

ハイパーカミオカンデ実験の エレクトロニクスR&Dに向けた 50 cm PMT標準波形の作成

M1 Ryota Kaneshima
ICRR, Kamioka Observatory
ICEPP シンポジウム @ 志賀高原
2022/02/21

Contents

1. Introduction

- 1.1 ハイパーカミオカンデ (HK)
- 1.2 HKが目指す物理
- 1.3 自分の研究テーマ
- 1.4 HKエレキの役目
- 1.5 HKエレキの構成

2. デジタイザーの性能評価

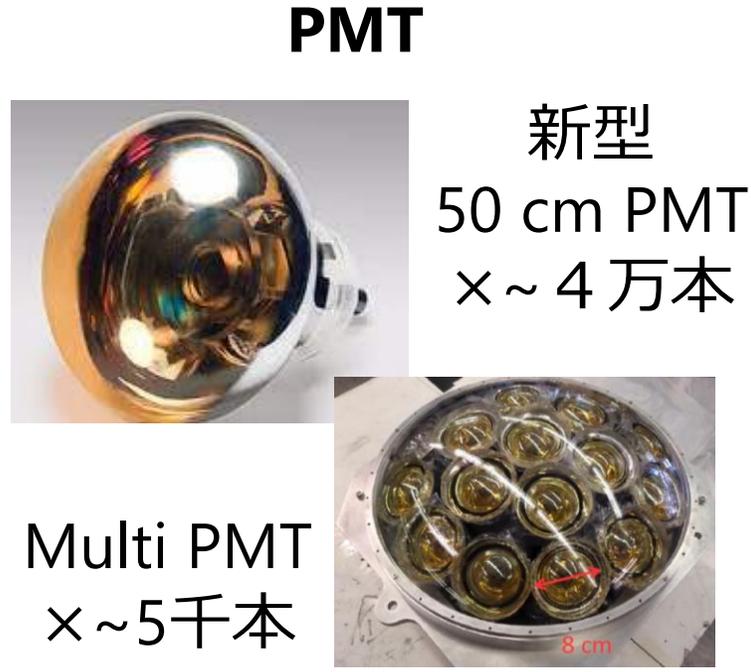
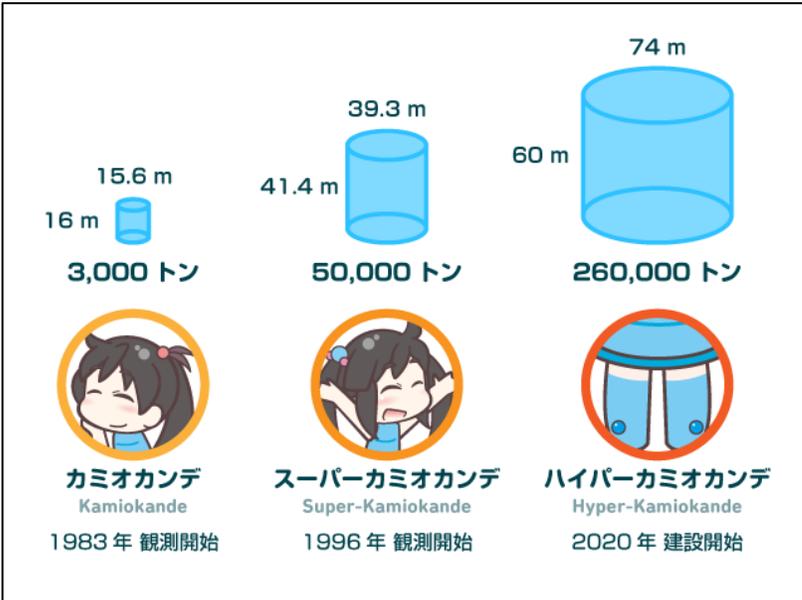
- 2.1 要求性能
- 2.2 性能評価の手法
- 2.3 B&L PMT測定
- 2.4 PMT波形解析
- 2.5 PMT標準波形
- 2.6 標準波形出力試験
- 2.7 今後の予定

1. Introduction

1.1 ハイパーカミオカンデ (HK)

- 2027年運用開始予定の大型水チェレンコフ型検出器
- SKと検出原理は同じ：数万本のPMTで荷電粒子のチェレンコフ光を観測

SKと何が違うのか？



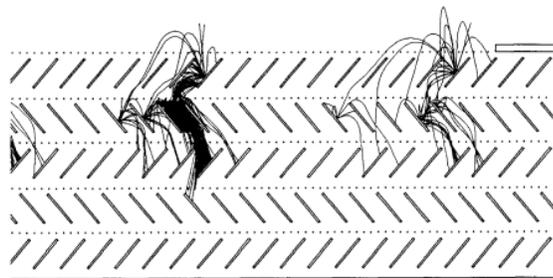
補足① -SK-PMT から HK-PMT になって何が変わったか？ -

構造

Super-K PMT R3600

(浜松ホトニクス社製)

ベネシアンブラインド型



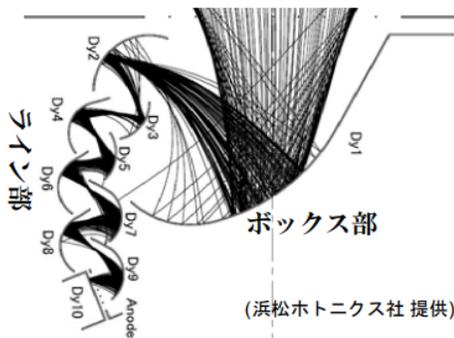
NIM A329 (1993) 299-313

(一部)

Hyper-K PMT R12860

(浜松ホトニクス社製)

ボックスライン型



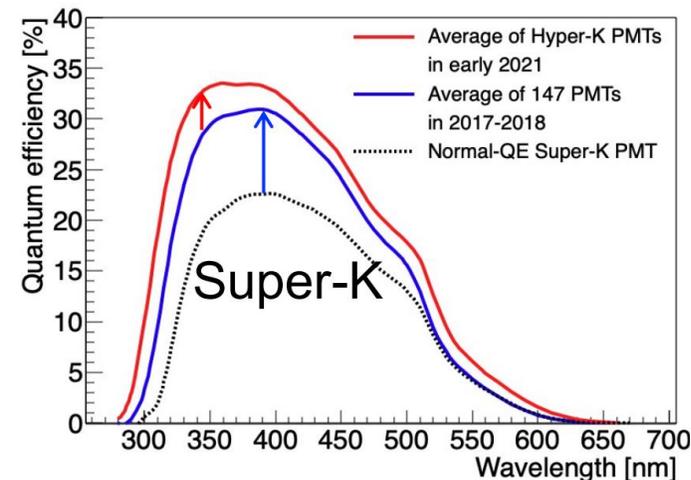
(浜松ホトニクス社 提供)

Peak QE

33.5% ← 30.1% ← 22.6%

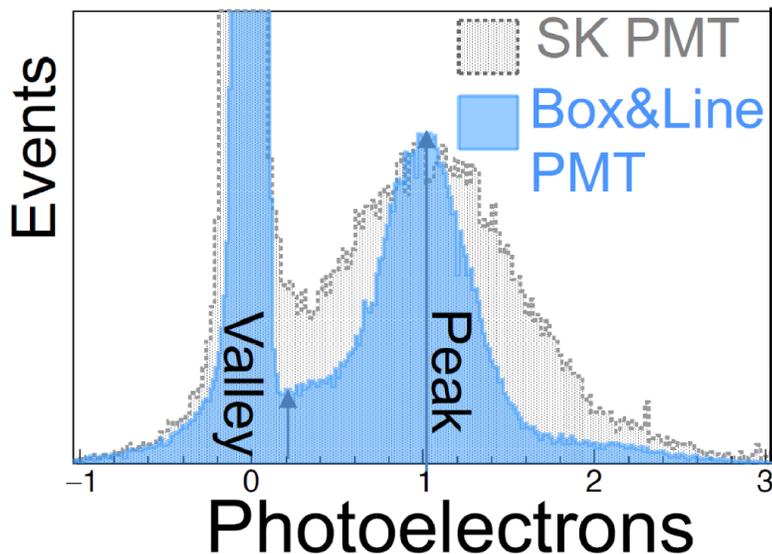
量子効率

22.6 %
→ 33.5 %



電荷分解能

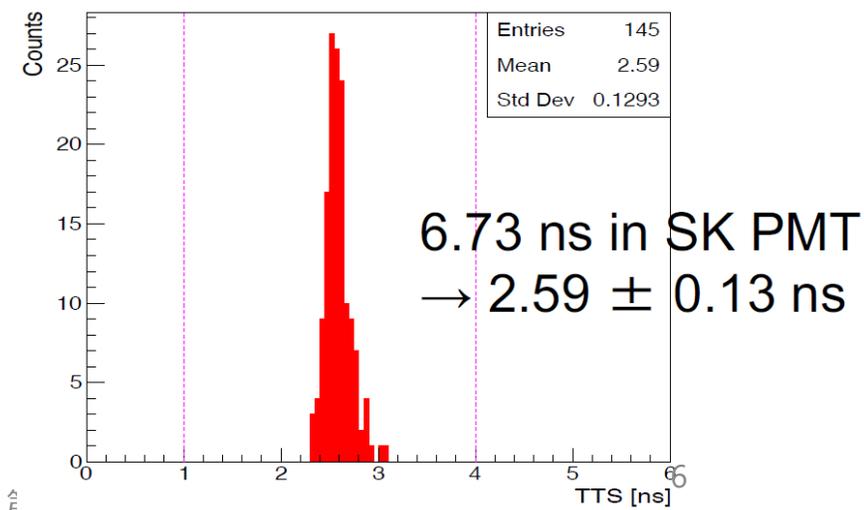
54 %
→ 27 %



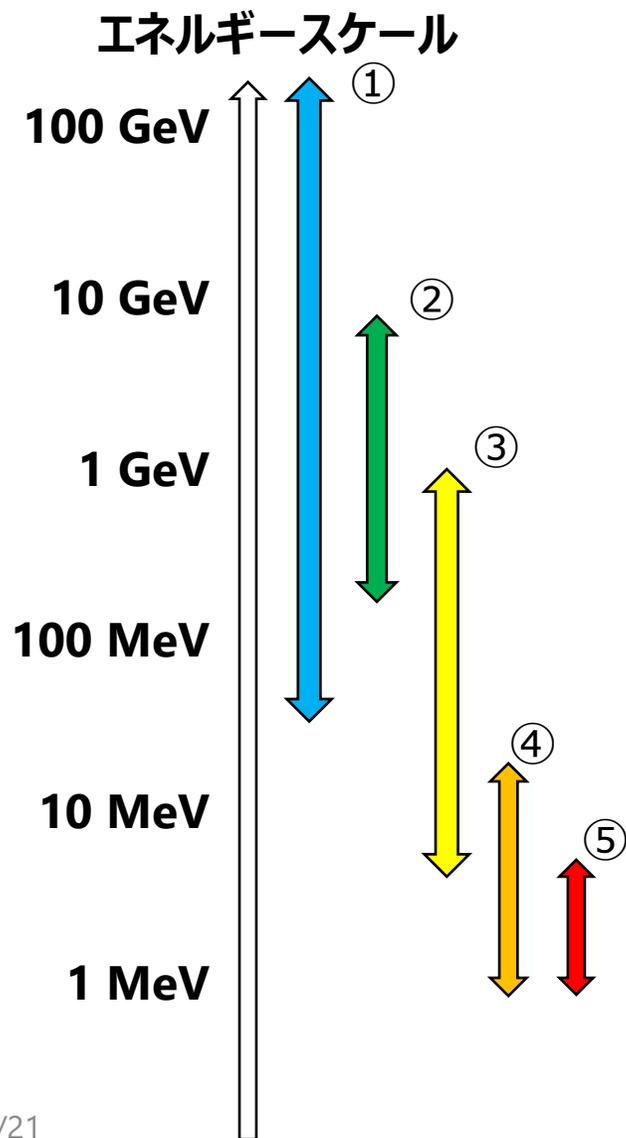
2022/2/21

時間分解能

6.73 ns
→ 2.59 ns



1.3 HKが目指す物理



1. 大気ニュートリノ
→ 質量階層性
2. 加速器ニュートリノ
→ CP対称性
3. 陽子崩壊
→ 大統一理論
4. 超新星爆発, 背景ニュートリノ
→ ニュートリノ天文学
5. 太陽ニュートリノ
→ 恒星の燃焼

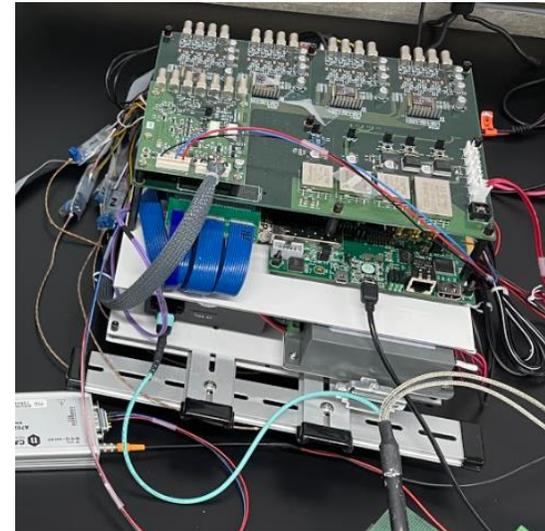
素粒子

宇宙

1.4 自分の研究テーマ

“HKエレキの性能評価”
における

“50 cm B&L PMTの測定” + “ディジタイザーの性能評価”



1.5 HKエレキの役目

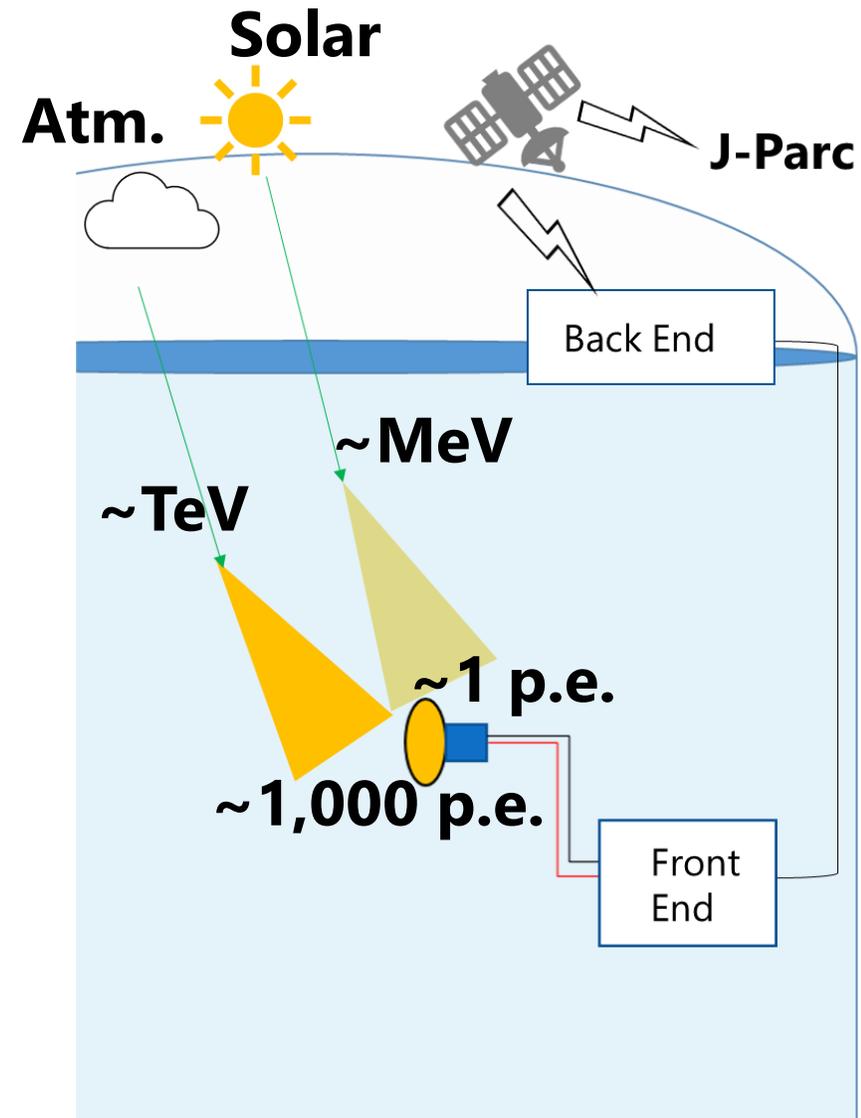
• “PMTの信号を記録する。”

- 広いダイナミックレンジの電荷を正確に
- 時間情報も正確に
- デジタイズのトリガーは自分でかけてね
- 24時間365日10年間以上壊れずに
- Supernova が起きても漏らさずに。
- HVの供給もよろしく。

- 全部のモジュールで同期していて
- GPSでJ-Parcからのニュートリノビームをとれるように、イベントの時間を正確に。

フロント
エンド
エレキ
(水中)

バック
エンド
エレキ
(タンク上)

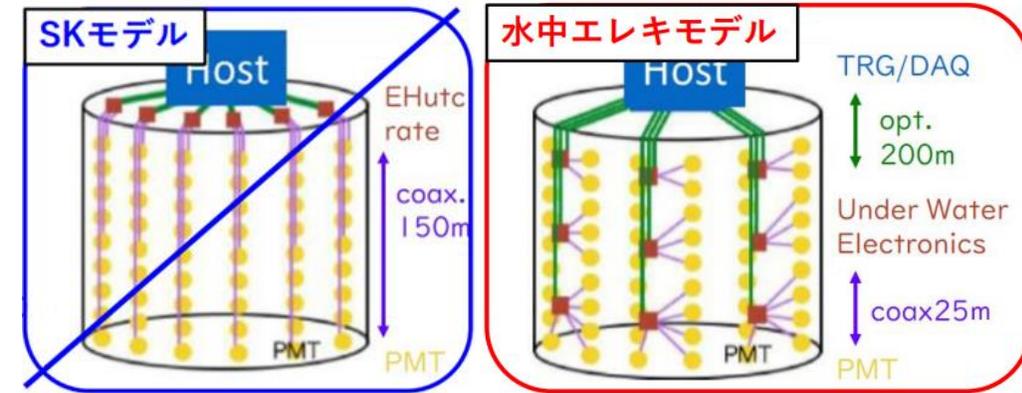


補足② -なぜ水中にエレキを設置するのか-

- SKではタンク上部にエレキハットがある。

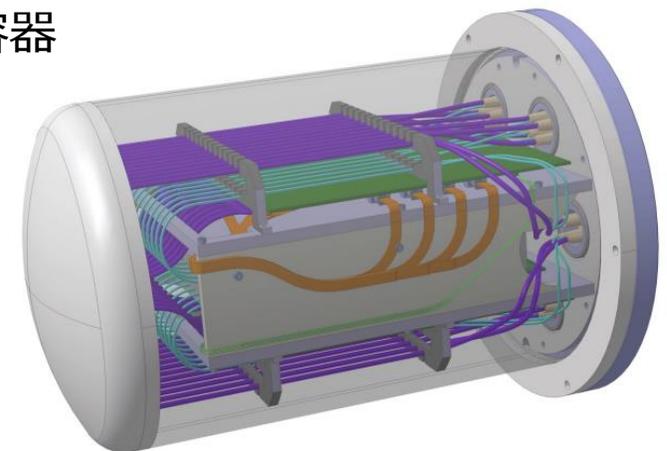
SKと同じ構造にする際の問題点

- HKはタンクが深く、ケーブルの長さが100mになる。
 - 信号減衰
 - ケーブルの重さに耐える構造が必要
 - タンク上に数十mのケーブルを置くスペースが必要
- 水中に設置することでケーブル長を30mに短くできる。

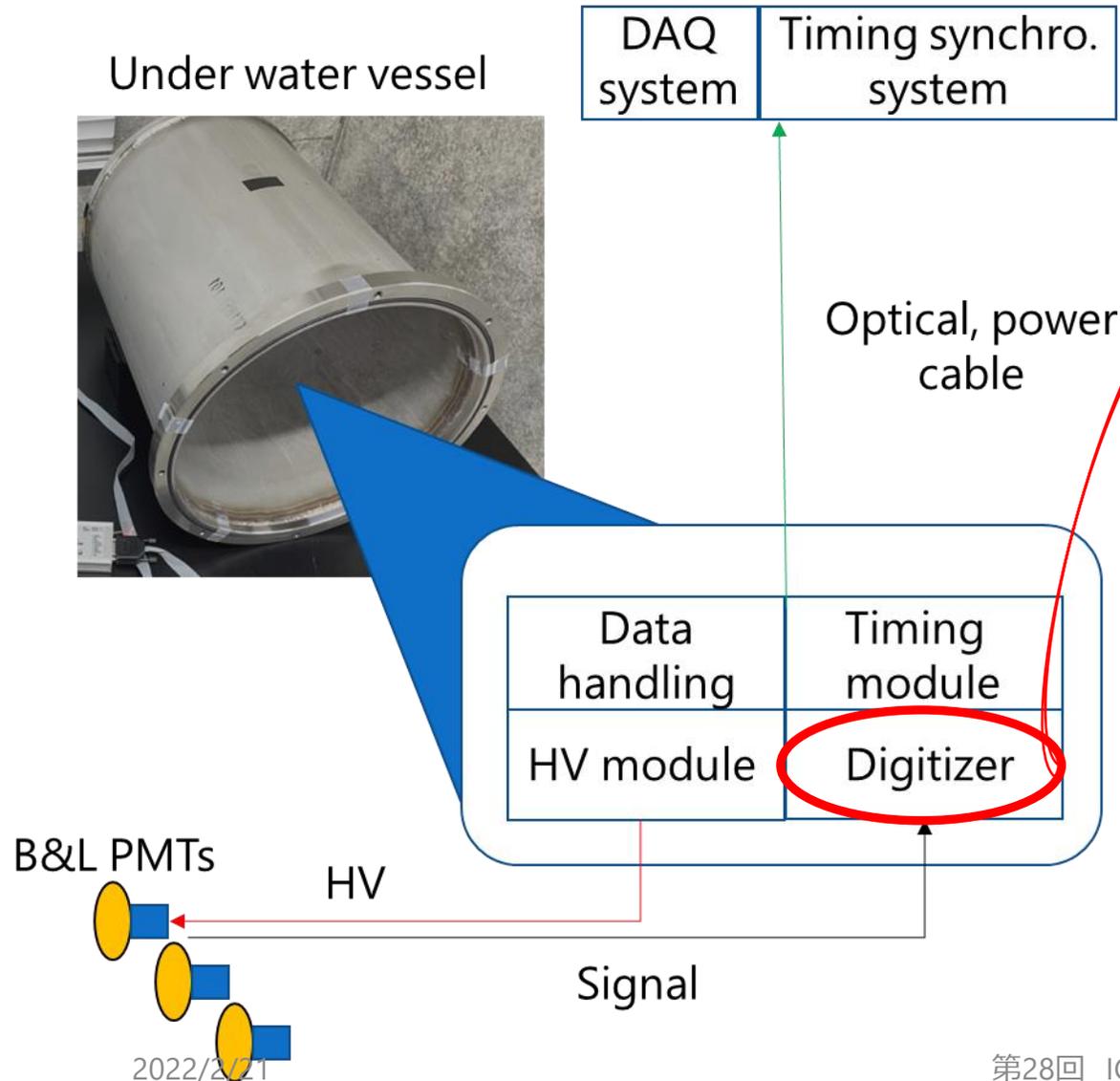


エレキを水中に設置する = 大きなチャレンジ

- 10年間以上メンテナンスができない → 故障率の保証
- タンク中に熱源ができることによる水流への影響
- 耐水設計



1.6 HKエレキの構成

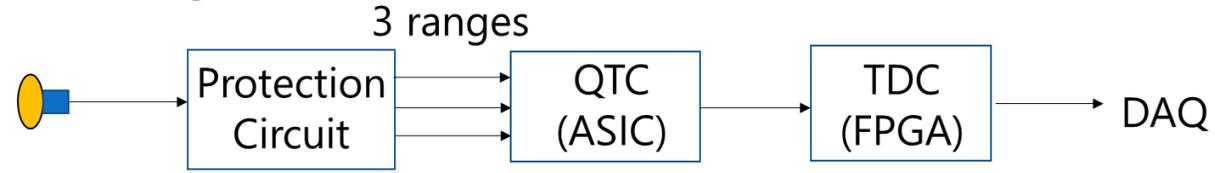


- 各国,大学がcomponentごとに分担して開発を進めている。
- デジタイザーに関しては3種類開発中
 - QTC + TDC digitizer 
 - SKエレキと同じ構成→耐久性の実績あり
 - Chipの開発は済
 - Discrete digitizer 
 - 時間と電荷を別々のpathで測定
 - HKROC (Waveform digitizer) 
 - 波形をsamplingして電荷,時間を測定

補足③ – QTC + TDC digitizer –



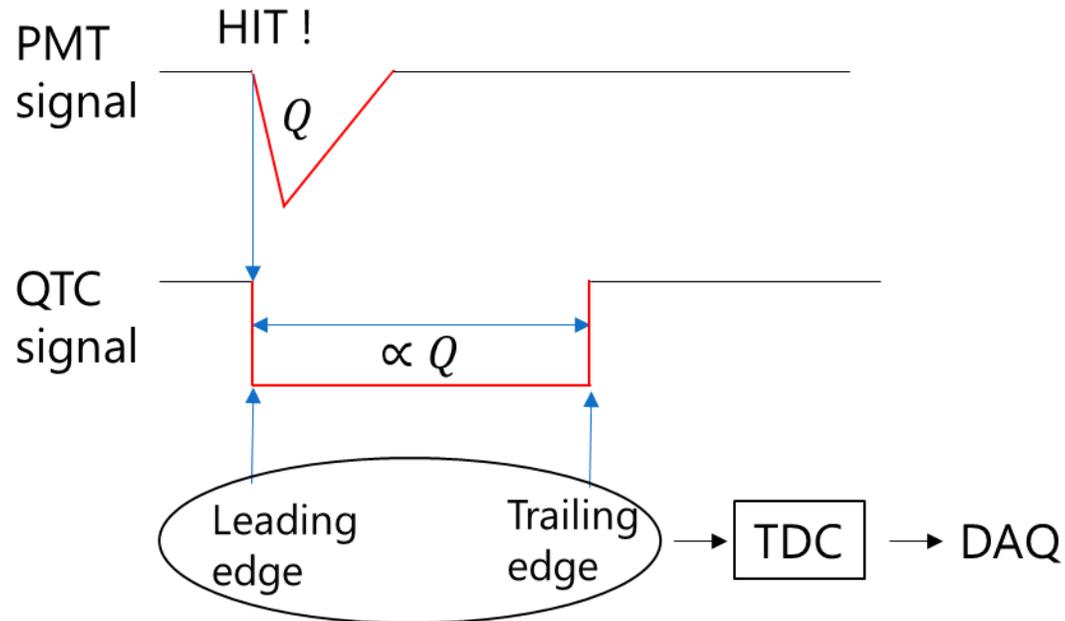
Digitizer



- QTC (Charge to Time Converter)
 - Hit 時間を矩形波の立ち上がり時間に変換
 - 電荷を矩形波長に変換 **Encoder**

- TDC (Time to Digital Converter)
 - 矩形波の立ち上がり時間をHit時間に変換
 - 矩形波長を電荷値に変換 **Decoder**

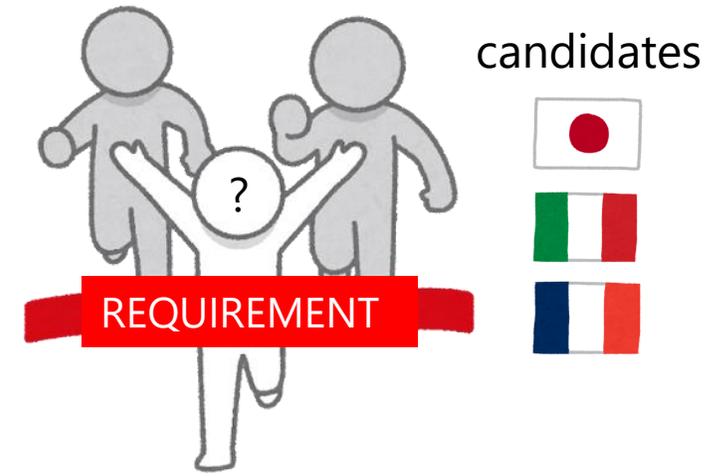
- Protection circuit
 - HK PMTの波高がSK PMTの2倍になり、QTC保護のために改良版が必要になった。



2. デジタルタイザーの性能評価

2.1 要求性能

- 来年度にディジタイザーの選定を行う。
 - 一律に要求性能を設定
 - 評価試験をそれぞれの環境(国)で実施する。
→ **同じ条件**でデジタイズを比較する必要がある。



主要要求項目

1 p.e. = 1.9 pC (1/6 p.e. = 0.32 pC) 換算

item	requirement
Trigger	Self triggering for each channel
Discrimination threshold	1/6 pe (0.32 pC)
Signal reflection	1 % when 25m of a 50 ohm cable is connected
Noise hit rate	< 1 Hz with 1/6 p.e.
Channel dead time	< 1 us
Maximum hit rate	> 1 MHz

item	requirement
Charge dynamic range	1 p.e. to 1,250 p.e.
Charge resolution	0.19 pC for <1 pC signal, 0.5% for > 19 pC signal
Charge linearity	< 1% from 1 p.e. to 1,250 p.e.
Timing LSB	< 0.5 ns
Channel dead time	<1 us
Timing resolution	RMS < 0.3 ns @ 1.9 pC, RMS < 0.2 ns for > 9.5 pC

2.2 性能評価の手法

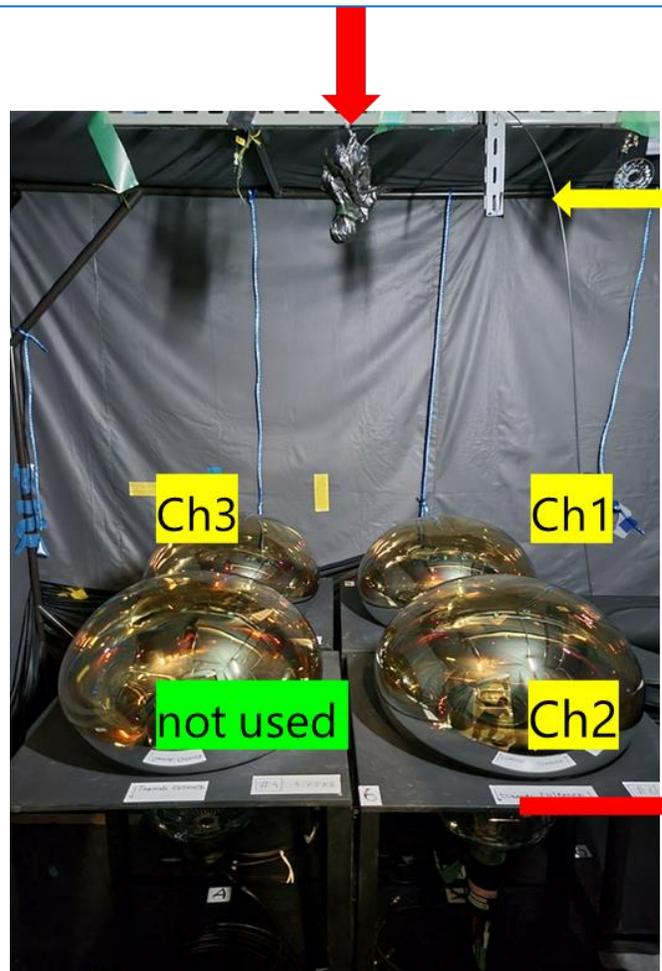
性能評価のインプットは何が適切か？

- CTG (Charge Timing Generator) : パルス発生器
 - 扱いやすいが、完全にPMT-likeの波形ではない
 - 製造していた会社がなくなった。(他国で使えない)
- 実際のPMTと接続
 - 最もrealisticな波形が得られるが、
 - 出力波形にばらつきがある。PMT個体差もある。各開発環境を画一化するのが難しい
- 任意波形発生器 (function generator)
 - 性能が担保された装置によって実際のPMTの波形をどこでも再現可能

Box & Line PMT の出力波形をオシロで測定して標準波形を作成
→標準波形データを共有して同じ条件の評価を可能にする。

2.3 B&L PMT 測定

光源 : Diffuser Ball
光量を抑えるために黒いビニール袋をかぶせている。



半導体レーザ装置
Hamamatsu LD



Light input

Sync Out
(Trigger for data taking)

Signal input
RTA4004 Oscillo



神岡坑内実験室で半年間PMTの測定を実施

- 暗室にPMTを並べ、
- 頭上に光源(LD ($\lambda = 405.6\text{nm}$)+diffuser ball) を設置
- 光量、supply HVを変えながらPMTの波形をオシロで測定
 - 光量 (Charge) : 1 pC ~ 10,000 pC
 - HV : nominal - 200 V ~ nominal + 50 V

備忘録

- 最初の3か月間はノイズ落としに苦労した。
- 原因は半導体レーザ装置の電氣的なノイズだと突き止めた。
- 装置を暗室外に設置することで解決！

2.4 PMT波形解析

- 測定した波形データを解析
 - 最大波高, 積分電荷, 閾値タイミング, プレ/レイトパルス
 - 電荷毎に波形を平均化して標準波形作成

モチベーション

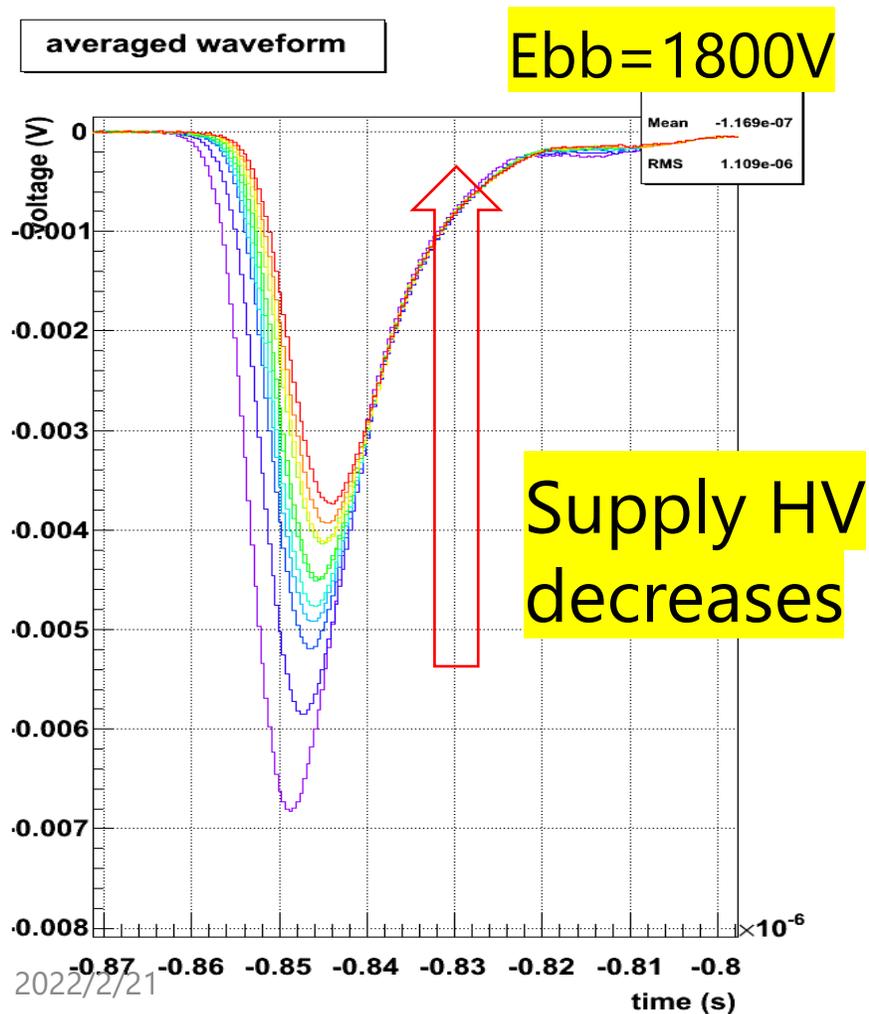
- 標準波形作成 & エレキR&D のためのPMT性能評価
 - **HV依存性** : 要求性能は1光電子を基準に定めているため、ゲインの評価（決定）は必須
 - **最大波高vs電荷** : 各電荷rangeでの標準波形を用意するために必要
 - ***Ebb依存性** : PMTの個体差を確認する（“標準”波形の担保）
 - **プレパルス** : 時間測定精度に関わる。
 - **レイトパルス** : 電荷測定精度に関わる。
 - **磁場依存性** : 磁場の補正ができていることを確認する。

*Ebb : メーカーが決められている規定のHV、
gain = 1×10^7 になるように合わせている。

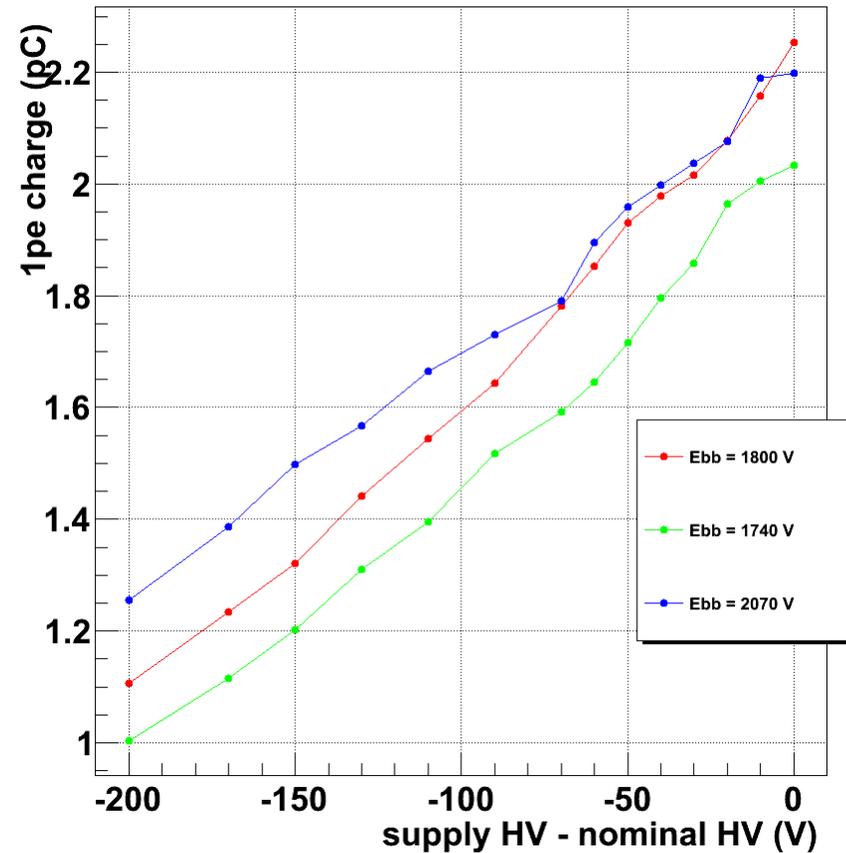
HV 依存性

- HVを下げていき、1光電子相当の信号の変化を確認

- Nominal HV (Ebb)ではゲインが規定の 1×10^7 (1 p.e. = 1.6 pC)よりも大きくなっている。



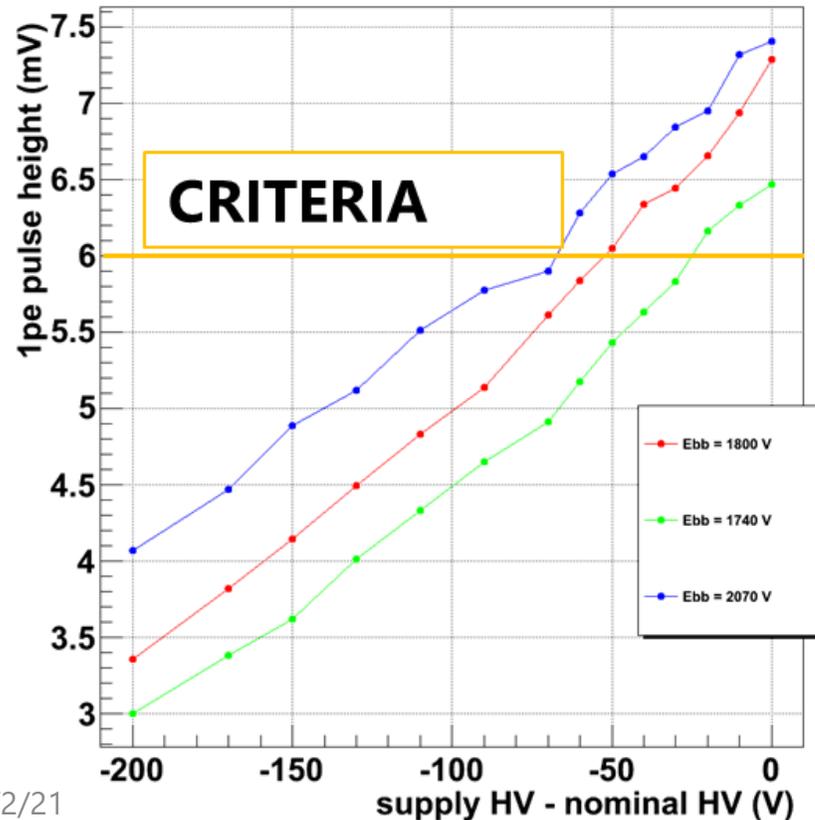
1 p.e. charge vs HV



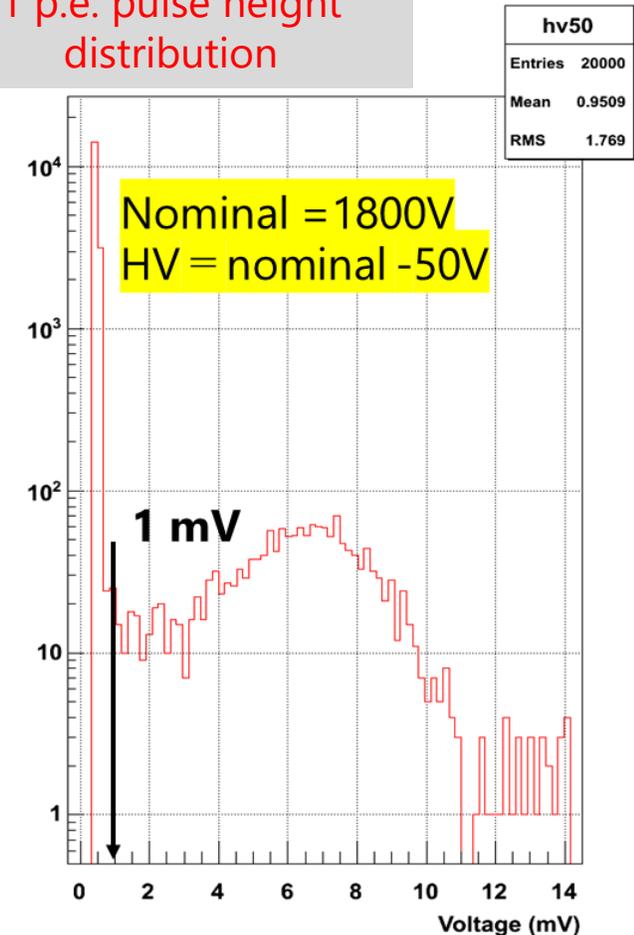
HV 依存性

- 1 p.e. = 6 mV になるHVに設定 (閾値への要求より)
- この時、ゲインは 1.18×10^7 (1 p.e. = ~ 1.9 pC)
- DAQ 閾値 : 1 mVが“良い”閾値であることを確認

1 p.e. pulse height vs HV

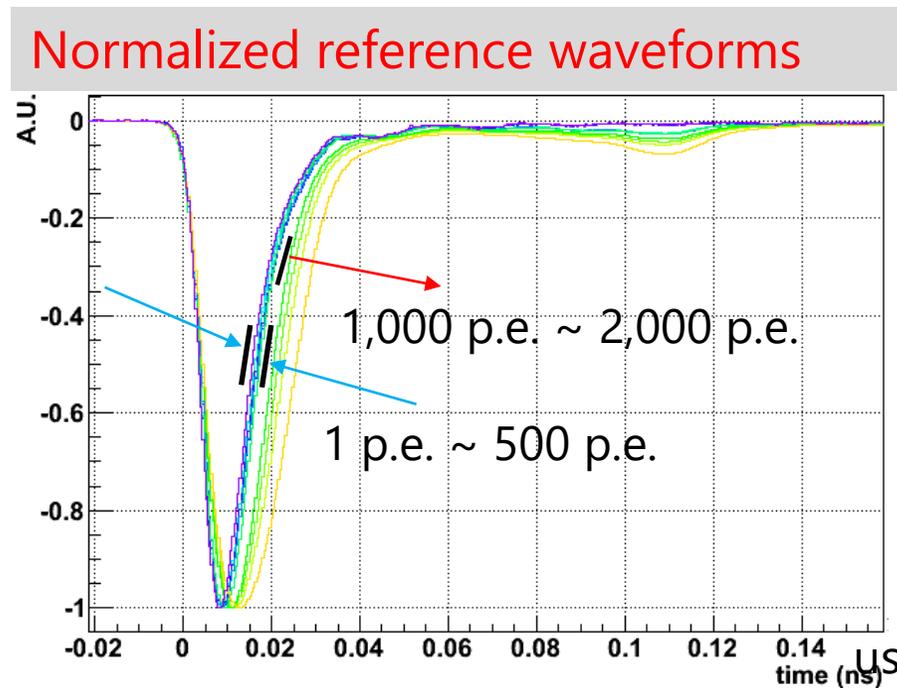


1 p.e. pulse height distribution

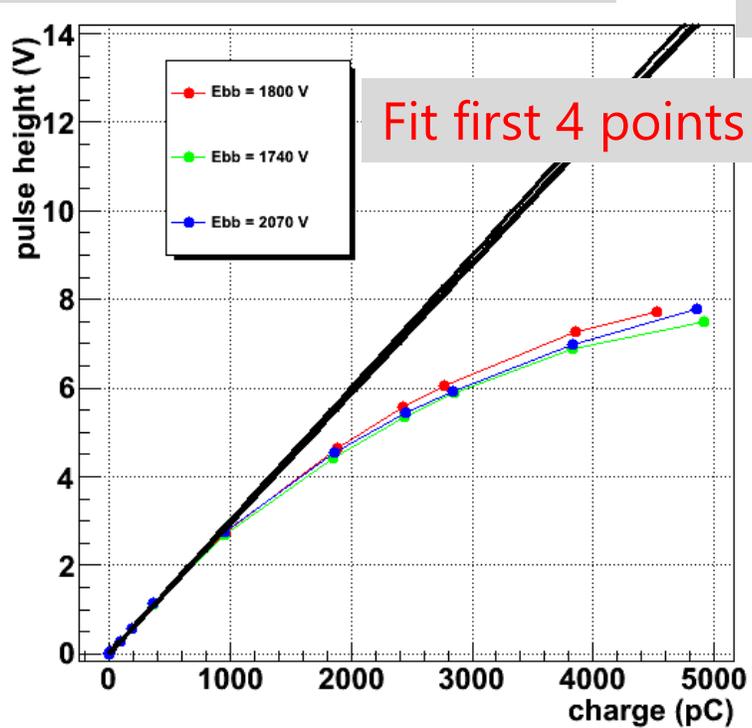


電荷 v.s. 最大波高

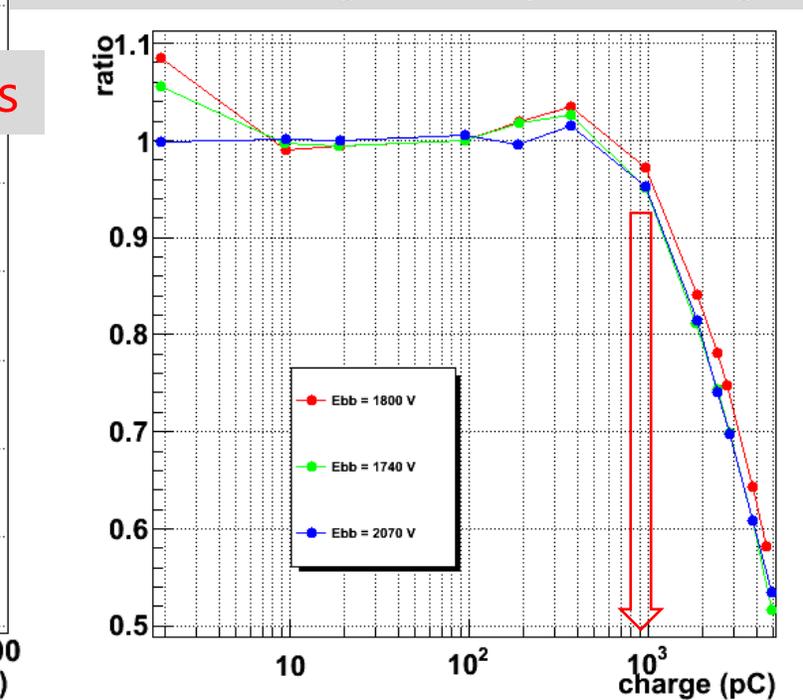
- 電荷毎に標準波形を作成して、PMTのlinearityを確認
- 1,000 pCから飽和し始めることを確認



Pulse height vs charge



Ratio of fitting to output voltage

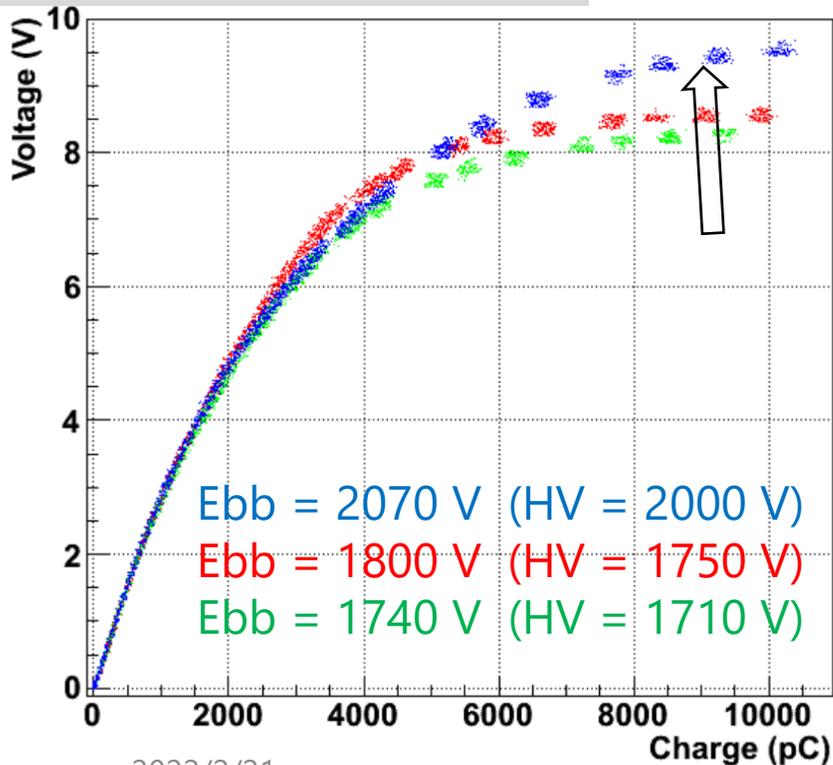


Ebb 依存性

- Ebb が高いほど最大出力電圧が高くなる。

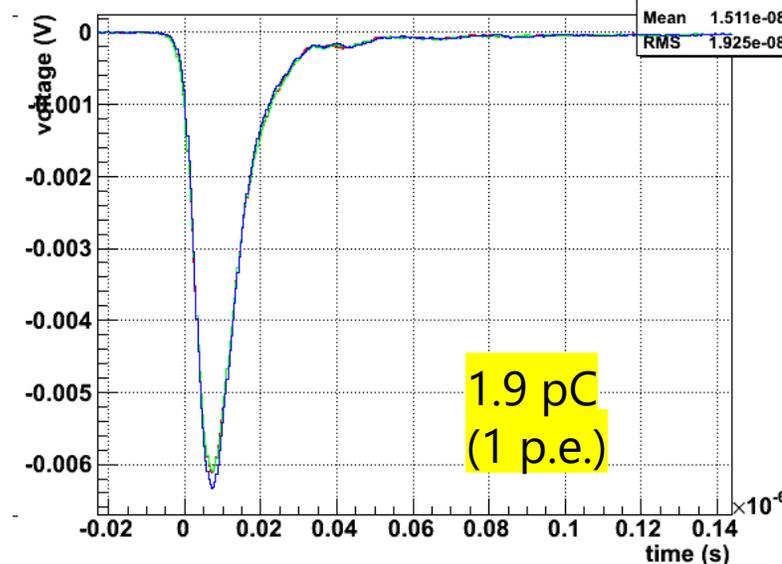
- 光量が小さいうちはEbbによる変化は小さい
- 光量が大きくなるにつれて、メインパルスの幅、レイトパルスのタイミングが変化してくる。

Pulse height vs charge



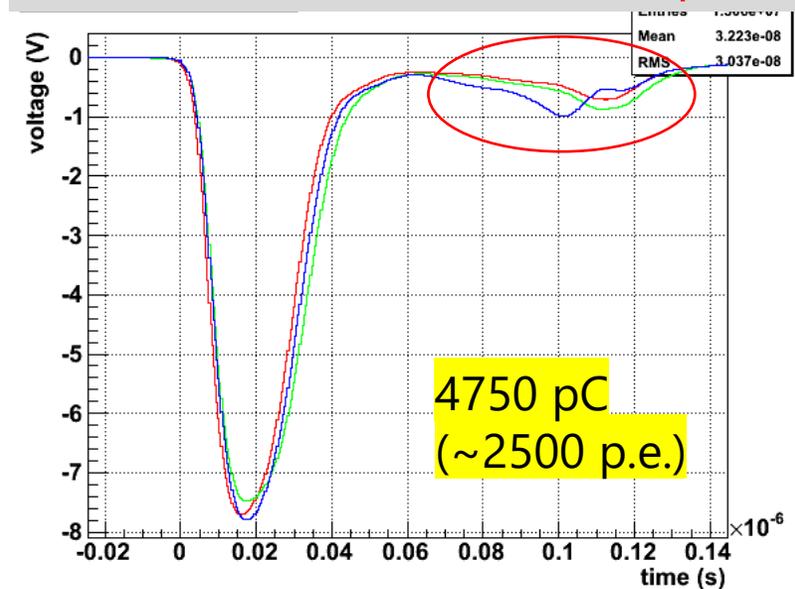
2022/2/21

Reference waveform (1p.e.)



第28回 ICEPP シンポジウム

Reference waveform (2500p.e.)

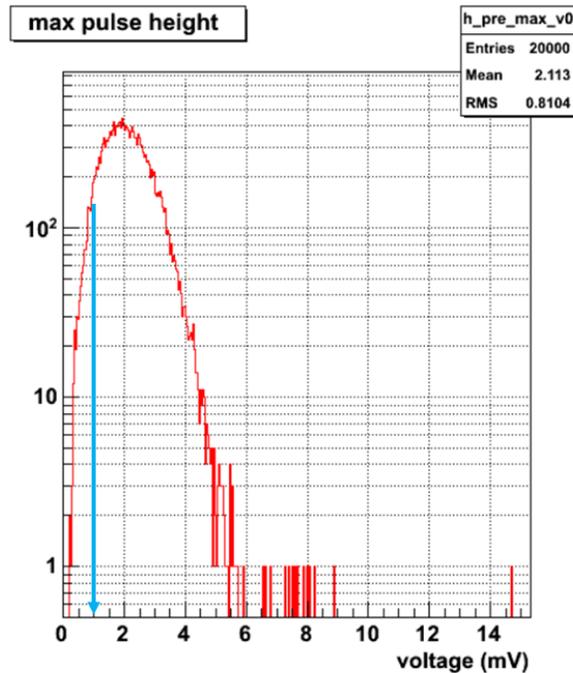
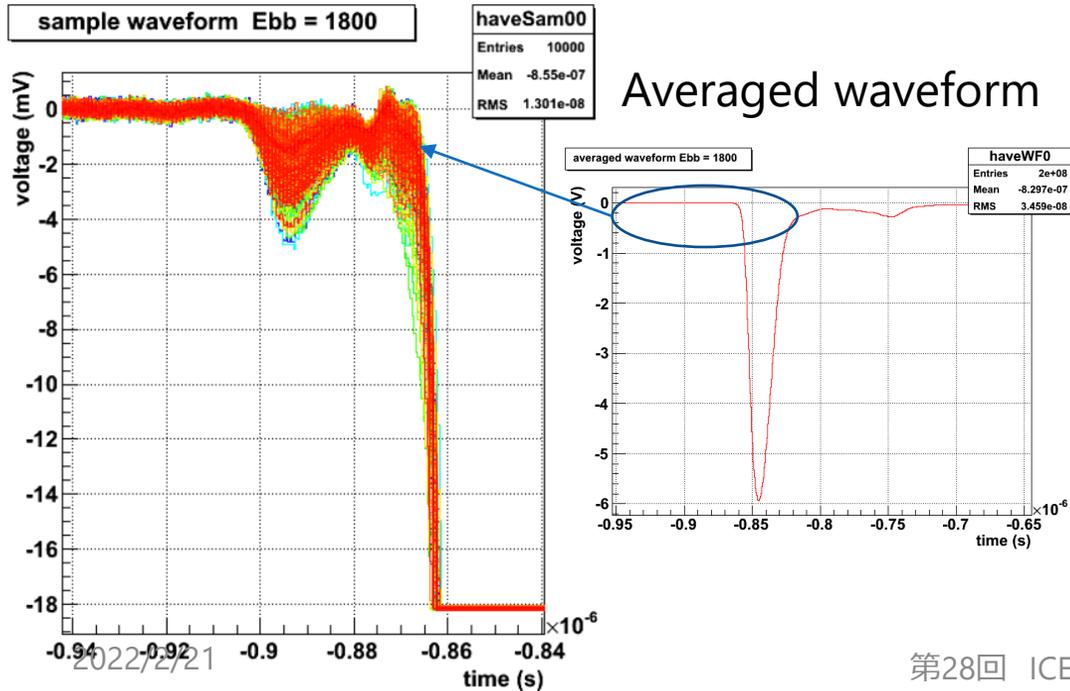


21

プレパルス

- プレパルスは確率的に発生する。→ 光量が大きければほぼ必ず発生する。
- 自分たちのオシロの分解能ではプレパルスとメインパルスと同時に測定できない
→ 小さいレンジにして測定
- 3つの光量でのプレパルスの確率を評価

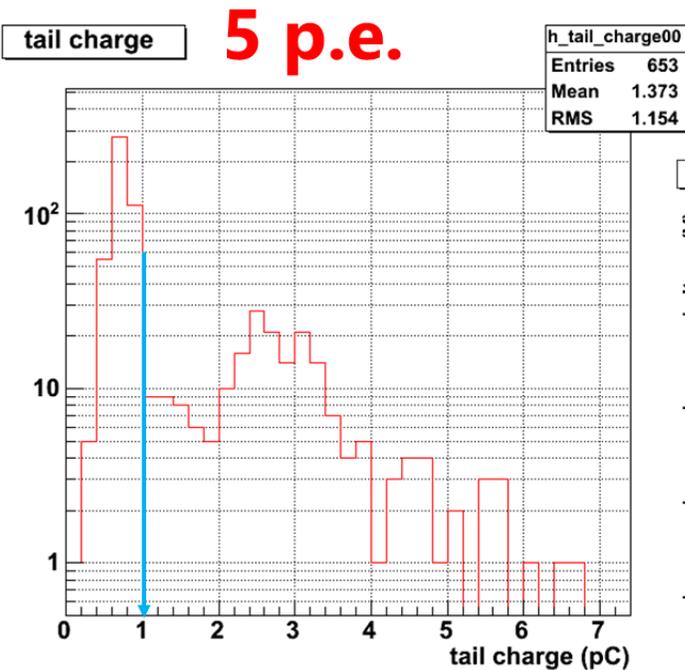
Event-by-event waveforms



Light Intensity	Probability (exceed 1mV threshold)
300p.e.	7.3 %
1500 p.e.	94 %
2500 p.e.	100 %

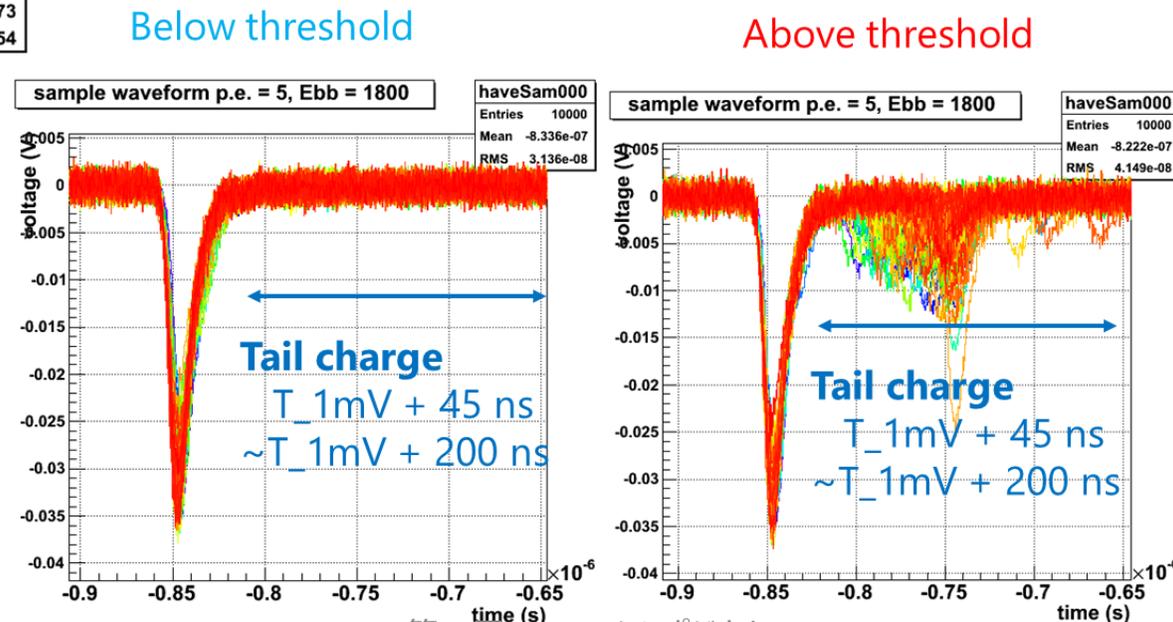
レイトパルス

- ある光量まではレイトパルスは確率的に発生する。 → 標準波形を作る際にはレイトパルスを除去する必要がある。
- “Tail charge” を定義してレイトパルスの閾値を設定
- 3つの光量でのレイトパルスの確率を評価



Threshold > 222 events/653 events

event by event sample waveform

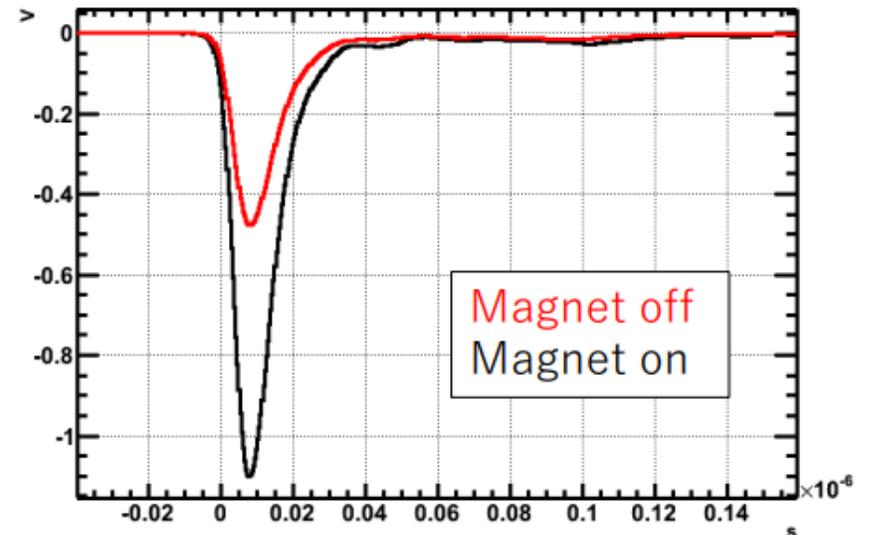


Light Intensity	Probability (exceed 1mV threshold)
5 p.e.	34 %
10 p.e.	41 %
50 p.e.	100 %

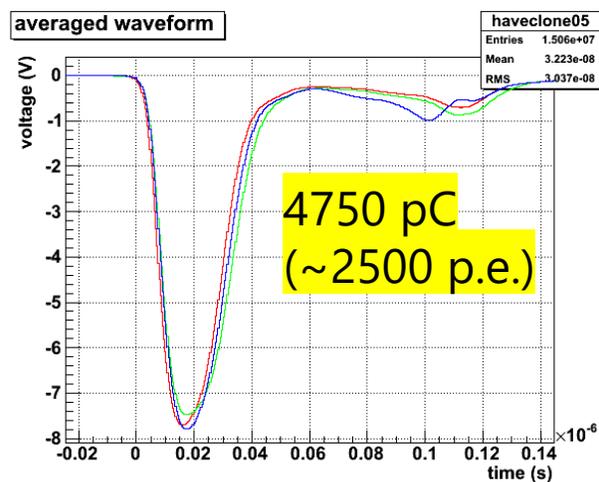
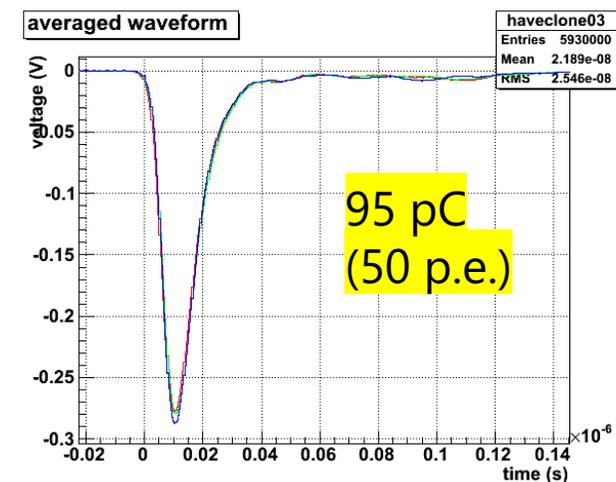
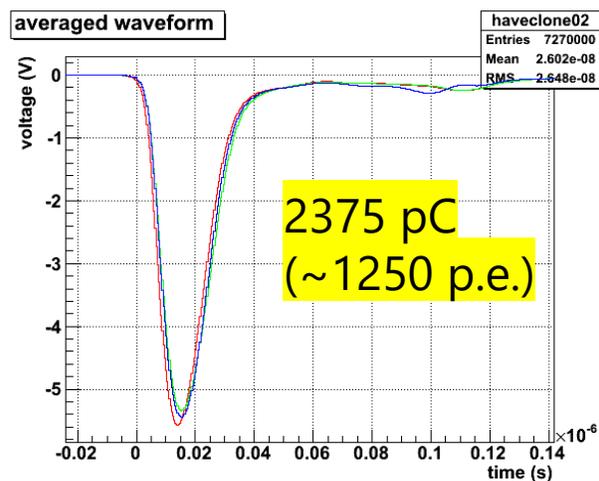
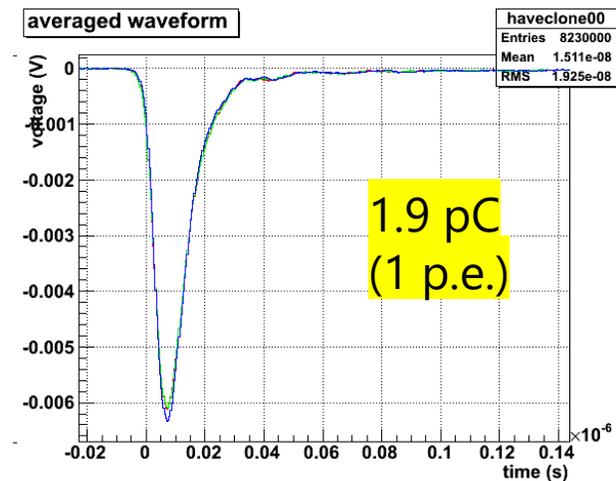
磁場依存性

- PMTの原理には“荷電粒子”の電子の移動が関わるため、その応答は磁場の影響を受けやすい。
- 測定した暗室には地磁気を補正するヘルムホルツコイルが3方向に配置されている。
- 補正コイルによってPMTの周囲の磁場の大きさを10分の1となっている。
- 補正あり/なしでは波高が 55 %変わる。→ 磁場によってcollection efficiencyが下がる。

磁場 (mG)			
	X	Y	Z
On	-27.3	22.0	78.8
Off	-211.8	-210.5	-332.4



2.5 PMT標準波形



- 電荷毎に標準波形を作成（一部抜粋）
 - 作成した波形データをエレキグループに配布

→ **第一目標完了！**

→ 実際に波形を性能評価に使用するフェーズに移る。

HV = 2000 V

HV = 1750 V

HV = 1710 V

2.6 標準波形出力試験

- 任意波形発生器(FG : function generator)を使って標準波形の出力試験を実施 (現在進行形)
 - 目的 : FGの性能を確認するため (linearity, 波形再現性, 温度依存性, etc.)
 - 特に linearity はエレキに inputs する電荷を正確に把握するために必要
 - Linearity の精密測定にはオシロの性能も考慮しなければいけない
 - “波形がなまる” or “ノイズが多い” range ではアンプでの信号増幅, アッテネータでの信号減衰などが必要になってくる。



2.7 今後の予定

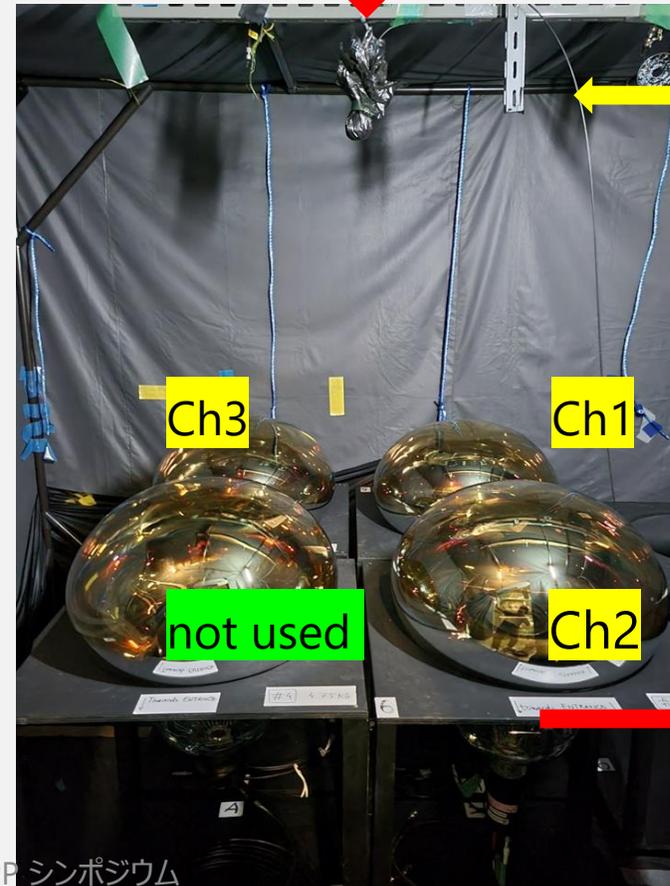
- 今月までにdigitizer のreview用の試験を終わらせる必要がある。
 - 各国のエレクトロニクス開発者が測定を進めている。
 - Function Generator を使用する試験が重要なので、前頁の試験を完了した後は、オシロをdigitizerに置き換えて試験を進める。
- Review が一段落した後は、
 - エレクトロニクス：Mass production 後の性能評価の方法を考える。
 - PMT波形解析：評価が不十分な項目のstudyを続ける。
 - アフターパルス
 - 磁場依存性 → レイトパルスへの影響
 - 角度依存性 → プレパルスへの影響

Back Up

Setup @ Lab-B in Kamioka mine

- Place
 - Lab-B dark room
- Light source
 - Hamamatsu C10196 + M10306-30($\lambda = 405.6\text{nm}$)
 - 10m fiber + diffuser ball + black films
- 3 B&L PMTs (Ebb : Nominal HV from Hamamatsu)
 - Ch1 : EC0230-G (mass-production) @Ebb = 1800V
 - Ch2 : ED0810-C (") @Ebb = 1740V
 - Ch3 : ED0920-C (") @Ebb = 2070V
- Cable type
 - HK cable (signal : RG58 (20m) , HV : RG174)
- Rohde-Schwarz RTA4004 Oscilloscope
 - (2.5G sampling/s, 10bit ADC resolution)
- Magnet field
 - There are 3-dimensional compensation coils to minimize the effects from geomagnetic field.

diffuser ball
covered with 4~12 black films (plastic bags)
to reduce intensity



Light
input

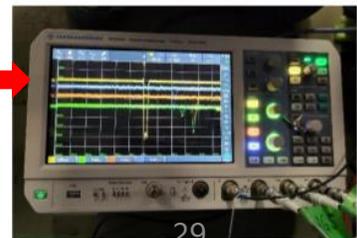
Hamamatsu LD



Sync Out
(Trigger for data taking)

Signal
input

RTA4004 Oscillo



Mechanism of various pulses

