

C01 関連解析@岡大

Gd(n, γ) reaction and C,O(p,p' γ) reaction

作田 誠 (岡山大学)@領域研究会5月22日

Outline

1. 濃縮Gd(^{155}Gd , ^{157}Gd) の熱中性子捕獲反応での γ 線生成

目的: SK-Gd や他のGdを使った実験へ、高統計・高精度の基礎データと γ 線生成モデルを提供。
意義: 熱中性子と濃縮Gdの系統的なエネルギー分布測定解析は無い。

2. 陽子炭素・酸素反応を使った炭素・酸素巨大共鳴からの γ 線放出率の測定

目的: 炭素・酸素巨大共鳴からの γ 線放出率は測定されていない。世界初の測定を目指す。
意義: 超新星爆発ニュートリノの検出では、IBDに次ぎ、2番目に大きい断面積をあたえると期待され、 ν_{μ} , ν_{τ} に感度あり。

C01 2016

理論: J3, P2,

実験: J3, P1, 理論・実験 国際発表 >20件、国内発表 >20

1. JPARC-MLF Experiment Gd(n, γ)

- 2014 B0124 -Enriched Gd (^{155}Gd , ^{157}Gd) targets

- 共同研究者 : K.Hagiwara, P.Das, T.Tanaka, Y.Yamada, I.Ou, T.Kayano, T.Mori, Y.Koshio, R.Dhir, S.Lorenz, W.Focillon, M.Sakuda (Okayama), T.Yano (Kobe), A.Kimura, H.Harada, N.Iwamoto, S.Nakamura (JAEA)

Experimental period : 2014/Dec/11-16

Target : Enriched Gd(A=155(91.65%),157(88.4%)), Gd_2O_3 Powder

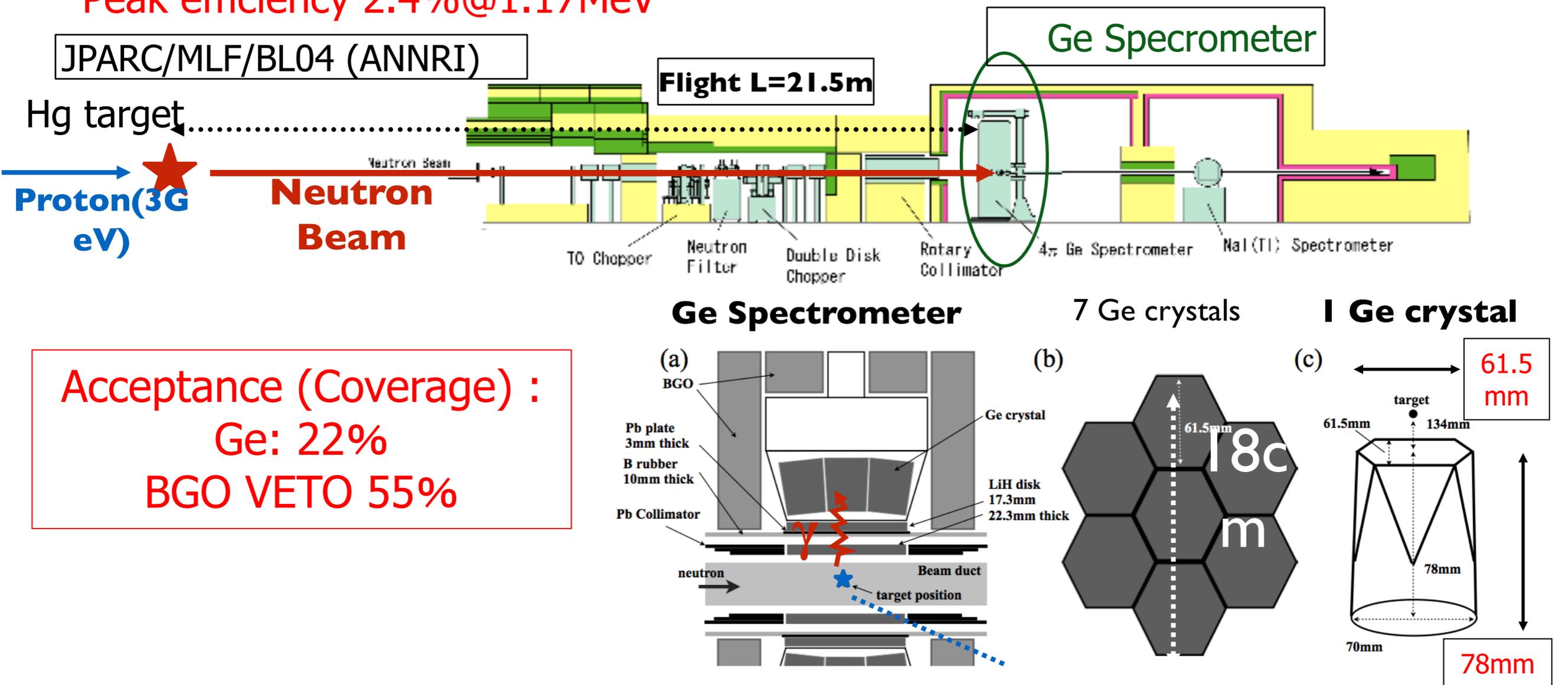
Total event : 8×10^9 events

Calibration source : ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , NaCl



JPARC Beamline (BL04) and Ge Spectrometer (ANNRI)

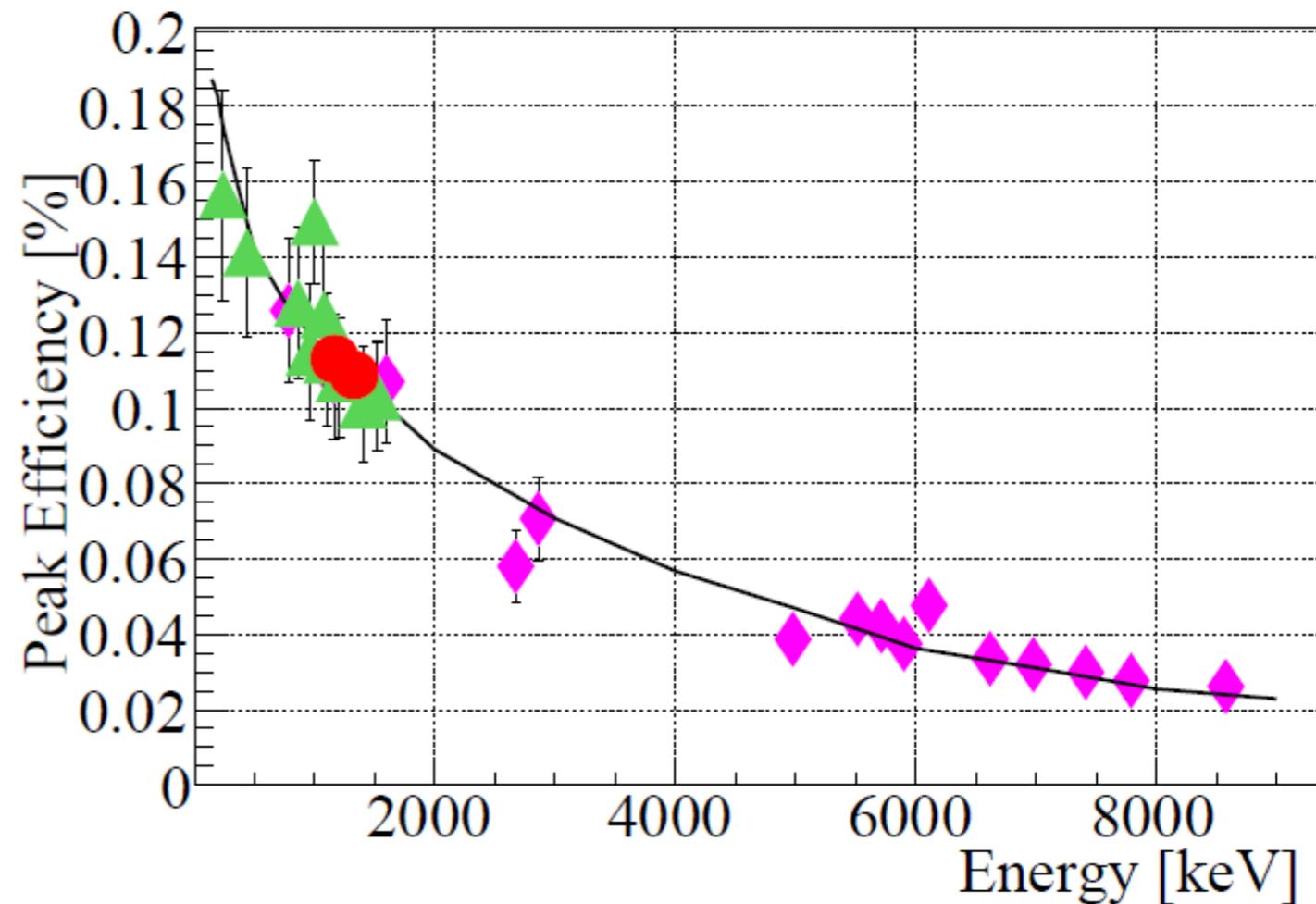
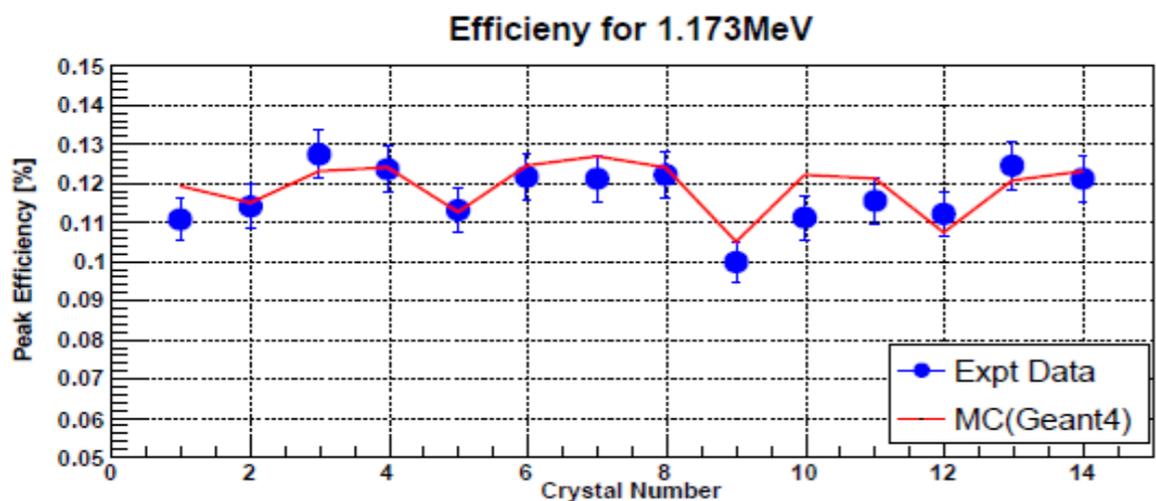
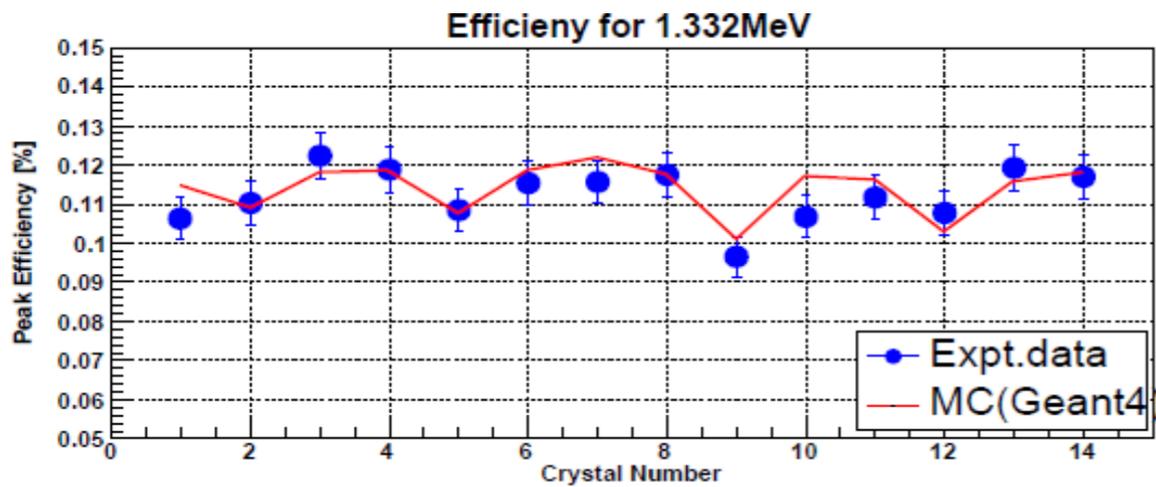
- JPARC/MLF/BL04 Neutron beam: $1.3 \times 10^{11} \text{ n/(s/m}^2\text{)}$ at $E_n = 1.5\text{--}25 \text{ meV}$ at Power 300kW, ($\Delta E_n/E_n \sim 1\%$),
- Spectrometer (ANNRI): **two Ge clusters with BGO veto shields.**
- Each cluster : **an array of 7 Ge crystals**, arranged in hexagon ($\Delta E_\gamma = 9 \text{ keV}@1.3 \text{ MeV}$)
Peak efficiency 2.4%@1.17MeV



較正データを使った高精度な検出器の理解

^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu γ 線源 and NaCl(n, γ)

- E=0.2-9MeV に渡って、個々のGe結晶の検出効率を20%程度で理解できている。性能のばらつきは、主に検出器周りの物質量の理解と個々の検出器の個性による。



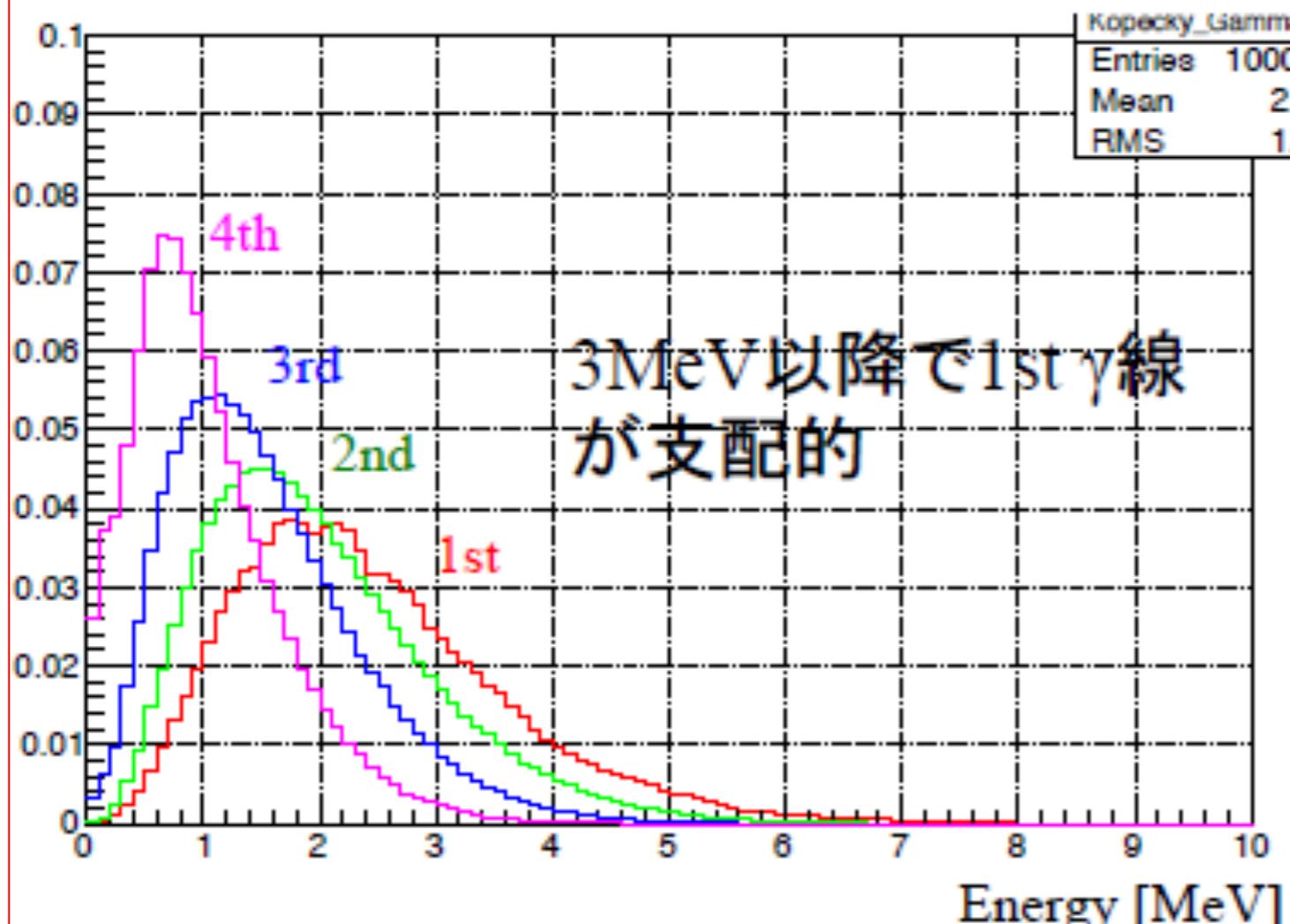
連続成分に対する我々の γ 崩壊モデル

$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$

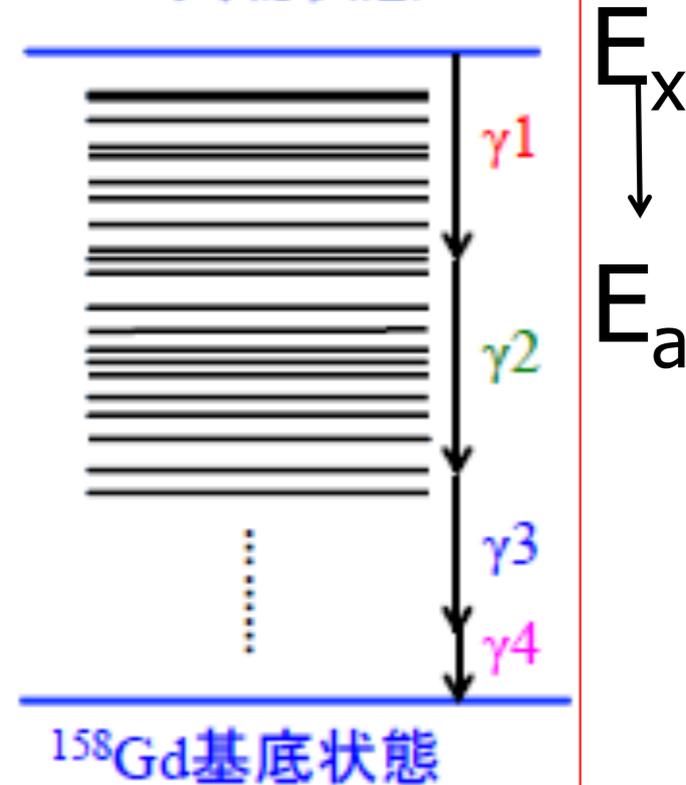
■ Probability Distribution from $E_x \rightarrow E_a = E_x - E_\gamma$

- ✓ Fermi Golden Rule: Probability = $|\text{Amplitude}|^2 \times (\text{Number of States} = \text{Levels})$
- ✓ E_γ^3 favors Large E_γ , $f(E_\gamma)$ favors Large E_γ , But $\rho(E_a)$ favors Very Small E_γ .

$$P(E_\gamma, E_x) = \frac{E_\gamma^3 f(E_\gamma) \rho(E_x - E_\gamma)}{\int_0^{E_x} E_\gamma^3 f(E_\gamma) \rho(E_x - E_\gamma) dE_\gamma}$$



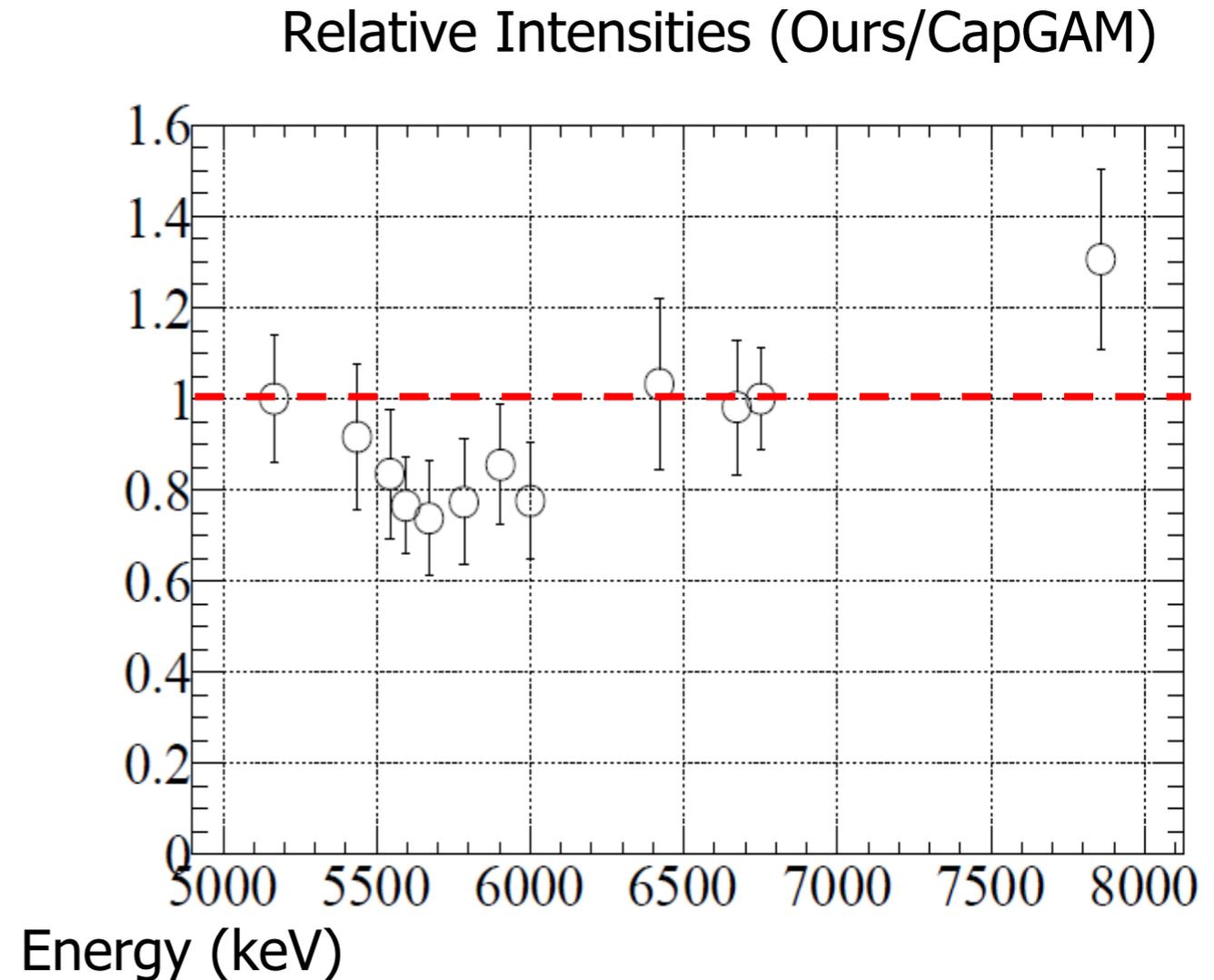
^{158}Gd 共鳴状態



$$E_x \rightarrow E_a \times \rho(E_a)$$

観測された離散レベル (^{157}Gd)は、先行実験の値 (CapGam)と矛盾無い、MCに組み込む。->田中ポスター

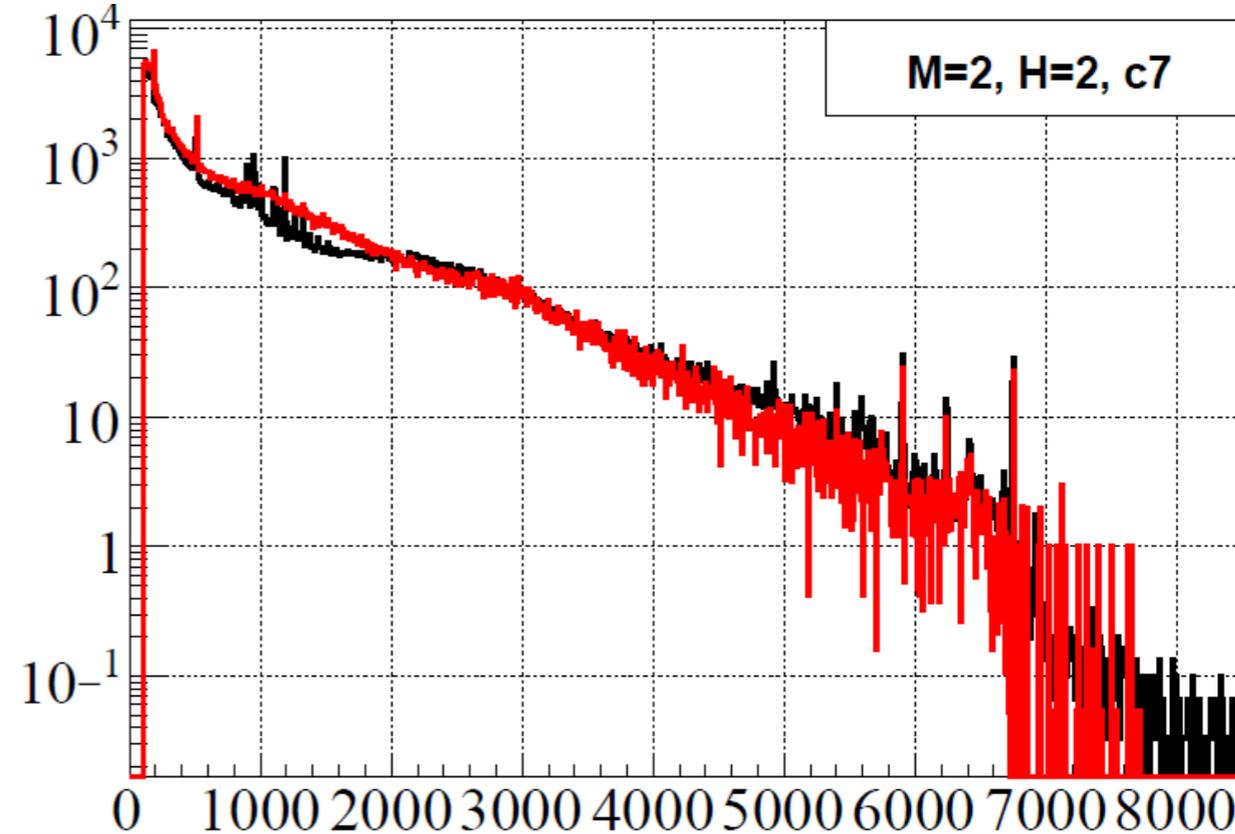
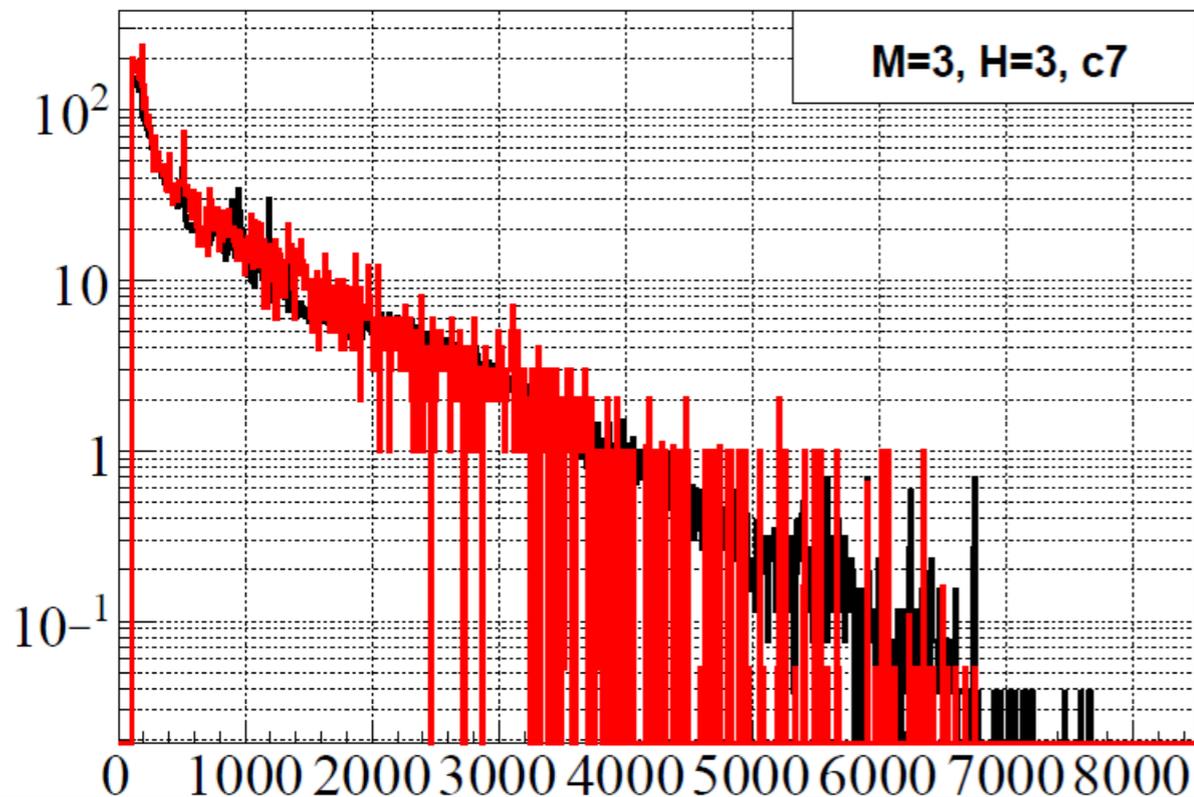
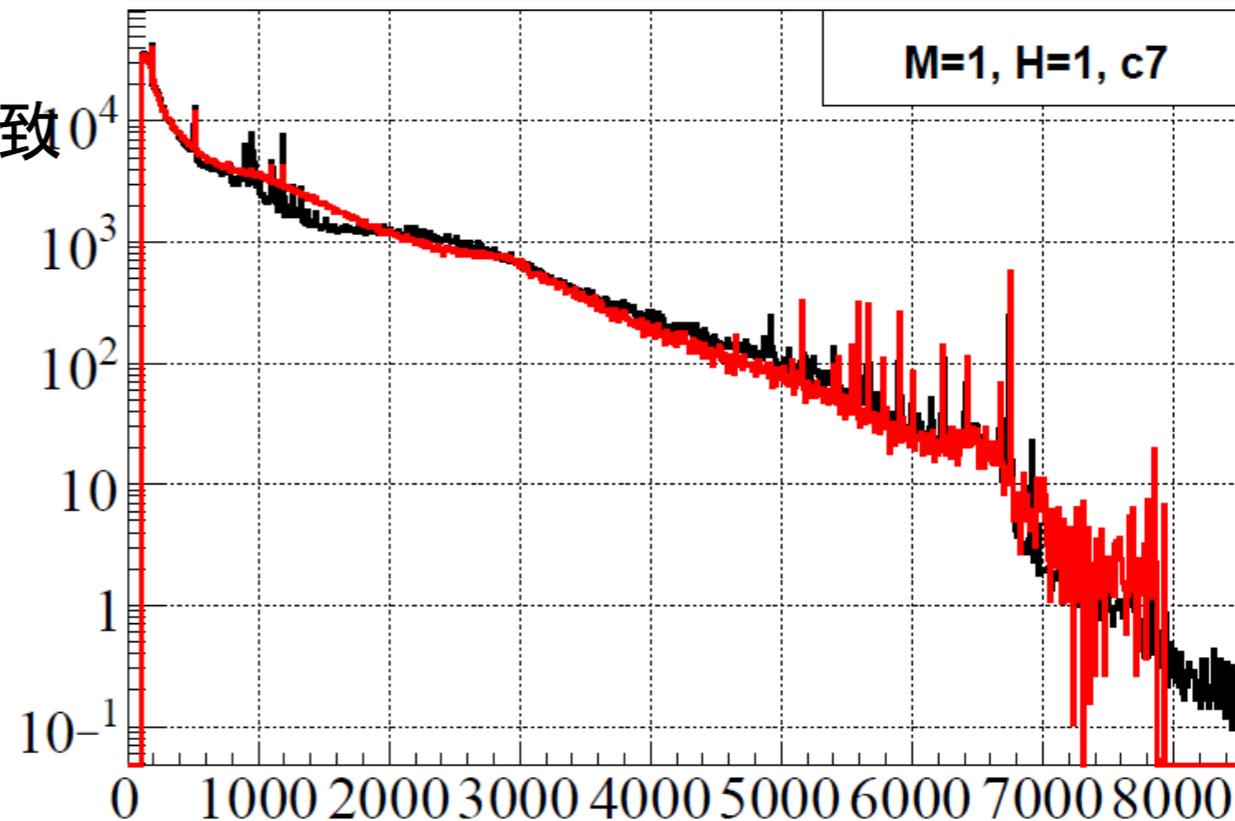
Energy (MeV)	Relative Intensity (%)
1. Continuum	(97.6%)
2. 12 Discrete levels	(2.4%)
-7.937MeV	[0.0019%]
-7.857MeV	[0.0081%]
-0.080	[100%]
-6.750MeV	[0.84%]
-1.187	[50.1%]
-1.107+0.080	[49.9%]
-6.672MeV	[0.068%]
-1.186	[84.8%]
-1.004+0.182+0.080	[15.2%]
-6.420MeV	[0.125%]
-1.517	[38.1%]
-1.438+0.080	[41.5%]
-1.256+0.182+0.080	[20.4%]
-6.001MeV	[0.057%]
-5.903MeV	[0.42%]
-1.010+0.944+0.080	[39.1%]
-0.875+0.898+0.182+0.080	[25.4%]
-0.769	[22.2%]
-1.186+0.080	[84.8%]
-1.004+0.182+0.080	[15.2%]
-0.676	[13.2%]
-1.097+0.182+0.080	[75.5%]
-1.279+0.080	[24.5%]
-5.784MeV	[0.071%]
-5.669MeV	[0.228%]
-5.595MeV	[0.239%]
-5.543MeV	[0.085%]
-5.436MeV	[0.058%]
-5.167MeV	[0.214%]



多重度M=1,2,3 の γ 線エネルギー分布

1 γ , 2 γ , 3 γ エネルギー分布 (Data と MC の比較)

- データとMCは0.2MeV ビンでも約30%で一致 (コンプトンの寄与コメント)

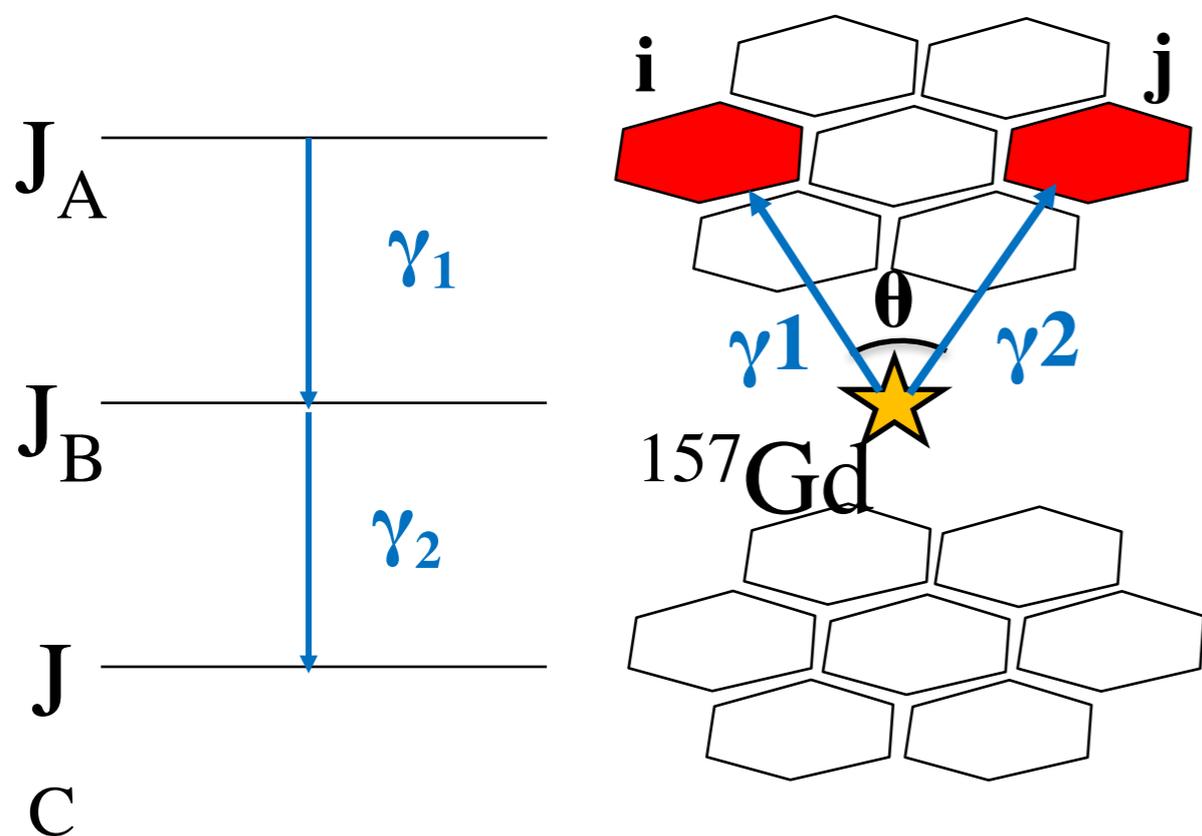


1) 角度相関の理解

8

- カスケード崩壊で放出される2本の γ 線の同時計測数から角度相関を解析。
 - 角相関関数は始状態、中間状態、終状態の J^P で決まる。

i番目とj番目のGe結晶で同時計測



同時計測数

$$N_{ij} = N_0 \varepsilon_i(E_1) \varepsilon_j(E_2) W(Z)$$

i, j : Ge結晶
の番号

N_0 : 崩壊数

ε : ピーク検
出効率

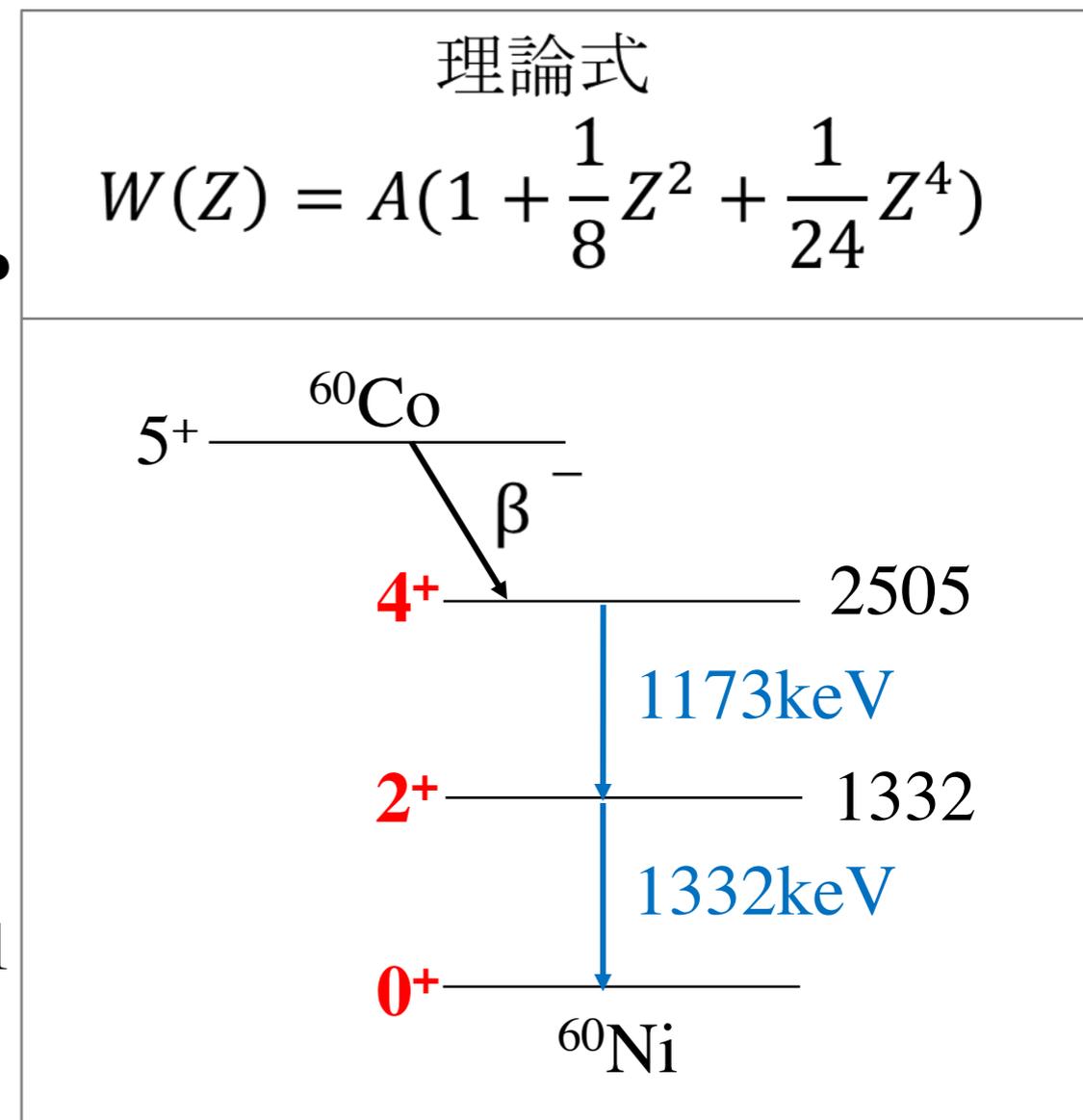
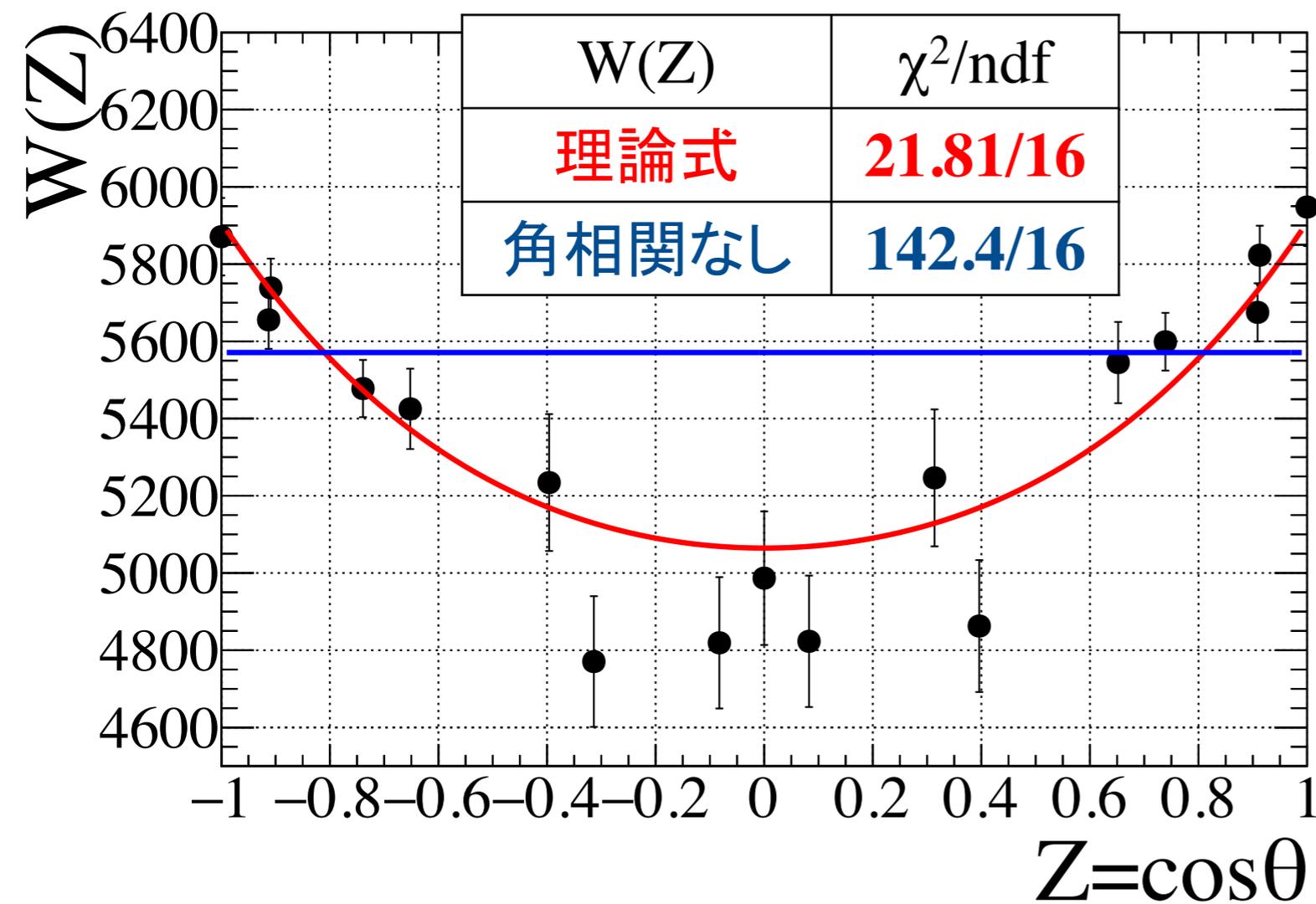
E_1, E_2 : γ_1, γ_2 のエネルギー

$W(Z)$: 角相関
関数

$Z = \cos\theta$
を角度ごとにプロット

^{60}Co の角度相関 [1173keV/1332keV]

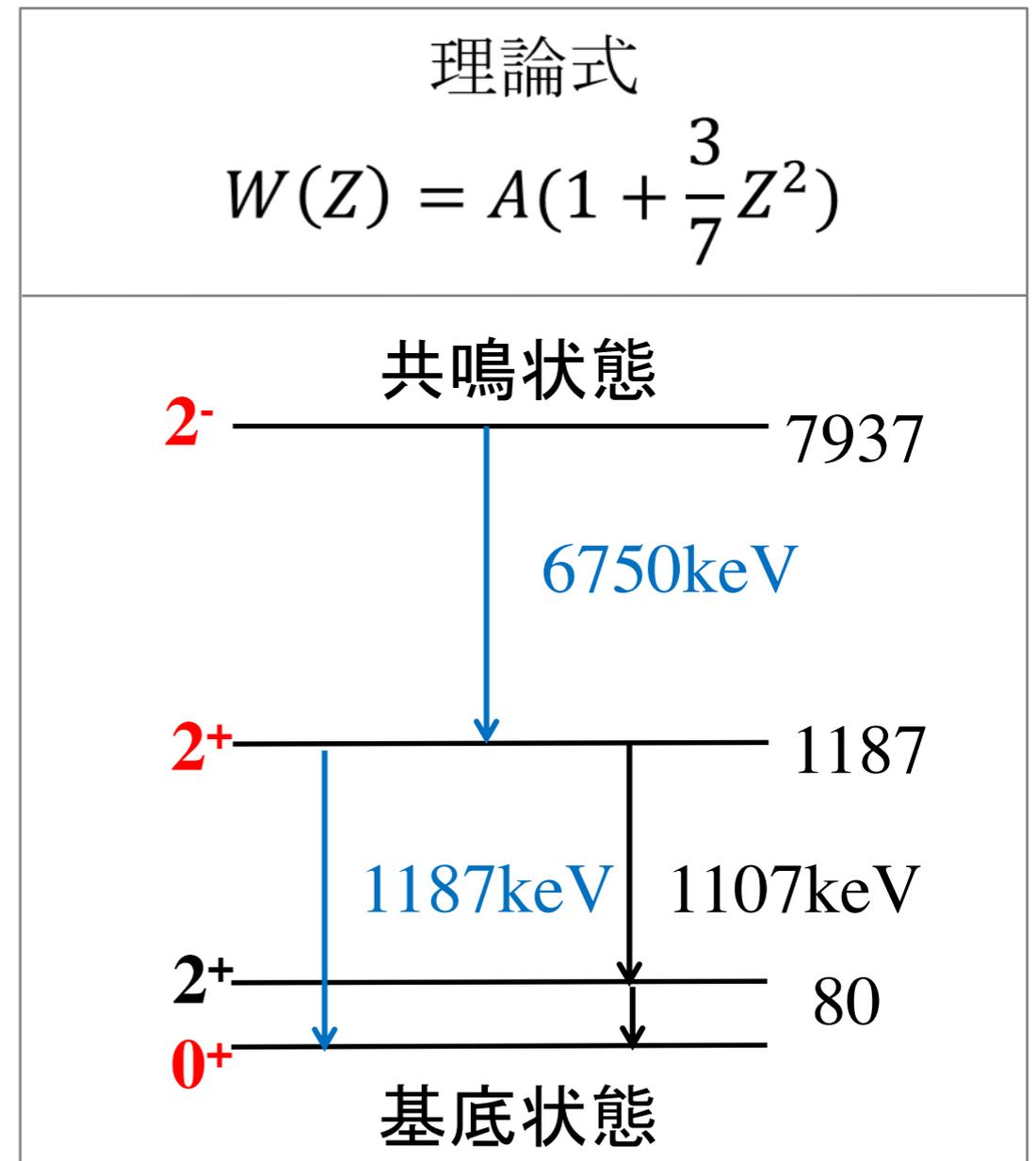
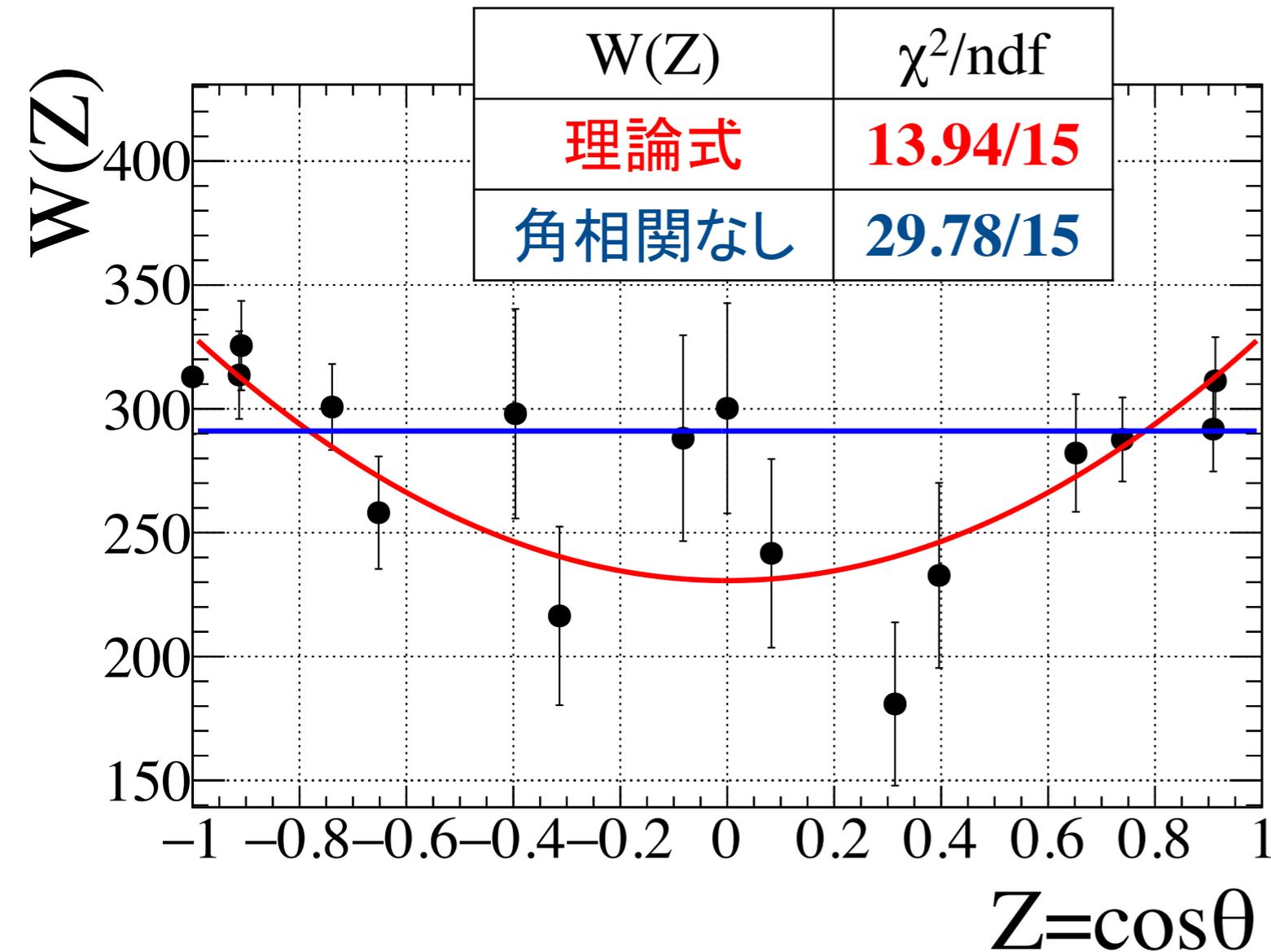
- 理論式と定数でFittingし、角度相関を示しているかを調べた。
- 角度相関がよく知られている ^{60}Co で理論式と良い一致を得た。



$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ の角度相関 [6750keV/1187keV]

- 予想の角度相関が見えていそう。統計増やす。

5分



2. 酸素・炭素原子核の巨大共鳴からの γ 線測定

1) 王 岩, 2) 須藤高志 3) Mandeep Reen (岡大物理) の発表スライド @日本物理学会 第72回年次大会

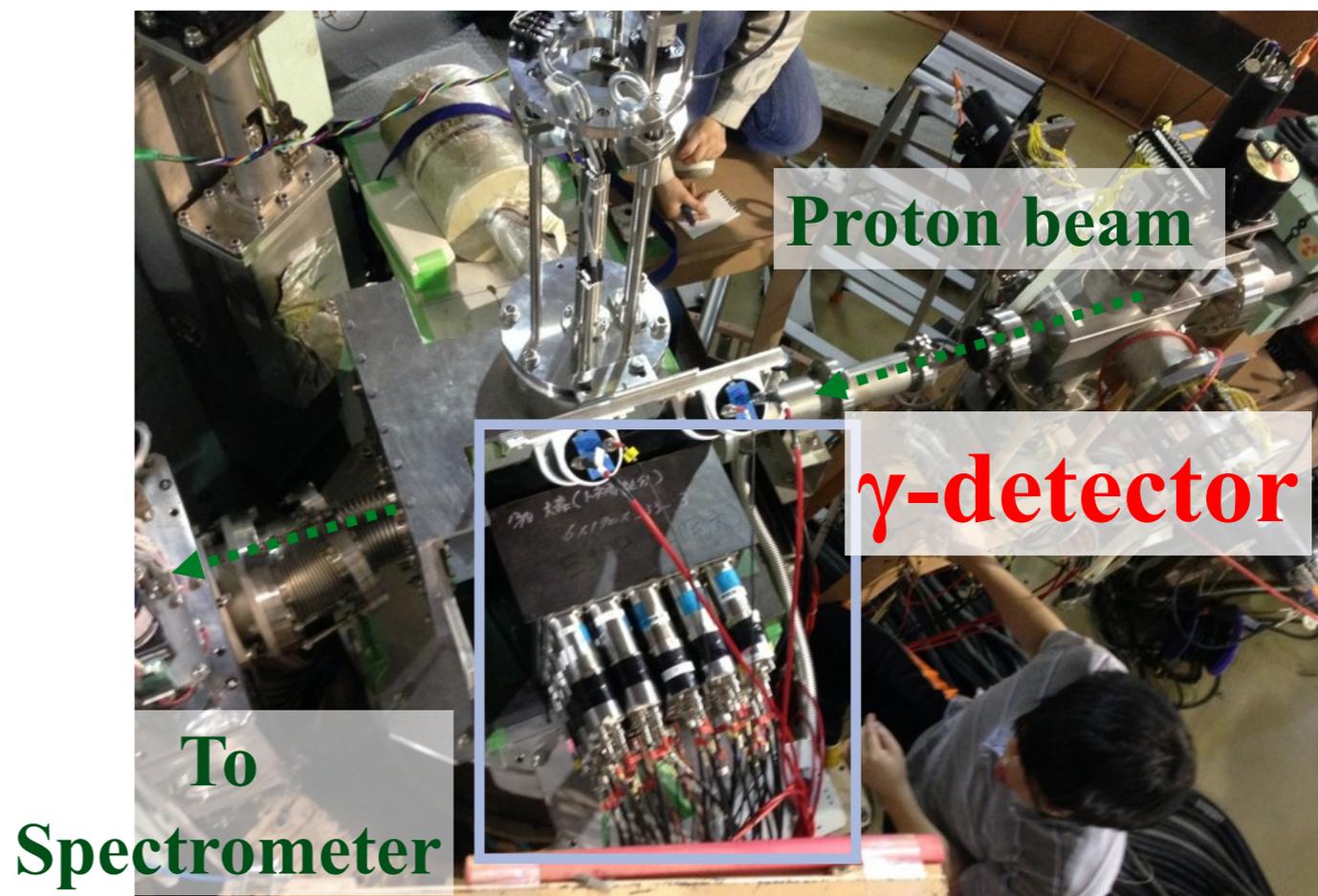
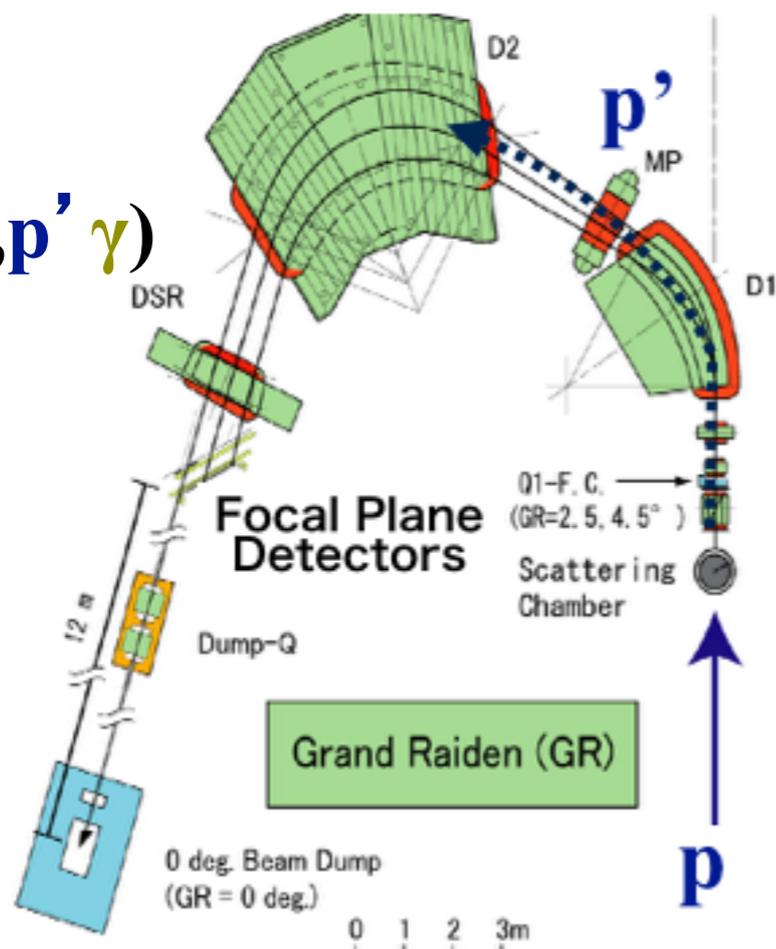
RCNP E398 実験: I.Ou, T. Sudo, M. S.Reen, R.Dhir, M. Sakuda, Y. Yamada, T. Shirahige, D. Fukuda, Y. Koshio, T. Mori(Okayama)

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(IFS), K. Miki, H. Akimune(Konan), H. Nakada (Chiba), T. Yano(Kobe)

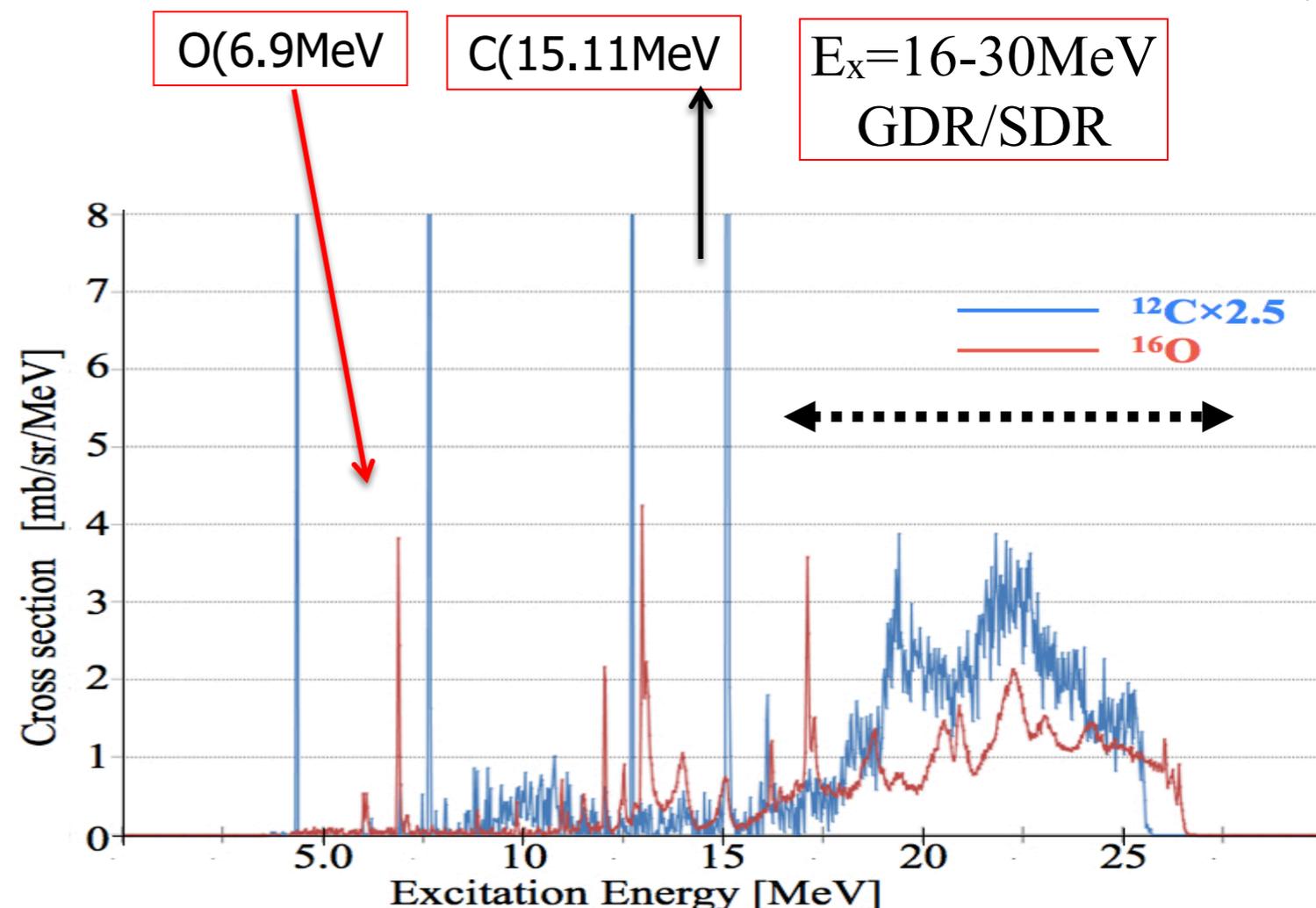
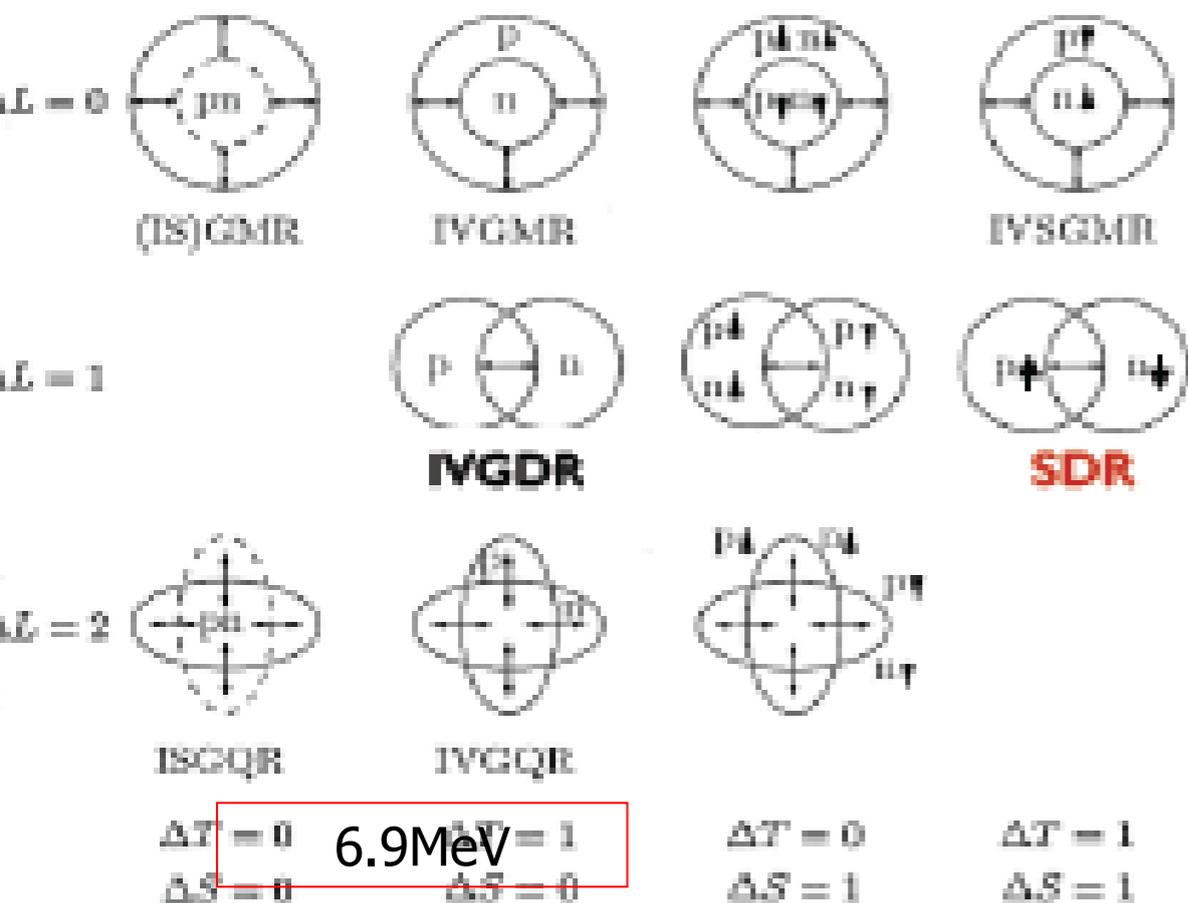
$^{16}\text{O}, ^{12}\text{C}(p, p' \gamma)$



巨大共鳴(集団運動による励起)の出現 ($E_x > 16\text{MeV}$)

[Our E398 data]

巨大共鳴状態：量子数による分類



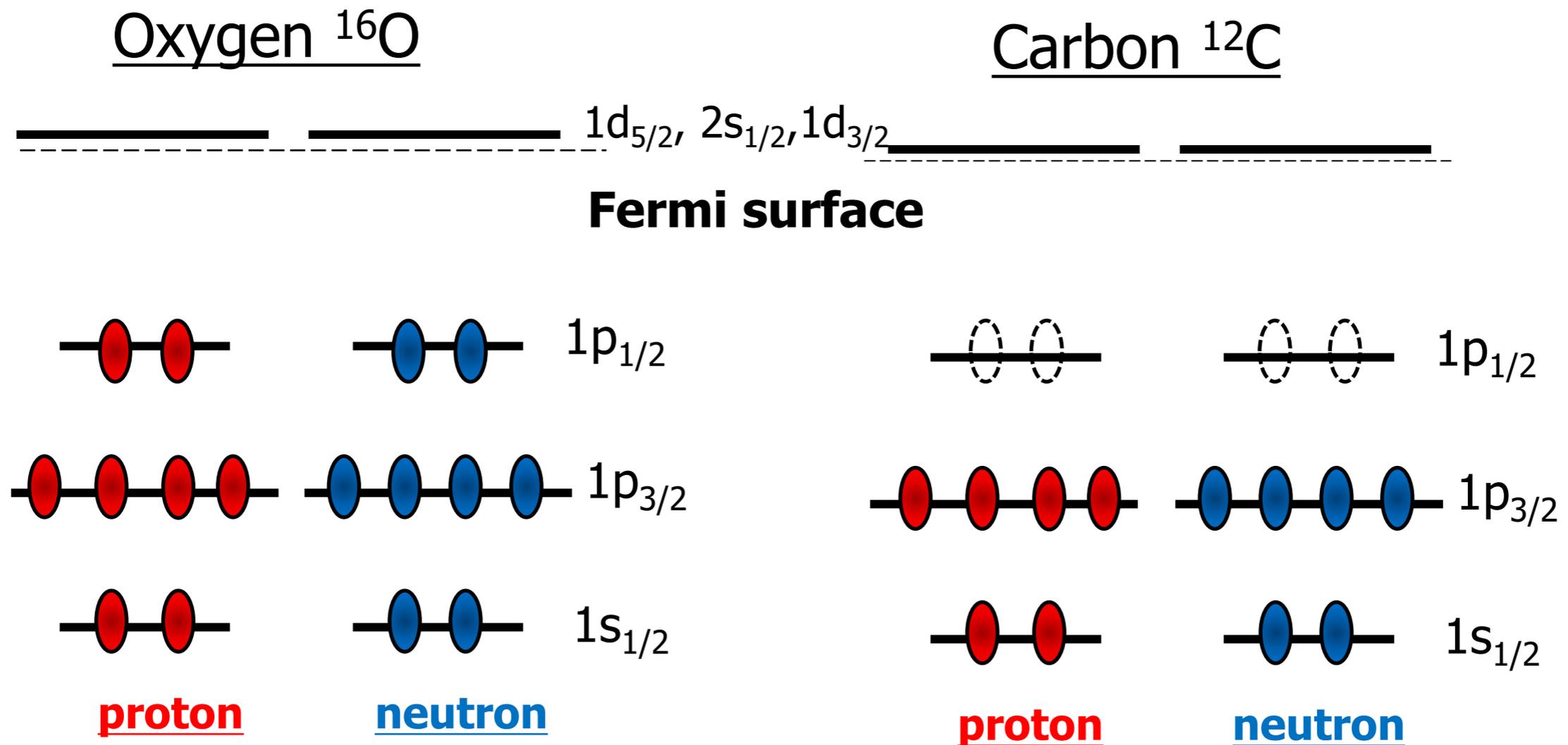
低エネルギーのニュートリノ反応 ($E_\nu = 10-100\text{MeV}$) では、巨大共鳴が主な寄与する。

参考. 巨大共鳴の発見 (1947, 48): 原子核の集団的励起 (陽子全体、中性子全体が集団的に運動)

殻模型の発見 (Nobel Prize 1963), 集団運動と独立運動の統一的記述 (Nobel Prize 1975)

Oxygen and Carbon (Shell Structure)

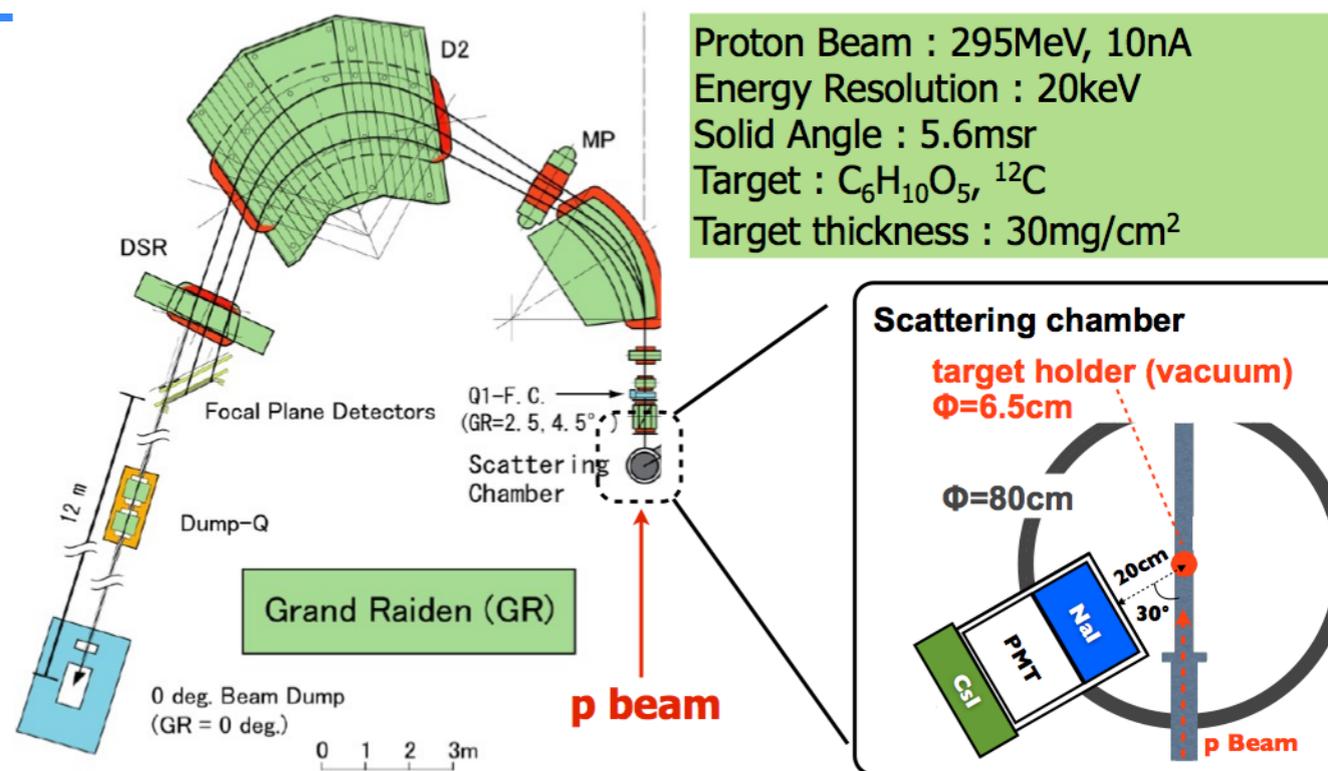
■ 精密なニュートリノ断面積を出すには、基底状態のみならず、巨大共鳴の波動関数(形状因子、電磁+Weak)も理解しないと基本的には計算できない。(吉永さんの講演)



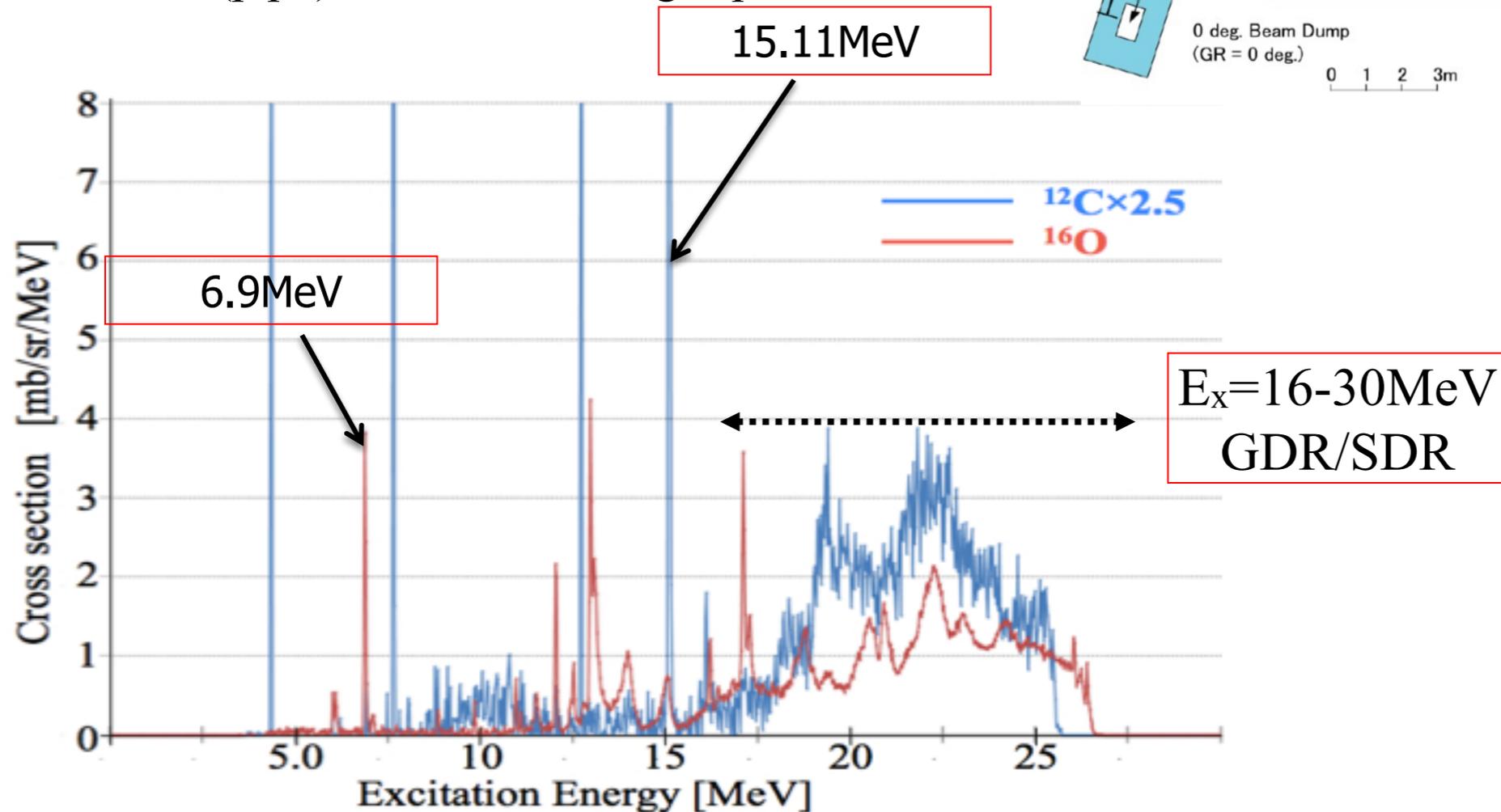
RCNP Grand-Raiden Spectrometer O,C(p,p')

-10-

See excellent **Energy Resolution**
 $E_x = E_p - E_{p'}$, $\Delta E_x \sim 20 \text{keV}$



$^{16}O, ^{12}C(p,p')$ Rate at $\theta = 0.4$ deg. $E_p = 295 \text{MeV}$



γ 線検出器(NaI)の検出効率

検出器での γ 線の応答・検出効率(全吸収ピークやコンプトン散乱)は、線源データやデータ中の γ 線を使うことにより、1MeV-15MeVに渡って大変良く理解できた。

2.1. γ 線エネルギー E_γ を入射した時の検出器

の応答関数 $P(E_\gamma, E)$ と検出効率 $\eta\varepsilon_{MC}(E_\gamma)$

$$N(E_X) \times P(E_\gamma, E)$$

$$P(E_\gamma, E)$$

$$= \frac{\text{検出器でエネルギー}(E)\text{を得た数}}{\text{MCの}\gamma\text{線}(E_\gamma)\text{生成数}}$$

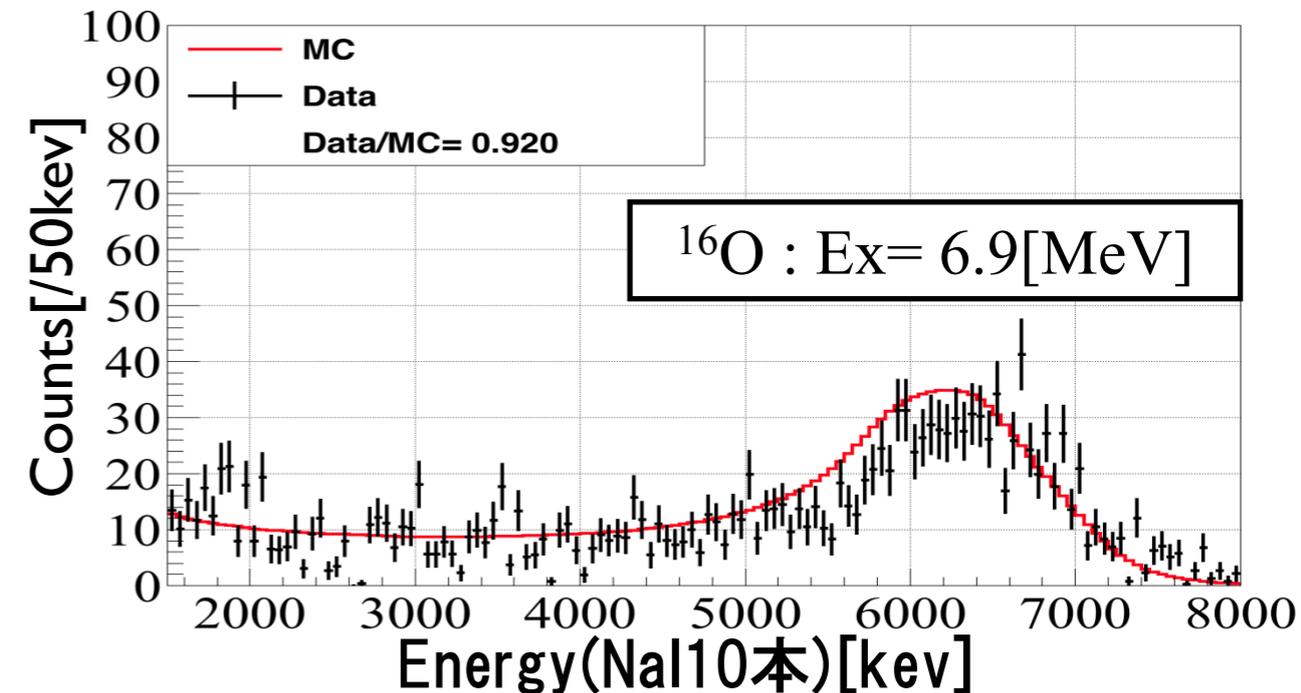
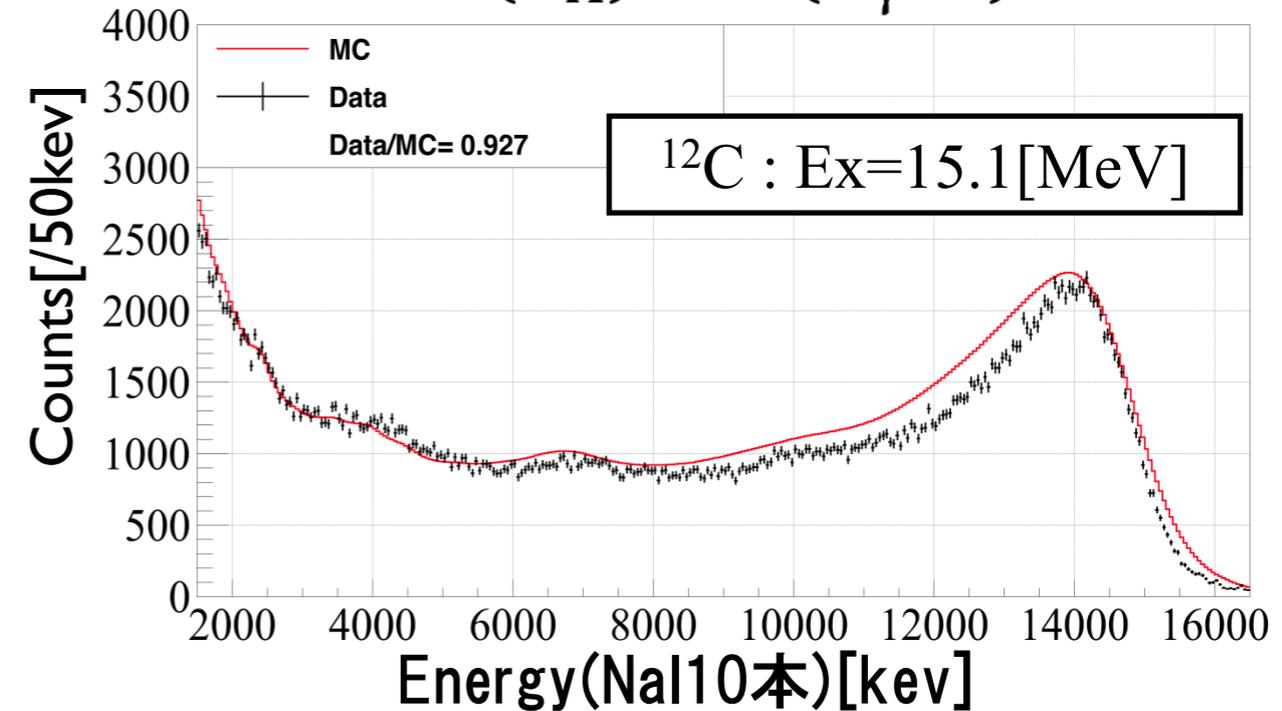
$$\eta\varepsilon_{MC}(E_\gamma) = \int_{E>1.5\text{MeV}} P(E_\gamma, E) dE$$

= E_γ での検出効率
と定義する。

15.1MeVと6.9MeVにおいて
Data/MC=92%で一致している。

**応答関数 $P(E_\gamma, E)$ と
検出効率 $\eta\varepsilon_{MC}(E_\gamma)$ を良く理解した**

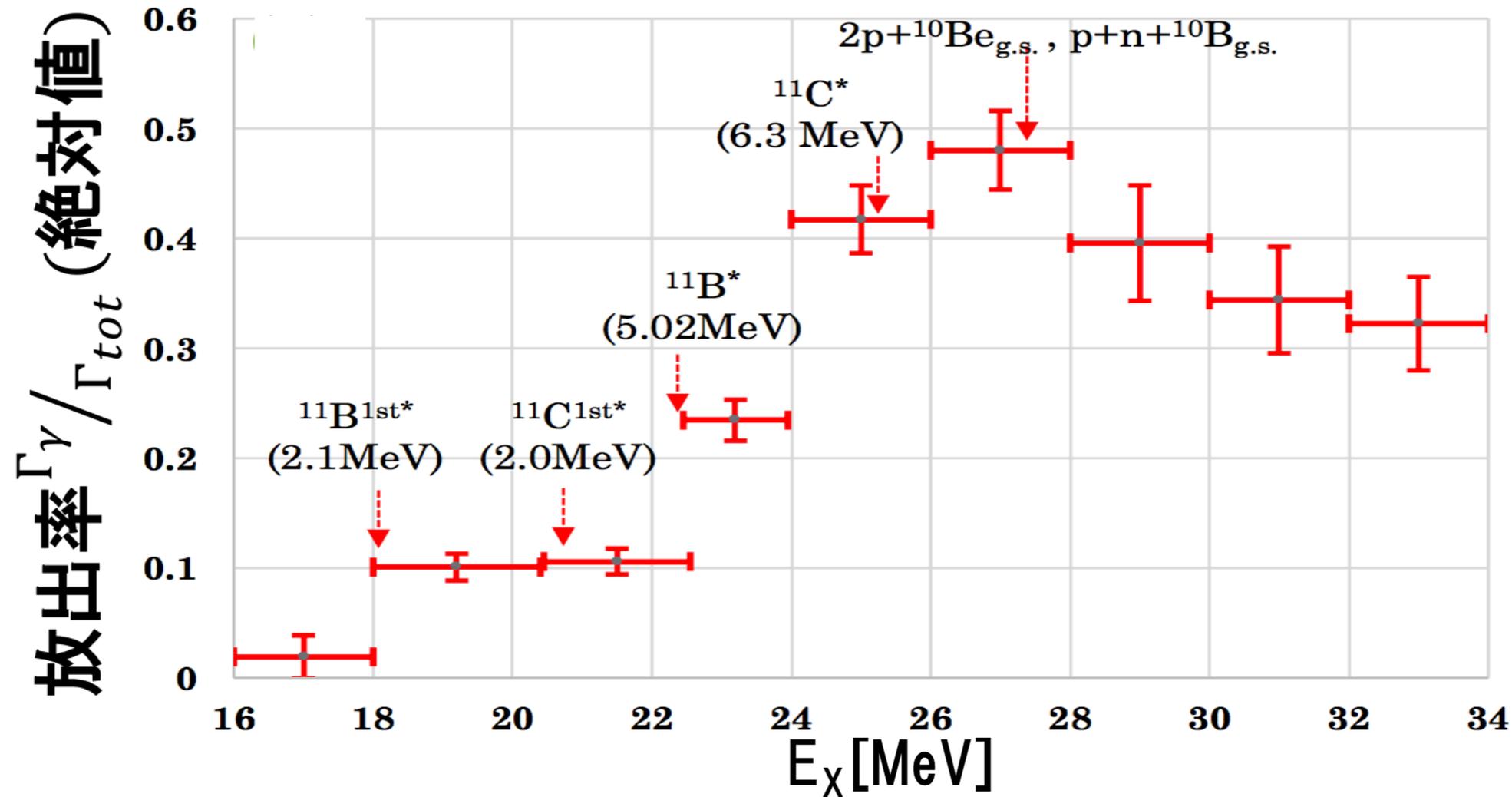
※以後、MCが8%過大評価している効果を
補正係数として考慮している。



3.2. ^{12}C における γ 線放出率

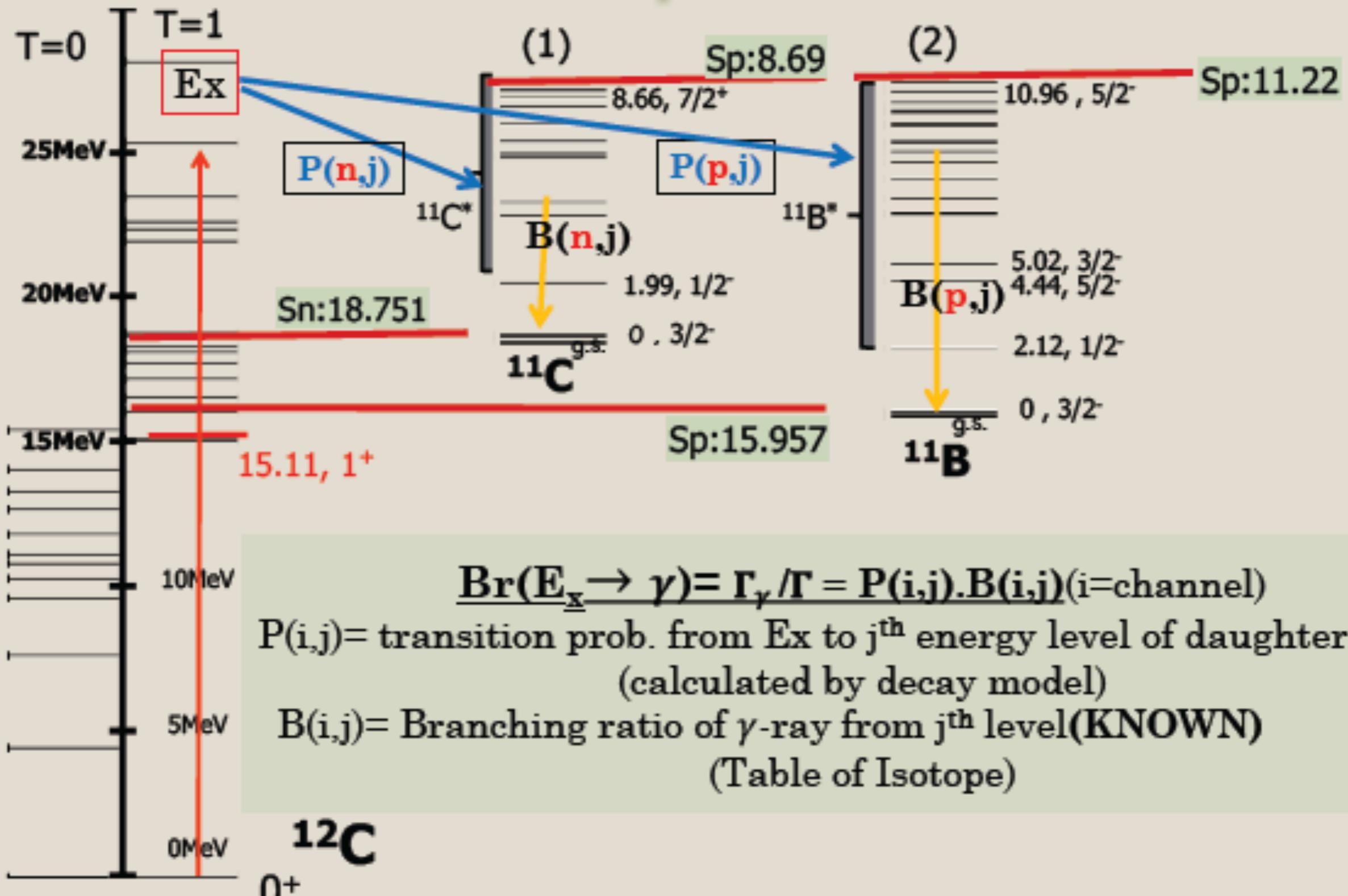
2. 全領域での γ 線放出率

$$\text{Br}(E_X \rightarrow \gamma) = \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma_{tot}} = \frac{N_\gamma (E_{\text{NaI}} > 1.5\text{MeV})}{N_{E_X}(\text{Energy Range}) \times \eta \varepsilon_{\text{MC}}}$$



$E_X=16 \sim 34$ [MeV]での γ 線の放出率を測定できた。

γ Branching ratio - Γ_γ/Γ (Hadronic Mode)



3.まとめ・今後

1. 濃縮Gd(^{155}Gd , ^{157}Gd) の熱中性子捕獲反応での γ 線生成

目的: SK-Gd や他のGdを使った実験へ、精密な基礎データと γ 線生成モデルを提供。

結果・今後: 検出器(14個Ge)もよく理解でき、エネルギー分布をよく理解できた。結果を出版する。(今年博士1予定。来年度修士2予定)

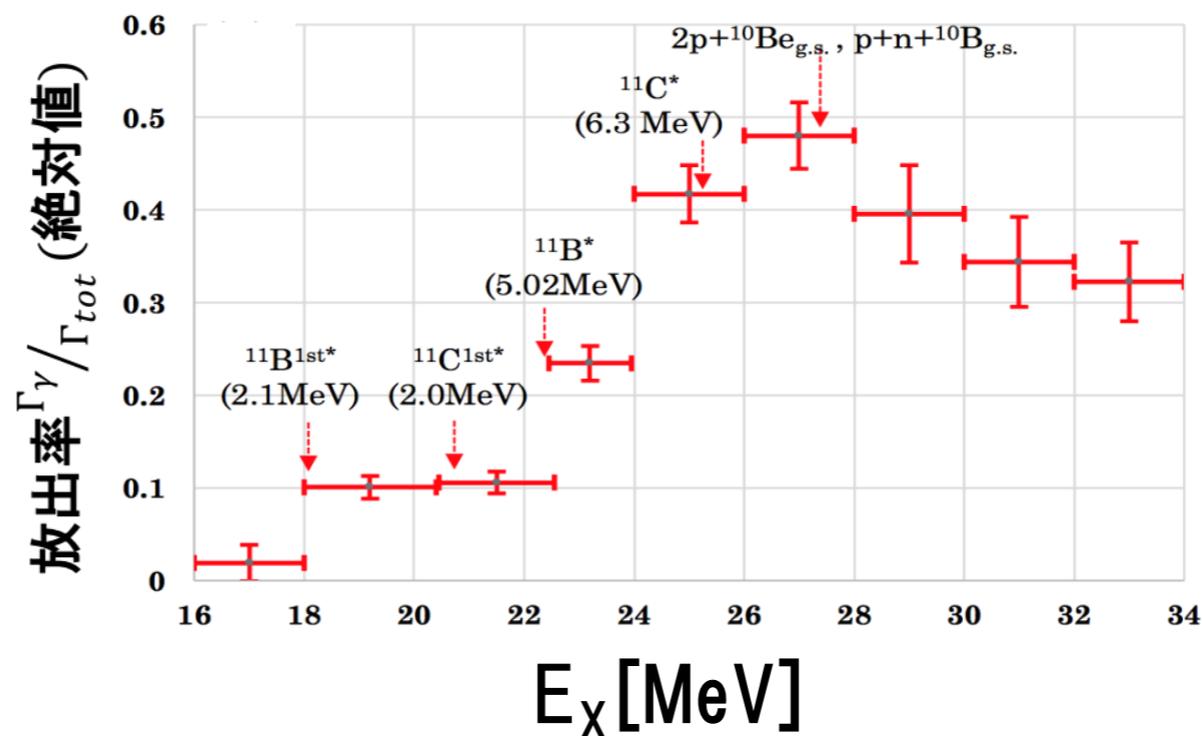
2. 陽子炭素・酸素反応を使った炭素・酸素巨大共鳴からの γ 線放出率の測定

目的: 炭素・酸素巨大共鳴からの γ 線放出率の世界初の測定を目指す。

結果・今後:

- 1) 精密な γ 線検出器較正: 2-15 MeV でMC計算と10%精度で一致した(検出効率を求めた)。
- 2) それを使い、 ^{12}C において実験の目的である γ 線放出率を、Ex毎に測定できたので、まずはそれを出版する。散乱角は0-4度、その依存性も議論する。
(今年博士1、来年度博士1. 修士1 予定。)

3.まとめ・今後



今後:

3. ^{16}O $E_x=16[\text{MeV}]$ から放出される γ 線の放出率も同様に測定。

4. モデル計算と比較。その際には、中田氏のO,Cの巨大共鳴の

Transition Density計算(JP)+DWBA断面積計算+崩壊計算を組み合わせ、 γ 線放出率を計算、我々の測定データと比較。

5. さらに、NC反応での γ 線放出率をSFOモデル計算などと我々のデータに確認された γ 線放出率を組み合わせ、超新星爆発の際のNC γ 生成事象数の定量的評価に生かしたい。