

濃縮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について

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)

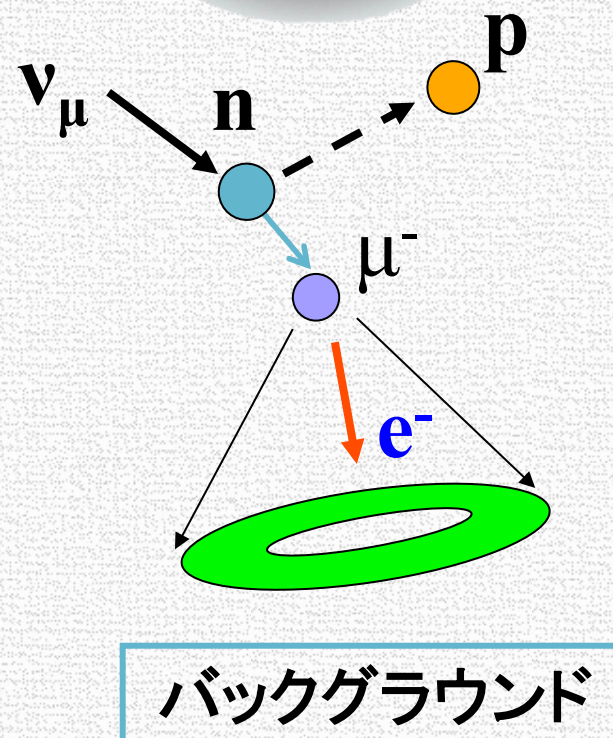
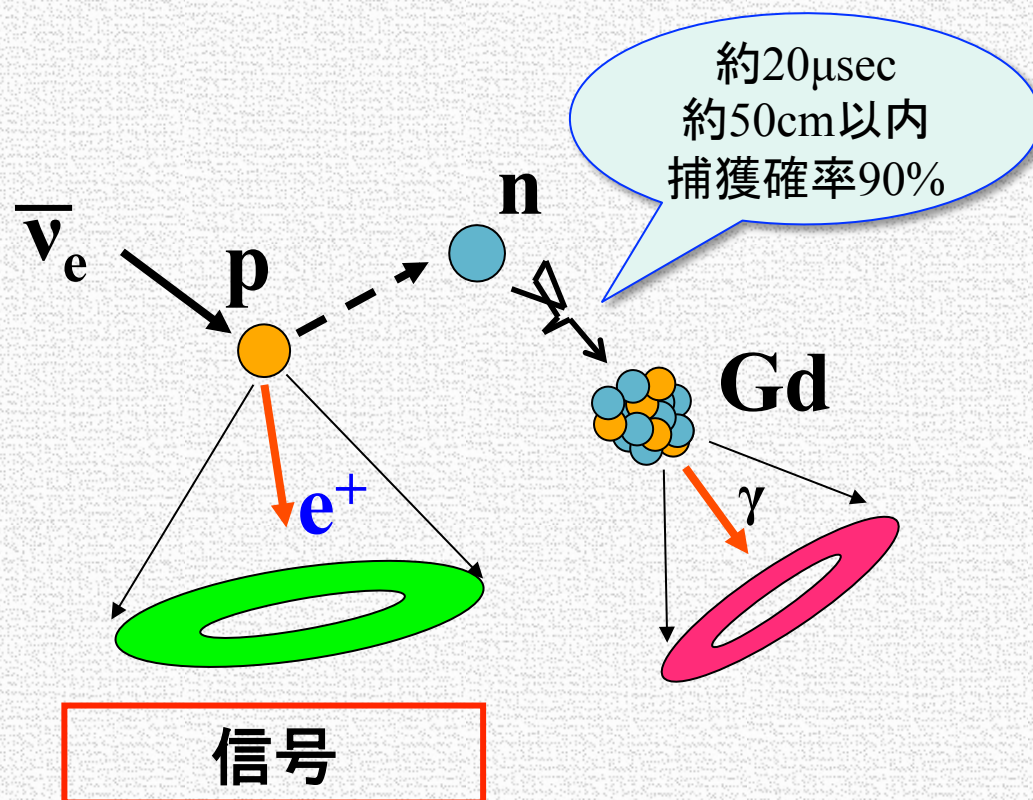
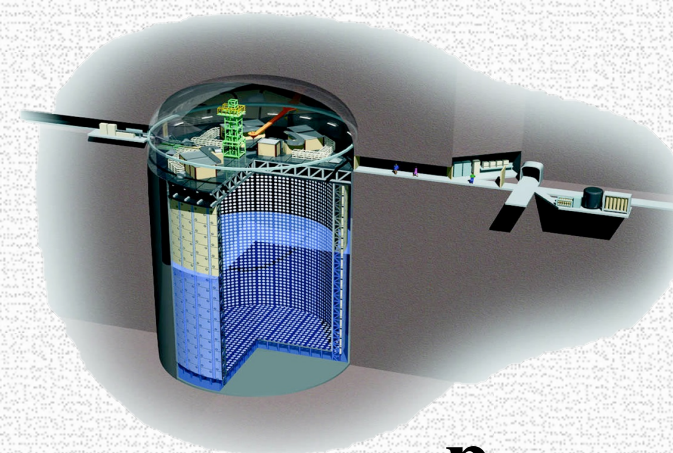
2014B0124 (^{155}Gd , ^{157}Gd 標的実験): 山田芳幸、王岩、P.Das、小汐由介、作田誠 (岡大)、
矢野孝臣(神戸大)、木村敦、原田秀郎、岩本信之、中村詔司 (JAEA)

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. 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4桁落とし、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

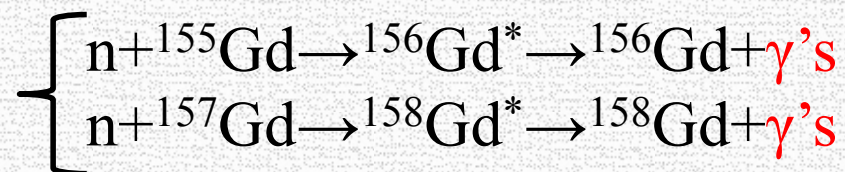
① 共鳴による大きな断面積

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。



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

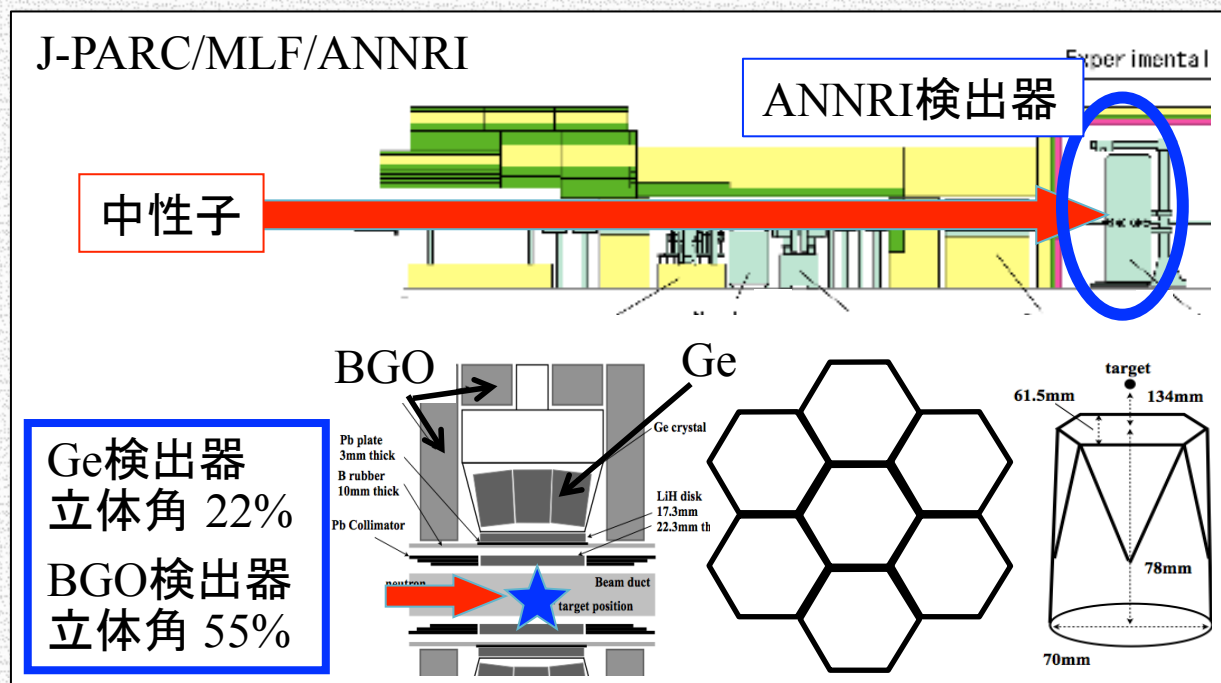
構築

2-1. 実験概要

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	上下7個の計14個で高精度な 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する

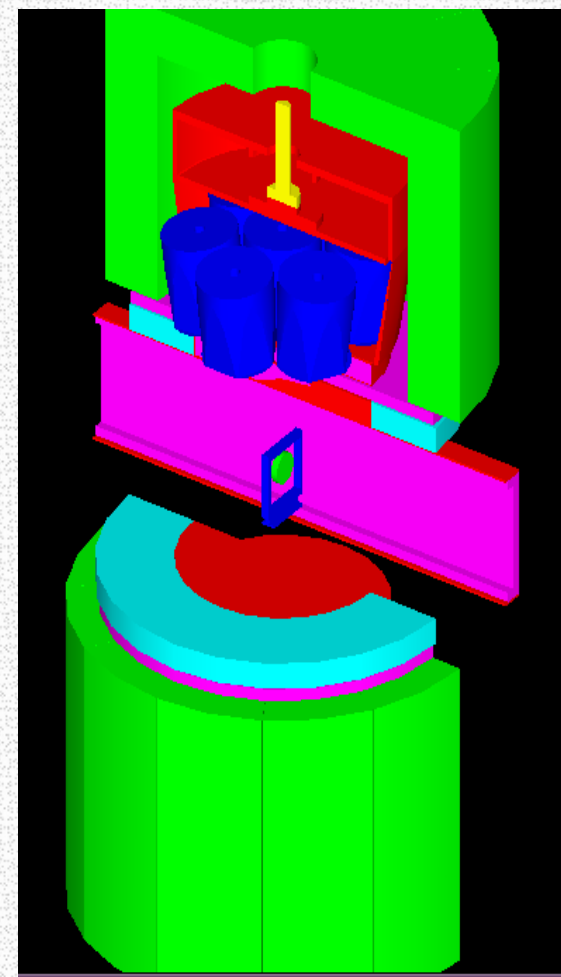
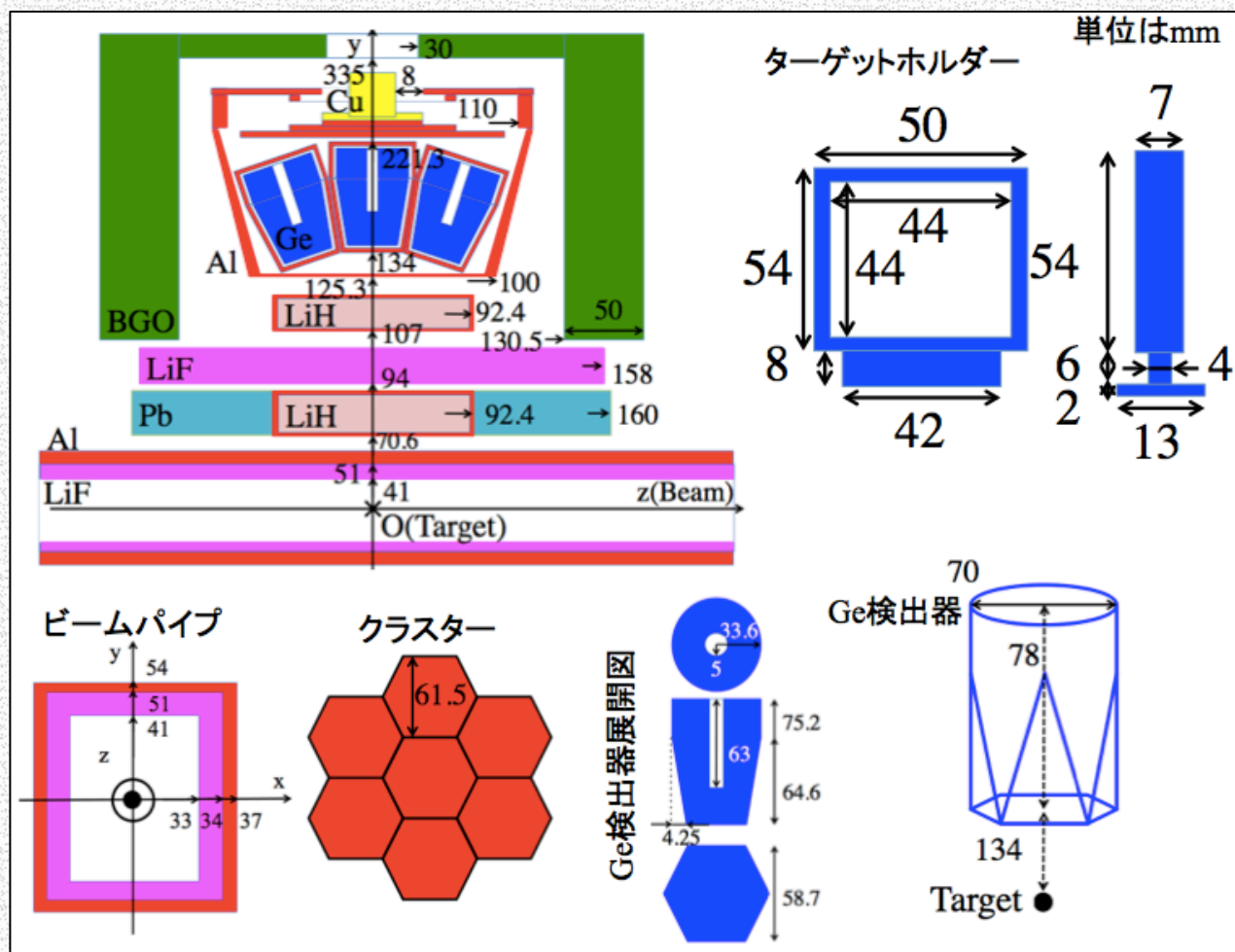
2014 B0124実験

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



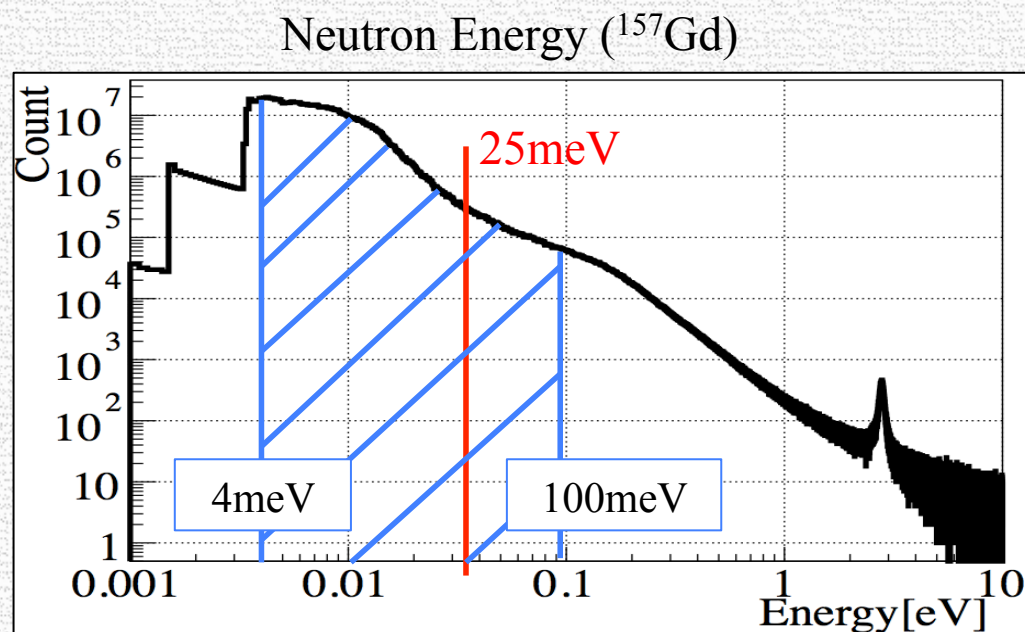
2-2. 検出器詳細

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))



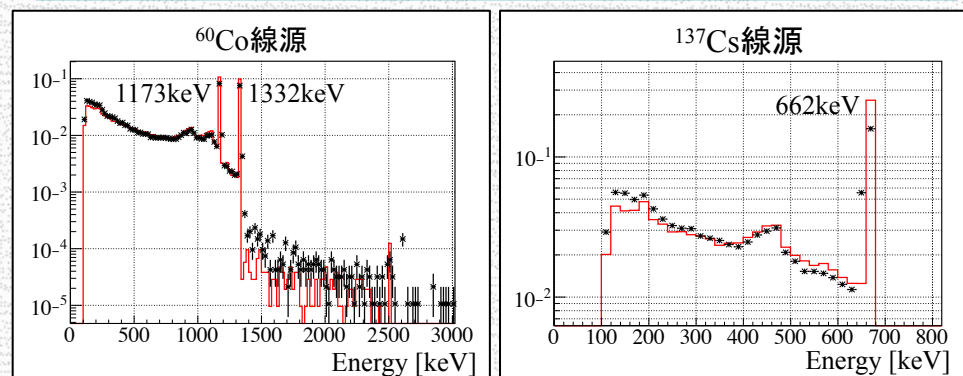
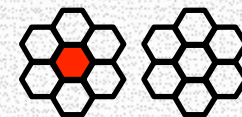
多重度3までの一例

	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

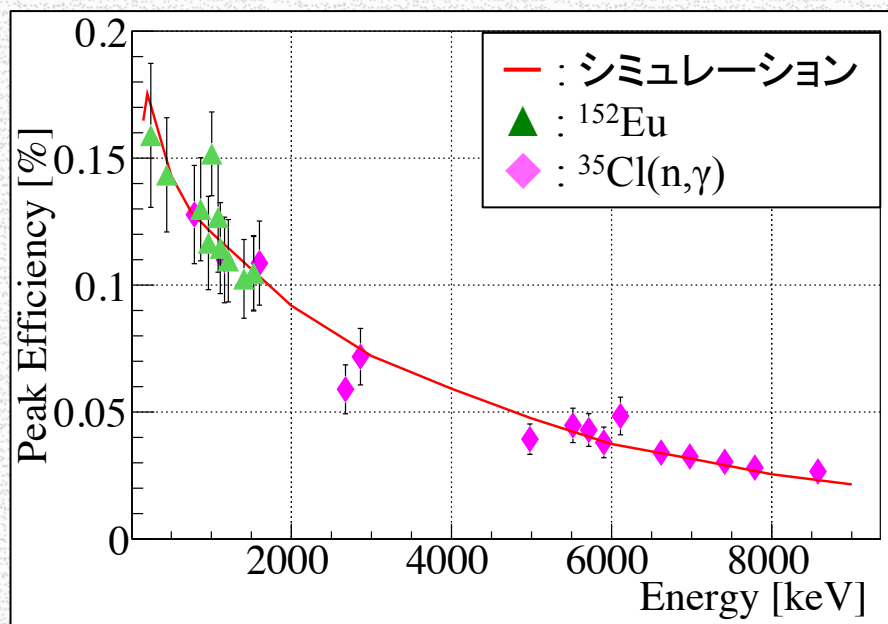
3-2. 線源データによるシミュレーションの評価

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。

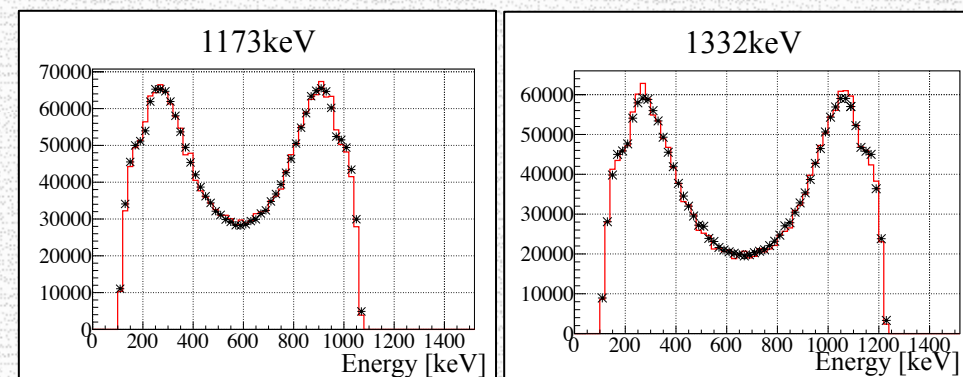
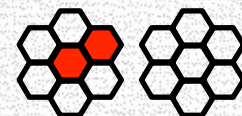
エネルギー分布



ピーク検出効率

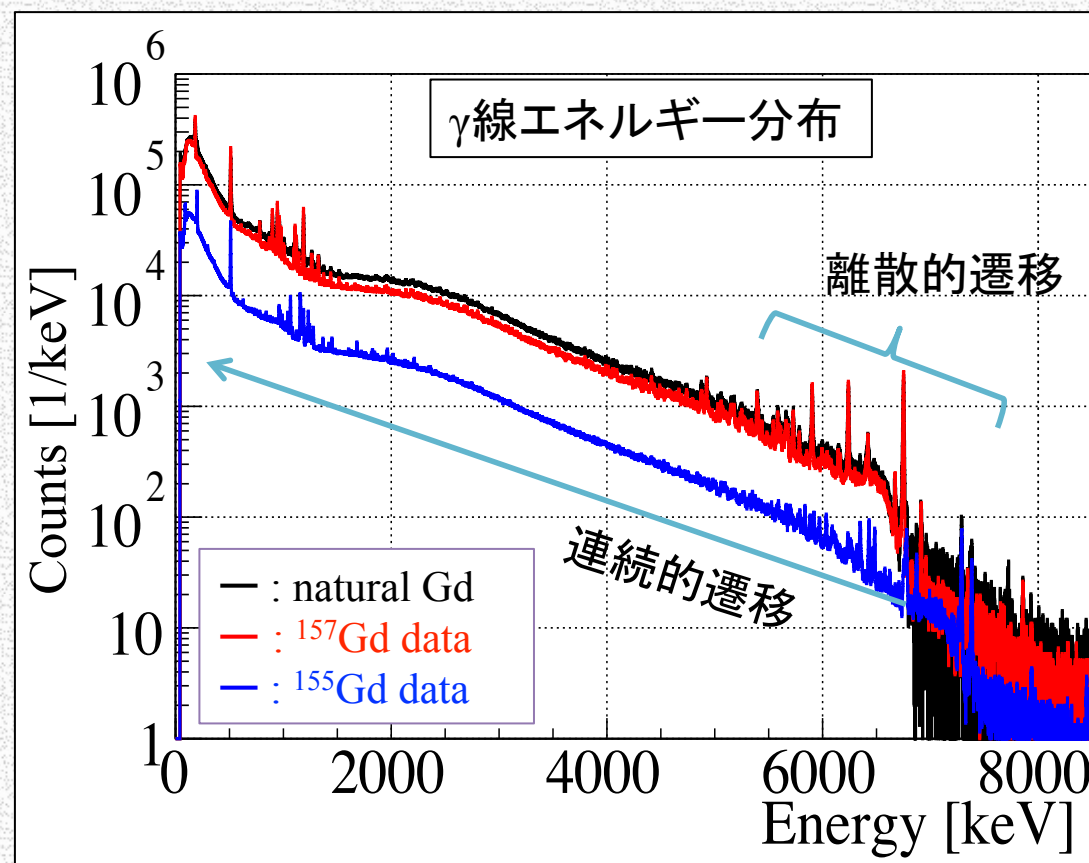
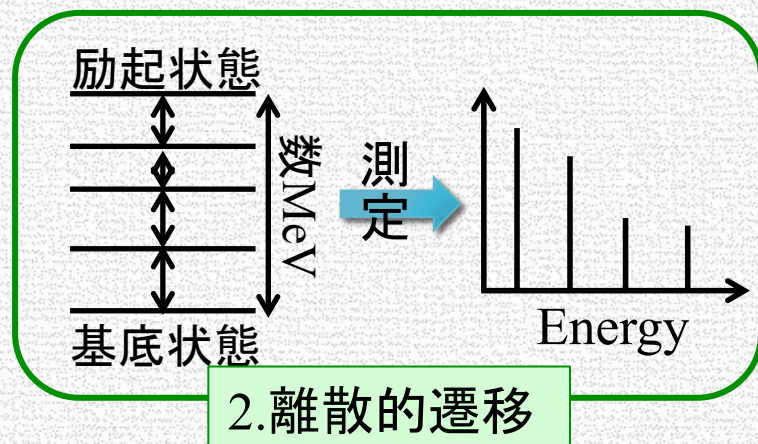
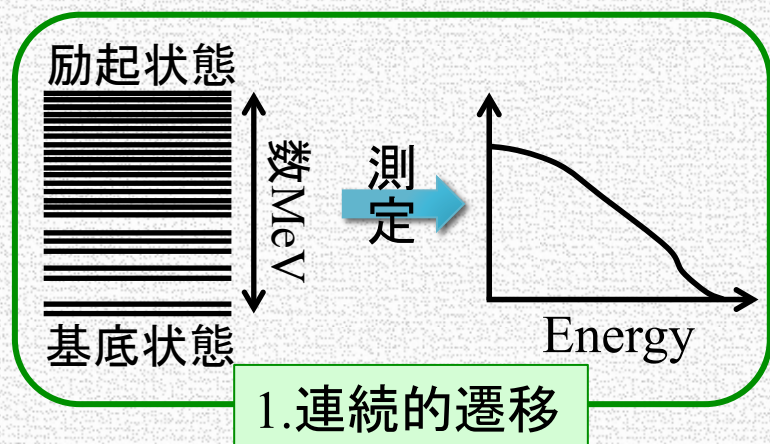


コンプトン散乱による γ 線の
広がりの評価



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(97.3%)と離散的遷移(2.7%)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。



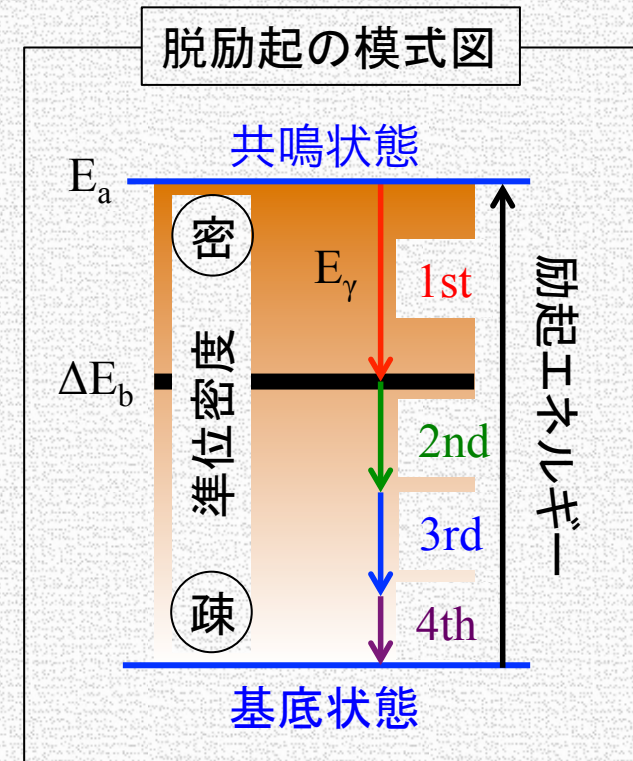
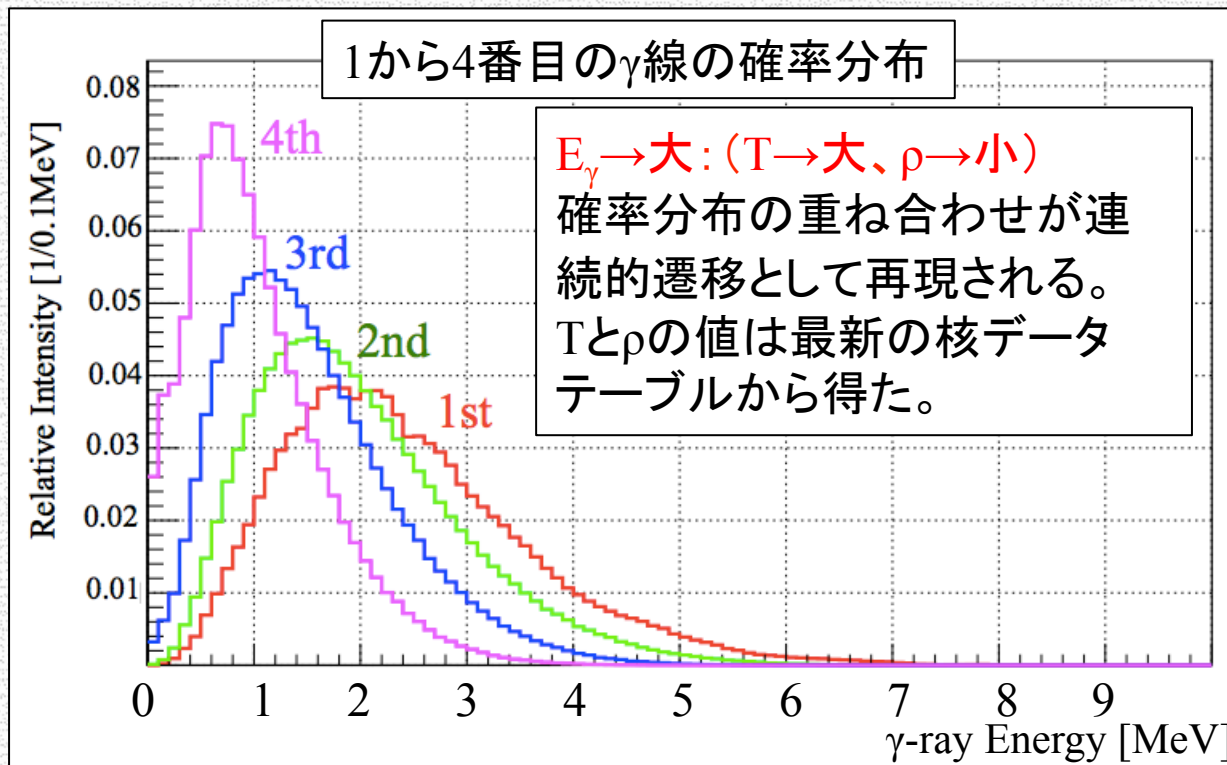
4-2. 連続的遷移

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。

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

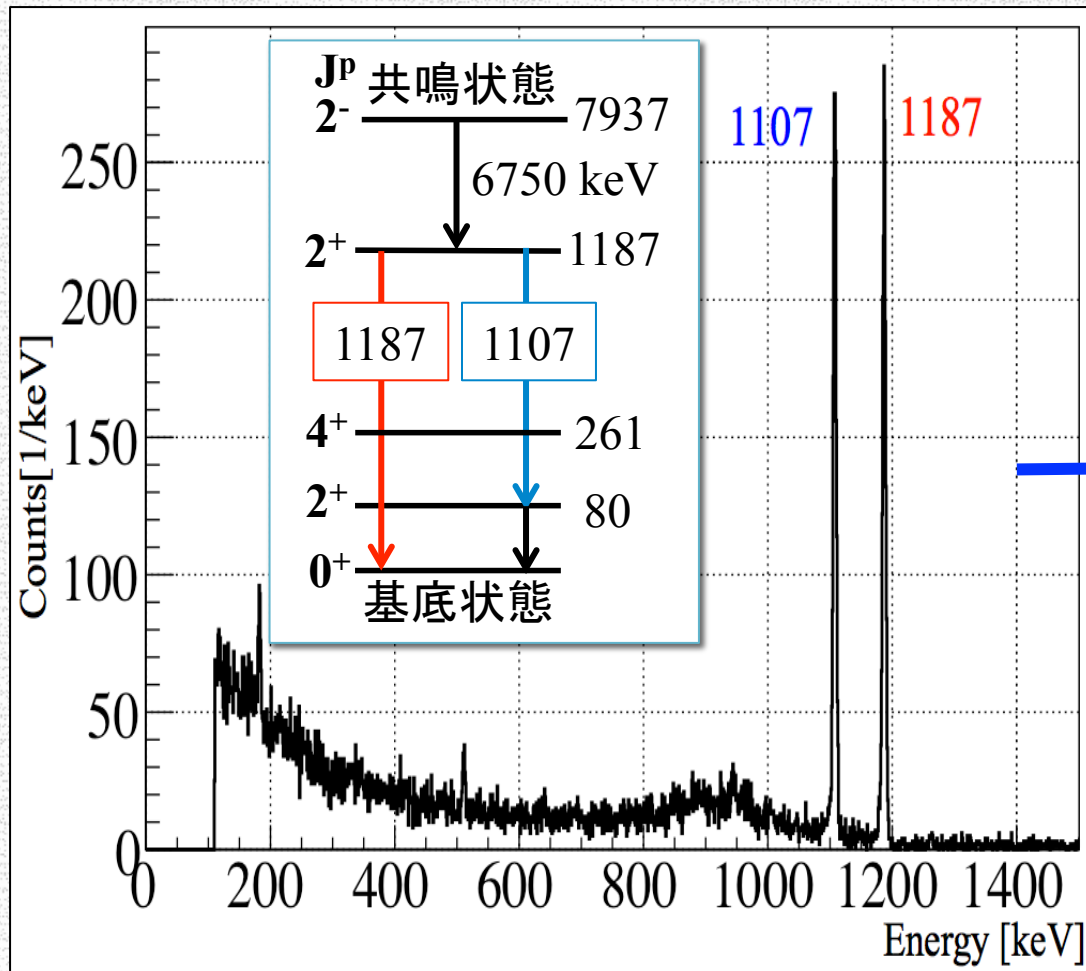
$$T = E_\gamma^3 f(E_\gamma) : \text{E1遷移}$$

$$\rho \propto e^{-\sqrt{AE}} : \text{準位密度}$$



4-3. 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。

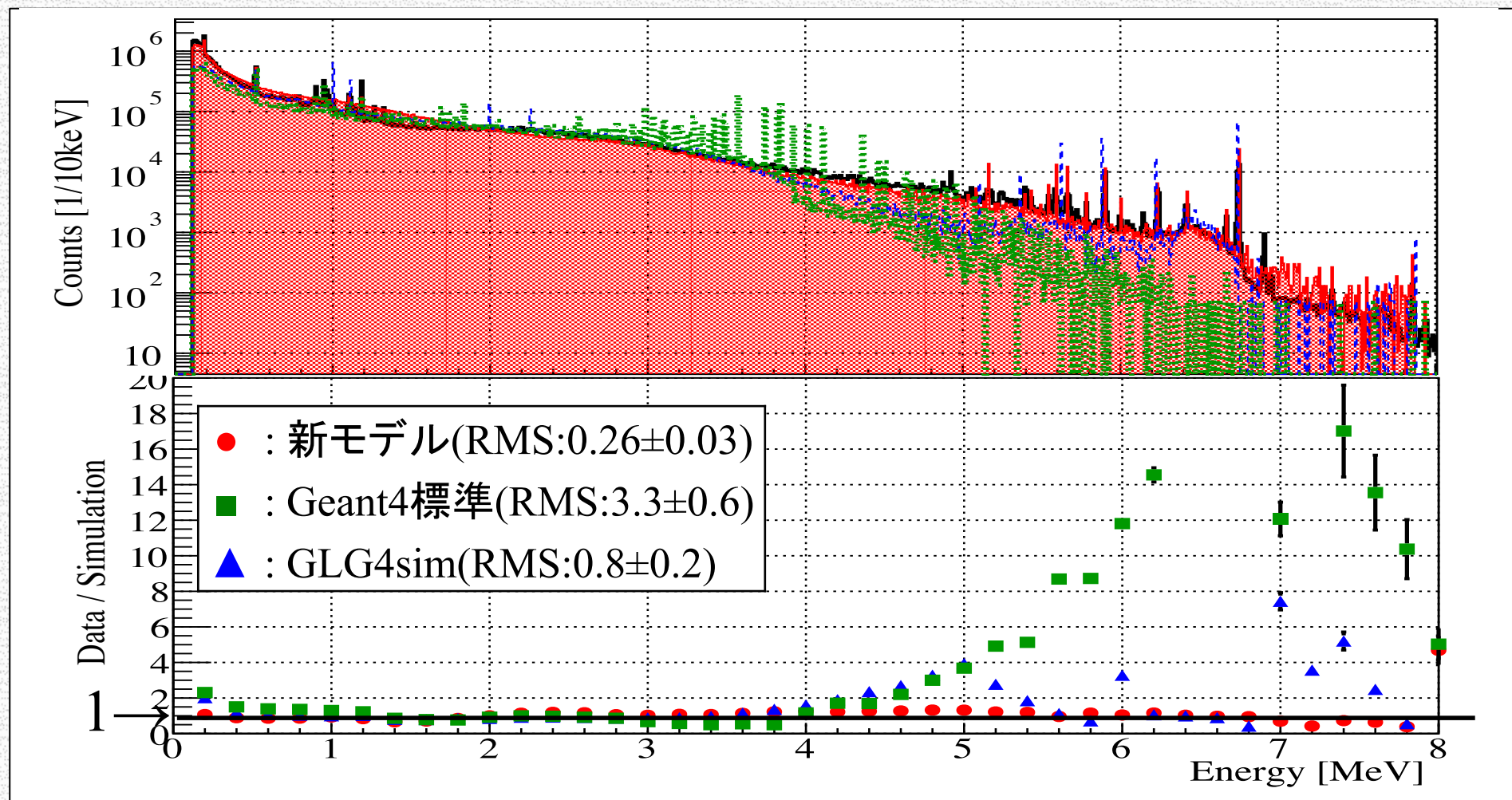


1. 連続的遷移 [97.3%]
2. 離散的遷移 [2.7%] (15本)
 - 5.167 MeV [0.25%]
 - 5.436 MeV [0.068%]
 - 5.543 MeV [0.099%]
 - 5.595 MeV [0.27%]
 - 5.669 MeV [0.26%]
 - 5.784 MeV [0.083%]
 - 5.903 MeV [0.49%]
 - 6.001 MeV [0.066%]
 - 6.420 MeV [0.14%]
 - 6.672 MeV [0.080%]
 - 6.750 MeV [1.0%]
 - 6.914 MeV [0.053%]
 - 6.960 MeV [0.0085%]
 - 7.857 MeV [0.0097%]
 - 7.937 MeV [0.0023%]

新モデルへ導入

4-4. 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. 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。

以下ノバックアップ