



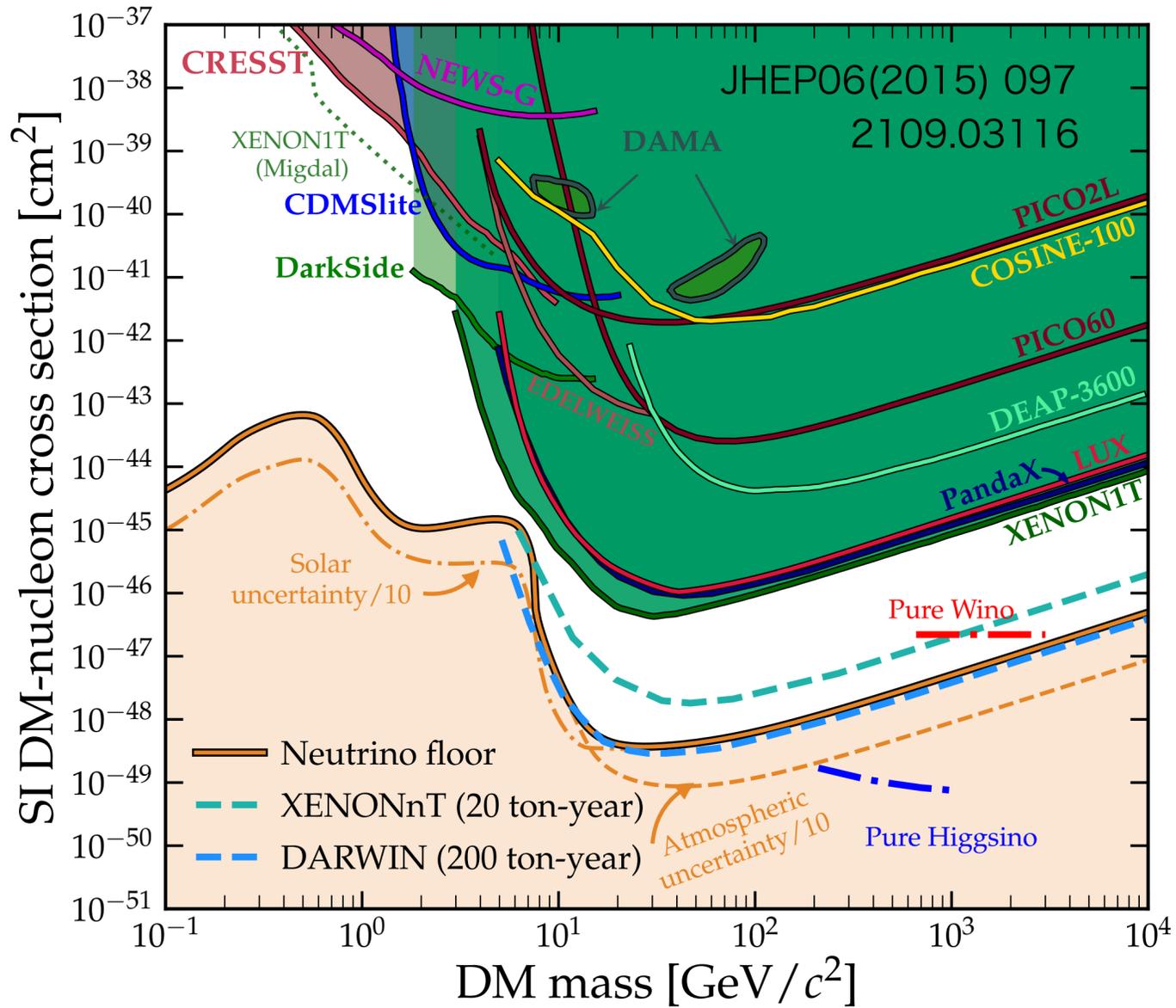
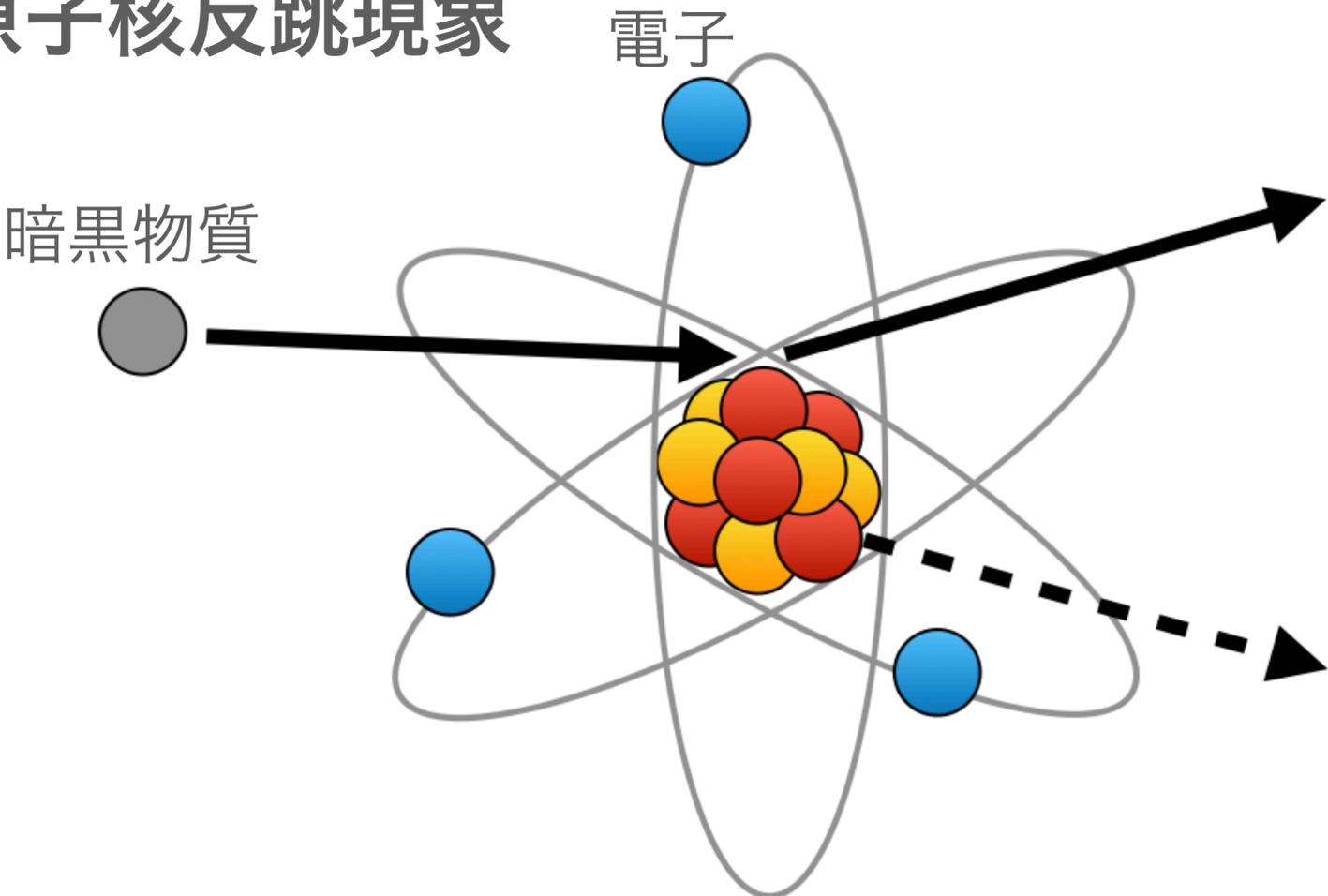
DARWIN実験のための ハイブリッド光検出器の開発

名古屋大学理学研究科 修士1年 長谷川智哉

2022年11月23日 第3回新学術「地下宇宙」若手研究会

- ▶ ~ 50 トンの液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索の将来計画 (XENONnTの次世代実験)
- ▶ 暗黒物質と液体キセノンの原子核反跳現象の痕跡を捉える
- ▶ 200 トン・年の大統計で、重い暗黒物質($> \text{GeV}$)に対して最も感度の良い探索を行う

原子核反跳現象



中性子やニュートリノも液体キセノンと原子核反跳現象を起こし、偽の暗黒物質事象を形成する

• 中性子BG

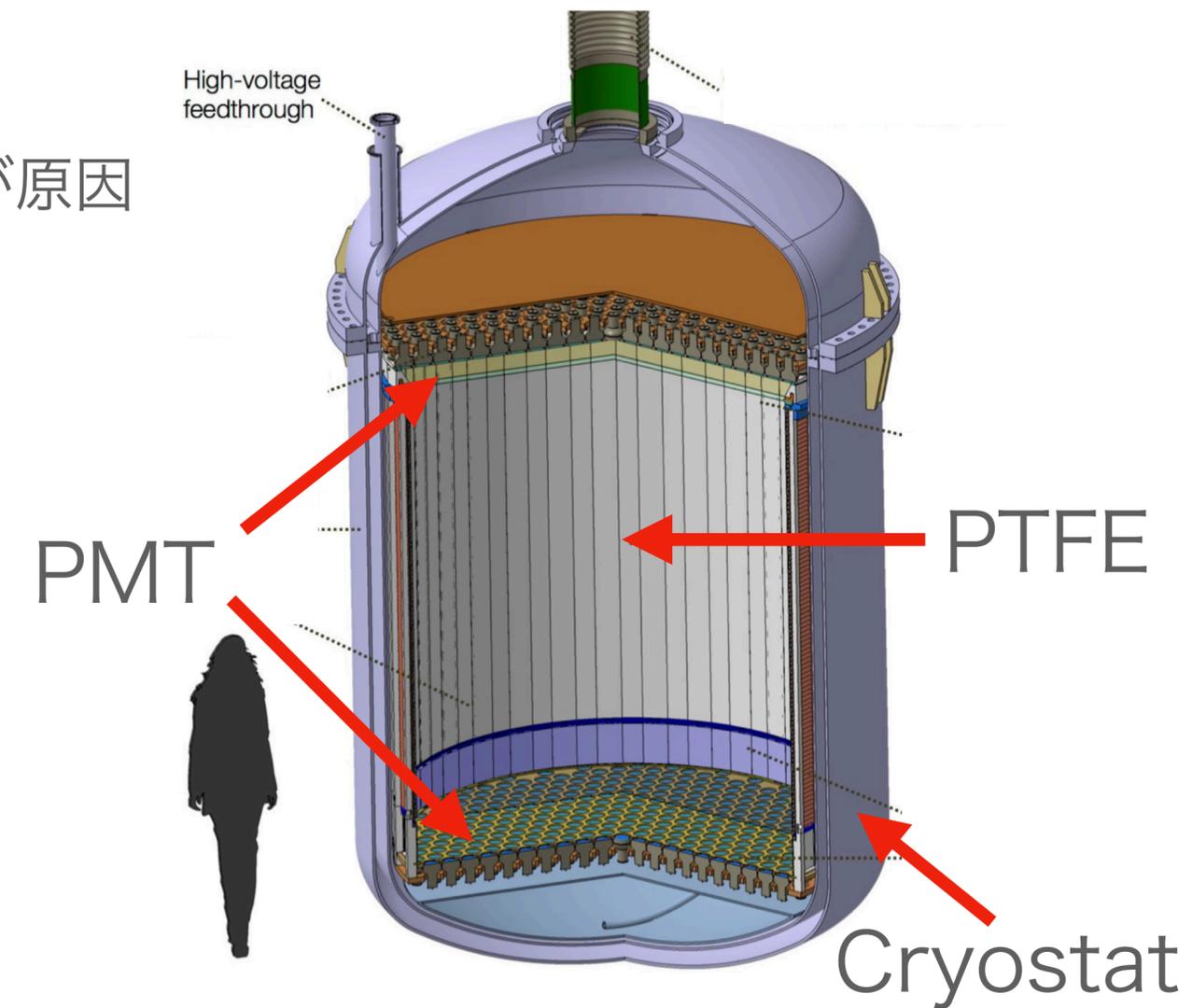
- 検出器部材(PMT、Cryostat、PTFE(反射材)等)に含まれる放射性同位体の自発核分裂や(α, n)反応によって発生する中性子が原因
- 中性子Vetoシステムによるタグ効率 ~ 90%を仮定すると、200 トン・年で約5イベント存在

中性子BGを低減(ニュートリノBGの1/10)することが目標



現状よりも更に低放射能な光検出器の開発が必須

DARWIN検出器



J. Aalbers et al. 2016
“DARWIN: towards the ultimate dark matter detector”

- **放射性物質含有量**

- 中性子BGの主な原因となるU、Th系列の放射性同位体がより少ない光検出器が必要

- **検出面積あたりのダークカウントレート [Hz/mm²]**

- ダークカウントは偽の暗黒物質事象を形成する一因となる
- 検出面積が異なる光検出器を比較する際は、ダークカウントレートを検出面積あたりに規格化している
- 要求値 ≤ 0.01 [Hz/mm²]

- **検出効率**

- 液体キセノンのシンチレーション光(~ 175nm)に対して高い検出効率が必要

PMT (R11410)

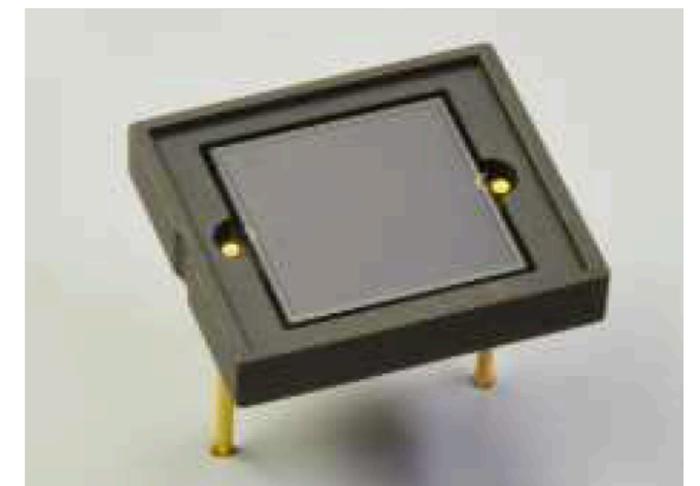
- XENON実験で用いられているPMT
- **電極ピンの絶縁体(セラミック)に中性子BGの原因となるU、Th系列の放射性同位体が比較的多く含まれている**
- ダークカウントレート ~ 0.01 [Hz/mm²] ~ 要求値
- 液体キセノンのシンチレーション光(~ 175nm)に対し、高い検出効率(~ 35%)



浜松ホトニクスより引用

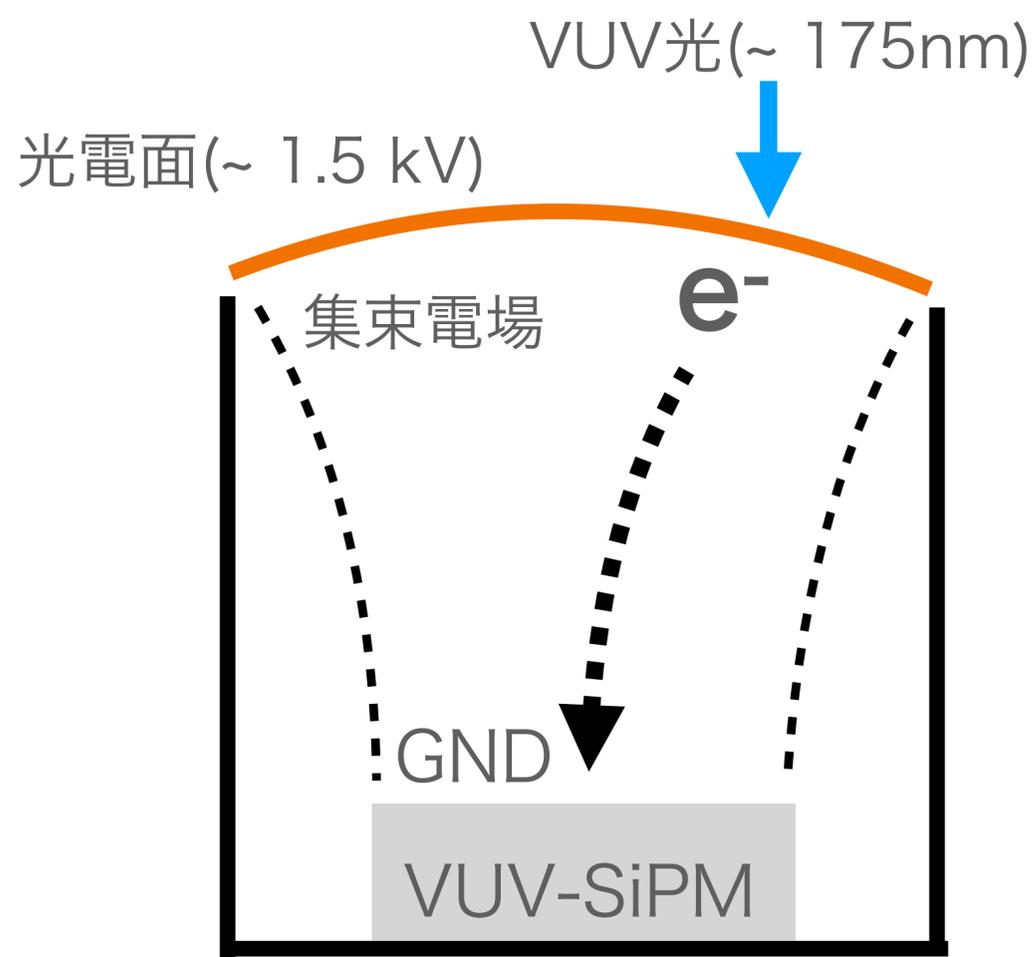
SiPM (S13370)

- ガイガーモードのアバランシェフォトダイオードを並列接続した光検出器
- 受光面周りの部材がセラミック製なので、放射性物質含有量が多い
- **検出面積辺りのダークカウントレートが高いことが課題点**
0.1 - 0.8 [Hz/mm²] (要求値の10 ~ 80倍)
- 液体キセノンのシンチレーション光(~ 175nm)に感度を持つ
検出効率 ~ 25%



浜松ホトニクスより引用

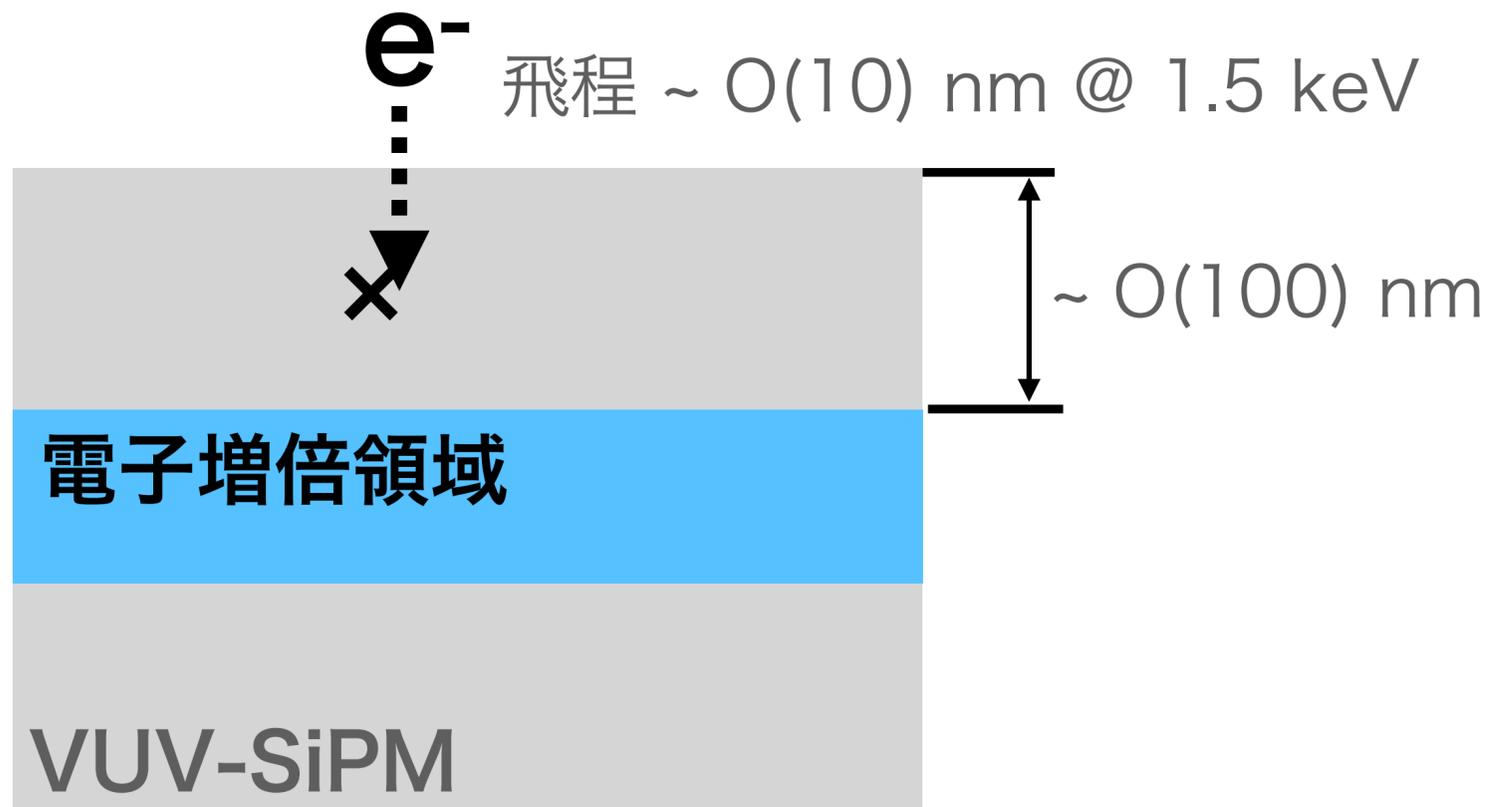
- PMTの光電面、集束電場とSiPMを組み合わせた光検出器
- 入射光子を光電面で光電子に変換し、SiPMで電子を増倍することで検出
- 必要な電極ピンがPMTより少ないことから絶縁体(セラミック)を削減でき、低放射能な光検出器として期待されている
- 光電面の面積をSiPMの数百倍にすることで、実効的に検出面積辺りのダークカウントレートを要求値まで低減可能



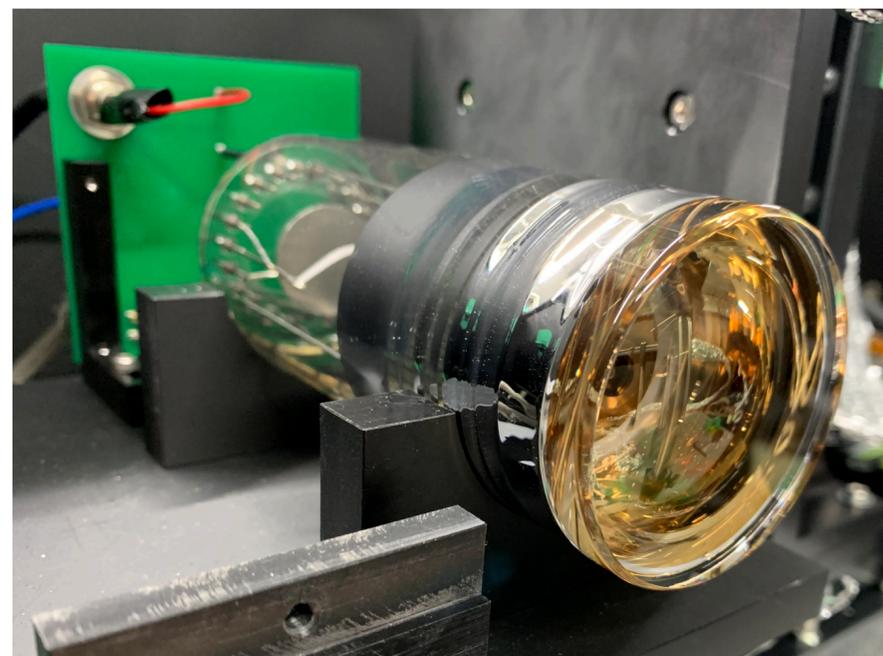
光電面	バイアルカリ(R11410と同じもの)
SiPM	VUV光用(S13370)
窓材	石英ガラス
光電面への印加電圧	~ 1.5 kV

先行研究でのハイブリッド光検出器(XE5859)の性能評価から、
検出効率@1.5 kV ~ 4%で非常に低い値 ref: ~ 35% for PMT(R11410)
~ 25% for SiPM(S13370)

何故? → 低エネルギー光電子の飛程が短く、SiPMの増倍領域に到達できていない

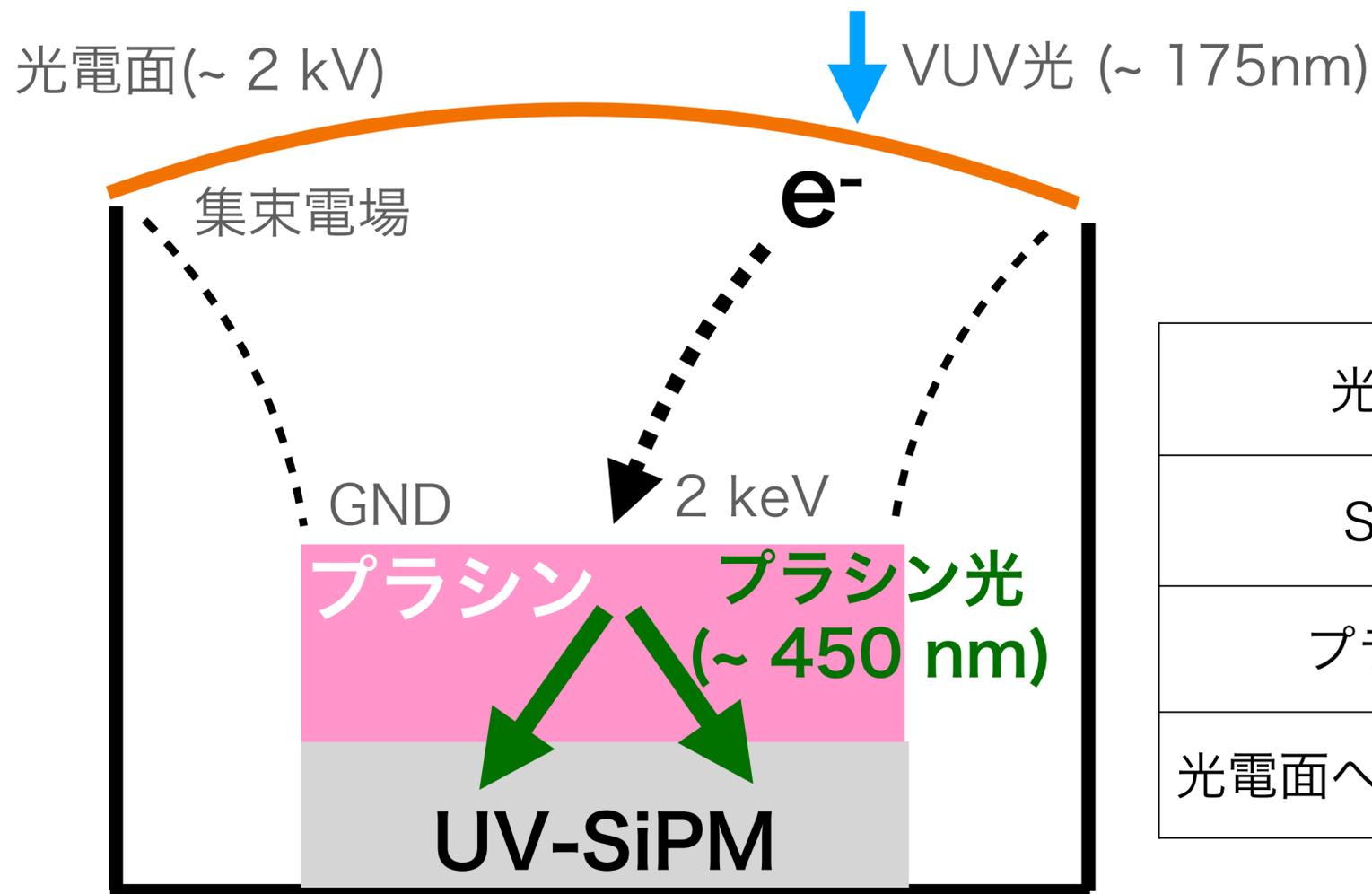


XE5859



実用化の為に、検出効率を向上させる必要がある

- ハイブリッド光検出器内のSiPMの前に薄いプラスチックシンチレータを設置する
- 光電子がプラシンに入射することによって発生するプラシン光をSiPMで検出する
- SiPMを光検出器として用いることができるので検出効率の大幅な向上が望める



光電面	バイアルカリ (R11410と同じもの)
SiPM	S14520 (プラシン光に高い感度を持つ)
プラシン	EJ -212 (厚さ ~ 100um)
光電面への印加電圧	~ 2 kV

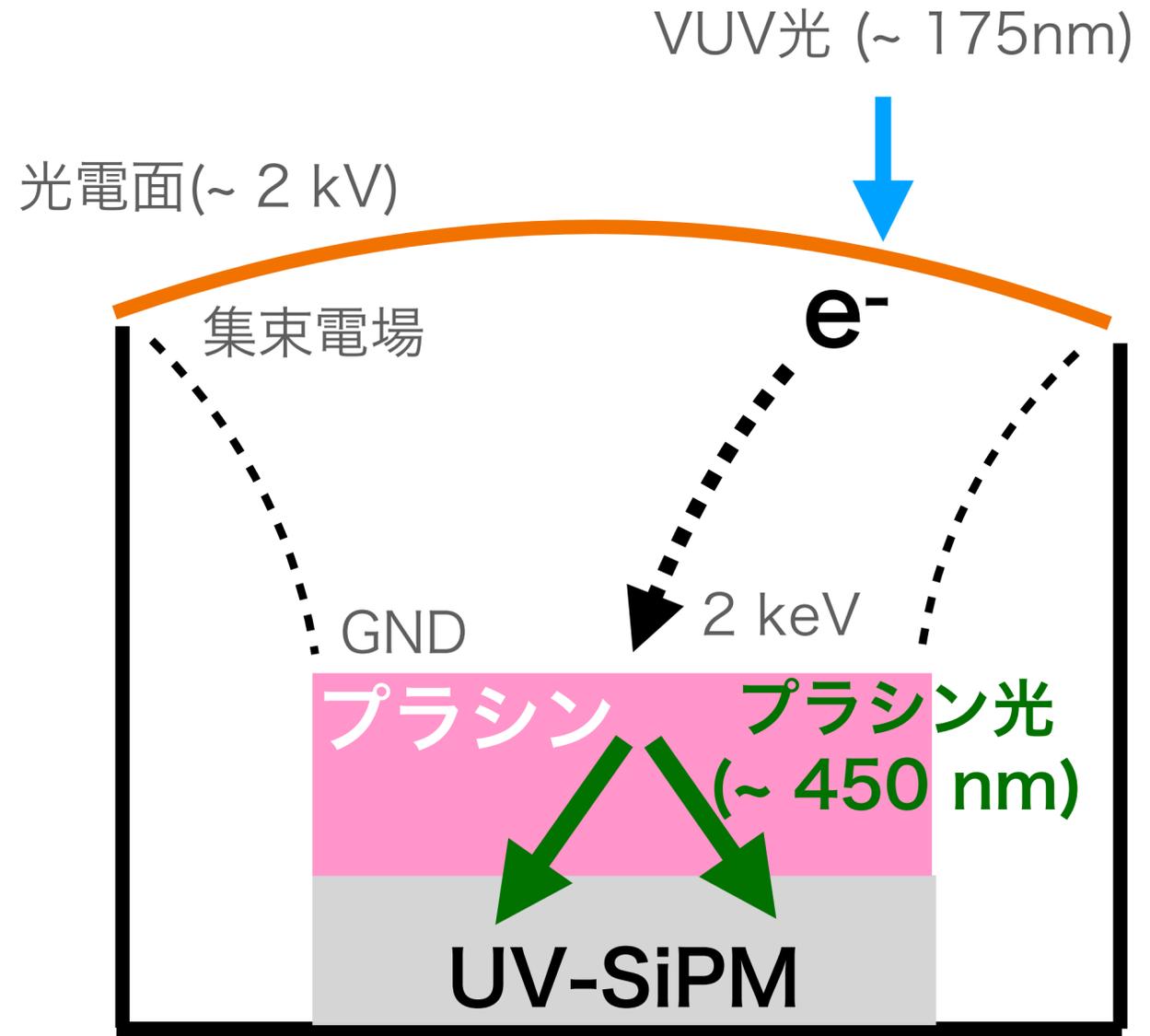
検出効率がどの程度向上するのか、原理実証を行う

新型ハイブリッド光検出器の検出効率(PDE)

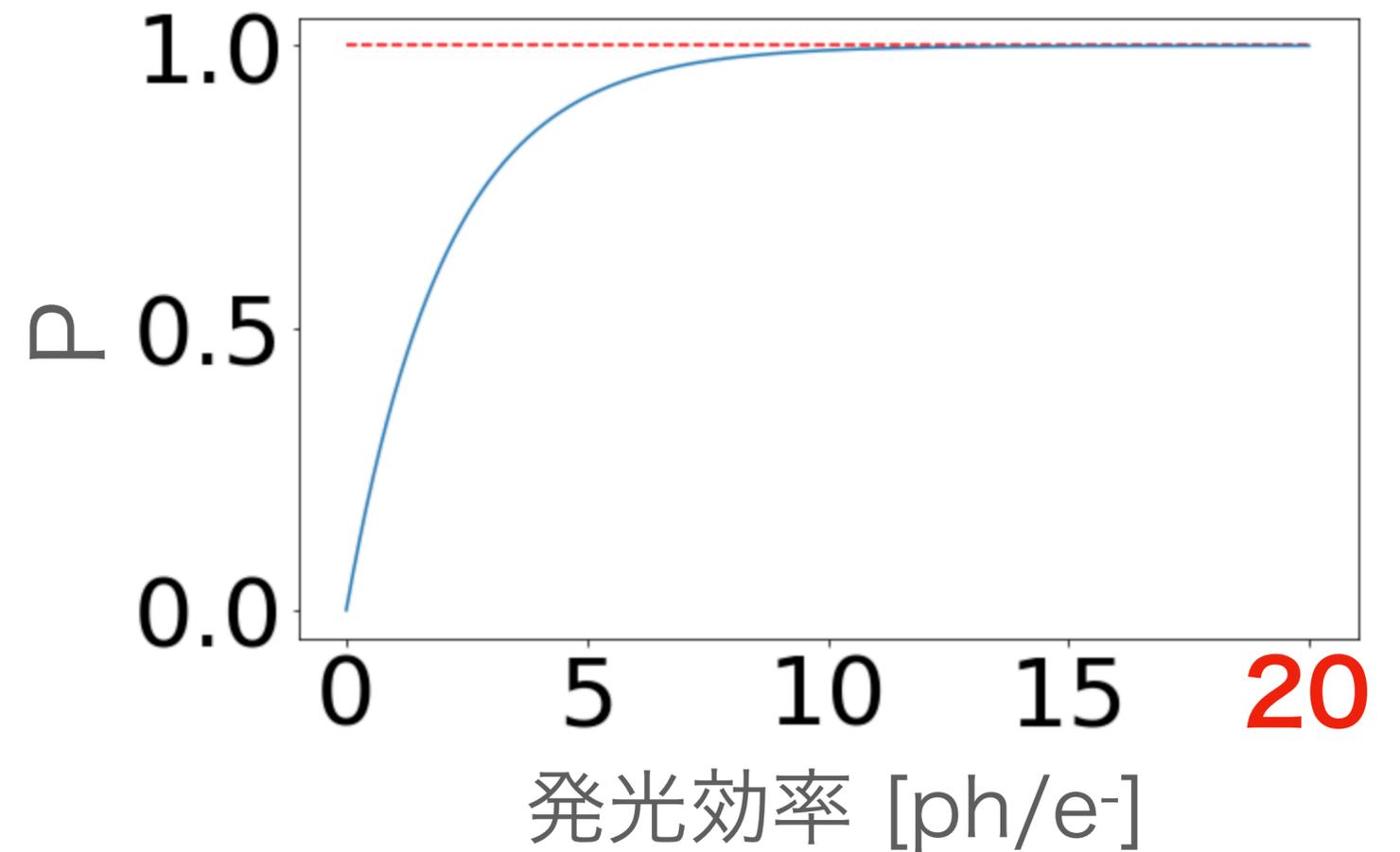
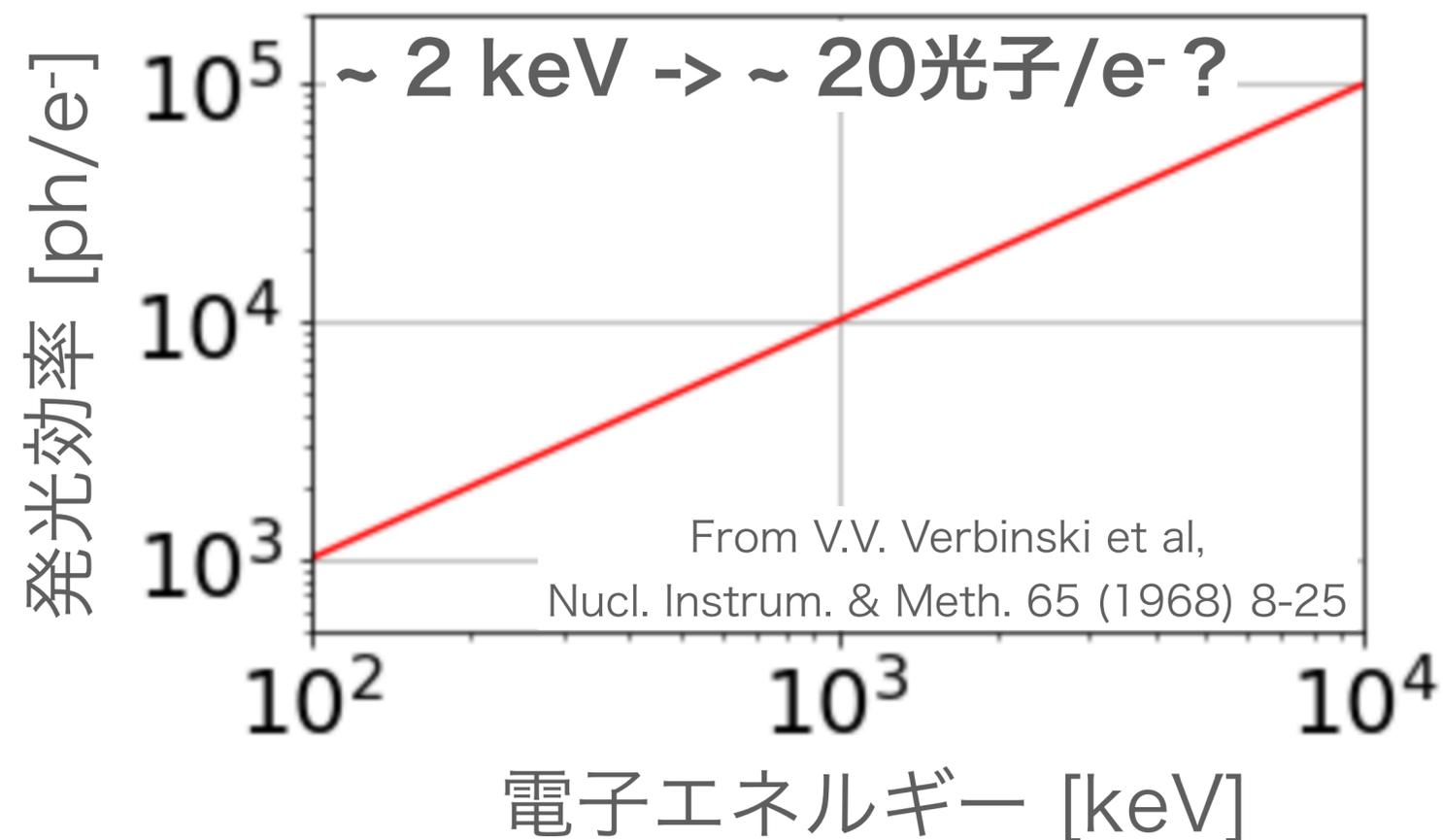
$$PDE = QE \times \varepsilon \times P(\text{発光効率})$$

QE	光電面の量子効率
ε	光電子の収集効率
P	プラシン光が SiPMで1光子以上検出される確率
発光効率 [光子/e ⁻]	光電子1個の入射に対する プラシンの発光量

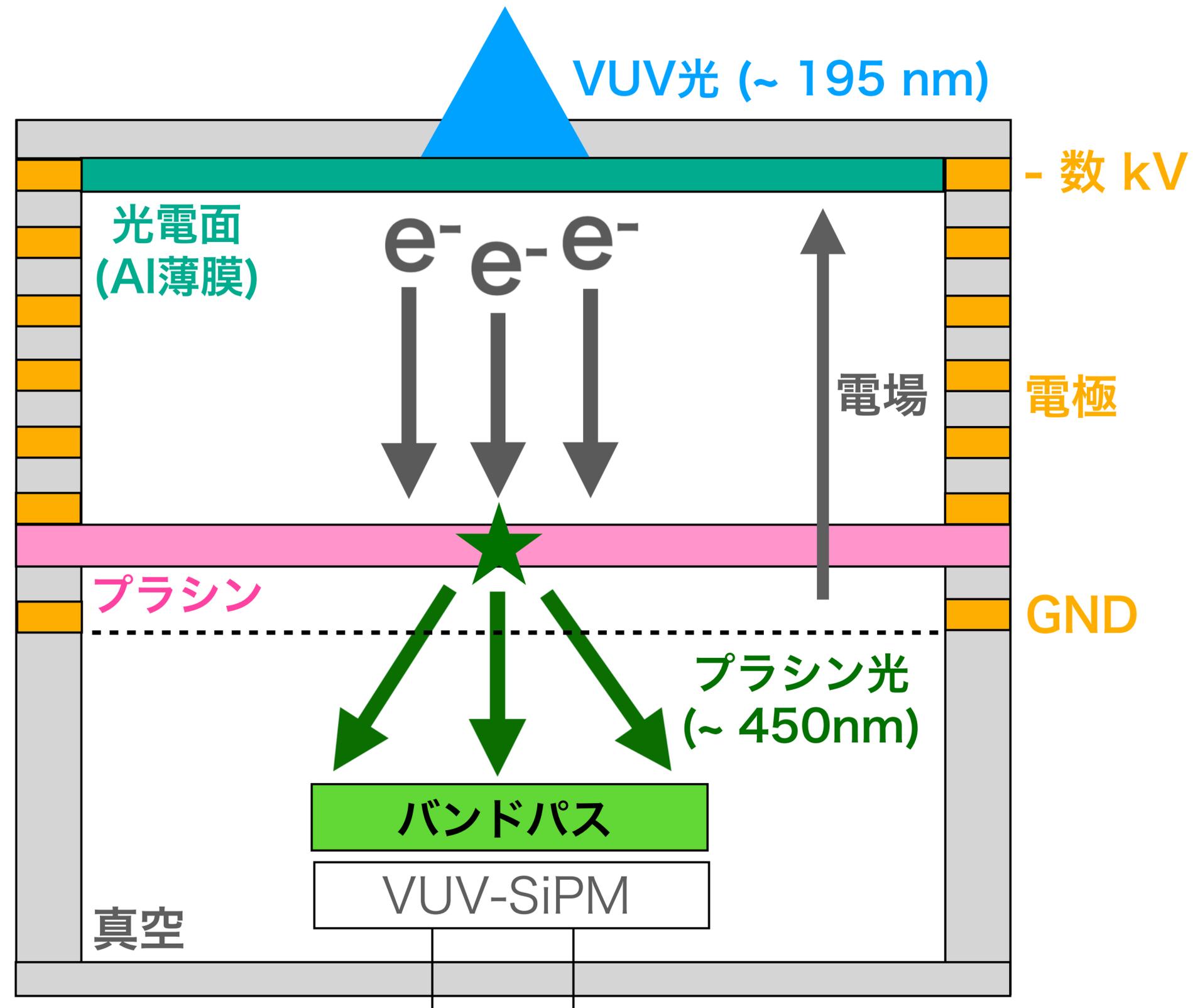
- P ~ 1で、PMTと同等程度の検出効率
- Pはプラシンの発光効率[光子/e⁻] に依存している



- 10^2 keV 以上の電子エネルギーに対するプラシンの発光効率は比例関係
- 比例関係が低エネルギーでも成立すると仮定すれば、発光効率 @ 2 keV e^- ~ 20光子/ e^-
- 発光効率 ~ 20光子/ e^- ならば、 $P \sim 1$ となりPMTと同程度の検出効率
- **低エネルギー電子に対するプラシンの発光効率の測定を行った**



自作した光検出器

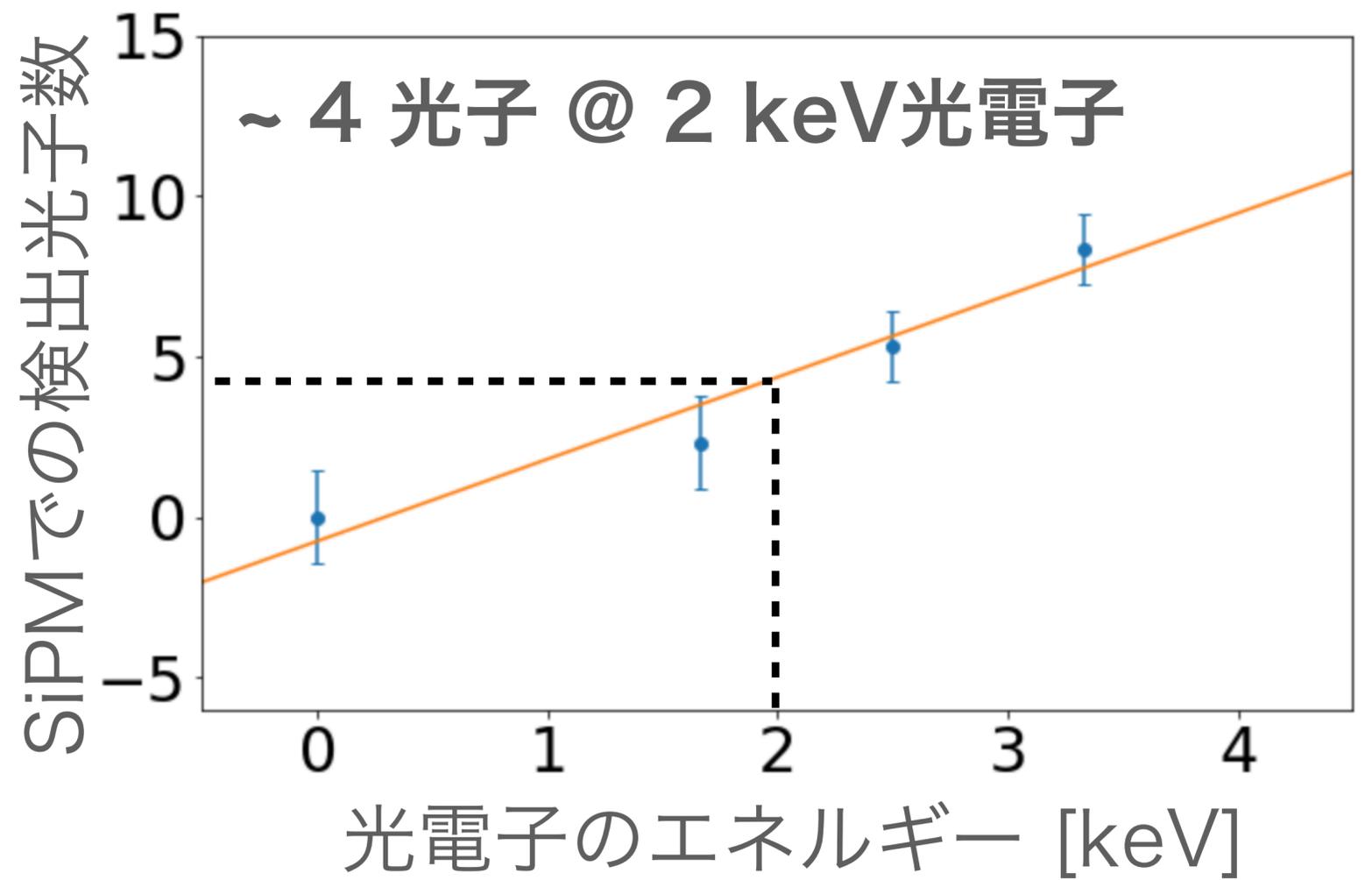
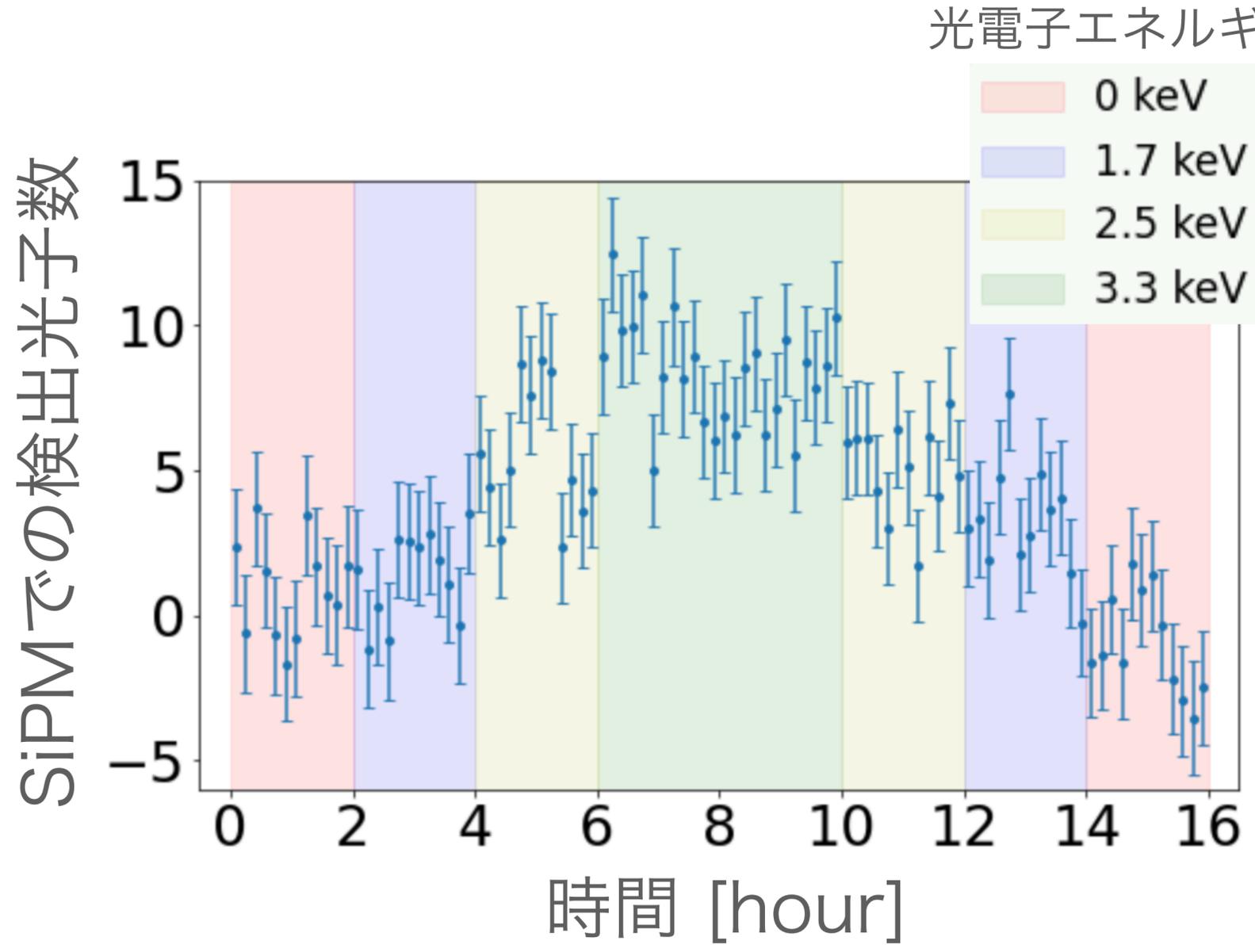


$$S = N_{\text{electron}} \times \text{発光効率} \times \text{Acceptance} \times \text{PDE}_{\text{SiPM}}$$

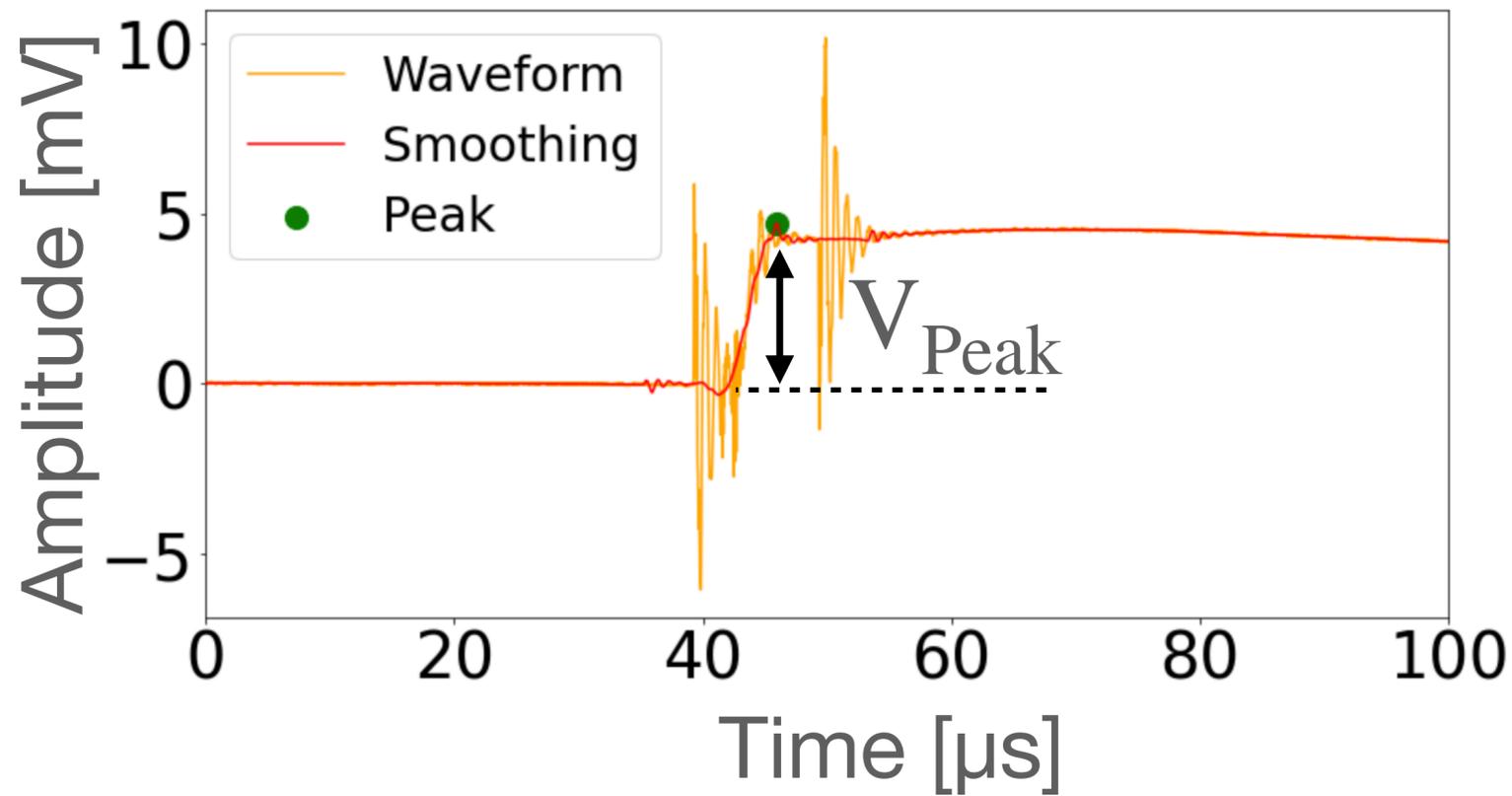
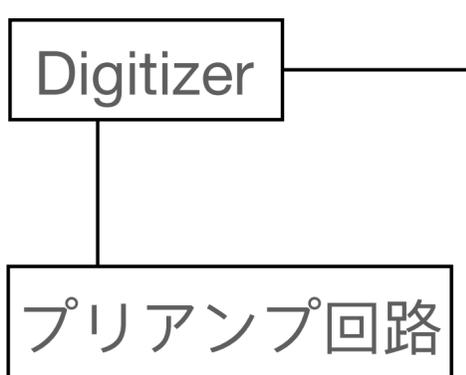
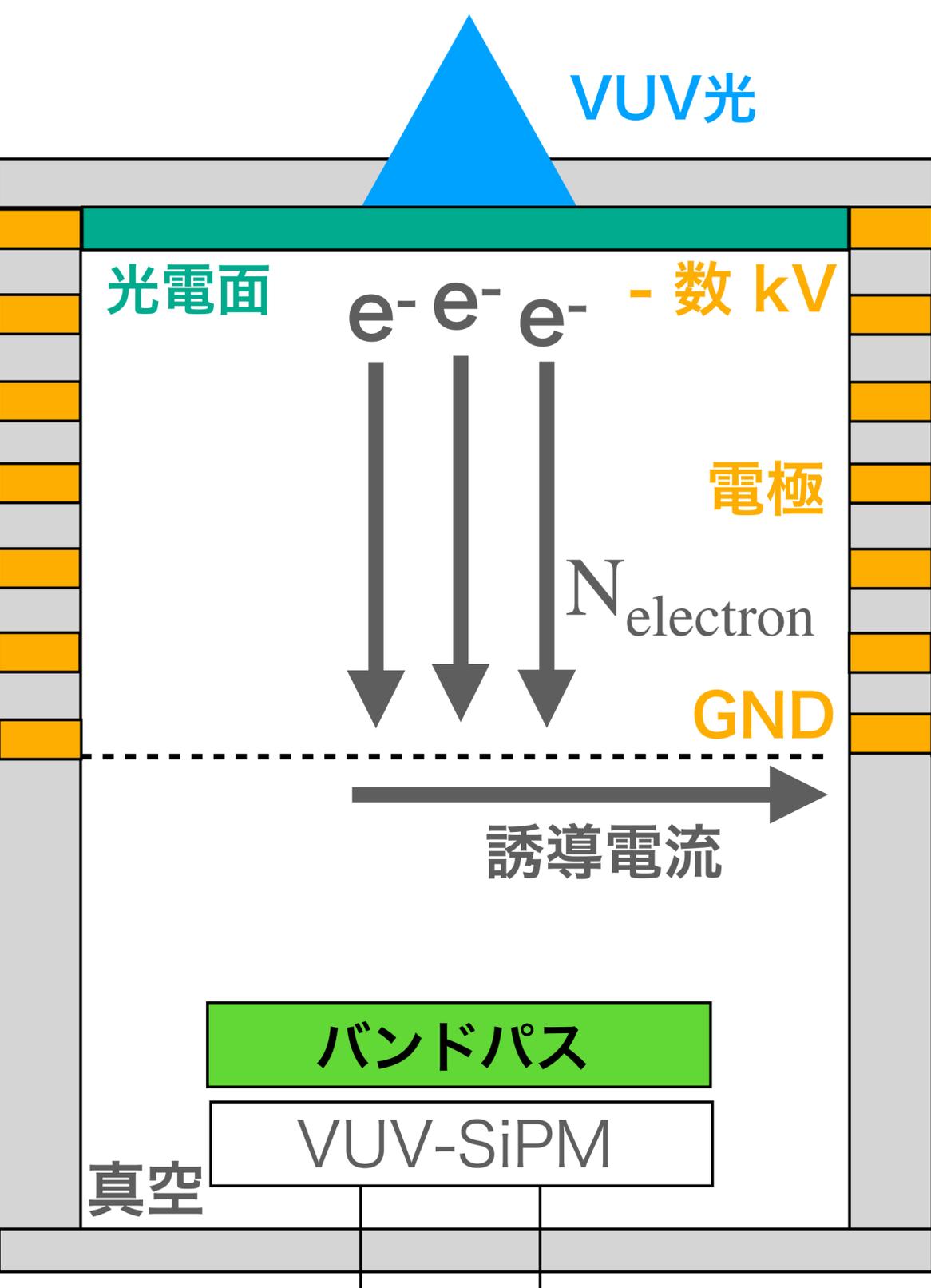
S	SiPMでの検出光子数	~ ?
N_{electron}	プラシンに入射する光電子数	~ ?
Acceptance	プラシン光が SiPMに入射する確率	~ 0.3 %
PDE_{SiPM}	SiPMのプラシン光に対する検出効率 (~ 500nmに対する値)	~ 30 % preliminary

- ・ 発光効率を測定する為に、S、 N_{electron} の測定を行った

- ▶ 光電子エネルギーに対する、SiPMで検出された光子数の測定を行った
- ▶ **SiPMでの検出光子数 (S) @ 2 keV光電子 ~ 4 光子**



プラシニンに入射する光電子数(N_{electron})の測定方法 13/16



- ドリフトされた光電子がグリッドに到達した際に流れる誘導電流を測定する

$$N_{\text{electron}} = \frac{V_{\text{Peak}}}{e \times G_{\text{AMP}}}$$

V_{Peak} : 波高の最大値
 G_{AMP} : プリアンプの増倍率
 e : 素電荷量

$$S = N_{\text{electron}} \times \text{発光効率} \times \text{Acceptance} \times \text{PDE}_{\text{SiPM}}$$

S	SiPMでの検出光子数	~ 4
N_{electron}	プラシンに入射する光電子数	~ 200
Acceptance	プラシン光が SiPMに入射する確率	~ 0.3 %
PDE_{SiPM}	SiPMのプラシン光に対する検出効率 (~ 500nmに対する値)	~ 30 % preliminary

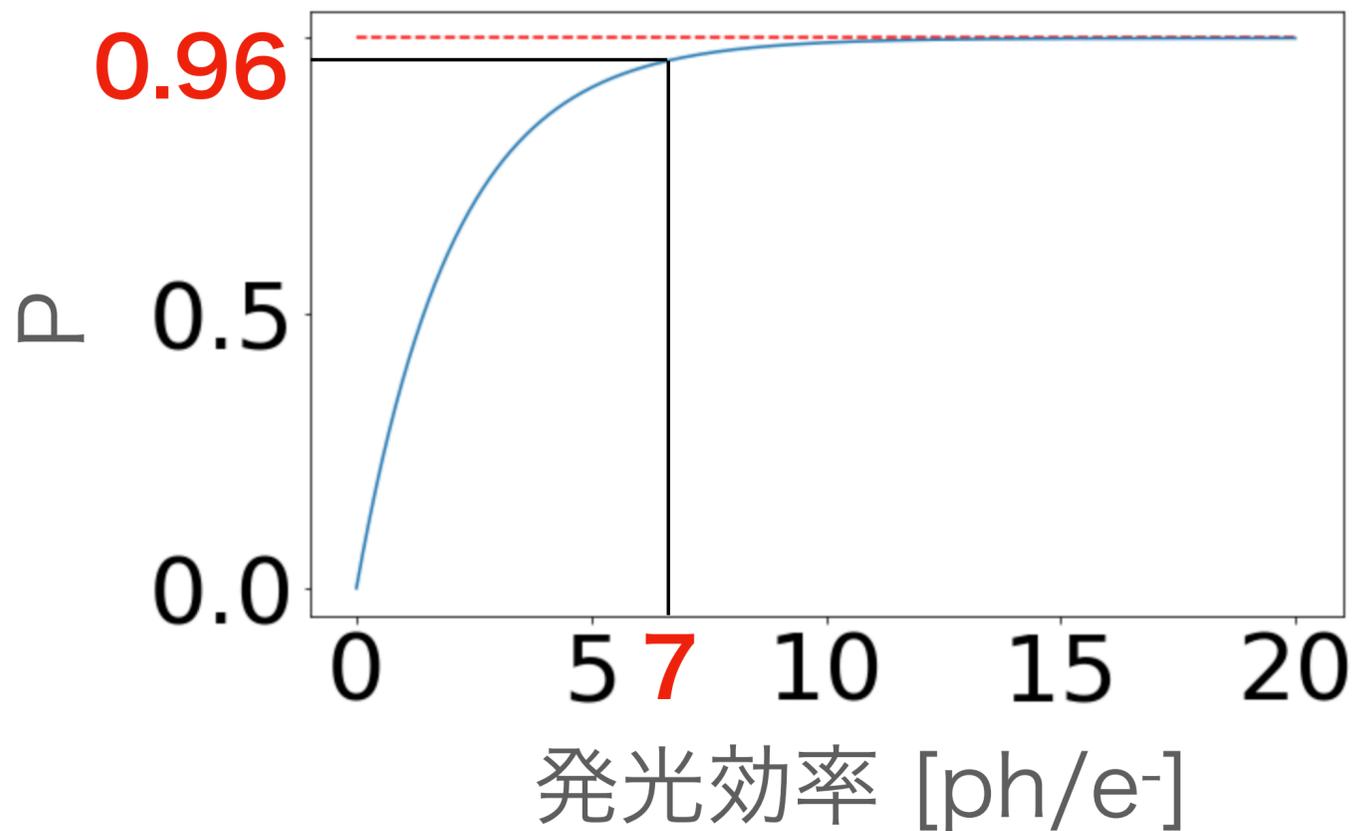
プラシンの発光効率(@ 2 keV e-) ~ 7光子/e-

新型ハイブリッド光検出器の検出効率(PDE)

$$PDE = QE \times \varepsilon \times P(\text{発光効率})$$

QE	光電面の量子効率
ε	光電子の収集効率
P	プラシン光が SiPMで1光子以上検出される確率

発光効率 ~ 7光子/e⁻ @ 2 keV e⁻



PDE ~ 33 % (PMT(R11410)の ~ 96%)

先行研究(PDE ~ 4%)からの大幅な検出効率の向上が望める

- DARWIN実験に用いる低放射能光検出器として、新たなハイブリッドの開発を行なっている
- ハイブリッド光検出器の課題である検出効率の低さを改善する為に、プラシンを導入した新型のハイブリッド光検出器の開発を行なっている
- 検出効率を評価する為に、低エネルギーでのプラシンの発光効率を自作の装置を用いて測定した
- 原理実証の結果、新型ハイブリッド光検出器の検出効率の大幅な向上が有望であることが分かった (PDE : ~ 4% -> ~ 33%)
- 今後は、実験の再現性を確かめた上で、新型ハイブリッド光検出器の作成、評価を浜松ホトニクスとともに行う予定