

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】

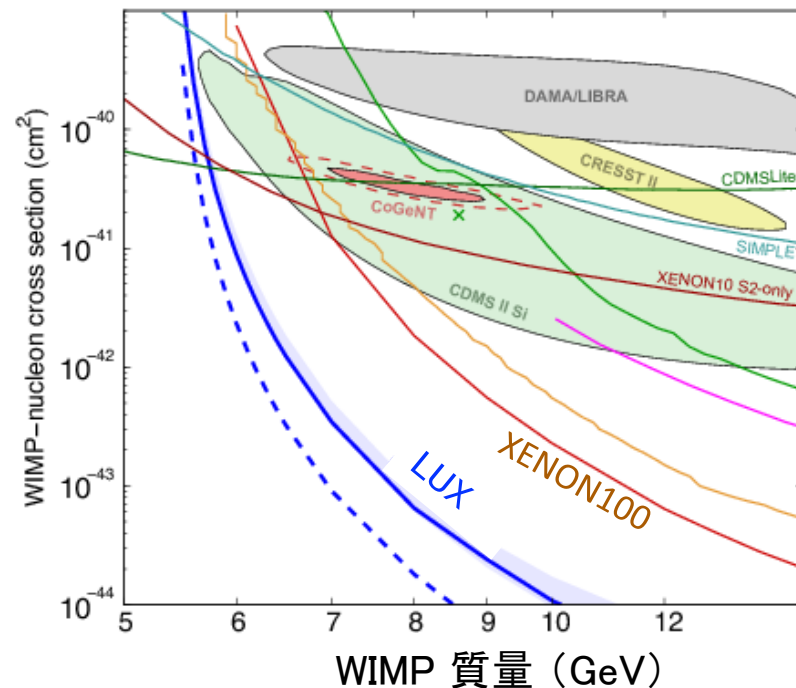
WIMP と弾性散乱した標的原子核の  
反跳エネルギーを測定

… **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

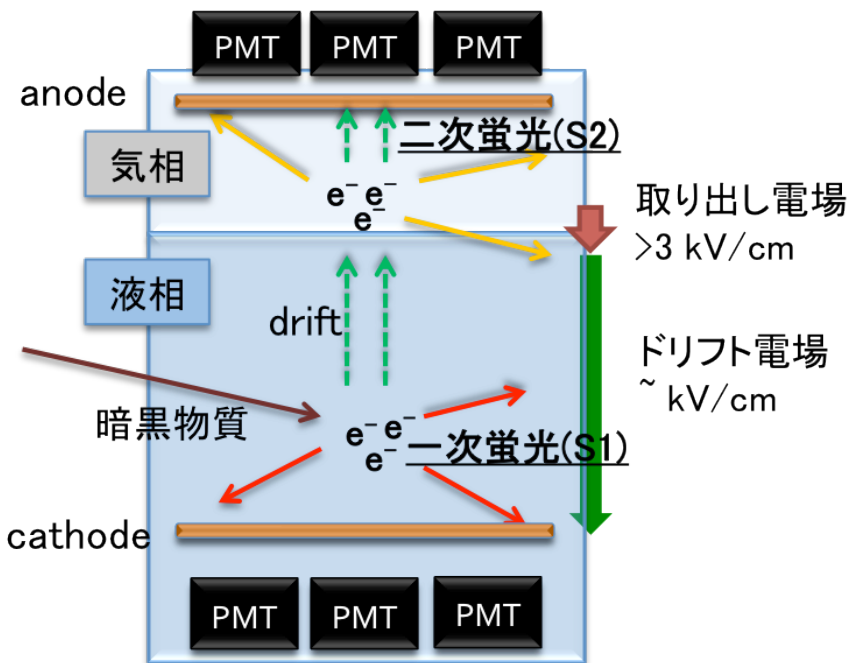
… **核種依存？ 背景事象による違い？**



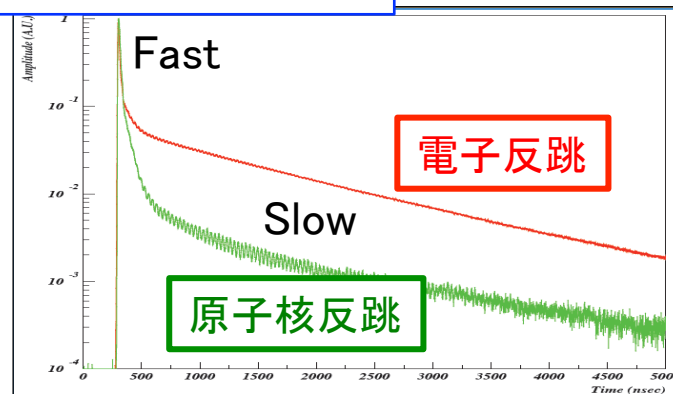
**異なる媒質・検出手法を用いて相補的・多角的に検証することが重要**

# ANKOK 実験

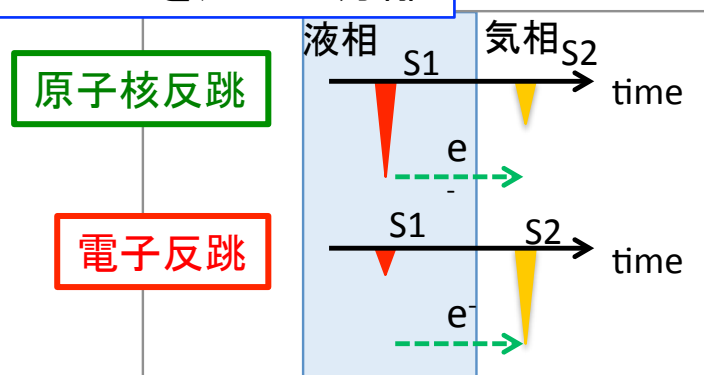
## 【気液 2 相型アルゴン光検出器】



### S1 波形を用いた分離



### S1/S2 比を用いた分離



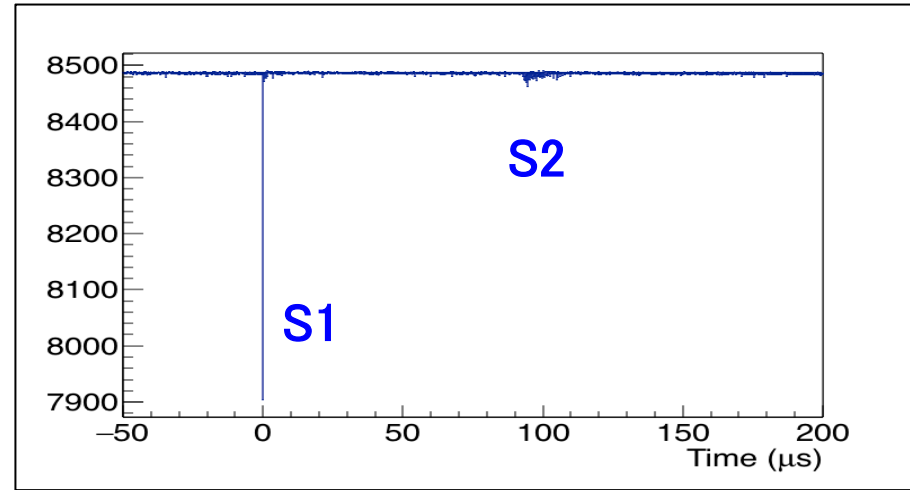
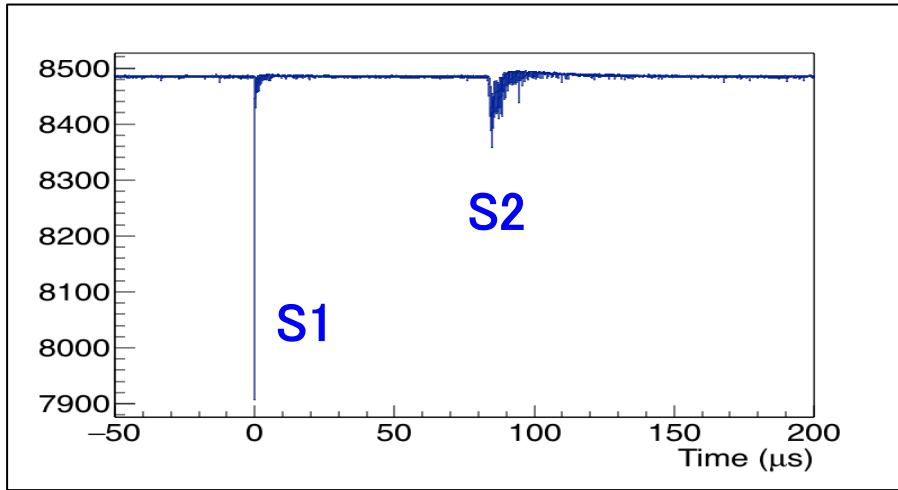
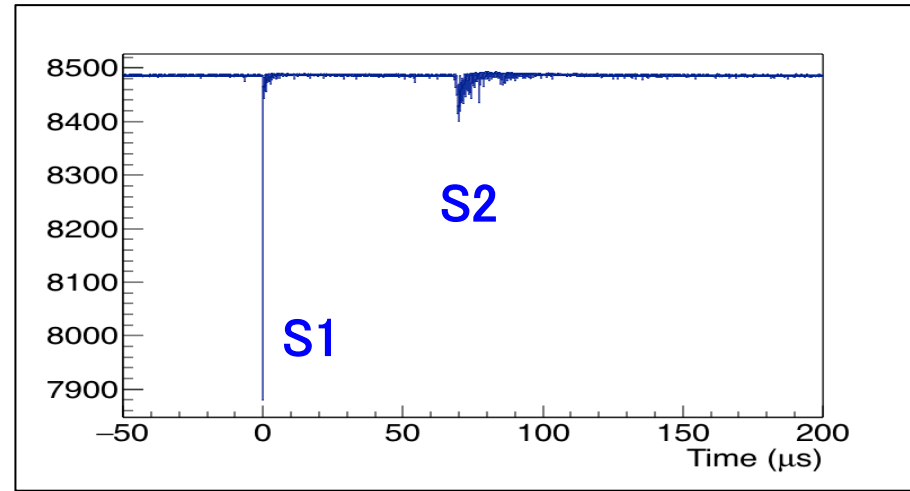
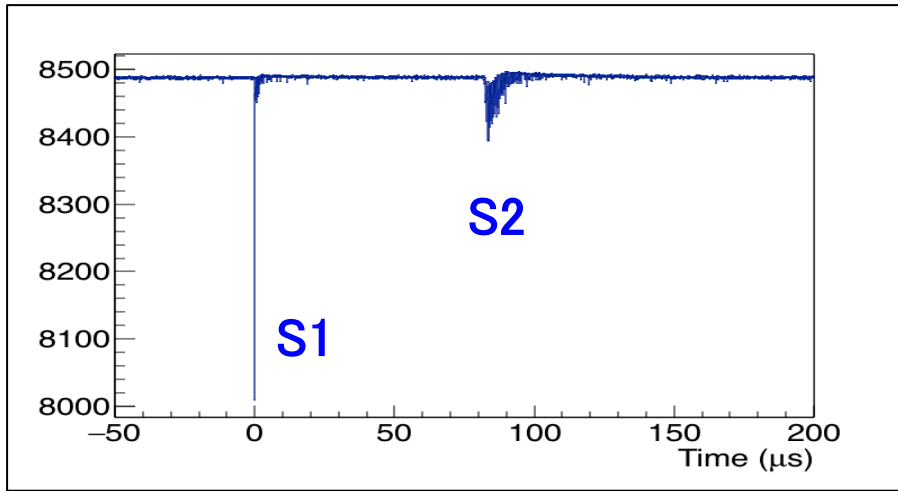
電子反跳・・・ $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

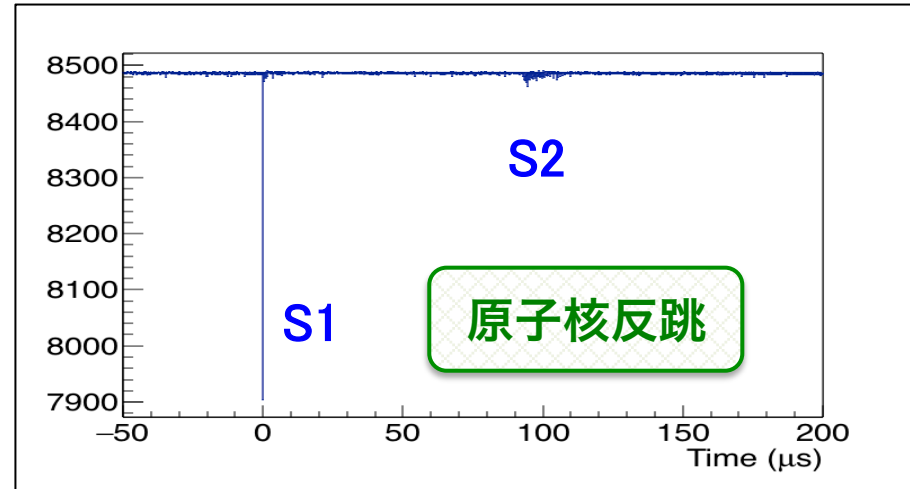
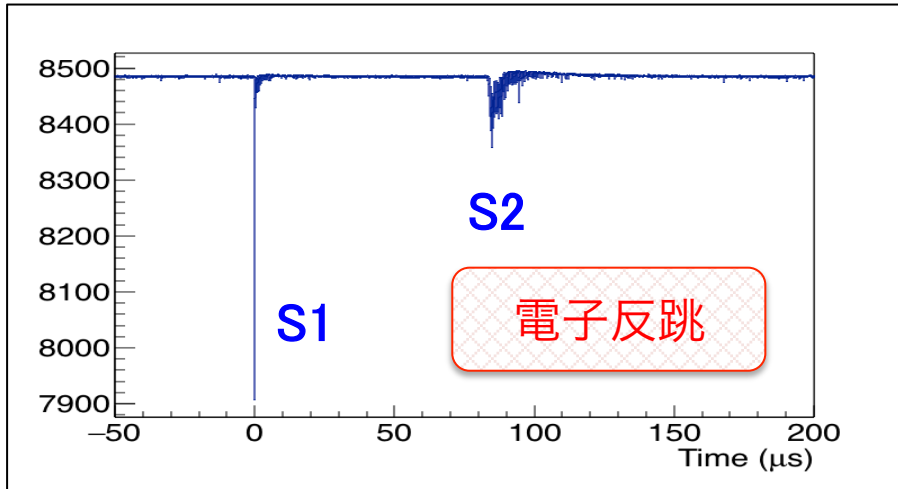
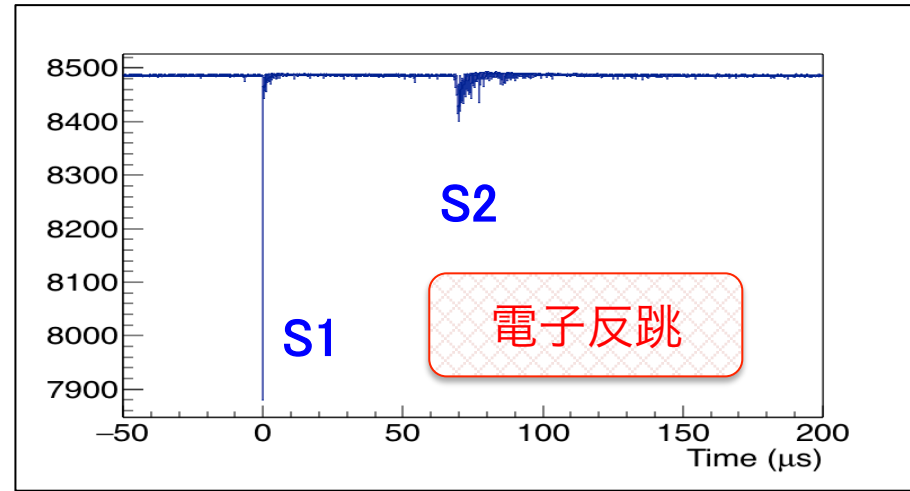
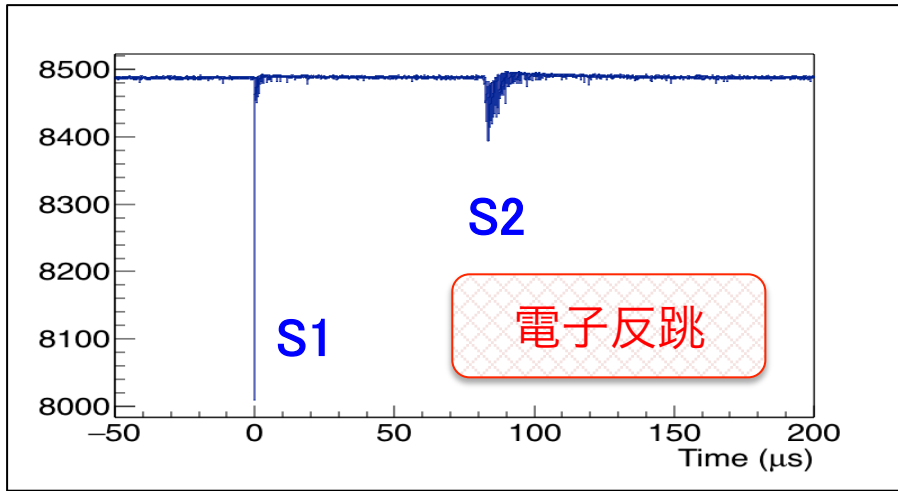
⇒ S1 波形・S2/S1 比を用いて分離

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

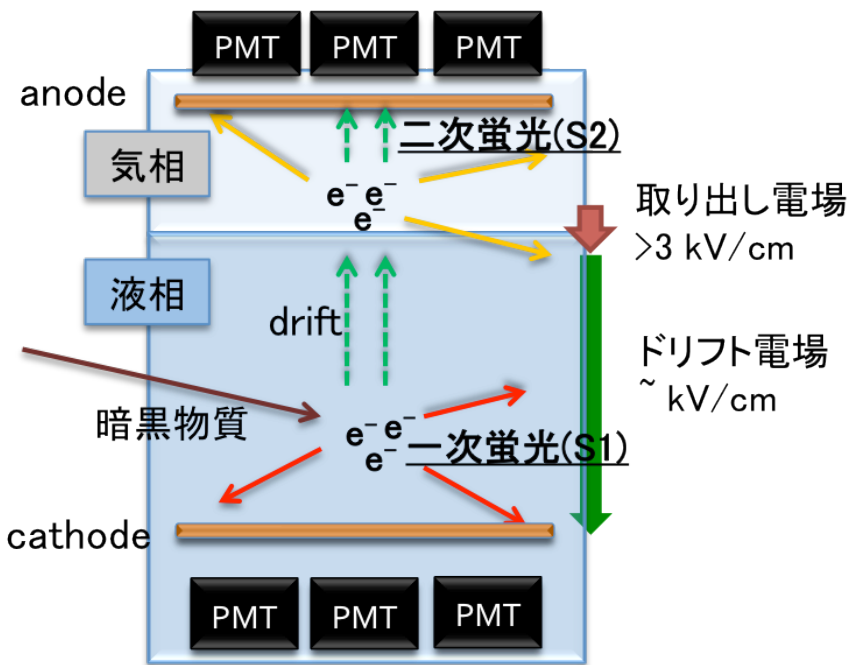
⇒ シミュレーションの構築は必須



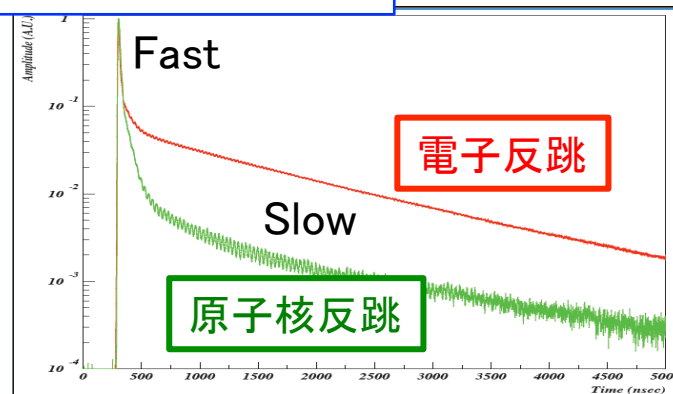


# ANKOK 実験

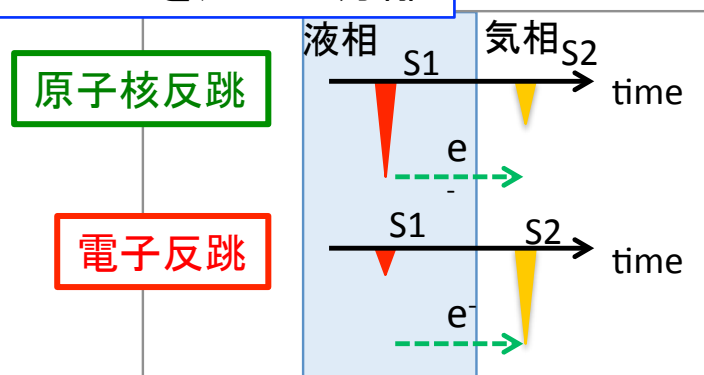
## 【気液 2 相型アルゴン光検出器】



### S1 波形を用いた分離



### S1/S2 比を用いた分離



電子反跳・・・ $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

⇒ S1 波形・S2/S1 比を用いて分離

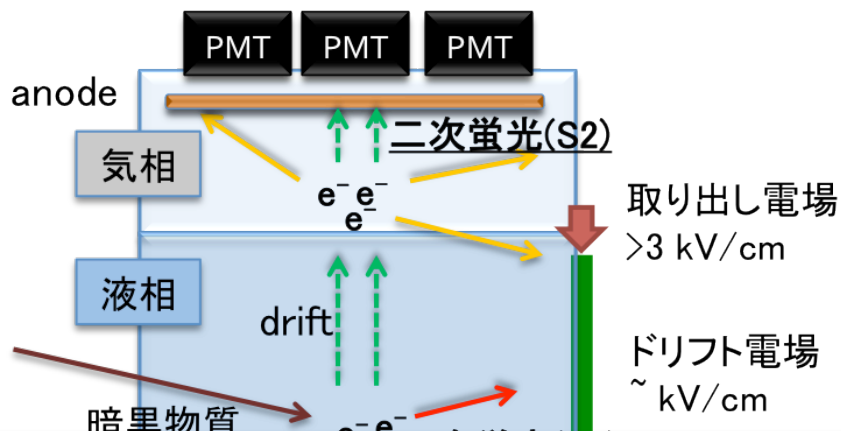
原子核反跳・・・WIMP, 中性子

⇒ 事象数を正確に見積もることが重要

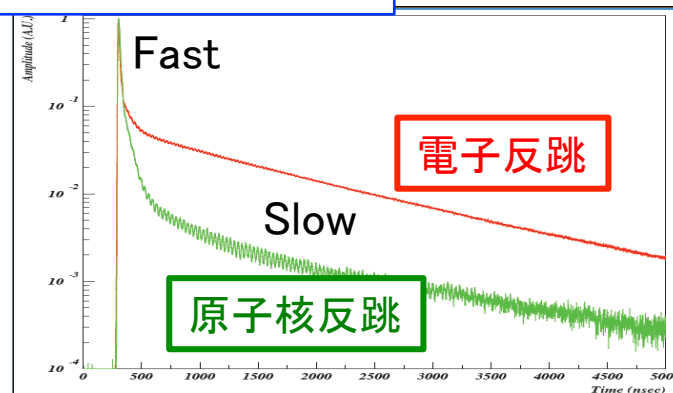
⇒ シミュレーションの構築は必須

# ANKOK 実験

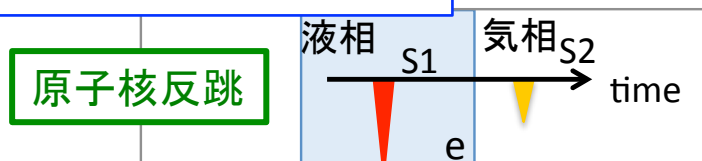
## 【気液 2 相型アルゴン光検出器】



### 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・・・ $\beta$ 線,  $\gamma$ 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<sub>ee</sub>
- 2 inch PMT 2 本
- E-Drift : 500 V/cm
- E-Extraction : 3.8 kV/cm
- Gain :  $5.0 \times 10^6$
- 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

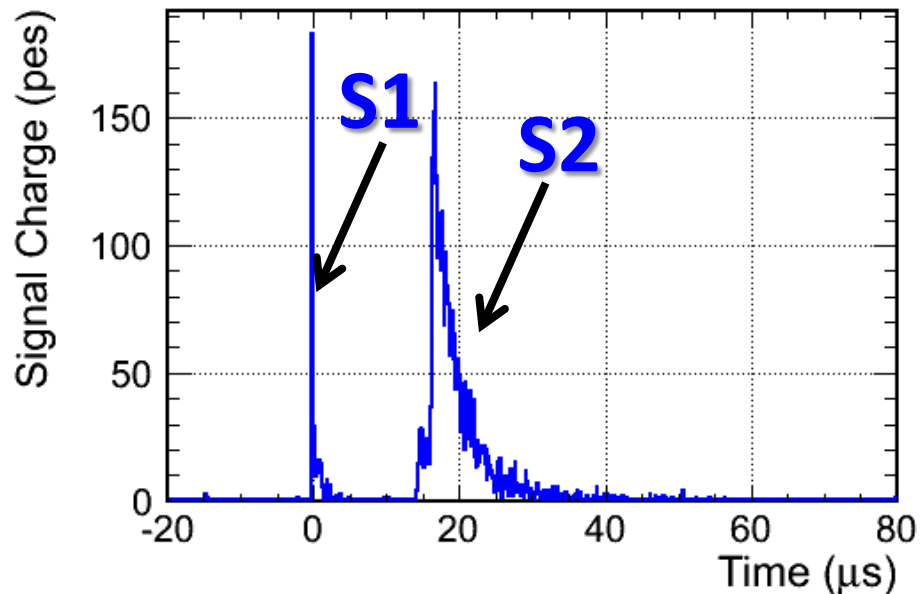


背景事象低減の努力



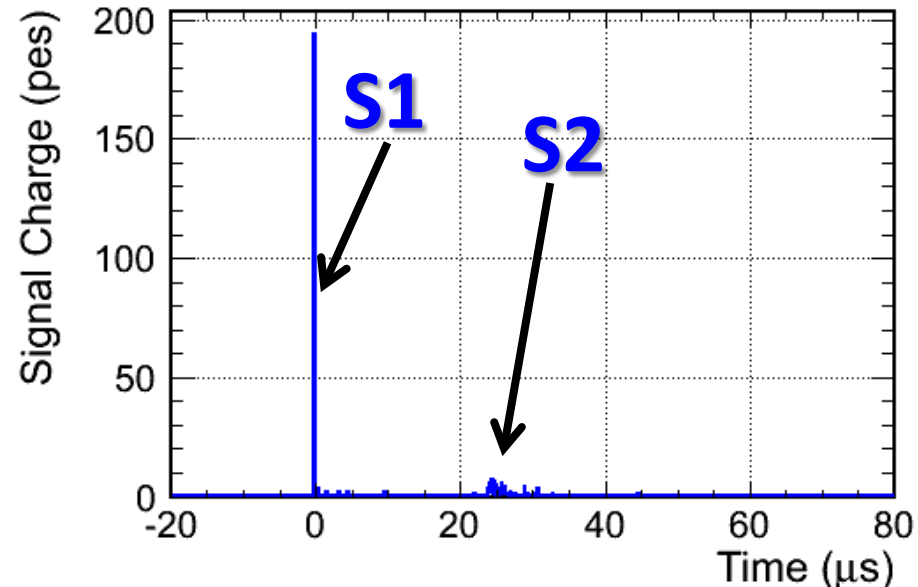
# RunVI 取得データの例

## ◆ 電子反跳事象 ( $^{60}\text{Co}$ )



- 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 ( $^{252}\text{Cf}$ )



- 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。

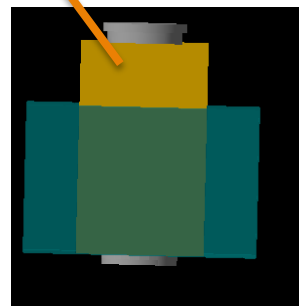
1. シミュレーション基盤の構築
2. 検出器分解能の較正
3. 原子核反跳に対する消光因子の較正

# Geant4 設定

## 【ジオメトリ】

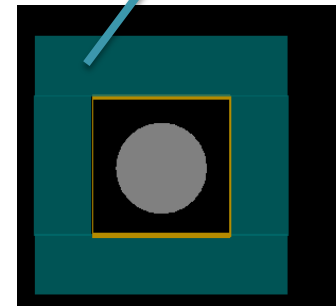
アルゴン, ステンレス製容器, 空気  
(+ 鉛シールド, 水シールド)

鉛シールド



横から見た図

水シールド



上から見た図

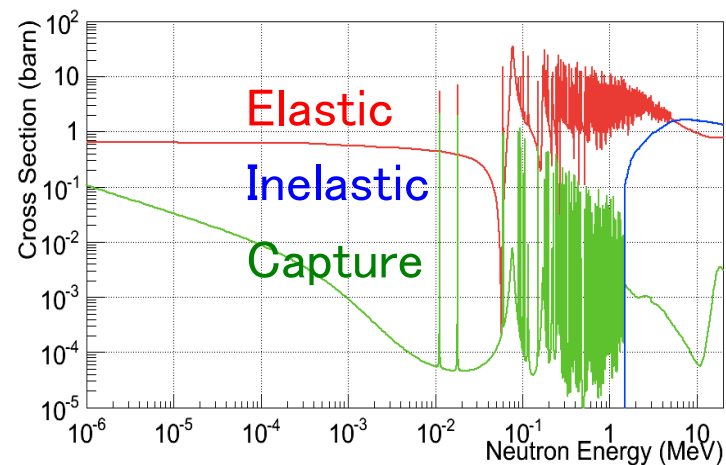
## 【物理モデル】

### 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



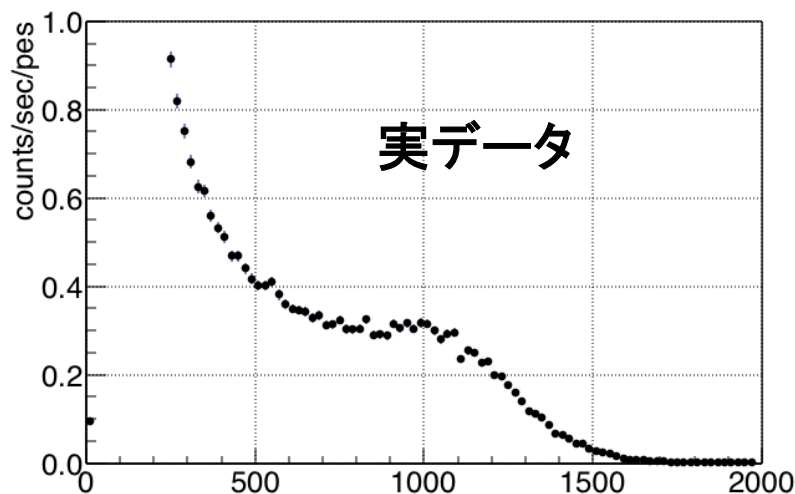
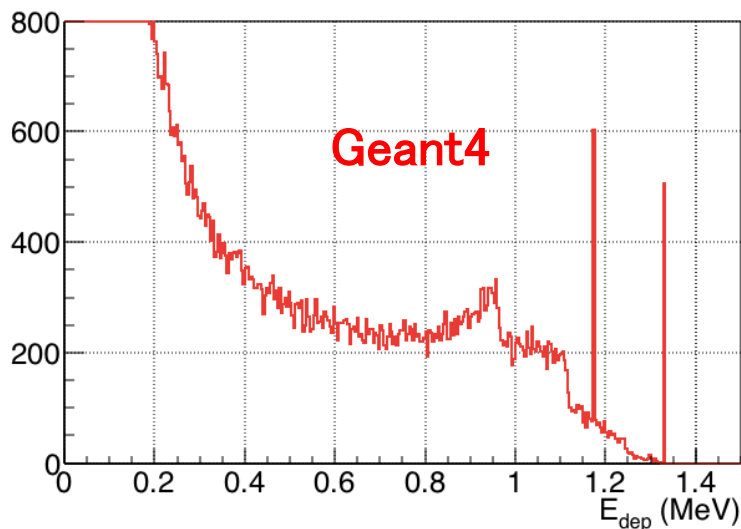
アルゴンと中性子の反応断面積

# 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】



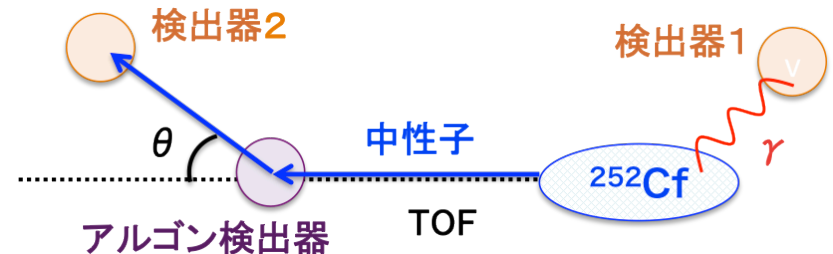
# 原子核反跳に対する消光因子

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

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  $\theta$   $\Rightarrow$  反跳エネルギー



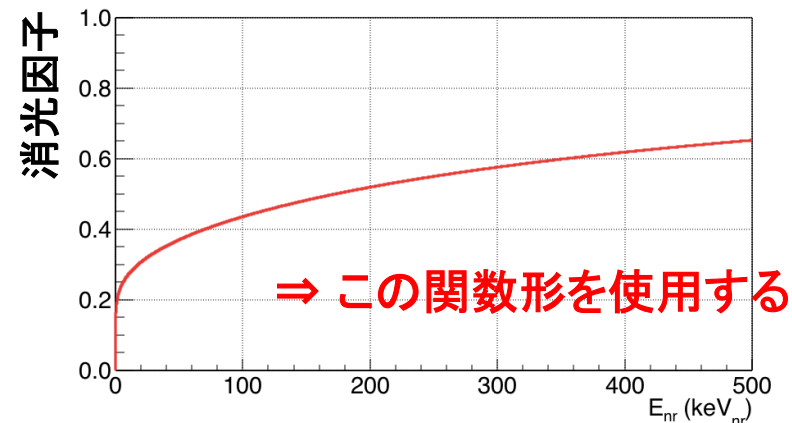
## 【Lindhard's Theory】

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

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

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

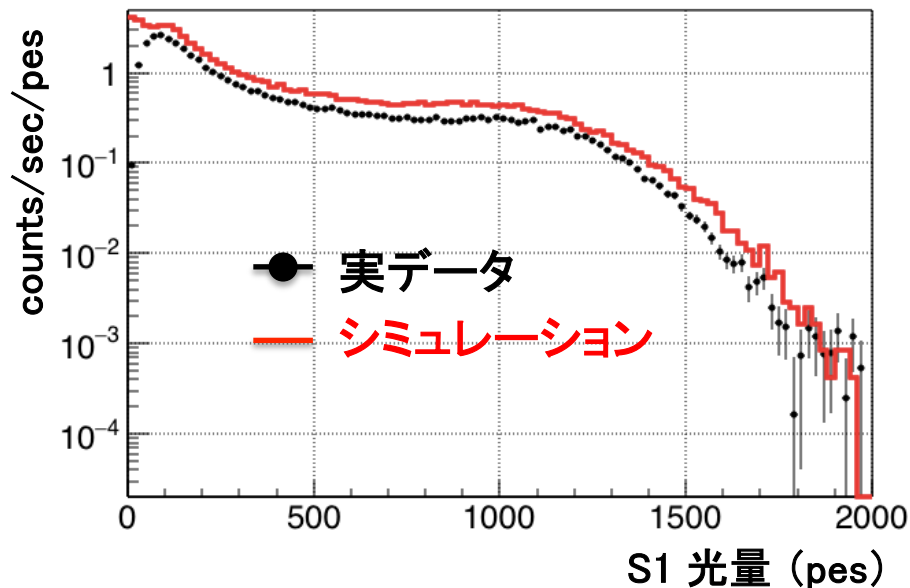
$$g(\epsilon) = 3\epsilon^{0.15} + 0.7\epsilon^{0.6} + \epsilon$$



# シミュレーションの較正 (1 相型・ゼロ電場)

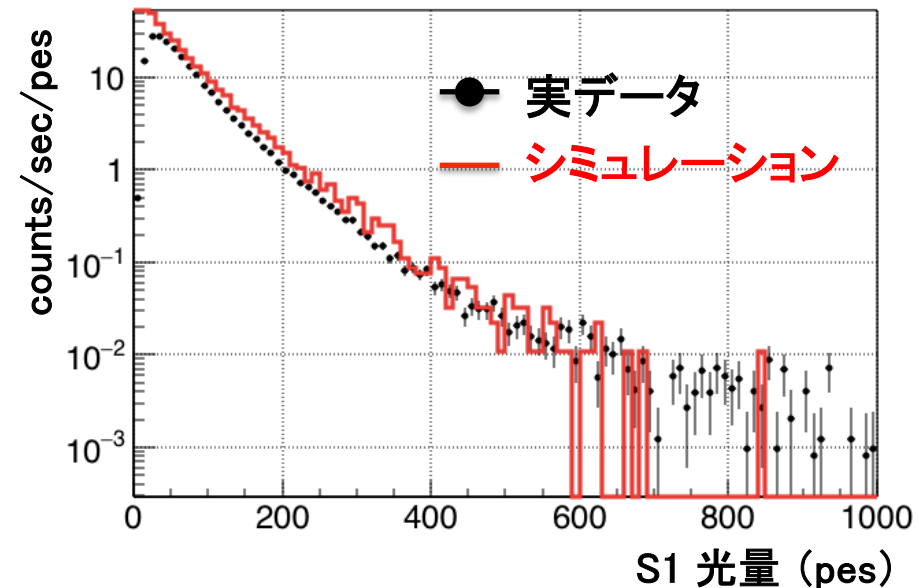
【 $^{60}\text{Co}$  線源 (電子反跳事象)】

- ✓ 取得時間で規格化
- ✓ 検出器分解能の較正



【 $^{252}\text{Cf}$  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

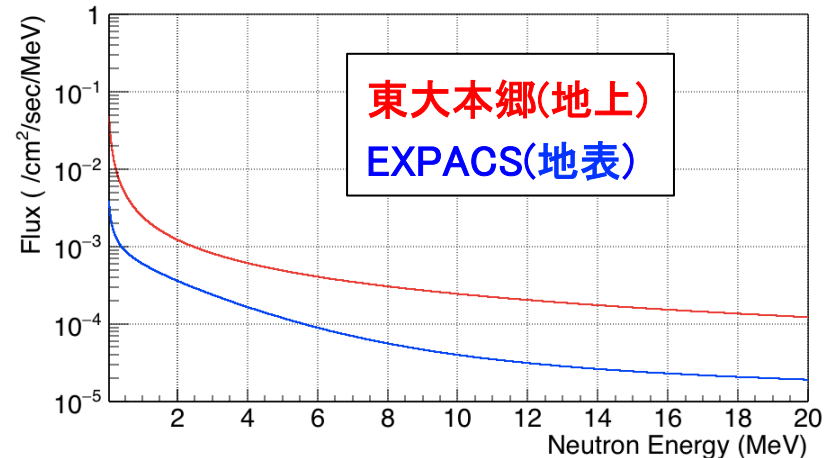
## 【エネルギースペクトル】

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



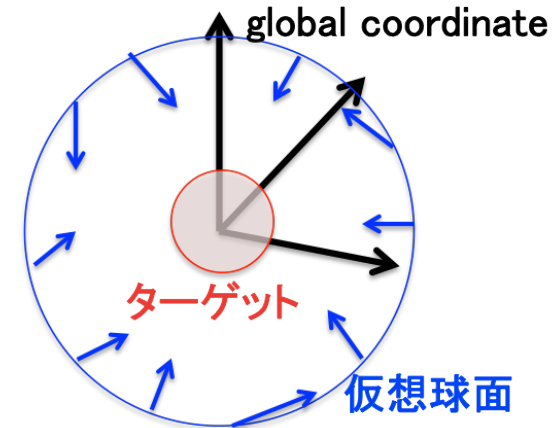
# 環境中性子シミュレーション

【初期粒子生成】 以下の 2 つを仮定

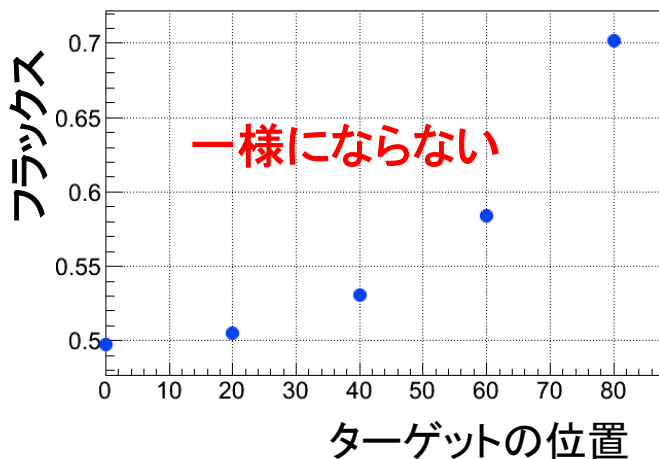
✓ 環境中性子は全方位から等方的に飛来.

✓ 任意の点においてフラックスは一樣.

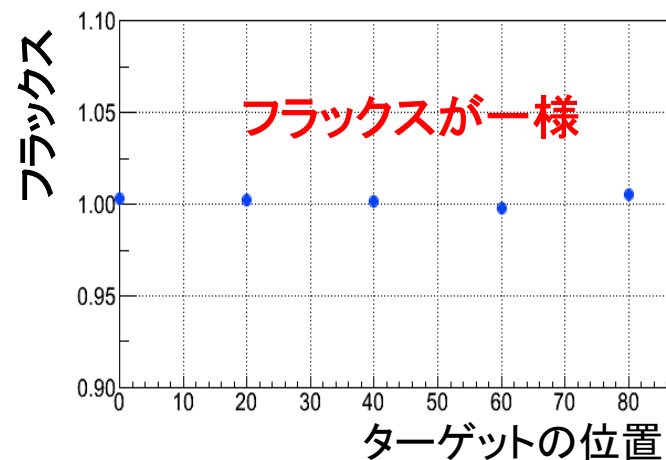
⇒ 検出器より大きい仮想球面上に一樣分布.  
仮想球に対する天頂角分布が  $\cos \theta$  に比例.



等方的



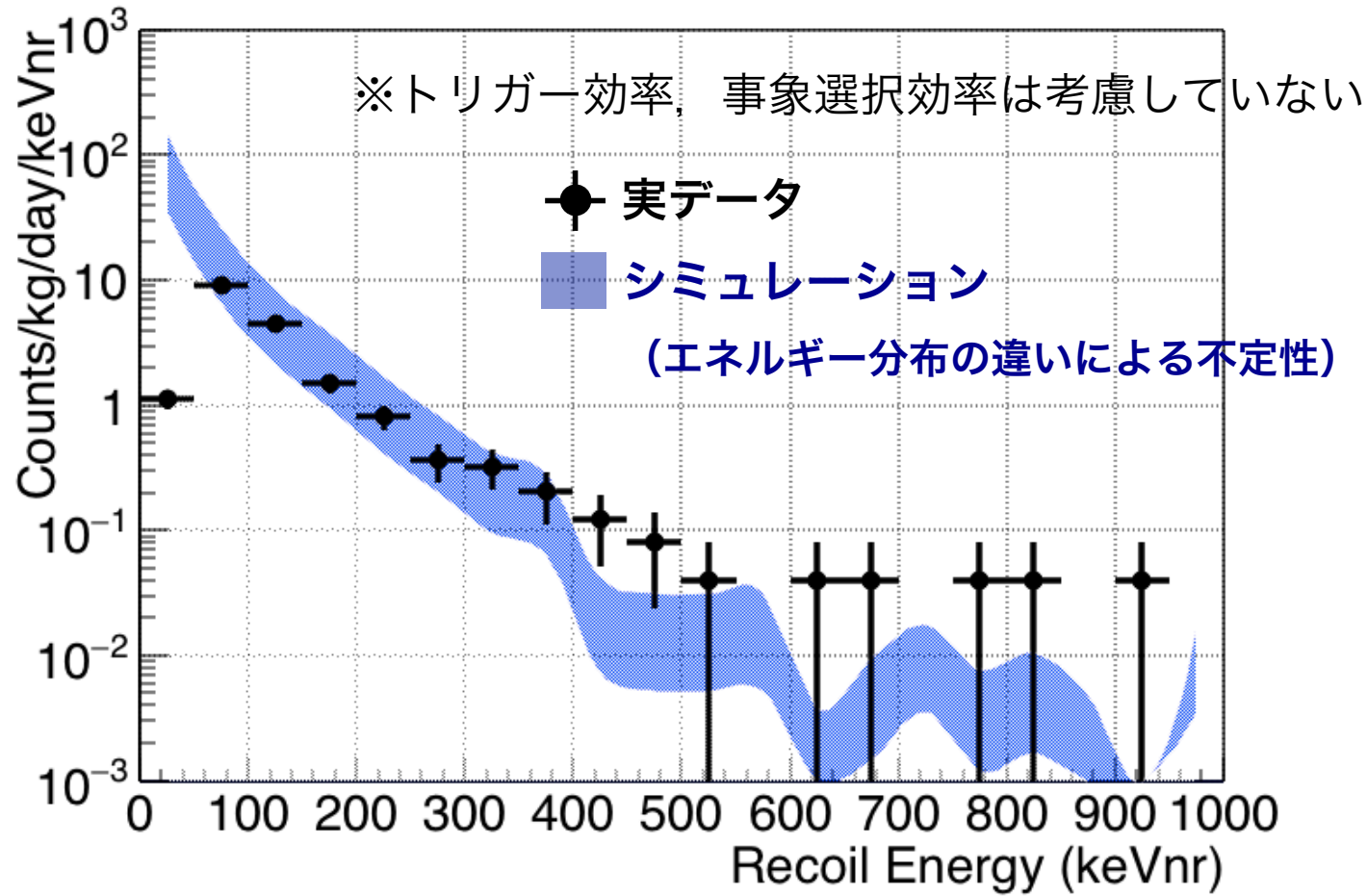
天頂角分布が  $\cos \theta$  に比例





# 実験データとの比較

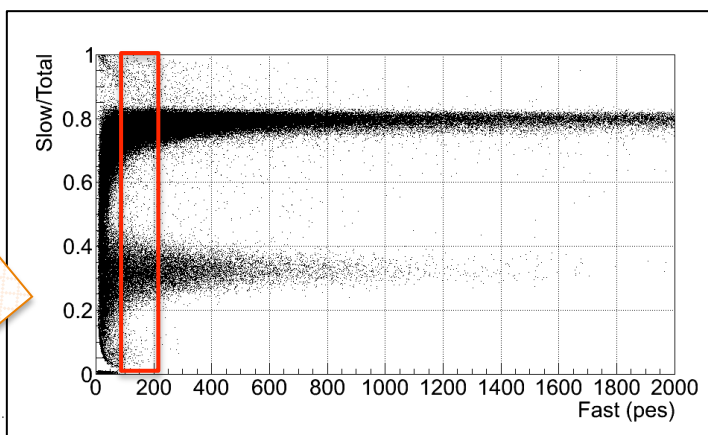
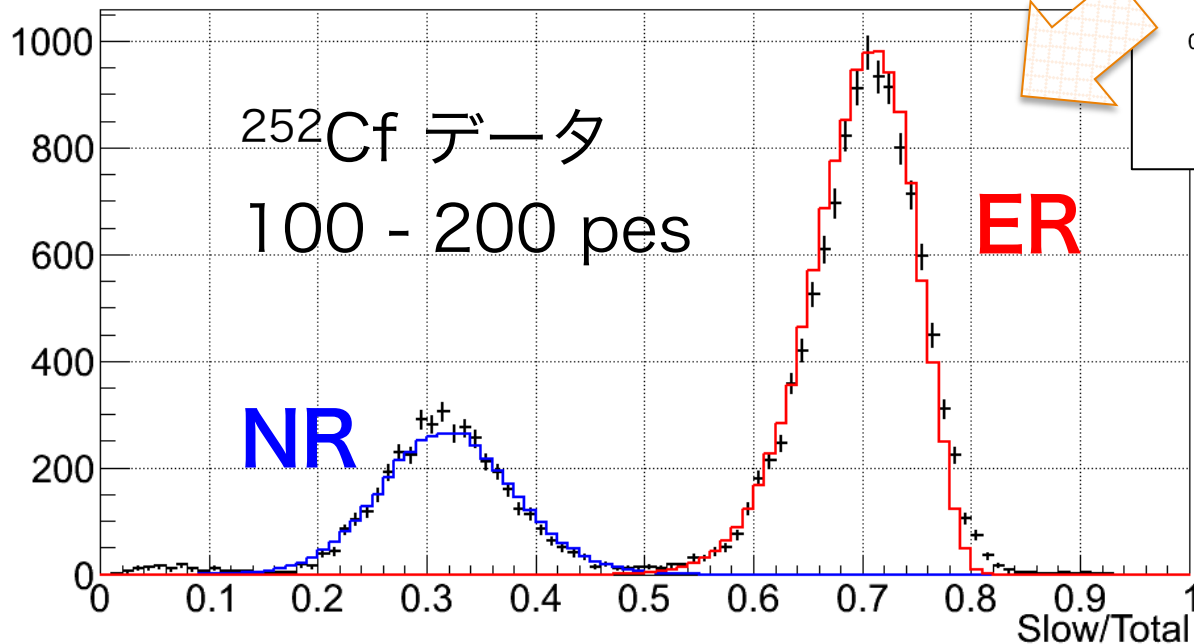
- ✓ 2相型・電場有り
- ✓ 鉛シールド・水シールド有り



## まとめ (もう少しだけ続きます)

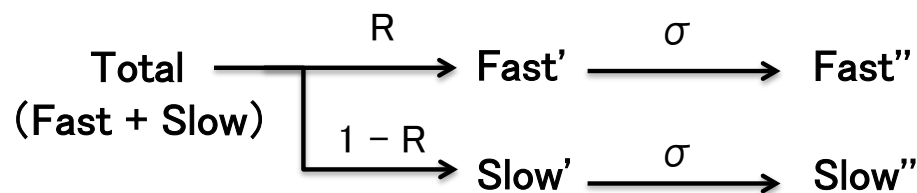
- ✓ ANKOK 実験のシミュレーション基盤を構築
- ✓  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{252}\text{Cf}$  線源を用いて検出器分解能・消光因子を較正し、エネルギースペクトルの形を再現
- ✓ 環境背景事象が環境中性子起因であることに無矛盾
- ✓ 今後は光・電子の発光・伝搬過程や信号読み出し部なども実装し、実験データの理解や物理実験用検出器設計につなげることが重要

# 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

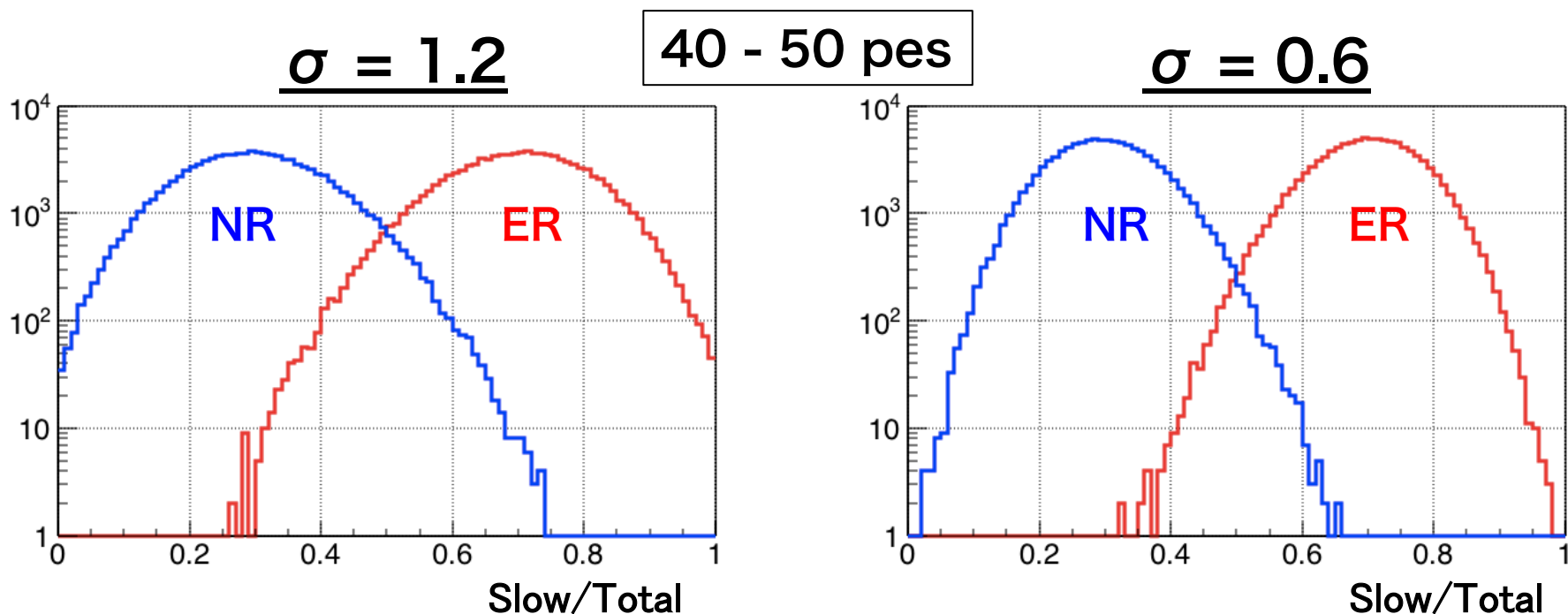


# 分解能と分離能力

NR の slow/total = 0.3

ER の slow/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/ $\gamma$  事象のしみ出しがある。

⇒ 分解能を上げて  $\sigma$  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。