

液体キセノン中での 真空紫外光照射試験で探る MPPCの光子検出効率低下機構

山本 健介、潘晟、David Gallacher^A、岩本敏幸、大谷航、小川拓泰^B、鈴木大夢^{B,C}

(東大ICEPP、^ATRIUMF、^B東大理、^C神戸大理)

日本物理学会第81回年次大会

2026年9月14日(月)-17日(木)

14aG724-5



VUV光に対するPDE減少 in MEG II実験

- MEG II液体キセノン検出器: 52.8 MeV γ の位置、時刻、エネルギーを精度よく測定

- 900 Lの液体キセノン

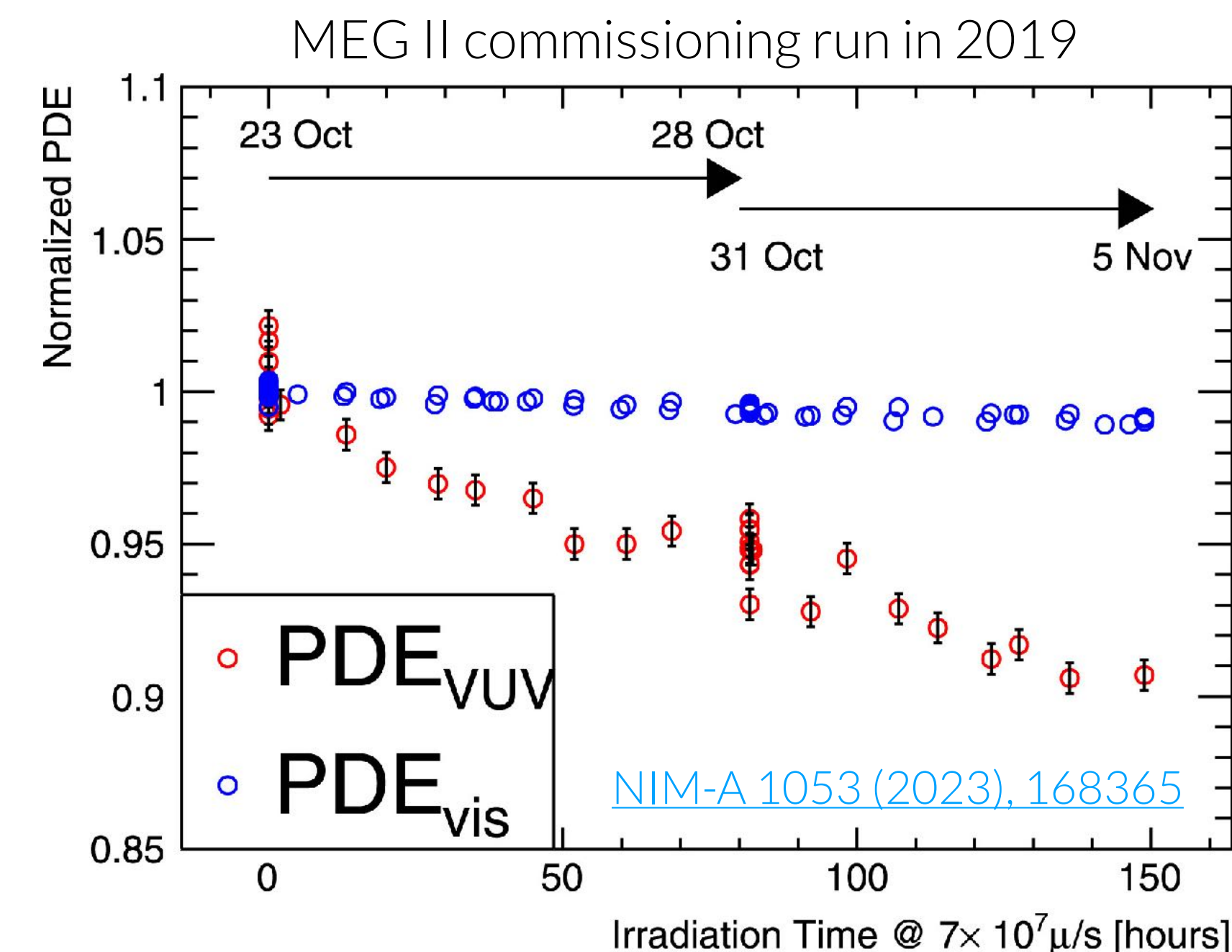
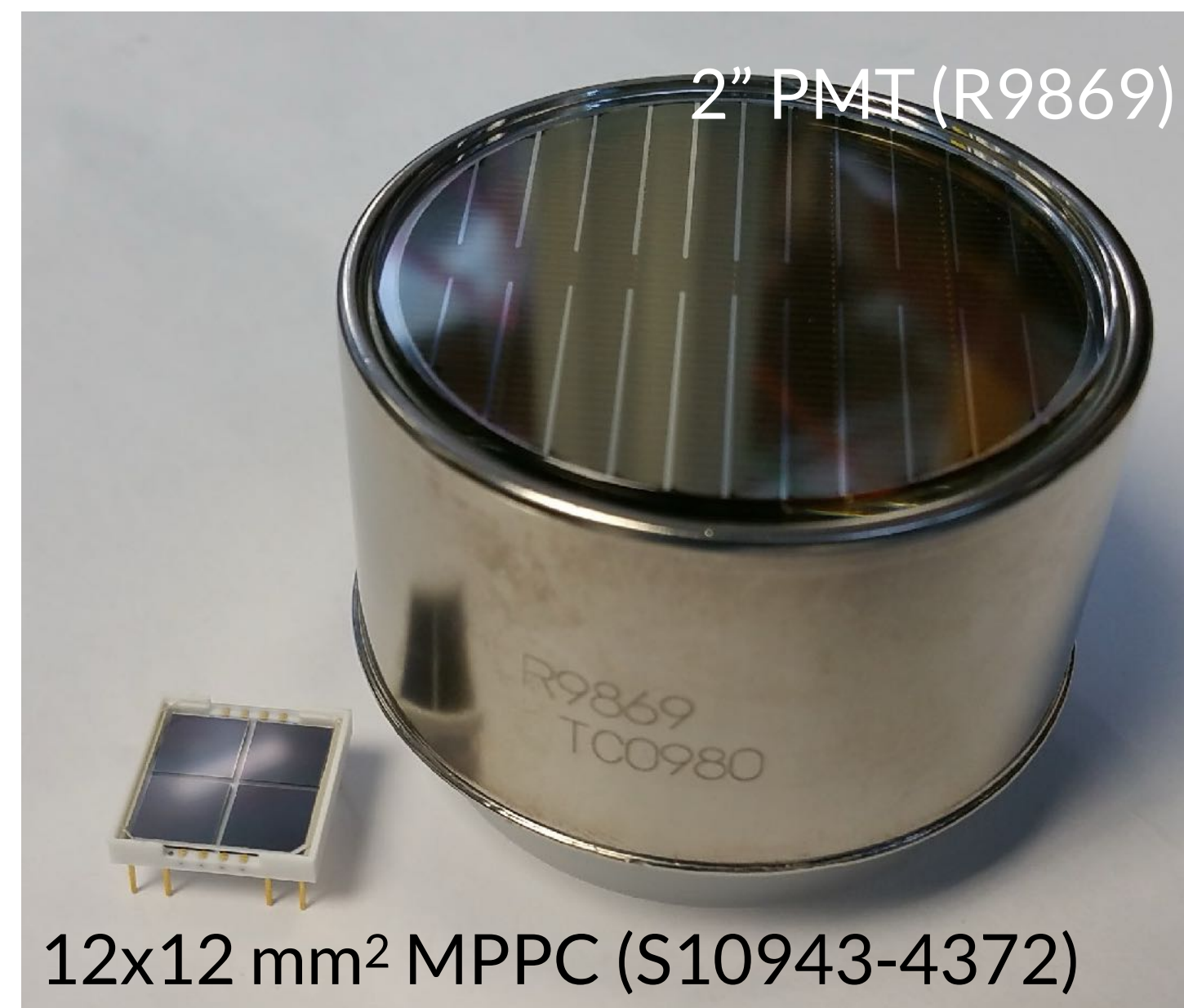
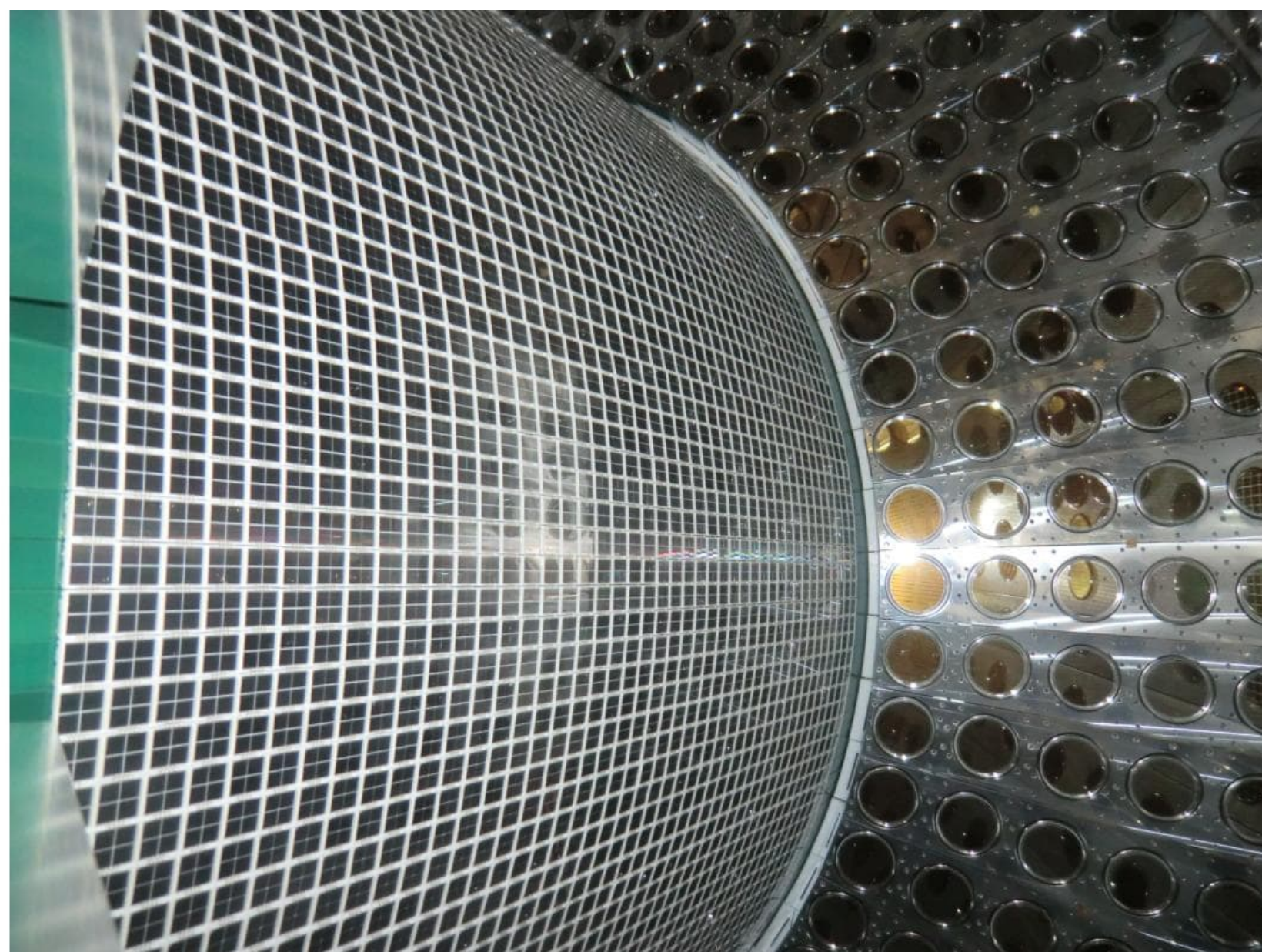
- 真空紫外光に感度のある4092個のMPPC (ガンマ線入射面) と668個のPMT

関連講演:

14pE525-3 (M. Francesconi)

17aG723-[7-9] (潘、李、榊原)

- 高レートビームの使用で真空紫外 (VUV) 光に対する光子検出効率 (PDE) の低下が観測

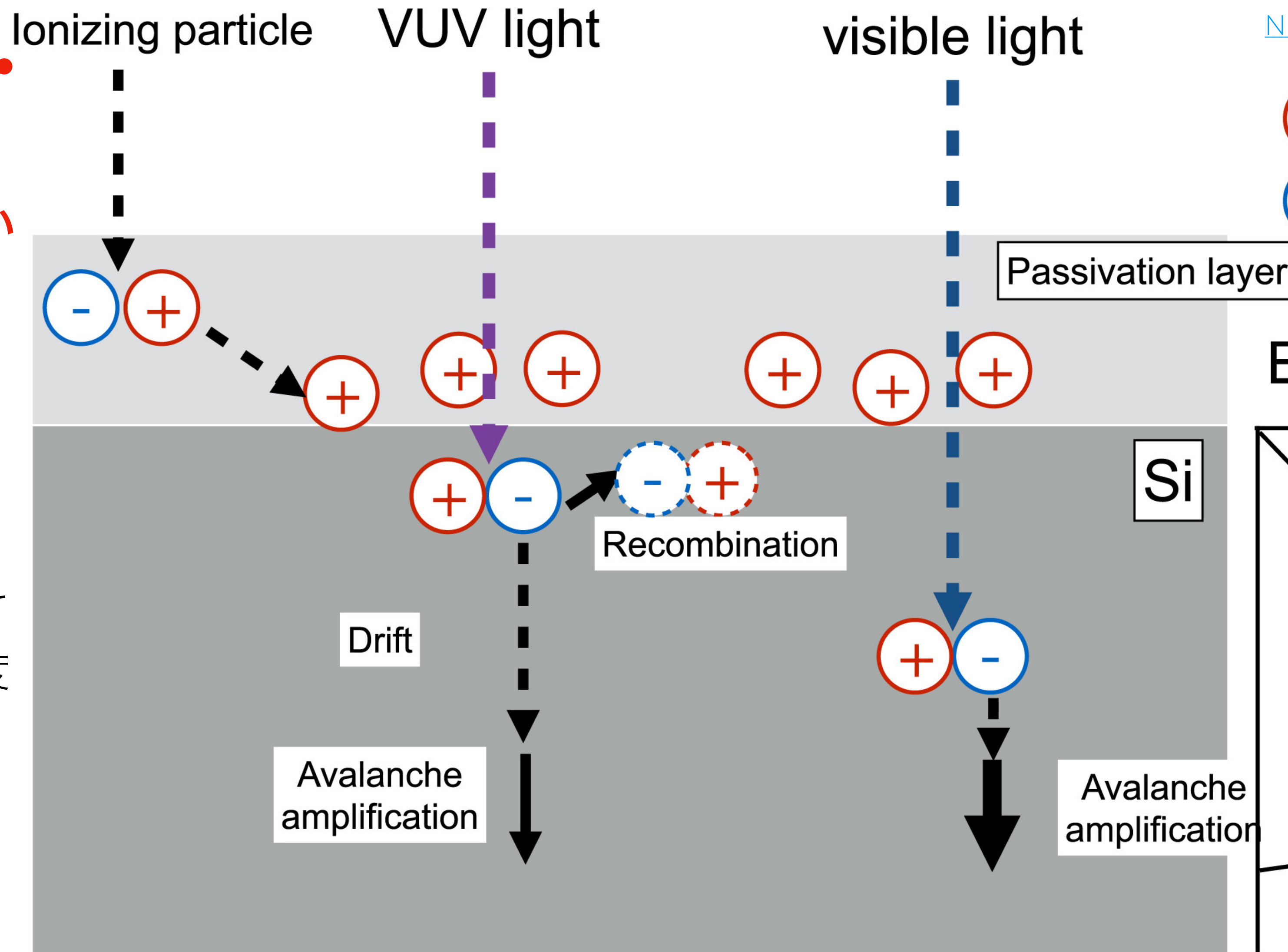


仮説: 表面損傷

[NIM-A 1053 \(2023\), 168365](#)

⊕ Hole
⊖ Electron

Electric field

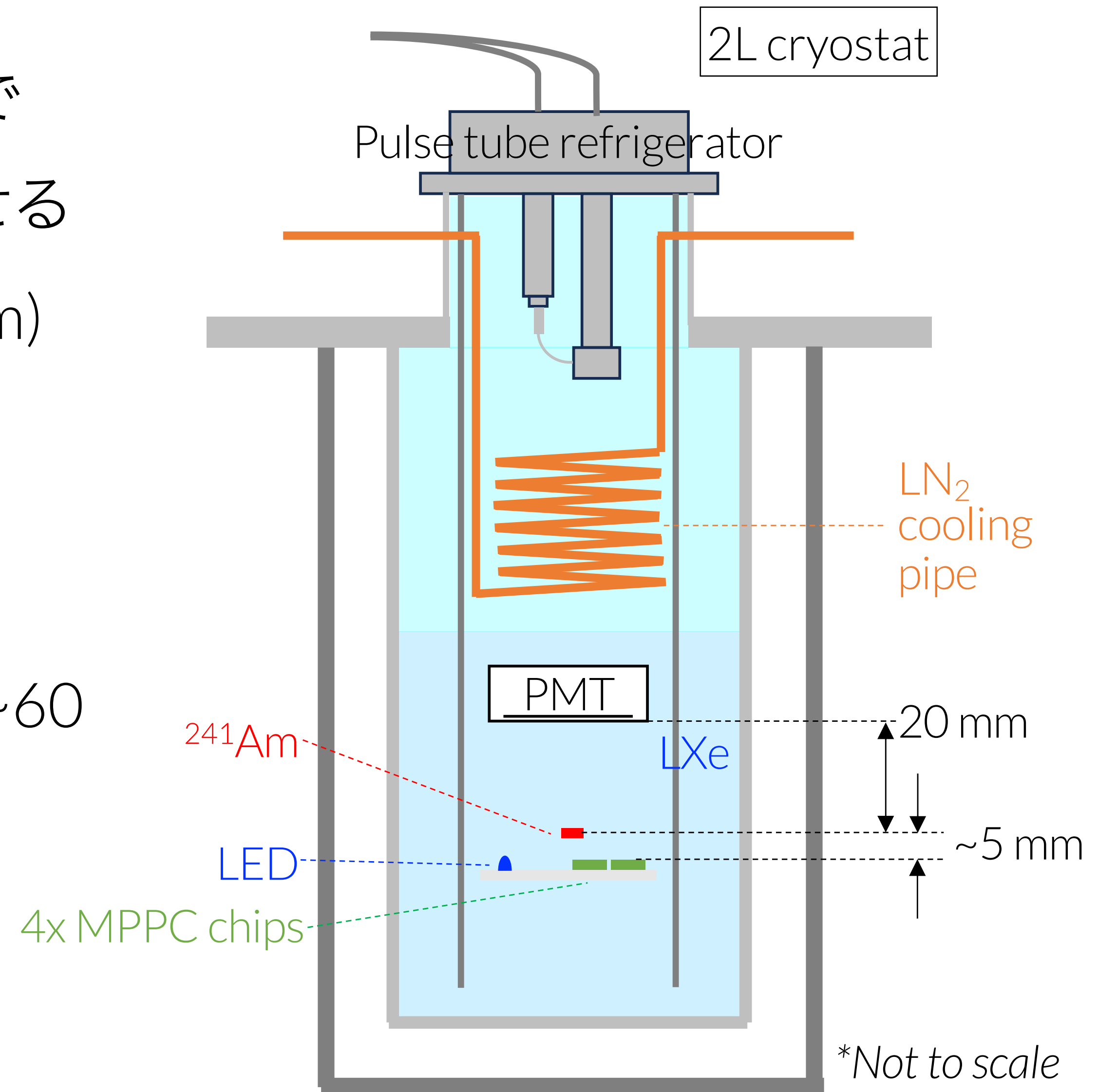


Ionizing particleを特定したい

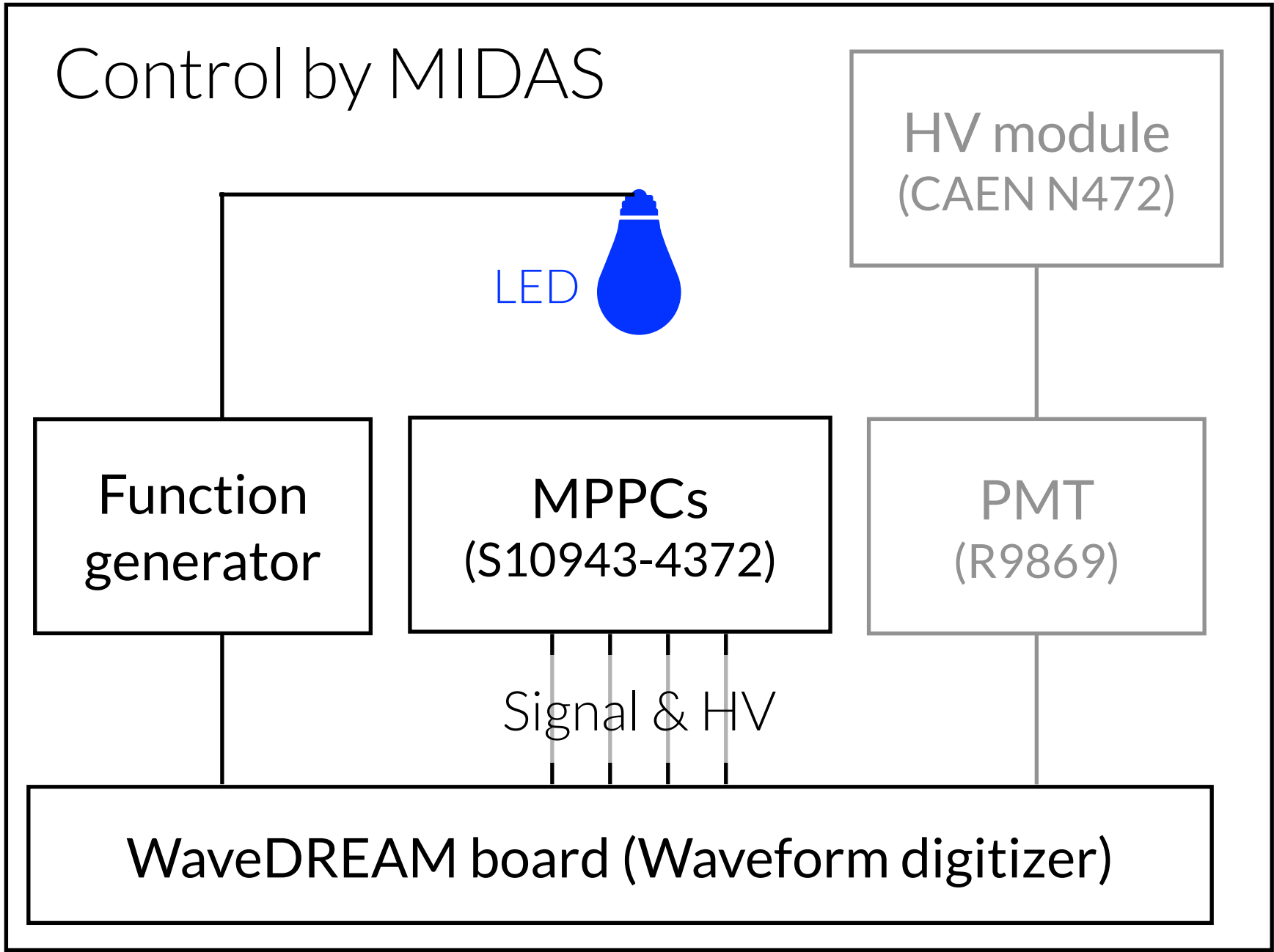
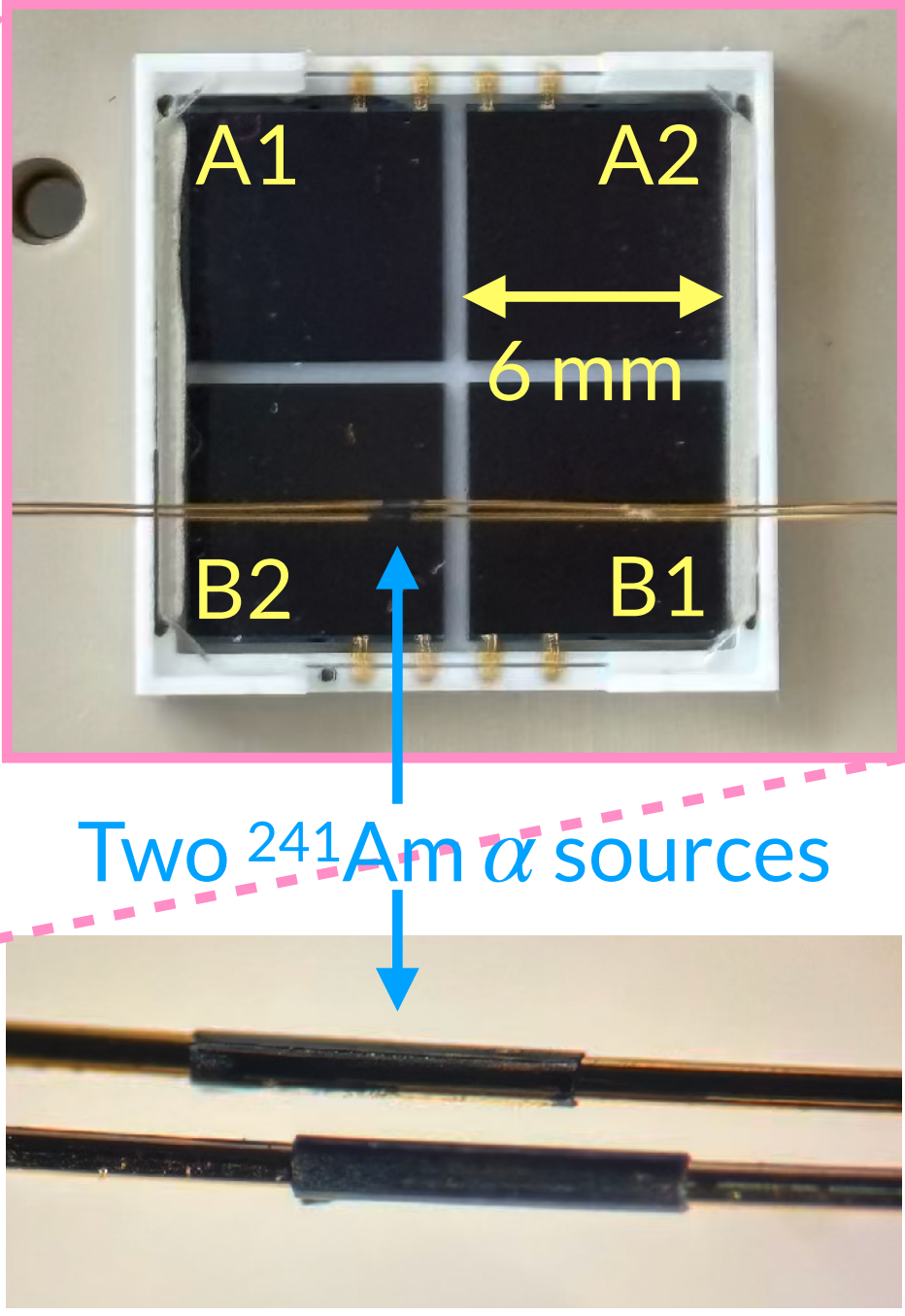
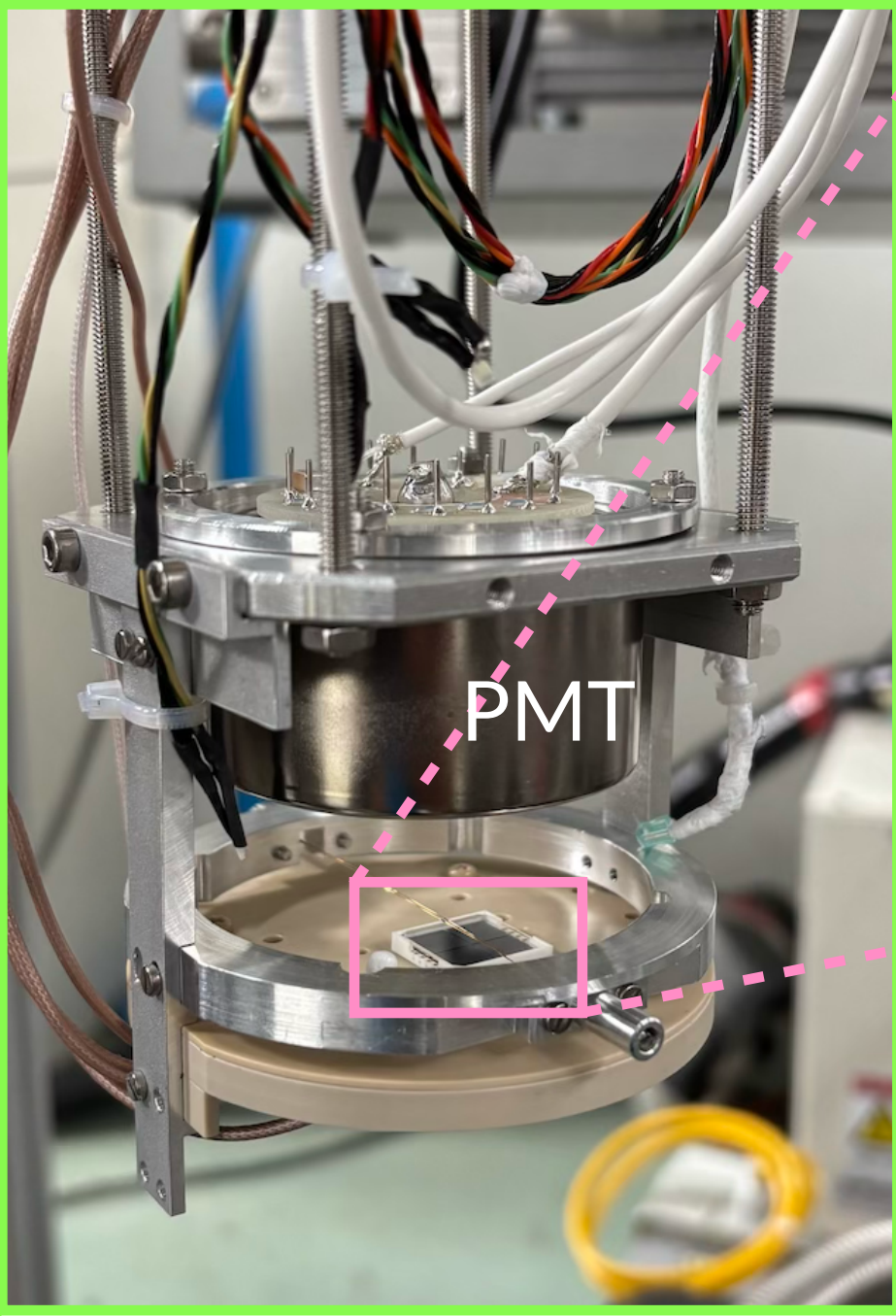
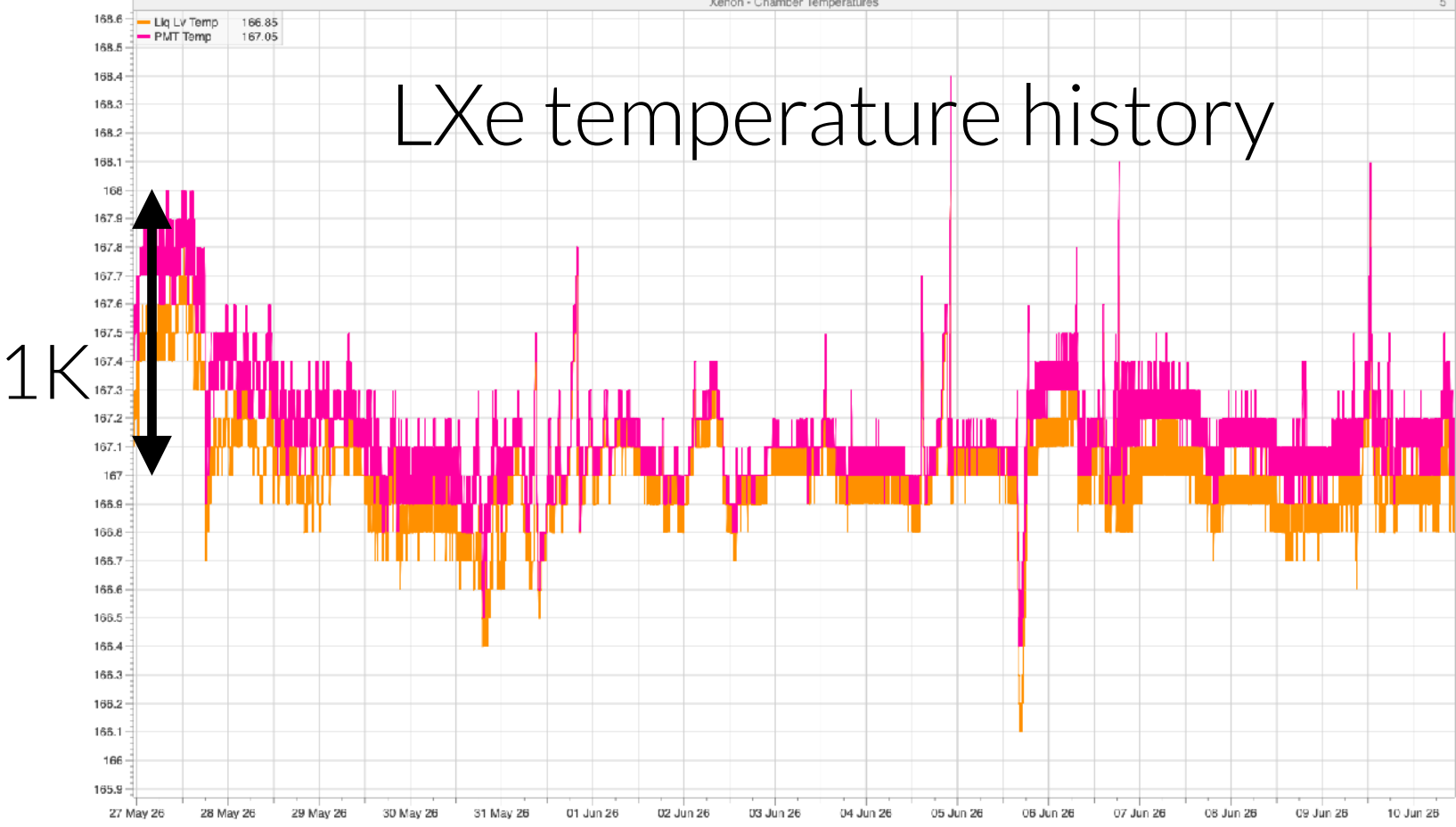
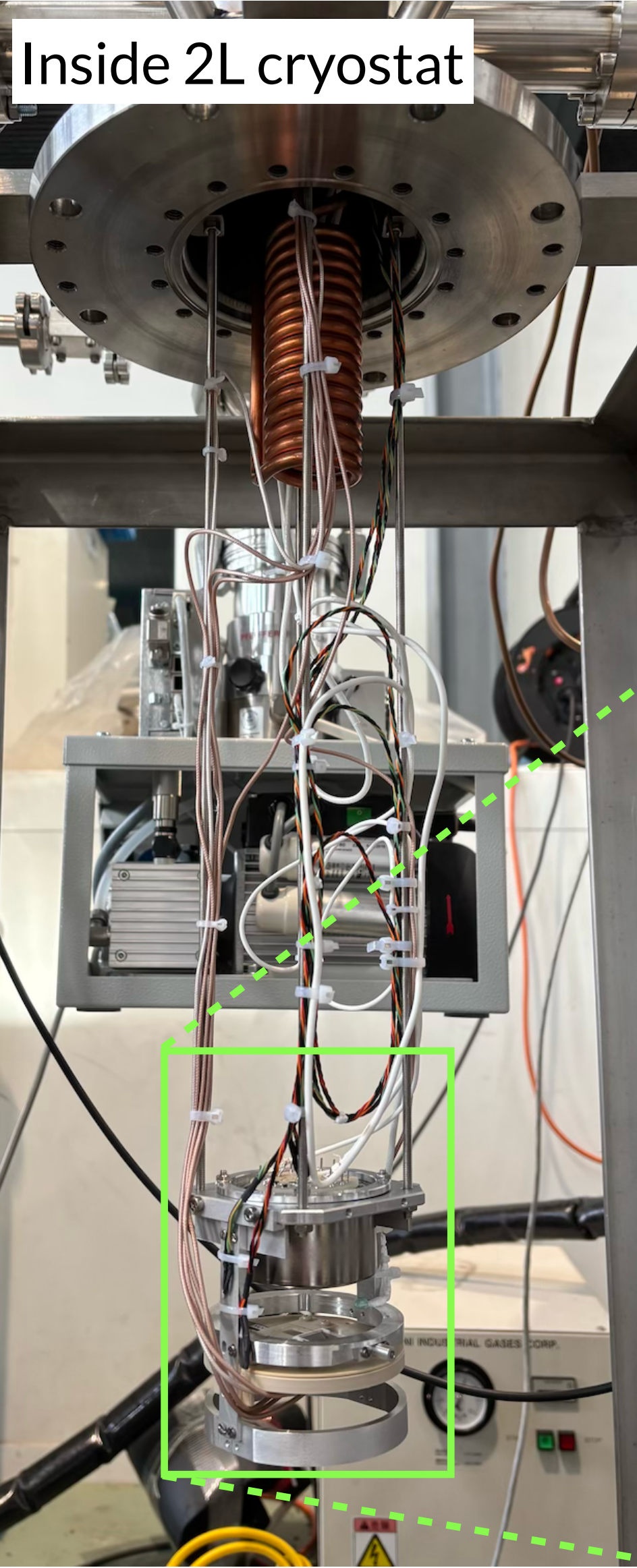
これまでラボでの試験をしてきたが、どの測定も同じ速度のPDE減少を再現できない
 → 温度や印加電圧の有無が重要なのか？

5.5 MeV α 線から発生するVUV光照射試験 in LXe

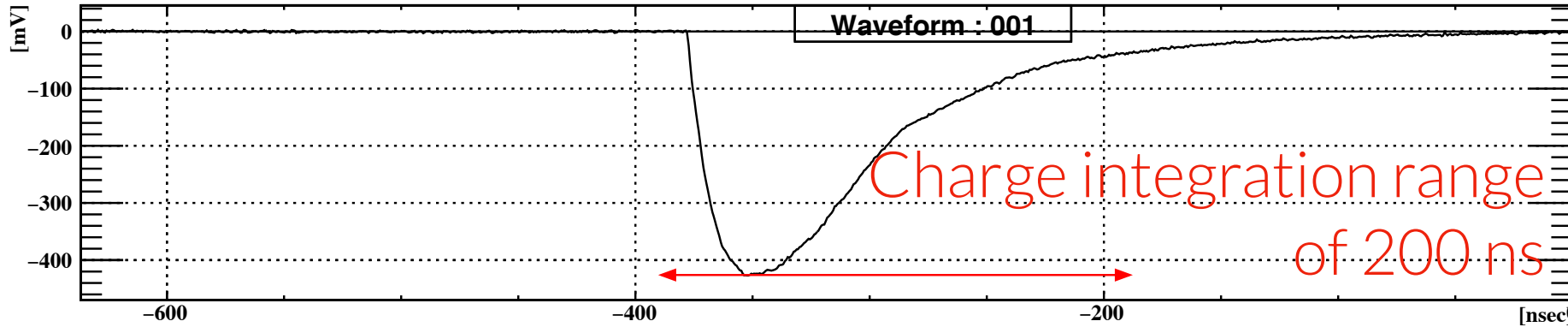
- ^{241}Am から出てくる α 線が液体キセノン中でVUV領域のシンチレーション光を発生させる
- MPPCを ^{241}Am のとても近くに置いて (5 mm) 照射量を稼ぐ
 - MPPCはバイアスした状態で照射
- 5.5 MeVのアルファ線は液体キセノン中で $\sim 60\ \mu\text{m}$ の飛程
- **Passivation layerに正孔をためる”Ionizing particle”としてVUV光を検証**



試験セットアップ



MPPC waveform in an α event



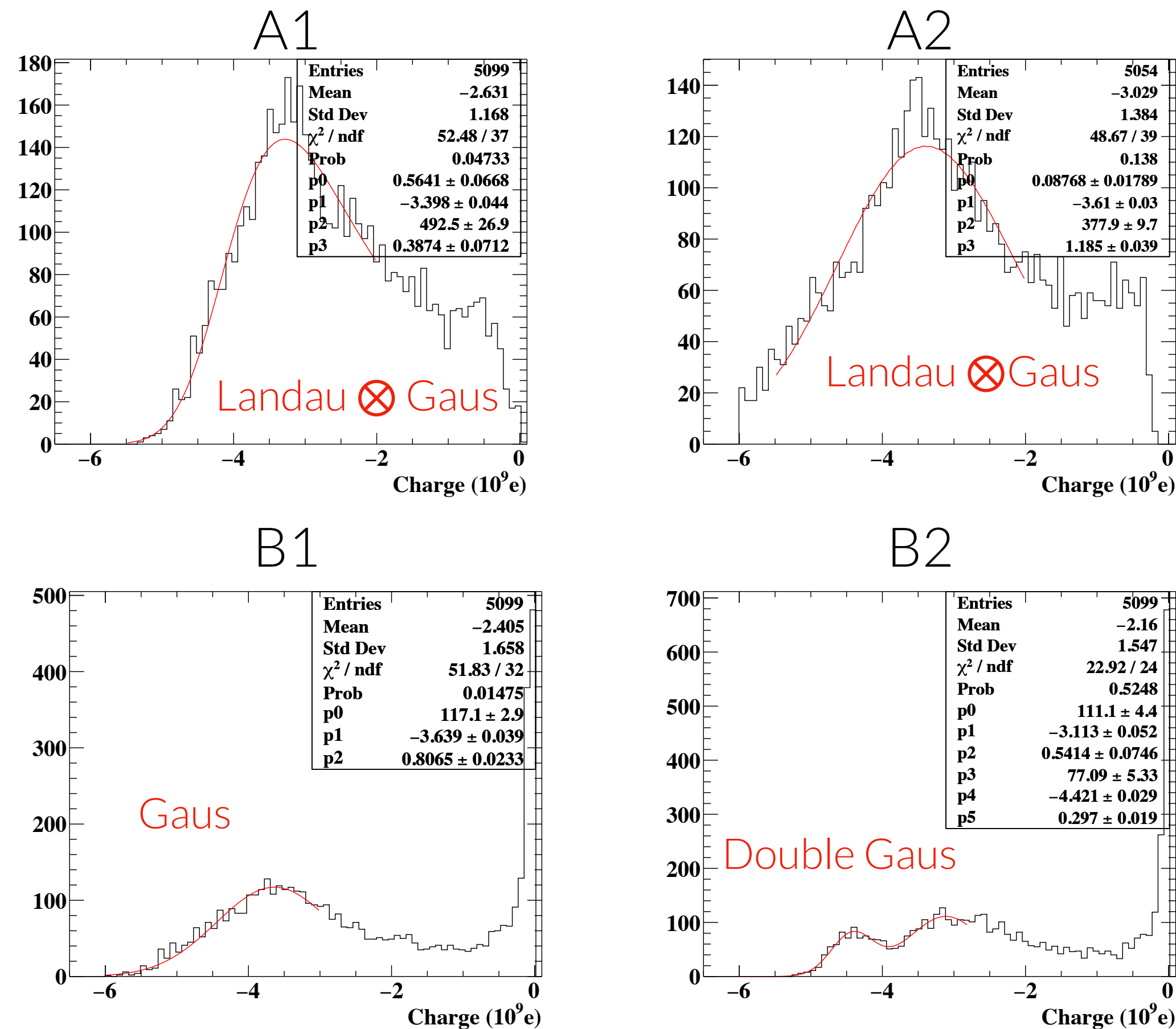
1時間ごとにモニタリングデータ取得

セルフトリガー (アルファ)

$Q_{\text{peak}} \sim 4$

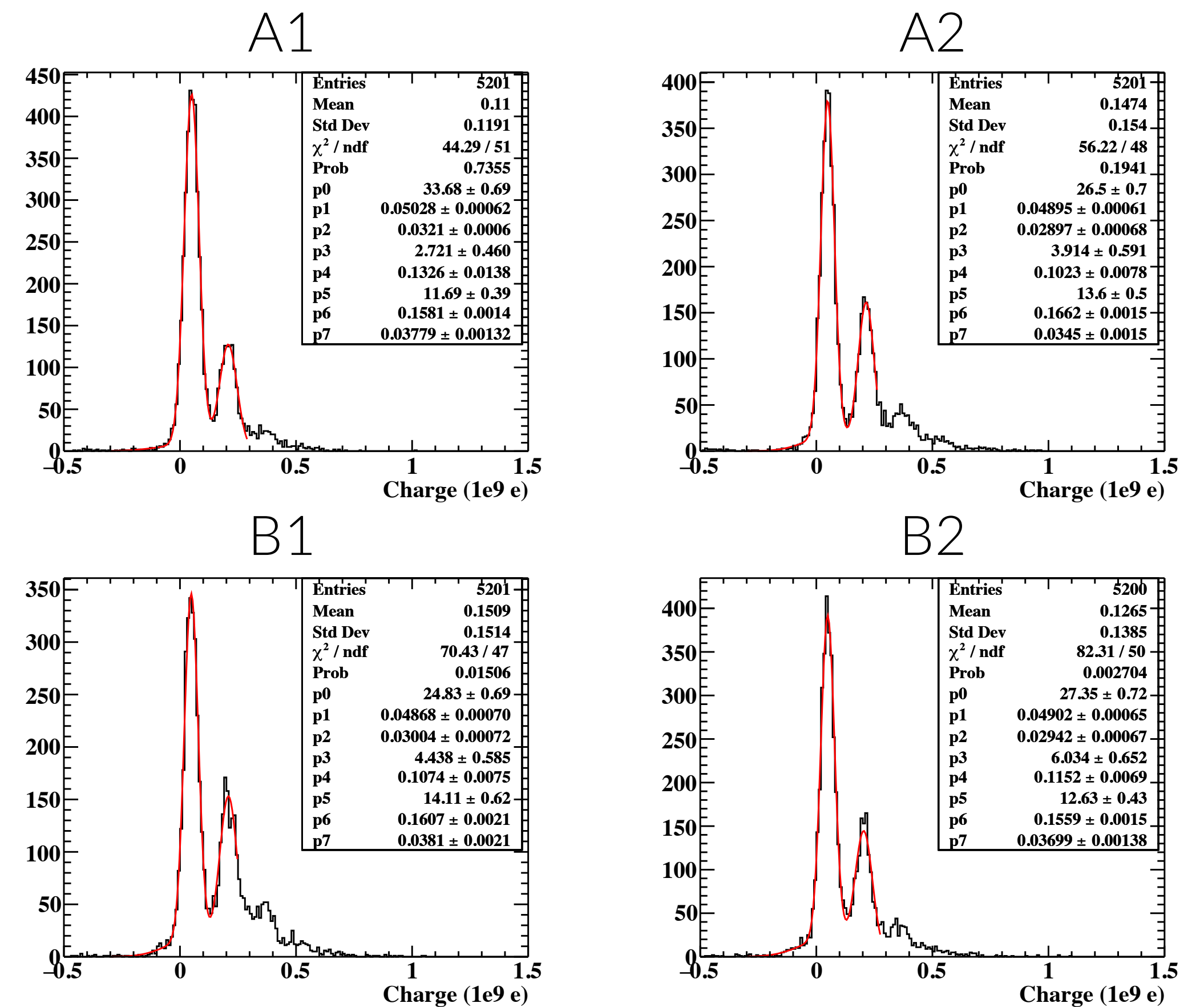
*A2でトリガー

**アンプのゲインは異なる

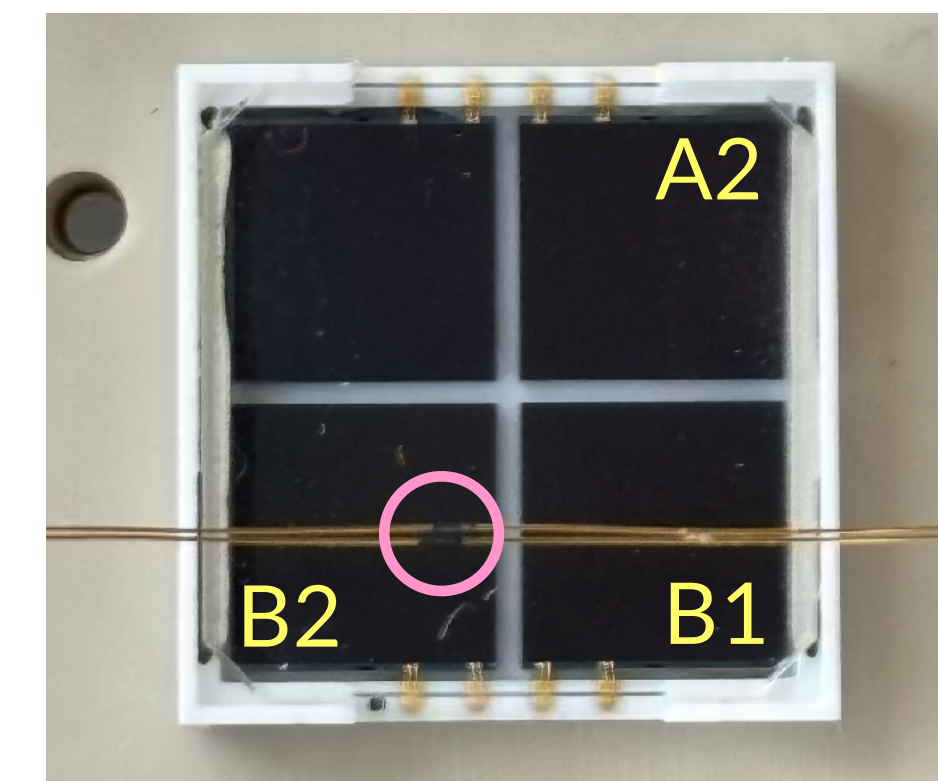


ファンクションジェネレータートリガー (LED)

$G_{\text{SPE}} \sim 2 \times 10^6, F_{\text{EC}} \sim 1.1$



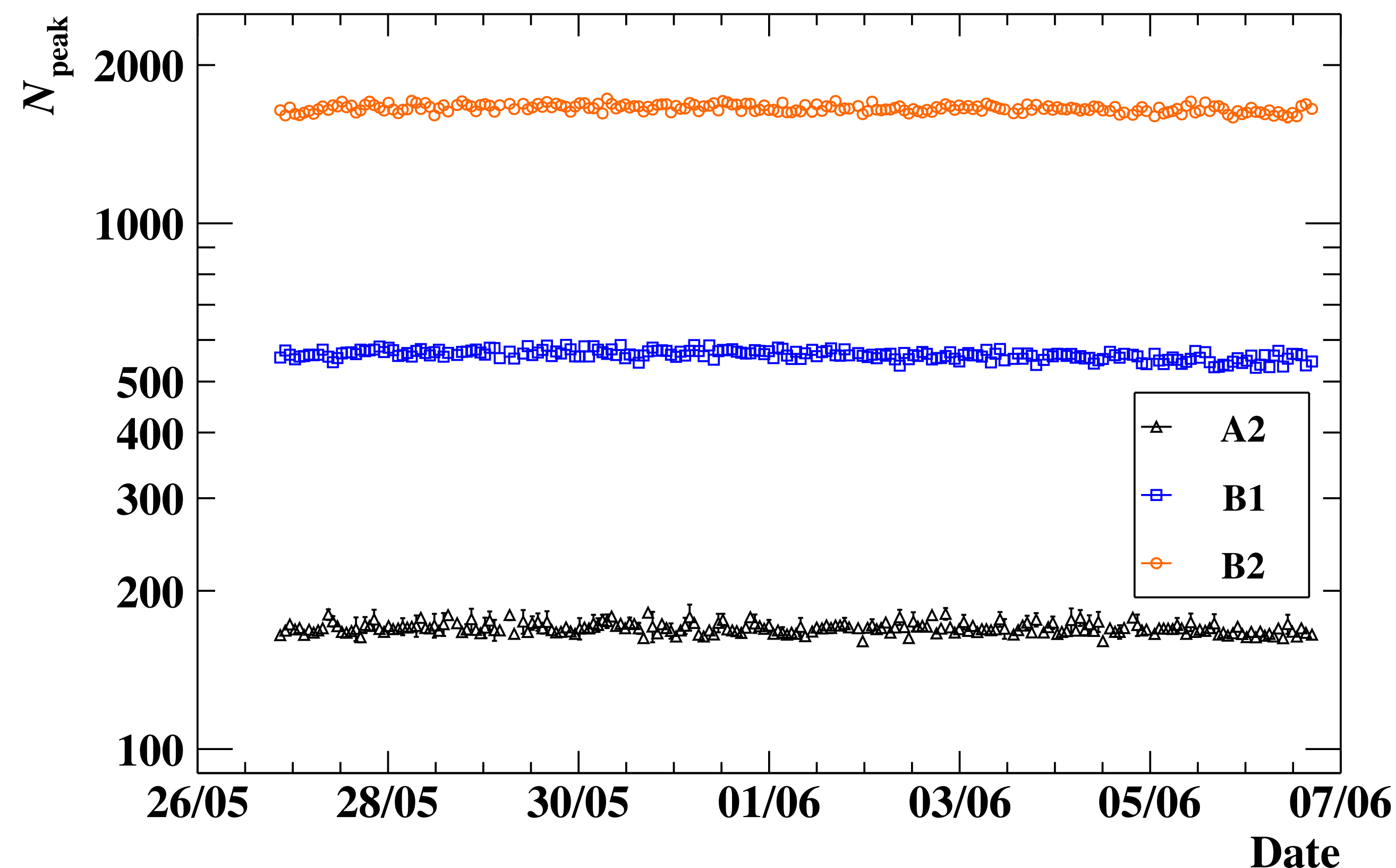
光電子数の推移 as a function of time



- 検出光電子数のピークの推移を見る

$$N_{\text{peak}} = Q_{\text{peak}} / (G_{\text{elec}} \cdot G_{\text{SPE}} \cdot F_{\text{EC}})$$

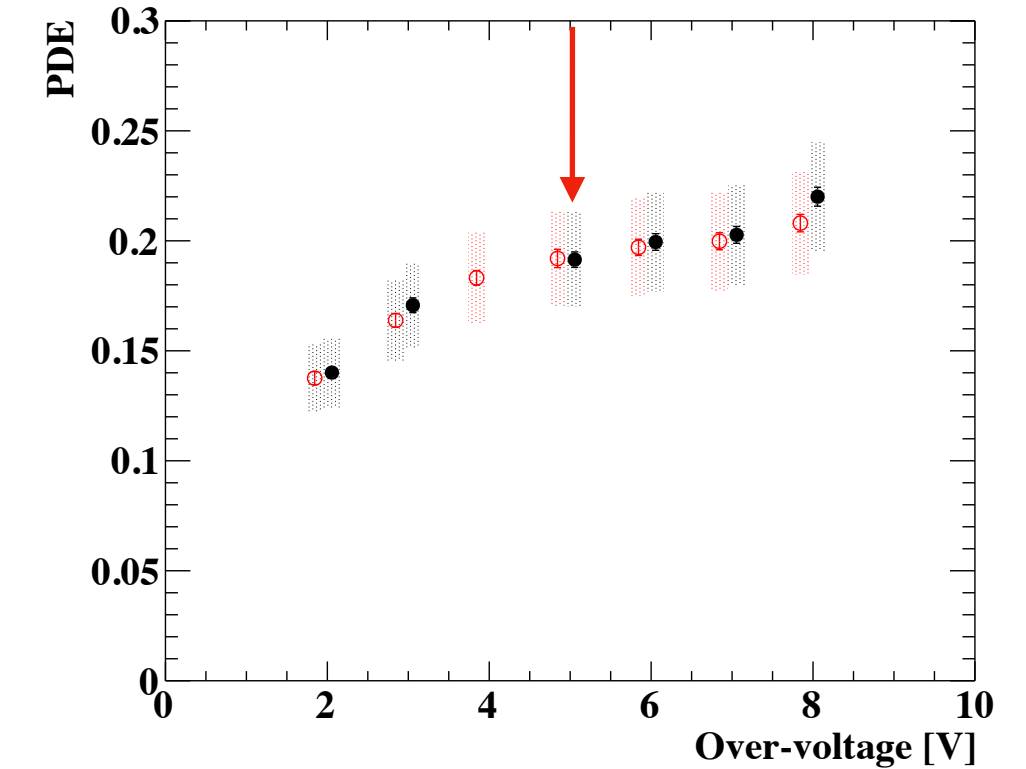
- G_{elec} : アンプのゲイン
- A1チップとPMT信号は解析から除外
 - A1: 信号の不安定性
 - PMT: 予想よりも大きな電荷の上昇
 - キセノン純度の影響を受けている可能性
- 光電子数に最大2%の変化



単位時間あたりのVUV照射量の見積もり

- 最も ^{241}Am に近いB2チップでのフラックスが $(5 \pm 1) \times 10^5 \text{ Hz}$
- PDEの見積もりが最も大きな不定性 (25%)

[NIM-A 925 \(2019\), 148-155](#)

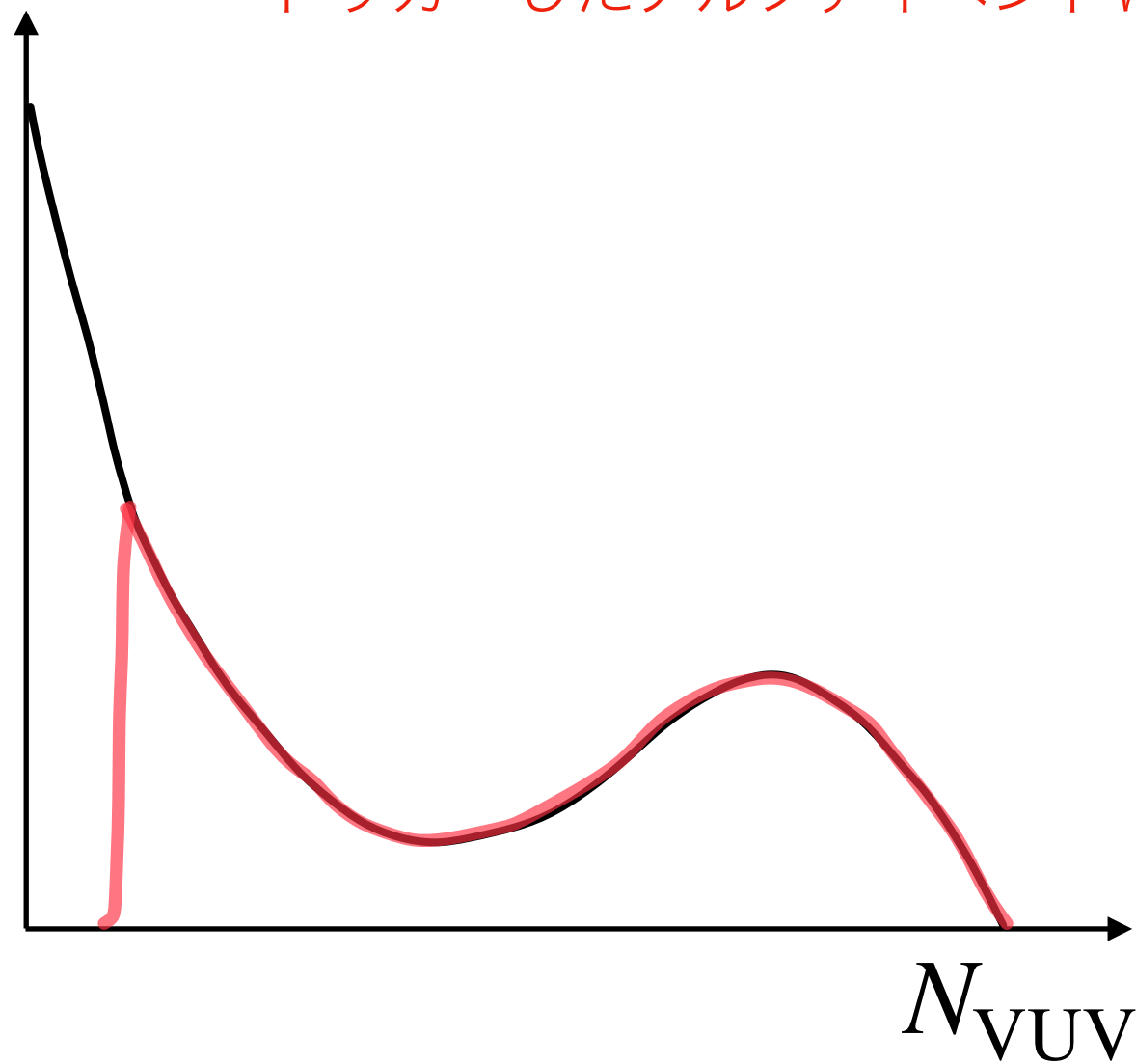


平均電荷とトリガー

$$\Phi_{\text{VUV}} = \bar{N}_{\text{VUV}} \cdot R_{\alpha} = \bar{N}_{\text{VUV}}^{\text{TRG}} \cdot R_{\text{TRG}}$$

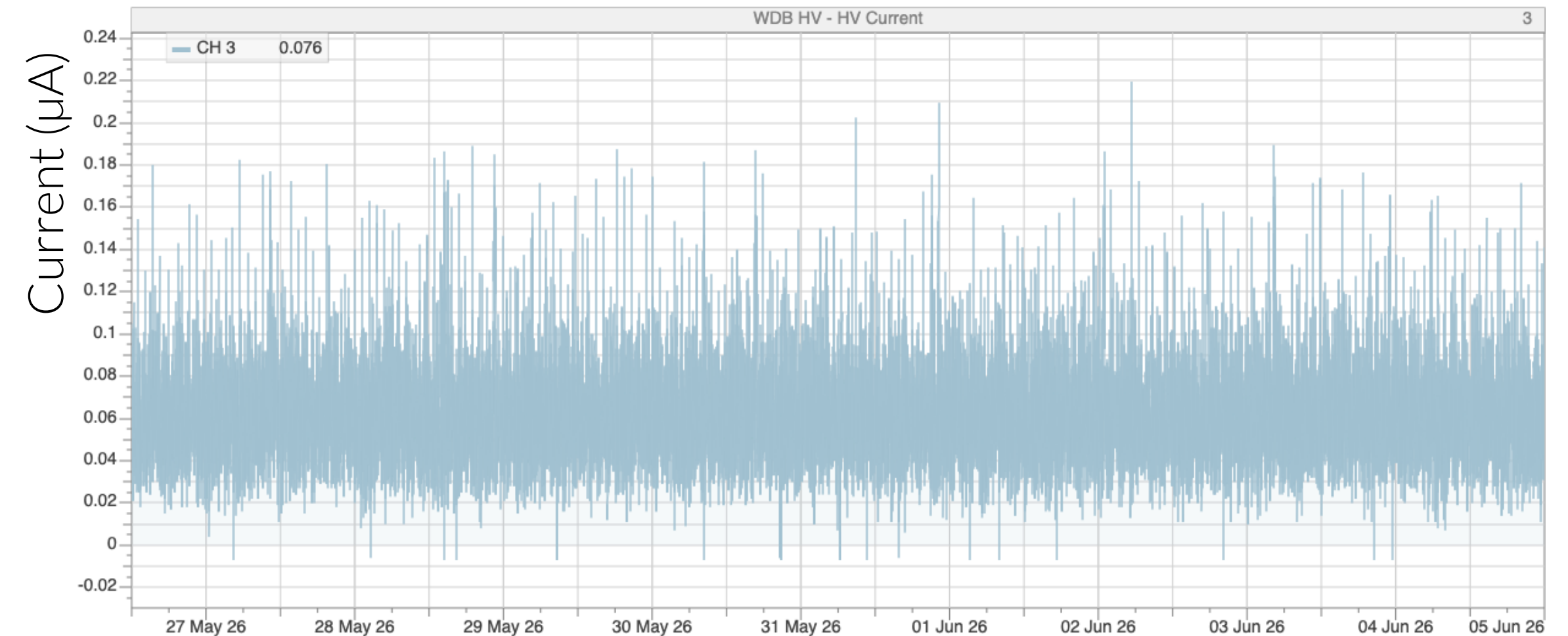
全アルファイベントに対する平均光子数

トリガーしたアルファイベントに対する平均光子数



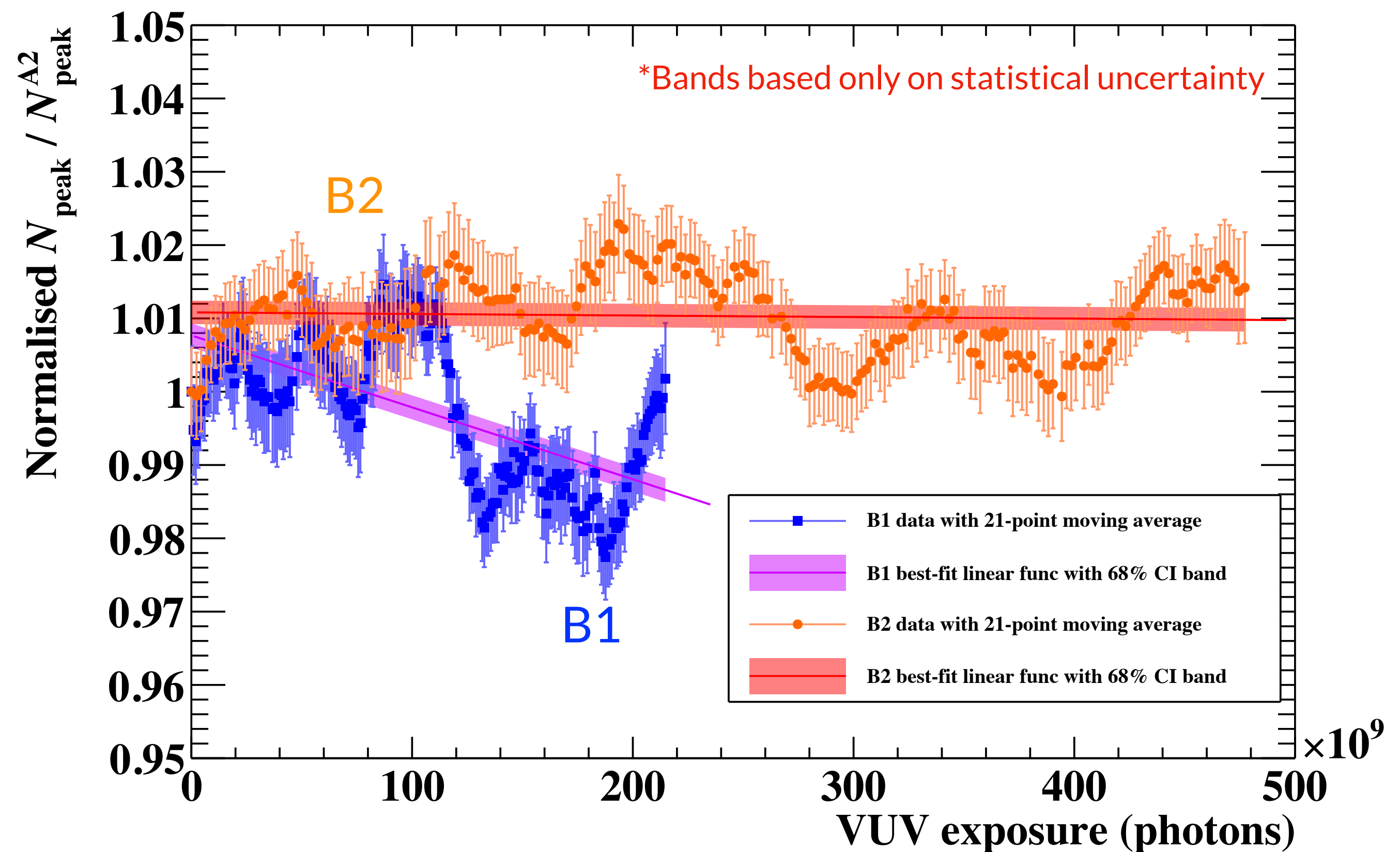
電流

$$I \propto \Phi_{\text{VUV}} \times G_{\text{SPE}} \times F_{\text{CTAP}} \times \epsilon_{\text{PD}}$$



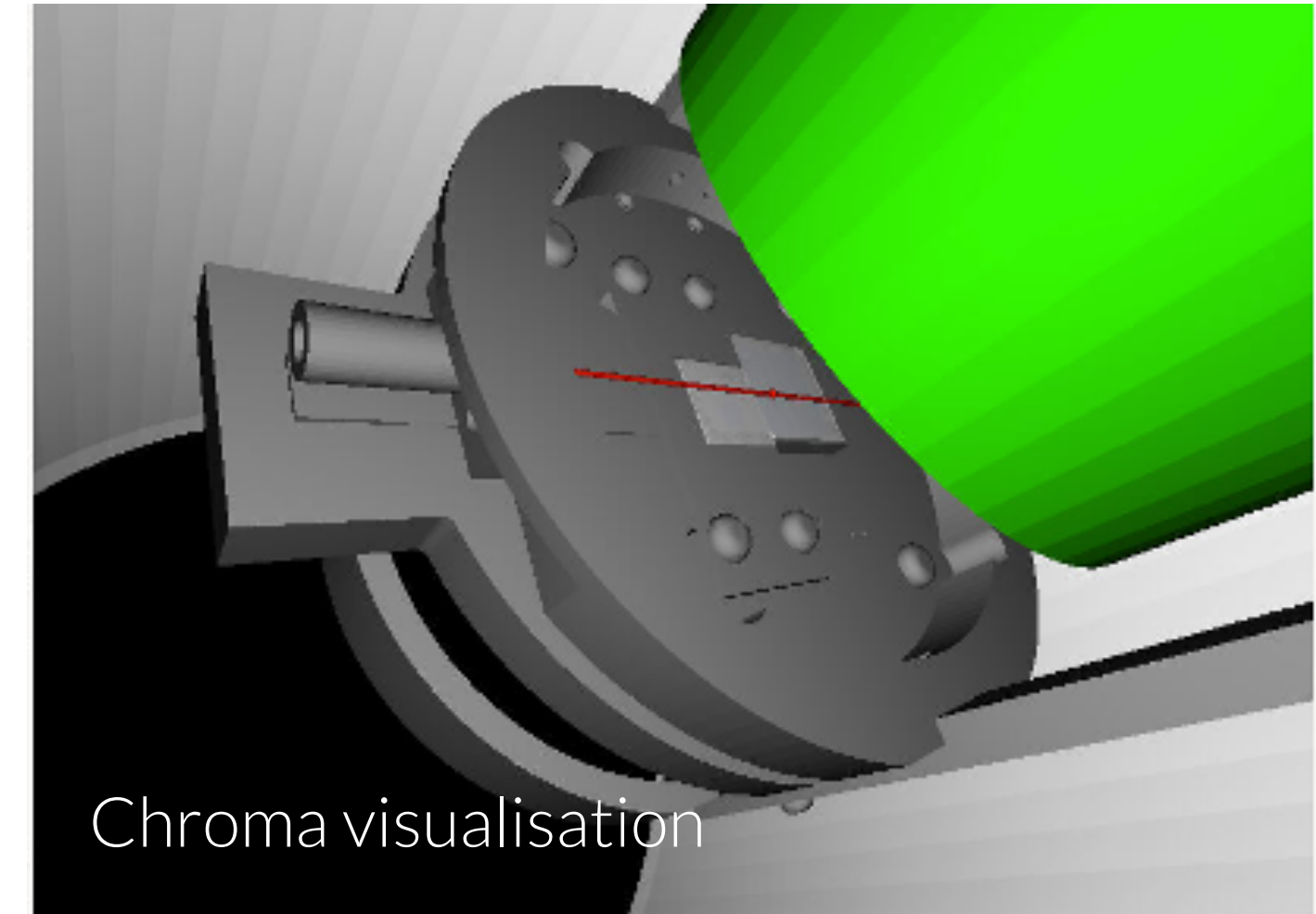
光電子数の推移 as a function of VUV exposure

- 外的な環境要因を抑制するため、A2チップでの時間変動で補正
- B1とB2で同じ振る舞いを予想していたが、そうではない
 - 見落としている系統的な何か？
 - もっと照射量が必要？
- **この試験では結論づけられない**
- 改善点
 - シミュレーションでのイベントの理解
 - 照射量を増やす

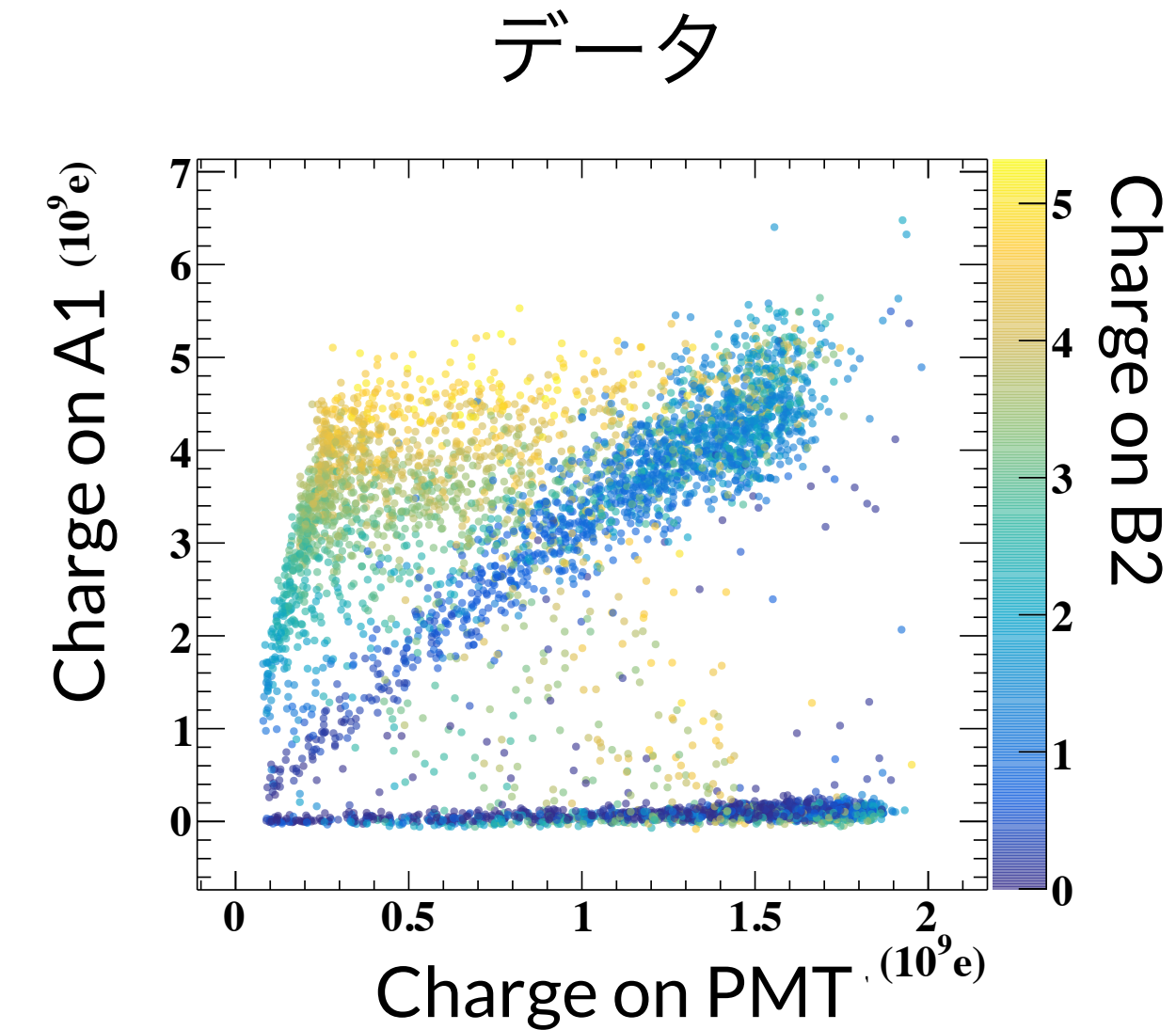
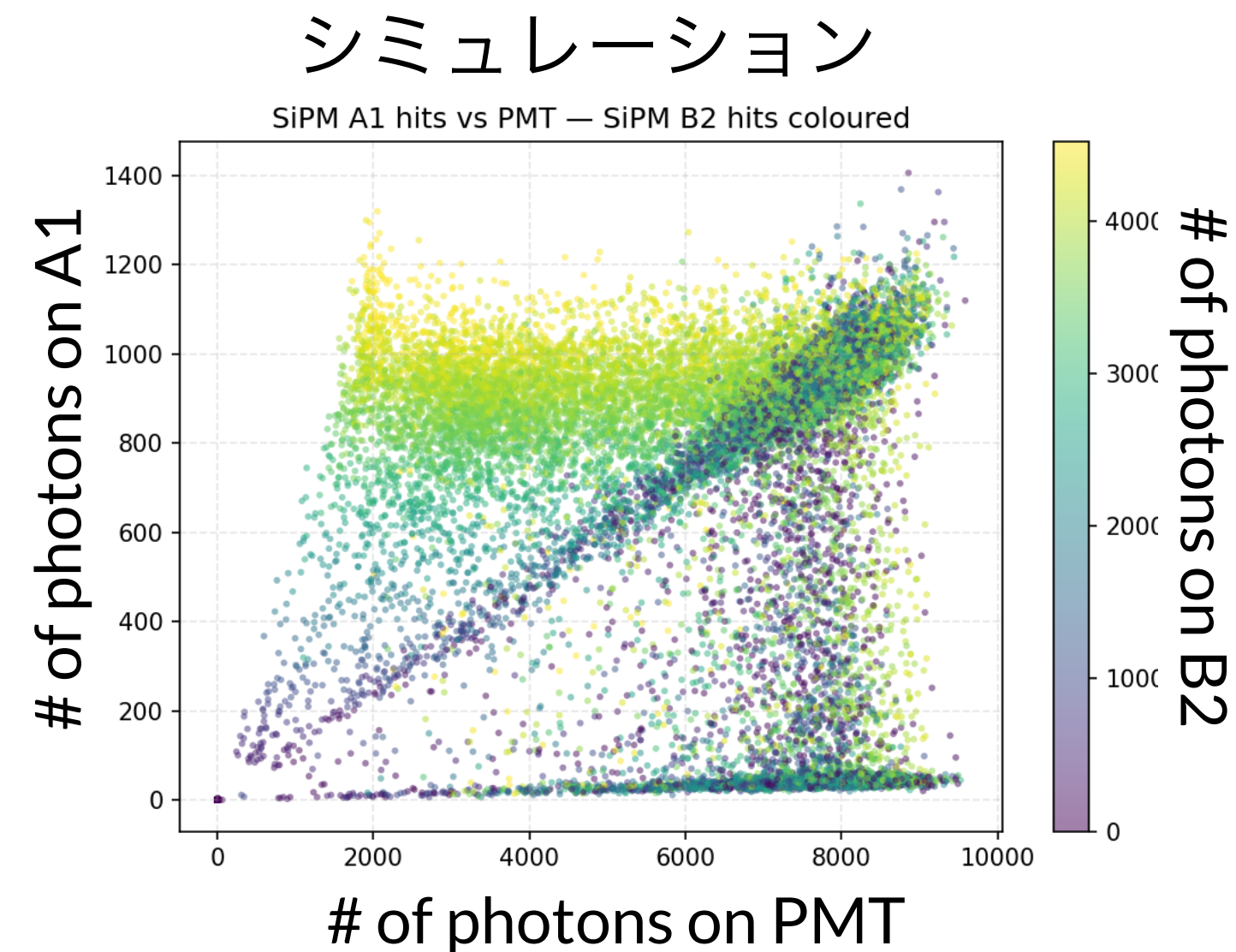


シミュレーションを基にしたPDEの計算

- 照射量の見積もりで最も大きな不定性はPDEの不定性
- シミュレーションでの入射光子数とデータでの検出光電子数を比較することでPDEを算出したい



- Chromaを基にした光学光子の伝播シミュレーションを構築中
 - シミュレートした分布が測定と完全には一致しない
 - セットアップに使っている素材の光学特性とAm-241をつけているワイヤーのモデリングに課題



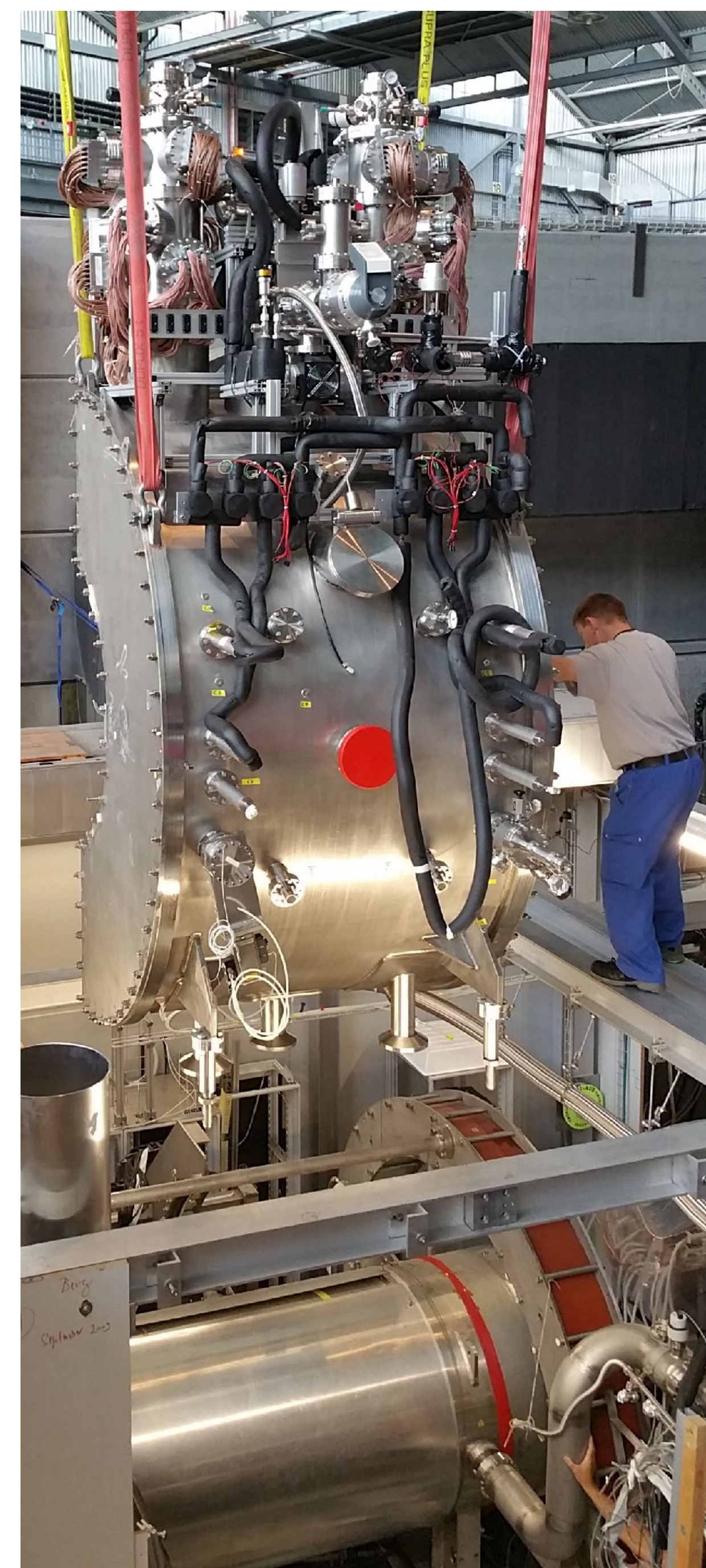
まとめと展望

- VUV光に感度のあるMPPCの高レート環境下でのPDE減少の原因を探るため、 10^{11} 個のVUV光の照射試験を実施
 - 液体キセノン中 (=低温)
 - 電圧を印加しながら
- 同じ振る舞いをするはずの2つのMPPCチップで異なる振る舞いを観測
- ➔ 理解できない限りは**結論づけられない**
 - 測定の系統的な何かを見落としている？
 - もっと大きな変化 ($\mathcal{O}(10\%)$ の変化) を見るためには、照射量が足りない
- 今秋スイス・ポールシェラー研究所で高強度陽電子ビームを用いた試験を予定
 - そのセットアップと準備については次の講演

Backup

Liquid xenon γ -ray detector

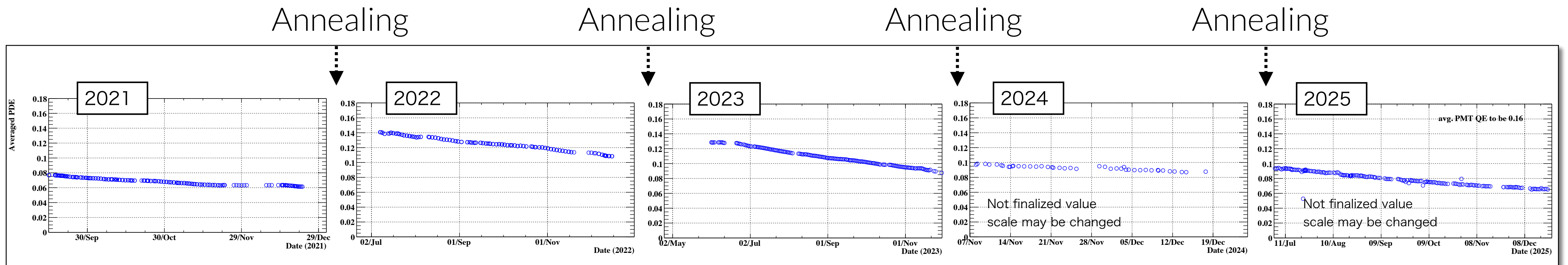
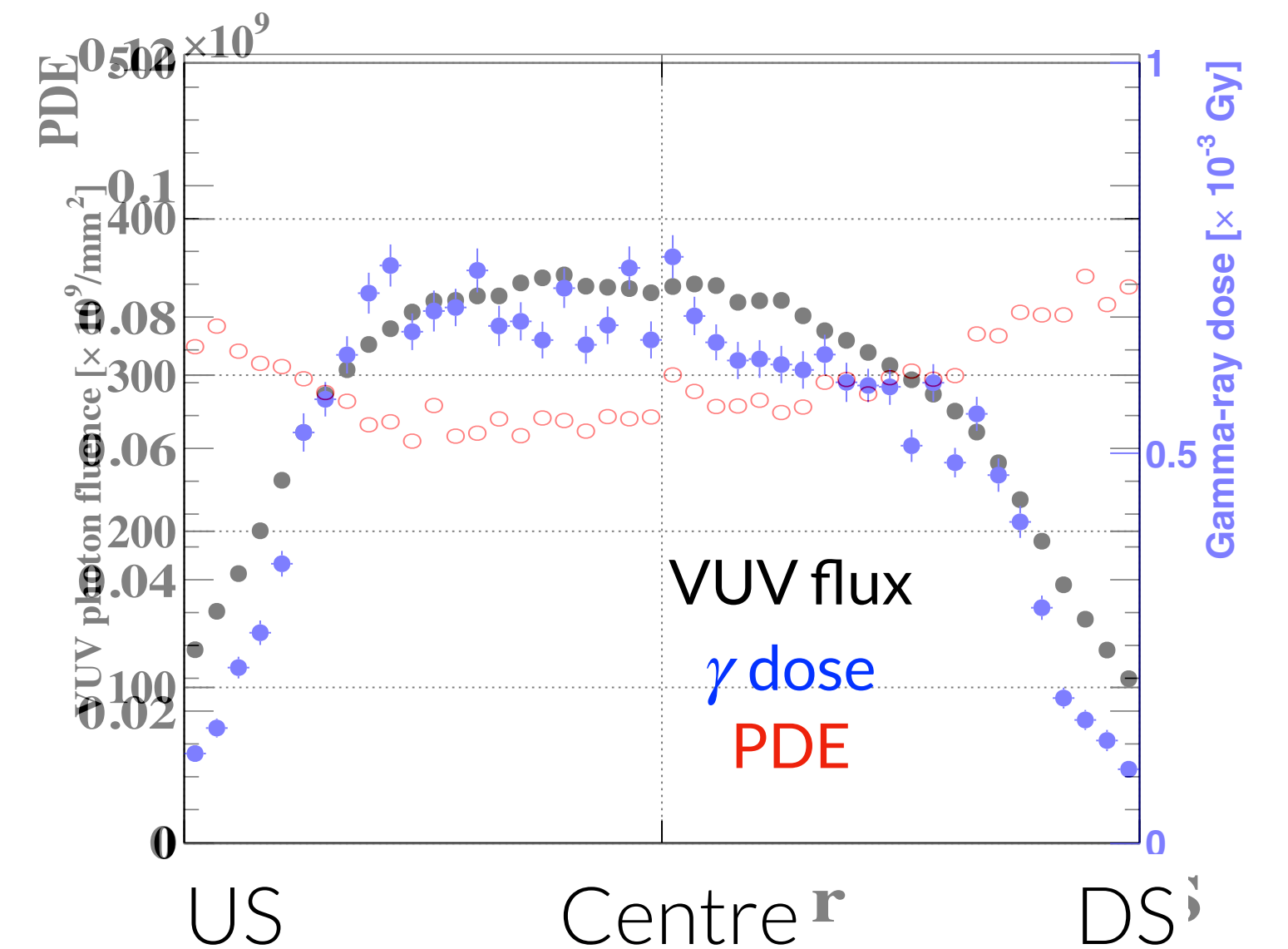
- Measure γ -ray position, timing, and energy
- 900 L of liquid xenon as a scintillation medium
 - High stopping power ($X_0 = 2.8$ cm)
 - High light yield (46000 photons/MeV)
 - Fast response (45 ns decay time)
 - Good uniformity
- VUV-sensitive photosensors
 - 4092 HPK MPPCs (3rd gen. VUV-MPPC; VUV3 (S10943-4372))
 - [K. Ieki, et al. NIM-A 925 \(2019\), 148-155](#)
 - 668 HPK 2-inch PMTs (R9869)
- Record waveform to deal with pile-ups



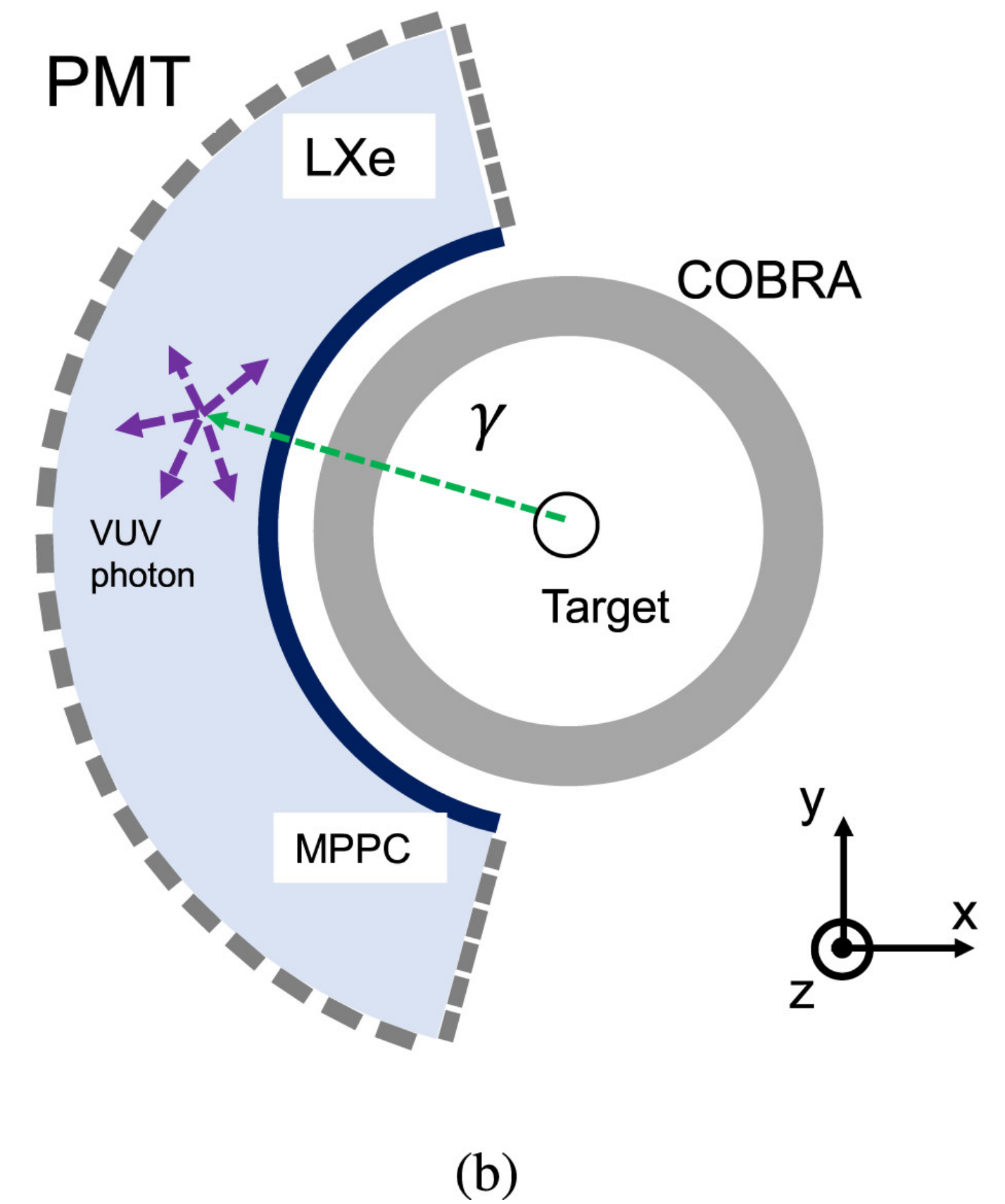
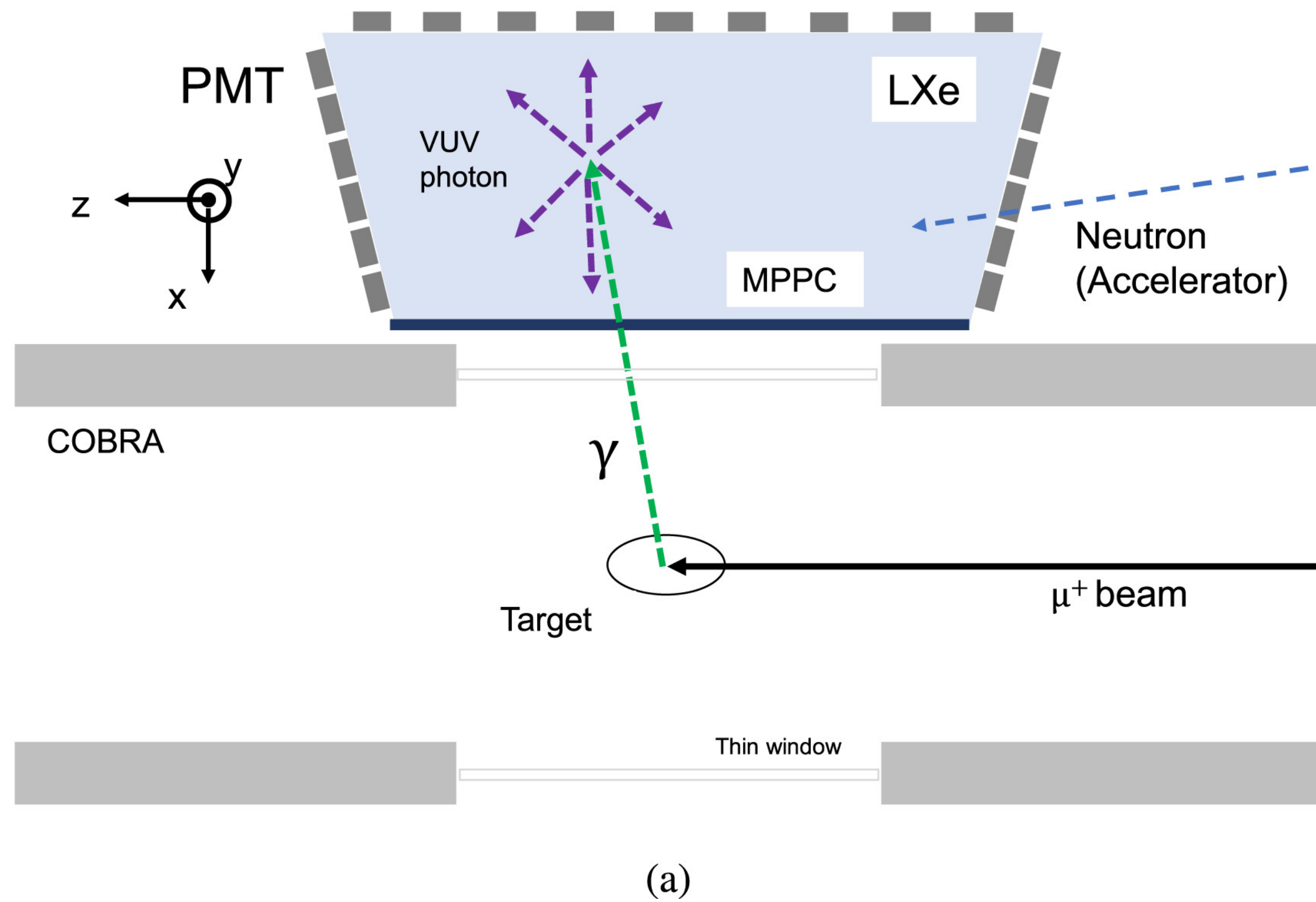
Recap of PDE degradation in the LXe detector

- Photon detection efficiency (PDE) for VUV light has decreased as high-intensity beams were used
- PDE drop correlated to γ radiation dose
 - ➔ The damage source must be beam-related radiation

Modified from [PhD thesis \(S. Kobayashi, UTokyo\)](#)



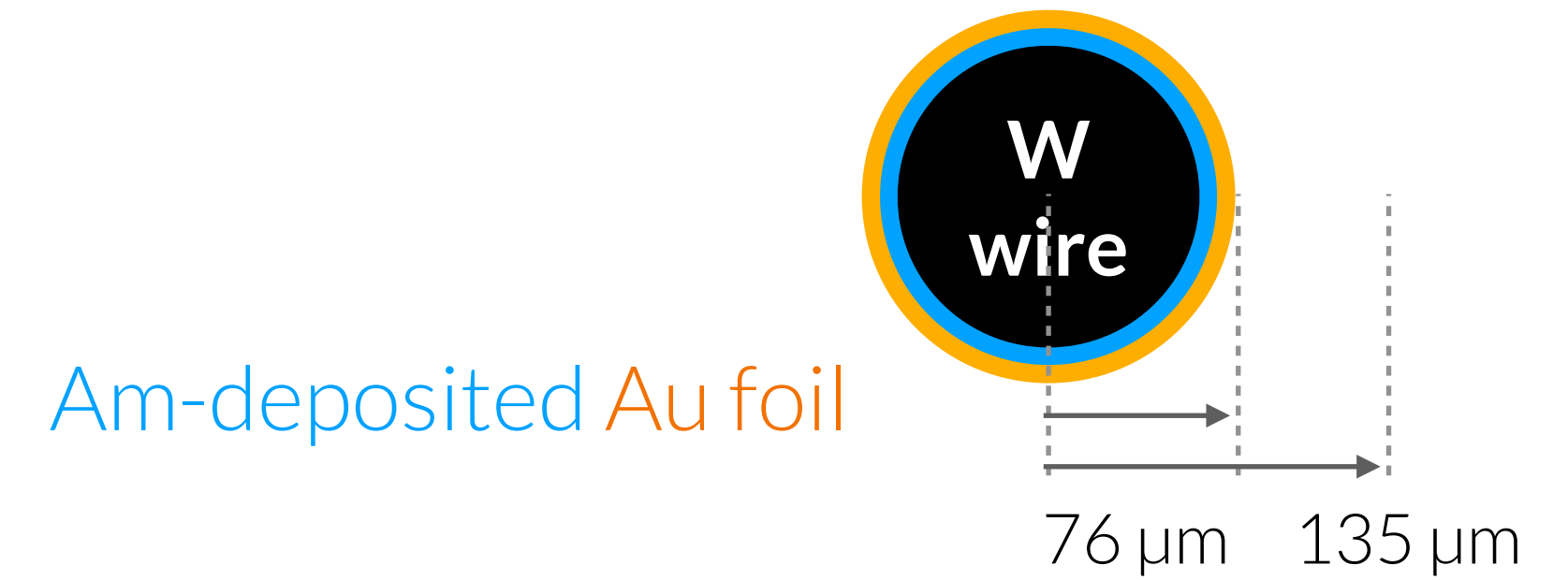
Radiation particles



Past tabletop tests

Info	Radiation	Test	Environment	Outcome	Reference
MEG II (Observed, where do numbers come from?)	4.6e10/mm ² 0.6 Gy		LXe, 165K	–9% VUV after 4.6e10/mm² (2019 run) - Less at visible light - Recovery with annealing	Onda (C2.1)
	Xe lamp @5cm, no filter Hamamatsu L9456-03 (doesn't exist?)	Xe lamp (L9455-13) @35cm, bandpass, ND	25°C	–65% VUV after 3e16 γ/mm² - Incompatible with MEG II - Complete recovery (70°C, 24h)	Onda (C2.1)
	Xe lamp @3cm, no filter		Gas. N ₂ , 170K (refrigerator)	–(10-20)% VUV after 1.3e15/mm²	Onda (C2.2), Shimida
Same setup as above	Xe lamp @3cm, no filter		Room temperature	–10% VUV after 1.3e15/mm²	Onda (C2.2)
Wavelength dependence	Xe lamp (3 to 12)e14/mm ²	5 LEDs, 280-645nm	Room temperature, N ₂ gas	–90% VUV –85% @ 280nm –75% @ 380nm - Almost nothing > 380nm	Onda (C2.3)
Gamma irradiation	⁶⁰ Co (1.17, 1.33 MeV) 1-4 kGy			No significant decrease (sensors stored for 4 years, so maybe annealed)	Onda (C3), Shibata
Unclear, was it just a test?	VUV from Alpha		LXe,		Onda (C3)
Neutron irradiation	3MeV n 5e9 to 2e12 n _{eq} /cm ²			No effect (potentially after annealing)	Onda (C4), Shibata
Beta ray	⁹⁰ Sr 18mm away from MPPC (he claims 0.006 Gy in MEG)		22°C, No bias voltage	No significant effect	Yoshida (5.2)
Beta ray (cold)	Same as above	Cooled down MPPC with nitrogen		Negative reduction	Yoshida (5.3)
Alpha			First stored in atmosphere (absorbed moisture?)		Shimada

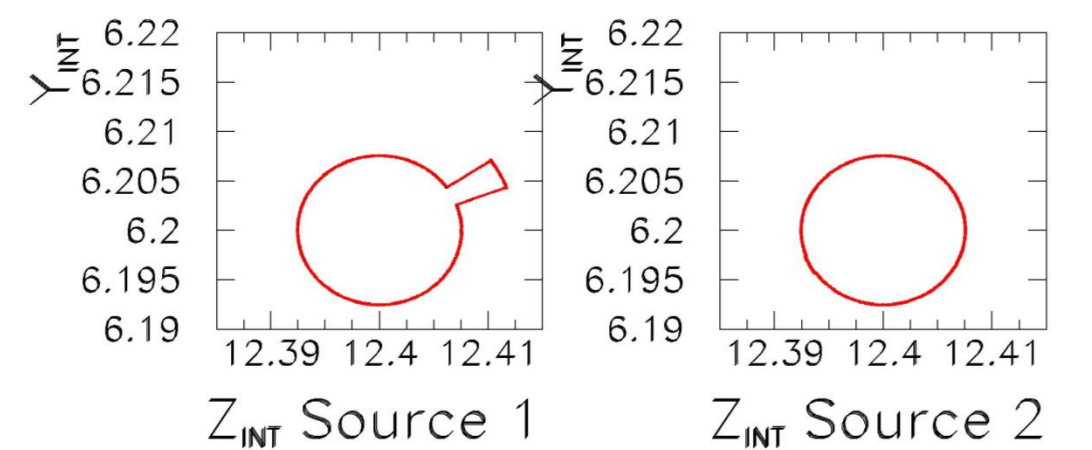
Am-241 source in wire



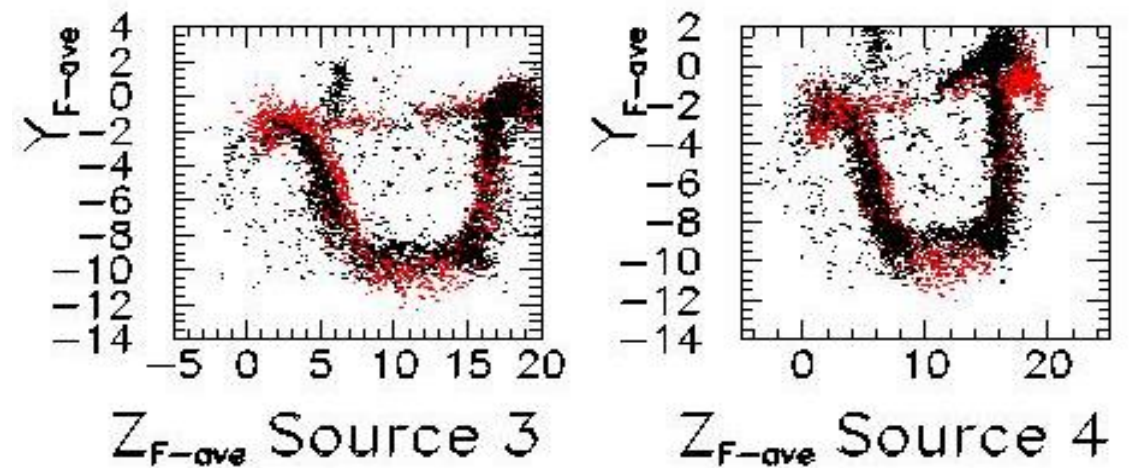
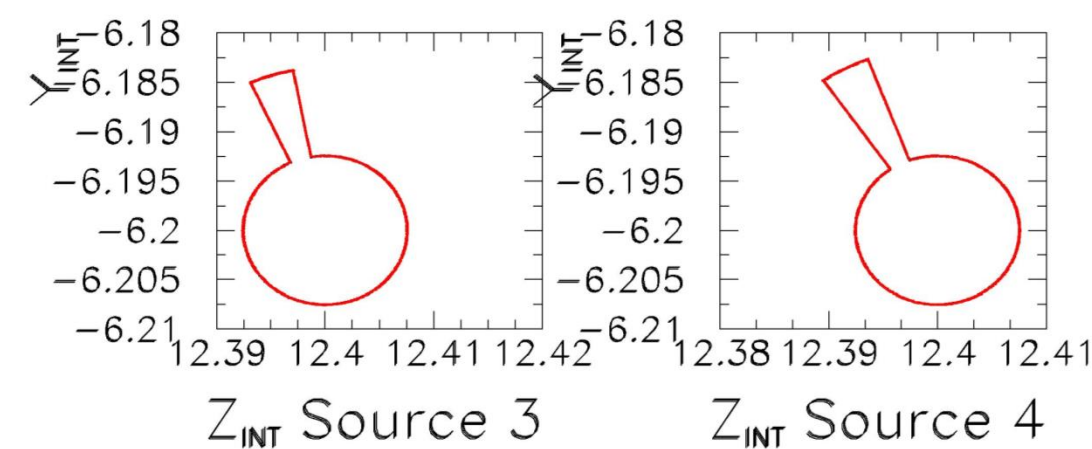
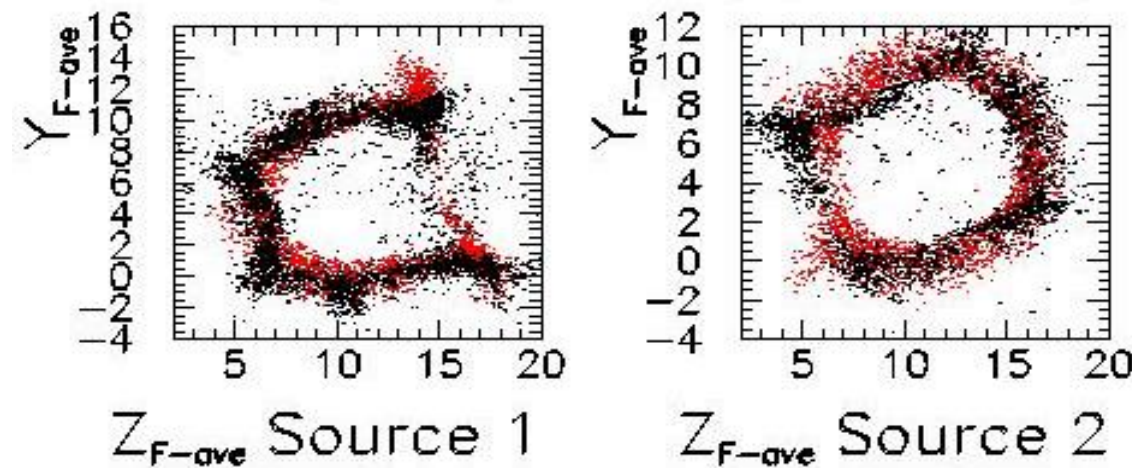
Source modeling

- The **direction** of the tip towards the place where events are depleted
- The **length** of the tip controls the “C” opening

MC Generated α position (red for $E > 3\text{MeV}$)



run9865(black) vs MC(sy9-I300a)



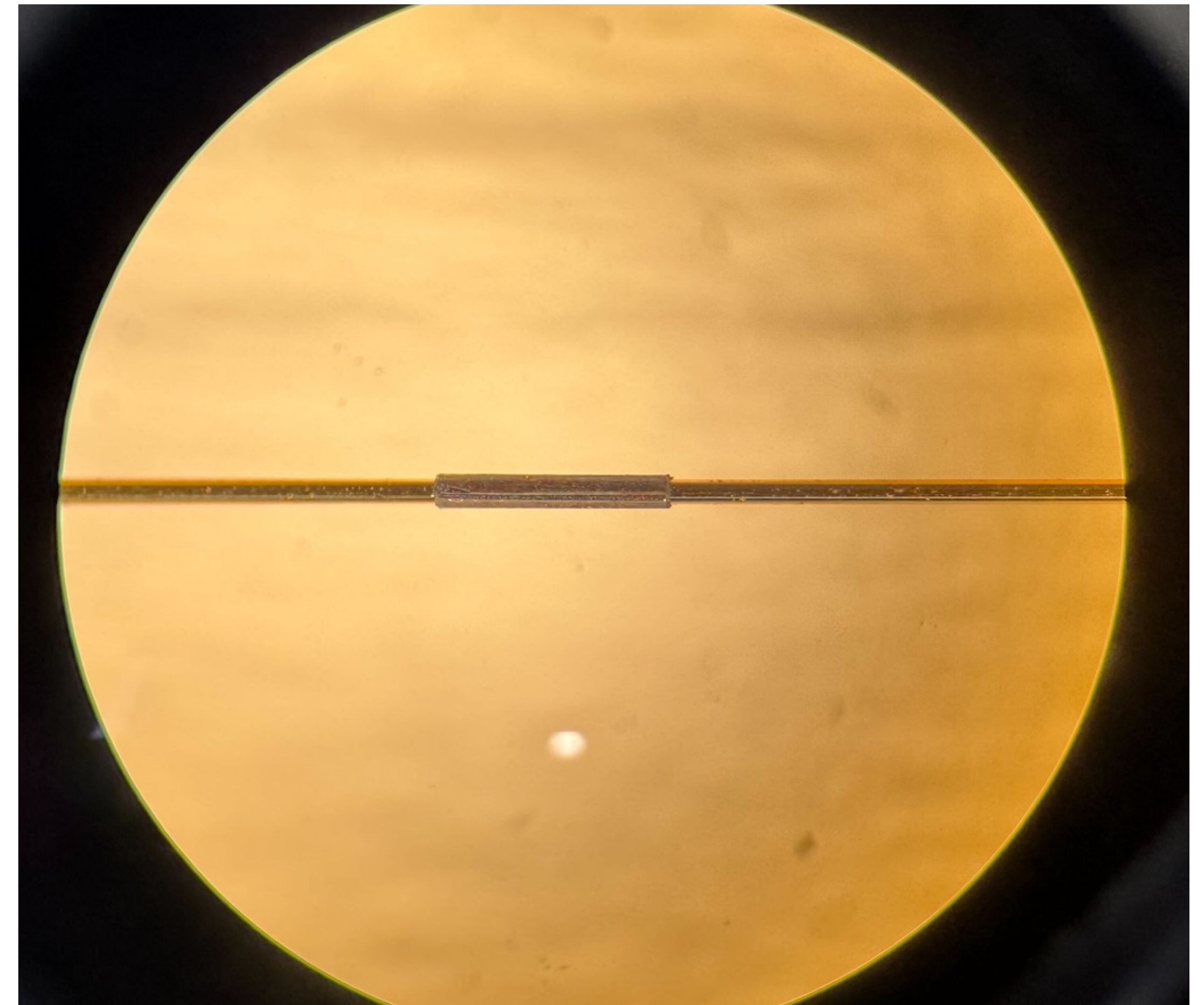
200 μm

26

10 cm

Data

Monte Carlo

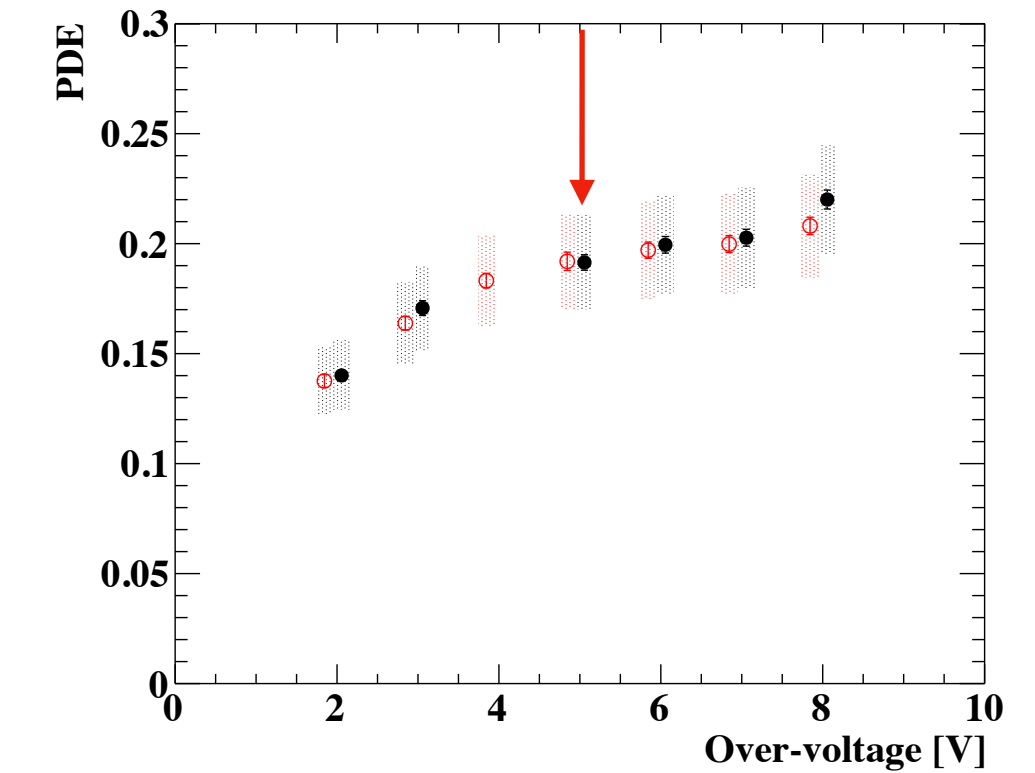


VUV flux calculation for nearest B2 chip

- **VUV flux on B2 chip calculated to be 5×10^5 Hz, assuming 18% PDE**

- Precise PDE calculation using simulation in progress

[NIM-A 925 \(2019\), 148-155](#)



Trigger-based

Calculate $\bar{Q}$ for self (B2)-triggered alpha events

$$\Phi_{\text{VUV}} = \bar{N}_{\text{pho}} \cdot R_{\text{TRG}}$$

$$\bar{N}_{\text{pho}} = \frac{\bar{Q}}{G_{\text{elec}} \cdot G_{\text{SPE}} \cdot F_{\text{CTAP}} \cdot \epsilon_{\text{PD}}}$$

$$\rightarrow \Phi_{\text{VUV}} = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$$

- $\bar{Q} = 2.5 \times 10^9 e$
- $I = 0.06 \mu\text{A}$
- $G_{\text{elec}} = 1$
- $G_{\text{SPE}} = 2.2 \times 10^6$
- $F_{\text{CTAP}} = 1.13$
- $\epsilon_{\text{PD}} = 0.18$
- $c_{\text{elec}} = 1.8$
- $R_{\text{TRG}} = 90 \text{ Hz}$

Current-based

Measured current I written as

$$I = \Phi_{\text{VUV}} \times G_{\text{SPE}} \times F_{\text{CTAP}} \times \epsilon_{\text{PD}} \times c_{\text{elec}} \times e$$

c_{elec} is calculated by taking the ratio of the current readout value of an MPPC by the electronics to the expected current value based on the measured charge and the frequency to flash the LEDs

$$\rightarrow \Phi_{\text{VUV}} = 5 \times 10^5 \text{ Hz}$$