



# 宇宙暗黒物質探索のための 高速中性子によるシンチレーション応答測定

浦野雄介, 畑和実<sup>A</sup>, 折戸玲子, 黒澤俊介<sup>B</sup>, 伏見賢一,

小西哲之<sup>C</sup>, Bakr Mahmoud<sup>C</sup>, 向井啓祐<sup>C</sup>

徳島大理工, 東北大RCNS<sup>A</sup>, 東北大NICHe<sup>B</sup>, 京大エネルギー理工学研究所<sup>C</sup>

## 目次

- ◆ 単色中性子照射
- ◆ PSD測定, TOF測定
- ◆ Quenching factorの算出
- ◆ まとめと展望

# WIMPs 直接探索と消光因子

## 直接探索による検出原理

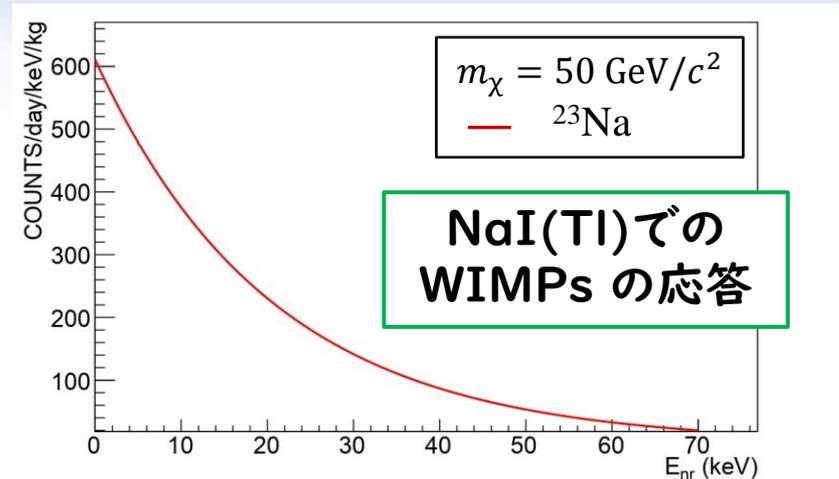
$$E_{nr} = \frac{4m_N m_\chi}{(m_N + m_\chi)^2} E_\chi \frac{1 - \cos \theta}{2}$$

$E_\chi$  : WIMPs の運動エネルギー

$m_\chi$  : WIMPs の質量

$m_N$  : 標的原子核の質量

$\theta$  : 重心系の散乱角



$E_{nr} = \text{数 keV} \sim 100 \text{ keV 以下}$

## 消光因子 (Quenching factor : QF)

◆ 同じ運動エネルギーをもつ原子核反跳による発光量  $C_{nr}$  と

電子反跳による発光量  $C_{er}$  の比で定義

$$QF = C_{nr} / C_{er} = E_{ee} / E_{nr}$$

$E_{ee}$  : 電子反跳発光等量エネルギー

$E_{nr}$  : 原子核反跳エネルギー

◆ WIMPs のエネルギースペクトル算出に必要

# 消光因子 QF の理論値

## Lindhard によるモデル研究

$$QF(E_{nr}) = \frac{kg(\varepsilon)}{1 + kg(\varepsilon)}$$

$$\varepsilon = 11.5 E_{nr}[\text{keV}] Z^{-7/3}$$

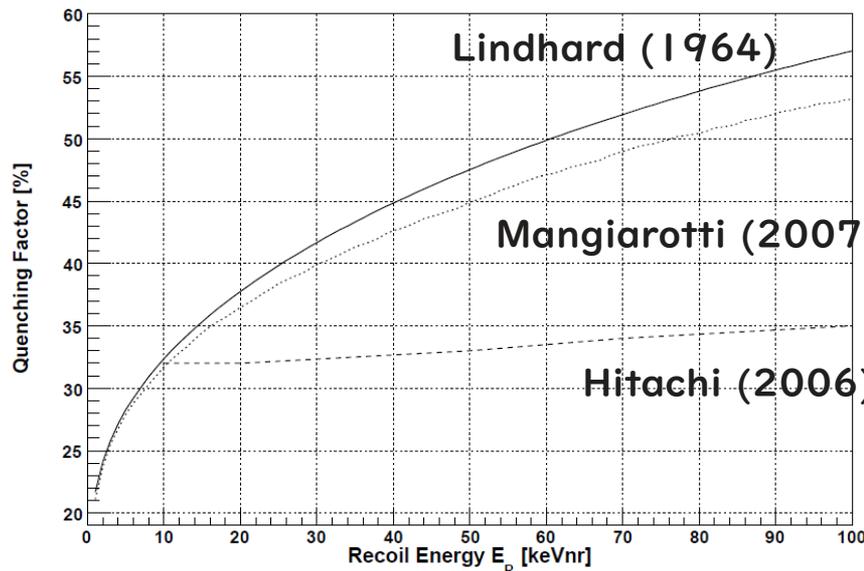
$$k = 0.133 Z^{2/3} A^{-1/2}$$

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

$$QF_{Na}(100 \text{ keV}_{nr}) \sim 0.57$$

$$QF_I(100 \text{ keV}_{nr}) \sim 0.29$$

J. Lindhard et al., Mat. Fys. Medd Dan. Vid. Selsk. **33**(10) (1963)



## Naの原子核反跳の消光因子の理論曲線

実線: Lindhard理論による消光因子

点線: Mangiarottiの計算による消光因子

破線: Hitachiの計算による消光因子

H. Chagani et al., Journal of Instrumentation **3** (2008) P06003

# NaI(Tl) の消光因子 QF

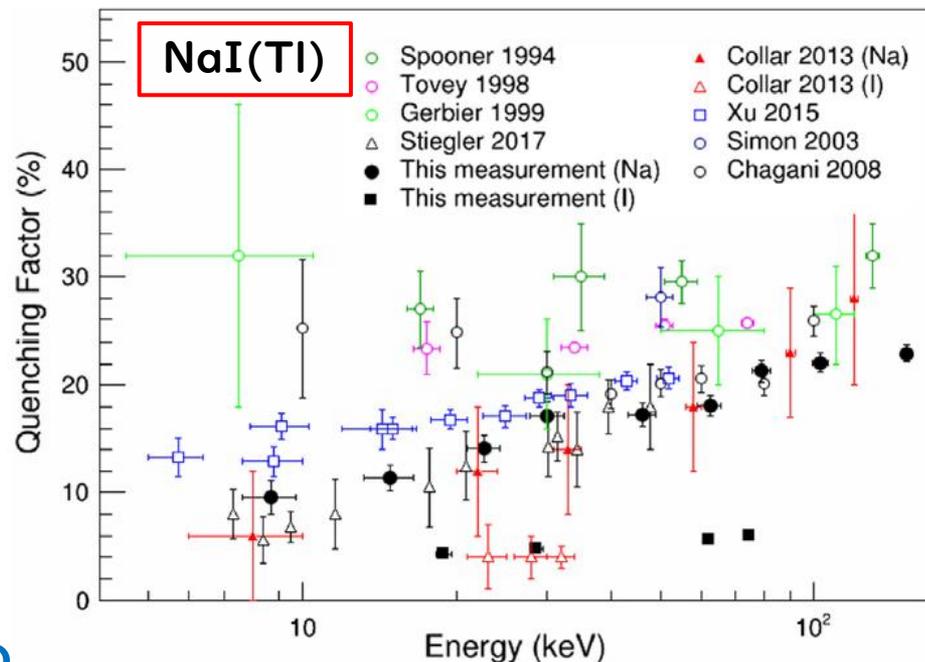
WIMPs 探索に必要なとされる低エネルギー側まで精度よく測定

エネルギー依存性が確認

- ◆ 理論値より小さい
- ◆ 値にばらつき, 不定性有り
- ◆ 結晶個体差が示唆

個々の検出器に対する測定が必須

➔PICOLONで作製したNaI結晶の  
QFを測定したい



H.W.Joo et al., Astroparticle Physics 108 (2019) 50

# 中性子源 (京都大学エネルギー理工学研究所)



## 小型D-D核融合中性子源



直径 40 cm の球形

中心に直径 8 cm のカソード (陰極)

周りに冷却用の水 (厚さ 5 cm)

K. Yoshikawa et al., Journal of Plasma and Fusion Research  
83(10) (2007) 795

## 電圧値により強度変化が可能

ゼロエミッションエネルギー研究拠点の協力  
(ZE2020-C08)

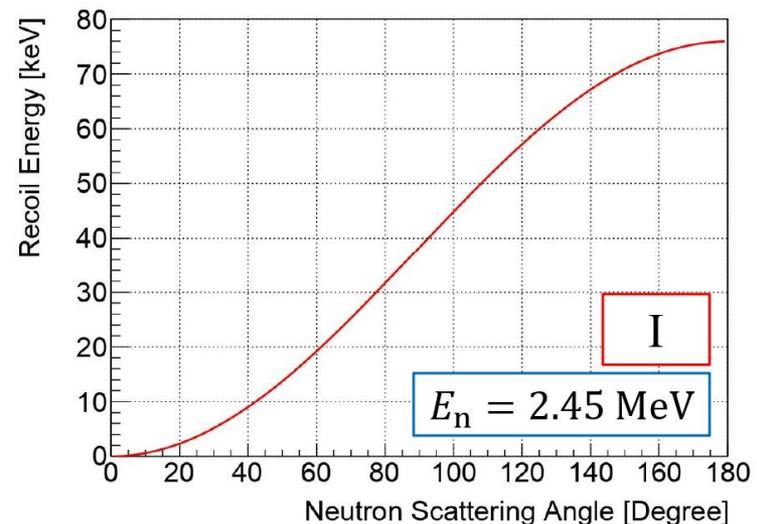
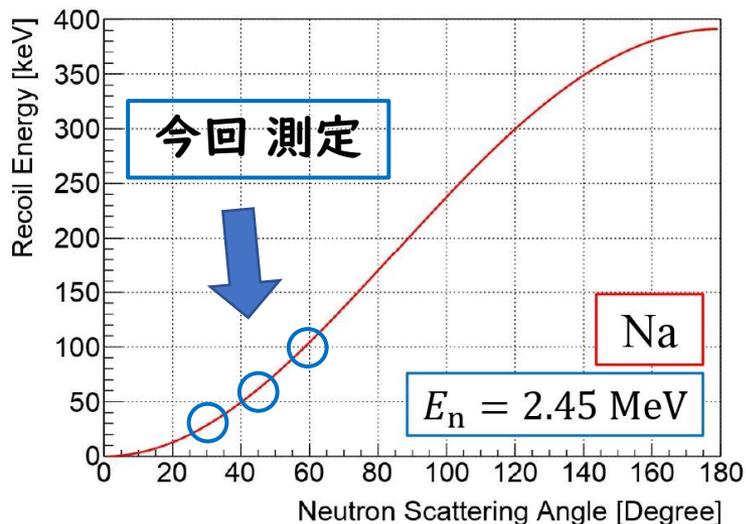
実験日: 2020/11/10-12

# 中性子散乱角と原子核反跳エネルギーの関係

$$E_{nr} = E_n \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{m_n \cos \theta_L + \sqrt{m_N^2 - m_n^2 \sin^2 \theta_L}}{m_n + m_N} \right)^2 \right\}$$

$E_{nr}$  : 原子核反跳エネルギー  
 $E_n$  : 入射中性子エネルギー  
 $\theta_L$  : 中性子の散乱角

$m_n$  : 中性子の質量  
 $m_N$  : 反跳核種の質量





# データ収集システム



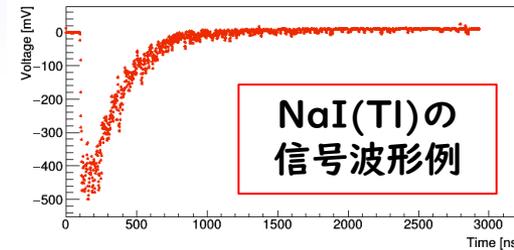
<https://www.psi.ch/drs/drs-chip>

## DRS4 (Domino-Ring-Sampler 4)

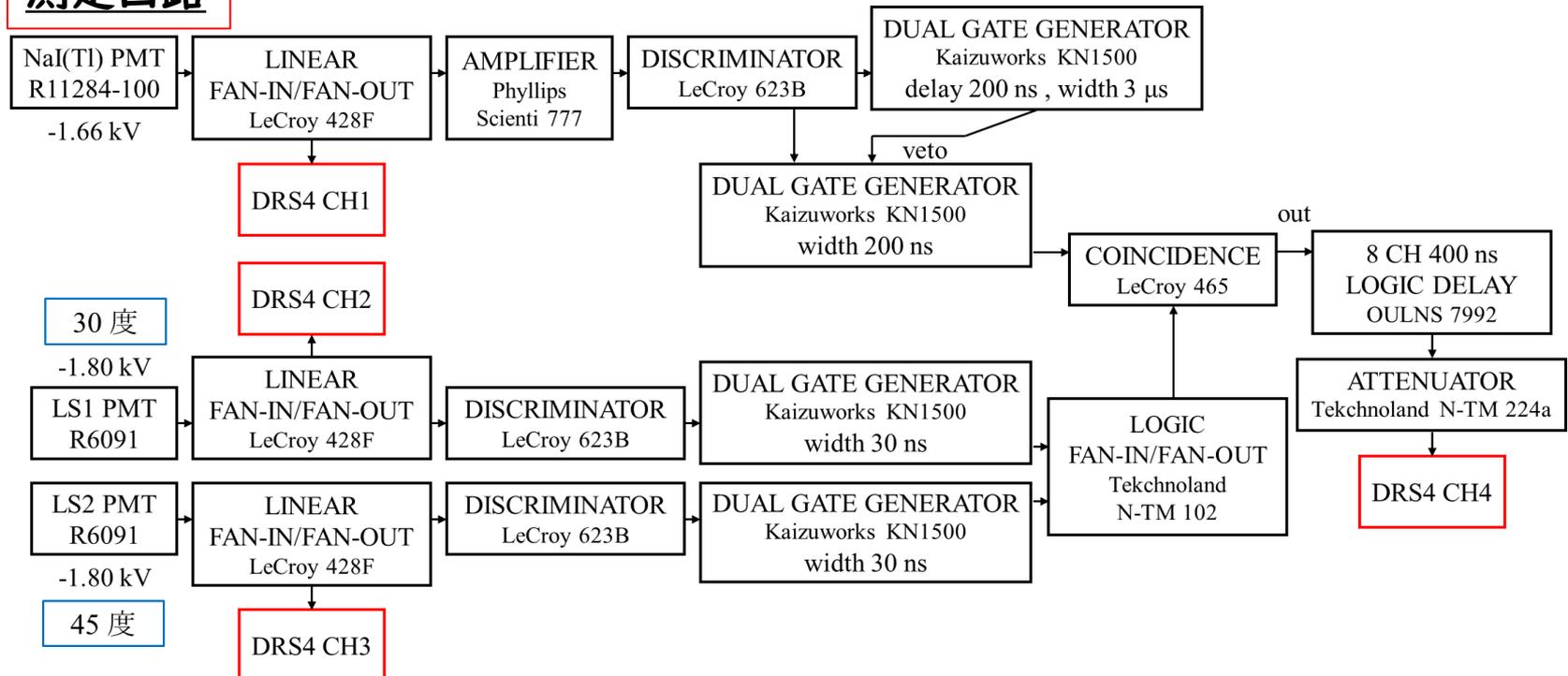
→ 高速信号の波形記録が可能

サンプリング速度: 700 MHz

2.9  $\mu$ s の間に 2048 点プロット



### 測定回路



# NaI(Tl) の PSD 測定方法と結果

## 光子の平均到着時間分布の違いから波形弁別 (PSD)

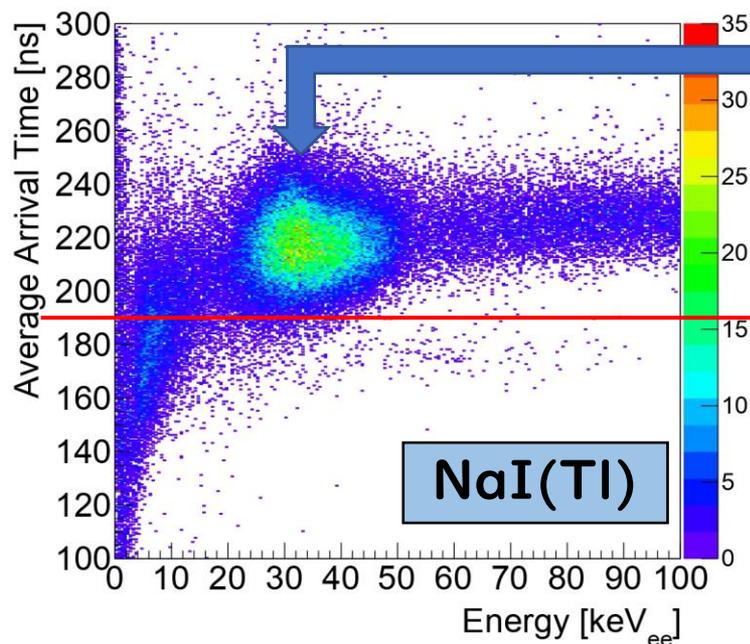
$$\langle t \rangle = \frac{\sum_{i=0}^{2047} t_i a_i}{\sum_{i=0}^{2047} a_i}$$

$a_i$  : Voltage [mV]

原子核反跳 : ~180 ns

$t_i$  : Time [ns]

電子反跳 : ~230 ns



放射化による<sup>128</sup>Iの  
特性 X 線 (31.8 keV)

γ線

原子核反跳

# LS の PSD 測定方法と結果

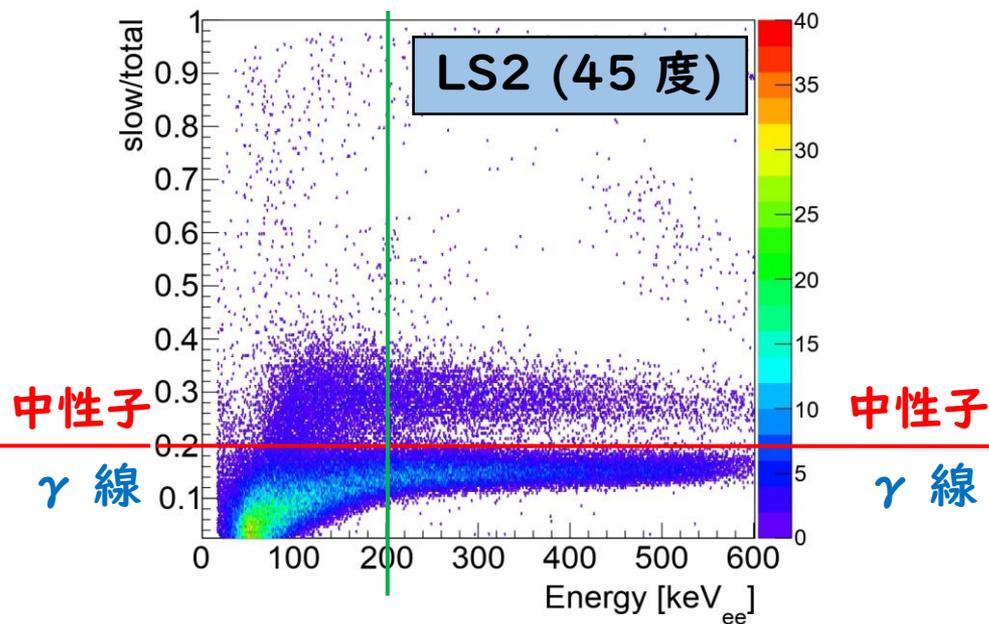
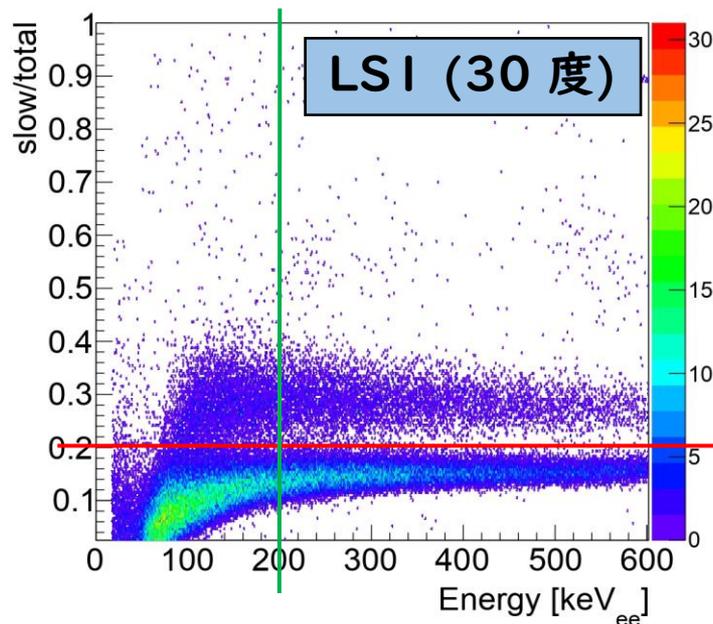
## 信号の減衰時間の違いを利用して波形弁別 (PSD)

シンチレーション光を以下のように設定

slow : 遅い成分を表す発光時間 30~350 ns における発光量

total : 0~350 ns における全発光量

slow/total の値で中性子と  $\gamma$  線イベントを弁別



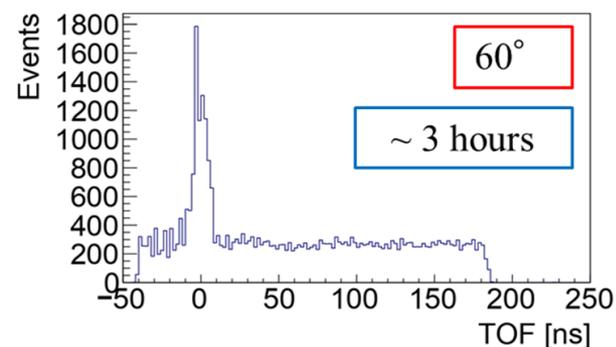
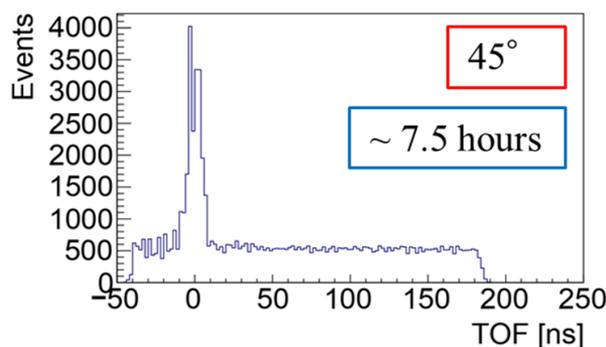
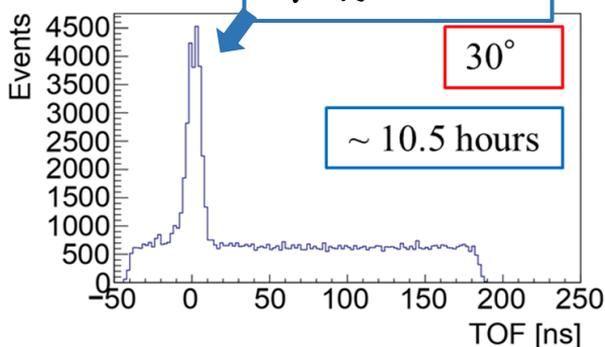
# TOF 測定

$$TOF = L \sqrt{\frac{m_n}{2E}} = fp_{LS} - fp_{NaI}$$

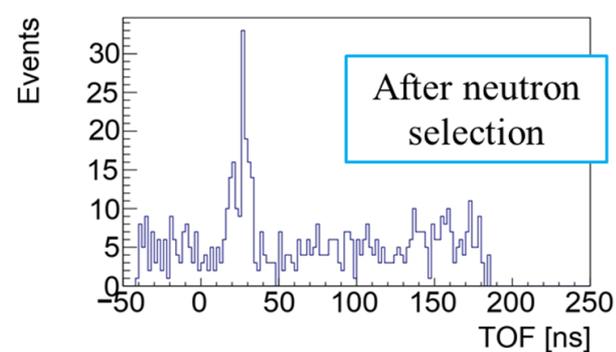
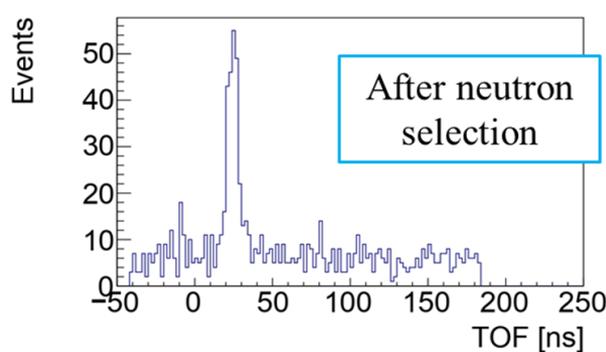
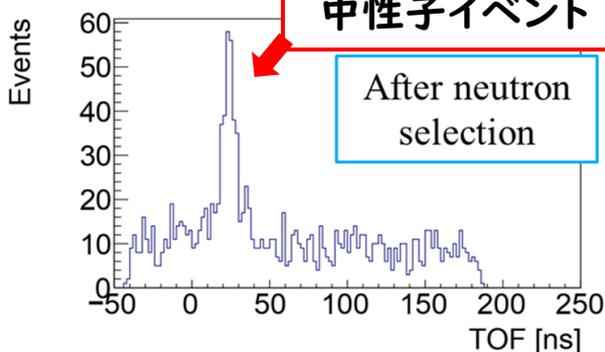
$fp_{NaI}$  : NaI(Tl)の信号開始時刻

$fp_{LS}$  : LSの信号開始時刻

$\gamma$  線イベント



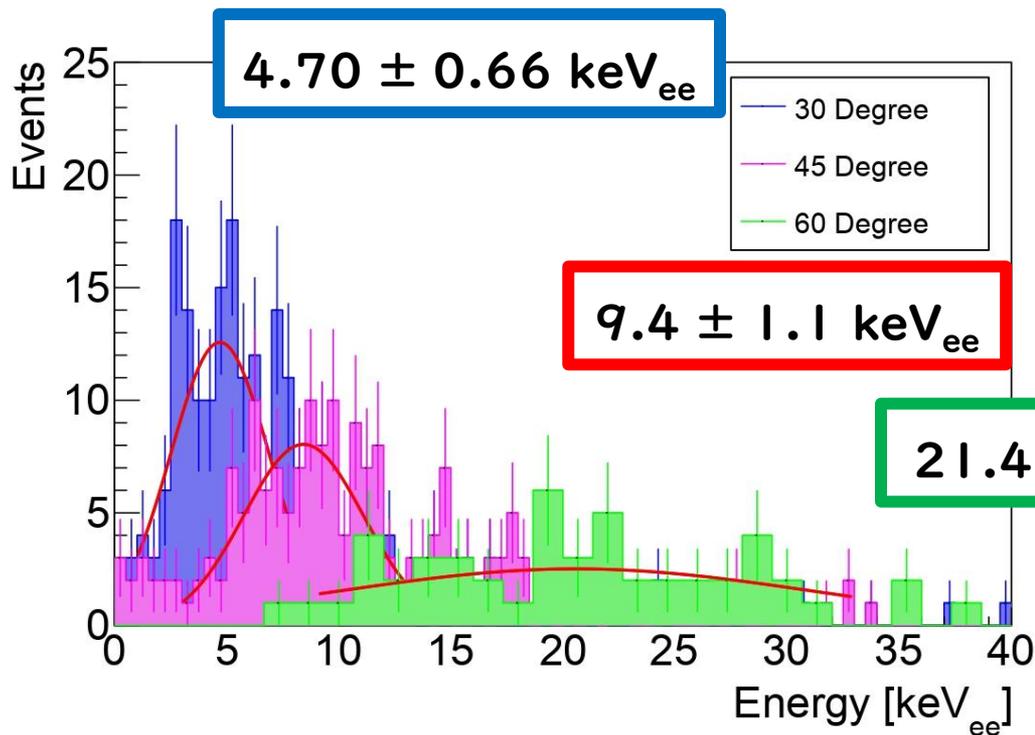
中性子イベント



23 ns @  $L = 50$  cm (中性子TOF)

# エネルギースペクトル

PSDとTOFカット後



散乱角に依存した  
エネルギースペクトル



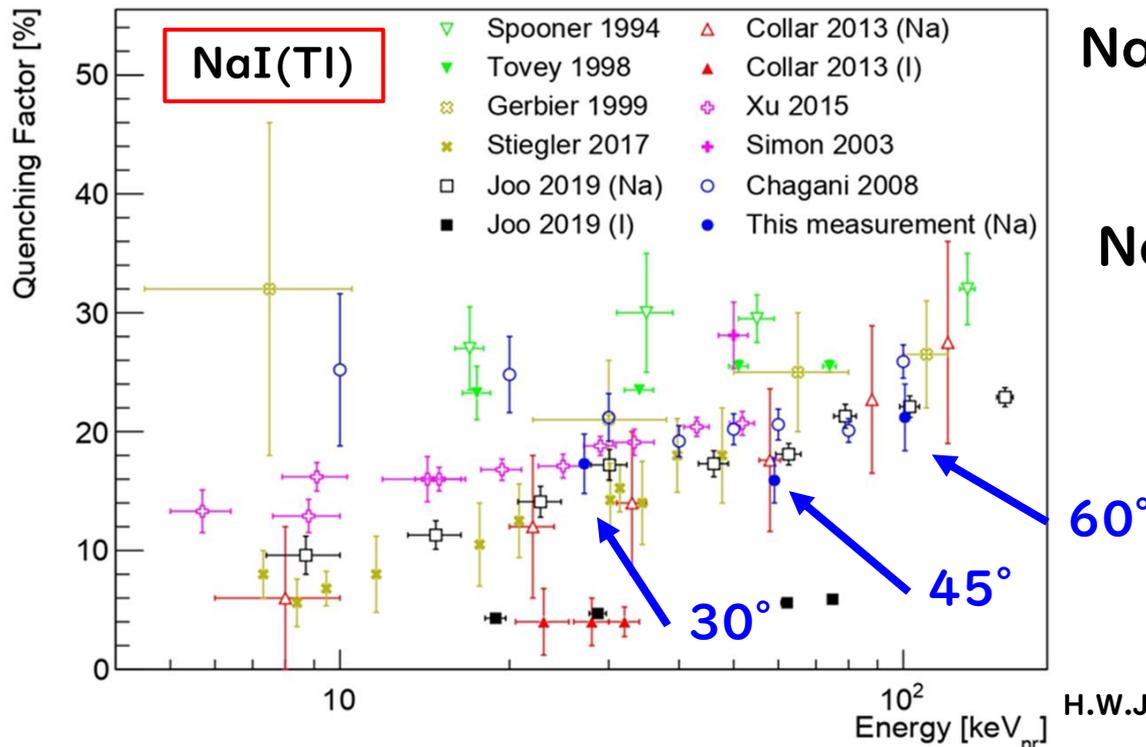
# 消光因子の結果と他グループとの比較

Degree	$E_{nr}$ (Na) [keV <sub>nr</sub> ]	QF <sub>Na</sub> [%]
30	27.15 ± 0.18	17.3 ± 2.5
45	59.05 ± 0.14	15.9 ± 1.9
60	100.7 ± 0.2	21.2 ± 1.8

$$QF = C_{nr} / C_{er} = E_{ee} / E_{nr}$$

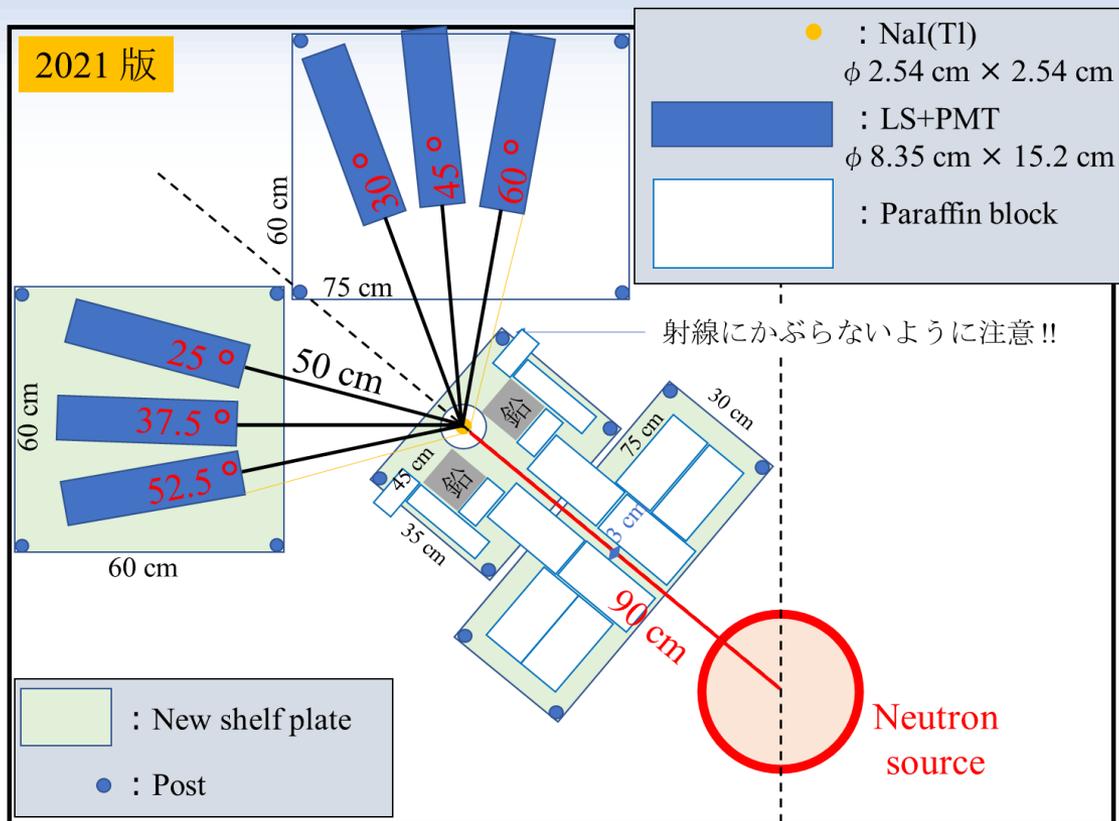
Geant4 を用いて各散乱角での  
反跳エネルギーを求め、  
Na の消光因子 QF<sub>Na</sub> を算出

Naの消光因子の算出に成功！



H.W.Joo et al., Astroparticle Physics 108 (2019) 50

# 来月予定の実験

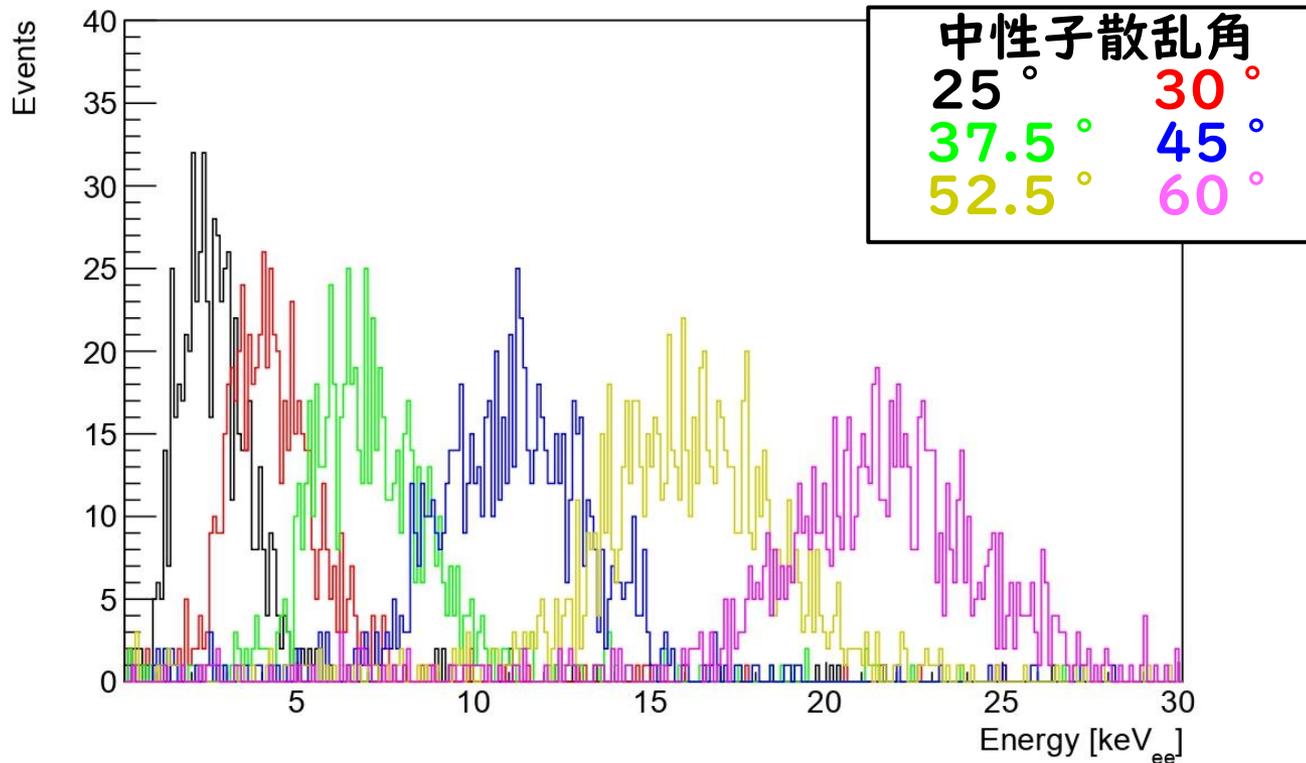


DRS4を2台連結  
→合計8chでデータ収集

LS1 : 30 deg.  
LS2 : 45 deg.  
LS3 : 60 deg.  
LS4 : 25 deg.  
LS5 : 37.5 deg.  
LS6 : 52.5 deg.

- ◆ 測定点を増やす (30, 45, 60度 + 25, 37.5, 52.5度)
- ◆ 散乱中性子・BG  $\gamma$ 線を減らす (パラフィンと鉛を追加)
- ◆ 測定時間をのばす

# 予想されるエネルギースペクトル



Geant4 simulation  
原子核反跳エネルギー ×  $QF_{Na}$  × エネルギー分解能

# まとめと今後の展望

- ◆ 宇宙暗黒物質探索用 NaI (TI) シンチレータの QF 測定のための単色中性子照射実験を行なった
- ◆ 個々に異なる可能性のある消光因子の測定に成功した
- ◆  $QF_{Na}$  のエネルギー依存性について、より多くのデータポイントで測定を検討
- ◆  $QF_{Na}$  の TI 濃度依存性(結晶の位置依存性)の測定や、 $QF_I$  を測定を検討

Proceedings of the 35th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses に投稿