

光電子増倍管の残留ガスイオン由来の アフターパルスの評価

2026/09/14~17 日本物理学会 第81回年次大会

花川靖麿, 小汐由介, 多田智昭, 水野裕介^A, 林崎響^A, Wentao Cai^A,
安部清尚^A, 中島康博^A, 酒井聖矢^B, 大津秀暁^B, 阿久津良介^C



OKAYAMA
UNIVERSITY



岡大理, 東大理^A, 理研仁科セ^B, 高エネ研^C



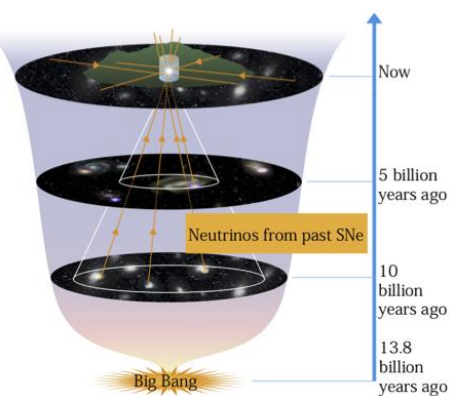
本研究は JST/ERATO (課題番号 JPMJER2304) の助成を受けたものである。

スーパーカミオカンデにおけるDSNB探索

1

超新星背景ニュートリノ(DSNB)

過去の超新星爆発
から放出された
ニュートリノの
重ね合わせ



スーパーカミオカンデ(SK)

目的(の一つ) :DSNBの世界初観測

5万tの純水

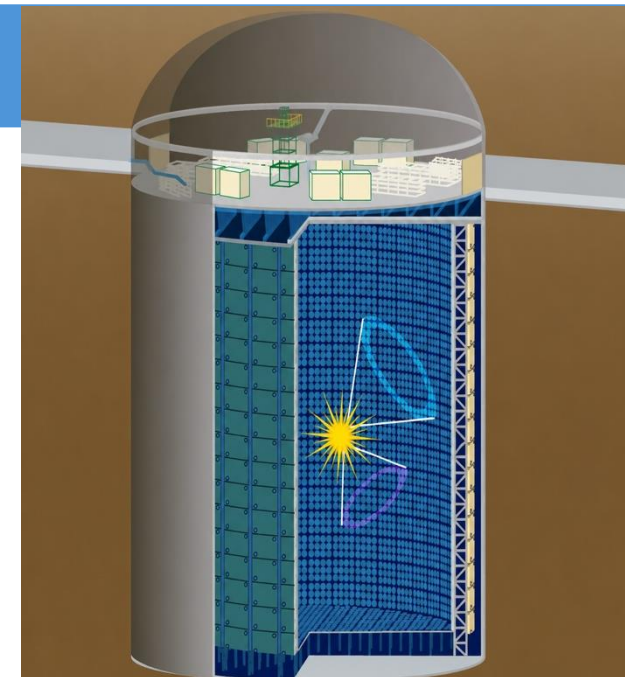
→ ニュートリノ反応の標的

多数のPMT

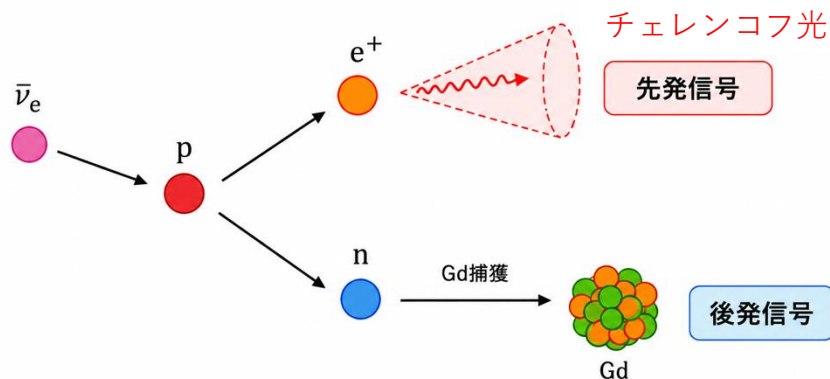
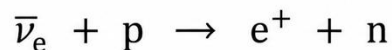
→ タンク内壁に設置

Gd添加

→ 中性子捕獲効率を向上



逆ベータ崩壊 (IBD)



観測手法

逆ベータ崩壊(IBD)による遅延同時計測

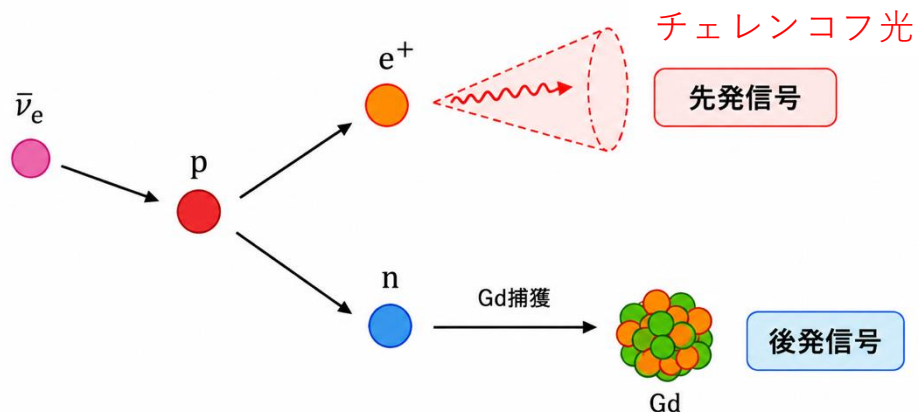
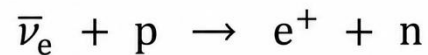
陽電子のチェレンコフ光(先発信号)

+

中性子のGd捕獲に伴う γ 線(後発信号)

NCQE反応

逆ベータ崩壊 (IBD)



IBD

先発信号：陽電子

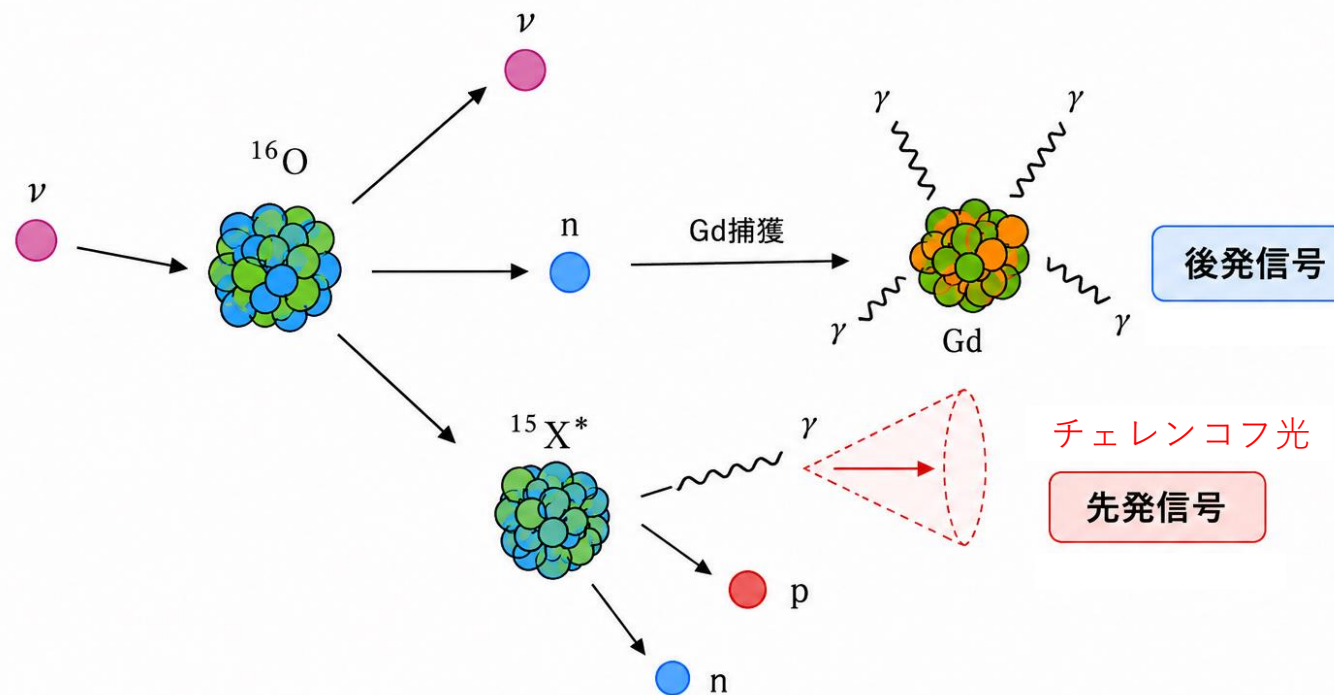
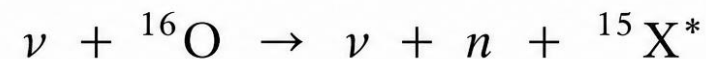
後発信号：中性子捕獲

NCQE

先発信号：脱励起 γ 線・二次反応

後発信号：中性子捕獲

NCQE 反応

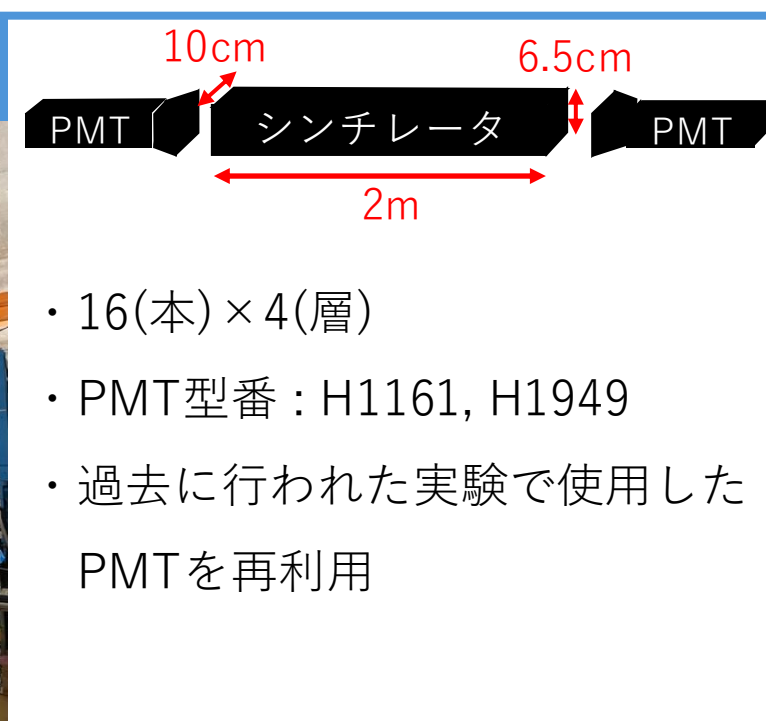
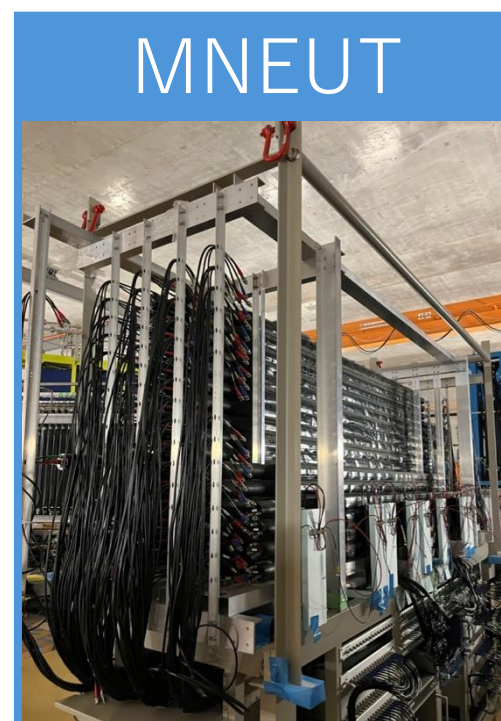
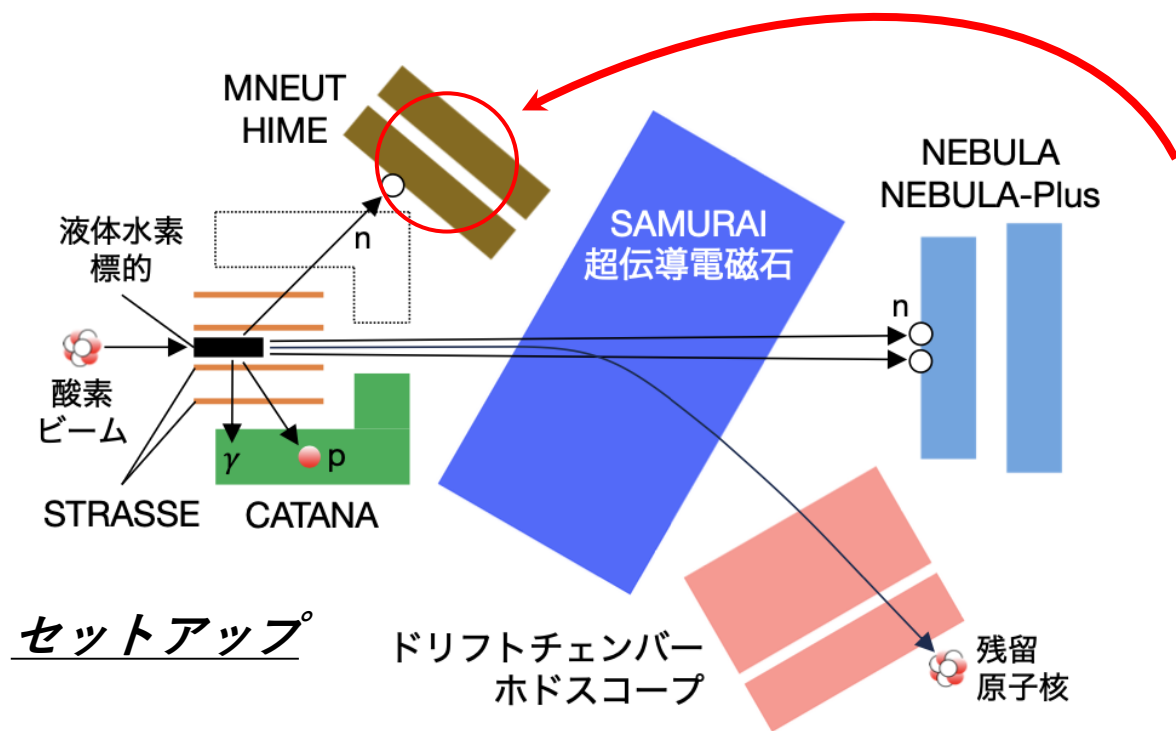


NCQEでは γ 線・核子放出のモデル化が重要

SAMURAI-79実験

目的： $^{15}\text{N}^*$, $^{15}\text{O}^*$, $^{16}\text{O}^*$ の脱励起過程の測定

→ 励起エネルギーごとの γ 線・中性子エネルギー分布を測定



$^{16}\text{O}(\text{p,pn})^{15}\text{O}^*$ と $^{17}\text{O}(\text{p,pn})^{16}\text{O}^*$ 反応の測定 (理化学研究所 RIBF で実施予定)

本研究 : 中性子検出器 MNEUT の性能評価

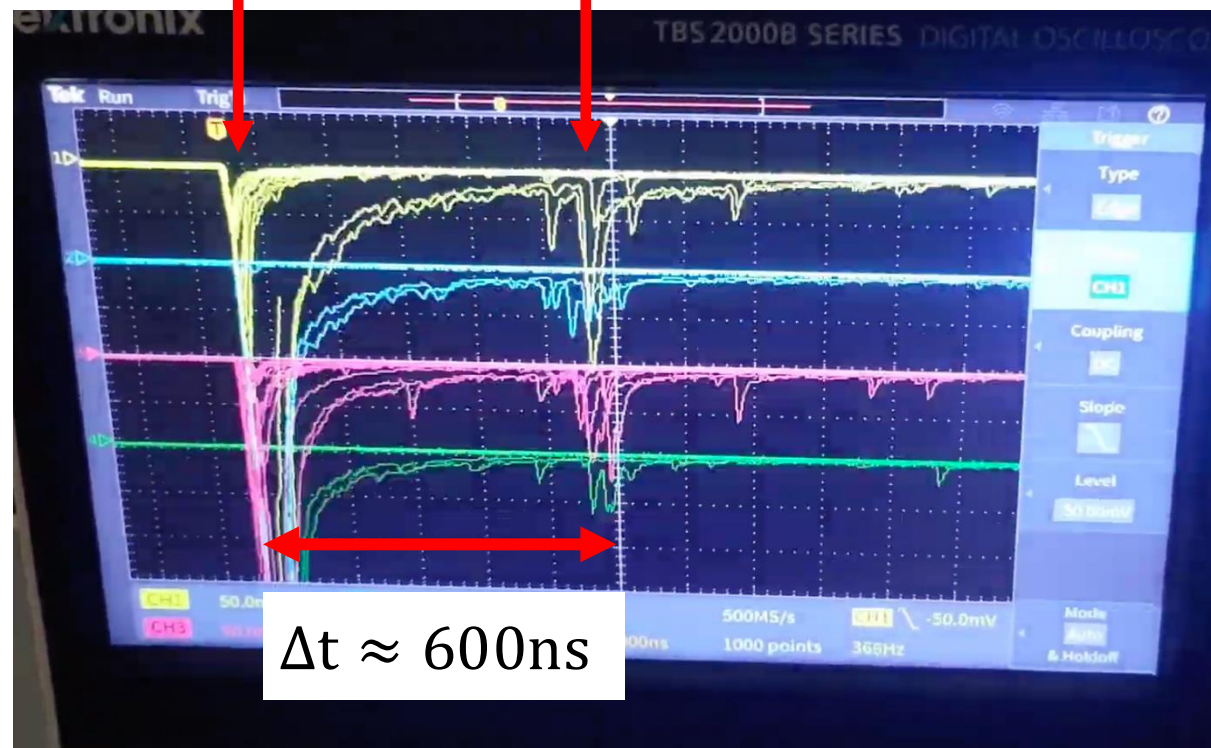
64本中22本のMNEUTバー(44 PMT)で比較的大きなアフターパルスを確認

→測定精度に影響を及ぼす可能性

MNEUT PMTのAPについての調査

Main pulse
(MP)

After pulse
(AP)



約600nsにAPを確認

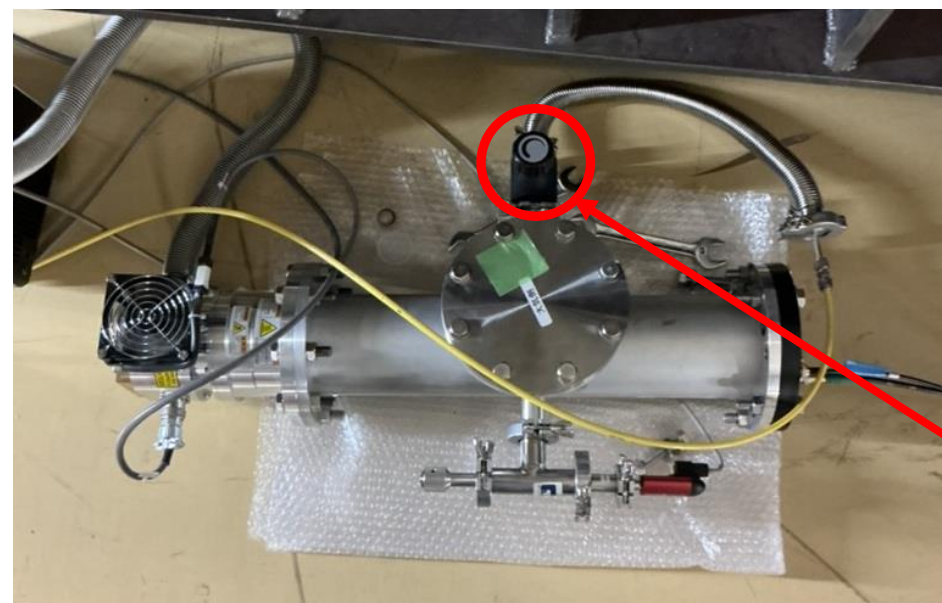
過去に使用されたPMTを再利用
and
Heはガラスを透過しやすい

HeイオンがAPに寄与している可能性

He封入実験

ヘリウム封入実験

目的： APがヘリウムガス起因であるかを検証



手順

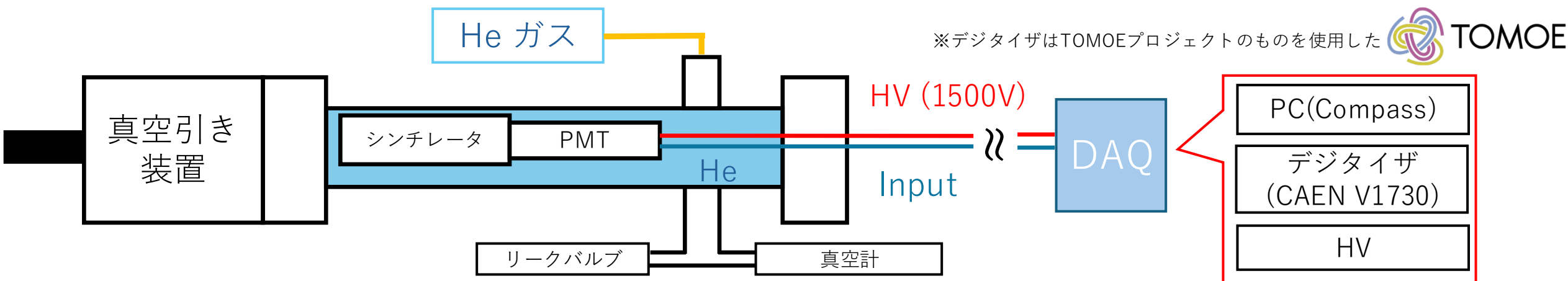
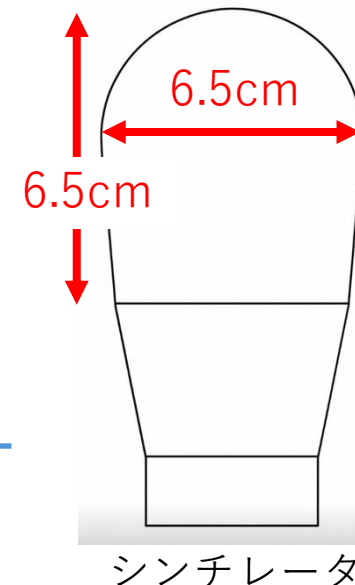
- ① 真空引き
- ② ダクト内にヘリウム封入
- ③ バルブを閉じる(1 atm)

※ビームダクトは東京科学大学のものを使用した



型番：H1161HH

MNEUT用PMT
(H1161)と
同様のPMT

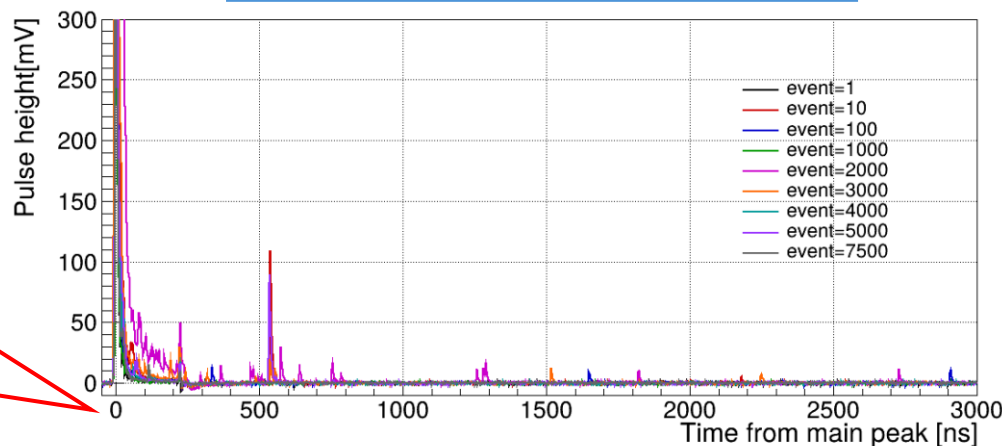


ヘリウム封入前後

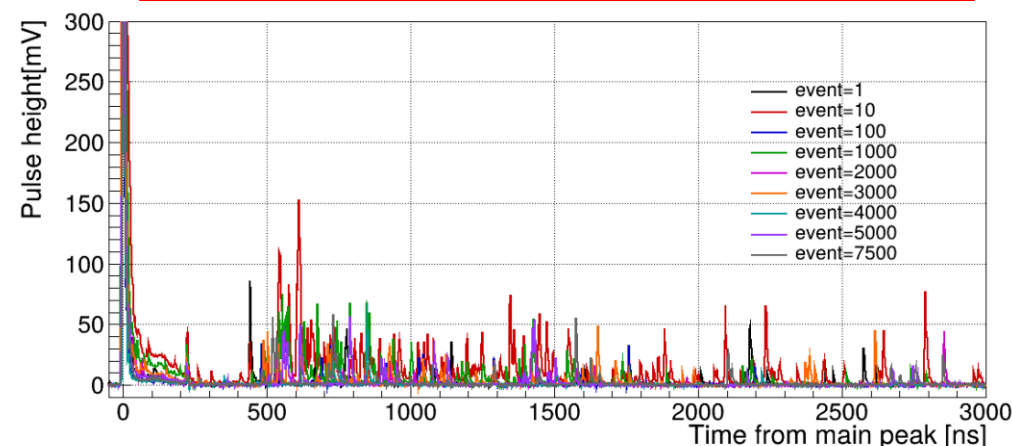
重ね書き
(9波形)

横軸：
MPのピークを
0 nsに
揃えた時間差

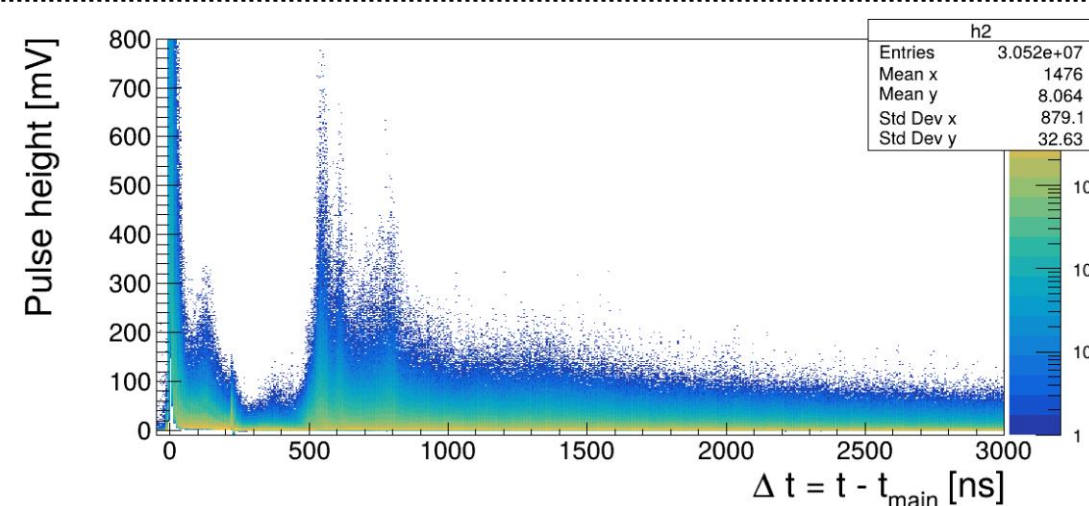
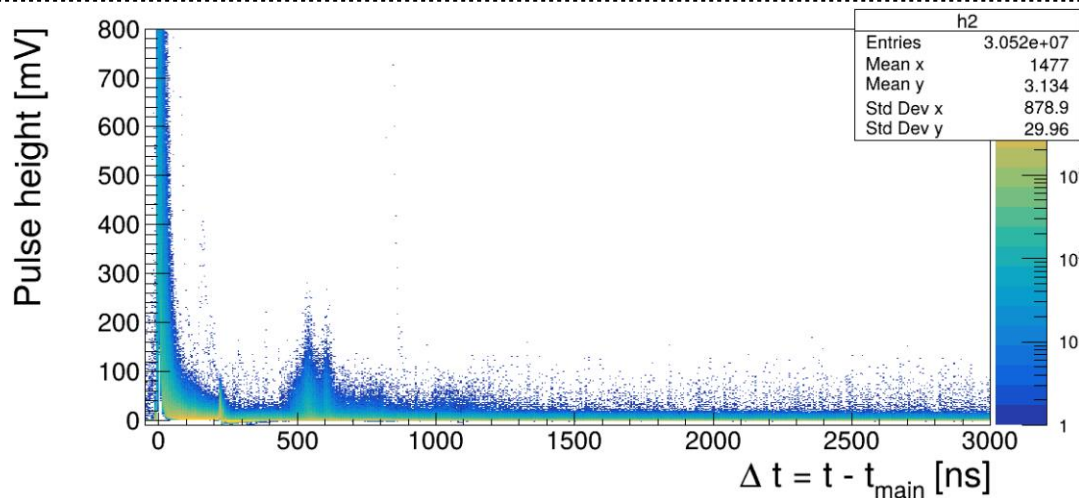
He 封入前



He 封入 1 ヶ月後



AP 検出時間
vs
波高

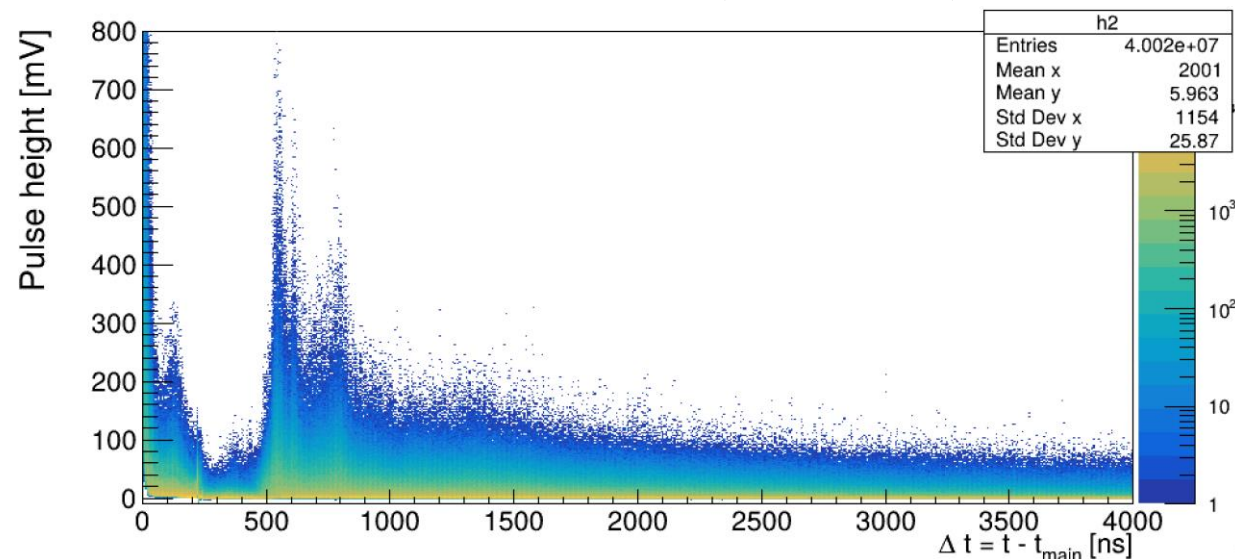


APの時間応答は変わらず、量だけ増加

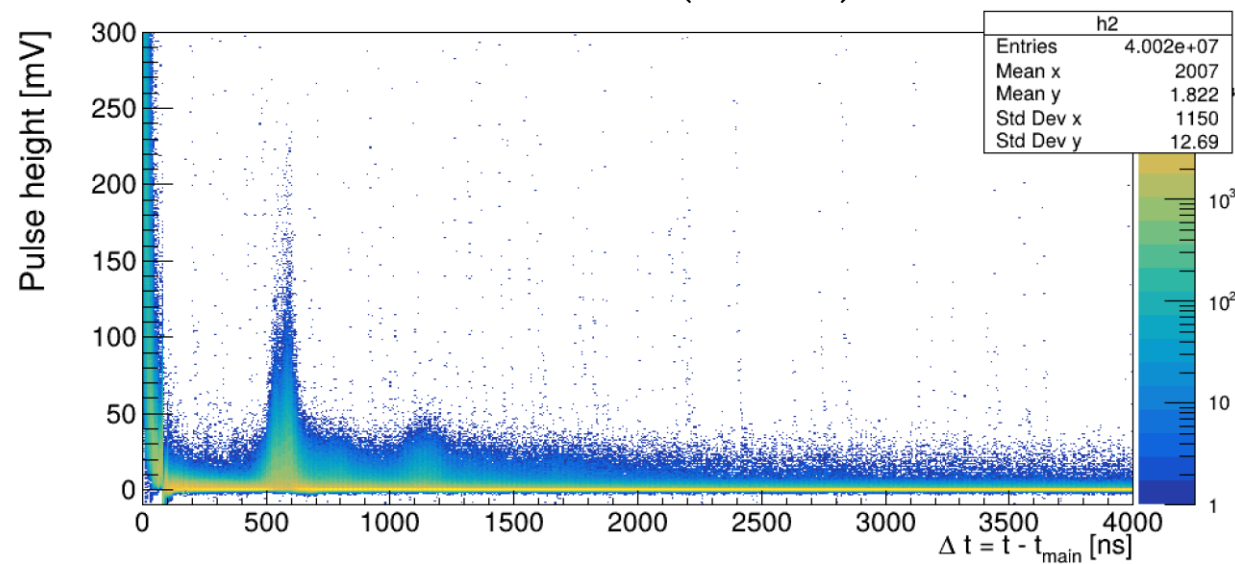
MNEUT PMTとの比較

7

He 封入PMT 1 ヶ月後 (H1161HH)



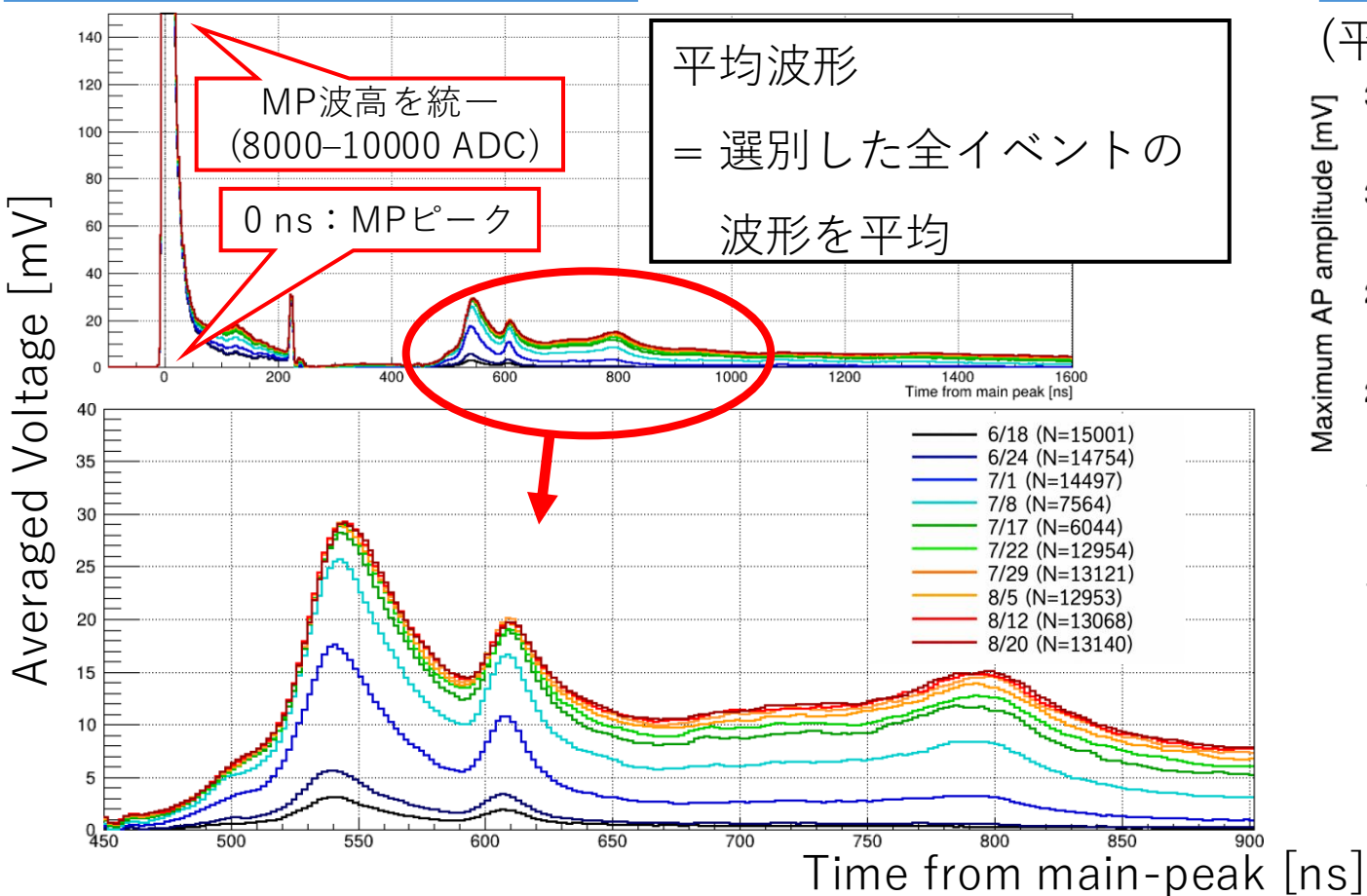
MNEUT PMT (H1161)



- APの検出時間がほぼ一致 (約600 ns)
- MNEUT PMTのAPもHe起因であることが示唆される

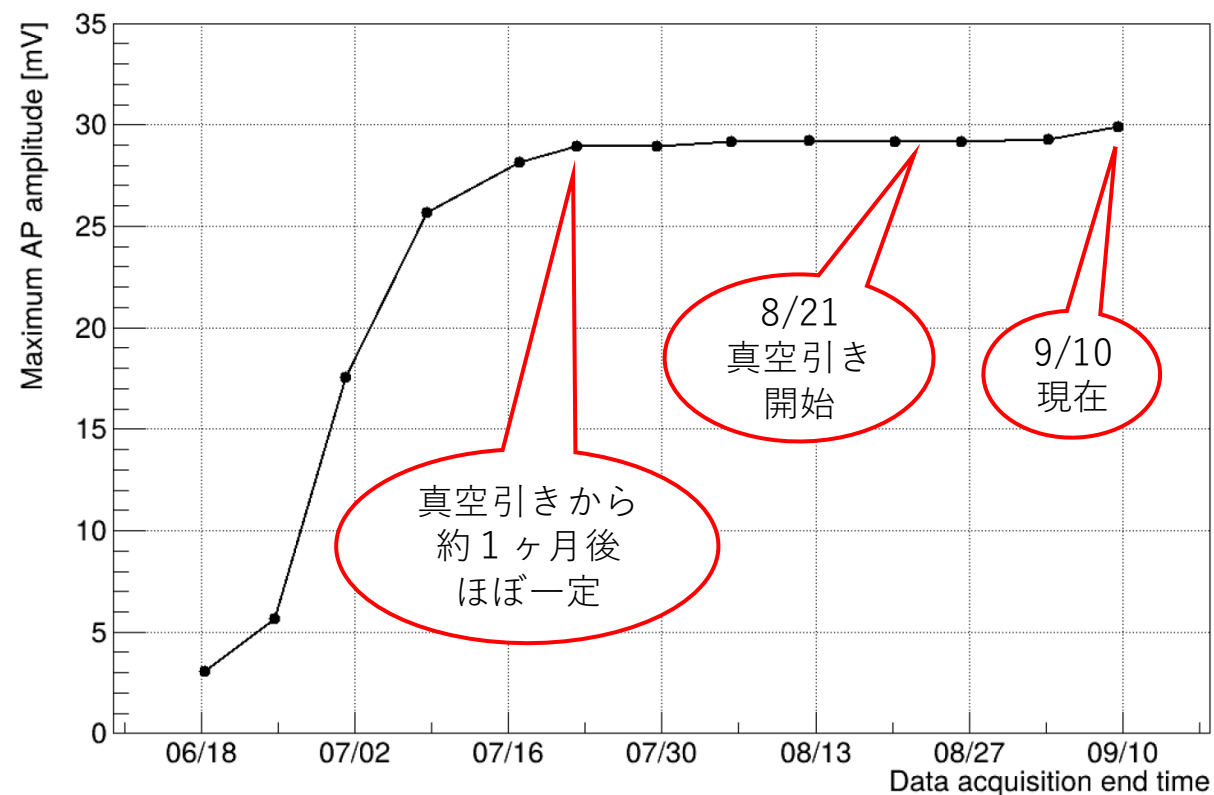
アフターパルスの経時変化

平均波形の重ね書き



最大AP波高の経時変化

(平均波形におけるAPの最大波高をプロット)



He封入後
APは徐々に増加
約1ヶ月後からほぼ一定

8/21 真空引き開始
現在の真空度: 5.7×10^{-2} Pa
真空容器にリークが考えられる

リーク箇所を特定、改善後
真空引きによるAPの変化を
再評価

アフターパルスのHV依存性

目的

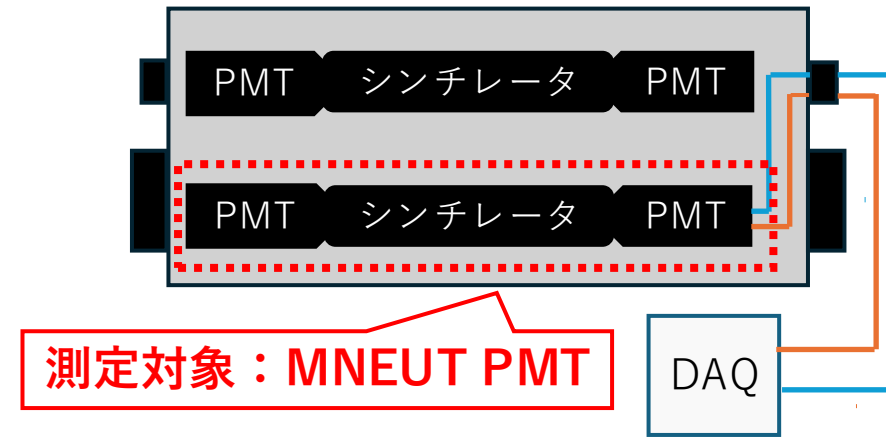
HVの違いによるAP波高の変化を確認

- ゲインの違いから、実験ではPMTごとに使用HVが異なる
- HVの違いがAPに与える影響を調査

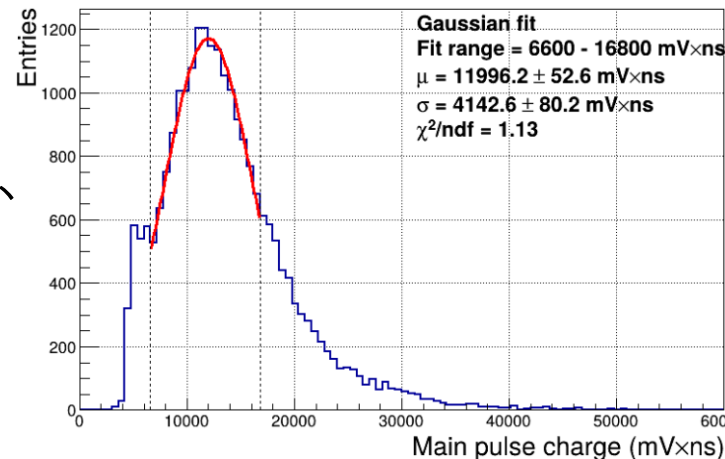
手法

- MNEUT PMTにHVを印加し、MP・APのチャージ分布を取得
- 各HVで分布をガウス関数でフィットし、得られた最頻値をMP, APのチャージとして評価
- MPとAPの増加率を比較

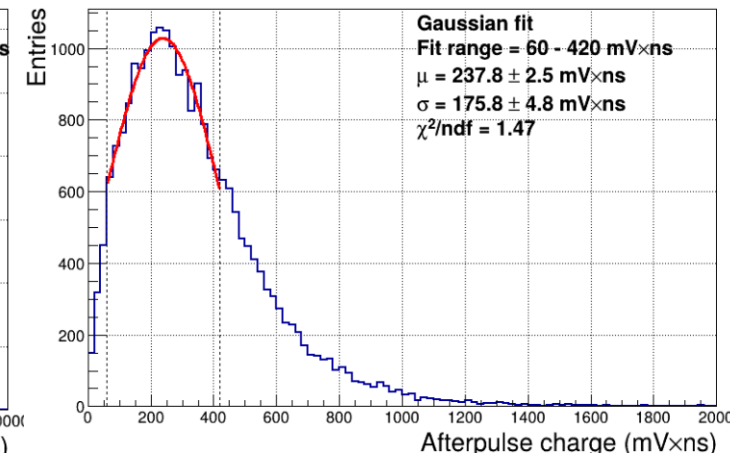
測定セットアップ



チャージ分布とガウスフィット



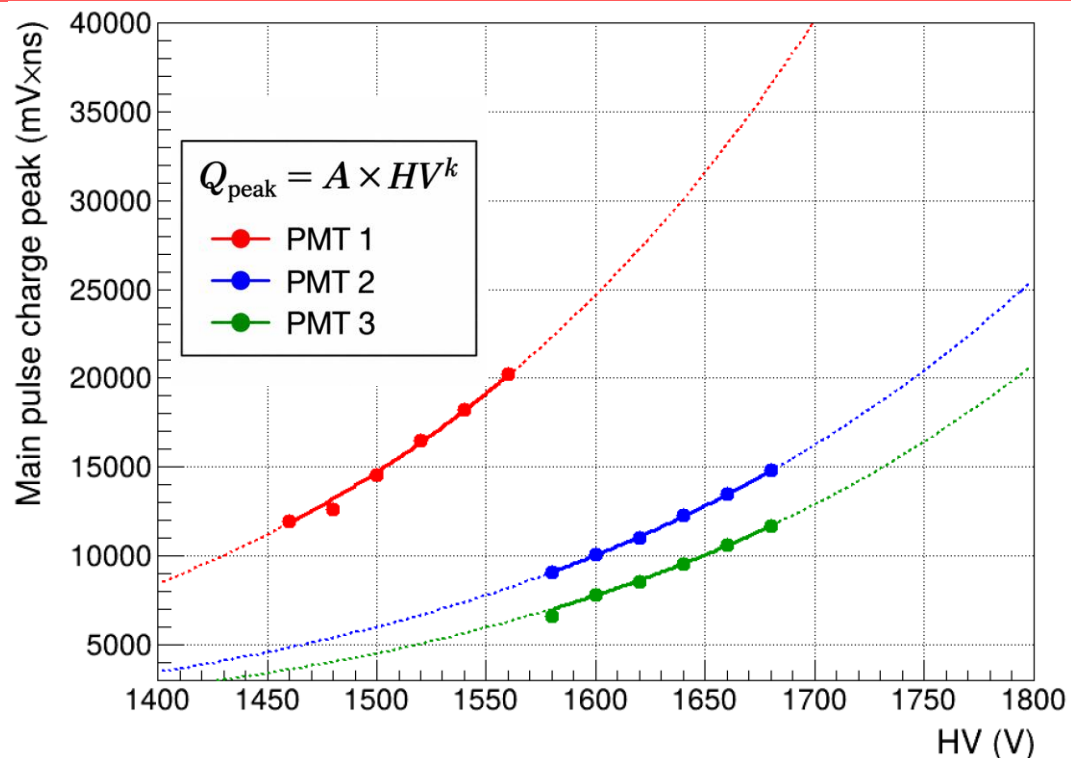
MP チャージ分布 (1460V)



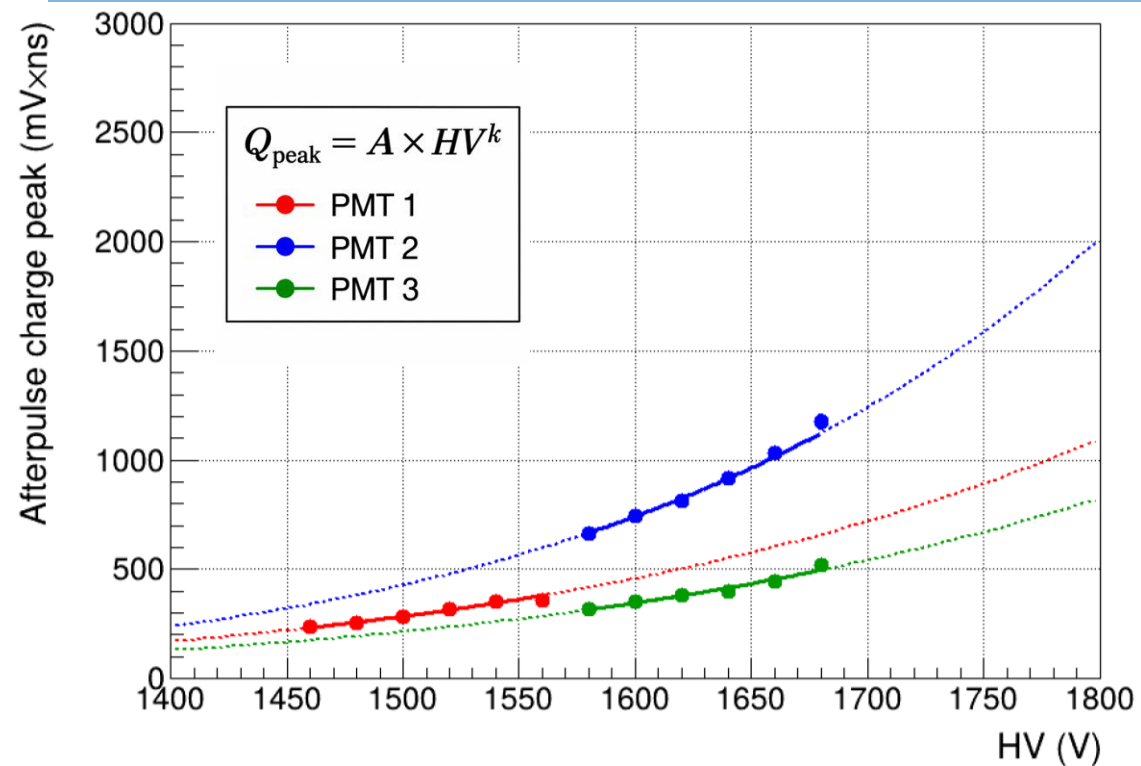
AP チャージ分布 (1460V)

アフターパルスのHV依存性

MPのHV依存性



APのHV依存性



PMT	型番	k (MP)	k (AP)
PMT 1	H1161	8.01 ± 0.11	7.41 ± 0.04
PMT 2	H1161	7.93 ± 0.18	8.48 ± 0.02
PMT 3	H1949	8.33 ± 0.18	7.39 ± 0.02

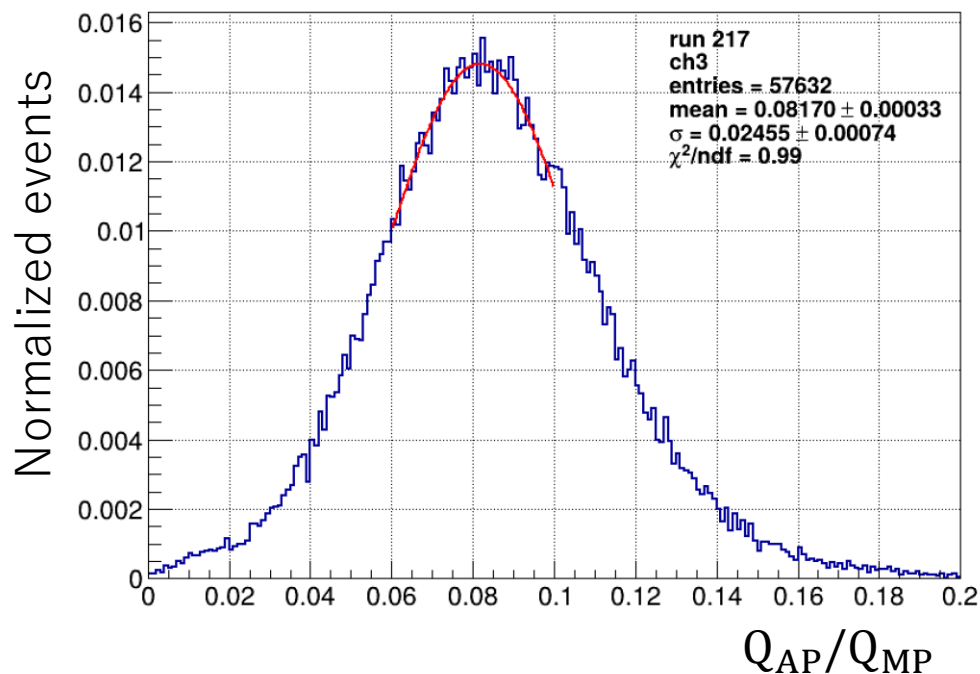
- ・ MP・APチャージはHVに対してべき乗に増加
- ・ MP・APの増加率はPMTごとに異なる
→ MPに対するAPチャージの割合を評価

MPに対するAPチャージの割合

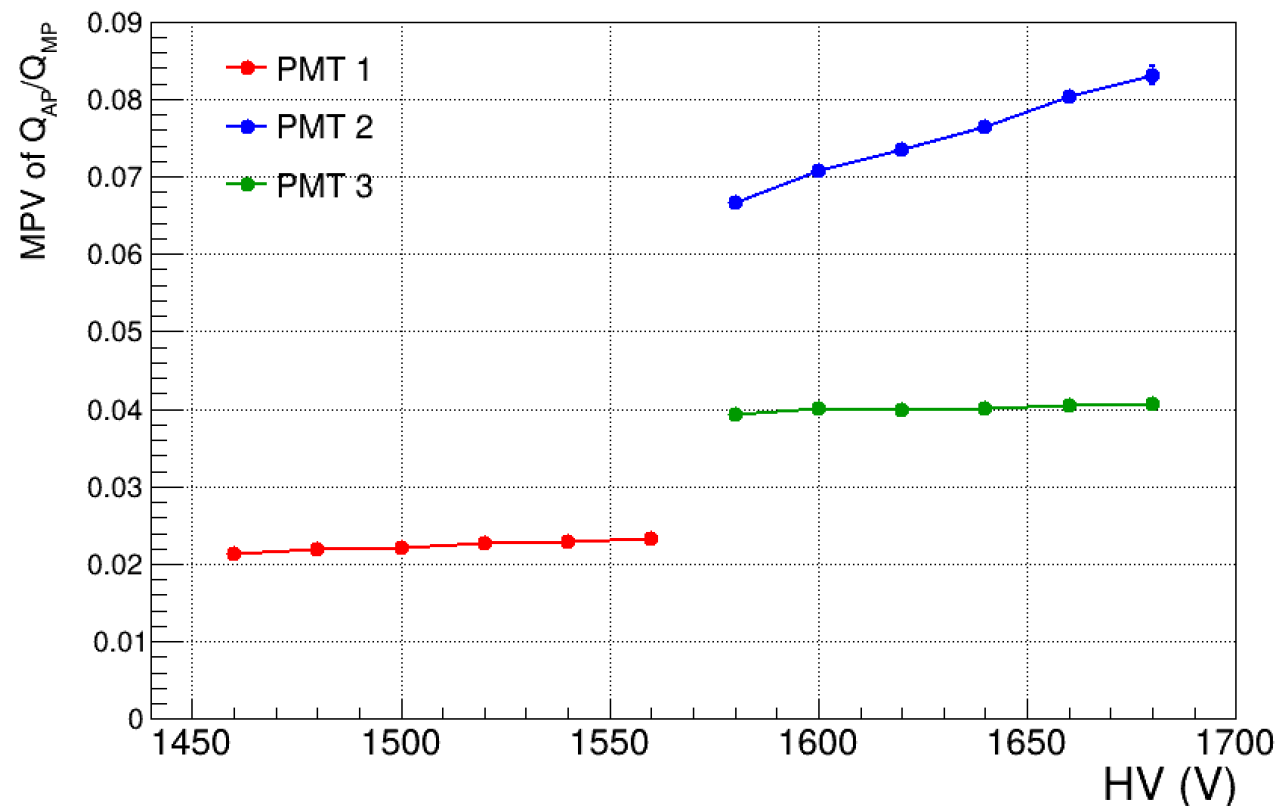
評価方法

- ・ 各イベントで Q_{AP}/Q_{MP} を算出
- ・ チャージ比分布をガウシアンフィット
- ・ 得られた最頻値を各HVで比較

ガウシアンフィット (PMT 2 1680V)



MPに対するAPのチャージの割合



AP/MPはPMT 1・3ではほぼ一定である一方、
PMT 2でHVとともに増加する

→ APのHV依存性はPMTごとに異なる

まとめと今後

- ・ MNEUTで使用予定のPMTにおいて、約600 nsに比較的大きなアフターパルスを確認

[He封入実験]

- ・ He封入実験により約600 nsのアフターパルスが増加し、
MNEUT PMTのアフターパルスもHe起因であることが示唆された
- ・ He封入後、APの時間応答は大きく変化せず、AP量が増加
- ・ 約1か月後から増加はほとんど見られず
- ・ 真空引きを行ったが、十分な真空度での評価には至っていない

[APのHV依存性]

- ・ MPに対するAPチャージの割合のHV依存性はPMTごとに異なる

[今後]

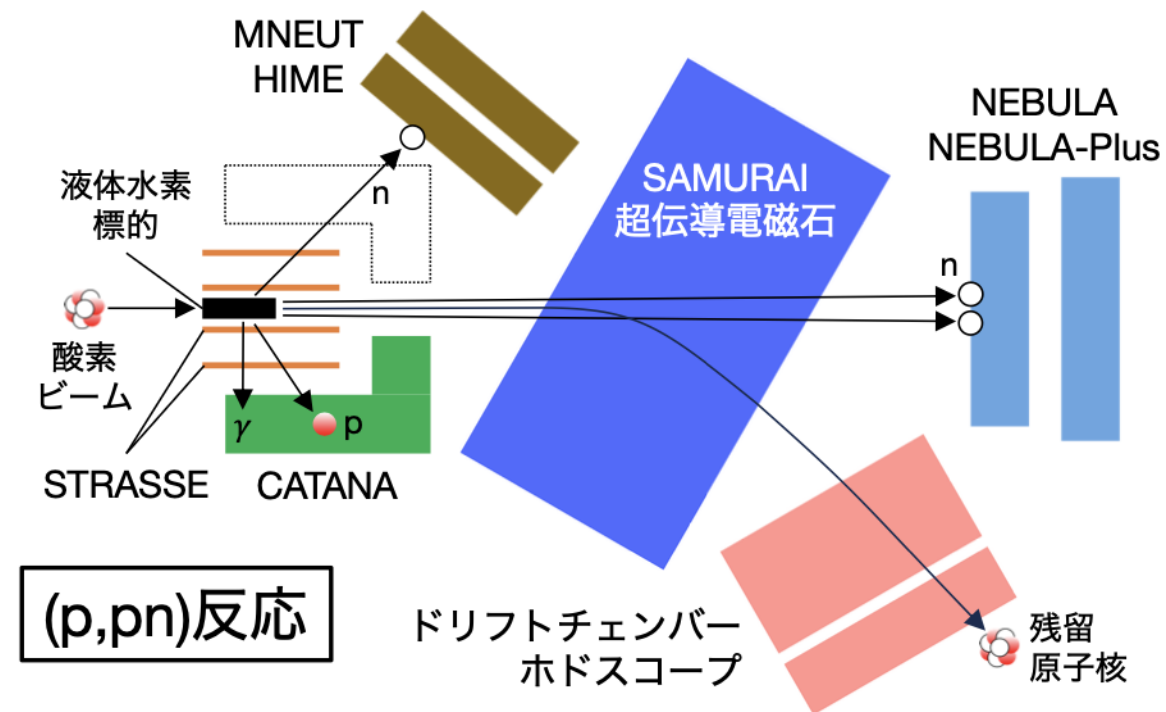
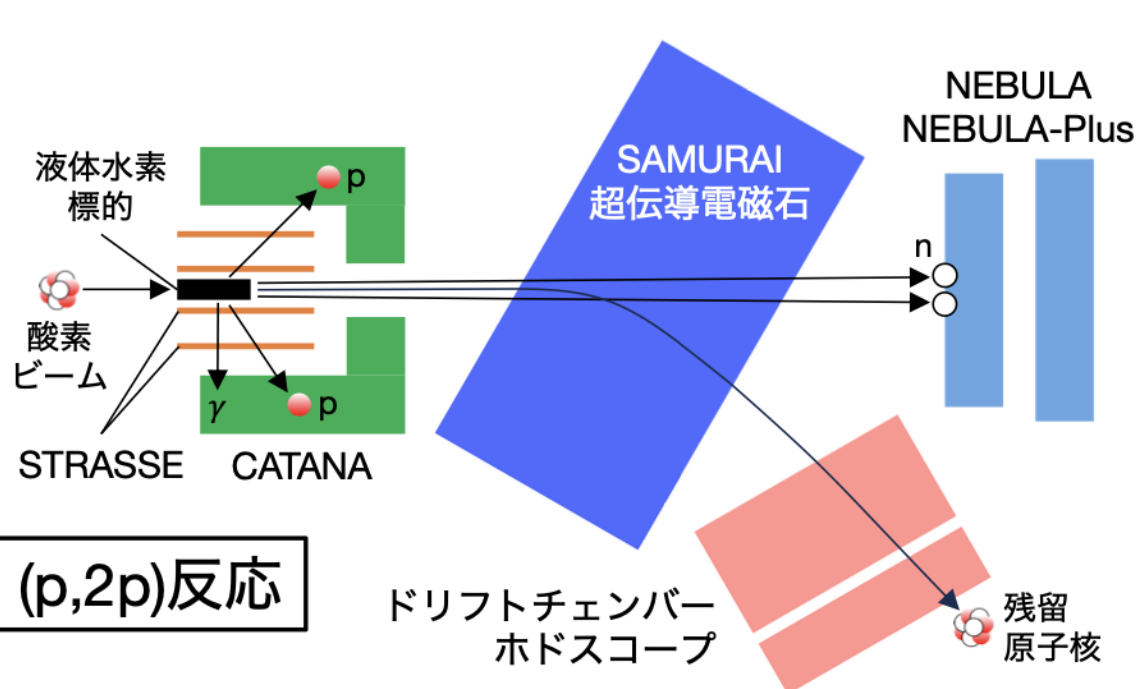
- ・ 実験に影響すると思われるPMTを選別

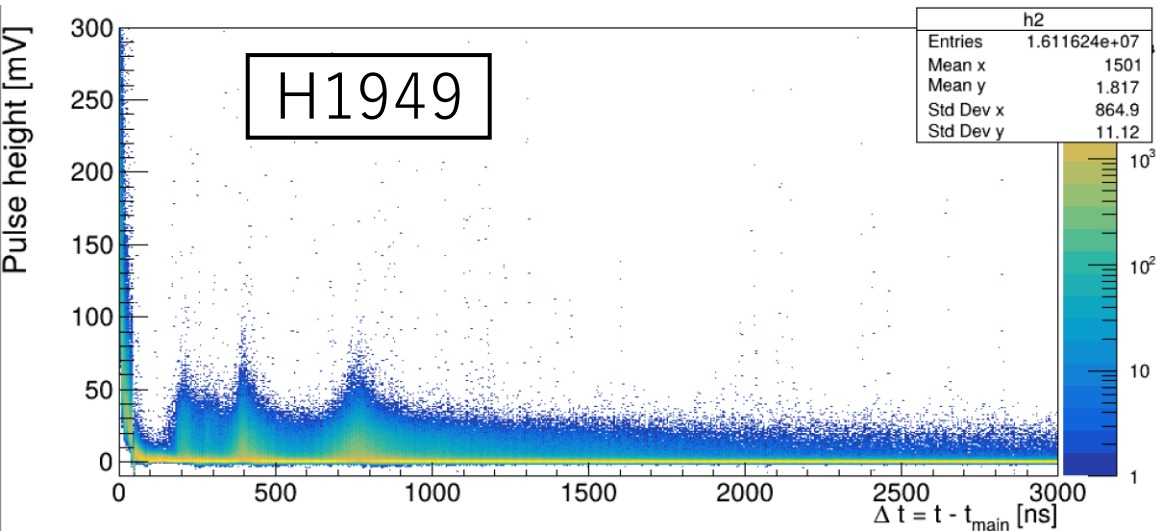
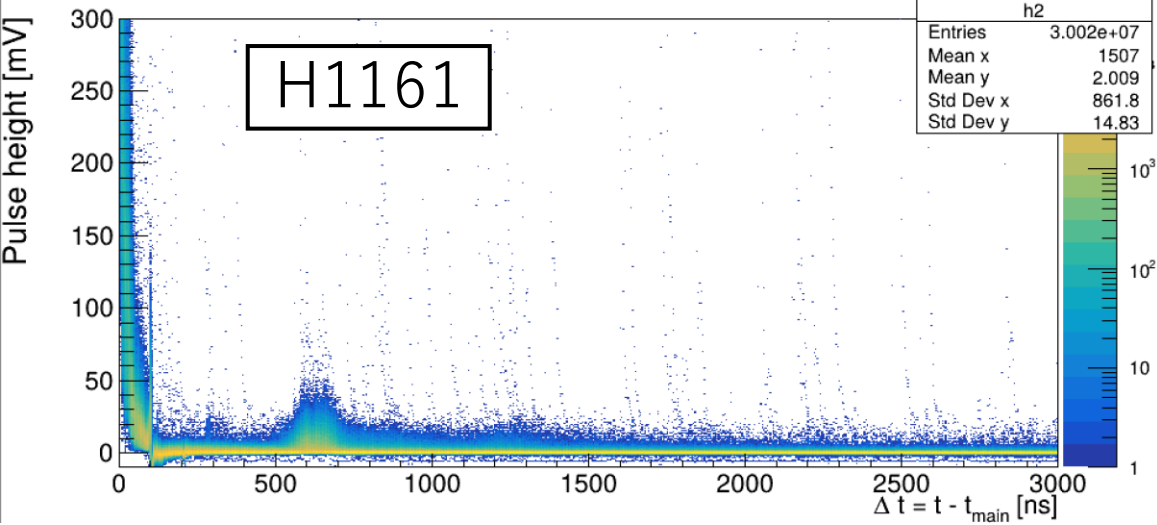
Back up

SAMURAI-79実験

目的： $^{15}\text{N}^*$, $^{15}\text{O}^*$, $^{16}\text{O}^*$ の脱励起過程の測定

→励起エネルギーごとの γ 線・中性子エネルギー分布を測定





	H1161	H1949
ダイノード構造	ラインフォーカス	ラインフォーカス
ダイノード段数	12	12
トランジットタイム	48ns	28ns
印加電圧	1500V	2500V

H1161

VOLTAGE DISTRIBUTION RATIO AND SUPPLY VOLTAGE

Electrodes	K	G	Dy1	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	Dy11	Dy12	P
Ratio	4	0	1	1.4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Supply voltage: 1500 V, K: Cathode, Dy: Dynode, P: Anode, G: Grid

* The shield pin should be connected to Dy5.

H1949

VOLTAGE DISTRIBUTION RATIO AND SUPPLY VOLTAGE

Electrodes	K	G	Dy1	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	Dy11	Dy12	P
Ratio	1.2	2.8	1.2	1.8	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5	3	2.5	

Supply voltage: 2500 V, K: Cathode, Dy: Dynode, P: Anode, G: Grid

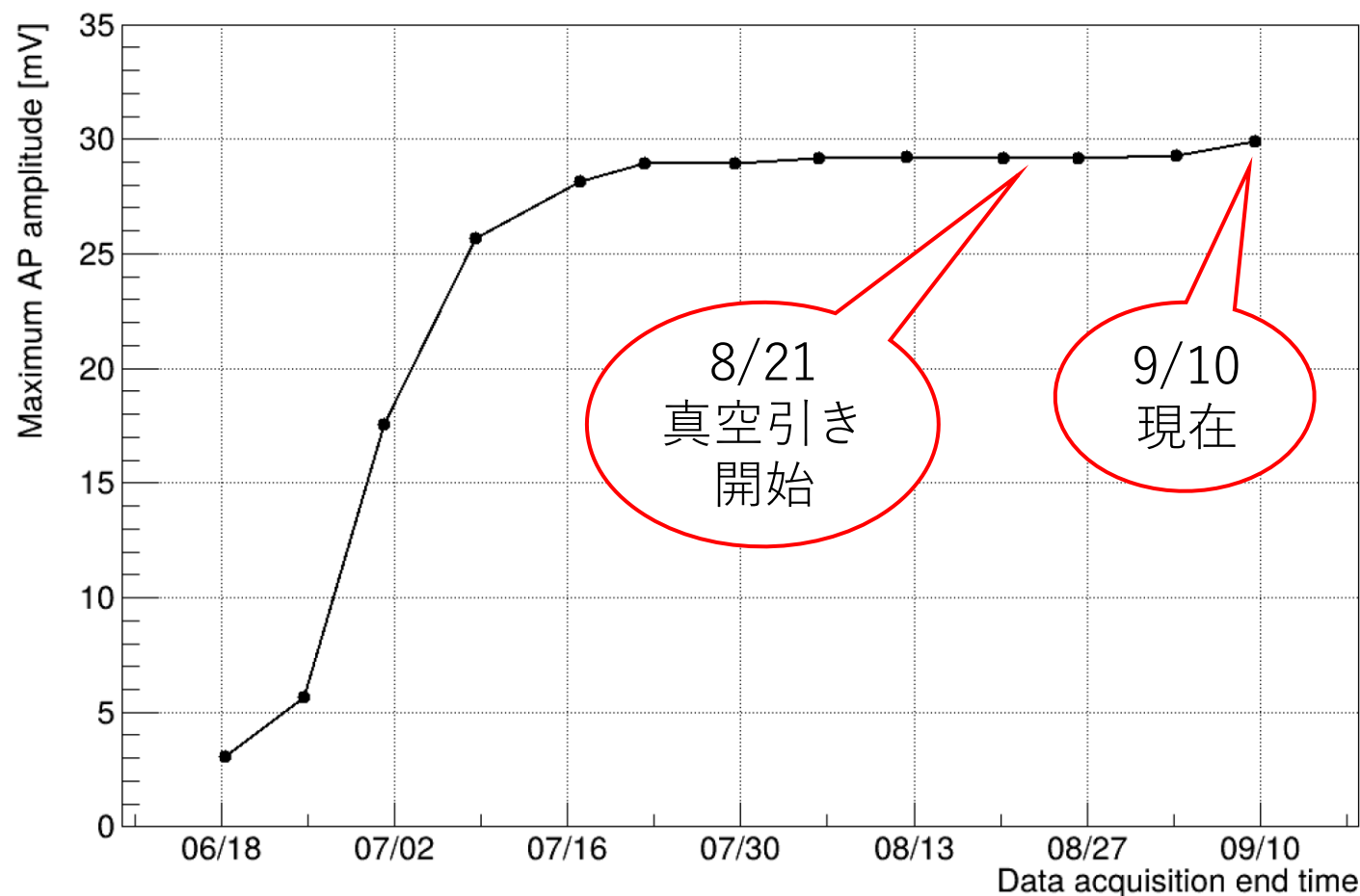
アフターパルスの経時変化②

- ・各点：平均波形におけるAPの最大波高
(MP から300 – 1500 ns の範囲)
- ・約1週間おきにプロット
- ・約1ヶ月後からAP波高の増加は
ほとんど見られない

目的：真空引きによって改善されるか

→ 真空引き開始 (8/21)

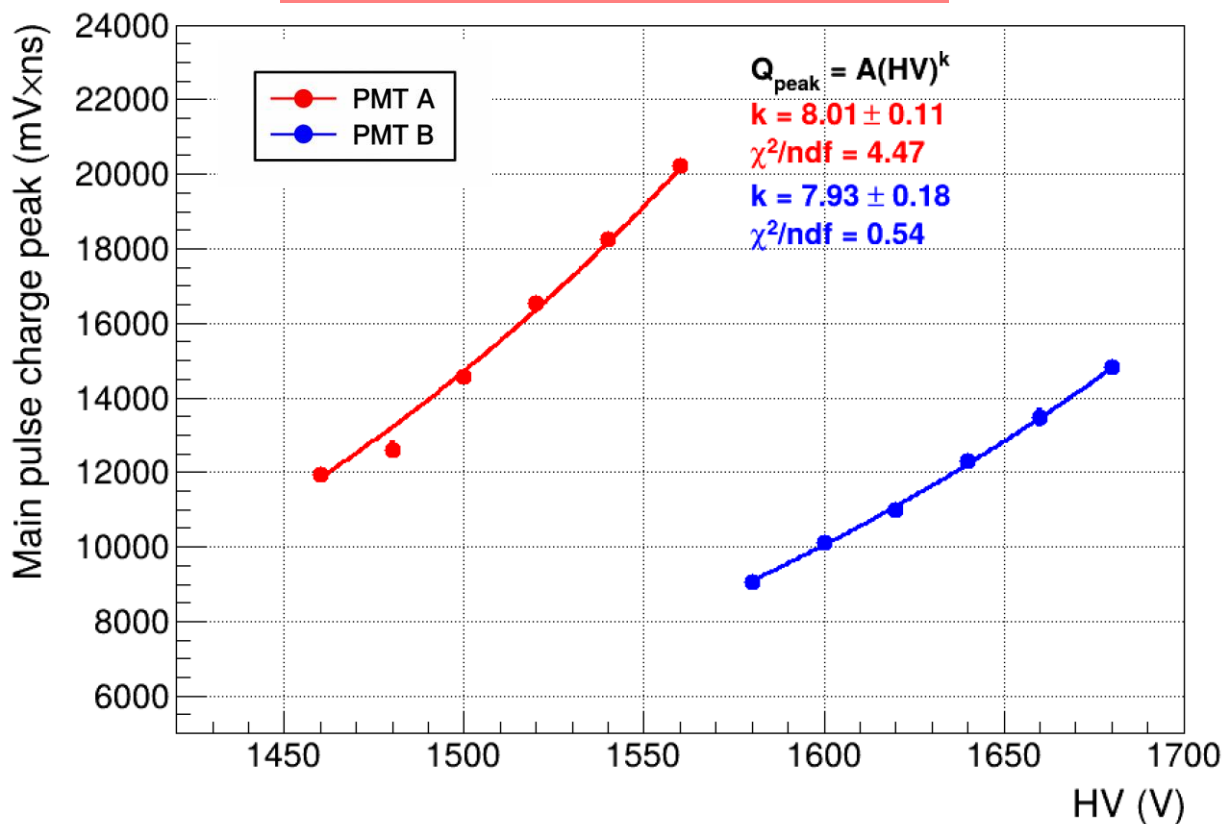
- ・真空度： 5.7×10^{-2} Pa
- ・真空容器にリークが考えられる



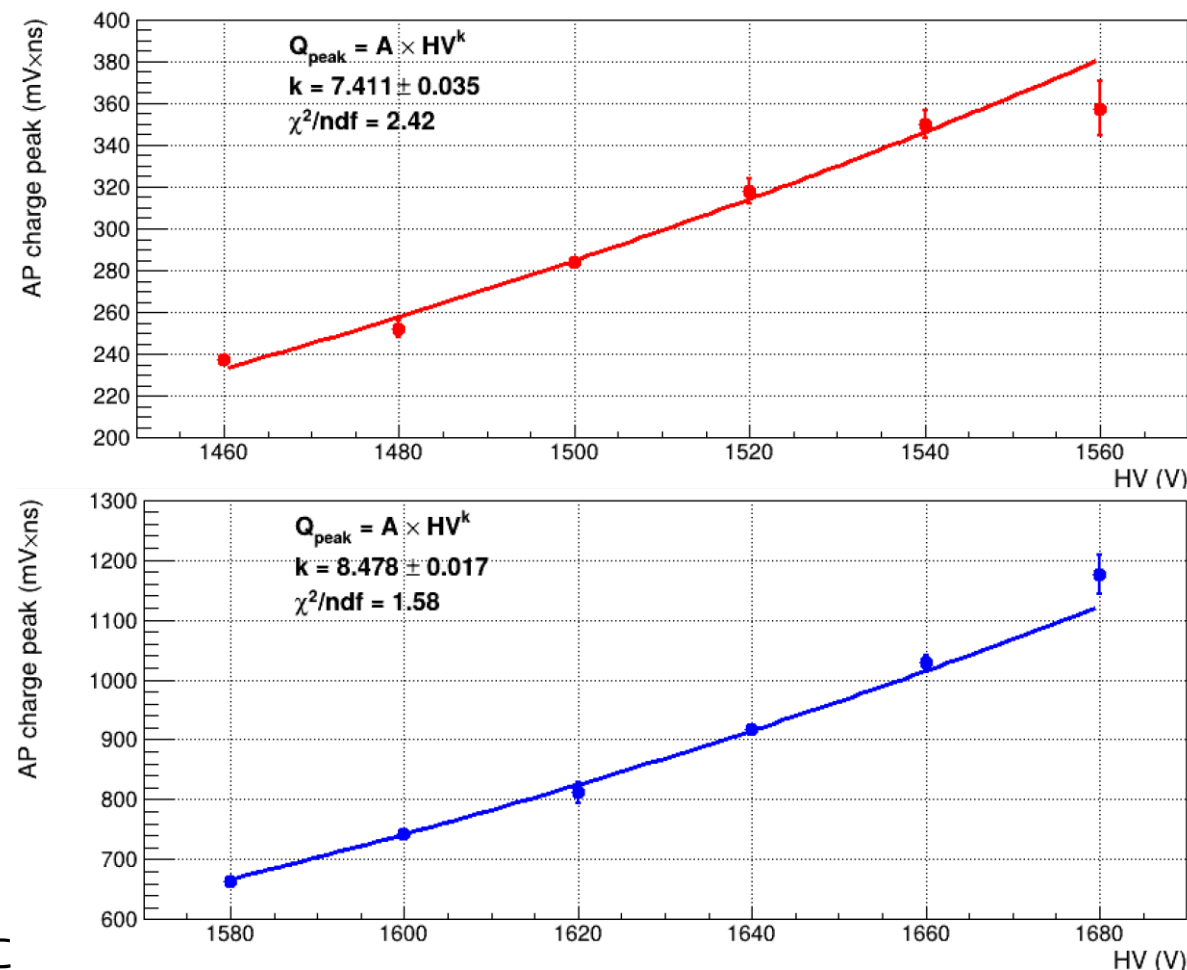
現状：十分な真空度でのAP評価には至っていない

→ リーク箇所を特定・改善後、真空引きによるAPの変化を再評価

MPのHV依存性



APのHV依存性

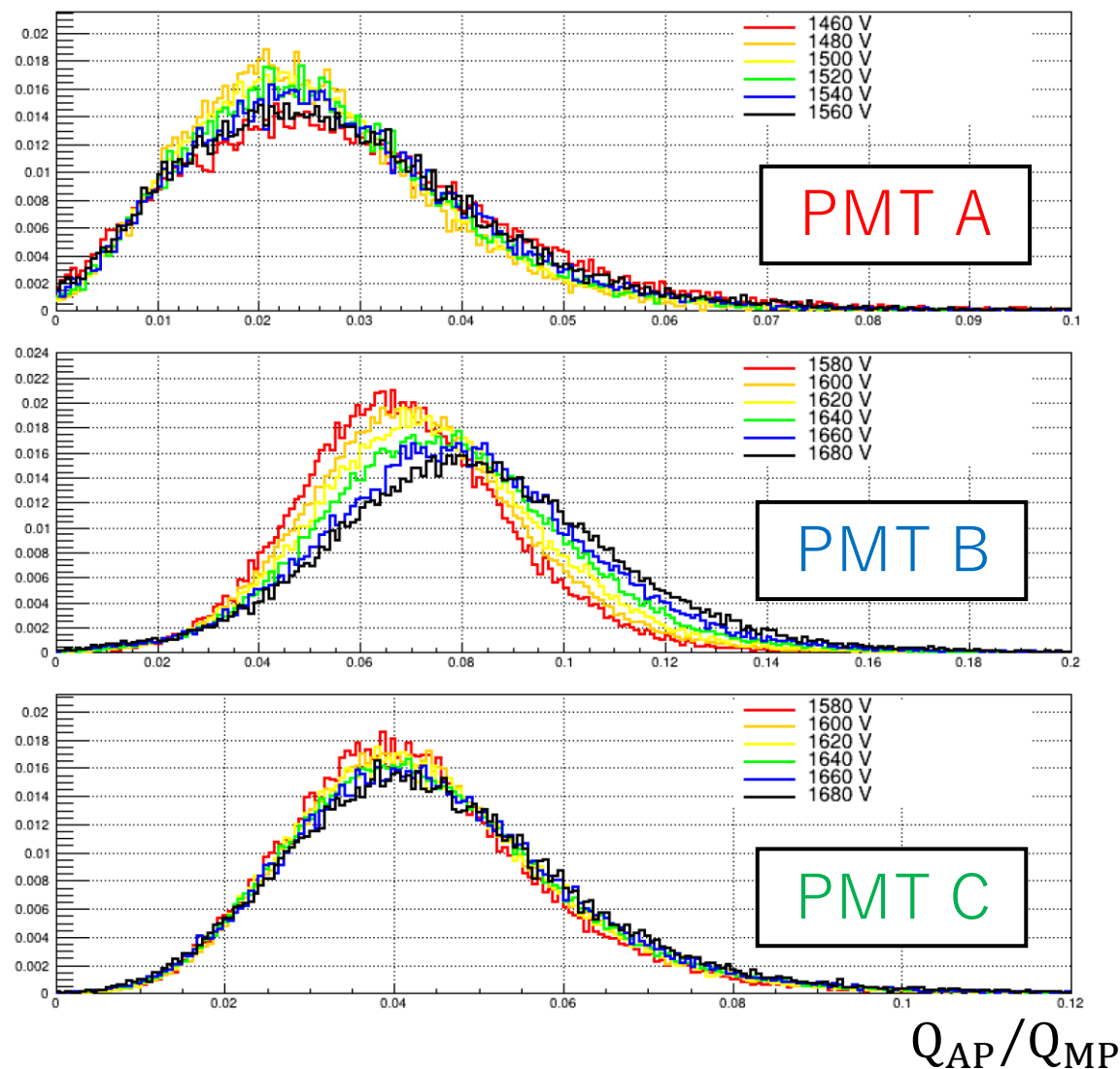


APチャージはMPと近いHV依存性を示した

→ APチャージはPMTゲインと概ね同様のHV依存性を示した

MPに対するAPチャージの割合

Normalized events



各分布をガウシアンフィットし、求めた最頻値をプロット

