



岡山大学
OKAYAMA UNIVERSITY

WCTEにおける中性子タギング手法の 開発と性能評価

岡山大里

Lee Yuno、小汐由介、

他 Water Cherenkov Test Experiment Collaboration

2026年9月15日

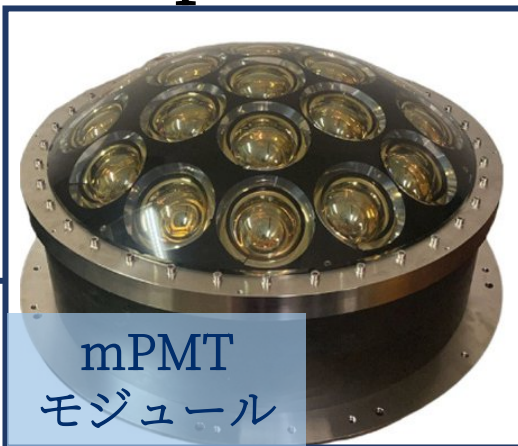
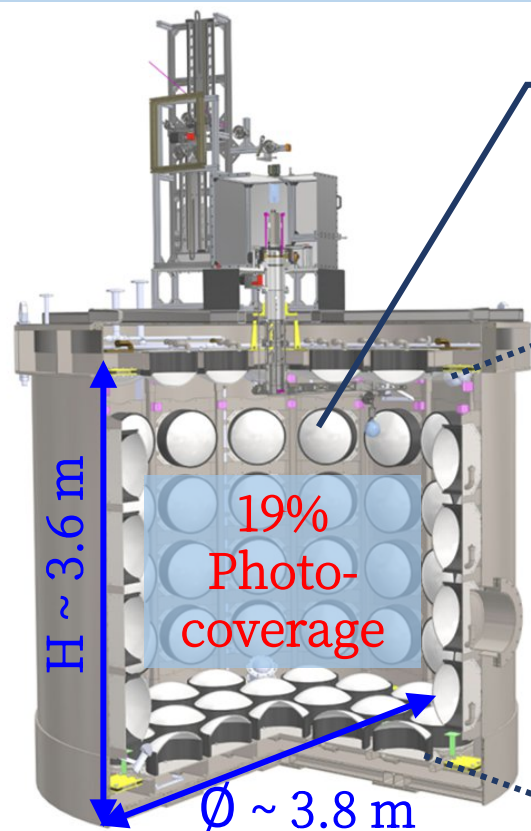
日本物理学会第81回年次大会@東京大学駒場キャンパス

講演番号：15aG723-12

Motivation

Water Cherenkov Test Experiment : WCTE

CERN T9ビームラインで
実施された二次粒子
($\pi^\pm, \mu^\pm, e^\pm, p^\pm$) ビーム実験



mPMT
モジュール



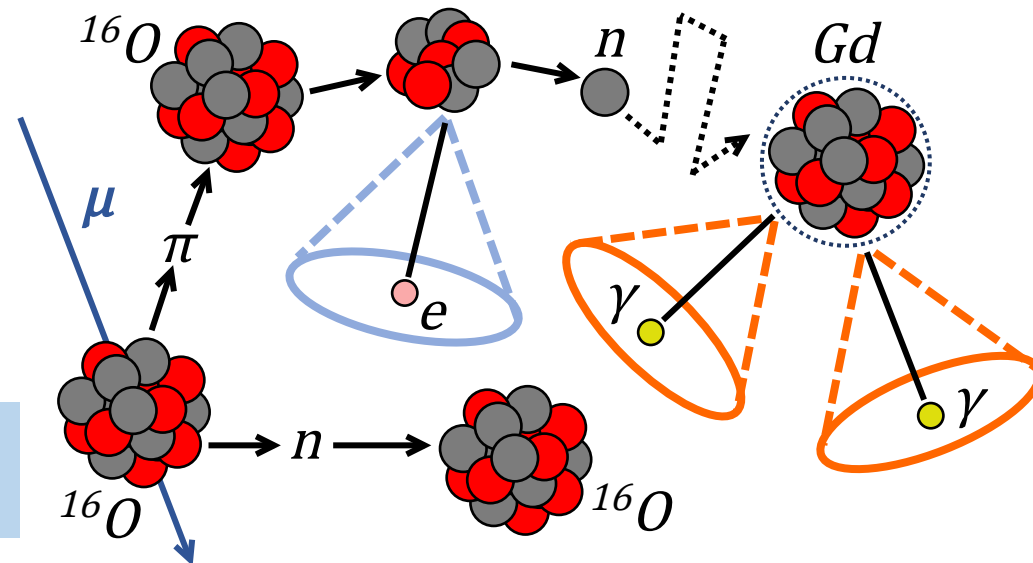
19×3" PMT
(R14374)



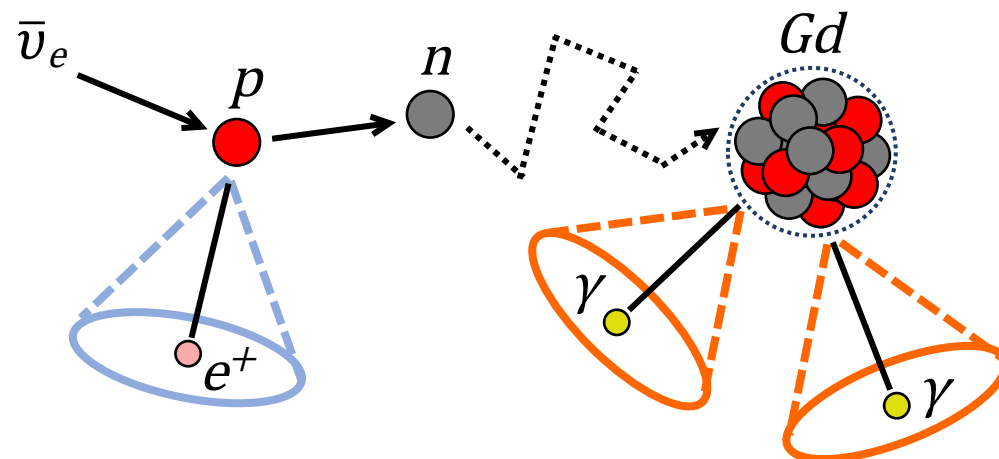
41 ton Water tank
97 mPMTs

超純水および0.03%Gd添加条件におけるデータを取得

核破碎反応 (雑音事象)



逆ベータ崩壊 (信号事象)

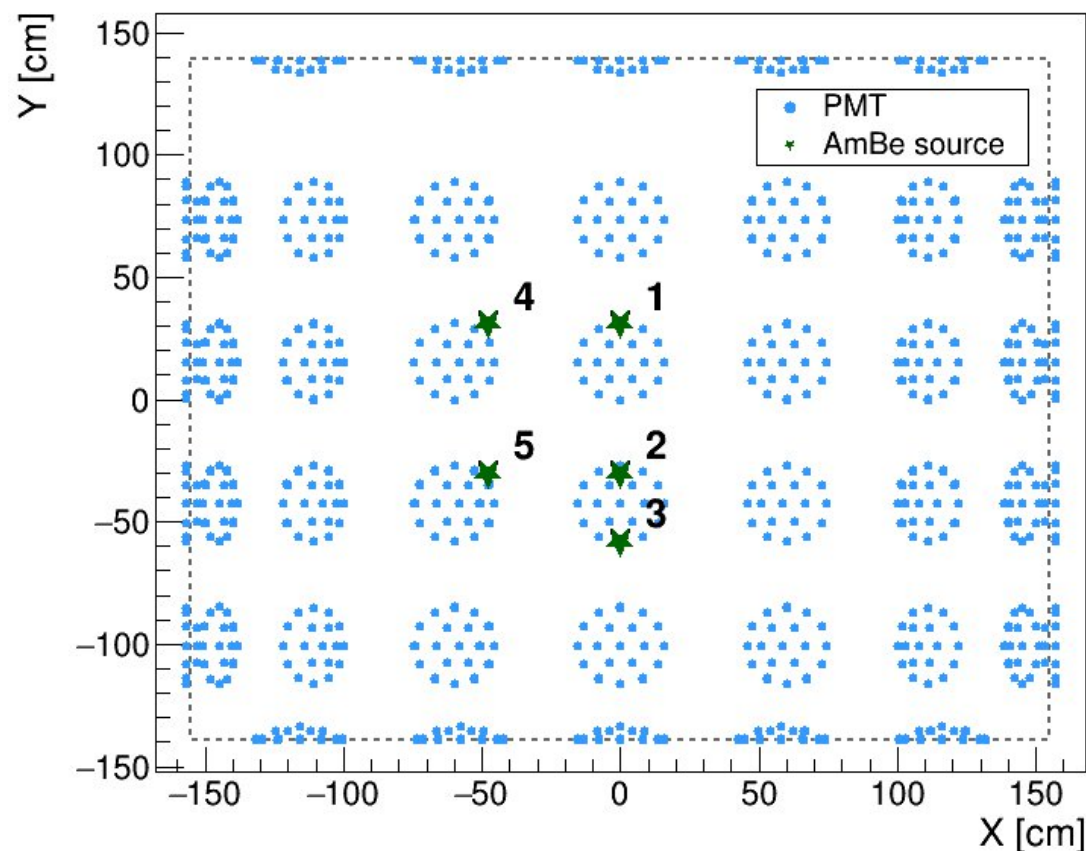


AmBe + BGOを用いた遅延同時計測

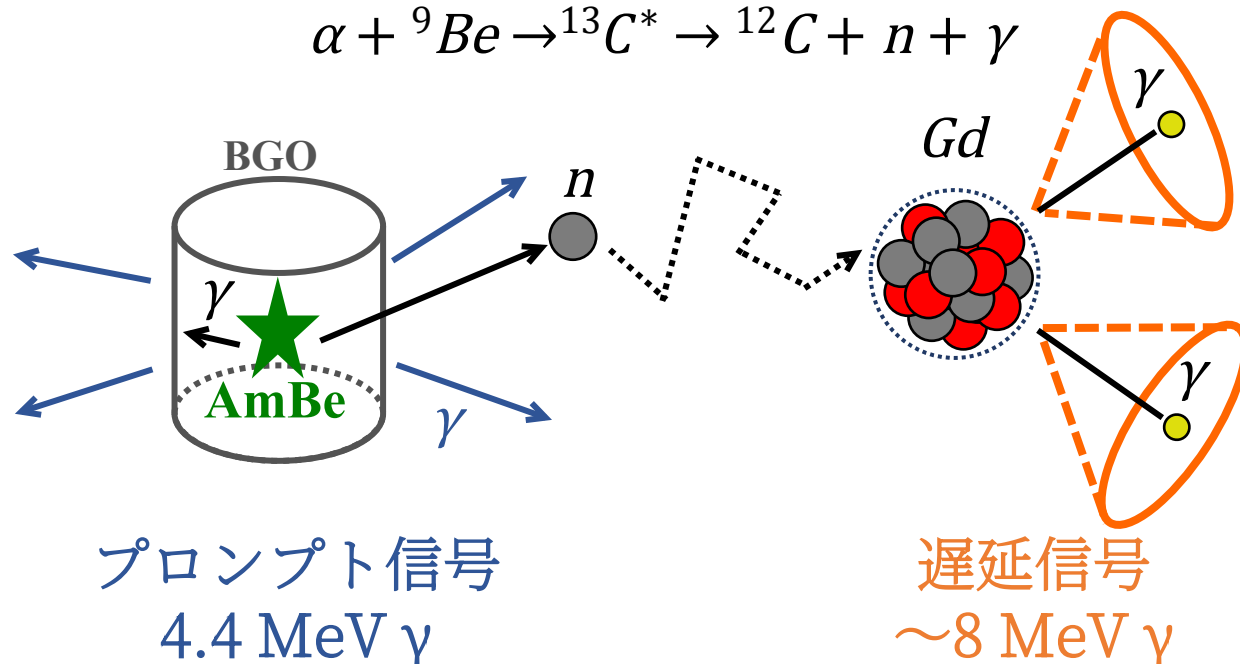
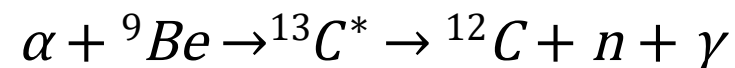
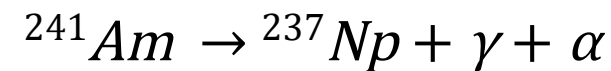
2

	BKG	1	2	3	4	5
Run #	2384	2386	2387	2388	2389	2390

AmBe source positions (X-Y side)

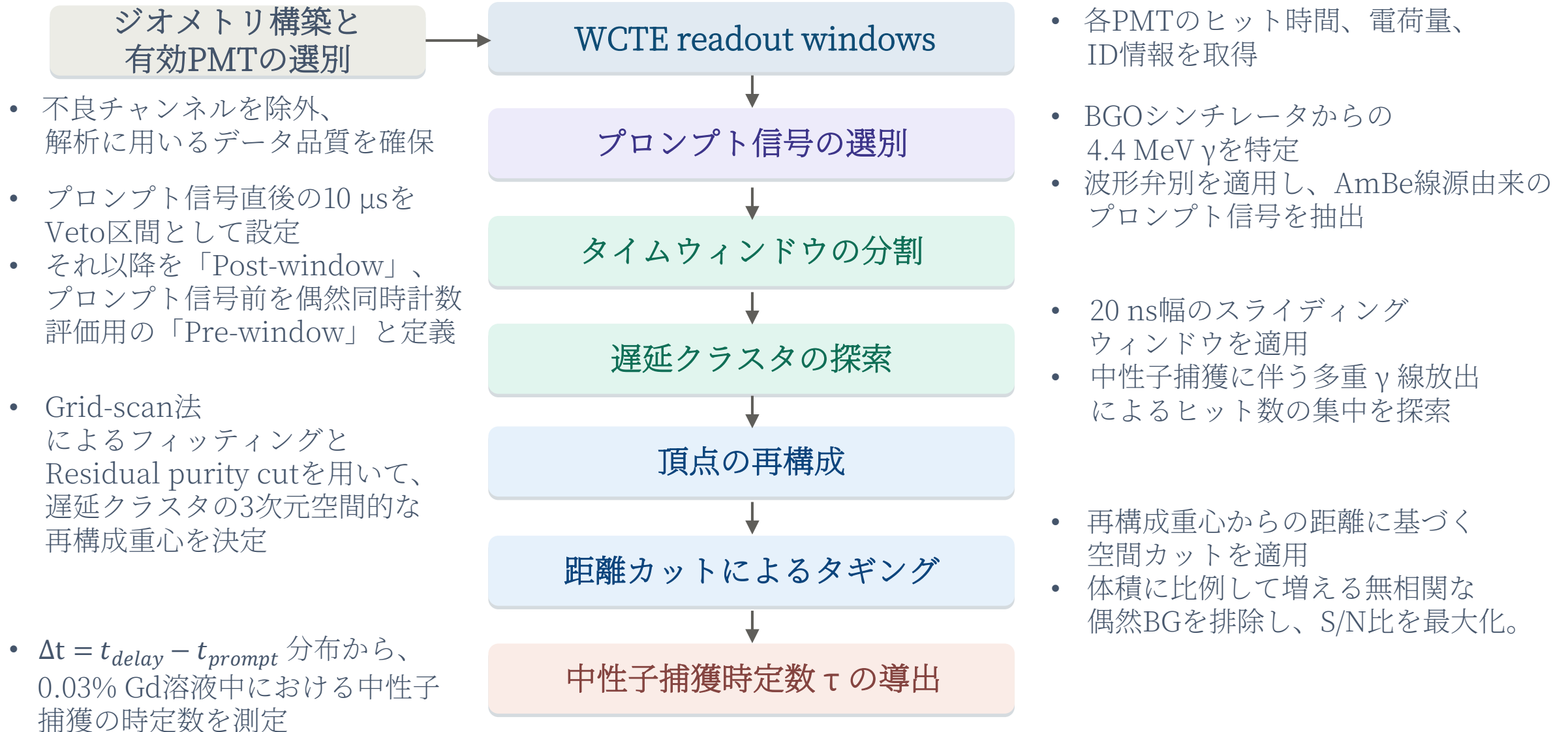


- 本研究の目的：中性子捕獲に対する
 - 遅延同時計測手法の確立
 - 時定数 τ の測定



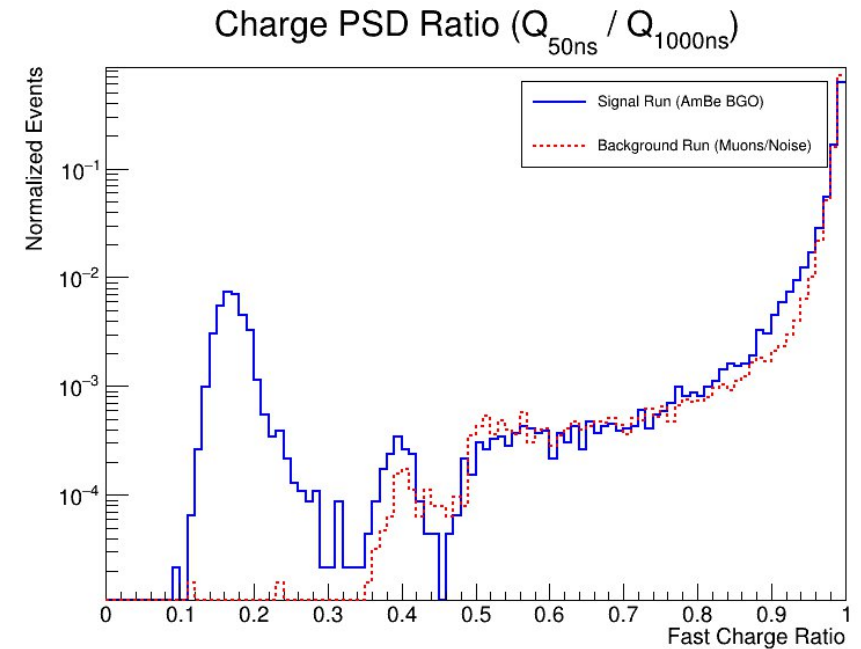
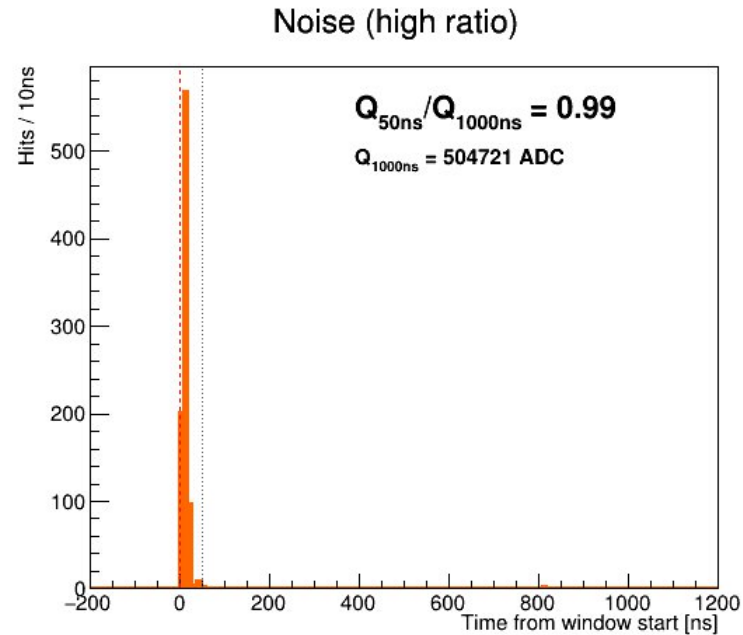
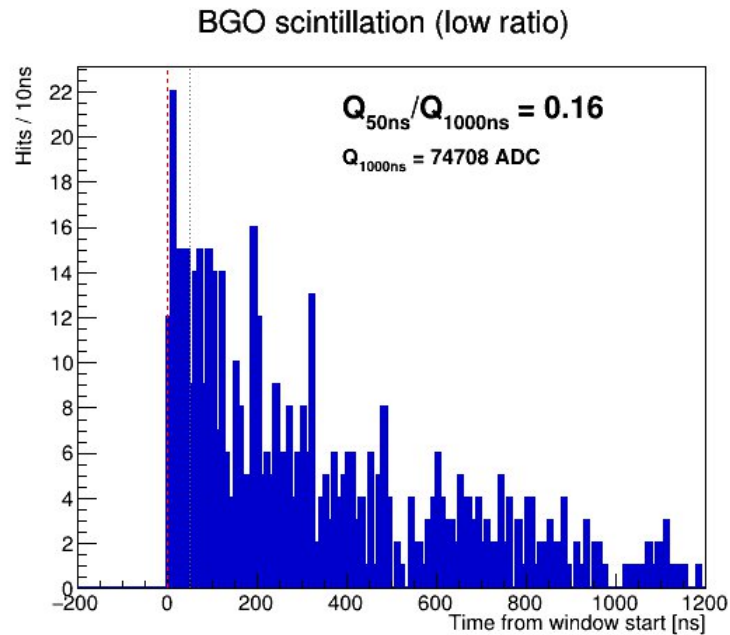
データ解析の流れ

3



プロンプト信号の波形特性

4



- 波形特性：
AmBe + BGOの発光は背景事象より遅く幅広
- Pulse Shape Discrimination (PSD)：
電荷比 (Q_{50ns}/Q_{1000ns}) を基に時間差を定量化

- **Signal** :
低比率領域にピークを形成
- **Background** :
1.0付近に集中分布

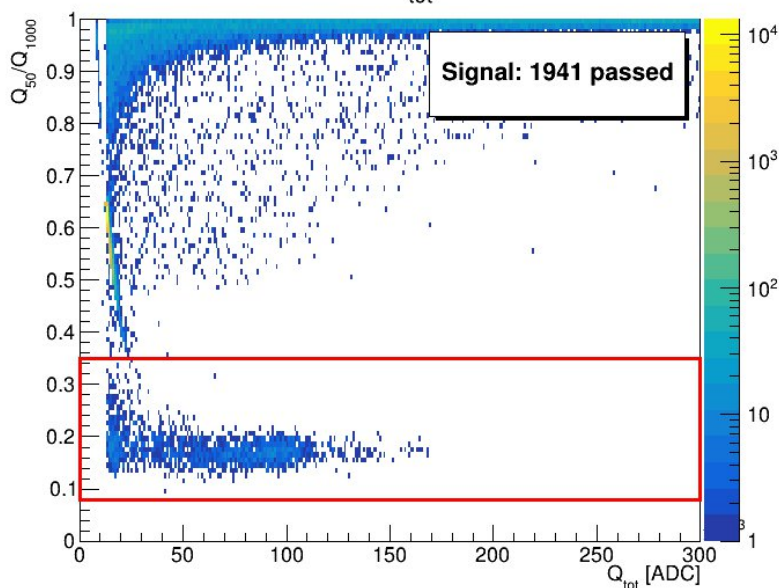
プロンプト信号の選別

データ

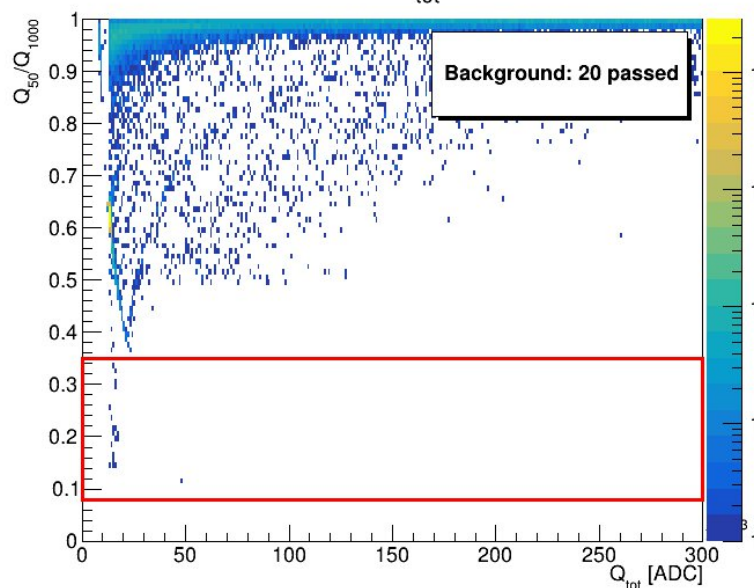
□: $Q_{50ns}/Q_{1000ns} \in [0.08, 0.35]$

MC

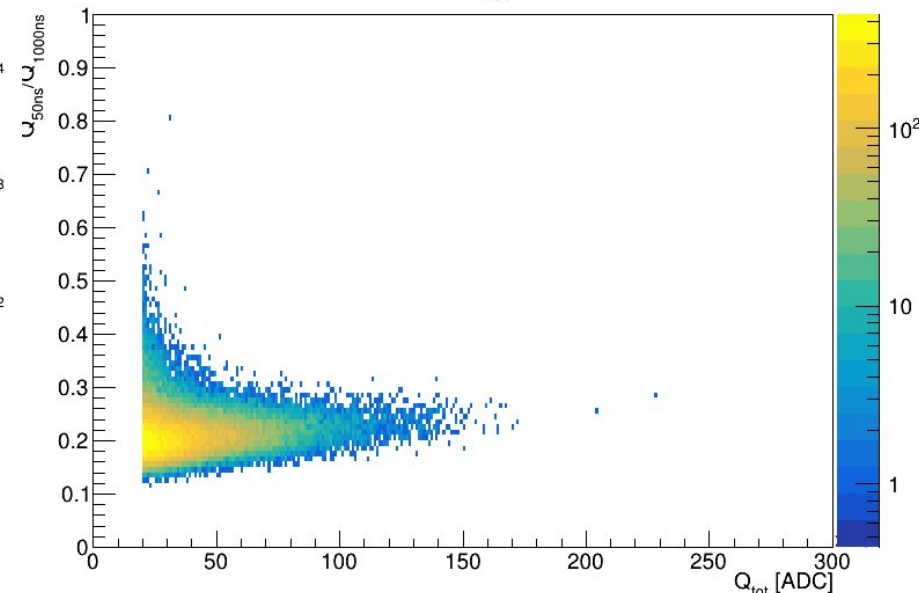
Run 2386_Sig: Q_{tot} vs PSD ratio



Run 2384_Bkg: Q_{tot} vs PSD ratio



Run 2386_MC: Q_{tot} vs PSD ratio

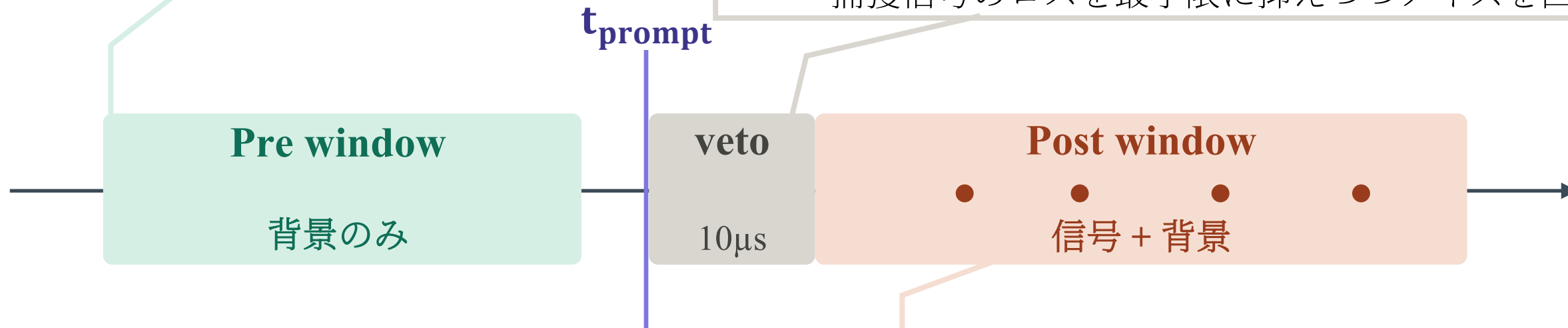


- 最大総電荷 (Q_{tot}) を含む1000 ns区間を特定し、 Q_{50ns}/Q_{1000ns} を計算
 - BGO事象の抽出: 4.4 MeVの信号を分離するためPSDカットを適用
 - Box Cutの採用: 比率バンドが平坦なため、RMSカットではなくBox Cutを使用

遅延同時計測 Window 設定

- 純粋な背景事象サンプル
 - 中性子捕獲事象を含まない偶発事象 (Accidental) のみを測定

- 偽信号の遮断
 - プロンプト由来の残光、壁からの反射、PMTアフターパルスを除去
 - 捕獲信号のロスを最小限に抑えつつノイズを回避



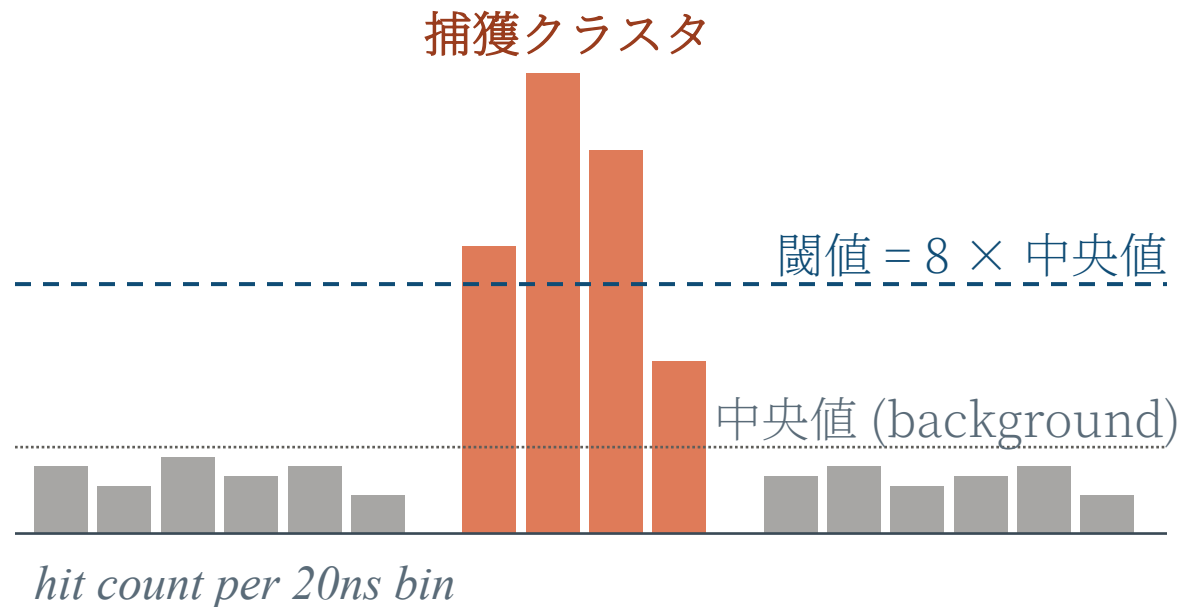
信号 = Post 事象数 - (スケール係数 × Pre 事象数)
 (スケール係数 = Post の露出時間 / Pre の露出時間)

- 信号観測領域
 - 遅延信号が到達する区間
 - 平坦な偶発BGの上に信号が分布

遅延信号の選別条件

7

- 20 ns ビンで hit 時刻をヒストグラム化
 - 閾値 = $\max(10, 8 \times \text{median})$
 - median はピークを無視
→ 背景を正しく評価
- 最終採用条件：nHits $\in [10, 50]$

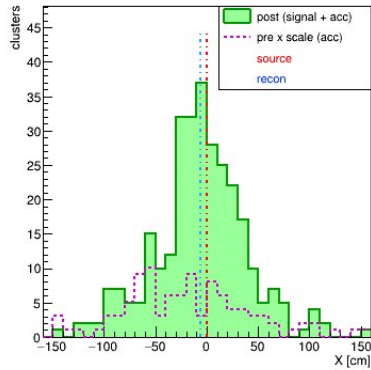


- 中性子捕獲の特性
平坦な偶発背景の上に、
約14 ns 幅のピークを形成
- 閾値の設計
median は背景レベルを追い、
ピーク自体には引きずられない
→ 窓ごとに自動調整
- nHits カット [10, 50]
 - 10 以上：偶然同時計測を除去、
Vertex fit に必要な Hit 数を確保
 - 50 以下：宇宙線・パイルアップ除去
- Pre/Post への適用
両ウィンドウに同一アルゴリズムを適用
→ 背景推定が不偏

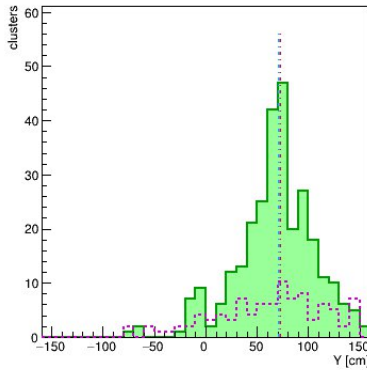
遅延信号の選別：Vertex Reconstruction

8

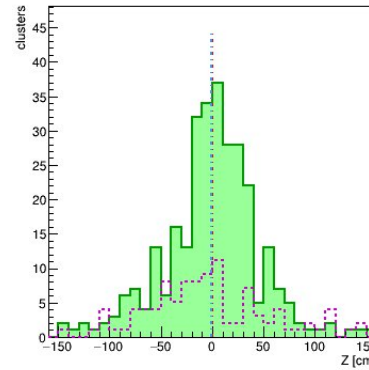
2386 Delayed X



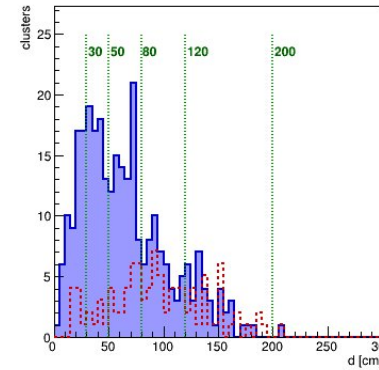
2386 Delayed Y



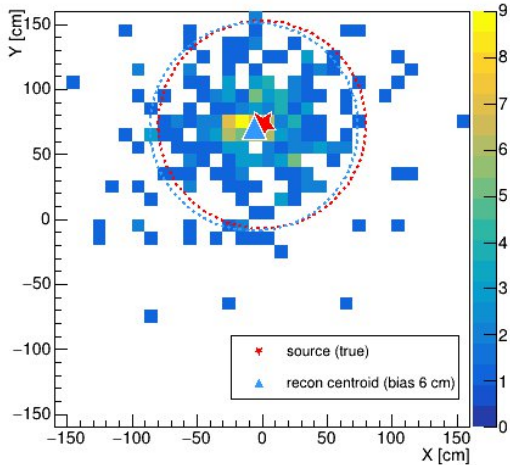
2386 Delayed Z



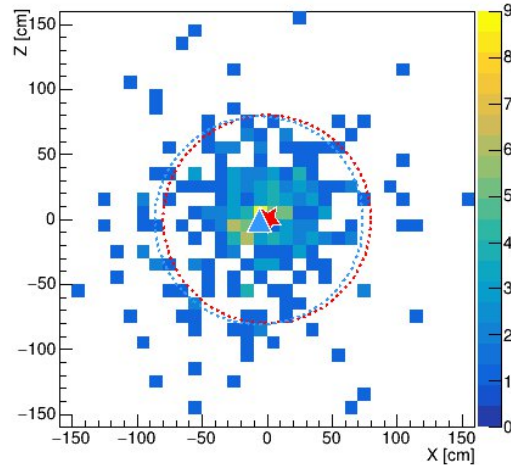
2386 distance to recon centroid



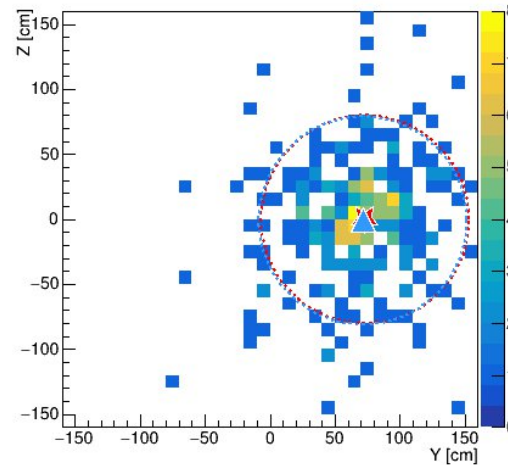
2386 Delayed X-Y



2386 Delayed X-Z



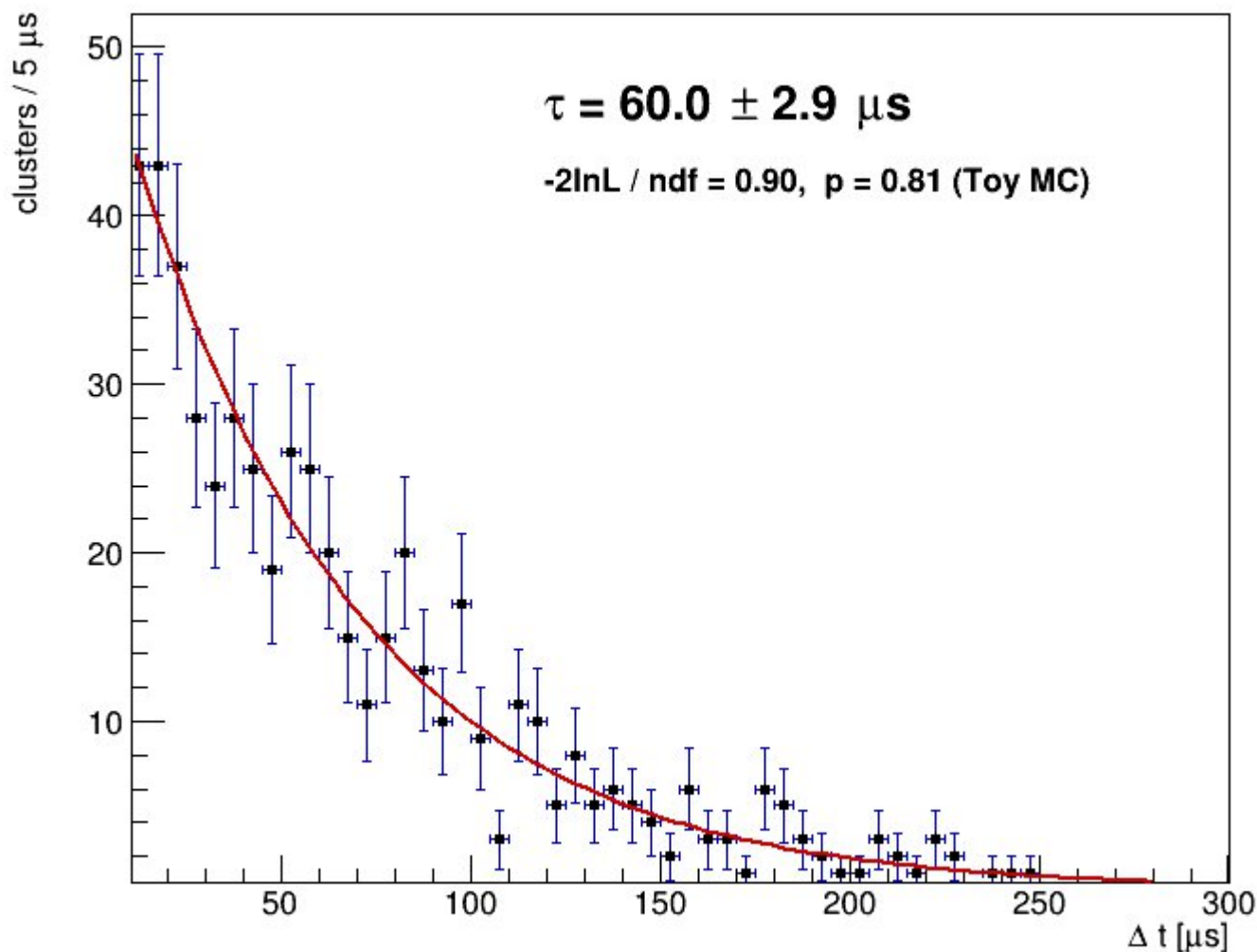
2386 Delayed Y-Z



- 再構成重心（Recon. Centroid）を用いる理由
 - 既知の線源位置に依存しない
 - 実際のビームデータ解析へ直接応用できる

- 遅延信号とBGの分離
 - Pre（BG：マゼンタ）との差分が捕獲信号
 - 分布の裾野が一致しており、BG規格化の妥当性を確認
- 空間カット ($D < 80$ cm) の最適化
 - 再構成重心からの3D距離(D)で評価。
 - 体積に伴い増加する無相関な偶然BGを効果的に排除

中性子捕獲時定数 τ の測定



$$N(\Delta t) = N_0 e^{-\Delta t/\tau} + C$$

Δt : prompt-delayed 時間差

N_0 : 指数成分の規格化定数

τ : 中性子捕獲時定数 (測定対象)

C : 偶発背景の平坦成分

- 3つのRun統合で $\tau = 60 \pm 3 \mu\text{s}$
- Gd 濃度 0.03 % に対応する
~60 μs と一致
- χ^2 フィットは低統計の
裾ビンで τ を過小評価
→ Likelihoodフィットを採用
- 適合度 (Goodness) は
Toy MC (500回) で $p = 0.81$
→ モデルとデータは無矛盾

まとめと今後の展望

- まとめ
 - プロンプト 選別 (PSD) : BGO の発光を電荷比でタグ、
カットで 信号を分離し、 t_{prompt} を決定
 - 頂点再構成 : 捕獲クラスタを TOF 残差最小化で 3D 頂点に再構成
 - 距離カットによるタグ : 再構成重心基準の距離カットで、
ビームデータへ移行可能
 - τ 測定 : Δt を指数 + 平坦成分でフィットし $\tau = 60 \pm 3 \mu\text{s}$
(SK-Gd の Gd 0.03 % と一致)

今後の展望

核破碎事象への応用 : β -遅発中性子放出体の同定・収量測定へ本手法を展開