

CTA 報告 134 : CTA 大口径望遠鏡搭載 光電子増倍管の経年変化の研究

櫻井駿介

櫻井 駿介 A, 永吉 勤 B, 稲田 知大 A, 猪目 祐介 C, 岩村 由樹 A, 大岡 秀行 A, 奥村 暁 D, 岡崎 奈緒 A, 折戸 玲子 E, 片岡 淳 F, 片桐 秀明 G, 木村 颯一郎 H, 櫛田 淳子 H, 窪 秀利 I, 郡司 修一 J, 小山 志勇 K, 今野 裕介 I, 齋藤 隆之 A, 澤田 真理 L, 砂田 裕志 B, 高橋 光成 A, 辻本 晋平 H, 手嶋 政廣 A,M, 寺田 幸功 B, 門叶 冬樹 J, 中嶋 大輔 A, 中 森 健之 J, 西嶋 恭司 H, 西山 楽 B, 野崎 誠也 I, 林田 将明 N, 馬場 彩 O, 平子 丈 I, 深 見 哲志 A, 増田 周 I, 山本 常夏 C, 吉田 龍生 G, Daniela Hadasch A, Daniel Mazin A,M, 他 CTA-Japan consortium

東大宇宙線研 A, 埼玉大理工 B, 甲南大理工 C, 名大 ISEE D, 徳島大理工 E, 早稲田大理工 F, 茨城 大理 G, 東海大理 H, 京大理 I, 山形大理 J, 宇宙研 K, 青山大理工 L, Max Planck Institut fur Physik M, 千葉大理 N, 東大理 O

CTA-大口徑望遠鏡 (Large Size Telescope, LST)

視野
4.5度

焦点距離
28 m

計**1855**本の
PMTを搭載

焦点面検出器及び主鏡の
開発は日本が主導
(他、ドイツ、スペイン、イタリア)

エネルギー帯域
20 GeVから
数TeVまで

Credit:
Carlos D. Ginzo

主鏡
198枚

口径
23 m

総重量
120 t

PMTモジュール
PMT 7本 (平均量子効率40%以上)
信号読み出し基盤
(1 GHz 高速波形サンプリング)
焦点面カメラに265モジュール搭載
現在初号機建設中

2018年秋ファーストライト

本研究の研究対象
PMTの経年変化

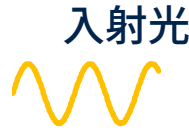
Credit: CTA-Observatory.org

2018年3月22日

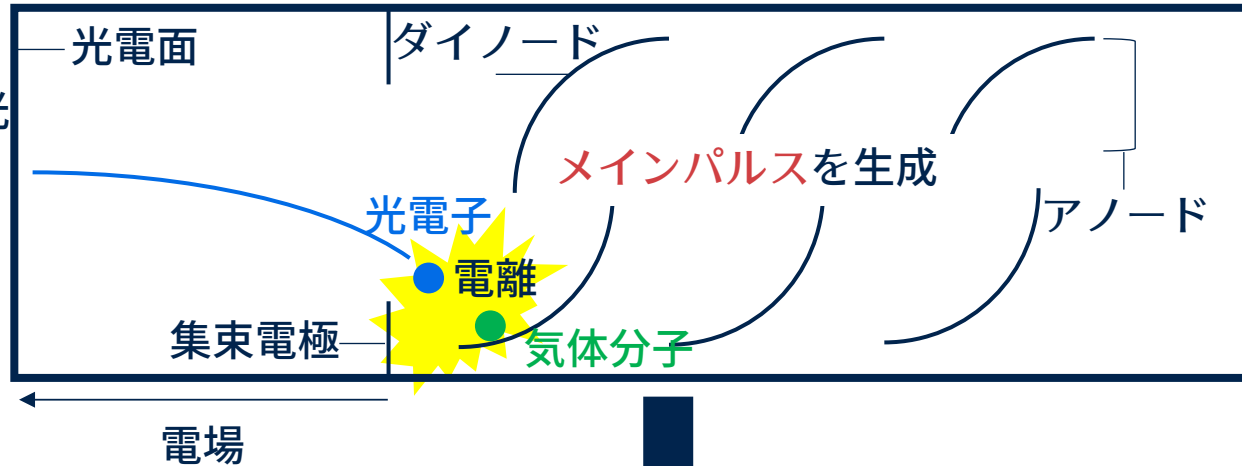
物理学会第73回年次大会@東京理科大、野田キャンパス

アフターパルスの原理

- 光電面から光電子が放出



- ダイノードに到達した電子は増幅時に気体分子を電離しイオンを生成



- イオンは電場により光電面へと加速（イオンフィードバック）し、光電子を放出

- この光電子による信号 → アフターパルス



アフターパルスの到来時間はイオンの質量と電荷に依存

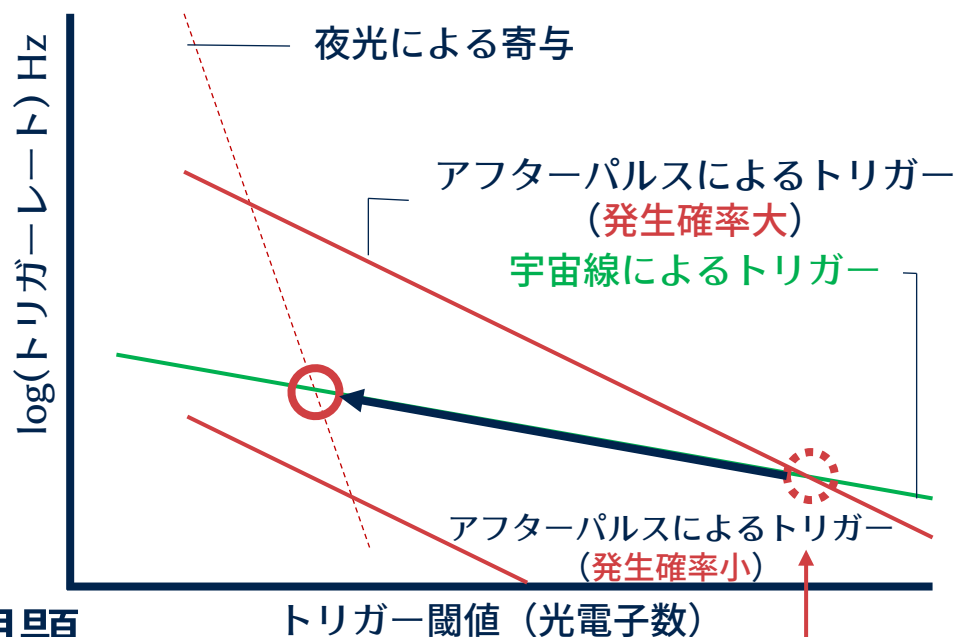
$$t = \sqrt{\frac{m}{2q}} \int (V(l_0) - V(l))^{-1/2} dl$$

アフターパルス発生確率 $P_{\text{after}} =$

$$\frac{\text{発生したアフターパルス数}}{\text{メインパルスの初期光電子数}}$$

アフターパルスが及ぼす影響

- 望遠鏡のトリガーレートは宇宙線の寄与と偶発的ノイズの寄与が等しくなる点で決定 (図中 \odot)

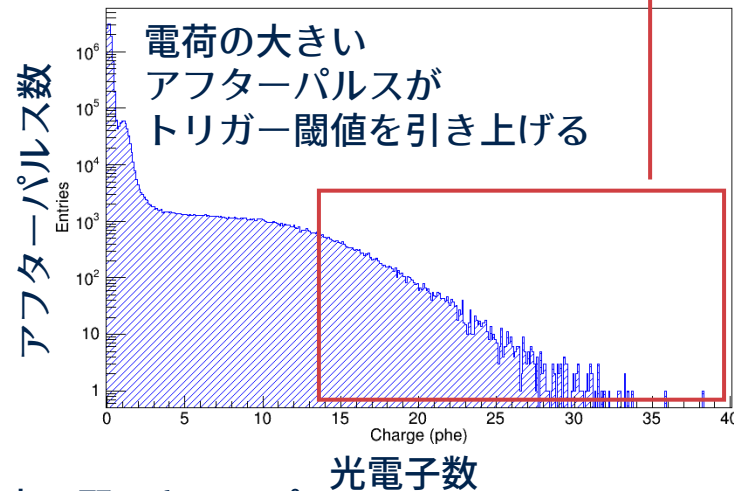


トリガー閾値が大きい場合の問題

- 複数のPMTの信号またはその和が閾値を超えた場合にトリガーを生成
 - 低エネルギーのガンマ線観測に有効
 - アフターパルス発生確率が大い
 - 観測エネルギー下限値増加

LSTの最大性能を引き出すために
アフターパルスの抑制が重要

LSTのPMTには P_{after} が 2.0×10^{-4} 以下 (4phe以上)
という厳しい要請 通常の~1/100倍



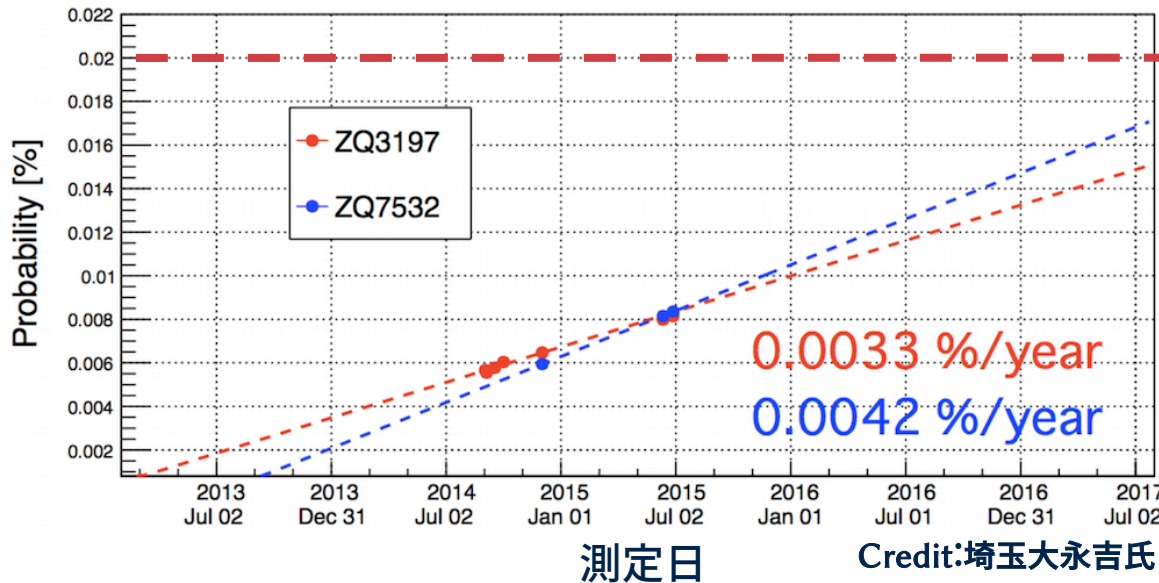
測定の動機

2017年LST初号機のPMTモジュール評価試験の結果と
2015年PMT評価試験の結果が矛盾

他のグループの測定結果も結果（2015年）と矛盾

過去の結果を再解析した所
増加傾向が確認された

初号機用PMTのアフターパルス発生確率の推移



LST要求値

2017年7年の測定

0.0013%(He⁺)-予想通りの結果

2018年6月には

0.0018%に到達

この時点でアフターパルス増加の
確認例はこの2本のみ

- ・ アフターパルス発生確率の増加は望遠鏡の性能（トリガー、エネルギー）を悪化
- ・ ヘリウム透過によるアフターパルスの増加の先行研究（INCANDELA 1987）
- ・ LST初号機と二号機以降でPMTの設計変更有

測定の目的

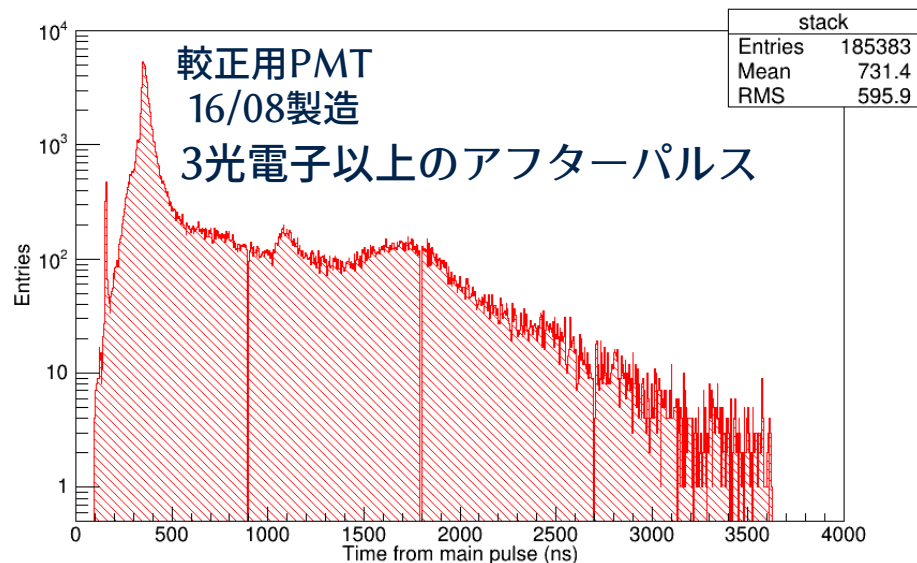
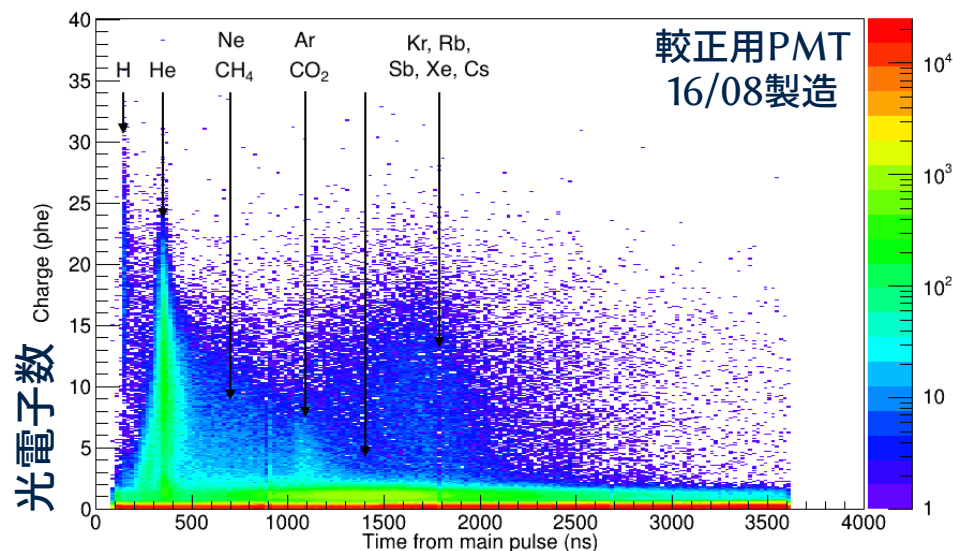
アフターパルスの増加、PMTの設計変更を受けて、
本研究では、

- ・ 複数のPMTを測定、一般的なアフターパルス増加性質を確認
- ・ アフターパルス発生確率の変化の時間依存性の有無
が測定の目的

以上から大口径望遠鏡に対する対策を示唆
さらにアフターパルスの性質についても議論

このために製造時期が異なるPMTを計7本測定した。

結果：アフターパルスの到来時間分布



到来時間 (ns)

アフターパルスの到着時間の式

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

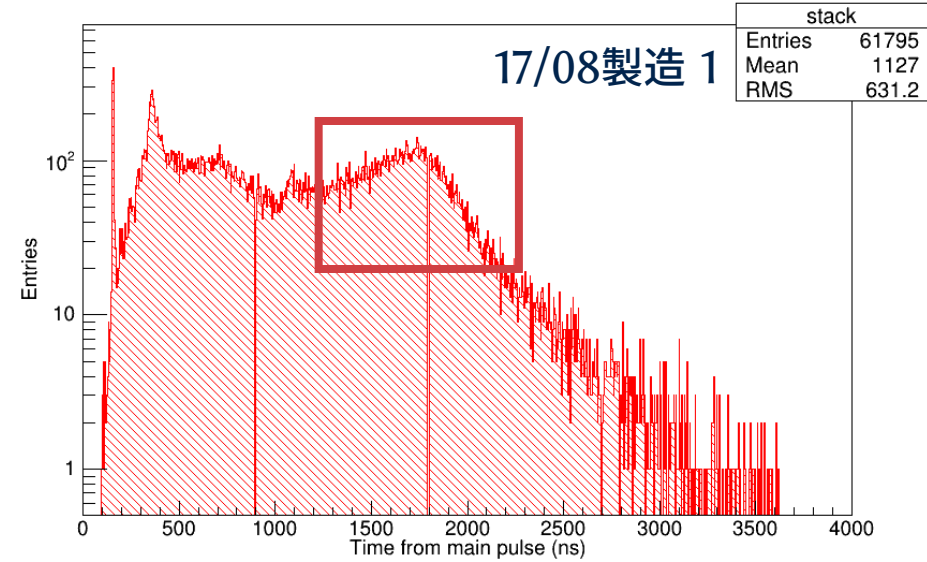
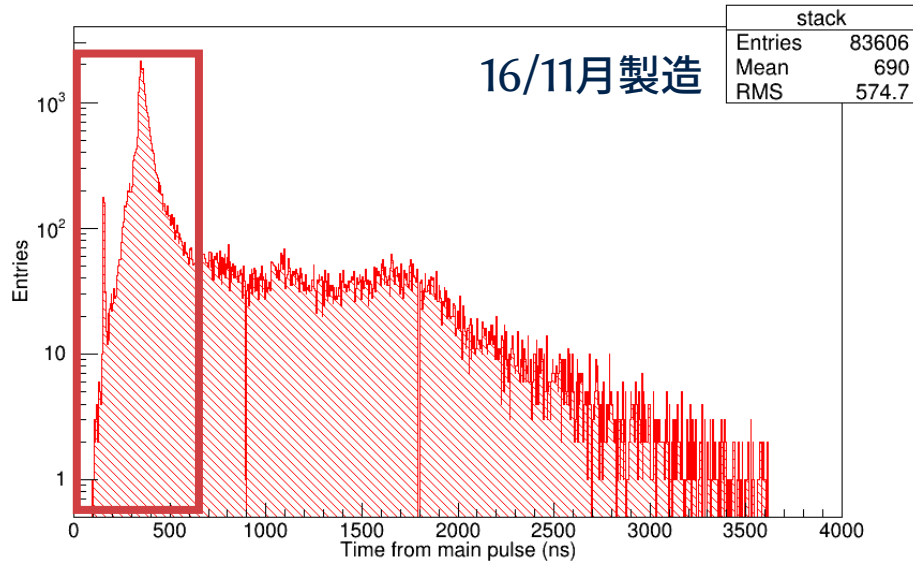
$^1\text{H}^+ \sim 160 \text{ ns}$	$^{84}\text{Kr}^+ \sim 1470 \text{ ns}$
$^4\text{He}^+ \sim 320 \text{ ns}$	$^{85}\text{Rb}^+ \sim 1480 \text{ ns}$
$^{16}\text{CH}_4^+ \sim 640 \text{ ns}$	$^{121}\text{Sb}^+ \sim 1760 \text{ ns}$
$^{20}\text{Ne}^+ \sim 720 \text{ ns}$	$^{132}\text{Xe}^+ \sim 1840 \text{ ns}$
$^{40}\text{Ar}^+ \sim 1010 \text{ ns}$	$^{133}\text{Cs}^+ \sim 1850 \text{ ns}$
$^{44}\text{CO}_2^+ \sim 1060 \text{ ns}$	

各ピークの起源と推測されるイオン

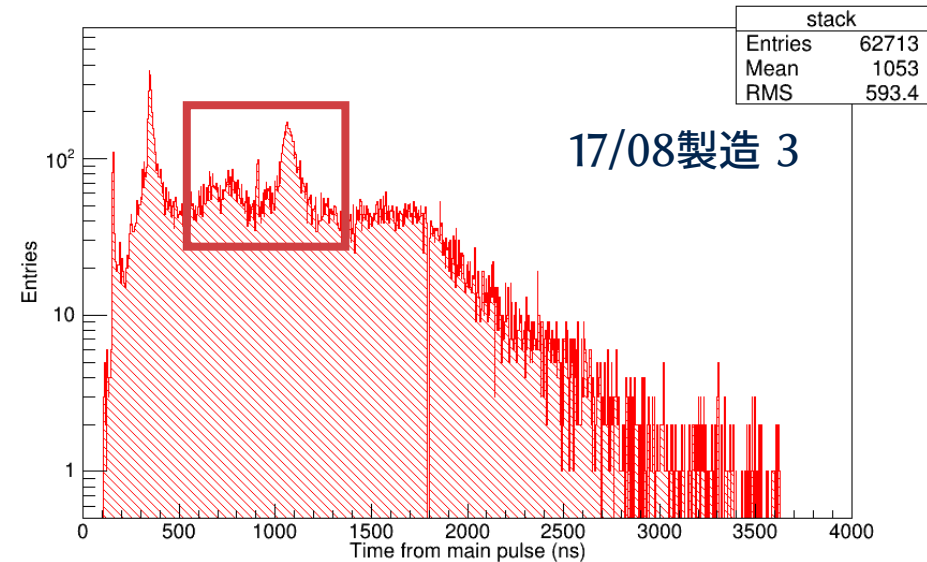
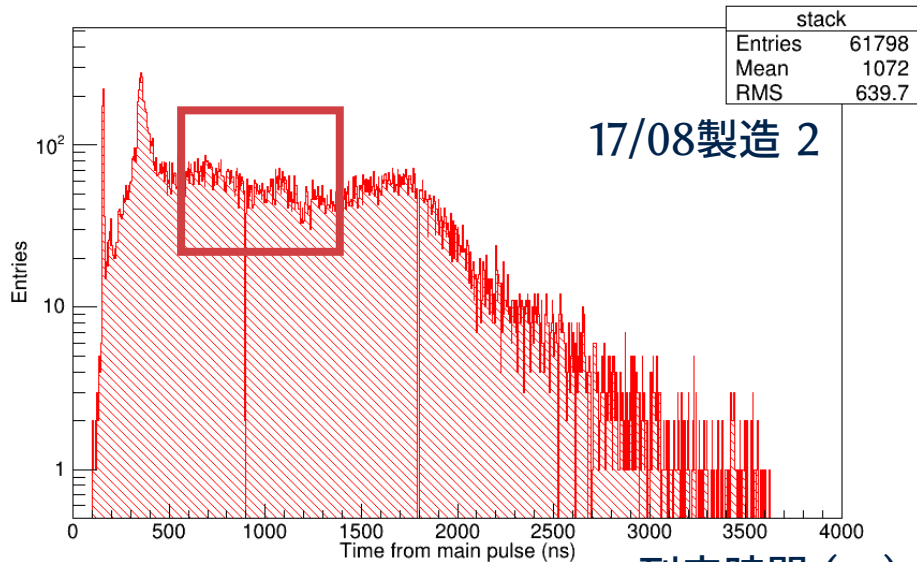
ガス分子ごとにアフターパルスの光電子数に差があることが確認できる

ガス分子ごとにアフターパルスの到来時間に差があることが確認できる

結果：アフターパルスの到来時間分布の比較

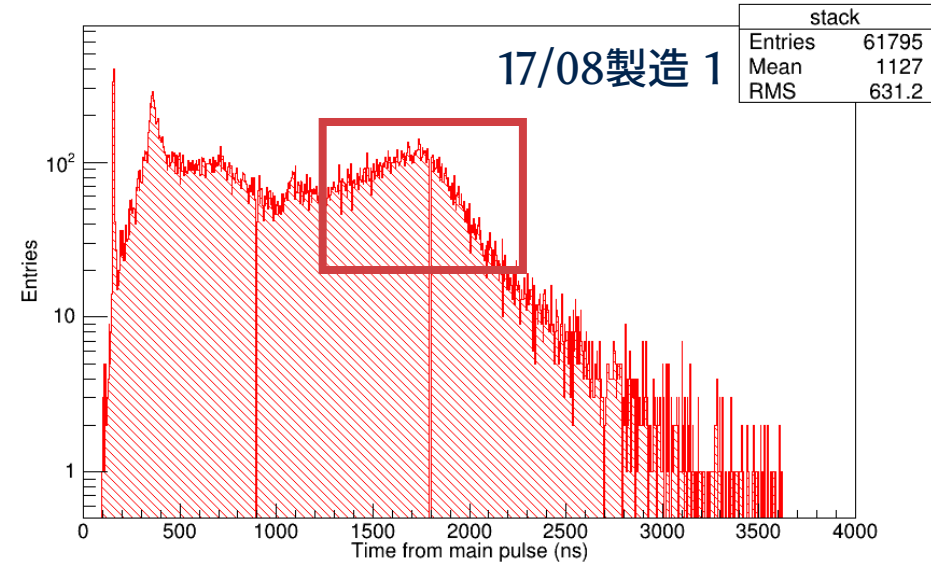
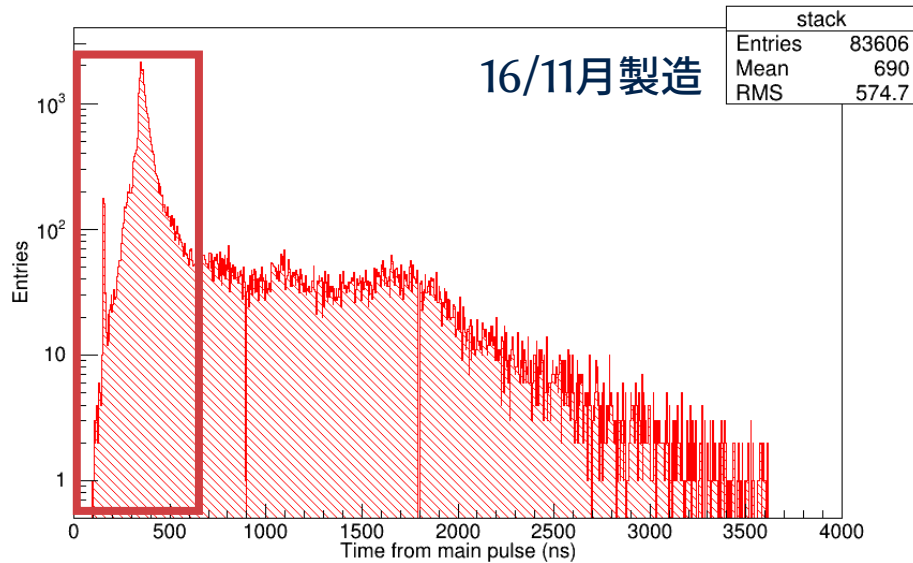


アフターパルスの原因分子の量にはPMTごとに個体差が存在



到来時間 (ns)

結果：アフターパルスの到来時間分布の比較



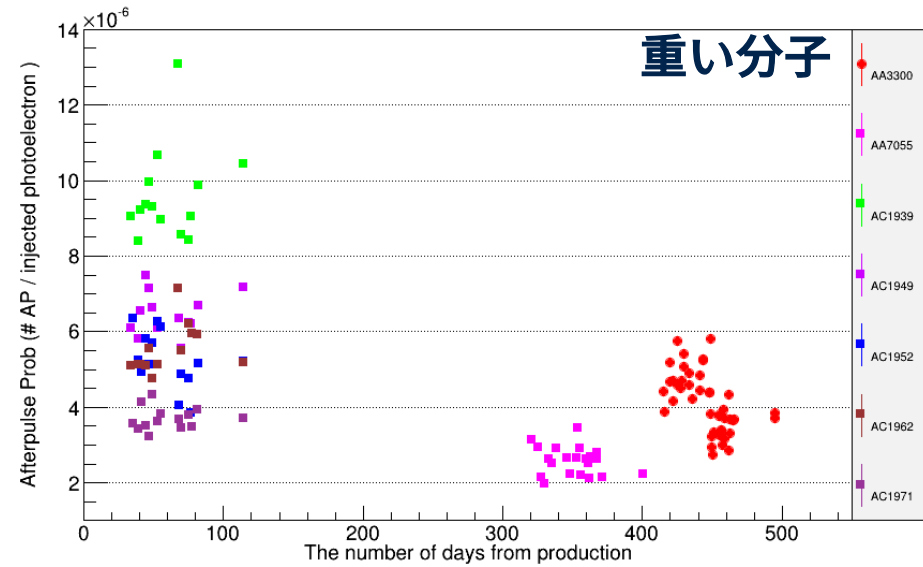
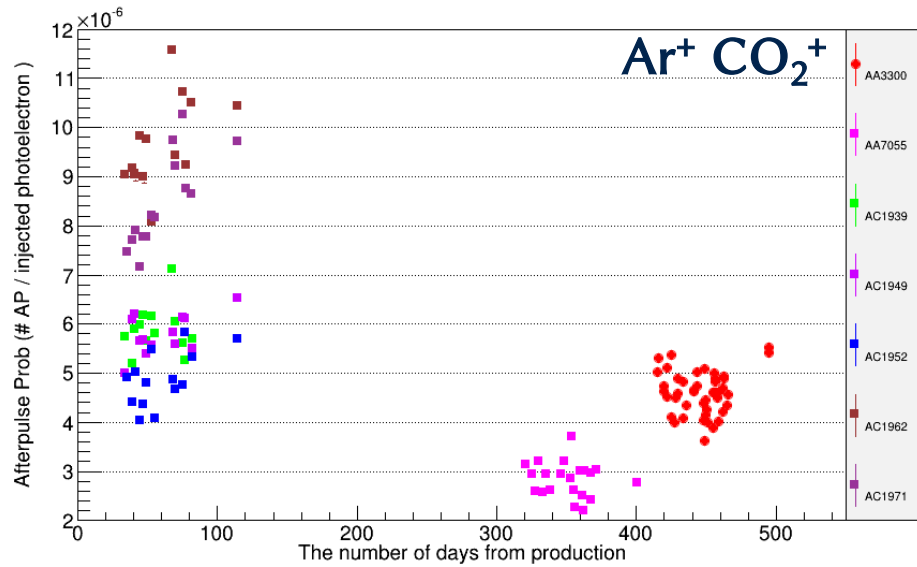
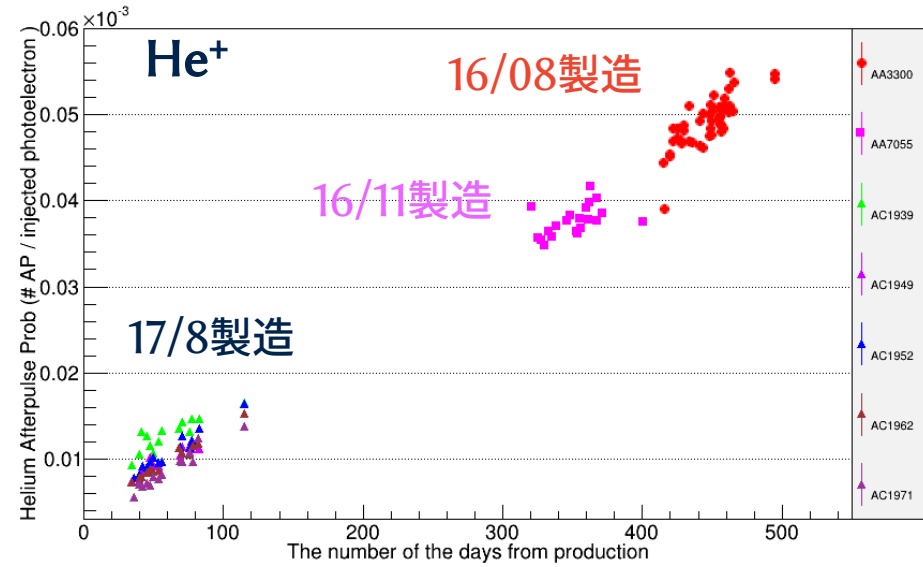
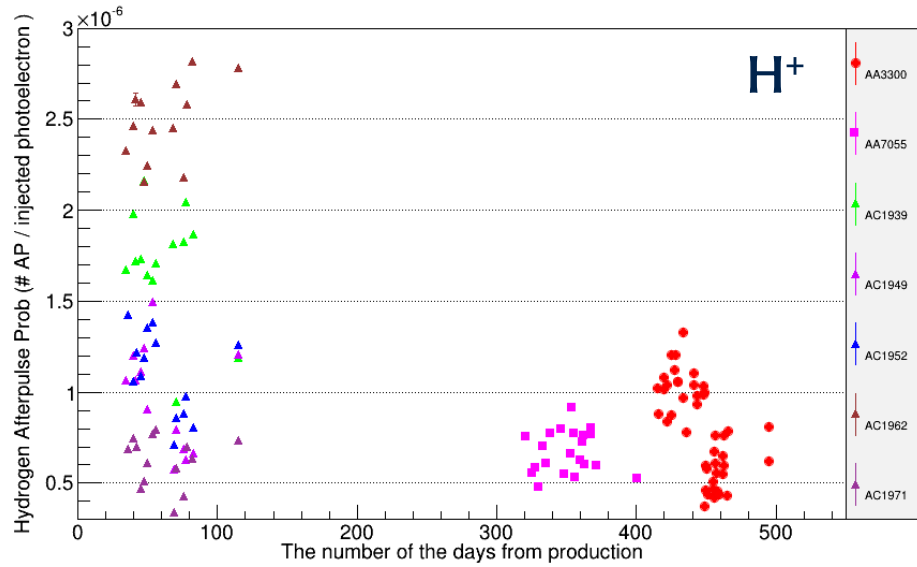
アフターパルスの原因分子の量にはPMTごとに個体差が存在

結果からわかったこと

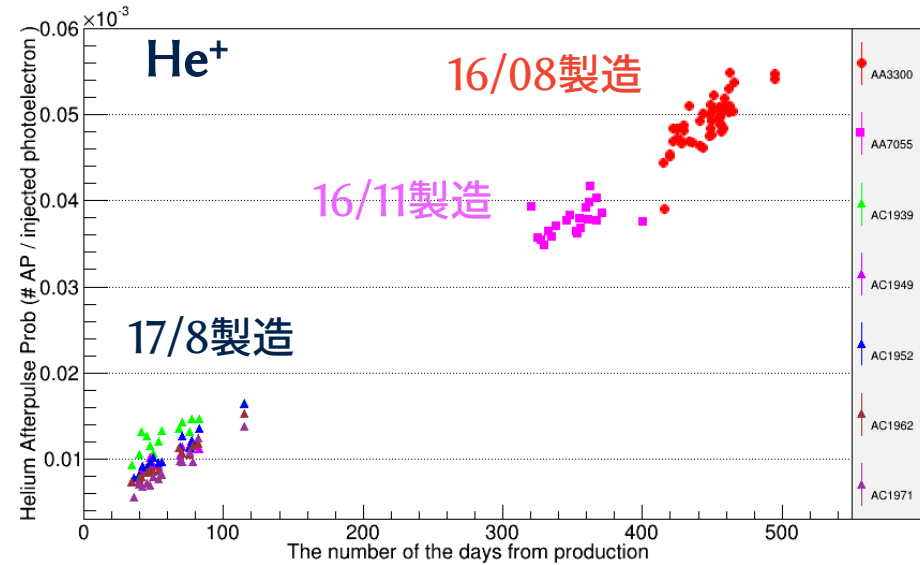
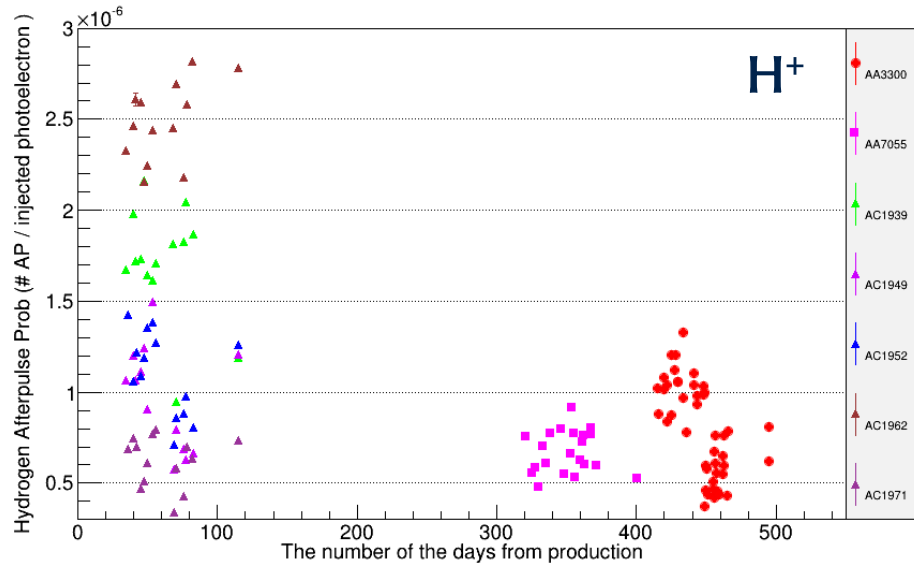
アフターパルスの到来時刻には分子依存性があった。
その量はPMTによって個体差が大きい。

目立ったピークに対して、それぞれアフターパルス発生確率を計算した。

結果：アフターパルス発生確率の推移（製造日）



結果：アフターパルス発生確率の推移（製造日）



結果からわかったこと

ヘリウム由来のアフターパルス発生確率は
製造からの経過日数に従い増加。

他の成分に関してはPMTごとに個体差が確認
経過日数に対して減少？

結論

アフターパルス特性

- LST用PMTにはH⁺、He⁺以外にAr⁺、CO₂⁺やKr⁺、Rb⁺、Sb⁺、Xe⁺、Cs⁺由来と推定される成分が多く存在

アフターパルス発生確率の増加

- ヘリウムのアフターパルスのみが増加していることが明確に確認**
これはLST-PMTのアフターパルス発生確率が非常に低いために確認できる。
- LST初号機用PMTとLST二号機以降用PMTでアフターパルス発生確率の増加は同様
初号機 ($3.3 \times 10^{-5}/\text{year}$, $4.2 \times 10^{-5}/\text{year}$)、二号機 ($3.6 \times 10^{-5}/\text{year}$)
- 製造日によらず**増加率一定**、絶対値にも**大きな個体差は無し**

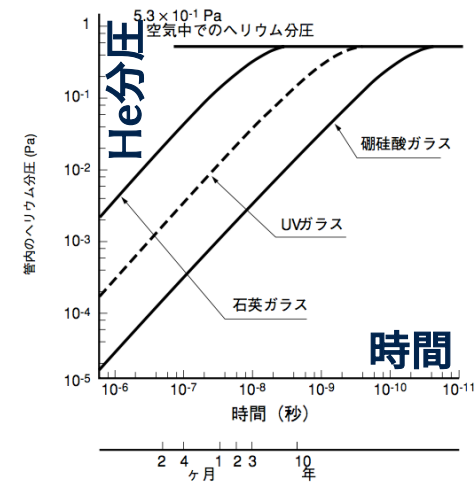
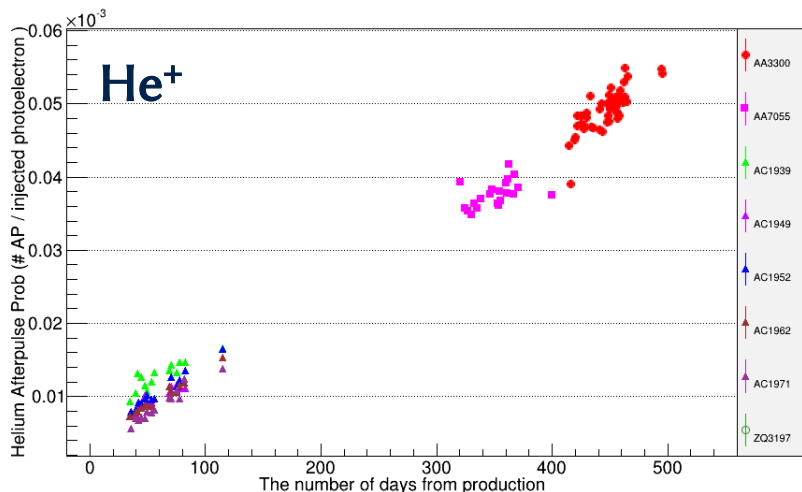


図 13-14 バルブ材質と管内のヘリウム分圧の変化

Credit:光電子増倍管ハンドブック

今後の展望

大口径望遠鏡への影響

- このままアフターパルスが増加すると、望遠鏡搭載時には要求値程度まで増加。低エネルギーガンマ線観測に影響有り

今後の対策

- 人為的にアフターパルス発生確率を減少可能か検討中。
- 減少の傾向は確認できた。現在、より詳細な研究を行っている。