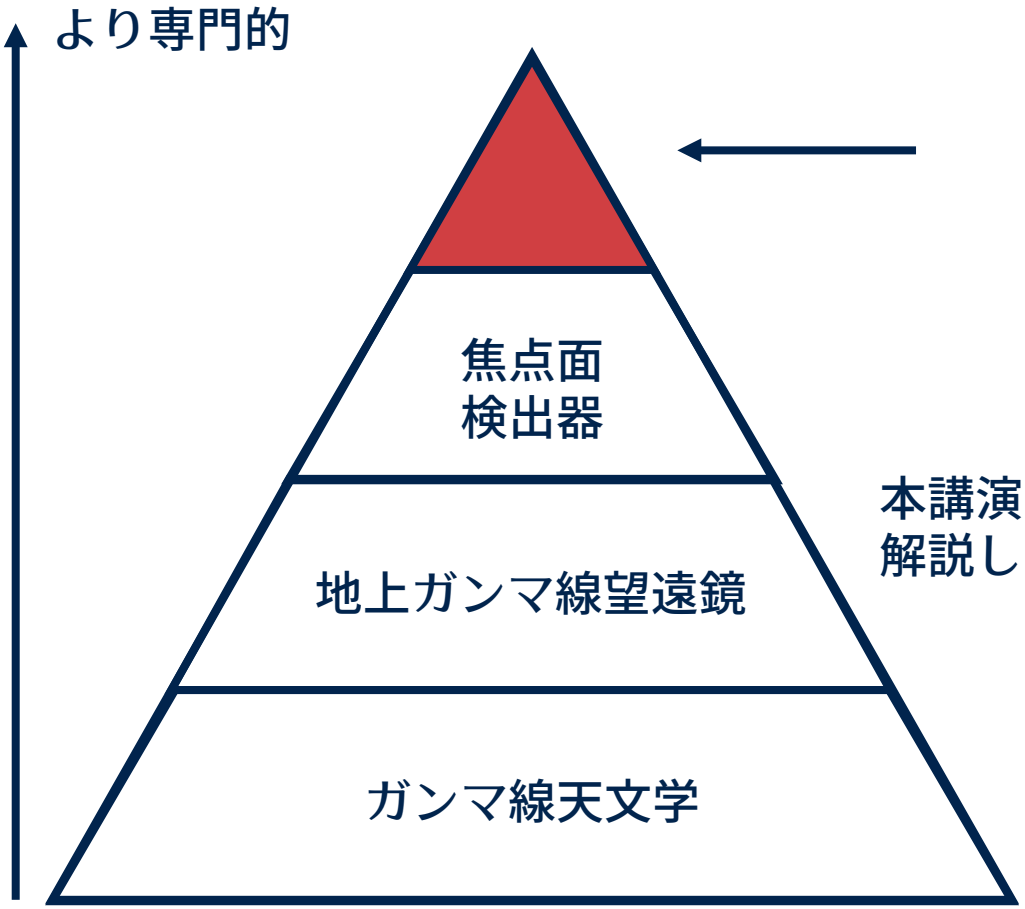
Cherenkov Telescope Array 大口径望遠鏡搭載光電子増倍管の経年変化の研究

東京大学　宇宙線研究所
修士二年　櫻井駿介

2018年2月18日
第24回ICEPPシンポジウム

本発表の流れ



本研究のテーマ
PMTの経年変化

本講演はより一般的な事項から
解説していく

本研究の動機
ガンマ線天文学
CTA計画

ガンマ線天文学のねらい

宇宙には地球上では実現不可能な極限環境が存在

これらの天体は天然の加速器

さらにWIMP探査（矮小楕円銀河）や
ALPs探査（銀河間磁場）も対象

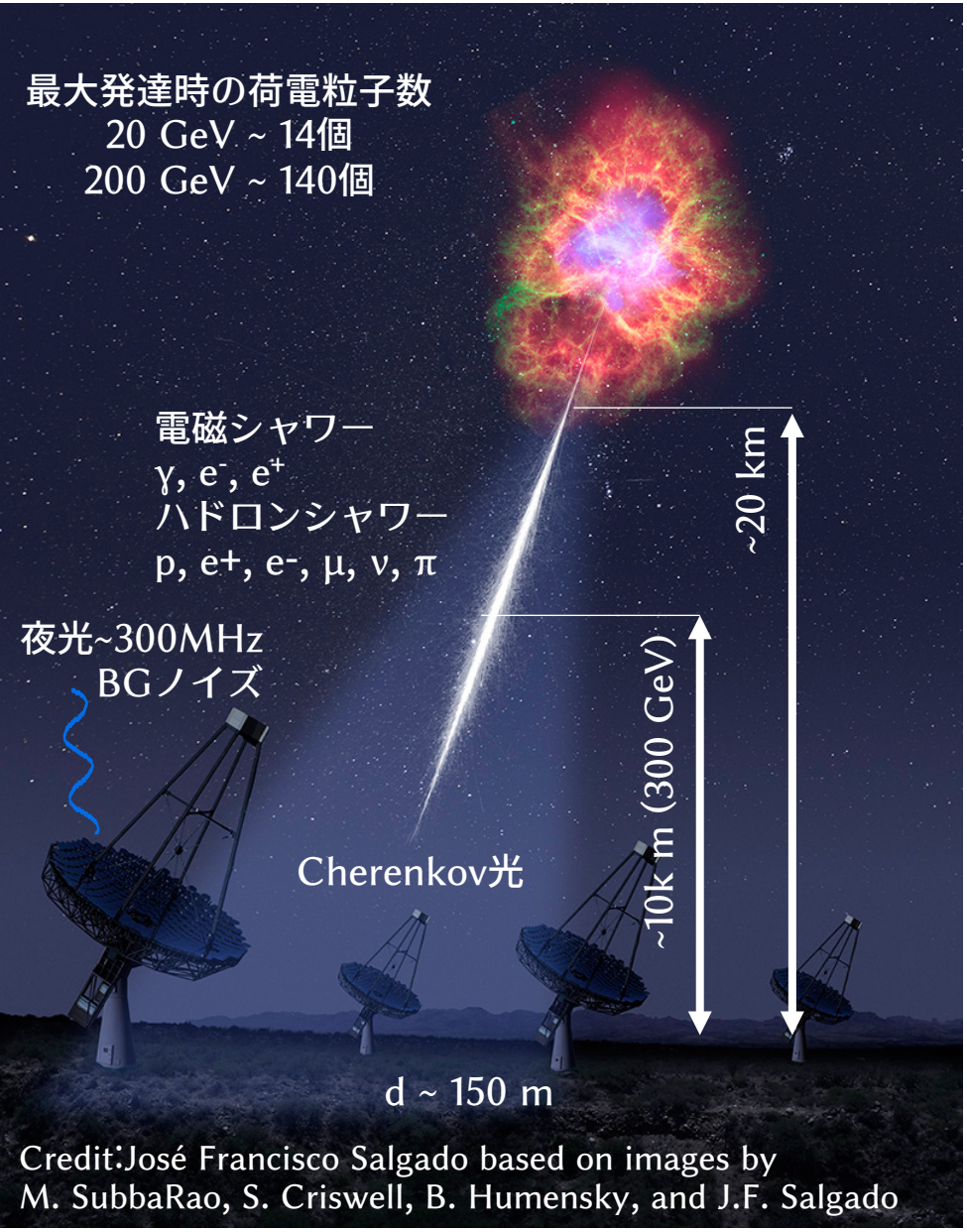
極限宇宙環境の多くには
高エネルギー粒子が存在

このような粒子が
ガンマ線を放射

ガンマ線天文学の目的

宇宙の
高エネルギーな現象を
ガンマ線
を通して解明する

超高エネルギーガンマ線の観測手法

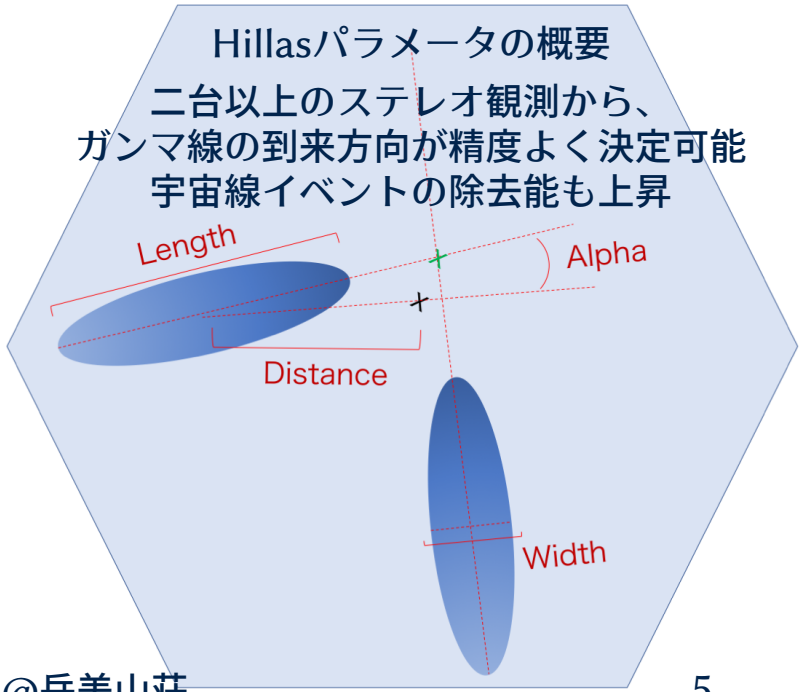


- ガンマ線や宇宙線が大気に入射すると大気シャワーが発生
- 大気シャワー中で光速を超えた荷電粒子がCherenkov光を放射
- Cherenkov光をカメラで観測し、そのイメージからHillasパラメータを計算

ガンマ線のエネルギー、到来方向が決定

解像型大気チェレンコフ望遠鏡

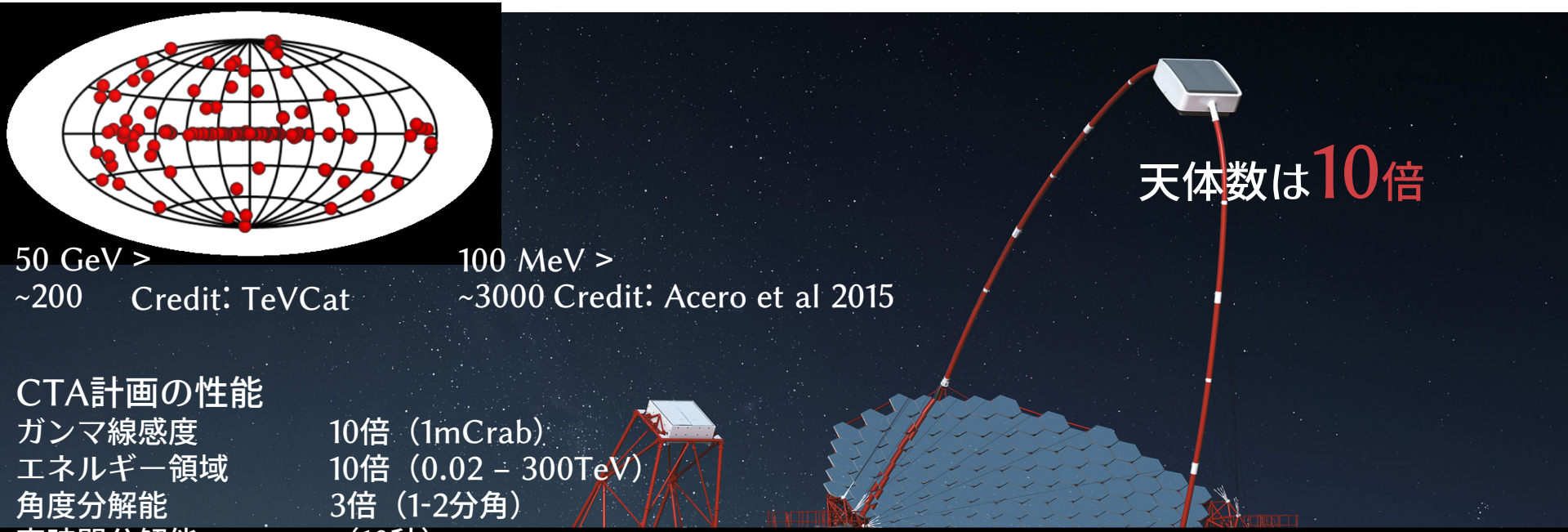
→CTA計画



Cherenkov Telescope Array 計画

次世代地上ガンマ線天文台　口径の異なる三つの望遠鏡を配置

50 GeV >
~200　Credit: TeVCat



100 MeV >
~3000 Credit: Acero et al 2015

天体数は10倍

CTA計画の性能

ガンマ線感度	10倍（1mCrab）
エネルギー領域	10倍（0.02 – 300TeV）
角度分解能	3倍（1-2分角）
高時間分解能	（10秒）
全天観測	

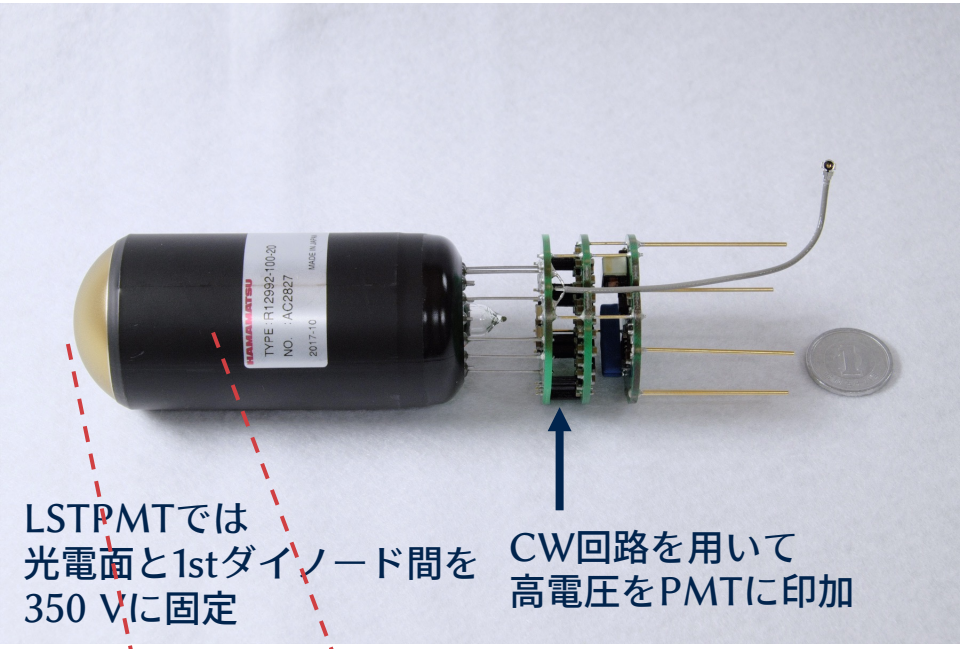
この性能で観測が予想される

天体数は1000天体に到達

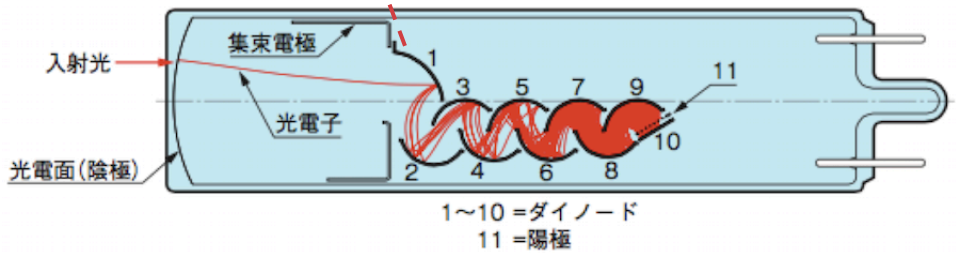
小口径望遠鏡　中口径望遠鏡　大口径望遠鏡

Credit: CTA-Observatory.org

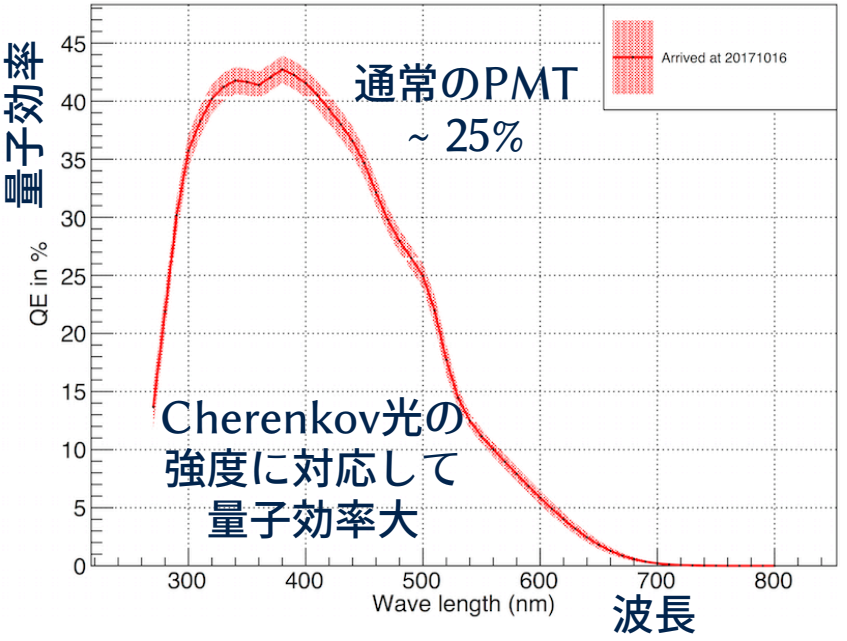
LST用光電子増倍管の特性と原理



R11920-100/R12992-100	浜松ホトニクス
ピクセルサイズ	50 mm
光電面直径	1.5 インチ
有感波長領域	300-600 nm
平均ピーク量子効率	41% 以上
ダイナミックレンジ	1-5000 光電子
アフターパルス発生確率	2×10^{-4} 以下
パルス幅(FWHM)	2.5-3.0 ns
信号増幅率	4×10^{4}
ダイノード段数	7/8



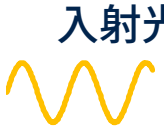
量子効率の波長依存性（1900本）



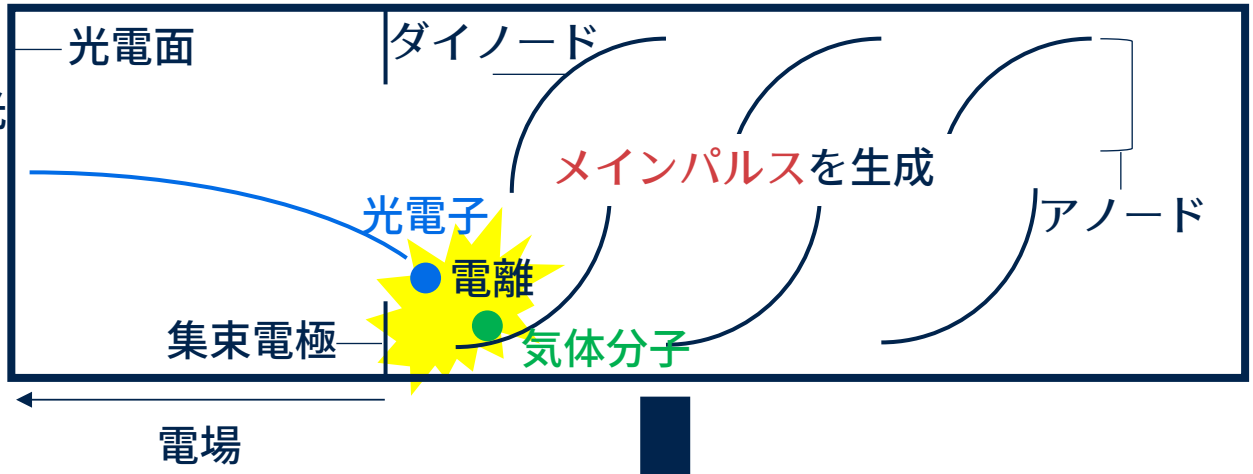
次のスライドで
アフターパルスについて説明する

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

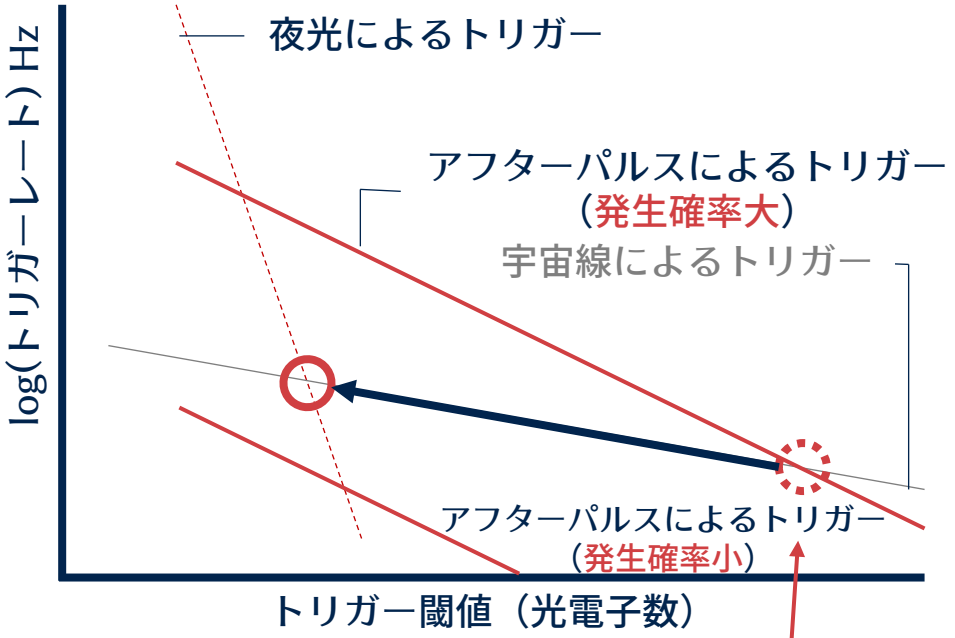
$$t = \sqrt{\frac{m}{2q}} \int (V(l_0) - V(l))^{-1/2} \mathrm{d}l$$

アフターパルス発生確率P_{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

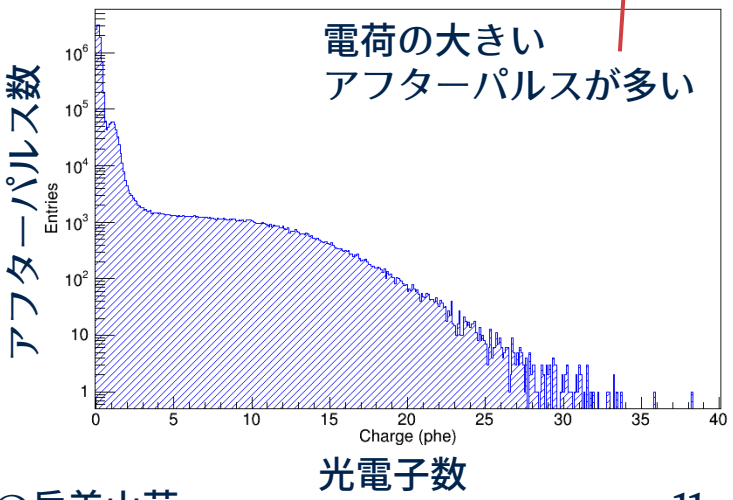
- 望遠鏡のトリガーレートは
  偶発的イベントと宇宙線から決定
  偶発的イベント（夜光やアフターパルスにより
  偶発的に生成されるトリガー）
- 運用時には宇宙線のトリガーレートと
  偶発的ノイズと等しくなる点が閾値
  （図中◌）
- アフターパルス発生確率が低ければ、
  トリガー閾値を下げることが可能（図中○）



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きい
→観測エネルギー下限値増加
LSTのPMTにはP_{after}が2.0×10^{-4} 以下
（4光電子以上）という要請←→通常~10^{-3}



測定の動機及び目的

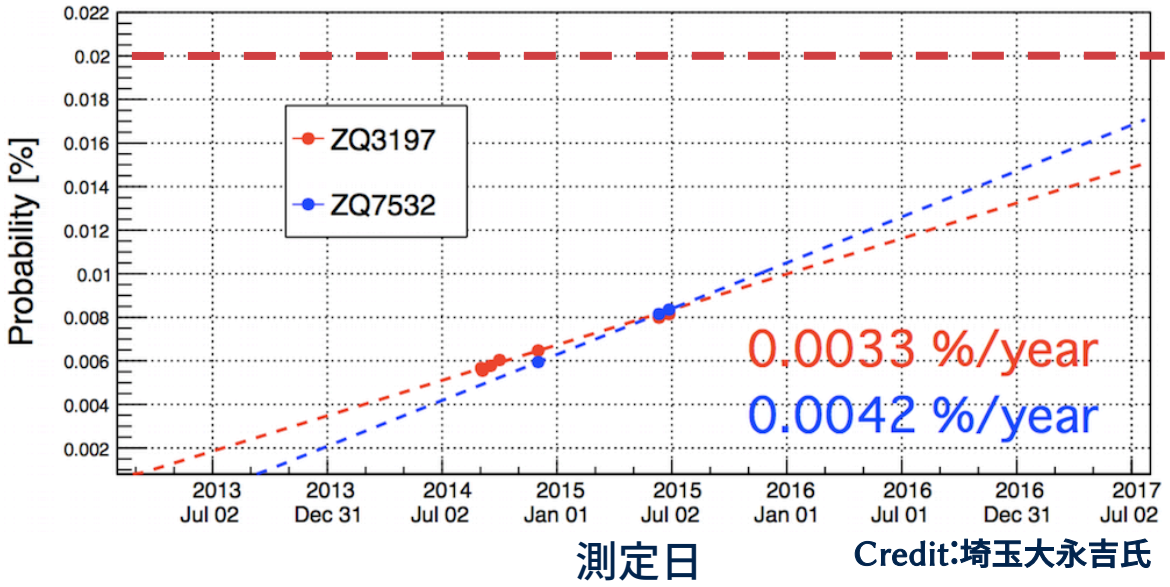
測定の動機

2017年LST初号機のPMTモジュール評価試験の結果と
2015年PMT評価試験の結果が不一致

他のグループの測定も結果（2015年）と不一致

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



Credit:埼玉大永吉氏

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

- 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、アフターパルス発生確率の個体差を確認
- アフターパルス発生確率の変化の時間依存性の有無
- 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関しても議論

を測定の目的とした。

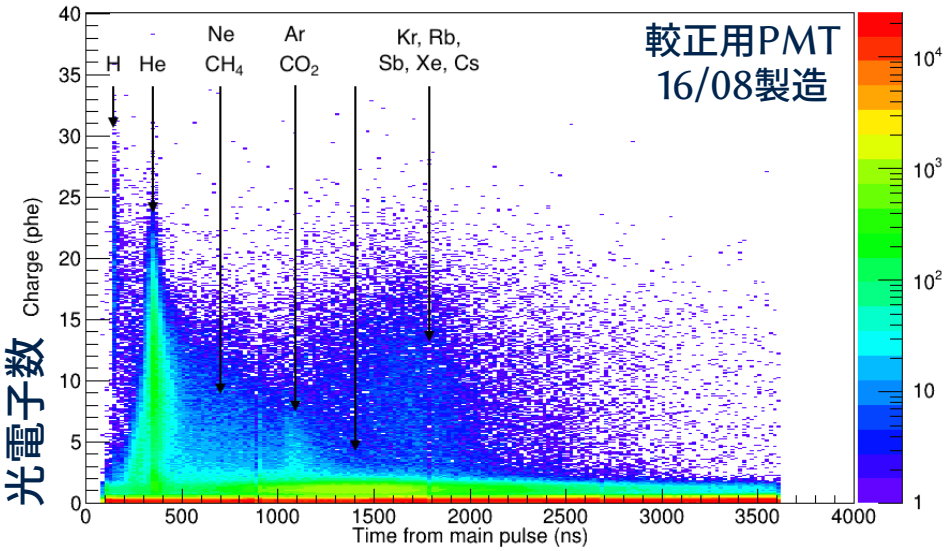
このために製造時期が異なるPMTを計7本測定した。

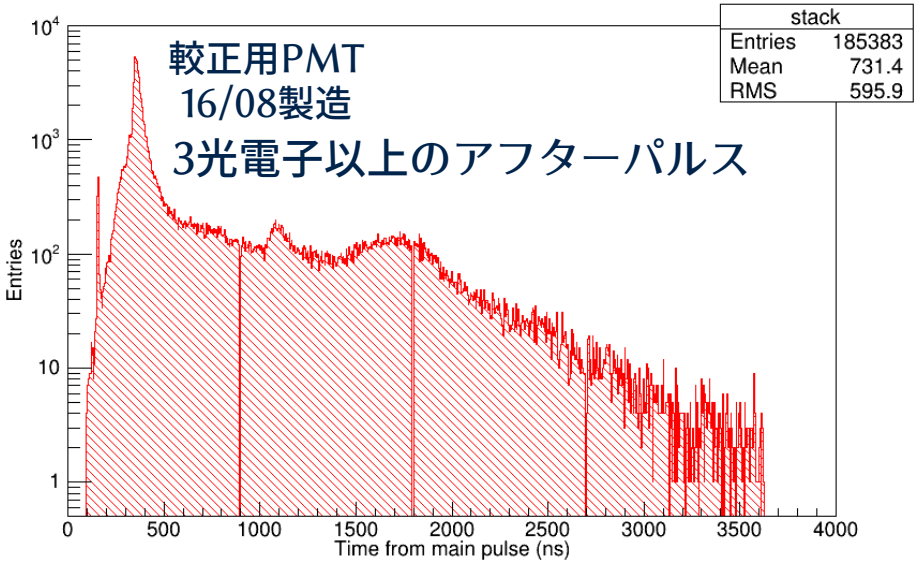
結果および議論

アフターパルスの到来時間分布

アフターパルス発生確率の増加

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

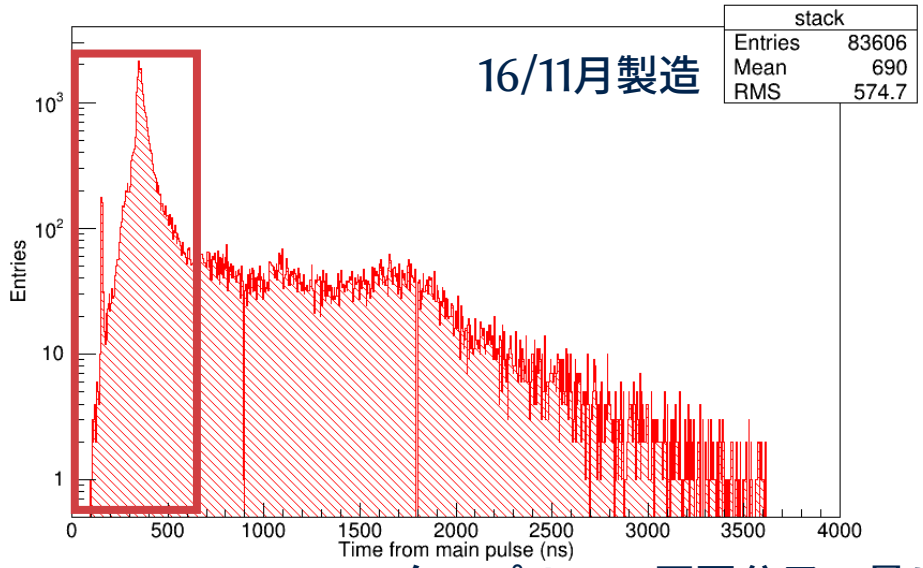
$$t = \sqrt{\frac{m}{2q}} \int (V(l_0) - V(l))^{-1/2} \mathrm{d}l$$

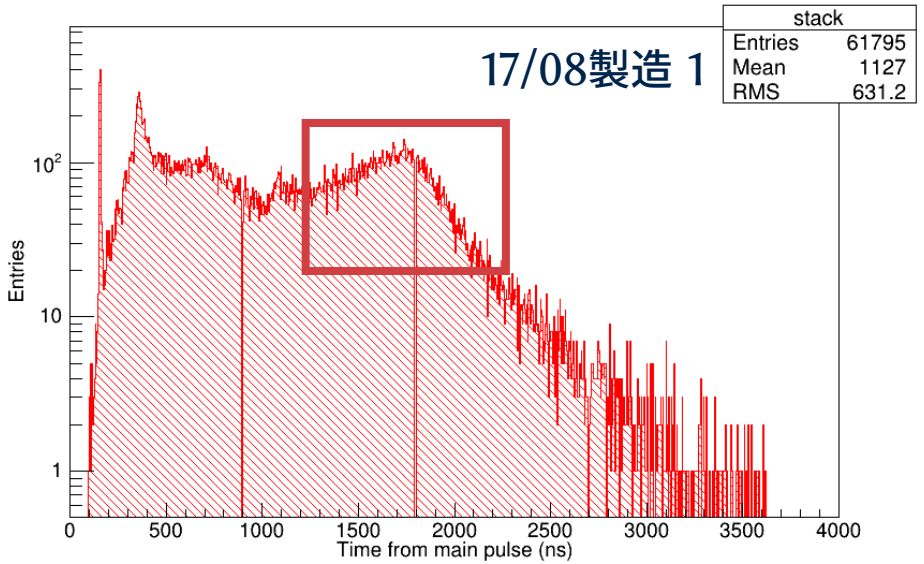
$^{1}H^{+}$ ~ 160 ns	$^{84}Kr^{+}$ ~ 1470 ns
$^{4}He^{+}$ ~ 320 ns	$^{85}Rb^{+}$ ~ 1480 ns
$^{16}CH_4^{+}$ ~ 640 ns	$^{121}Sb^{+}$ ~ 1760 ns
$^{20}Ne^{+}$ ~ 720 ns	$^{132}Xe^{+}$ ~ 1840 ns
$^{40}Ar^{+}$ ~ 1010 ns	$^{133}Cs^{+}$ ~ 1850 ns
$^{44}CO_2^{+}$ ~ 1060 ns	

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

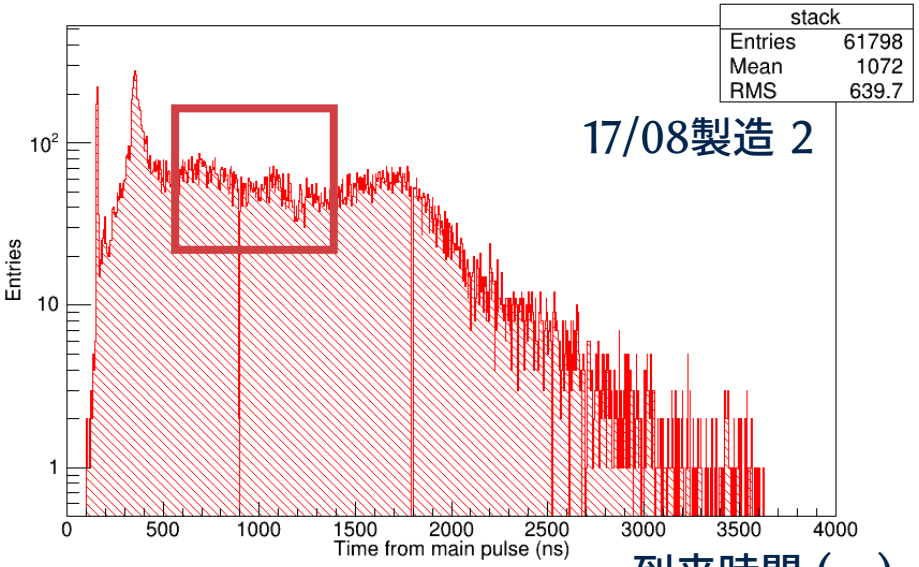
ガス分子ごとにアフターパルスの到来
時間に差があることが確認できる

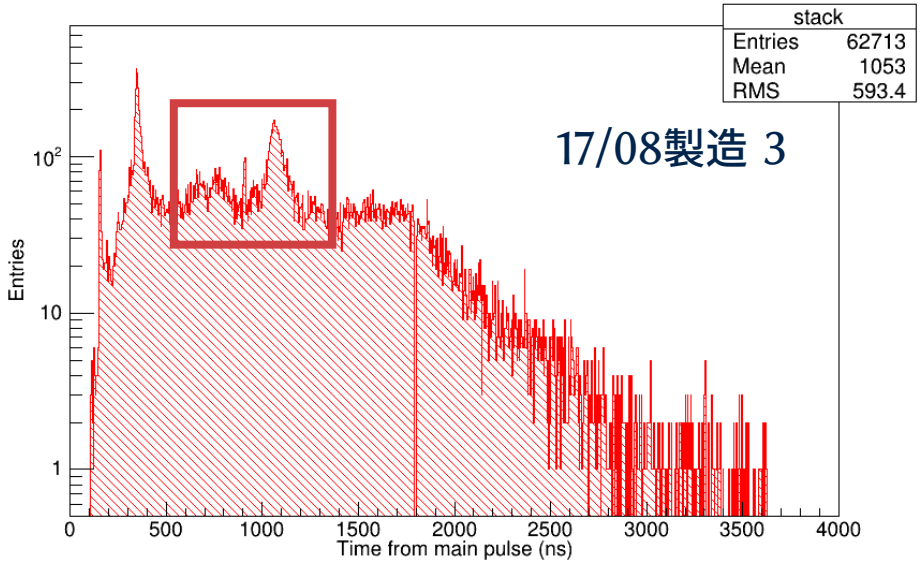
アフターパルスの到来時間分布の比較





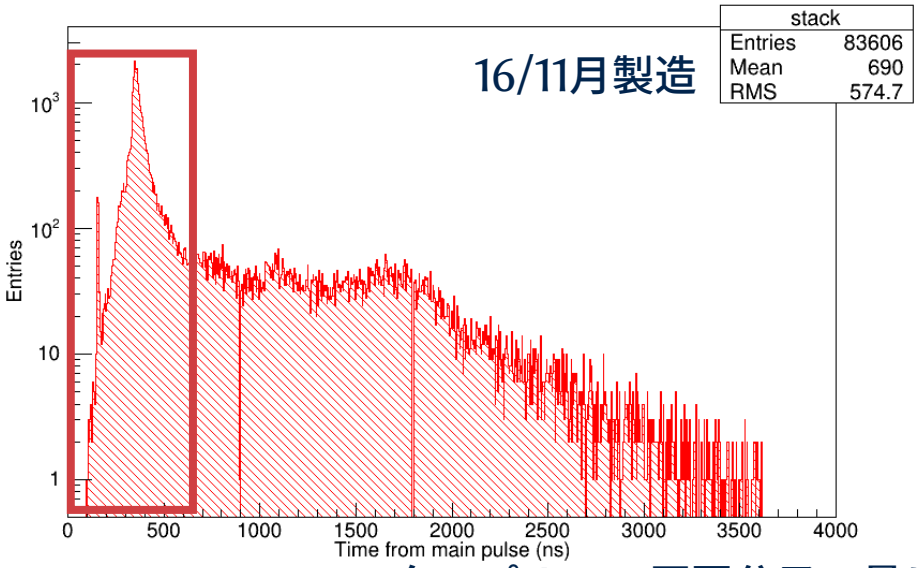
アフターパルスの原因分子の量にはPMTごとに個体差が存在

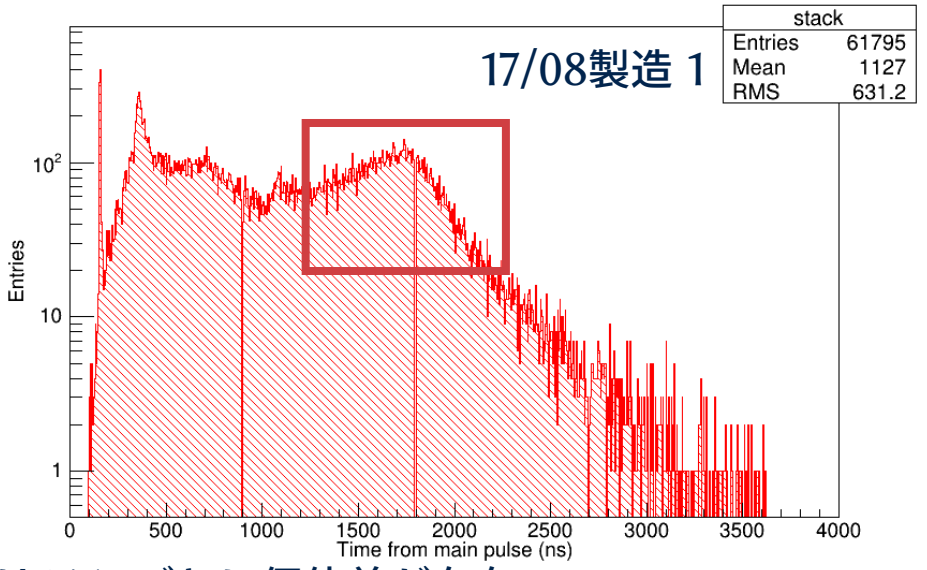




到来時間 (ns)

アフターパルスの到来時間分布の比較





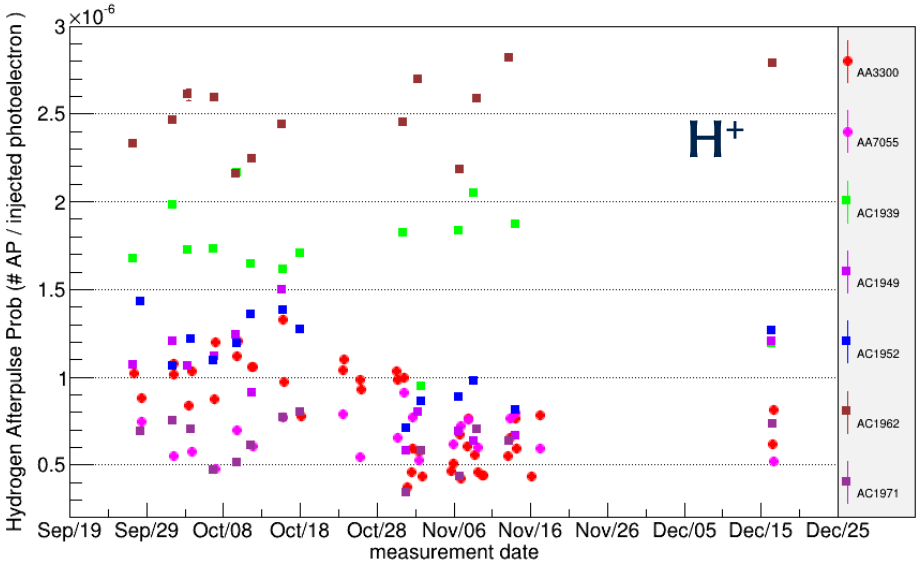
アフターパルスの原因分子の量にはPMTごとに個体差が存在

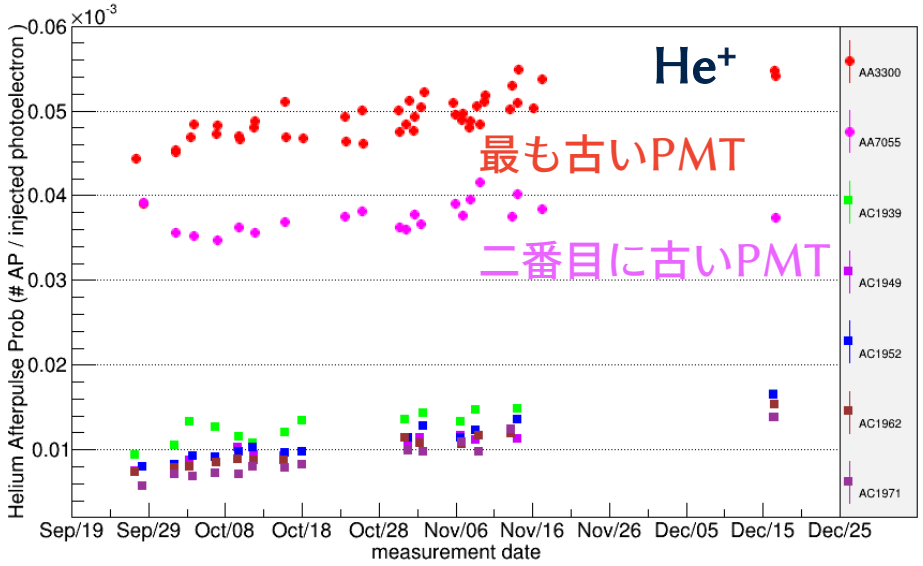
結果からわかったこと

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。

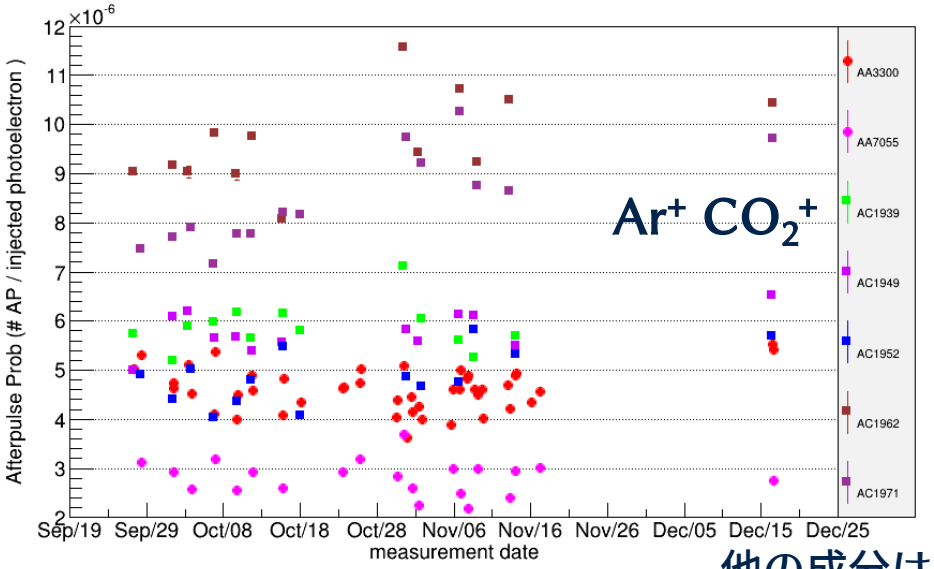
目立ったピークに対して、それぞれアフターパルス発生確率を計算した。

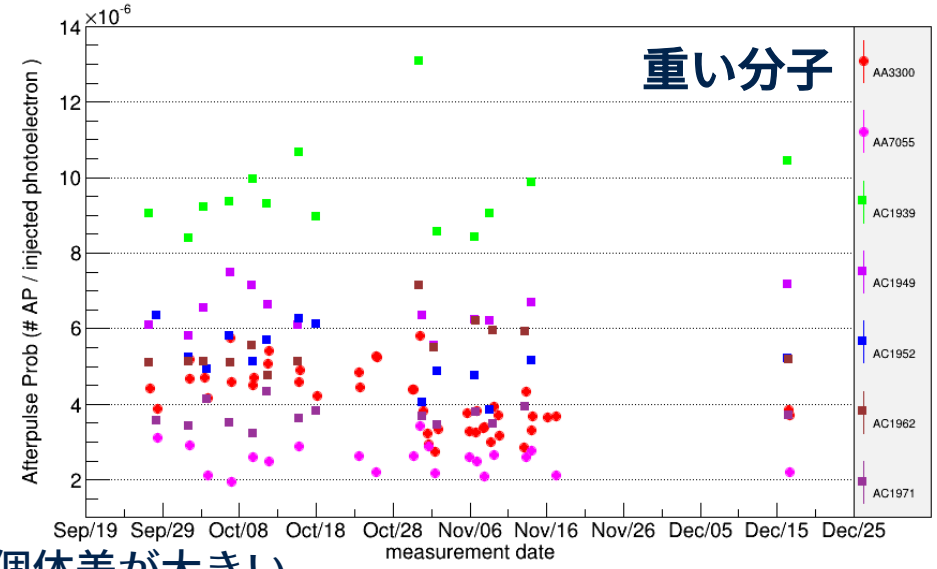
アフターパルス発生確率の推移





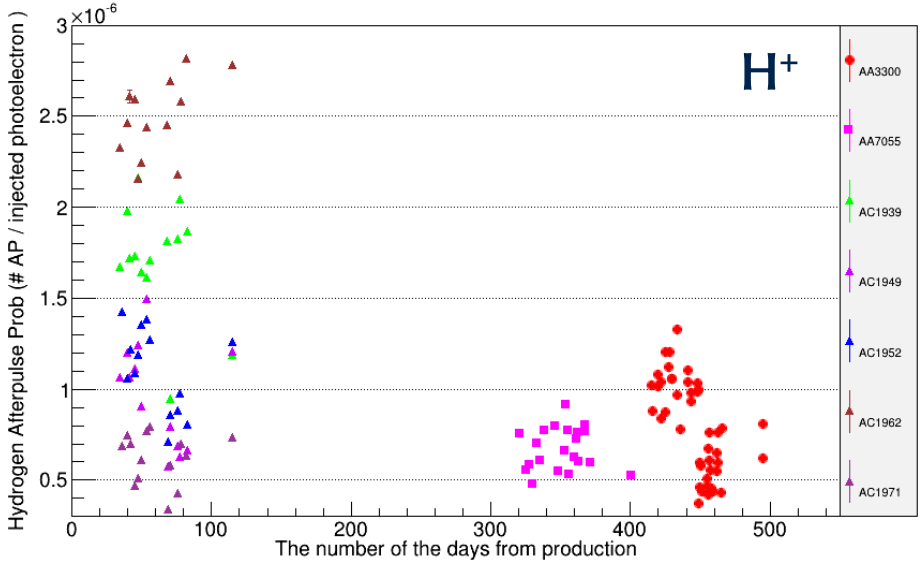
Heアフターパルスのみ増加していることが確認できる。

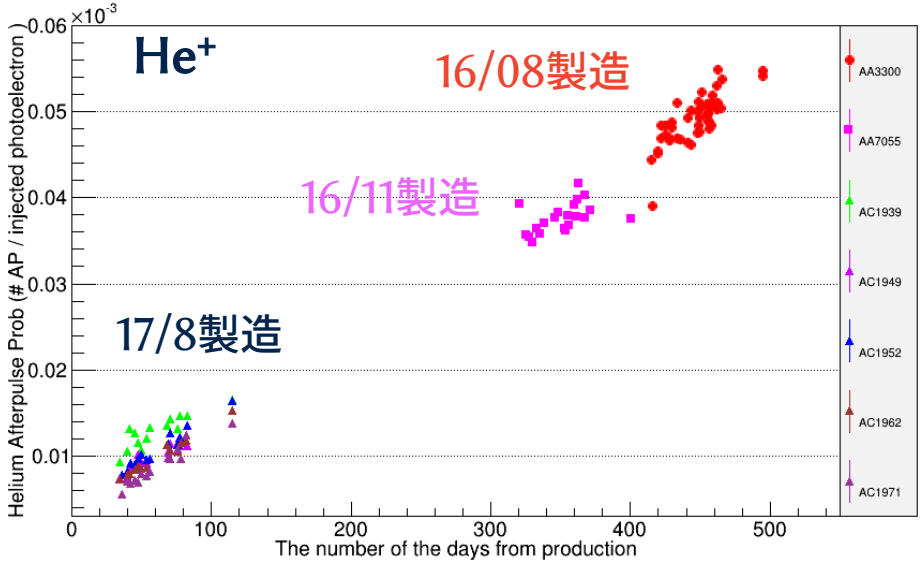


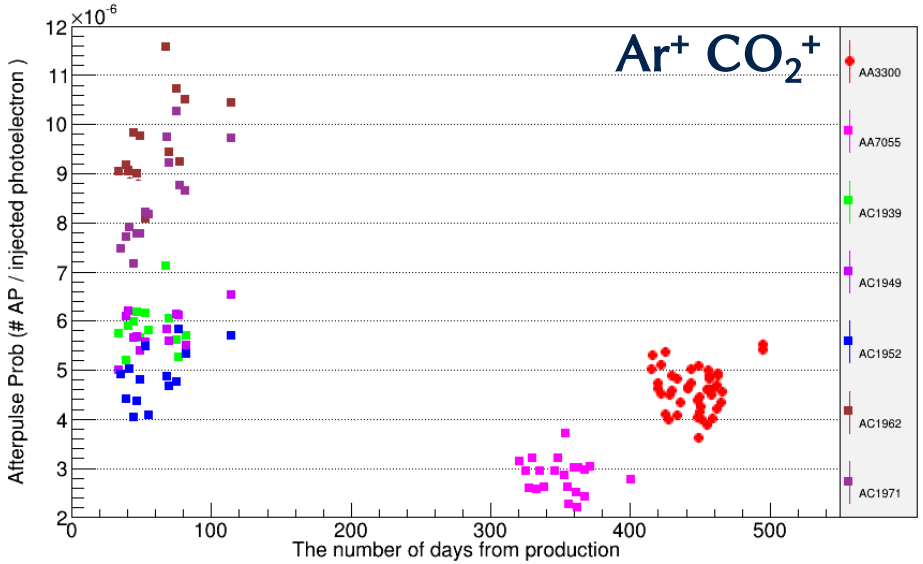


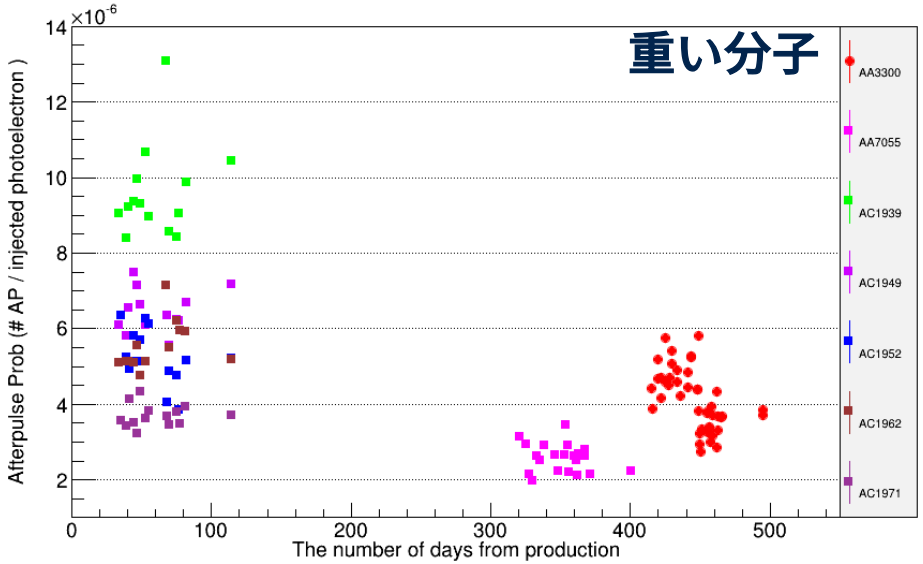
他の成分は個体差が大きい

アフターパルス発生確率の推移（製造日から）

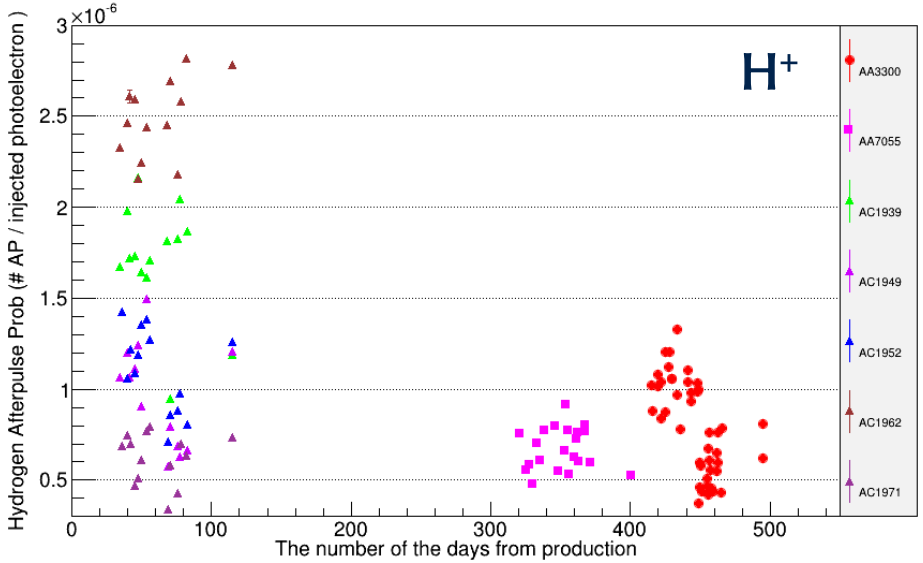


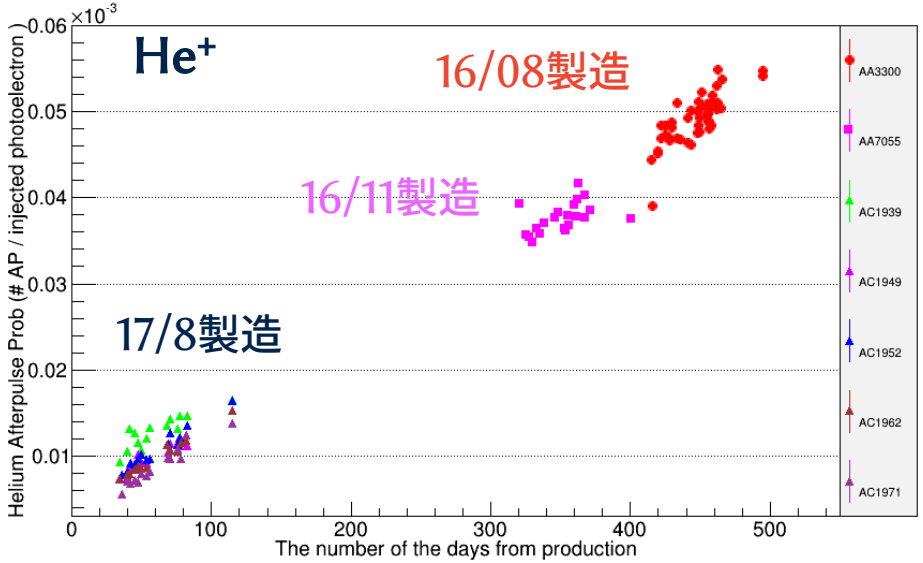






アフターパルス発生確率の推移（製造日から）





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はっきりと増加。

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？

まとめと展望

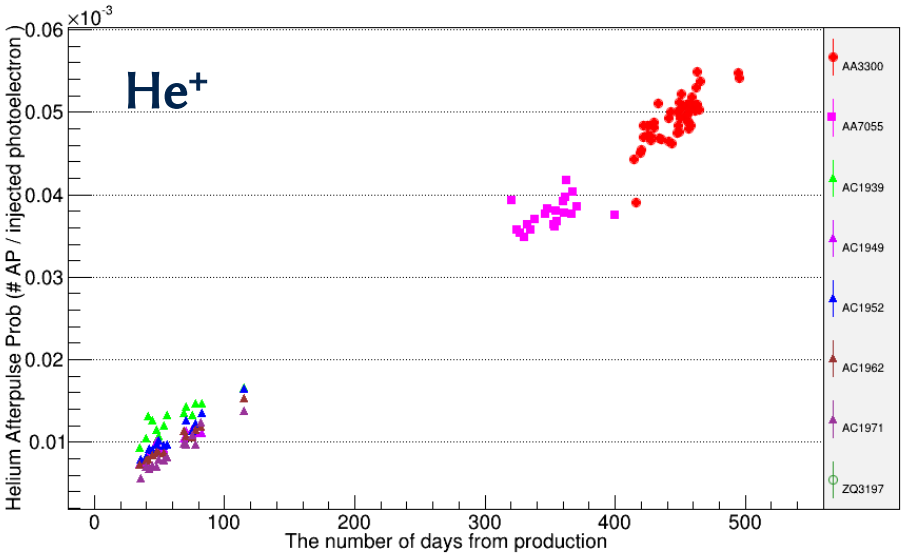
結論

アフターパルスの特性

- LST用PMTにはH+, He+以外にAr+, CO_{2+}やKr+, Rb+, Sb+, Xe+, Cs+由来の成分が多く存在していた

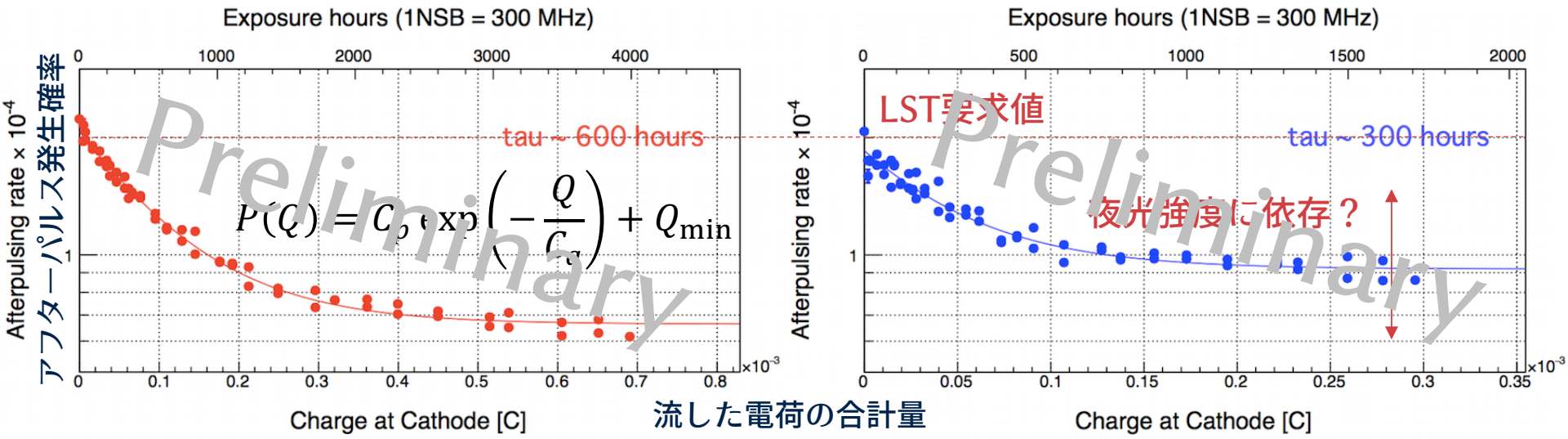
アフターパルス発生確率の増加

- 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
- 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（3.3×10^{-5}/year, 4.2×10^{-5}/year）、二号機（3.6×10^{-5}/year）
- 測定期間中増加率一定、測定サンプル中で大きな個体差は無し



今後の展望

大口径望遠鏡への影響

- 人為的なアフターパルス発生確率の減少は可能。
  しかしその減少には停留値が存在。原因の特定が必要。

20倍から30倍の夜光照射後のアフターパルス発生確率の変化