

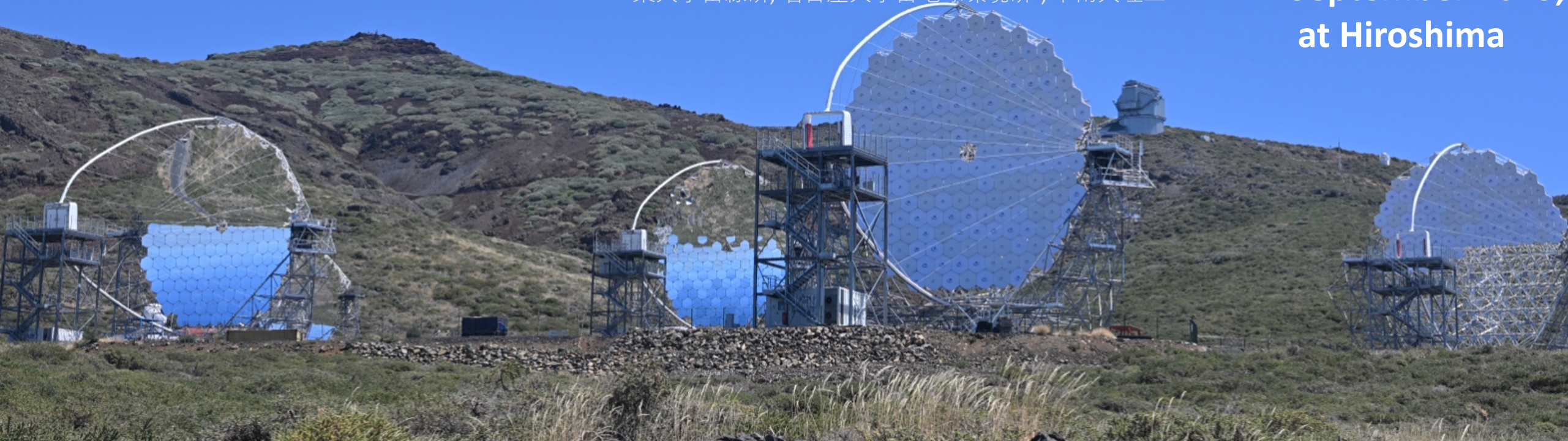
CTAO報告247： CTAO大口径望遠鏡向け光電子増倍管における アフターパルス減少の測定

CTAO report 247 :
Measurement of Afterpulse Reduction
in Photomultiplier Tubes for the CTAO LST

森田開

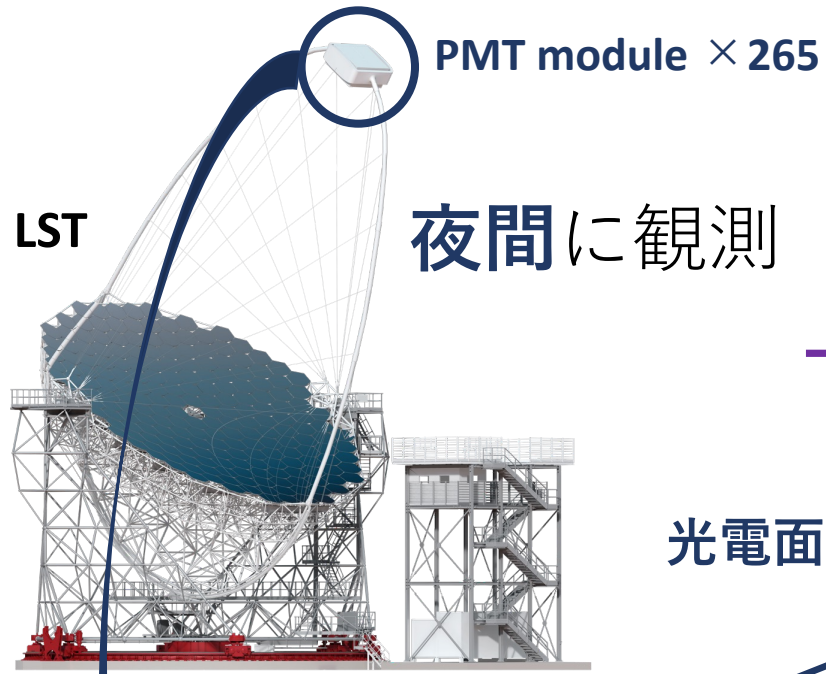
猪目祐介, 大岡秀行, Habib Ahammad Mondal, 窪秀利,
齋藤隆之, 櫻井駿介, 高橋光成^A, 野崎誠也, 山本常夏^B,
他 CTAO-Japan Consortium

東大宇宙線研, 名古屋大宇宙地球環境研^A, 甲南大理工^B

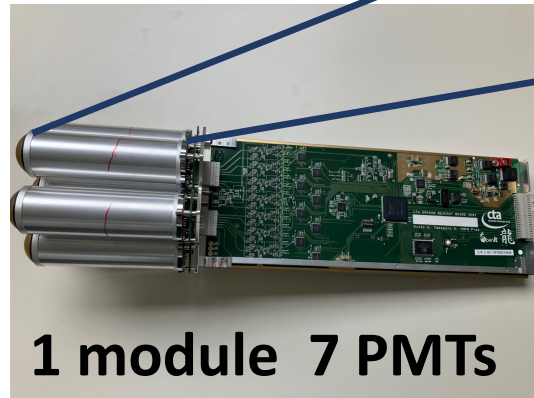
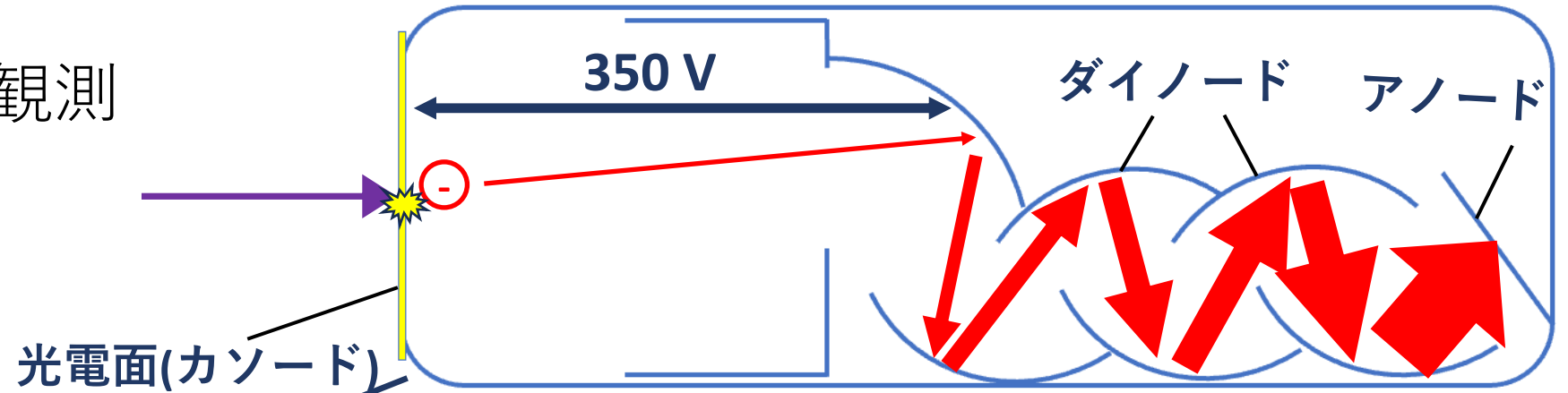


CTAO 大口径望遠鏡の 光電子増倍管 (PMT)

2



光 → 光電子 → ダイノードで増幅 → アノード信号

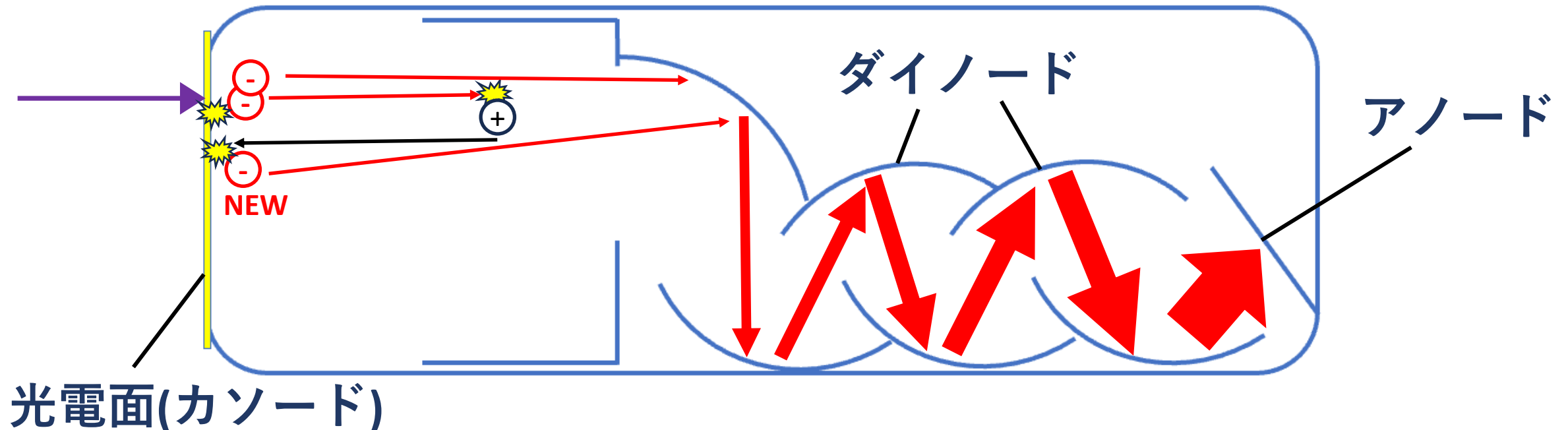


- ◆微弱な光を高感度で検出
- ◆ゲイン4万程度になるよう高電圧 (HV) を調節可能
- ◆ただし初段は350 V で一定
- ◆真空だが残留ガスが存在

アフターパルスの原理

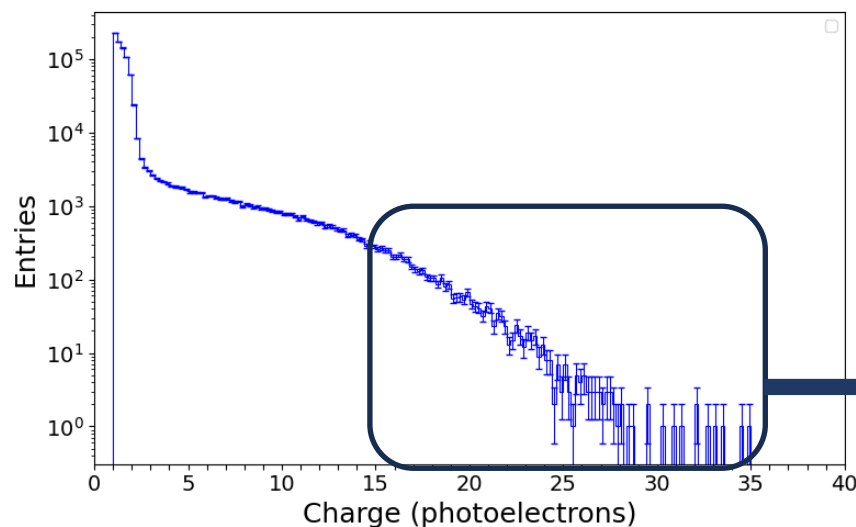
■ アフターパルス：入射光によるパルス信号の後に生じるパルス

- ① 光電面で光電子が生成され、アノードに向けて加速
- ② PMT内の残留ガスに衝突しイオン化
- ③ 生成された陽イオンがカソードに向けて加速
- ④ 光電面で新たに電子を生成
- ⑤ パルスとして現れる

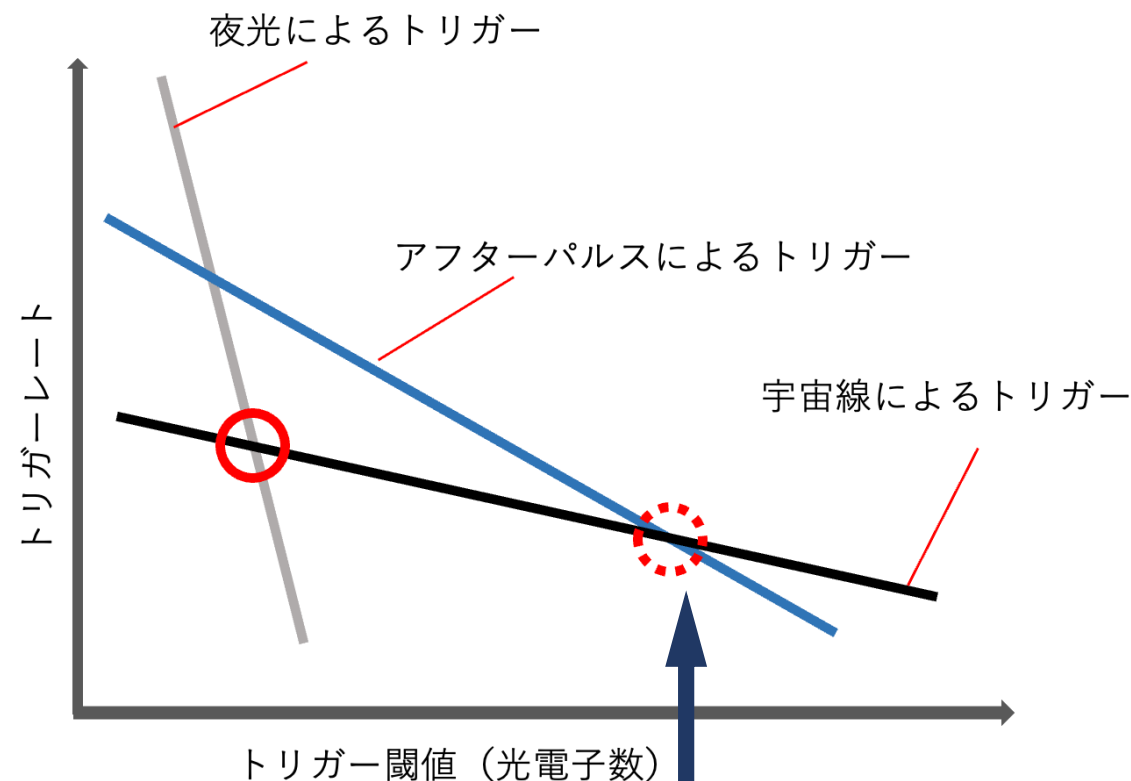


アフターパルスが及ぼす観測への影響

- 夜間の観測中には250 MHz程度の夜光がPMTに照射しアフターパルス生成
- アフターパルスや夜光は観測のバックグラウンド要因
- アフターパルス発生確率大
→ トリガー閾値増加
→ 観測されるエネルギーの下限値が増加



アフターパルスの電荷分布



電荷の大きなアフターパルスが
トリガー閾値に影響

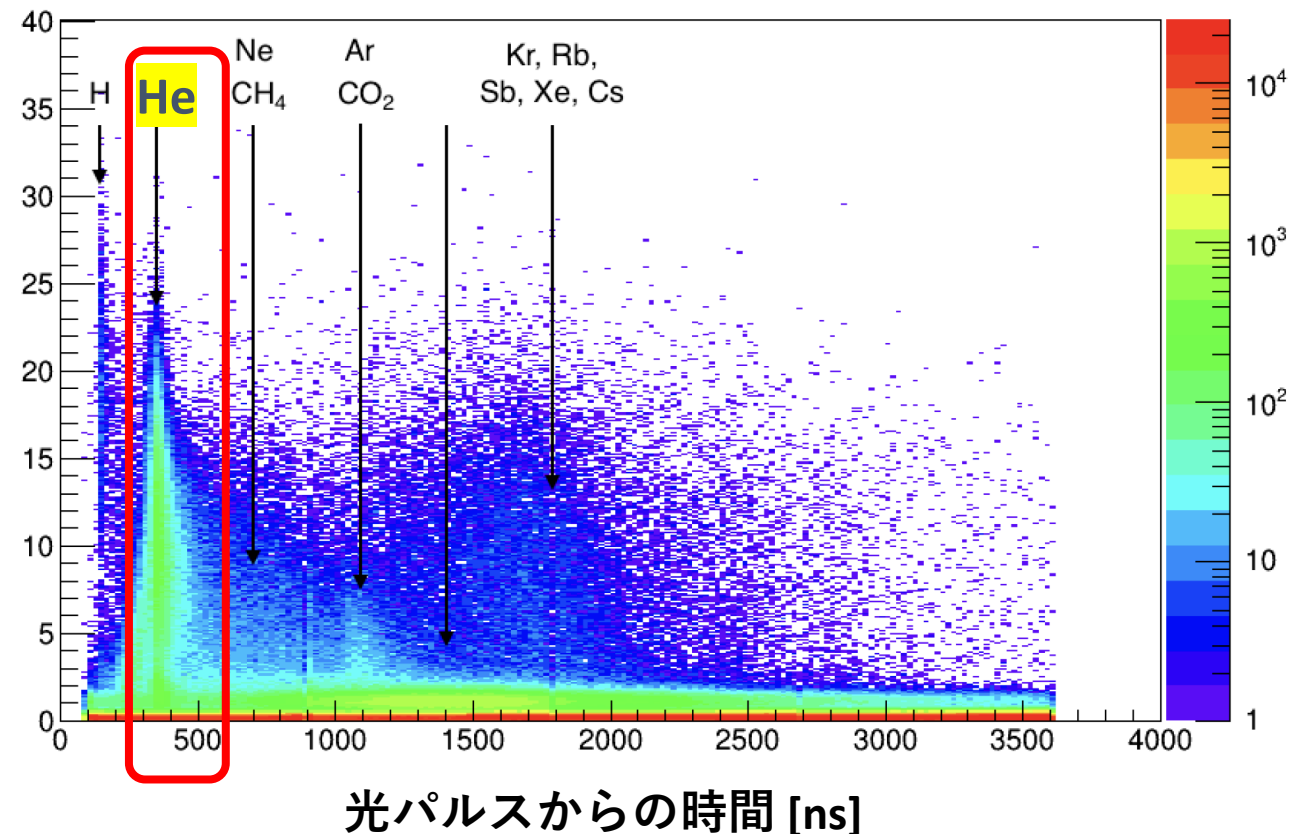
アフターパルスの到来時間とイオン種

■ PMTにレーザーパルスを照射する実験

アフターパルスの**到来時間**：
イオンの質量と電荷依存

→イオン種を推定

- 光によるパルスから約3 μ sまで分布
- アフターパルスを起こすのは主に**He**

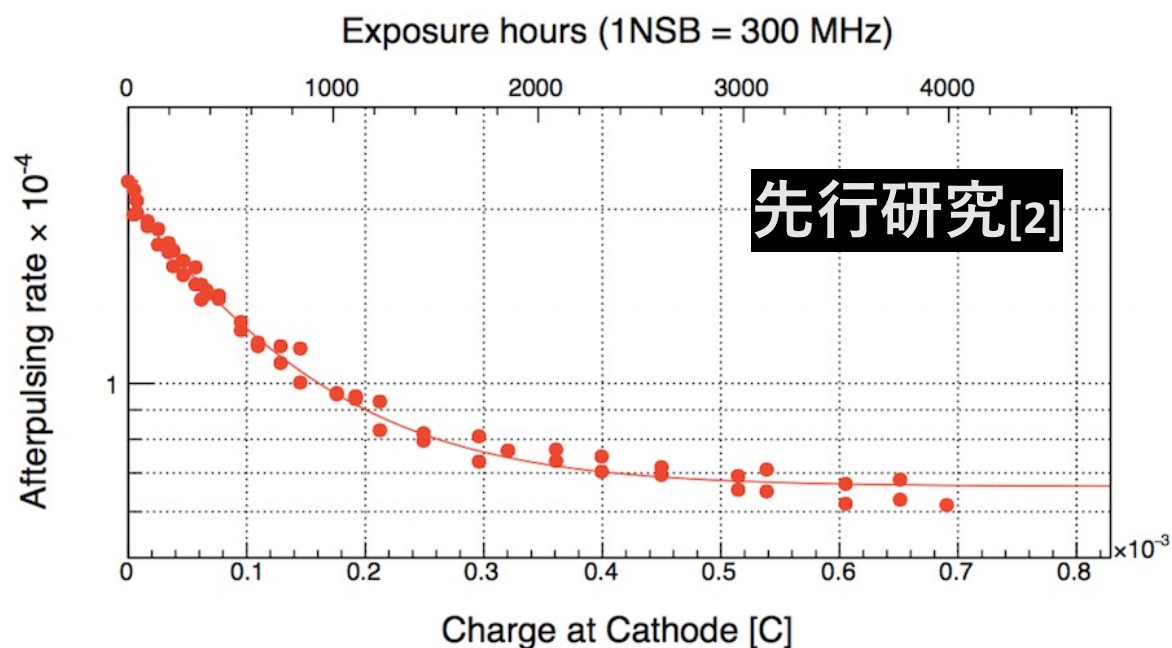


アフターパルスの到来時間分布^[1]

実験背景・目的

先行研究^[2]：

PMTに長期間のLED照射 & HV印加するとアフターパルス発生確率**減少**

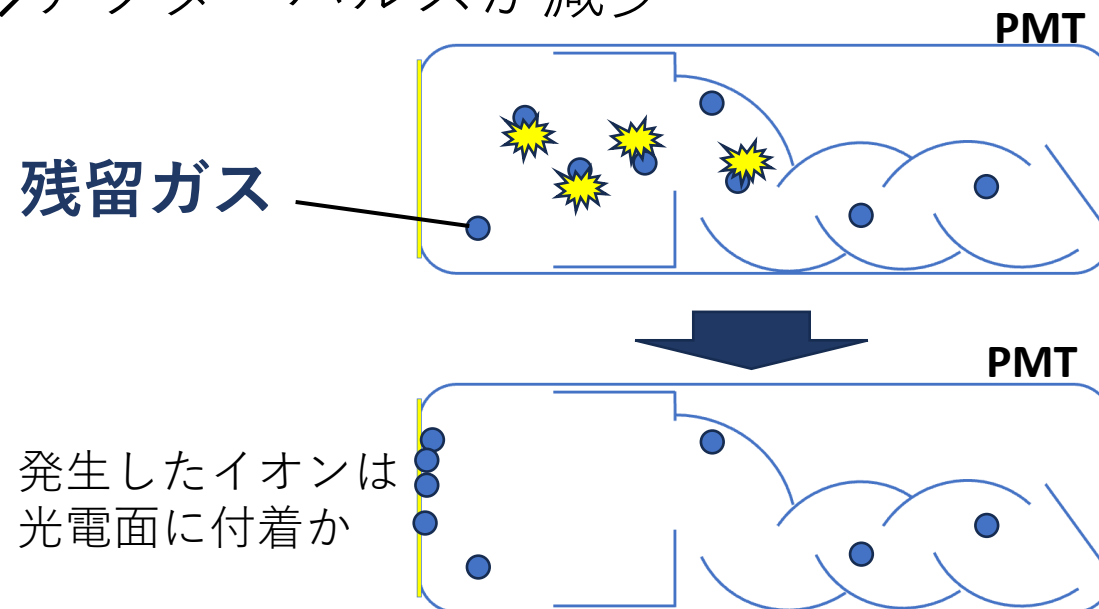


アフターパルス発生確率の変化

指数関数的に減少後、一定値に漸近

仮説：

イオン化による残留ガス(主に**He**)の減少
→アフターパルスが減少

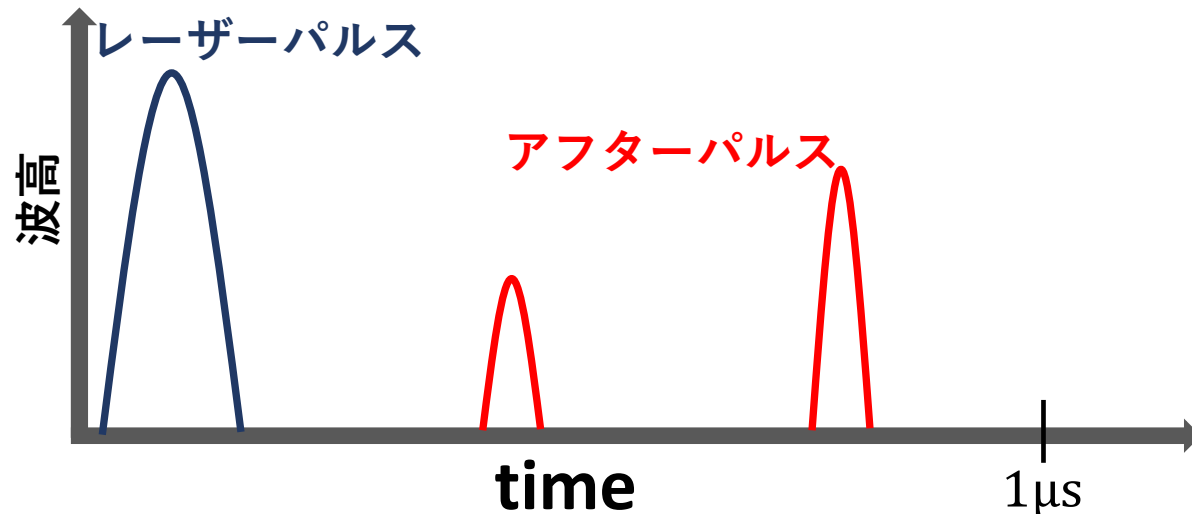
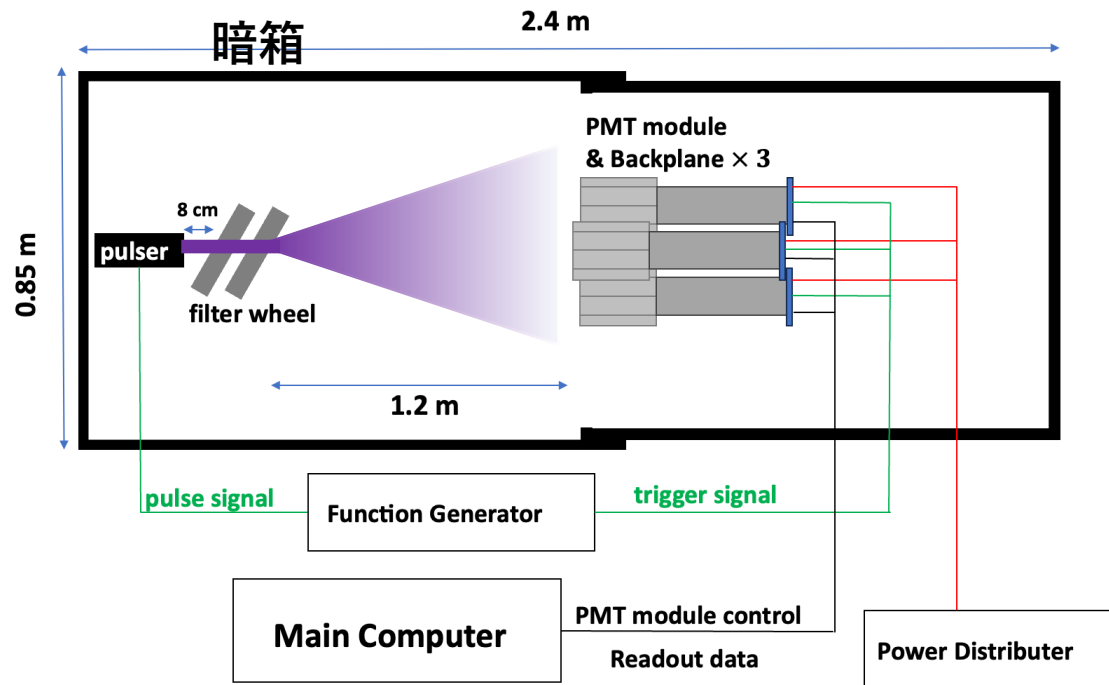


研究目的：

- 長期測定によりアフターパルス減少における光照射と高電圧依存性の確認
- アフターパルス発生確率変化の支配要因の特定

アフターパルス測定方法

7

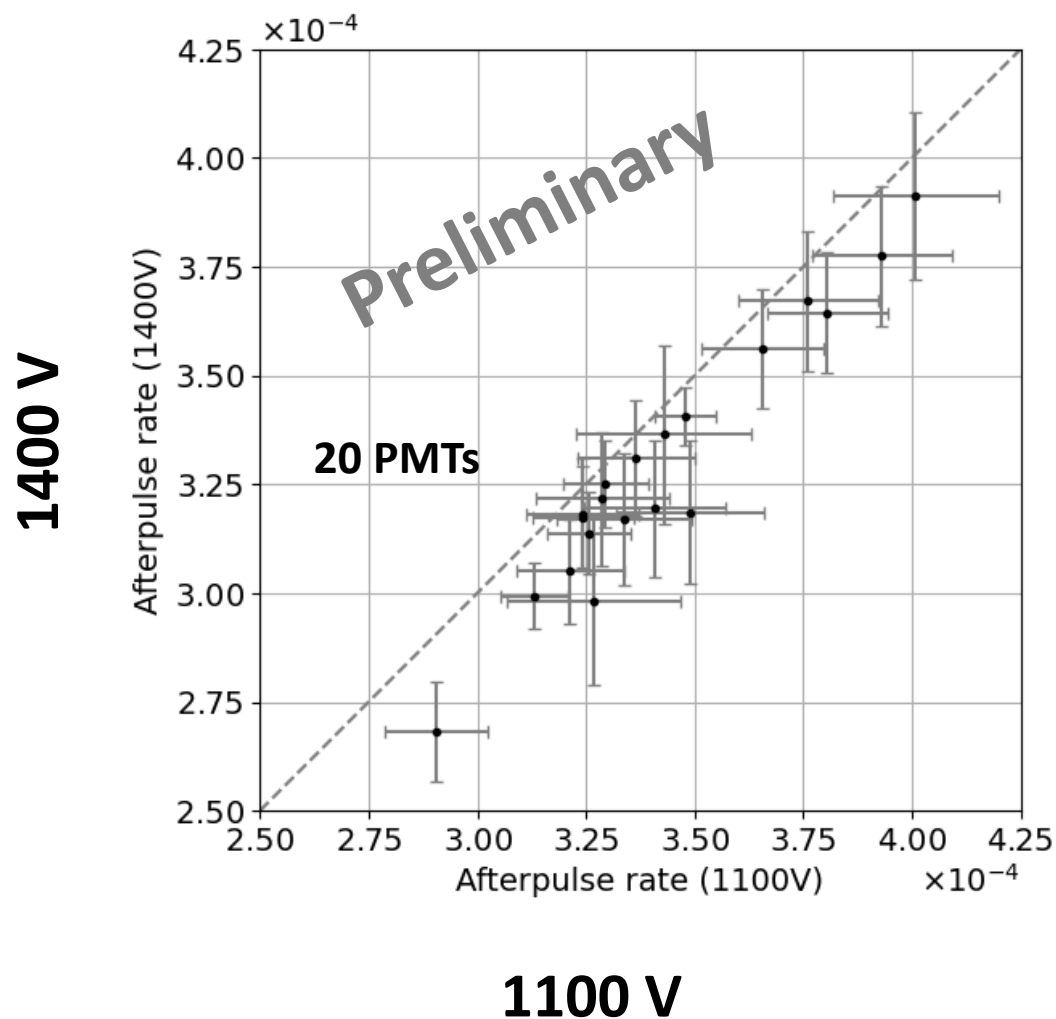


LST2-4用のPMTを使用（実機では未使用）

- ① PMTにHVを印加
- ② レーザーパルスを手PMTに照射
（10万イベント）
- ① 波形を取得（約1μs）
- ② レーザーパルスの光電子数計算
- ③ アフターパルスの発生回数を計算

$$\text{AP発生確率} = \frac{\text{アフターパルス発生回数}}{\text{レーザーパルスの総光電子数}}$$

アフターパルス測定時のHV依存性を調査



■ 全 PMTでLSTの要求値 (2.0×10^{-4}) より高い発生確率

■ 測定時のHVによるアフターパルス発生確率の差は小さい

長期測定手法

9

■ PMTを異なるLED・HV条件で約3週間運転

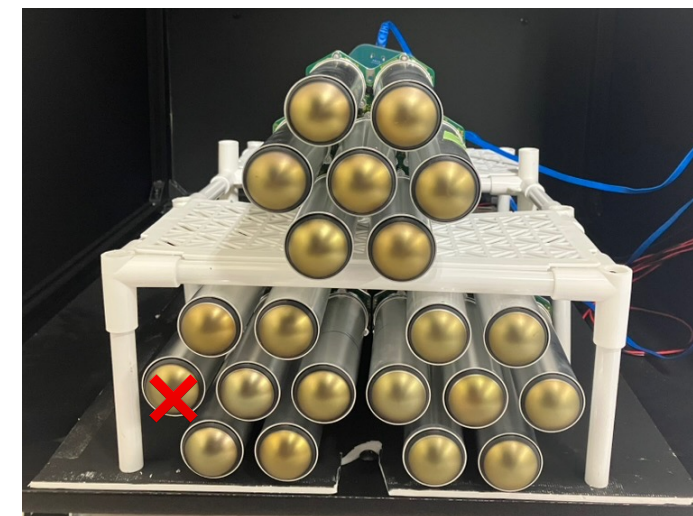
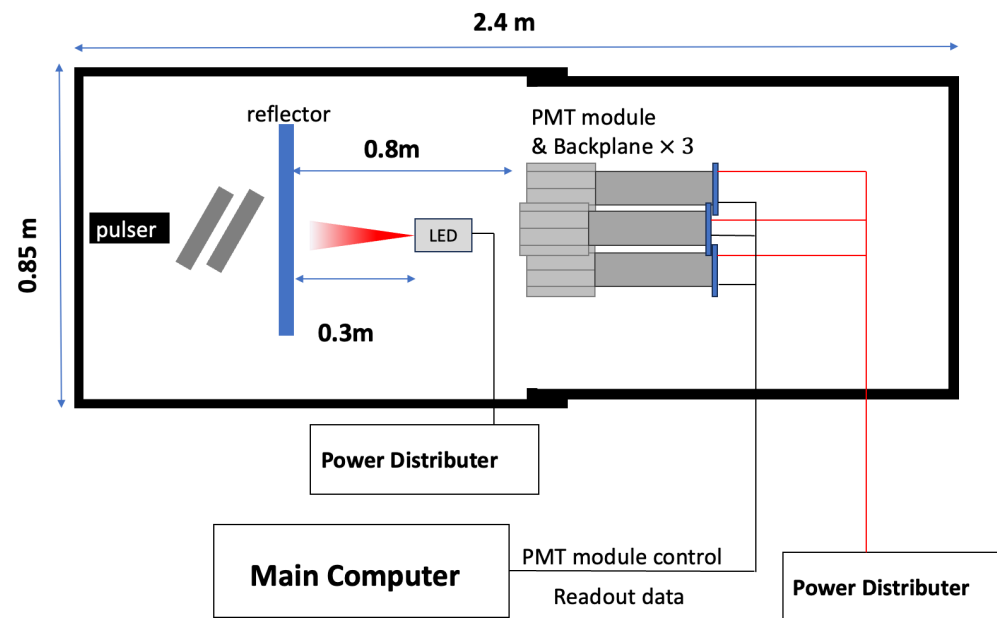
※昼夜問わずPMTの条件を変えず運転

■ アフターパルス発生確率を毎日測定し変化を見る

※AP測定時のみ全PMTでLEDはOFF、HVは1100 V

PMTの条件

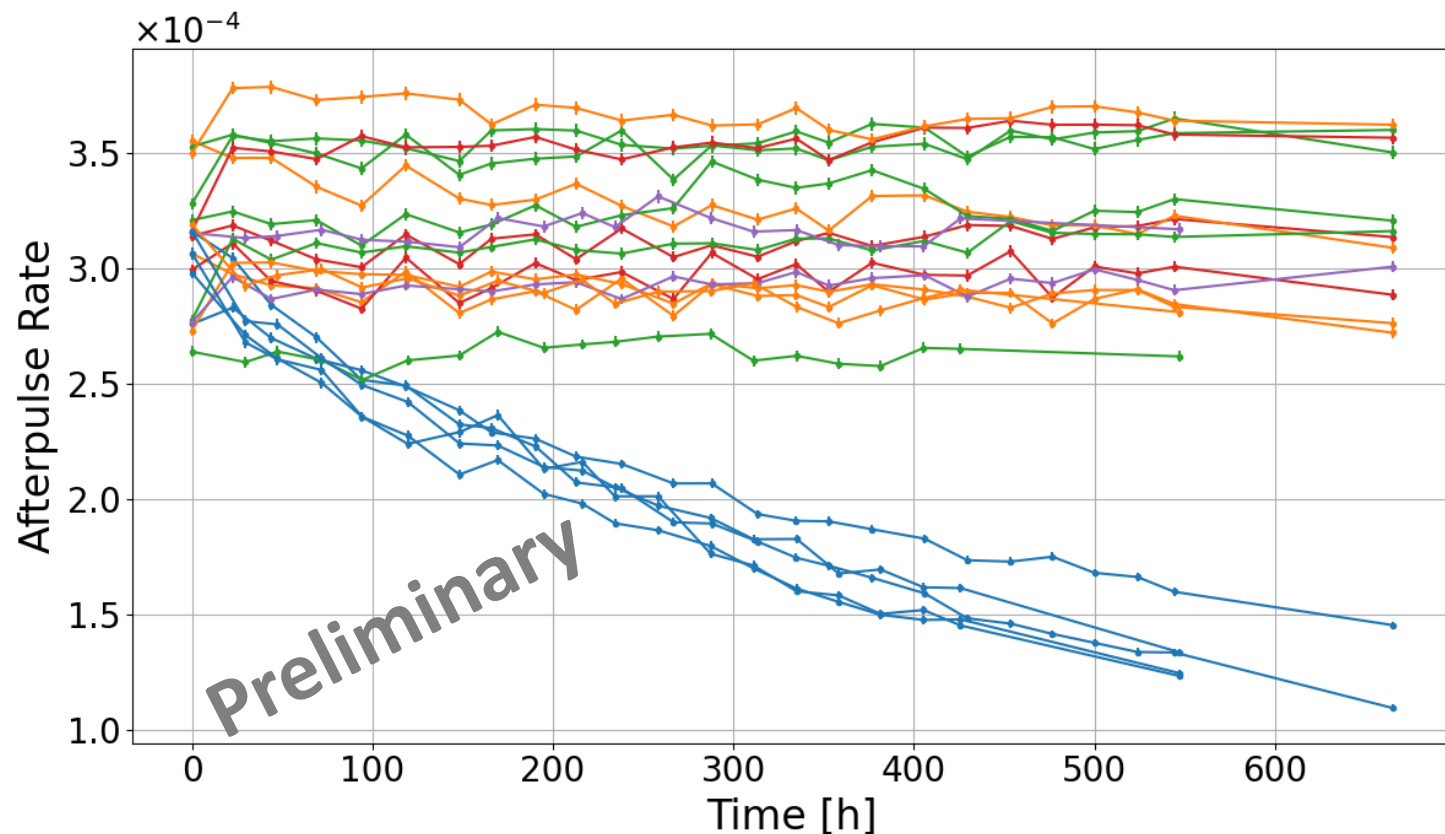
	LED (約2.5 GHz)	HV [V]	本数
PMT group1	ON	1100	5
PMT group2	ON	750	5
PMT group3	ON	0	5
PMT group4	OFF	1100	3
PMT group5	OFF	0	2



PMT計20本使用

結果2 アフターパルス発生確率の時間変化

10



PMTの条件

	LED	HV [V]
group1	ON	1100
group2	ON	750
group3	ON	0
group4	OFF	1100
group5	OFF	0

PMTの平均ゲイン

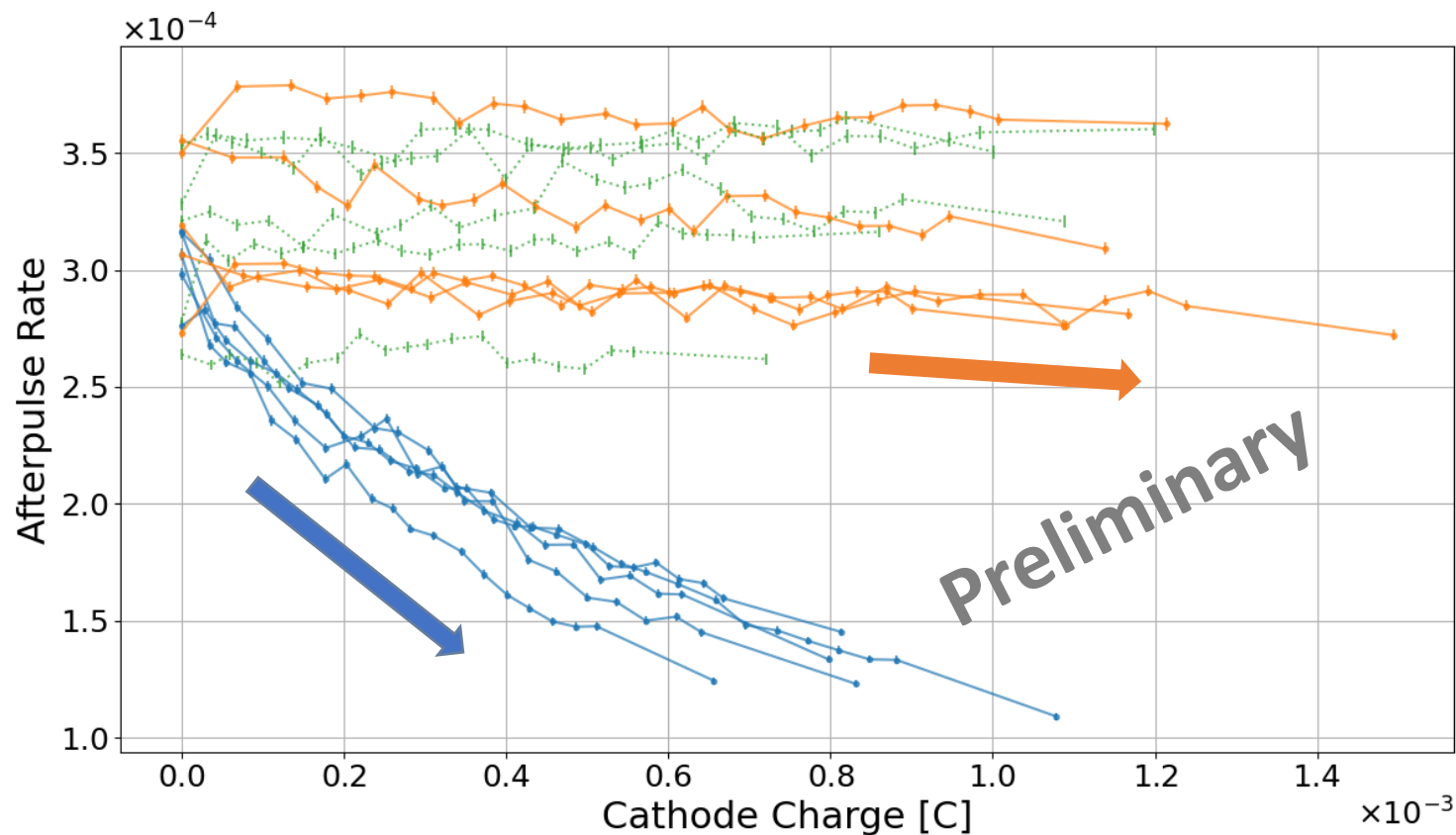
1100 V : $\sim 2.7 \times 10^4$

750 V : $\sim 2.3 \times 10^3$

- LED **ON**, HV **1100 V** のPMTのみ明らかに減少（初期値の約半分）
→APの減少には光電面への光の照射とHVの両方が必要

結果3 アフターパルス発生確率 vs 積算カソード電流

11



PMTの条件

	LED	HV [V]
group1	ON	1100
group2	ON	750
group3	ON	0

PMTの平均ゲイン

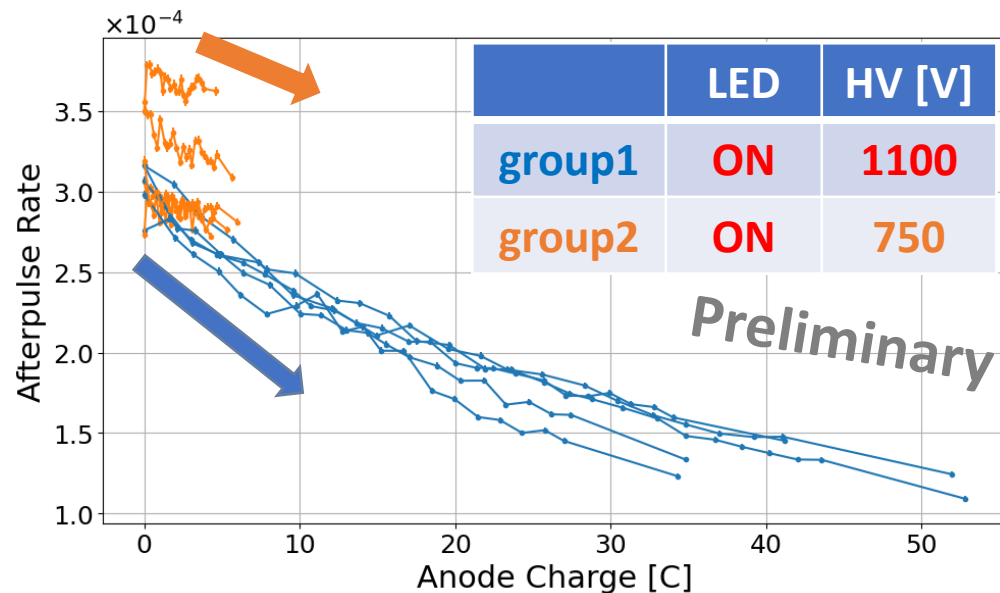
1100 V : $\sim 2.7 \times 10^4$

750 V : $\sim 2.3 \times 10^3$

- LED **ON**, HV **1100 V** のPMTのみ明らかに減少
→APの減少はカソードで生成された光電子の数が原因ではない

結果 4 アフターパルス発生確率 vs 積算アノード電流

12



■ LED **ON**, HV **750 V** のPMTも **1100 V** と同様の減少傾向が見られる

→APの減少はアノード電流に大きく依存



減少量と比較してみる

■ 条件ごとに**線形フィット** (1100 V は初めの4点のみ)

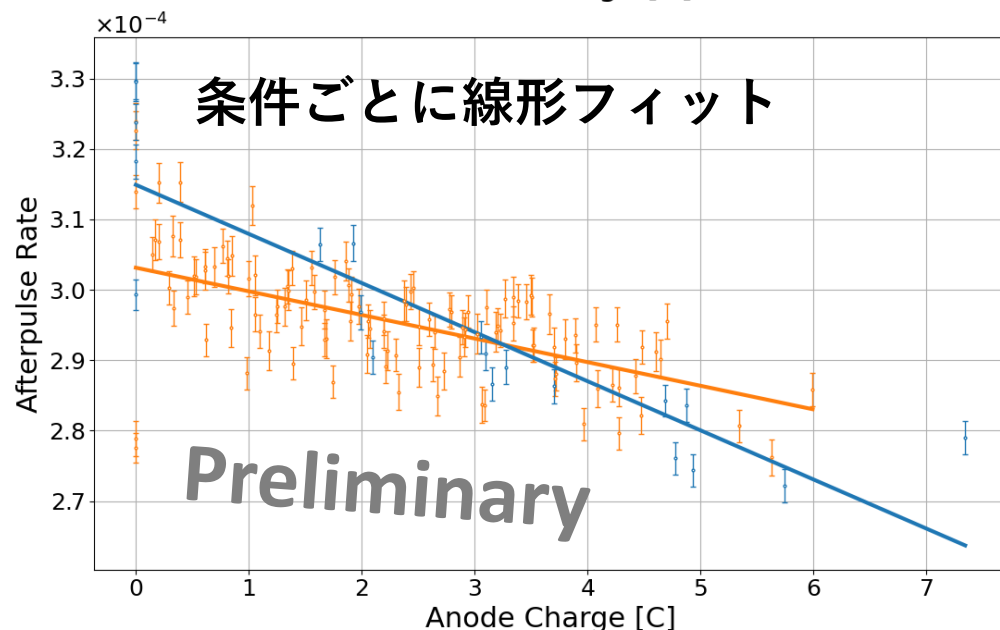
$$AP = a \times Q + b \quad a \dots [1/C], Q \dots [C]$$

$$1100 \text{ V} : a = (-6.97 \pm 0.25) \times 10^{-6}$$

$$750 \text{ V} : a = (-3.35 \pm 0.16) \times 10^{-6}$$



750 V は1100 Vの半分程度の減少量
→電子が持つエネルギーの違いが原因か

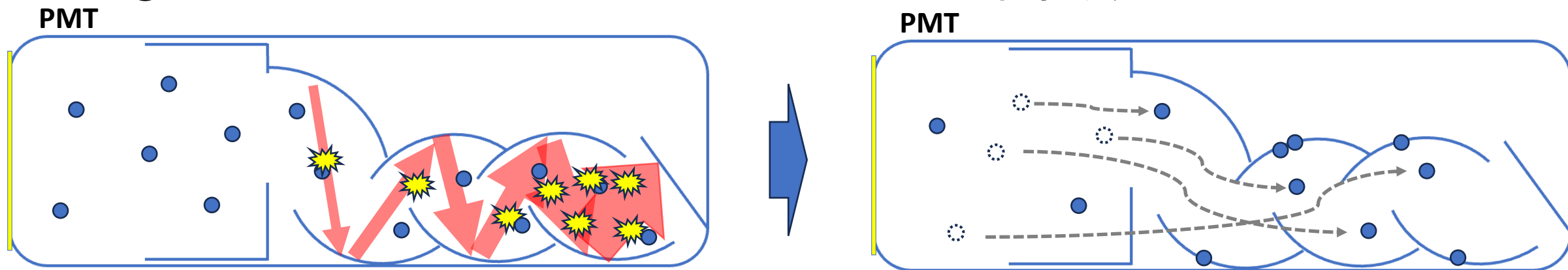


■ Points

- 結果 4 : AP発生確率はHVによらずアノード電荷の増加とともに減少
→**残留ガスのイオン化はPMT後段で発生**
- 結果 1 : AP測定時のHVによって発生確率は大きく変わらない
→後段で発生した陽イオンの多くはアフターパルスとして現れない

■ アフターパルス減少メカニズム

- ① 主に**後段ダイノード**でイオン化が発生し、後段の残留ガス減少
- ② 発生したイオンはダイノードに付着
- ③ **PMT前方の残留ガスが拡散**
- ④ 前方のガス減少により**アフターパルス発生確率減少**



まとめ

- アフターパルスの減少には光照射とHV印加による残留ガスのイオン化が必要
ただ、HVによって差が大きい
- 積算アノード電流 30 C で、発生確率は要求値以下まで減少
- 残留ガスの減少は主にPMT後段でのイオン化が寄与
- 後段で発生した陽イオンはアフターパルスとして現れにくい

展望

- 今回と異なるHVを使った長期測定によりアノード電流依存性を確認