

気液2相型Ar光検出器における 2次蛍光を用いた低質量暗黒物質探索

早稲田大学寄田研究室
(ANKOK Group)
木村 真人

2019/02/19
25th ICEPP Symposium



WASEDA University

WIMP暗黒物質直接探索

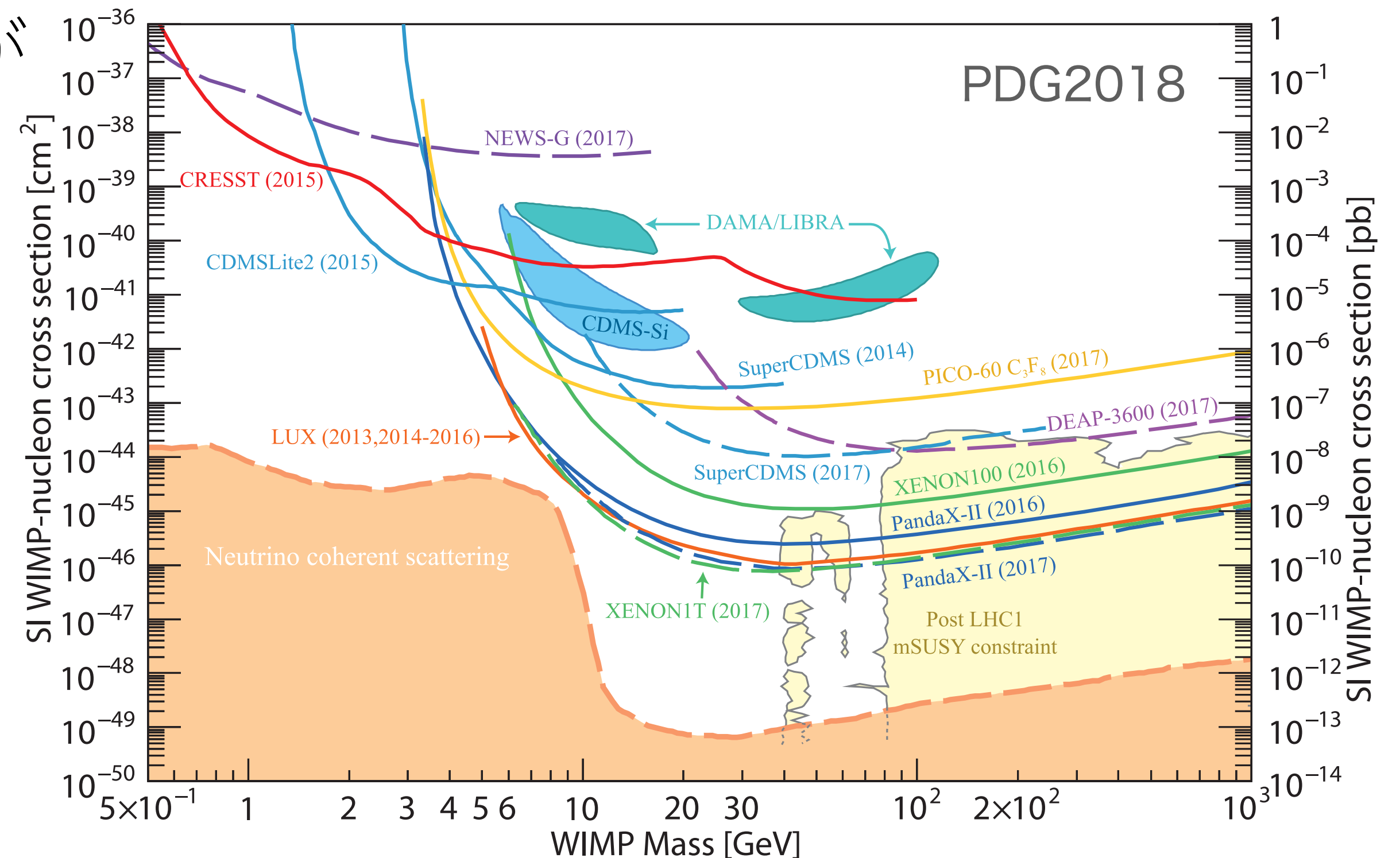
: 様々な検出器を用いたWIMP直接探索が世界各地で行われている。

- 液体/気体希ガス検出器 (Xe, Ar, Ne)
- 個体シンチレータ (NaI, CsI)
- 半導体検出器 (Ge, Si)
- Directional Sensitive...

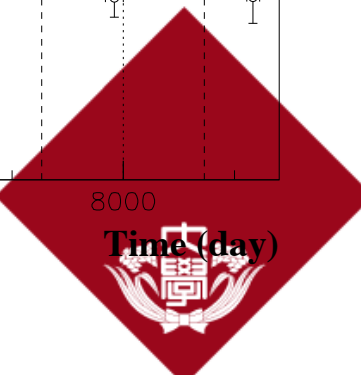
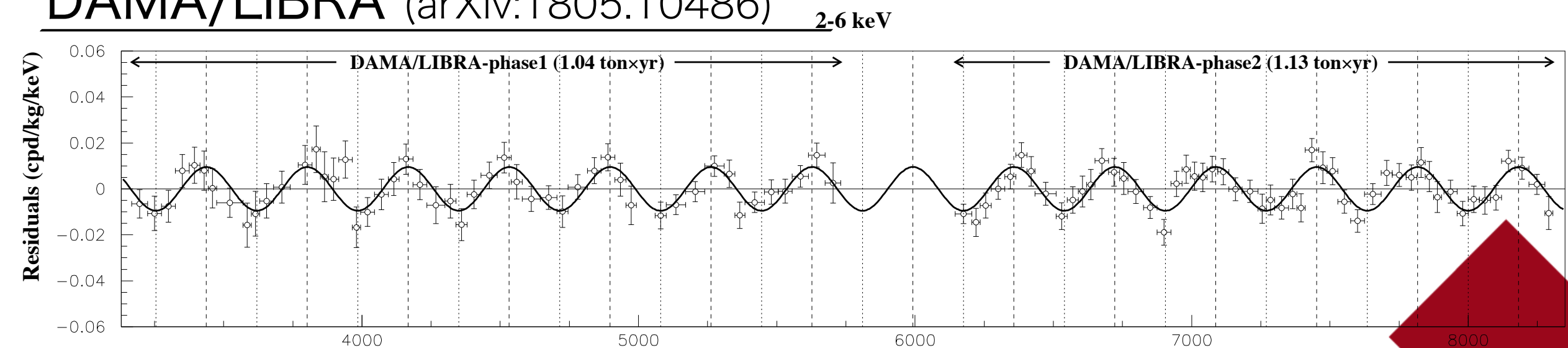
: 確たる発見証拠はない。

- DAMAによる20年間にわたる季節変動観測 @ $\sim 10 \text{ GeV}/c^2$??

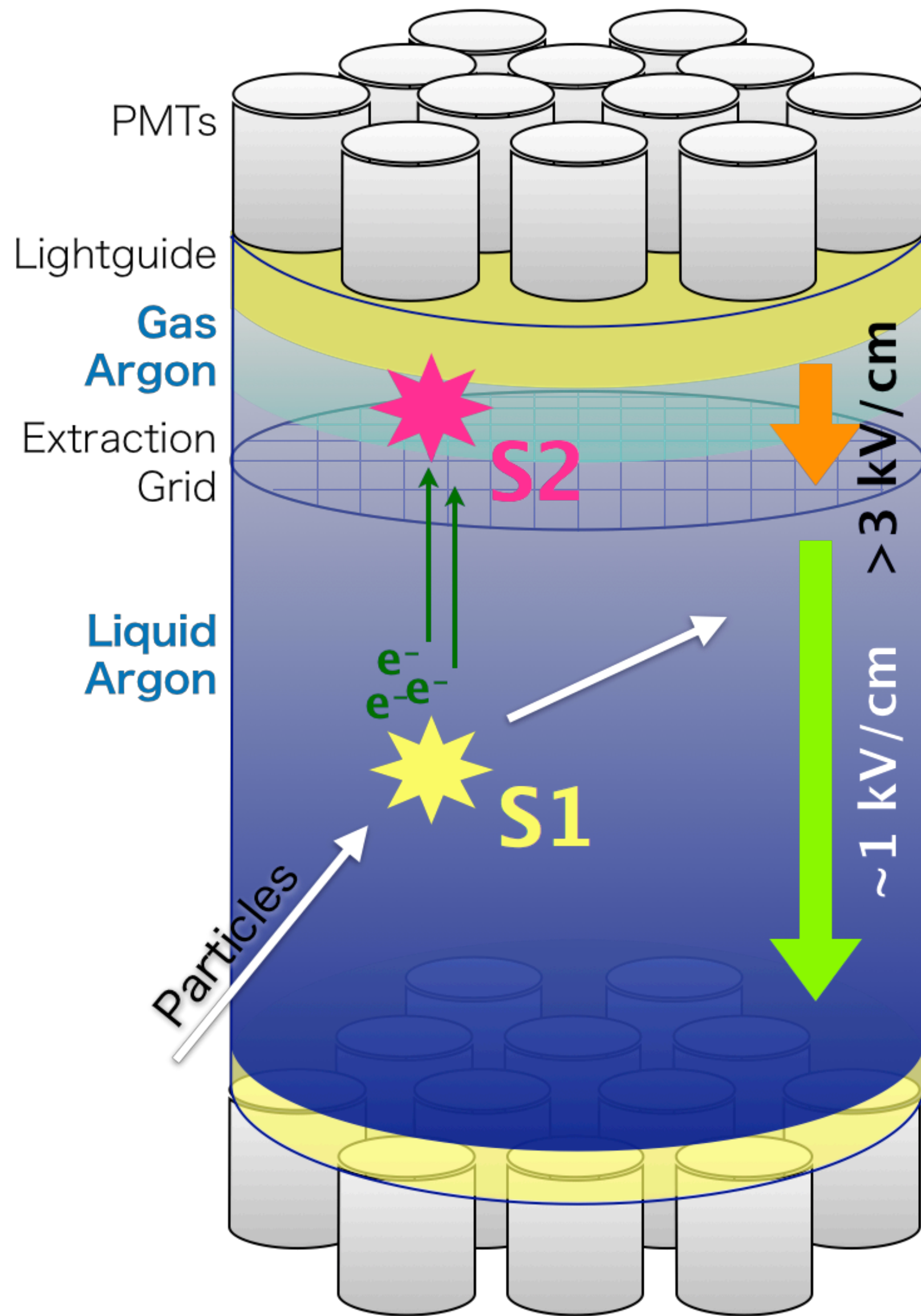
: 多手法・多媒質による探索が重要。



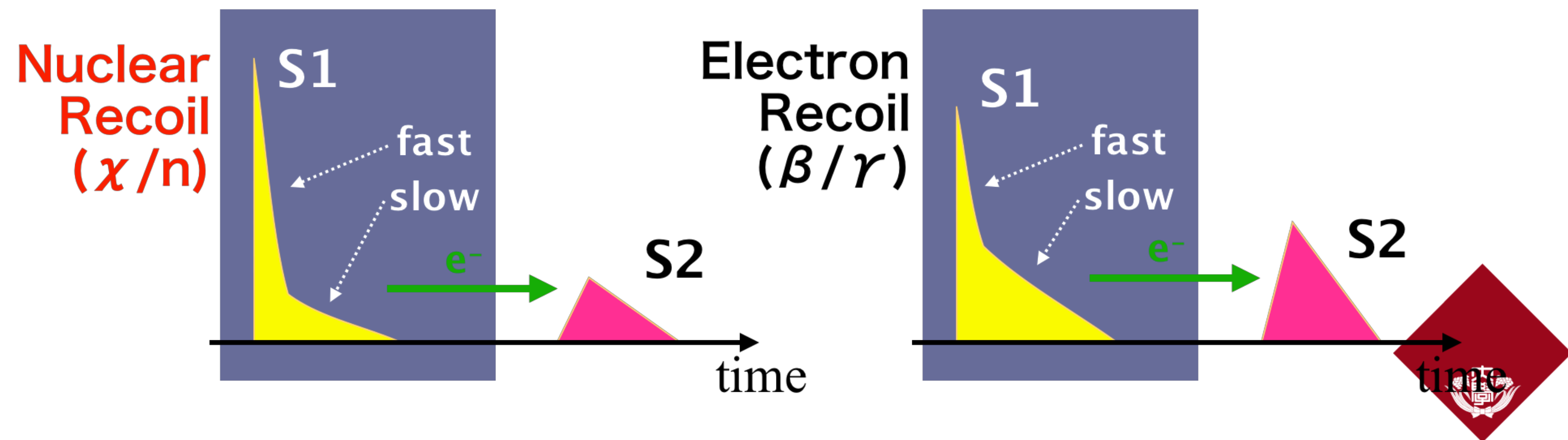
DAMA/LIBRA (arXiv:1805.10486)



気液2相型Ar光検出器

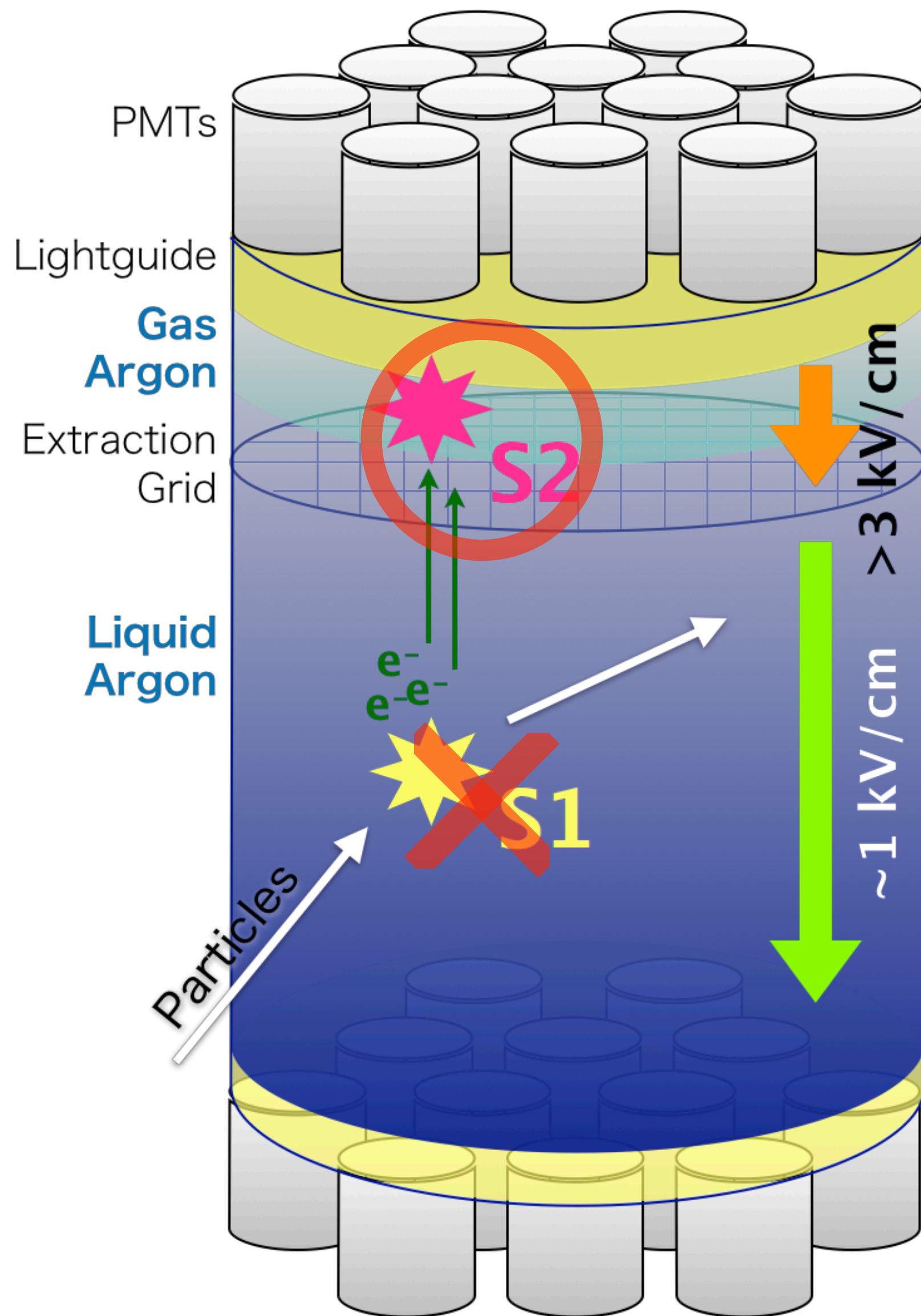


- : 液体アルゴン + 気体アルゴン， 内部に一様電場印加。
- : 2つのシンチレーション光 (S1@液相, S2@気相) を観測。
- : S1とS2の時間差による鉛直方向同定 (TPC), 気相側光検出器のS2観測光量を用いた水平方向同定。
- : PSD (S1シンチレーション波形) \otimes S2/S1 (電離蛍光比) による強力な粒子識別能力。



気液2相型Ar光検出器

4



- : 液体アルゴン + 気体アルゴン，内部に一様電場印加。
- : 2つのシンチレーション光 (**S1**@液相, **S2**@気相) を観測。
- : S1とS2の時間差による鉛直方向同定 (TPC), 気相側光検出器のS2観測光量を用いた水平方向同定。
- : PSD (S1シンチレーション波形) \otimes S2/S1 (電離蛍光比) による強力な粒子識別能力。
- : **S2 ($\mathcal{O}(10)$ p.e./e⁻)** により極小電離信号 ($\sim 1e^-$) に有感。
 - ▶ 1-photon : Detection efficiency $\lesssim 25\%$
(光収集効率に制限される)
 - ▶ 1-electron : Detection efficiency $\sim 100\%$
(~ 10 photon以上のS2に変換される)



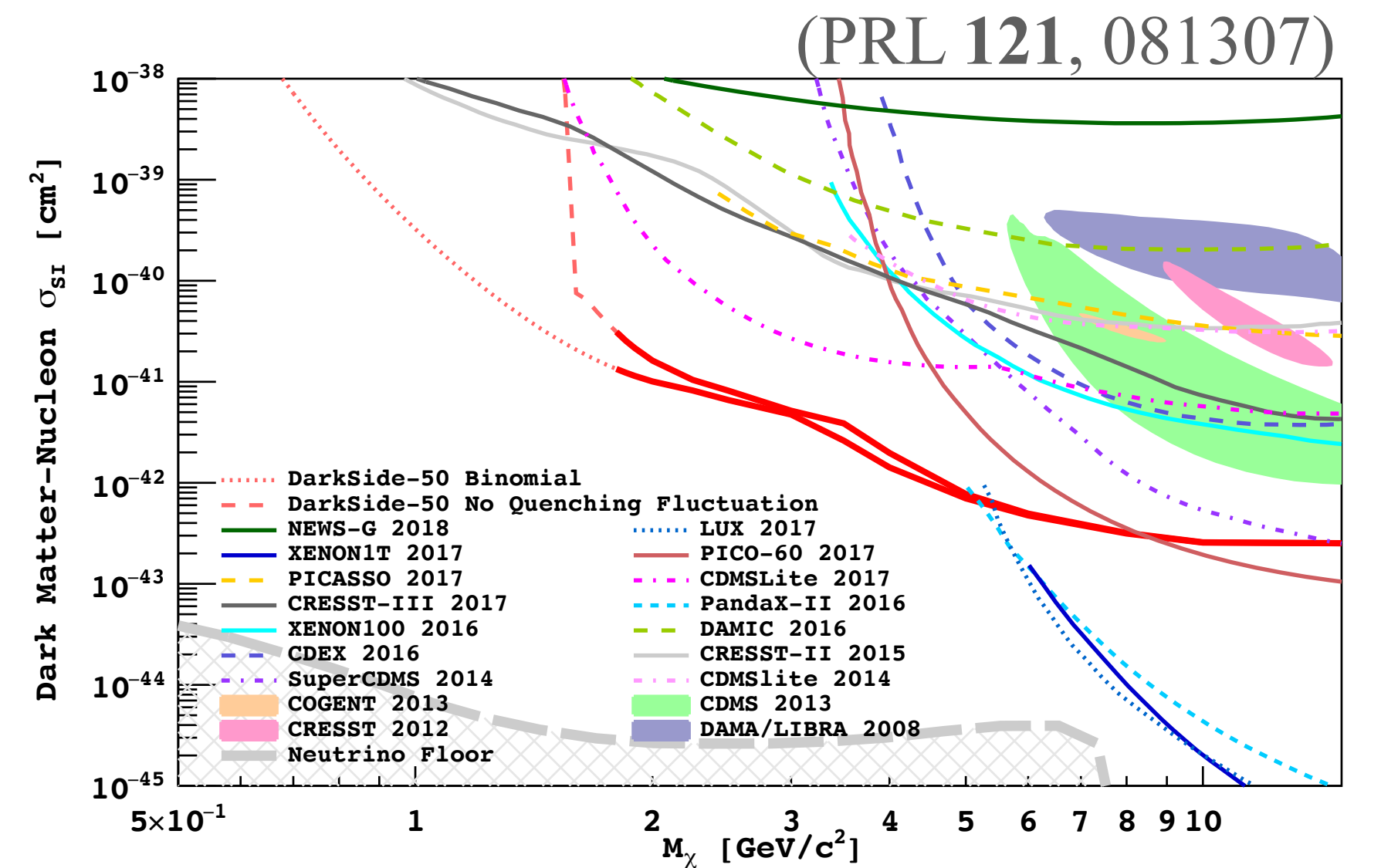
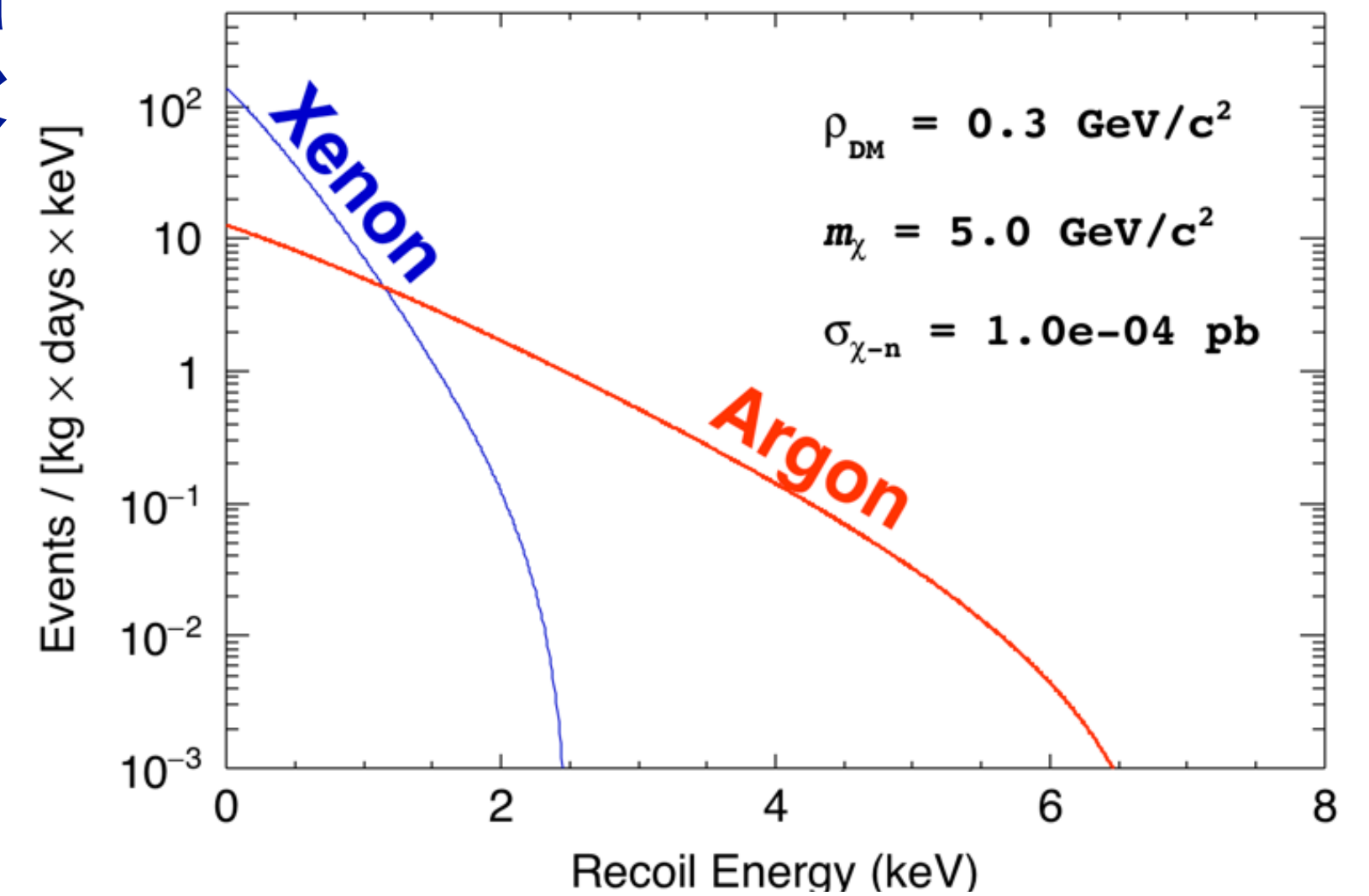
S2によるWIMP探索

: アルゴンは比較的軽い元素 ($Z = 18$)
 → 液体アルゴンTPC (LAr-TPC) は, **S2の活用により**
低質量暗黒物質探索に強力な検出器になる。

: DarkSide-50実験による探索結果 ('18/09)

- Energy Threshold ≈ 1 keV_{nr},
- 1.8 GeV/c² @ 2×10^{-41} cm² を棄却。

→ Arが持つ低質量DMへのポテンシャルを実証。
 (特にCalibrationに関して不定性も大きい)



— ANKOK —
 ArによるLow Mass ($\sim \text{GeV}/c^2$) WIMP直接探索を目指す



ANKOK Group

Waseda Univ.
staff : 2
D : 1
M : 3
B4 : 3

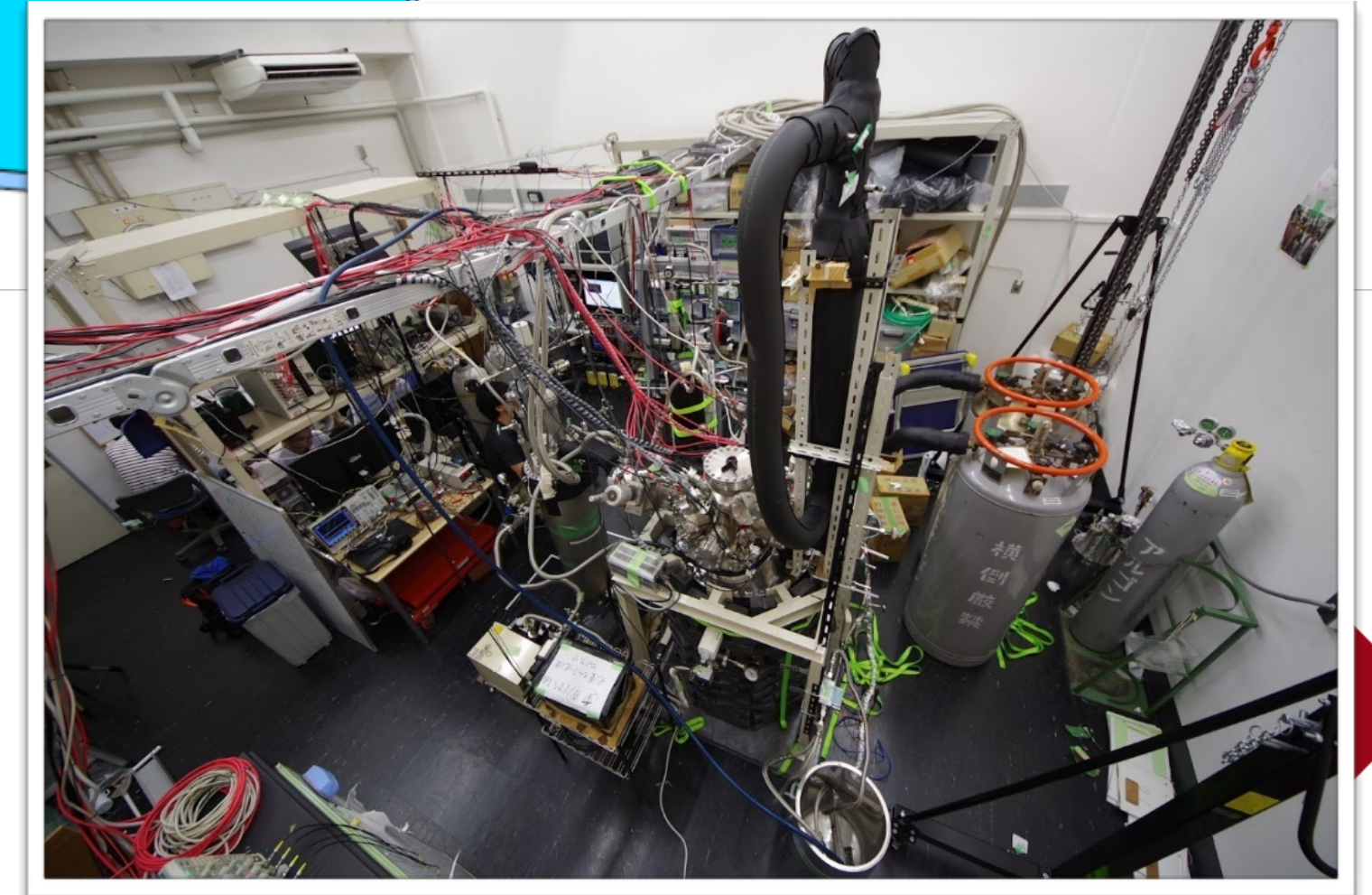
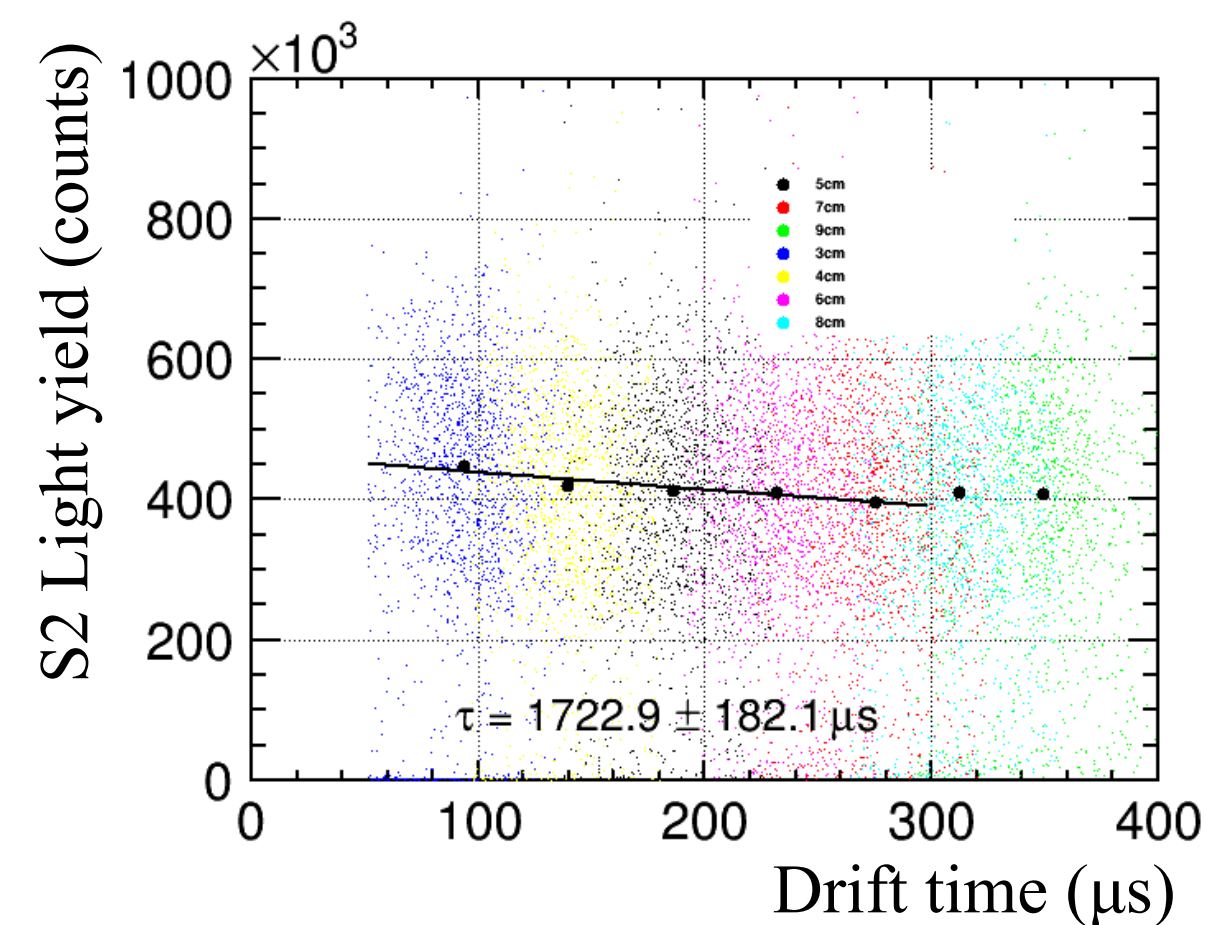
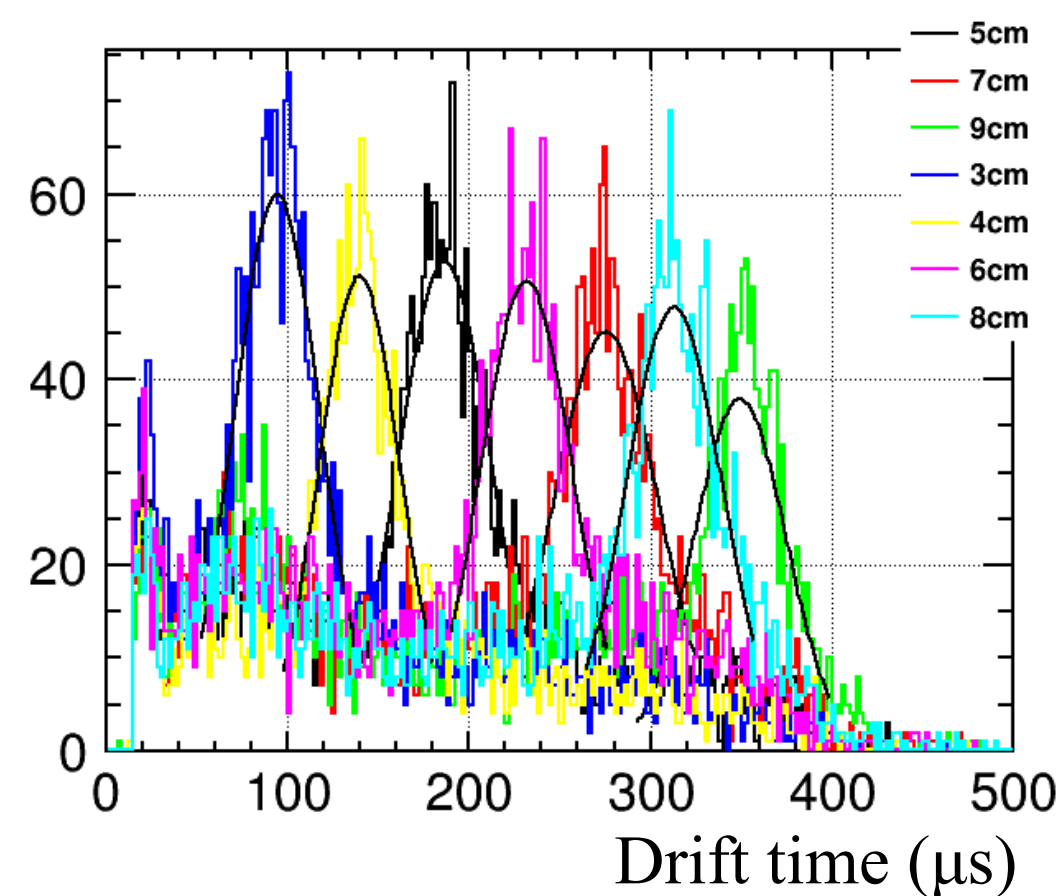
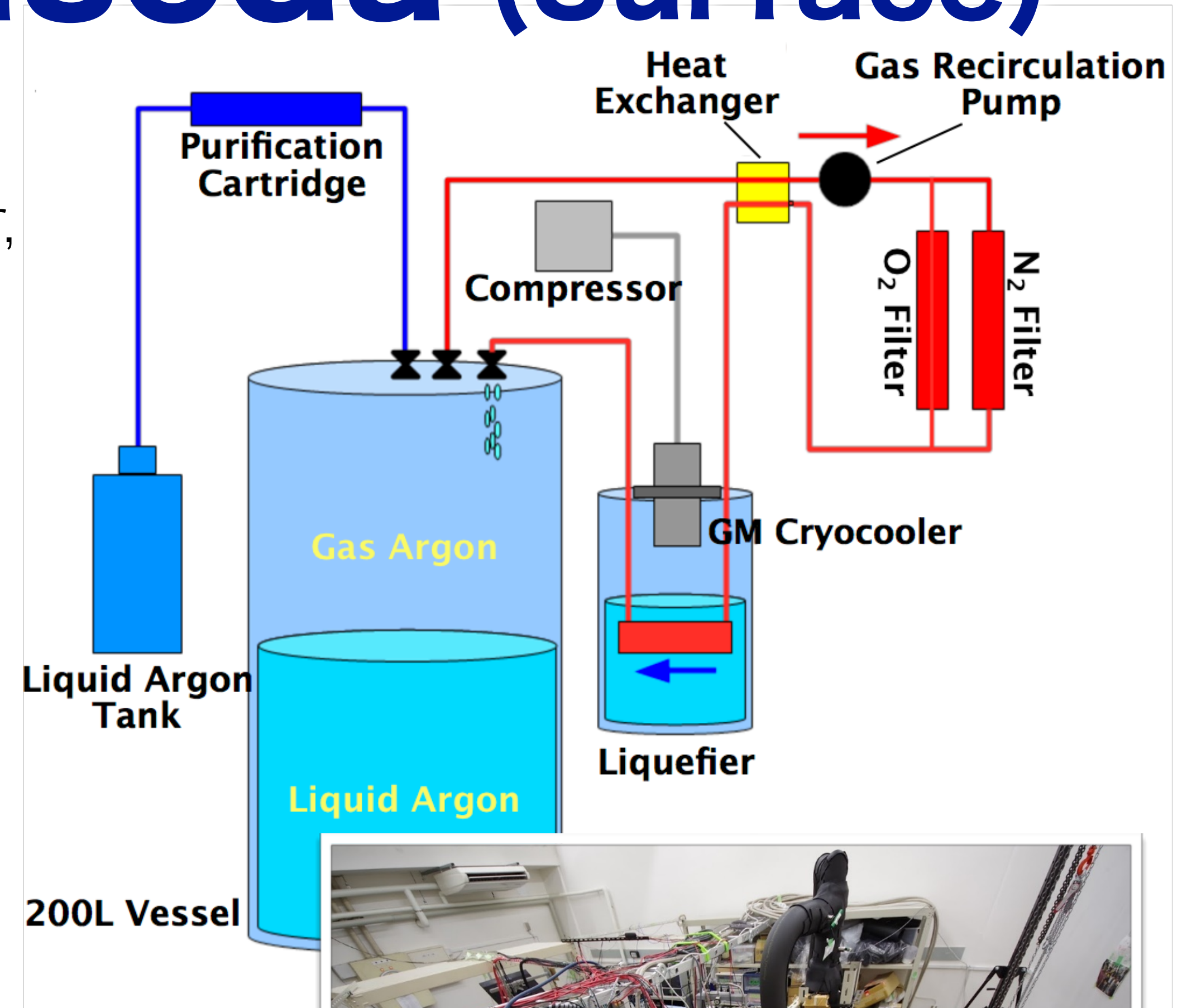


Test stand at Waseda (Surface)

- : 200L cryostat and liquefier,
- : Liquid argon (LAr) filling through cryogenic filter,
- : Gas argon (GAr) recirculation and liquefaction.

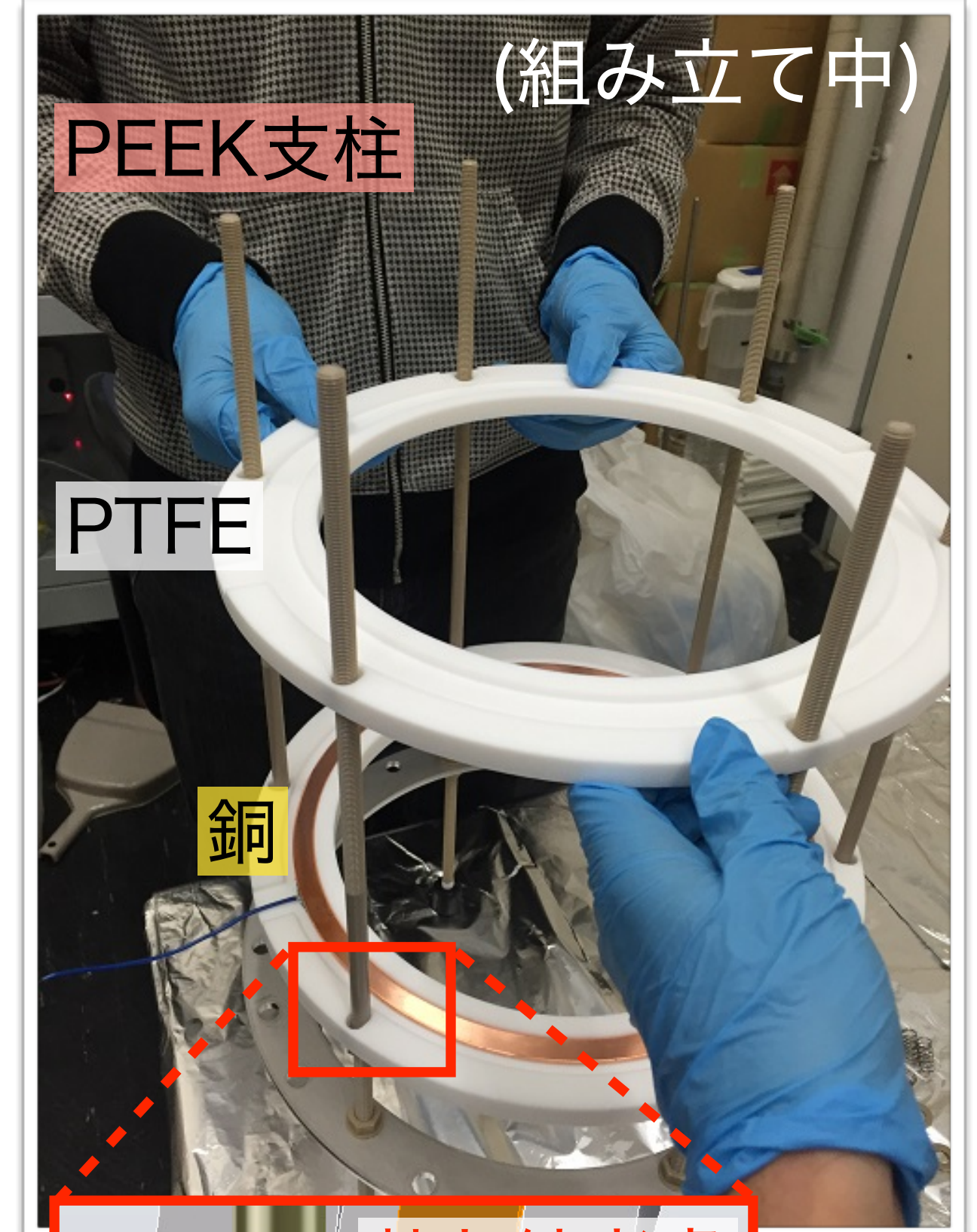
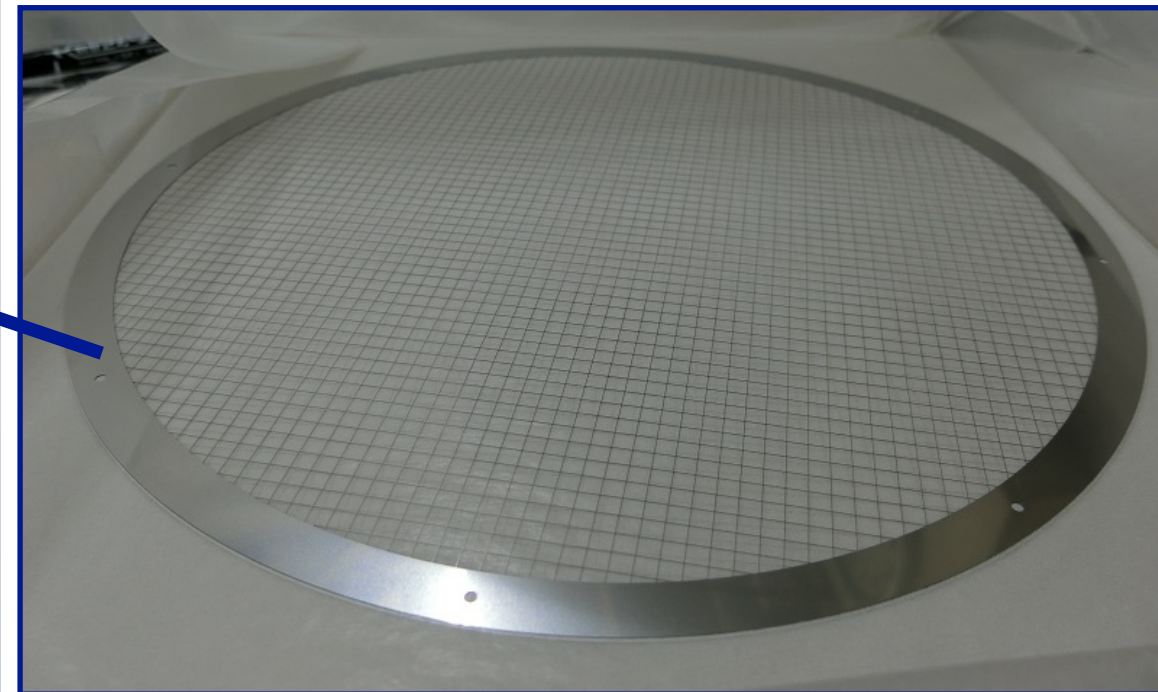
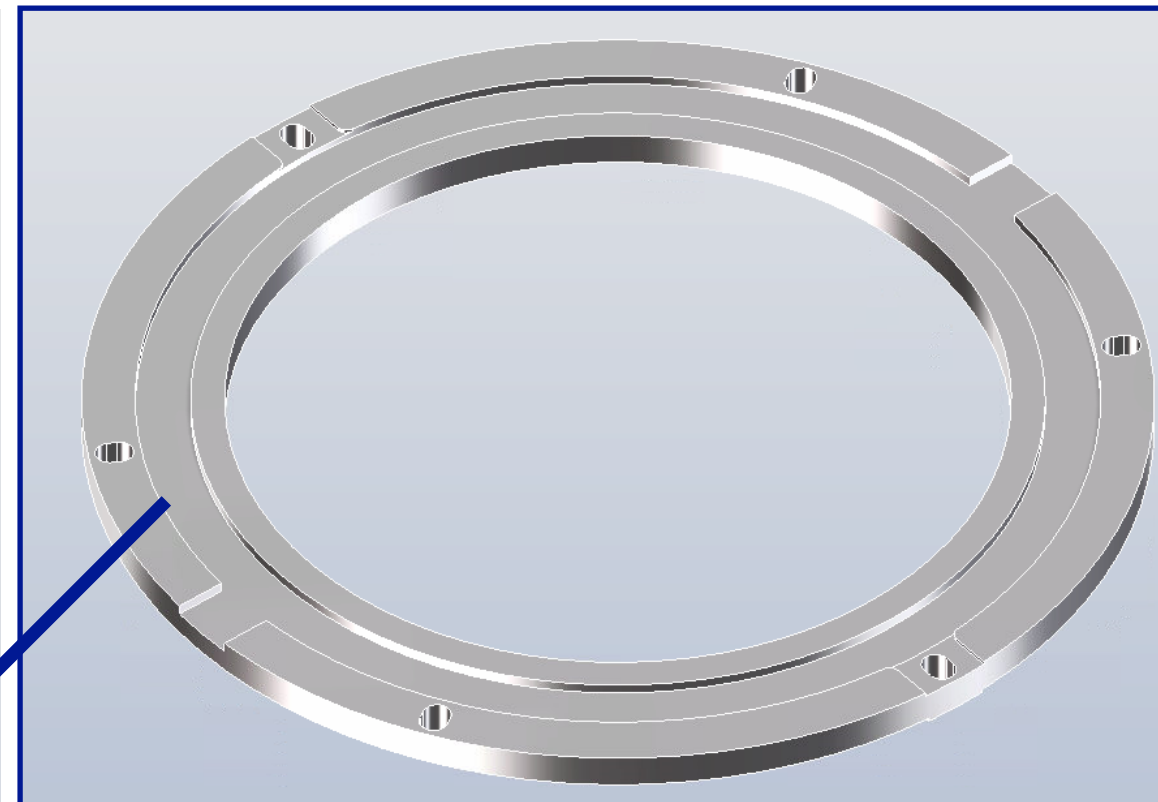
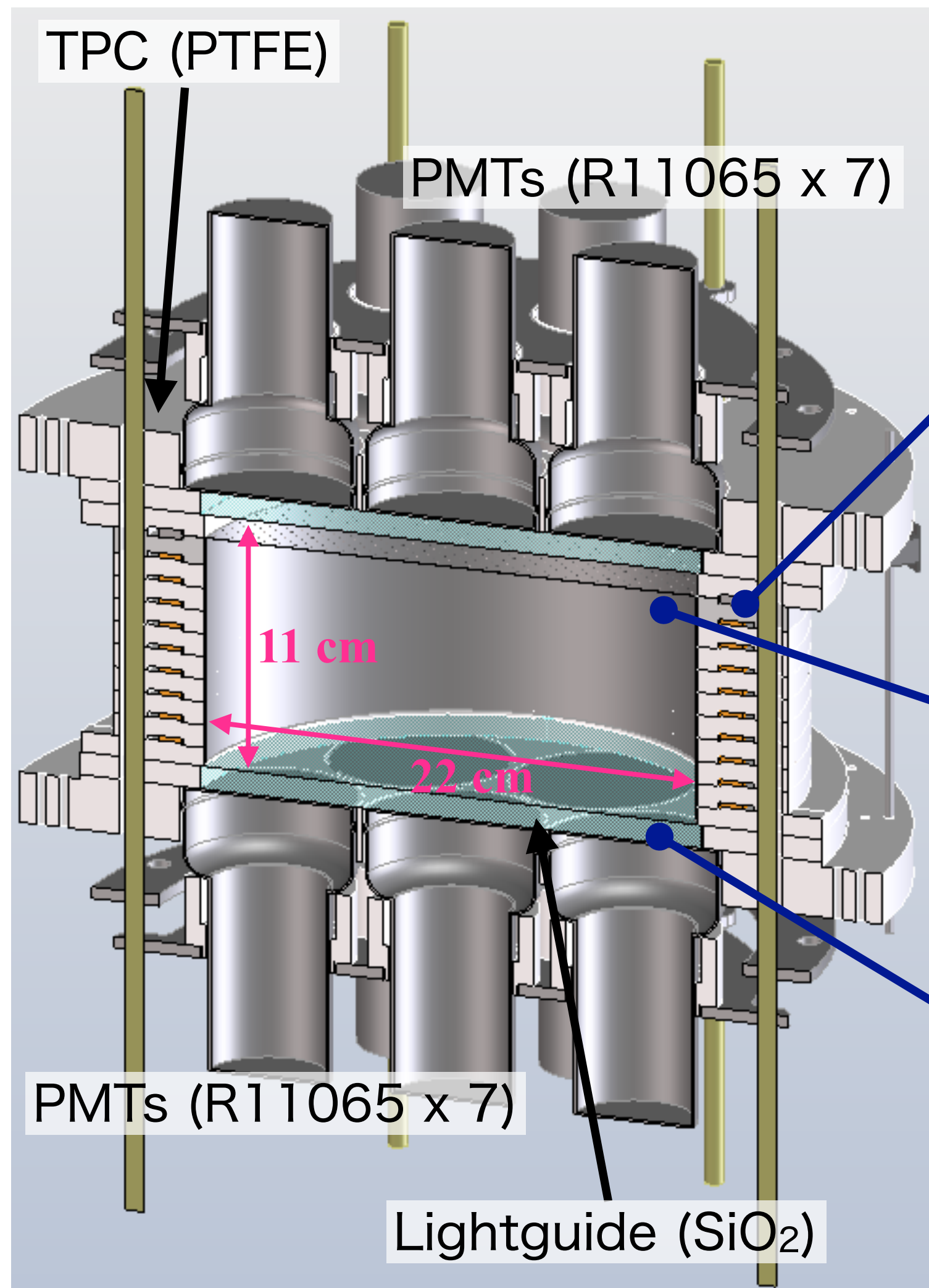
We achieved :

- ~1 month of **stable operation**,
 - 0.5 mm **liquid surface control**,
 - **Contamination removal** from LAr.
- (Electron lifetime $\tau \sim 1.5$ ms).



ANKOK Detector

- : Fiducial Mass = 5 kg
- $\phi 22$ cm x h10 cm (+ 取り出し1 cm)
- : Total 14ch PMTs (3-inch)

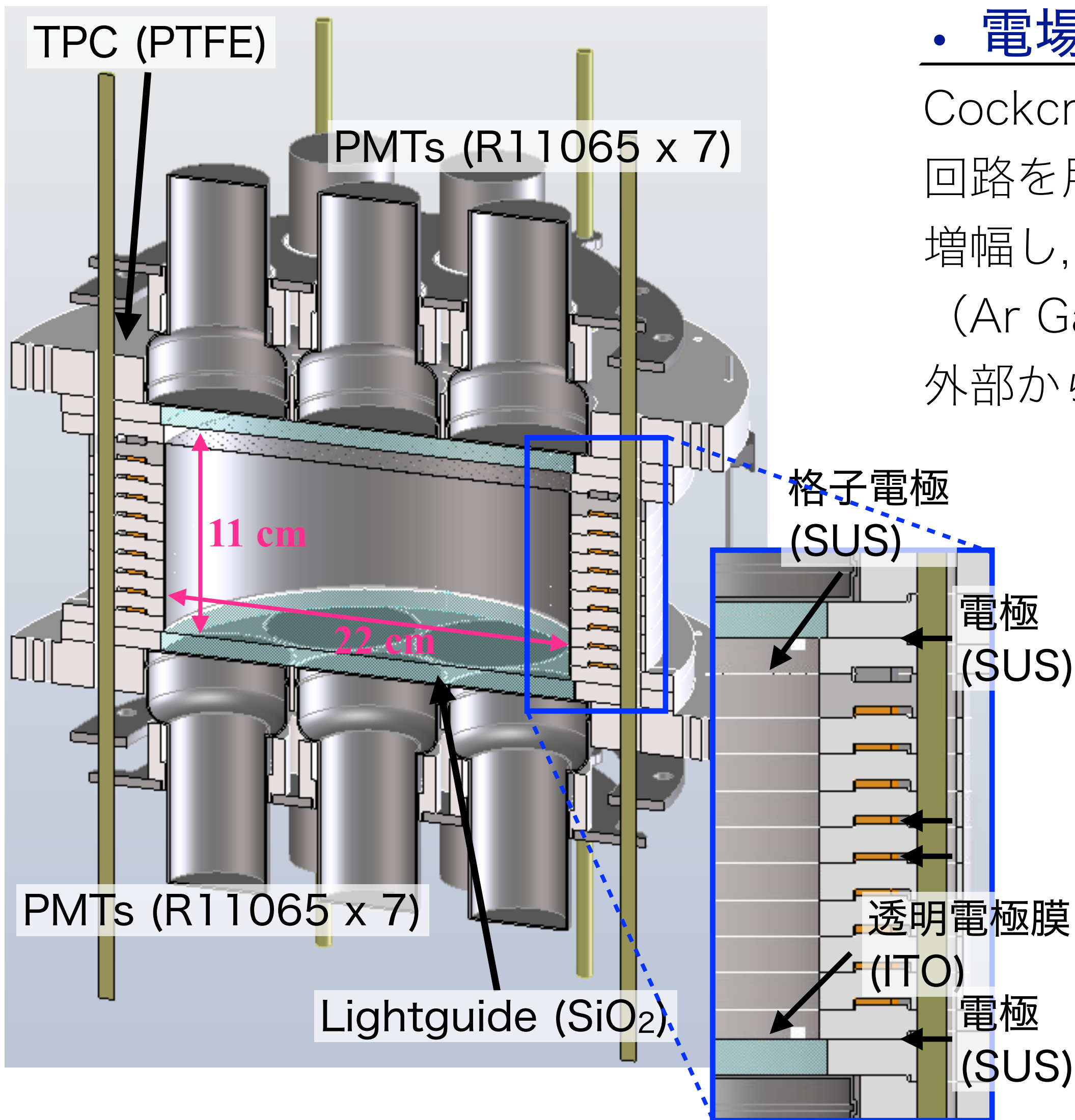
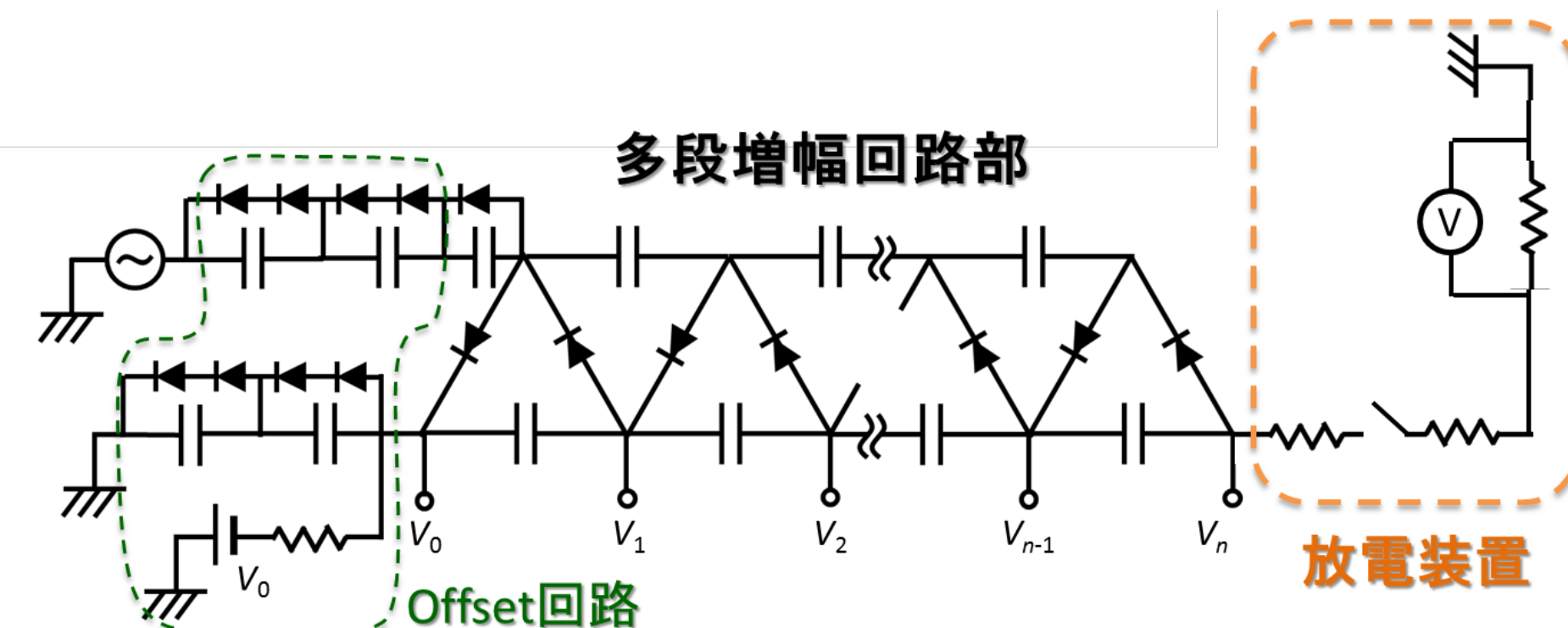


ANKOK Detector

- : Fiducial Mass = 5 kg
- $\phi 22 \text{ cm} \times h 10 \text{ cm}$ (+ 取り出し 1 cm)
- : Total 14ch PMTs (3-inch)

電場印加

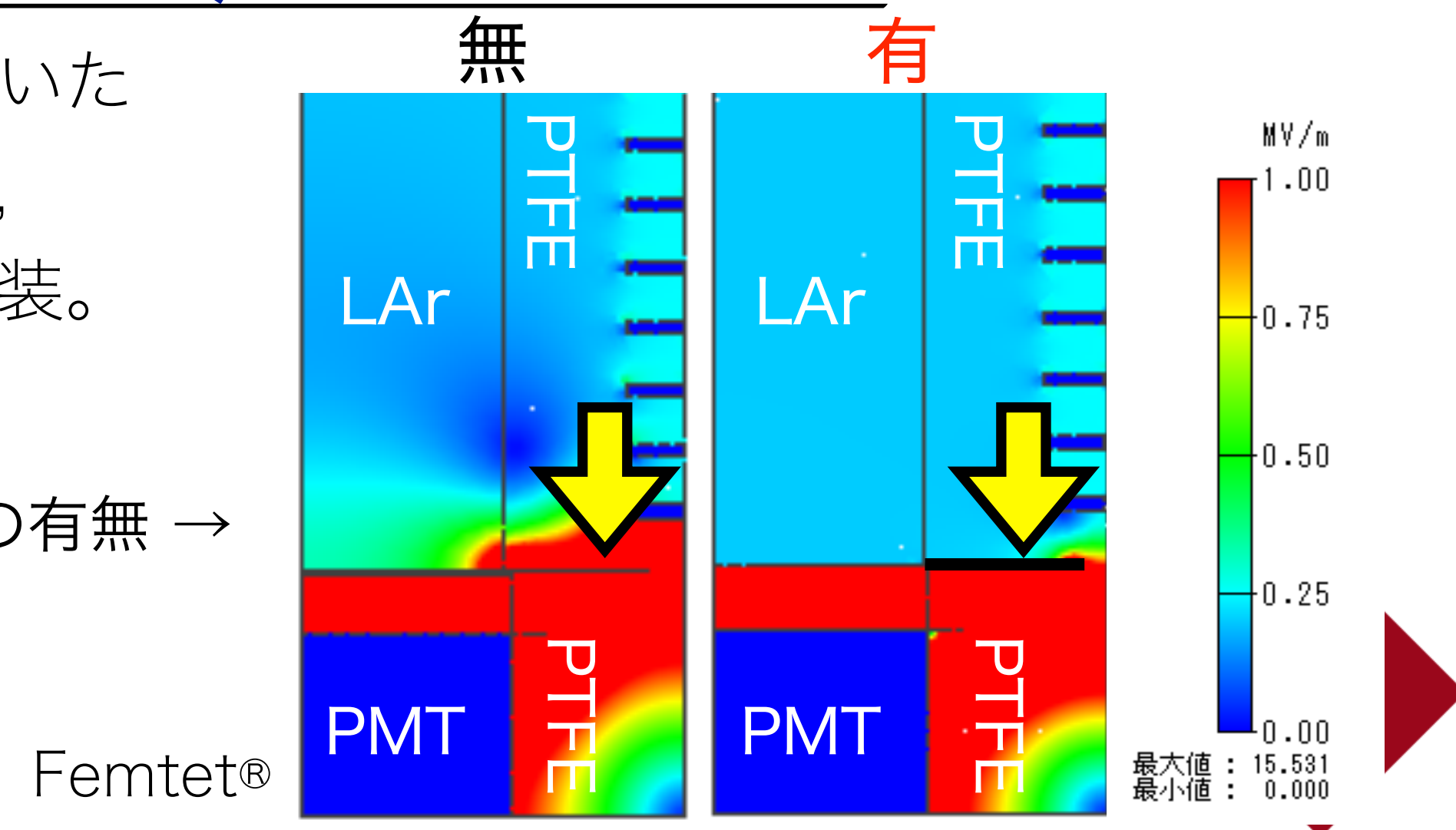
Cockcroft-Watson (CW) 回路を用いて電圧を液中増幅し、電極へ印加。
(Ar Gasは放電しやすく、外部からの導入は困難。)



電場形成 (一様性)

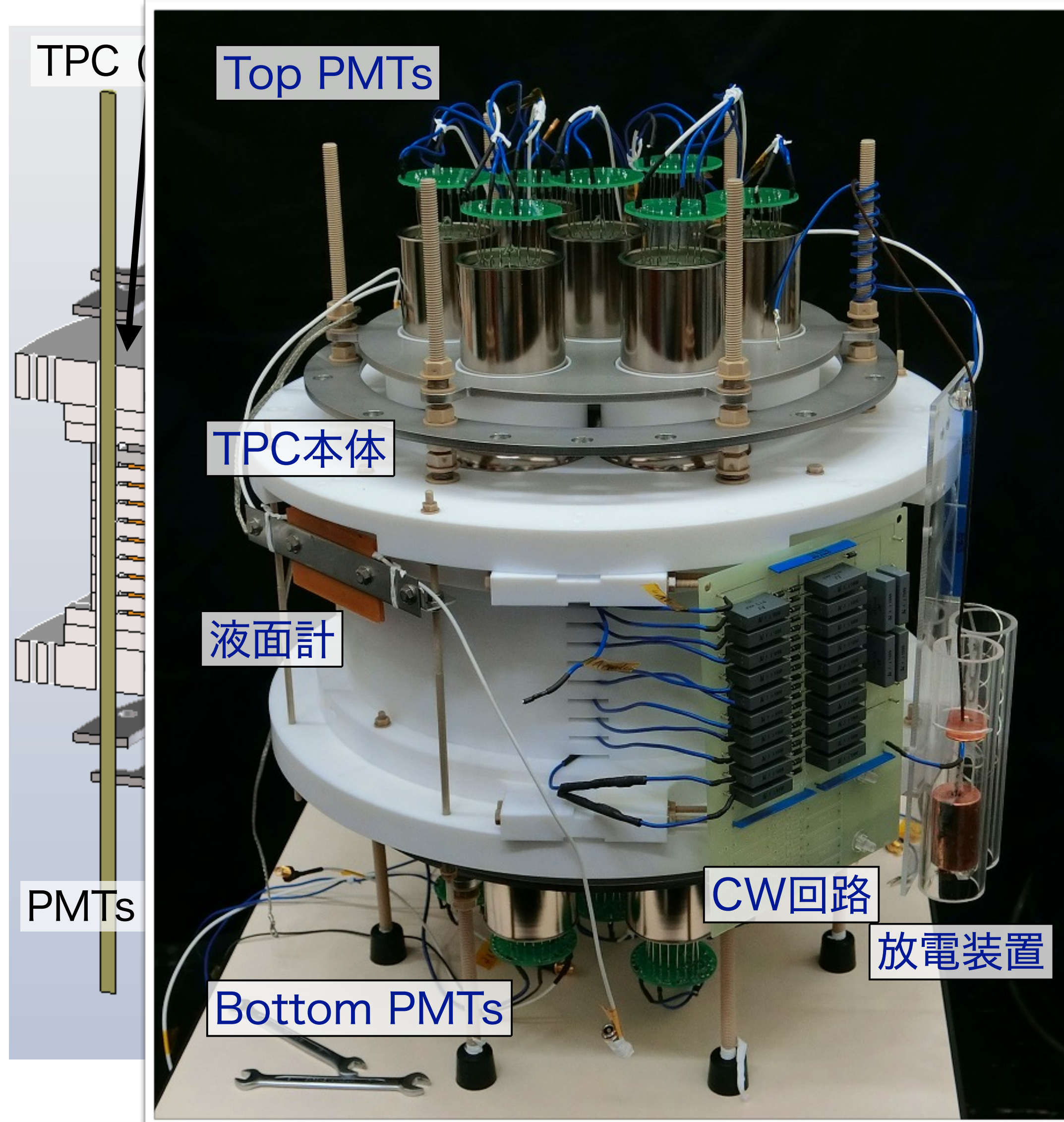
有限要素法を用いた電場計算を行い、各所に電極を実装。

ex. “リング電極”の有無 →



ANKOK Detector

: Fiducial Mass = 5 kg
 - $\phi 22 \text{ cm} \times h10 \text{ cm}$ (+ 取り出し1 cm)
 : Total 14ch PMTs (3-inch)

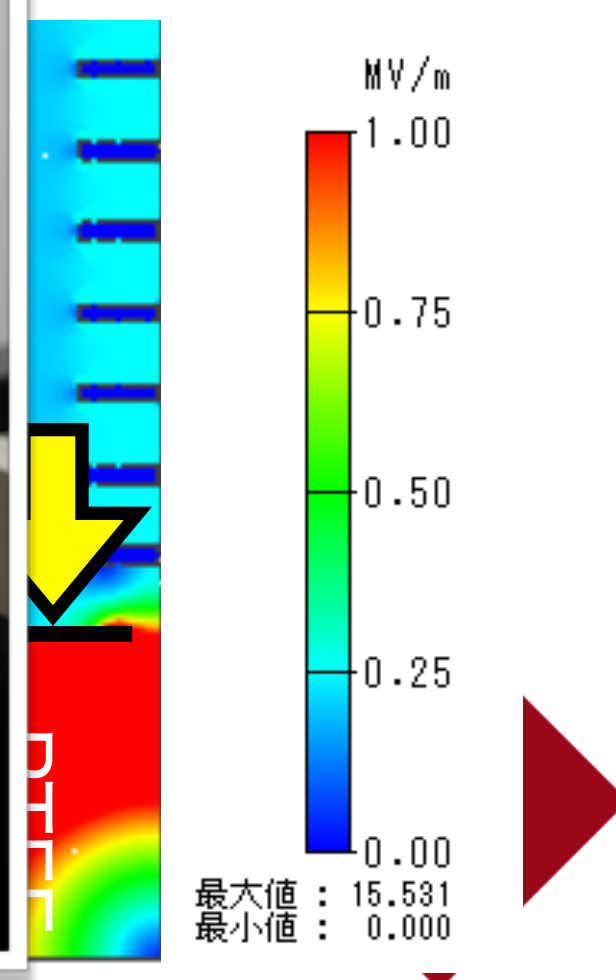
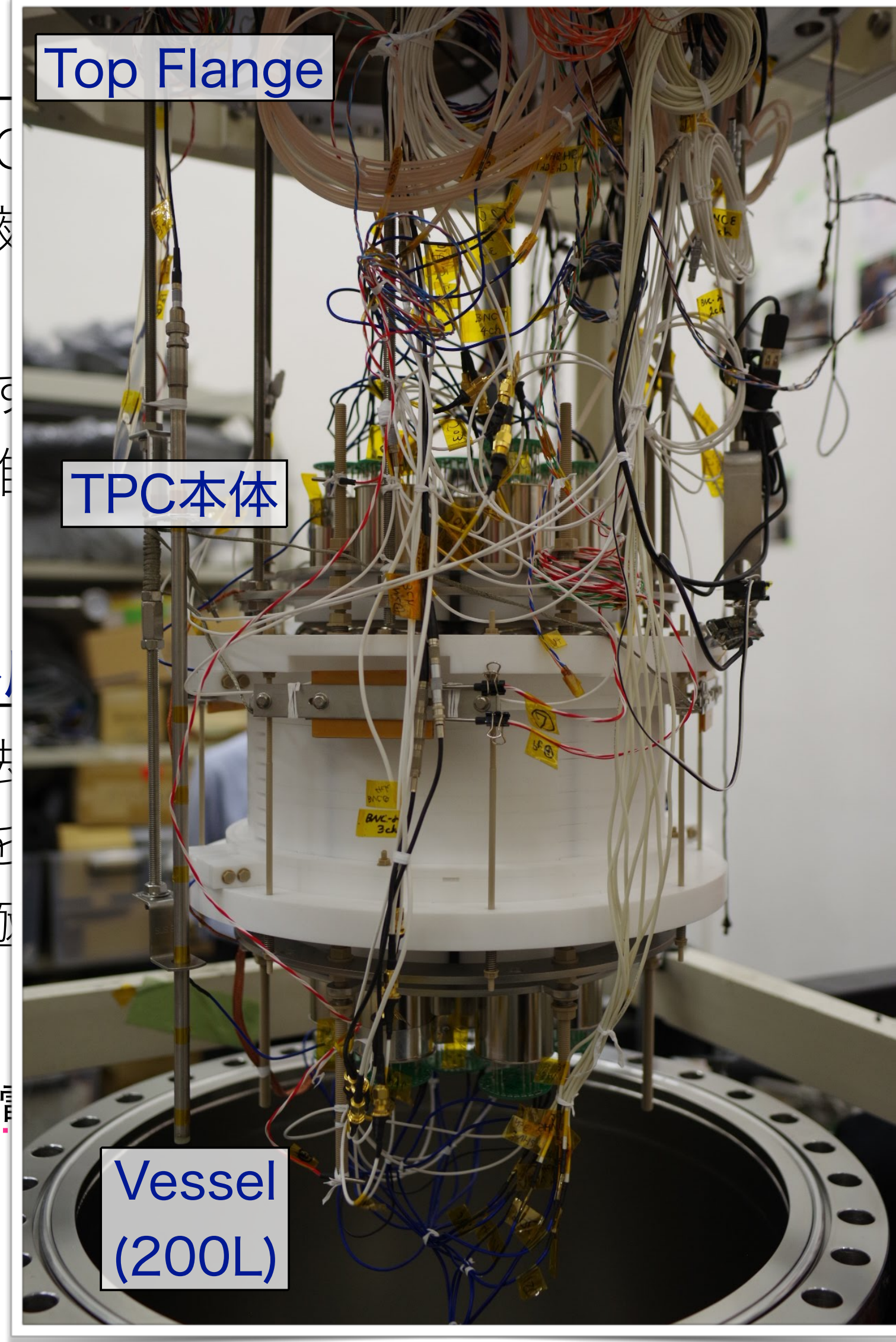


印加
 について電圧を液
 電極へ印加。
 sは放電しやす
 の導入は困難

電場形

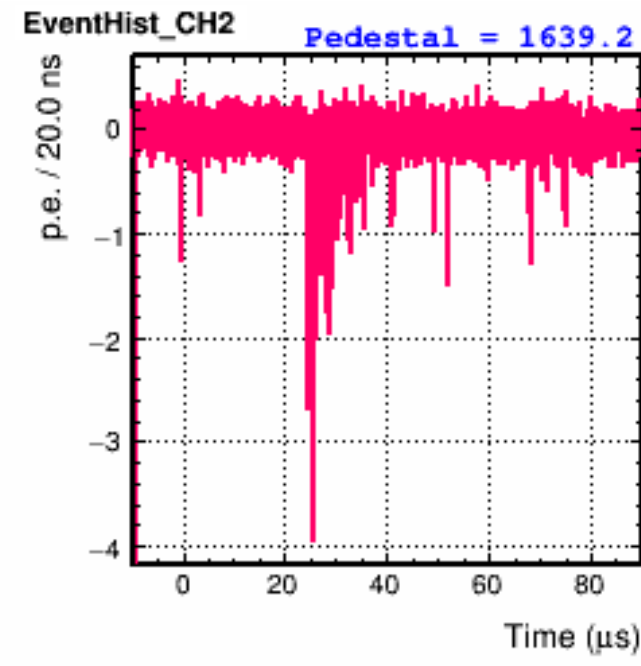
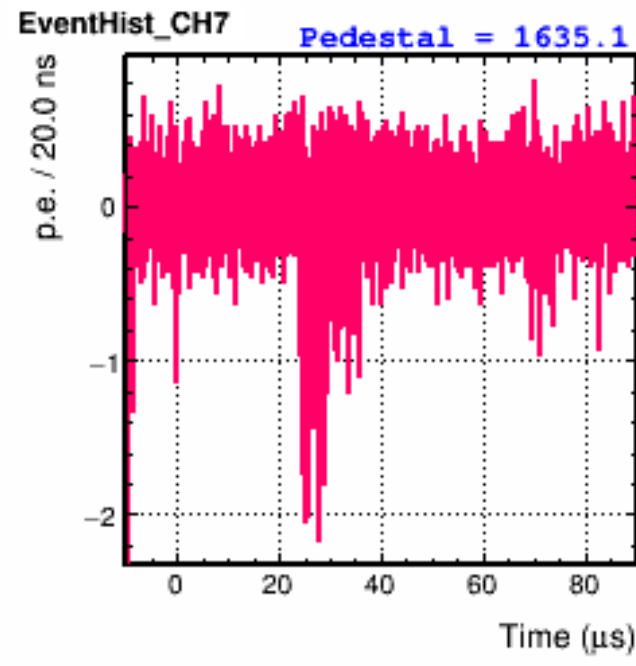
有限要素法
 電場計算を
 各所に電極

ex. “リング電

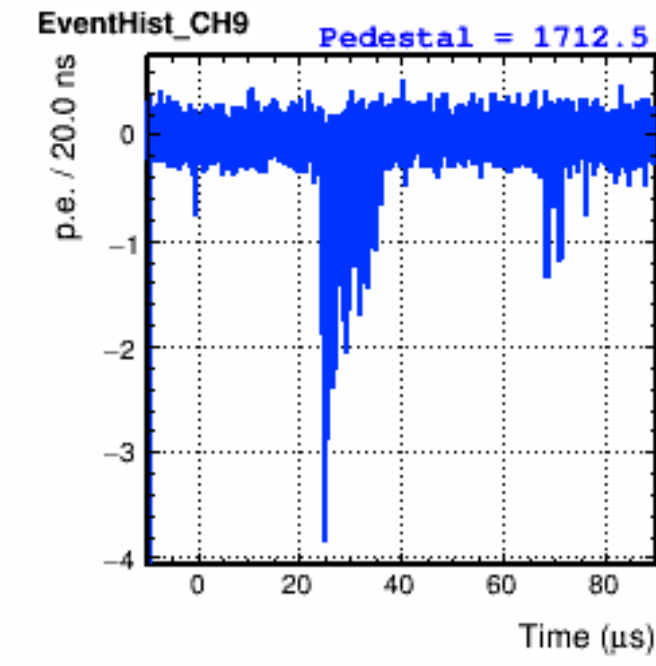
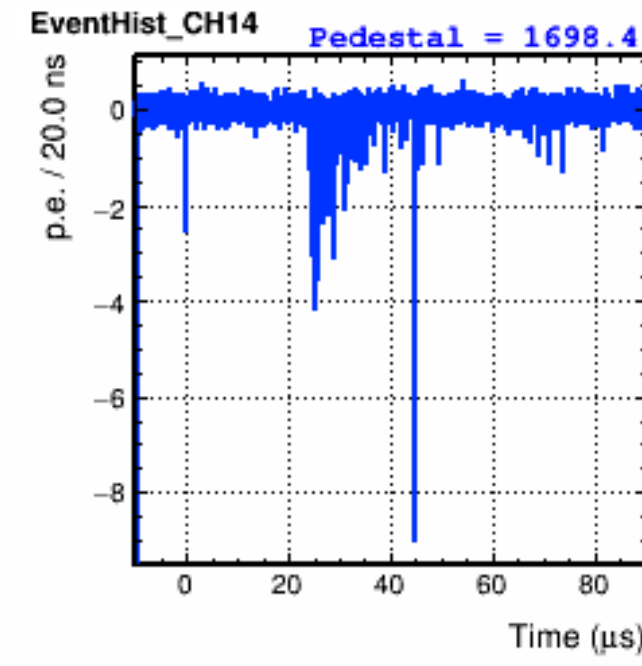


Event Display (S1 & S2)

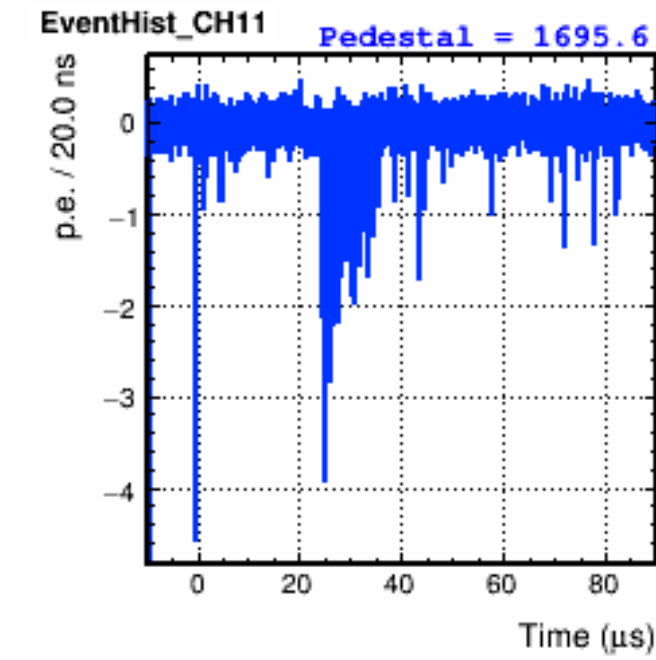
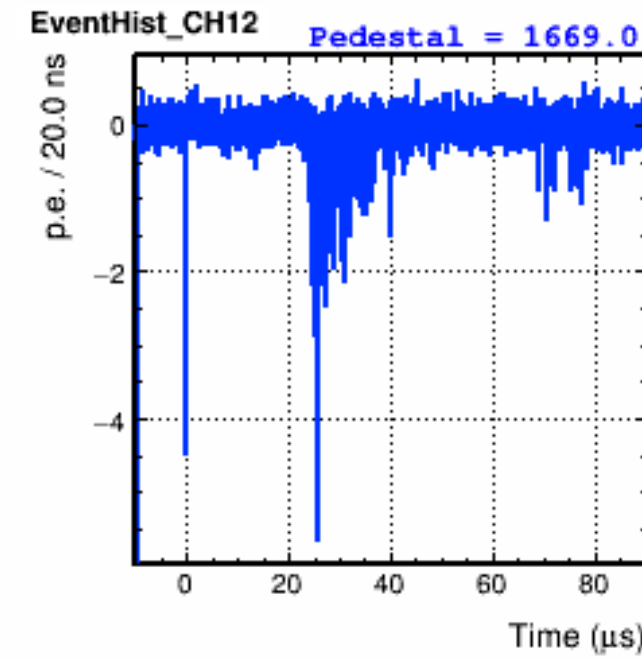
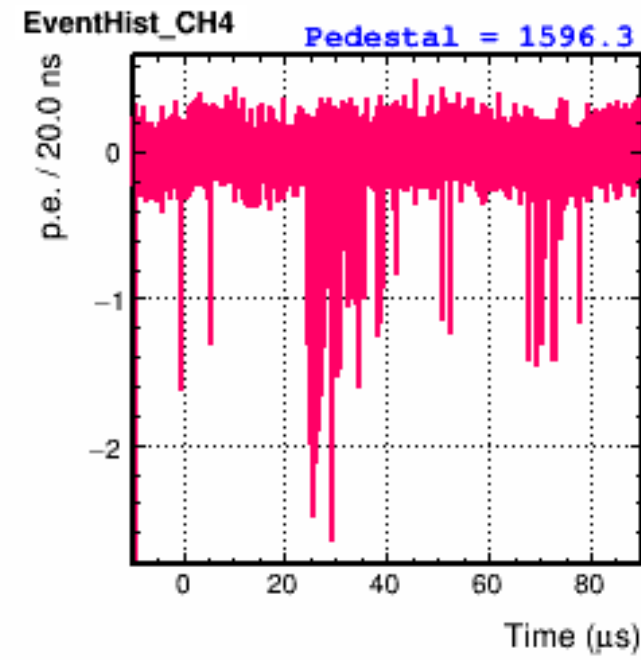
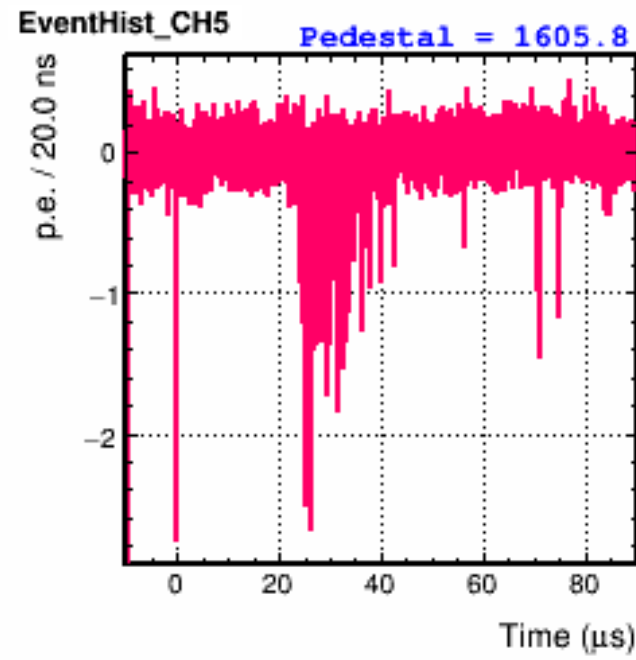
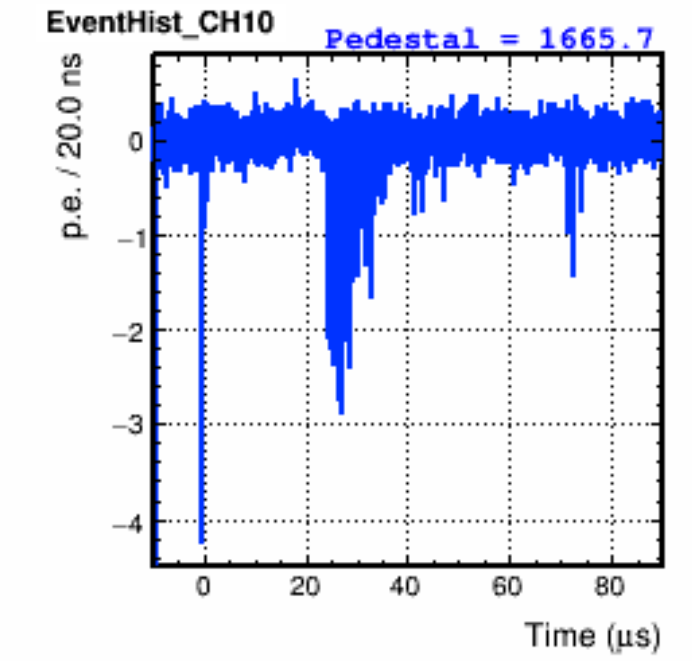
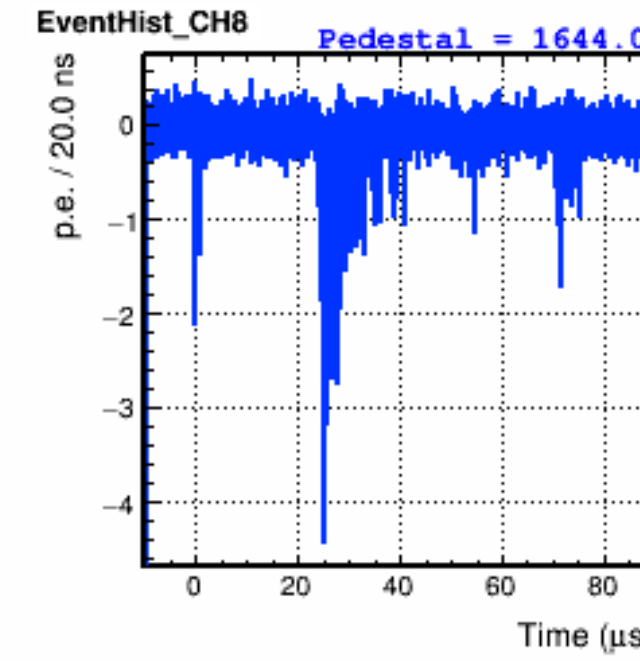
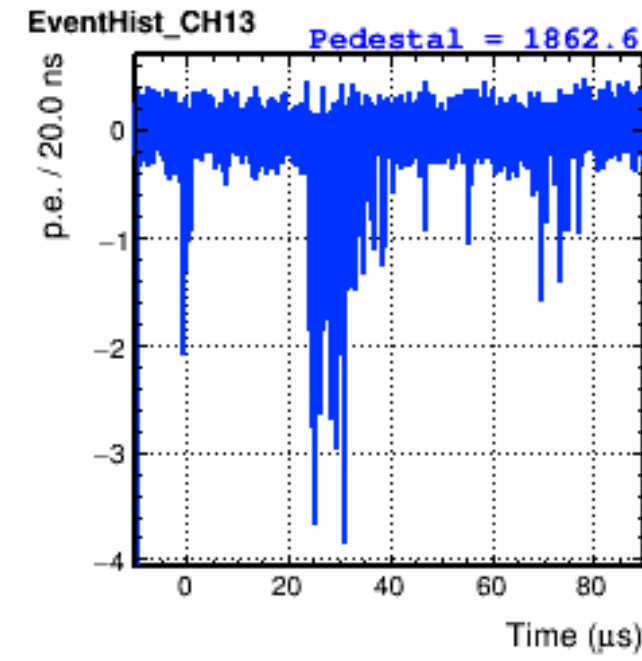
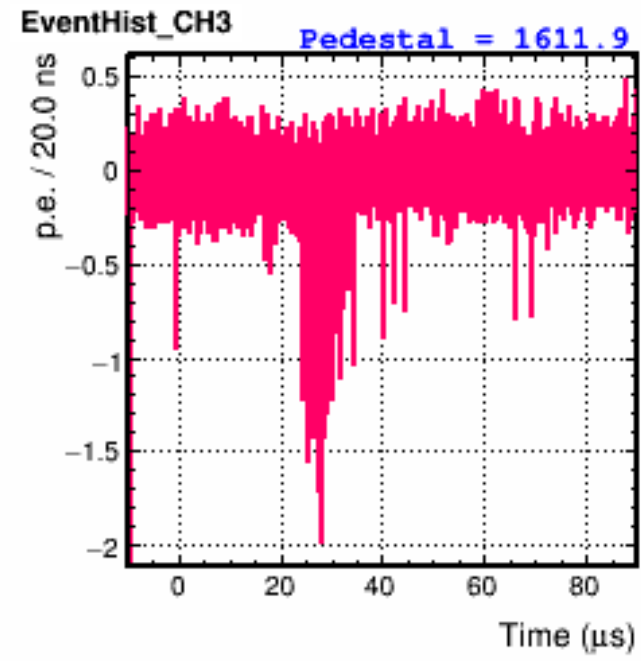
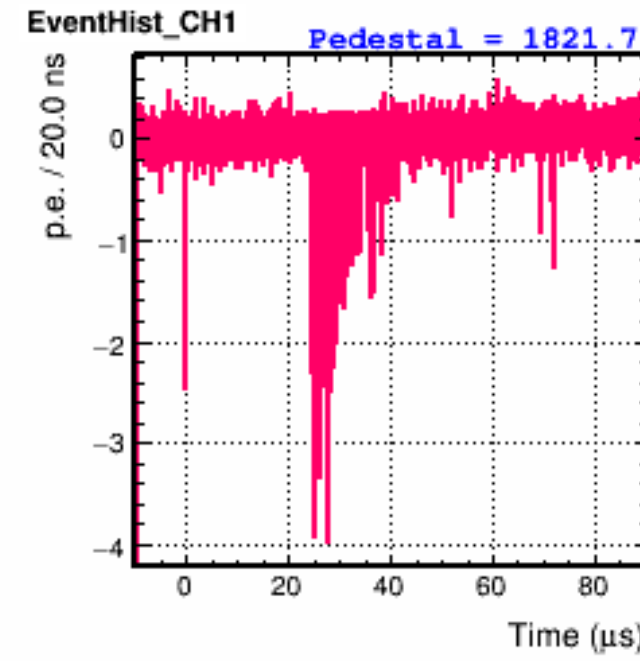
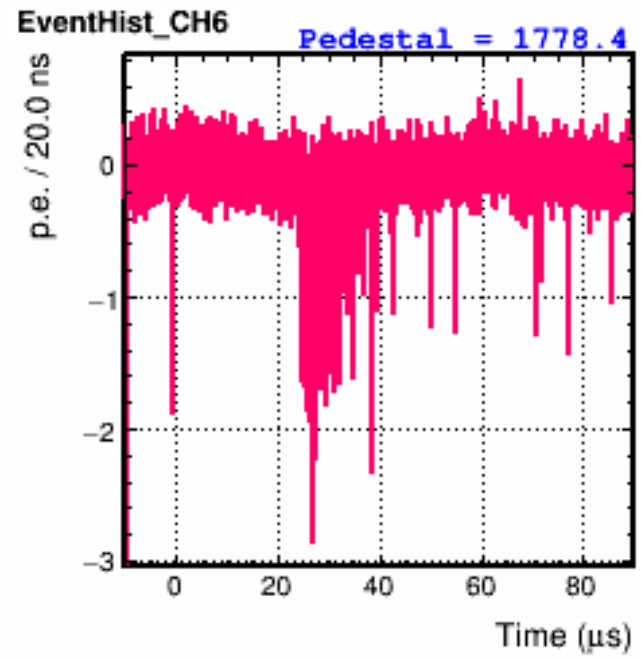
Top



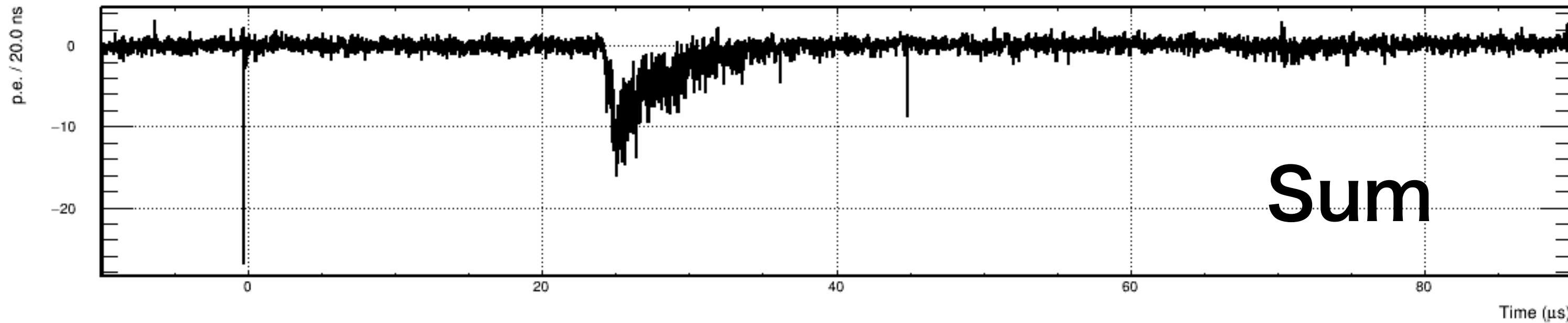
ANKOK RUN17.3
Waveform Display
Run : 287
File : 278
(Fri Mar 2 00:03:04 2018)
Event : 301
($\delta T = 5.100e-02$ s)



Bottom



EventSumRebin

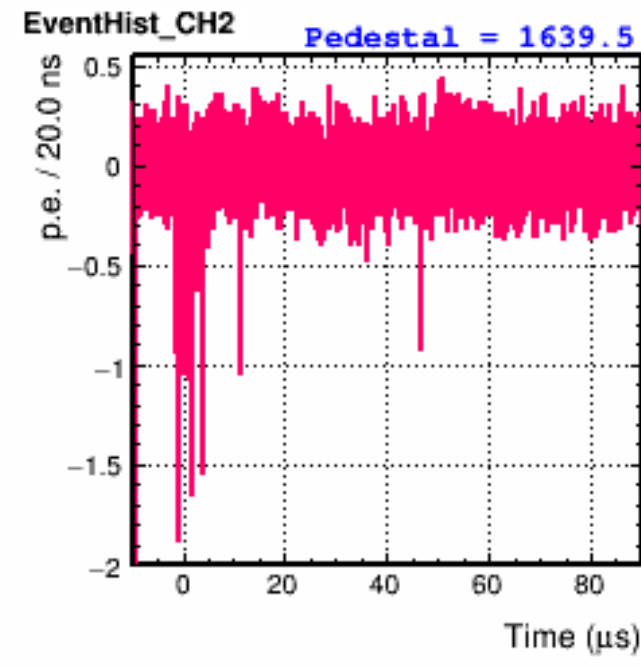
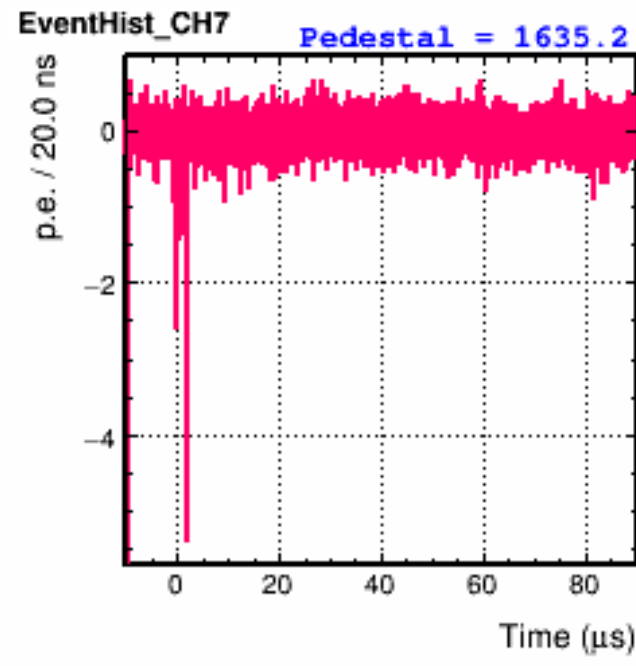


PHCTag :
phc.cosmicvetoalphaallow
S1 = 61.98
S2 = 2037.32
Slow/Total = 0.235
Log10(S2/S1) = 1.517
Drift Time = 30.29
Total + Rest = 64.82

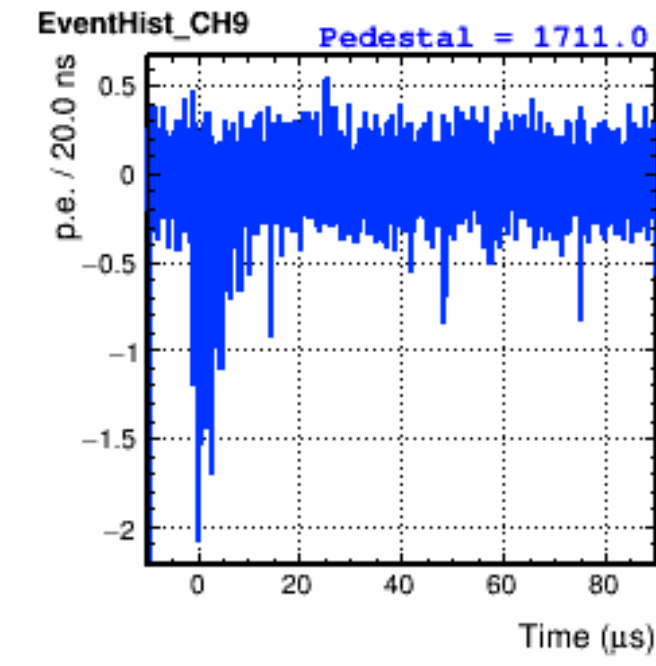
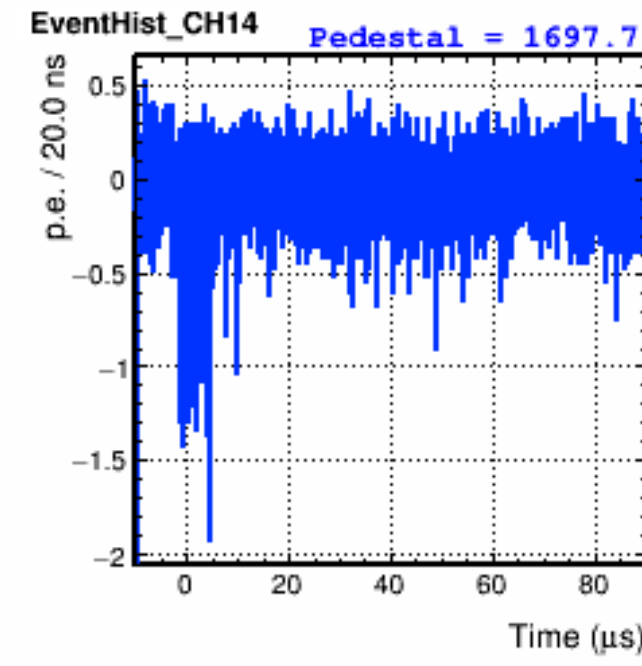


Event Display (S2-Only)

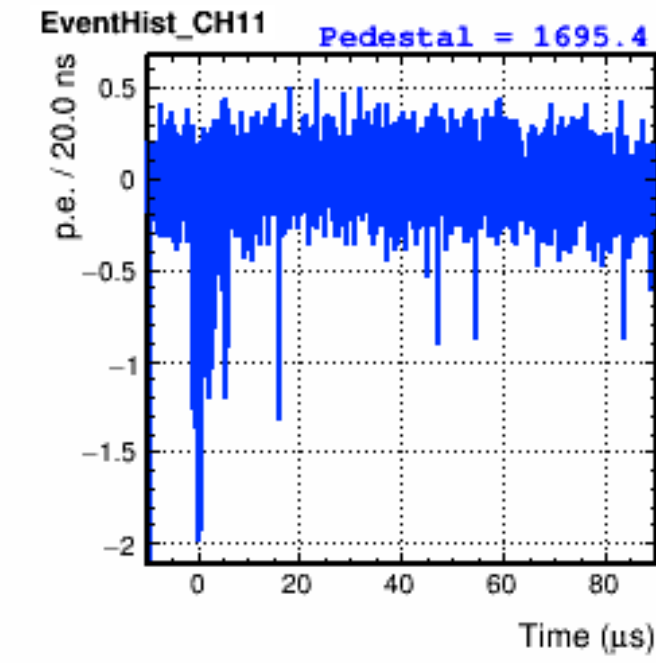
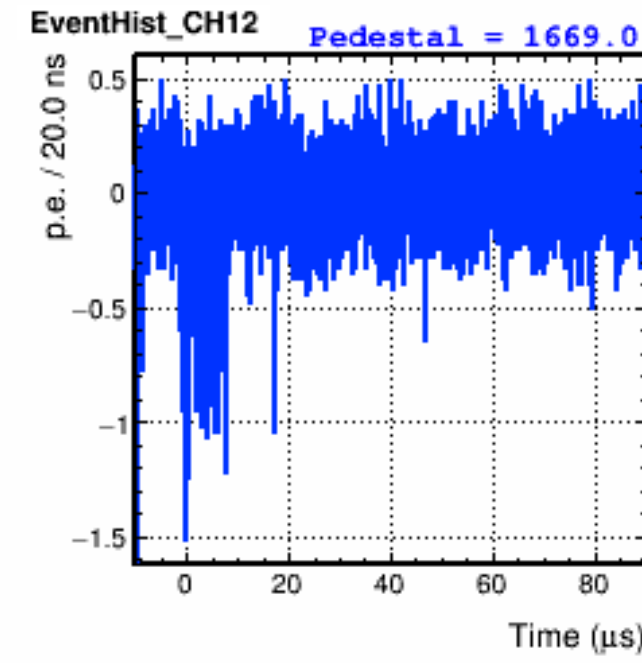
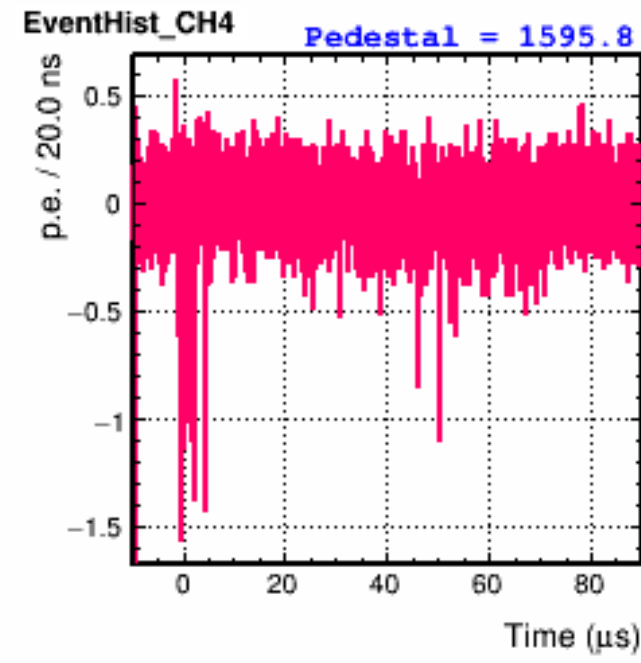
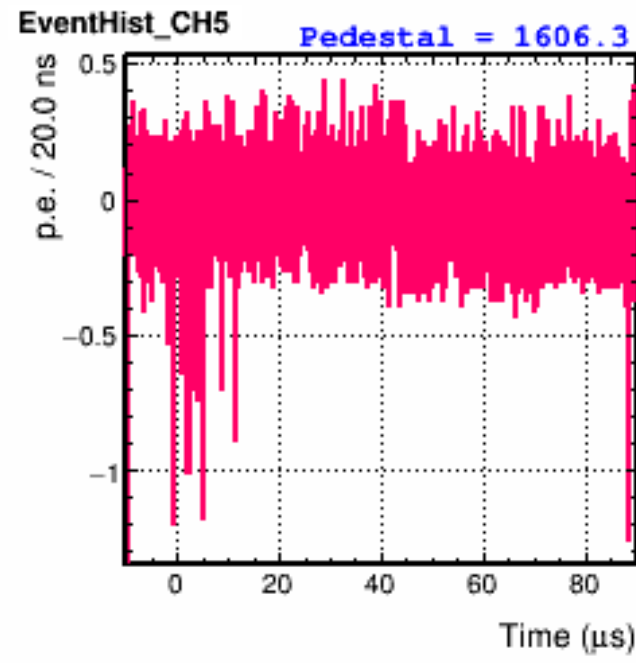
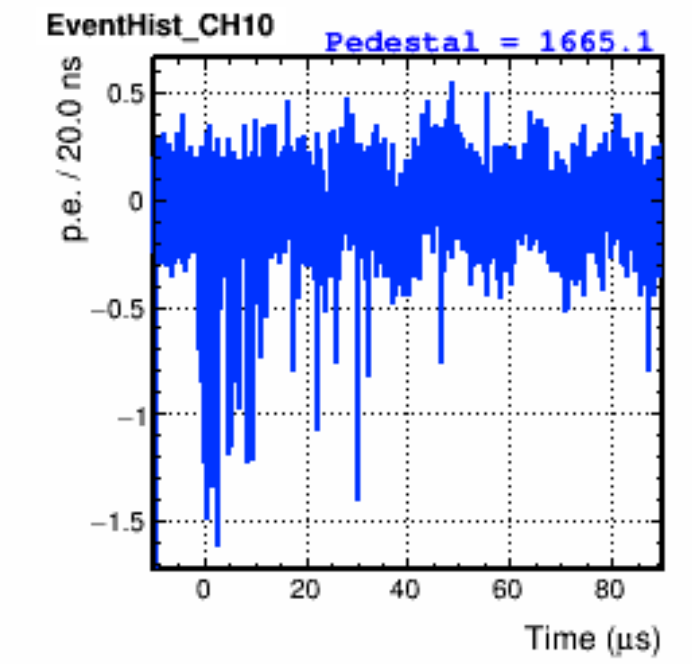
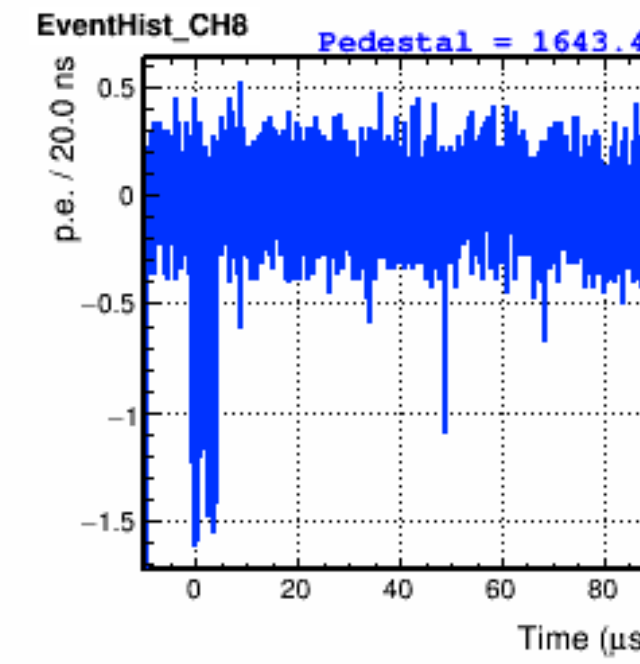
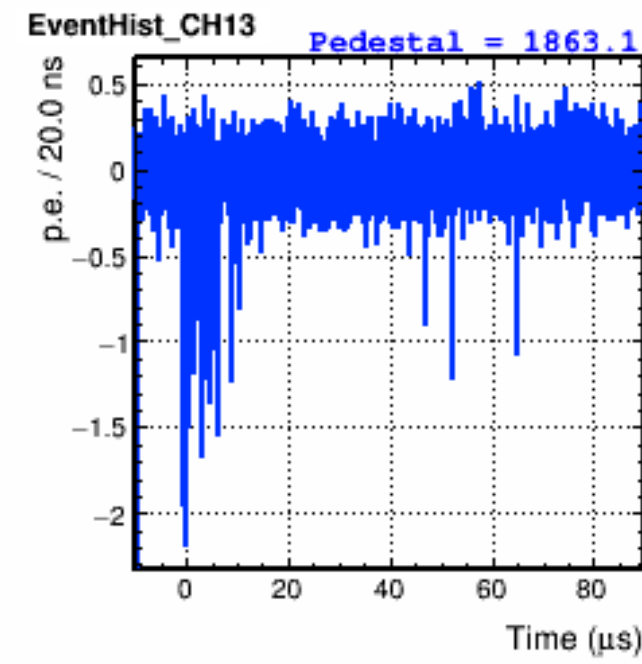
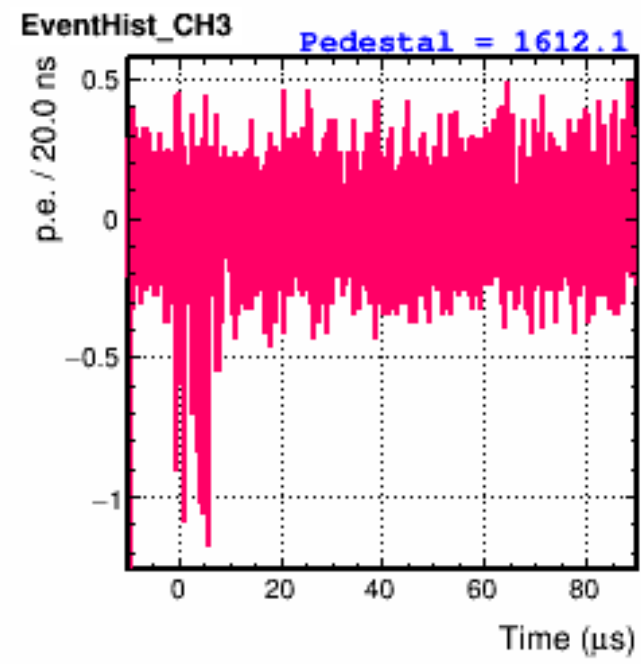
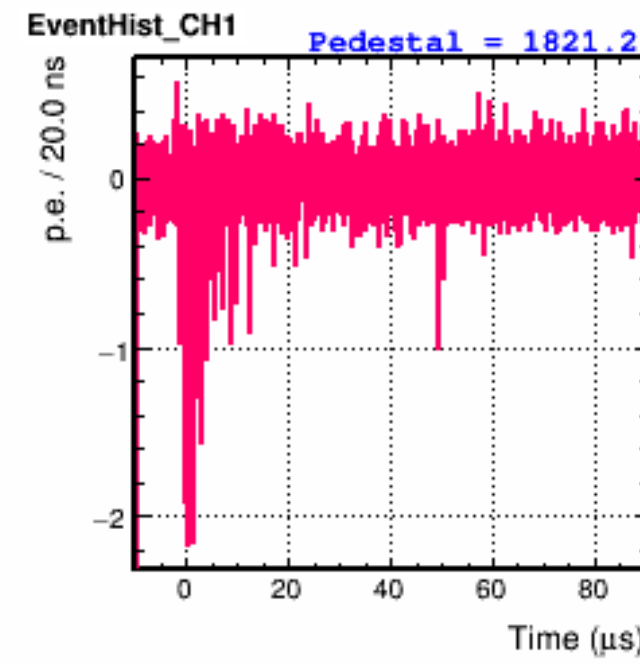
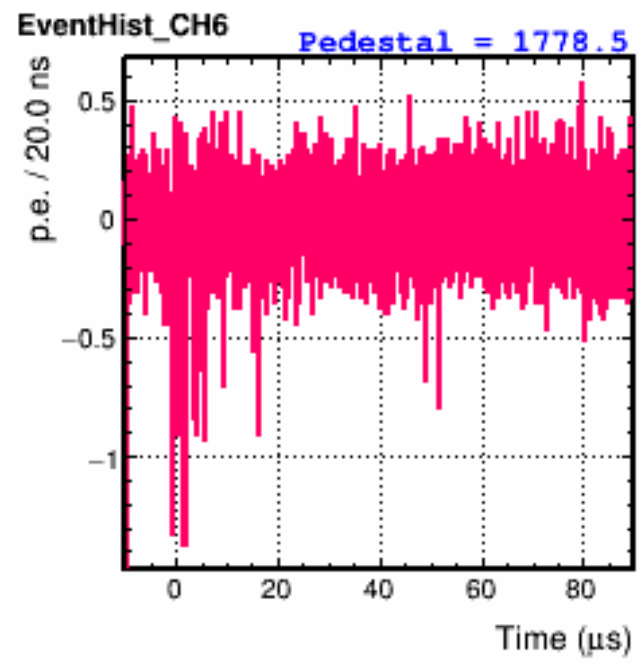
Top



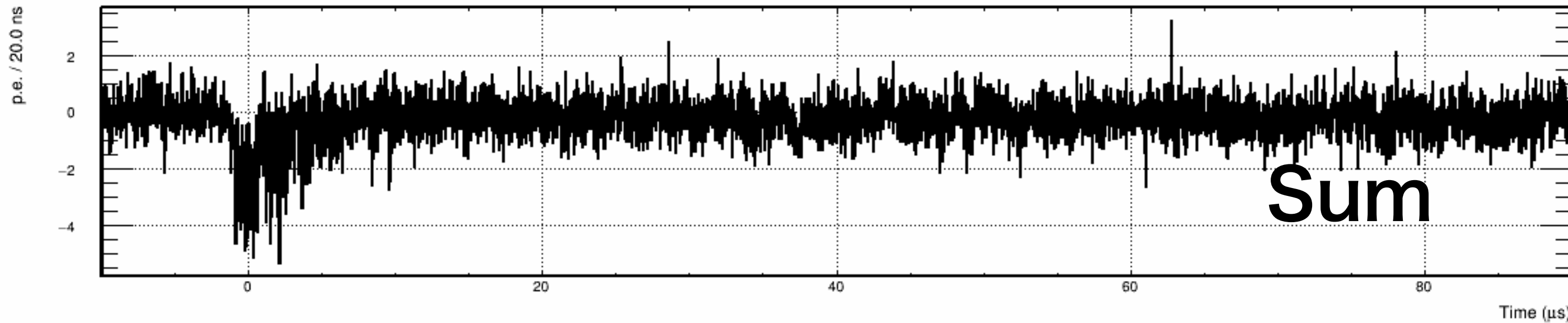
ANKOK RUN17.3
Waveform Display
Run : 287
File : 17
(Thu Mar 1 23:34:10 2018)
Event : 217
($\delta T = 4.022e-03$ s)



Bottom



EventSumRebin



PHCTag :
phc.cosmicvetoalphaallow
S1 = 313.74
S2 = 59.71
Slow/Total = 0.986
Log10(S2/S1) = -0.721
Drift Time = 34.54
Total + Rest = 381.46

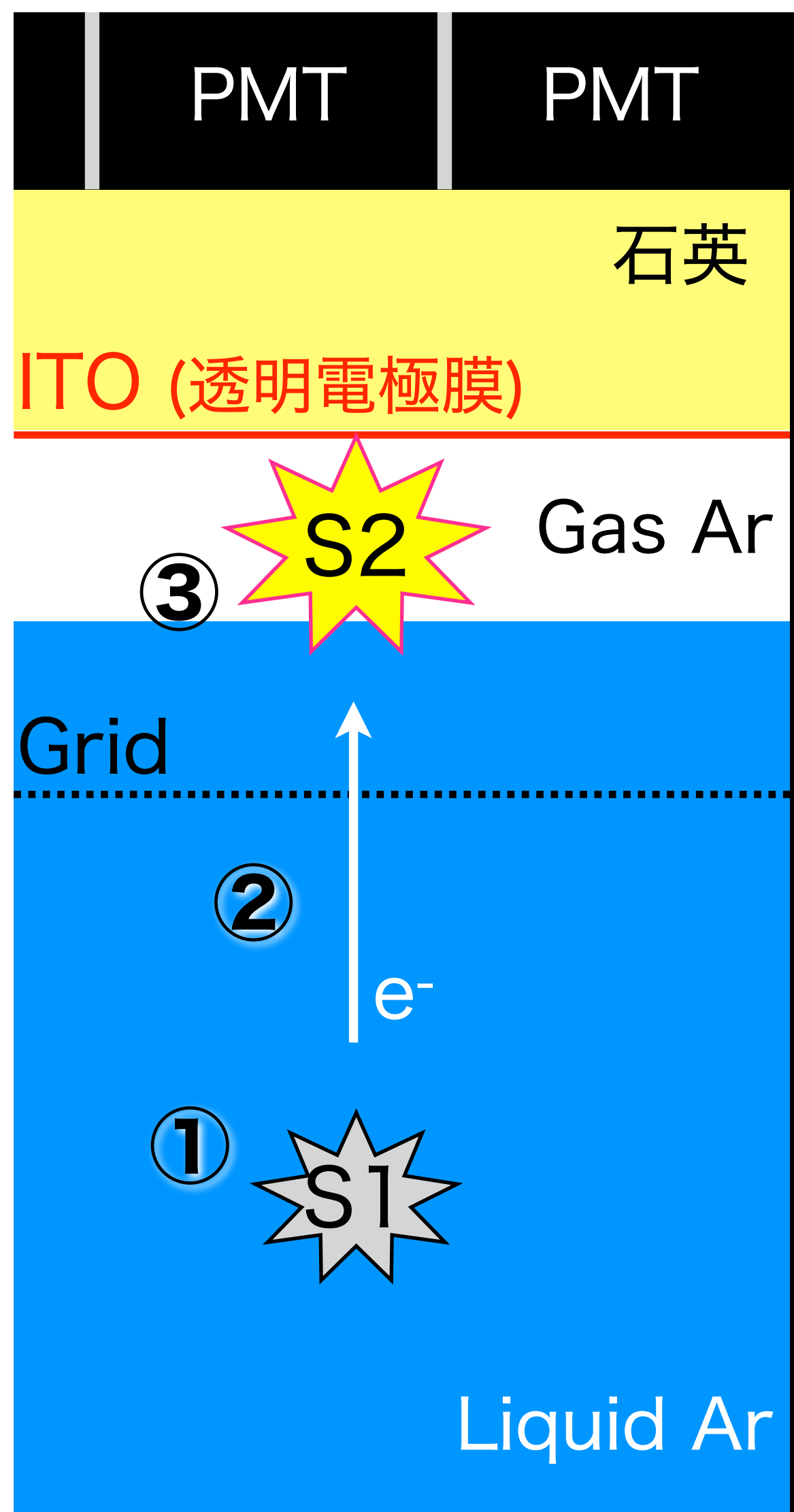


“S2”の理解

S2 … Electroluminescence (電子比例蛍光)

発光までの各過程ごとの校正と最適化が探索感度に直結

EL Process



LAr
相互作用

電離電子
生成

① 入射粒子と電場 E_d により決定
電子がいくつ生成されるか

→ 校正データとMCを用いて
基礎過程から理解する

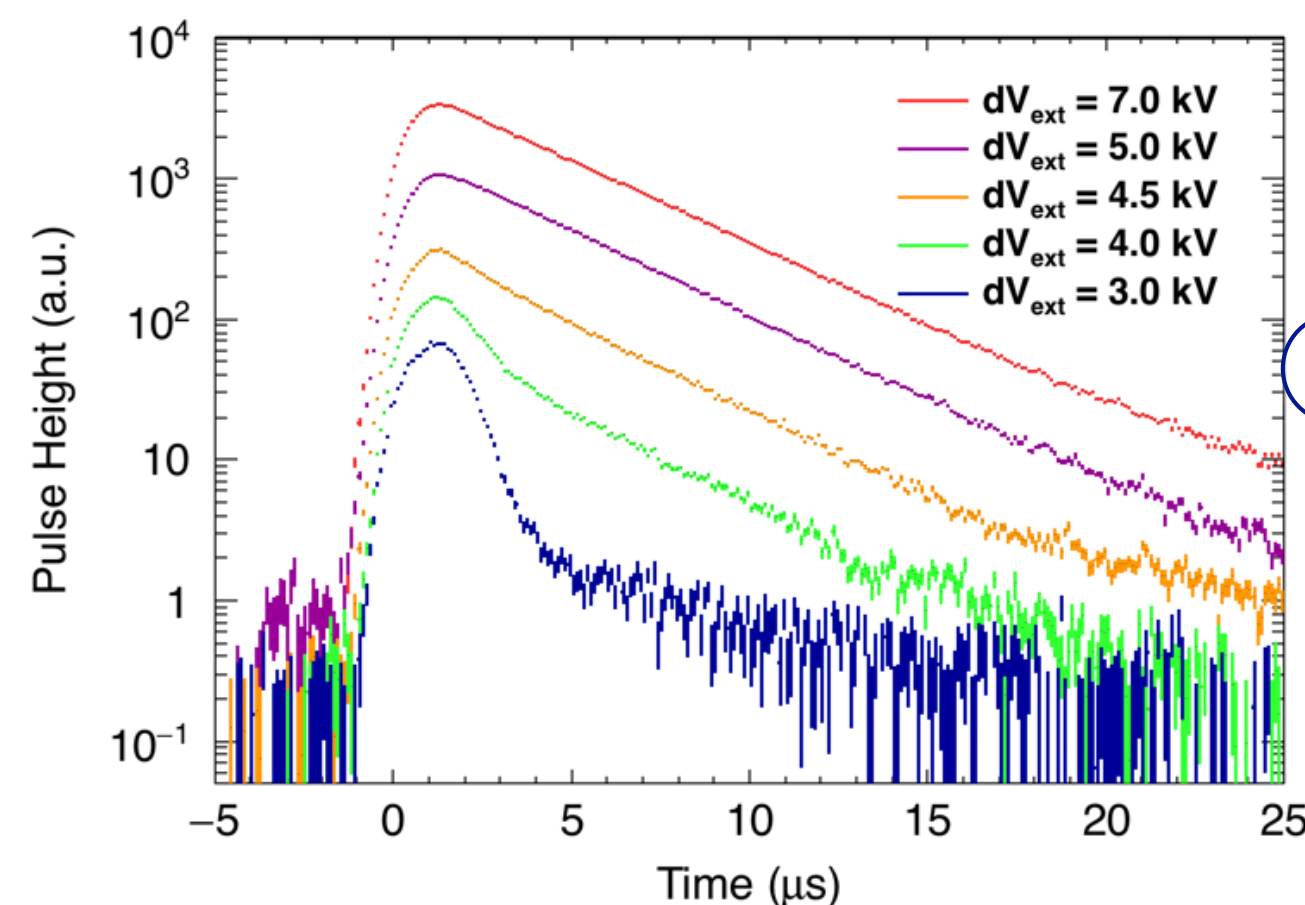
ドリフト ② LAr純度に依存
電子がいくつ取り出されるか

気相
取出し

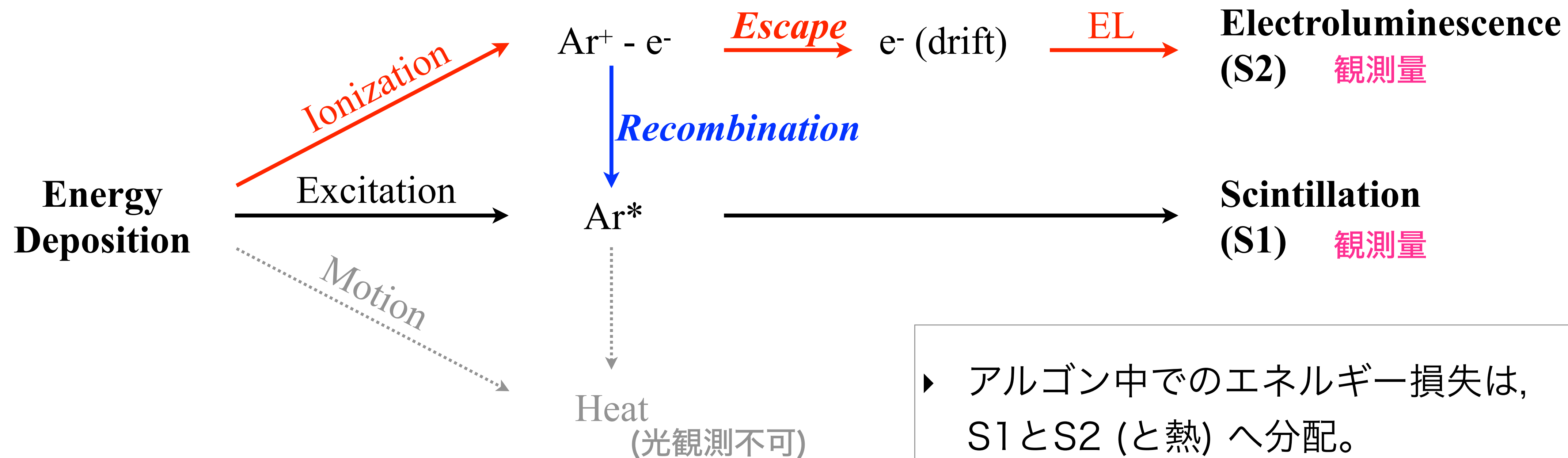
③ 取出電位 dV_{ex} や
気相環境により決定
1電子がいくつの光子へ
変換されるか

EL光
放出

→ 武田知将 (次トーク)



S2の電場依存性の測定



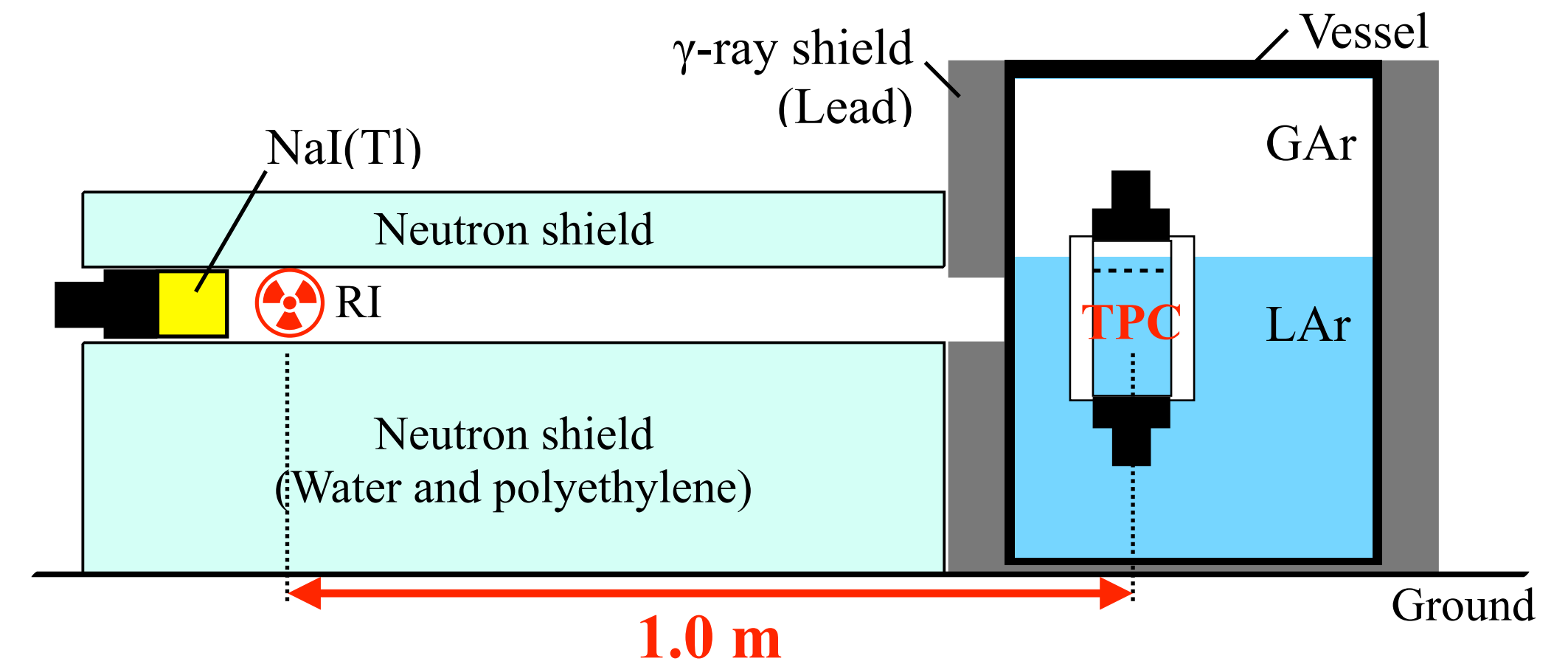
- ▶ アルゴン中でのエネルギー損失は、S1とS2 (と熱) へ分配。
- ▶ 電場印加によって再結合確率は減少。

- **S1減少量 ≒ S2増加量**
- 高電場の印加により、
 - S2 (= Drift-Electron) へ分配されるエネルギーが増加する。
 - “S2-only”による解析下で低エネルギー事象への感度が向上する可能性。

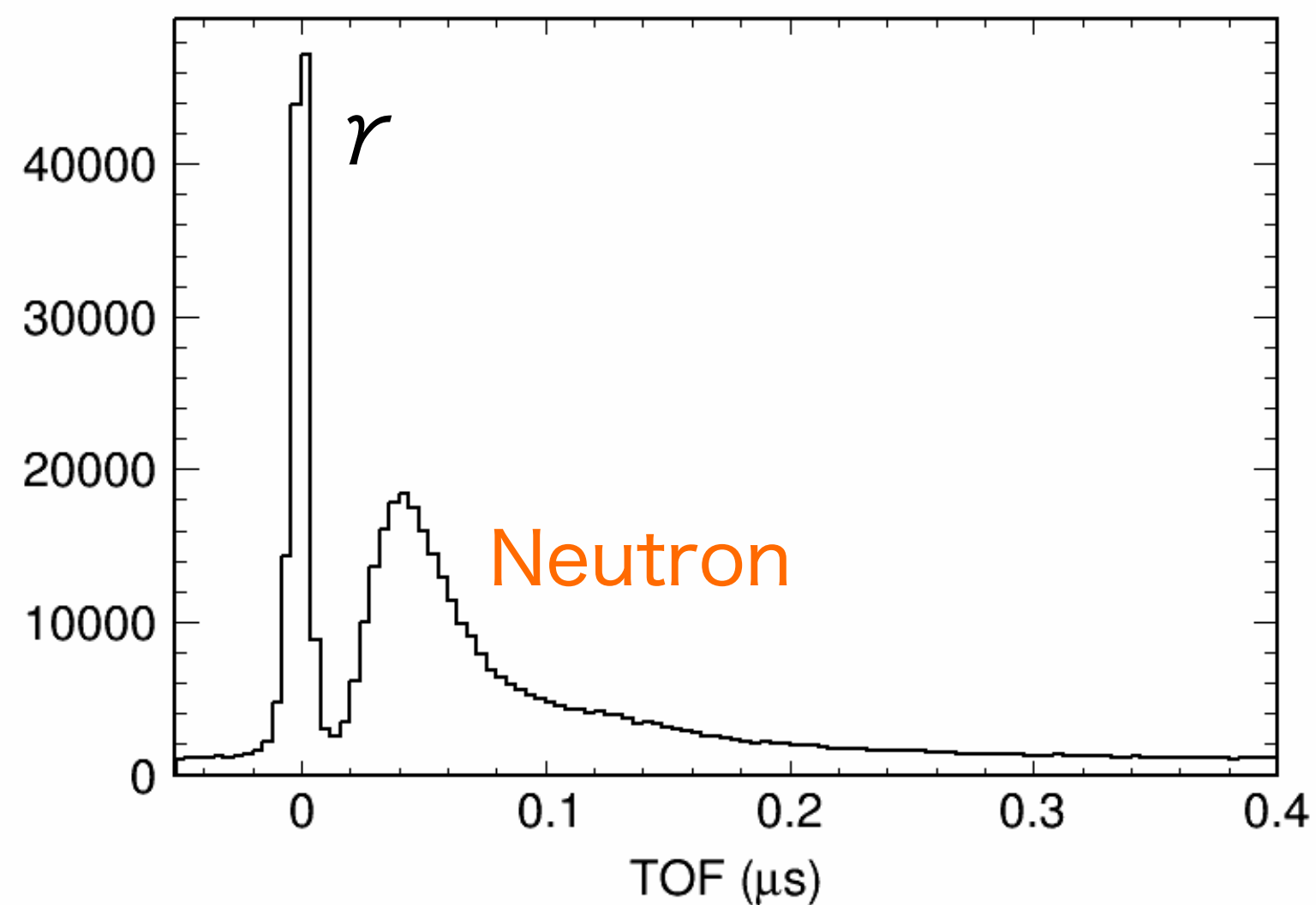


中性子データの取得 (^{252}Cf)

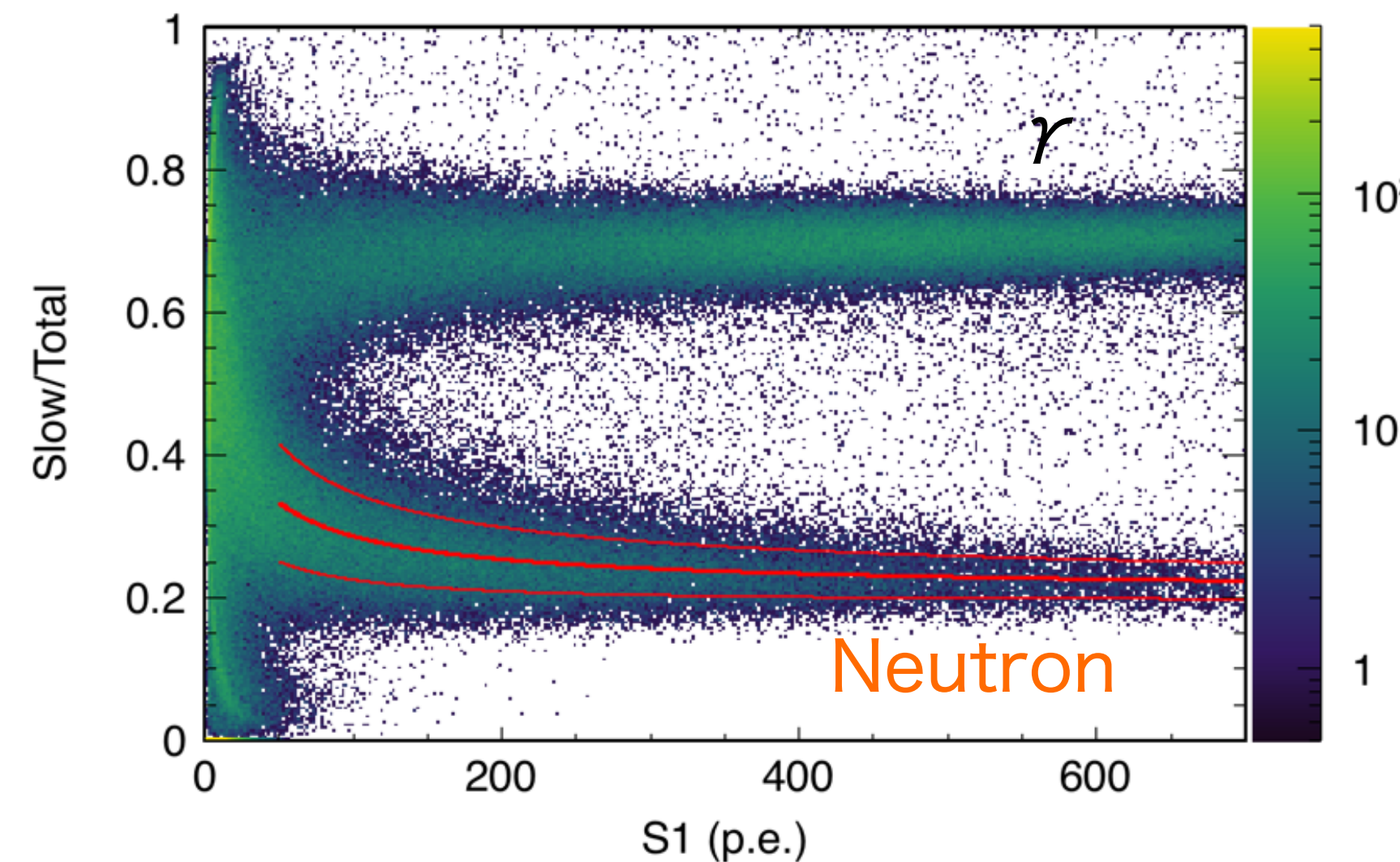
- : Drift E-Field = 0.0 - 3.0 kV/cm
- : 250 MHz FADCで波形取得 (LAr-TPC, NaI)
- : $\text{TOF} = t_{\text{LAr}} - t_{\text{NaI}}$ ($L = 1.0 \text{ m}$) を用いて、
入射中性子エネルギーをイベントごとに特定。



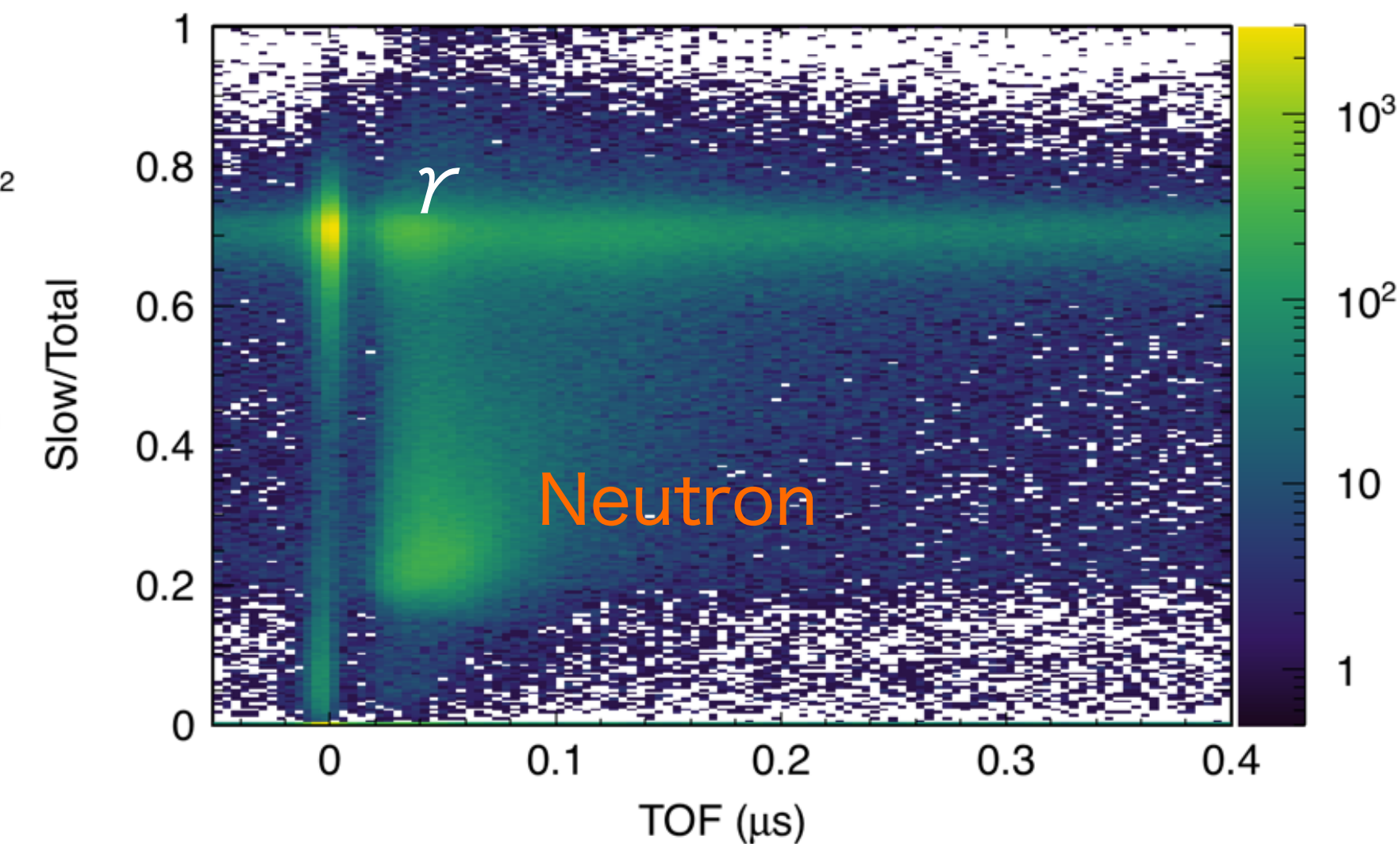
Time of Flight

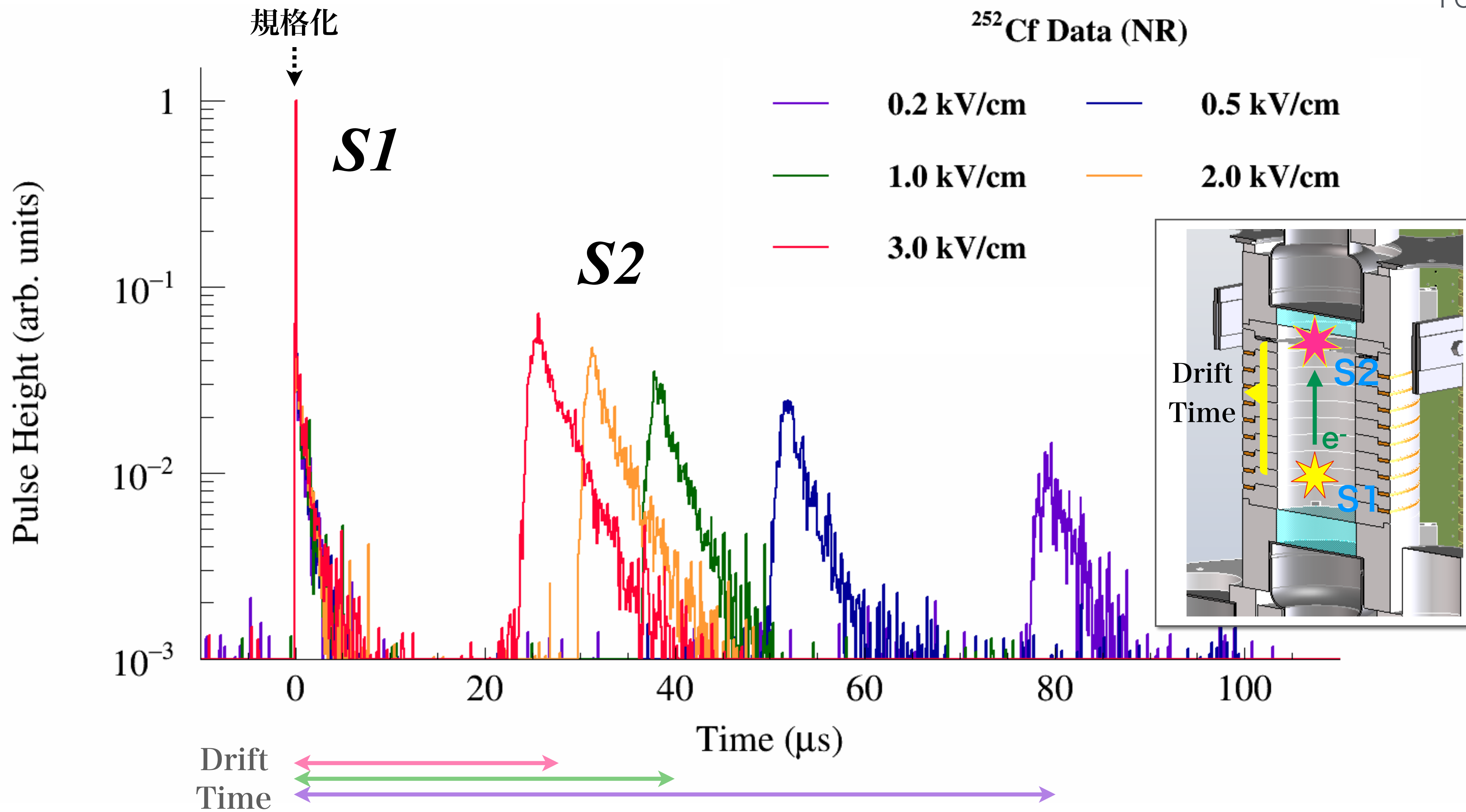


PSD Parameter



TOF vs PSD

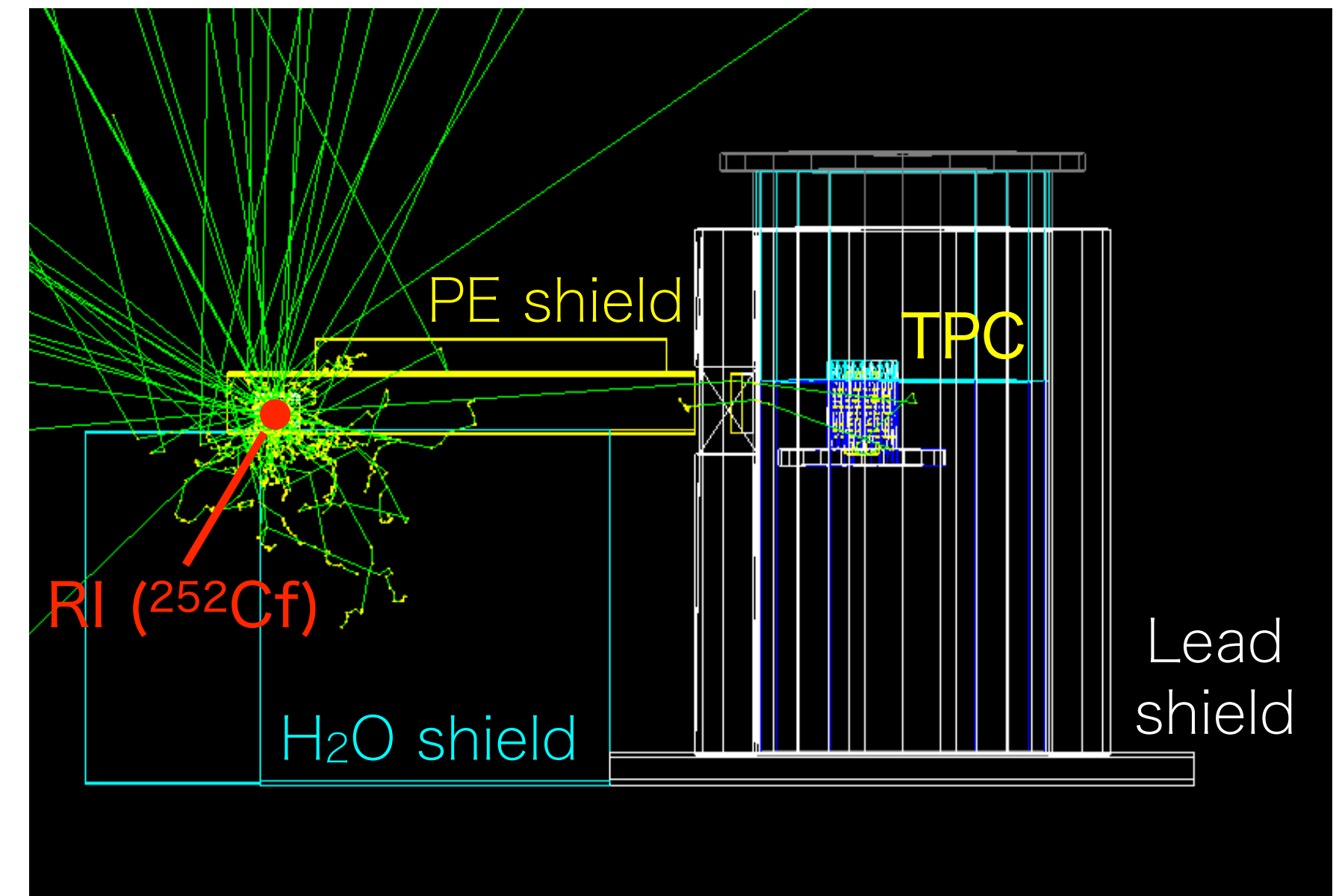




MC (Geant4)

: Geant4 MC Simulationにより,
各TOF時刻ごとのエネルギー損失分布を算出。

- Geant4-10.1.1
- Physics list : QGSP_BERT_HP
(Neutron : G4NDL4.5 (ENDF/B-VII.1))
- Neutron truck cut : 0.5 μ sec



: 液体希ガス実験で用いられてきたモデルを仮定して観測光量分布を予測。

- NR quenching

: Mei-model

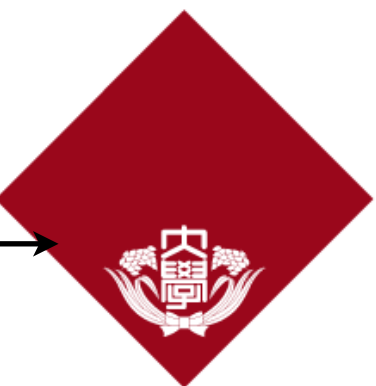
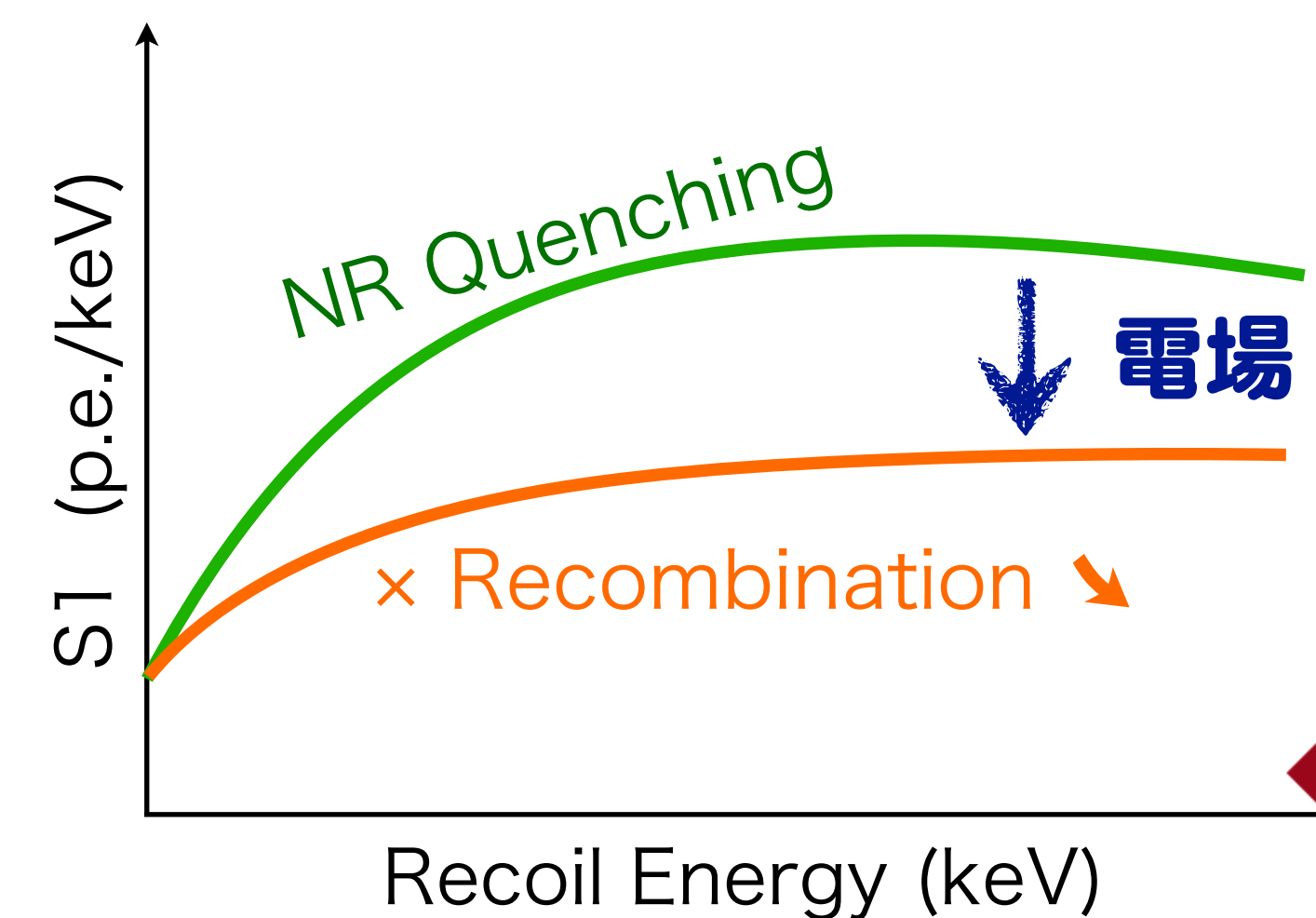
= Lindhard \times Birks'

$$L_{\text{eff}}^{\text{Mei}} = L_{\text{eff}}^{\text{Lindhard}} \times \frac{1}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

- Recombination prob.

: Thomas-Imel box model (TIB)

$$R = 1 - \frac{\ln(1 + N_i \zeta)}{N_i \zeta}, \quad \zeta = \beta F^{-\gamma}$$



MC Fitting to Data

- : Spectrumを,
TOF Bin (4 ns) 毎に分割。
- エネルギー依存性に感度
- : 0.0 - 3.0 kV/cm (6点)。
- 電場依存性に感度
- : それぞれのS1・S2分布を
Simultaneous Fit。

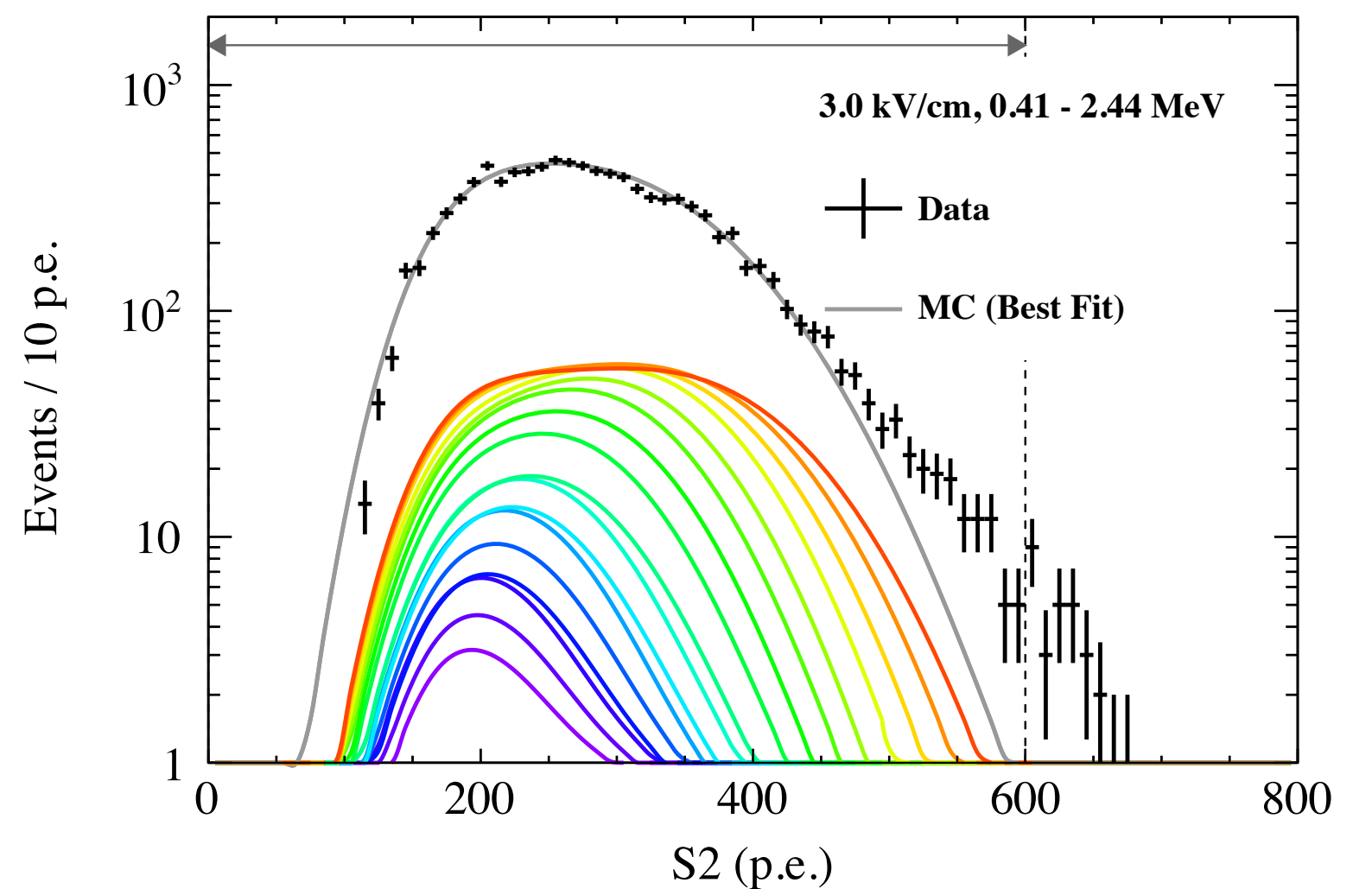
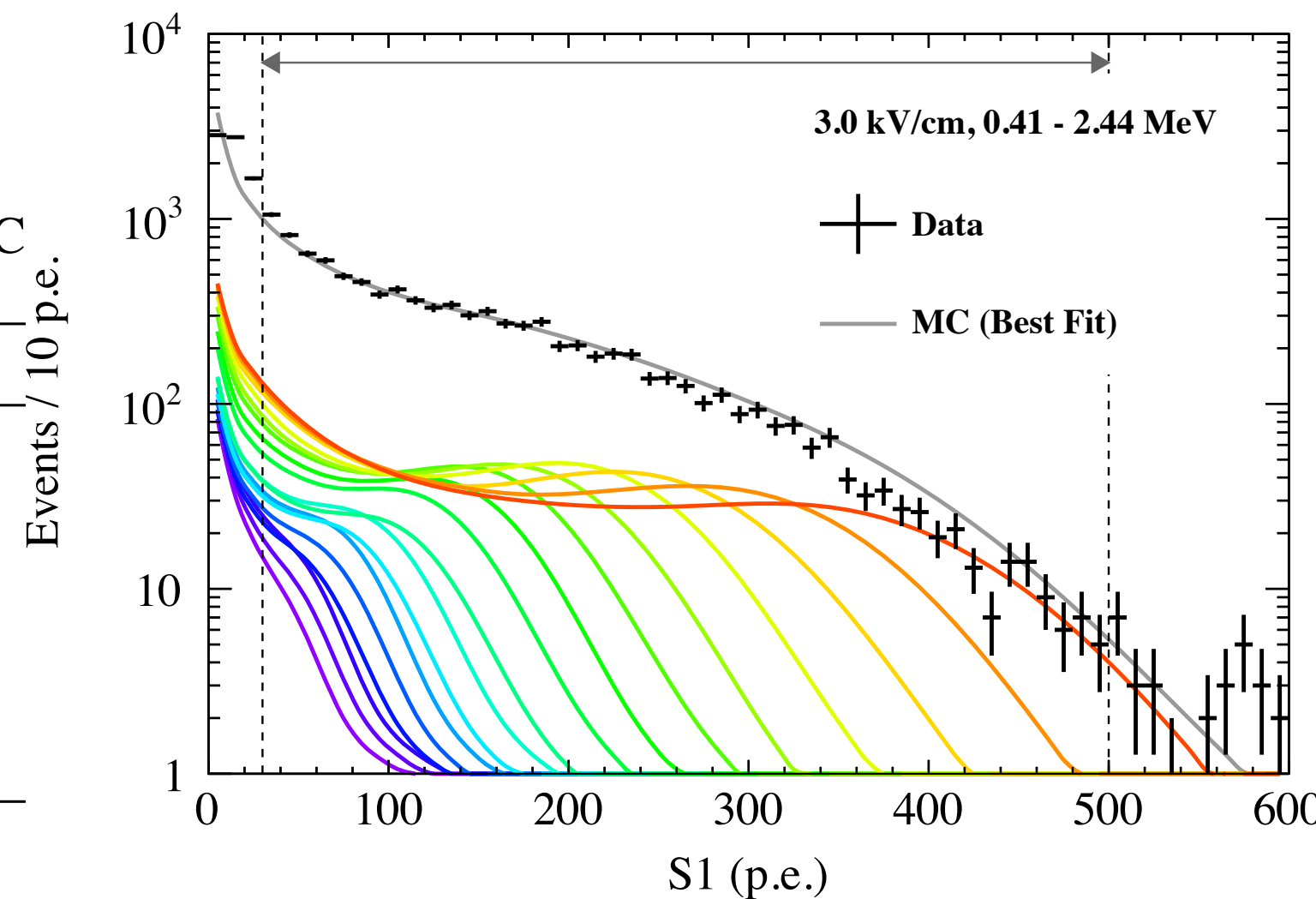
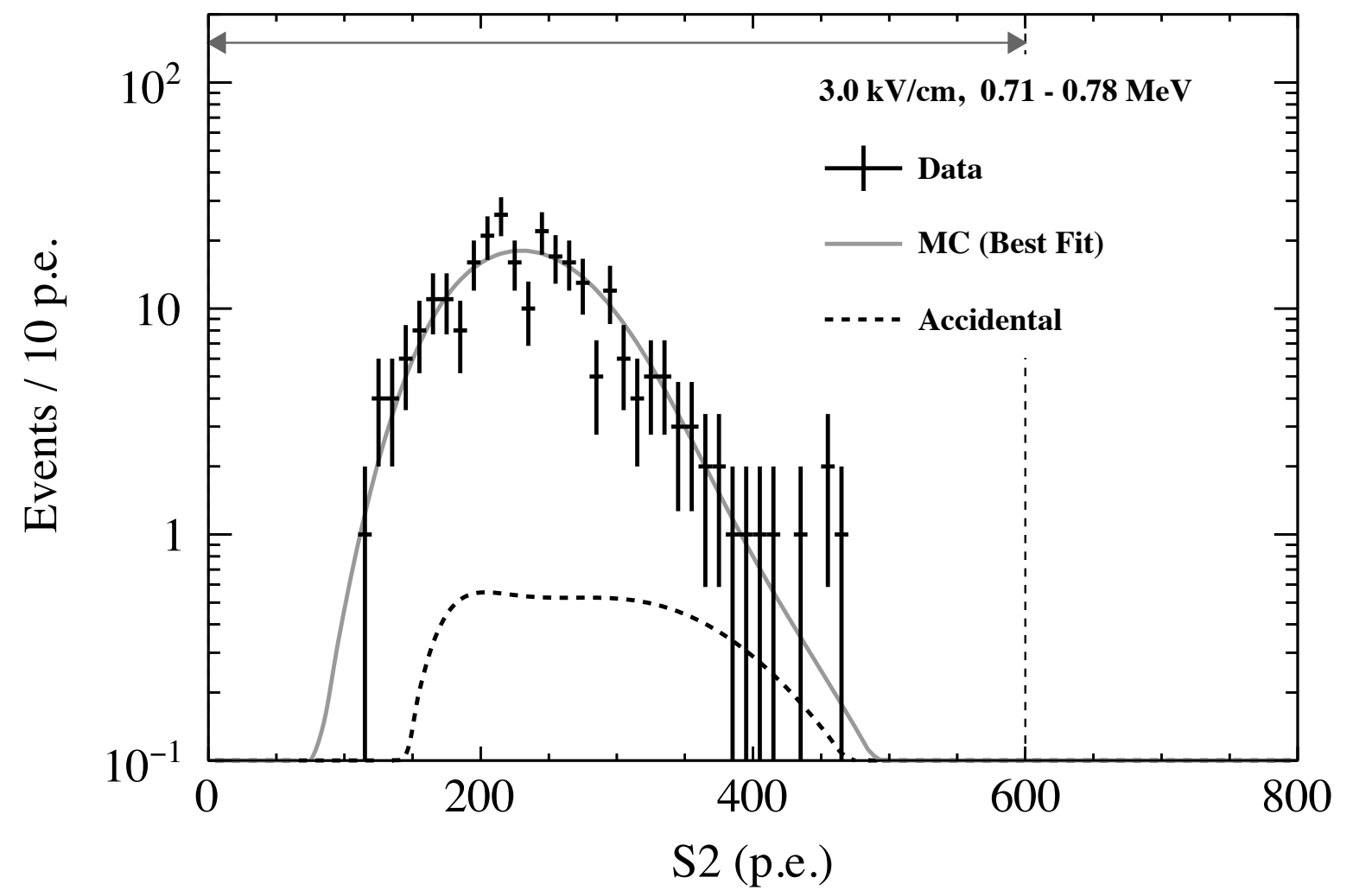
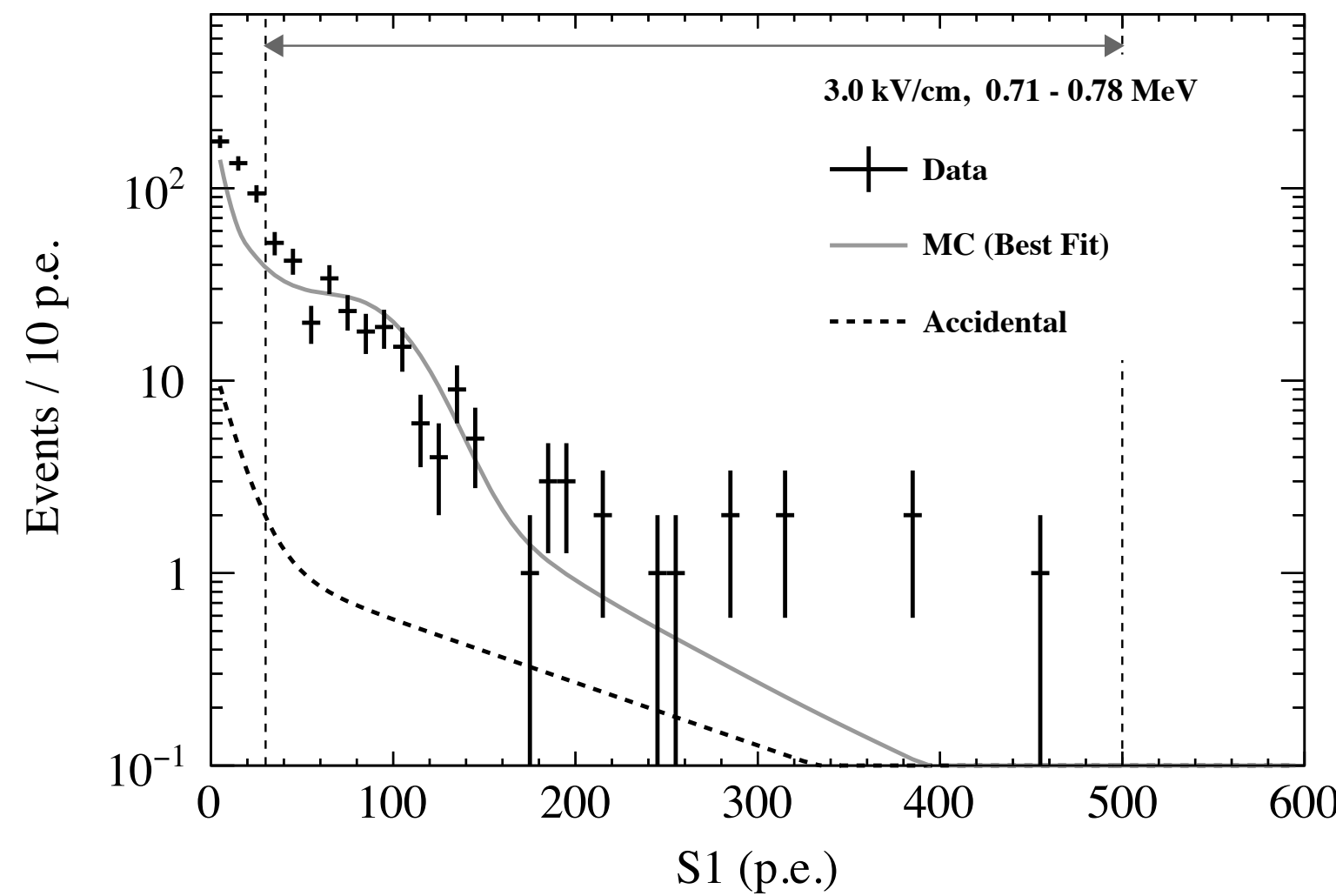


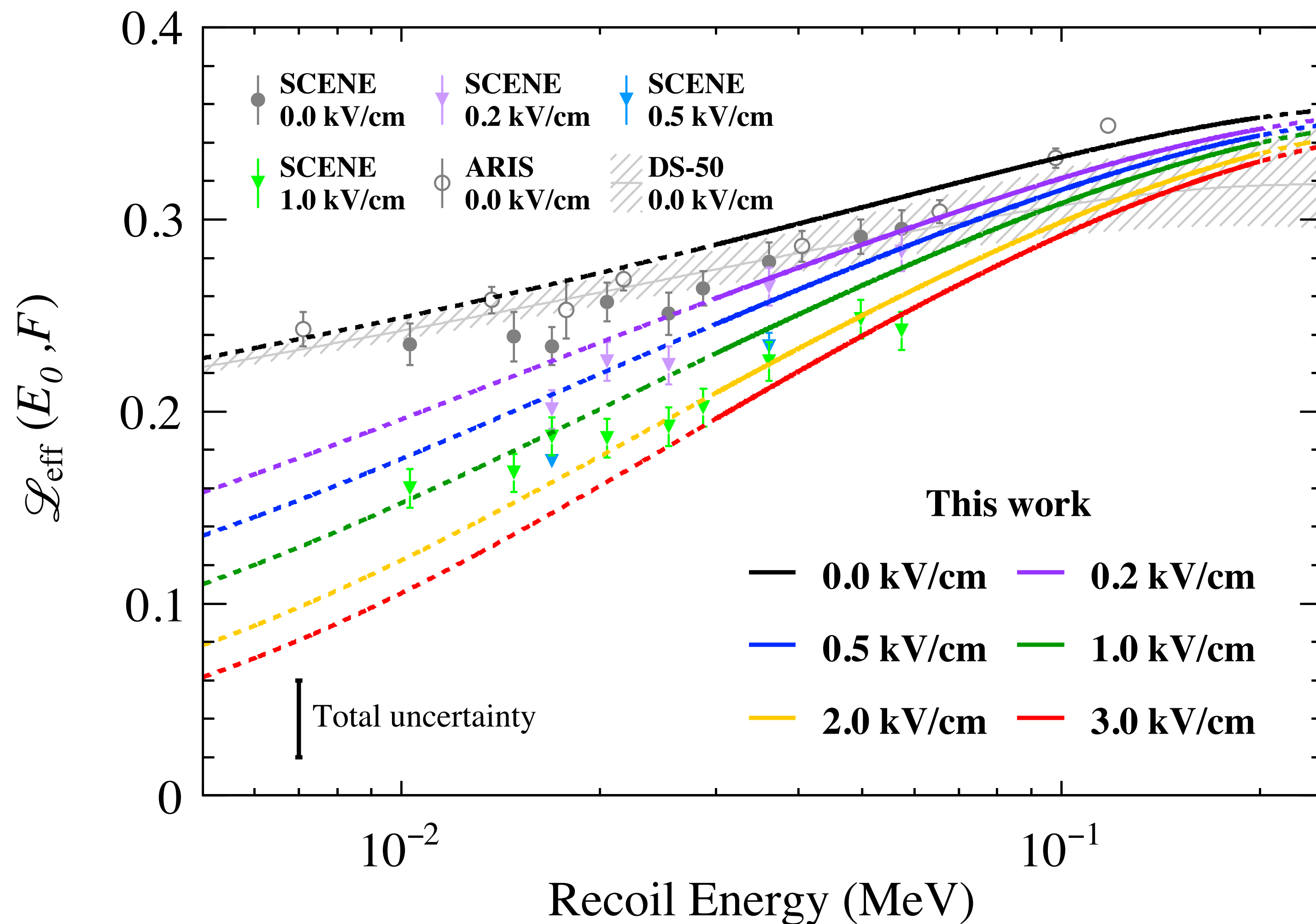
Table 1: Results from the simultaneous fit of ^{252}Cf data with the MC simulation and the NR model described in Sec. 2.

| Parameter | Value |
|---|----------------------|
| k_B [g/(MeV · cm ²)] | 3.5×10^{-4} |
| α_0 (fixed) | 1.0 |
| D_α [(V/cm) ⁻¹] | 1.2×10^{-3} |
| γ [(V/cm) ^{δ}] | 1.2 |
| δ | 5.8×10^{-1} |

Result (\mathcal{L}_{eff})

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} [\text{keV}_{\text{ee}}/\text{keV}_{\text{nr}}]$$

: 電子反跳 @ 0電場に対する原子核反跳の相対的な発光量



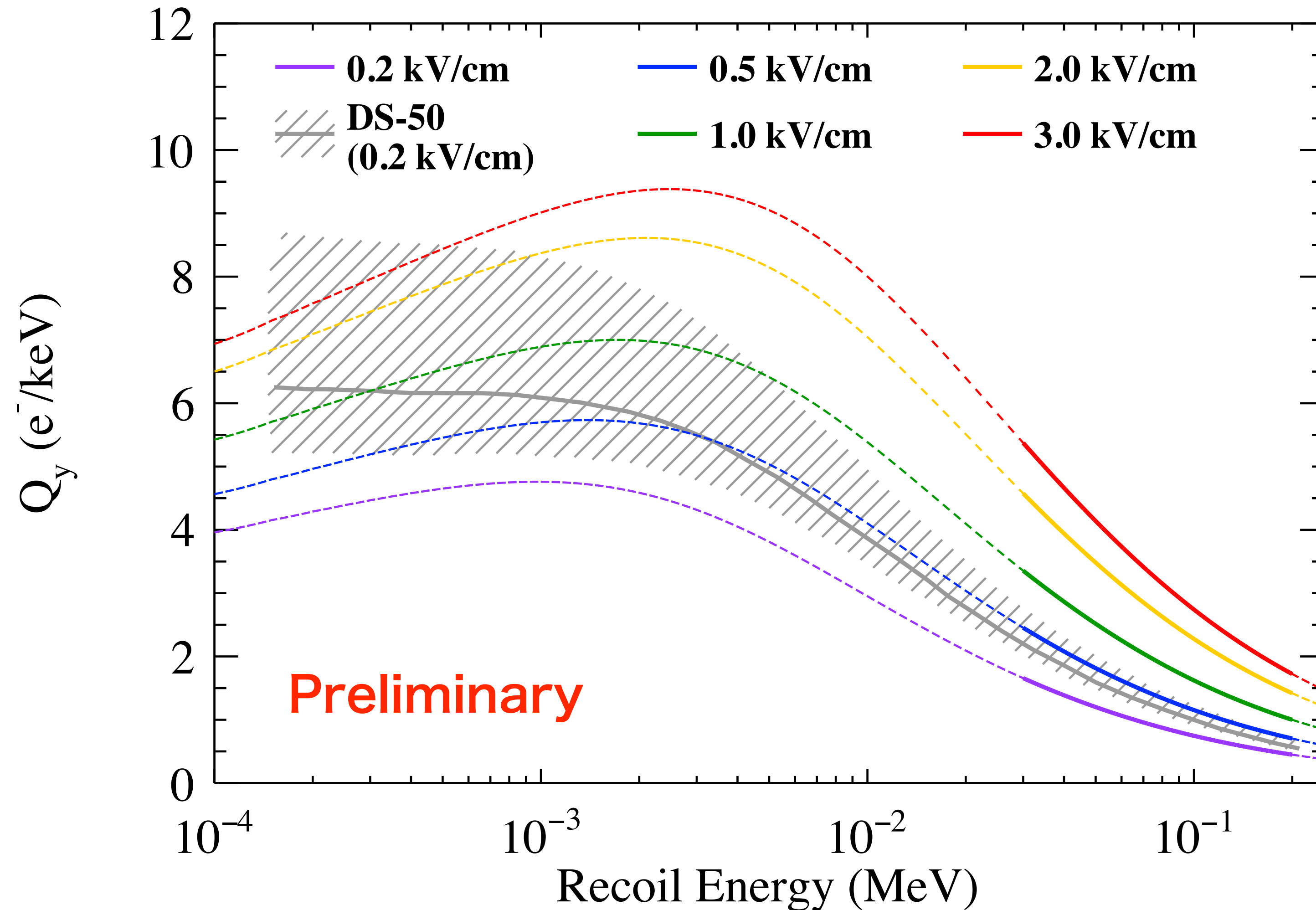
$F \leq 3.0 \text{ kV/cm}$ における、
原子核反跳に対する
LArシンチレーション発光量を
初めて測定。

arXiv:1902.01501

Result (Q_y)

Q_y [$e^-/\text{keV}_{\text{nr}}$]

: 単位原子核反跳エネルギーあたりの
電離電子生成数



$F \leq 3.0 \text{ kV/cm}$ における、
原子核反跳に対する
電離電子生成量を測定。

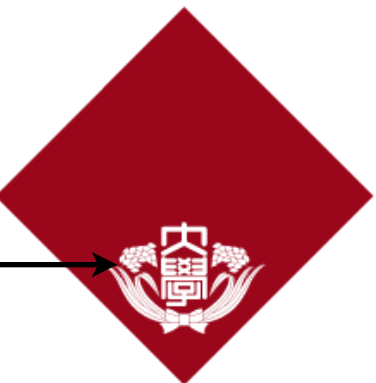
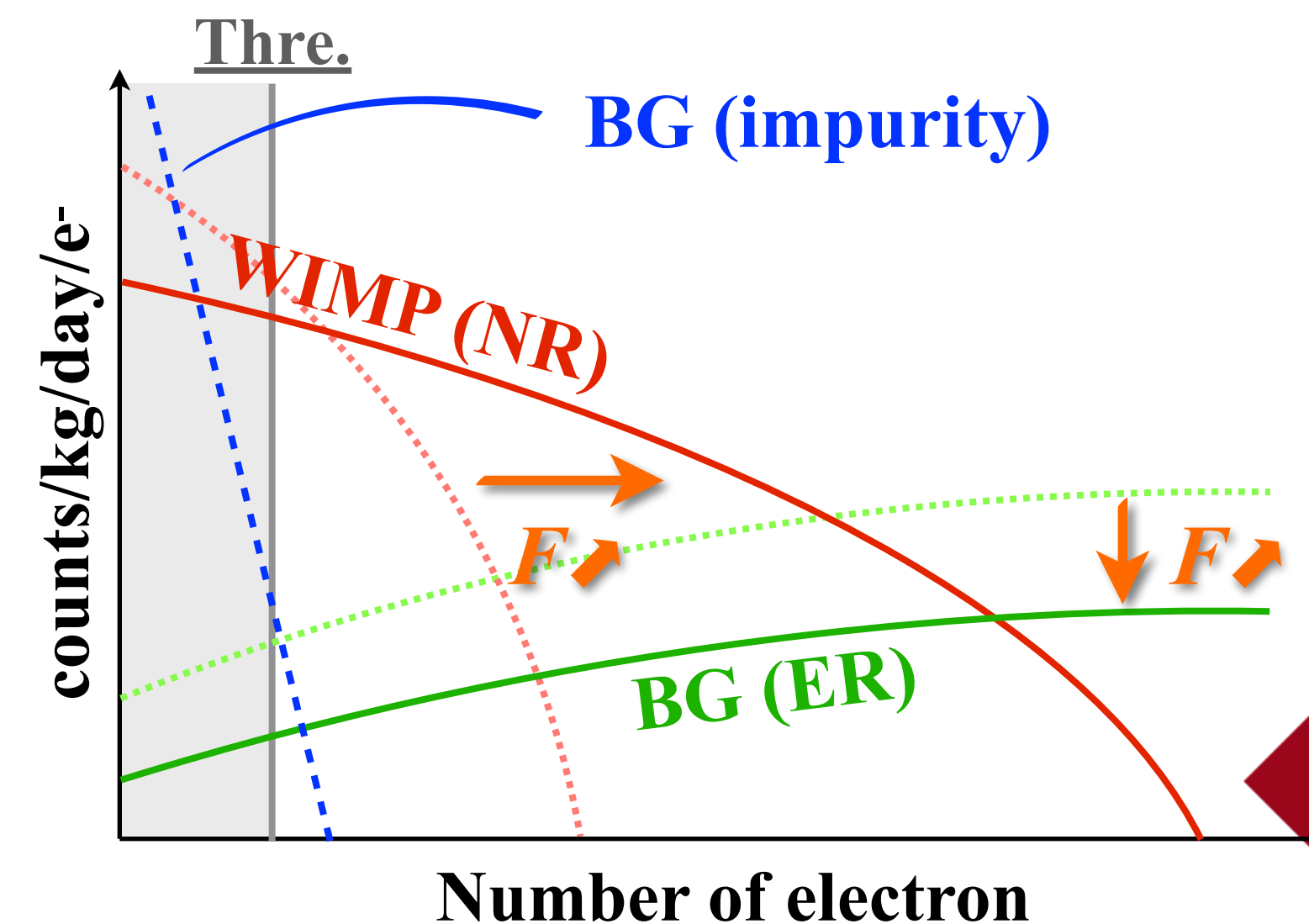
系統誤差は評価中。

電場が高いほど、
生成される電離電子は多い。

纏めと展望

- : LAr-TPCの電離信号 (= **S2**) は, $\mathcal{O}(\text{keV})$ の極小反跳エネルギー事象に有感。
- : ^{60}Co を用いたHigh-energy ER sampleの解析から, S2波形特性を測定。
- : ^{252}Cf を用いたNR sampleの解析により,
 $F = 0.0 - 3.0 \text{ kV/cm}$ におけるLight/Charge yieldsを測定。
 - Charge yieldは, $0.2 \text{ kV/cm} \rightarrow 3.0 \text{ kV/cm}$ で約3倍増加 @ 50 keV 。

- : “S2-only” 解析によるLow-mass WIMP search。
 - **高電場印加**による感度向上を示唆。
 - ~Signal energyにおけるCharge yieldの測定,
ER事象に対するCharge yieldの測定,
Background sourceの特定/除去が課題。

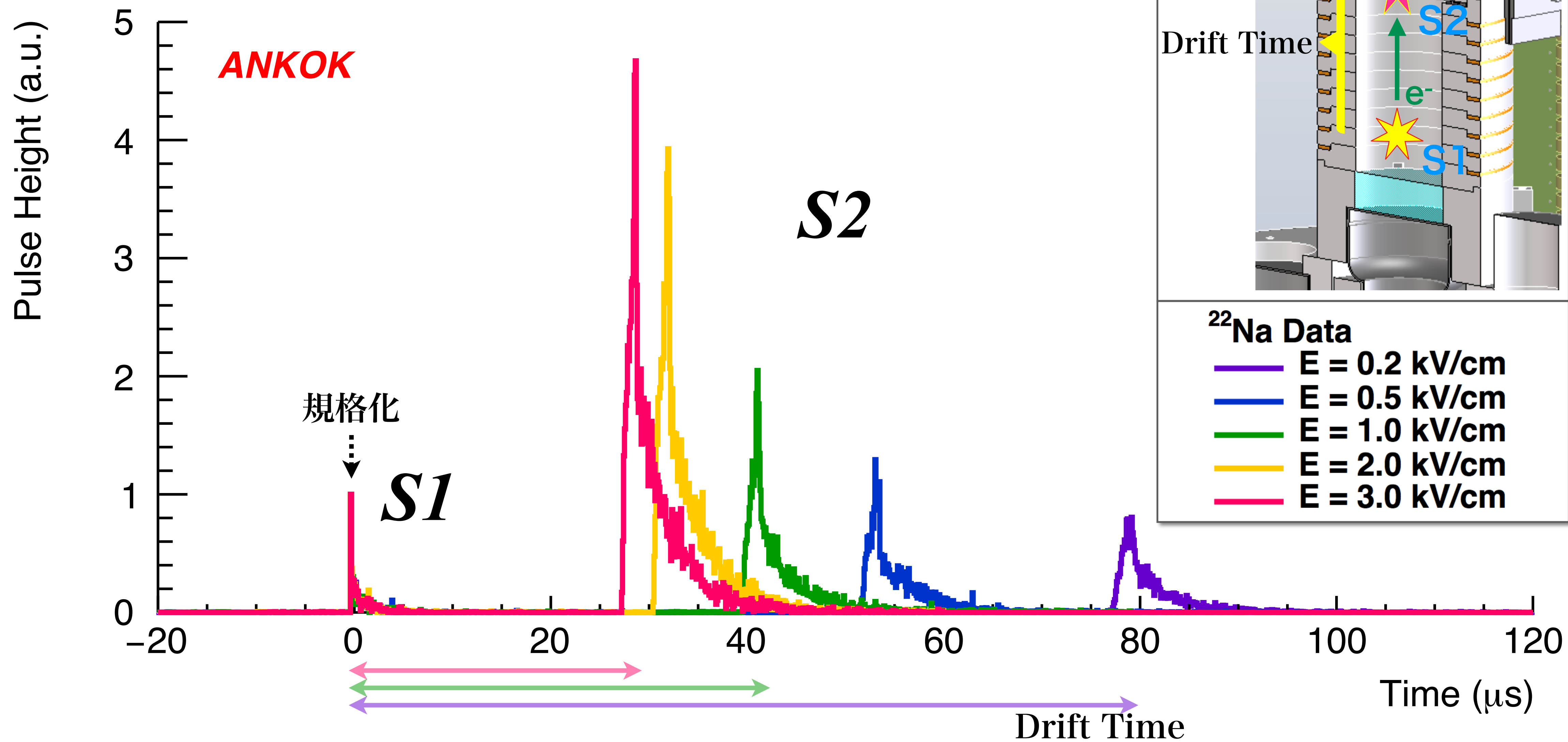


Backup



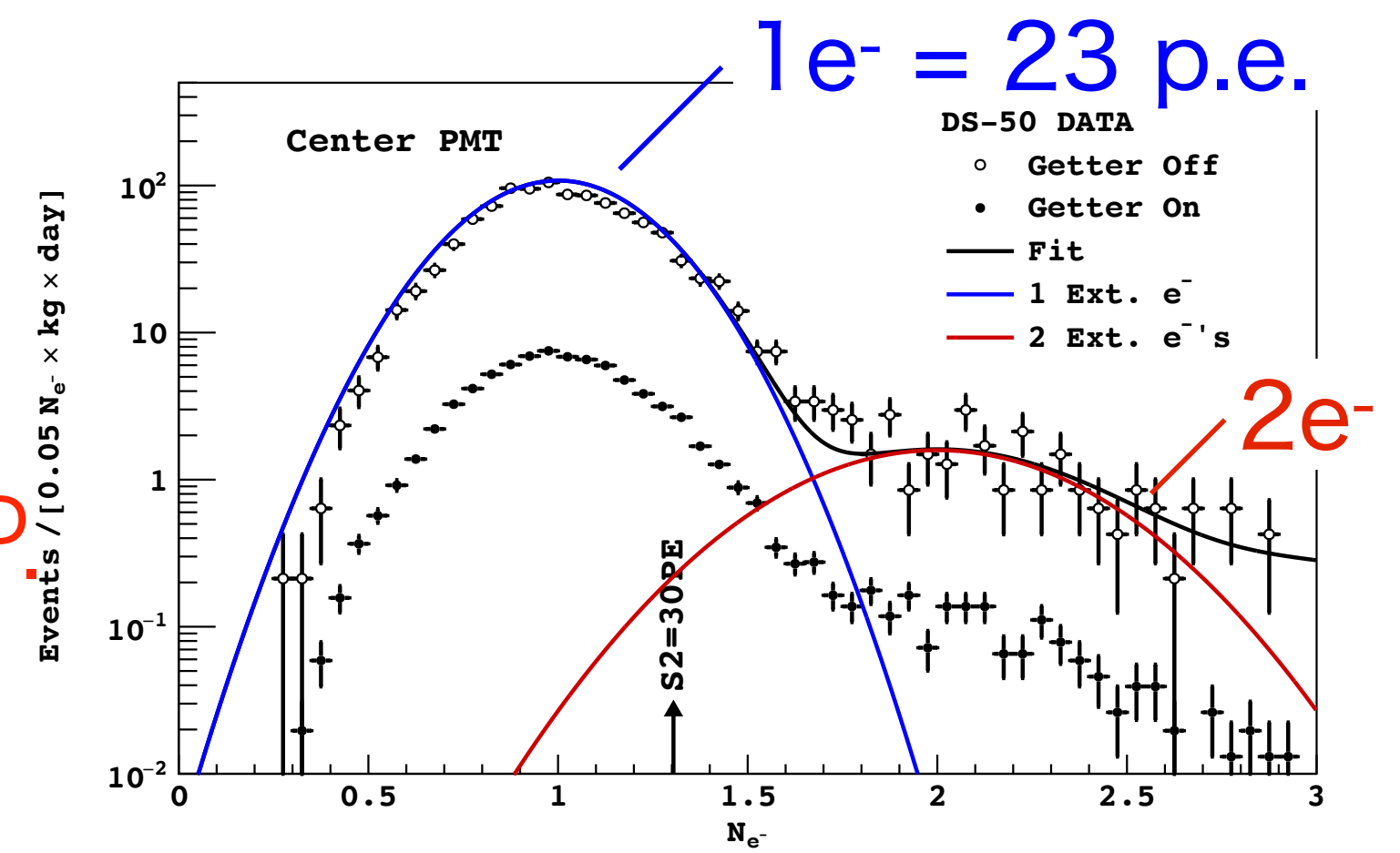
WASEDA University

Event Display

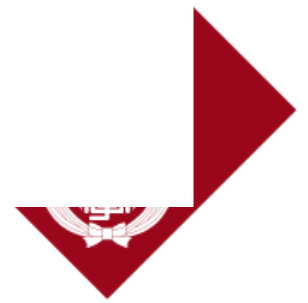
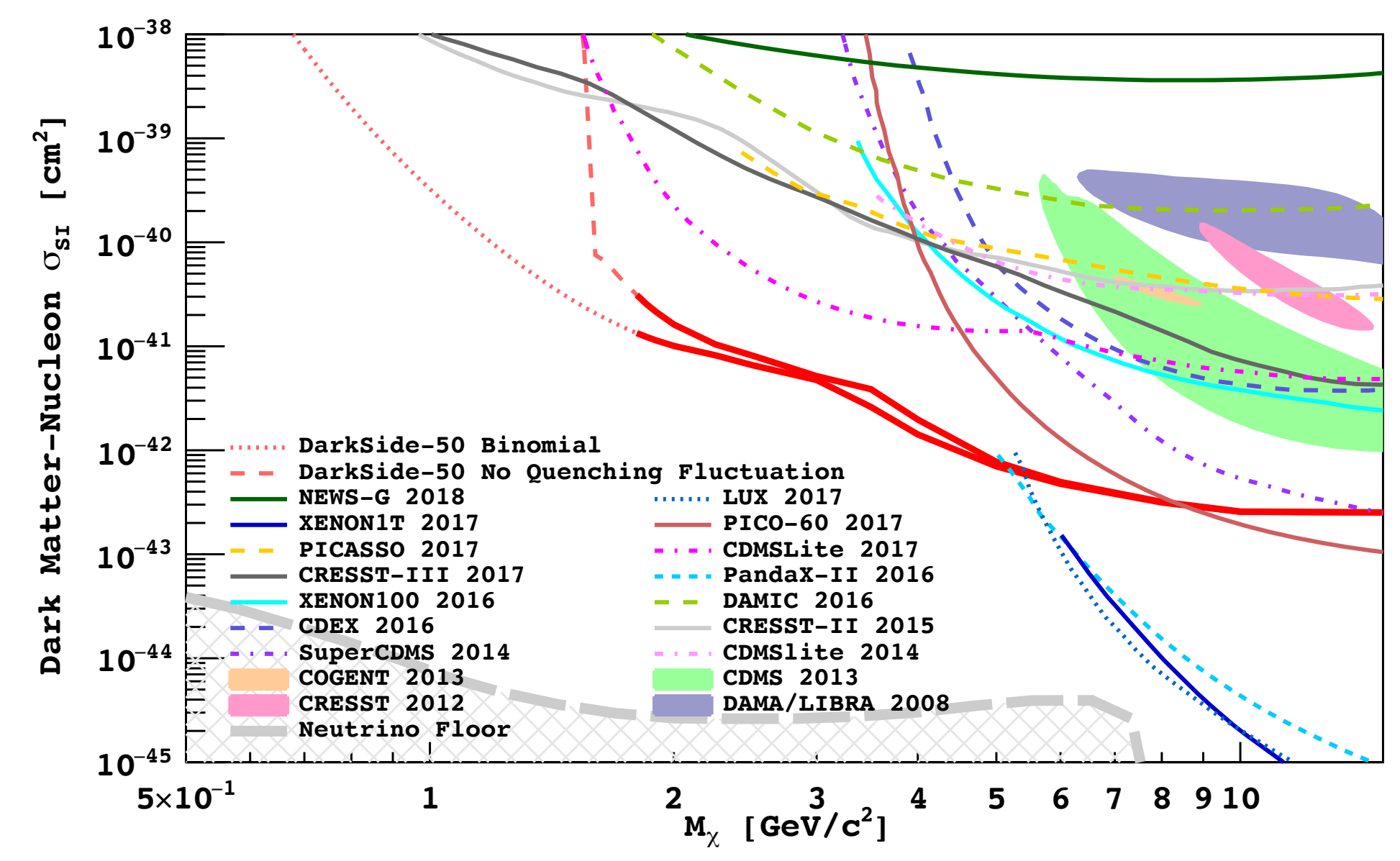
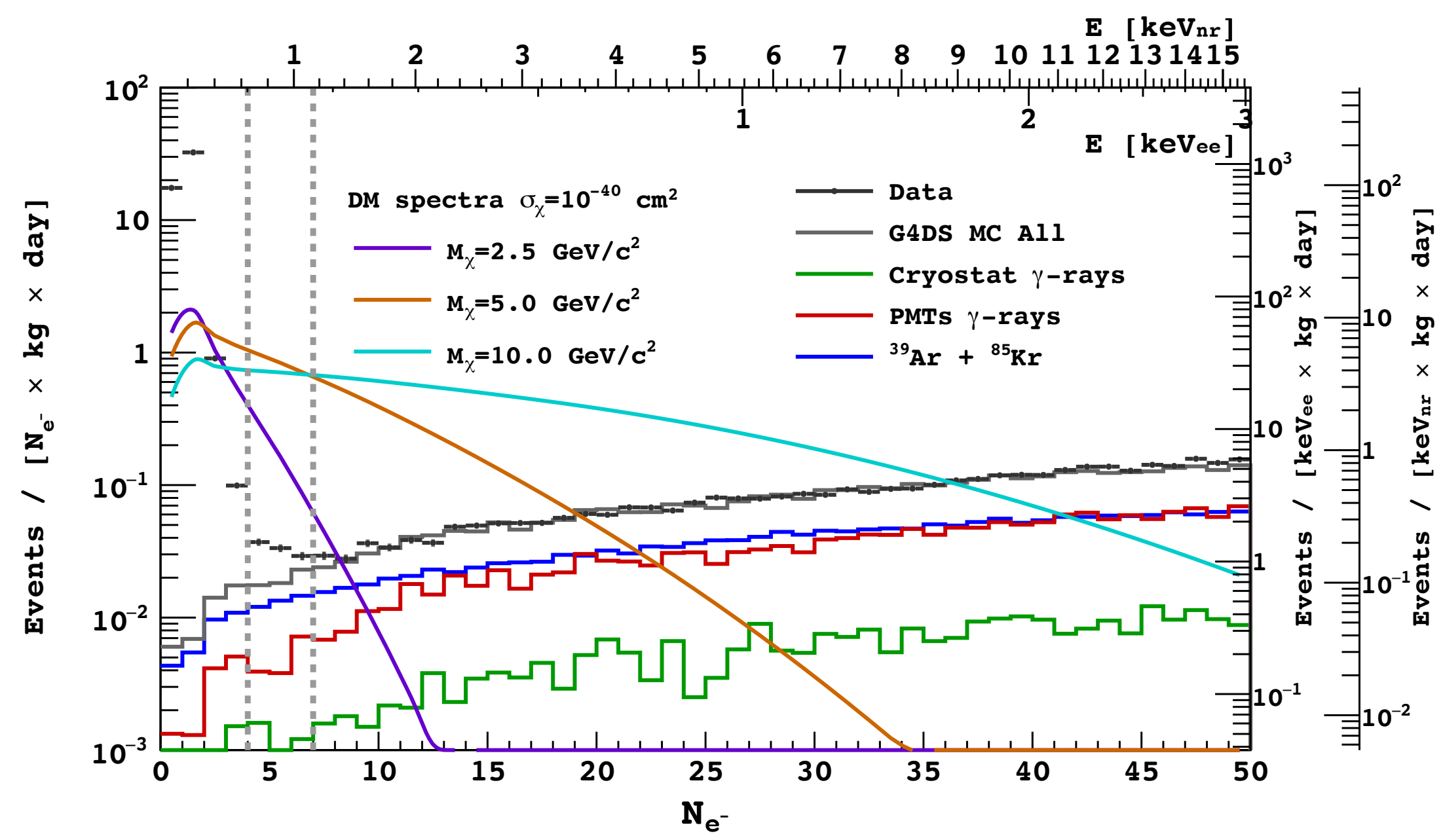


Result from DarkSide (PRL 121, 081307)

“S2-only” analysis by DarkSide-50 (@ LNGS).
 (Spectrum analysis without BG-rejection)

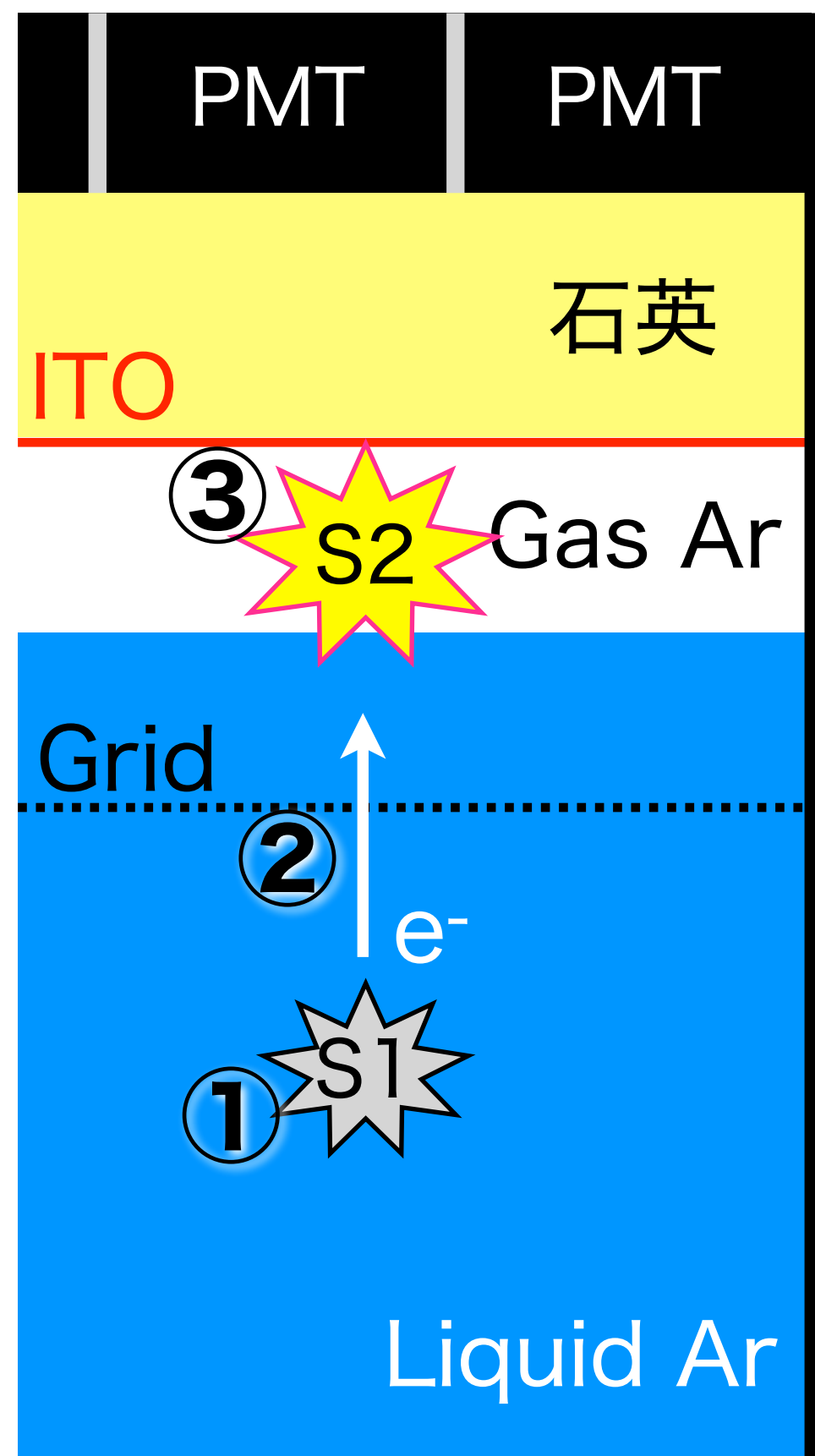
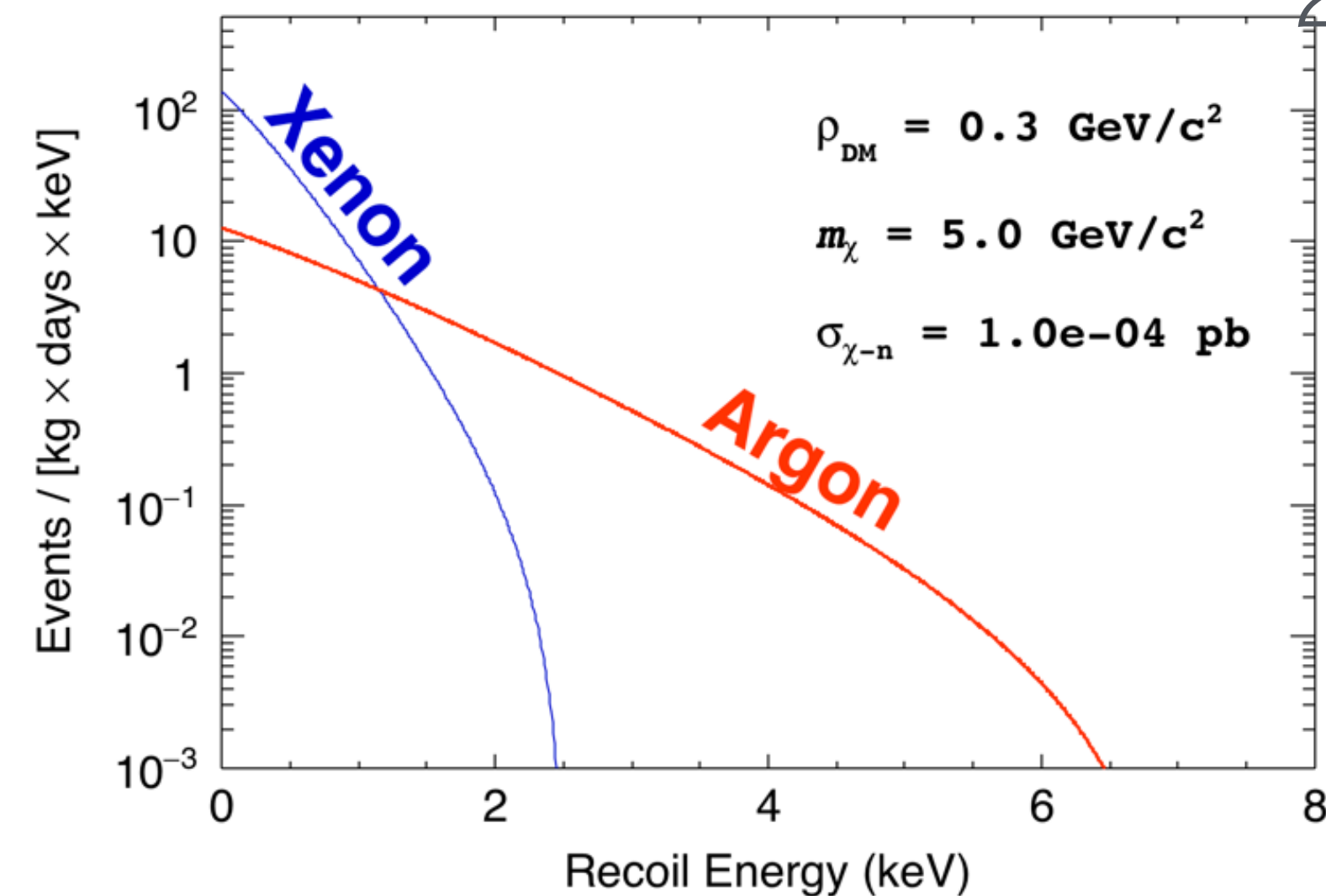


World's most stringent limits for 1.8 GeV WIMP.
 (4e- ≈ 0.6 keV_{nr} threshold)



LAr-TPCのS2信号

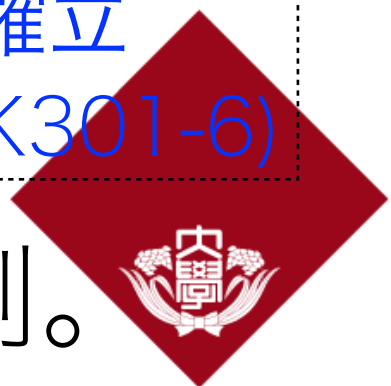
: アルゴンは比較的軽い元素 ($Z = 18$)
 → 液体アルゴンTPC (LAr-TPC) は, **S2の活用により**
低質量暗黒物質探索に強力な検出器になる。



: 検出器内で発生する過程ごとの較正や環境最適化により,
 探索感度の向上が考えられる。

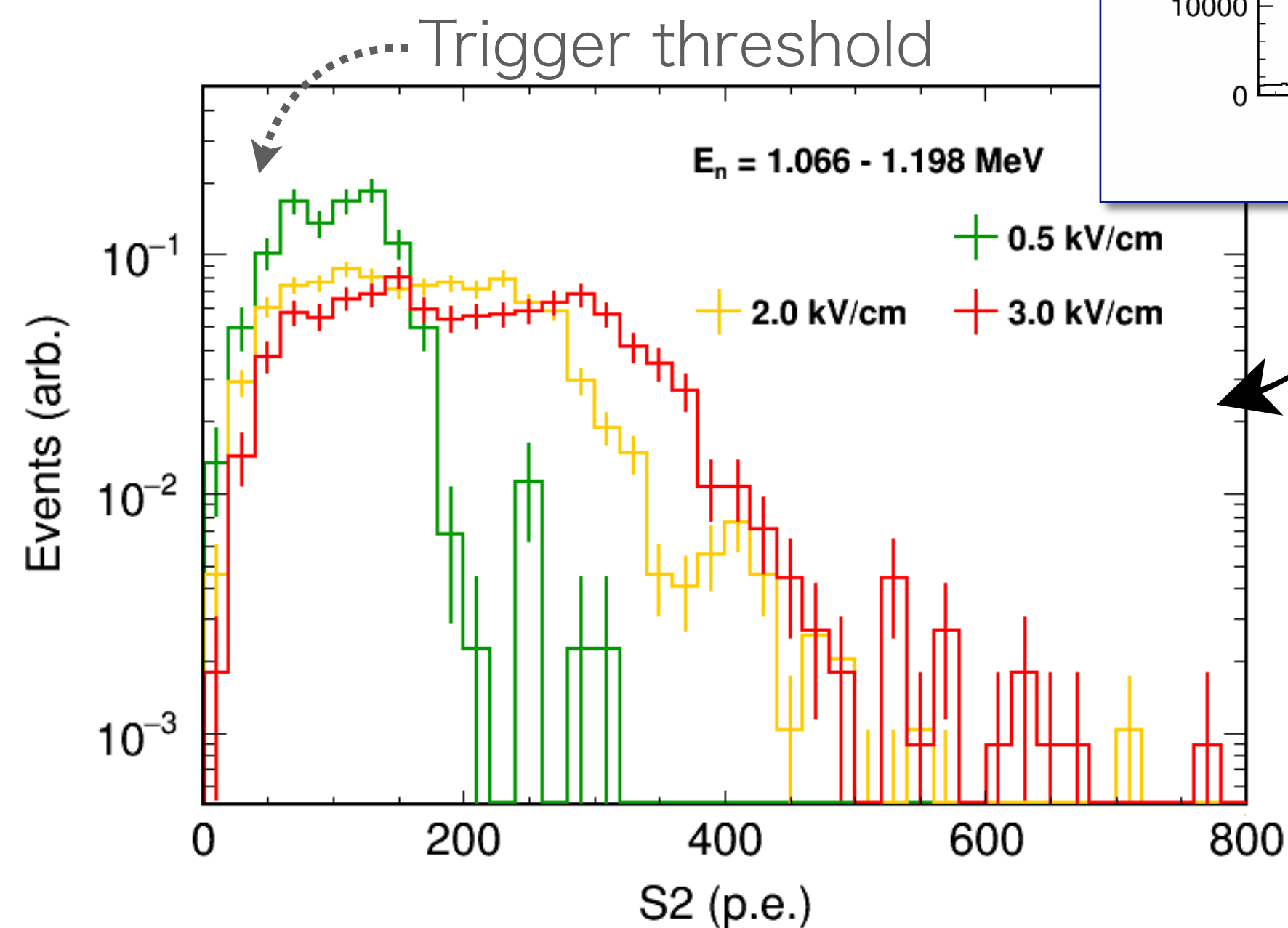
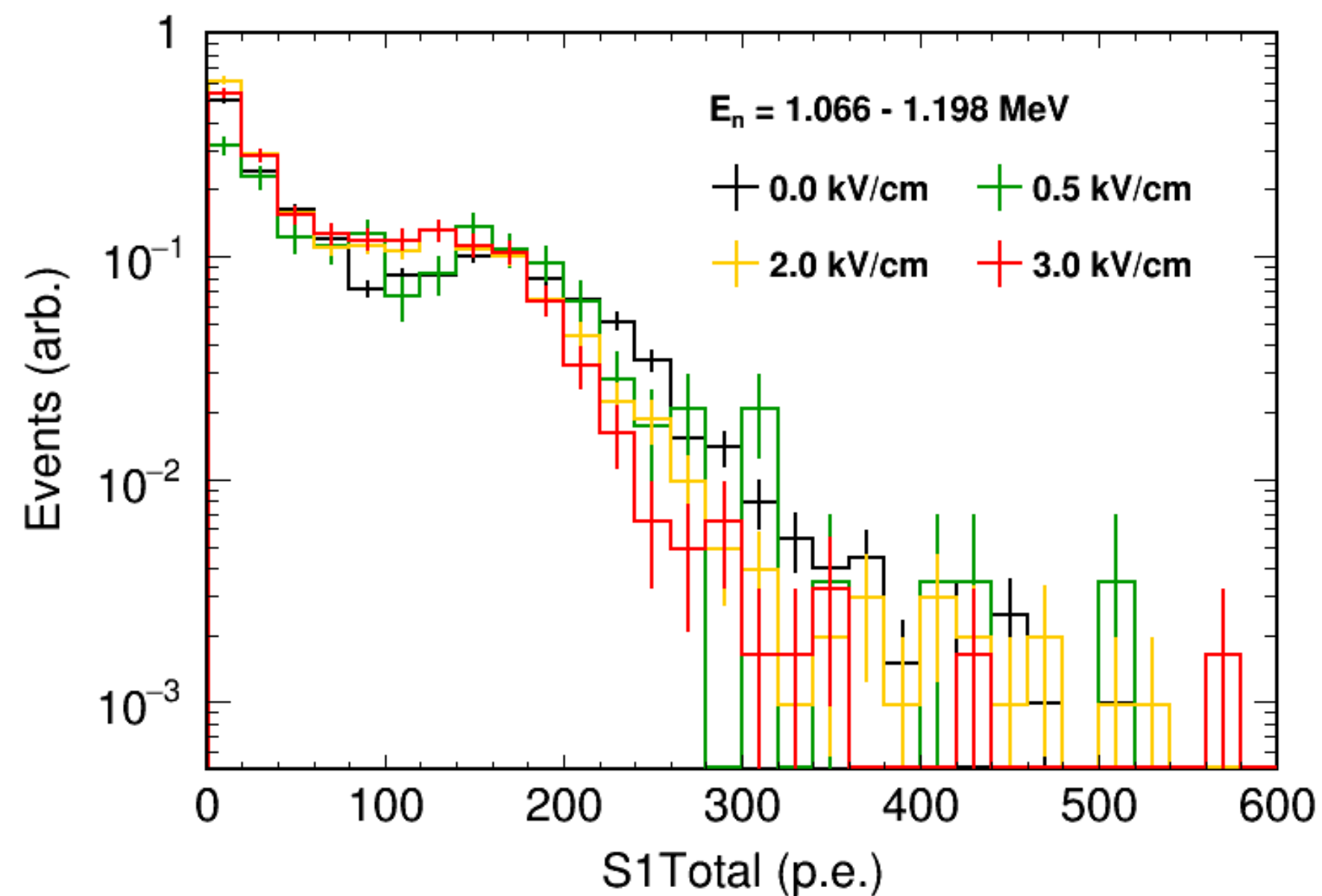
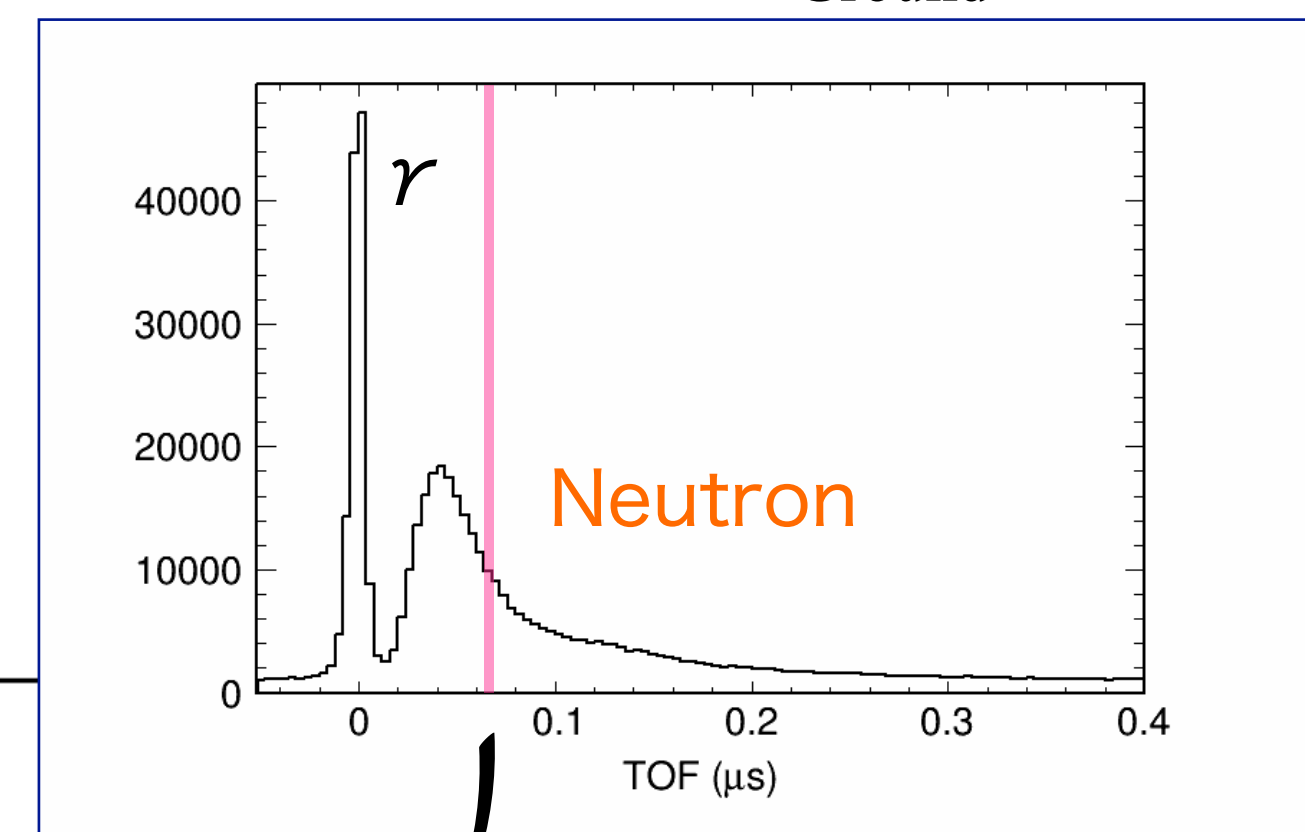
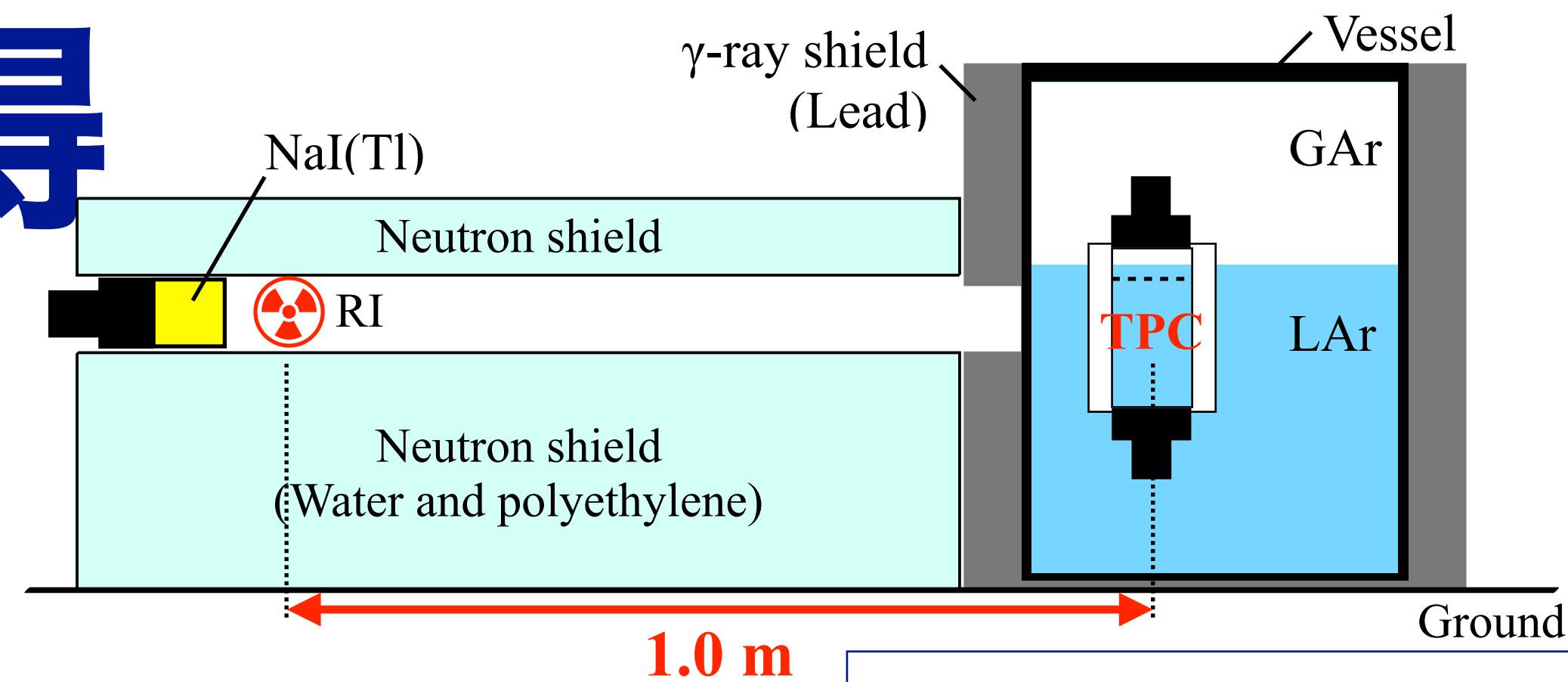
- ① 電場下における電離電子生成過程
 - アルゴンの相互作用により発生する電離電子数を決める
- ② 電子のドリフト・気相取り出し過程
 - 発生した電離電子からS2 (観測量) への変換成功確率
- ③ 低温気体アルゴンのEL発光過程
 - 電子 → S2の増幅率を決める, dV_{ext} と $-P_{gas}$ にほぼ比例。

↳ O₂/H₂O/N₂不純物の除去を確立
 (e.g. JPS2018年次大会 24pK301-6)



中性子データ取得

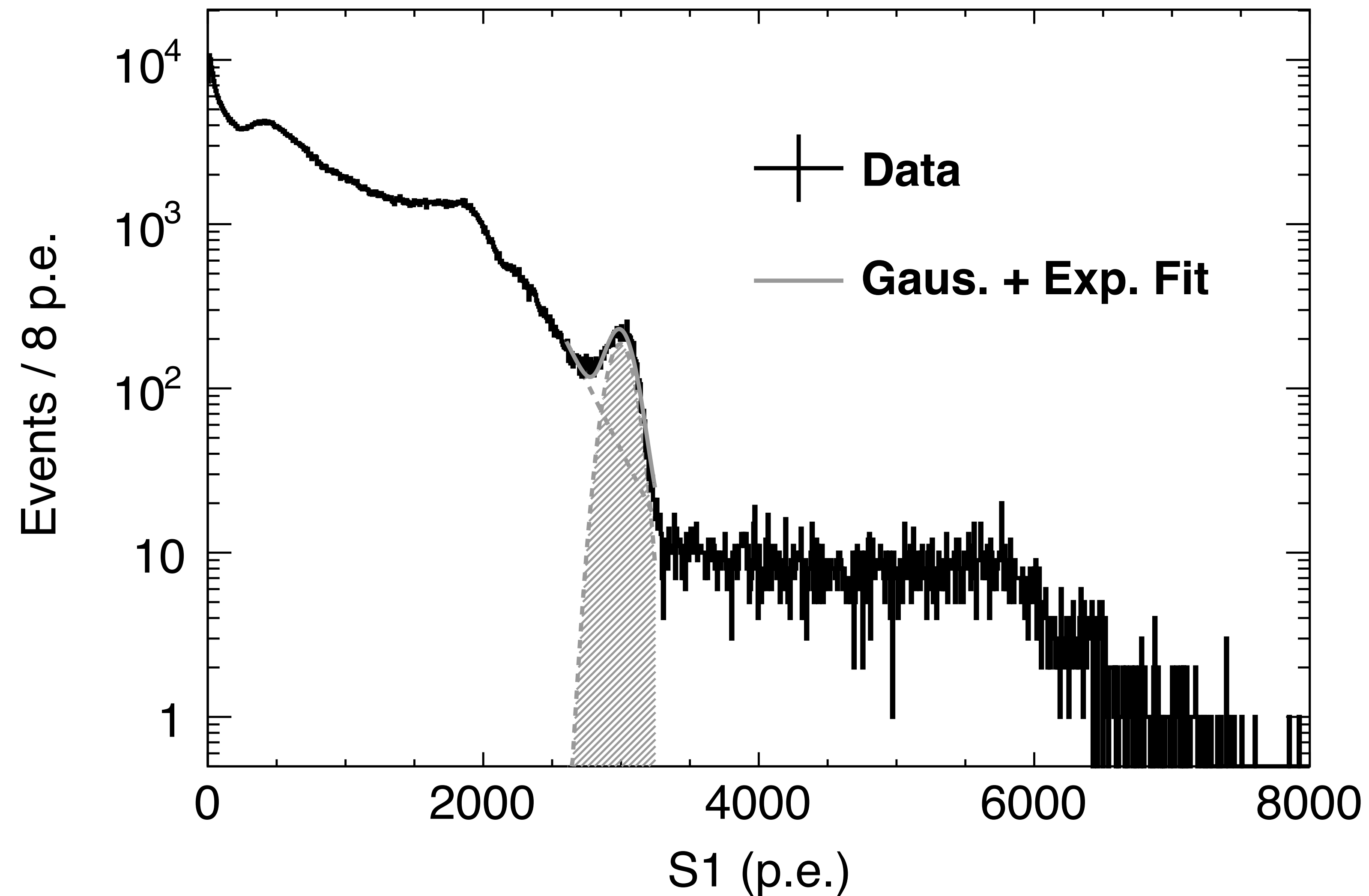
- : ^{252}Cf 線源を用いたNR事象サンプル
- : Drift E-Field = 0.0 - 3.0 kV/cm
- : TOF値 ($L = 1.0\text{ m}$) を用いて、
入射中性子エネルギーをイベントごとに特定。
→ 中性子エネルギーで区切って光量を比較。



$E_n = 1.1\text{ MeV}$
→ $\sim 100\text{ keV}_{nr}$



ER Light Yield



^{22}Na Back-to-back Run
(null-field)

5.9 p.e./keV_{ee}

