

ガドリニウムの熱中性子捕獲反応から 放出されるガンマ線データ解析と シミュレーションの詳細比較

新学術「地下素核研究会」
第3回超新星ニュートリノ研究会
3月4-5日、東北大学

岡山大学 理 萩原 開人

2012B0025 (天然Gd標的実験): 山田芳幸、茅野翼、王岩、作田誠 (岡大)、
矢野孝臣(神戸大)、木村敦、原田秀郎(JAEA)

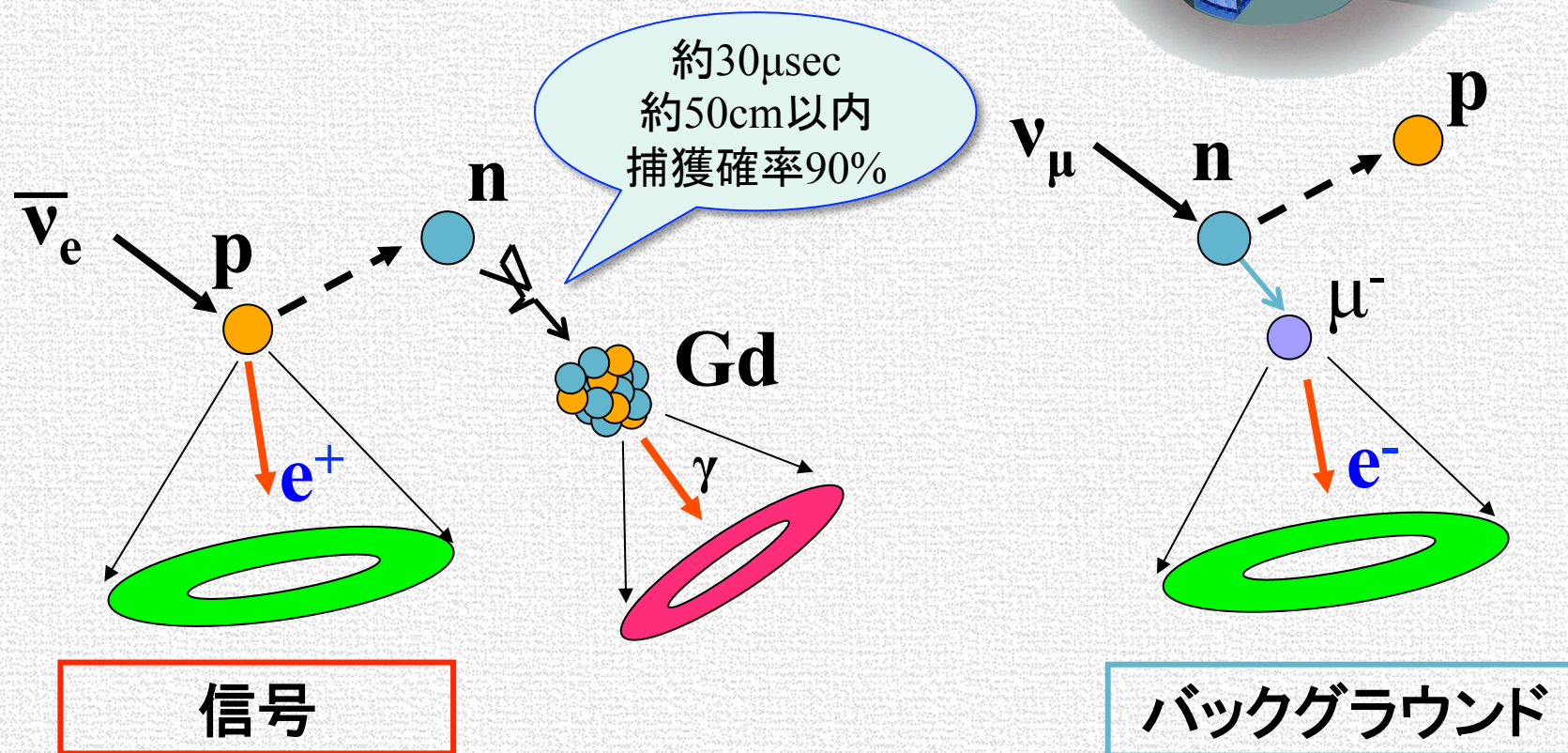
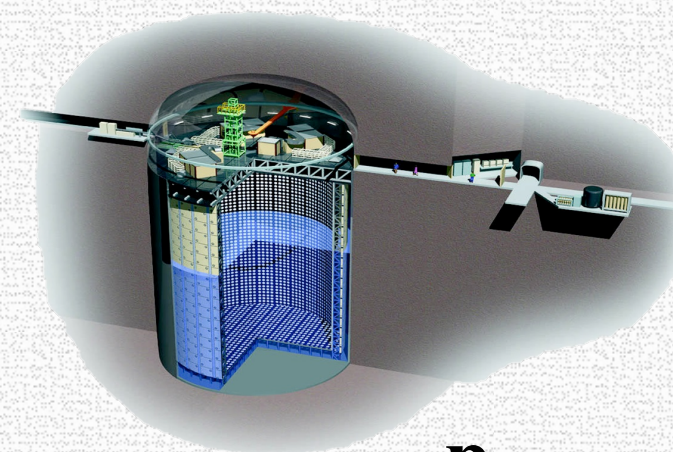
2014B0124 (^{155}Gd , ^{157}Gd 標的実験): 山田芳幸、王岩、P.Das、M.Reen、小汐由介、作田誠 (岡大)、
矢野孝臣(神戸大)、木村敦、原田秀郎、岩本信之、中村詔司 (JAEA)

目次

1. 研究背景・目的
2. 実験概要
3. 実験データ解析とシミュレーション
4. γ 線遷移の新モデル構築
5. 解析の現状
6. まとめ

1-1. ガドリニウム(Gd)を用いたニュートリノ観測

スーパーカミオカンデでは超純水にGdを0.1%溶かすことにより、バックグラウンド事象を落とし、超新星背景ニュートリノを探索する。



1-2. 何故ガドリニウムを使うのか

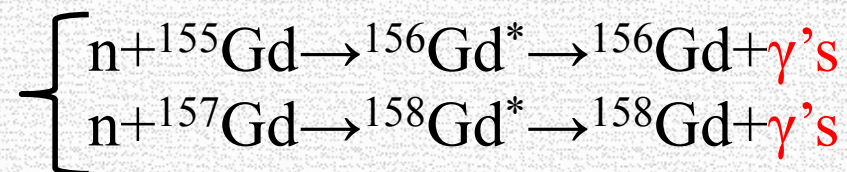
① 共鳴による大きな断面積

同位体	天然存在比 [%]	熱中性子捕獲断面積 [barn(10^{-24}cm^2)]
^{152}Gd	0.20	735
^{154}Gd	2.18	85
^{155}Gd	14.80	60900 (天然元素中2番目)
^{156}Gd	20.47	1.8
^{157}Gd	15.65	254000 (天然元素中最大)
^{158}Gd	24.84	2.2
^{160}Gd	21.86	1.4

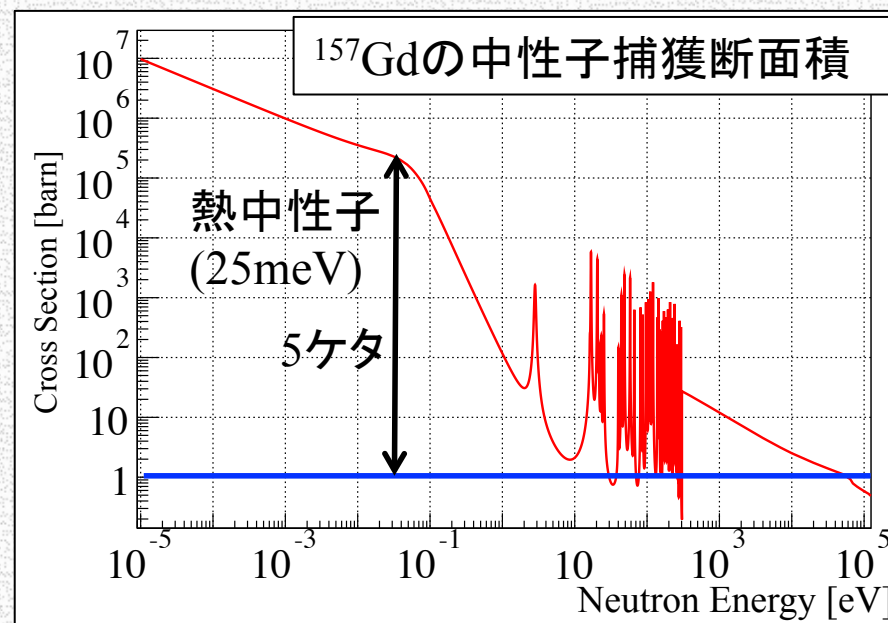
典型的な原子核での断面積
 $\sigma = 4\pi a^2 = 1 [\text{barn}]$ (a: 原子核半径)

② 高い γ 線放出エネルギー

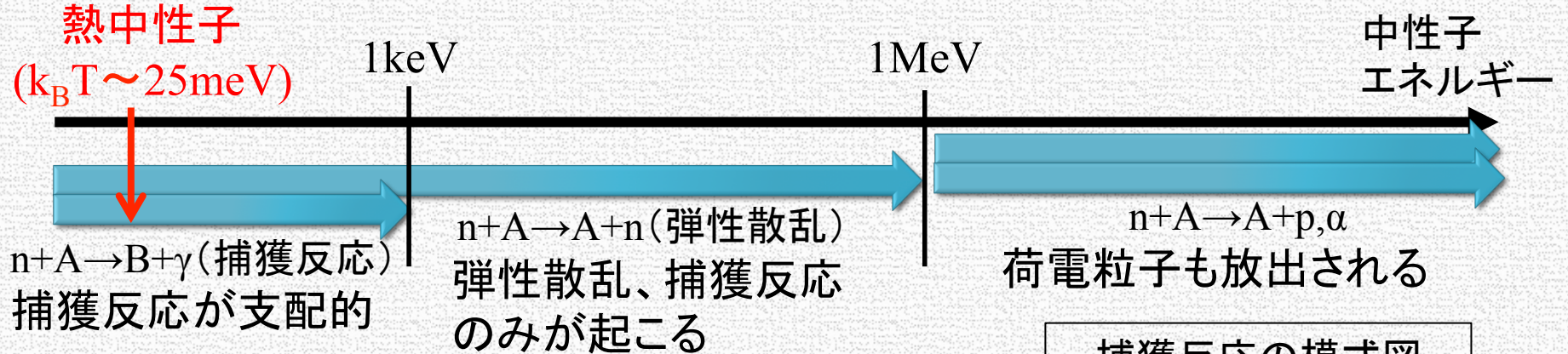
Gdの熱中性子捕獲反応



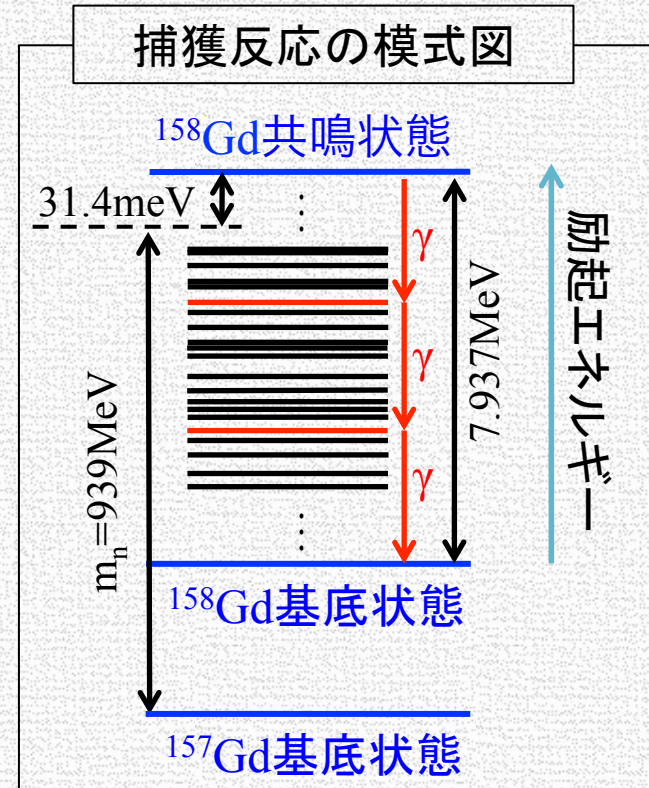
合計約8MeVとなる
 複数の γ 線を放出する。



1-3. 中性子・原子核反応の特徴



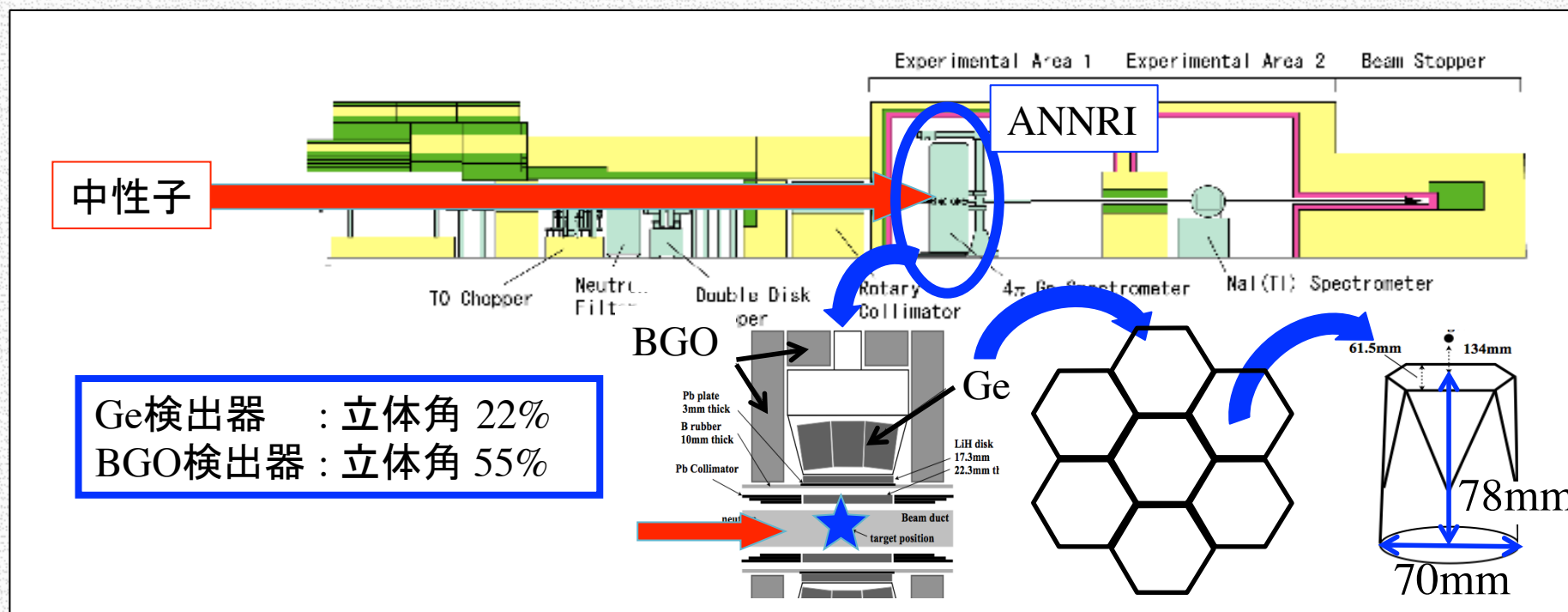
^{157}Gd は熱中性子を捕獲すると ^{158}Gd の共鳴状態となる。
共鳴状態からは複数のエネルギー準位を經由して γ 線を放出する。



Gdが放出する γ 線の高精度なデータ取得
高精度な γ 線遷移の新モデル構築

2-1. 実験概要 J-PARC/ MLF/ ANNRI

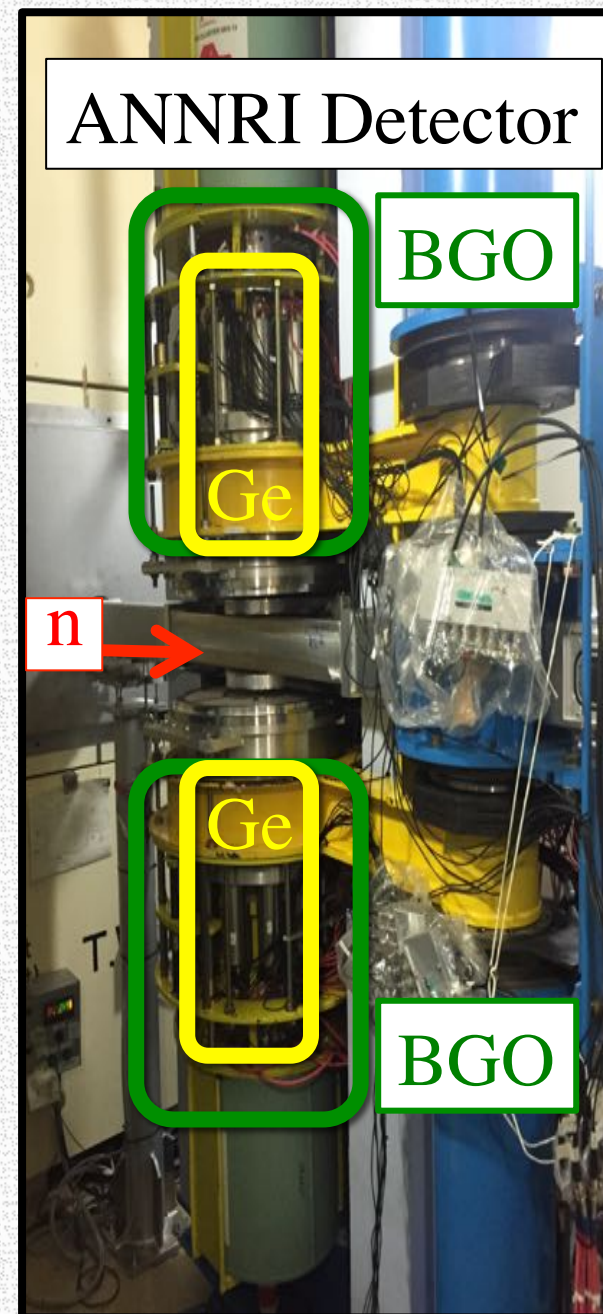
中性子ビーム	世界最高強度のパルス型ビーム ($\Delta E_n/E_n \sim 1\%$ 、陽子強度300kW)
Ge検出器	高精度で γ 線エネルギー測定が可能 ($\Delta E_\gamma = 9\text{keV}@1.3\text{MeV}$)
BGO検出器	Ge検出器から漏れ出ている事象を検出し破棄 (VETO)



2-2. 実験情報

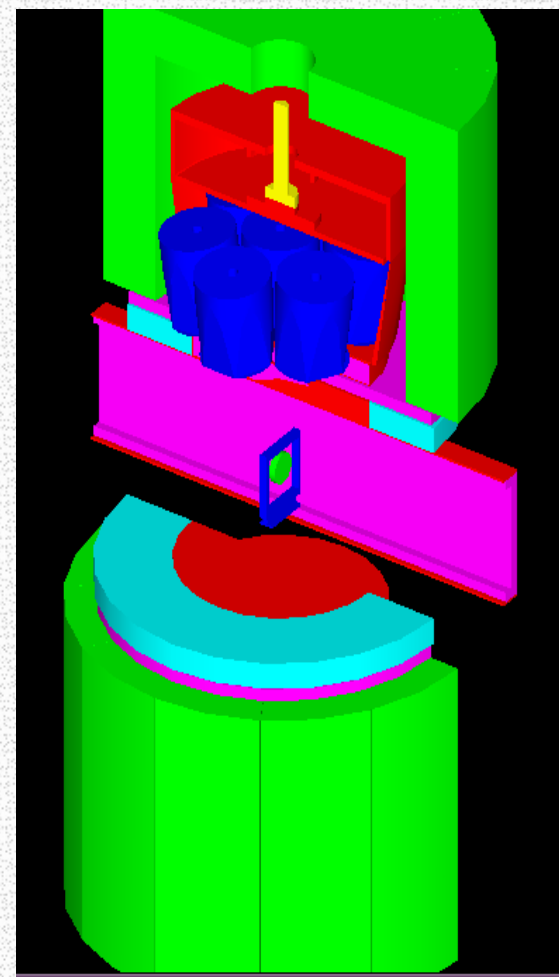
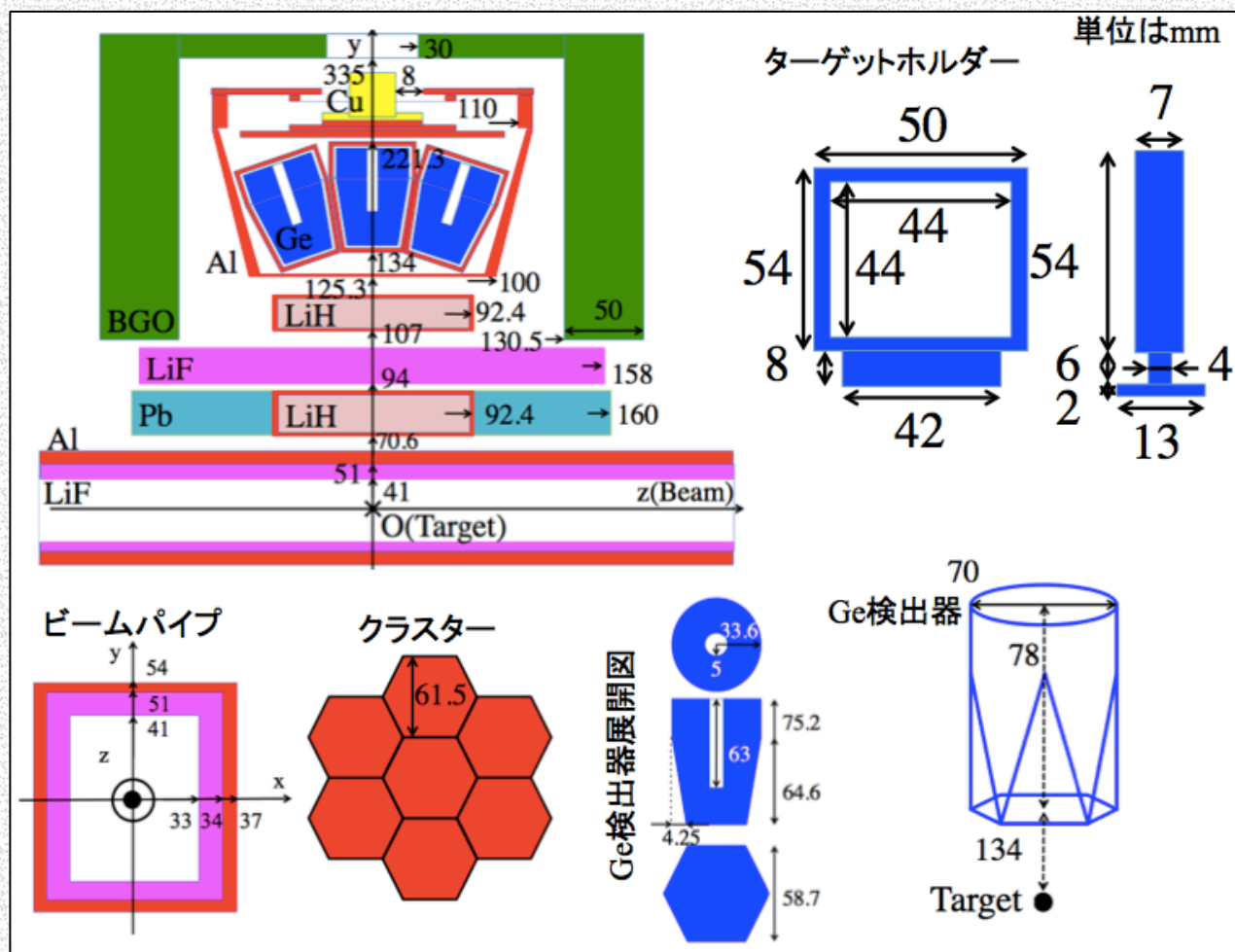
B0025実験(天然Gd)とB0124実験(濃縮Gd)

	2012 B0025	2014 B0124
測定日	2013/3/14~3/17	2014/12/11~12/16
標的	<ul style="list-style-type: none"> 天然Gd(99.99%) 5mm×5mm×10,20μm	<ul style="list-style-type: none"> 濃縮Gd <ul style="list-style-type: none"> A=155(91.65%) 157(88.4%) NaCl(較正用)
取得総事象数	3×10^9 events	8×10^9 events
検出器の較正	^{60}Co , ^{137}Cs	^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu



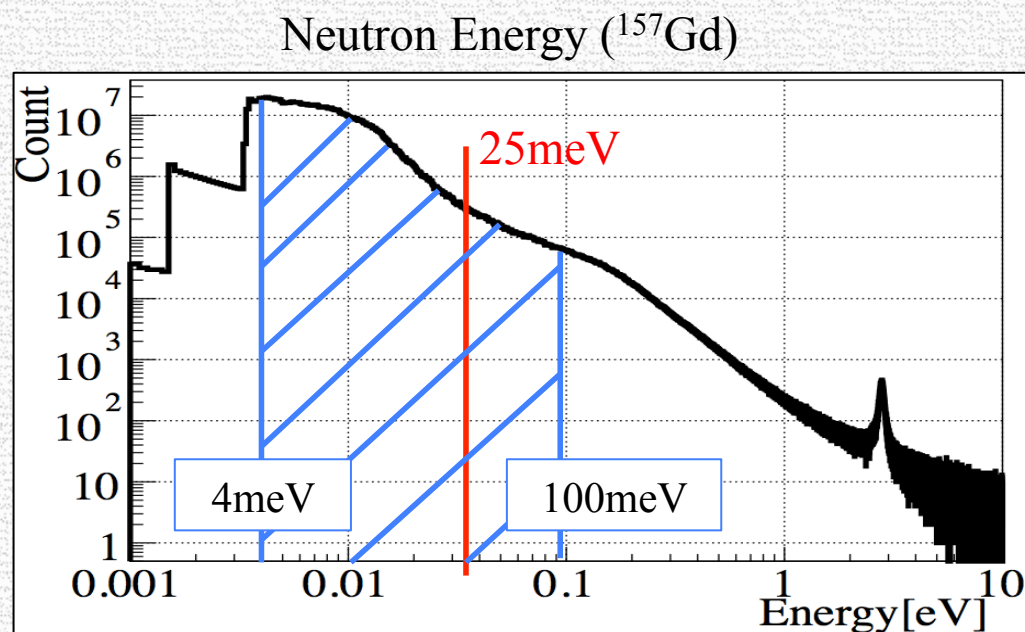
2-3. 検出器詳細

γ 線の検出には、検出器周りの物質量の理解が重要である。ANNRI検出器の詳細寸法は良く理解出来ており、この図面がシミュレーションに利用される。



3-1. 事象選別

- TOF測定により4~100meVの中性子エネルギー領域を選択
- Ge検出器によって0.2~9MeVの γ 線事象を取得
- γ 線多重度による分別
(Multiplicity(γ 線の本数), Hit Crystal(γ 線の広がり))



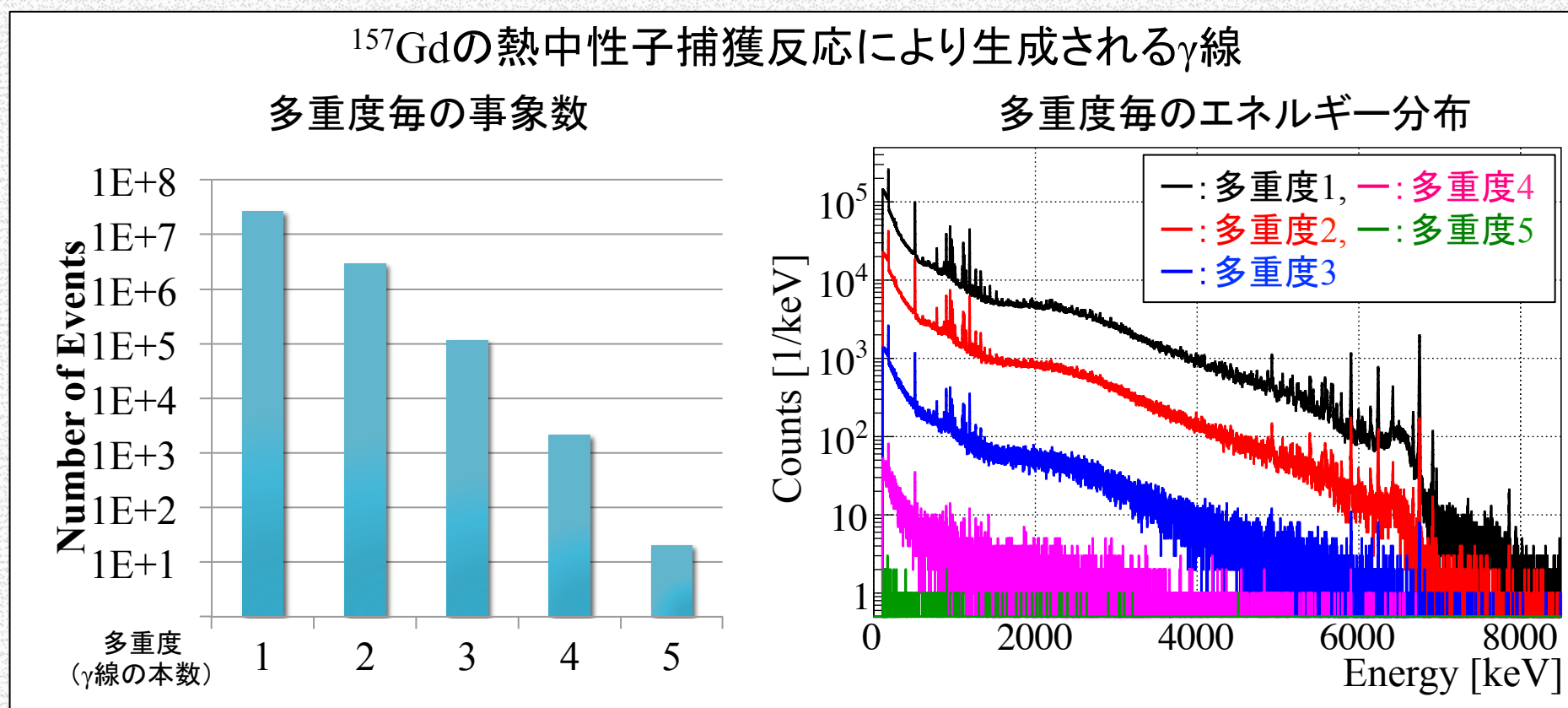
多重度3までの一例

	H=1	H=2	H=3
M=1	上側 下側	上側 下側	上側 下側
M=2		上側 下側	上側 下側
M=3	赤色がHitしたGe 検出器を示す。		上側 下側

3-2. γ 線多重度によるエネルギー分布

多重度1の事象が支配的である。

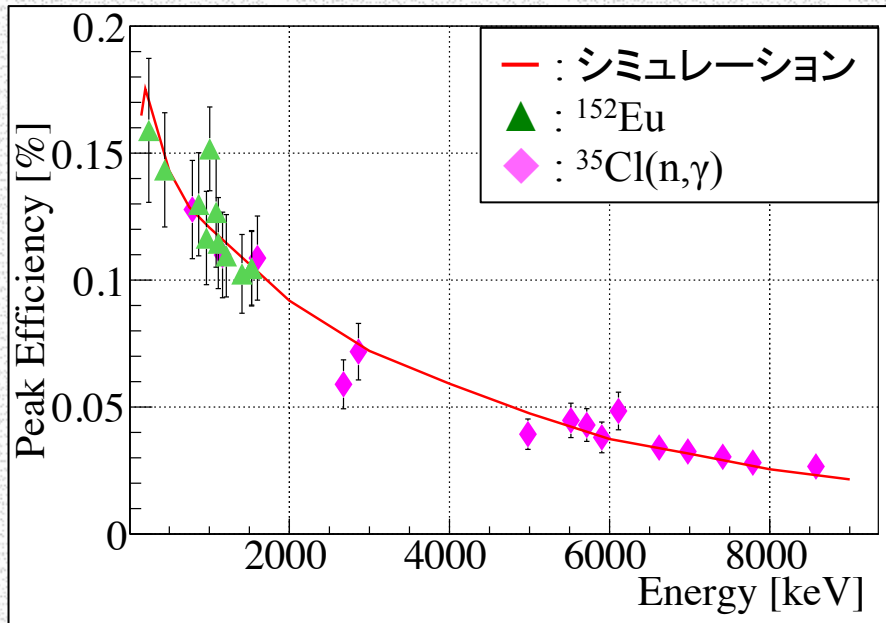
→1本の γ 線による事象が高統計(約 10^7 事象)で得られた。
各多重度(γ 線の本数)でのエネルギー分布を得た。



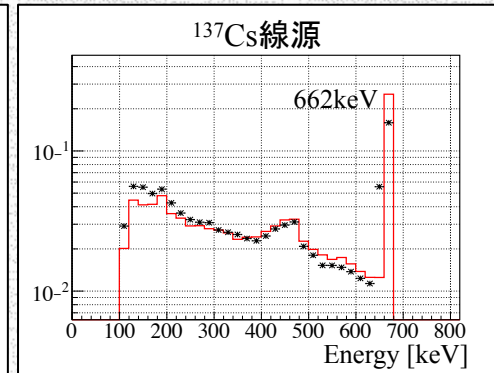
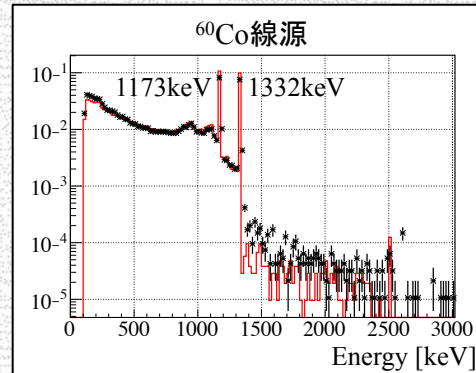
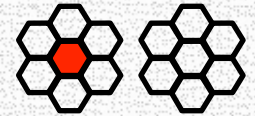
3-3. γ 線1本でのシミュレーション評価

0.2~9MeVでの線源データと検出器シミュレーションが良く一致 ($\pm 7\%$ 精度) している。

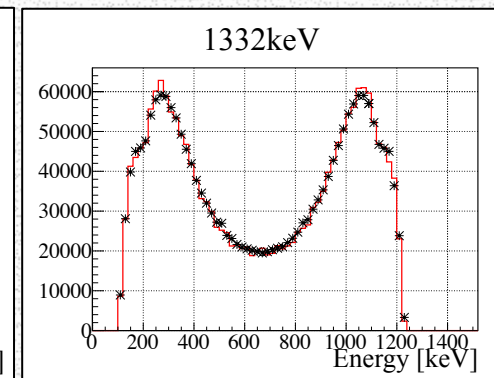
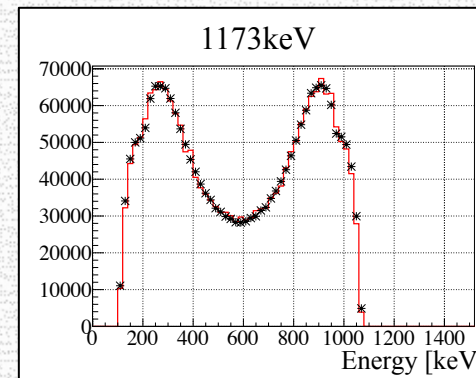
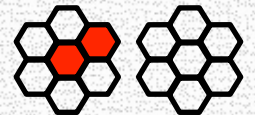
ピーク検出効率



エネルギー分布



コンプトン散乱による γ 線の広がりの評価



3-4. γ 線1本での 多重度理解

^{60}Co 線源と $^{35}\text{Cl}(n,\gamma)$ 反応の γ 線を用いて、1本の γ 線の多重度を実験データとシミュレーションで比較した。

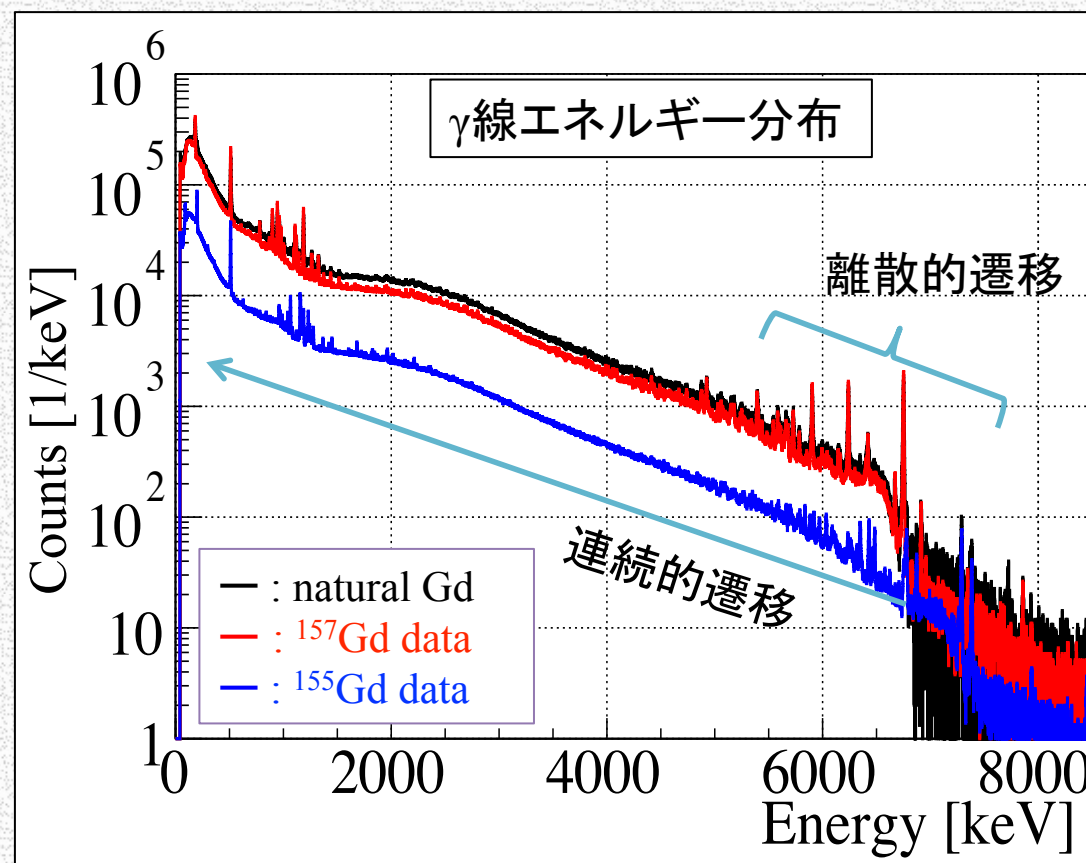
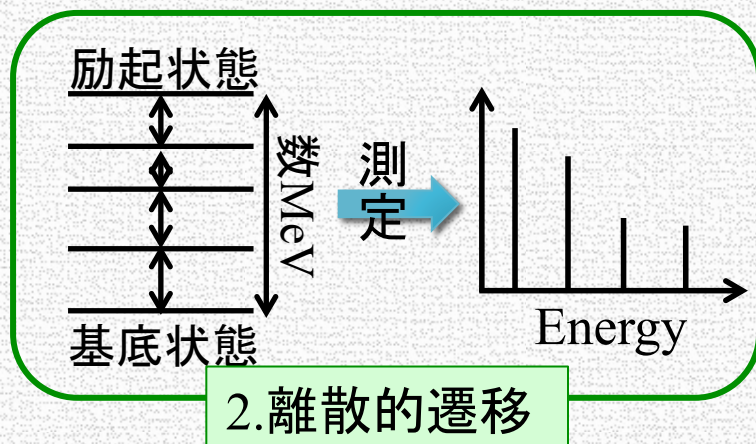
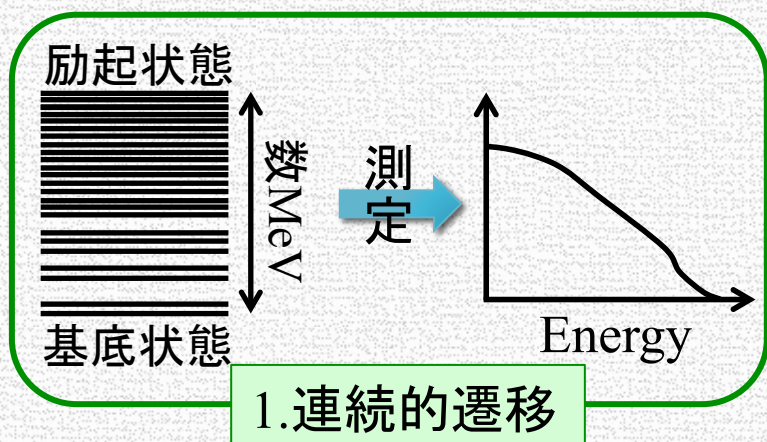
γ 線1本の検出器内での広がりを**5%精度**で理解出来た。さらに、1本の γ 線が多重度2に分類される確率は**約1%程度**であると見積もられた。

Ratio[%]		実験データ		
エネルギー[keV]		H=1	H=2	H=3
1173	多重度1	71.2±0.3	26.3±0.3	2.0±0.09
	多重度2	-	0.4±0.04	0.03±0.01
1332	多重度1	70.7±0.3	26.7±0.3	2.2±0.1
	多重度2	-	0.4±0.04	0.01±0.07
8578	多重度1	48.6±1.4	37.7±1.9	11.6±2.1
	多重度2	-	-	-

Ratio[%]		シミュレーション		
エネルギー[keV]		H=1	H=2	H=3
1173	多重度1	69.9±1.2	27.4±0.6	2.1±0.2
	多重度2	-	0.54±0.08	0.01±0.01
1332	多重度1	68.3±1.1	28.6±0.6	2.2±0.2
	多重度2	-	0.76±0.09	0.03±0.02
8578	多重度1	45.5±0.3	39.4±0.3	12.0±0.1
	多重度2	-	1.2±0.04	0.25±0.02

4-1. γ 線遷移の新モデル構築

Gdから放出される γ 線は連続的遷移(97.1%)と離散的遷移(2.9%)に大別する。Gdは準位が密に詰まっているため、連続的遷移が支配的になる。



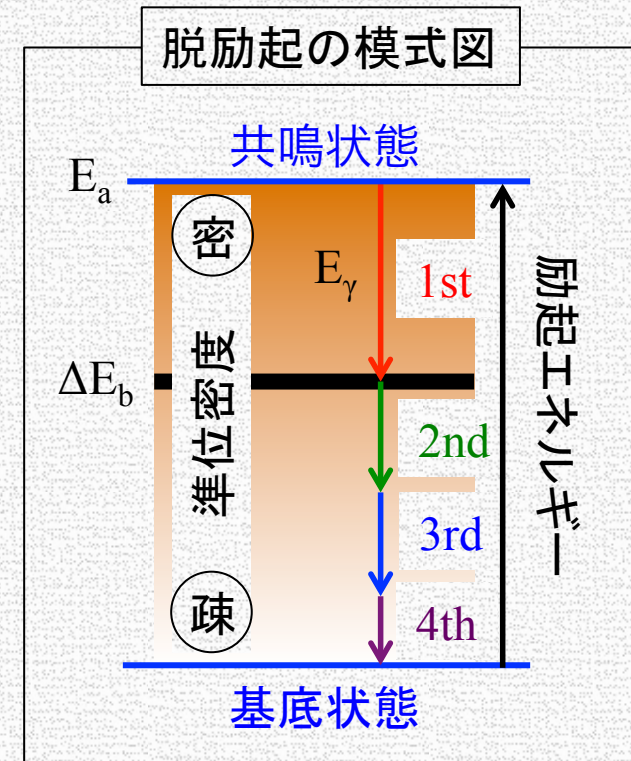
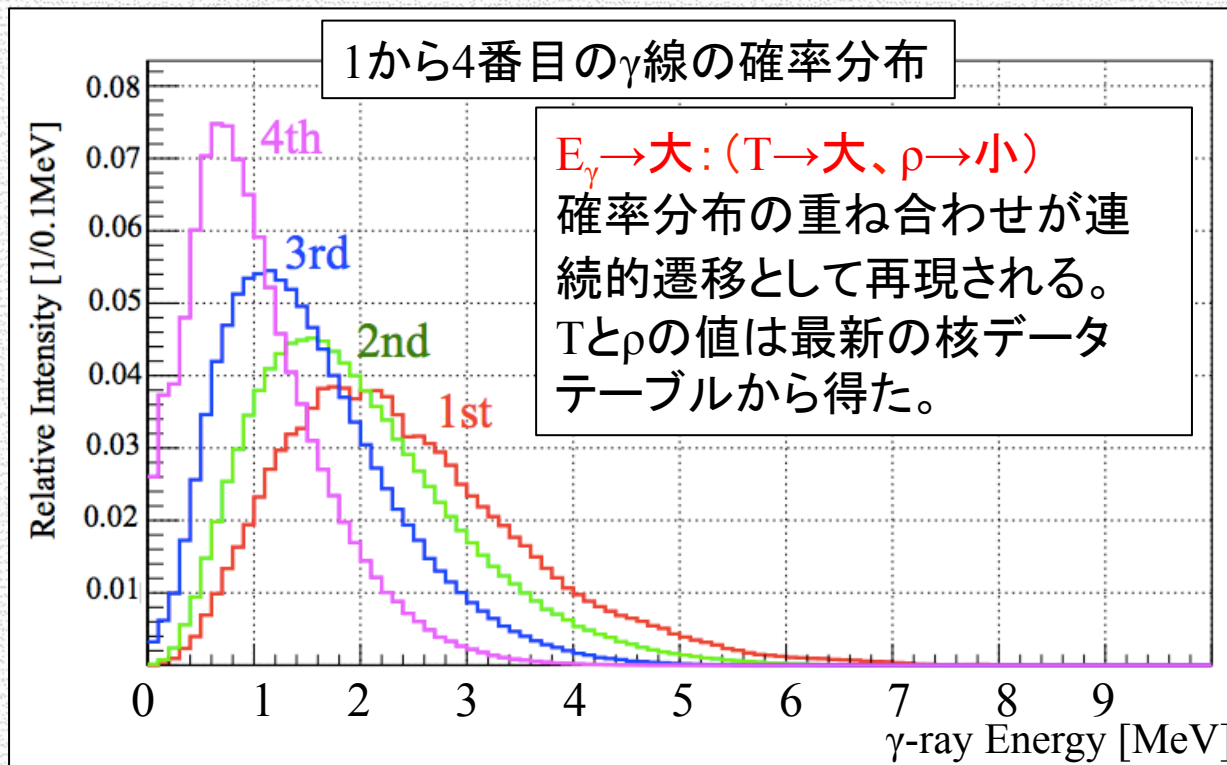
4-2. 連続的遷移

準位 E_a から E_b のγ線を放出して準位 E_b に遷移する確率分布 P は、フェルミの黄金律(確率=振幅²×準位数)から求まる。

$$P\Delta E_b = T(E_\gamma)\rho(E_b)\Delta E_b$$

$$T(E_\gamma) = 2\pi E_\gamma^3 f(E_\gamma)$$

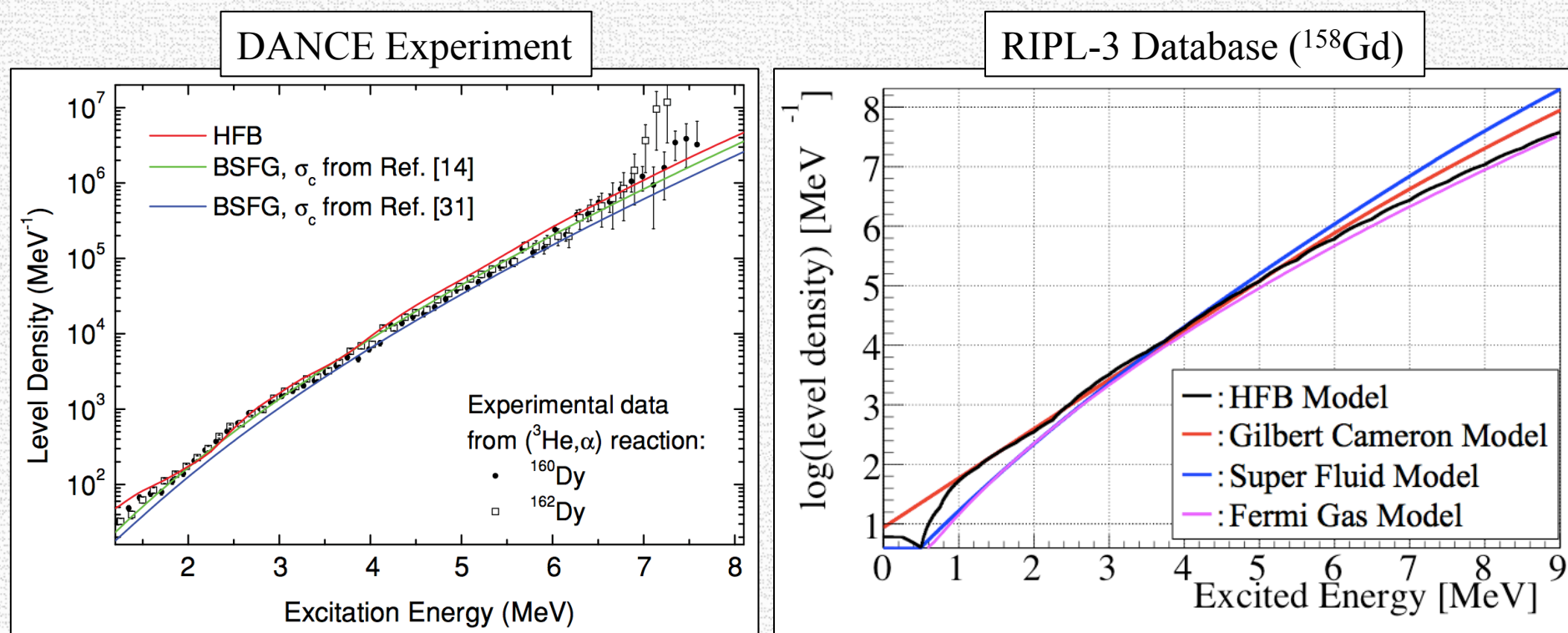
$T(E_\gamma)$: E1遷移透過係数
 $f(E_\gamma)$: PSF
 $\rho(E_b)$: 準位密度



4-3. エネルギー準位密度 ρ

DANCE実験ではジスプロニウム(Dy)を使って実験値と理論値を比較し、HFBモデルで良い一致を得た。

我々の新モデルでもHFBモデルを使用した。



4-4. 遷移強度関数 f

γ線電磁遷移強度 $f(E_\gamma)$ は、逆反応 $\gamma + \text{Gd} \rightarrow n + \text{Gd}$ により一部測定され、E1 遷移強度関数としてパラメータ化されている。

$$T(E_\gamma) = 2\pi E_\gamma^3 f(E_\gamma)$$

$$f(E_\gamma) = \frac{1}{3(\pi\hbar c)^2} \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_i E_\gamma \Gamma_i^2}{(E_\gamma^2 - E_i^2)^2 + E_\gamma^2 \Gamma_i^2} \quad \begin{array}{l} i = 2 \text{ GDRs} \\ (E_1, \text{ electric dipole}) \end{array}$$

	Energy (E_i) [MeV]	Strength (σ_i) [mb]	Width (Γ_i) [MeV]
^{156}Gd	11.2	180.0	2.6
	15.2	242.0	3.6
^{158}Gd	11.7	165.0	2.6
	14.9	249.0	3.8

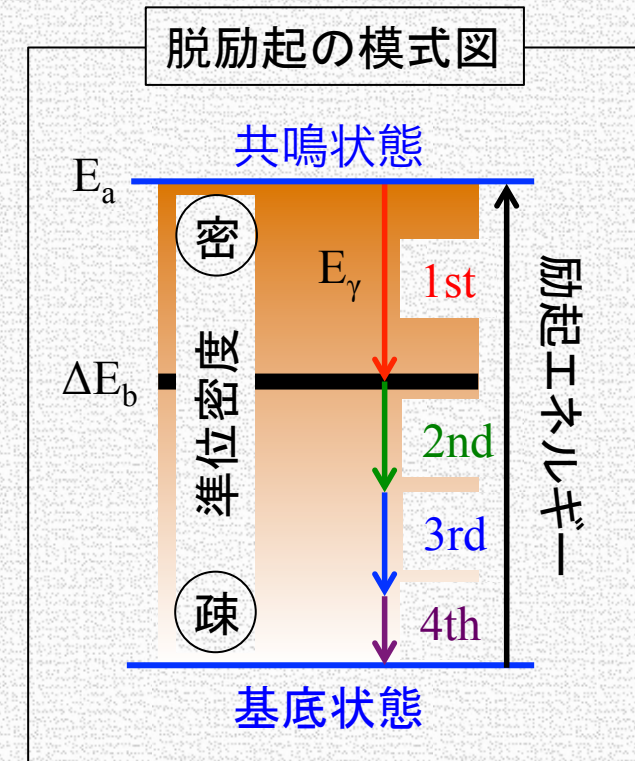
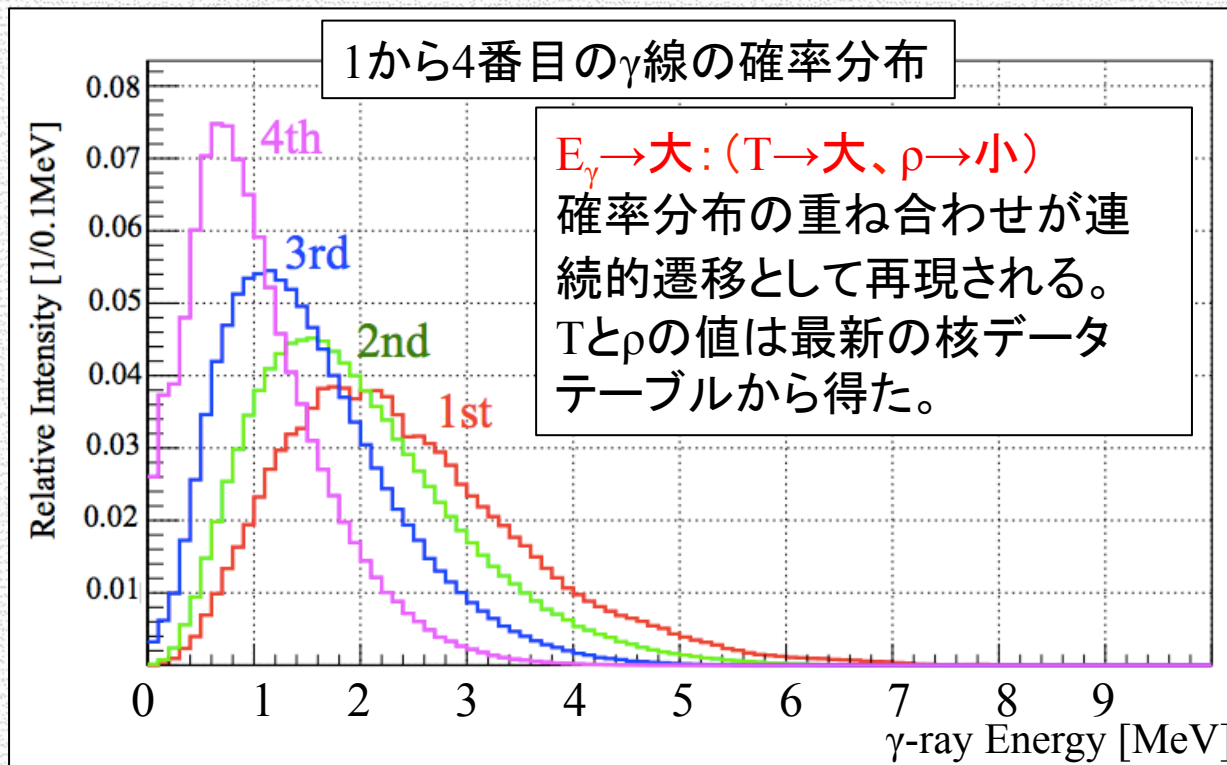
4-2. 連続的遷移

準位 E_a から E_b のγ線を放出して準位 E_b に遷移する確率分布 P は、フェルミの黄金律(確率=振幅²×準位数)から求まる。

$$P\Delta E_b = T(E_\gamma)\rho(E_b)\Delta E_b$$

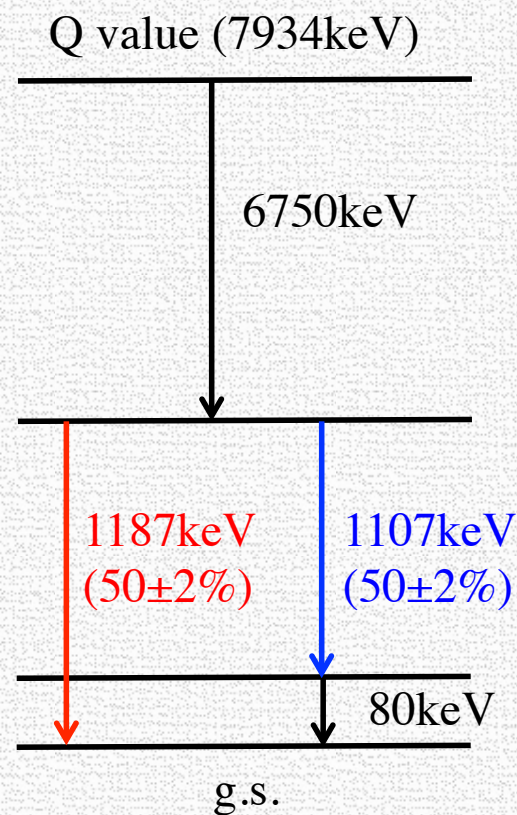
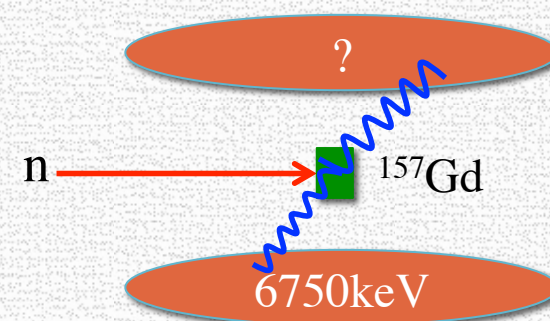
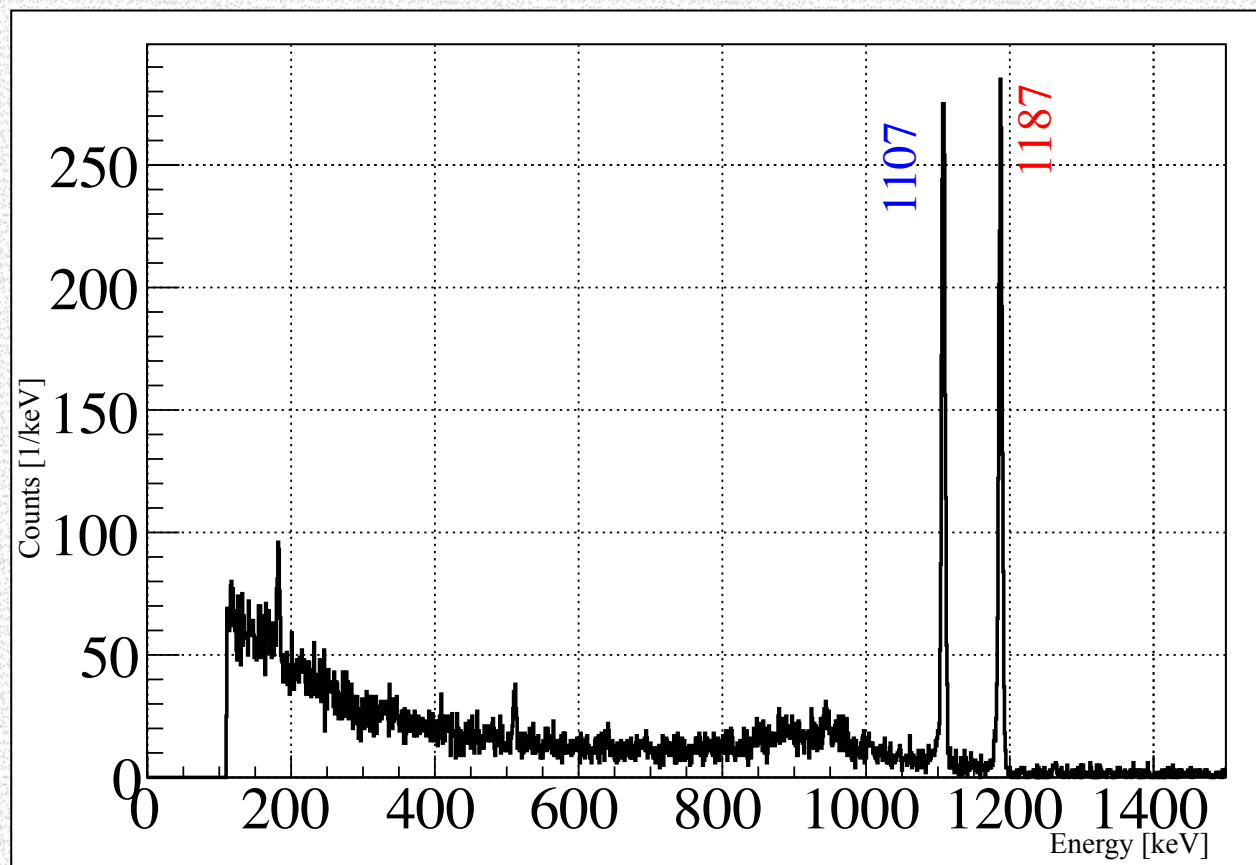
$$T(E_\gamma) = 2\pi E_\gamma^3 f(E_\gamma)$$

$T(E_\gamma)$: E1遷移透過係数
 $f(E_\gamma)$: PSF
 $\rho(E_b)$: 準位密度



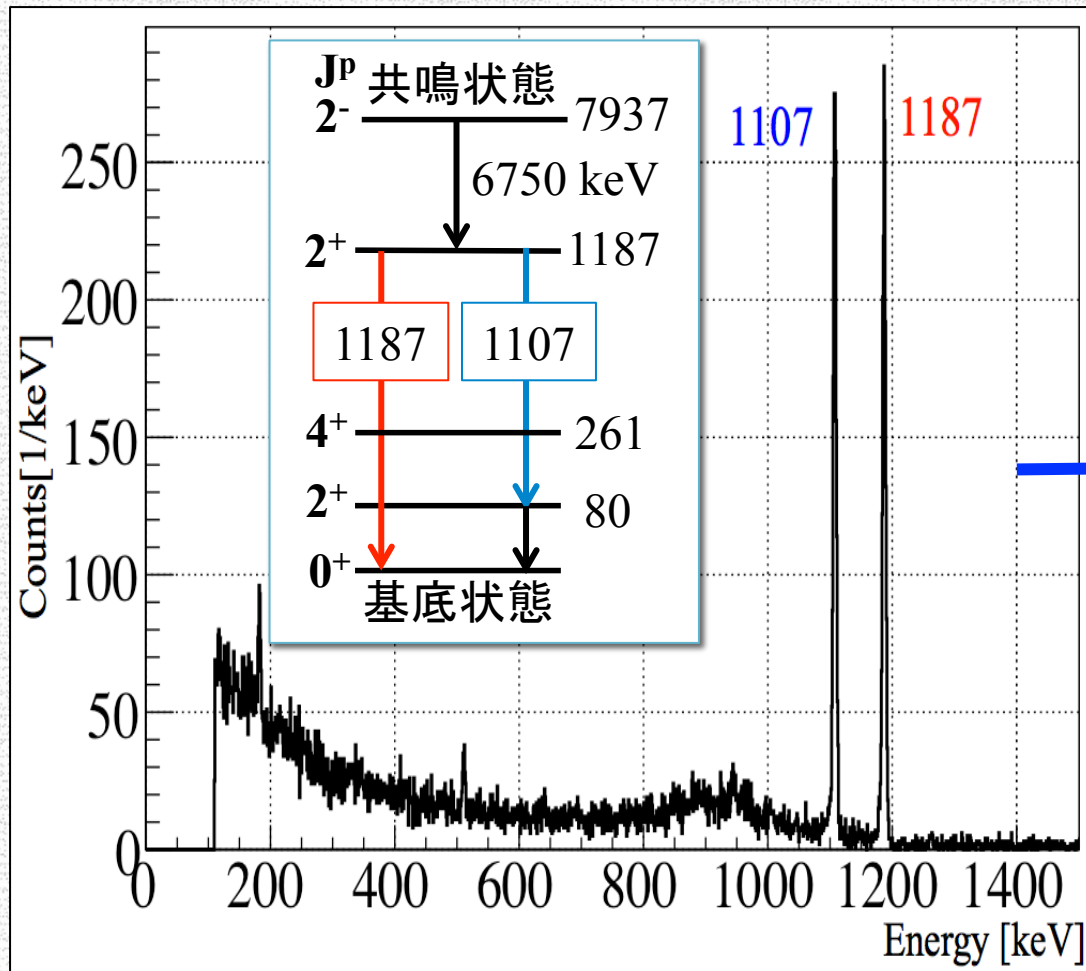
4-5. 離散的遷移

濃縮Gd実験データを使い、Q値から
離散的遷移のエネルギーを予測する。



4-6. 離散的遷移

γ 線遷移強度を我々の実験データから評価し、
15本の離散的遷移の経路を特定した。



1. 連続的遷移 [97.1%]

2. 離散的遷移 [2.9%] (15本)

5.167 MeV [0.25%]

5.436 MeV [0.068%]

5.543 MeV [0.099%]

5.595 MeV [0.27%]

5.669 MeV [0.26%]

5.784 MeV [0.083%]

5.903 MeV [0.49%]

6.001 MeV [0.066%]

6.420 MeV [0.14%]

6.672 MeV [0.080%]

6.750 MeV [1.0%]

6.914 MeV [0.053%]

6.960 MeV [0.0085%]

7.857 MeV [0.0097%]

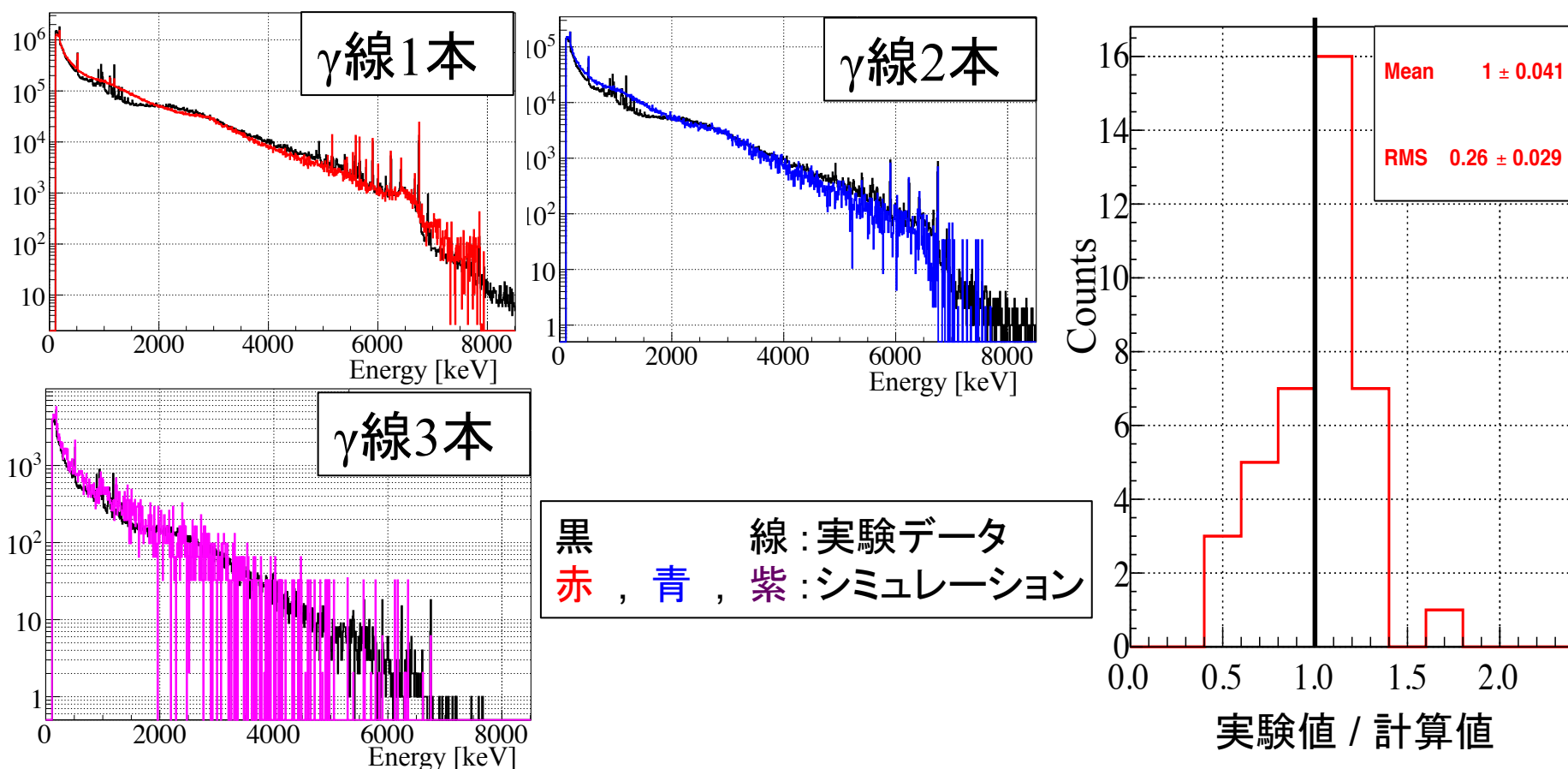
7.937 MeV [0.0023%]

新モデルへ導入

4-7. 実験データと新モデルの比較

実験データと新モデルを各多重度 (γ 線の本数) 毎で比較した。
エネルギー分布比 (実験値 / 計算値) から、誤差 **26%** 以内での一致を得た。

^{157}Gd の熱中性子捕獲反応により生成される γ 線



4-8. ^{157}Gd から放出されるγ線多重度

$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ 反応から放出されるγ線の多重度(γ線の本数)とシミュレーションで良い一致を得た。

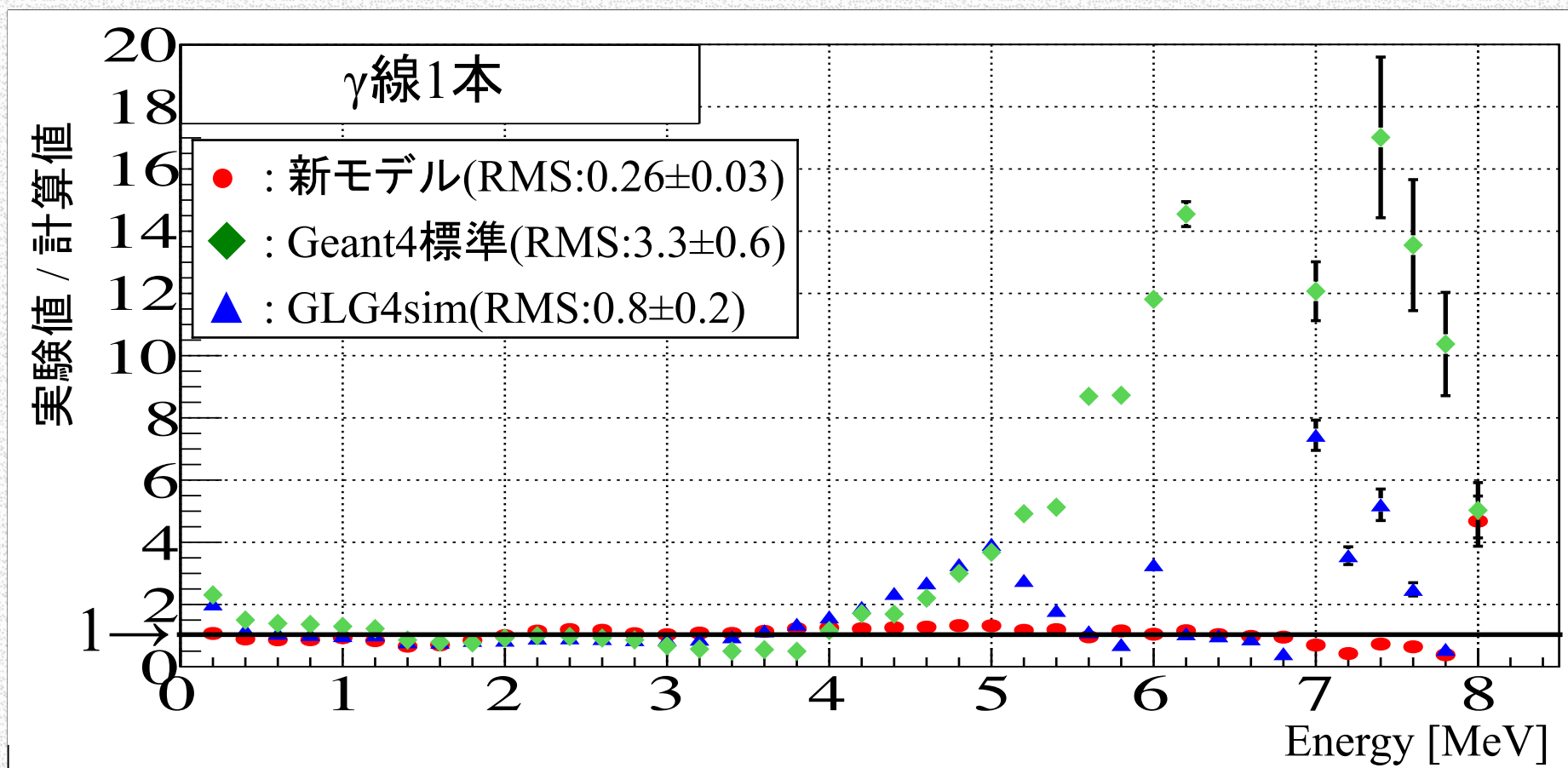
実験データ				
Ratio[%]	H=1	H=2	H=3	H=4
多重度1	69.936±0.008	17.161±0.007	2.315±0.003	$(2.364\pm0.009)\times 10^{-1}$
多重度2	-	7.401±0.005	2.056±0.003	$(4.01\pm0.01)\times 10^{-1}$
多重度3	-	-	$(2.96\pm0.01)\times 10^{-1}$	$(8.47\pm0.05)\times 10^{-2}$
多重度4	-	-	-	$(5.9\pm0.1)\times 10^{-3}$

新モデル				
Ratio[%]	H=1	H=2	H=3	H=4
多重度1	63±1	20.2±0.4	3.21±0.06	$(3.68\pm0.07)\times 10^{-1}$
多重度2	-	8.5±0.1	3.21±0.05	$(7.5\pm0.1)\times 10^{-1}$
多重度3	-	-	$(3.77\pm0.06)\times 10^{-1}$	$(1.35\pm0.02)\times 10^{-1}$
多重度4	-	-	-	$(7.0\pm0.2)\times 10^{-3}$

4-9. 実験データと他モデルでの比較

我々の実験データと3種類のモデルを比較した。

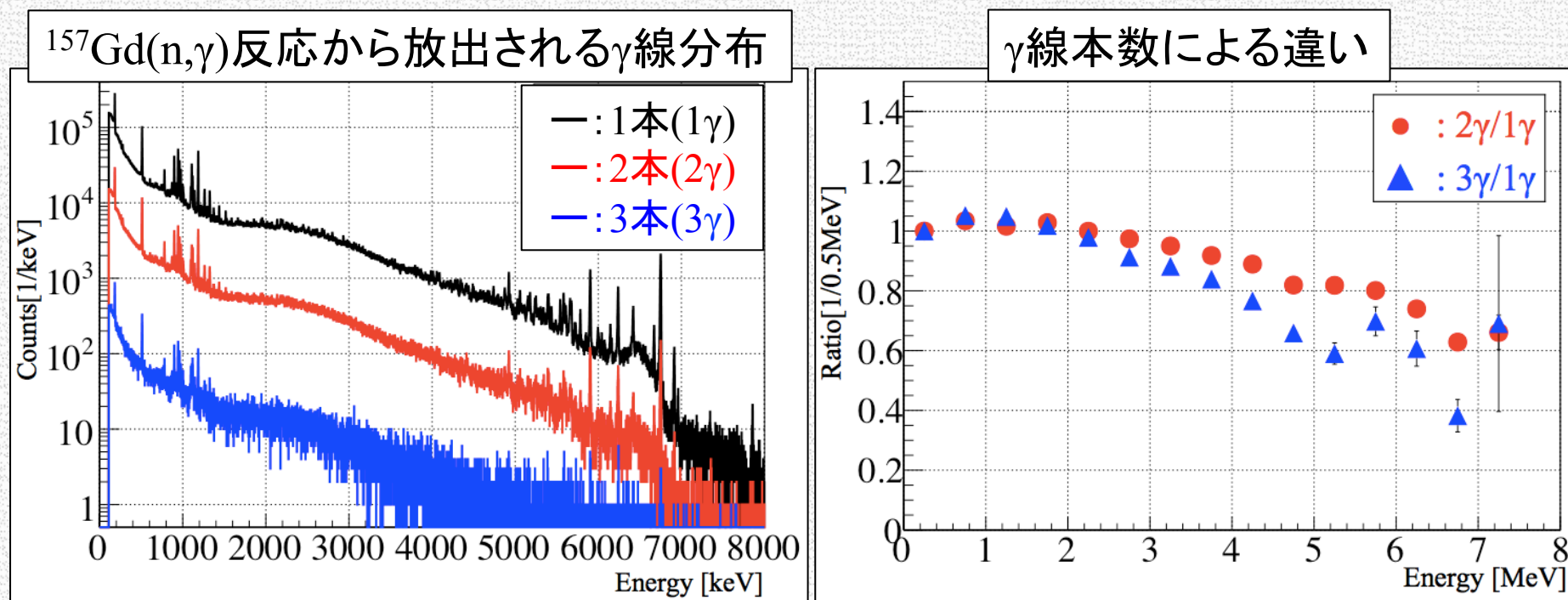
Geant4標準モデル(誤差約330%)とGLG4simモデル(誤差約80%)
に対して、新モデルでは誤差**26%**以内にまで改善した。



5-1. γ 線の本数毎の解析

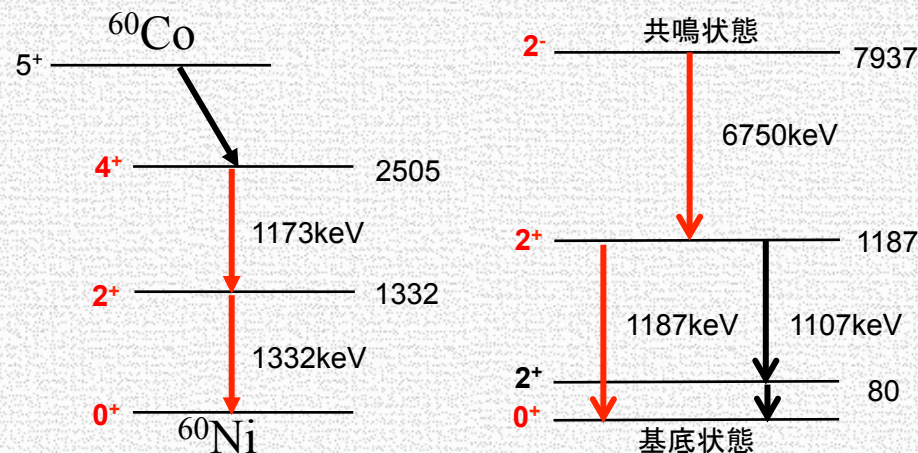
$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ 反応から放出される1本の γ 線について良く理解出来た。
現在、2 γ データの解析を現在行っている。(田中ポスター)

- 1st γ と2nd γ の強度
- 角度分布

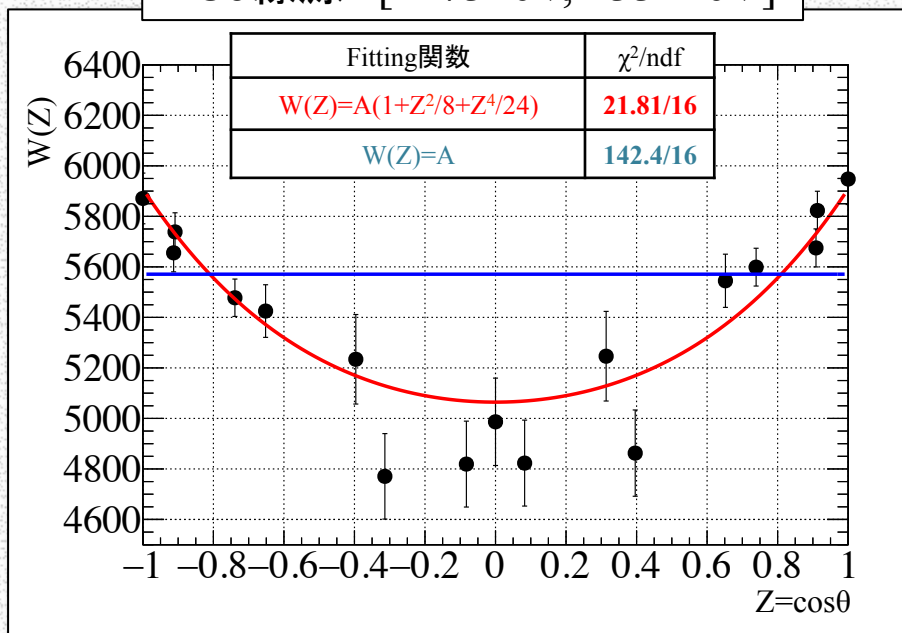


5-2. 角度分布解析の現状

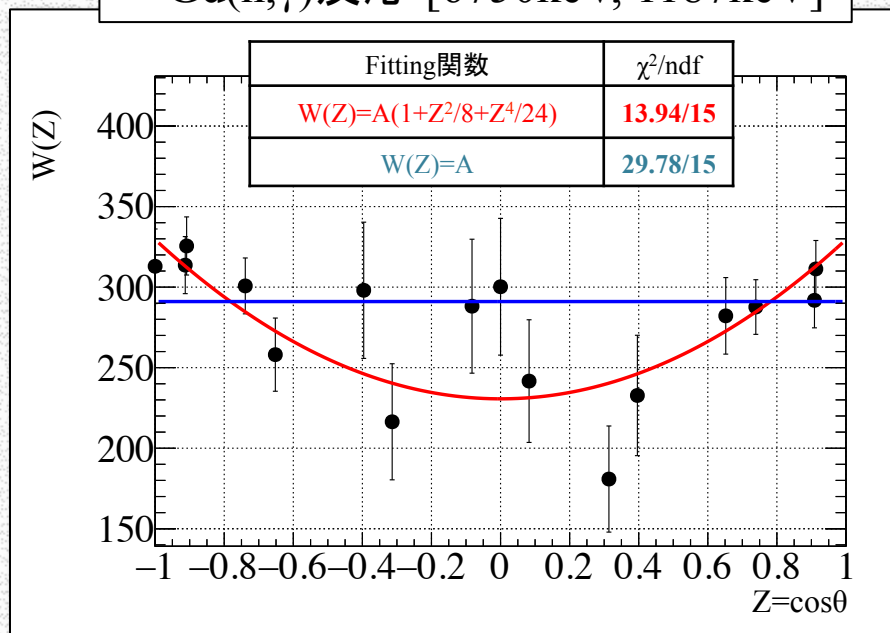
^{60}Co 線源と $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ 反応から放出される γ 線の1つのペアを使って角度依存を調べた。



^{60}Co 線源 [1173keV, 1332keV]



$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)$ 反応 [6750keV, 1187keV]



6. まとめ

目的

- ニュートリノ実験分野(SK-Gd等)でGdの熱中性子捕獲反応の応用が盛んである。
- Gdの熱中性子捕獲反応から放出される γ 線の詳細なデータが必要である。

実験成果

- ANNRI検出器を使って濃縮Gd[^{155}Gd , ^{157}Gd]の高精度データを高統計(約十億事象)で取得した。
- 線源較正により、 γ 線のエネルギー分布、 γ 線エネルギーの漏れ出し、ピーク検出効率($\pm 7\%$ 精度)を求め良い一致を得た。

研究成果

- 実験データに基づく γ 線遷移の新モデルを構築し、データとシミュレーションの良い一致($\pm 26\%$)を得た。これは従来モデルから精度を1桁程度向上させた。