

# CTA報告223: CTA大口徑望遠鏡搭載の 焦点面検出器の アフターパルス 発生確率の研究

---

清本拓人<sup>A</sup>, 高橋光成<sup>B</sup>, 山本常夏<sup>C</sup>, 小林志鳳<sup>D,E</sup>, 武石隆治<sup>D</sup>, 齋藤隆之<sup>D</sup>, 立石大<sup>A</sup>, 寺田幸功<sup>A</sup>,  
糸川拓海<sup>D</sup>, 猪目祐介<sup>D</sup>, 大岡秀行<sup>D</sup>, 岡知彦<sup>D</sup>, 奥村曉<sup>B,F</sup>, 折戸玲子<sup>G</sup>, 片桐秀明<sup>H</sup>, 櫛田淳子<sup>I</sup>, 窪秀利<sup>D</sup>,  
郡司修一<sup>J</sup>, 櫻井駿介<sup>D</sup>, 田島宏康<sup>B</sup>, 田中真伸<sup>K</sup>, 手嶋政廣<sup>D,L</sup>, 寺内健太<sup>M</sup>, 門叶冬樹<sup>J</sup>, 中森健之<sup>J</sup>,  
西嶋恭司<sup>I</sup>, 野崎誠也<sup>D,L</sup>, 野田浩司<sup>D,E</sup>, 橋山和明<sup>D</sup>, Daniela Hadasch<sup>D</sup>, Daniel Mazin<sup>D,L</sup>, 溝手雅也<sup>C</sup>

他 CTA-Japan Consortium

埼玉大理<sup>A</sup>, 名大 ISEE<sup>B</sup>, 甲南大理工<sup>C</sup>, 東大宇宙線研<sup>D</sup>, 千葉大理<sup>E</sup>, 名大 KMI<sup>F</sup>, 徳島大理工<sup>G</sup>,  
茨城大理<sup>H</sup>, 東海大理<sup>I</sup>, 山形大理<sup>J</sup>, KEK 素核研<sup>K</sup>, マックスプランク物理<sup>L</sup>, 京大理<sup>M</sup>

# 大口径望遠鏡 (Large Size Telescope, LST)

焦点面検出器



PMT モジュール×265



7本のPMT

信号読み出し基盤

平均量子効率 $\approx$ 40%

R11920-100

CW

PACTA

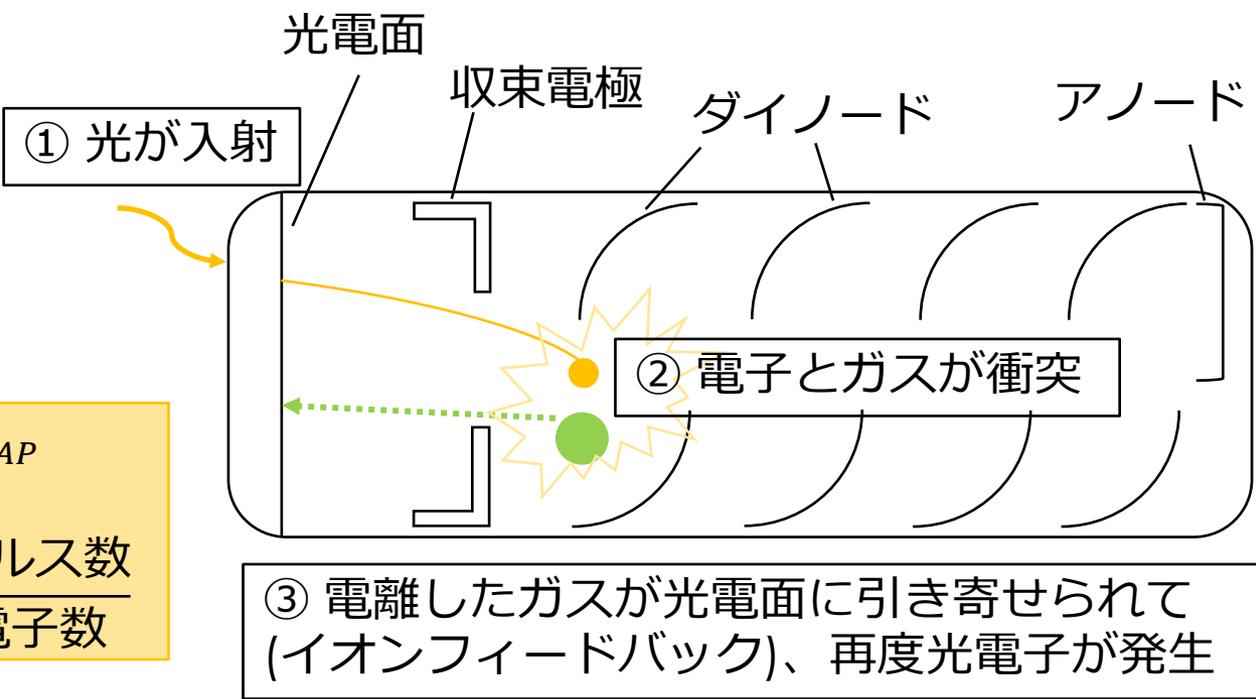


Credit: 永吉勤 Master's thesis. 埼玉大学. 2014

# アフターパルス

入射光子による出力信号の後に生じる擬似パルス = アフターパルス

アフターパルスの発生確率  $P_{AP}$

$$P_{AP} = \frac{\text{発生したアフターパルス数}}{\text{メインパルスの光電子数}}$$


アフターパルスは、メインパルス発生から  $3 \mu\text{s}$  の範囲で分布しており、その到来時間は、**イオンの質量と電荷**による

$$t = \sqrt{\frac{m}{2q}} \int_{l_0}^L (V(l_0) - V(l))^{-\frac{1}{2}} dl$$

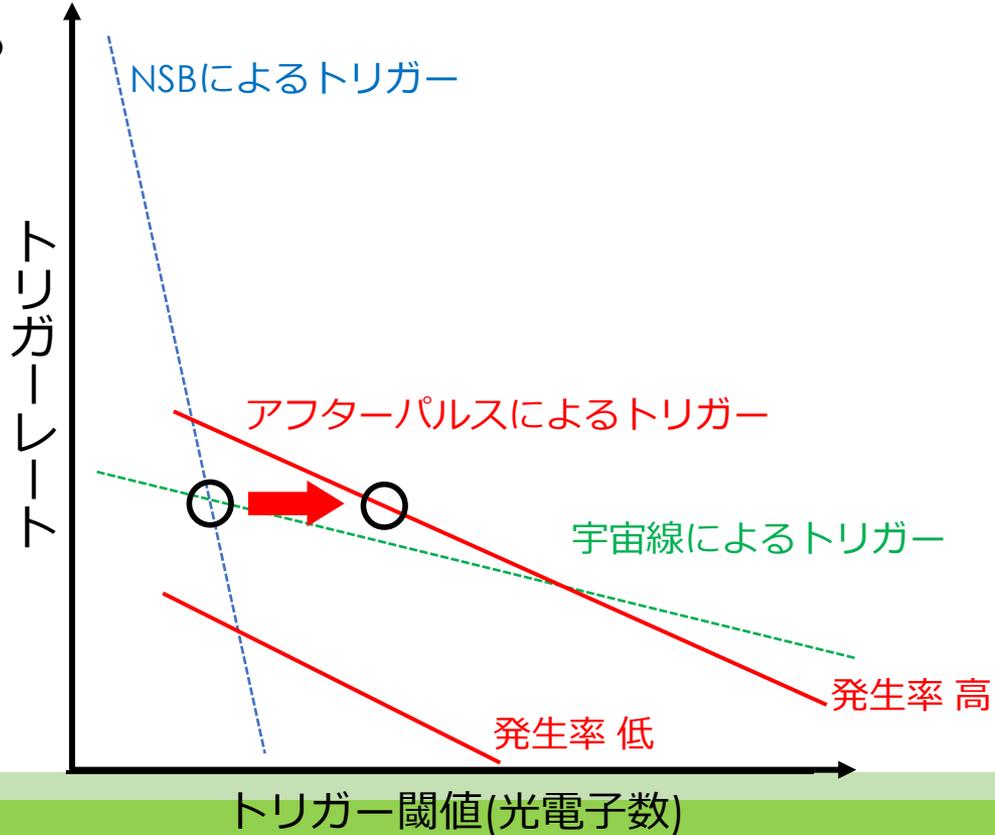
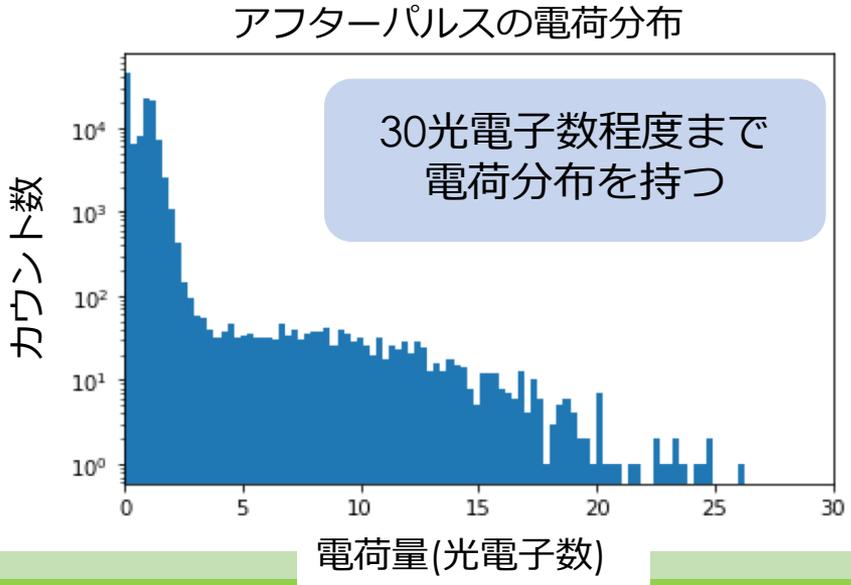
$l_0$ : イオンの発生位置  
 $L$ : 光電面の位置  
 $V(l)$ : 位置  $l$  における電位  
 $m, q$ : イオンの質量、電荷

PMTの管内に残留していると想定されるガス

- 大気中に含まれる分子  $\Rightarrow \text{N}_2 \text{ Ar He CH}_4 \text{ Ne Kr Xe}$
- 光電面の素材として含まれる分子  $\Rightarrow \text{Rb Sb Cs}$

# AfterPulseが望遠鏡に与える影響

- 望遠鏡の観測中には、宇宙線や夜光(Night Sky Background, NSB)が入射  
⇒ガンマ線観測において、バックグラウンドになる
- 電荷量の大きいアフターパルスの発生確率が増加すると、トリガー閾値を引き上げる必要がある  
⇒ 観測エネルギーの下限値に影響する

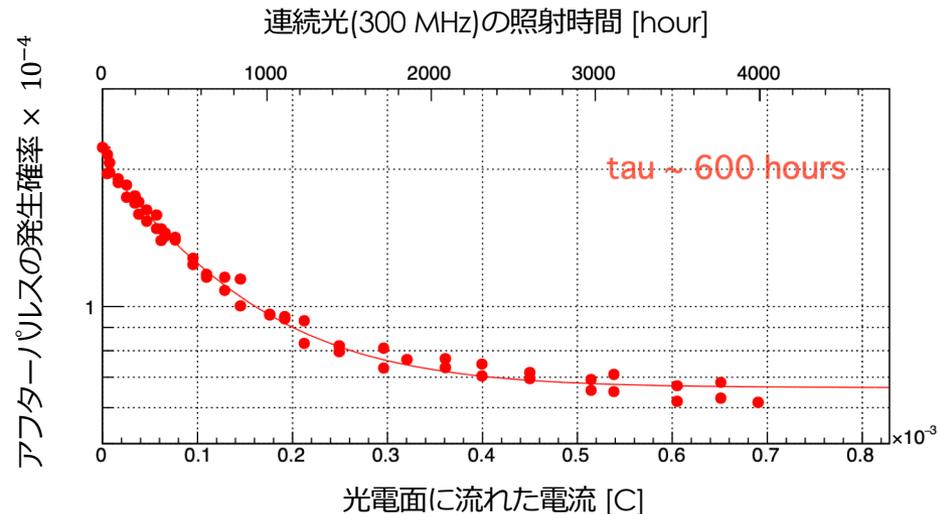


# 研究の動機

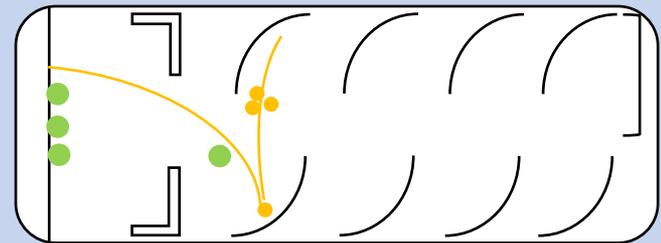
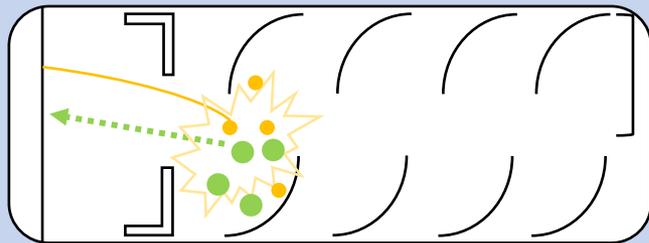
- 2015年のPMT評価試験にて、PMTのアフターパルスの**増加傾向**が確認された  
LST初号機搭載PMTの増加率 =>  $\sim 0.004\%/year$
- その一方で、アフターパルスの発生確率は、PMTに連続光を照射し続ける事により**減少**することが実験で確認された

## LEDでPMTに連続光を照射した実験

イオンフィードバックを促した事により、アフターパルスの発生確率は急速に減少し、その後一定の値に漸近した



Credit: 櫻井駿介 Master's thesis. 東京大学. 2017, 埼玉大学永吉氏



ガスのイオン化を促進して、ダイノードの残留ガスが減少

# 研究の目的

⇒運用中のLST初号機中のPMTモジュールでは  
観測中にNSBを受けて、アフターパルスの発生確率が抑制されているのでは？

## 本研究の目的

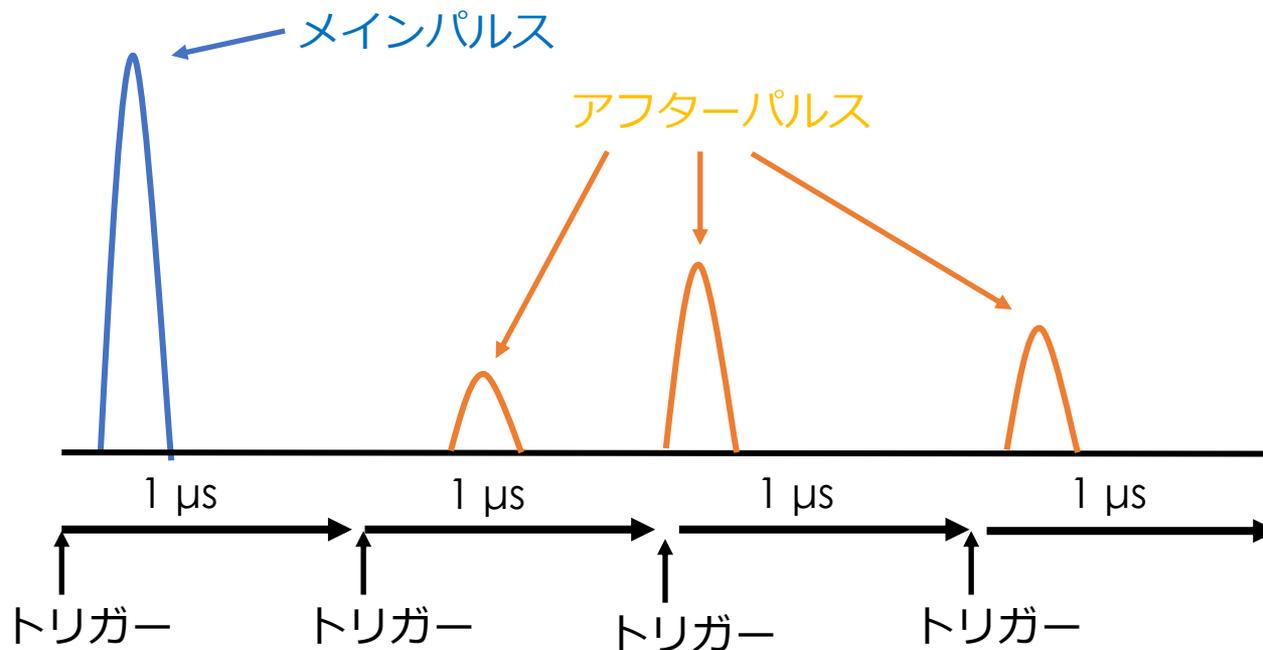
- LST初号機のPMTモジュールのアフターパルス測定を行い、
  - ① 現在のアフターパルスの発生確率を確認する
  - ② アフターパルスに対するNSBの影響を調査する

## 測定したPMTモジュール

- 運用の有無による影響を比較するため、以下の環境の異なるPMTモジュールを3セットずつ用意し、同時に測定した
  - 夜光が**当たっている**
    - ⇒ LST初号機から取り出したPMTモジュール (**実機PMT**)
  - 夜光が**当たっていない**
    - ⇒ 評価試験以降、予備として使用していなかったPMTモジュール (**予備PMT**)

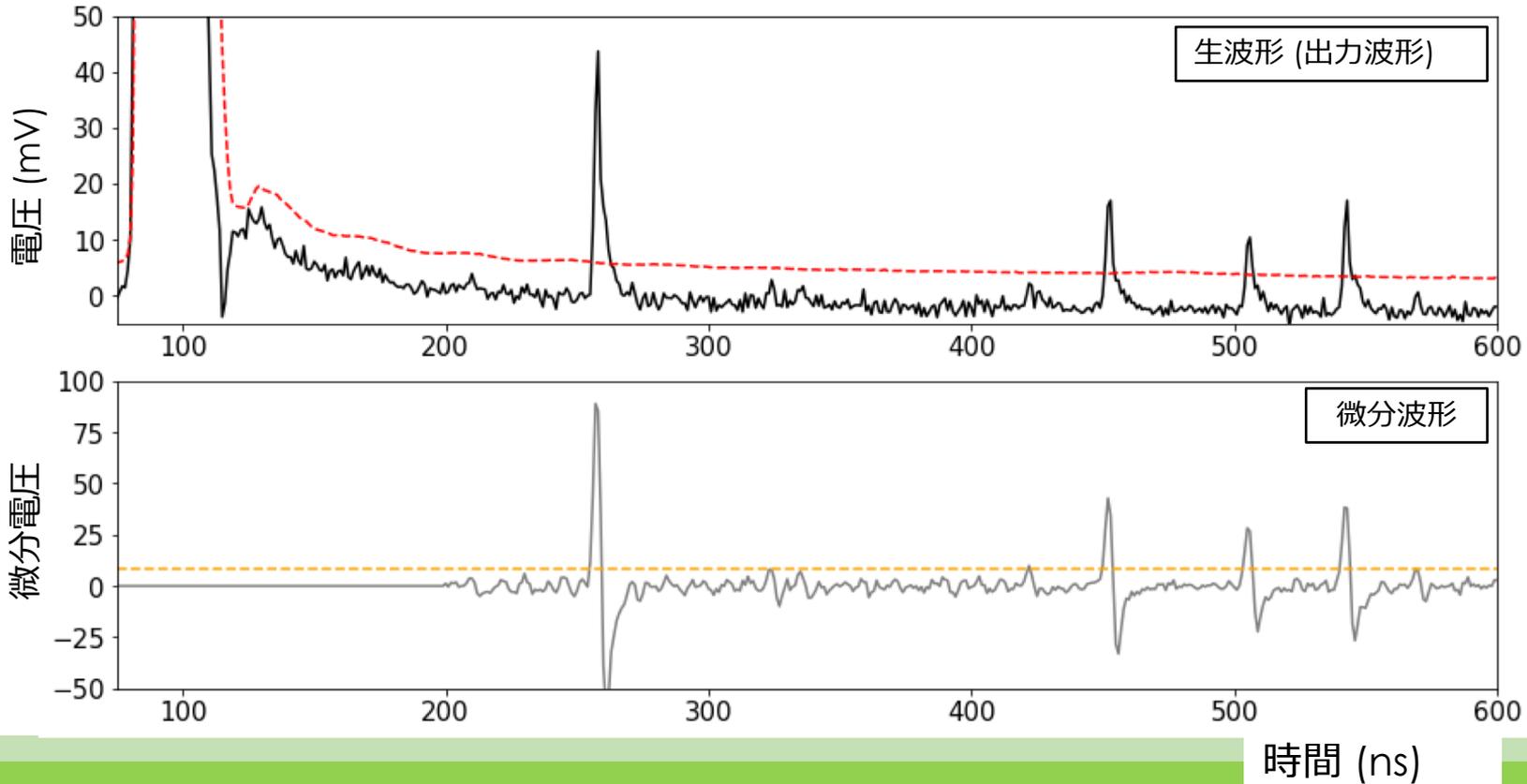
# アフターパルス測定方法

- PMTの増倍率が40,000になる印加電圧で測定を実施
- 50光子相当の光量を照射し、50,000イベント取得
  - 波形取得装置の最大取得範囲が1  $\mu\text{s}$ であるため、レーザーの発光タイミングとトリガーのタイミングをずらして、メインパルスから4  $\mu\text{s}$ までの波形を取得



# アフターパルスの識別手法

- 平均波形と各イベント毎に微分波形を求める
- 以下の条件を満たした波形をアフターパルスと識別する
  - ✓ 微分波形が閾値を超えた場合
  - ✓ 生波形が閾値(平均波形との偏差)を超えた場合



# 結果 1: アフターパルスの測定結果

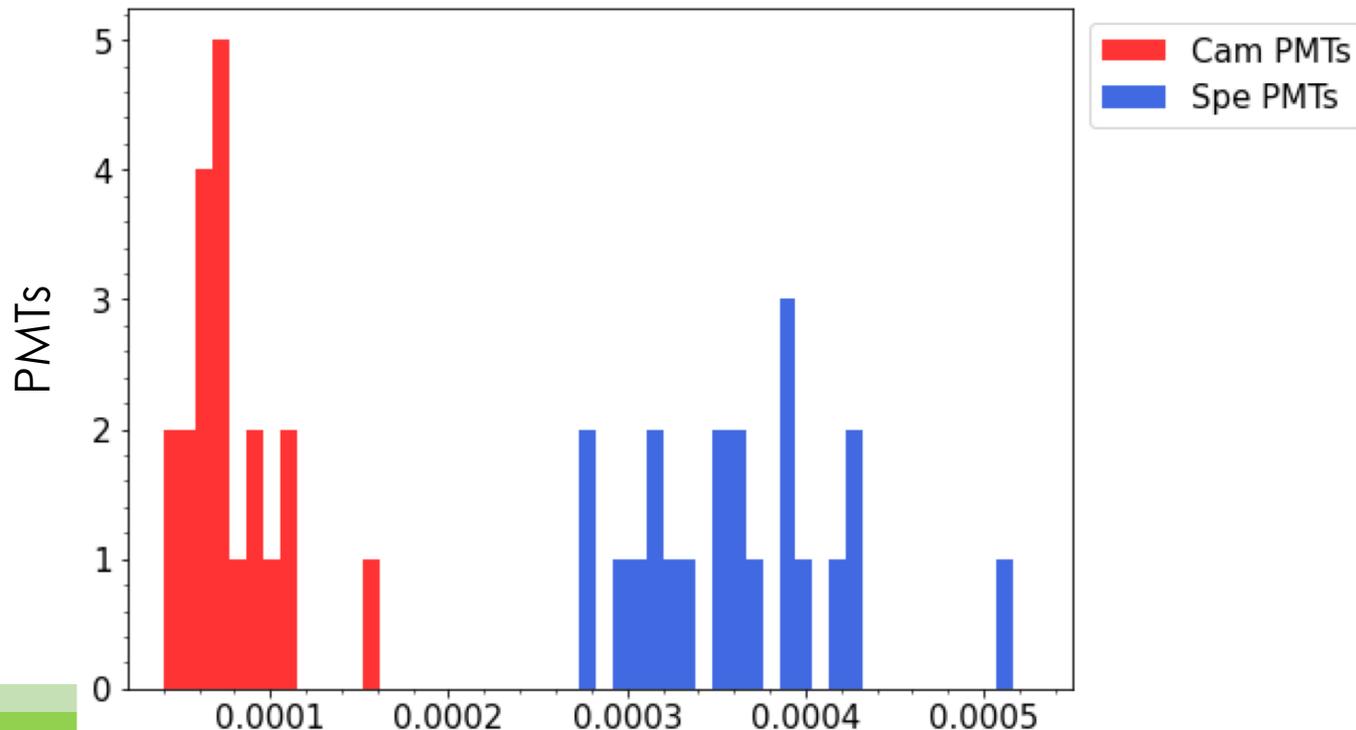
アフターパルス発生確率の平均値

実機PMT(測定本数 20本)  $(7.9 \pm 2.6) \times 10^{-3} \%$ /光電子数

予備PMT(測定本数 21本)  $(3.6 \pm 0.6) \times 10^{-2} \%$ /光電子数

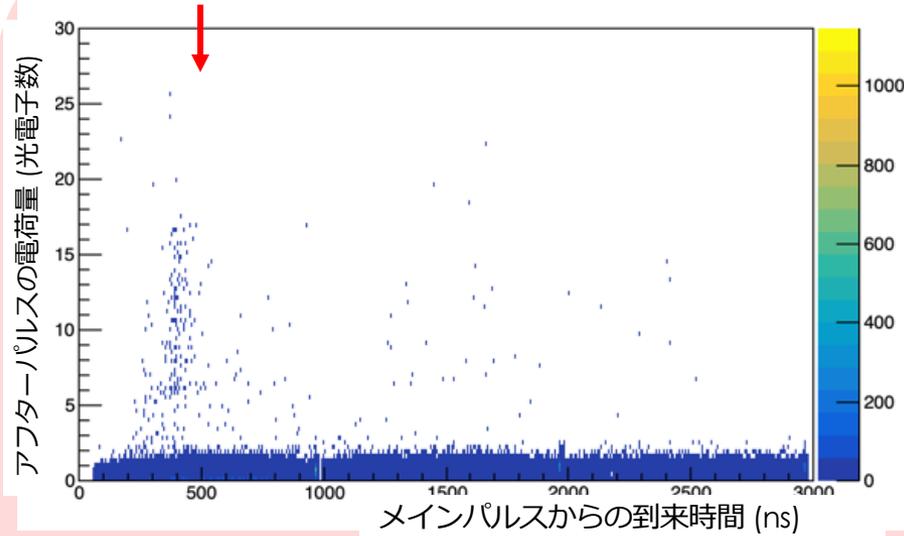
**実機PMTの方がアフターパルスの発生確率が低い**

測定したPMTのアフターパルス分布

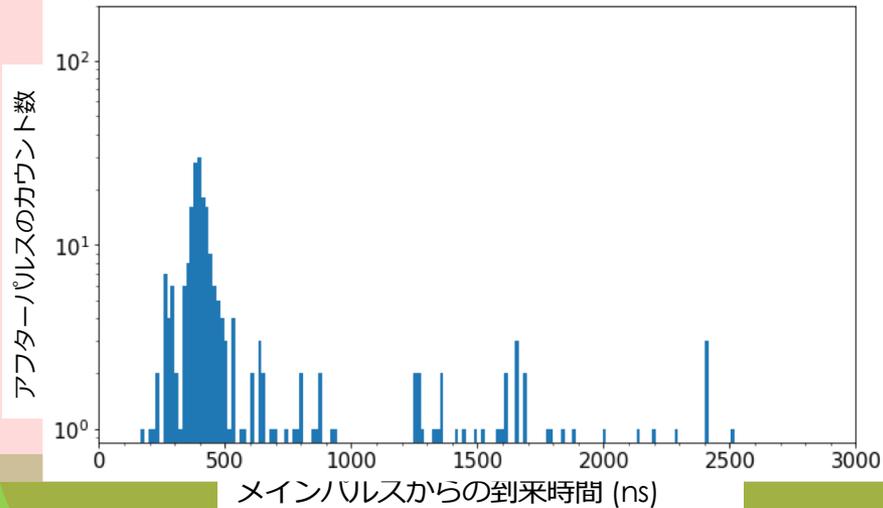


# 結果 1: アフターパルスの測定結果

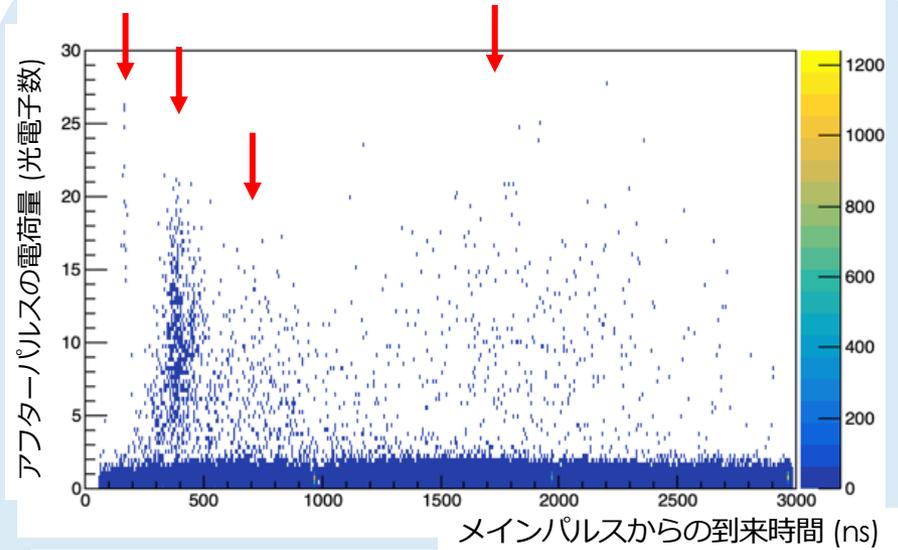
実機PMT ZQ3798



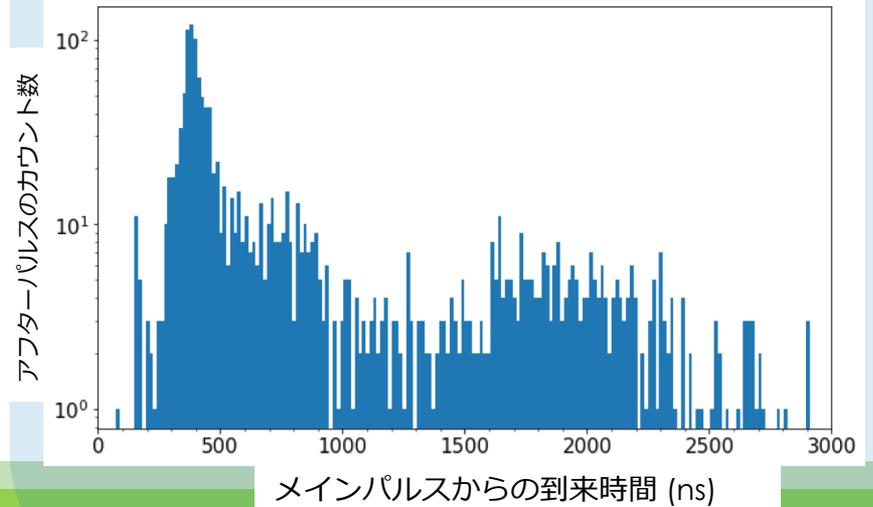
電荷量が4光電子数以上のアフターパルス



予備PMT ZQ4065



電荷量が4光電子数以上のアフターパルス

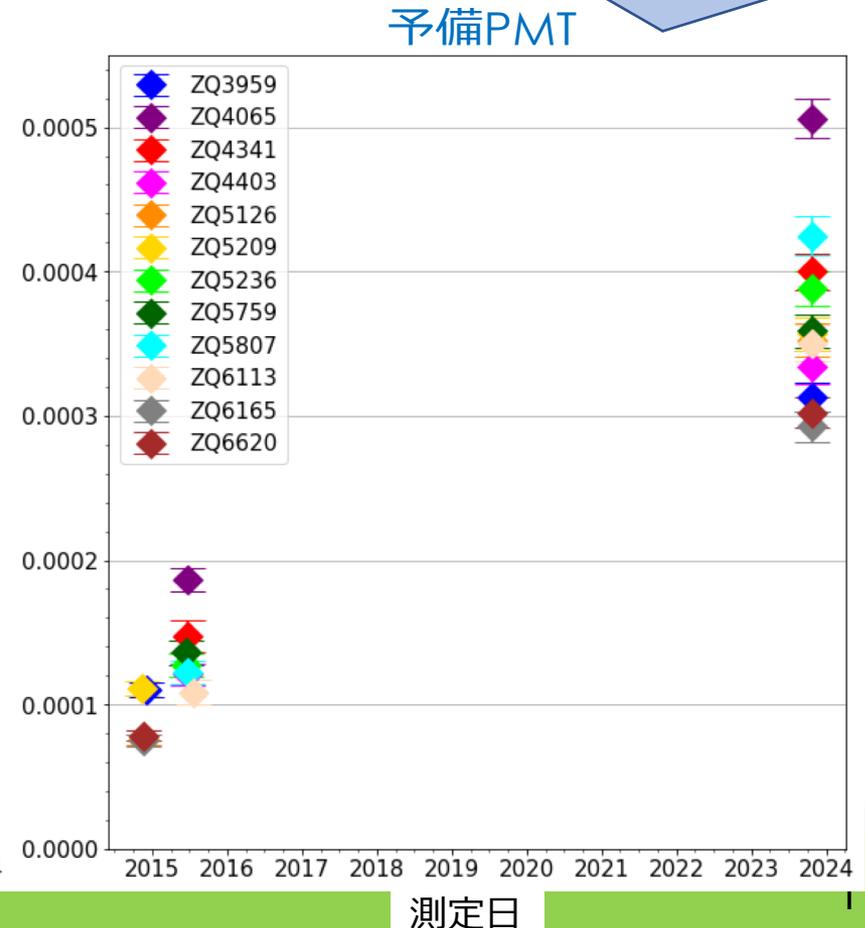
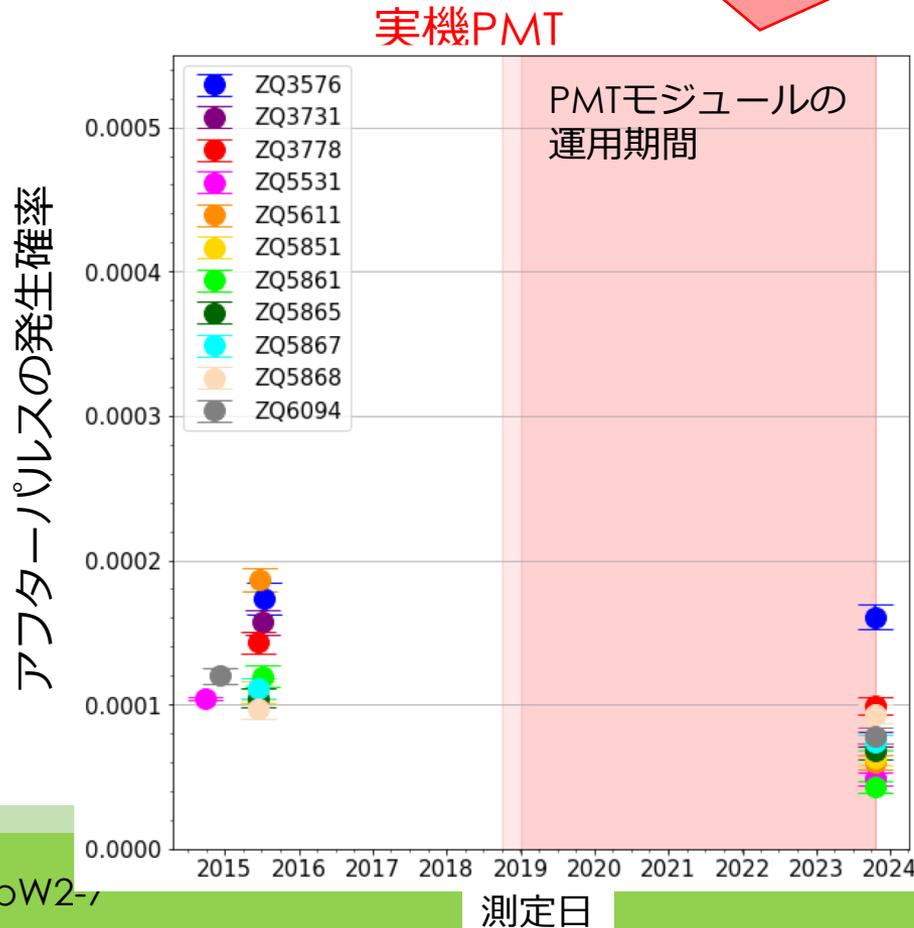


# 結果2: 過去の測定結果との比較

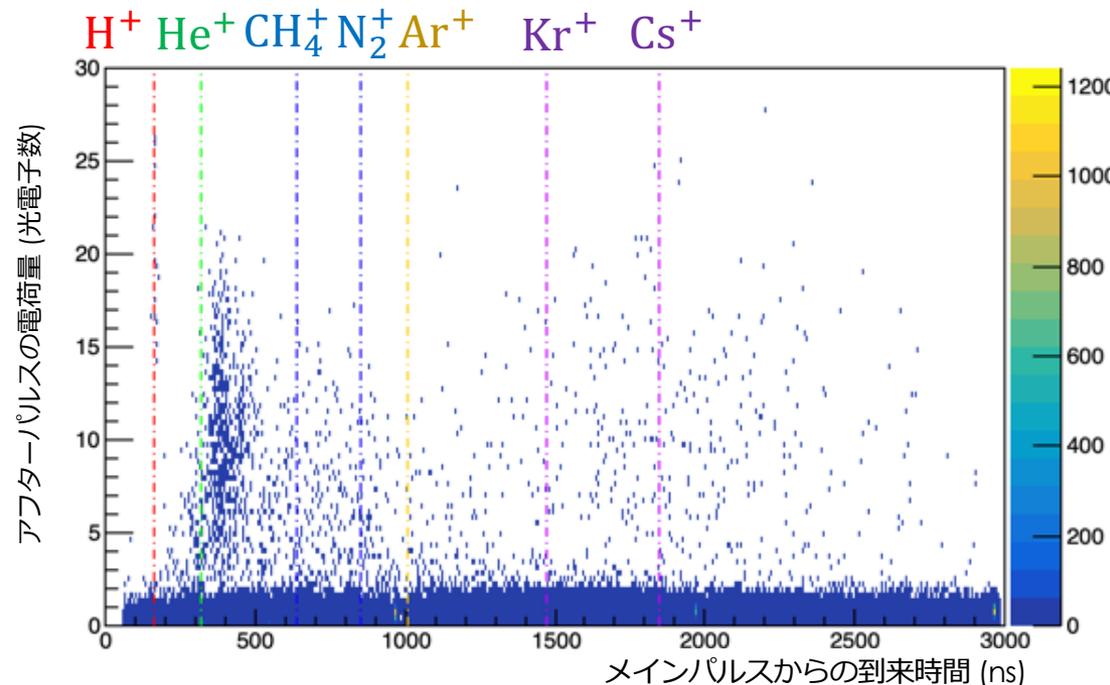
- 2015年に実施されたPMT評価試験の測定結果を再解析して、今回の測定結果と比較し、発生確率の遷移を求めた
- **実機PMTの増加率**  $(-6.0 \pm 3.9) \times 10^{-4} \text{ %/year}$
- **予備PMTの増加率**  $(2.9 \pm 0.4) \times 10^{-3} \text{ %/year}$

わずかに減少？

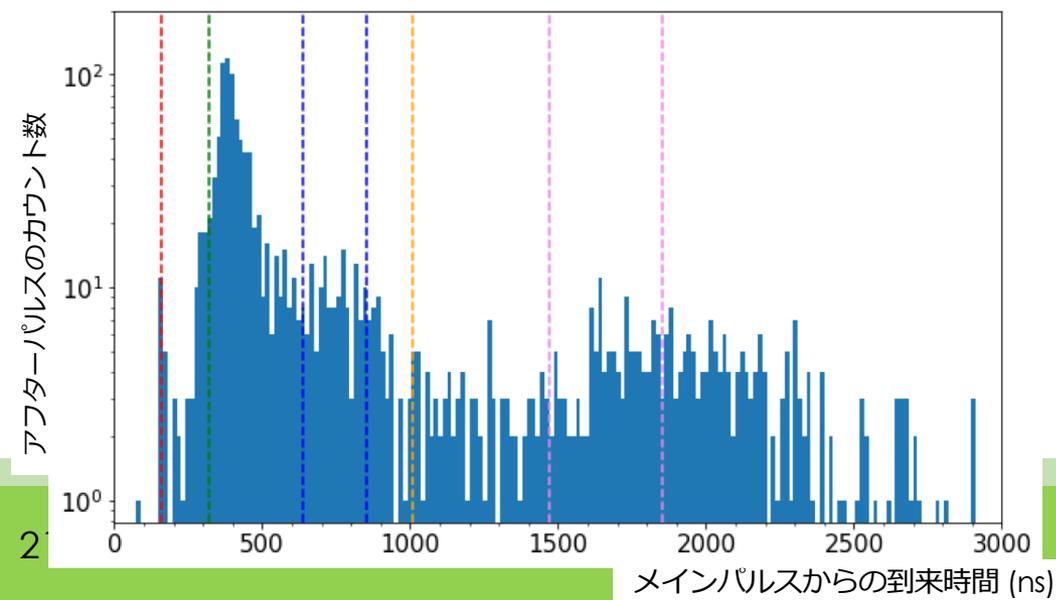
先行研究と同様の増加傾向



# 結果3: アフターパルスの時間分布

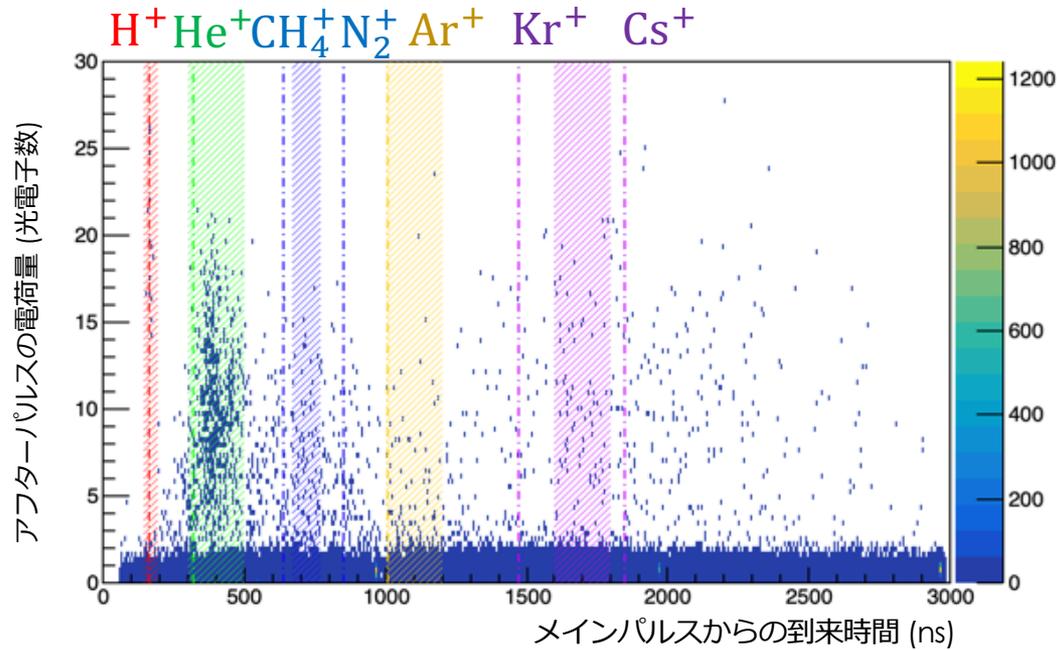


- ピークの到来時刻から、アフターパルスを引き起こすイオン種を推定する
- 一番到来時刻の早いピーク (160 ns)を $H^+$ によるアフターパルスとしてイオン毎のピークを算出

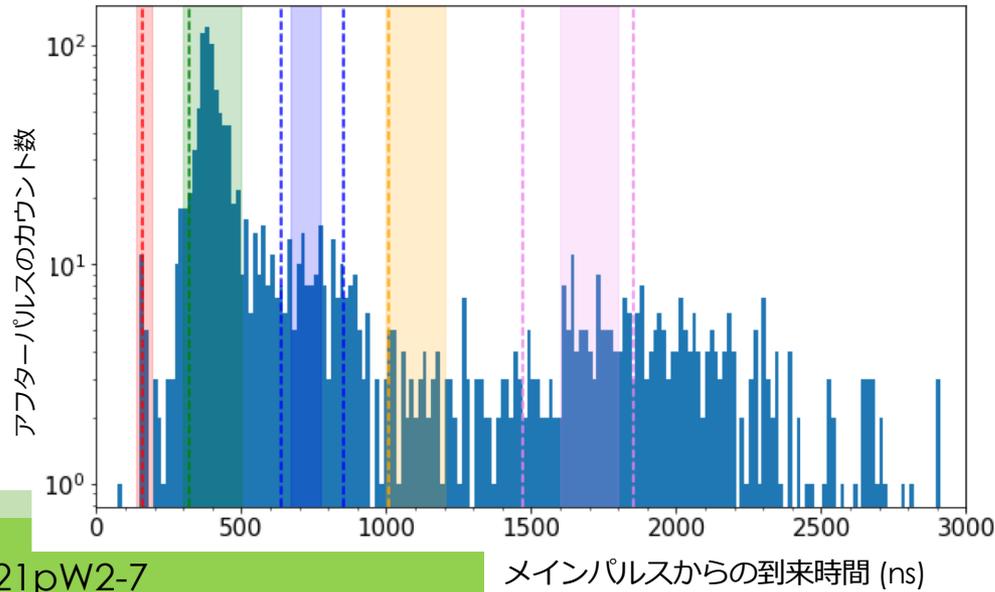


ピークの到来時刻	推定されるイオン(分子量)
160 ns	$H^+$ (1)
320 ns	$He^+$ (4)
640 ns	$CH_4^+$ (16)
850 ns	$N_2^+$ (28)
1010 ns	$Ar^+$ (40)
1470 ns	$Kr^+$ (83)
1850 ns	$Cs^+$ (133)

# 結果3: アフターパルスの時間分布



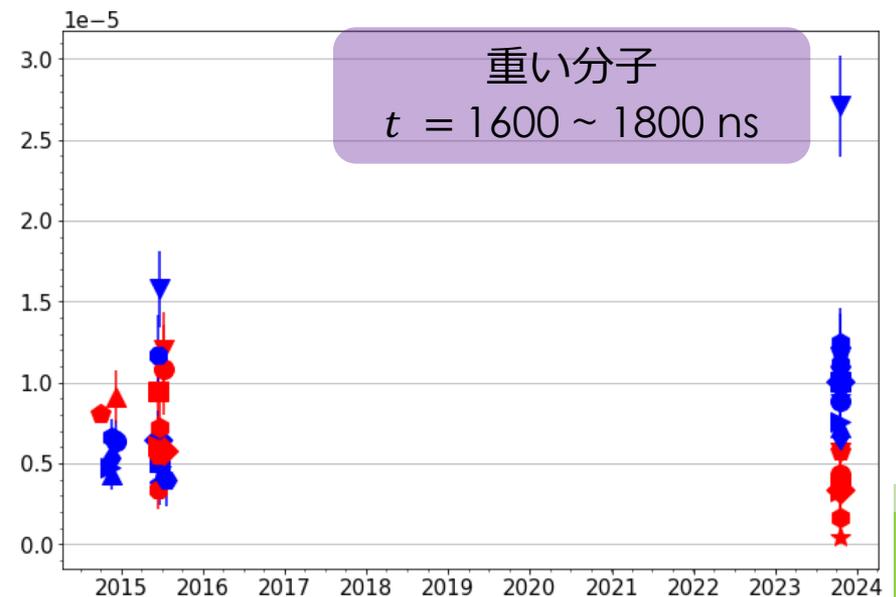
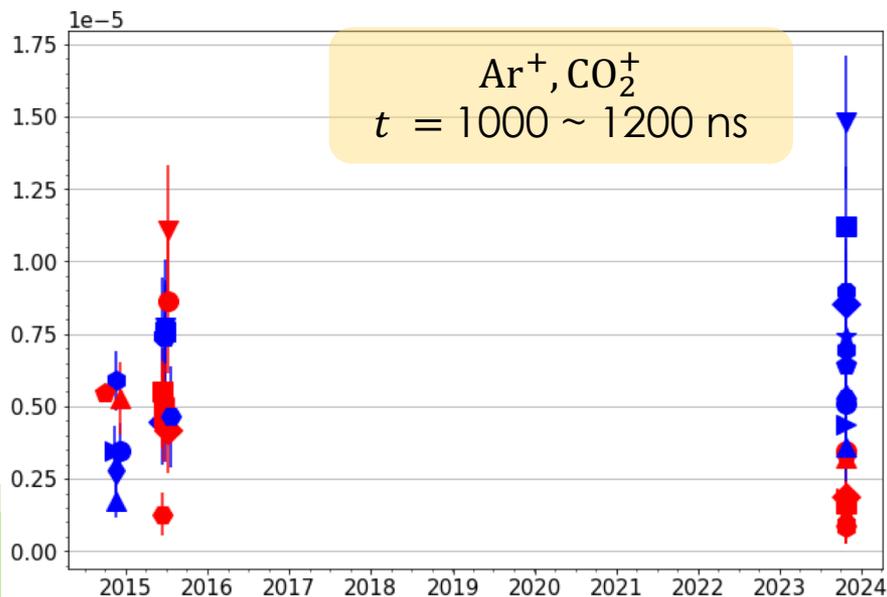
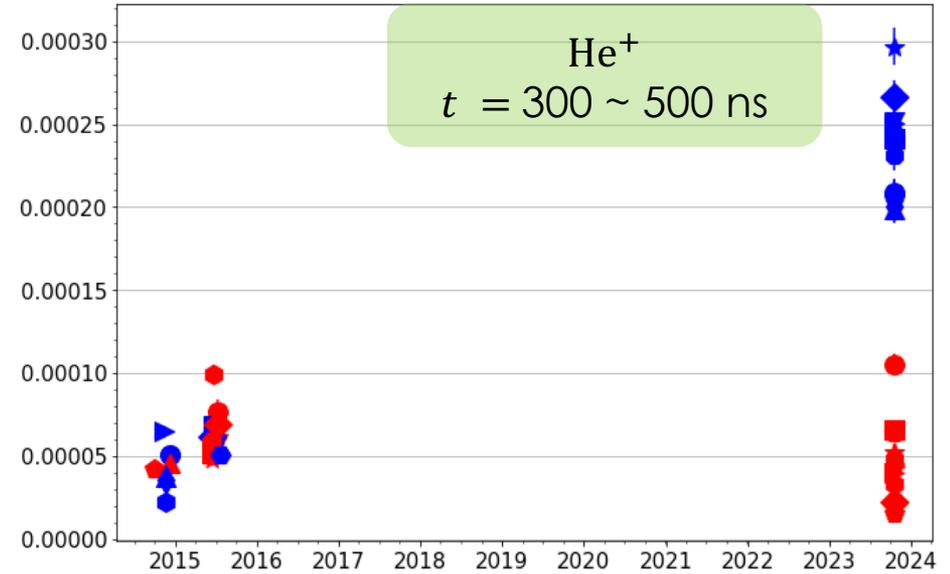
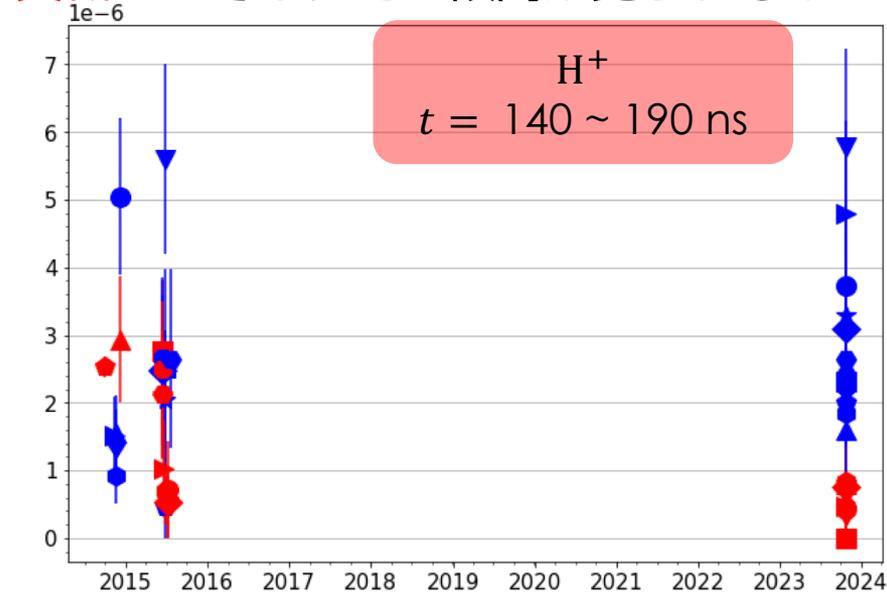
推定したピーク位置周辺での  
アフターパルスの発生確率  
を求める



計算範囲	推定したイオン
140 ~ 190 ns	H <sup>+</sup>
300 ~ 500 ns	He <sup>+</sup>
670 ~ 770 ns	CH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , N <sub>2</sub> <sup>+</sup>
1000 ~ 1200 ns	Ar <sup>+</sup> , CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>
1600 ~ 1800 ns	Cs <sup>+</sup> などの 重い分子

# 結果3: アフターパルスの時間分布

- 予備PMTでは、ヘリウム由来のアフターパルスの増加が顕著だが、  
実機PMTでは、その傾向が見られなかった



# 結論

- LST初号機に搭載されたPMTモジュールと予備のPMTモジュールのアフターパルスと同時に測定することで、アフターパルスの経年変化とアフターパルスに対するNSBの影響について調べた
- 実機に搭載されたPMTモジュールは、実機搭載されていないPMTモジュールと比較して、アフターパルス発生確率の増加が抑制されている
- 特に、ヘリウム由来のアフターパルス成分の増加が抑えられている事が分かった

# 今後の展望

- PMTに連続光を照射する実験を再度行い、NSBがヘリウム由来のアフターパルスの減少に有効なのか検証を行う