JPS Meeting, September, 2026

ICRR Institute for Cosmic Ray Research University of Tokyo

UTokyo

光電子増倍管アフターパルス減少の印加電圧依存性測定：発生確率の下限と波高スペクトル変化の評価

森田　開　東大宇宙線研　修士２年

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, 野崎誠, 早川文菜[A], 溝手雅也[A], 山本常夏[A],

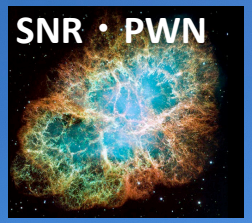
東大宇宙線研, 甲南大理工[A]

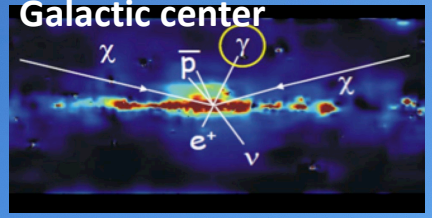


2026年6月撮影

Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO)

- 次世代地上ガンマ線天文台
- 20 GeV–10 TeVのガンマ線を従来より約一桁高い感度で観測
- 北サイト（スペイン LaPalma 島）にて口径23mの大口径望遠鏡（LST）を４台建設
- LST-1が稼働中。LST-2–4は2027年以降観測開始予定









LST-1

LST-4

LST-2

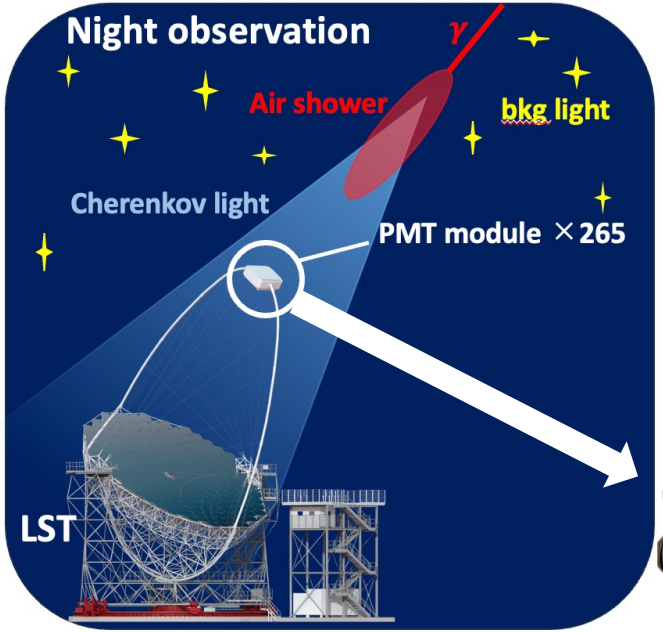
LST-3

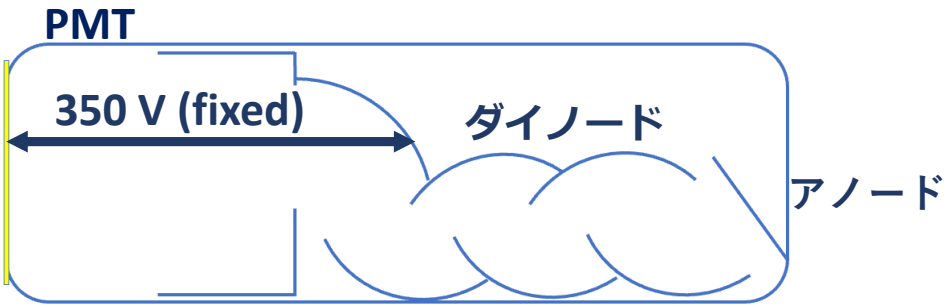
2026年6月撮影

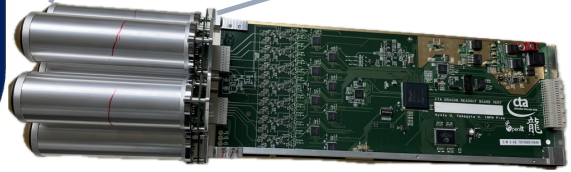
LSTの観測方法と光電子増倍管（PMT）

■ **観測方法**

- ガンマ線由来の空気シャワーが生成する**チェレンコフ光（紫外・可視光）**のパルス（数ns）をPMT (R12992-100, Hamamatsu)で検出
- **PMTを屋外に露出**させて夜間観測を実施
- **夜光が常にPMTに入射**（光電子レート：~250MHz）→アフターパルス（AP）を生成







- ゲイン4万程度にHVを調整可能
- 光電面と初段ダイノードとの電位差は350 Vで固定

1 module 7 PMTs

PMTの長期運用時におけるアフターパルス発生確率の減少 （JPS 2024春）

保管していたPMT

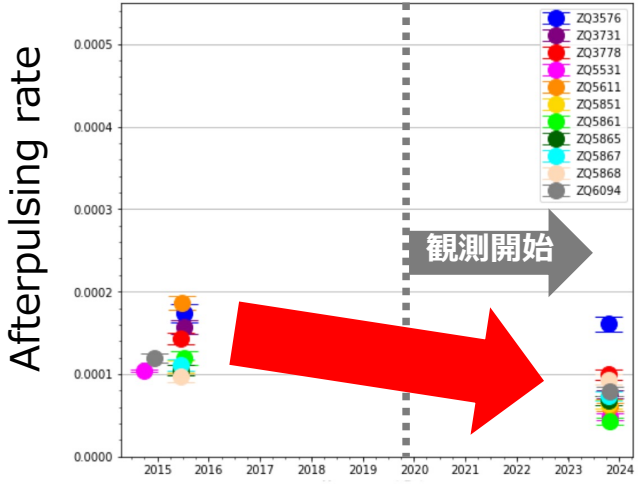
PMT内へのガス侵入が原因で
AP発生確率**増加**



Measurement date (year)

LST-1で使用したPMT

AP発生確率が**減少**？

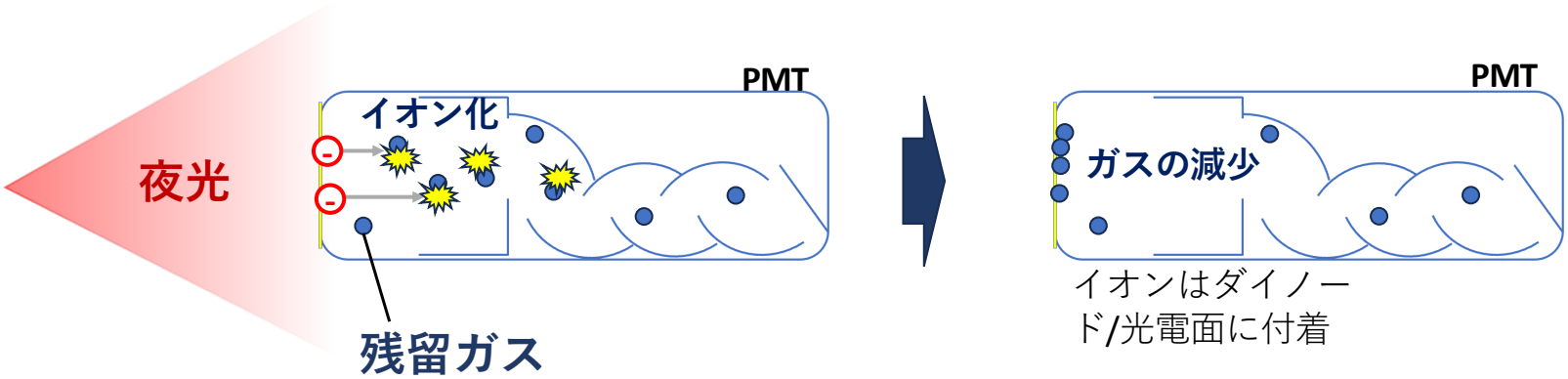


Measurement date (year)

仮説：運用時の夜光とHVでPMT内のガスが減少している？

■ **仮説**

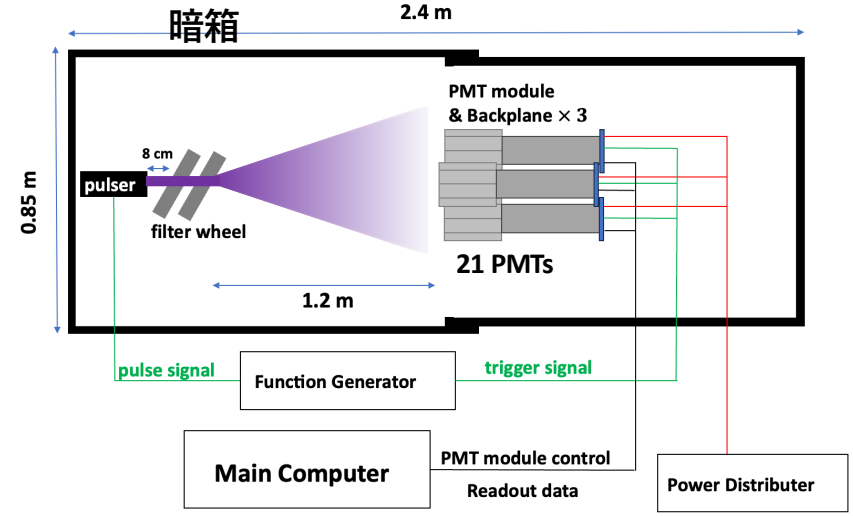
光電面から加速された光電子によるイオン化で残留ガス（主にHe）が減少
→AP発生確率の減少

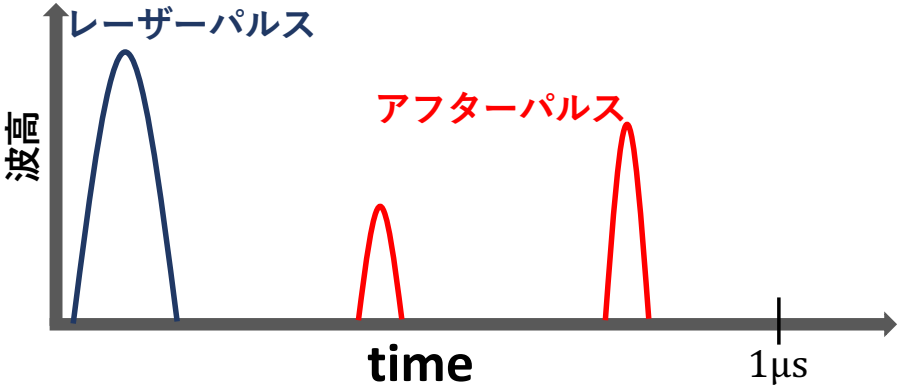


■ **本実験の目的**

- AP発生確率の減少に光の照射とHVが必要か確認
- 減少における光照射とHVの依存性や、その他長期運用時におけるAPの特性変化のHV依存性解明

アフターパルス測定方法





LST2-4用（**実機では未使用分**）の
PMT（R12992-100, Hamamatsu）を使用

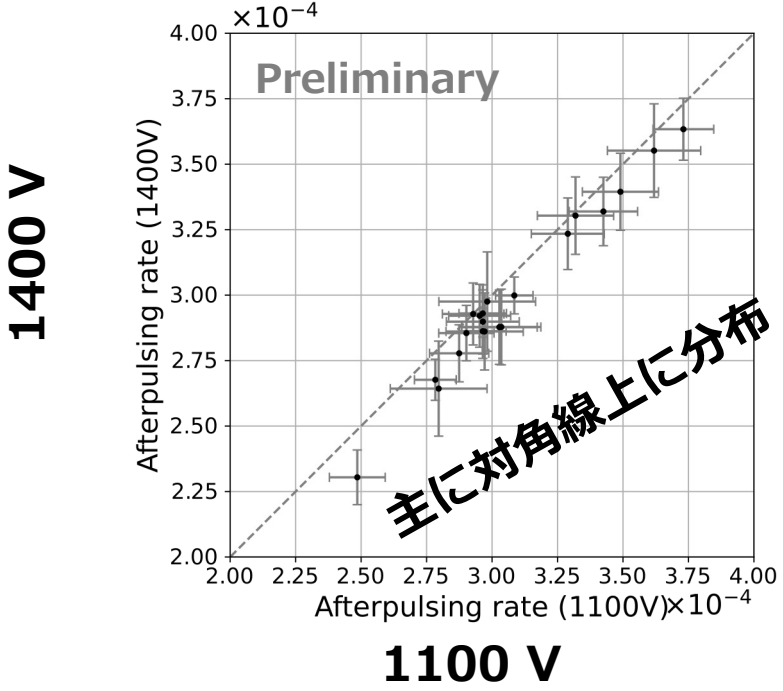
① PMTにHVを印加
② レーザーパルス （パルス幅約110ps）をPMTに照射
③ 波形を10万イベント取得（約1μs）

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

アフターパルス測定時のHVと発生確率

■ アフターパルス測定時のHV依存性を調査

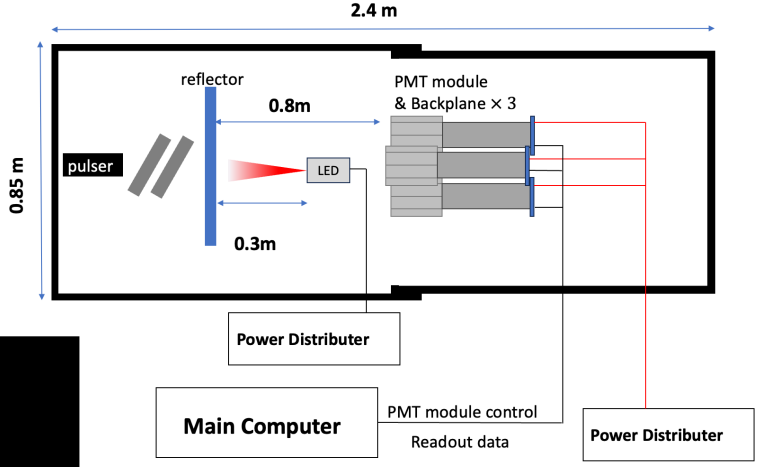
長期運用していないPMT21本のAP発生確率分布



- 実機で未使用のためAP発生確率が高い（全PMTがLSTの要求値2.0×10^{-4}を満たしていない）
- **測定時のHVによるAP発生確率の差は小さい**

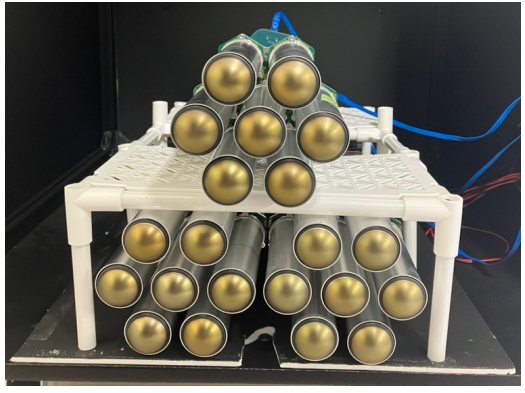
長期測定手法

- **PMTを異なるLED・HV条件で最長半年運転**
  ※昼夜問わずPMTの条件を変えず運転
- **AP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



長期運用時におけるPMTの条件

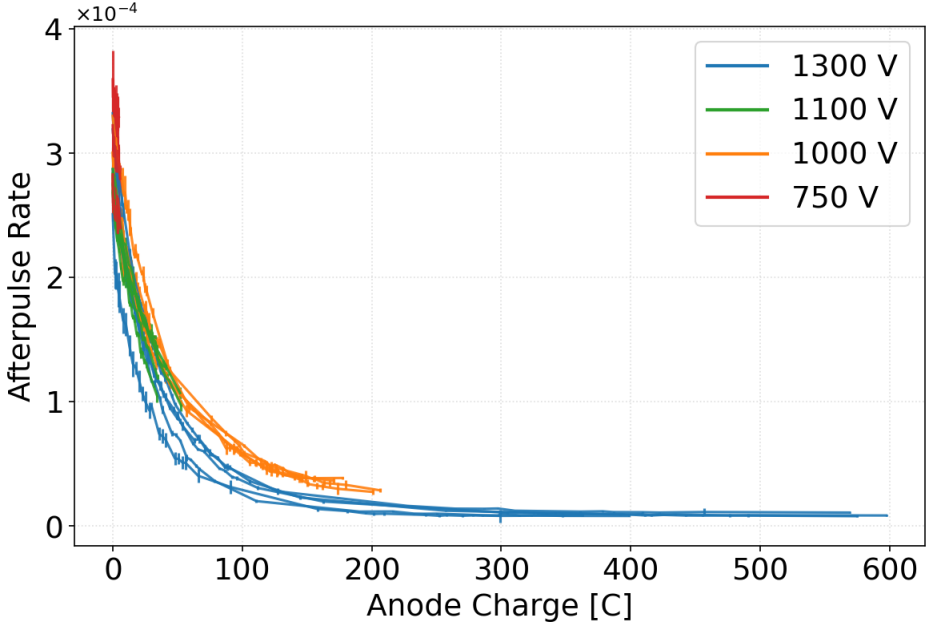
	LED (光電子レート 約2.5 GHz)	HV [V]	本数
PMT group1	ON	1300	5
PMT group2	ON	1100	5
PMT group3	ON	1000	5
PMT group4	ON	750	5
PMT group5	ON	0	5
PMT group6	OFF	1100	3
PMT group7	OFF	0	3



一度に21本のPMTで長期測定実施

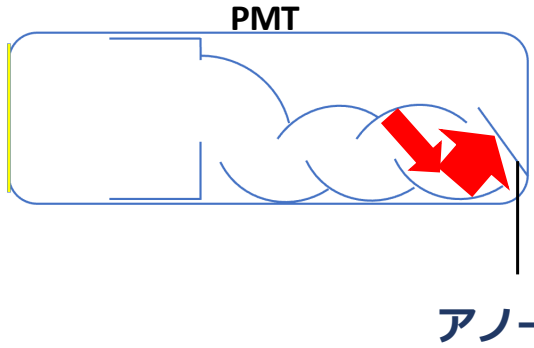
アフターパルス発生確率 vs 積算アノード電荷量

- 光照射/HVありのPMTのみAP発生確率が減少
  →PMT内の残留ガスイオン化が原因
- AP発生確率は、**HVに依らず積算アノード電荷量に対して同様の減少傾向**を示す
  →アノード電流の量と残留ガス減少量に相関がある
  →主にPMT後段で生成された**二次電子が残留ガスをイオン化**させる



積算アノード電荷量：

- アノードに流れた電流の合計値



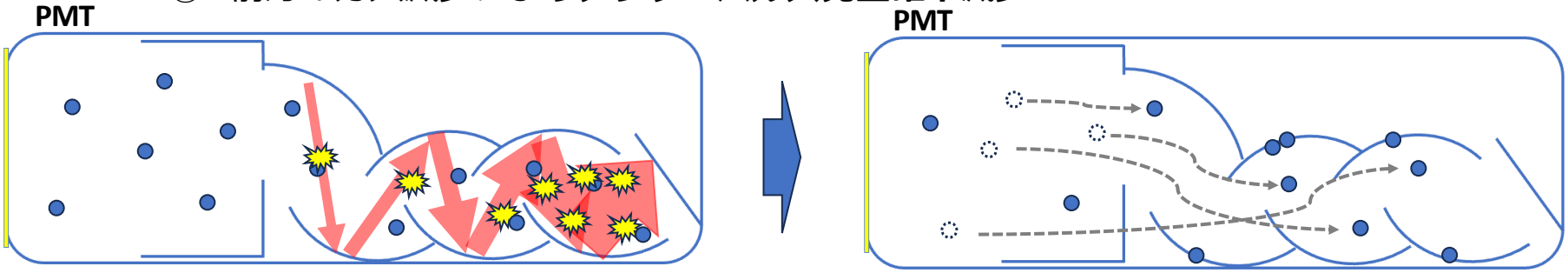
アフターパルス減少の仕組み

■ Points

- 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**
- 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**



アフターパルス減少の仕組み

■ PMT内で浮遊している残留ガスの変化をアノード電流 I で評価

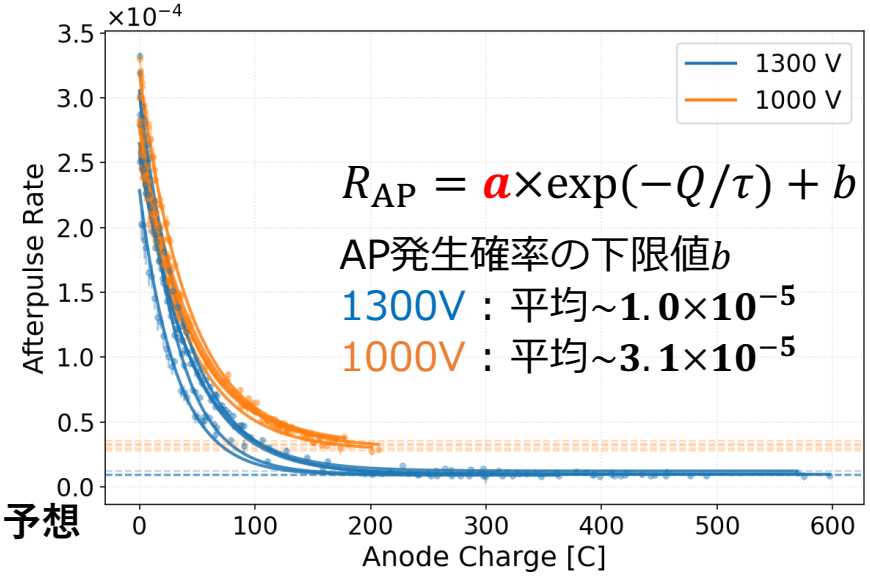
- 残留ガスの変化量：
  アノード電流値に比例してガスが減少し、
  時間と共に一定のガスが増加すると仮定（例：PMT内へのHe侵入）

電流値に比例して減少　　ガスの増加

$$\frac{dN}{dt} = -kNI + A$$

- 残留ガス量：$N = \frac{A}{kI} + C\exp(-kIt)$

下限値

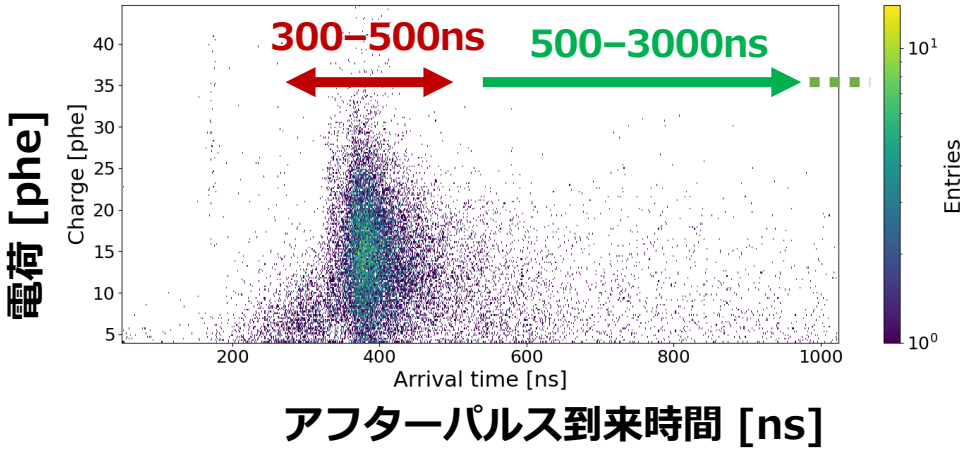


- **残留ガス量の下限値は運用時の電流値に反比例と予想**
- **AP発生確率の下限値も同様の電流依存性を示す**

AP減少測定前後のAPスペクトルの変化

■ 1000 Vと1300 Vを印加したPMTについて**減少測定前後のAPスペクトルを到来時間ごとに比較**

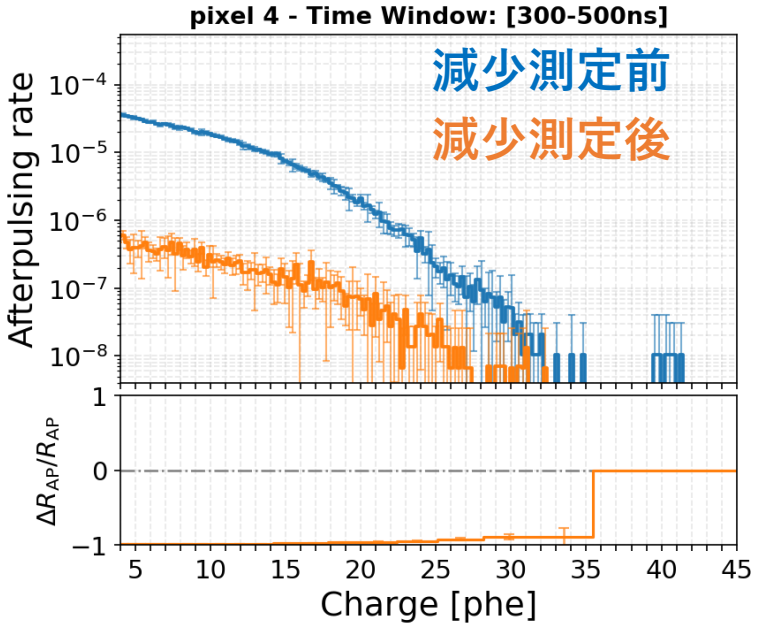
- AP到来時間１：**300–500ns**
  （最もAPが分布する範囲）
- AP到来時間２：**500–3000ns**



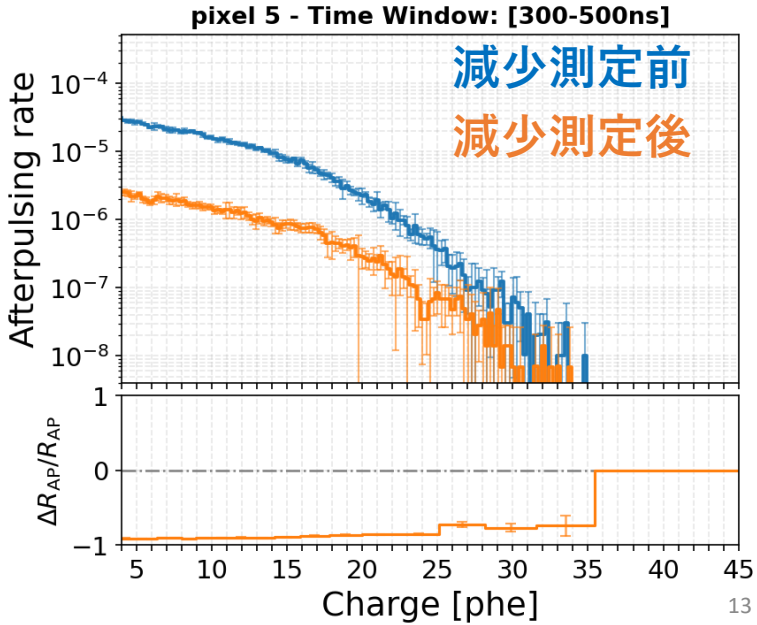
到来時間300–500nsのAP電荷分布

- 特に電荷が小さいAPは**1300 V印加時の方が明らかに減少**
  →高HV印加時ほどAP発生確率下限値が低下する傾向と整合
  →到来時刻300–500nsのAPはHe成分の減少を捉えていることを確認

1300 Vで長期間運用したPMT



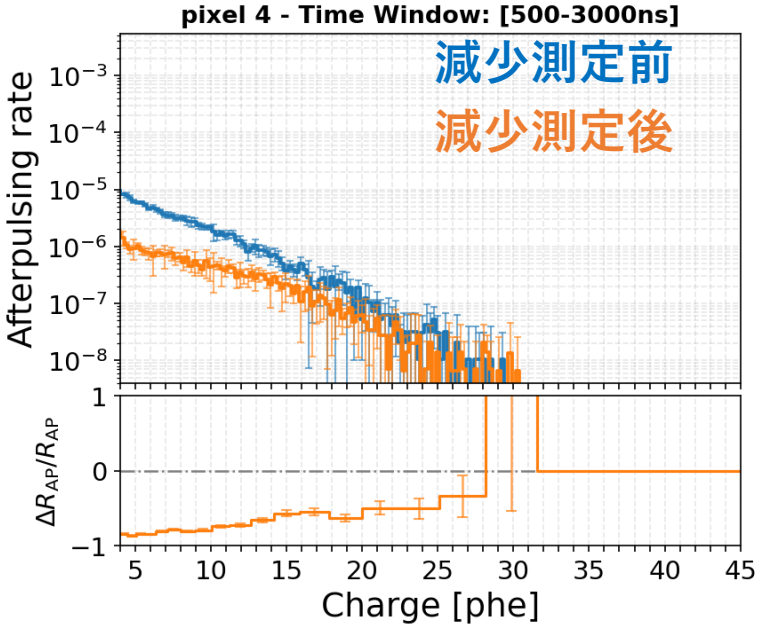
1100 Vで長期間運用したPMT



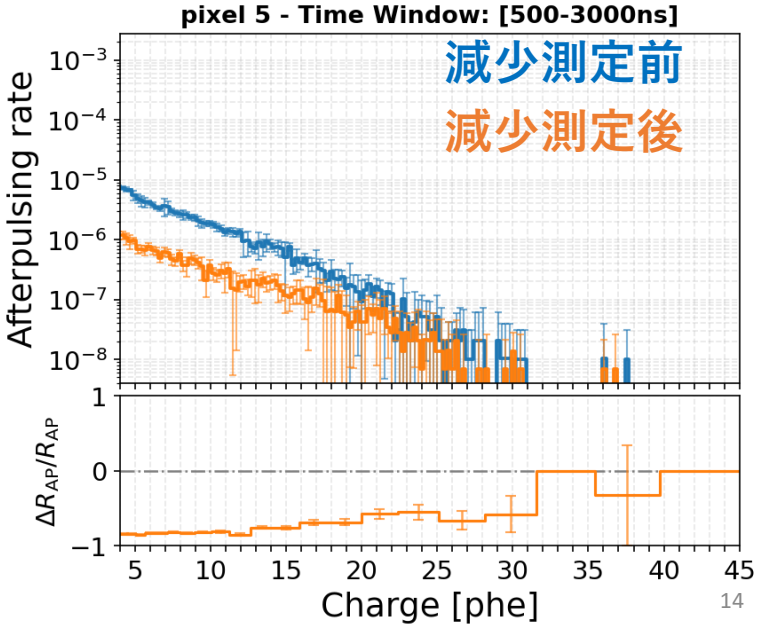
到来時間500–3000nsのAP電荷分布

- **電荷の大きいAPは減少率が小さい**
  →PMT内に浮遊分子由来ではない、減少しないAP成分が少量存在する可能性
  （Sb, CsなどのPMT構成材料由来）

1300 Vで長期間運用したPMT



1100 Vで長期間運用したPMT



Summary

- アフターパルス発生確率の減少には光照射とHV印加の両方が必要
- 主にPMT後段で発生したイオン化が残留ガスの減少に寄与し、AP発生確率が減少
- 残留ガスの減少量が運用中のアノード電流値に依存するとしたモデルは、AP発生確率の測定結果と整合
- しかしAPスペクトルの変化から、電荷の大きいAP成分はPMTの運用で減少しない可能性を示唆

Next Steps

- PMT内部の電場モデルを用いた、APを生成するイオン種の特定と到来時間の検証