

気液2相型アルゴン光TPCの研究開発

早稲田大学

木村 真人 (ANKOK Group)



WASEDA University

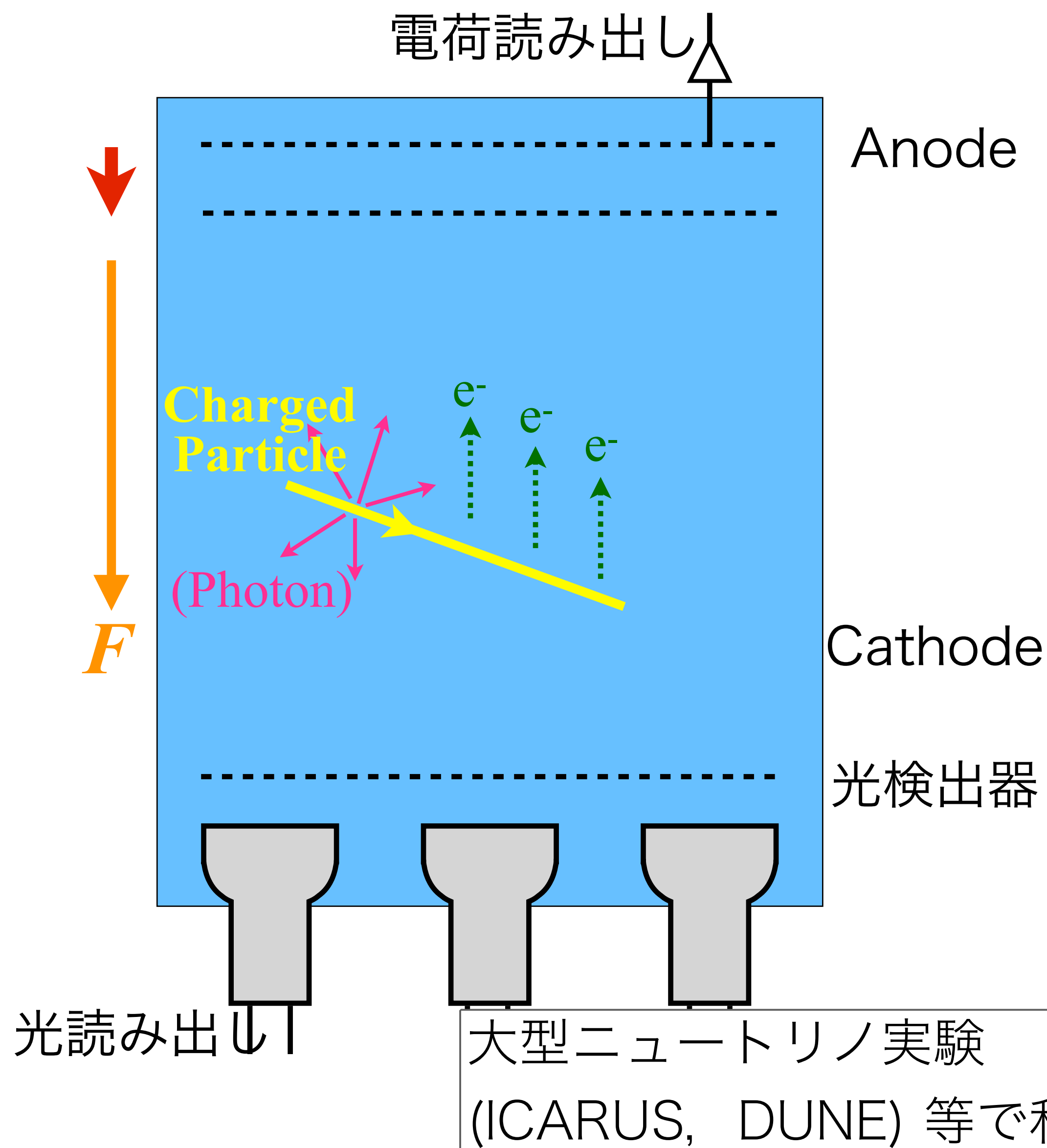
2019.12.06 | MPGD&TPC合同研究会 @ 理研-和光

液体アルゴン (LAr)

A.Hitachi et al., Phys.Rev.B **27**, 9 (1983)

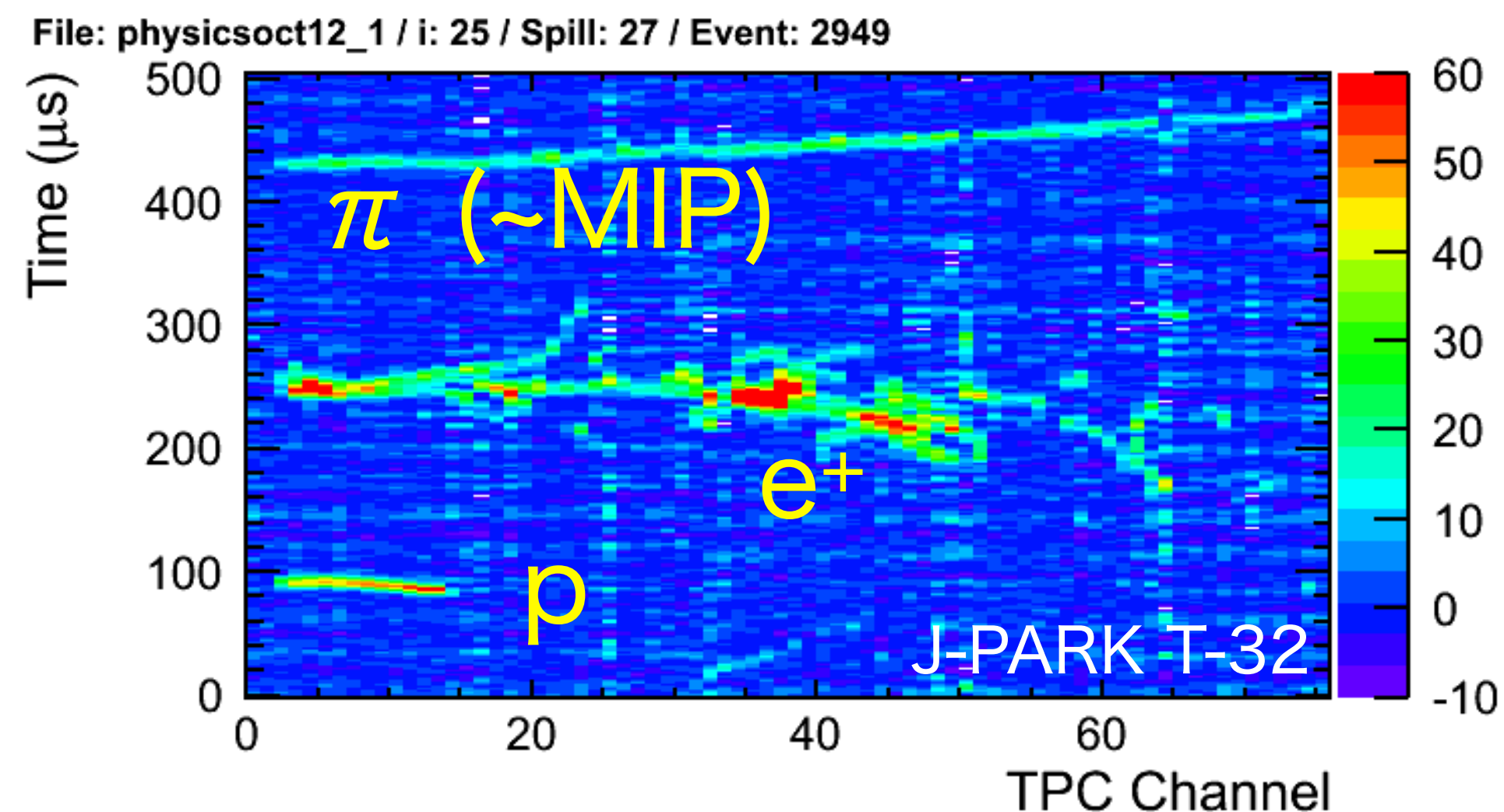
| | LHe | LNe | LAr | LKr | LXe | NaI(Tl) | 水 |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-----|
| 沸点@大気圧 (K) | 4.2 | 27 | 87 (→低温) | 120 | 165 | 1600 | 373 |
| 密度 (g/cm ³) | 0.125 | 1.2 | 1.4 | 2.4 | 3.0 | 3.67 | 1 |
| 放射長 (cm) | 755 | 24 | 13 | 4.9 | 2.8 | 2.6 | 36 |
| W値 (蛍光) (eV) | 100 | 26 | 19.5 | 15.5 | 14.7 | 40000 ph/MeV | — |
| W値 (電離) (eV) | 42.3 | 36.6 | 23.3 | 18.6 | 15.6 | — | — |
| 蛍光波長 (nm) | 80 | 78 | 128 | 150 | 175 | 420 | — |
| 時定数 (Singlet) | 10 ns | 18 ns | 6 ns | 8.6 ns | 4 ns | 200 ns | — |
| 時定数 (Triplet) | 13 s | 15 μs | 1.6 μs | 350 ns | 22 ns | / 1 μs | — |
| 大気中の割合 (%) | 5×10 ⁻⁴ | 2×10 ⁻³ | 0.93(→安価) | 1×10 ⁻⁴ | 9×10 ⁻⁶ | — | < 4 |

Liq.-Ar TPC

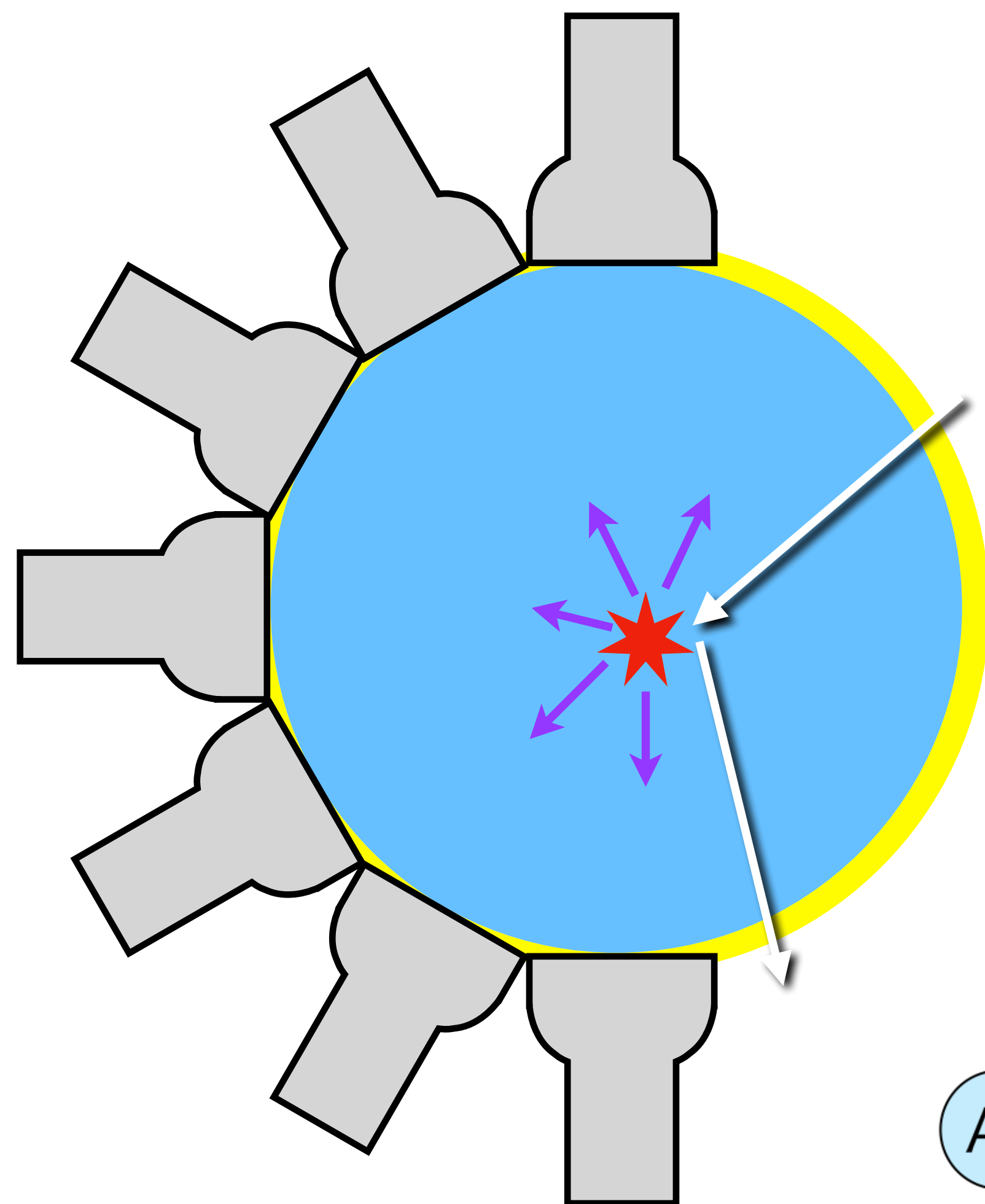


: 荷電粒子と液体アルゴンが相互作用,
軌跡に沿って電離電子を生成

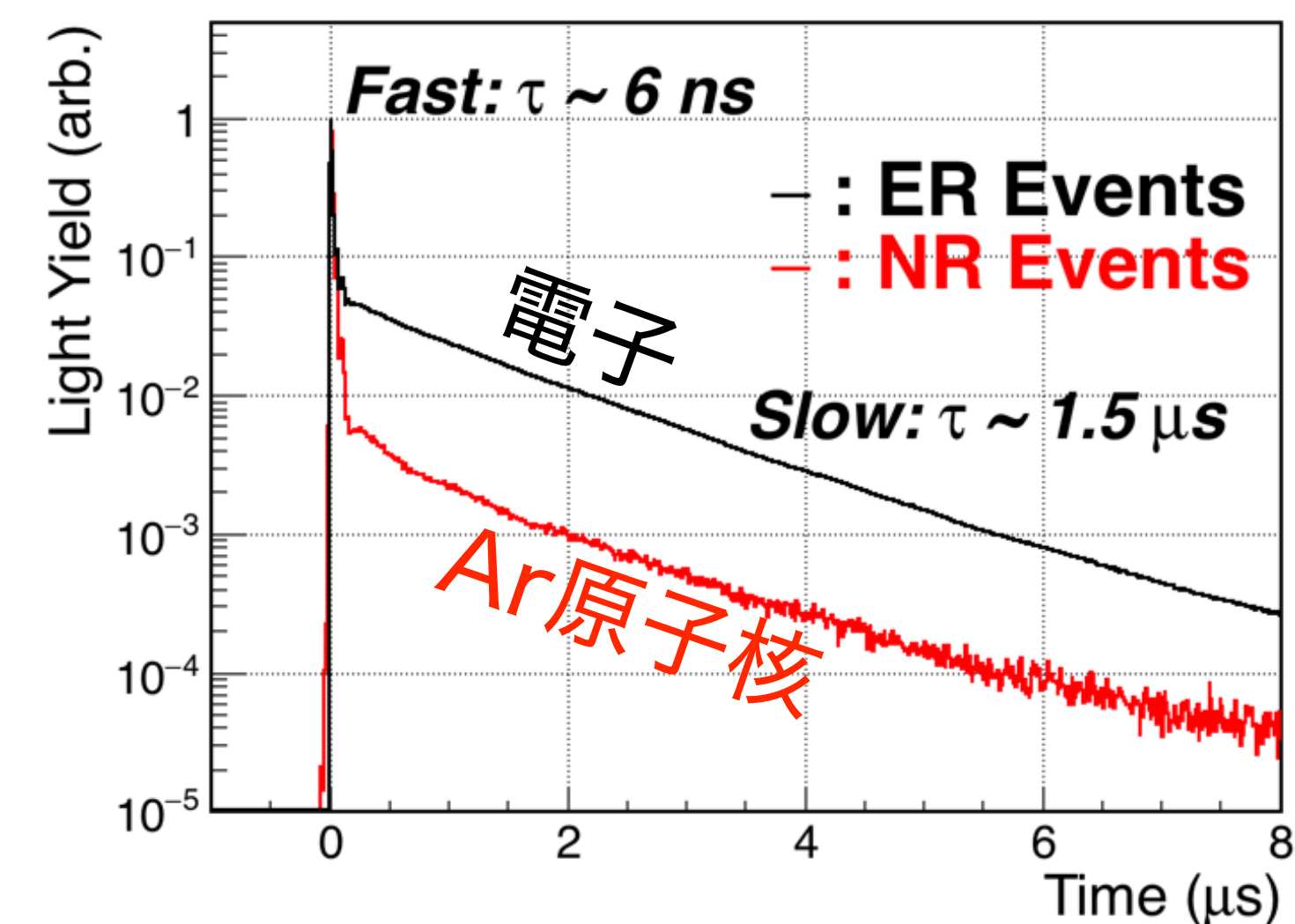
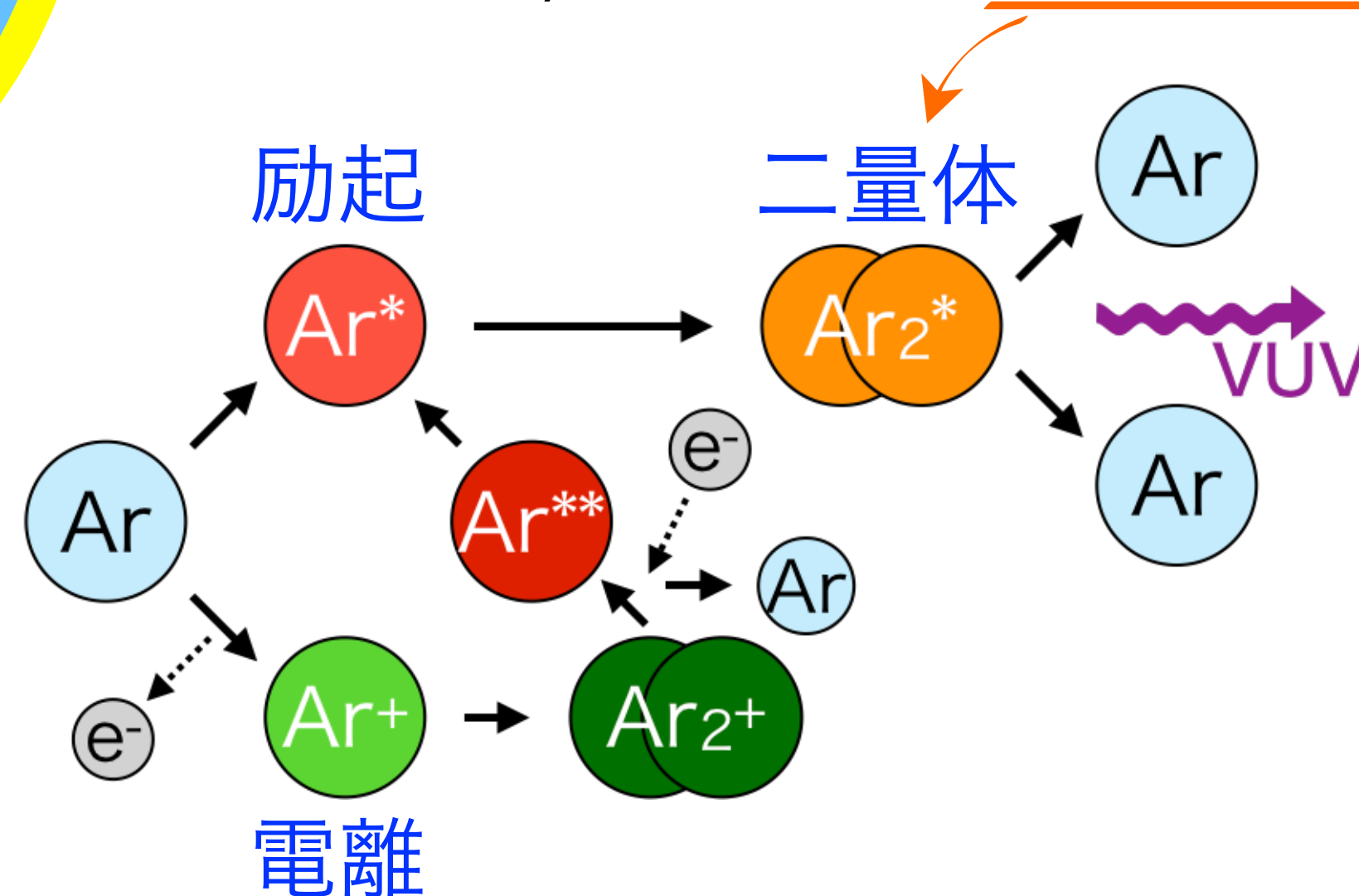
- $\sim 40,000 e^- / \text{MeV}$
- 電子：アルゴン中をドリフト
(Arは無極性,
不純物 ($\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}$) があると吸収される)
- : **飛跡検出器 (TPC)** として機能
- 電荷 (xy) + 光信号と電荷信号の時間差 (z)



Liq.-Ar Scintillator

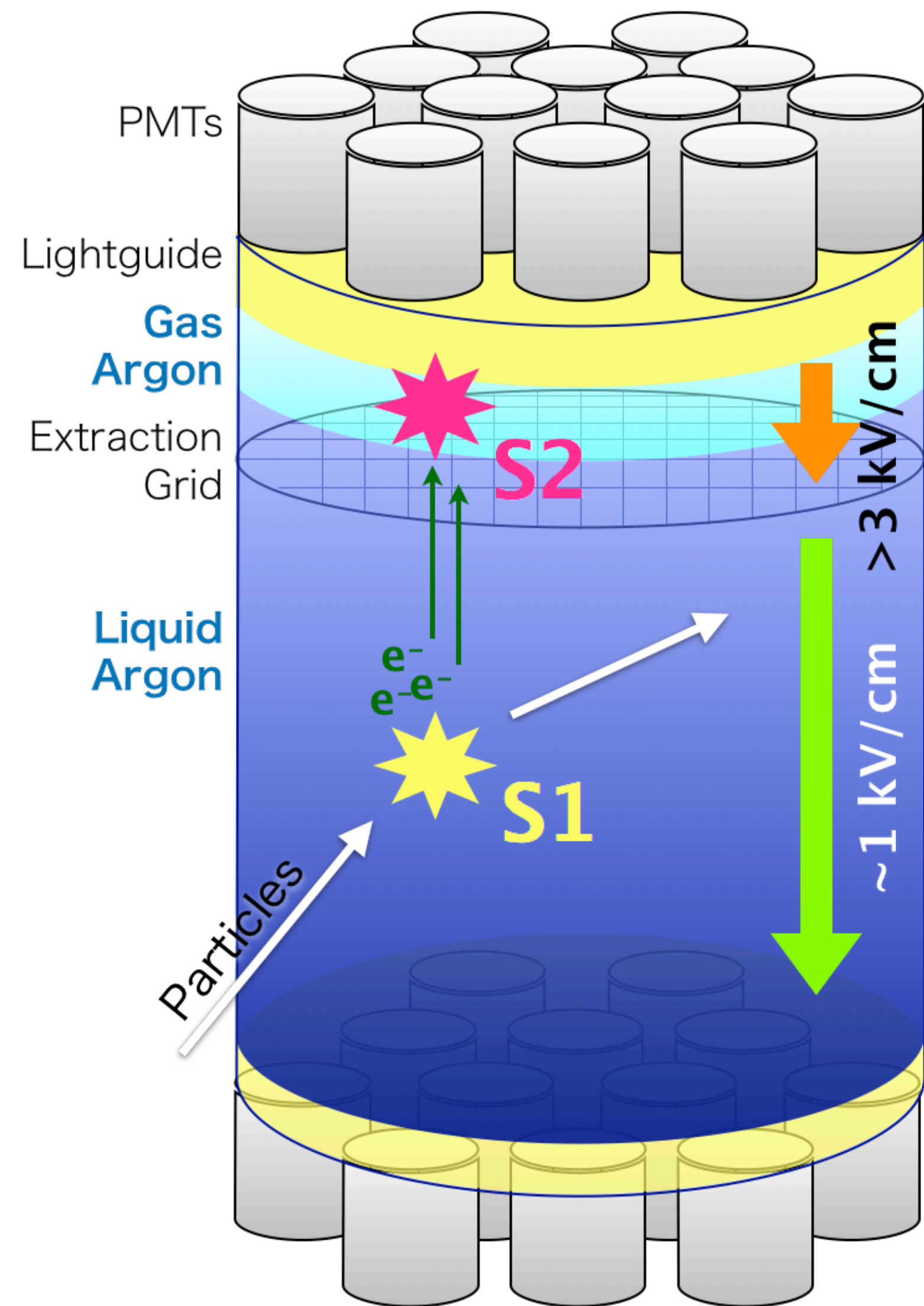


- : 荷電粒子との相互作用でシンチレーション光を放出
 - ~40,000 photon/MeV
(電離電子も0電場下では再結合して光子に変換)
 - 波長: 128 nm (真空紫外)
(2量体の脱励起による放出, アルゴンはほぼ透明)
- : シンチレーション波形による強力な粒子弁別
 - dE/dx により二量体の励起状態比 ($^1\Sigma$ or $^3\Sigma$) が変化



暗黒物質探索実験
(DEAP) 等での利用

Double-Phase Argon TPC⁵



: 気液2相型アルゴン光TPC

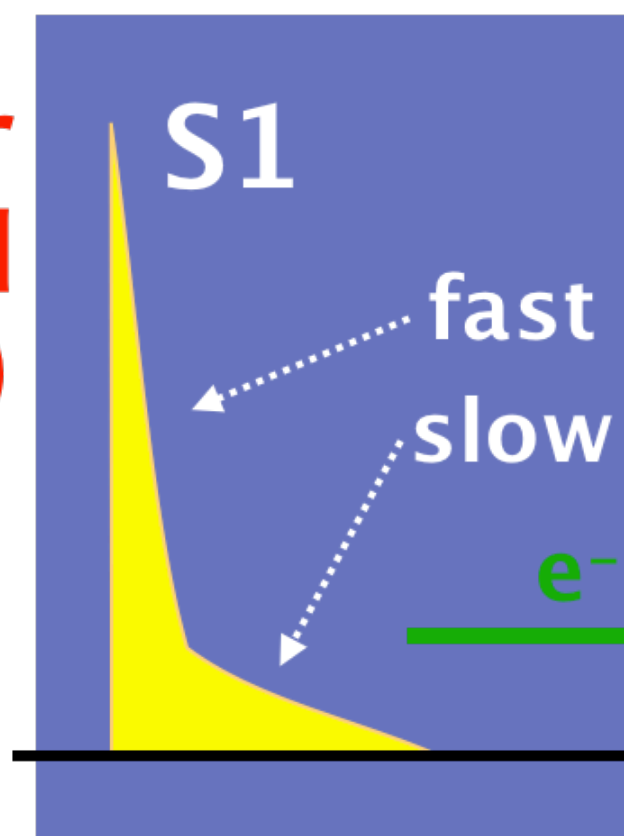
ドリフト電子を高電場 (>3 kV/cm) で気相へ取り出し

: シンチレーション光 (S1) と,

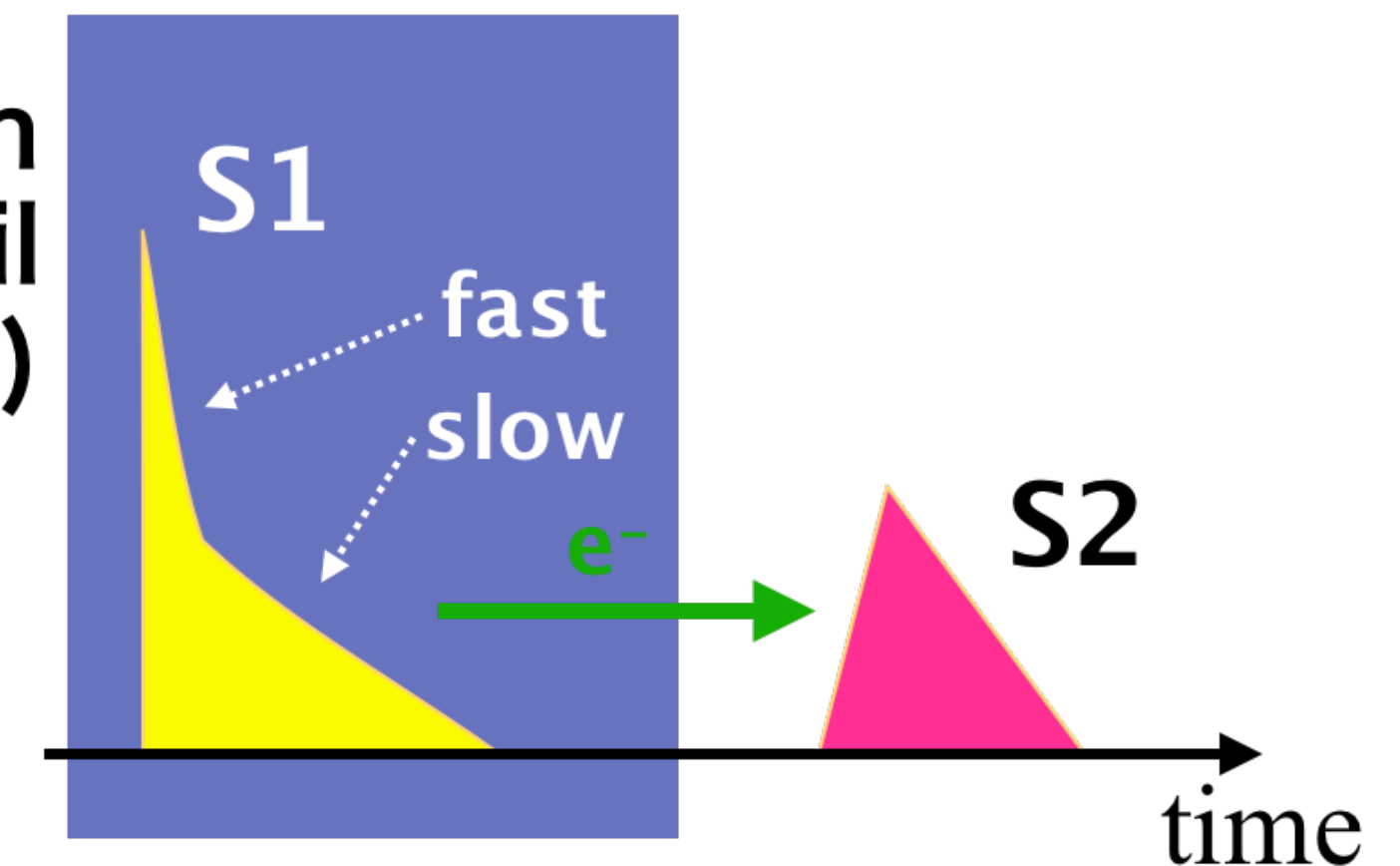
電離電子によるエレクトロルミネセンス光 (S2) を検出

- 低エネルギー (~keV or 1電子信号) 事象に有感
& 3次元位置再構成 (“TPC”)
- 電子反跳事象と原子核反跳事象を強力に弁別
(S1波形 \otimes S2/S1比)

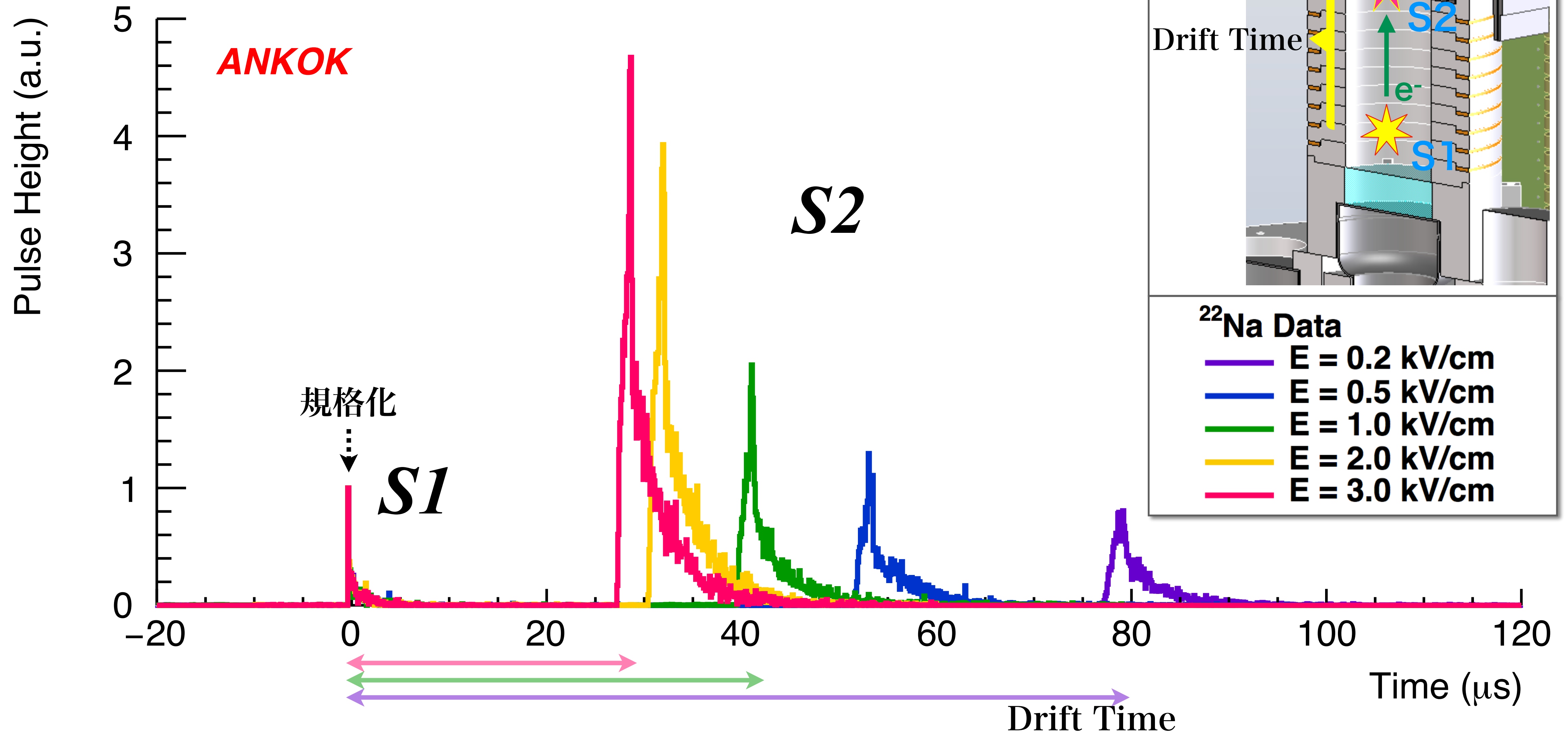
Nuclear Recoil (χ/n)



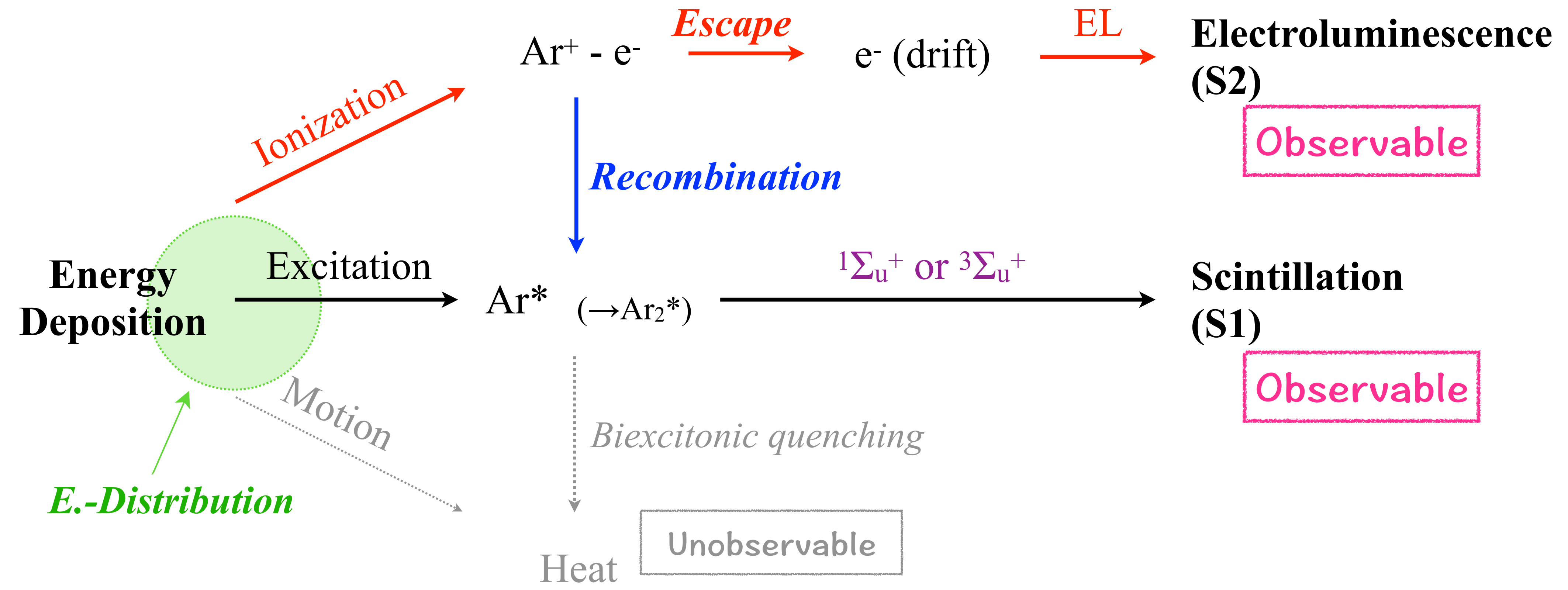
Electron Recoil (β/γ)



Event Display



Liq.-Ar Response



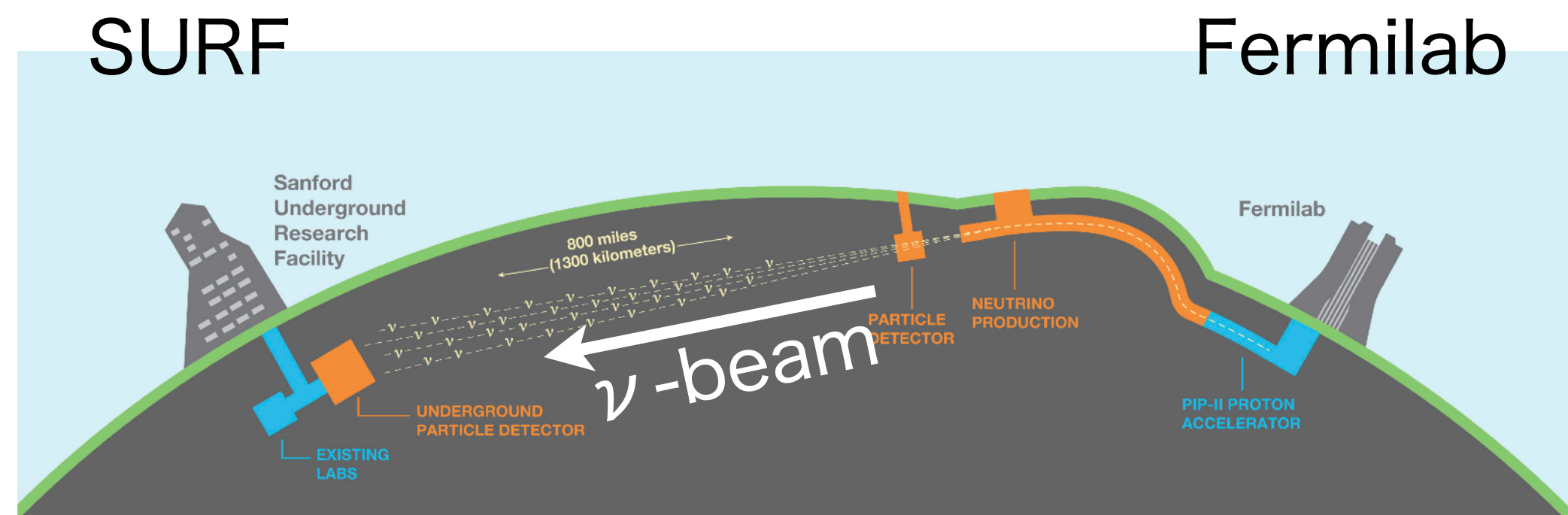
Energy Distribution
 電場や粒子種に依存?

Recombination Prob.
 電場 $\downarrow \rightarrow$ 再結合 \uparrow
 $dE/dx \uparrow \rightarrow$ 再結合 \uparrow

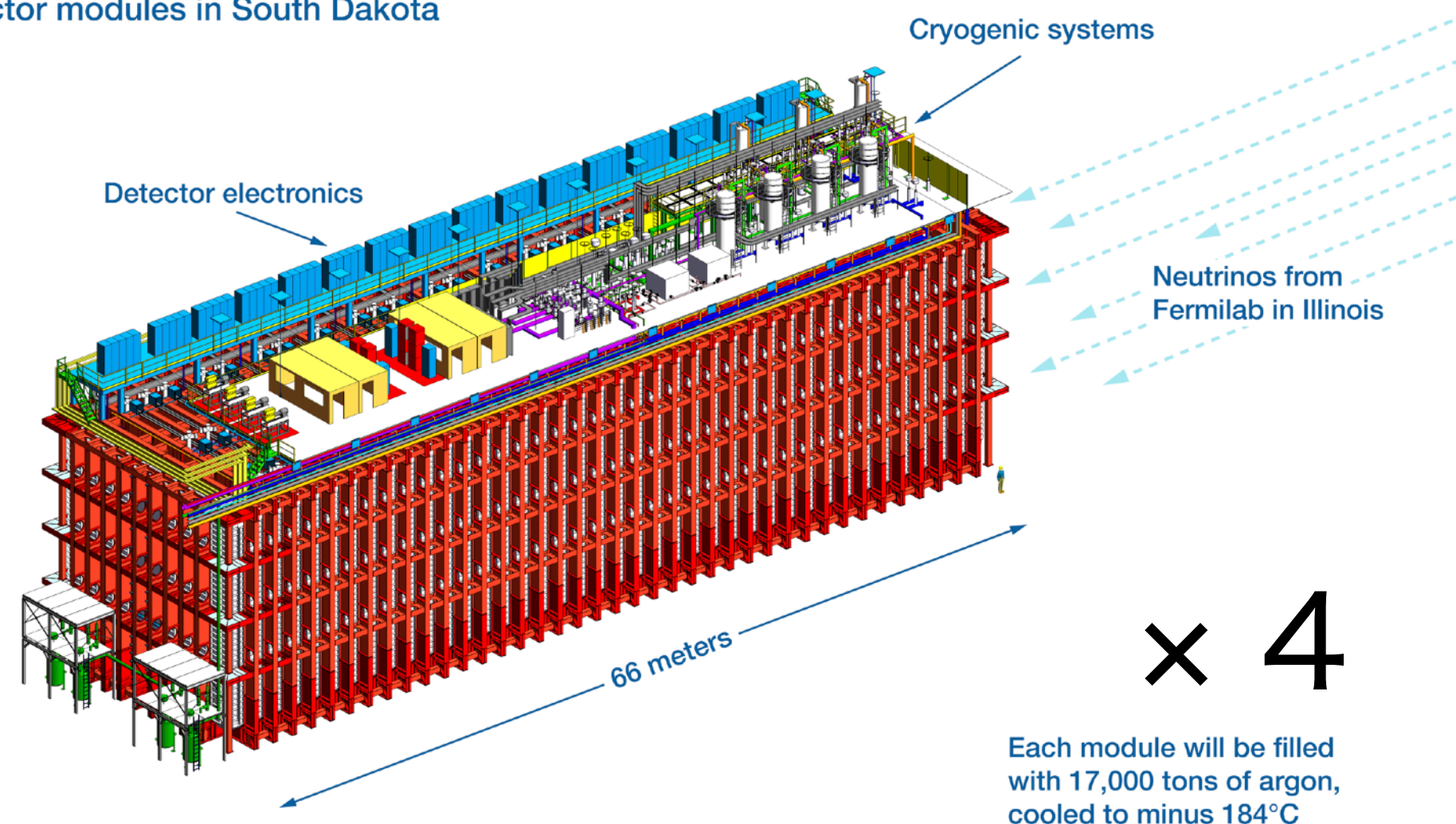
Excitation State
 波形弁別の原理
 電場や dE/dx に依存

: DUNE (米英等) @ Sanford

- ニュートリノ振動 / 核子崩壊探索実験
- Ar-TPC (1相&2相) 17,000 t × 4基
- 建設開始, ~2026年実験開始予定



Deep Underground Neutrino Experiment
One of four detector modules in South Dakota

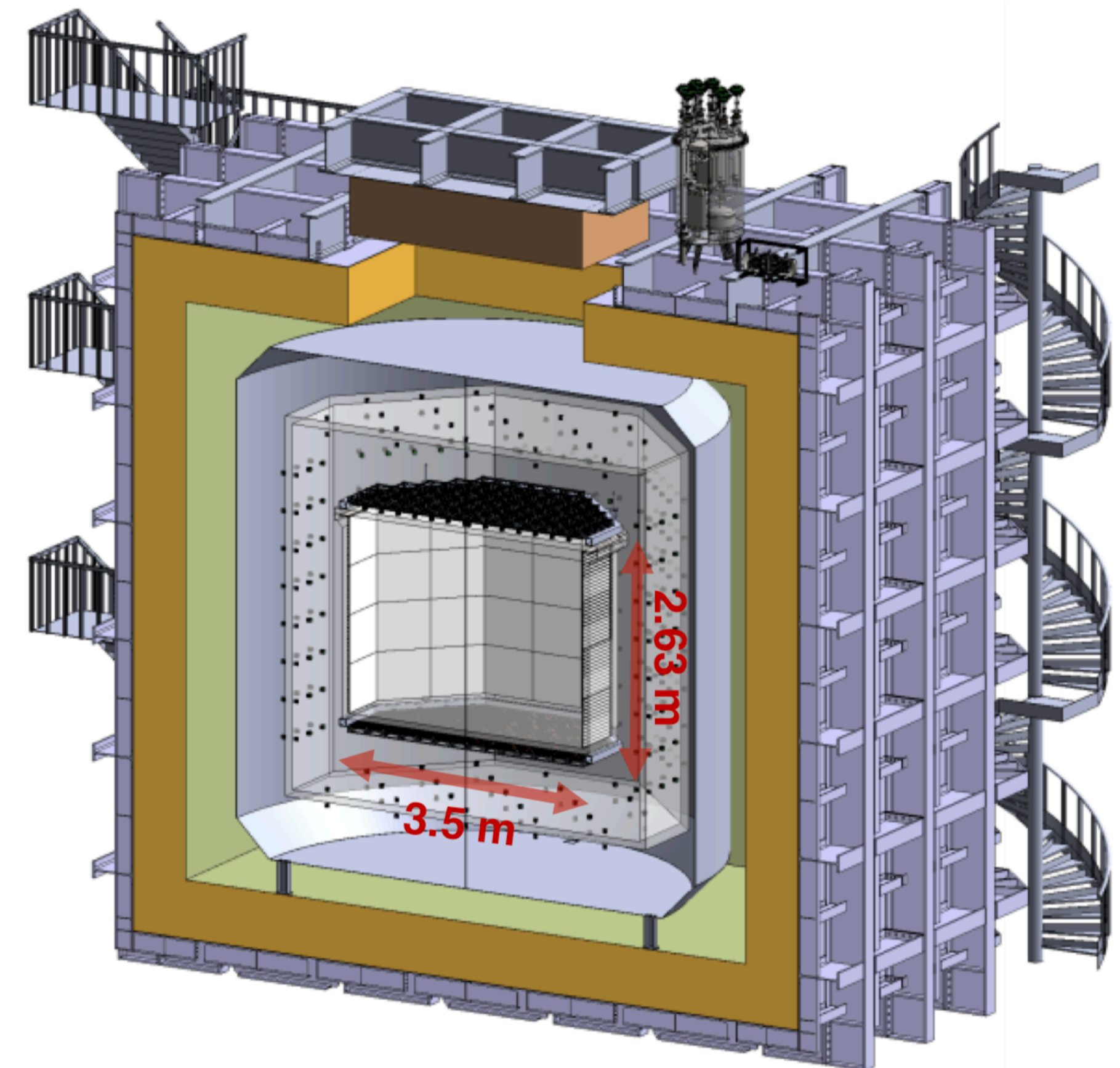


Detector located 1.5 kilometers underground at Sanford Lab

Each module will be filled with 17,000 tons of argon, cooled to minus 184°C

: DarkSide (伊米等) @ Gran Sasso⁸

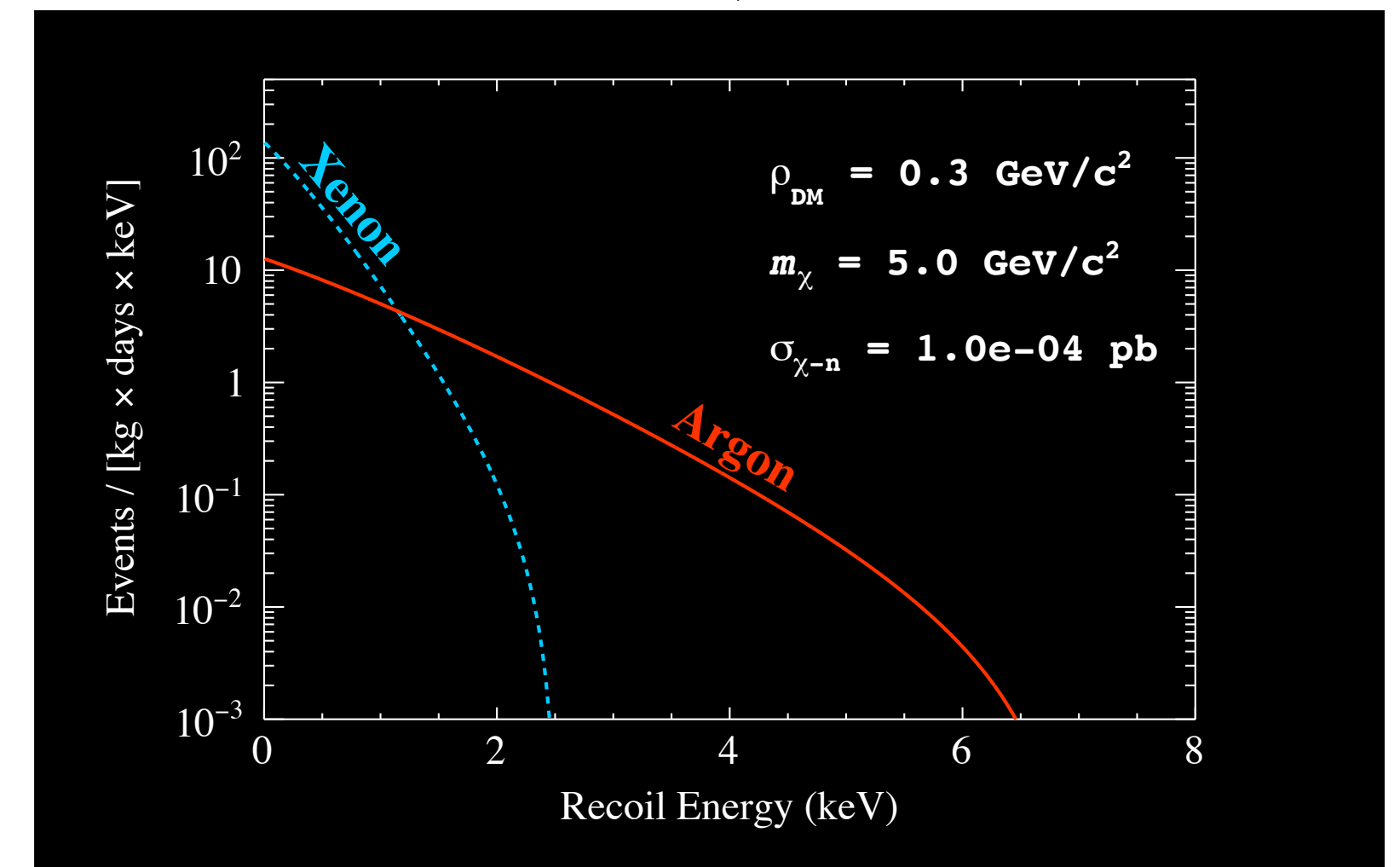
- 暗黒物質 (WIMP) 直接探索実験
- “DarkSide-20k” : Ar2相光TPC 39t
- 建設中, ~2023年実験開始予定



ANKOK Group

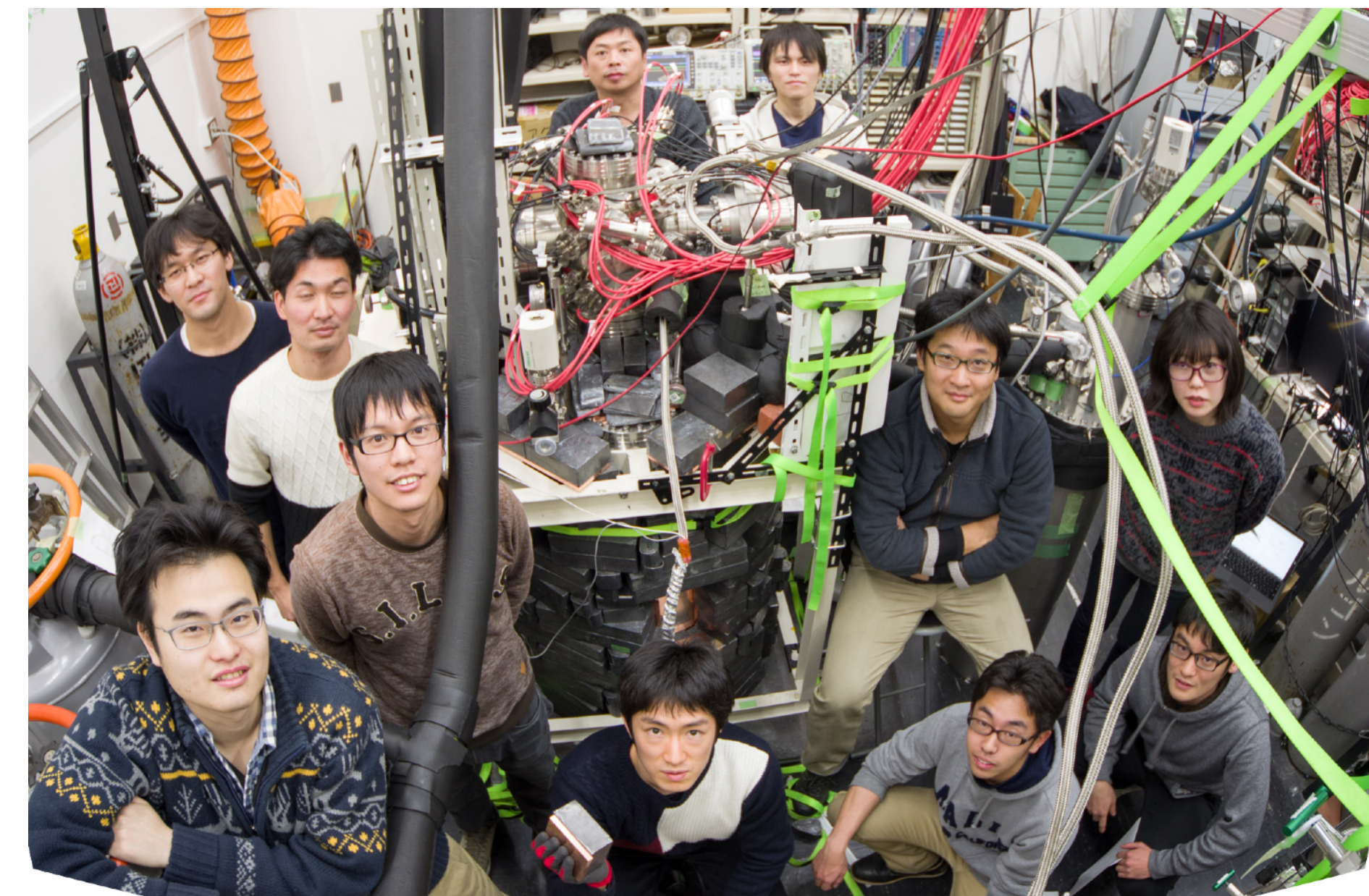
- : 液体アルゴン光検出器による
宇宙暗黒物質直接探索実験 (R&D phase)
 - 低質量WIMP ($<10 \text{ GeV}/c^2$) 探索に主眼
- : 低エネルギー ($\sim 10 \text{ keV}$) 稀事象探索
 - 高感度検出器構築と,
検出器応答の詳細理解 (背景事象分離) が鍵

WIMP-Ar 反跳エネルギー



最近の成果

- “Measurement of the scintillation efficiency for nuclear recoils in liquid argon under electric fields up to 3 kV/cm”, PRD 100 (2019), 032002.
- “Scintillation and Ionization Ratio of Liquid Argon for Electronic and Nuclear Recoils at Drift-Fields up to 3 kV/cm”, NIMA 910 (2018), 22-25.
- “Performance of VUV-sensitive MPPC for Liquid Argon Scintillation Light”, NIMA 833 (2016), 239-244.
- “気液2相型アルゴン光TPC検出器による暗黒物質探索実験 (ANKOK)”, 高エネルギーニュース Vol.36 No.4 180-188 (2018)

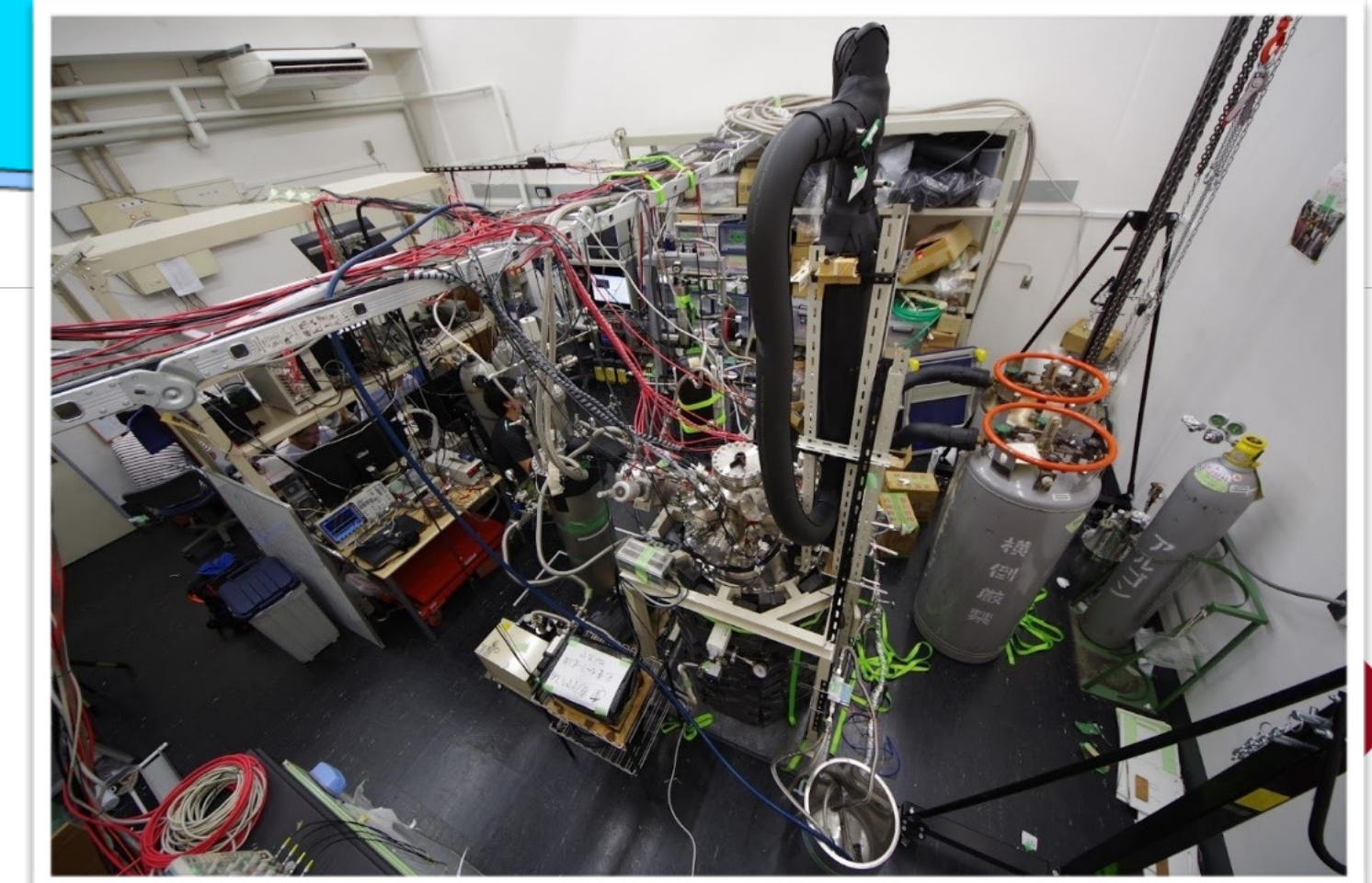
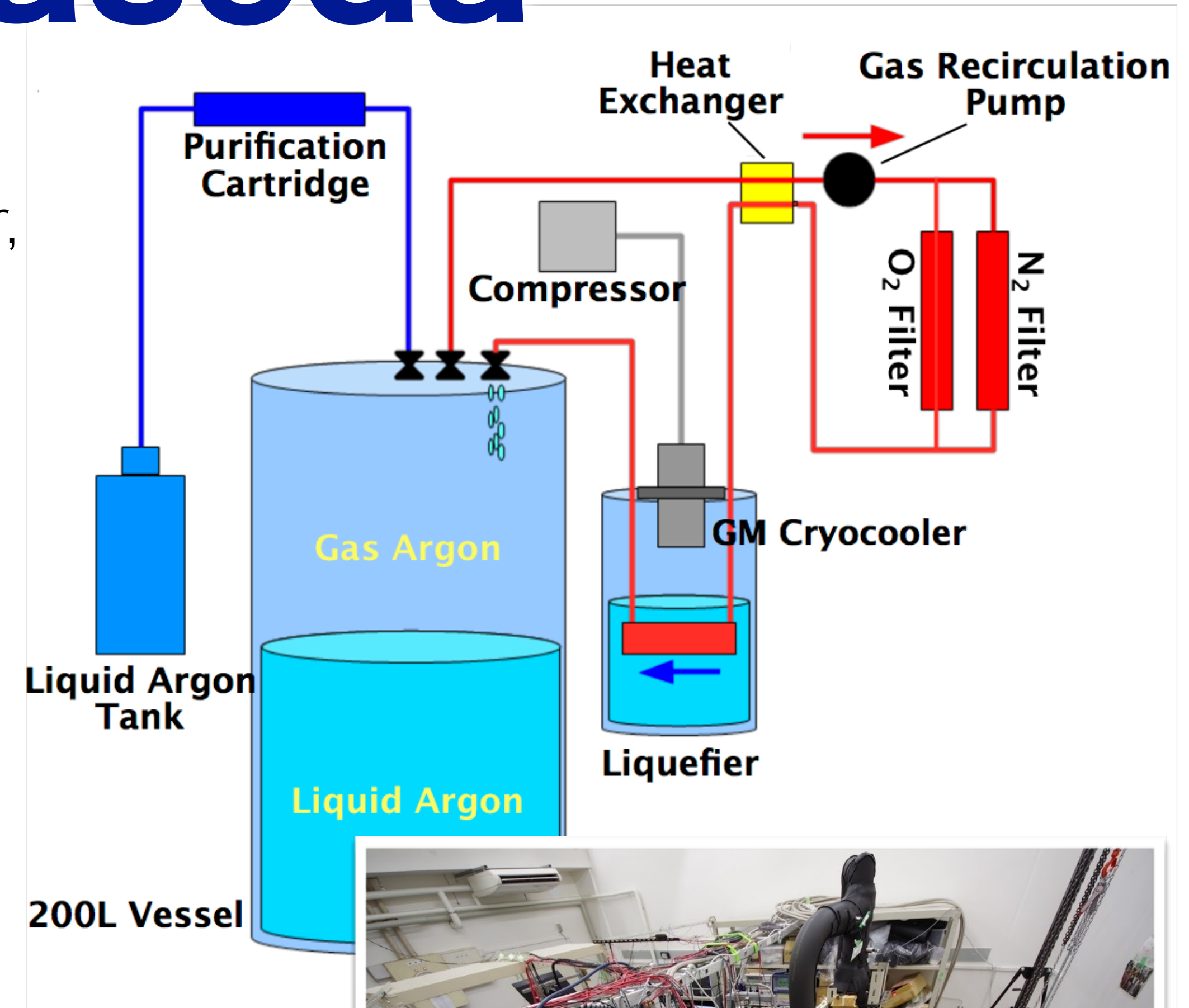
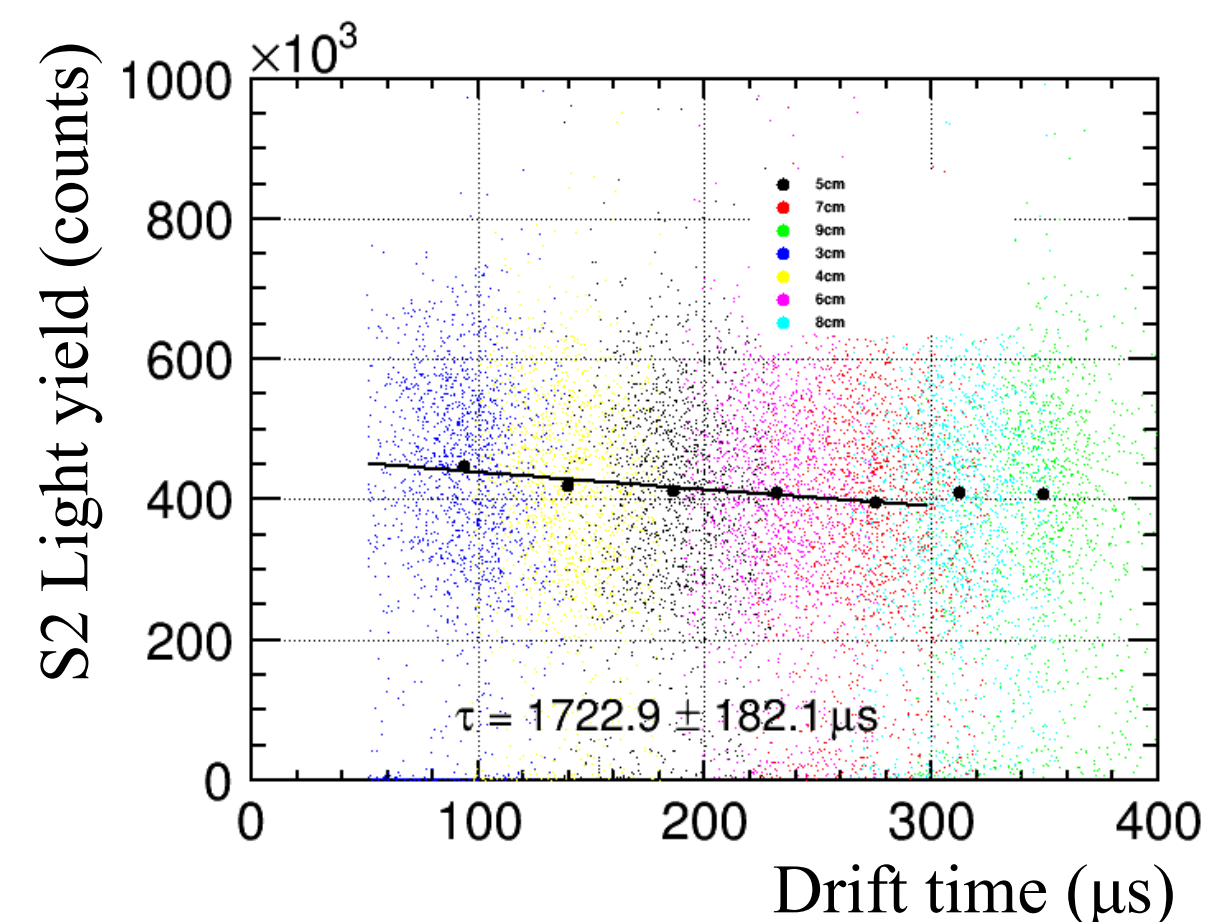
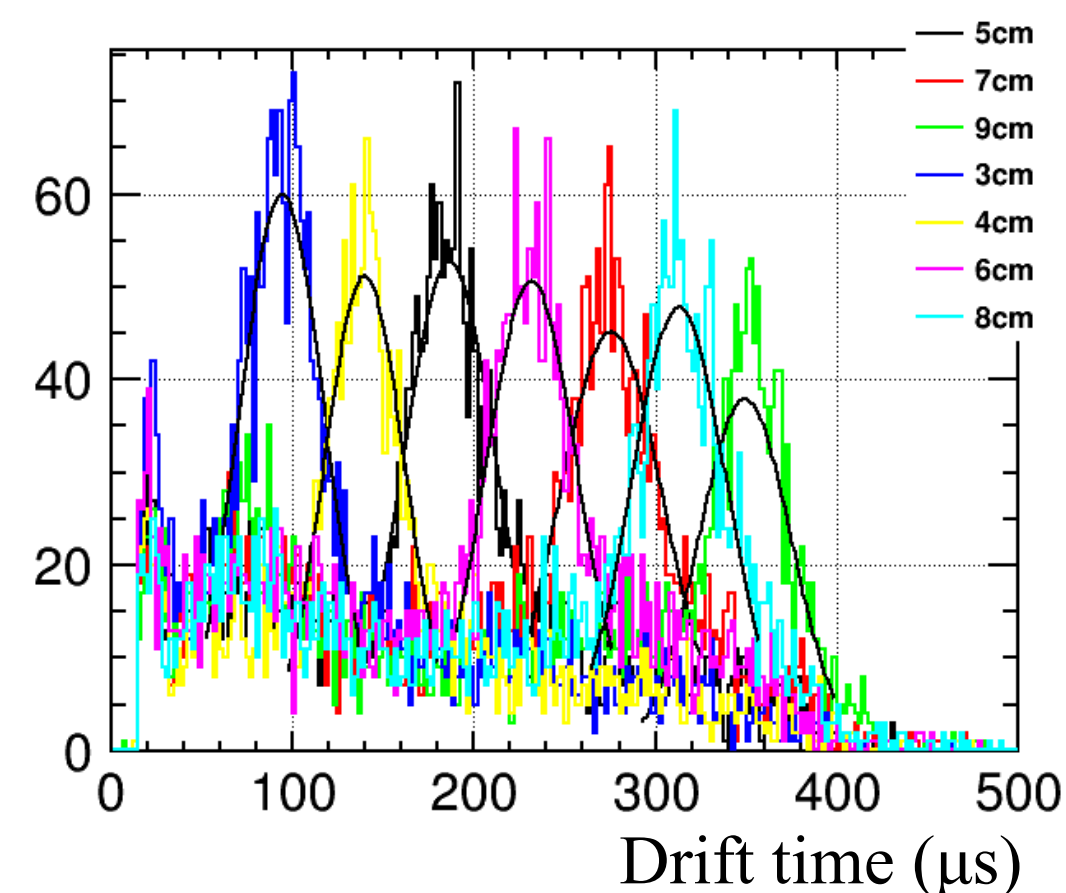


Test stand at Waseda

- : 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).



R&D Detectors

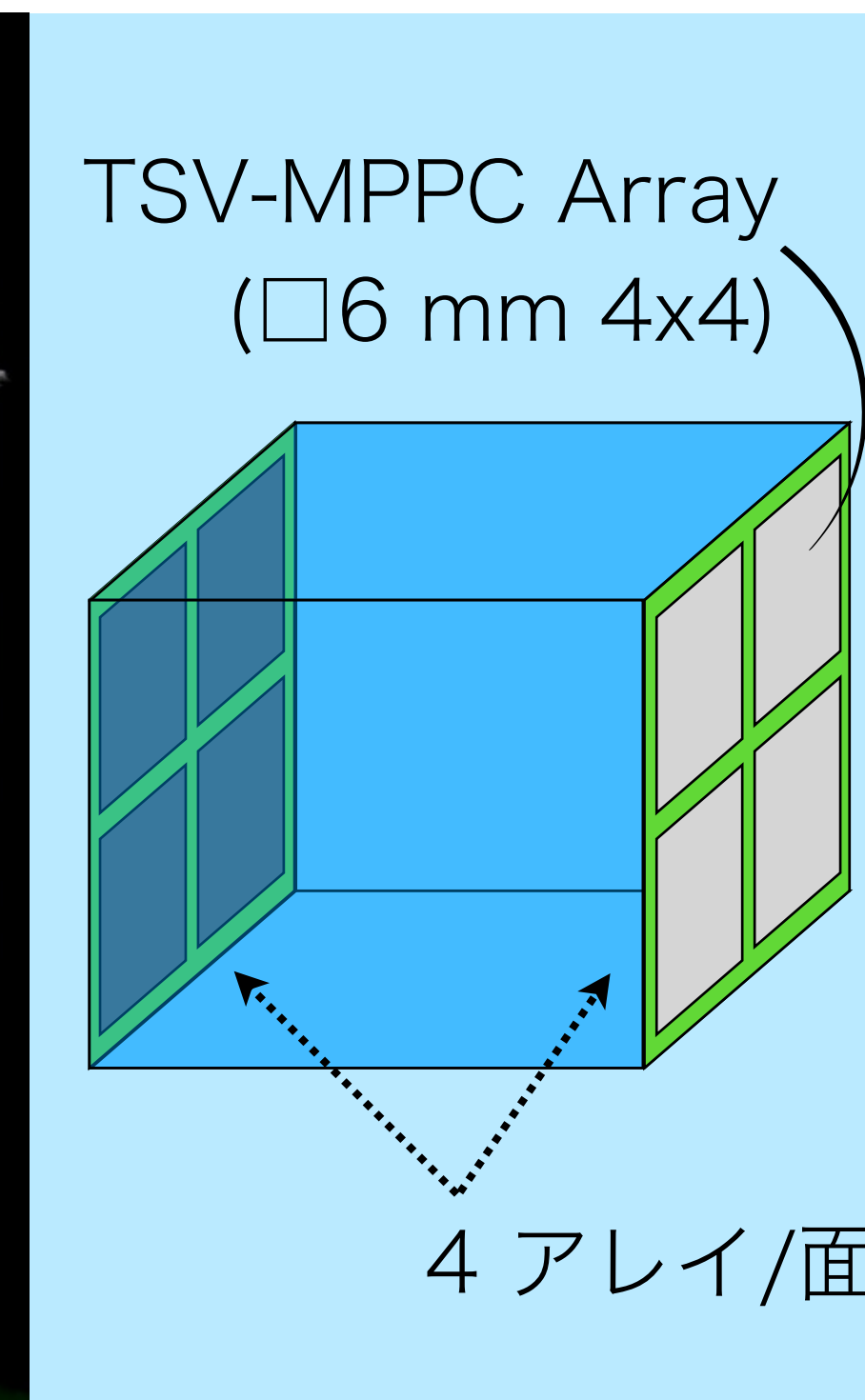
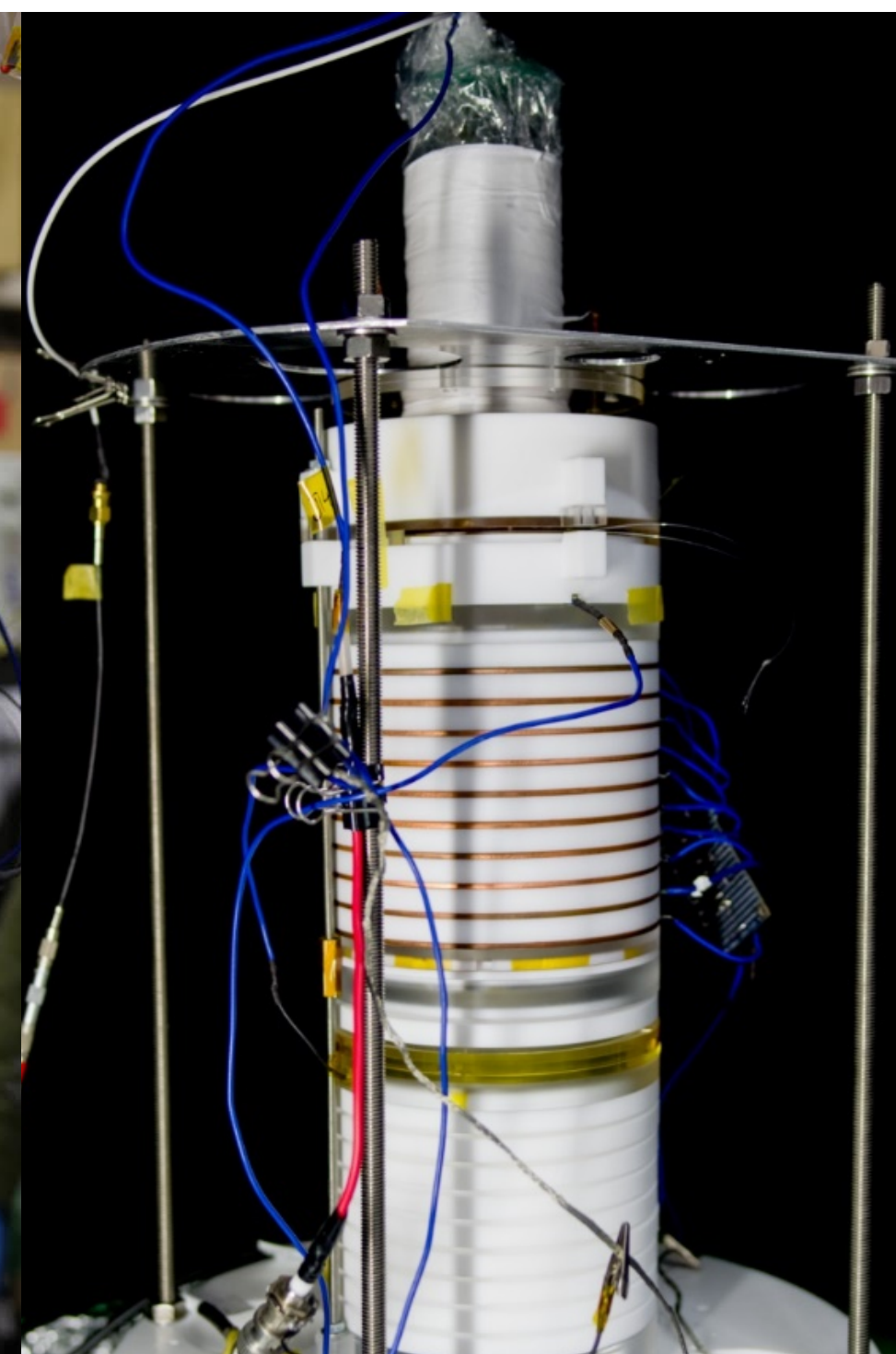
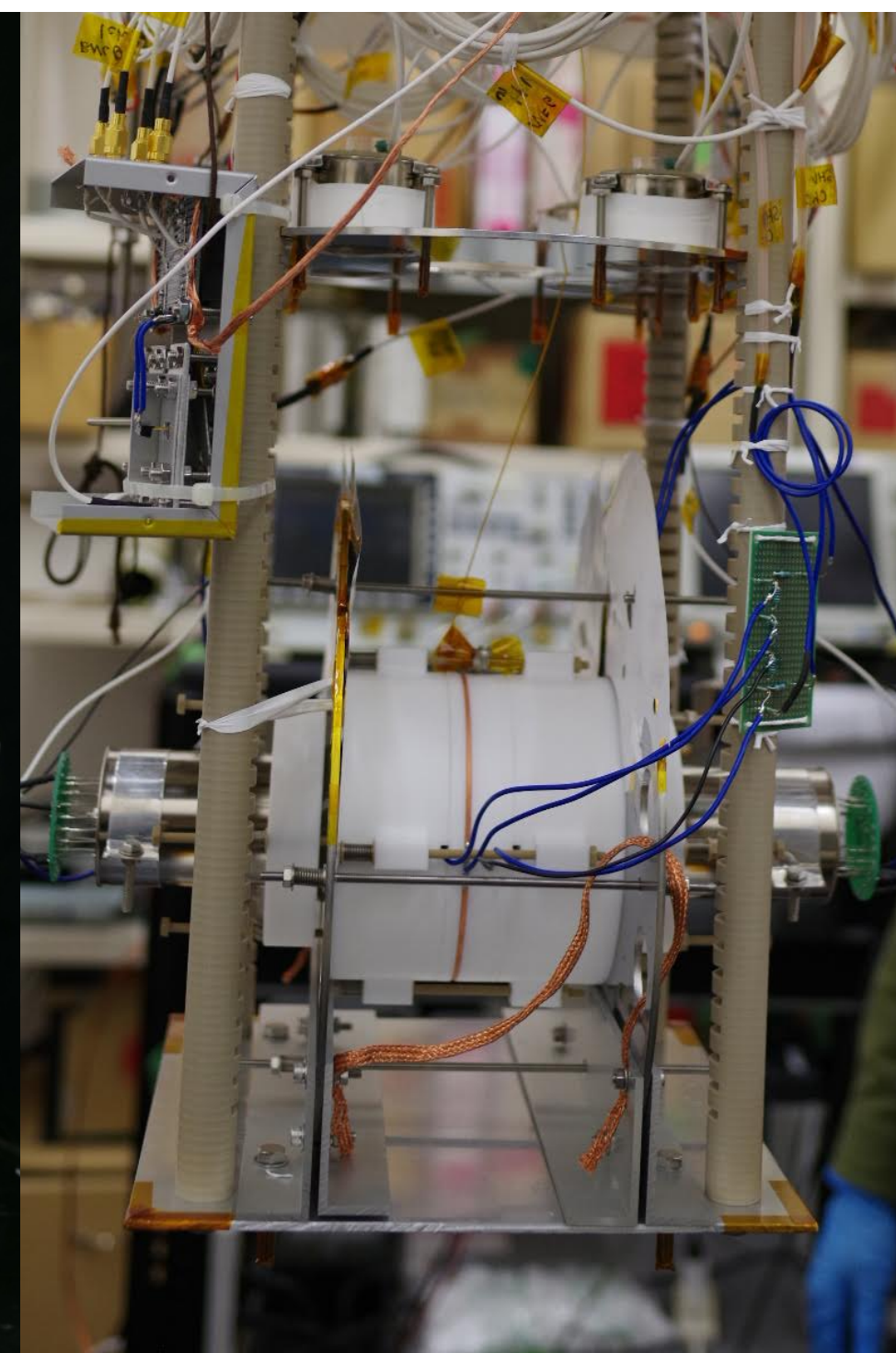
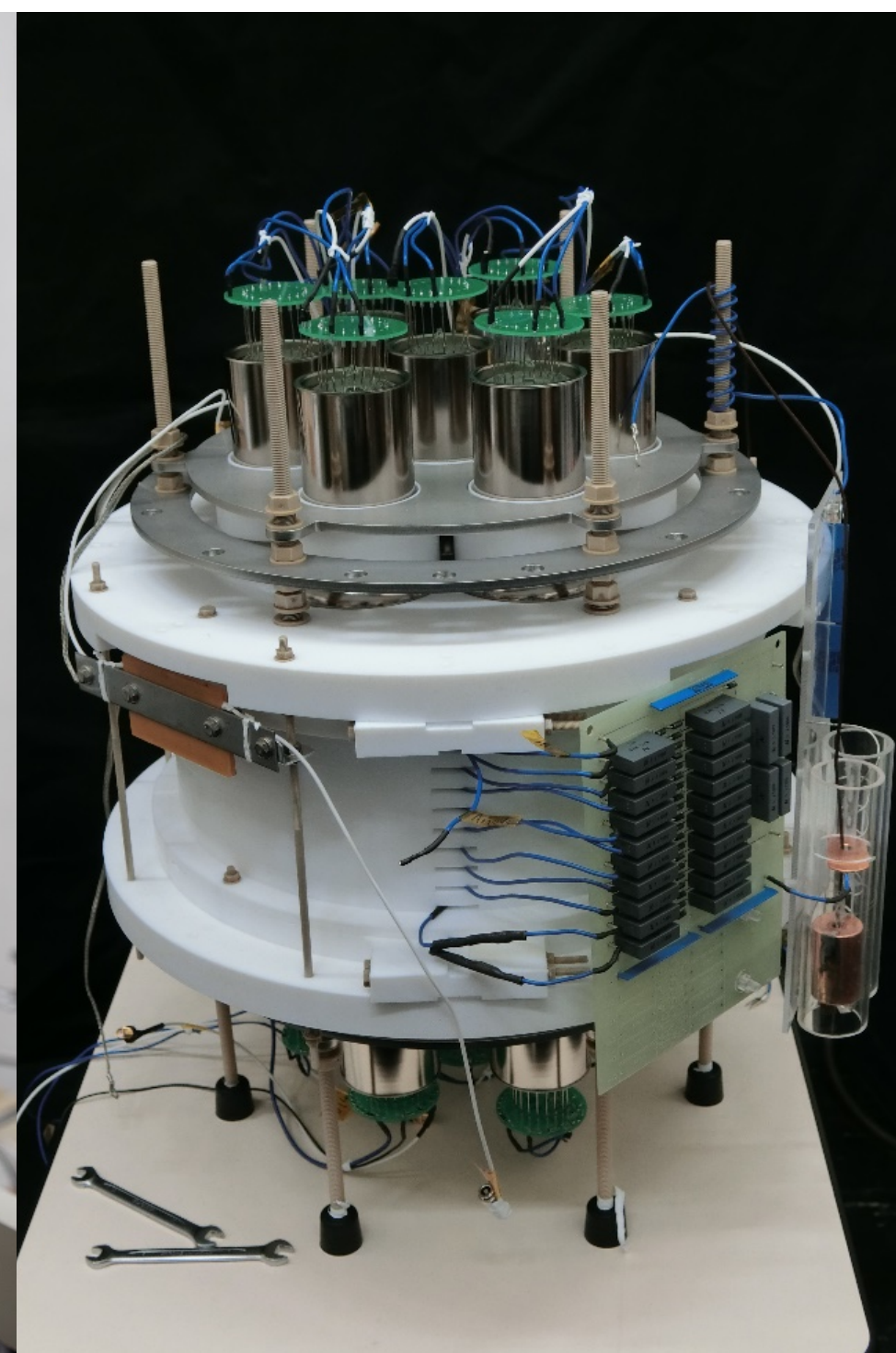
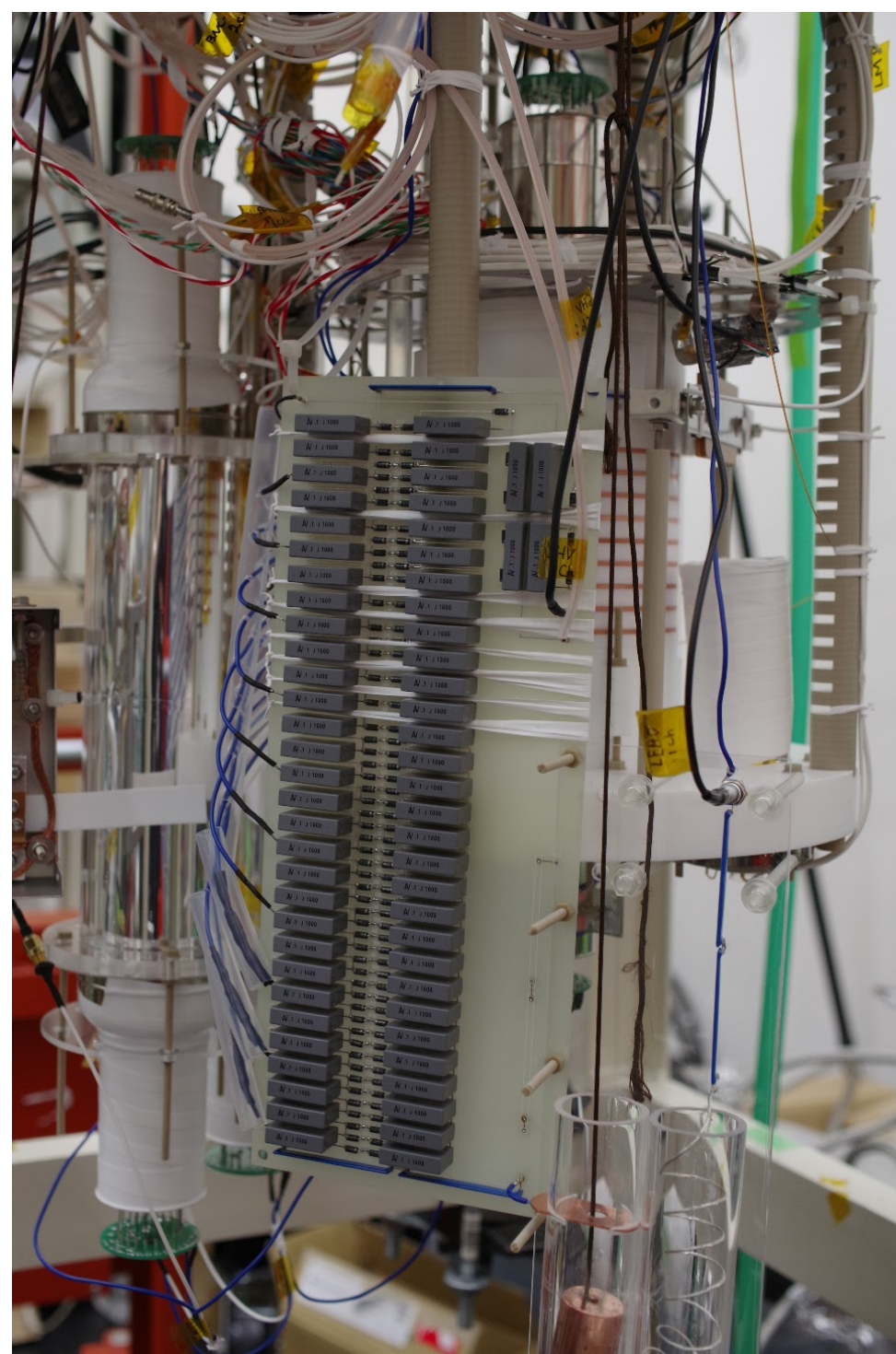
(2017)

(2017-2018)

(2018-2019)

(2019)

(2019-2020)



PMT x2,
気液2相,
高電場印加

PMT x14,
気液2相,
大型化

PMT x2,
液1相,
大検出光量

PMT x2,
気1相,
Gas (S2) Study

SiPM x128,
液1相,
大検出光量 (予定)



研究・開発項目

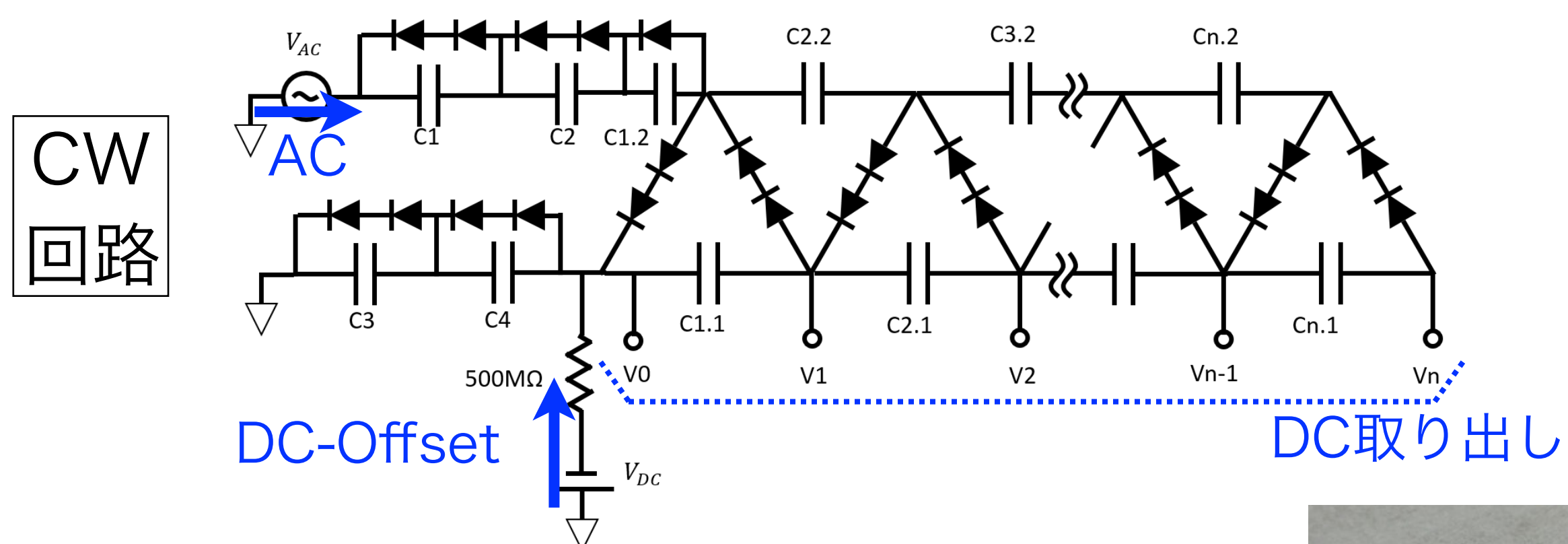
- 気液2相型アルゴン光TPCの安定運用
 - 高純度アルゴンを安定運用するテストスタンド
 - TPC電場形成と高電圧 (~30 kV) 印加 ①
 - 高感度検出器の構築
 - 光検出効率の最大化 ②
 - 検出器応答の詳細理解
 - 液体アルゴン応答の理解 (光子/電子生成効率, 粒子識別能力, ...)
 - 検出器基礎特性 (エネルギー分解能, 位置分解能, S2特性) の測定 ③
 - 背景事象の理解
 - 液体アルゴン光検出器の発展可能性 ④
- = 2相検出器の電離チャンネル

LAr-TPCへの高電場形成

詳細： 13
木村 @ TPC開発座談会2019,
鷺見 @ TPC開発座談会2017

: Cockcroft-Watson回路を利用

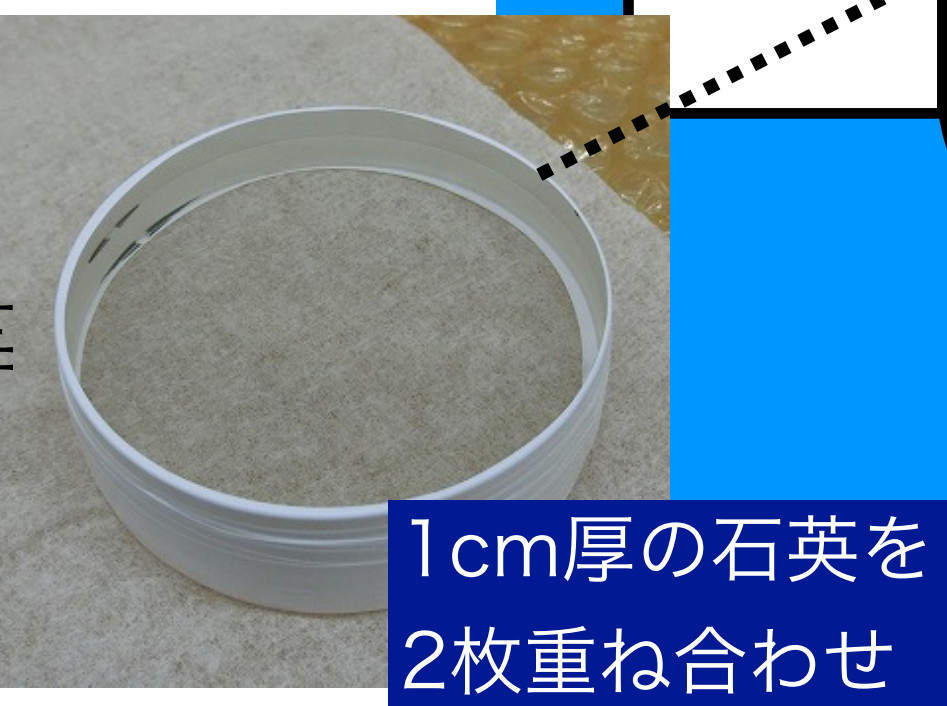
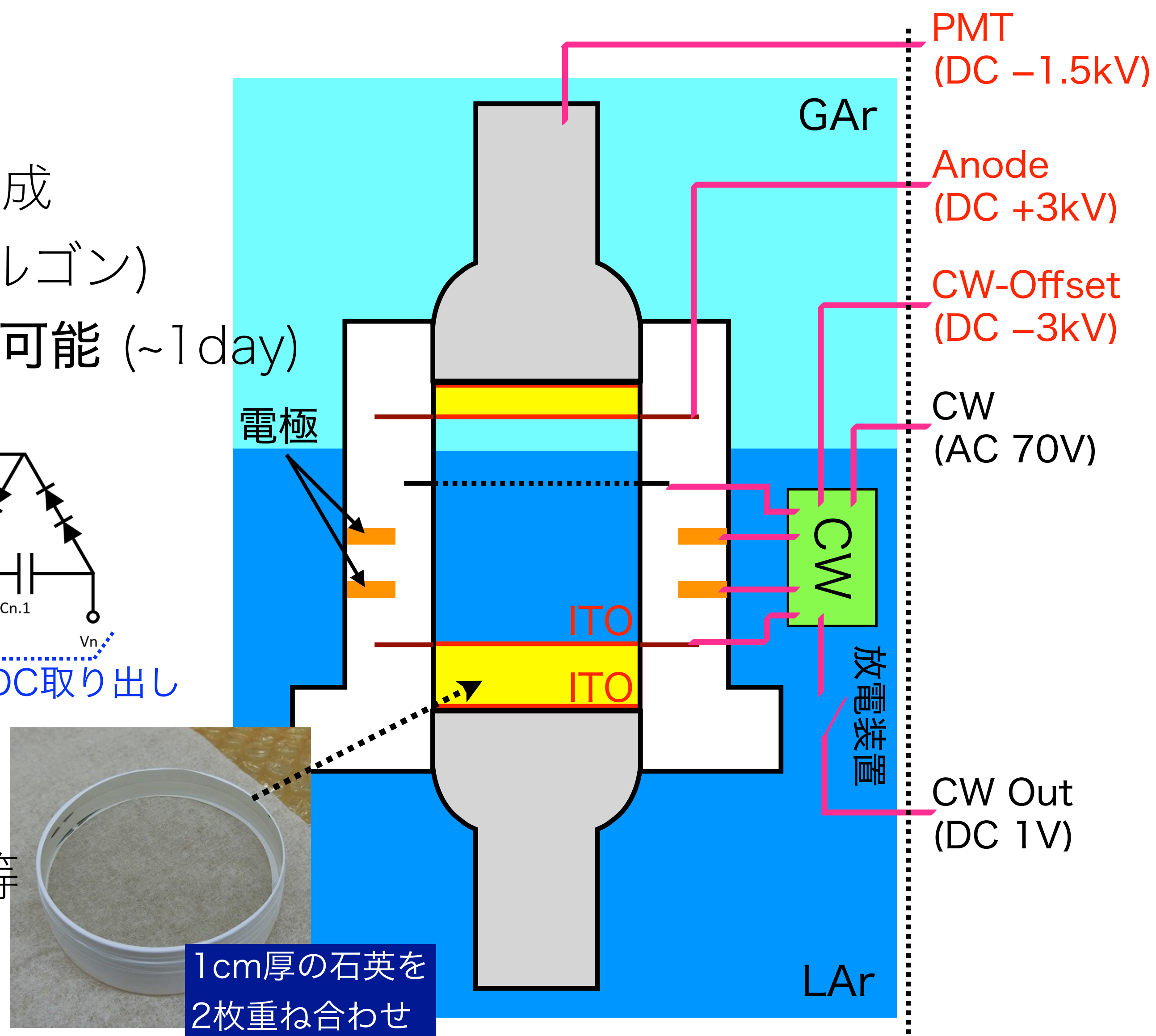
- AC入力 (~100 V),
液体アルゴン中で充電し高静電位を生成
- 液体アルゴンは高い絶縁性 (≠ 気体アルゴン)
→ 充電後, AC入力をOFFにして運用可能 (~1day)



: その他, 部材や気中での放電対策

- 電極間距離 (ライトガイド厚の倍増) 等

→ 32 kV (3 kV/cm) の印加に成功



LAr光検出 : 128 nm @ 87 K

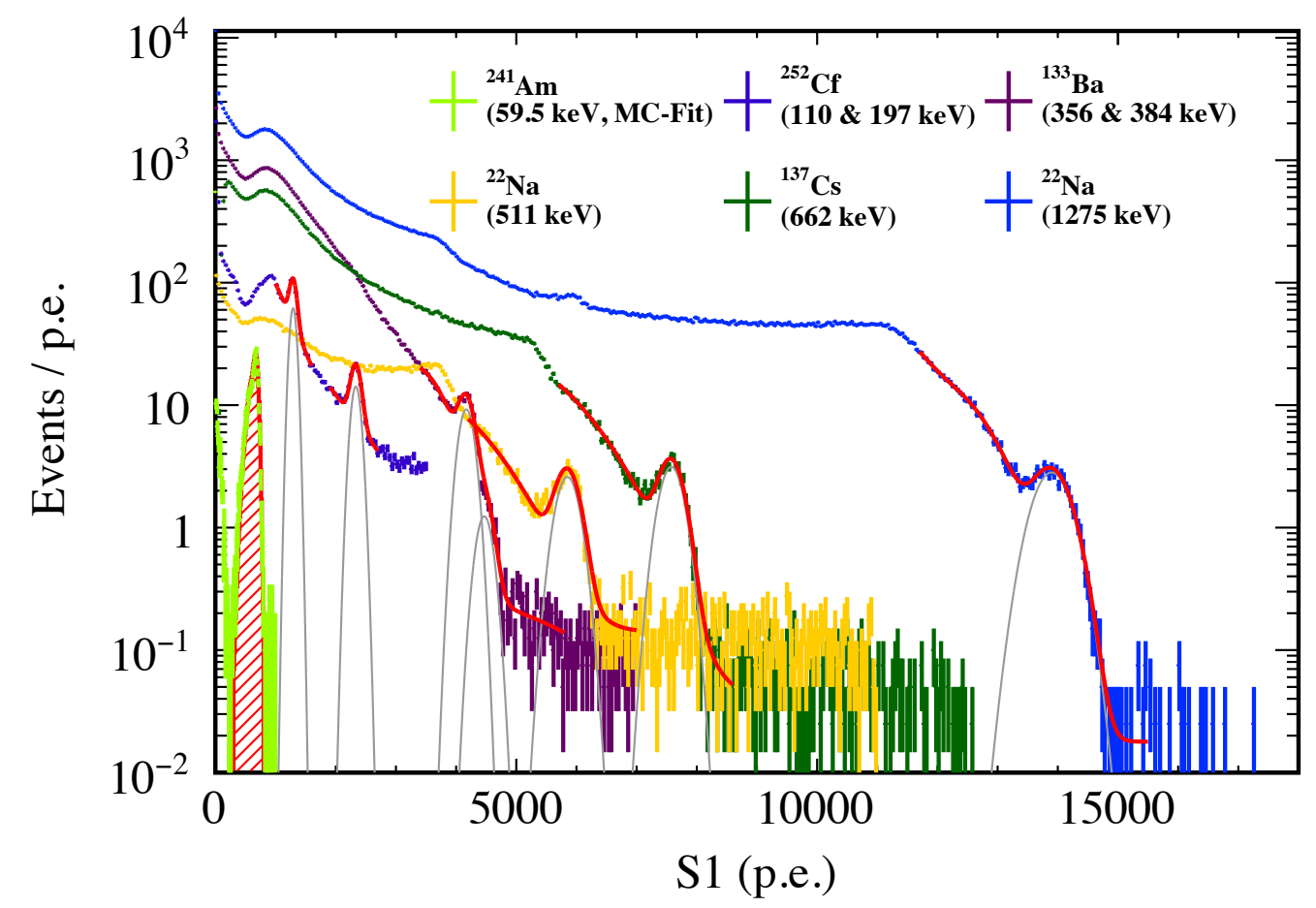
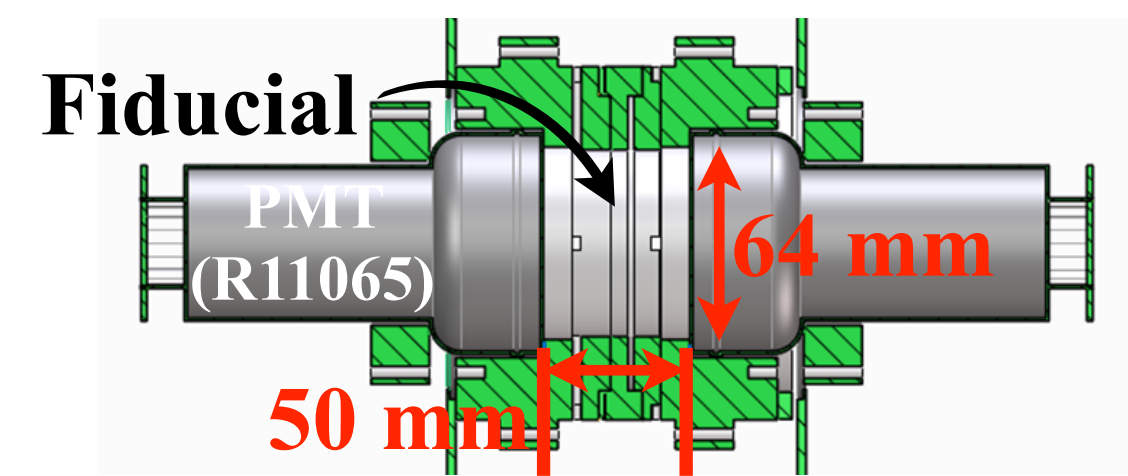
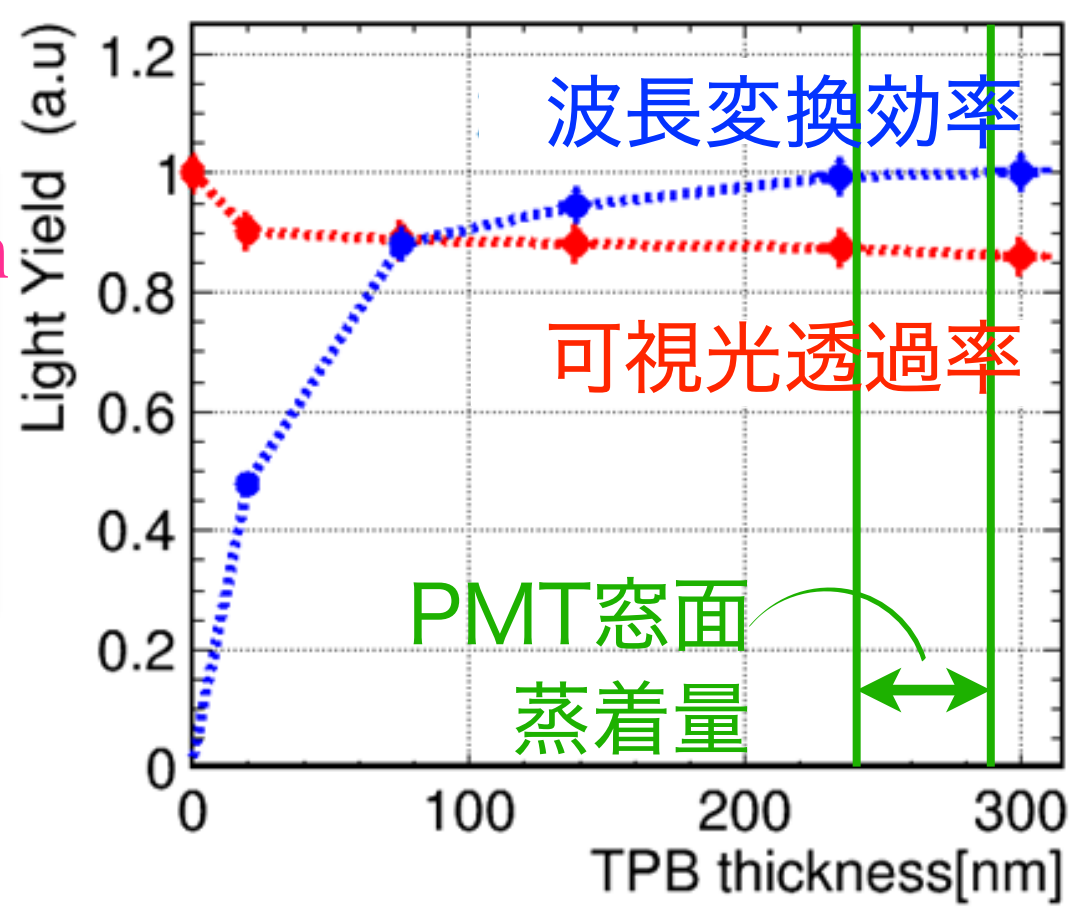
詳細 : 14
 青山 @ TPC開発座談会2019

* NIMA 833 239

| 手法 | 光検出器 | | 反射材 | 利点 |
|------------------------|--|--|----------------|----------------------------|
| | PMT (QE) | SiPM | | |
| 直接検出 (128 nm) | MgF ₂ 窓PMT (20% @ 128 nm) | VUV-MPPC* (10% @ 128 nm) | — | “生の”情報を取得 (→ 位置再構成等に有利) |
| 波長変換 (128 → 420 nm) | 石英窓PMT (30% @ 420 nm) <i>Established</i> | MPPC (50% @ 420 nm) <i>Ongoing</i> | PTFE, ESR, ... | 高い光収集効率 (→ 低エネルギー領域に感度) |

▶ 波長変換材TPBの真空蒸着と最適化

- 蒸着場所 : PMT窓面と反射材へTPB
 → “VUV変換率”と“可視光透過率”の最適化
- 真空蒸着装置を構築,
 膜厚センサー (QCM) で定量測定
- 液体1相検出器で光量測定 : ~12 p.e./keV
 → **Nearly PMT QE Limit**

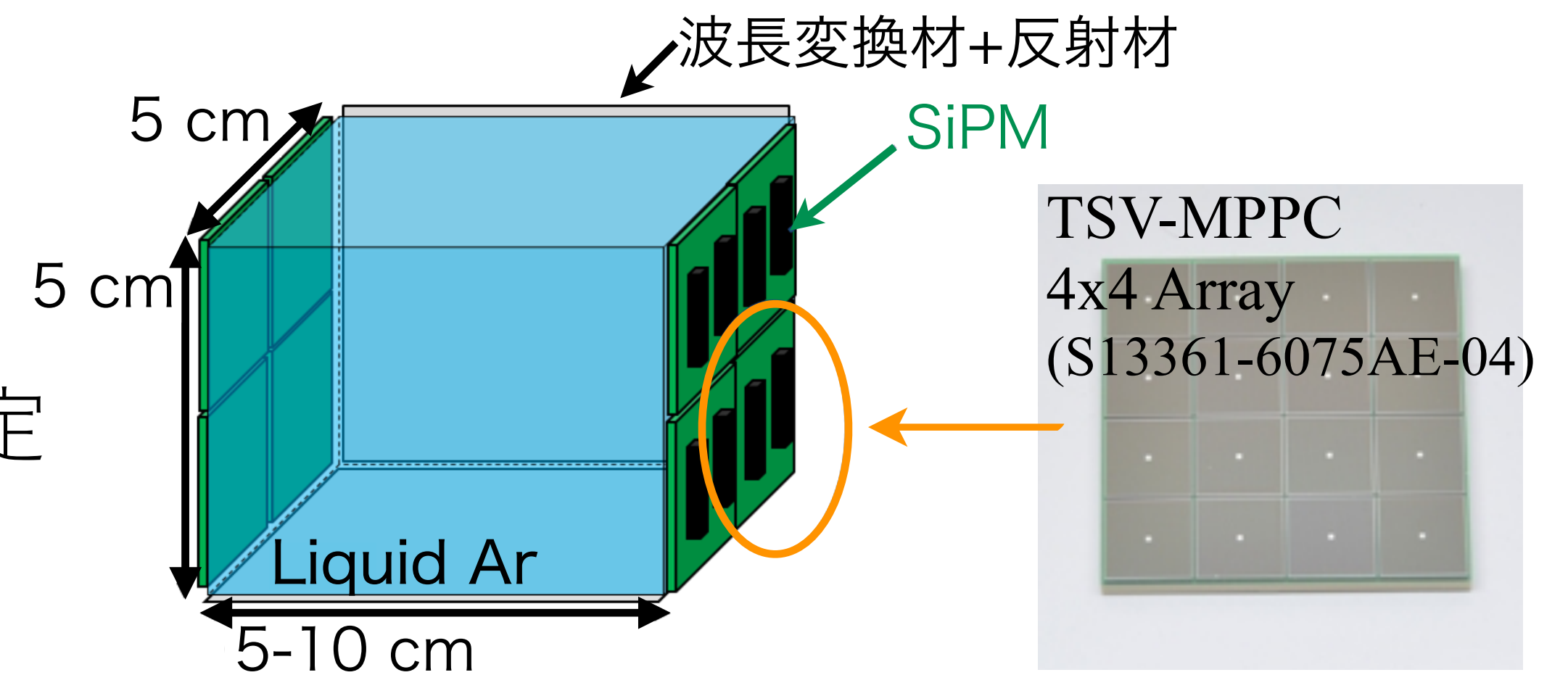
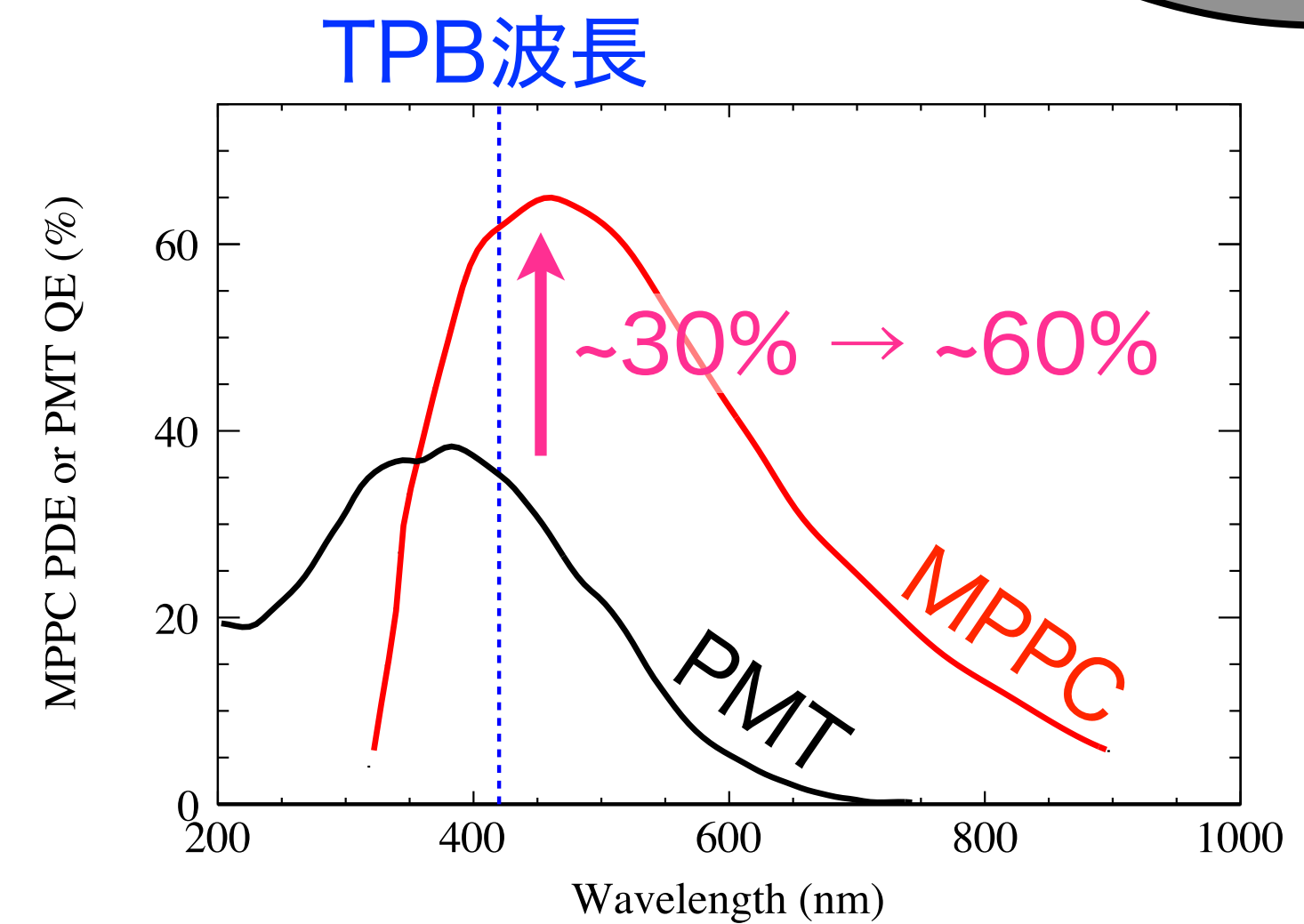
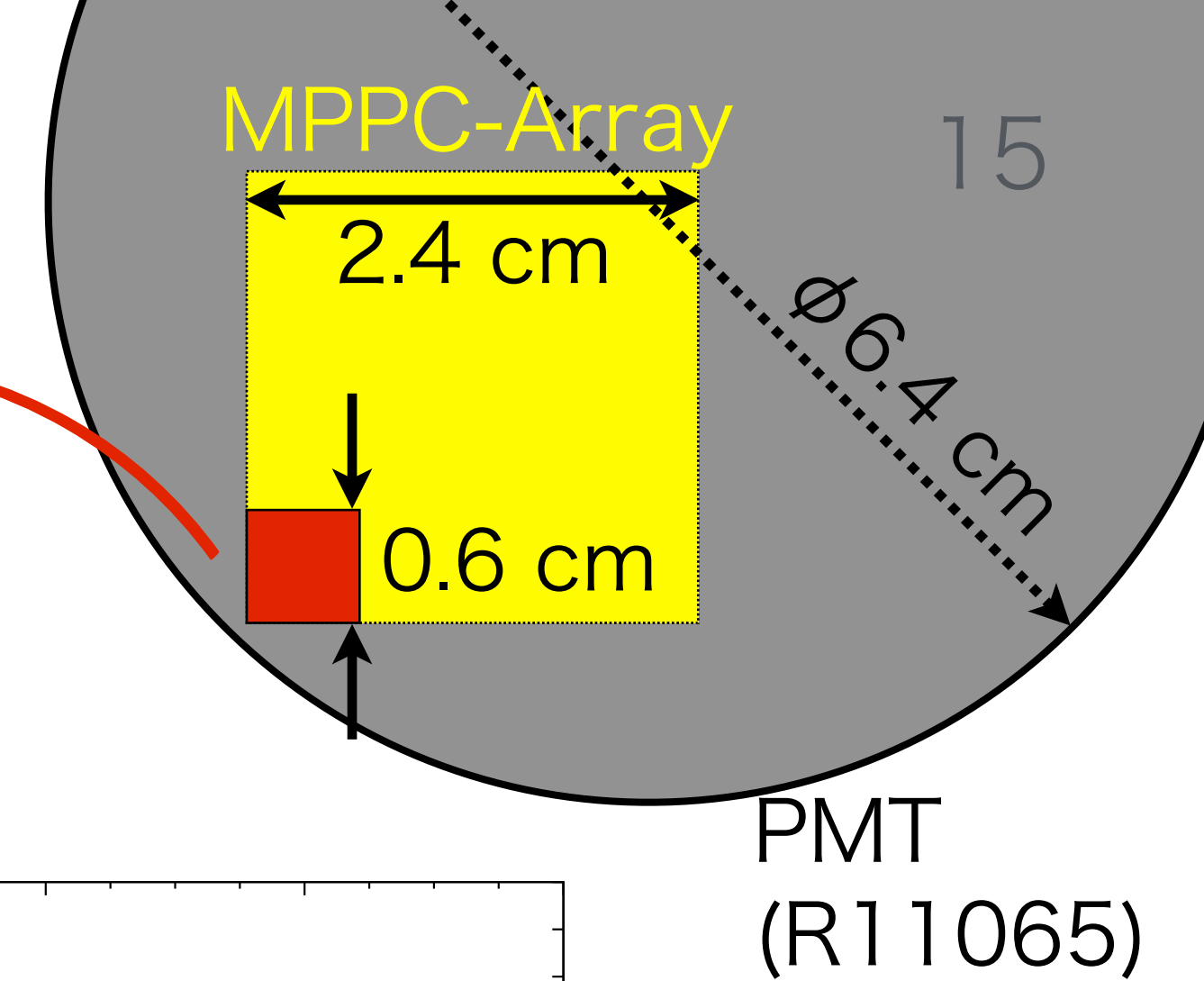
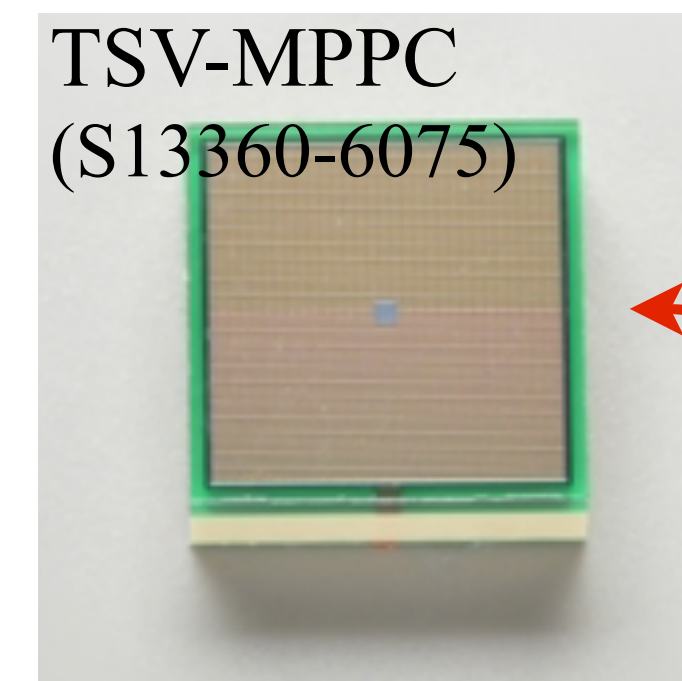


光検出効率の向上

- SiPM (可視光感度) を導入
 - 貫通電極 (TSV) -MPPC
 - 高PDE・大有感面積化
 - アレイパッケージの利用・多チャンネル接続
 - 読み出し信号数を抑制
 - PMTに比べ約2倍の検出光量を期待
 - 低エネルギー信号の検出,
波形弁別能力の向上, etc...

TSV-MPPCの低温 (LN₂温度) 駆動を確認済
(浜松ホトニクス保証外)

- MPPC-Array検出器を構築中, 1月に試験予定



③ アルゴン光検出器の基礎特性

- : 高電場印加が可能なTPCや大光量検出器を用いた測定
- 原子核反跳に対する電離・蛍光効率, 電場・エネルギー依存性
→ Phys.Rev.D 100 (2019), 032002
- 電場下における事象弁別能力の定量評価
→ NIMA 910, 22-25 (2018), 鷲見貴生 D論 (早稲田大学, 2018)
- 蛍光効率のエネルギー依存性
- 液体アルゴン光検出器のエネルギー分解能

高い光収集効率の達成により実現

- 種々エネルギー較正源を利用

| Energy | RI | Note | Energy | RI | Note |
|--------|--------------------------------|----------------------|--------|-------------------|--------------|
| 2.82 | ³⁷ Ar | LAr内一様 | 356.0 | ¹³³ Ba | |
| 59.54 | ²⁴¹ Am | α -tagging | 511.0 | ²² Na | Back-to-Back |
| 109.8 | ¹⁹ F (n, γ) | ²⁵² Cfを利用 | 661.7 | ¹³⁷ Cs | |
| 197.1 | ¹⁹ F (n, γ) | ²⁵² Cfを利用 | 1274.6 | ²² Na | |

エネルギー分解能

- : 理論的には
高分解能 (~0.1% @ 1 MeV) が可能
- (T.Doke : Fano Factor ~ 0.1)

- : 液体1相光検出器 (~12 p.e./keV) で実測
- 2.2% @ 662 keV
 - Fano Factorに感度はない
(光検出効率 ~0.3 : PMT QEにリミット)

NIM 134 353

NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 134 (1976) 353-357; © NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO.

ESTIMATION OF FANO FACTORS IN LIQUID ARGON, KRYPTON, XENON AND XENON-DOPED LIQUID ARGON

T. DOKE, A. HITACHI

Science and Engineering Research

S. KUBOTA, A. NAKAMOTO

Department of Physics, Rikkyo

and

T. TAKAHASHI

Institute of Physical and Chemical

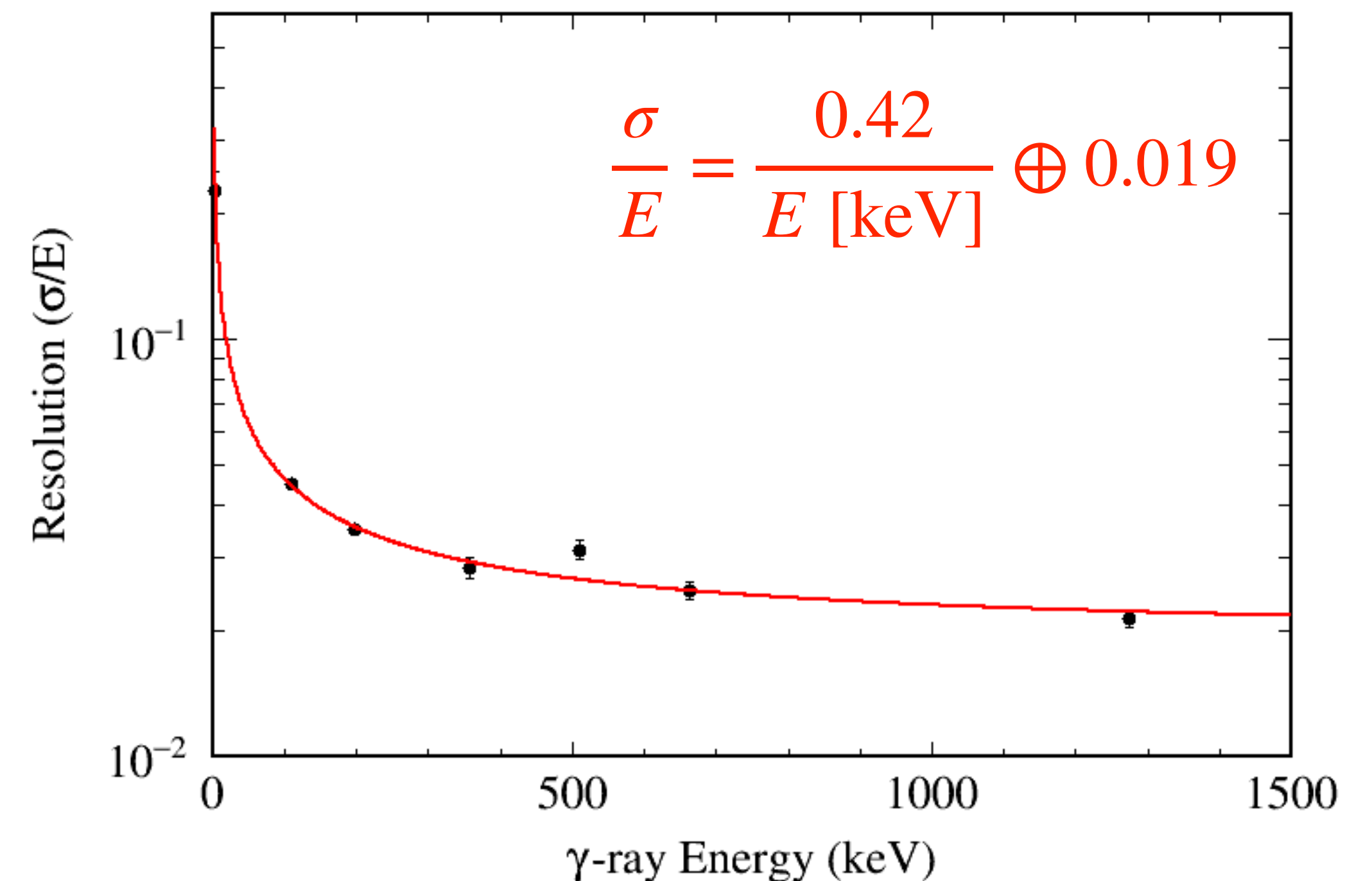
Received 10 February 1976

Fano factors in liquid argon, krypton and xenon are estimated from the parameters in the energy balance equation. The values for liquid argon, krypton and xenon are smaller than that for liquid argon doped with xenon, i.e. about 0.05, which is the noise level which can easily be reached by 1 MeV electrons.

TABLE 3

F_1 , F_2 , F_3 and F (Fano-factors) in liquid argon, krypton and xenon for Shockley's model and Alkhazov's model.

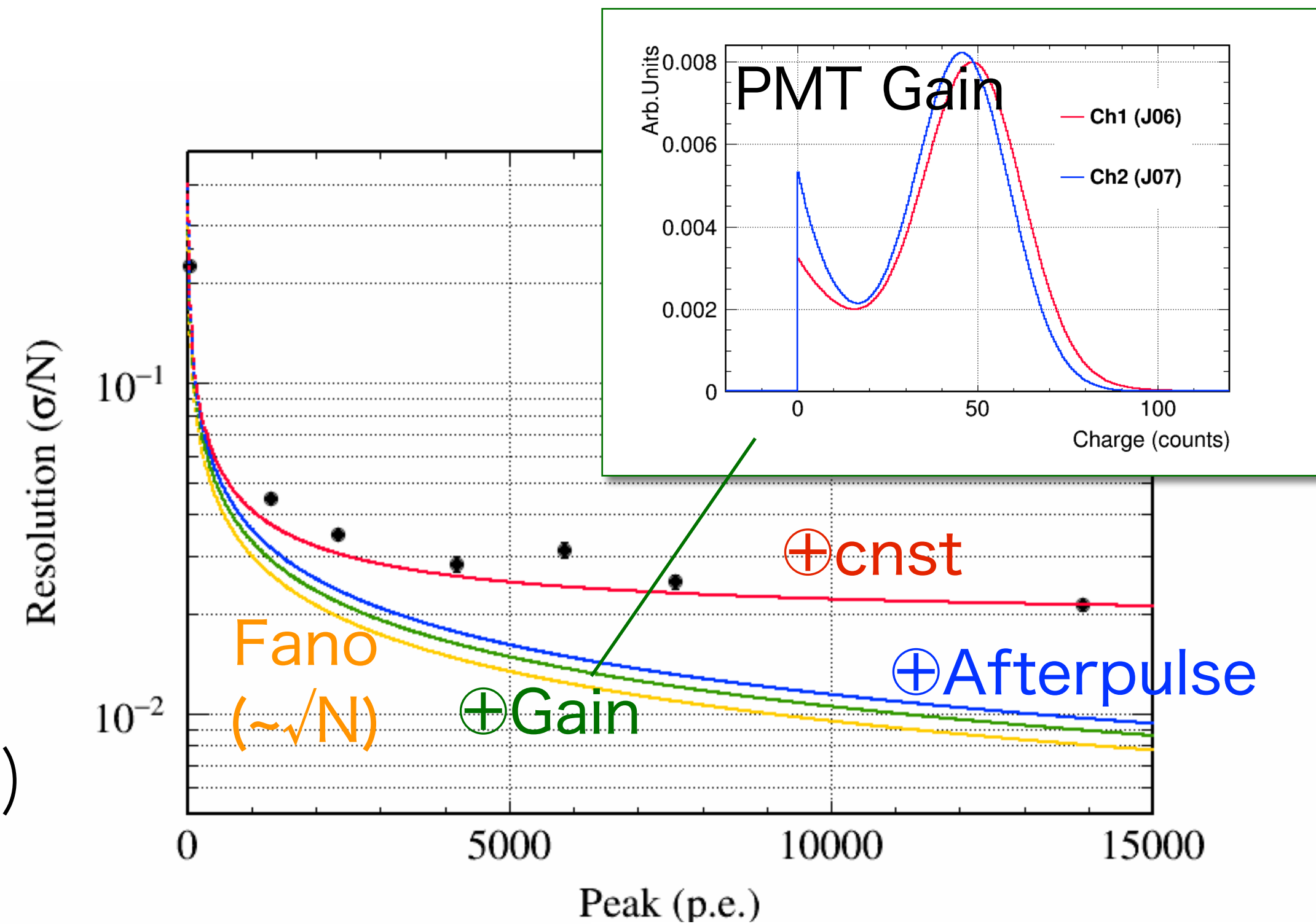
| Liquid | F_1 | F_2 | | F_3 | F | |
|--------|-------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | | S-model | A-model | | S-model | A-model |
| Ar | 0.076 | 0.027 | 0.036 | 0.004 | 0.107 | 0.116 |
| Kr | 0.032 | 0.024 | 0.037 | 0.001 | 0.057 | 0.070 |
| Xe | 0.019 | 0.021 | 0.039 | 0.0006 | 0.041 | 0.059 |



エネルギー分解能

: エネルギー分解能への寄与

- $E_{ER} > 500$ keV
 - … 定数項 (光量の位置依存性等)
- $E_{ER} < 100$ keV
 - … PMT応答 (ゲイン分散, Afterpulse)

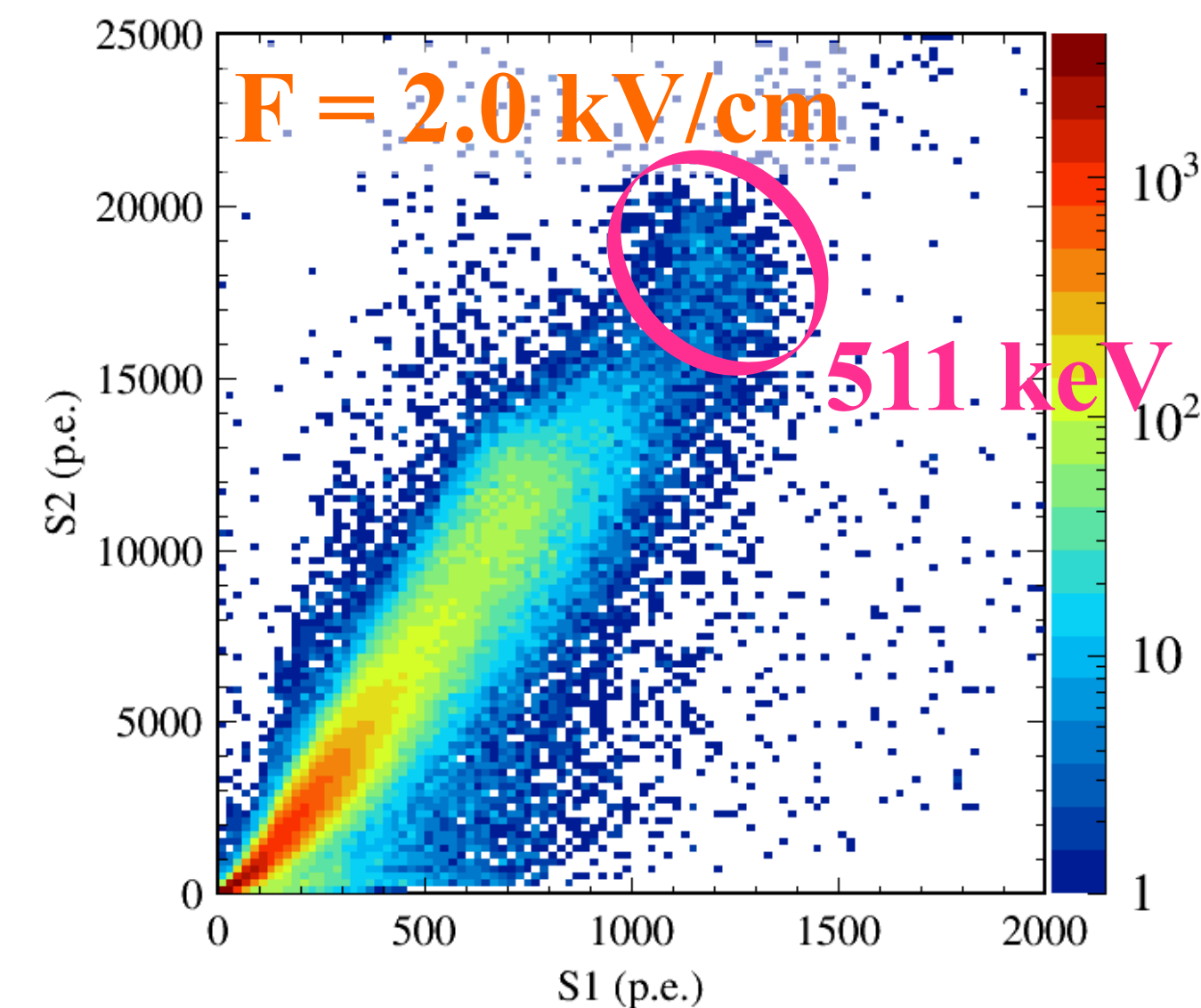
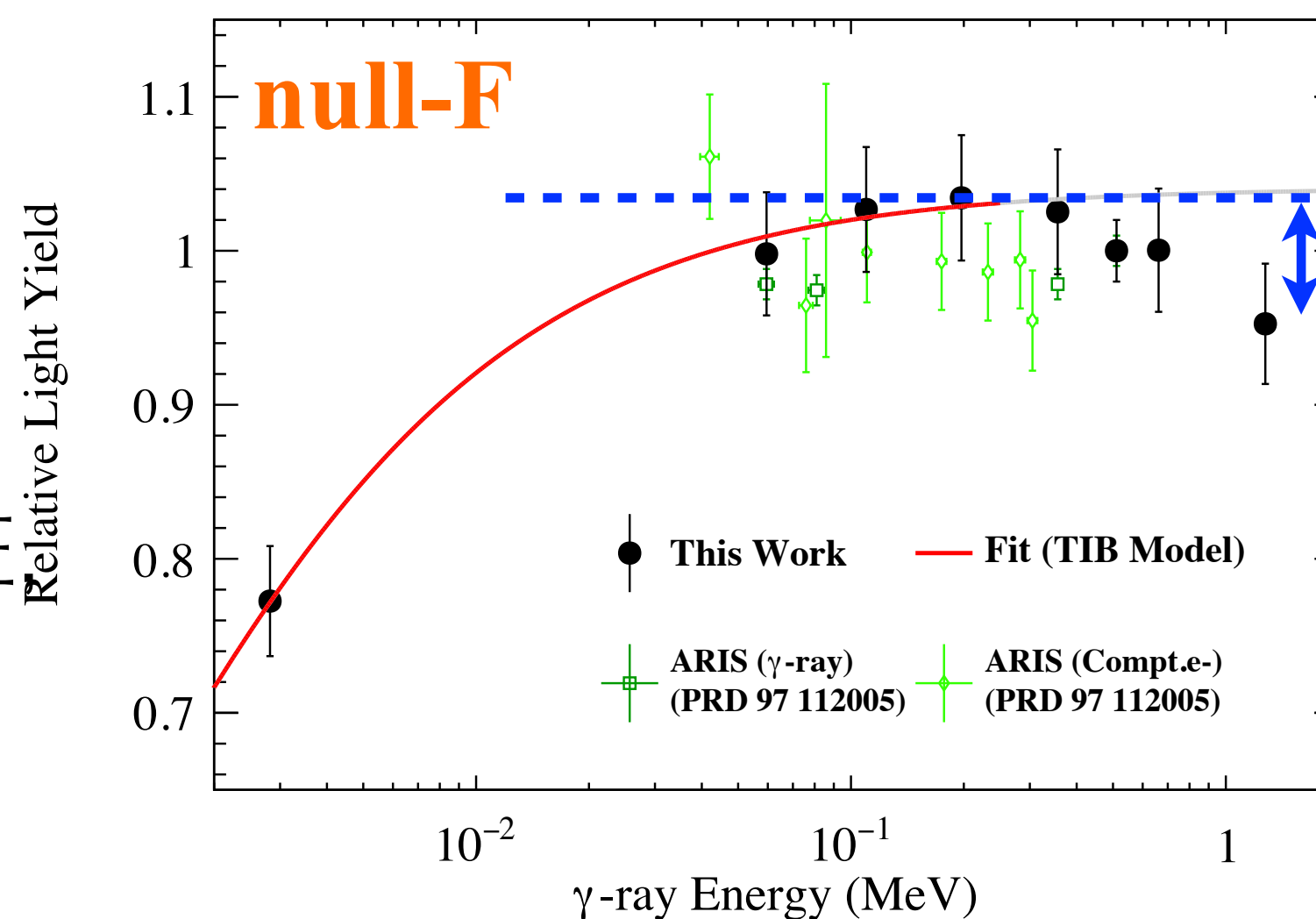


エネルギー分解能の回復

: PMT \rightarrow SiPM (MPPPC)による
1光子分解能の向上

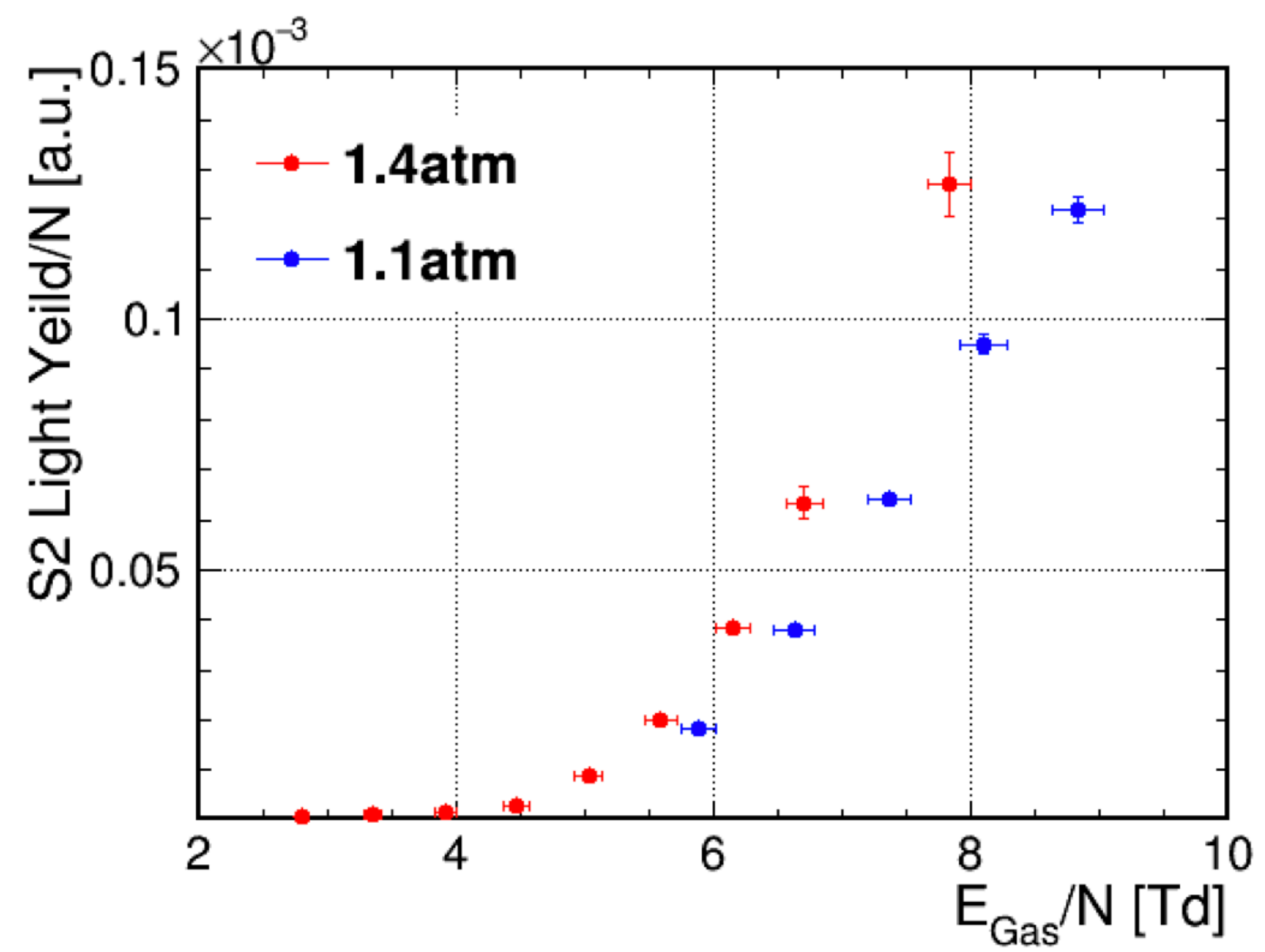
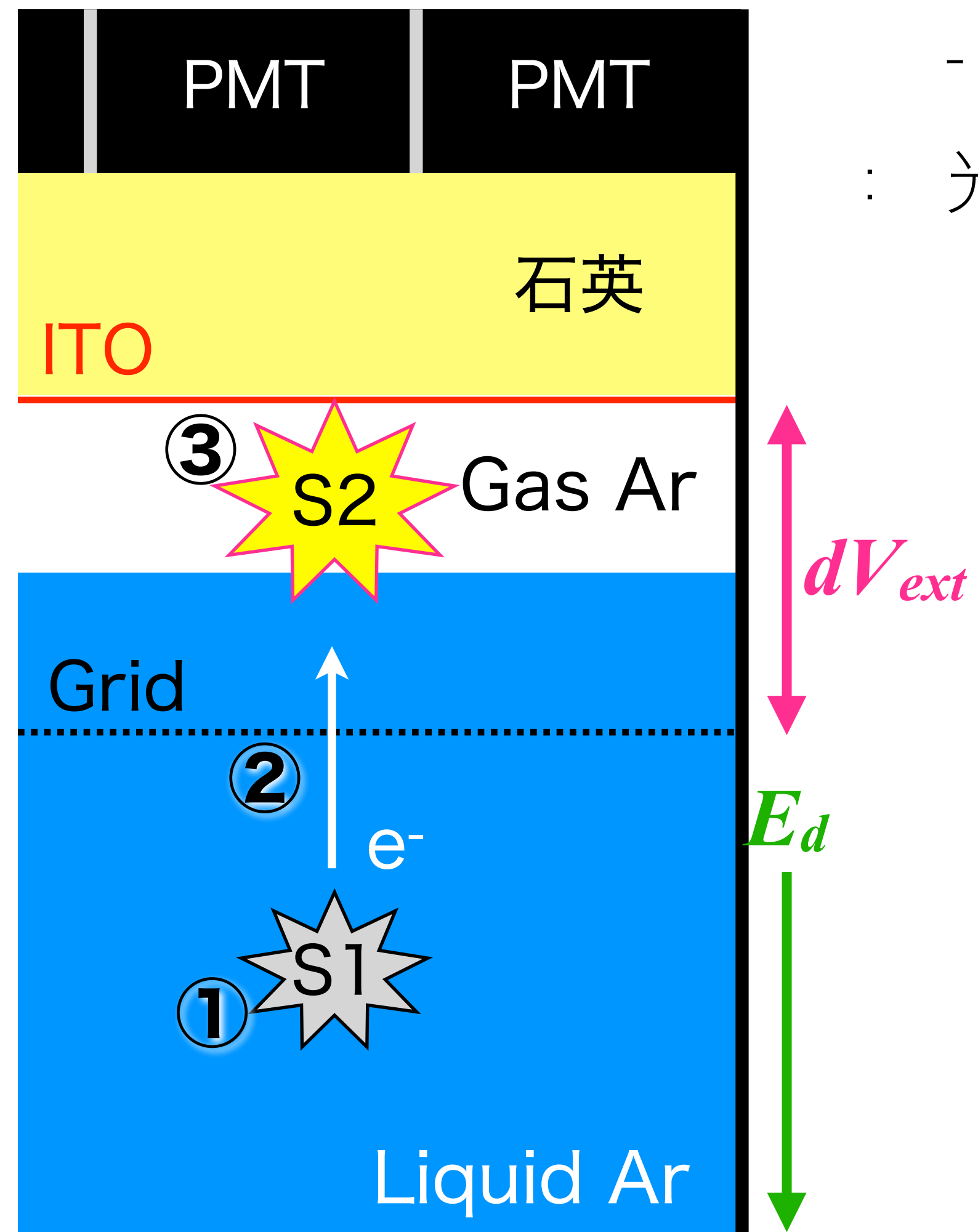
: 電離チャンネルの併用

- 光量とエネルギーの非線形性
- S1光量とS2光量の反相関
- etc.



S2 (EL光)の理解と利用

- 主にElectroluminescence : 電離電子を光増幅して観測
- O₂, H₂O < 1 ppbの不純物レベル (→ τ > 30 cm)
- >3 kV/cmの取り出し電場 (→ ε_{ext} ~ 100%)
- 光増幅率は気相電場, 気相長, 圧力に依存 (~比例)

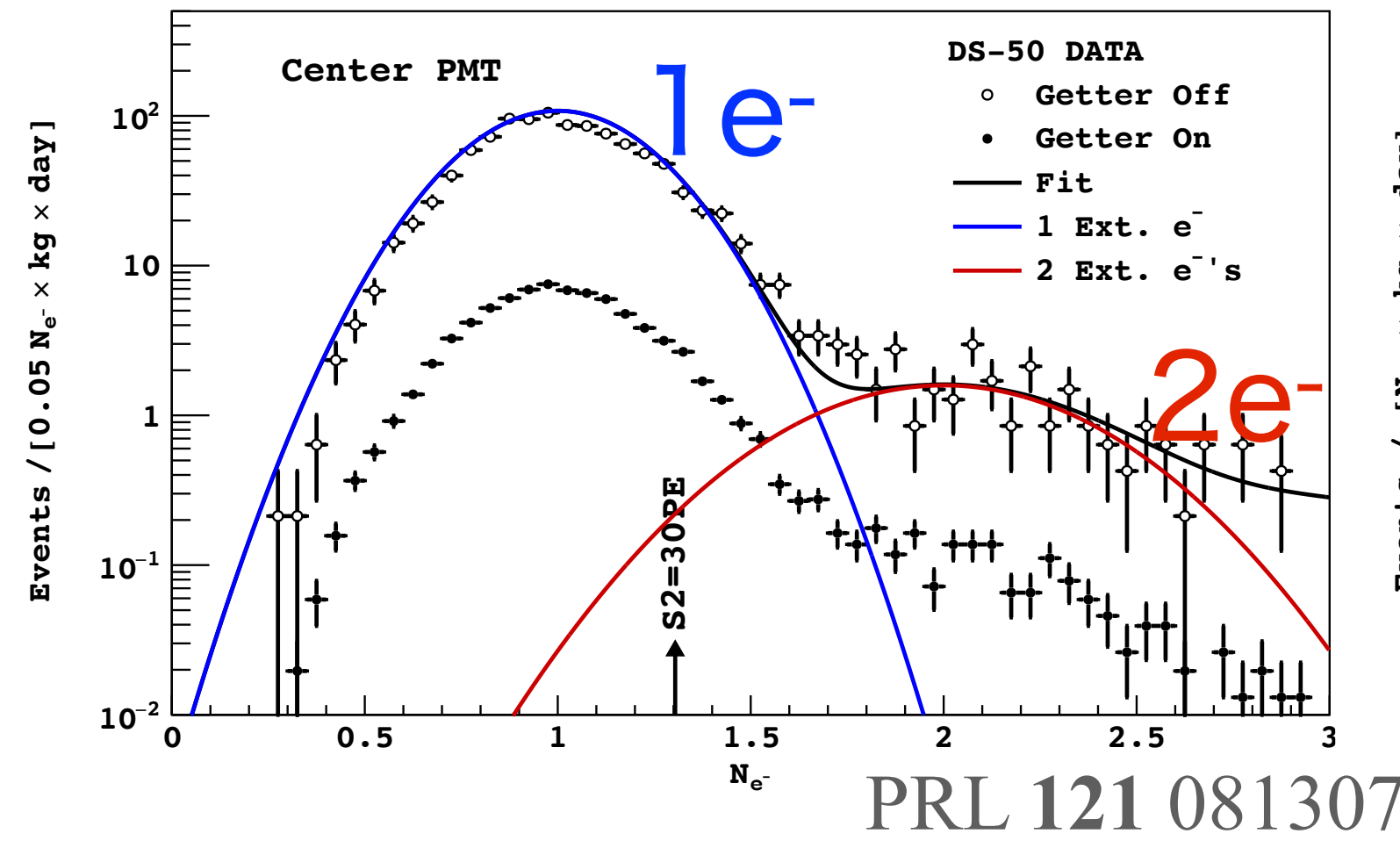


S2の理解と利用 20

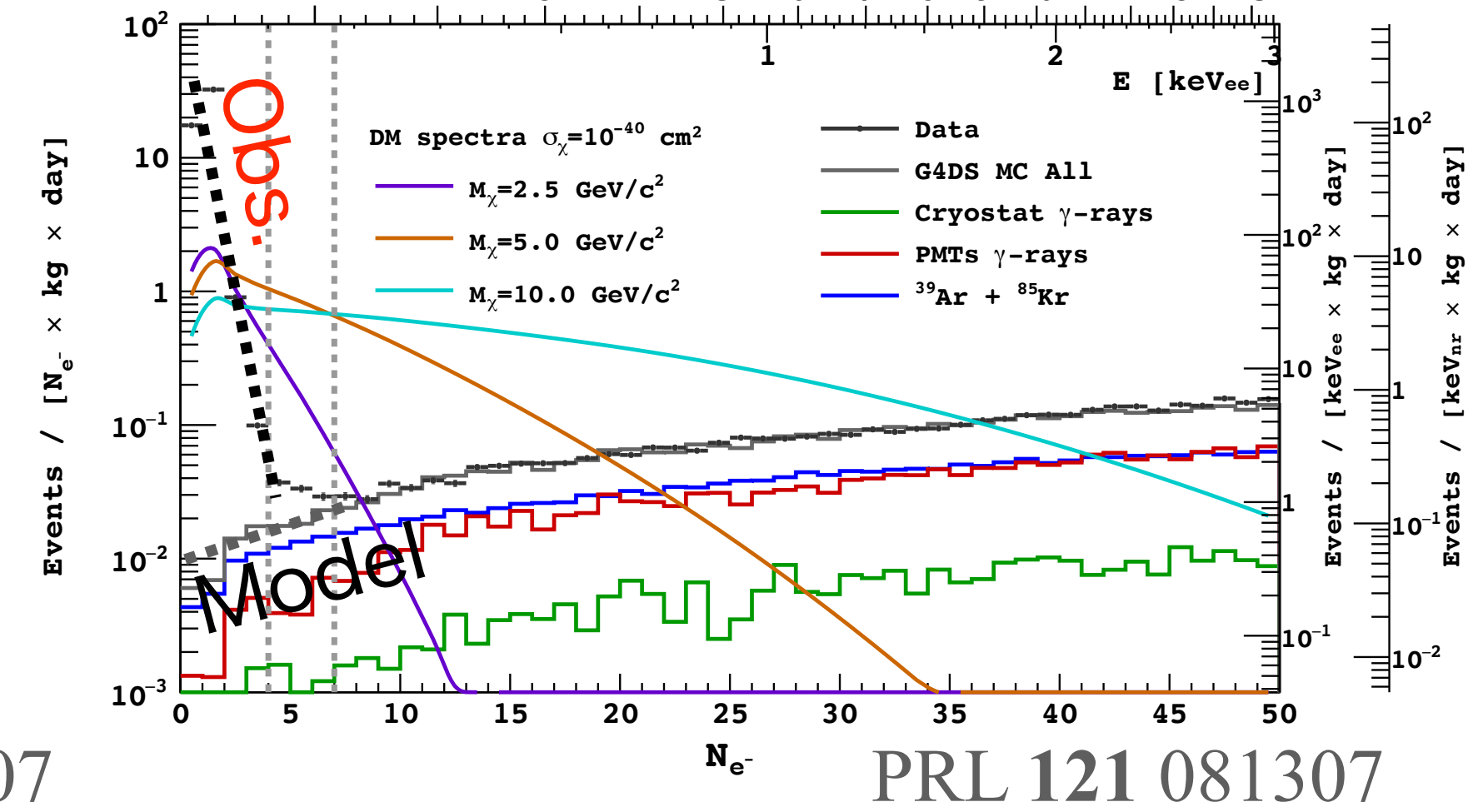
： 極低電離信号 ($\sim 1e^-$) に有感

- $O(10)$ p.e./ e^-
- 正体不明の“数電子事象”
- 不純物に電子がトラップ?
- 液面に電子がトラップ?
- 部材からの光電効果?

S2光量分布



Energy Spectrum (S2)



： S2波形は電子反跳方向に有感

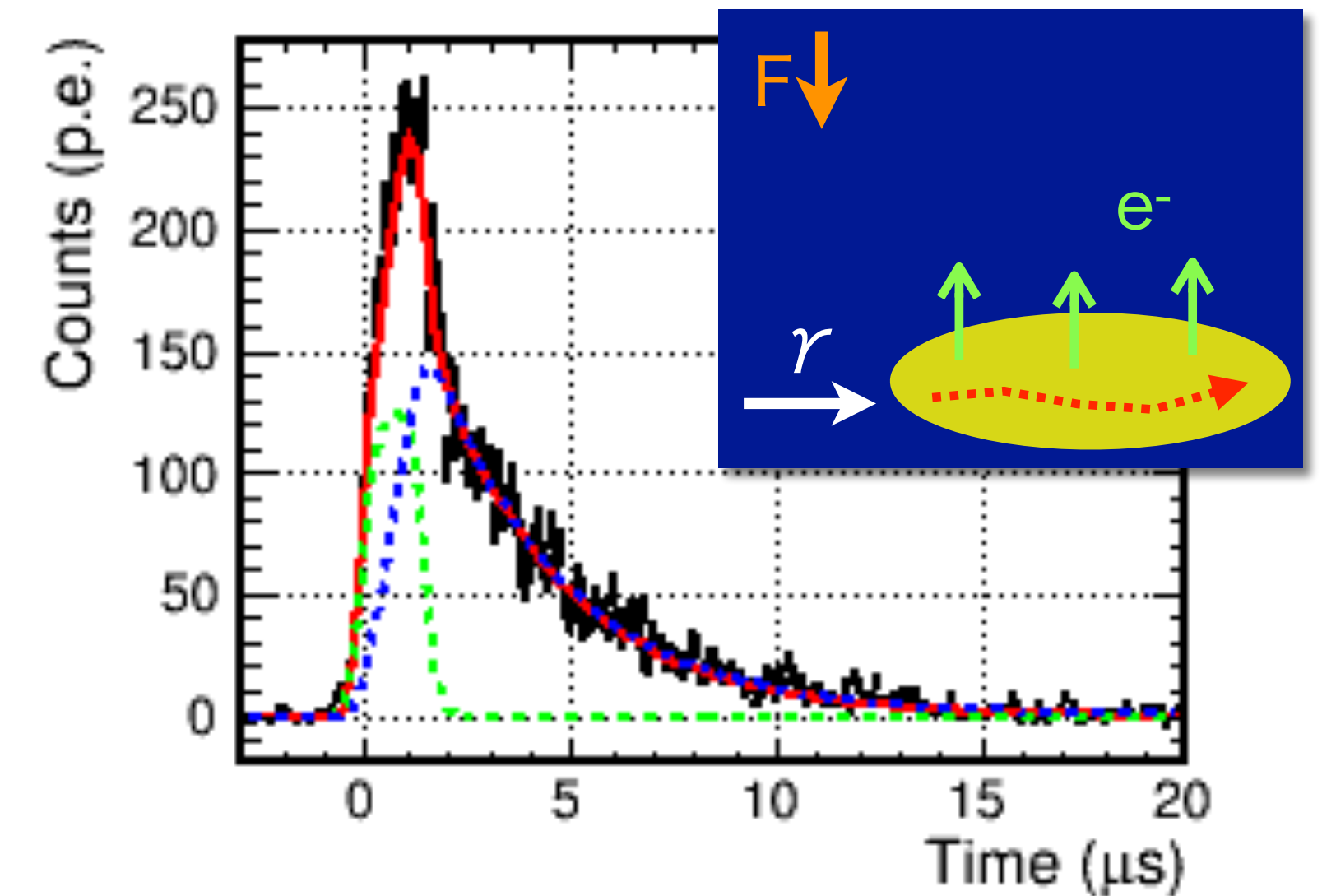
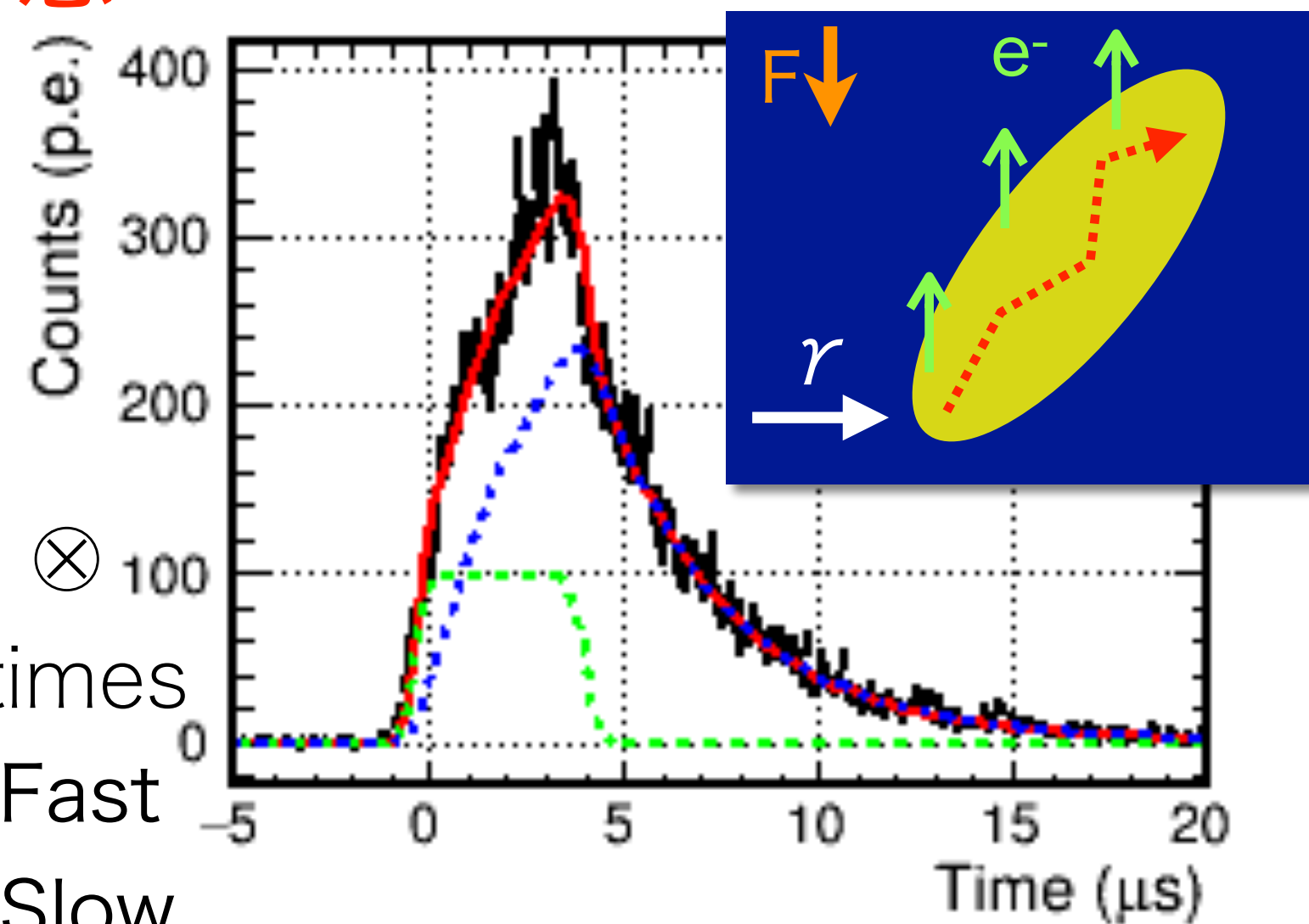
Data :

~ 1 MeV Electronic Recoil
(^{60}Co Compton Edge)

Fitting function :

Recoil track \otimes LAr drift diffusion \otimes GAr drift time \otimes Scintillation lifetimes

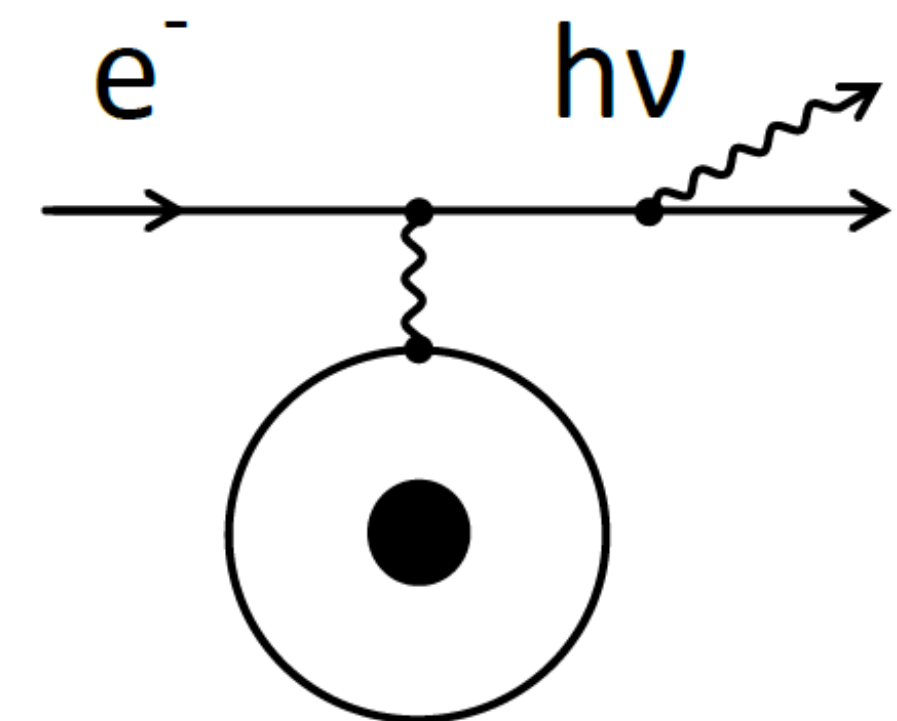
- Data
- Fit (Sum)
- Fast
- Slow



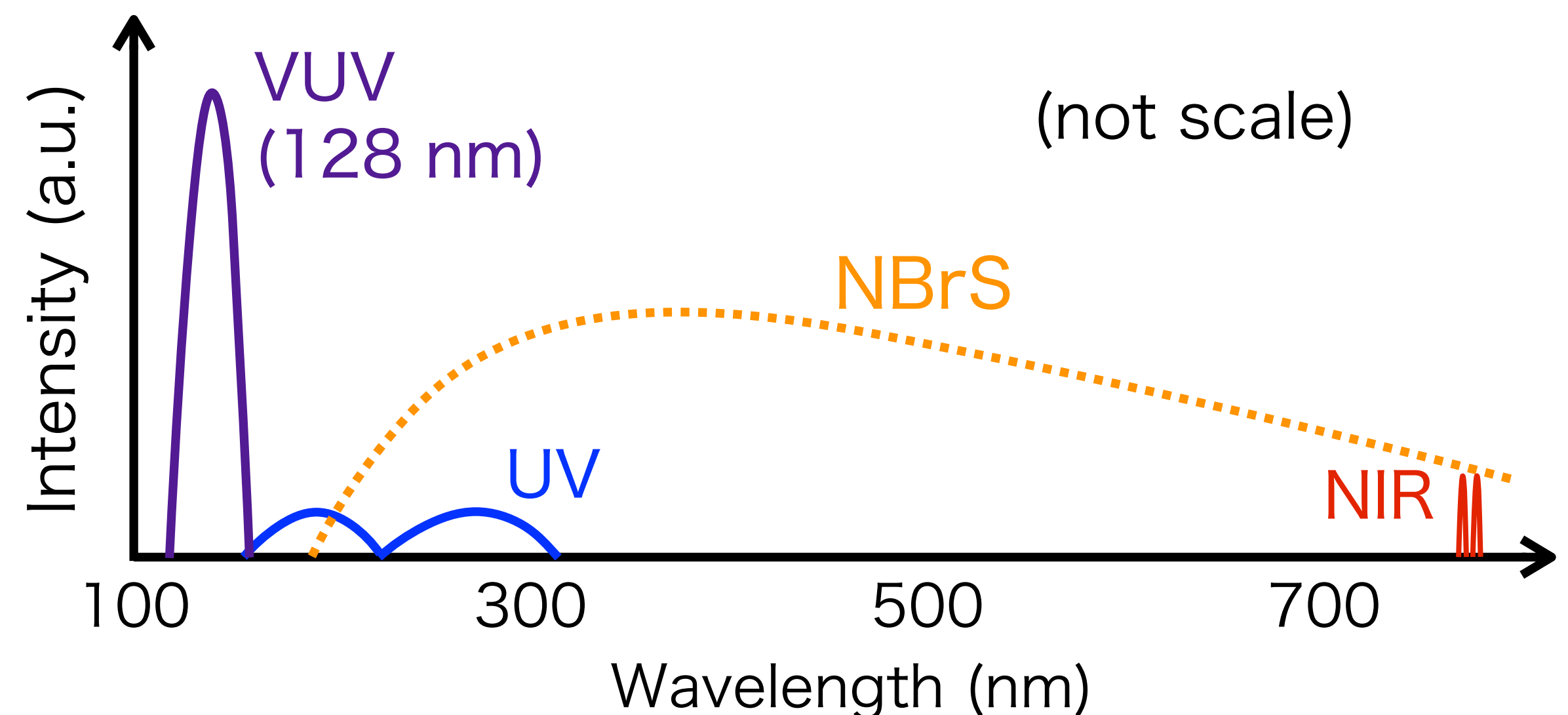
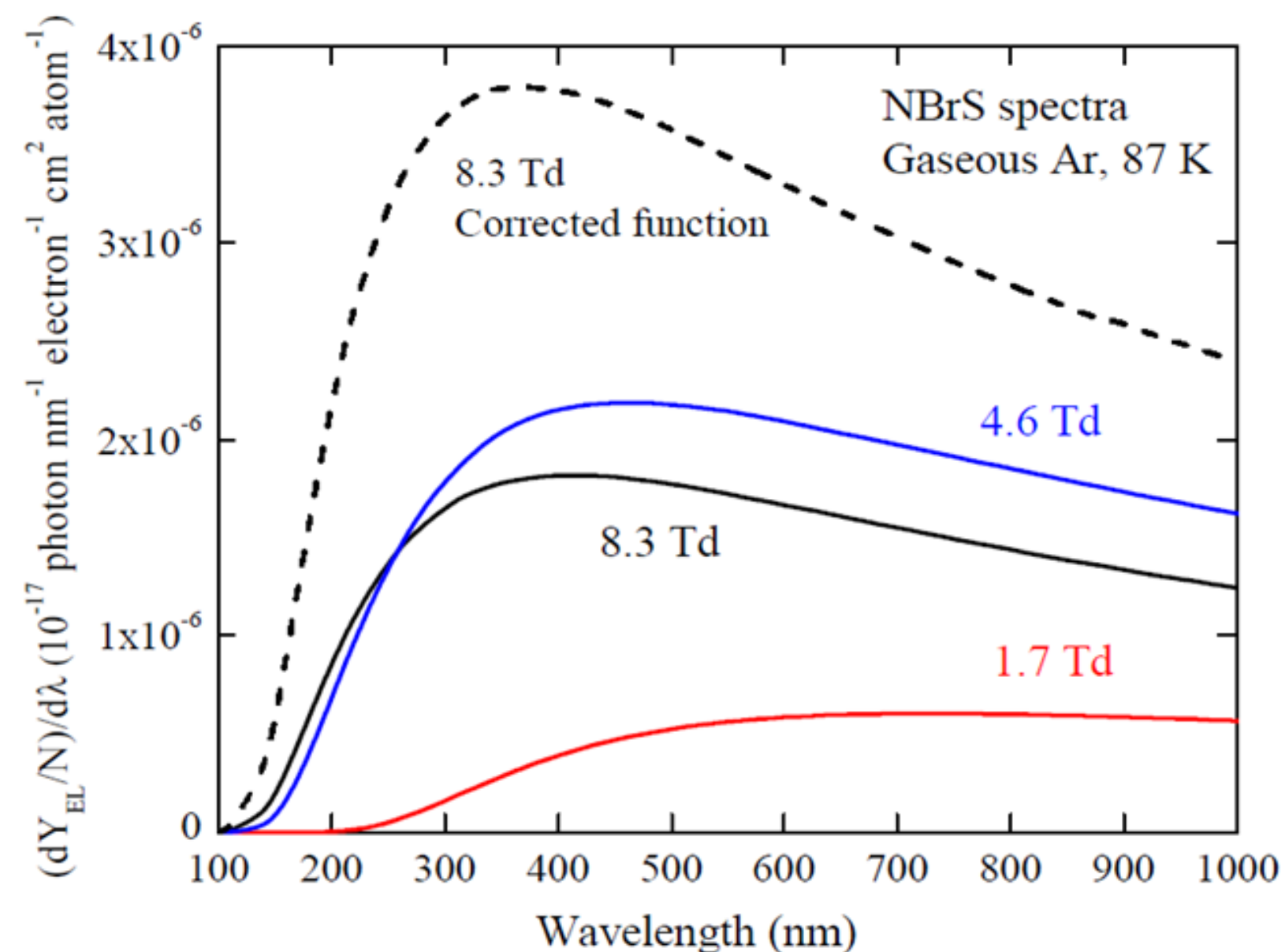
中性制動放射 (Neutral Brems.)

: 新たなS2発光機構として提唱 **

- ~10 eVの電子と原子核の散乱
- 低取り出し電場 (EL光閾値以下) から発光
- 発光波長は可視光領域の連続スペクトラム, 電場依存
- 存在の確証は未だ無い (可視光発光は確認されている)



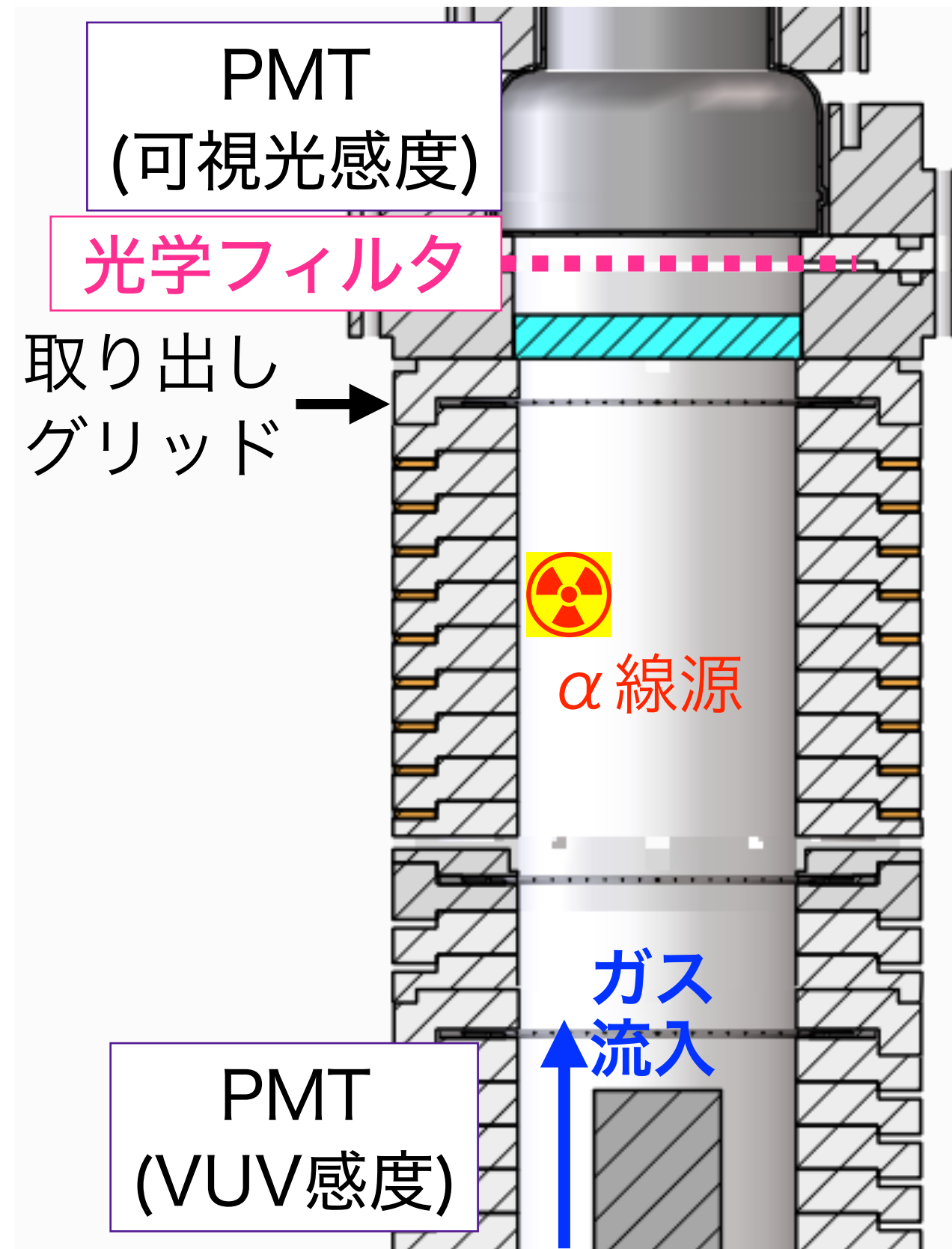
** Astropart.Phys. 103 29



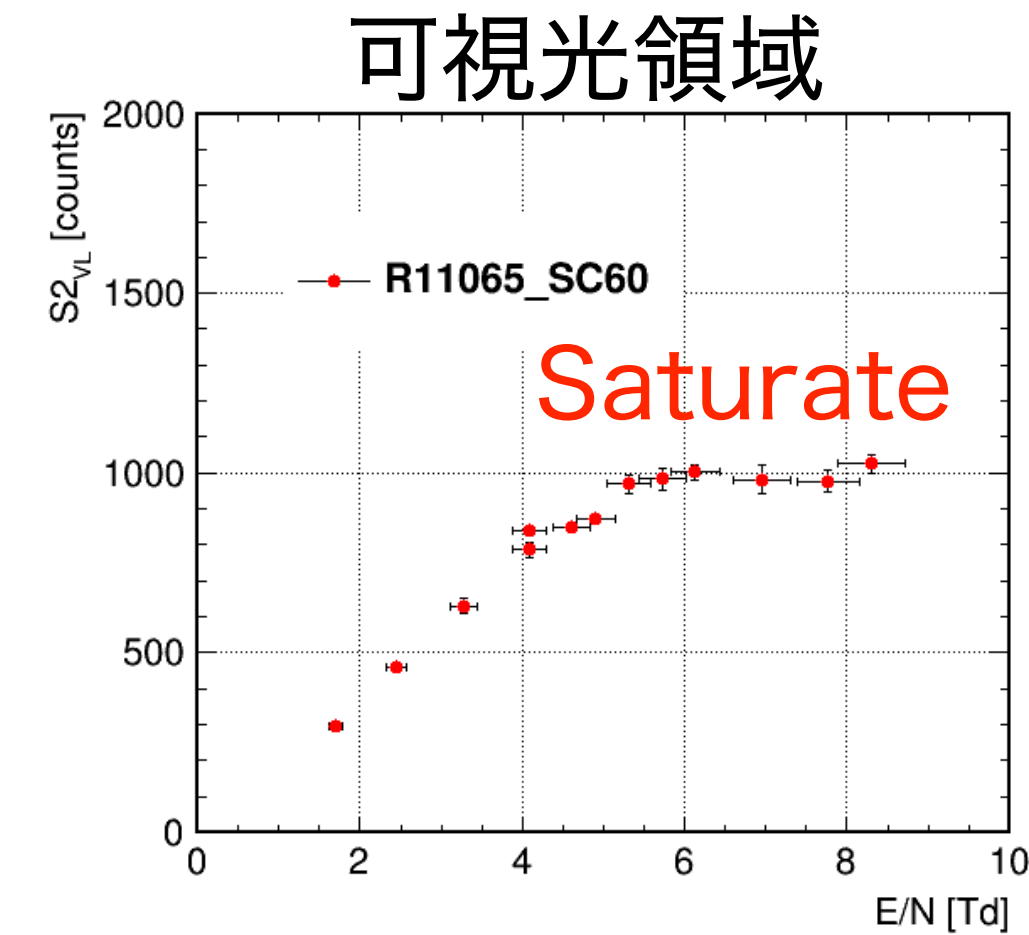
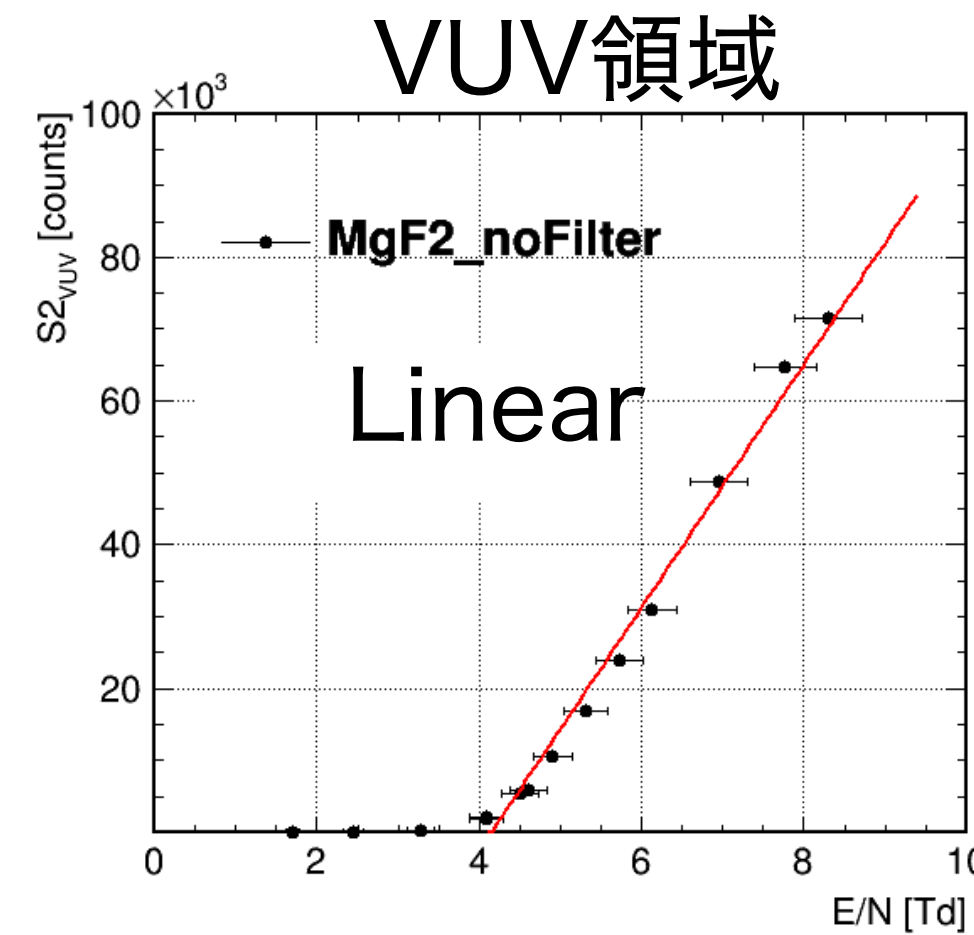
GAr中の

中性制動放射

- : 常温ガスTPCセットアップによる測定
- VUV-PMT (R6835) + 可視光PMT (R11065)
- 光学フィルタを用いた波長スペクトラム測定

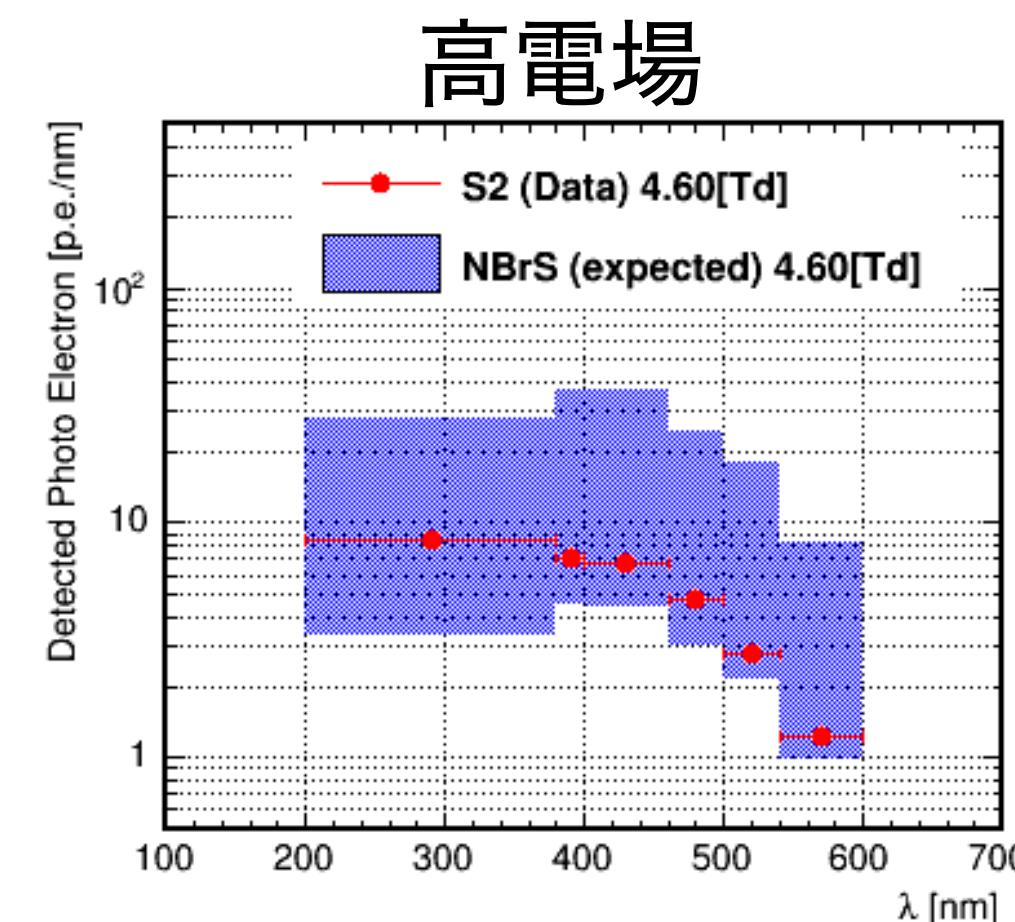
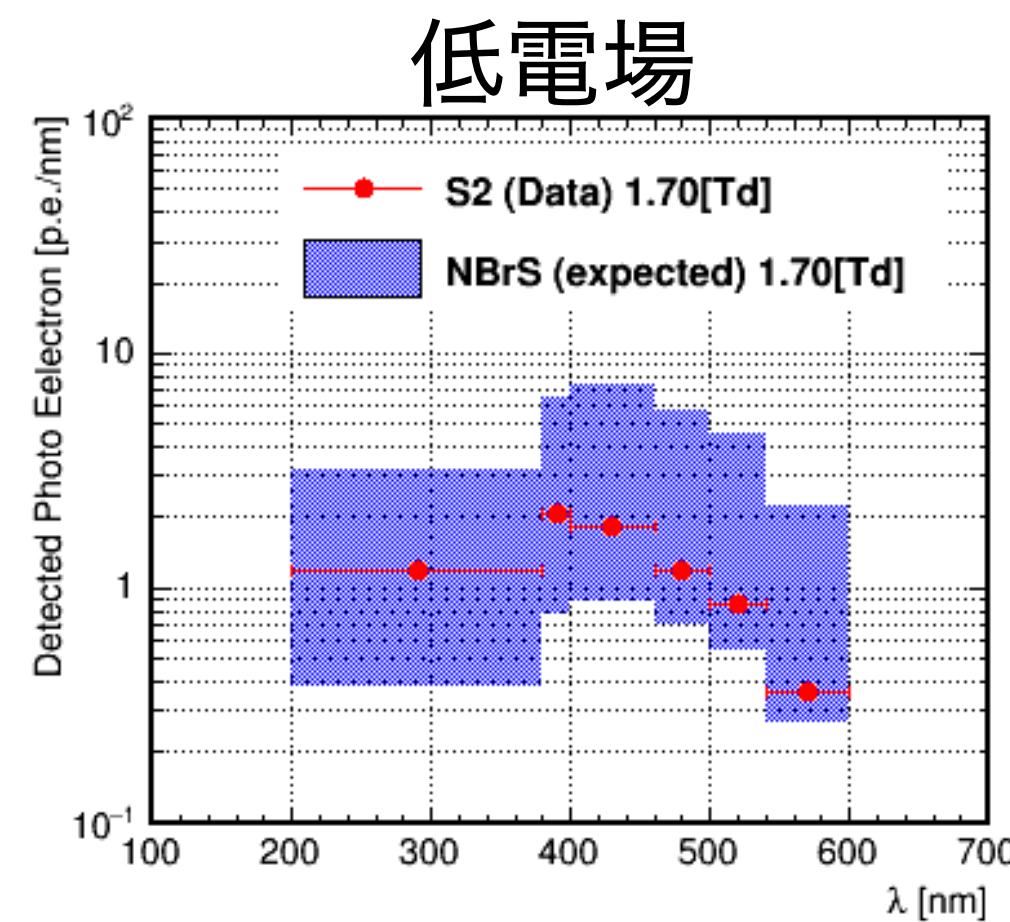


電場
依存性



VUV光 (EL光) と
可視光で異なる挙動

波長
分布



NBrSと無矛盾な
スペクトラム

→ Ongoing : 波長スペクトラム詳細測定 (分光器の利用), 放出確度分布測定 (放出角は偏るべき?)

： 気液2相型アルゴン光TPC

- シンチレーション光と、電離電子由来のエレクトロルミネセンス光を観測
- 軌跡が作られないような低エネルギー事象にも有感

： 低質量暗黒物質直接探索のための気液2相型アルゴン光TPCの開発

- Liquid Argon Test Stand @ Waseda Univ.
- 検出光量 (光収集効率) の最大化
→ 世界最大光量を達成, さらなる向上に向けたR&D中
- 液体アルゴン応答の定量理解
→ 高電場・低エネルギー事象に対する応答を測定
- 液体アルゴン光検出器の基礎特性評価
→ エネルギー分解能の測定, エレクトロルミネセンス (S2) の詳細理解

： 検出器の高感度化による暗黒物質探索とともに,
アルゴン光検出器の改良による他の物理実験への応用を進める (e.g. 光+電子読み出し)

Backup

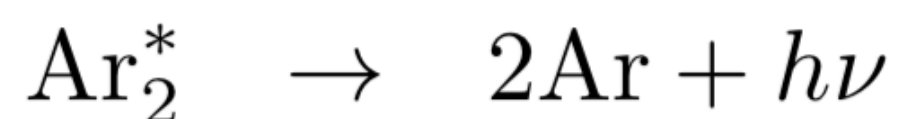
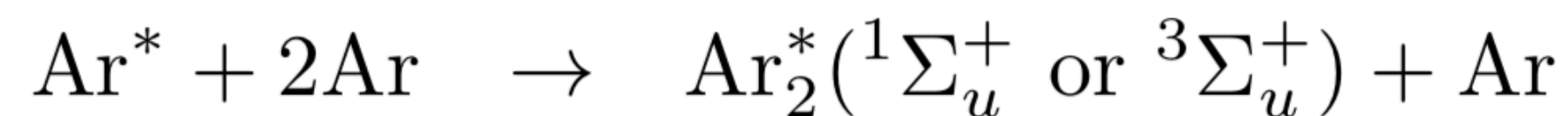


WASEDA University

LAr-Scint.の基礎特性

: 直接励起 or 電離再結合によって二量体を形成し、脱励起時に真空紫外光 ($\lambda = 128 \text{ nm}$) を放出。

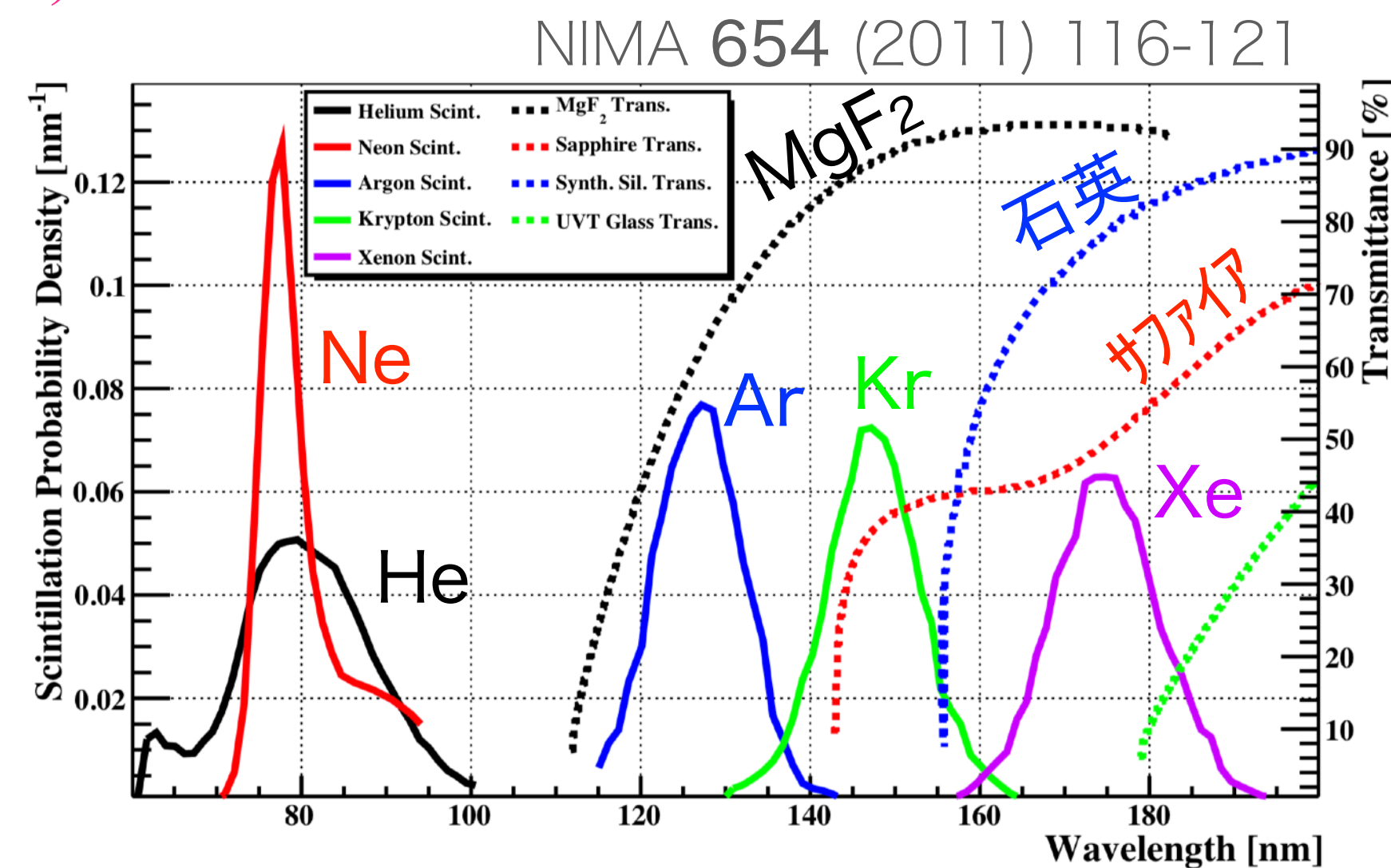
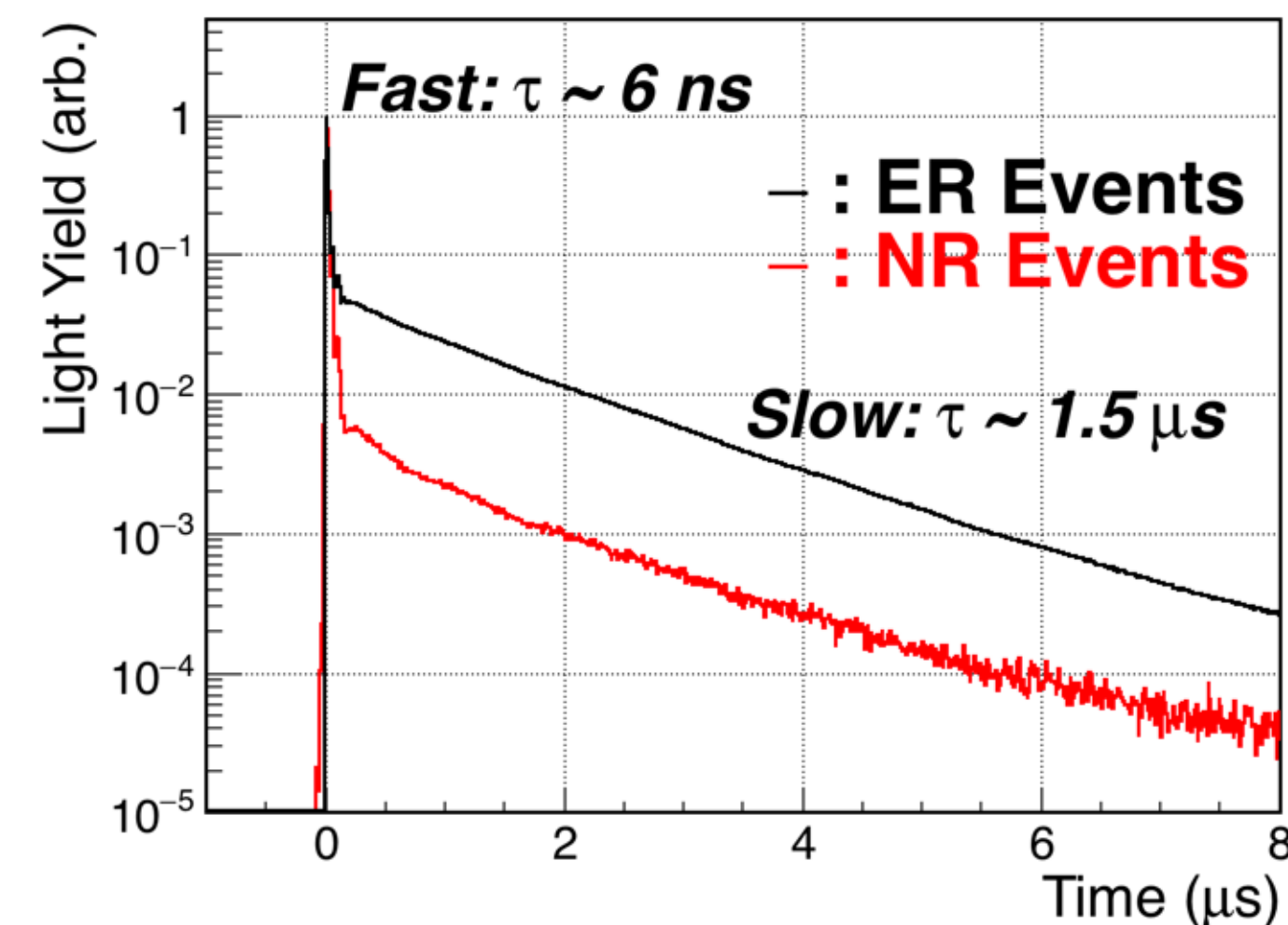
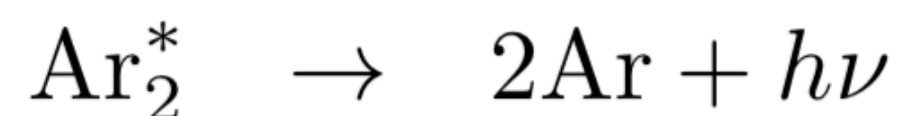
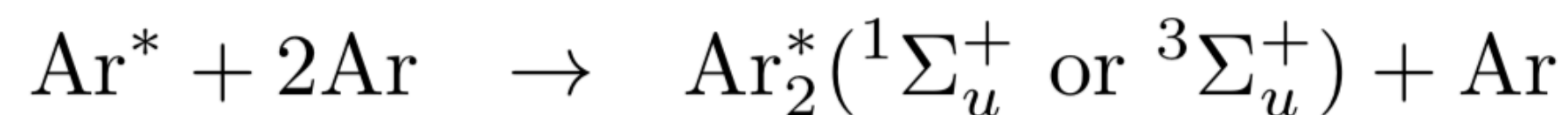
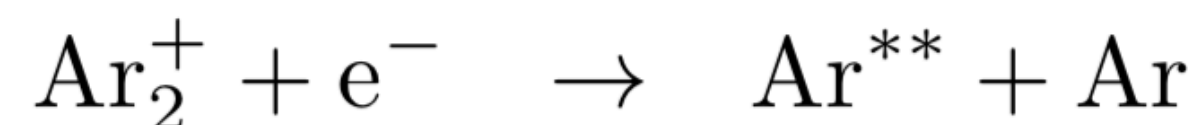
直接励起



“Slow” ($\tau = 1.6 \mu\text{s}$)

“Fast” ($\tau = 6 \text{ ns}$)

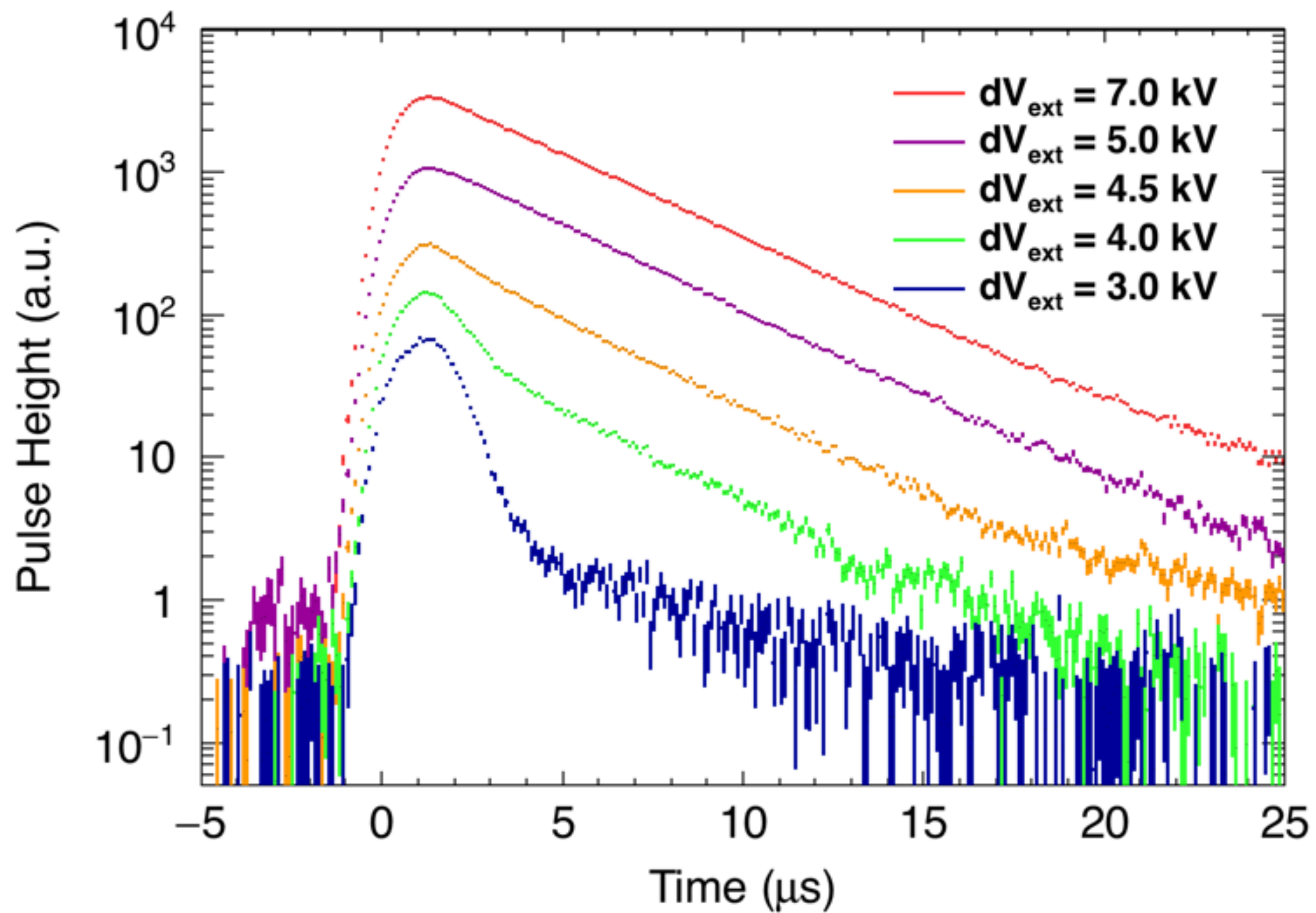
電離再結合



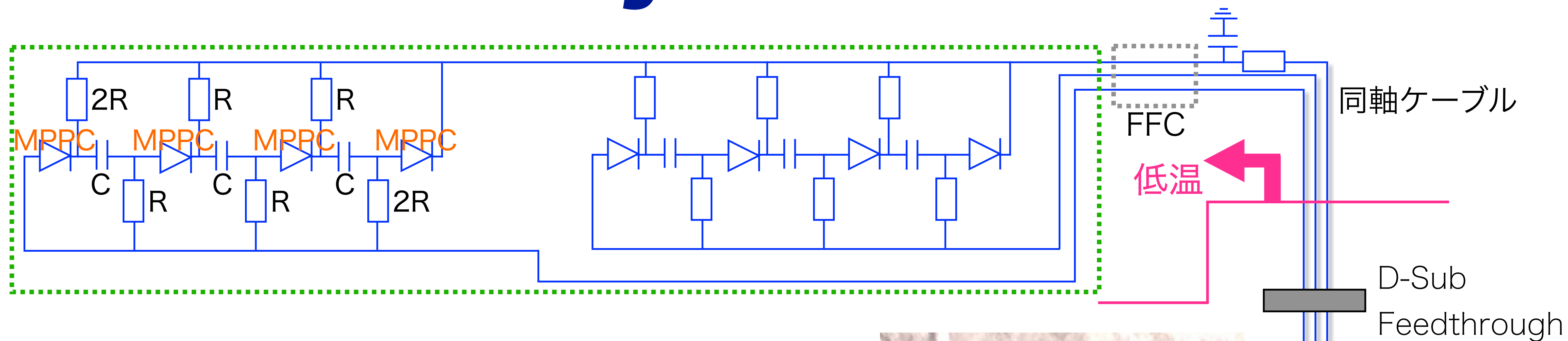
低温用PMT(石英窓)では直接検出不可 (→後述)



S2波形



MPPC-Array駆動回路



- : MPPCを”ハイブリッド接続” (MEG II方式)
 - 短い信号時定数, 単素子時と同じ印加電圧
- : 4 MPPC / ch
(Total 32 ch / detector @ 1次試験)
- : 市販のD-Sub Feedthroughによる信号線導入,
FADC (250 MS/s) による波形取得を予定
- : (基板・回路のプロとご相談できると助かります)

