

炭素・酸素原子核巨大共鳴 状態からの γ 線生成実験結果

須藤 高志 M2 岡山大学

新学術 若手A班研究会

For RCNP E398 Collaboration

1. 検出が期待される超新星ニュートリノ数

超新星ニュートリノと原子核の中性カレント(NC)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

* 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

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

$$NC: \nu + {}^{16}\text{O} \rightarrow \nu + X + \gamma \quad \sim 700? \text{ ev.}$$

- KamLAND (CH)

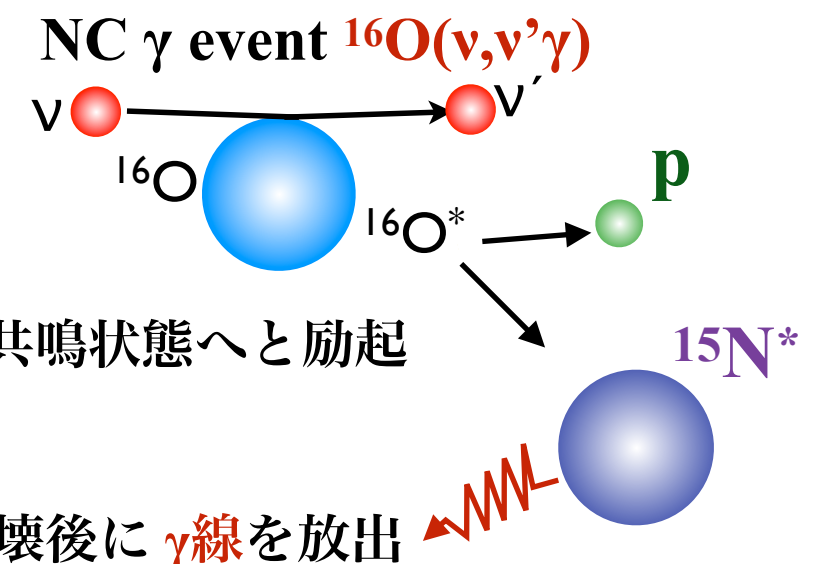
Ref. A. Suzuki, Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.) 77(1999) 171-176

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

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

$$NC: \nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + X + \gamma \quad \sim ? \text{ ev.}$$

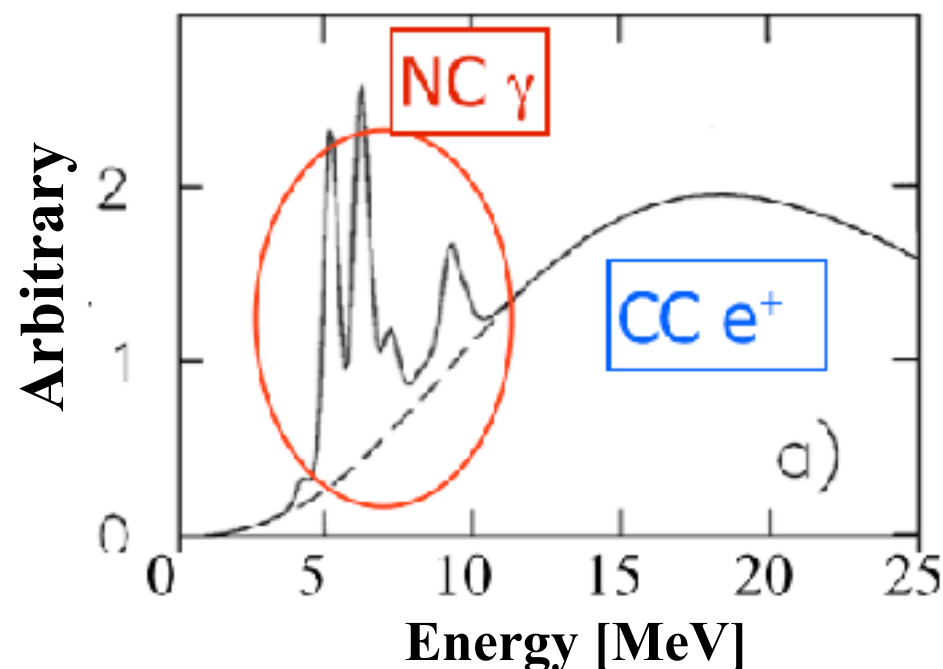
* SN 1987A



1. 中性カレント(NC)反応の重要性

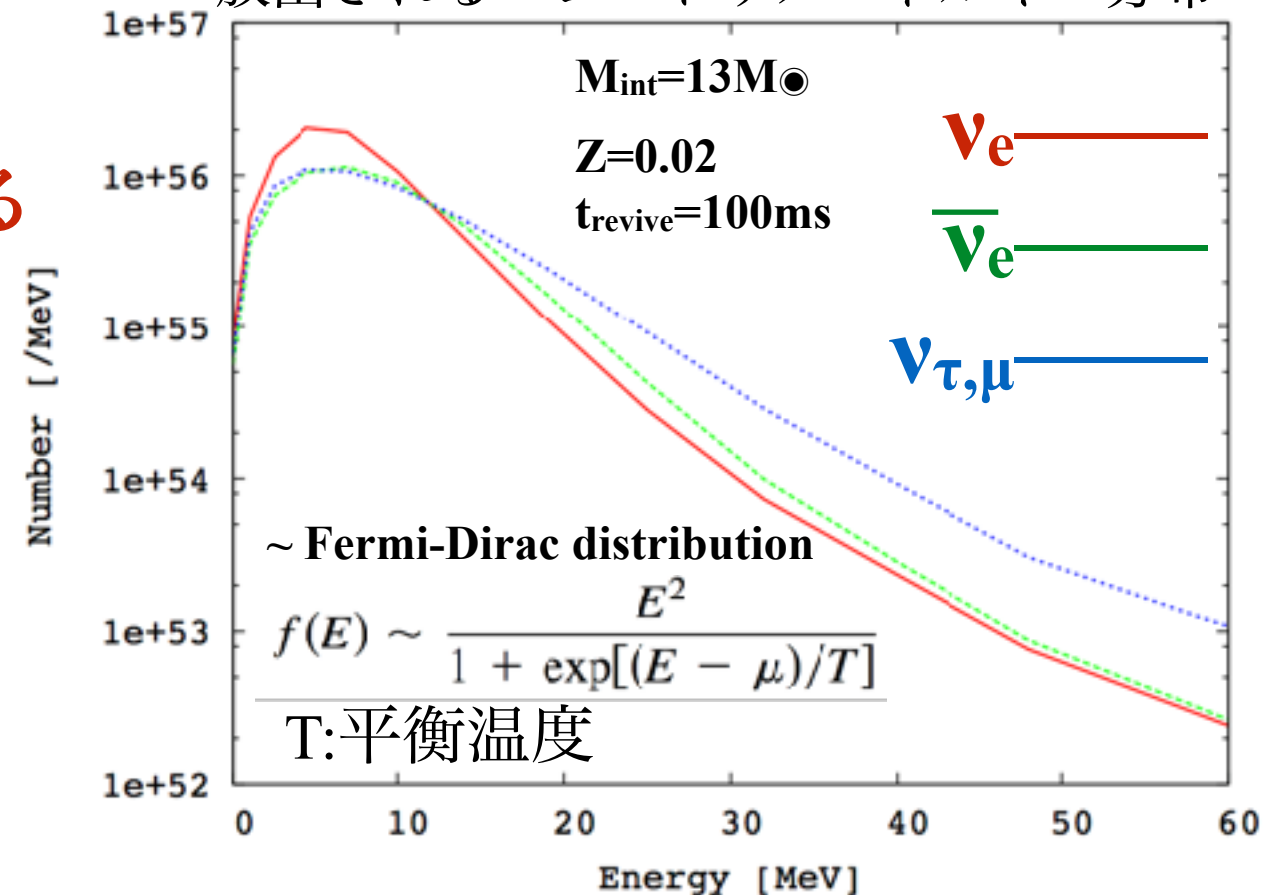
- 2番目に多い信号
- μ, τ -type の信号はNCが主
→ $T_{\nu\mu}, T_{\nu\tau}$ (平衡温度)に関する情報
- neutrino oscillation 解析にも有用である

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).

超新星爆発シミュレーション
放出されるニュートリノエネルギー分布



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

Data from <http://asphwww.ph.noda.tus.ac.jp/snn/>

酸素や炭素原子核巨大共鳴状態からの γ 線は測定されたことがない
→ γ 線放出率(P_r)とそのエネルギーの測定を行う必要がある。

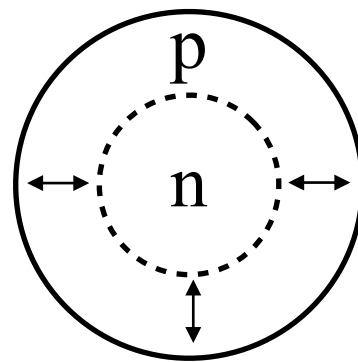
1. 巨大共鳴状態(Giant Resonance)

- 核子(陽子や中性子)による集団的運動モード
- エネルギー幅(ΔE)が大きい、反応率が高い
- 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

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

GMR



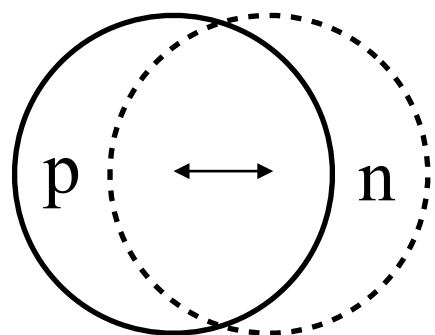
ΔL : 角運動量の変化

ΔT : アイソスピンの変化

ΔS : スピンの変化

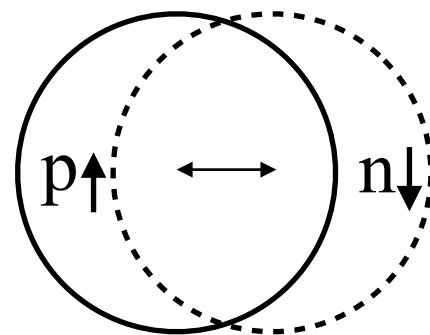
$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=0$$

Giant Dipole Resonance

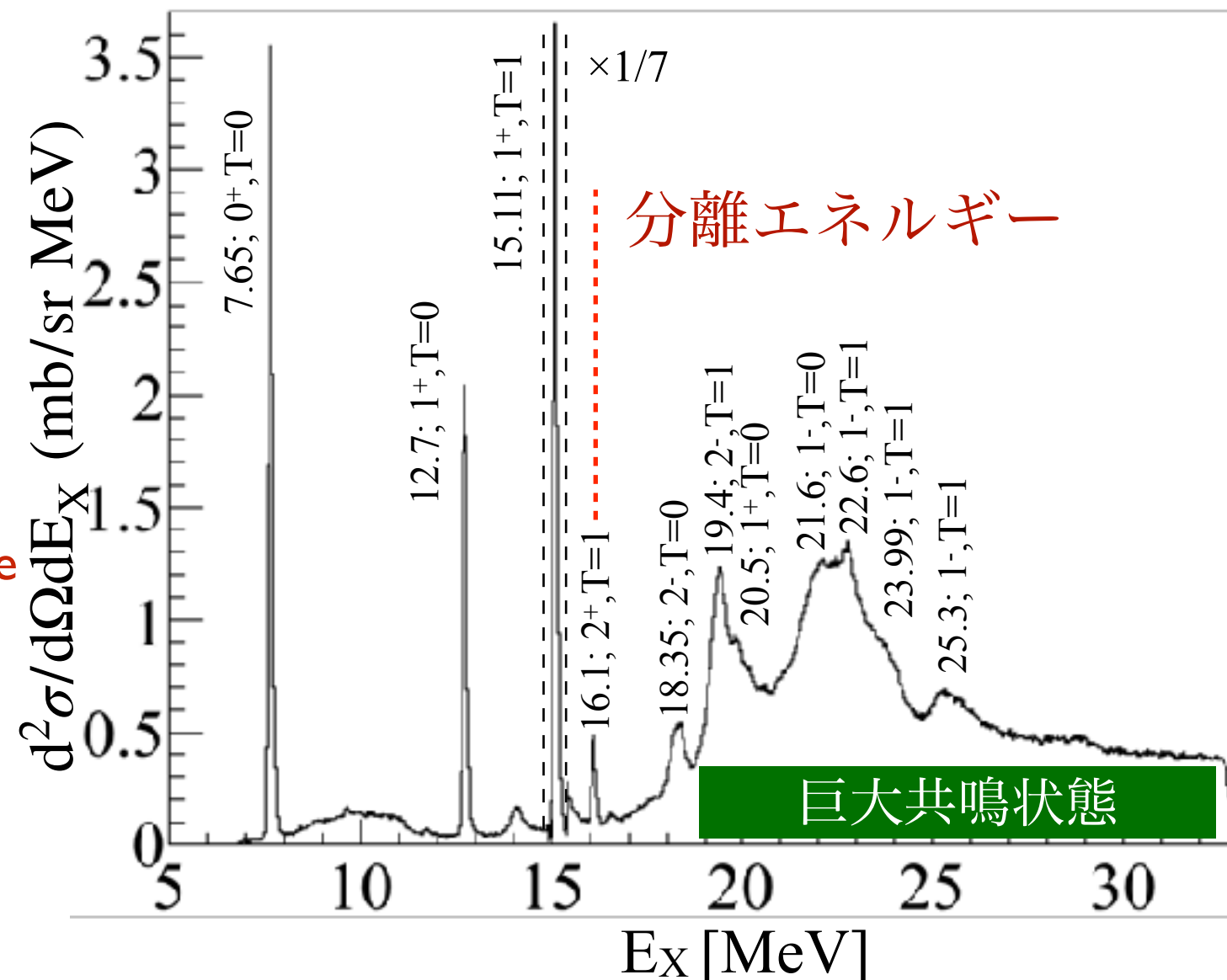


$$\Delta L=1, \Delta T=1, \Delta S=1$$

Spin Dipole Resonance



^{12}C の励起スペクトル



1. ニュートリノと原子核の反応

酸素や炭素原子核とニュートリノの反応断面積は理論計算されている

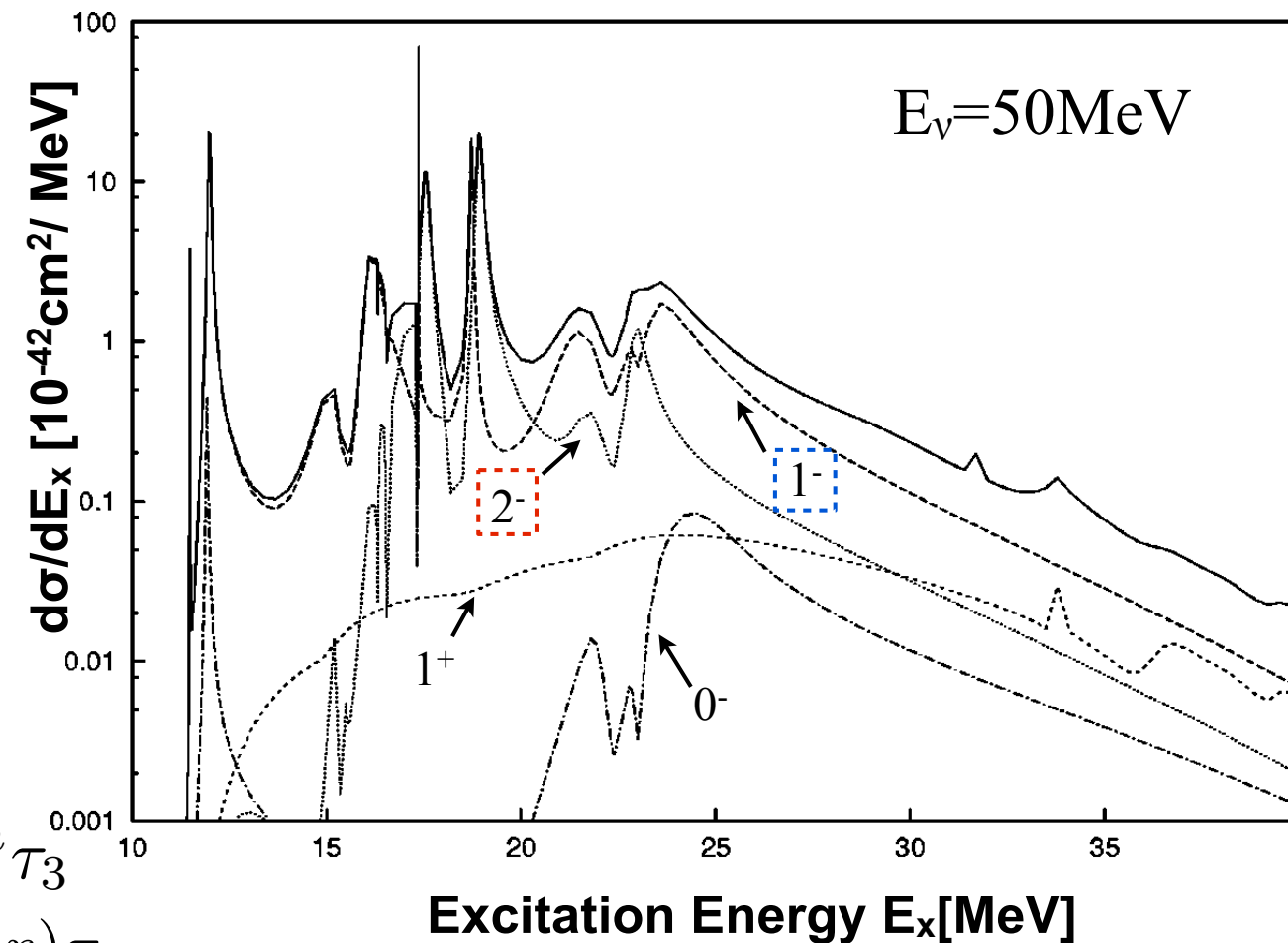


$^{16}\text{O}(\nu, \nu')$ Cross Section (理論計算)

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

特に $J^\pi=2^-(\Delta T=1), 1^-(\Delta T=1)$ 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
炭素の場合は $J^\pi=1^+(\Delta T=1)$ も



巨大共鳴状態の分類

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

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

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

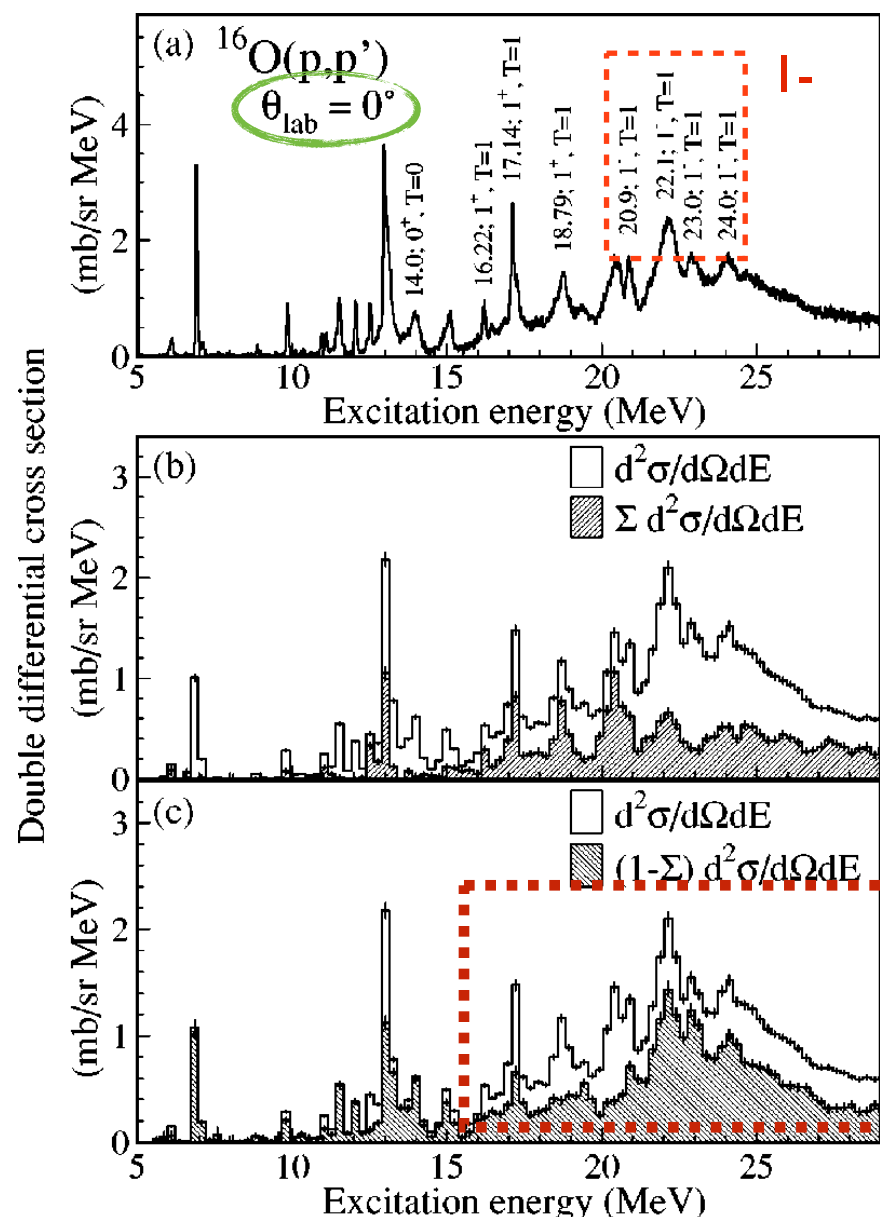
ニュートリノと酸素原子核の反応では $J^\pi=2^-, 1^-$ への励起が支配的
(^{12}C では $1^+, \Delta T=1, 15.1\text{MeV}$ も)

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

陽子(電磁気力or核力)による原子核巨大共鳴状態への励起

→ $^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}$ を1-や2-(ニュートリノによる励起と同じ)へ (p,p') で励起する

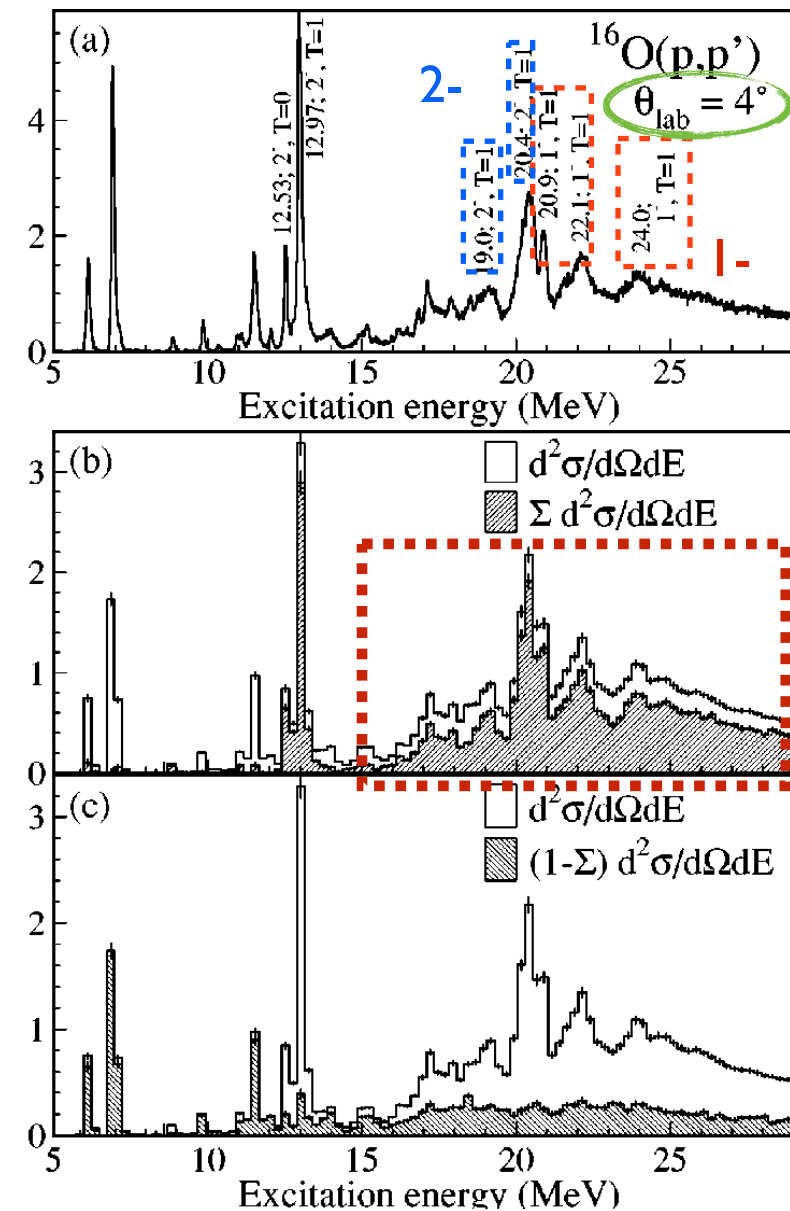
Cross Section of $^{16}\text{O}(p,p')$ ($E_p=400\text{MeV}$) Ref.Kawabata et al.,PRC65('02)064316



Total

$\Delta S=1$

$\Delta S=0$



0° : GDRが支配的($\Delta L=1, \Delta S=0, \Delta T=1$)

4° : SDR が支配的($\Delta L=1, \Delta S=1, \Delta T=1$)

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 : $E_p=392\text{MeV}$, $I_p=0.5\sim1.5\text{nA}$

* 標的: natC (36.3 mg/cm^2)

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

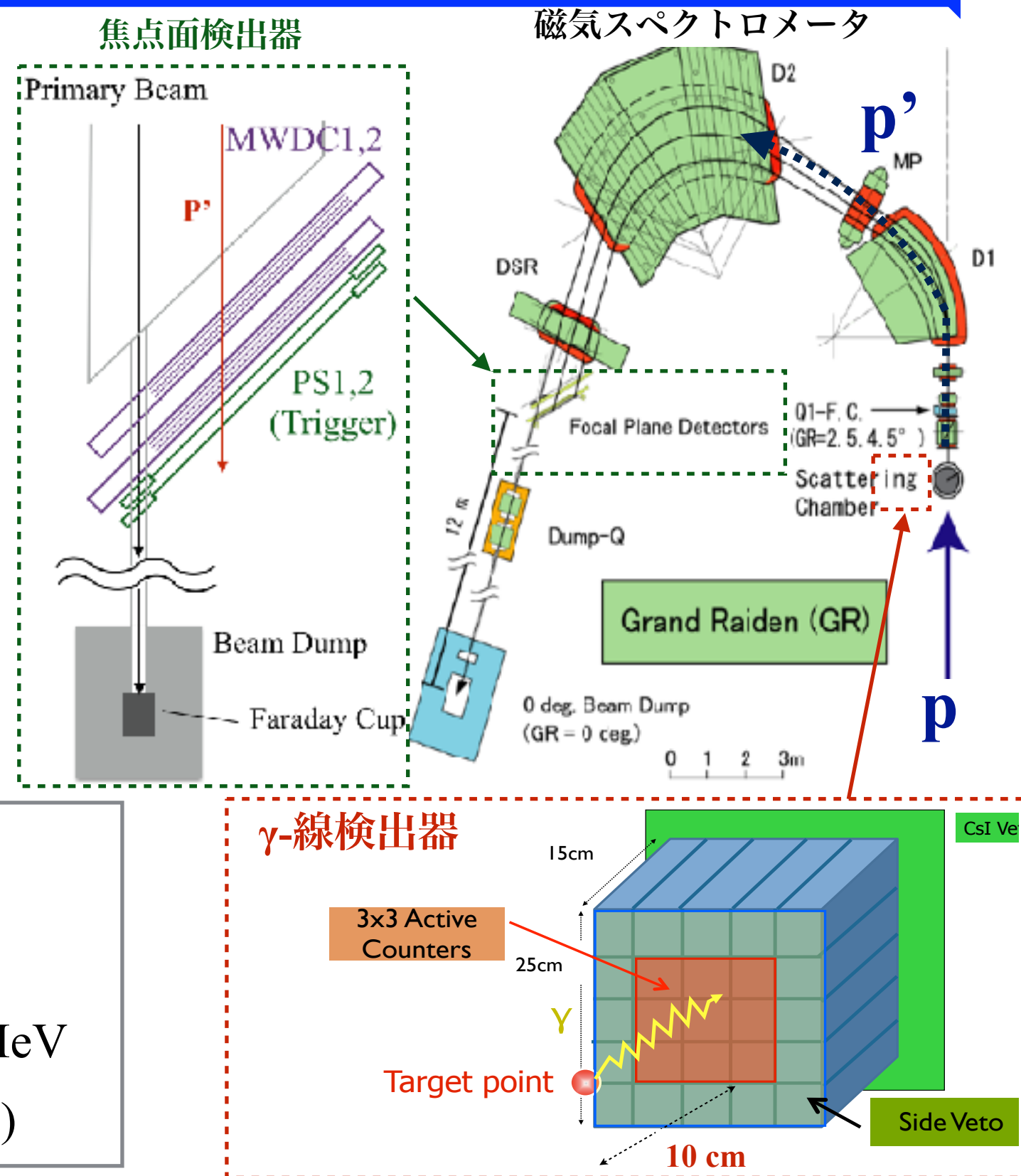
* 磁気スペクトロメータ“Grand Raiden”

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

γ 線のエネルギー

* γ 線検出器 : NaI(Tl) $\times 25$

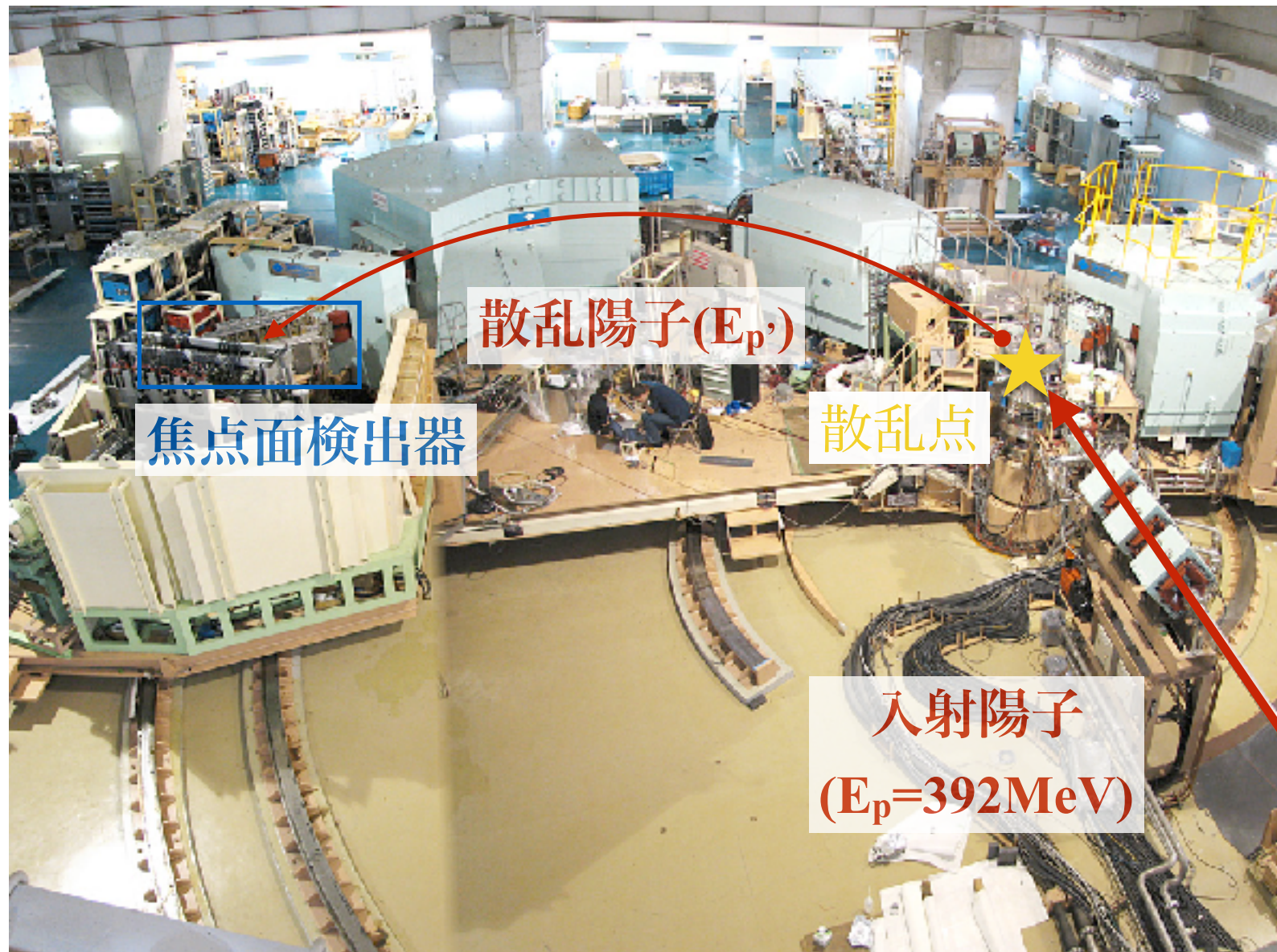
- γ 線 1.5MeV 以上で測定可能
- エネルギー分解能 $\sim 2.7\%$ @ 15.11MeV
- 前面: Plastic Scintillator Veto (3mm厚)



3. 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

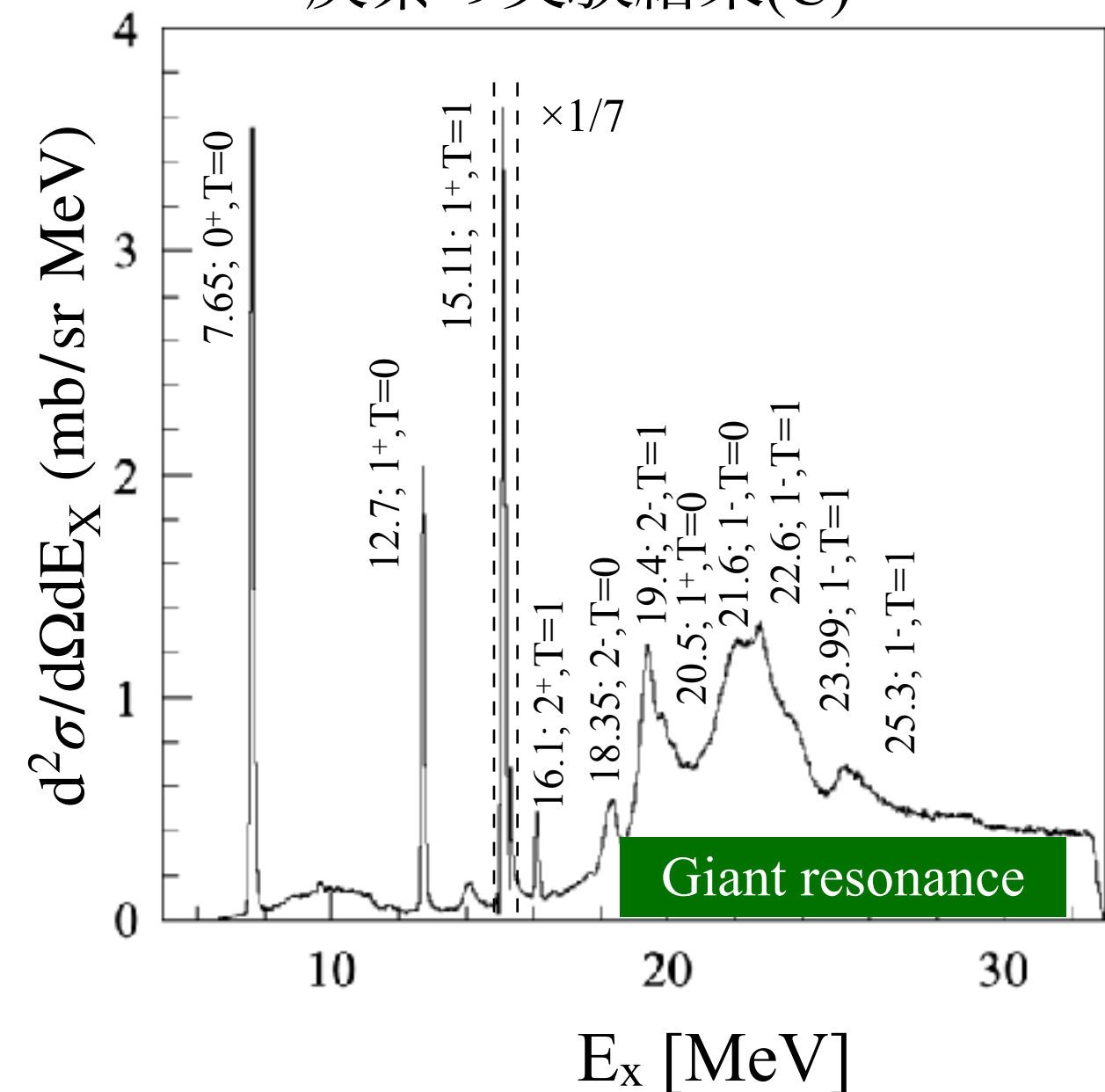
$$\rightarrow E_x = 392\text{MeV} - E_{p'}$$

3. スペクトロメータの解析：励起エネルギー

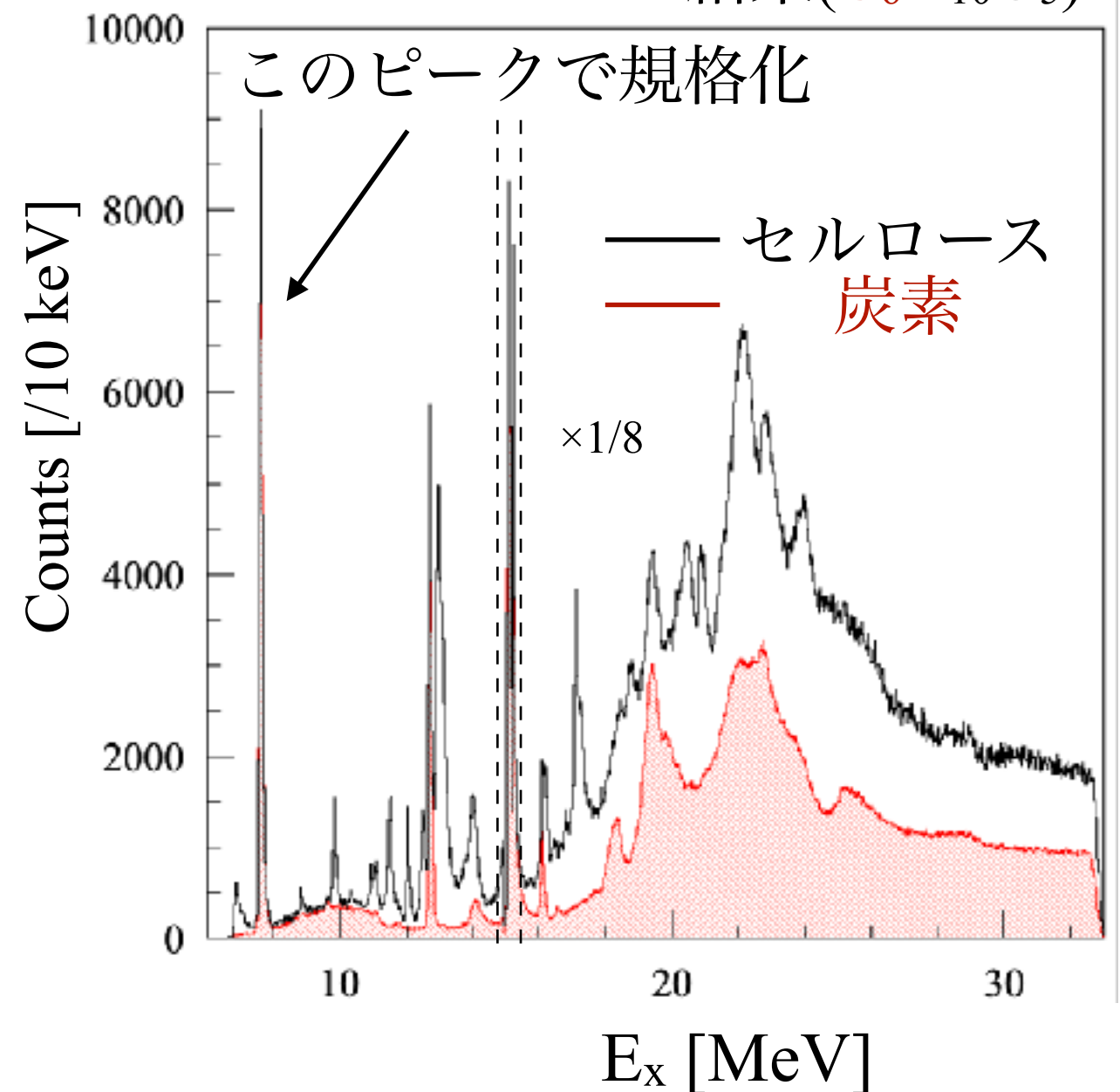
横方向の位置情報から陽子の運動量を計算 → 原子核に与えられた励起エネルギー(E_x)が求まる
セルロースから炭素由来のイベントで規格化し寄与を引き算する

文献値と各ピークは40keV以内でよく合っている

炭素の実験結果(C)



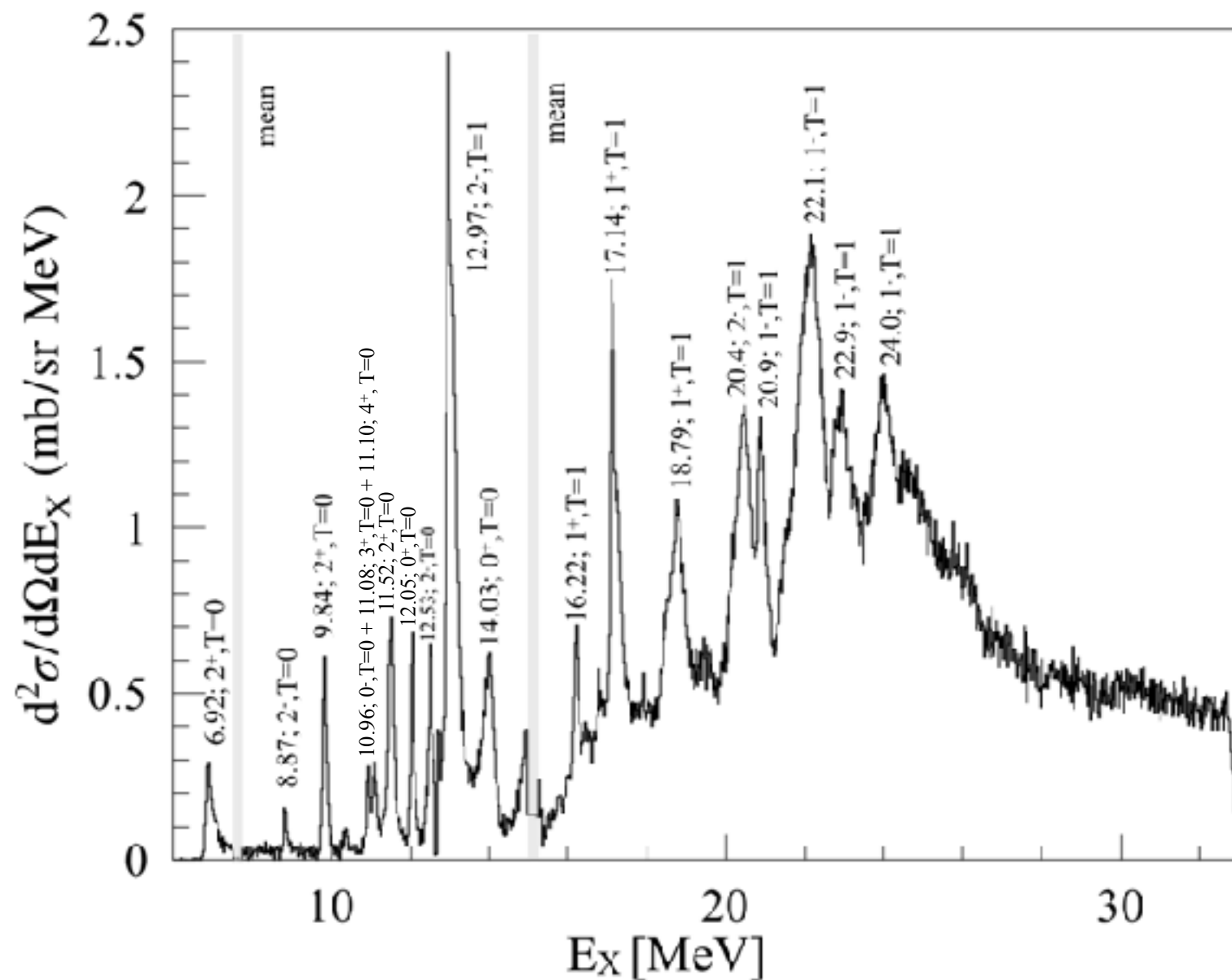
セルロースの結果($C_6H_{10}O_5$)



3. スペクトロメータの解析： ^{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る

$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ データから ^{12}C の寄与を引いたもの



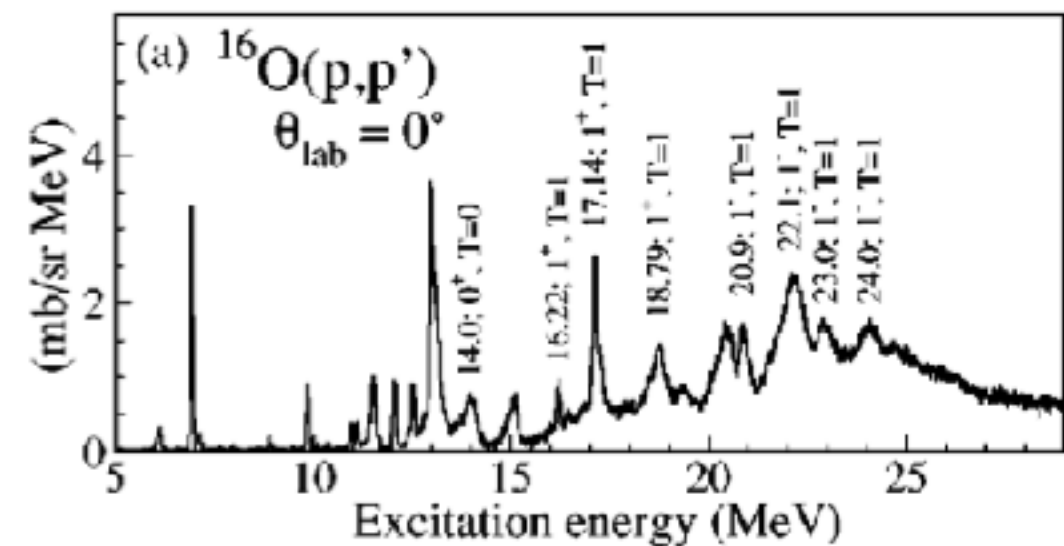
引き算係数の決定方法

- 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

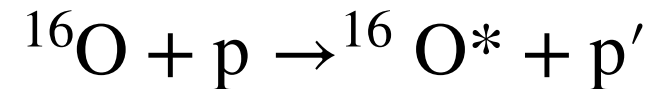
取得されたデータと比較



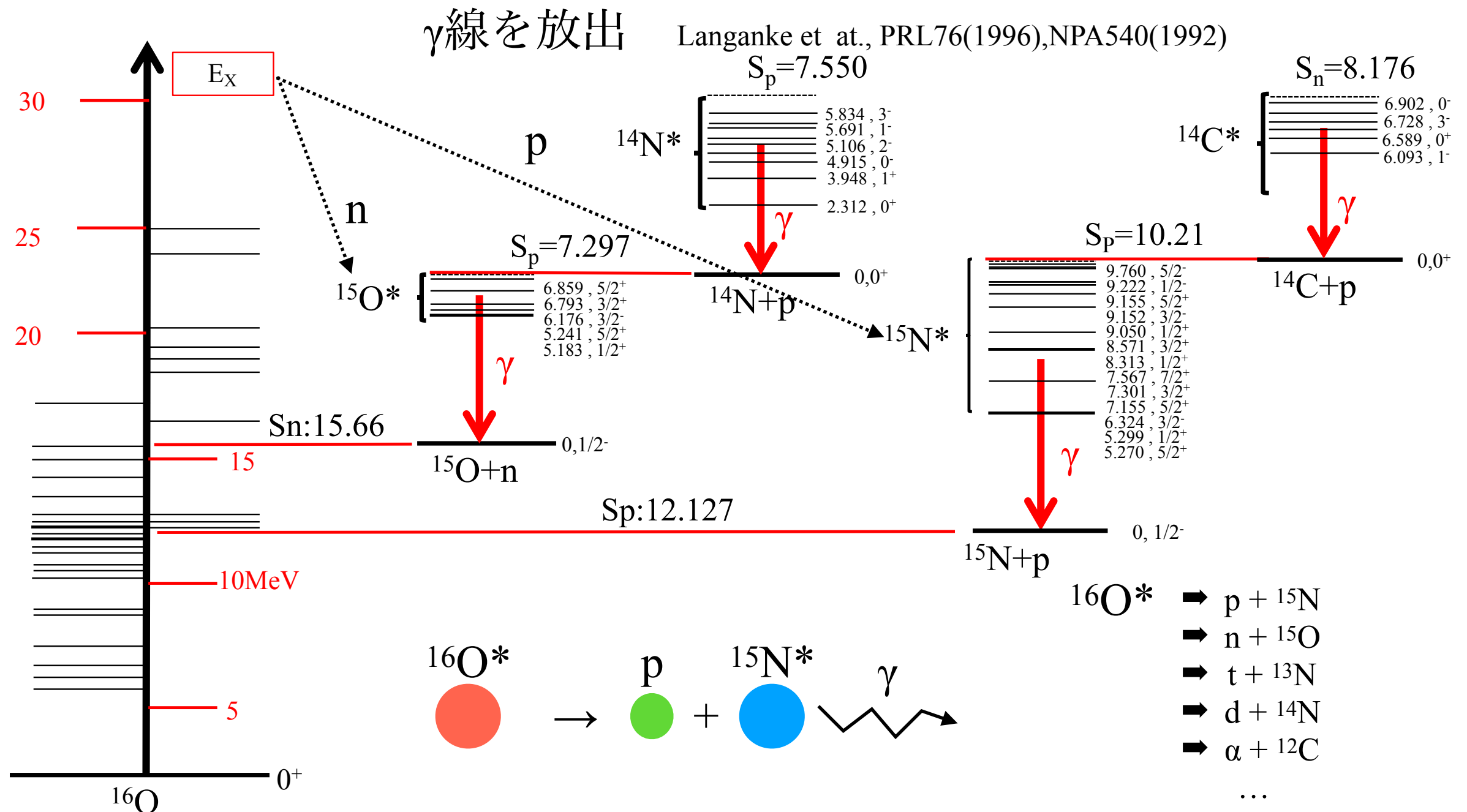
Taken from **Ref. T. Kawabata**
PHYSICAL REVIEW C, VOLUME 65, 064316
(2002)

3. 巨大共鳴状態からの γ 線放出(酸素の場合)

^{16}O を392MeVの陽子ビームで巨大共鳴状態に励起

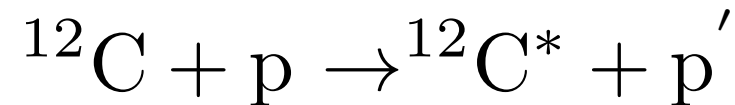


主な崩壊の理論予想：陽子や中性子を放出して娘核の励起状態へと遷移し



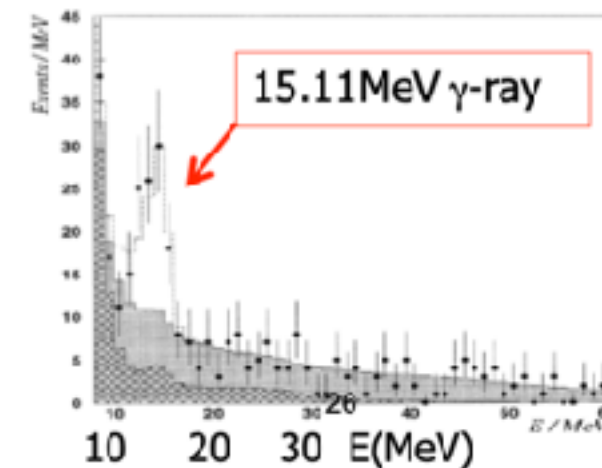
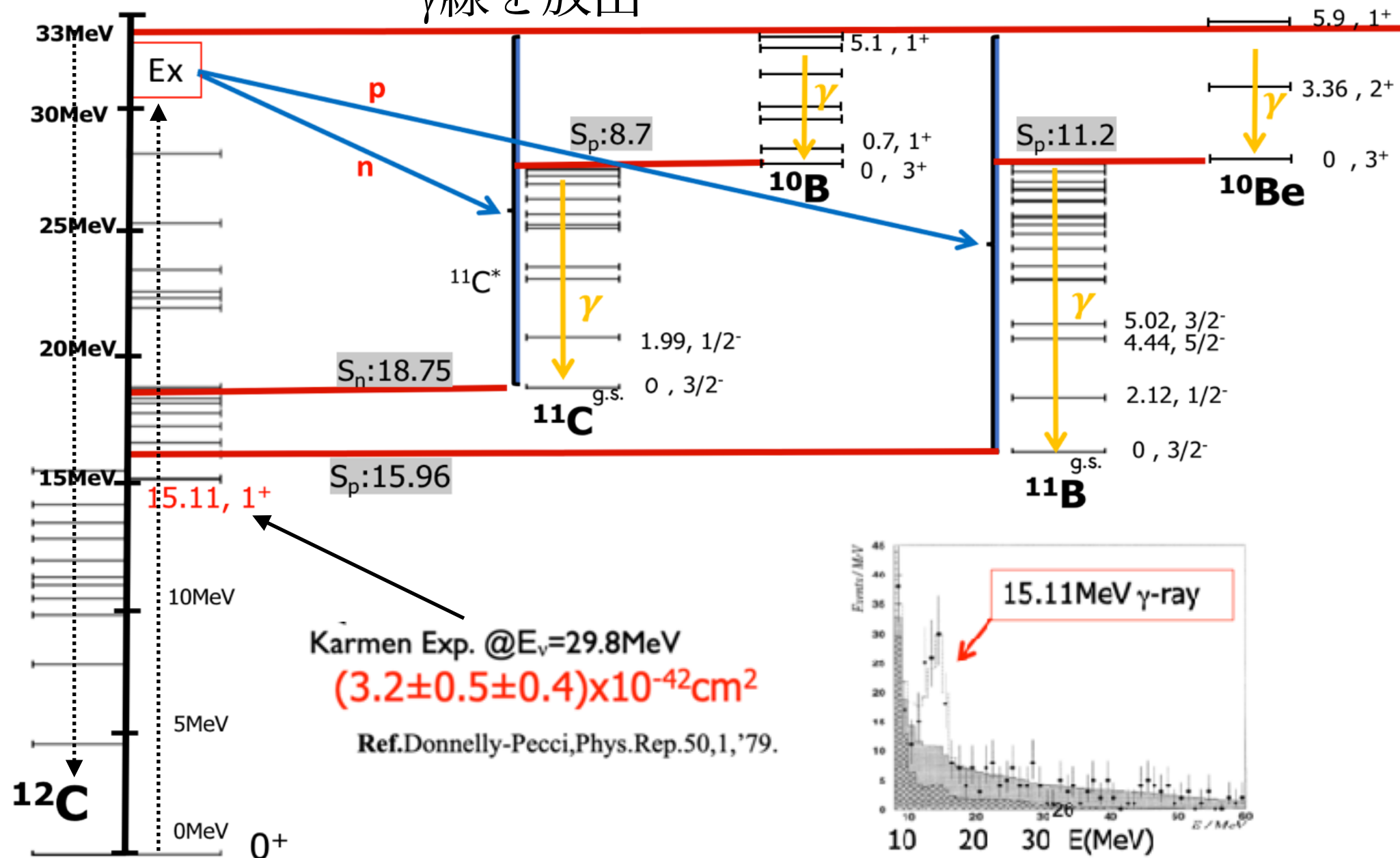
3. 巨大共鳴状態からの γ 線放出(炭素の場合)

^{12}C や ^{16}O を392MeVの陽子ビームで巨大共鳴状態に励起



主な崩壊の理論予想：陽子や中性子を放出して娘核の励起状態へと遷移し

γ 線を放出 Langanke et al., PRL76(1996),NPA540(1992)

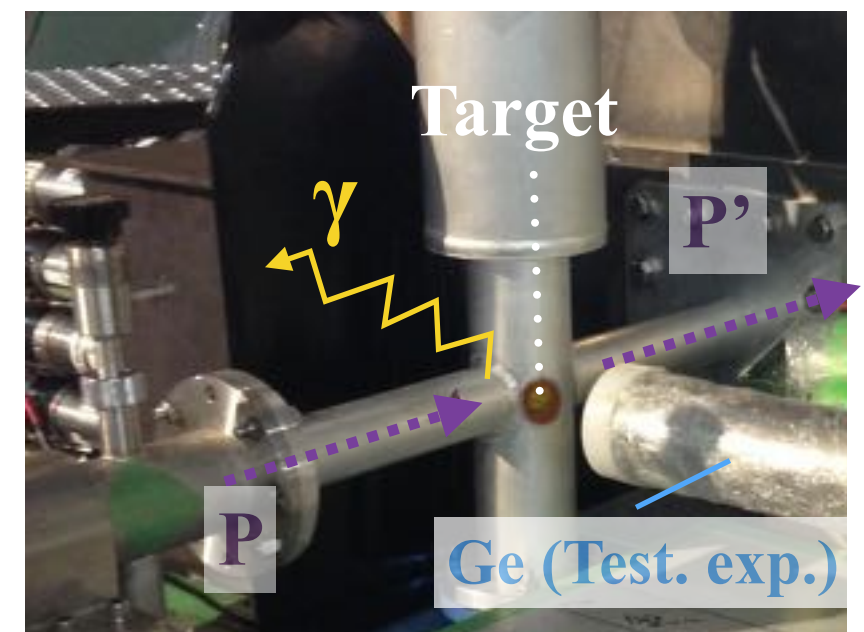


4. γ 線検出器解析

1. 磁気スペクトロメータとの同期
2. バックグラウンドの引き算
3. 検出器シミュレーション
4. 既知の励起状態から放出される γ 線

Plastic Scintillator
Particle Veto (3mm)

NaI Array



4.1&2.磁気スペクトロメータとの同期&バックグラウンド除去

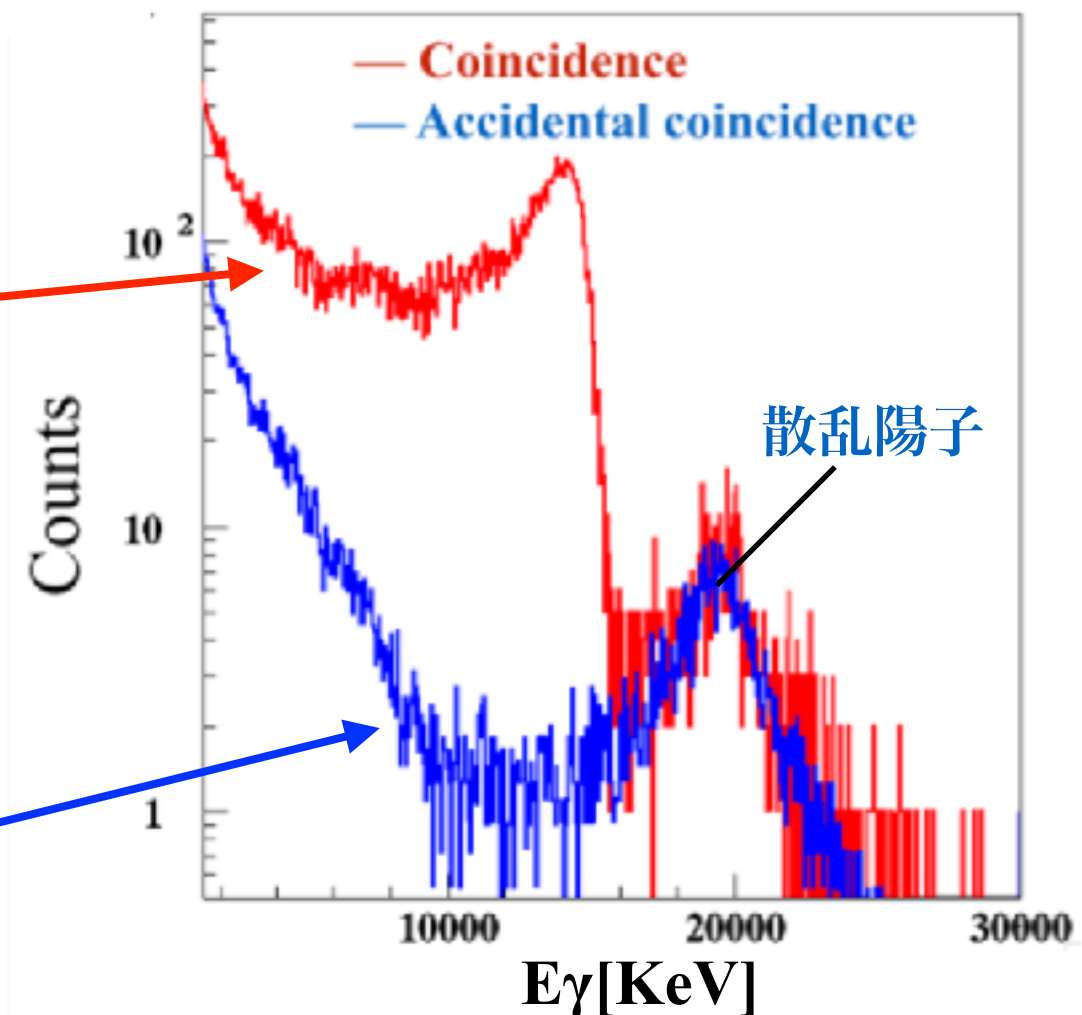
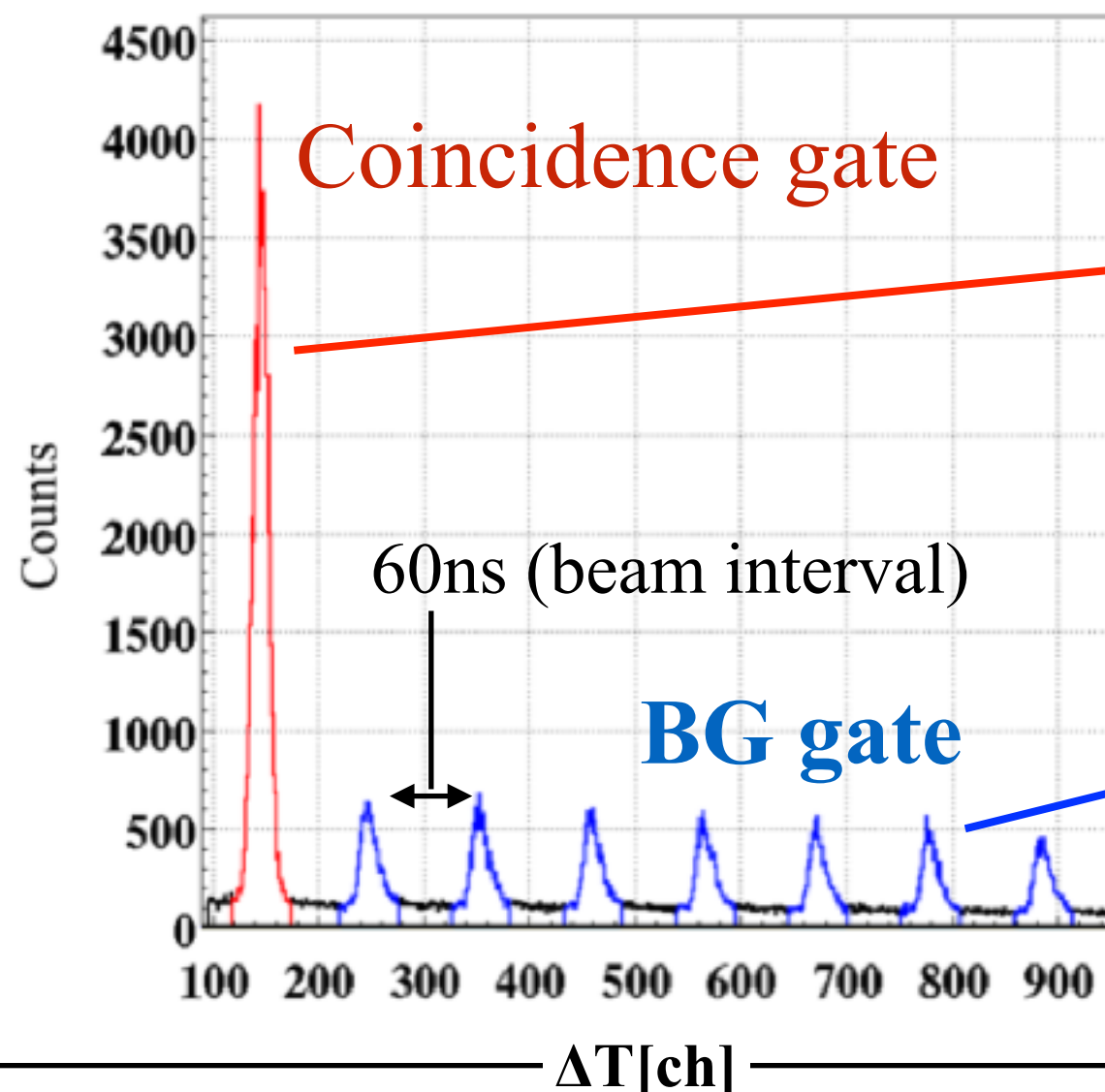
- γ 線検出器の時間情報からスペクトロメータとの同期事象 (**Coincidence gate**)を取り出した。
- 偶発的同期事象(**BG gate**)は同期事象にも含まれている→引き算が必要

$$\Delta T = [\text{GR-trigger}] - [\gamma\text{-trigger}]$$

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

4.3. γ 線検出器シミュレーション

Geant4を使用して γ 線検出器部分を再現した。

周囲の物質も正確に再現

遮蔽物(鉛)

散乱層

γ 線検出器

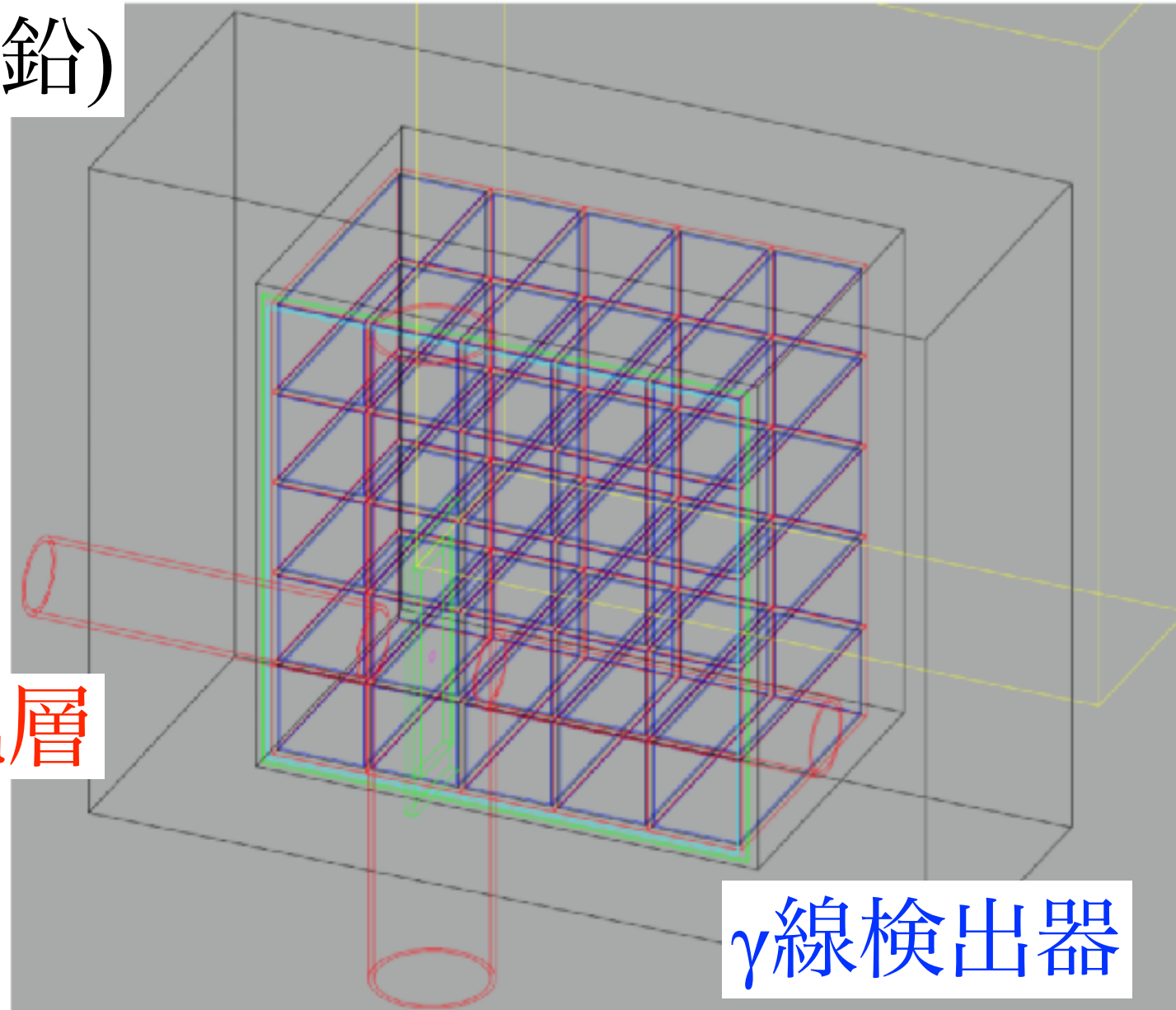


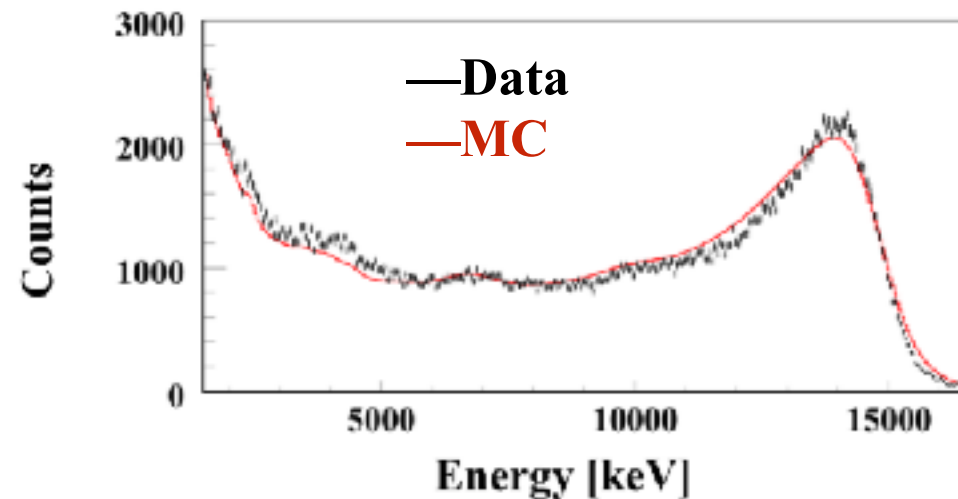
Figure 3.23: Geometrical setup in the simulation. Colors and material : blue = NaI, red = aluminum, black = lead, green = SUS, purple = target, light blue = plastic, yellow = CsI.

4.4.既知の励起状態から放出される γ 線スペクトル

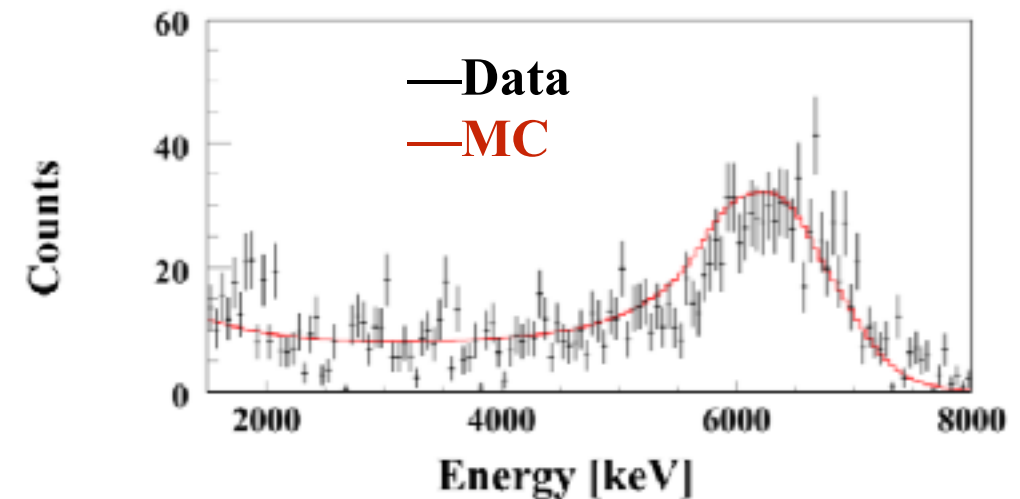
実験中の γ 線検出器の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ をよく理解することができた

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

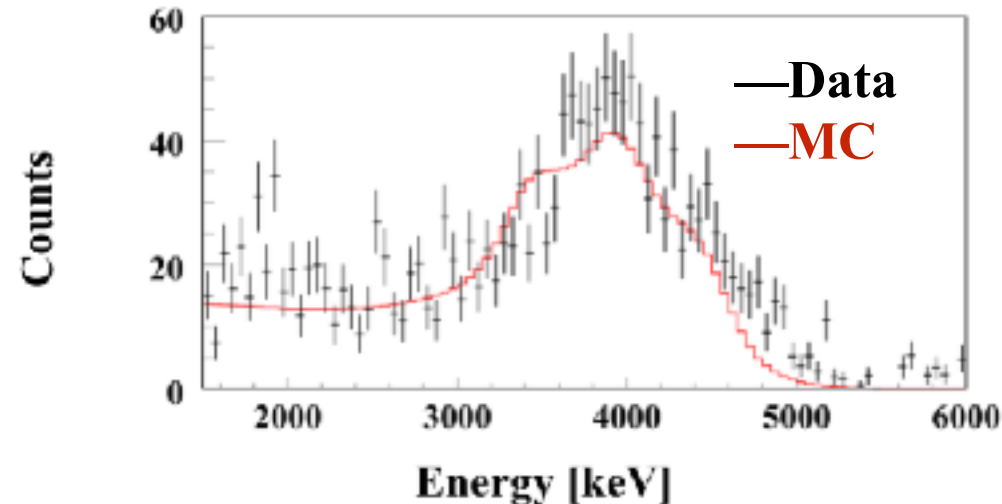
^{12}C , 1^+ , $E_x=15.1\text{MeV}$, $E_\gamma=15.1\text{MeV}$ and cascade



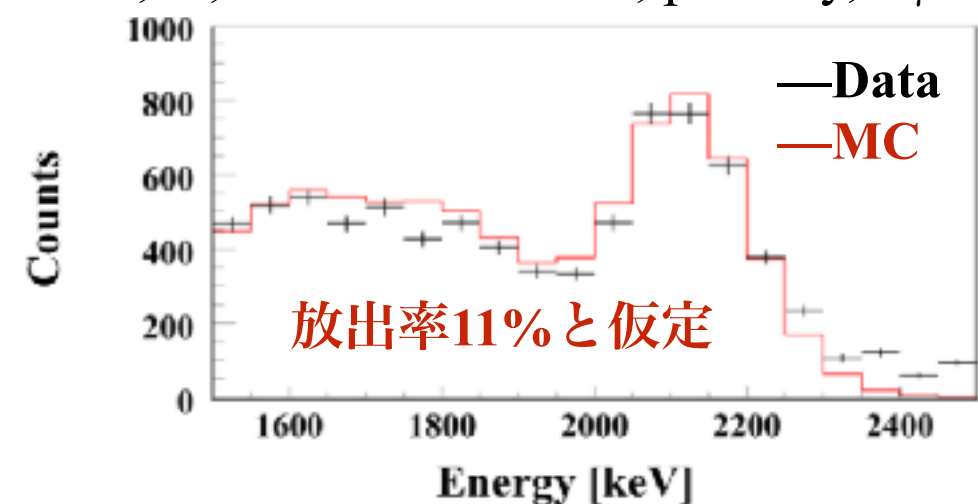
^{16}O , 2^+ , $E_x=6.9\text{MeV}$, $E_\gamma=6.9\text{MeV}$



^{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, $E_\gamma=2.12\text{MeV}$



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

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

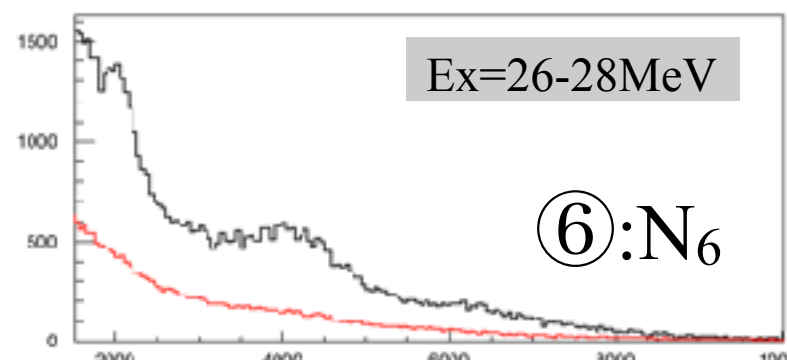
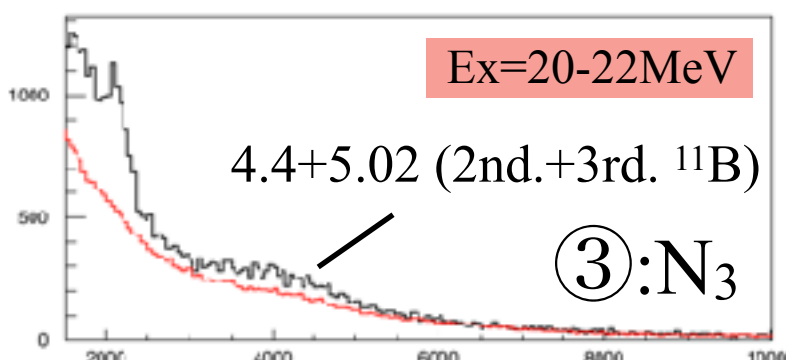
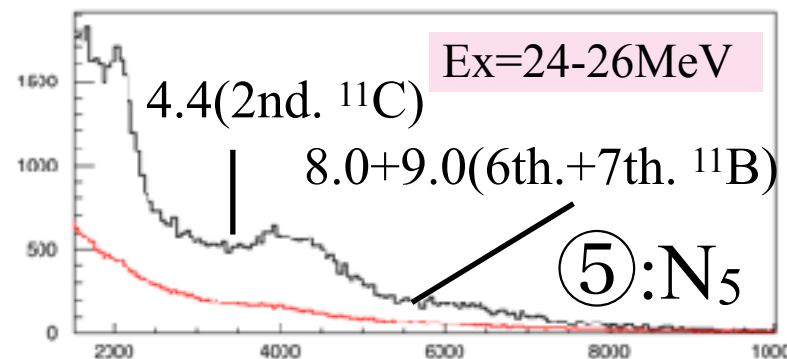
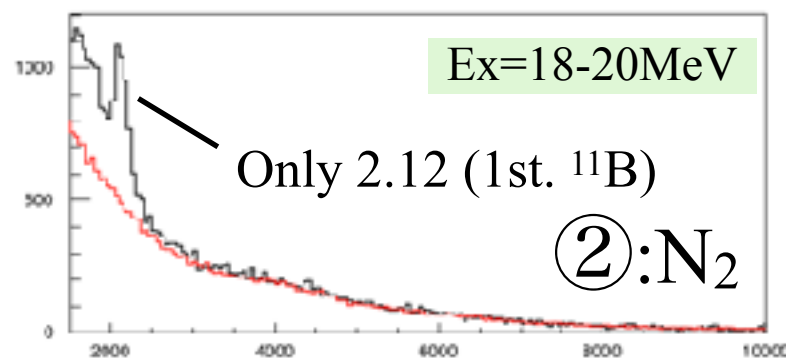
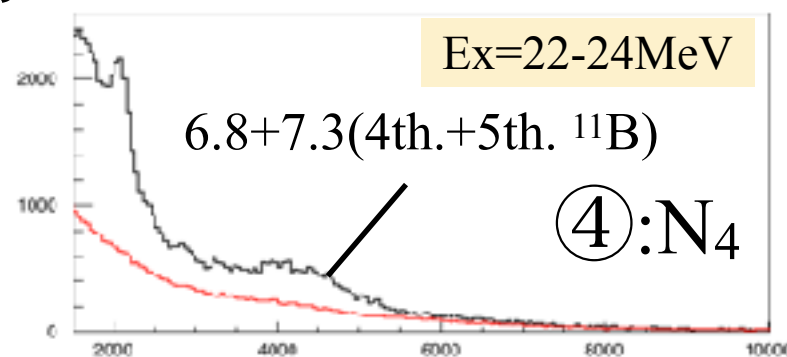
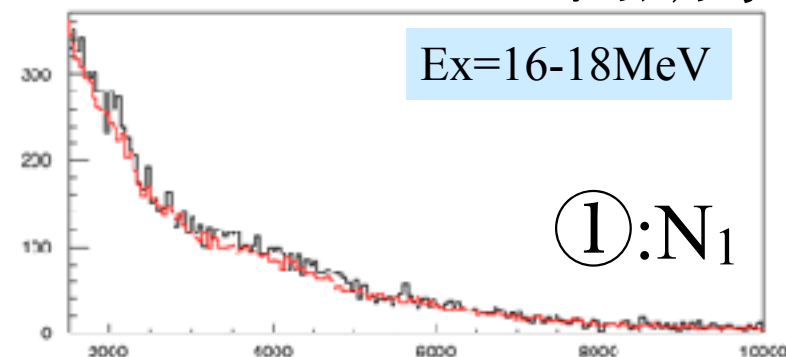
5. 巨大共鳴状態から放出される γ 線の特徴

理論予想(粒子崩壊による娘核の励起状態から γ 線が放出されること)が定量的に確認された。

励起エネルギー2MeV毎の γ 線スペクトラム

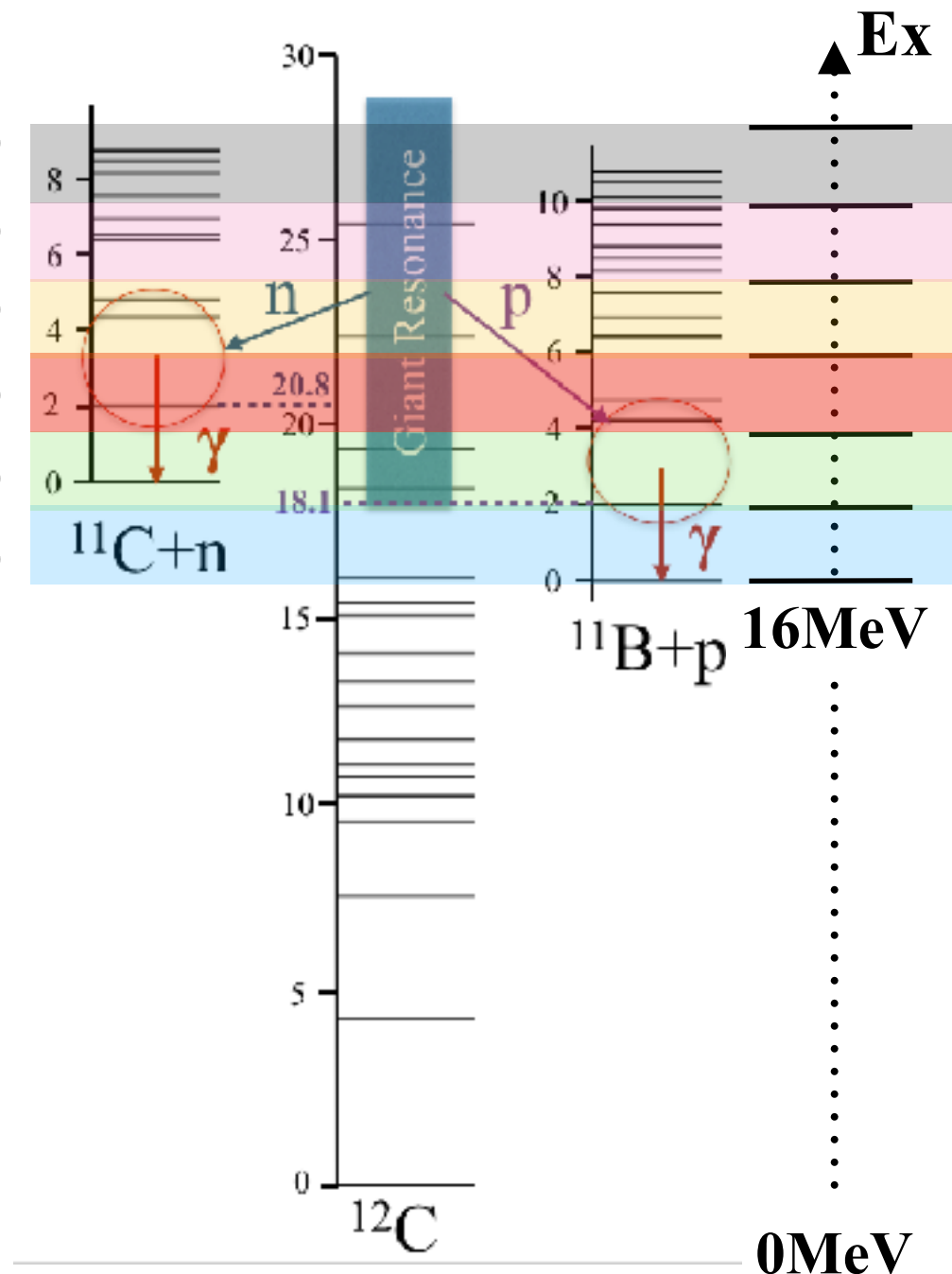
—同期事象 —B.G.

Counts



$E_{NaI}[\text{keV}]$

⑥
⑤
④
③
②
①

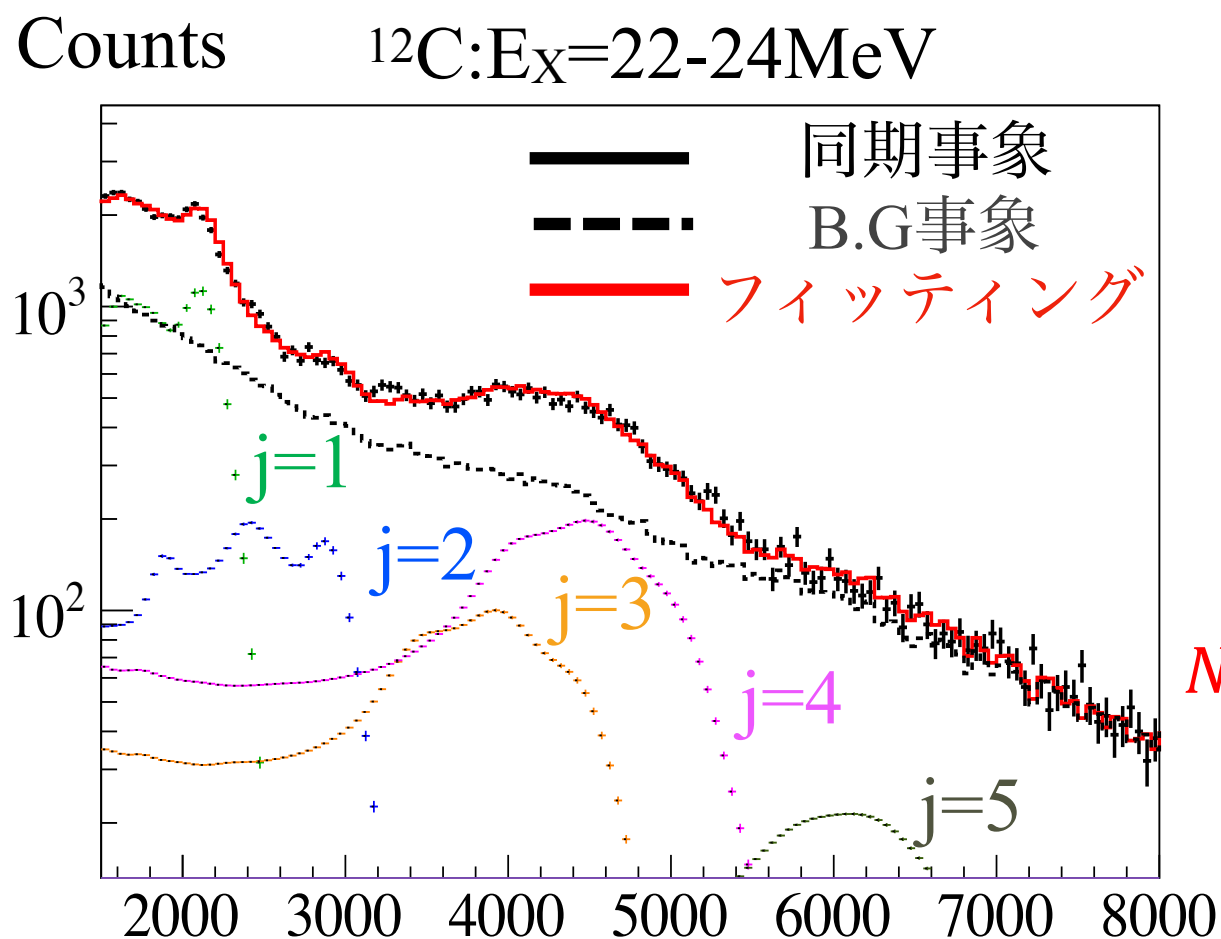


5. γ 線放出率の導出

γ 線放出率は応答関数 $P(E_\gamma, E)$ とB.Gスペクトルを用いたフィッティングで求める
 γ 線は娘核の主な候補を全て考慮。後に $T=0,1$ に分けるに重要

$$N_i(E_\gamma) = N_{\text{Ex}i} \sum_j Br_j P_j(E_\gamma, E) + \alpha N_{\text{bg}i}(E_\gamma) \left\{ \begin{array}{l} N_{\text{Ex}i} \text{ 励起数} \\ \gamma \text{線分岐比} \\ Br_j \text{ } j^{\text{th}} \gamma\text{-ray (パラメータ)} \end{array} \right. \text{B.Gイベント}$$

フィッティングの結果



γ 線の放出率は各 γ 線の放出率の合計

$$\frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma}(E_x) = \sum_j Br_j(E_x)$$

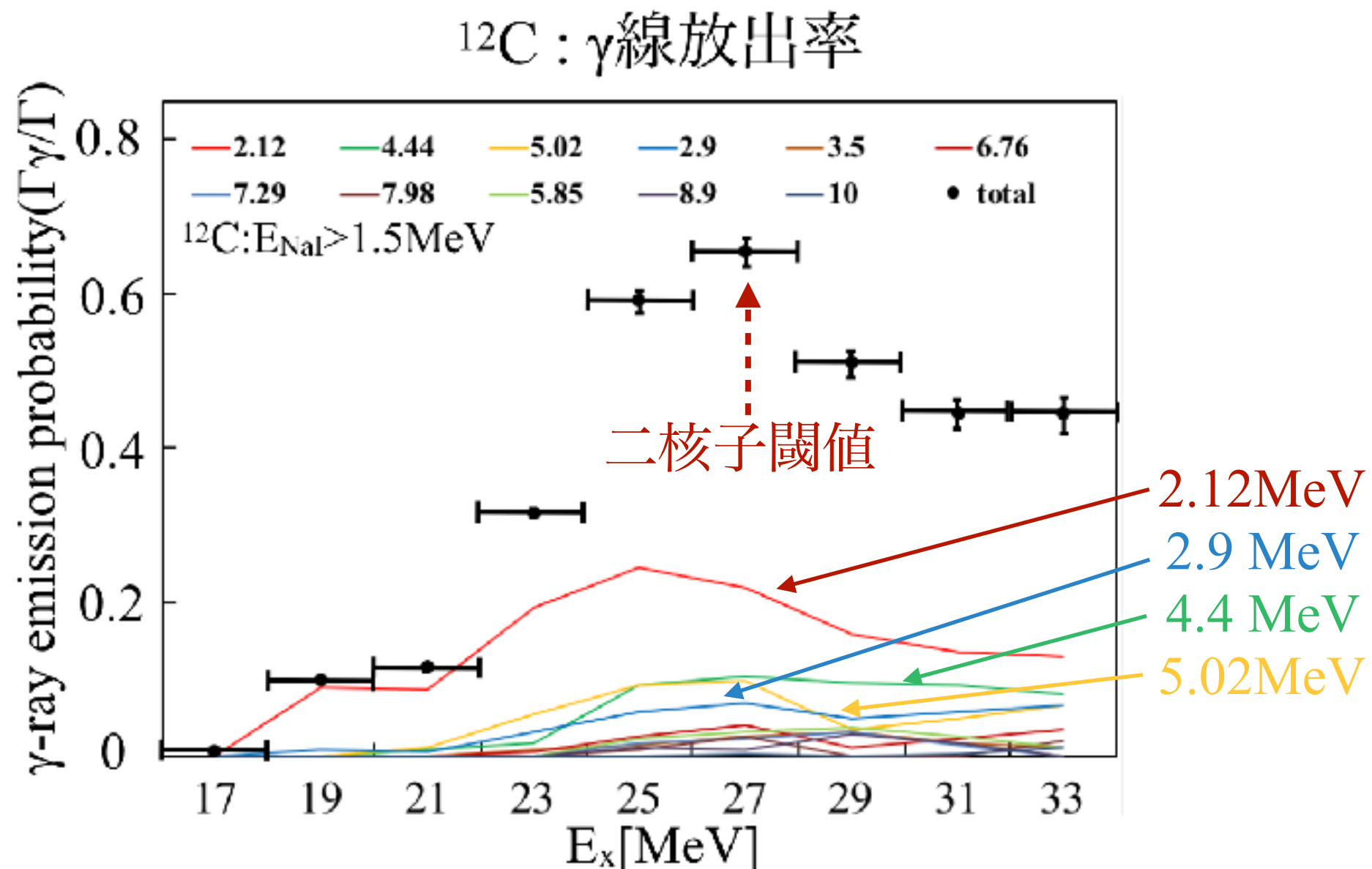
$j =$	1	2	3	4	5
$E_\gamma \text{ (MeV)} \rightarrow$	2.12	2.9	4.44	5.0	6.3

$$N_{\text{coin}}(E_\gamma) = N_{\text{Ex}} (Br_1 P_1 + Br_2 P_2 + Br_3 P_3 + Br_4 P_4 + Br_5 P_5) + \alpha N_{\text{bg}}$$

この過程を全ての励起エネルギーに適用した
 $E_{\text{NaI}}[\text{keV}]$

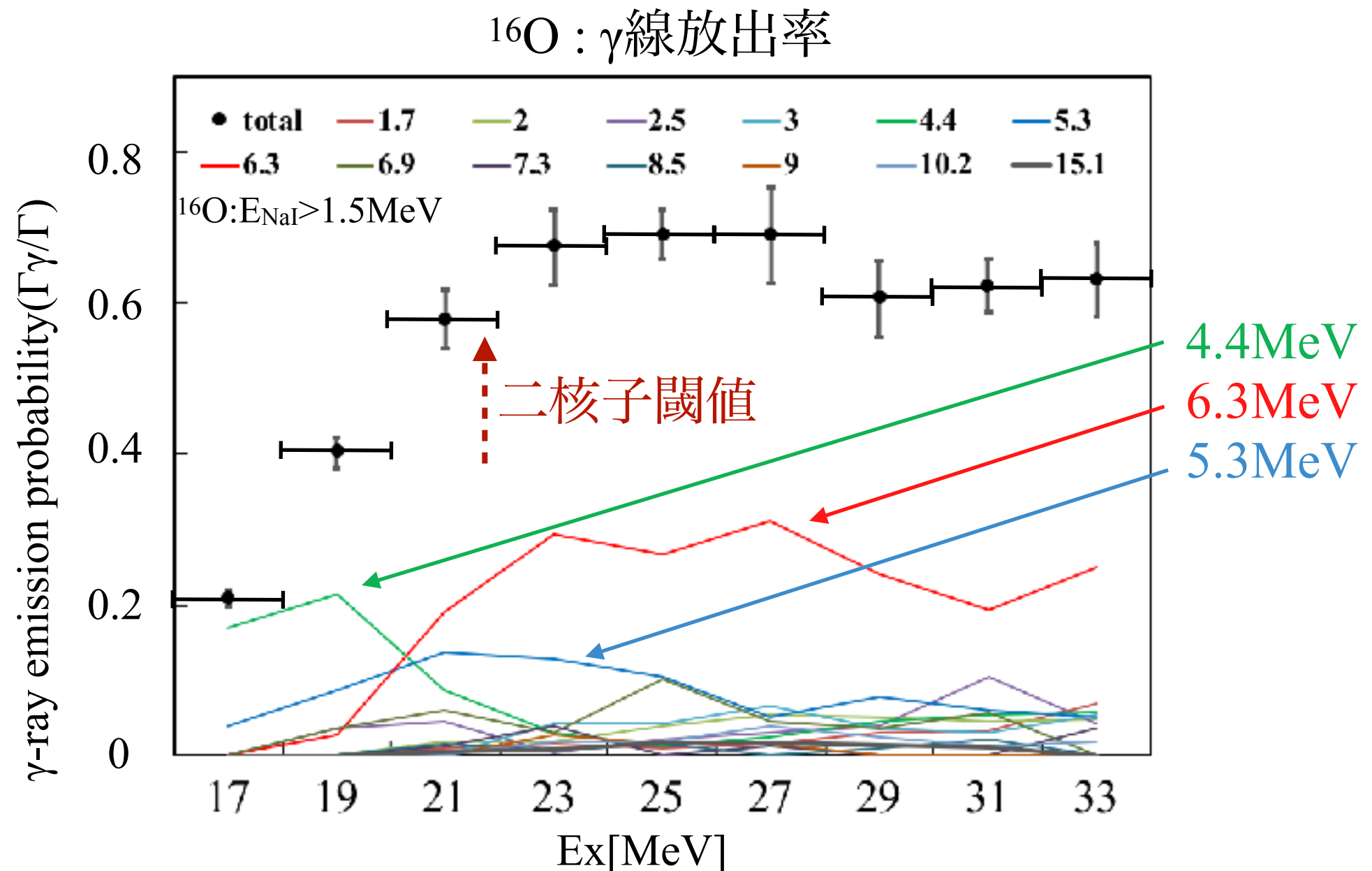
5. 励起エネルギー毎の γ 線放出率 ^{12}C

- γ 放出率 $\text{Br}(E_x \rightarrow \text{全ての}\gamma\text{線とその合計})$ を励起エネルギーの関数として求めたのは初めて、全ての γ 線 $E_\gamma > 1.5\text{MeV}$ (NaIの閾値) を考慮した。
- γ 線放出率 $\text{Br}(E_x, \gamma)$ は $E_x < 27\text{MeV}$ (二核子閾値) までは $\text{Br}(E_x, \gamma)$ が上昇(0.65)その後減少する



5. 励起エネルギー毎の γ 線放出率 ^{16}O

- 4.4MeVは α 崩壊($T=0$)後 ^{12}C (4.4MeV)、15.1MeVも同様
- γ 線放出率 $\text{Br}(E_x, \gamma)$ は $E_x < 22\text{MeV}$ (二核子閾値)まで $\text{Br}(E_x, \gamma)$ が上昇(0.7)しその後飽和する

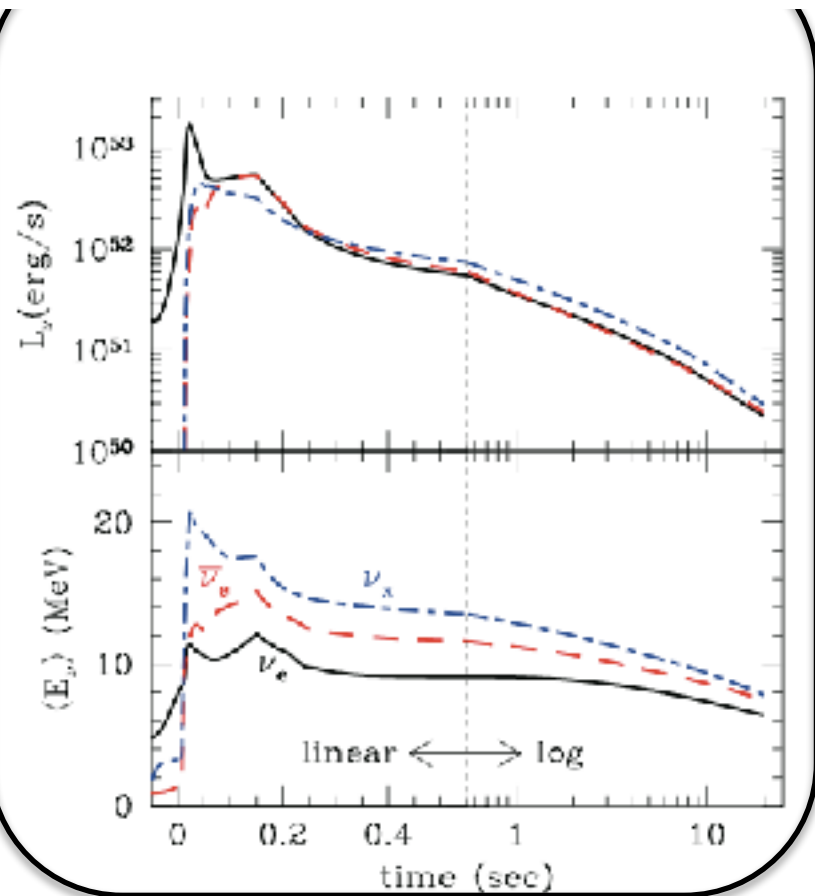


超新星NC- γ 事象の見積もり(予定)

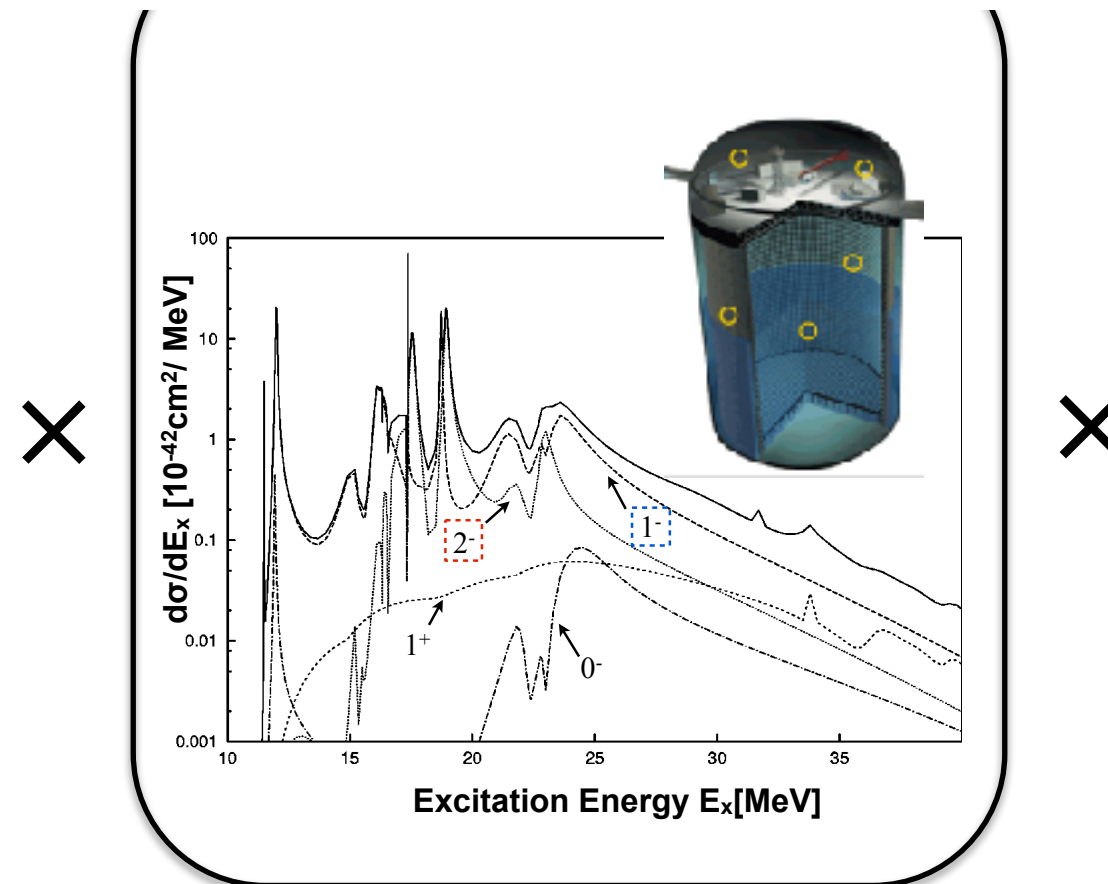
$$N = Flux(\nu_j) \times N_{target} \times \sigma_i \quad \sigma_{NC\gamma} = \int \frac{d\sigma_{NC}}{dE_x} \times \boxed{\frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma}(E_x)} dE_x$$

($i=CC, NC\gamma$)

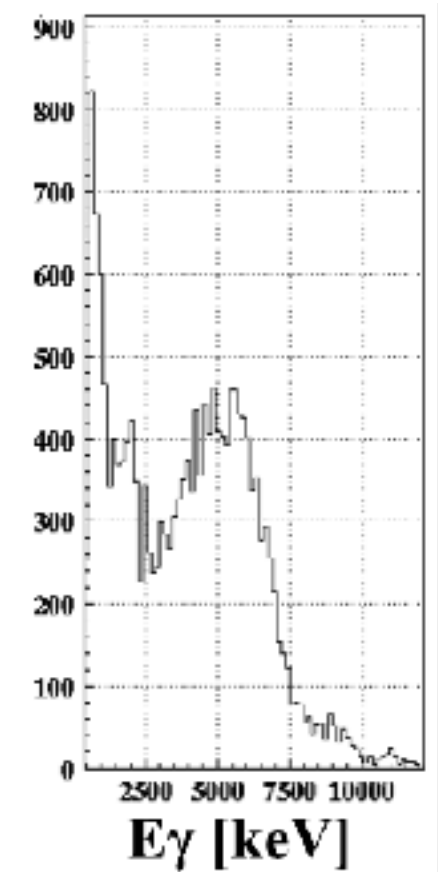
超新星爆発の
ニュートリノフラックス



SK内の ^{16}O をNC反応によって、
巨大共鳴状態へ励起する断面積



巨大共鳴から放出
される γ 線の放出率
我々の実験結果



その他：検出器の分解能, Threshold, 検出効率

ニュートリノ振動, 階層(NH or IH).....

まとめ

- 2014年の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 :

- 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。