

熱中性子捕獲反応 $^{157,155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ の γ 線エネルギー・角度分布の精密測定と γ 線生成モデル(ANNRI-Gd)について

作田誠(岡大理)、2019年8月24日「地下宇宙」研究会(大阪大学)

For ANNRI-Gd Collaboration (Okayama, JAEA, SRM, Mainz, EcolePolytechnique, Padova): K. Hagiwara, T. Tanaka, A. Ali, M.S. Reen, P.K. Das, S. Lorenz, I. Ou, T. Sudo, Y. Yamada, T. Mori, R. Dhir, Y. Koshio, M. Sakuda, T. Yano, A. Kimura, S. Nakamura, N. Iwamoto, H. Harada, M. Wurm, W. Focillon, M. Gonin, E.Gazzola and G. Collazuol

概要(とまとめ):

1. 热中性子反応 $^{157,155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ からの γ 線のエネルギー分布と角分布の高統計、高エネルギー分解能測定をJPARC-ANNRI測定装置を用いて行った。
2. また、 γ 線エネルギー分布を再現するMonte Carloモデル(ANNRI-Gd Model)を作成した。[論文1-2]
3. これらの結果について報告する。

論文:

- (1) γ -ray spectrum from thermal neutron capture on ^{157}Gd , K. Hagiwara et al., PTEP 2019, 023D01, pp26.
- (2) γ -ray spectrum from thermal neutron capture on $^{155, \text{nat}}\text{Gd}$, T.Tanaka et al., arXiv:1907.00788[nucl.ex], PTEPへ投稿済・コメント修正中, pp13. //

- (3) 2γ angular correlations in $^{155, 157}\text{Gd}(n,\gamma)$ reaction, 原稿修正中(Preliminary).

* ANNRI-Gd model 公開 URL: http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~sakuda/ANNRI-Gd_ver1.html

- Already being used in SK-Gd, XENONnT and NEOS (Korea).

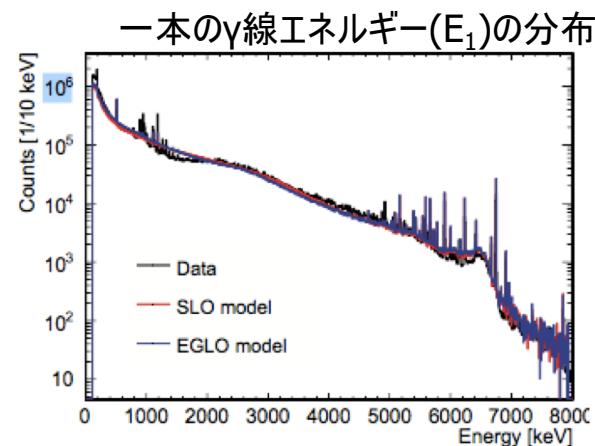
1) Gdを使う実験への応用増える。

1. 液体シンチレータ検出器

- θ_{13} ニュートリノ振動実験: DChooz, Daya Bay, RENO
- Sterile neutrino 探索: NEOS, PROSPECT, NEUTRINO-4, DNSS, JSNS²
- 暗黒物質探索:LZ

2. 水チェレンコフ検出器

- SRN探索他: SK-Gd
- 暗黒物質探索: XENONnT (nVETO)



Gd応用での留意点: Gd反応で合計8MeVの γ 線が“2-8個(平均4個)出る。検出器を立体角100%覆わないか、 γ 線エネルギー検出に閾値(~MeV)があると、検出効率の評価に誤差が出る。 $E_{\text{sum}} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 8\text{MeV}$ → γ 線生成分布が正確なGd反応モデルが重要。

2) 低エネルギー中性子原子核反応 $n+A$ ($A>25$)

- $E_n < 1\text{MeV}$: $(n,p), (n,\alpha)$ 反応はCoulomb障壁のため抑制される。
- $E_n < 200\text{keV}$ ($\sim 1^{\text{st}}$ 励起状態):
 (n,n) 、 (n,γ) のみ可能。
- $E_n < 1\text{keV}$: (n,γ) 支配的。
- 特徴: 共鳴が現れる。

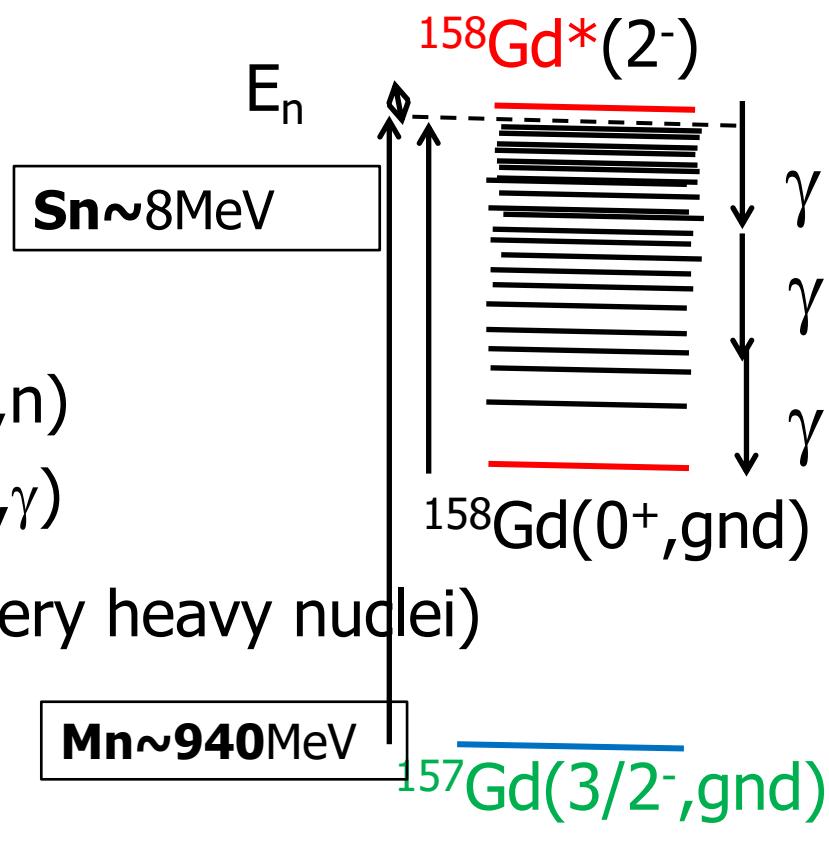
➤ $n+A \rightarrow C^* \rightarrow n+A$ (elastic) (n,n)

➤ $n+A \rightarrow C^* \rightarrow B+\gamma$ (capture) (n,γ)

$(n+A \rightarrow D+E$ (fission) for U or very heavy nuclei)

- Breit-Wigner 公式 (n,γ) :

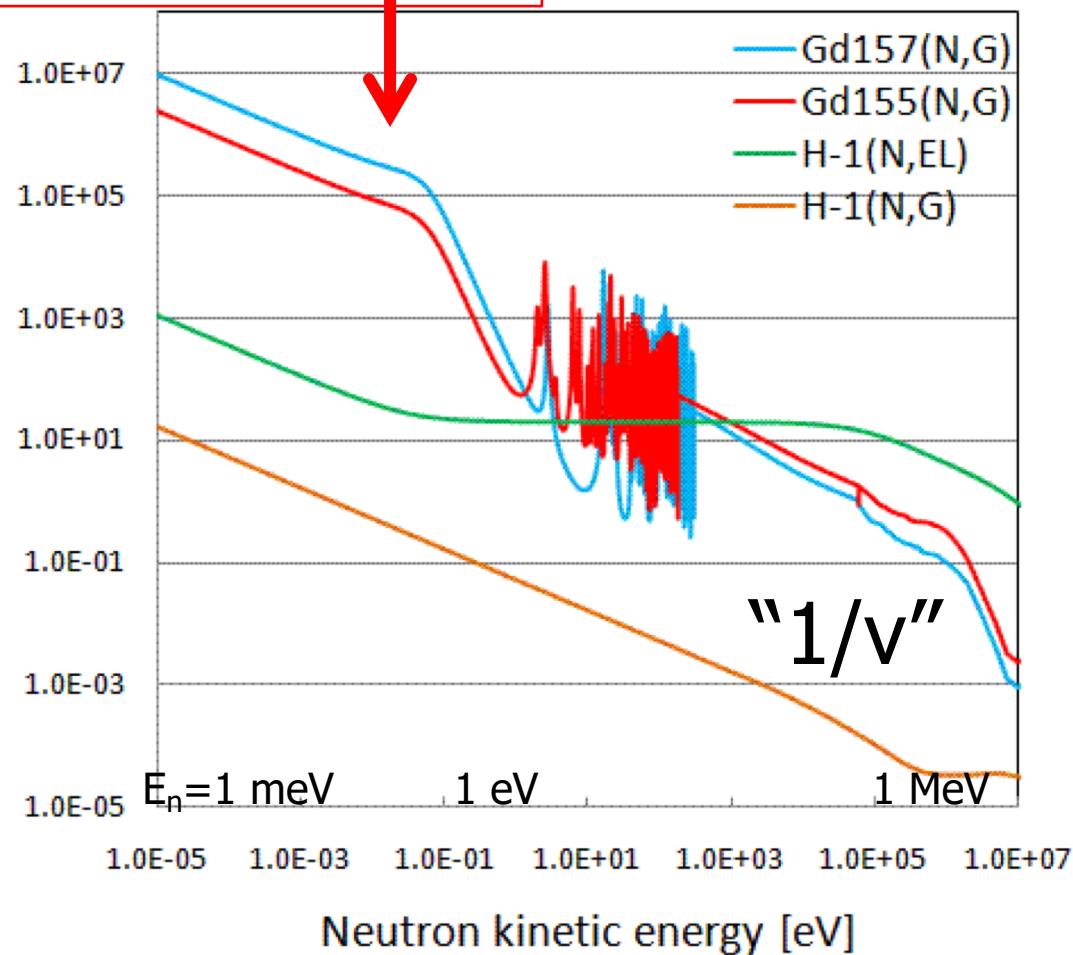
$$\sigma_\gamma = \sigma_0 \left(\frac{E_0}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{1 + 4(E_0 - E)^2 / \Gamma^2}$$



中性子捕獲反応断面積Gd(n,γ) vs E (eV)

熱エネルギー領域に共鳴吸収が存在する元素: ^{113}Cd , ^{149}Sm , ^{151}Eu , $^{157,155}\text{Gd}$.

Thermal energy 25meV



Element	Cross section [barn]
Gd 155	60900.
Gd 157	254000.
Proton	0.3326

1. JPARC-MLF Experiment Gd(n, γ)

- 2012 B0025 -natural Gd target

Experimental period : 2013/Mar/14-17

Target : Natural Gd(99.99% 5mm×5mm×10,20 μ m)

Total event : 3×10^9 events

Calibration source : ^{60}Co , ^{137}Cs

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

Experimental period : 2014/Dec/11-16

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

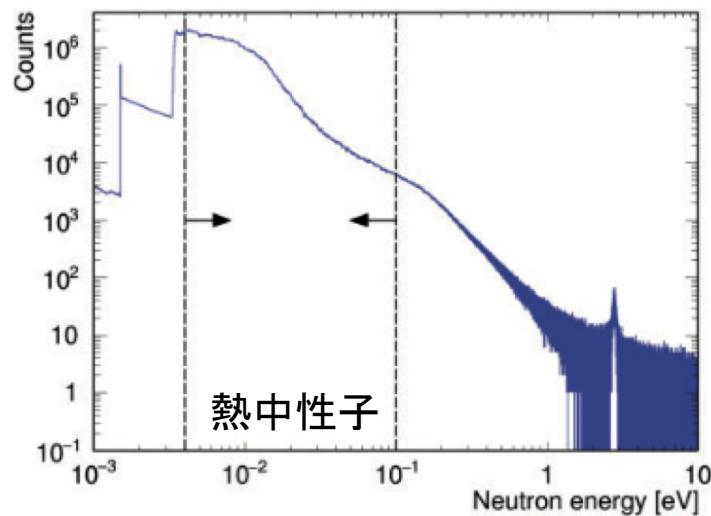
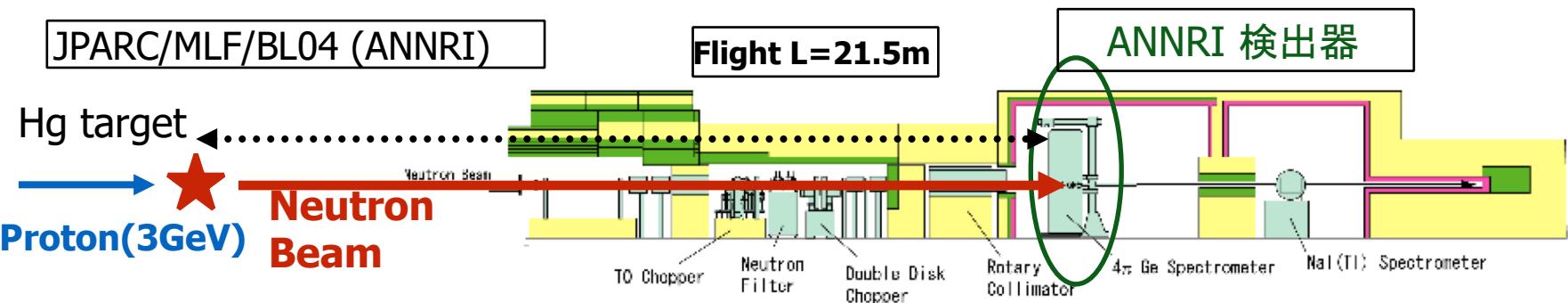
Total event : 8×10^9 events

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



1-2) JPARC 中性子Beamline (BL04) とANNRI 検出器

- JPARC/BL04 Pulsed Neutron Beam
 - $1.3 \times 10^{11} \text{n} / (\text{s/m}^2)$ at $E_n = 1.5\text{-}25 \text{ meV}$ at Power 300kW, ($\Delta E_n / E_n \sim 1\%$),

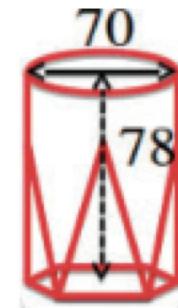
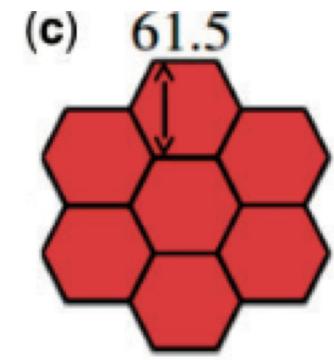
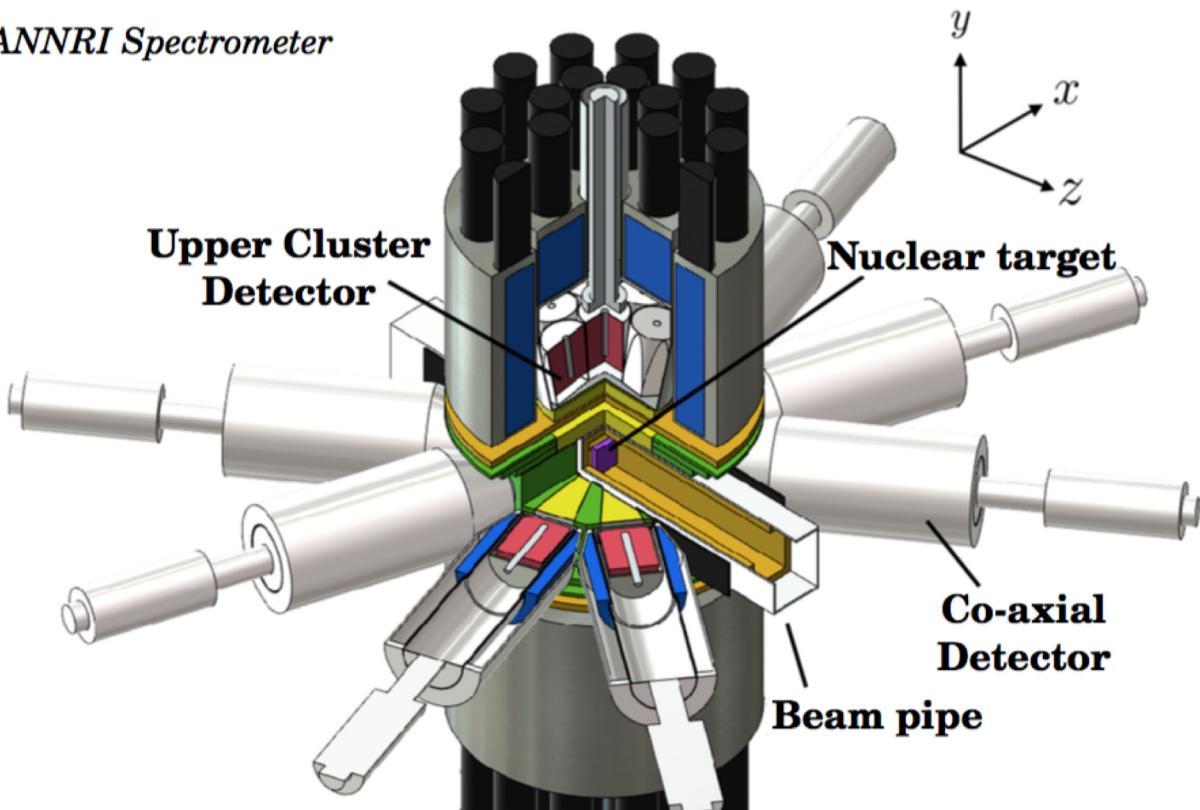


■ 事象毎の中性子エネルギーがTOF 21mにより $\Delta E_n / E_n \sim 1\%$ で測定できる。

ANNRI (Accurate Neutron-Nucleus Reaction Measurement Instrument)

- ANNRI ゲルマニウム検出器($\Delta E_\gamma = 9\text{keV} @ 1.3\text{MeV}$)
 - Acceptance (Coverage) : Ge: Cluster 15%+Co-axial 1% = 16%
 - BGO VETO: 44%
- Ge結晶 1本クリーンヒット、周りのGe結晶をコンプトン抑制として解析する。Prompt γ が選べる。

(a) ANNRI Spectrometer



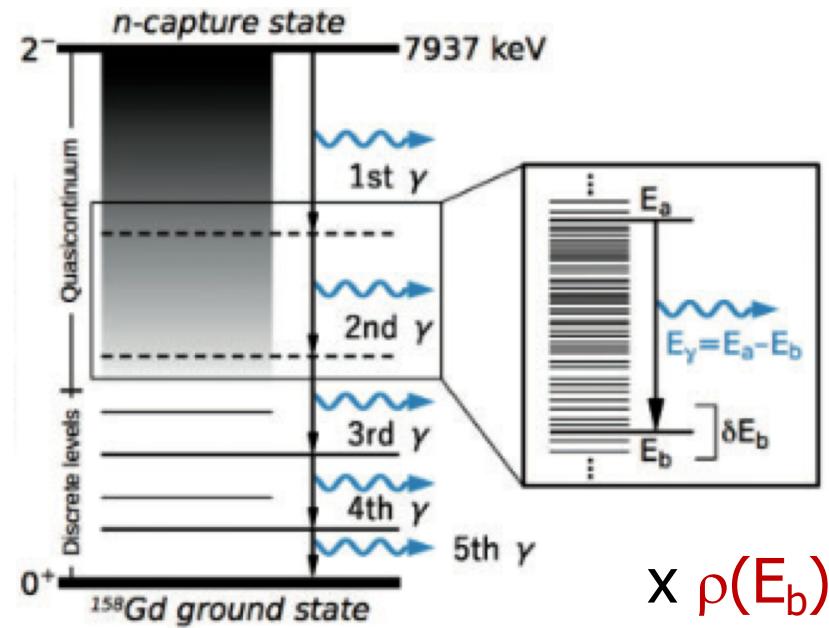
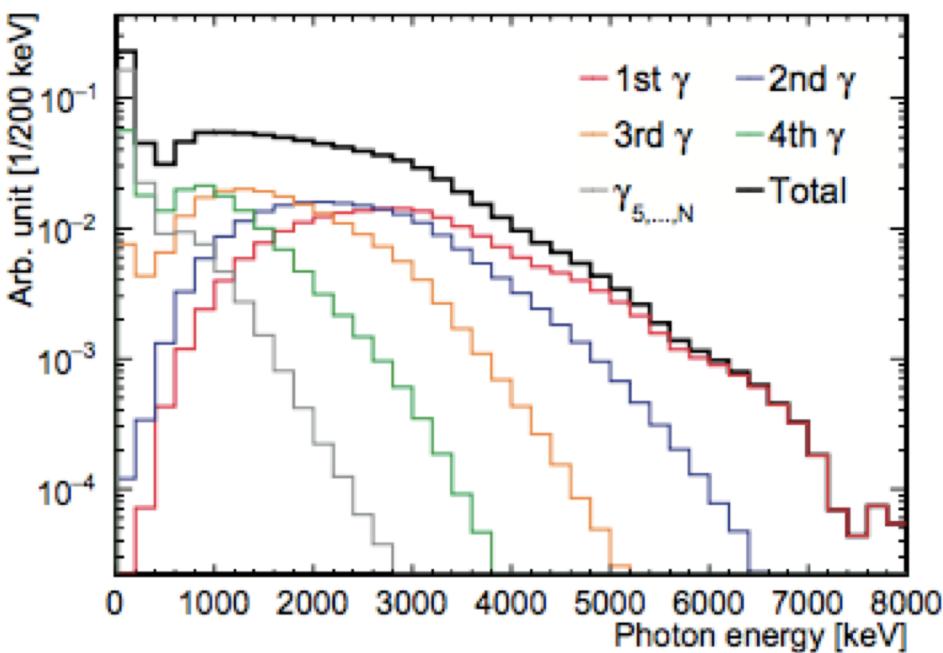
1-2) $^{157.155}\text{Gd}(n,\gamma)$ の γ 線分布の性質

p9

■ 確率分布 $P(E_a \rightarrow E_b)$, $E_\gamma = E_a - E_b$

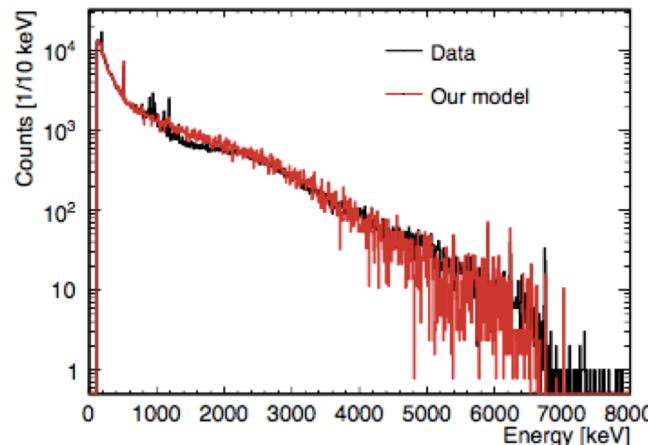
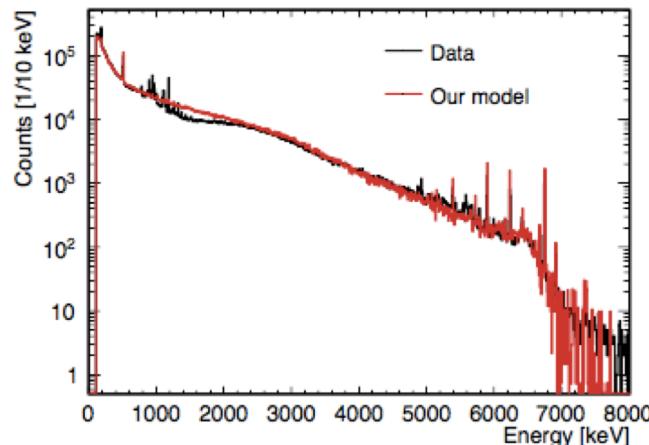
- ✓ Fermi Golden Rule: 確率分布 = |遷移行列|² * (終状態の準位数)
- ✓ E_γ^3 favors Large E_γ , $f(E_\gamma)$ favors Large E_γ , But $\rho(E_b)$ favors Very Small E_γ .
- ✓ $E_\gamma > 3\text{MeV}$ では確率分布そのままが見える。平均4個の γ 線放出、合計 $Q=8\text{MeV}$ 。

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

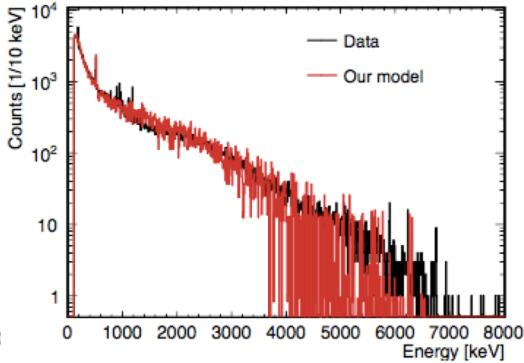
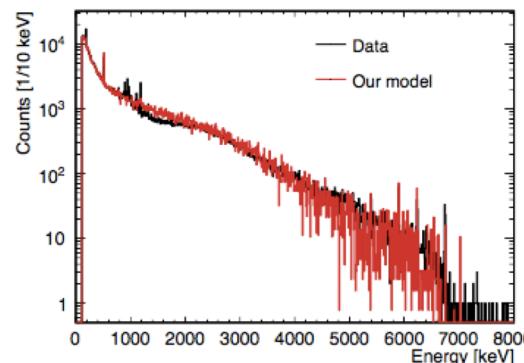
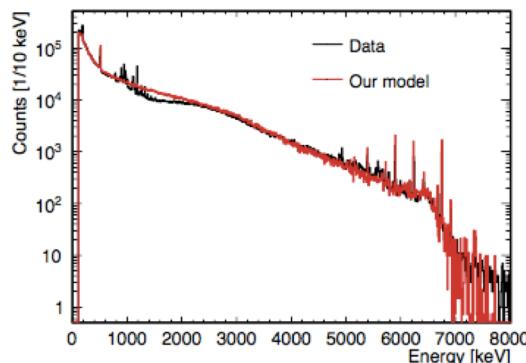


1-3) 結果： $^{157,155}\text{Gd}(n,\gamma)$ $E\gamma$ spectrum (Data) and MC(ANNRI-Gd model), for multiplicity=1,2,3,4. (p10)

- $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ $E\gamma$ (single) spectrum $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)$ $E\gamma$ spectrum



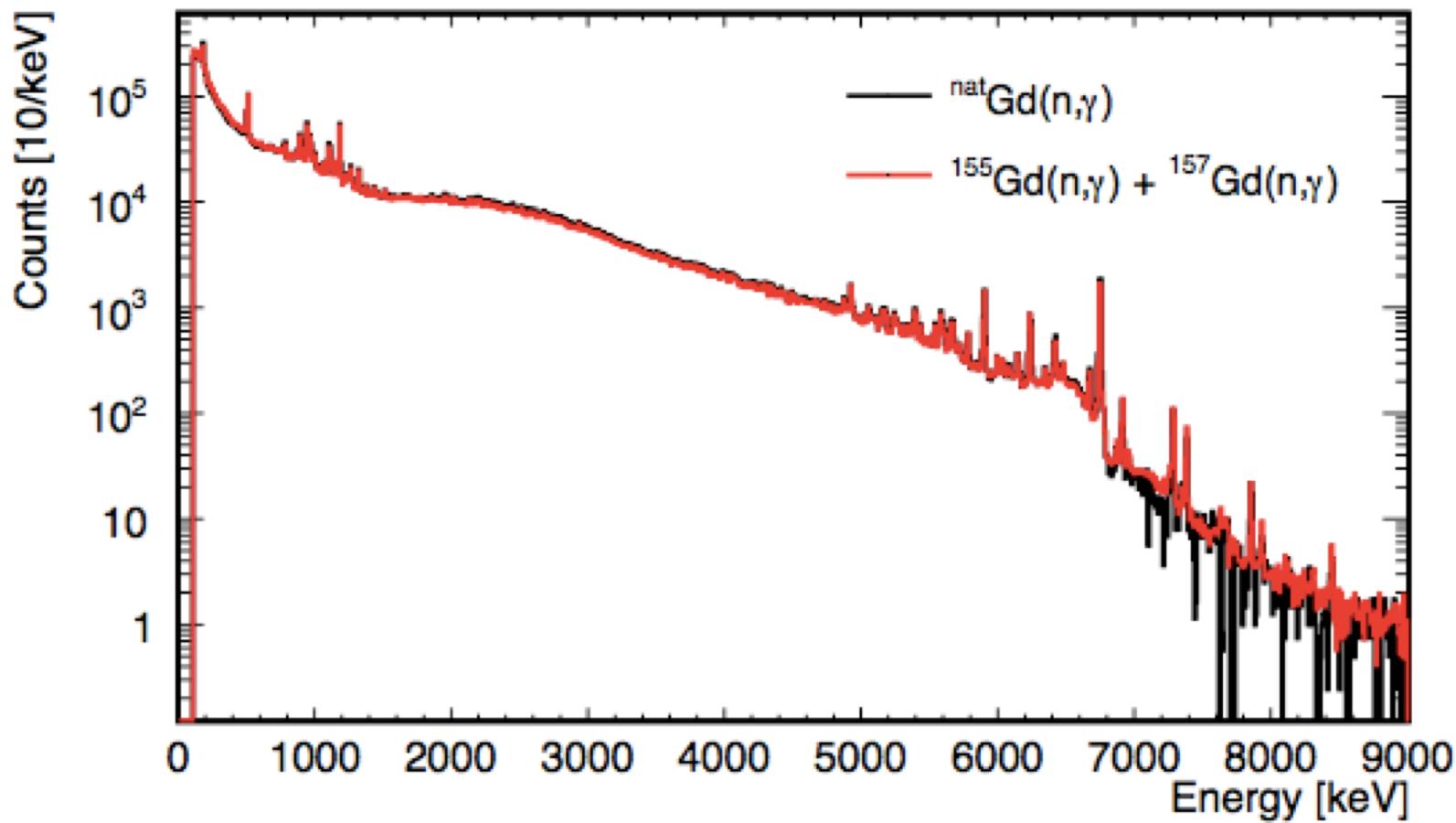
- $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ Multiplicity=2,3,4 $E\gamma$ spectrum



- DataとMCは、ますますの一一致。

$^{155,157}\text{Gd}$ と $^{\text{nat}}\text{Gd}$ のデータのつじつま

- ぴったり一致



2. γ - γ 角度相關分布 $W(z)$ in $^{157,155}\text{Gd}(n,\gamma)$

p12

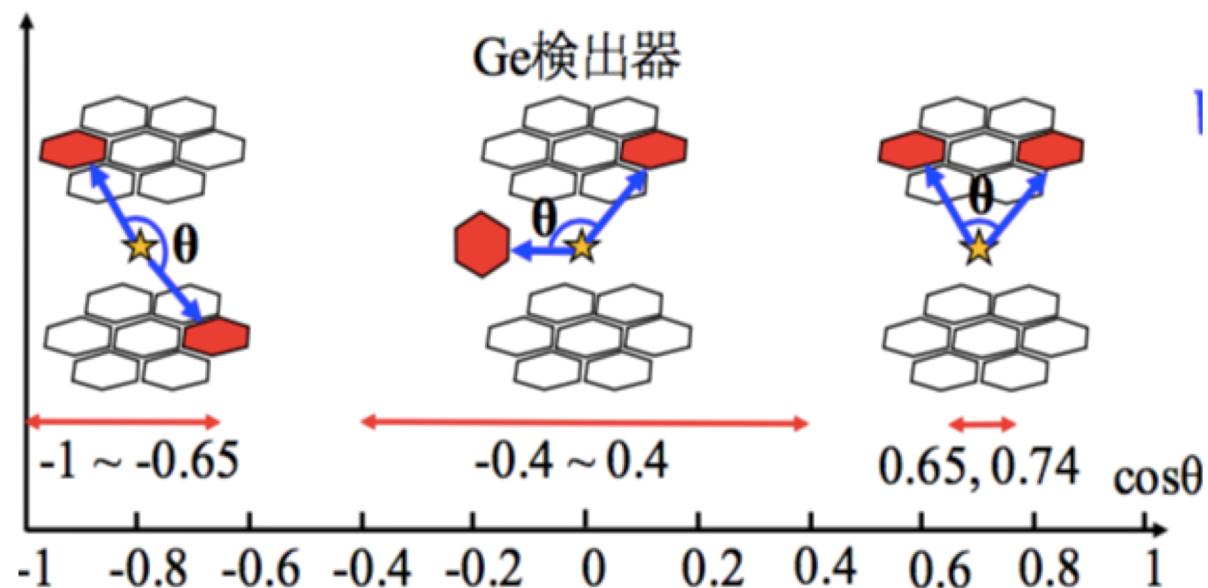
- 角度相關分布の定義 : $W(z)$ for $z = \cos\theta = [-1, 1]$.

- Select 2 γ -ray dataset (E_1 and E_2) and make z distribution.

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

($Z = \cos\theta$)

$$W(Z) \propto \frac{N_{ij}}{\varepsilon_i(E_1) \varepsilon_j(E_2)}$$



2-1) カスケード($J_A \rightarrow J_B \rightarrow J_C$) 2γ の角度相関W(z):

$$z = \cos\theta$$

(skip-7)

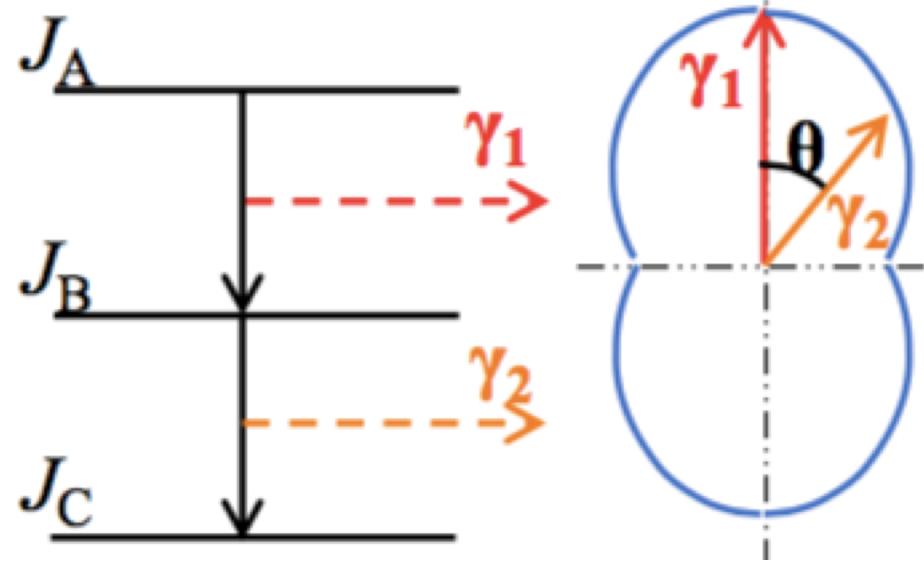
- 角運動量(j, m) の γ_1 を z 軸方向にとると、軌道角運動量は $L_z=0$ 、 $m=+1, -1$ のみ許される。従って、 γ_2 の(J, M) の M の重み $p(M)$ は一様でない。そうすると、 γ_2 の角分布 $W(z)$ は一様でない。

$$W(\theta) \propto \sum_M p(M) |X_{JM}(\theta, \phi)|^2$$

$$\frac{dP}{d\Omega} \propto |\vec{X}_{JM}(\theta, \phi)|^2$$

- もし $p(M)=1$ (for all M) 一様なら、
 $W(z)$ は一様になる。なぜなら、

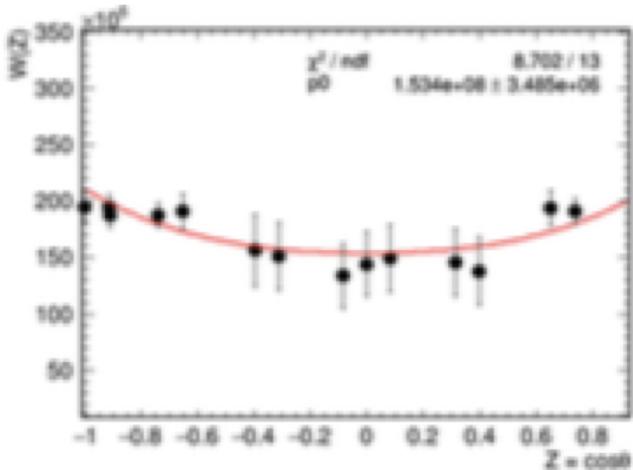
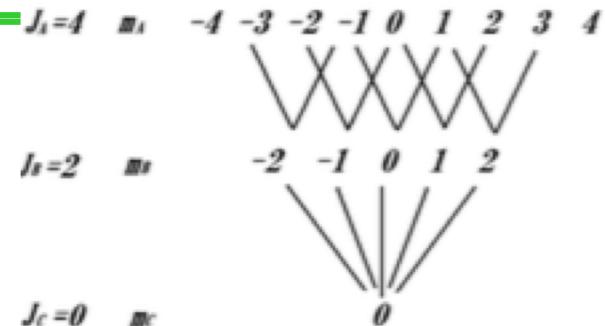
$$\sum_M |\vec{X}_{JM}(\theta, \phi)|^2 = \frac{2J+1}{4\pi}$$



2-2) 較正線源 ${}^{60}\text{Co}(4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+)$ の 2γ : 1.17, 1.33MeV の角相関はもちろん計算通り

p14

$$W(\theta) \propto \left(1 + \frac{1}{8} \cos^2 \theta + \frac{1}{24} \cos^4 \theta \right)$$



$$m_B = 2 : \quad \langle 2, 2, 2, 1 | 4, 3 \rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$\langle 2, 2, 2, -1 | 4, 2 \rangle = \sqrt{\frac{1}{14}}$$

$$m_B = 1 : \quad \langle 2, 1, 2, 1 | 4, 2 \rangle = \sqrt{\frac{4}{7}}$$

$$\langle 2, 1, 2, -1 | 4, 0 \rangle = \sqrt{\frac{8}{35}}$$

$$m_B = 0 : \quad \langle 2, 0, 2, 1 | 4, 1 \rangle = \sqrt{\frac{3}{7}}$$

$$\langle 2, 0, 2, -1 | 4, -1 \rangle = \sqrt{\frac{3}{7}}$$

$$m_B = -1 : \quad \langle 2, -1, 2, 1 | 4, 0 \rangle = \sqrt{\frac{8}{35}}$$

$$\langle 2, -1, 2, -1 | 4, -2 \rangle = \sqrt{\frac{4}{7}}$$

$$m_B = -2 : \quad \langle 2, -2, 2, 1 | 4, -1 \rangle = \sqrt{\frac{1}{14}}$$

$$\langle 2, -2, 2, -1 | 4, -3 \rangle = \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$p(2) = \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{14}} \right)^2 = \frac{4}{7}$$

$$p(1) = \left(\sqrt{\frac{4}{7}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{8}{35}} \right)^2 = \frac{4}{5}$$

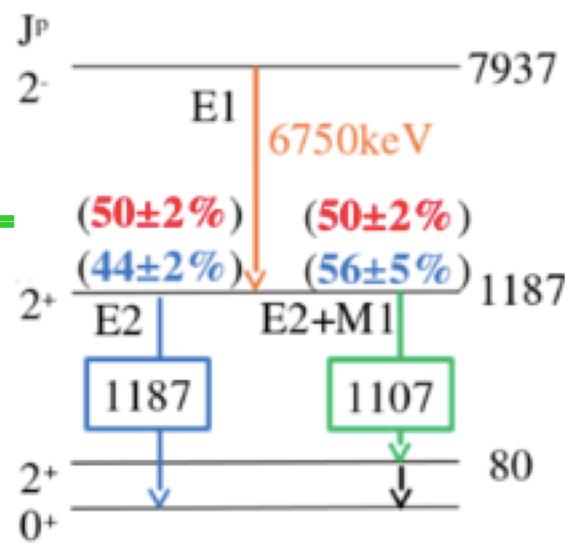
$$p(0) = \left(\sqrt{\frac{3}{7}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{3}{7}} \right)^2 = \frac{6}{7}$$

$$p(-1) = \left(\sqrt{\frac{4}{7}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{8}{35}} \right)^2 = \frac{4}{5}$$

$$p(-2) = \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{14}} \right)^2 = \frac{4}{7}$$

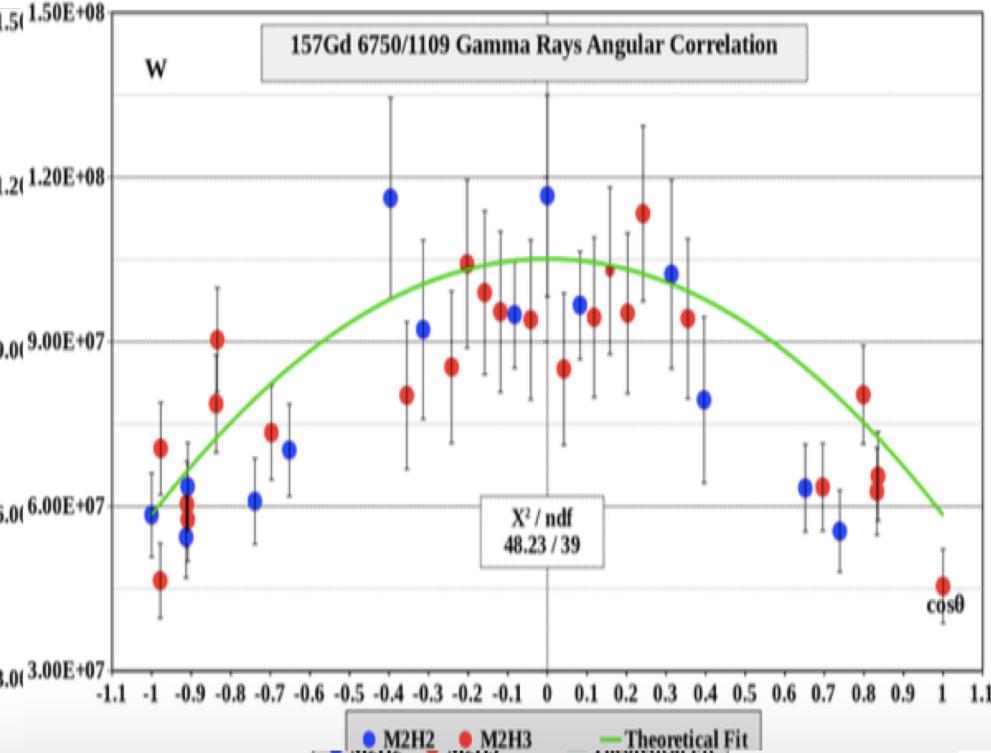
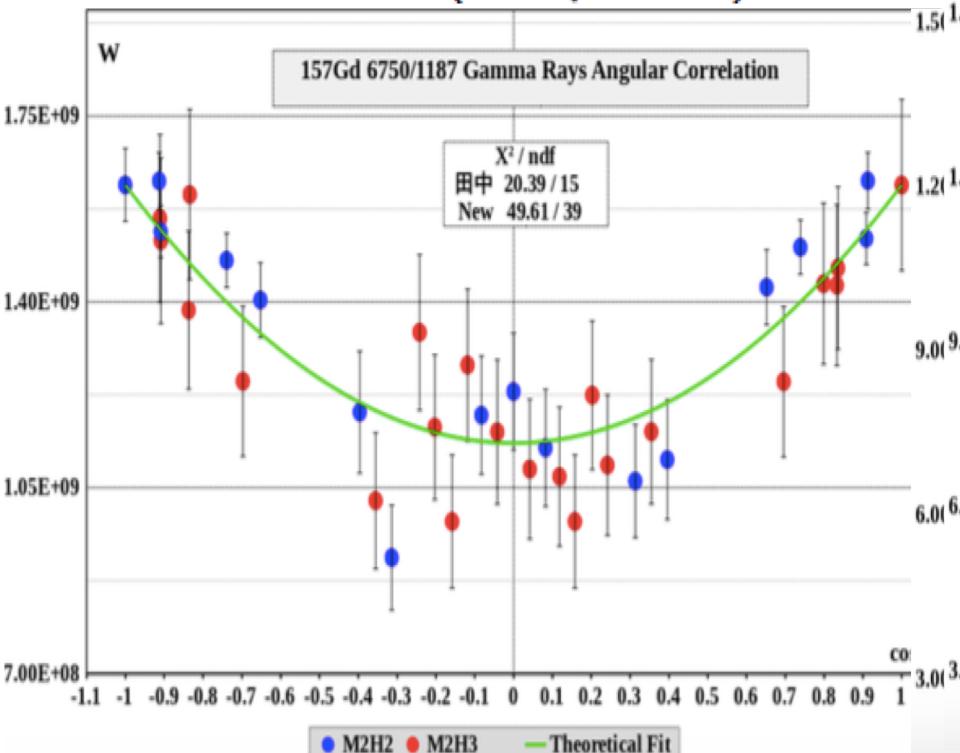
2-3) $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ の一番強い遷移での 2γ の角度相関

- $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ and $2^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 2^+$ cascade transitions: 計算通り。



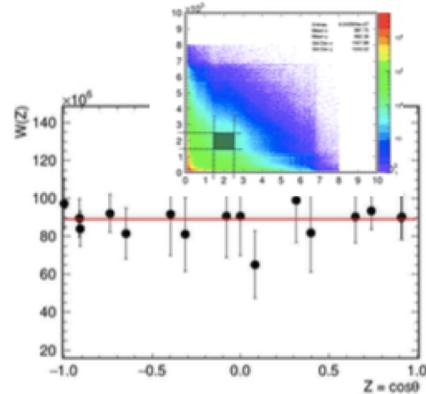
$$W(\theta) \propto \left(1 + \frac{3}{7} \cos^2 \theta\right)$$

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

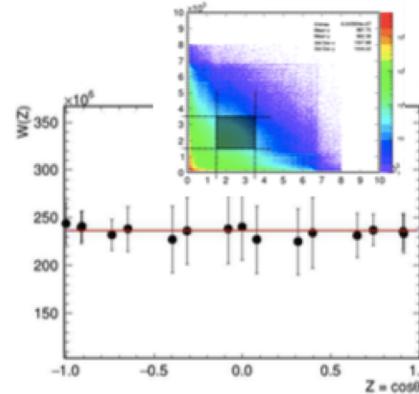


2-4) $^{157,155}\text{Gd}(n,\gamma)$ の大部分の連續遷移の任意の 2γ には角度相関は見られなかった。

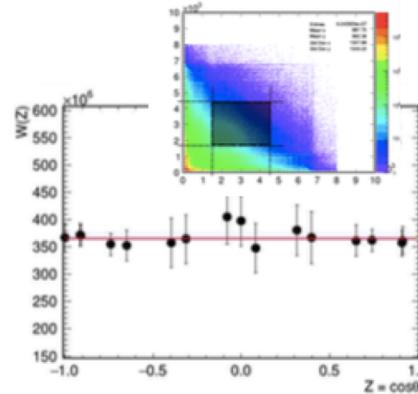
- We observe no correlations for bulk of 2γ rays from continuum.



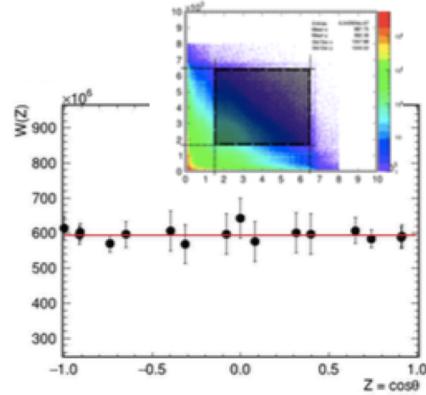
1.5–2.5MeV



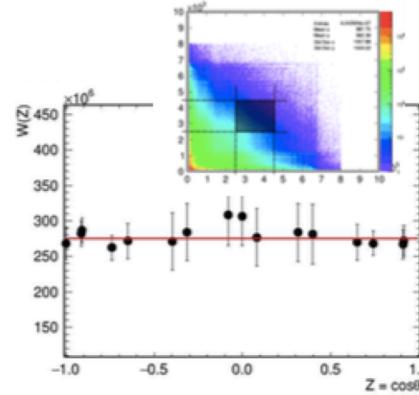
1.5–3.5MeV



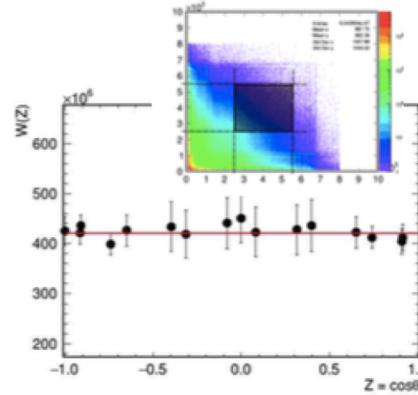
1.5–4.5MeV



1.5–6.5MeV



2.5–4.5MeV



2.5–5.5MeV

3. まとめと課題

1. 熱中性子反応 $^{157,155,\text{nat}}\text{Gd}(n,\gamma)$ からの γ 線のエネルギー分布と角分布の高統計、高エネルギー分解能測定をJPARC-ANNRI測定装置を用いて行った。また、 γ 線エネルギー分布を再現するMonte Carloモデル(ANNRI-Gd Model)を作成した。[論文1-2]
2. ANNRI-Gd Modelは公開されて、SK-Gd, XENONnT and NEOS (Korea)等で使われている。
公開 URL: http://www.physics.okayama-u.ac.jp/~sakuda/ANNRI-Gd_ver1.html
3. 角度相関の論文まとめはこれから。相関のある部分は、全体データの数%。
4. ニュートリノ実験へのFeedback(応用)としては、これで満足している。

課題:

1. 原子核物理業界ではGdや重い核の γ 線遷移について、バックグラウンドの少ない 2γ 同時計測データのみを解析し、強いE1遷移の他の弱いM1、E2強度のPSF研究が行われており、PTEPから我々に次の論文ではこの基礎的な問題を解決するように執拗に要請を受けている。準位密度 $\rho(E)$ と光強度関数 $f(E_\gamma)$ を同時に決めるのは容易ではない。

[我々は、95%の分布を決めることが優先し、数%の弱い遷移の解析をやる暇がない、と言っても許してくれない。]

論文:

- 1) γ -ray spectrum from thermal neutron capture on ^{157}Gd , K. Hagiwara et al., PTEP 2019, 023D01, pp26.
- 2) γ -ray spectrum from thermal neutron capture on $^{155, \text{nat}}\text{Gd}$, T.Tanaka et al., arXiv:1907.00788[nucl.ex], submitted to PTEP, pp13. 修正版作成中。//
- 3) 2γ angular correlations in $^{155, 157}\text{Gd}(n,\gamma)$ reaction, 原稿訂正中 (Preliminary).