

2015年2月9日
21st ICEPP Symposium

ANKOK 実験におけるシミュレーションの構築

早稲田大学 寄田研究室
修士2年 加地 俊瑛

暗黒物質直接探索実験の現状

【暗黒物質】

電磁相互作用・強い相互作用をしないが質量を持つ物質
渦巻銀河の回転曲線, 宇宙背景放射などの観測的事実

… **すべて重力の影響に依るもの**

【直接探索実験】

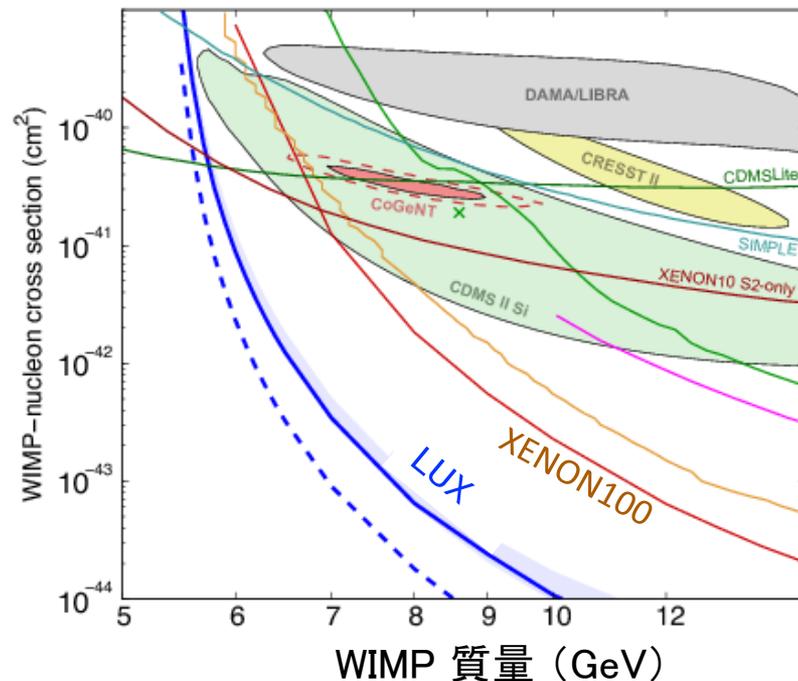
WIMP と弾性散乱した標的原子核の
反跳エネルギーを測定

… **光, 電離電子, 熱などとして検出**

【10 GeV 付近の低質量領域】

DAMA などの実験が発見を主張
LUX などの実験は棄却する結果

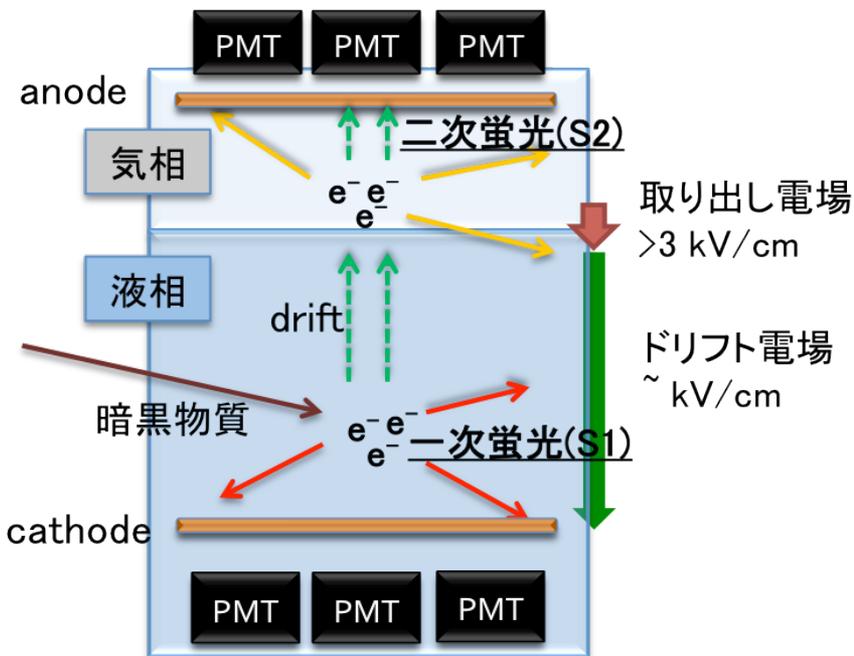
… **核種依存? 背景事象による違い?**



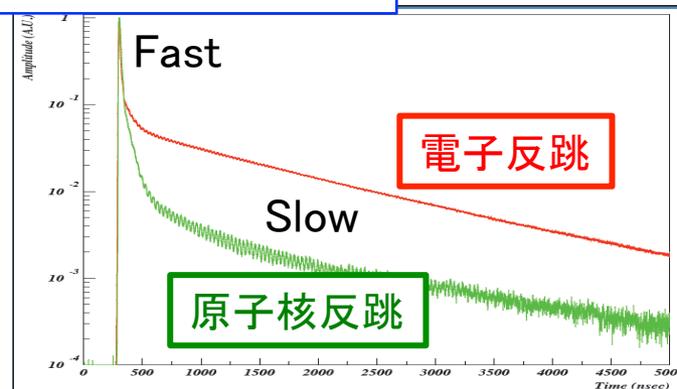
異なる媒質・検出手法を用いて相補的・多角的に検証することが重要

ANKOK 実験

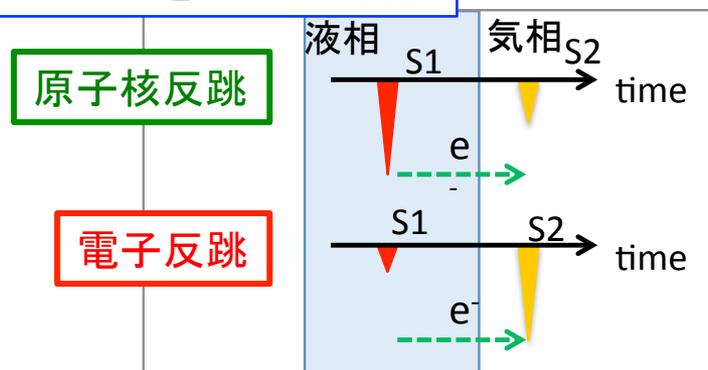
【気液 2 相型アルゴン光検出器】



S1 波形を用いた分離



S1/S2 比を用いた分離



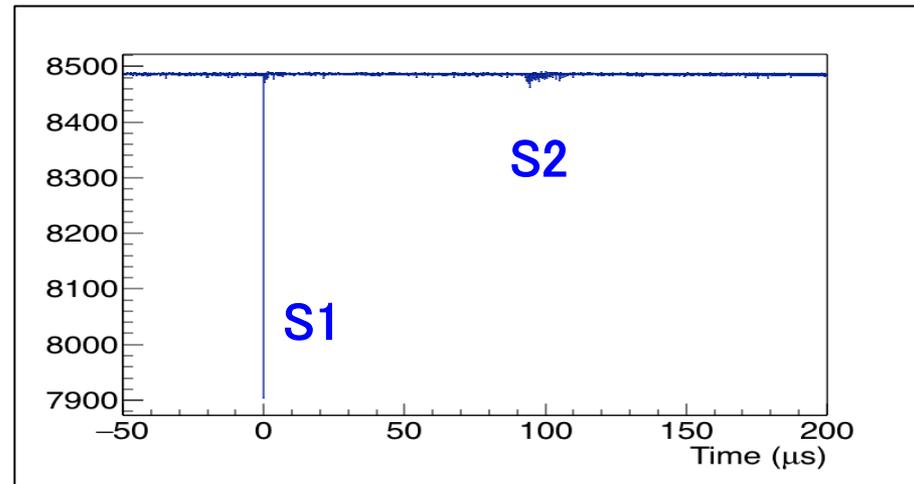
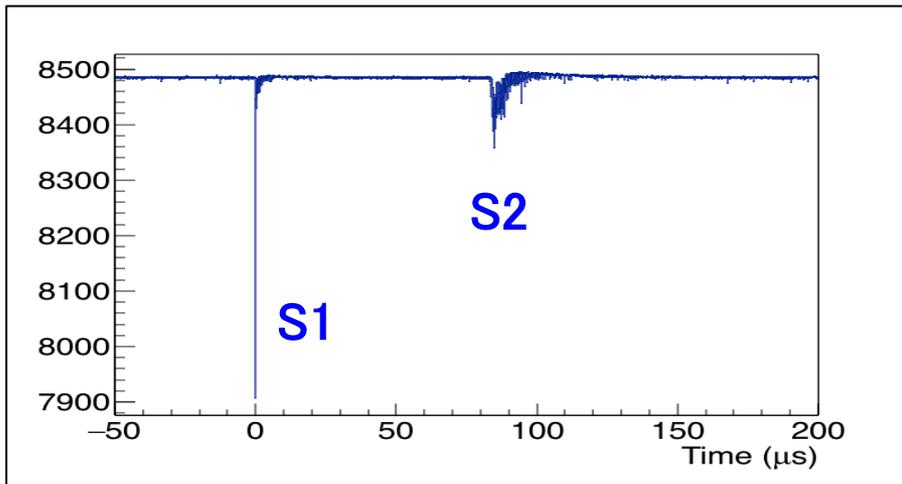
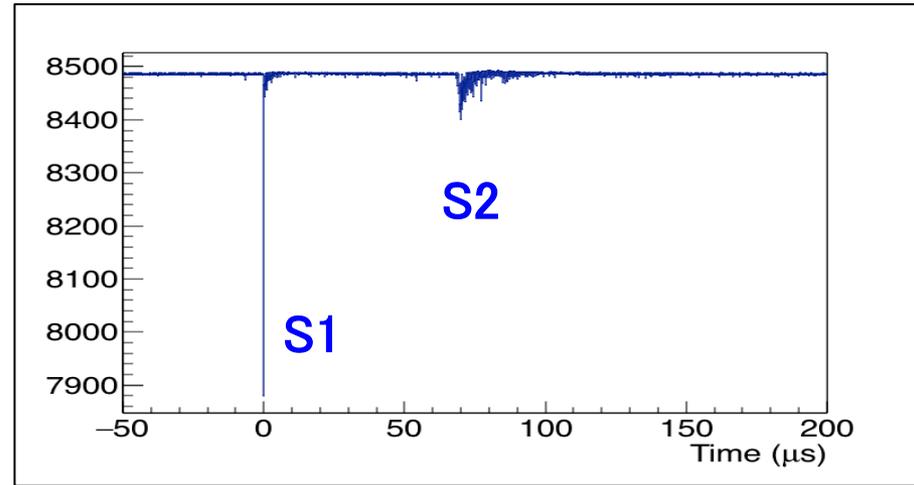
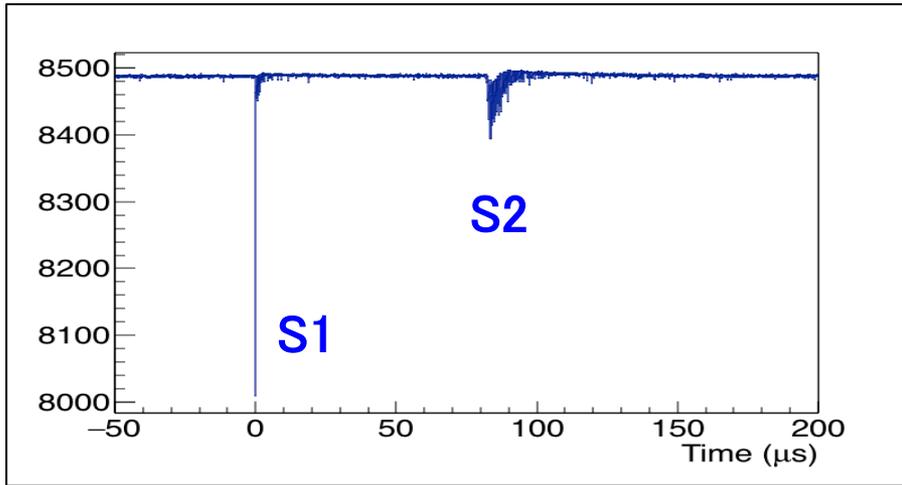
電子反跳・・・ β 線, γ 線

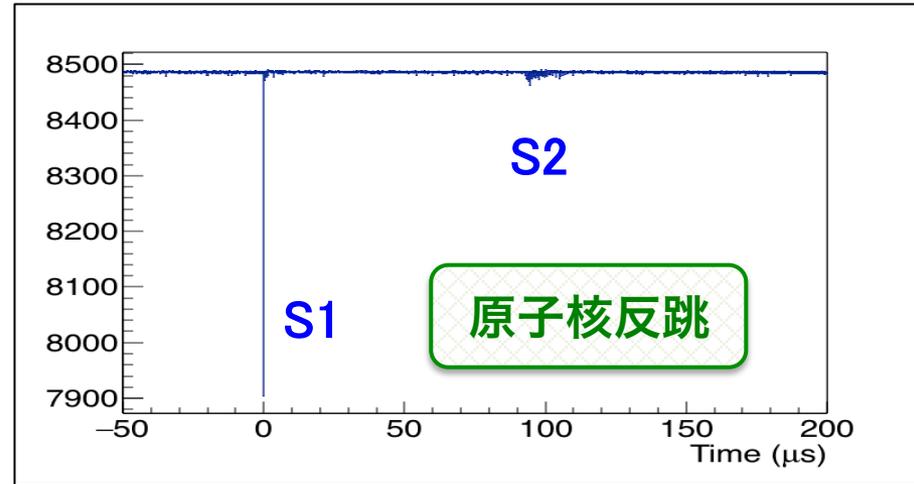
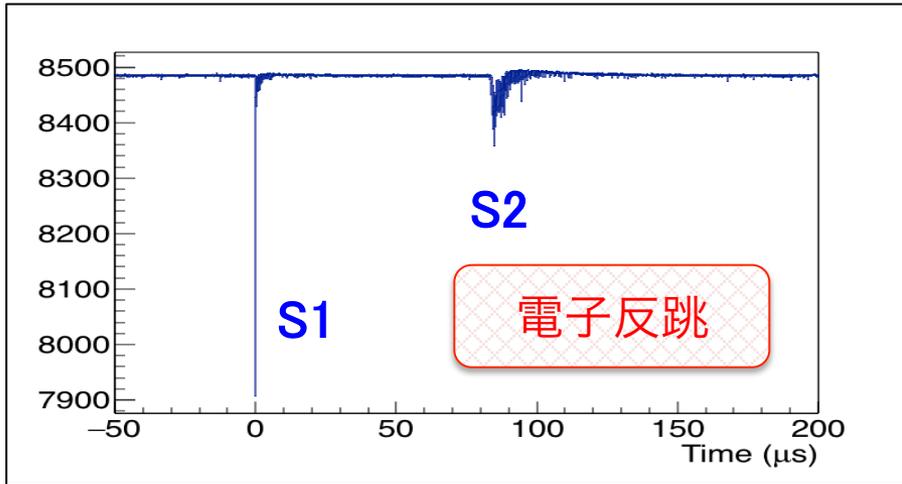
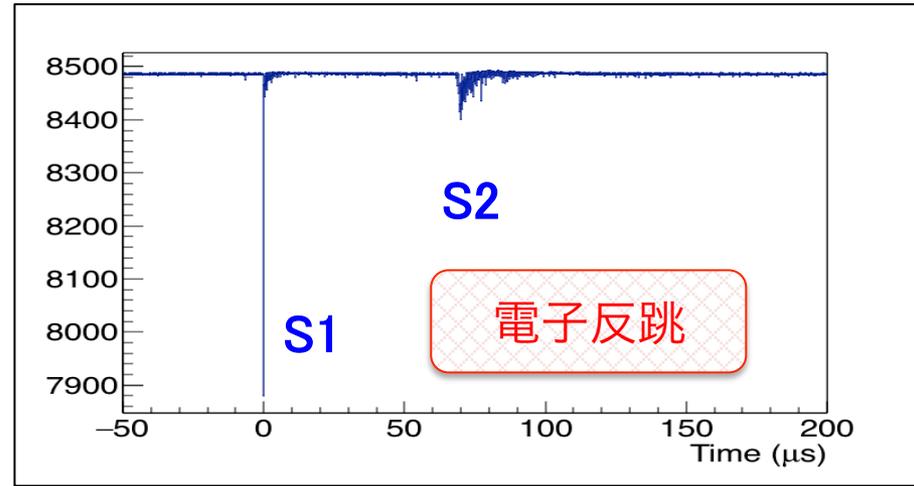
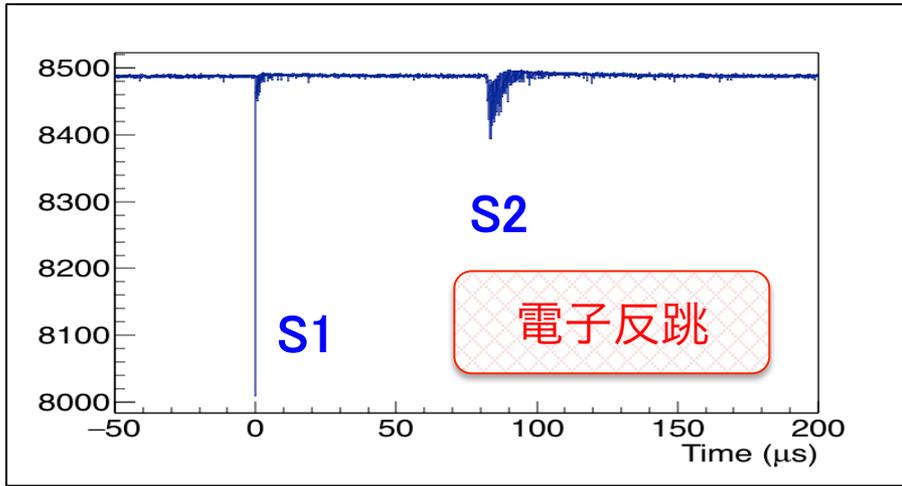
⇒ S1 波形・S2/S1 比を用いて分離

原子核反跳・・・WIMP, 中性子

⇒ 事象数を正確に見積もることが重要

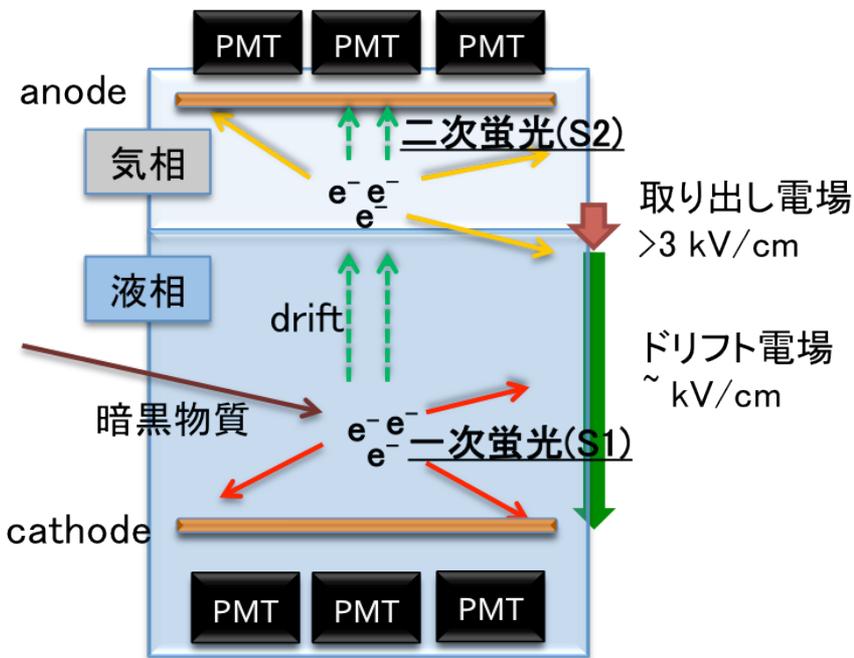
⇒ シミュレーションの構築は必須



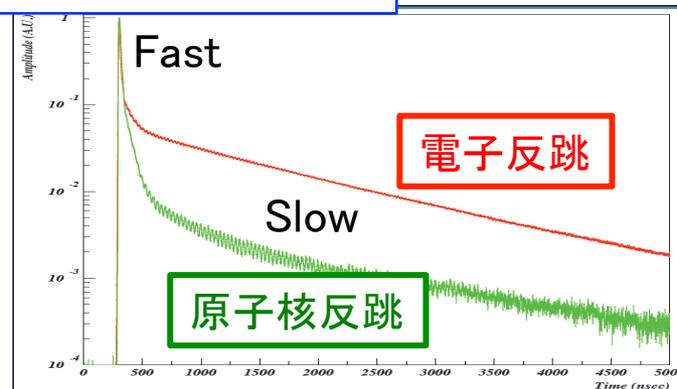


ANKOK 実験

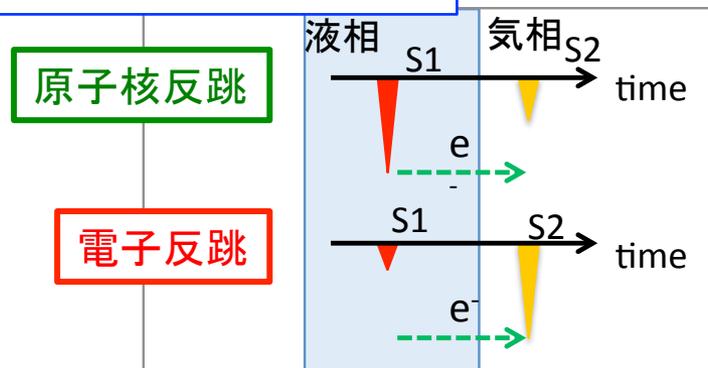
【気液 2 相型アルゴン光検出器】



S1 波形を用いた分離



S1/S2 比を用いた分離



電子反跳・・・ β 線, γ 線

⇒ S1 波形・S2/S1 比を用いて分離

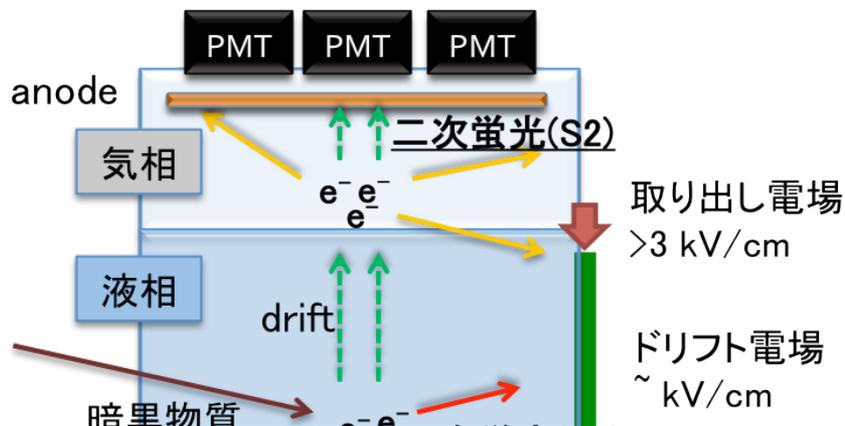
原子核反跳・・・WIMP, 中性子

⇒ 事象数を正確に見積もることが重要

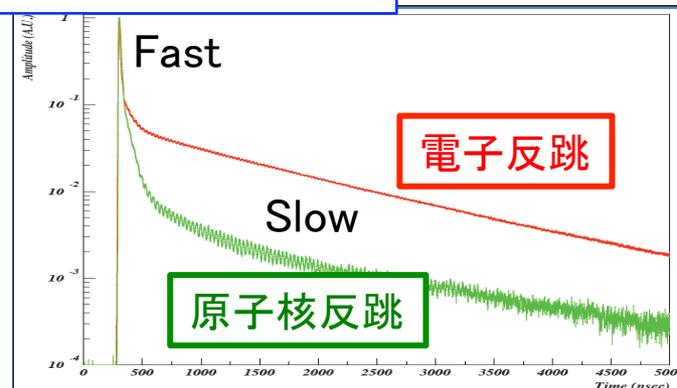
⇒ シミュレーションの構築は必須

ANKOK 実験

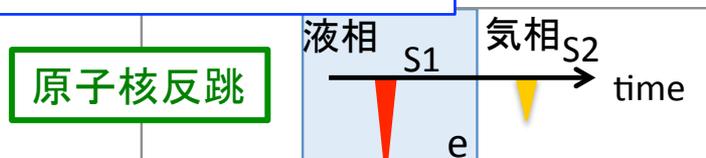
【気液 2 相型アルゴン光検出器】



S1 波形を用いた分離



S1/S2 比を用いた分離



ファーストステップとして、プロトタイプ検出器の地上背景事象データと、環境中性子シミュレーションによって算出した事象数の比較を行う。

電子反跳・・・ β 線, γ 線

⇒ S1 波形・S2/S1 比を用いて分離

原子核反跳・・・WIMP, 中性子

⇒ 事象数を正確に見積もることが重要

⇒ シミュレーションの構築は必須

RunVI 概要

1m x 1m シンチ

(上階の床)

【検出器】 (BG ラン時の設定)

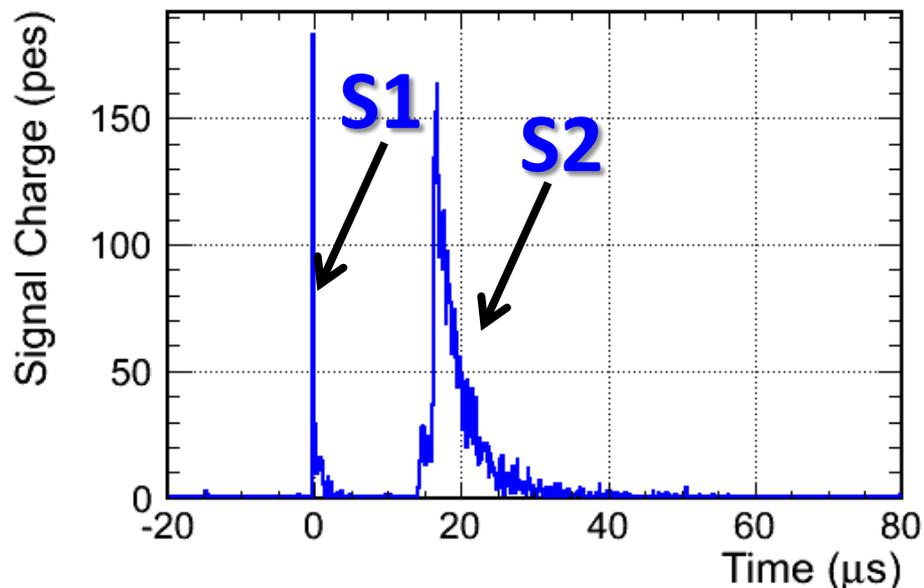
- 小型 2 相型検出器
- (有効体積 ~ 0.5 kg)
- 検出光量 : ~ 1 pes/keV_{ee}
- 2 inch PMT 2 本
- E-Drift : 500 V/cm
- E-Extraction : 3.8 kV/cm
- Gain : 5.0×10^6
- threshold 5 mV
- 内部 veto PMT×3
- 外部 veto シンチ
- ~6 mm 側面鉛シールド
- ~30 cm 側面水シールド



背景事象低減の努力

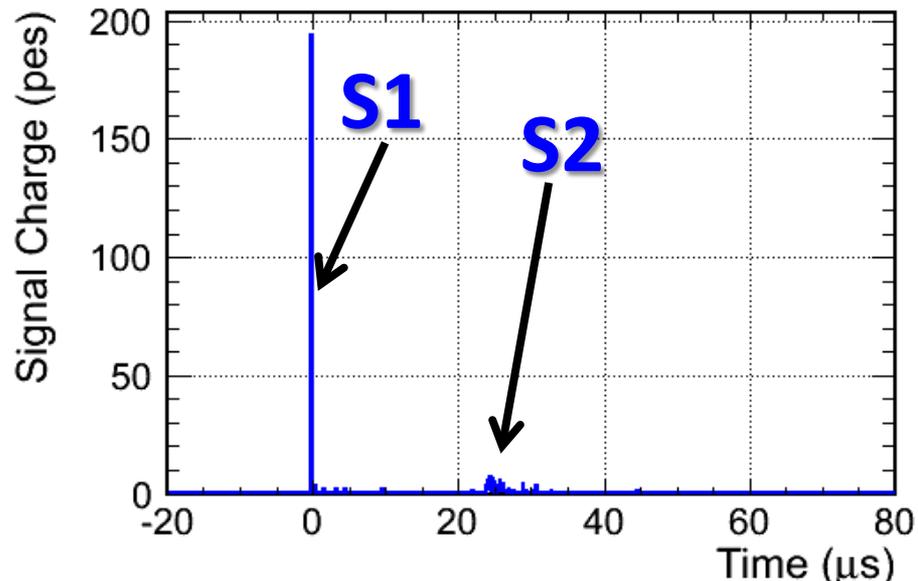
RunVI 取得データの例

◆ 電子反跳事象 (^{60}Co)



- slow 成分の割合が **多い**
- S1 に対する S2 の量が **多い**

◆ 原子核反跳事象 (^{252}Cf)



- slow 成分の割合が **少ない**
- S1 に対する S2 の量が **少ない**

シミュレーションについて

【シミュレーション構築の課題】

- ✓ シミュレーション基盤の構築（技術面，物理過程など）
- ✓ 背景事象の理解（環境中性子フラックスなど）
- ✓ 検出器応答の理解（エネルギー分解能，位置分解能など）
- ✓ アルゴン特性の理解（純度・電場特性，消光因子など）

⇒ 検出器設計につながる

環境中性子シミュレーションを行うために必要な以下の作業を行う。

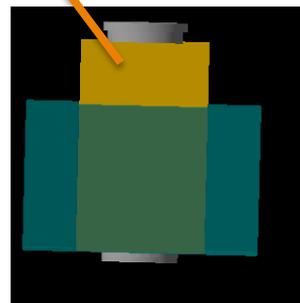
1. シミュレーション基盤の構築
2. 検出器分解能の較正
3. 原子核反跳に対する消光因子の較正

Geant4 設定

【ジオメトリ】

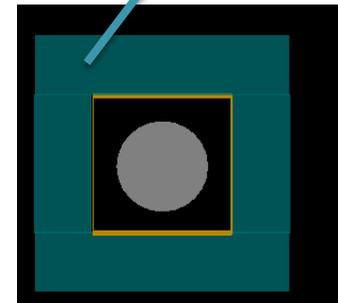
アルゴン, ステンレス製容器, 空気
(+ 鉛シールド, 水シールド)

鉛シールド



横から見た図

水シールド



上から見た図

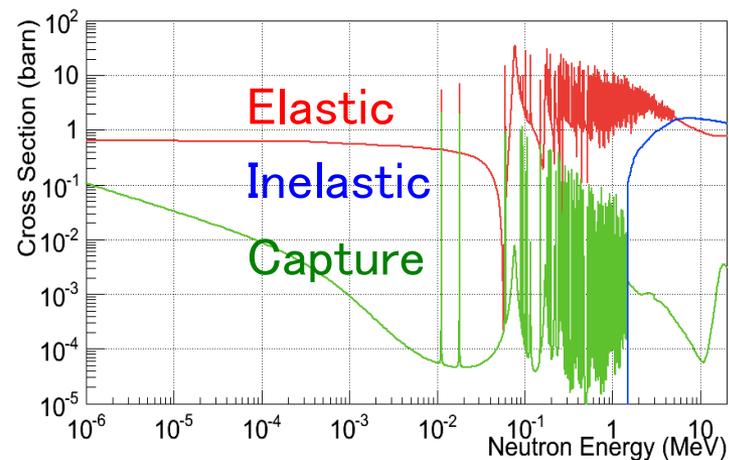
【物理モデル】

中性子との相互作用が特に重要

20 MeV 以下のエネルギー領域に特化した
高精度の物理モデル (G4NDL) を使用

【損失エネルギー】

- 電子反跳エネルギー
 - 原子核反跳エネルギー
- } 2 種類に分類



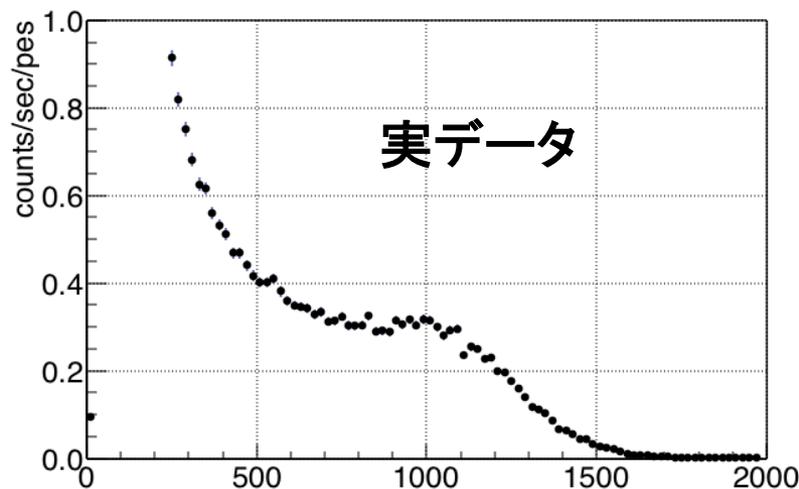
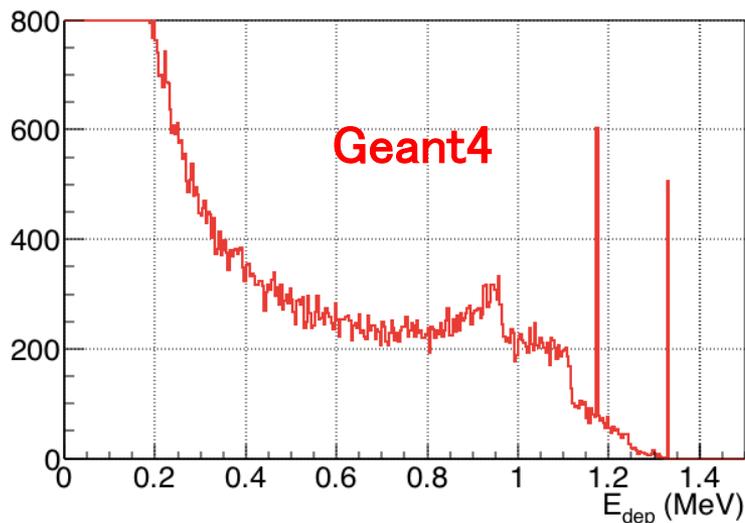
アルゴンと中性子の反応断面積

検出器分解能

実際に測定されるエネルギーは、様々な要因によってばらつく。

- 確率統計
- 光収集効率の非一様性
- PMT ゲイン特性
- FADC の分解能
- 解析手法
- ノイズ等による影響 など

【Co60 線源 (1173 keV, 1330 keV) のエネルギースペクトル】



原子核反跳に対する消光因子

$$(\text{損失エネルギー}) = \underbrace{(\text{電子的エネルギー})}_{\text{発光成分}} + \underbrace{(\text{核的エネルギー})}_{\text{非発光成分}}$$

消光因子 . . . 全損失エネルギーに対する電子的エネルギーの割合

測定が非常に難しい

TOF \Rightarrow 入射エネルギー

反跳角 θ \Rightarrow 反跳エネルギー



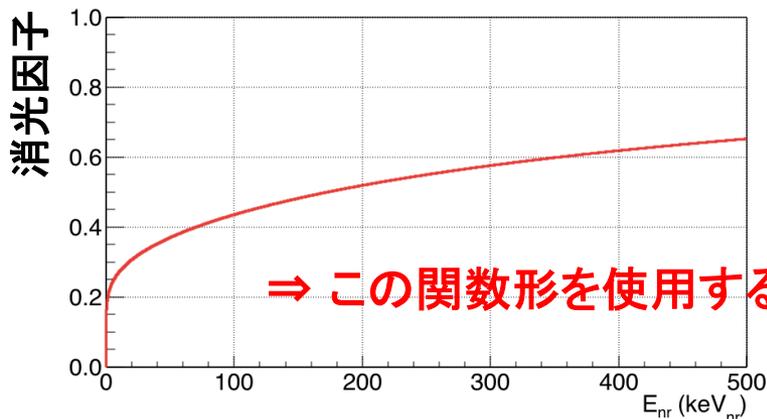
【Lindhard's Theory】

$$F_{Lindhard} = \frac{kg(\epsilon)}{1 + kg(\epsilon)}$$

$$\epsilon = 11.5 E_{nr}(\text{keV}) Z^{-7/3}$$

$$k = 0.133 Z^{2/3} A^{-1/2}$$

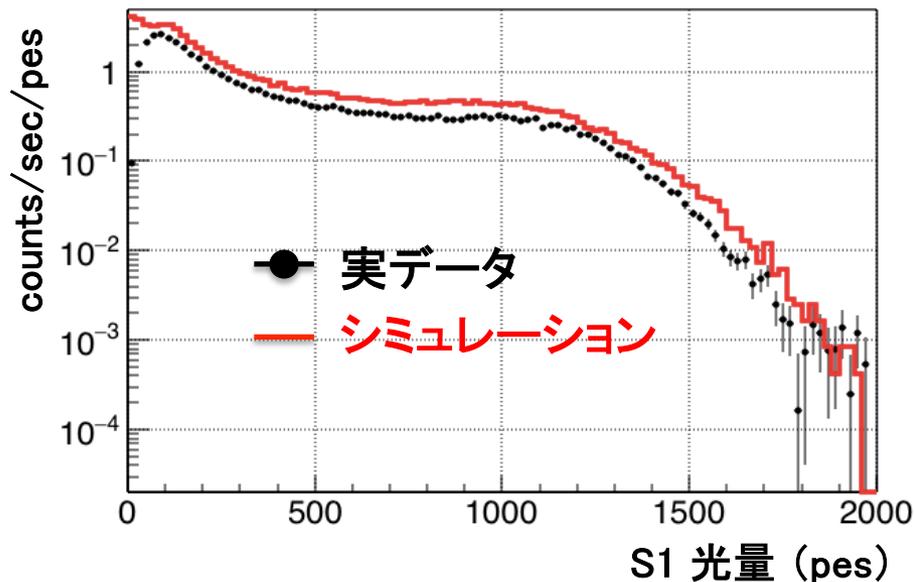
$$g(\epsilon) = 3\epsilon^{0.15} + 0.7\epsilon^{0.6} + \epsilon$$



シミュレーションの較正 (1 相型・ゼロ電場)

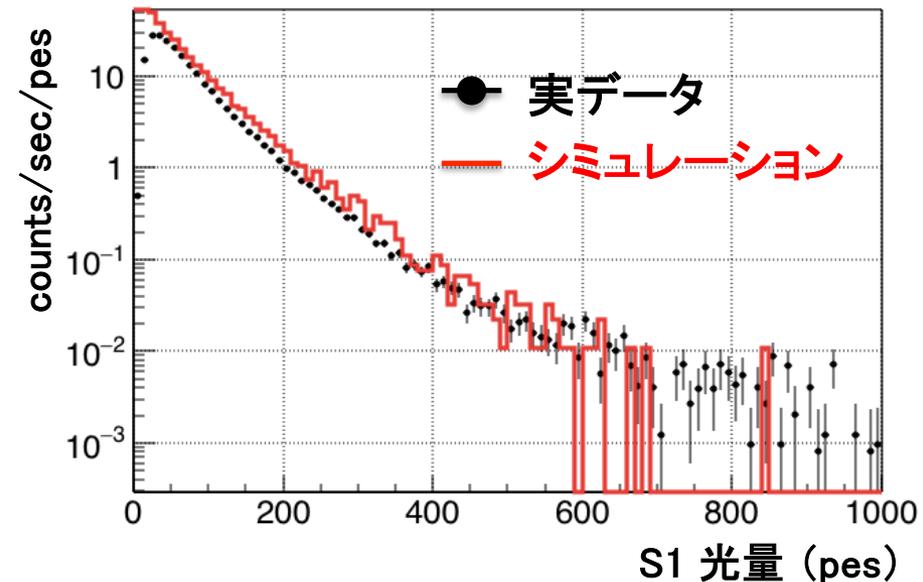
【 ^{60}Co 線源 (電子反跳事象)】

- ✓ 取得時間で規格化
- ✓ 検出器分解能の較正



【 ^{252}Cf 線源 (原子核反跳事象)】

- ✓ 電子反跳事象数で規格化
- ✓ 消光因子の較正



⇒ 環境中性子のシミュレーションを行う

環境中性子シミュレーション

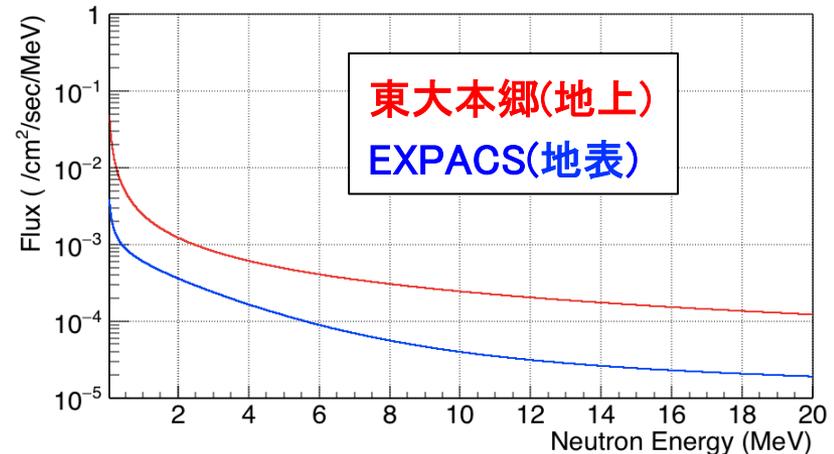
【エネルギースペクトル】

東大本郷：A/E を測定値で規格化

EXPACS：あるモデルに従った計算値

環境によって異なり，不定性が大きい

⇒ 実験環境場でのフラックスを知る必要がある



※ 別の学生が BC501A を使ってセットアップを構築，測定中！

【メリット】

- 波形弁別可能
- ターゲットが水素
- 文献，資料が非常に豊富
- ポータブル



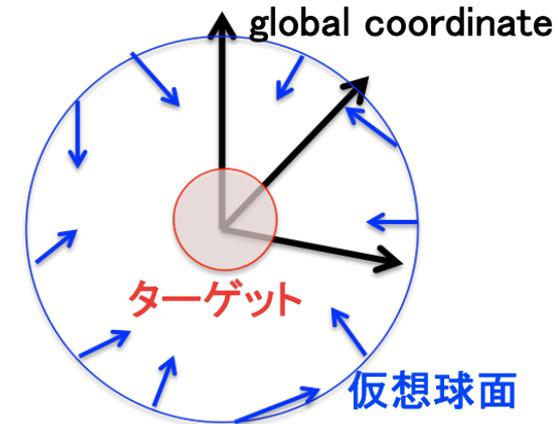
環境中性子シミュレーション

【初期粒子生成】 以下の 2 つを仮定

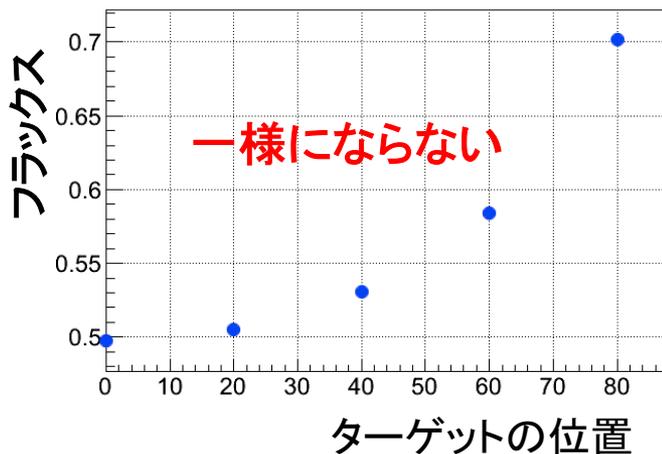
✓ 環境中性子は全方位から等方的に飛来.

✓ 任意の点においてフラックスは一樣.

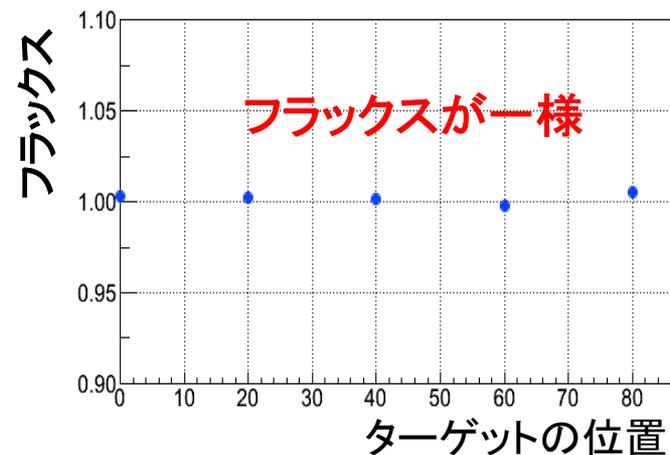
⇒ 検出器より大きい仮想球面上に一樣分布.
仮想球に対する天頂角分布が $\cos \theta$ に比例.



等方的

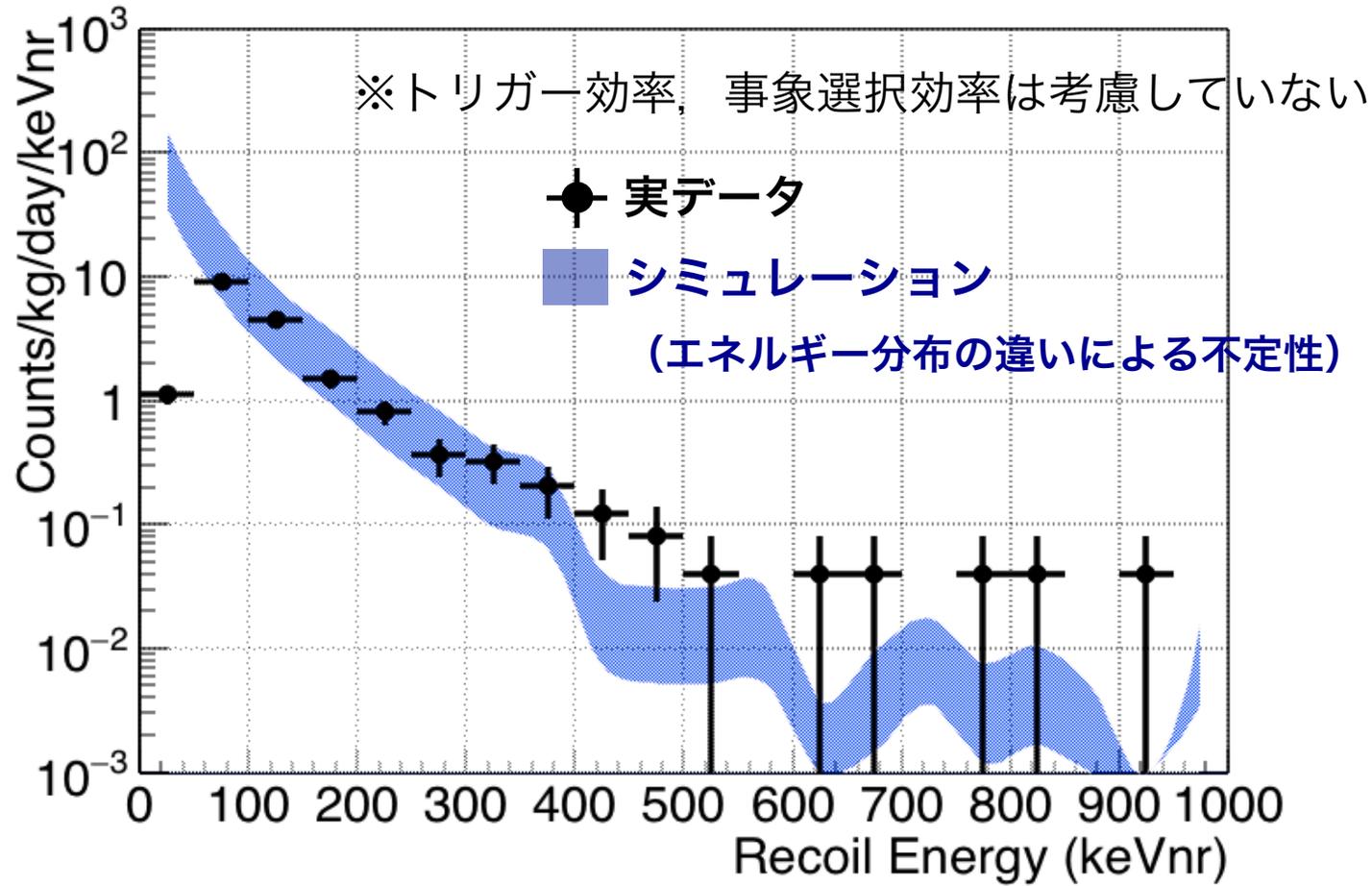


天頂角分布が $\cos \theta$ に比例



実験データとの比較

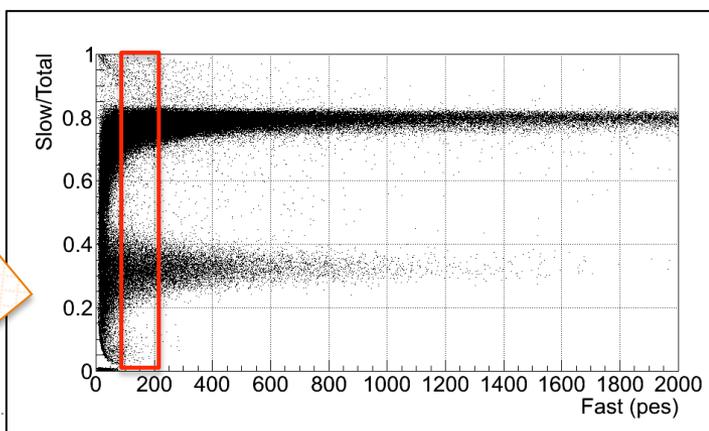
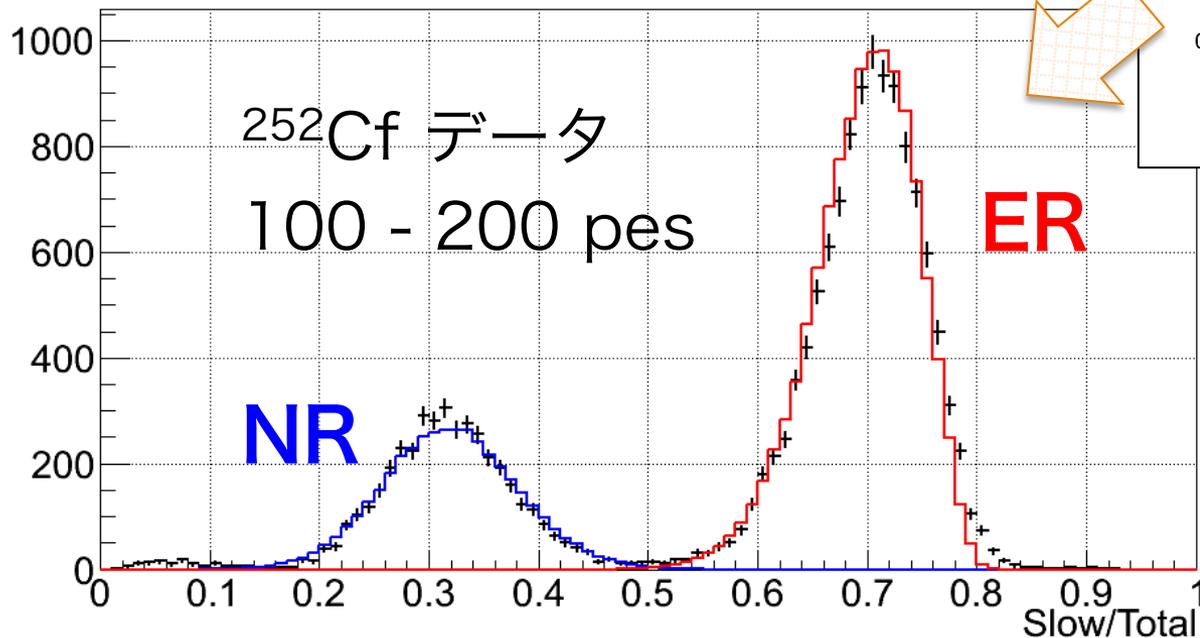
- ✓ 2相型・電場有り
- ✓ 鉛シールド・水シールド有り



まとめ (もう少しだけ続きます)

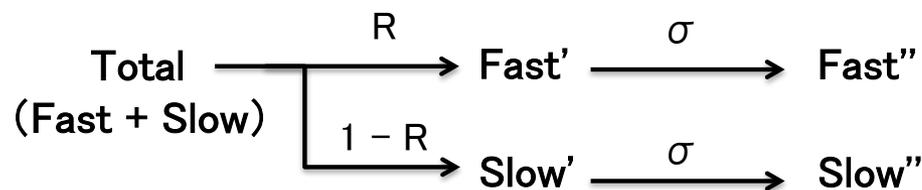
- ✓ ANKOK 実験のシミュレーション基盤を構築
- ✓ ^{60}Co , ^{252}Cf 線源を用いて検出器分解能・消光因子を較正し、エネルギースペクトルの形を再現
- ✓ 環境背景事象が環境中性子起因であることに無矛盾
- ✓ 今後は光・電子の発光・伝搬過程や信号読み出し部なども実装し、実験データの理解や物理実験用検出器設計につなげることが重要

PSD 分布の広がり



⇒ 分解能 $\sigma = 1.2$

PSD モデル : 二項分布 + 検出器の分解能

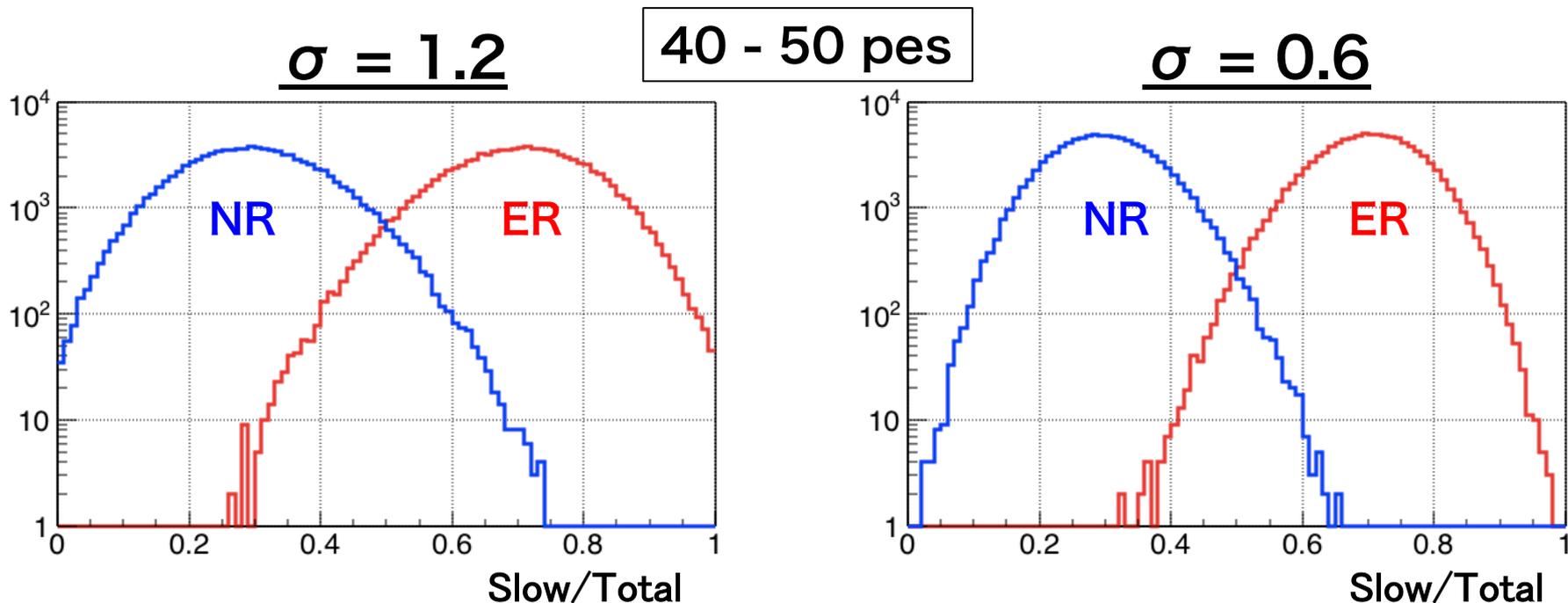


分解能と分離能力

NR の $\text{slow}/\text{total} = 0.3$

ER の $\text{slow}/\text{total} = 0.7$ に固定

ER と NR を同数生成



低エネルギー領域では、シグナル領域に e/γ 事象のしみ出しがある。

⇒ 分解能を上げて σ を抑える事が出来れば分離能力が向上し、より低エネルギー領域の事象を扱えるようになる。

"広がり" に対する取り組み

要素を切り分けるために定式化し、
波形シミュレーションを構築して PSD への影響を評価。

✓ 発生光子数

損失エネルギーが同じでも発生光子数は確率分布に従う。

✓ dE/dx 依存

損失エネルギー合計ではなく、dE/dx によって slow の割合が変わるとすると、物理現象として広がる可能性がある

✓ 光検出効率

位置依存性がある。検出・非検出は確率に基づく。

✓ PMT ゲイン

測定可能で、不定要素は少ない。

✓ PMT 応答関数

アンダーシュートやアフターパルスの効果など。