

スーパーカミオカンデ実験における Geant4ベースのシミュレーションの研究

岡山大学 理 萩原 開人
for Super-Kamiokande collaboration

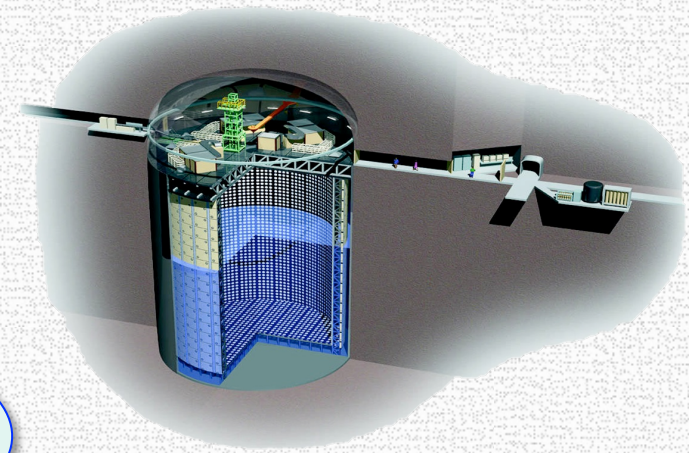


目次

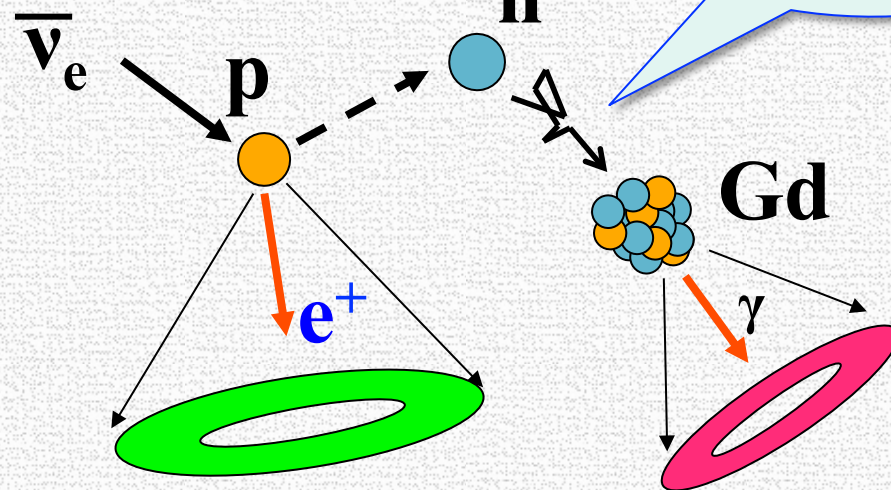
1. 研究背景・目的
2. Geant4ベースのSKシミュレーション
3. 中性子を用いた評価
4. まとめと今後

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(SK)の超純水に硫酸Gdを0.2%溶かすことにより、バックグラウンド事象を落とし、反電子ニュートリノを識別する。「SK-Gd実験」



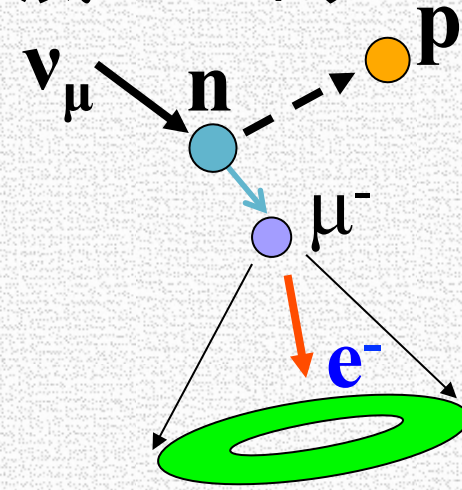
超新星背景ニュートリノ



信号

遅延信号

大気ニュートリノ



バックグラウンド

1-2. SKでのシミュレーション



現在SKで使用されているシミュレーション(**SKDetSim**)は、Geant3をベースに構築されている。しかし、維持や拡張性の観点から、最新のGeant4をベースとしたシミュレーションの構築が望まれている。そこで、新たにGeant4をベースにしたSKのシミュレーション(**SKG4**)を構築する。

	SKDetSim	SKG4
シミュレーション	Geant3	Geant4
使用言語	FORTRAN	C++
物理モデル	更新終了	最新

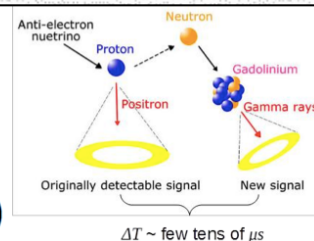
2-1. SKにおけるGeant4を用いた研究

Ka Mingさん

Introduction

- Super-Kamiokande Detector Simulator (**SKDETSIM**)
- Based on GEANT3, with low energy neutrons are simulated by MICAP:
No support for Gadolinium x-sec & interactions → interface to GEANT4 with updated data & flexibility to give **Gd-SKDETSIM**
- Neutron gun results shown in last JPS meeting → validation of atmospheric neutrino simulation & neutron tagging algorithm in this talk

JPS Spring Meeting 2017



Geant3ベースの「SKDetSim」を用いるが、中性子発生からGdに捕獲されるまでをGeant4でシミュレートする。

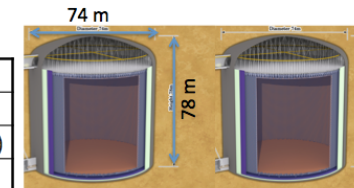
岡島さん

ハイパーカミオカンデ

- 大容量水チェレンコフ型ニュートリノ検出器を用いた将来実験計画
 - スーパーカミオカンデの17倍の有効体積→統計数増加
 - 光センサの高感度化(SKの2倍)、高時間精度化(2倍)により測定精度向上

検出器ベースラインデザイン

光電面被覆率	40% (Super-K: 40%)
有効体積	187 kton x 2 (Super-K: 22.5)
光センサ数 (内水槽)	~40000 x 2 (Super-K: 11129)
内水槽の光センサ	Box & Line PMT



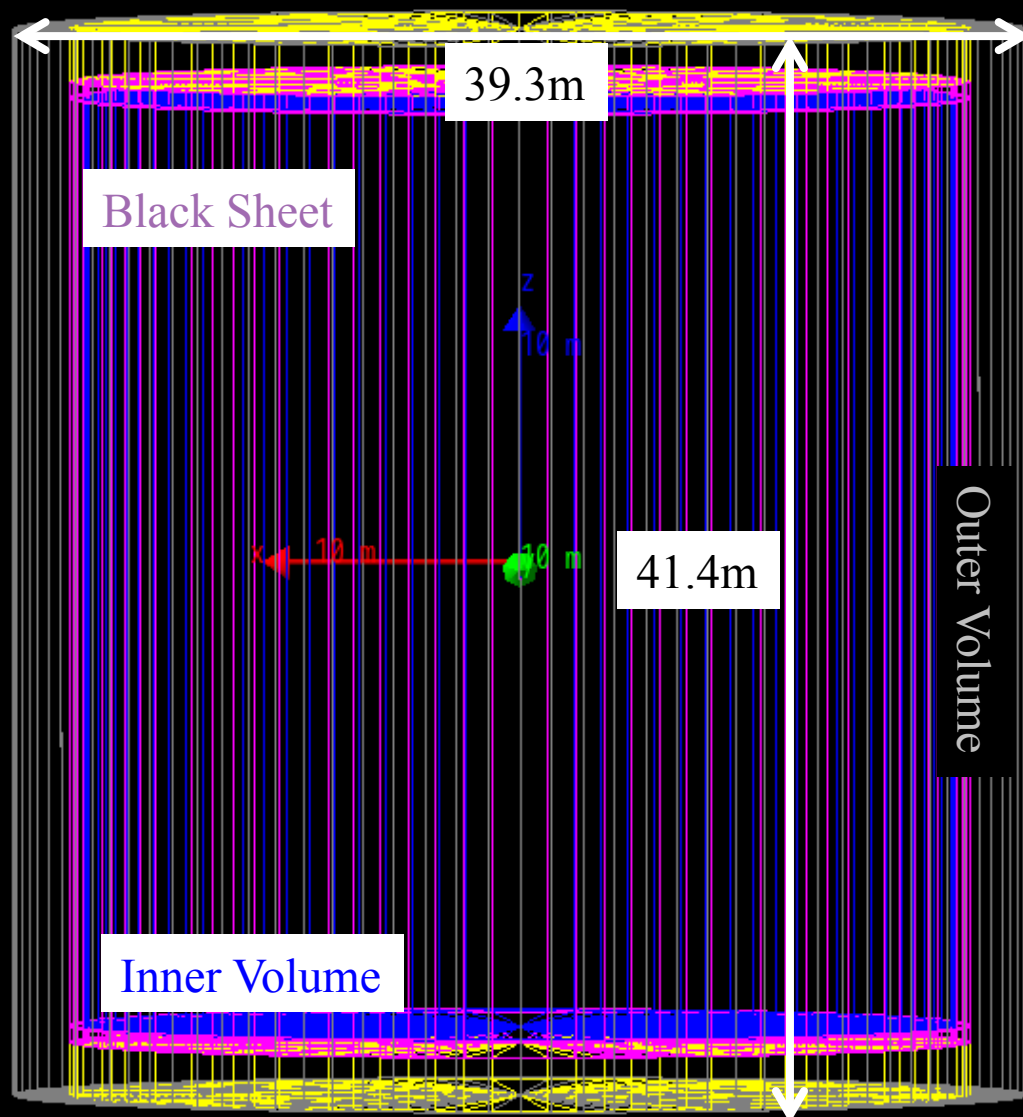
主な目的

- 核子崩壊の観測による大統一理論の検証
- レプトンのCP対称性の破れの検証などに向けたニュートリノ振動の観測
- 超新星爆発由来のニュートリノの観測などの宇宙物理学に関する研究

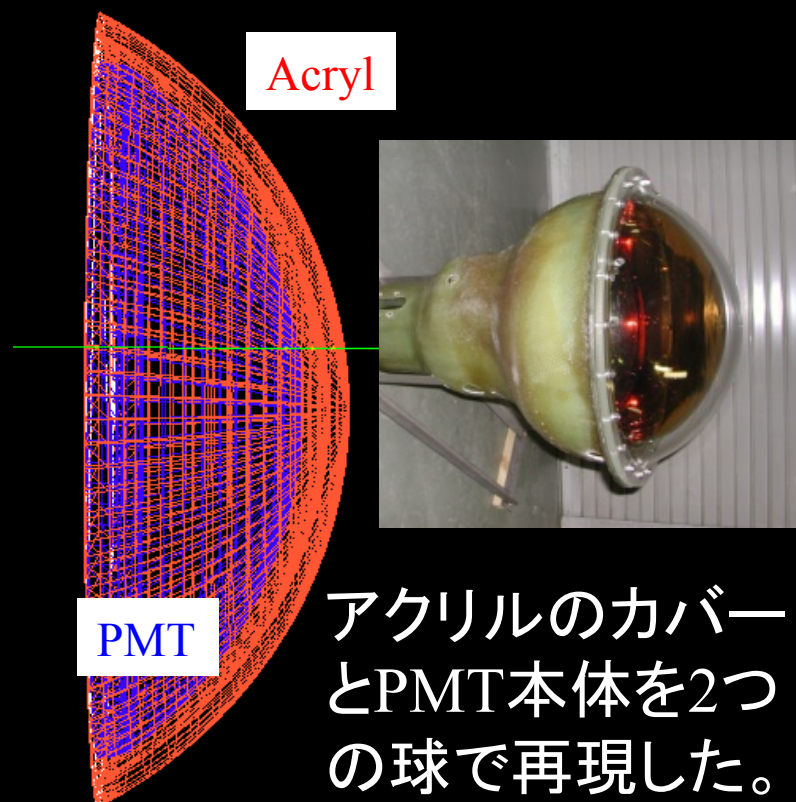
JPS Autumn Meeting 2016

ハイパーカミオカンデ計画のためにGeant4ベースのシミュレーション「WCSim」を作成。

2-2. SKG4のGeometry



Geant4.10.03.p02でSKを再現した。寸法はSKDetSimの値を用いた。



アクリルのカバーとPMT本体を2つの球で再現した。

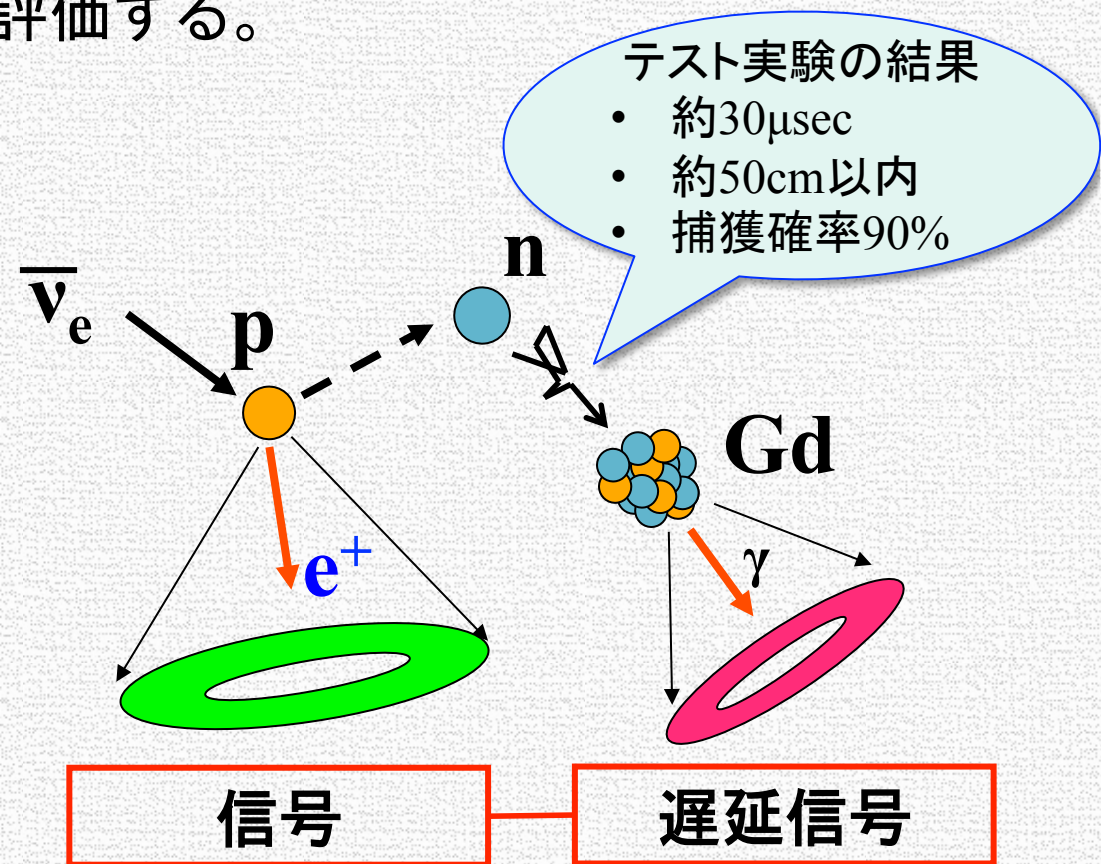
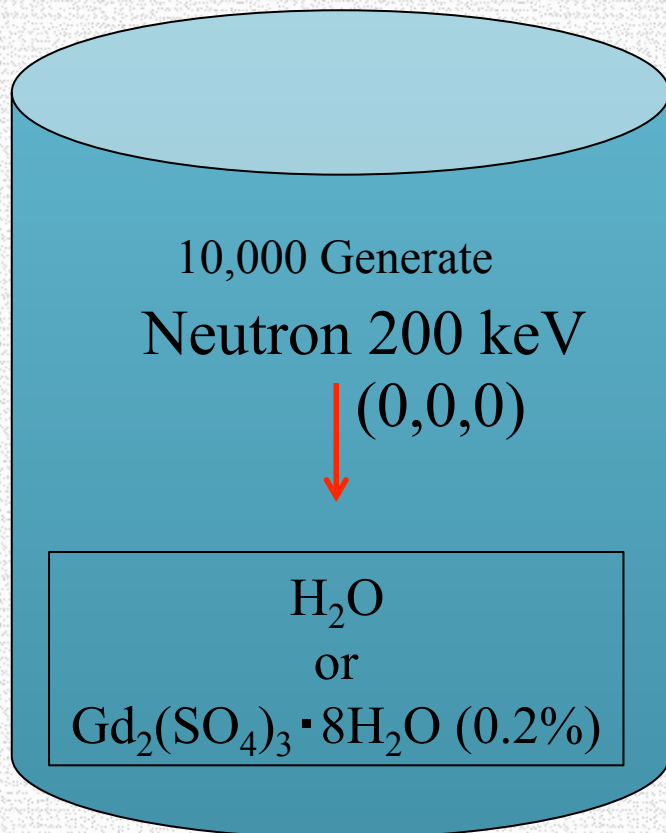
2-3. 物理モデル

Geant4では、様々な物理リストを使用することが可能である。SKG4ではスーパーカミオカンデ実験に適したモデルを選択しなければならない。現在は以下の物理リストを使用している。

Electromagnetic	G4EmLivermore	Livermore Data Tableを利用した低エネルギー用リスト
Optical	G4Optical	光学光子のための物理リスト(チェレンコフ放射, etc.)
Decay	G4Decay	放射性崩壊の物理リスト(β^- , etc.)
Stopping	G4Stopping	ミューオンの静止崩壊を記述する物理リスト
Hadron Elastic	G4HadronElasticPhysicsHP	低エネルギー(<20 MeV)中性子まで計算できるハドロン弾性散乱に関する物理リスト
Hadron Inelastic	G4HadronPhysicsFTFP_BERT_HP	Geant4.10.0からFTFP_BERTがデフォルトリストとなっている。低エネルギー中性子計算を追加した物理リスト

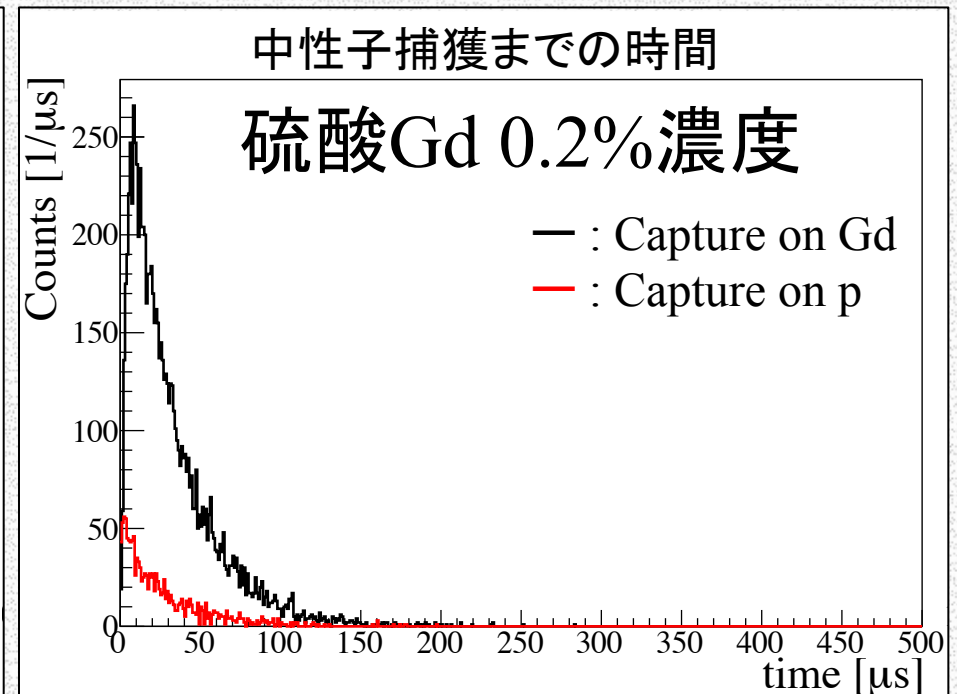
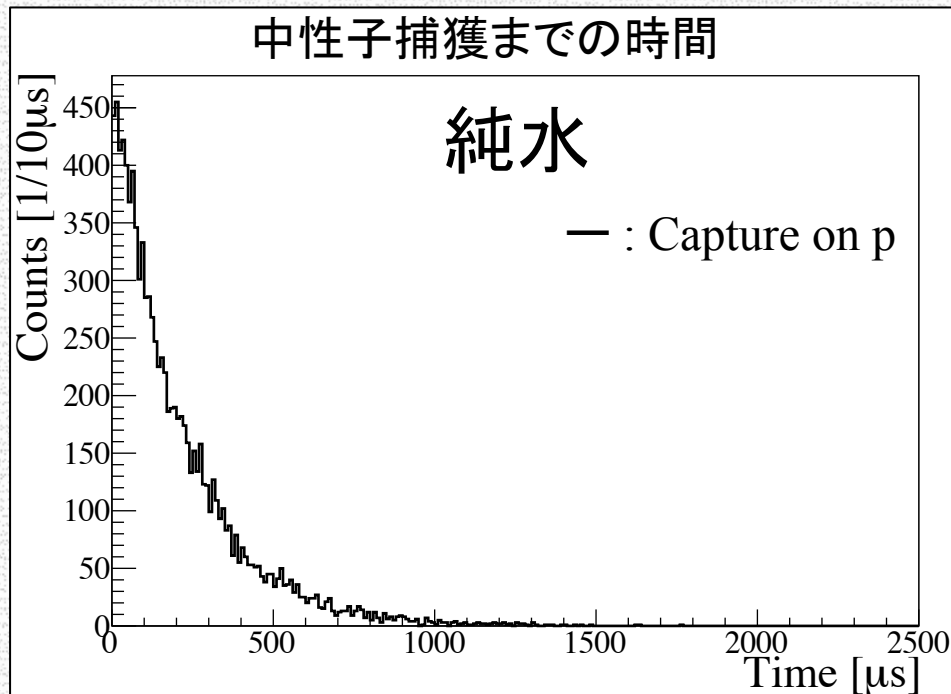
3-1. 中性子を使った評価

硫酸Gd八水和物0.2%濃度水溶液と超純水の2パターンで評価する。タンク中心から下方向へ中性子($T_n = 200\text{keV}$)を入射した際の挙動(時間、距離、確率)を評価する。



3-2. 中性子捕獲時間

200 keVの中性子が捕獲されるまでの時間分布。硫酸Gd水溶液の場合は、Gdに捕獲されるか水素原子核に捕獲されるかで場合分けをおこなった。下の表は $Ae^{-\lambda x}+B$ でFittingした時の $1/\lambda$ の値である。



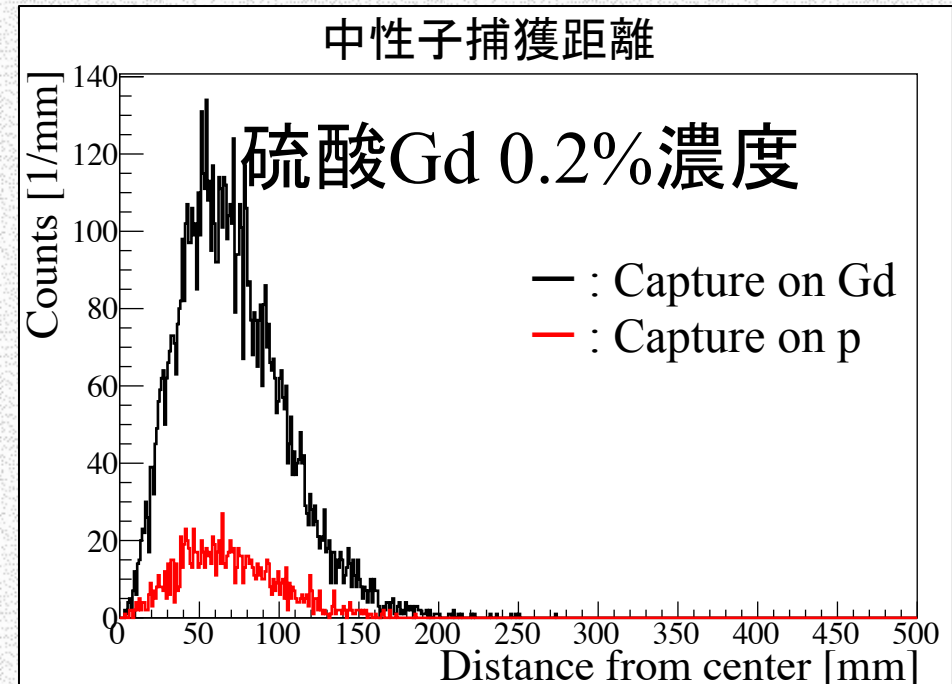
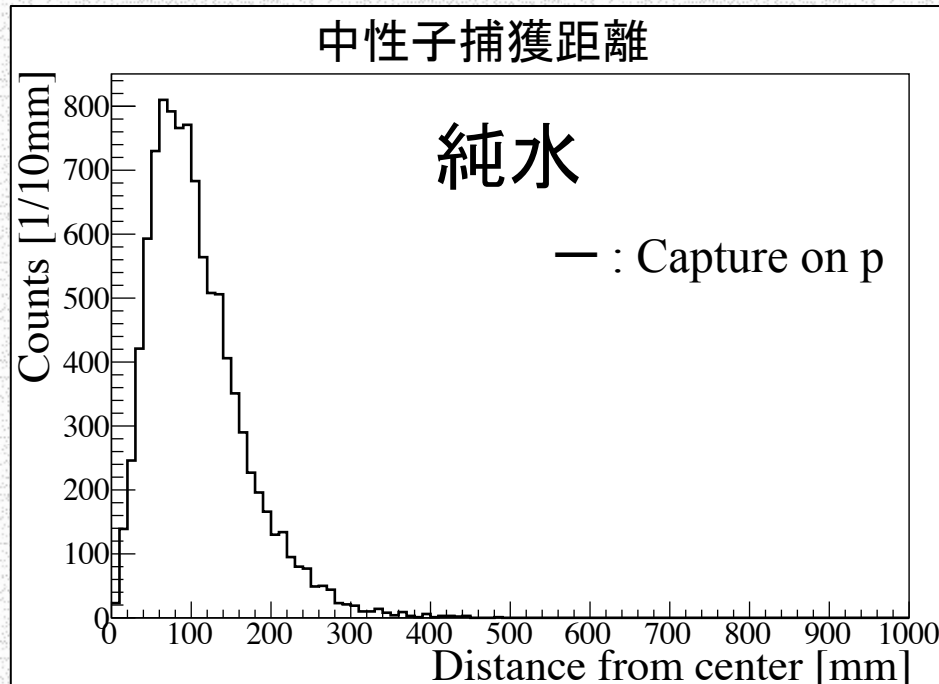
Capture on p (純水)	$196 \pm 3 \text{ } \mu\text{s}$
Capture on p (硫酸Gd水溶液)	$18 \pm 1 \text{ } \mu\text{s}$
Capture on Gd (硫酸Gd水溶液)	$27 \pm 1 \text{ } \mu\text{s}$

テスト実験の結果

- 約30μsec
- 約50cm以内
- 捕獲確率90%

3-3. 中性子捕獲距離

200 keVの中性子が捕獲された位置の中心からの距離の分布である。
下の表は、分布の中心値である。誤差は標準偏差 σ である。

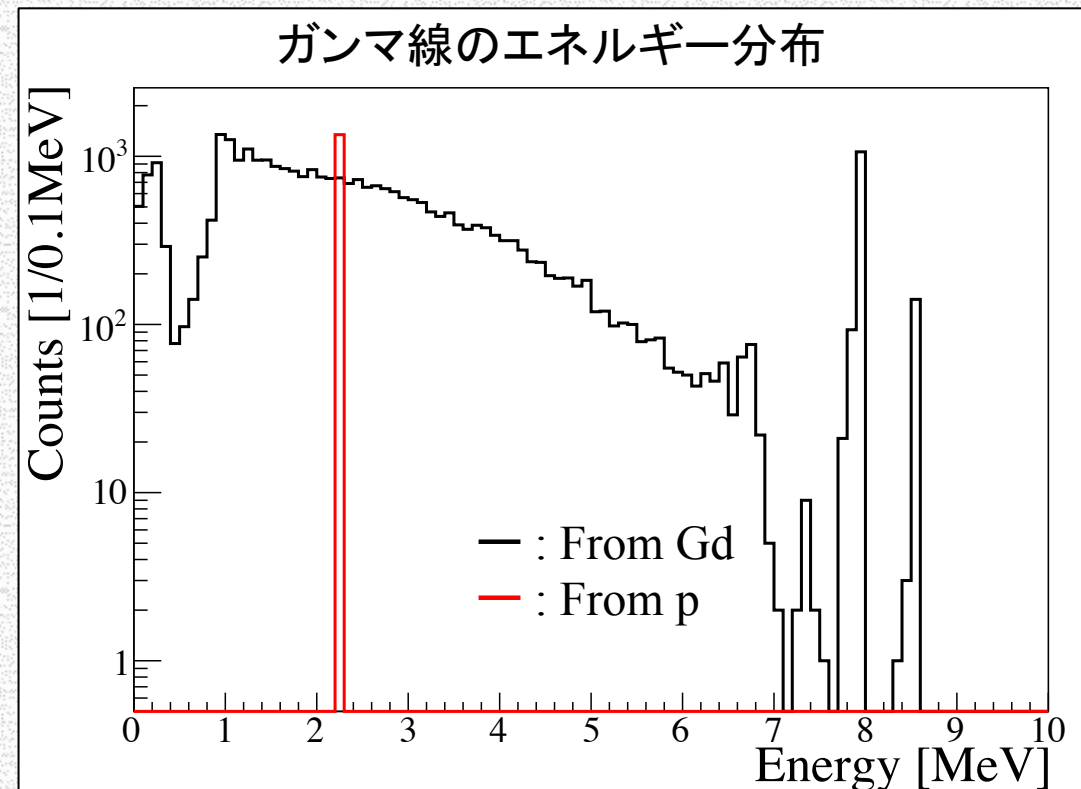


Capture on p (純水)	107±60 mm	テスト実験の結果 - 約30μsec - 約50cm以内 - 捕獲確率90%
Capture on p (硫酸Gd水溶液)	68±31 mm	
Capture on Gd (硫酸Gd水溶液)	70±33 mm	

3-4. 中性子捕獲確率とガンマ線

中性子がどの核子に捕獲されるかを下の表に示す。また中性子捕獲後に原子核から放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを右に示す。

1万回の内、1度だけ ^{16}O に中性子が捕獲される事象が起こった。その際には、2.18 MeVと3.27 MeVのガンマ線が放出された。



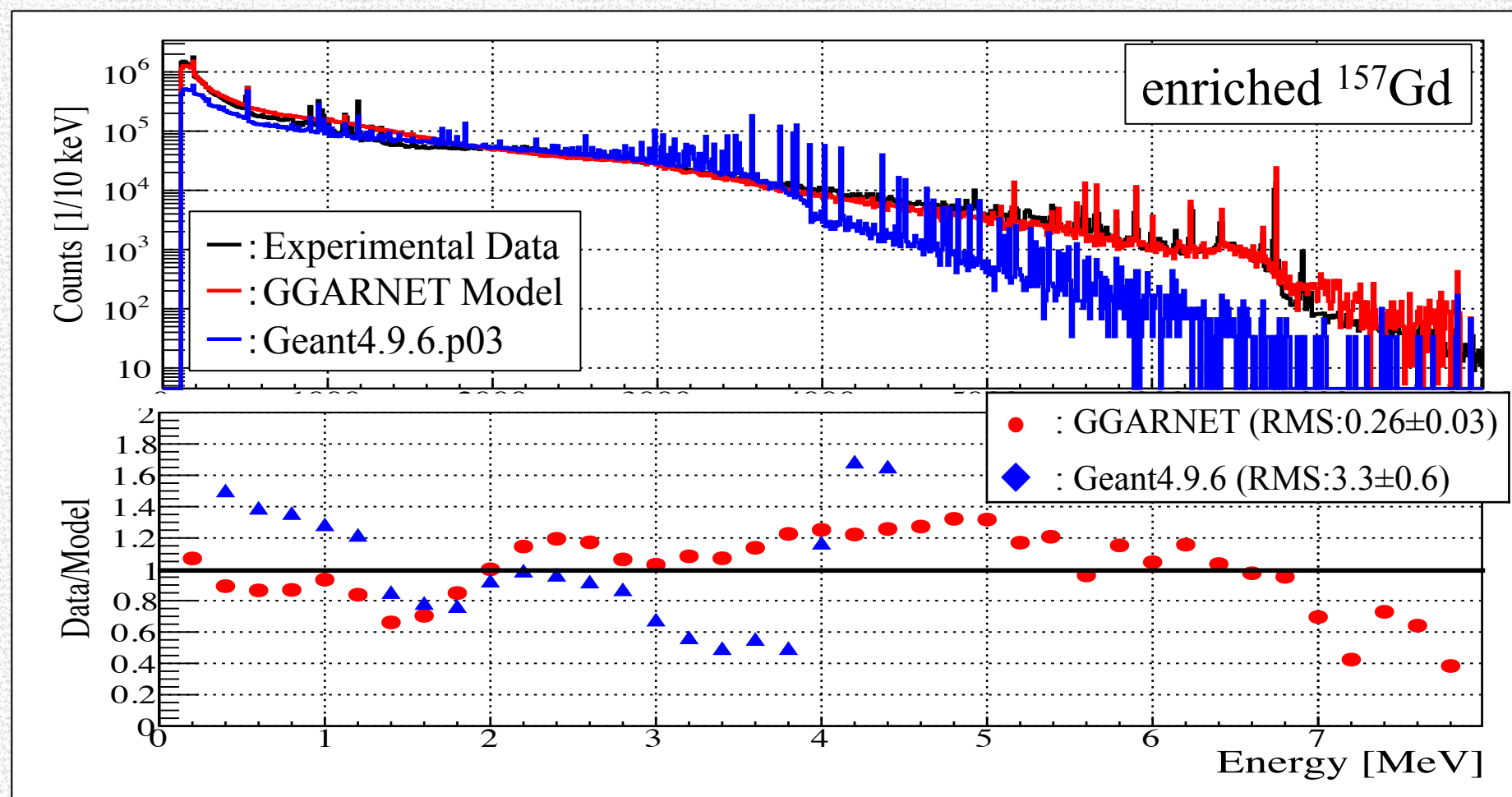
Capture on Gd	86.54±0.93%
Capture on p	13.45±0.36%
Capture on Other	0.01±0.01%

テスト実験の結果

- 約30μsec
- 約50cm以内
- 捕獲確率90%

3-5. Gdの中性子捕獲から放出される γ 線

J-PARC/MLFに設置されたANNRI検出器を使用して、 $\text{Gd}(n,\gamma)$ 反応からの γ 線を詳細測定した。その結果を使った高精度なモデル(GGARNET)が開発された。



4. まとめと今後

目的

- Geant4ベースのSKシミュレーションを新たに構築する。

結果

- SK検出器の構造は完成した。
- 200 keV中性子を利用して、硫酸Gd水溶液中の中性子捕獲の様子を評価した。
- 予想されていた値と良い一致を示した。

今後

- 現行のシミュレーション(SKDetSim)や校正データとの比較し、適切な物理リストの選定をおこなう。
- SK-Gd実験のために、GGARNETモデルを使用できるようにする。