

# SK-Gd実験における Am/Be線源を用いた中性子同定効率評価

岡山大学 原田将之

9月14日 @日本物理学会 (オンライン)

小汐由介(岡山大),

Han Seungho, 渡辺柁平, 矢野孝臣, 奥村公宏, 関谷洋之, 森山茂栄(東大宇宙線研),

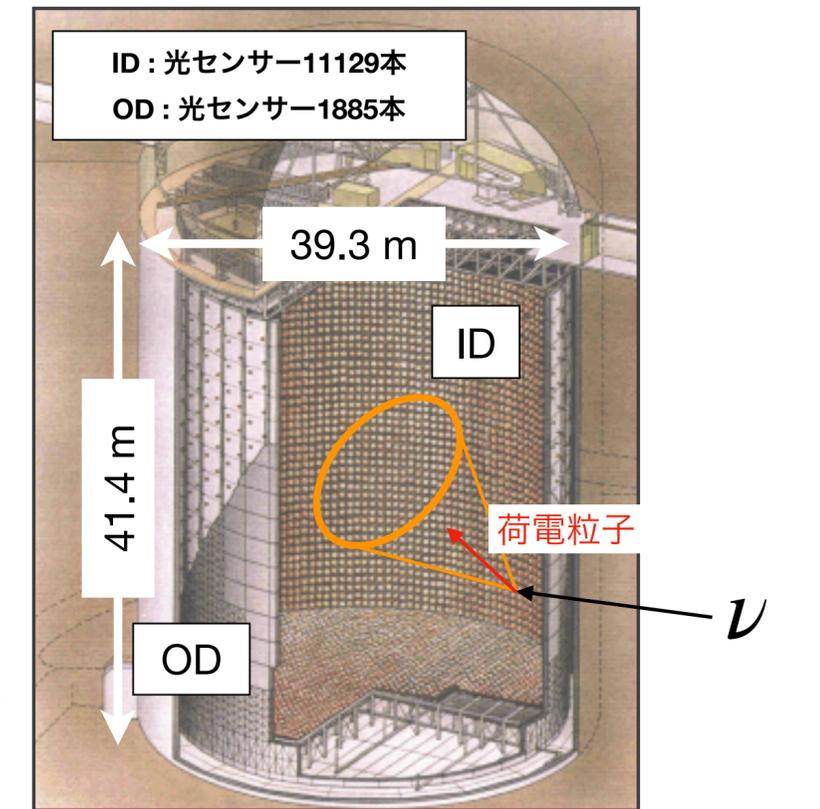
中島康博(東大理), Roger Wendell(京大理)

他Super-Kamiokande Collaboration

# SK-Gd実験

Super-Kamiokande検出器の超純水に硫酸Gdを導入し、  
中性子信号を高効率で検出する

- 検出器：Super-Kamiokande(SK)
  - ▶ 超純水で50 ktonの容量を持つチェレンコフ検出器
  - ▶ 内水槽(ID)に11129本のPMT→Hit時間・電荷・ヒット数から事象再構成
  - ▶ 外水槽(OD)に1885本のPMT→高エネルギー事象の再構成、宇宙線ミューオンのVETO



(<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/doc/sk/library/image.html>)

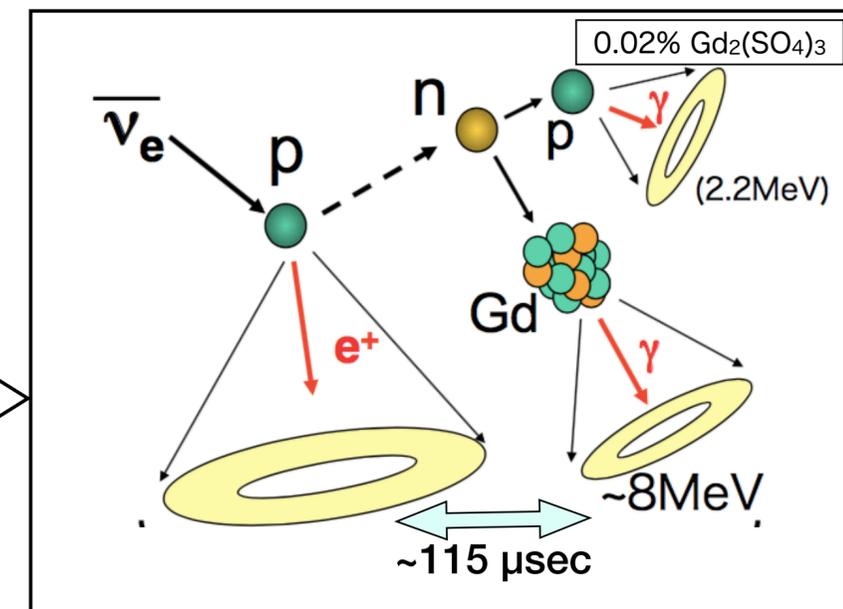
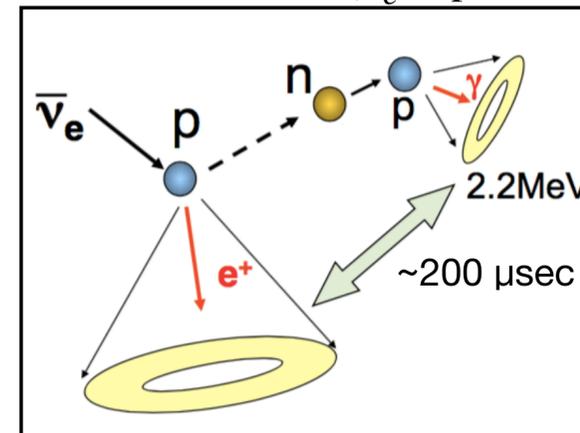
- 先発荷電粒子に付随した中性子の熱中性子捕獲事象を観測することで  
超新星背景ニュートリノなどの観測感度を向上させる→同時遅延計測

- Gdの中性子捕獲：SKで観測可能な合計~8 MeVのガンマ線

- 2021年9月現在、Gd濃度0.011%相当が導入済 (17pW1-2)  
(Gdの中性子捕獲 ~ 50%, 捕獲時定数 ~ 116 μs)

(<https://arxiv.org/abs/2109.00360>)

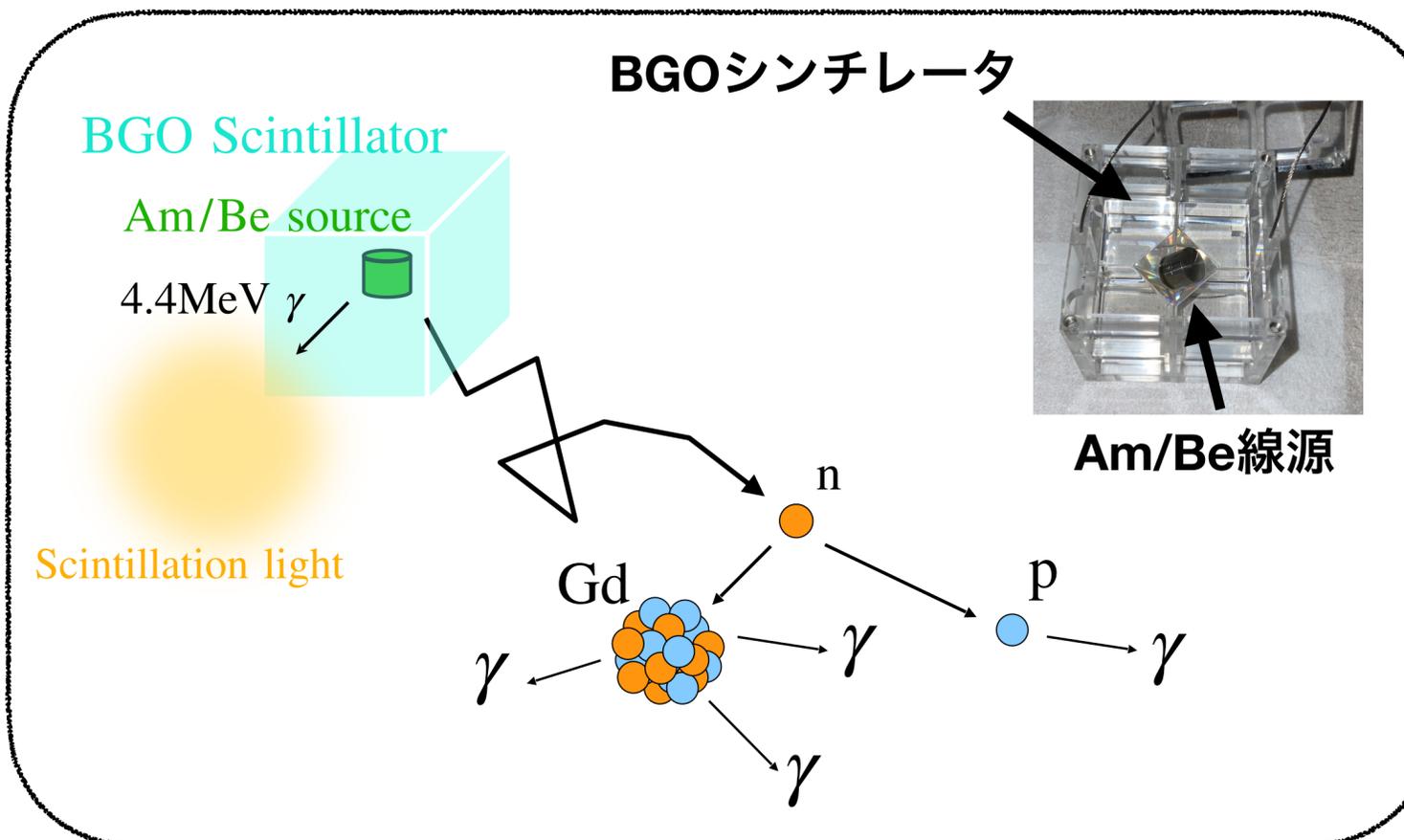
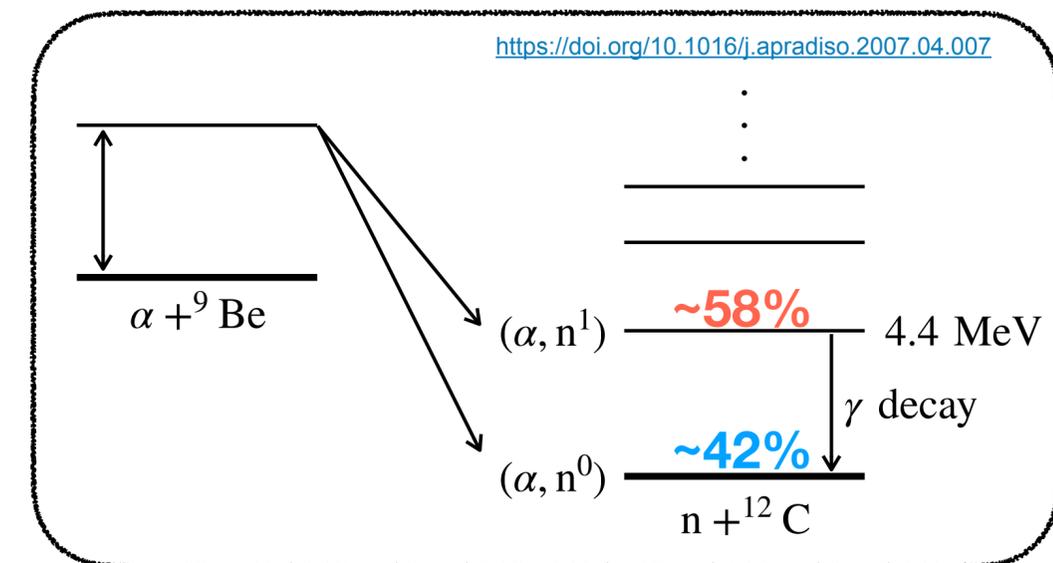
例: 逆ベータ崩壊( $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ )



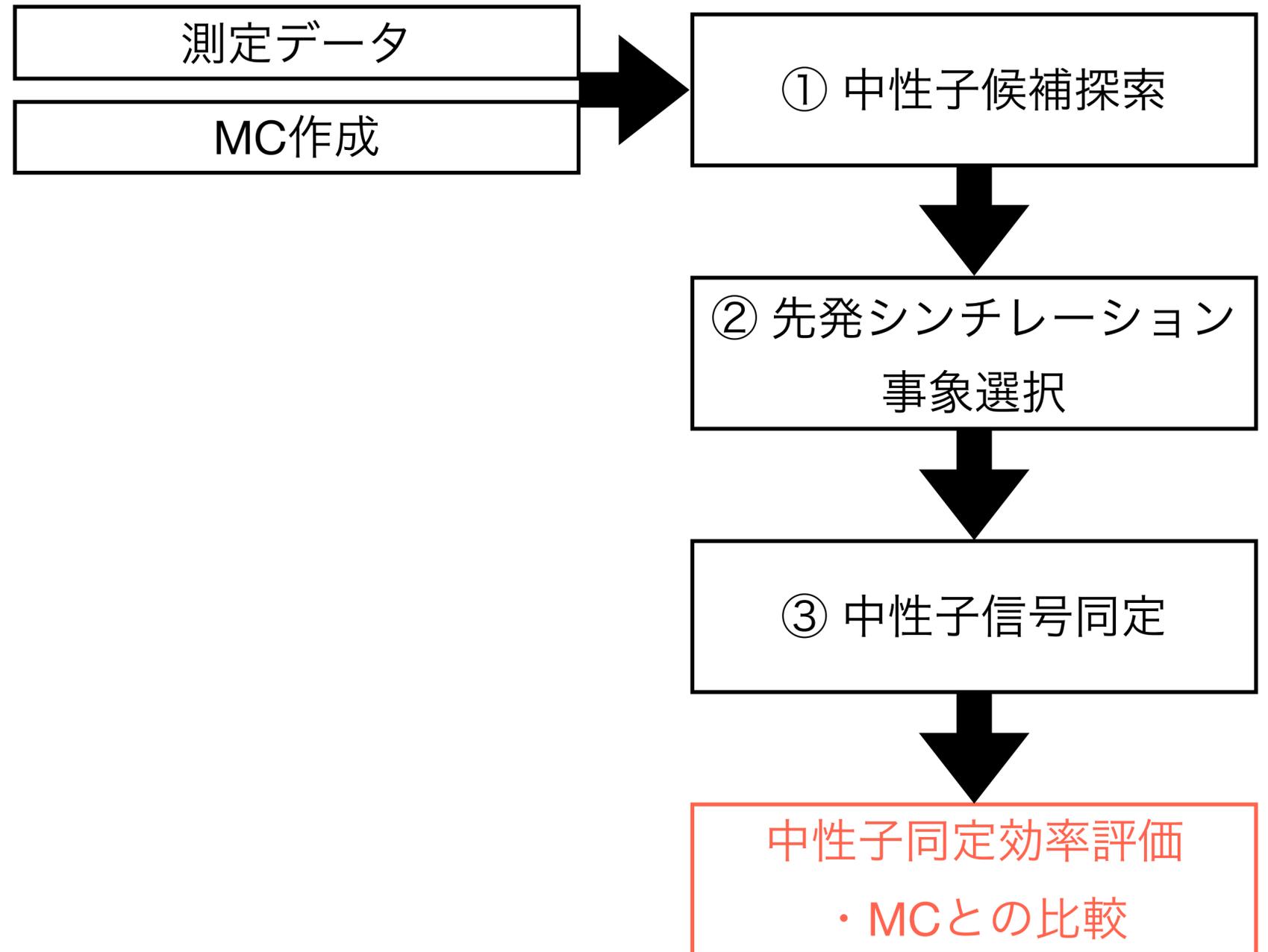
# Am/Be線源測定

目的：中性子線源を使った中性子同定効率の見積もり・MCとの比較

- Am/Be線源は  
 $\alpha + 9\text{Be} \rightarrow 12\text{C} + n + \gamma(4.4 \text{ MeV})$  (Fraction  $\sim 0.58$ )  
 $12\text{C}(\text{GS}) + n$  (Fraction  $\sim 0.42$ )  
で中性子を生成
- BGOシンチレータで4.4 MeVガンマ線から大光量の信号を作成  
→SKで先発信号として捉えることができる
- 先発信号に付随する中性子を探索することで中性子同定効率を見積もった
- AmBe線源+BGOを入れた検出器MCを用いて、  
 $n + \gamma$   
 $n\text{-only}$   
のMCを作成し、同様に同定効率を見積もった

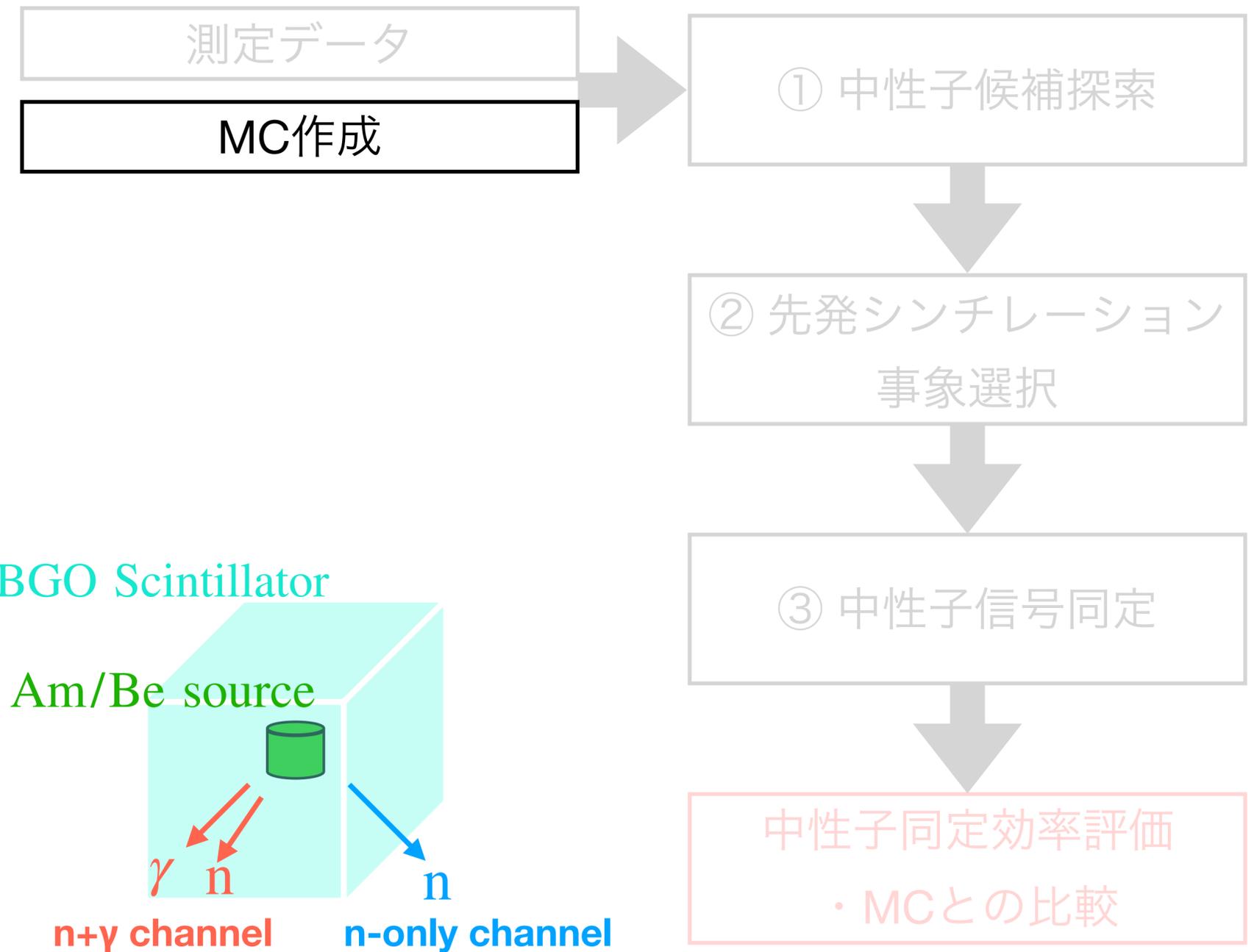


# 解析の流れ



# 解析の流れ

- Geant4ベースの検出器MC(SKG4)を使って作成
  - ▶ これまで数回JPSで発表  
(2017秋, 2018春, 2018秋, 2019春, 2019秋, 2021春)
  - ▶ 酒井さん(14aT3-2)の発表参照
- 作成したMC
  - ▶ SK MCの中にAm/Be、BGOのジオメトリ
  - ▶  $n+\gamma$  :  $5 \times 10^5$  event  
 $n$ -only :  $5 \times 10^5$  event
  - ▶ 近傍の通常RunデータのPMTヒットをノイズヒットとして使用



# ①中性子候補探索

①中性子候補探索

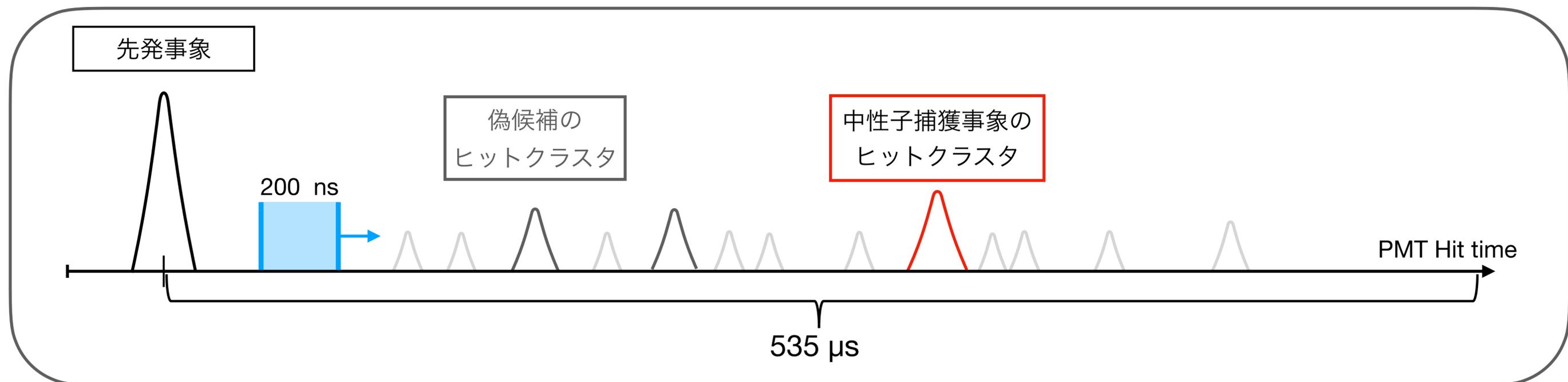
②先発シンチレーション  
事象選択

③中性子信号同定

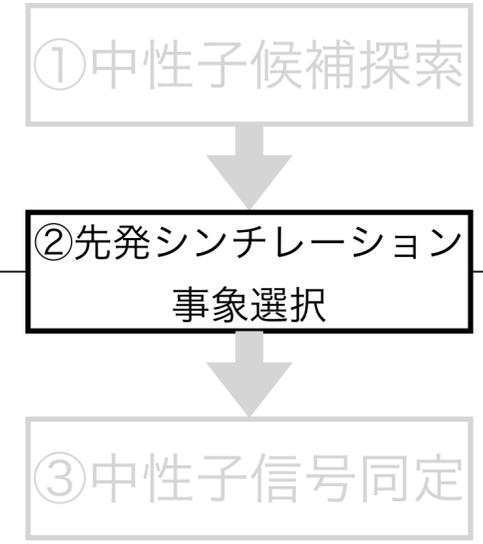
6

- 先発信号(> 60 hits/200 ns)のトリガーのあと、500  $\mu$ sの全ヒットが保存される
- 本解析ではヒットを200 ns windowで走査  
→ 25 hits/200 ns 以上のヒットクラスタ全てを候補として選択
- 探索範囲内に多く存在する、ノイズヒットによる偽候補も含めて選択してしまう  
→ それぞれに[③ 中性子信号同定]のプロセスで事象再構成・中性子事象の選別を行う

✓ 1 先発事象あたりの中性子候補事象数：~70個



# ②先発シンチレーション事象選択



- 4.4 MeV ガンマ線のシンチレーションイベントを選別

1. ODヒット < 11 :

宇宙線ミュオンなどの大光量イベントの除去

2.  $850 < \text{Total charge in } 1.3 \mu\text{s} < 1100$  :

4.4 MeV  $\gamma$ のシンチレーション由来以外の事象除去

3. 全候補での1.3 usでのヒット数の最大値

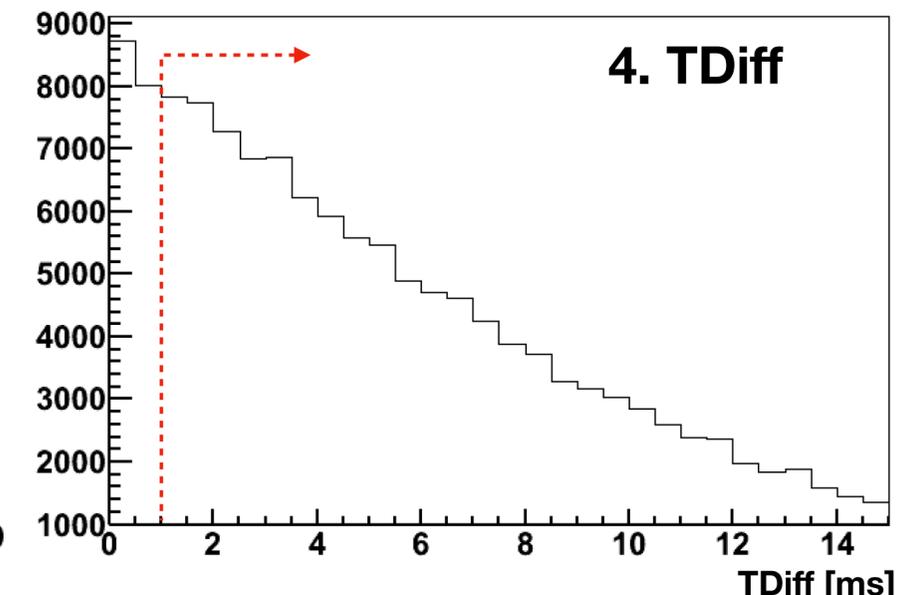
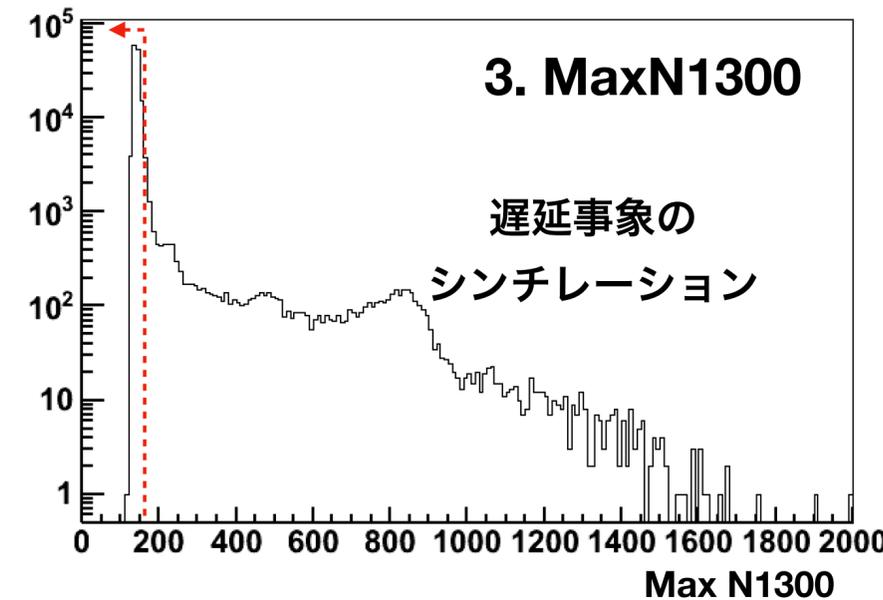
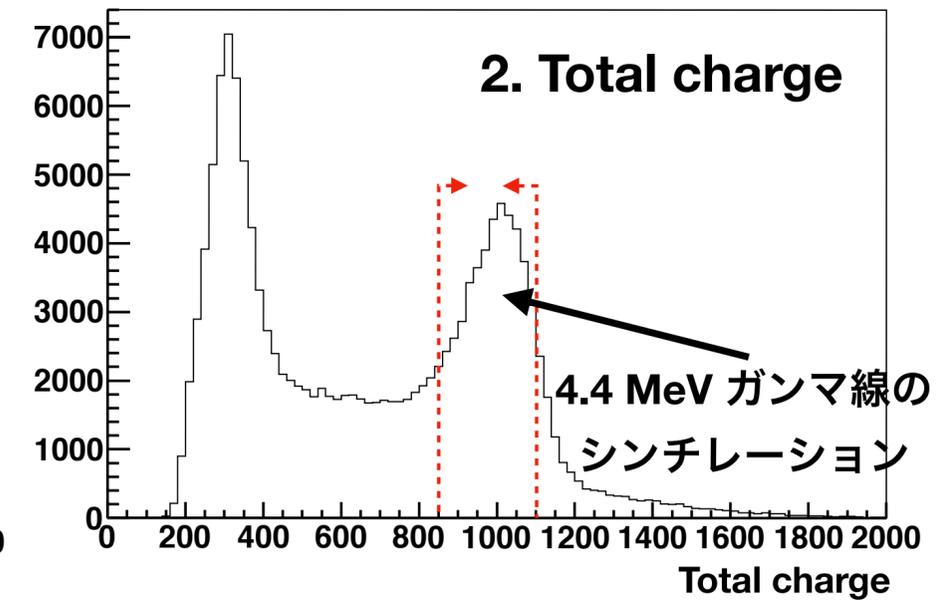
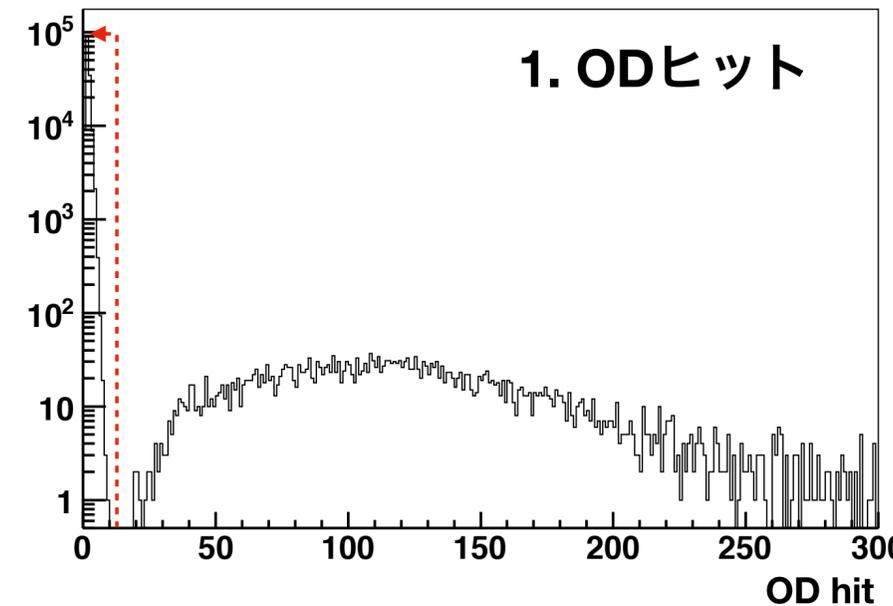
(MaxN1300) < 161 :

Capture- $\gamma$ のシンチレーション除去

4. 前のイベントとの時間差(TDiff) > 1 ms

✓ MC : n+g : 85647 event (92.5%)

n-only : 6941 event (7.5%)



# ③中性子信号同定

①中性子候補探索

②先発シンチレーション  
事象選択

③中性子信号同定

- ①の全候補の事象再構成を行い、4つの変数を使って中性子信号を選別

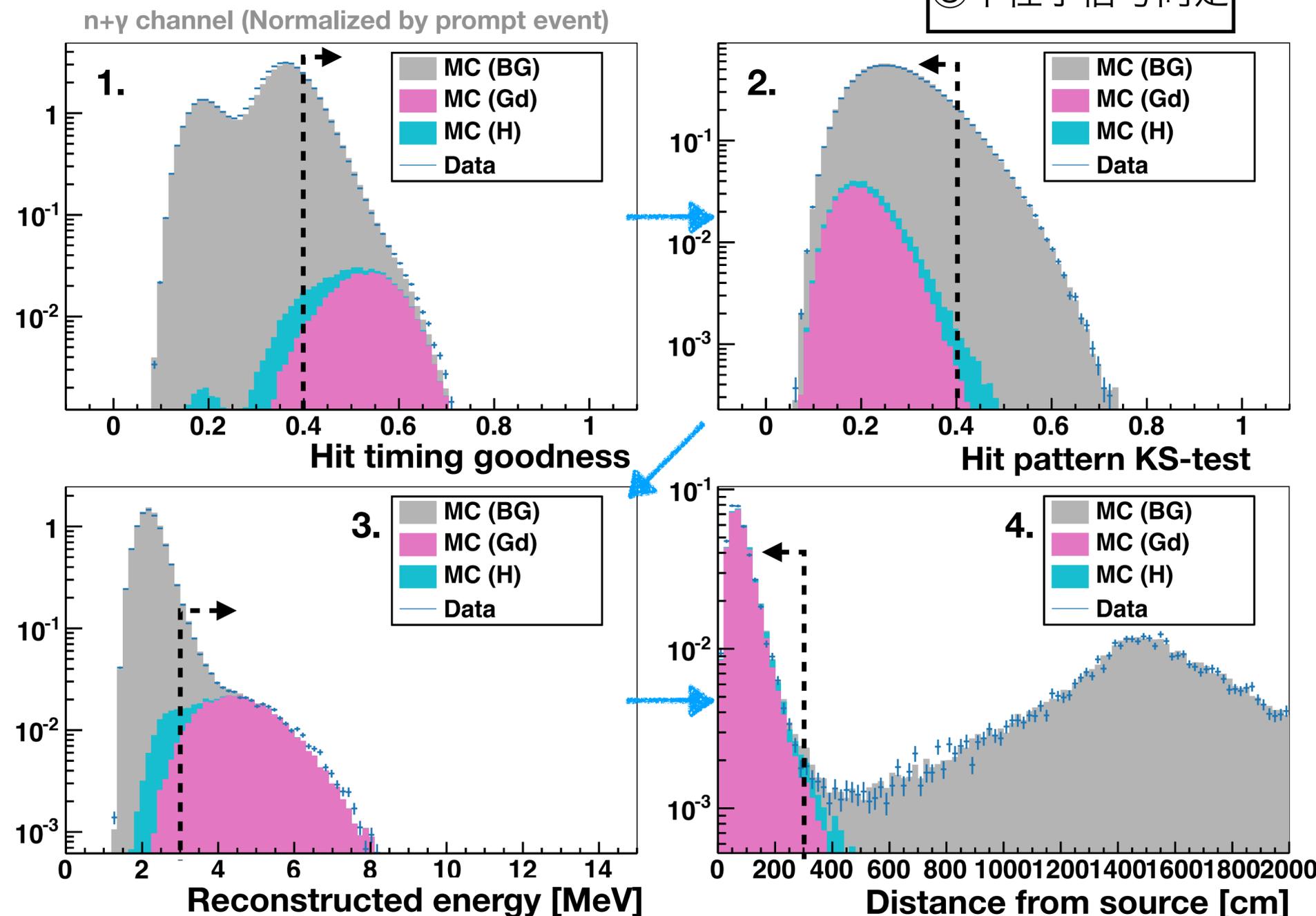
- Pre-cut :

- 有効体積(壁から2m以内のイベント)カット
- (先発事象からの時間) < 4  $\mu$ s カット :  
シンチレーションの影響を除去

- カット条件

- Hit timing goodness > 0.4
- Hit pattern KS test < 0.4
- Reconstructed energy > 3.0 MeV
- Distance from source < 300 cm

✓ MCでの各分布は測定データを再現できている



# 中性子同定効率評価

$$\text{Fit function : } A(e^{-x/\tau})(1 - e^{-x/\mu}) + B$$

↑  
中性子の熱化成分

$\tau$  : 中性子捕獲時定数 ( $\sim 115 \mu\text{s}$ )

$\mu$  : 熱化時間 ( $4.3 \mu\text{s}$ )に固定

B : ランダム成分

- 中性子として選択した候補の時間分布をFittingすることで、捕獲時定数と時間に依らないバックグラウンドを見積もった

- 捕獲時定数 : **DATA :  $116.2 \pm 2.4 \mu\text{s}$ , MC :  $116.8 \pm 1.6 \mu\text{s}$**

- 同定効率の計算 :

▶ DATA :

$$\epsilon_n = \frac{(\text{No. of Tagged candidates}) - (\text{No. of Background candidates})}{\text{No. of Prompt Event}}$$

▶ MC :

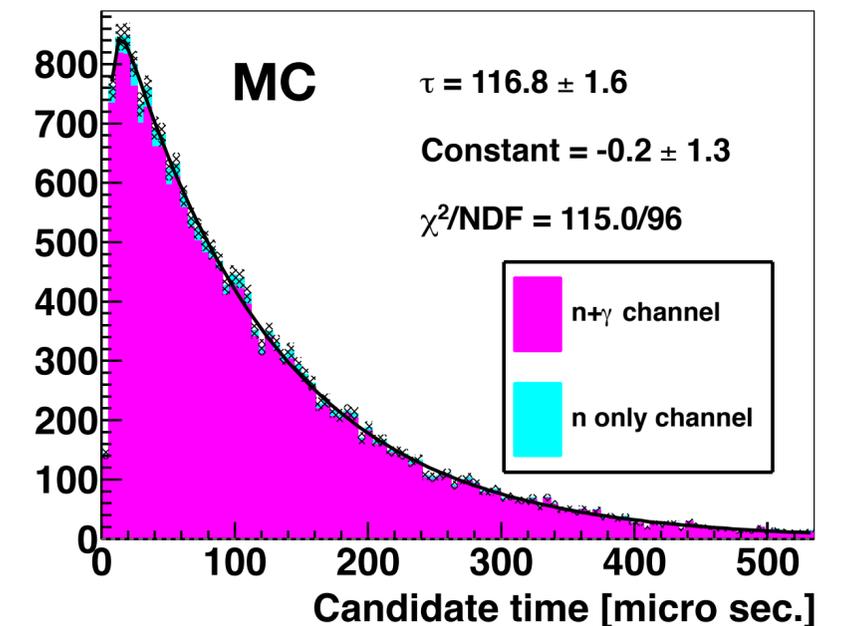
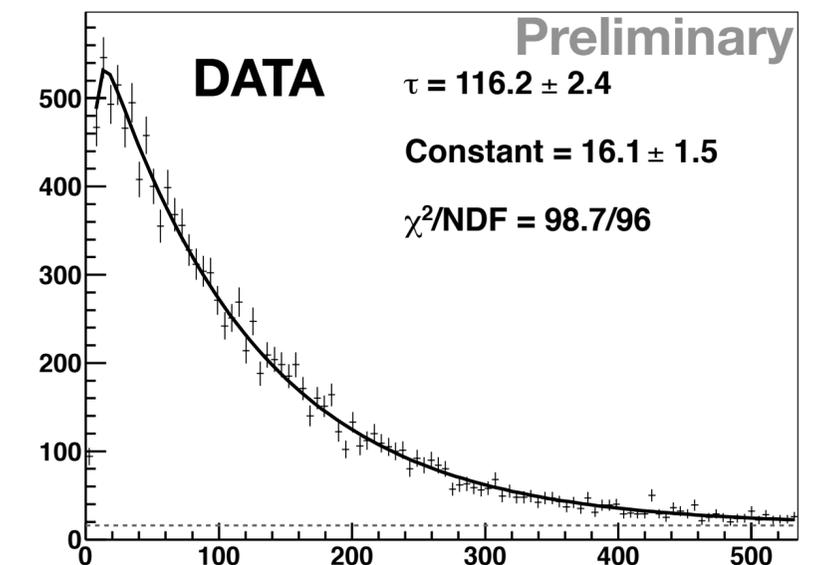
$$\epsilon_n = \frac{(\text{No. of Tagged candidates}) - (\text{No. of Background candidates})}{(\text{No. of Prompt Event for } n + \gamma) \times 0.58 + (\text{No. of Prompt Event for } n \text{ only}) \times 0.42}$$

- 中性子同定効率 :

**DATA :  $35.2 \pm 0.6\%$ , MC :  $38.7 \pm 0.4\%$ .**

(MC :  $n+\gamma = 39.4 \pm 0.3\%$ ,  $n\text{-only} = 25.0 \pm 0.9\%$ )

- ✓ 捕獲時定数にDATA/MCで良い一致が得られたが、同定効率は $\sim 3\%$ の違いが残った



# MCを使った真の同定効率の確認

- MCの情報を使って、真の中性子信号の同定効率を計算した
  - ▶ (A) : [① 中性子候補探索] で真の中性子信号を候補として選択する割合
  - ▶ (B) : (A)のうち、 [③ 中性子信号同定] で真の中性子信号を同定する効率
- ✓ 全体として、真の中性子信号の同定確率は(A)×(B) = **39.6%** (n+ $\gamma$  channel), **28.2%** (n-only channel)  
→Fittingから求めた前ページの効率**39.4±0.3%**(n+ $\gamma$ ), **25.0±0.9%**(n-only)で良い一致を示している
- ✓ 1event中のAccidental Background は**0.0026 bkg / Prompt event**  
→MCのFittingから時間に依らないバックグラウンドがゼロという結果と矛盾しない

# まとめ

- SK-Gd実験での中性子同定効率を評価するため、Am/Be線源測定を行なった
- AmBe線源を入れた検出器MCを作成し同様に中性子効率を評価・測定データとの比較を行なった
- 結果として、中性子捕獲時定数について $116.2\mu\text{s}$ (DATA)に対し $116.8\mu\text{s}$  (MC)という良い一致を得たが、中性子同定効率について $35.2\%$ (DATA),  $38.7\%$ (MC)で $\sim 3\%$ の差異が見られた
  - ▶ MCについてバックグラウンド混入率や真の同定効率を見積もったが、いずれも矛盾は見られなかった
  - ▶ 要因は実データにのみ存在する、時間に依らないバックグラウンドの存在・BGOの影響？  
→BGOの被覆率の少ない測定を行なってBGOの影響を調べる

# Appendix

# 検出効率の差異を生む要因

- BGOシンチレータの影響：  
BGOでつくられる大光量の偽信号や、中性子の消失・信号の性質変化が考えられる  
BGOの影響を少なくするためにBGOの被覆率を減らした測定などで影響を調査する予定
- MCの検出器応答：  
SK-Gd実験での水質・検出器応答が完全に整備されていない
- Gd-captureガンマ線モデル：  
中性子候補の各分布でDATA/MC間の差異が少ないことから小さいと考えられる  
使用したGd(n,  $\gamma$ )GdモデルはJ-PARC MLFでの測定を基に構築されたANNRI-Gd model  
(K. Hagiwara et. Al., PTEP(2019), 023D01, 29pp, T. Tanaka et. al., PTEP(2020), 043D02)

# BGOシンチレーションのシミュレーション

