

(1) SK-Gd 計画のためのGd(n, γ) 反応測定

(2)酸素・炭素の巨大共鳴からの γ 線崩壊の研究

作田 誠(岡山大学理)

@ SN Workshop, 2019.01.08

C01(岡大)結果報告

1. (1部)SK-Gd 計画のためのGd(n, γ) 測定とANNRI-Gdモデル構築
2. (2部)E398 C,O(p, p') 粒子崩壊、電磁崩壊での γ 線放出率測定
3. Evaluation of SN O,C($\nu, \nu' \gamma$) events
4. まとめ

(1部) SK-Gd計画のための $^{157,155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ γ 線エネルギー分布・相関測定とANNRI-Gd MCモデル構築

1. Gamma ray spectrum from thermal neutron capture on ^{157}Gd

K. Hagiwara, T. Yano, T. Tanaka, M.S. Reen, P.K. Das, S. Lorenz, I. Ou, T. Sudo, Y. Yamada, T. Mori, T. Kayano, R. Dhir, Y. Koshio, M. Sakuda, A. Kimura, S. Nakamura, N. Iwamoto, H. Harada, M. Wurm, W. Focillon, M. Gonin, A. Ali and G. Collazuol.

Prog. Theor. Exp. Phys. (accepted on December 25, 2018) (29 pages),
arXiv:1809.02664v1 [nucl-ex]

2. Analysis of Gd(n,gamma) reaction with 155 , 157 and natural Gd targets taken with JPARC-ANNRI and development of Gd(n,gamma) decay model for Gd-doped neutron/neutrino detectors

Ali Ajmi, T. Tanaka, K. Hagiwara, T. Sudo, M. Reen, P.K. Das, R. Dhir, Y. Yamada, I. Ou, T. Mori, T. Kayano, Y. Koshio, M. Sakuda, T. Yano, A. Kimura, S. Nakamura, N. Iwamoto, H. Harada, S. Lorenz, M. Wurm, W. Focillon, M. Gonin and G. Collazuol.

Proceedings of Science (ICHEP2018) 120 (4 pages).

→ $^{155,\text{nat}}\text{Gd}$ In preparation for PTEP.

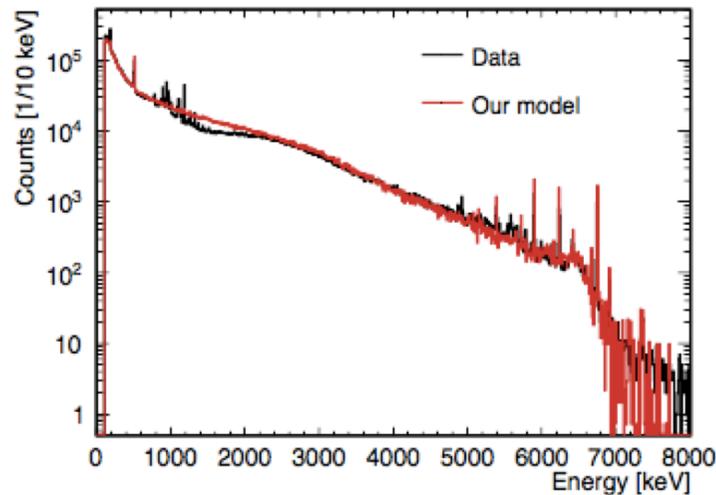
3. 2γ 角度相関: 田中、Goux 修士論文

$$\frac{dP(E_a, E_b)}{dE} \propto \rho(E_b) \times \underbrace{2\pi E_\gamma^{2L+1} f_{XL}(E_\gamma)}_{T_{XL}(E_\gamma)}.$$

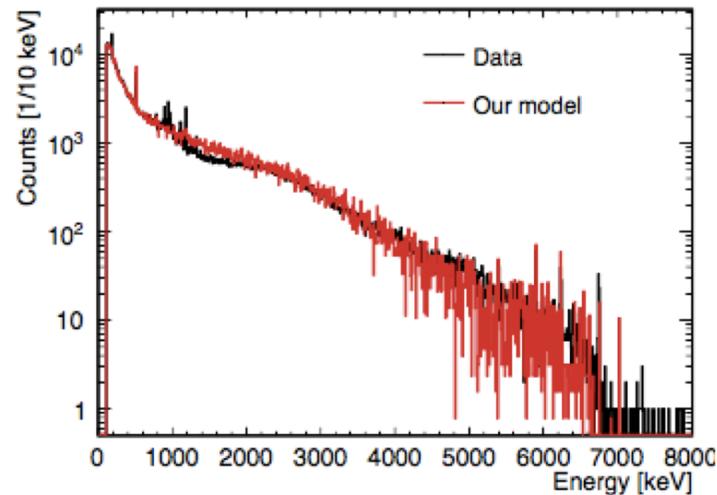
- このGdモデルは、既にSK-Gd計画で使われている。

$^{157,155}\text{Gd}(n,\gamma)$: data and our ANNRI-Gd model

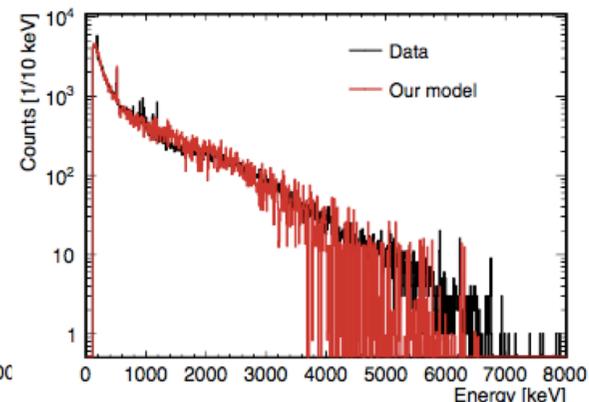
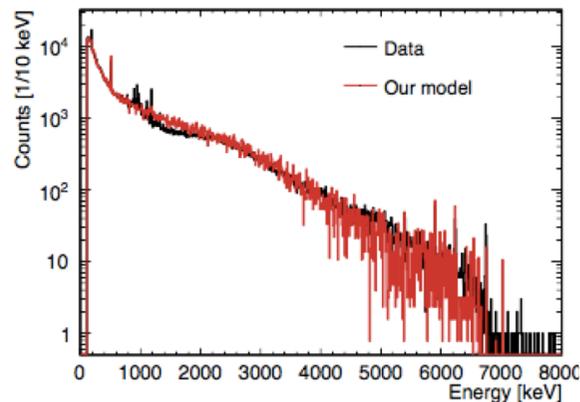
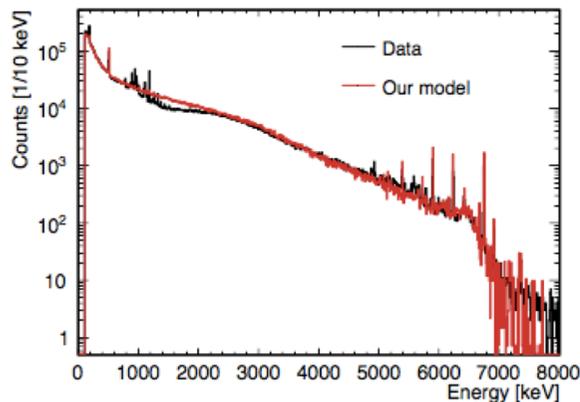
- $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ E_γ spectrum



- $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)$ E_γ spectrum

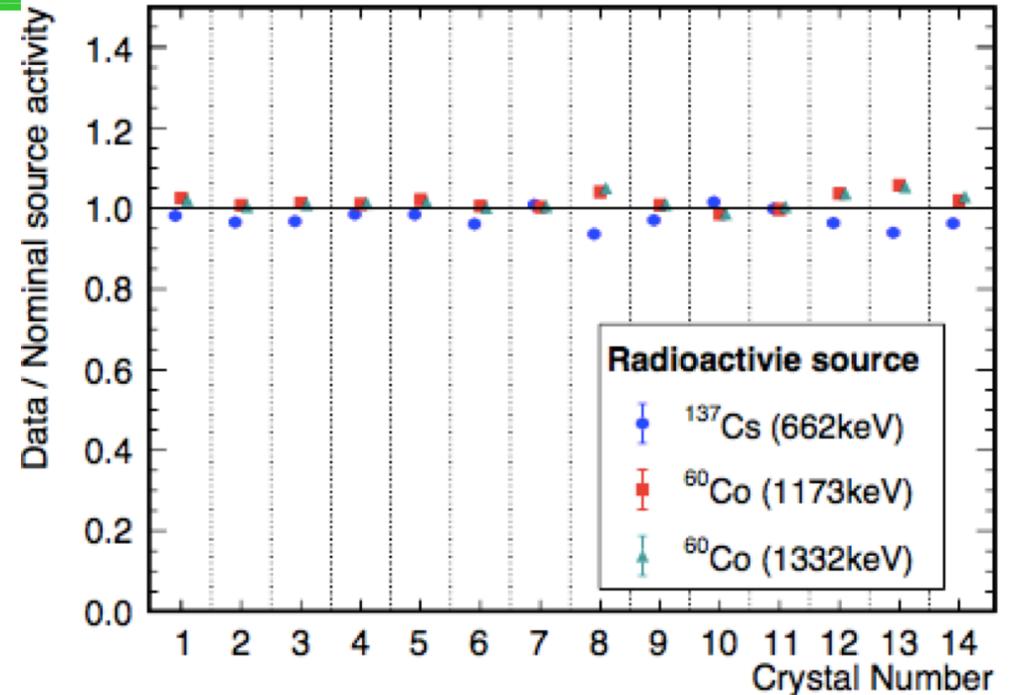


- $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ Multiplicity = 2,3,4 E_γ spectrum

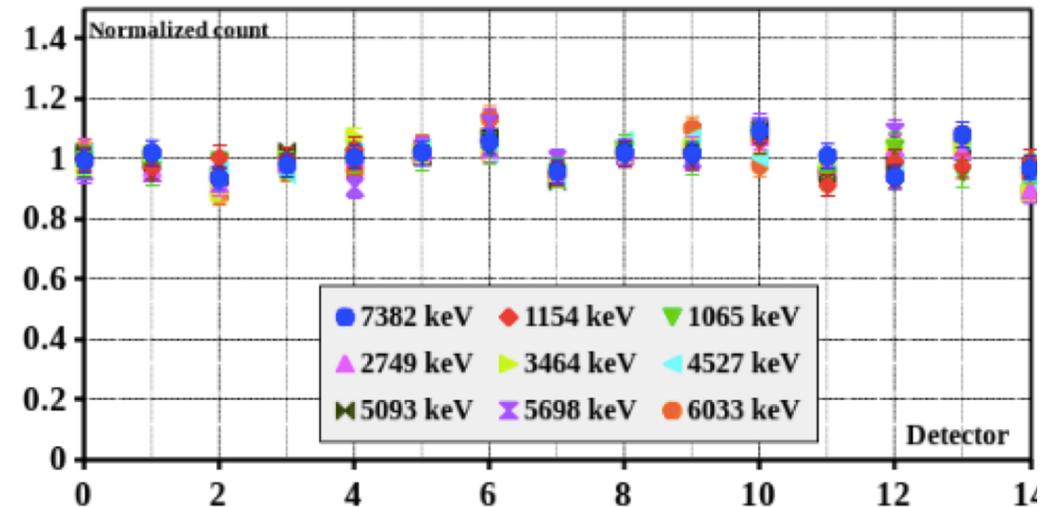
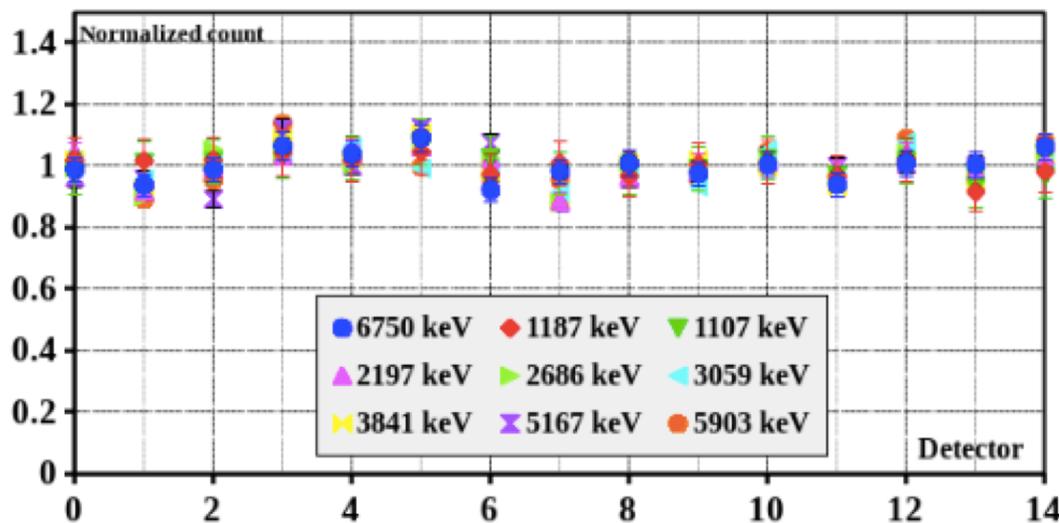


157,155Gd(n, γ)での γ - γ 角相関

- 検出器の一様性の確認
 - 標的から等方向に一様に放出された γ 線は5%内で一様に測られる。0.66~6MeV。

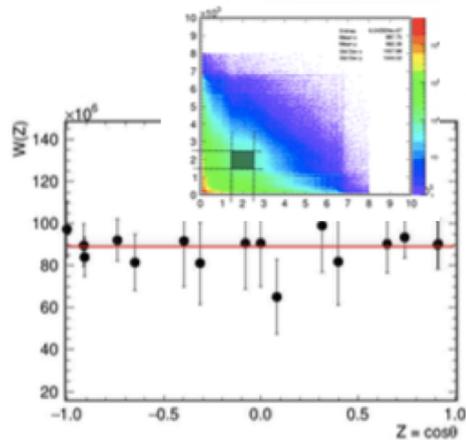


Distribution of gamma-rays

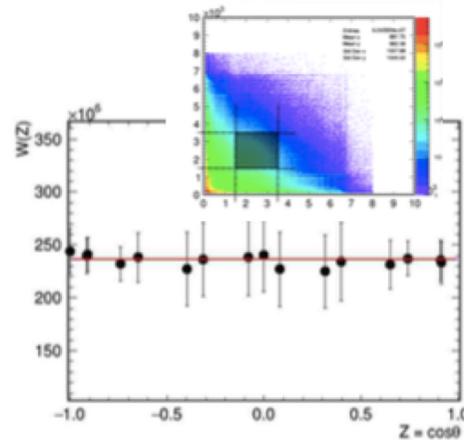


157,155Gd(n, γ)での γ - γ 角相関

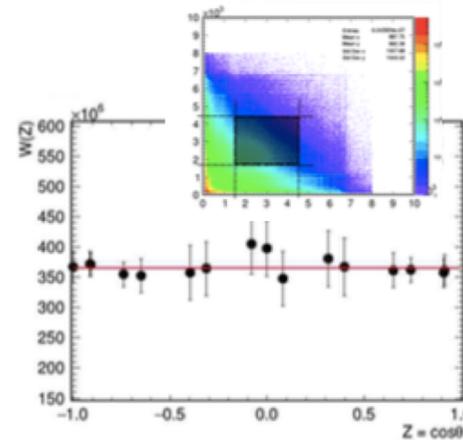
- 大部分の連続スペクトルの γ - γ 角相関は「ない」という結果を得た。



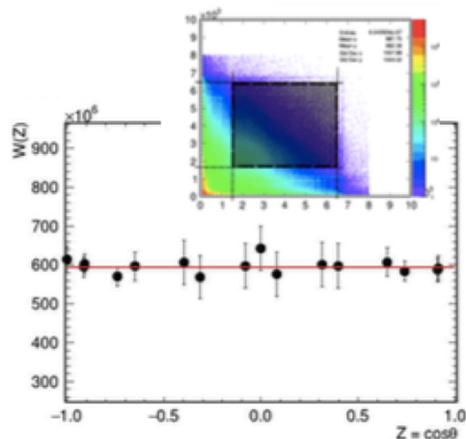
1.5-2.5MeV ;



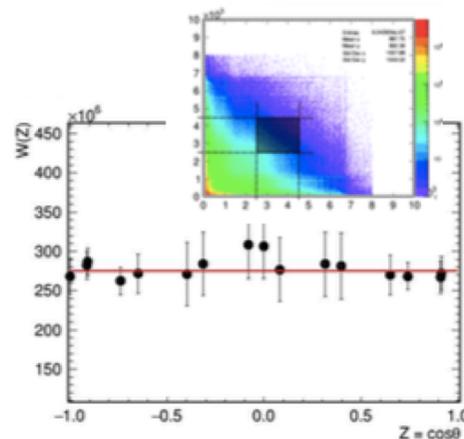
1.5-3.5MeV ;



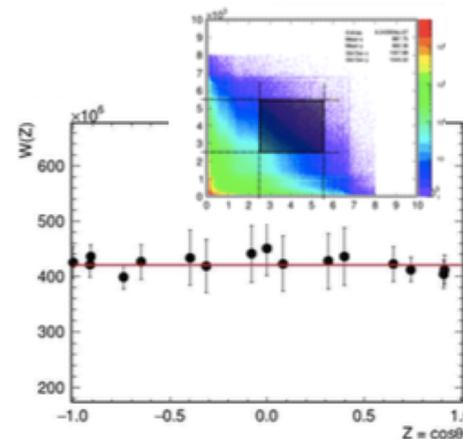
1.5-4.5MeV



1.5-6.5MeV ;



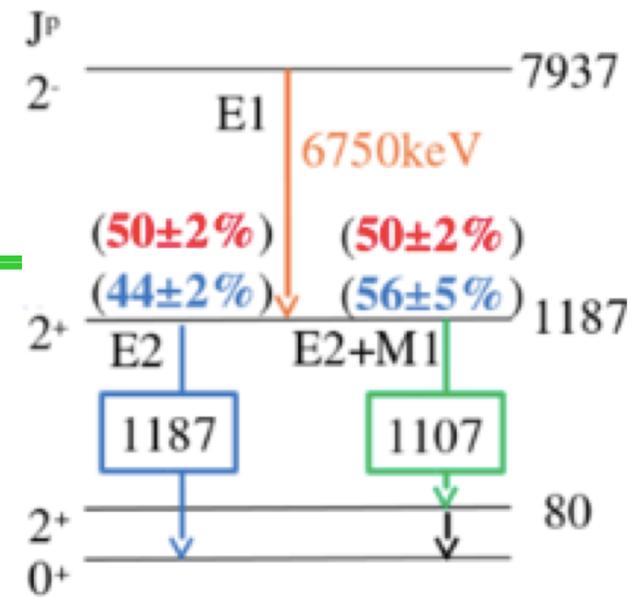
2.5-4.5MeV ;



2.5-5.5MeV

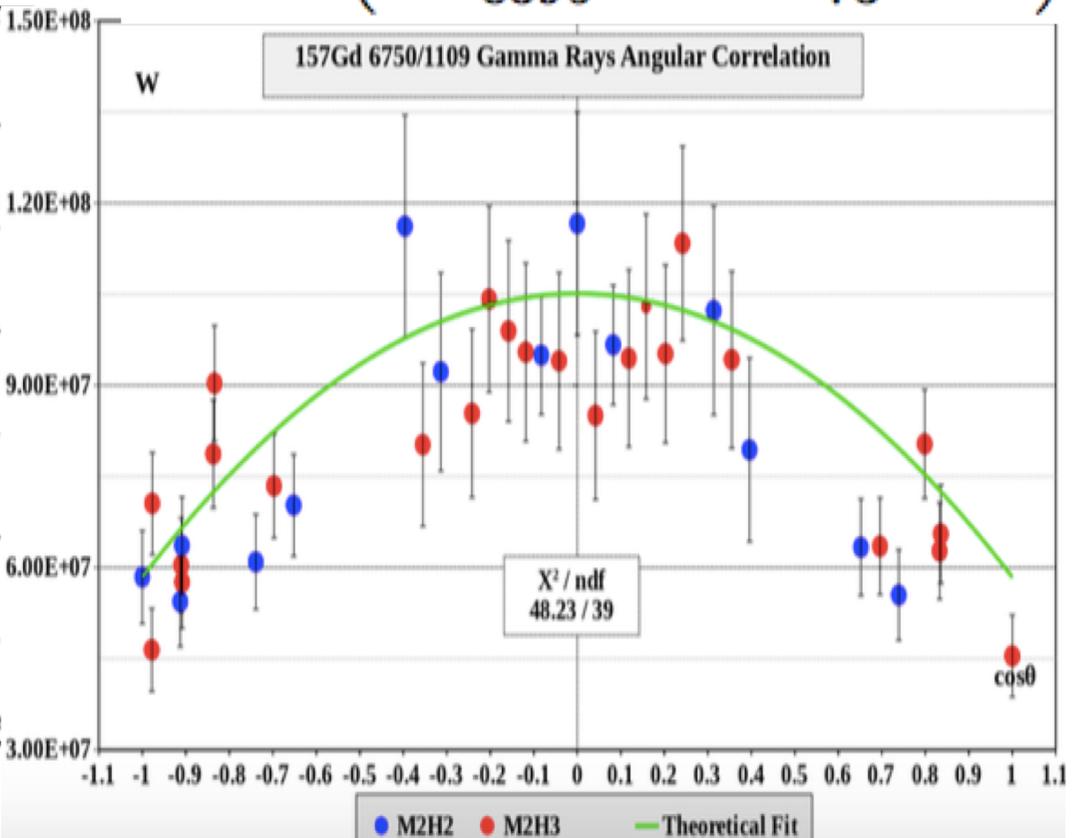
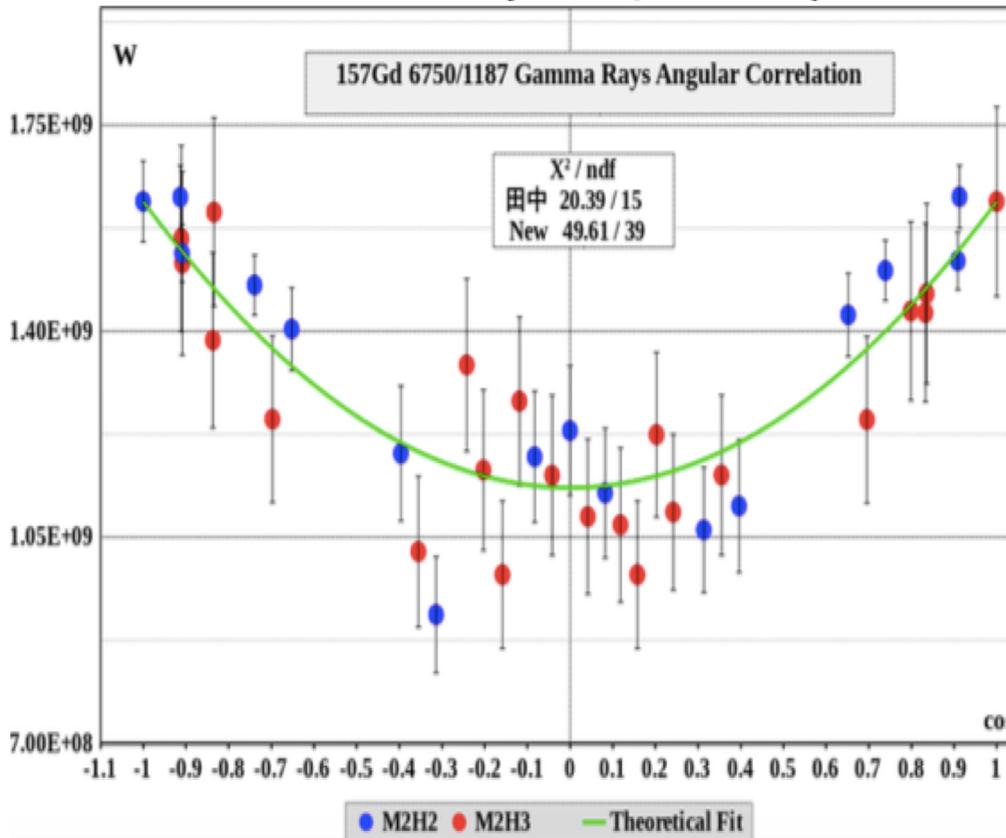
$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ での γ - γ 角相関

- $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ と $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$ 遷移での角分布
 - ✓ 数少ない強い遷移では、予想通りの相関あり。



$$W(\theta) \propto \left(1 + \frac{3}{7} \cos^2 \theta \right)$$

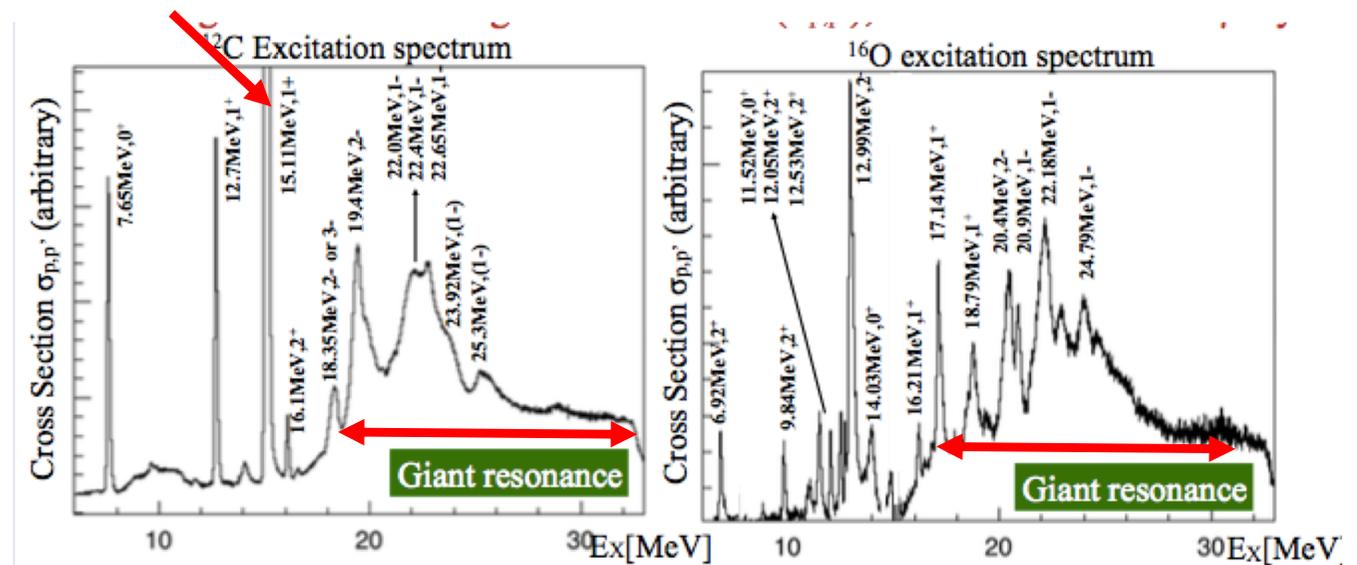
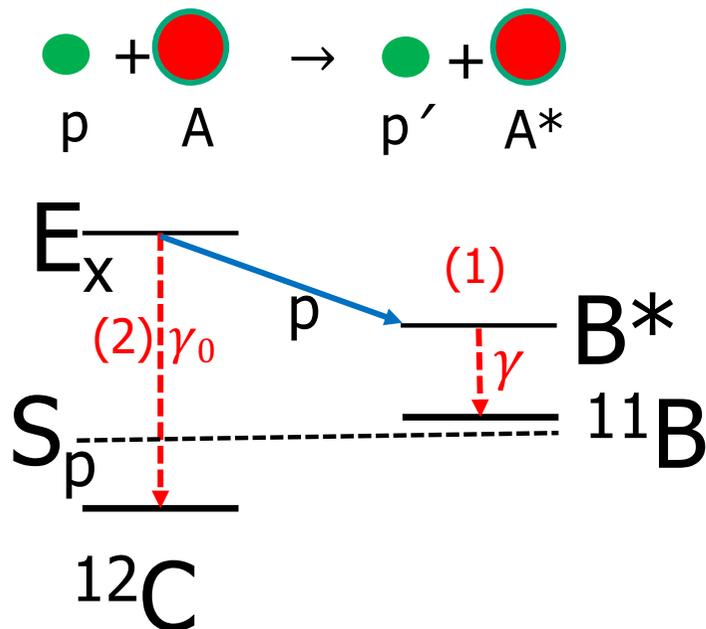
$$W(\theta) \propto \left(1 - \frac{3729}{8395} \cos^2 \theta - \frac{21}{73} \cos^4 \theta \right)$$





(2部) RCNP E398実験

- ^{12}C と ^{16}O は軽い安定原子核の典型である。ニュートリノ実験、素粒子原子核実験の標的として使われる。
 - ✓ [原子核物理] 原子核反応での巨大共鳴からの γ 線生成率は定量的には分かってない。→測定する意義あり。
粒子(強い)崩壊と電磁崩壊の両方の γ 線放出率を測定できた(世界初)。
 - ✓ [超新星爆発のニュートリノ検出] 中性カレント事象は、2番目に多い信号(酸素の場合)、 ν_μ , ν_τ の情報、重要な量である。→評価する。



今週に $^{12}\text{C}(p,p')$ 粒子崩壊・ γ 線放出率 論文投稿(M.Reen博士論文)

Measurement of γ rays from the giant resonances excited by $^{12}\text{C}(p,p')$ reaction at 392 MeV and 0°

M. S. Reen,^{1,*} I. Ou,¹ T. Sudo,¹ Y. Yamada,¹ T. Shirahige,¹ D. Fukuda,¹ T. Mori,¹ Y. Koshio,¹ M. Sakuda,^{1,†} A. Tamii,^{2,‡} T. Ito,² M. Miura,² N. Aoi,² M. Yosoi,² E. Ideguchi,² T. Suzuki,² T. Yamamoto,² C. Iwamoto,³ T. Kawabata,⁴ S. Adachi,⁵ M. Tsumura,⁵ M. Murata,⁵ T. Furuno,⁵ H. Akimune,⁶ T. Yano,⁷ T. Suzuki,⁸ and R. Dhir⁹

¹*Department of Physics, Okayama University, 700-8530 Okayama, Japan*

²*Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University, 567-0047 Osaka, Japan*

³*Center for Nuclear Study, Tokyo University, 113-0033 Hongo, Japan*

⁴*Department of Physics, Osaka University, 567-0043 Toyonaka, Japan.*

⁵*Department of Physics, Kyoto University, 606-8502 Kyoto, Japan*

⁶*Department of Physics, Konan University, 658-8501 Hyogo, Japan*

⁷*Department of Physics, Kobe University, 657-8501 Hyogo, Japan*

⁸*Department of Physics, Nihon University, 263-8522 Chiba, Japan*

⁹*Department of Physics and Nanotechnology, SRM University, 603203 Kancheepuram, India*

(Dated: December 16, 2018)

We have measured both the differential cross section ($\sigma_{p,p'} = d^2\sigma/d\Omega dE_x$) and the γ -ray emission probability ($R_\gamma(E_x) = \sigma_{p,p'\gamma}/\sigma_{p,p'}$) from the giant resonances excited by $^{12}\text{C}(p,p')$ reaction at 392 MeV and 0° , using the magnetic spectrometer and an array of NaI(Tl) counters. The absolute value of $R_\gamma(E_x)$ was calibrated using the well known γ -ray emission probability from $^{12}\text{C}^*(15.11 \text{ MeV}, 1^+, T=1)$ and $^{16}\text{O}^*(6.9 \text{ MeV}, 2^+, T=0)$ states within 5% uncertainty. We have found that $R_\gamma(E_x)$ starts from zero at $E_x = 16 \text{ MeV}$ and increases up to $47.9 \pm 0.5\% \pm 3.5\%$ at $E_x = 27 \text{ MeV}$. After 3-body decay threshold ($E_x = 27.2 \text{ MeV}$) is reached, $R_\gamma(E_x)$ begins to decrease. We have also compared the measured values of $R_\gamma(E_x)$ with the statistical calculations based on Hauser-Feshbach formalism in the energy range $E_x = 16 - 32 \text{ MeV}$.

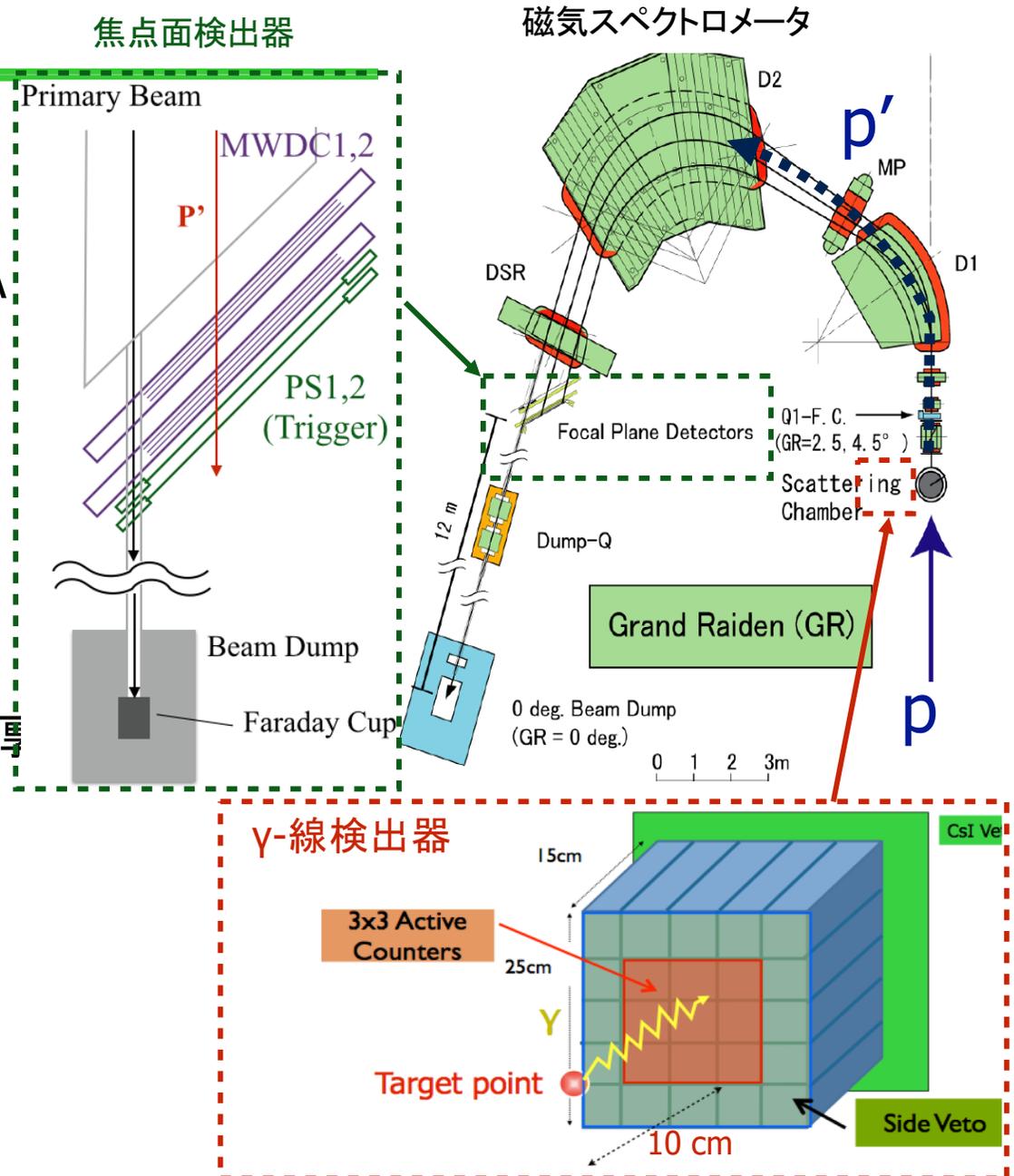
実験概要

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: ^{nat}C (36.3 mg/cm^2)と
cellulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)
- * γ 線検出器: NaI(Tl) $\times 25$
 - γ 線1.5MeV以上で測定可能
 - 検出効率 $\sim 6\%$ @ ^{12}C 15.1MeV
 - 前面: Plastic Scintillator Veto (3mm厚)



RCNP磁気スペクトロメータ “Grand Raiden”

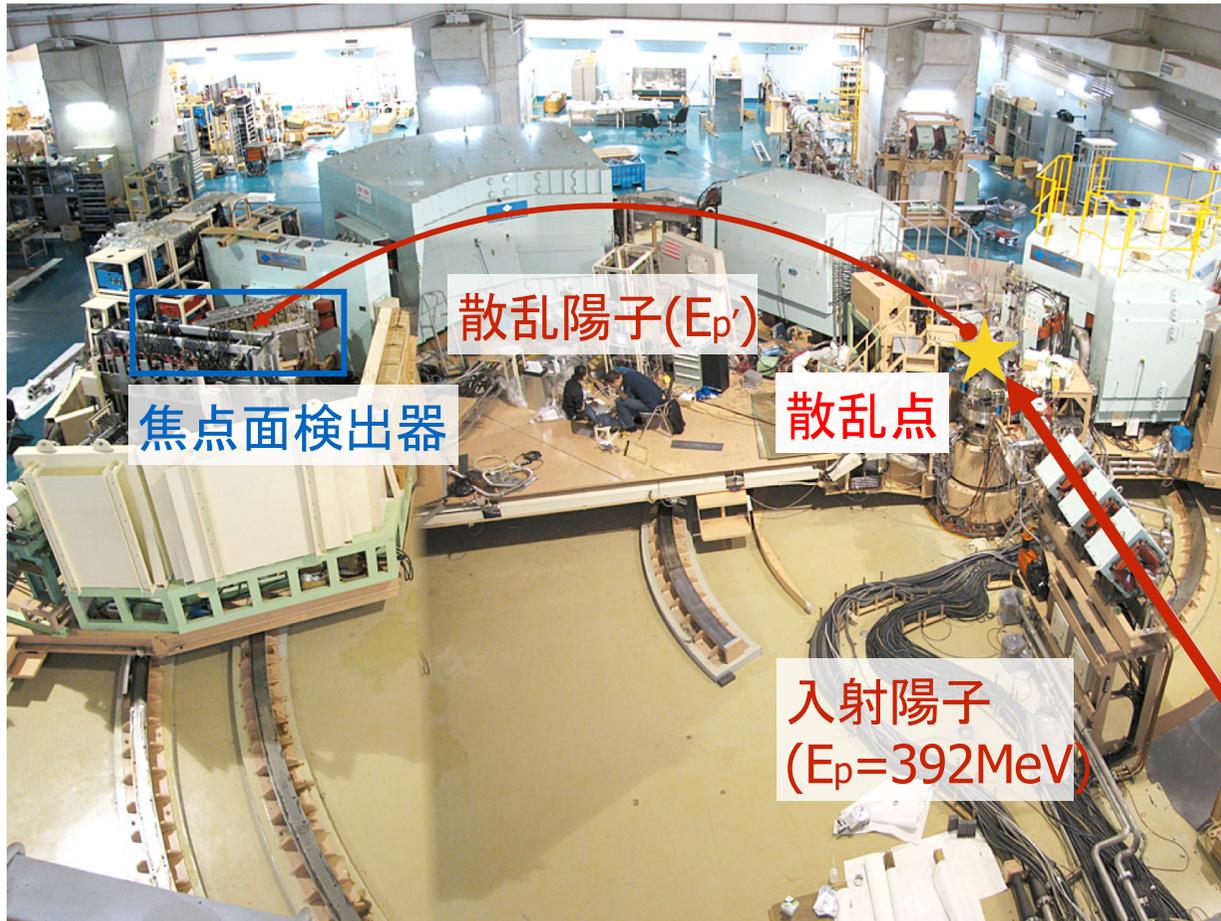
原子核の励起エネルギー E_x を50keV精度で測定できる。

磁気スペクトロメータ
Grand Raiden

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

$$P = eBR$$

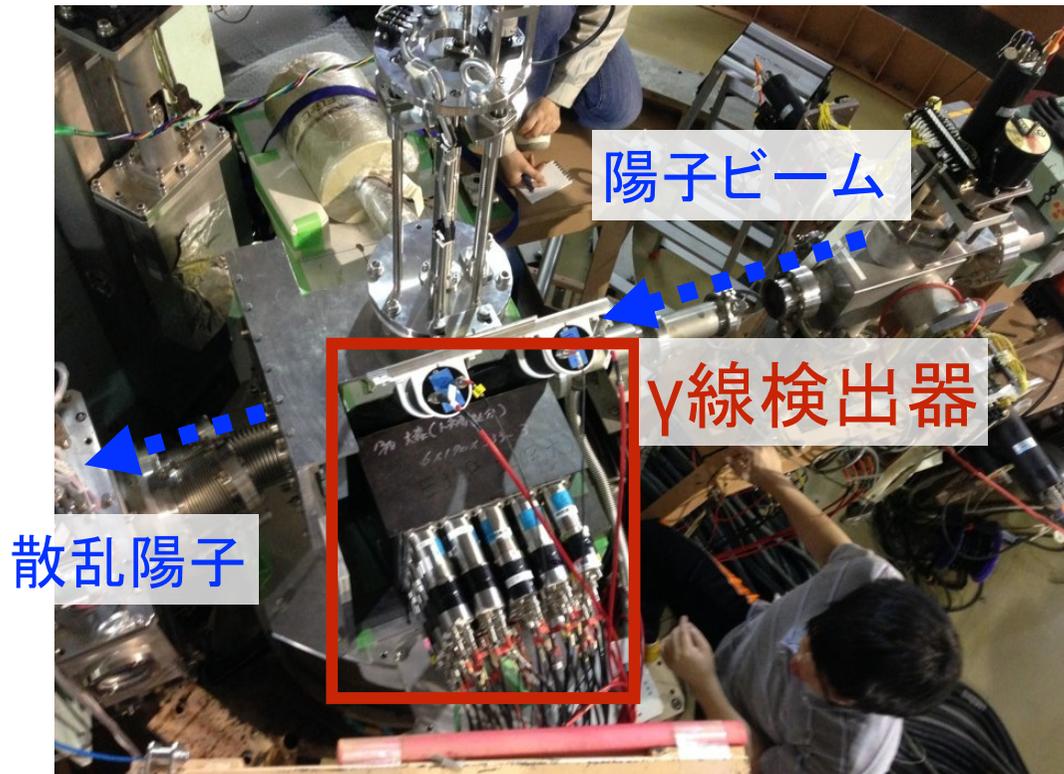
曲率から散乱陽子の
エネルギー($E_{p'}$)を計算



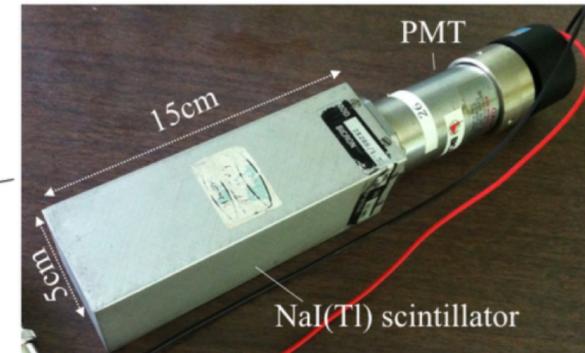
原子核に与えた運動エネルギー(励起エネルギー)を精密に測定できる

γ 線検出器(NaI)

γ 線検出器



NaI(Tl) scintillator+PMT
(2"×2"×6")

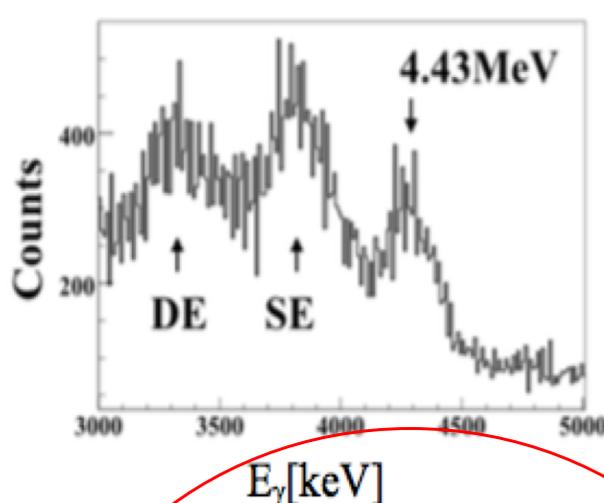
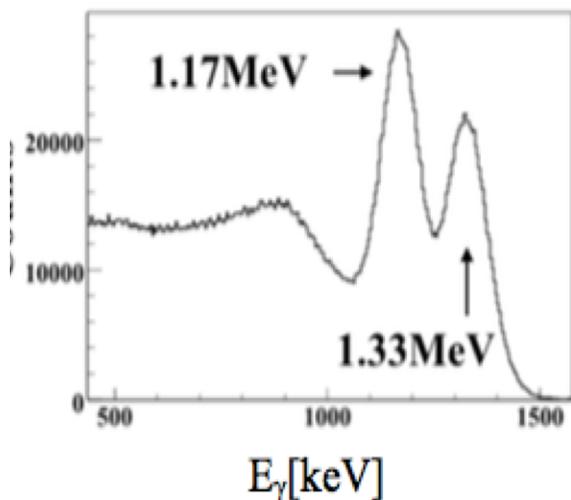


ターゲットと陽子ビームの散乱によって出てくる信号 (γ 線)を検出

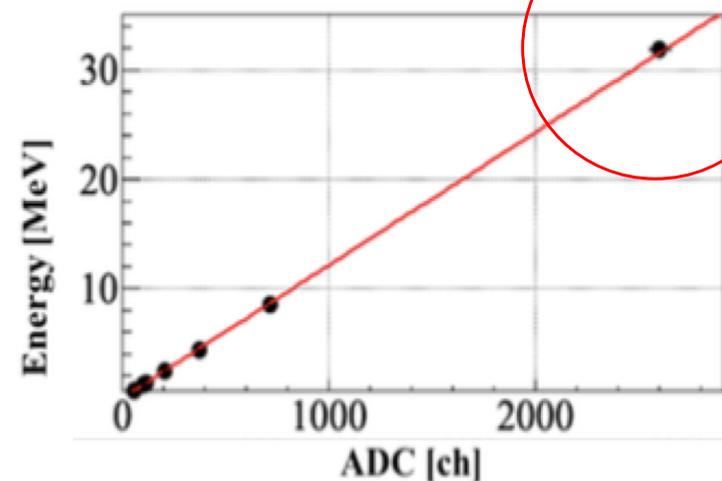
→ γ 線が検出器内でのエネルギー損失を最終的に電気信号に変え測定

NaI(Tl)のエネルギー線形性 ($E_\gamma = 1-34\text{MeV}$) の 実験前確認

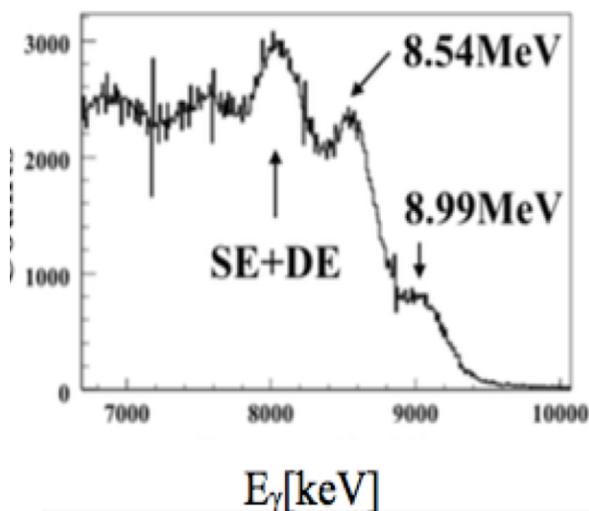
^{60}Co Energy Spectrum $^{241}\text{Am}+^8\text{Be}$



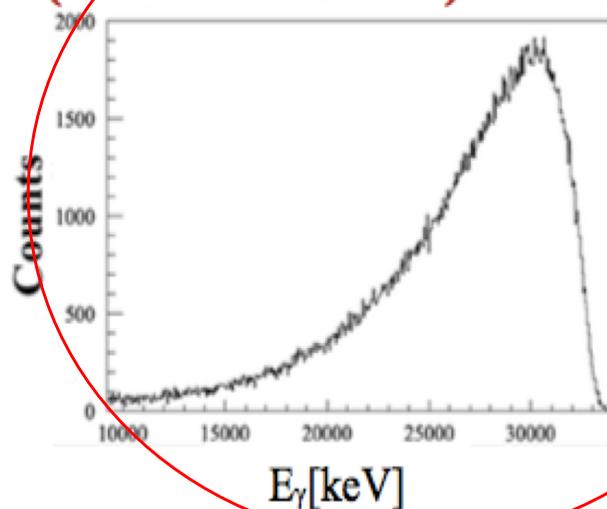
Pulse-height Linearity



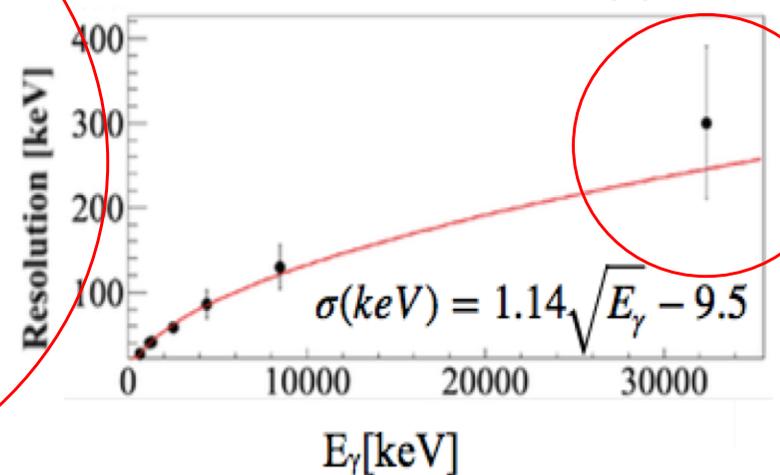
$^{252}\text{Cf}+\text{Ni}$



(NewSUBARU)* 33MeV



エネルギー分解能(σ)



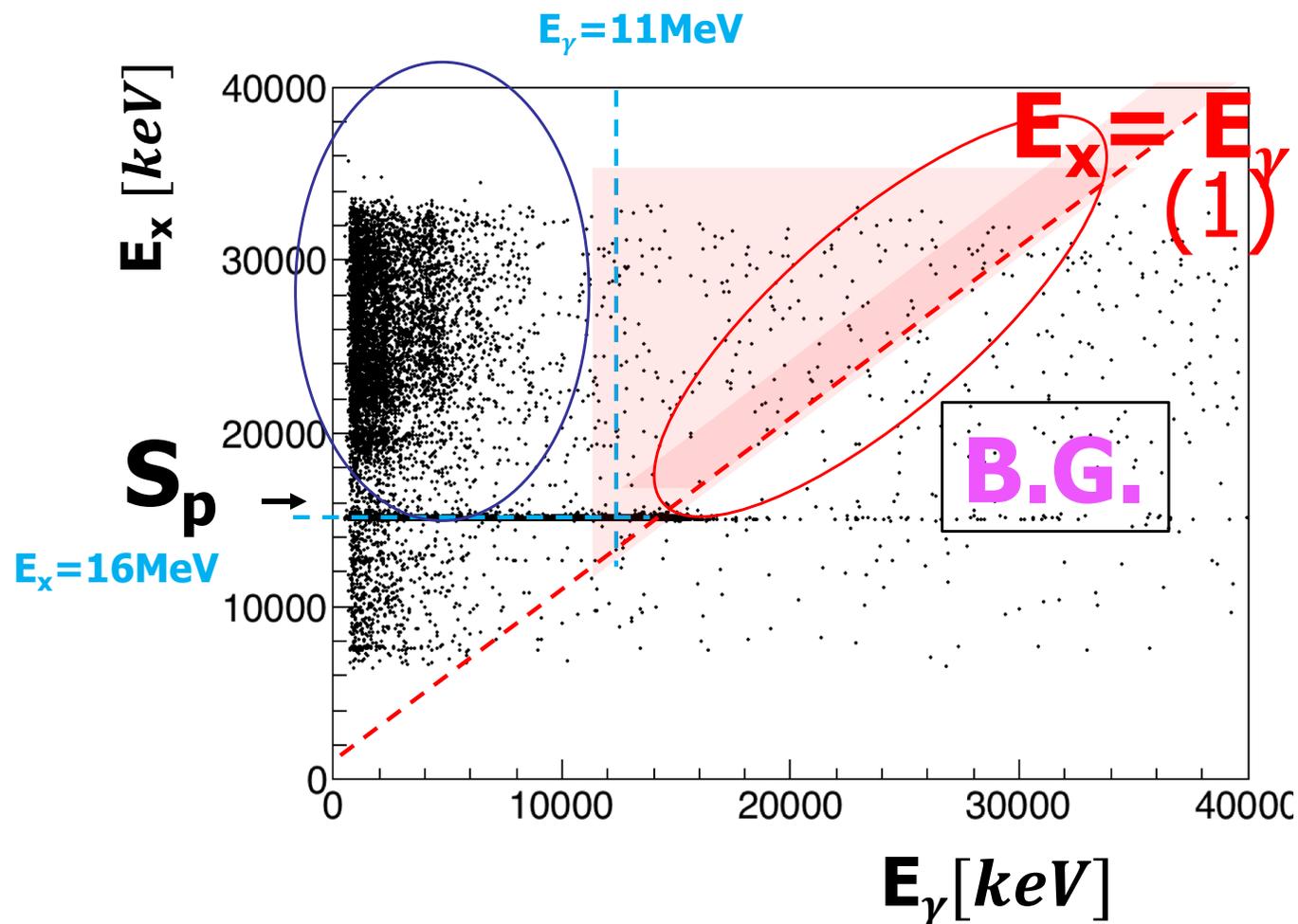
2次元: E_x - E_γ 分布

粒子崩壊と電磁崩壊の探索領域

粒子崩壊: 青印

直接電磁崩壊: 赤印

$E_x - E_\gamma > 0$; $E_\gamma > 11$ MeV、
 $16 < E_x < 34$ MeV.



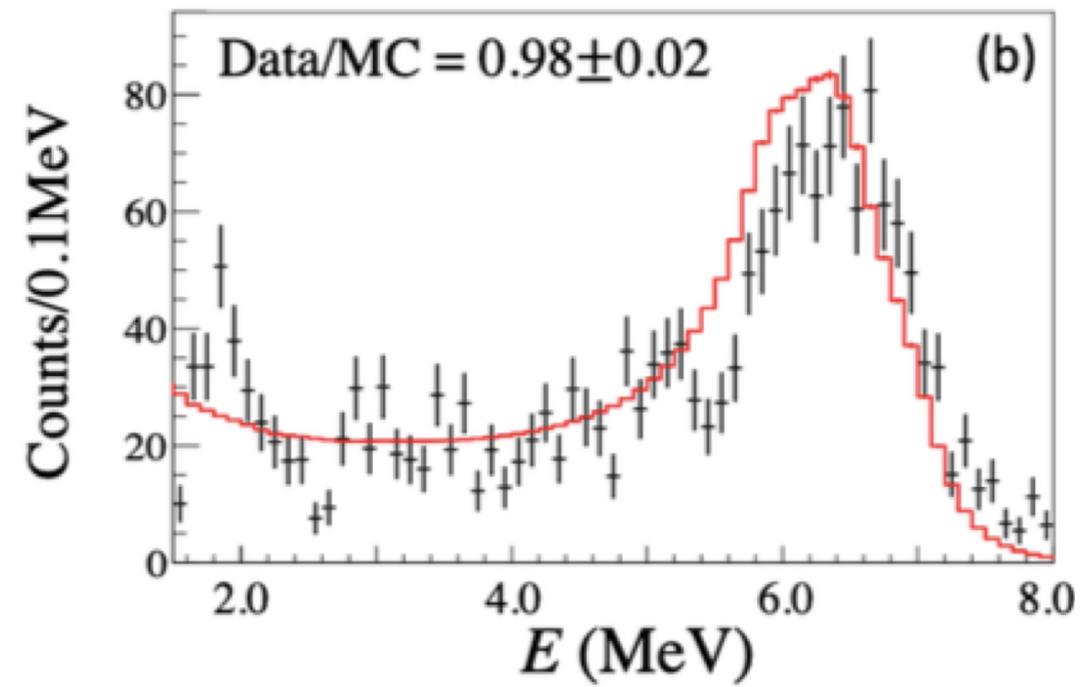
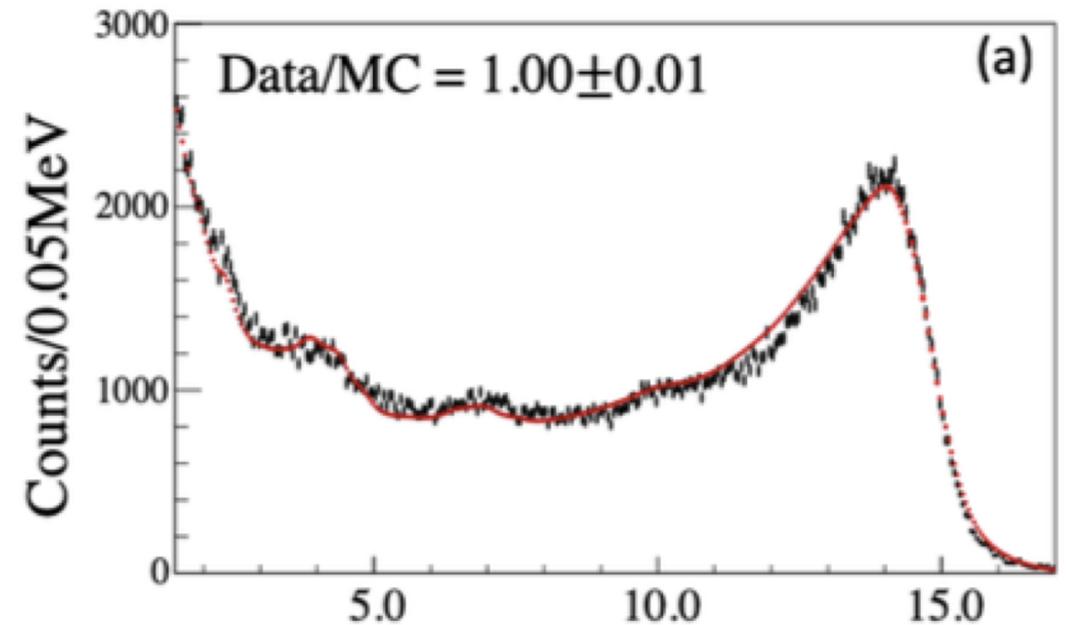
実験中、既知の γ 線放出率 $R_\gamma(E_x)$ (15.1MeV, 6.9MeV) を5%精度でモニター(in-situ Calibration)

- $^{12}\text{C}(15.1\text{MeV}, 1^+, T=1)$

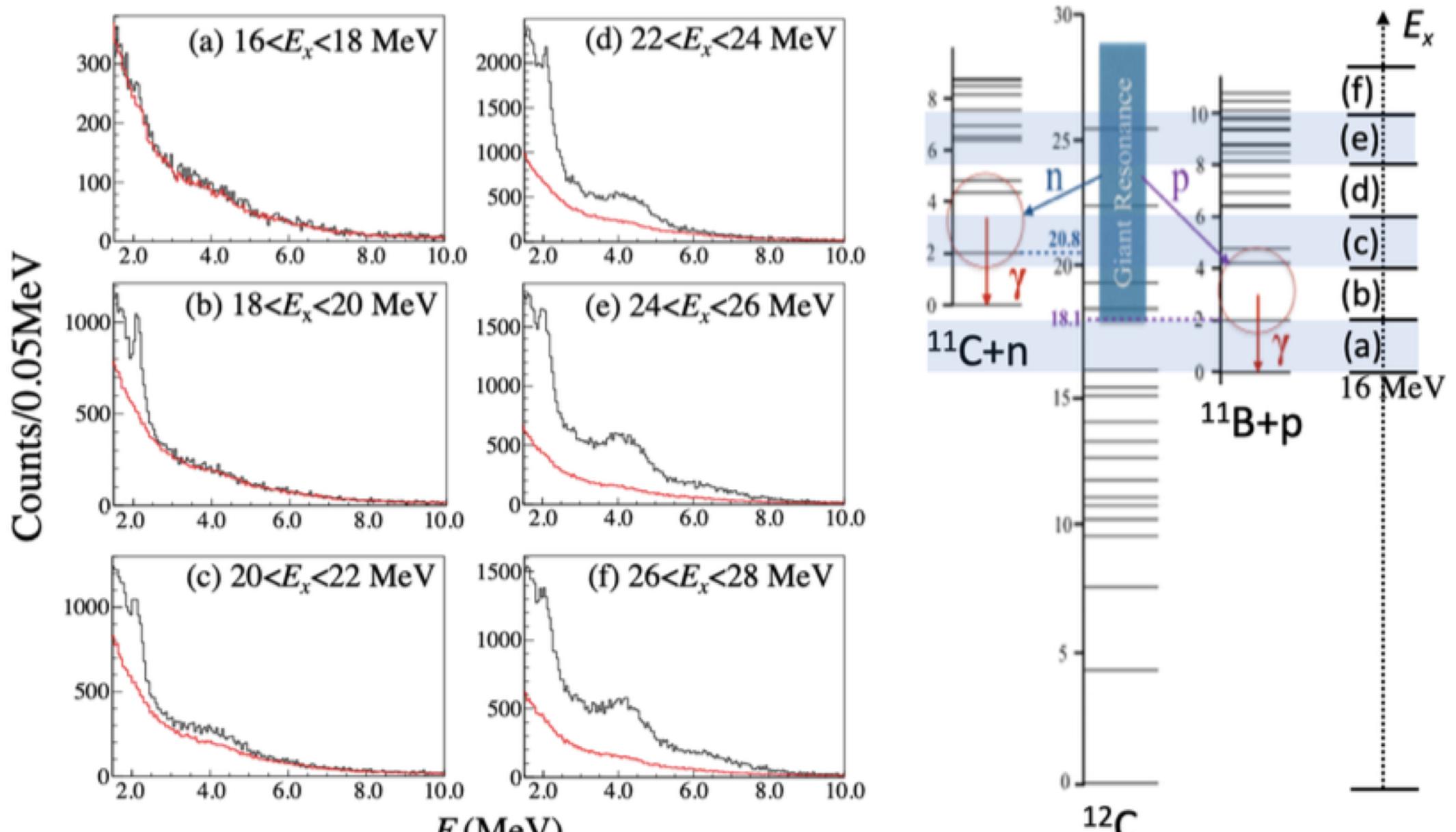
$$(\Gamma_\gamma/\Gamma = 0.96 \pm 0.04).$$

- $^{16}\text{O}(6.9\text{MeV}, 2^+, T=0)$

$$\Gamma_\gamma/\Gamma = 1.0$$



γ 線スペクトルを E_x 毎に測定、粒子崩壊の確認(^{12}C)



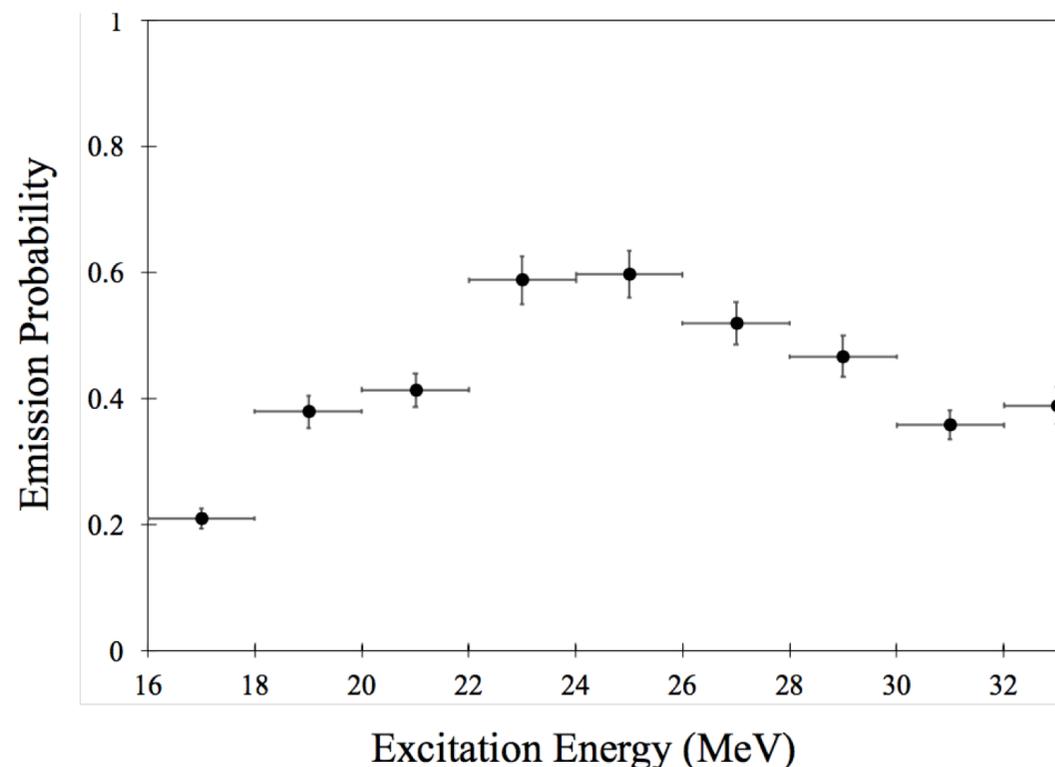
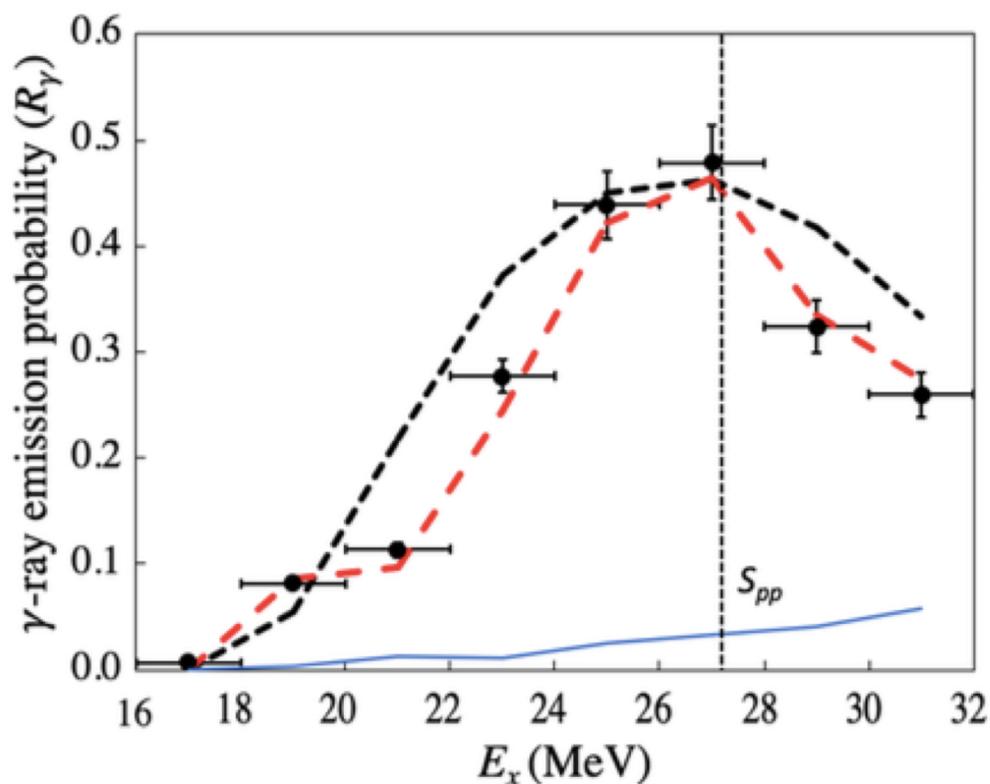
粒子崩壊での γ 線放出率($R_\gamma(E_x) = \sigma_{p,p\gamma}/\sigma_{p,p}$)

- データ(---)は統計計算(---)より30-40%低い。統計計算=角運動量保存を考慮し、光学模型の下で透過率($E_x \rightarrow$ 崩壊)を計算する。

$$T(E_x \rightarrow a + (A, i)) = \sum_{S=|J_A^i - s_a|}^{J_A^i + s_a} \sum_{L=|J_x - S|}^{J_x + S} T_L^a(\epsilon_a);$$

炭素 ^{12}C

酸素 ^{16}O



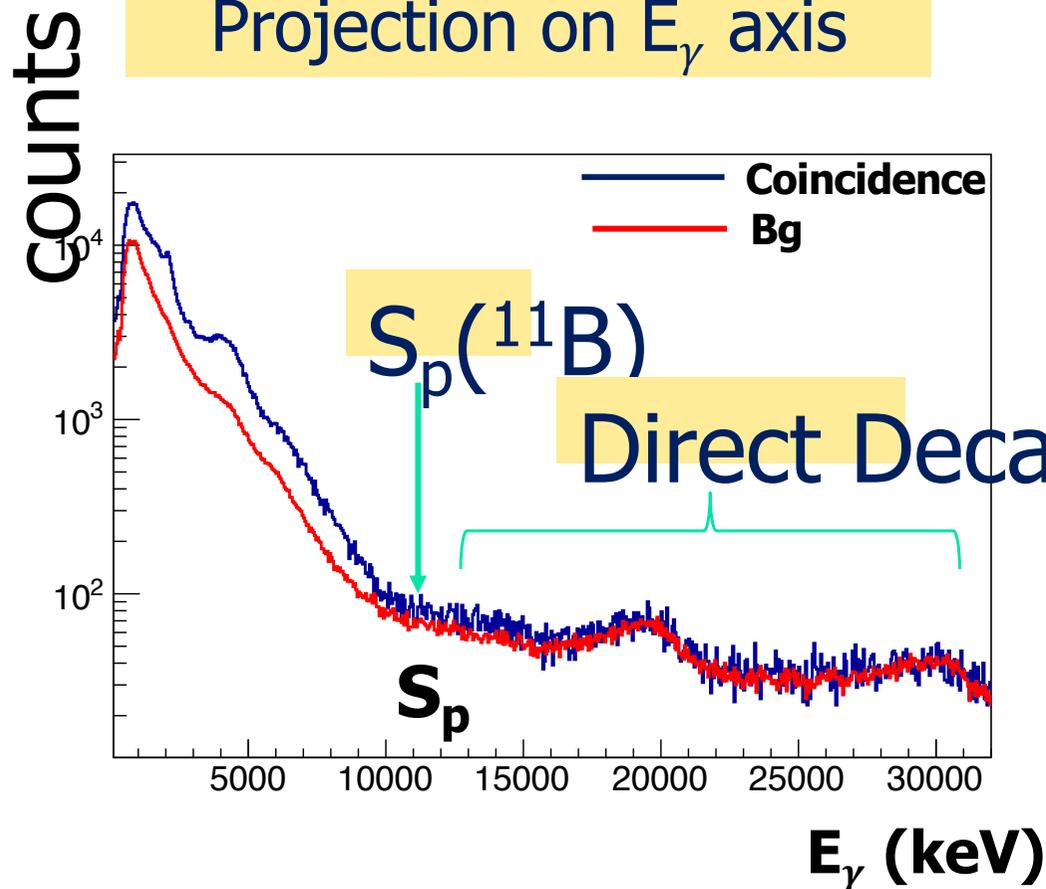
ここからはPreliminary

^{12}C 直接電磁崩壊解析

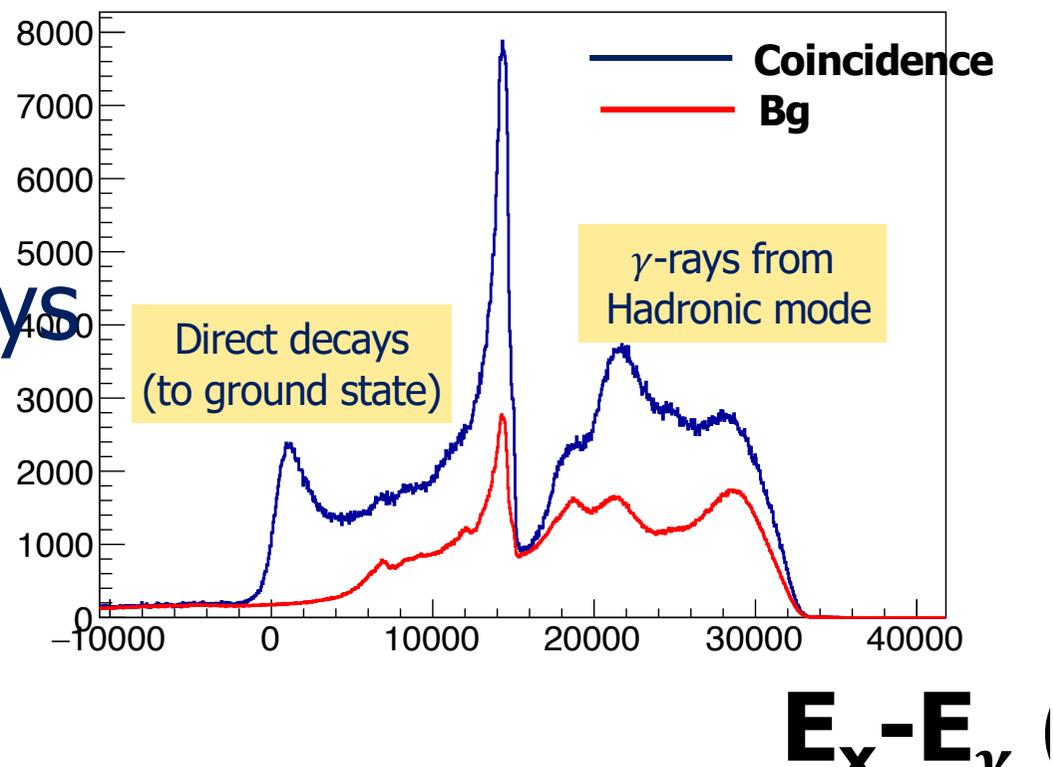
(1) E_γ では信号は見えない。(2) $E_x - E_\gamma$ では見える。

$E_x - E_\gamma = 0$ corresponds to the direct decay events.

Projection on E_γ axis

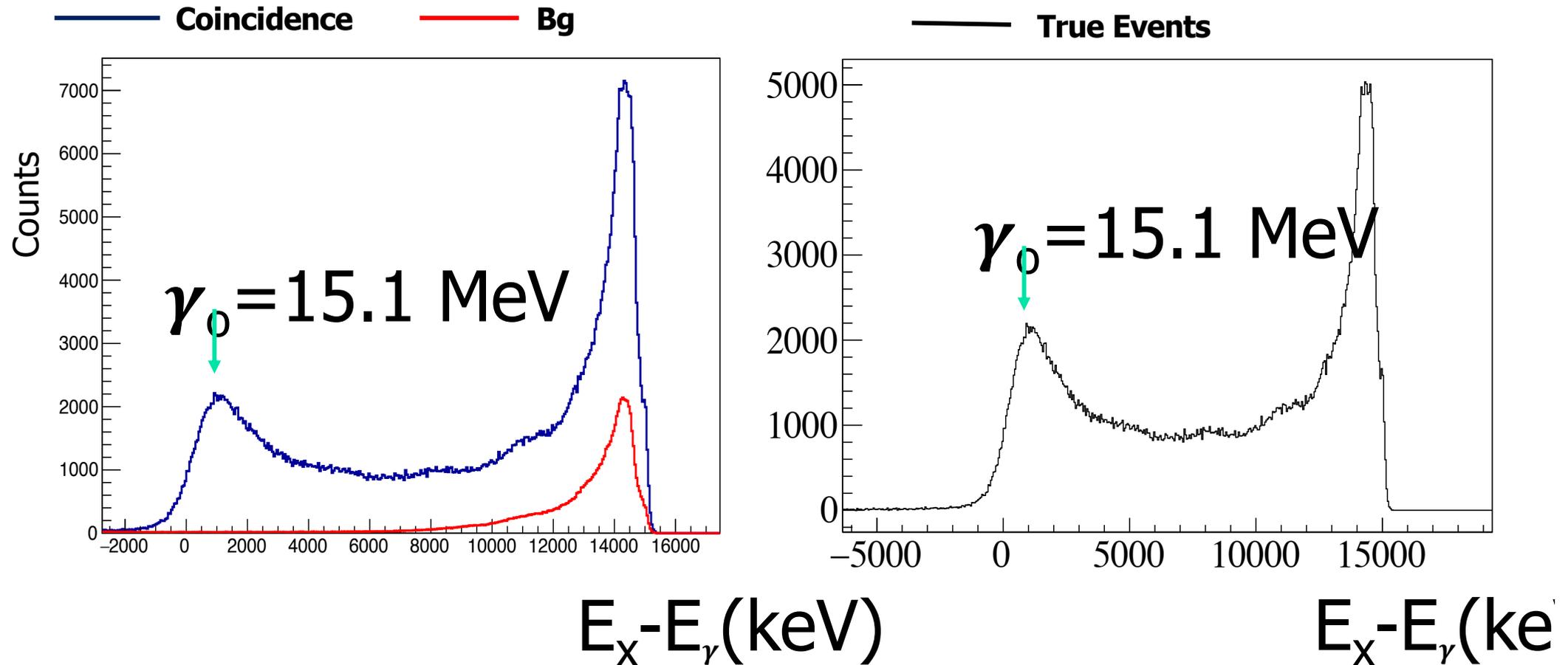


Projection on $E_x - E_\gamma$ axis



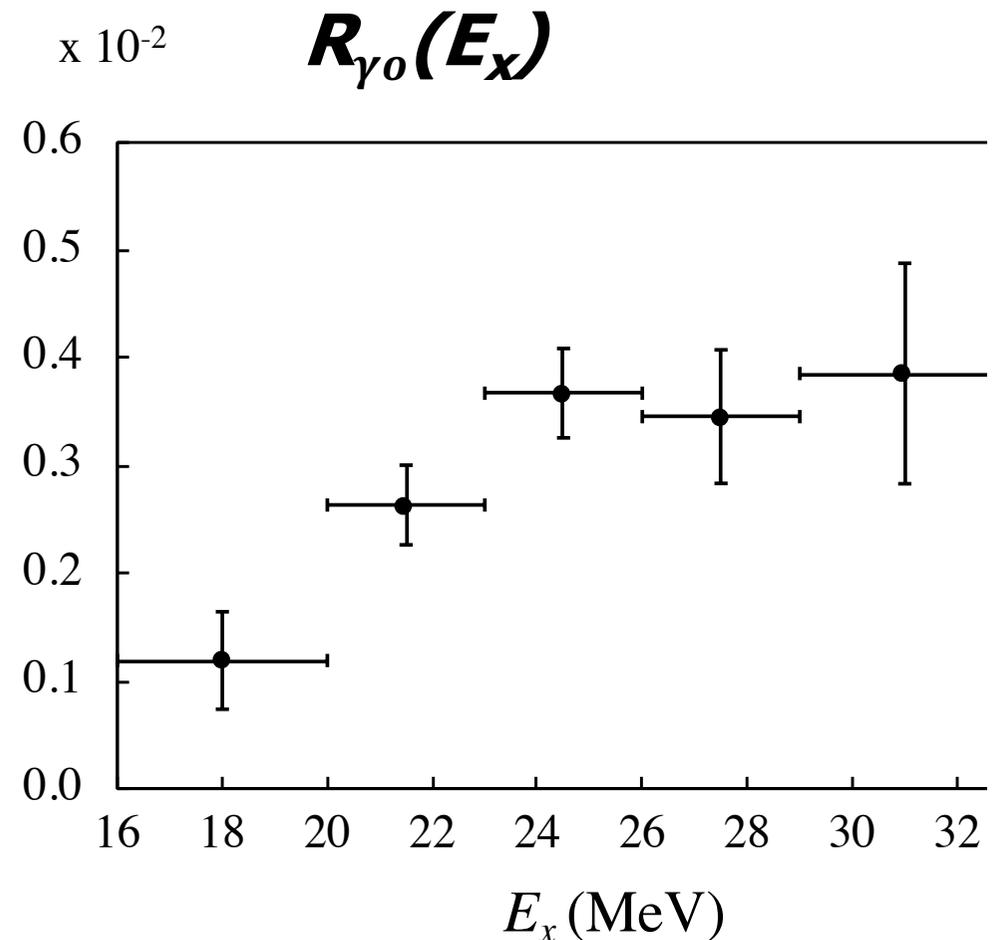
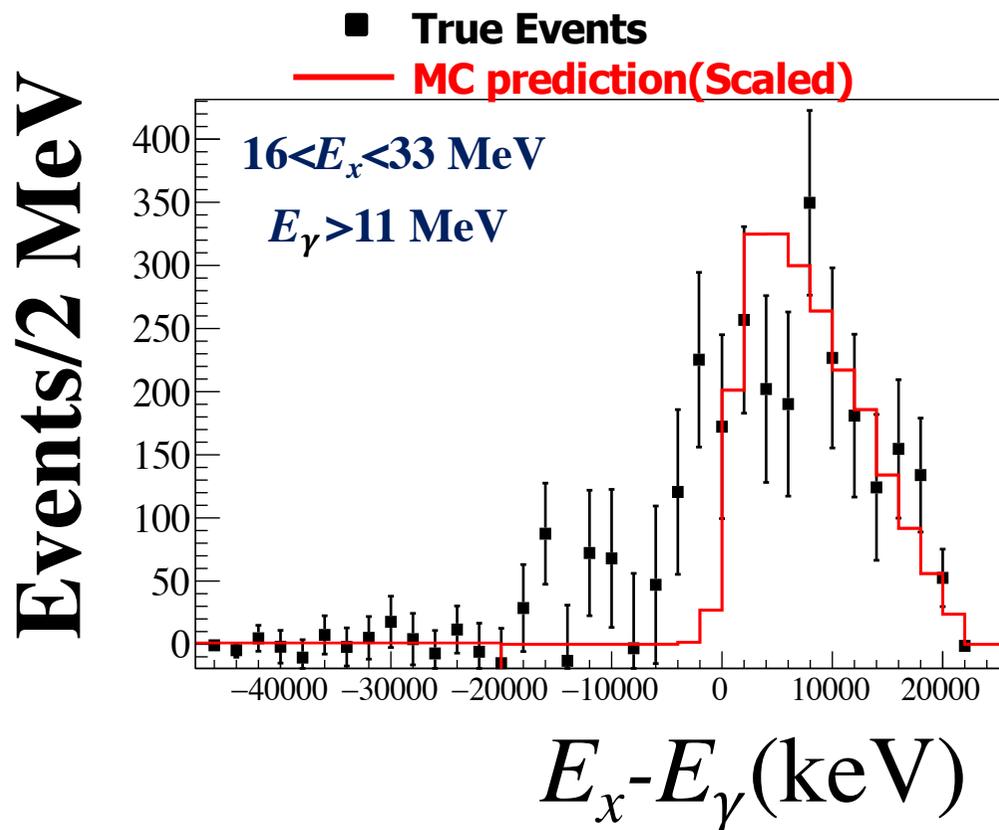
Check for 15.1 MeV ($14.9 < E_x < 15.4$ MeV)

$E_x - E_\gamma$ plots are shown for 15.1 MeV.



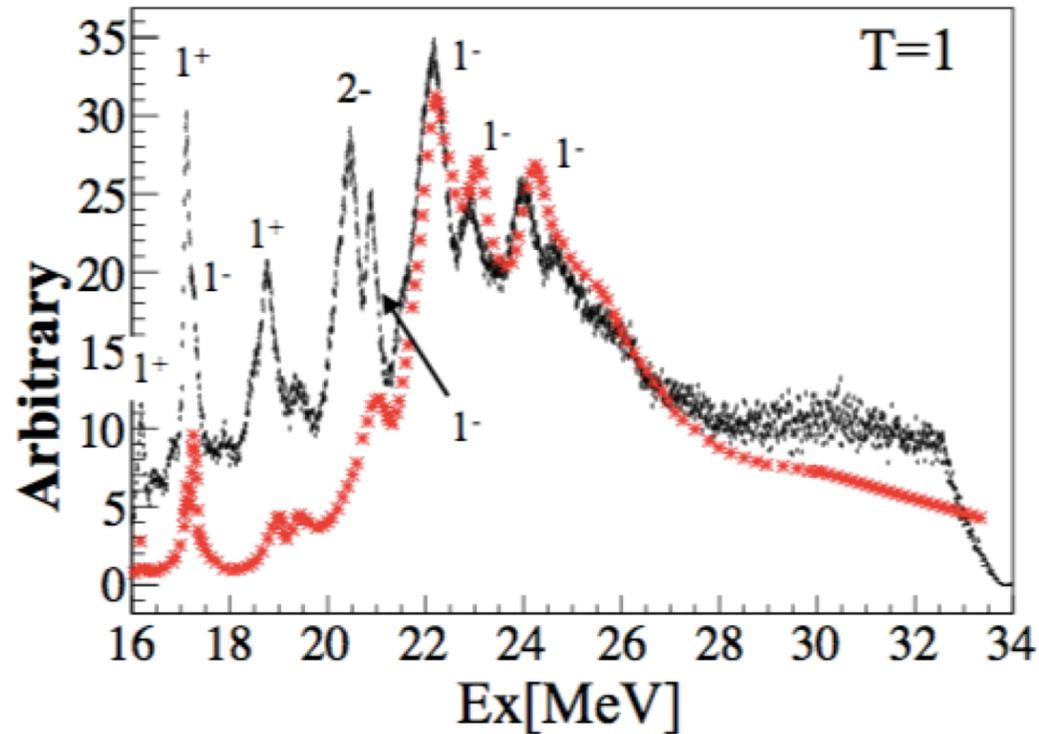
16大共鳴($E_x=16-32\text{MeV}$)からの直接電磁崩壊測定 E_x-E_γ 分布で信号が見える。

- ^{12}C の巨大共鳴($E_x=16-32\text{MeV}$)は $E_\gamma = 11-32\text{ MeV}$ の γ 線放出率 $0.37 \pm 0.04 \pm 0.04\%$ を持つ。

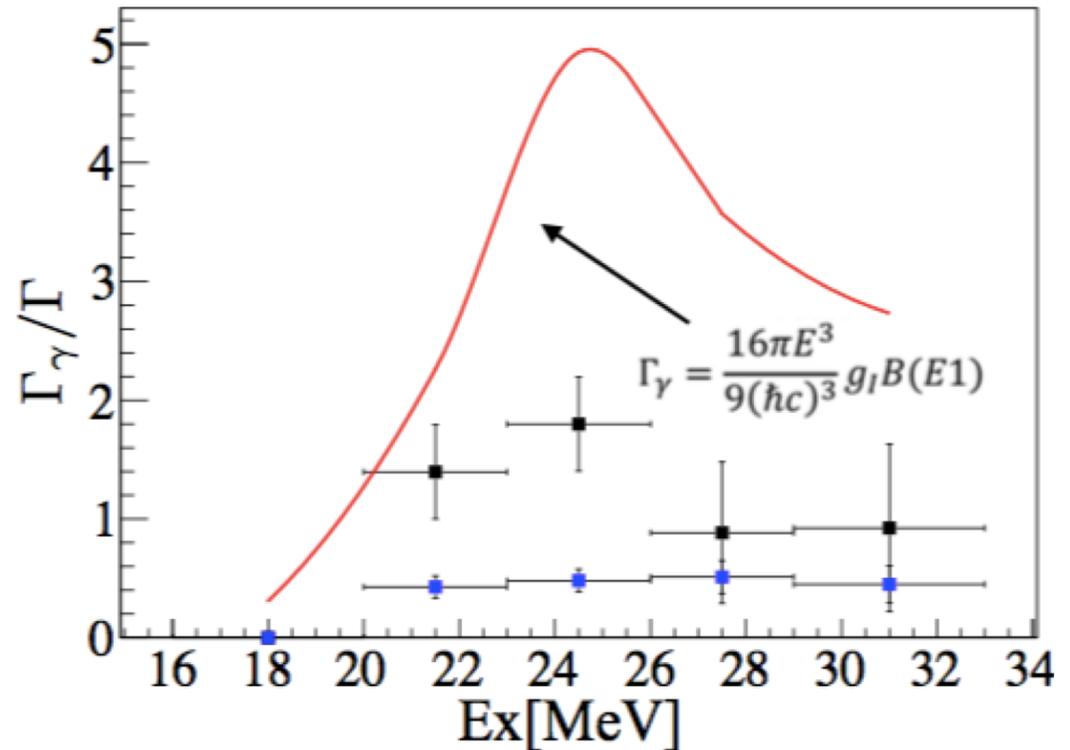


17 直接電磁崩壊の測定 ^{16}O

酸素の場合も、見える。



$$\times 10^{-2} \quad R_{\gamma 0}(E_x)$$



3. SN ν 's の事象数評価

ESTIMATION OF SUPERNOVA NEUTRINO EVENTS

E398 results are applied for the estimation of $N_{NC\gamma}$ for Super-K and KamLAND.¹²

The expected number of events from the core-collapse:

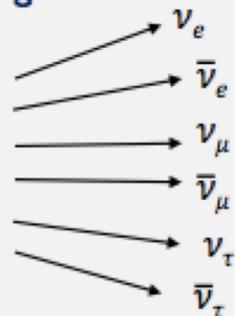
$$N_i = Flux(\nu_j) \times n_{target} \times \sigma_i$$

Where $Flux(\nu_j) = \frac{L_{\nu_j}}{\langle E_{\nu_j} \rangle 4\pi D^2}$ and σ_i is the cross section for reaction i

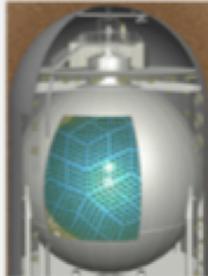
$D = 10$ kpc

Total Gravitational Energy

$$L = 3 \times 10^{53} \text{ ergs}$$



L divided equally among all species $L_{\nu_j} = \frac{L}{6}$

KamLAND (1kton)	SK (32.48kton)
	
n_{target} is number of targets	
$n_{^{12}\text{C}} : 4.30 \times 10^{31}$	$n_{^{16}\text{O}} : 1.09 \times 10^{33}$
$n_p : 8.60 \times 10^{31}$	$n_p : 2.17 \times 10^{33}$

KamLAND collaboration: Phys. Rev. C 84 (2011) 035804.

ASSUMPTIONS

13

The NC events are assumed to be induced by only ν_x (ν_μ, ν_τ and their anti particles).

Equilibrium Temperature

$T_{\nu_e} = 3.5 \text{ MeV}$
$T_{\bar{\nu}_e} = 5 \text{ MeV}$
$T_{\nu_x} = 8 \text{ MeV}$

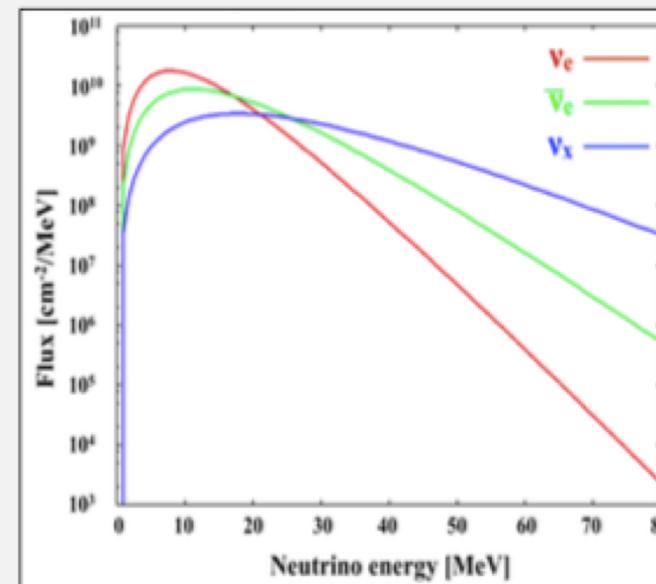
Supernova neutrino spectra is approximated by that of Fermi-Dirac distribution.

$$FD(E, T_{\nu_j}) = \frac{0.553}{T_{\nu_j}^3} \frac{E^2}{1 + \exp E/T_{\nu_j}}$$

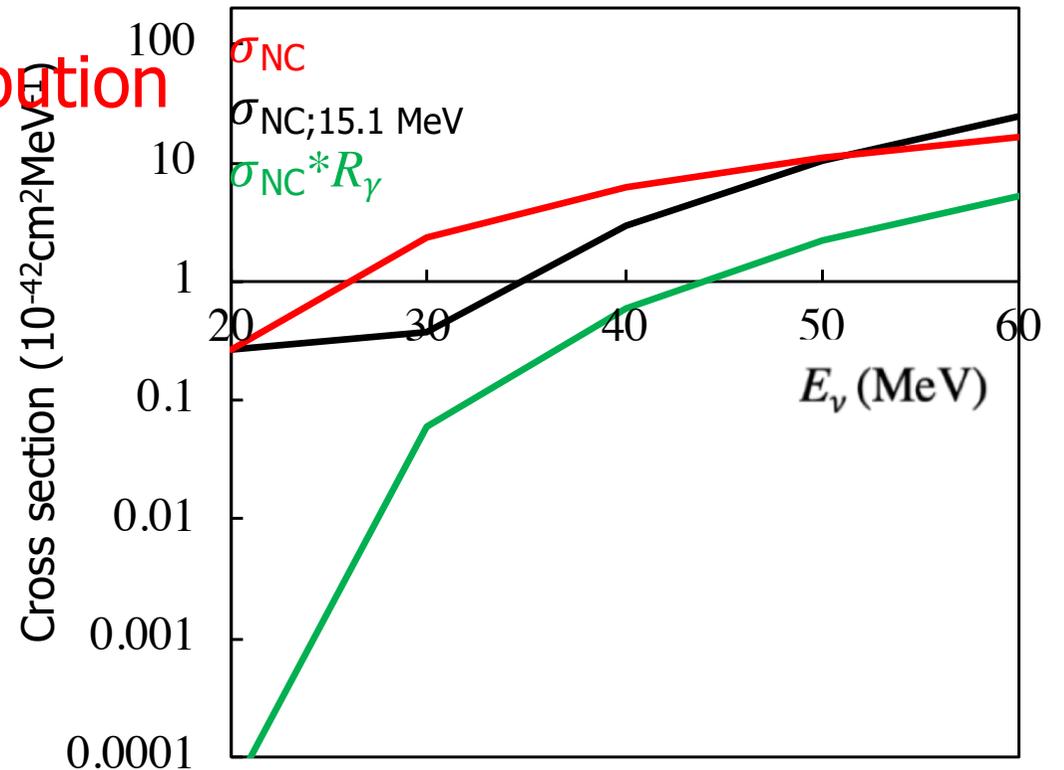
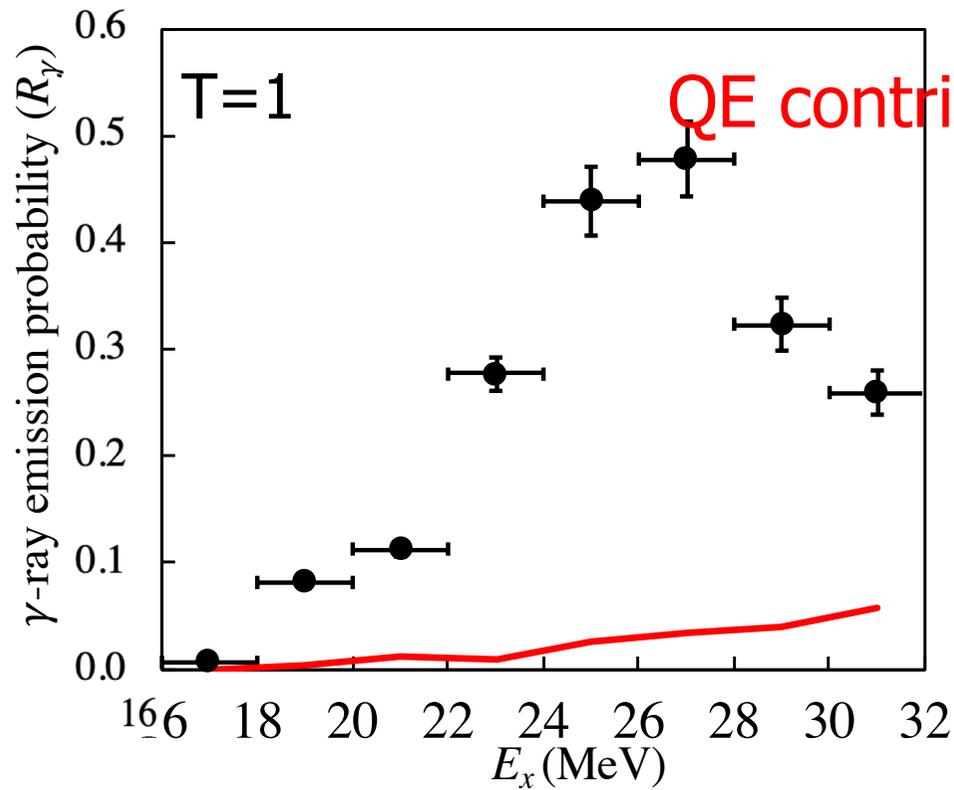
Solving Analytically, we get Average Energy as:

$$\langle E_{\nu_j} \rangle = 3.15 \times T_{\nu_j}$$

Now, we need cross section information



Carbon case:



炭素標的の場合

- 15.1MeVの違いはCross sectionの違いか。
- $E_x > 16\text{MeV}$ については、我々のデータのみ。ただ、15.1MeVに比べて小さい。

$$N_{\gamma}^{NC} = n_{tar.} \int_0^{E_{\nu}^{max}} dE_{\nu} \frac{d\Phi}{dE_{\nu}}(E_{\nu}) \left[\int_{E_x=16 \text{ MeV}}^{E_x=32 \text{ MeV}} dE_x \frac{d\sigma(E_x, E_{\nu})}{dE_x} \times R_{\gamma}(E_x) \right]$$

Reaction	Present work				Previous work
	MB	FD	NK1	NK2	(KamLAND collab.)
$p(\bar{\nu}_e, e^+)n$	303	301	129	116	KamLAND Collab.
$^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}^*(15.1 \text{ MeV})$	45	47	15	14	For NC events
$^{12}\text{C}(\nu, \nu')^{12}\text{C}^*(E_x > 16 \text{ MeV})$	7	9	1.1	1.2	F.D., T = 8 MeV

Table 4.2 Expected number of neutrino events from a core-collapse supernova to be detected at KamLAND (1kton).
 For CC events F.D., T=5 MeV

C01の活動の中での2019まとめ

■ RCNP E398 実験

- 炭素・酸素原子核の巨大共鳴の粒子崩壊での γ 線放出率： ^{12}C 論文投稿、 ^{16}O 論文準備
- 炭素・酸素原子核の巨大共鳴の電磁崩壊での γ 線生成率：系統誤差のチェック要。
- 粒子崩壊と電磁崩壊と組み合わせ、巨大共鳴崩壊の原子核物理としてのより良い理解。巨大共鳴の直接崩壊 $E_\gamma=16\text{-}35\text{MeV}$ の生成率は、実験屋にとっては2次粒子(n,p,γ)の相互作用として重要。

■ E398 実験結果を使った応用

- 超新星爆発でのニュートリノ炭素・酸素中性カレント事象数を出す。
 - 中里/鈴木GrのFlux+鈴木(俊)断面積計算+E398実験結果で系統的な評価(3月国際会議までに詰める)

■ SK-Gd計画のための $^{157,155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ 解析とモデル作り

- $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ データ・モデルはPTEP受理された。
- $^{155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ 論文書き、進行中。
- 2γ 相関解析進行中。