

2025年度卒業研究
APD読み出し結晶シンチレーション検出器の
貫通する宇宙線による特性評価

奈良女子大学

高エネルギー物理学研究室 4回生

嶋原瑞季 諏訪葵

目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

目次

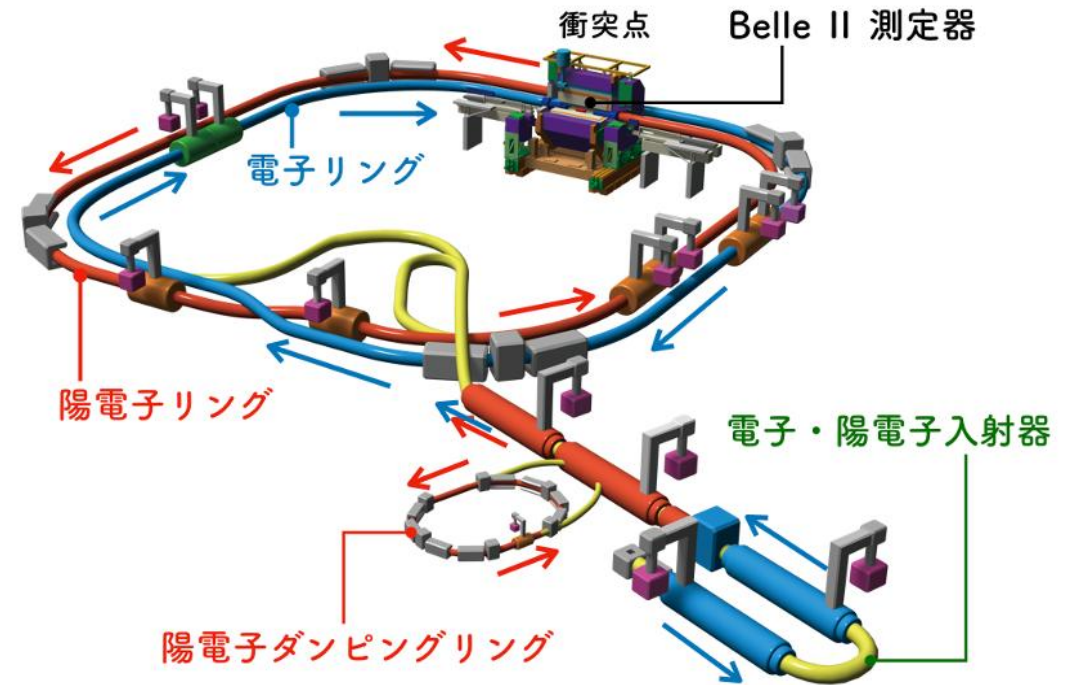
1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

研究背景

Belle II 実験 / SuperKEKB 加速器

Belle II 実験とは

- 茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）で行われている高エネルギー物理学実験
- SuperKEKB加速器と呼ばれる、衝突型加速器では、7 GeVの電子と4GeVの陽電子を衝突させ、B中間子・反B中間子を生成している
- 粒子・反粒子の対称性の破れや新しい物理法則の兆候を探索する



図：SuperKEKB加速器の外観
引用元

<https://www.kek.jp/ja/about/pr/image/12548>

Belle II 測定器

- SuperKEKB加速器の衝突点に配置されており、ビームパイプを中心として、衝突点の周囲に7つの異なる検出器が設置されている。

<電磁カロリメーター>

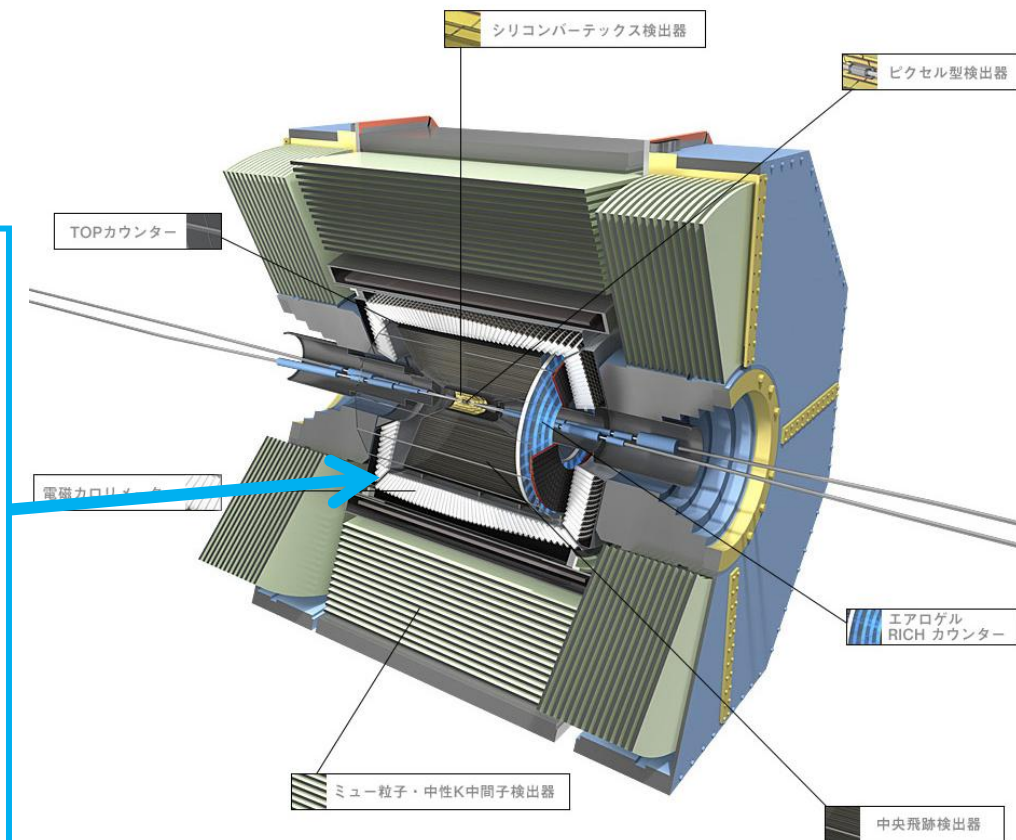
シンチレーターに入射した電子や光子が電磁シャワーをおこし、光を発する

→光量を電気信号に変換・読み出しを行い、エネルギーを測定

- 8736本のヨウ化セシウム (CsI (TI)) 結晶 ($5.5 \times 5.5 \times 30\text{cm}^3$) とフォトダイオードを用いている

- 数十MeV～数GeVの広い範囲のエネルギーを検出可能

- 全吸収型のため γ 線の到来方向への感度は乏しい

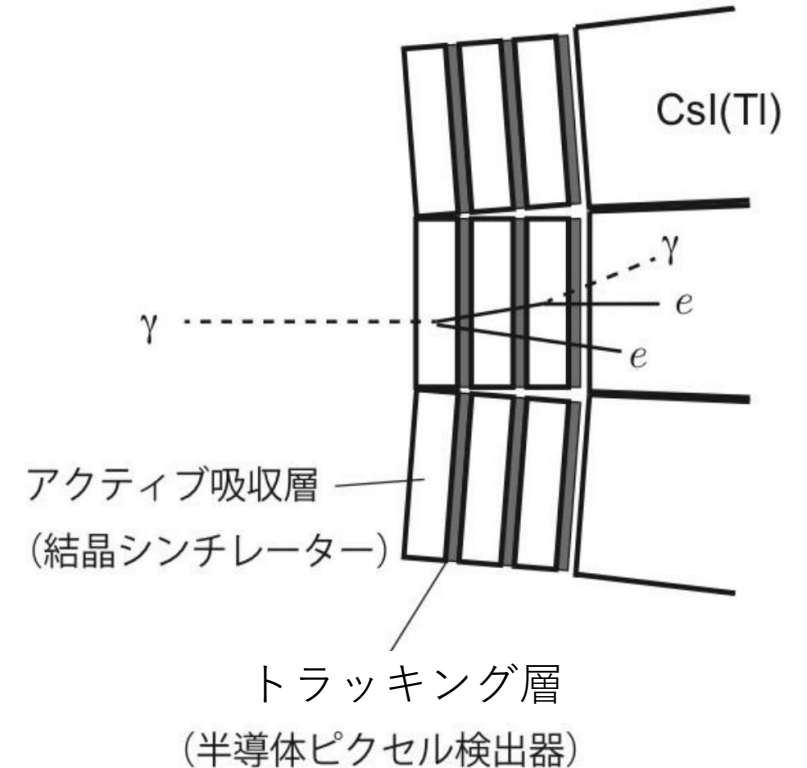


図： Belle II 測定器の外観
(引用元)

<https://belle2pb.kek.jp/Detector/>

プリシャワー検出器

- アクティブ吸収層とトラッキング層を交互に配置したサンプリング型のカロリメーター
- アクティブ吸収層とトラッキング層を一層として、三層重ねている
- アクティブ吸収層では発生した電磁シャワーのエネルギーを測り、トラッキング層ではシャワー中の e^+ 、 e^- の通過位置を検出することにより、 γ 線の到来方向がわかる



図：電磁カロリメーターの前にプリシャワー検出器を置いた図
(引用元) 岡田伊織：「MPPCによる結晶シンチレーターの読み出し光量測定」(2022)

研究の動機

電磁カロリメーターは高いエネルギー分解能をもつが、 γ 線の到来方向の判定に劣る



トラッキング層を入れたプリシャワー検出器では、電子・用電子の通過位置から、入射した γ 線の到来方向がわかる



Belle II 実験で検出したいエネルギー範囲：数十MeV～7GeV
→エネルギーの下限が低い
吸収層であるタングステンや鉛では、Belle II 実験でのエネルギー損失を測れない



- ・シャワーを発達させる吸収層をエネルギー損失を測定可能な素材で作る必要がある → **Fast-LGSOシンチレーター**
- ・コンパクトな半導体光検出器を使いたい → 5mm角の**APD**を選択

Fast-LGSOシンチレーター



- 40.0mm × 40.0mm × 12.0mm
- 発光量がNaI程度に多く、かつ発光時間が短い
- 反射材で包み、APDの受光面が当たる部分のみ開けている

	Fast-LGSO
蛍光出力 (NaI=100)	~90
減衰時間 (ns)	30~36
エネルギー分解能 (^{137}Cs , %)	8~10
密度 (g/cm ³)	7.3~7.4
吸湿潮解性	無
自己放射	有

引用元：株式会社オキサイドFast-LGSO

[Fast-LGSO - 株式会社オキサイド
https://www.opt-oxide.com/products/fast-lgso/](https://www.opt-oxide.com/products/fast-lgso/)

結晶シンチレーターでのエネルギー損失

- 荷電粒子が物質を通過するとイオン化や励起によりエネルギーを損失する
- 地上に到来する宇宙線 μ 粒子はほぼMIP (Minimum Ionizing Particle) と考えられ、エネルギー損失は 1 g/cm^3 あたり 2 MeV

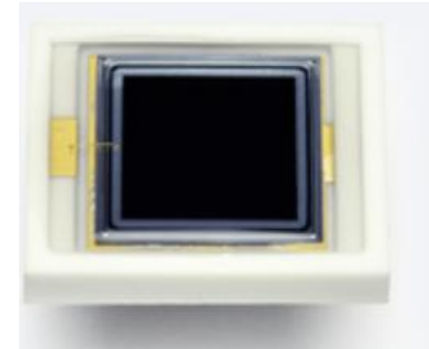


- 厚み 12 mm の Fast-LGSO シンチレーターでの平均エネルギー損失は $2 [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \text{g}^{-1}] \times 7.4 [\text{g/cm}^3] \times 1.2 [\text{cm}] \cong 17.8 [\text{MeV}]$

このエネルギー損失に対応する信号電荷を確認する

APD (Avalanche Photo Diode)

- 光子が通過すると光電効果により、電子正孔対が生成され、電流が流れる。
- 生成された電子が、強い電場によって加速され、電子なだれを形成
- 本研究ではS8664-55型を使用
- プロポーショナルモードで動作し、増幅率は50～100倍で入射した光量に比例した出力になる



浜松ホトニクス社製
S8664-55型APD
5mm×5mm

[Si APD S8664-55 | 浜松ホトニクス](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/apd/si-apd/S8664-55.html)

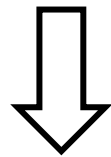
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/apd/si-apd/S8664-55.html>

先行研究をふまえた本研究の意図

< 先行研究 >

- 荷電粒子が物質中を通過する際のエネルギー損失を表すランダウ分布
- エネルギー損失が小さい領域にもイベント集中

→ シンチレータの角をかすめるといった通過距離が短いイベントであると考察。



< 今回の卒業研究 >

APD + 結晶シンチレーターを入れたアルミシャーシの上下にトリガーカウンターを挟んで、貫通した宇宙線のイベントを測定・解析

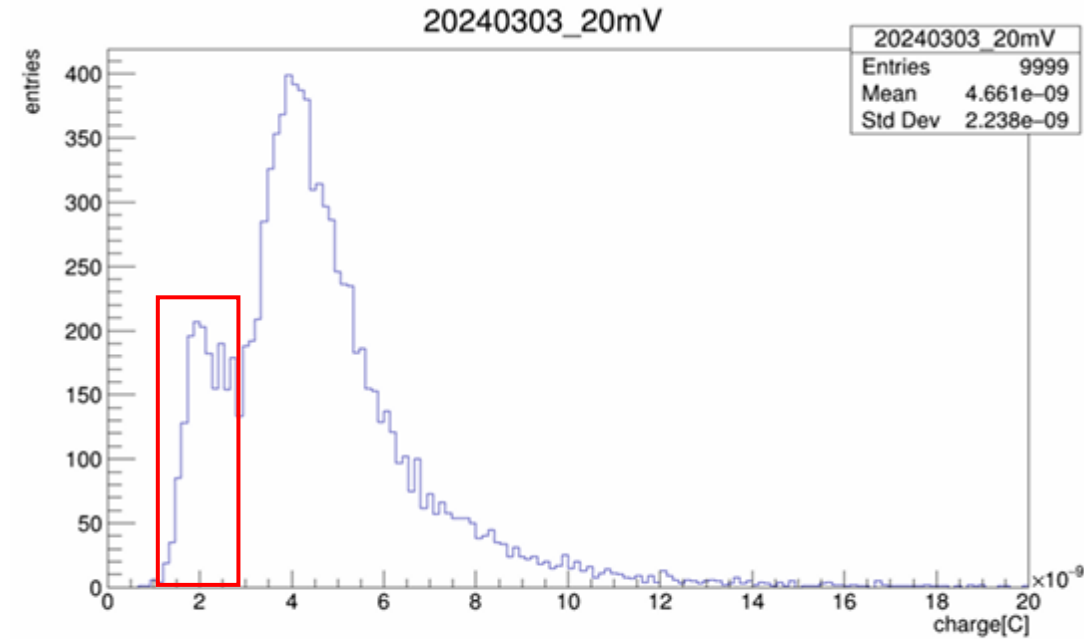


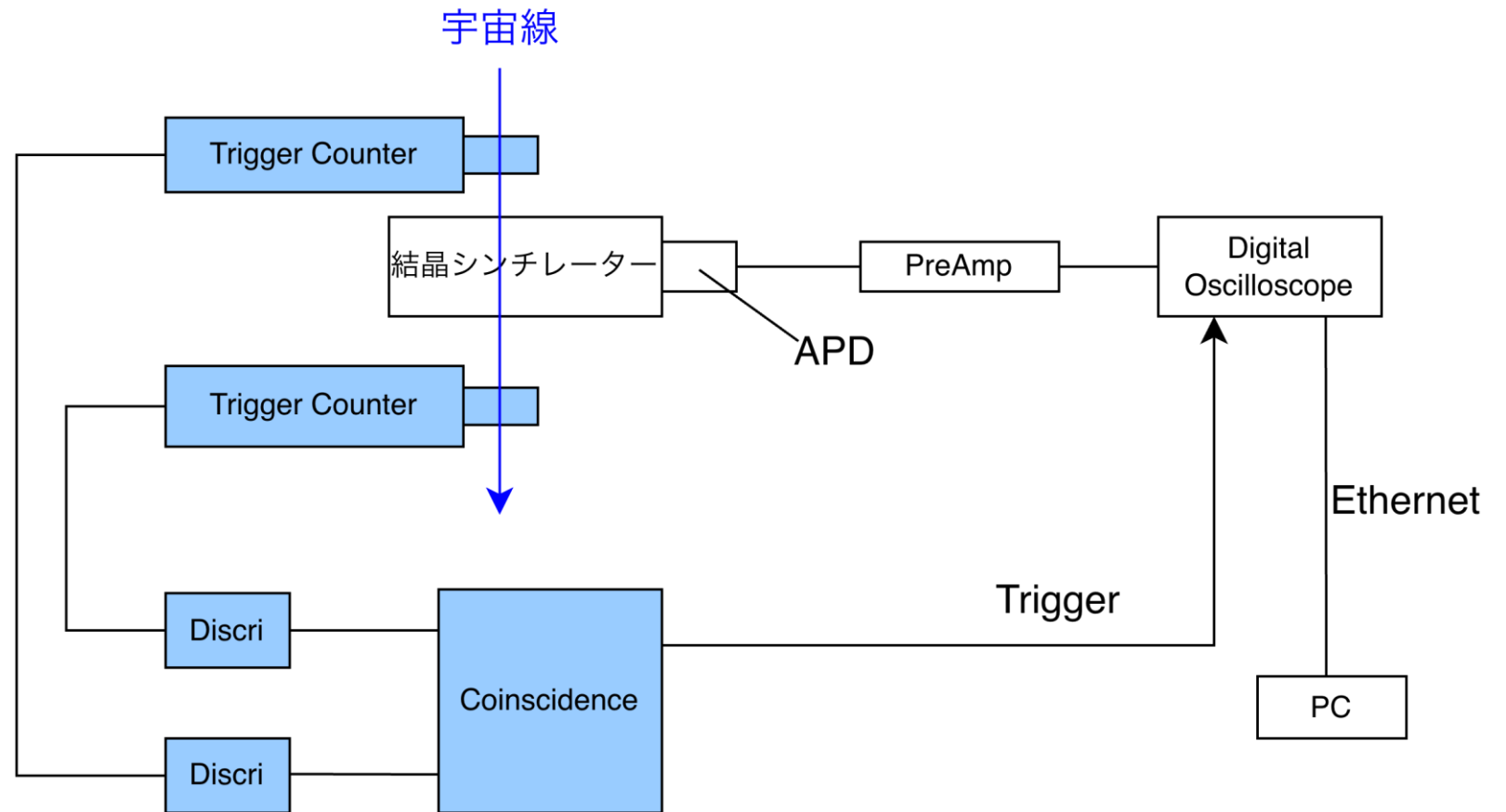
図 4.10: 信号電荷分布

尾崎恵美 卒業論文

「APDを用いた結晶シンチレーターの読み出し光量測定」2023年度 より

セットアップの概要

- プリアンプは自作
- トリガーカウンター
→光電子増倍管
- オシロスコープ
→Tektronix社DPO3034

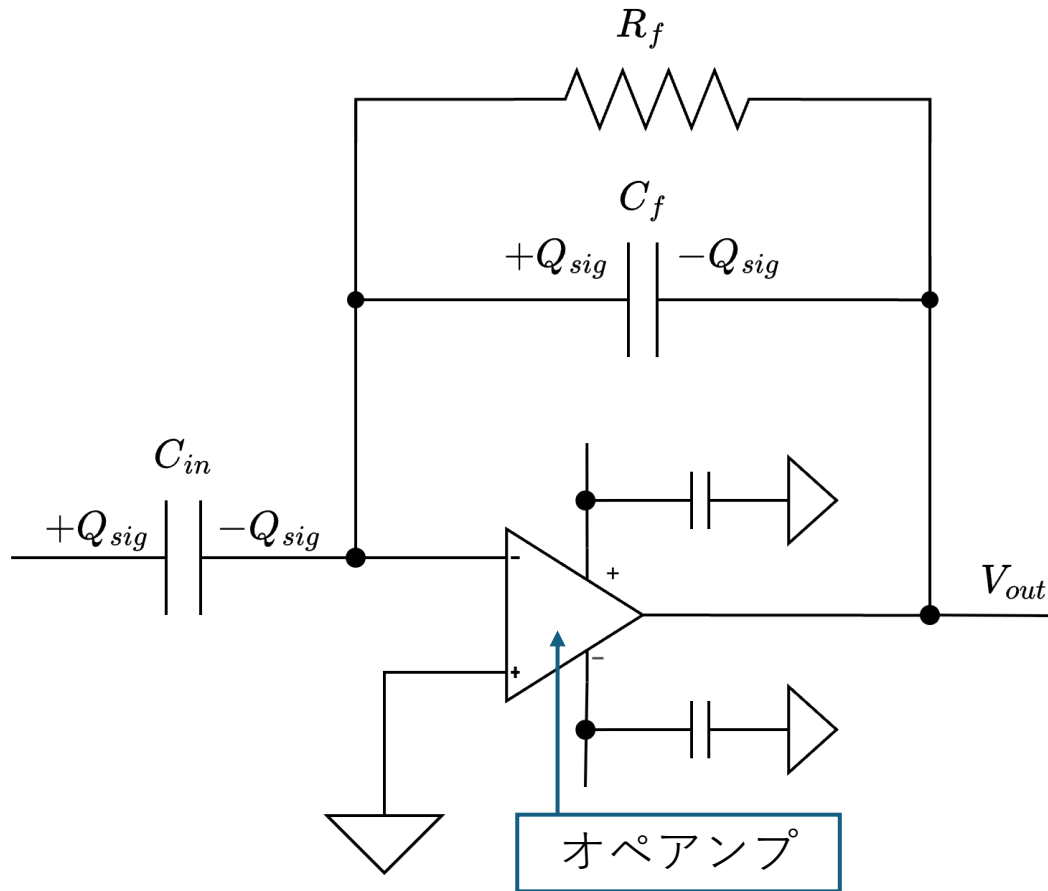


目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

プリアンプ作成

チャージアンプの原理



・チャージアンプは電荷を増幅して電圧値として出力する

チャージアンプに電荷 Q_{sig} の入力を考える。
オペアンプは、端子間の電圧が0かつ入力インピーダンスが無限大になるため、出力値は

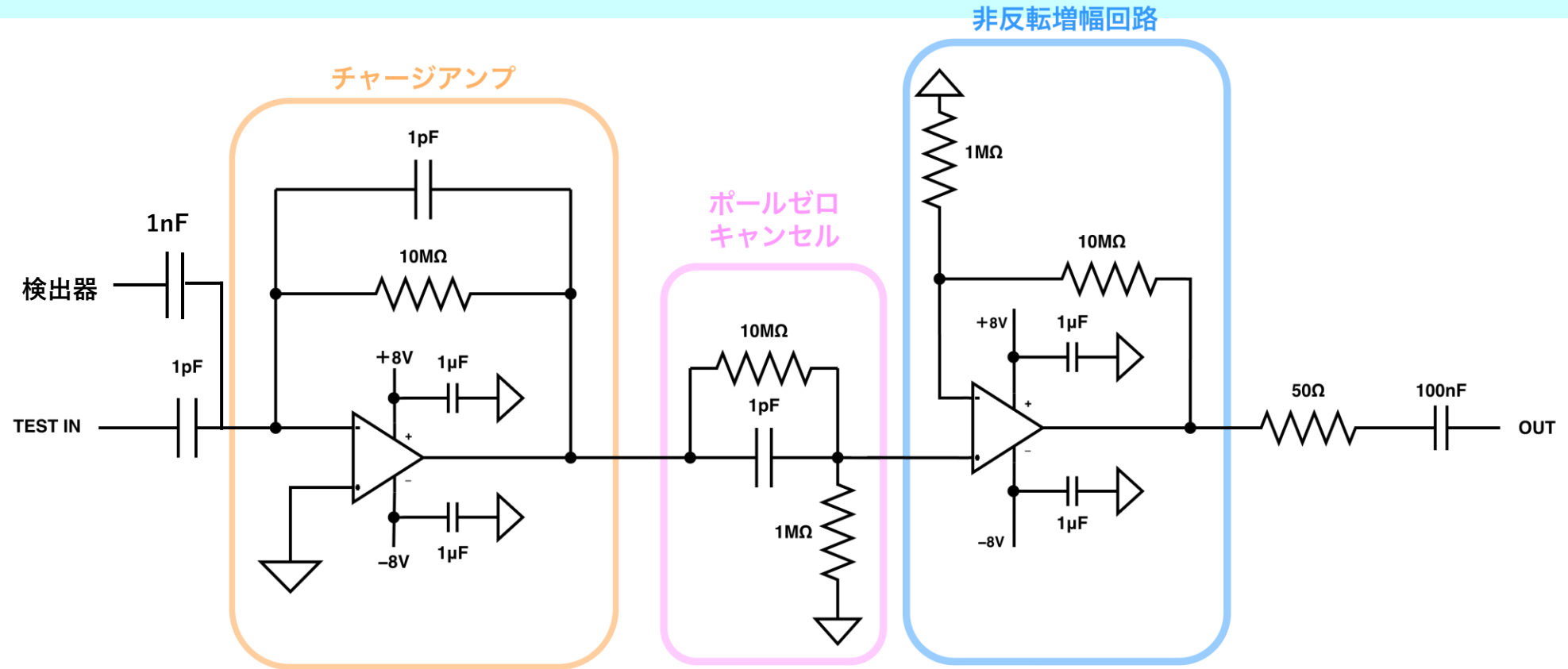
$$V_{out} = -\frac{Q_{sig}}{C_f}$$

コンデンサに溜まった電荷を逃がすために抵抗 R_f を入れるため時間経過による出力値は

$$V_{out} = -\frac{Q_{sig}}{C_f} \exp\left(-\frac{t}{C_f R_f}\right)$$

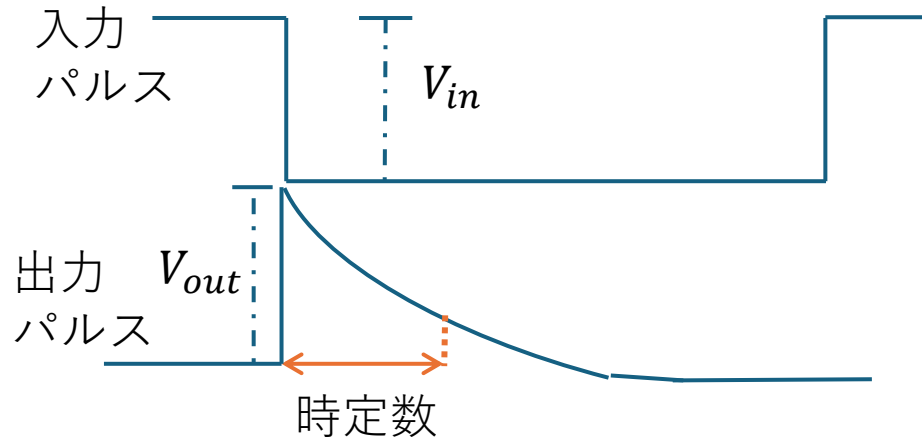
ここで、時定数は $\tau = R_f C_f$ である。

プリアンプの回路図



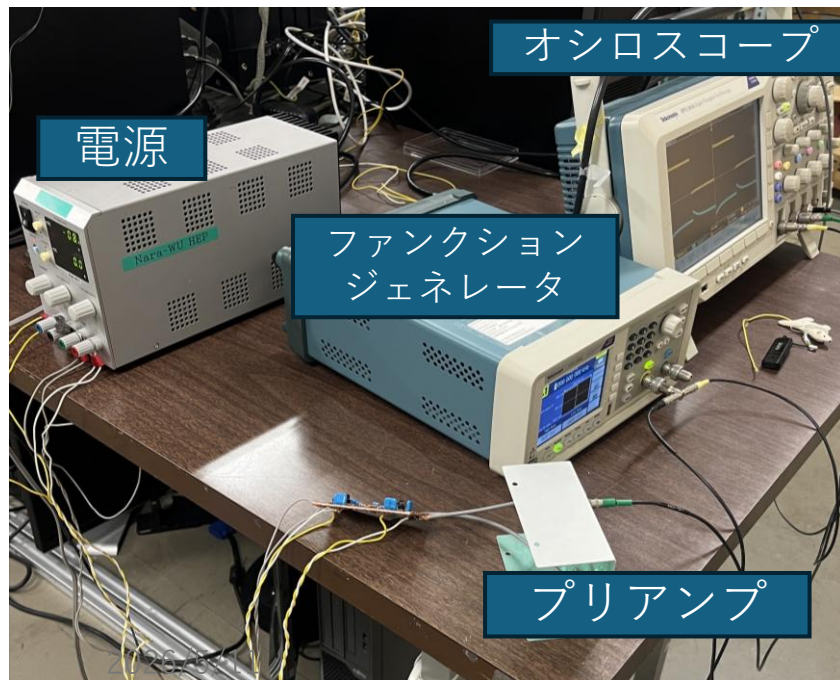
チャージアンプの出カインピーダンスを下げるためのポールゼロキャンセル部と、ポールゼロキャンセル部によって減衰した信号を回復するための非反転増幅回路を追加してプリアンプを作成した

プリアンプ動作確認

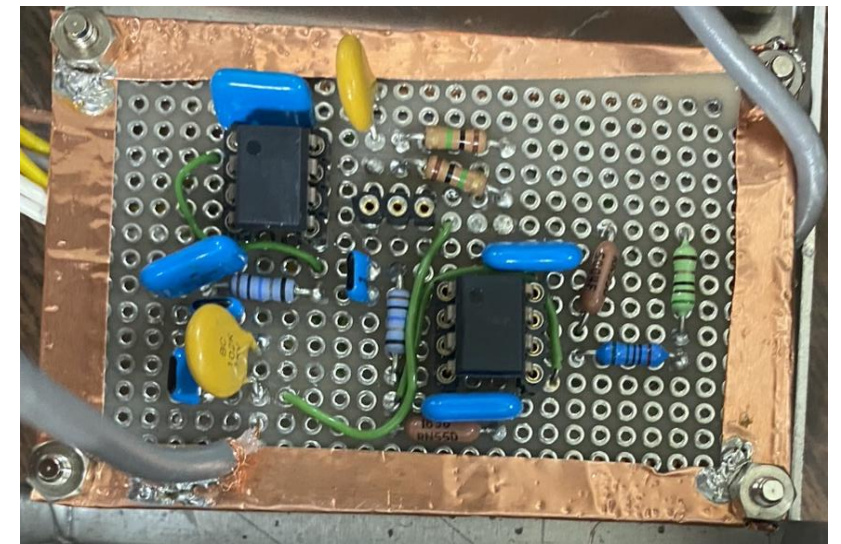


左図のような入力パルスを入れ、出力パルスから以下測定を行った。

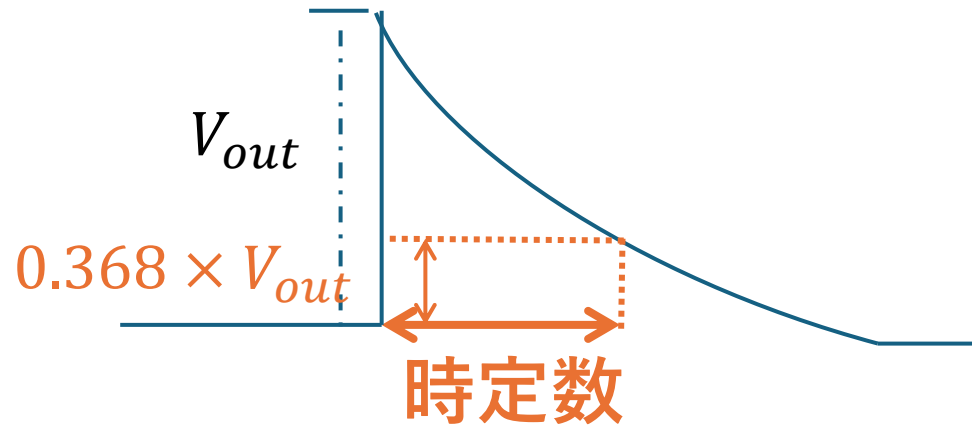
- 測定 1 : 時定数
- 測定 2 : 増幅率



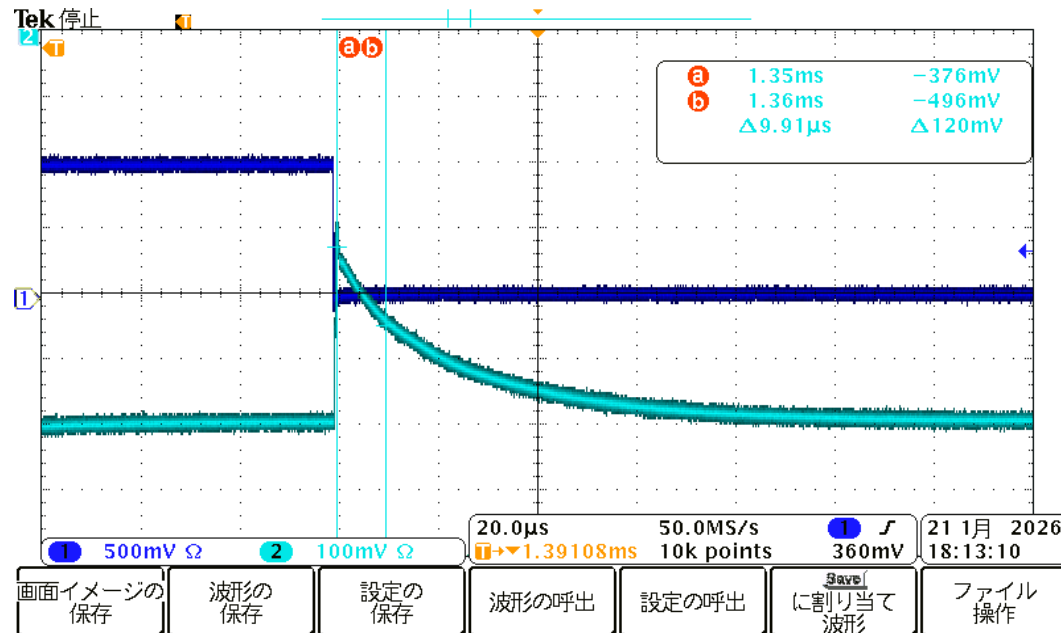
作成した →
プリアンプ基板



測定1：時定数

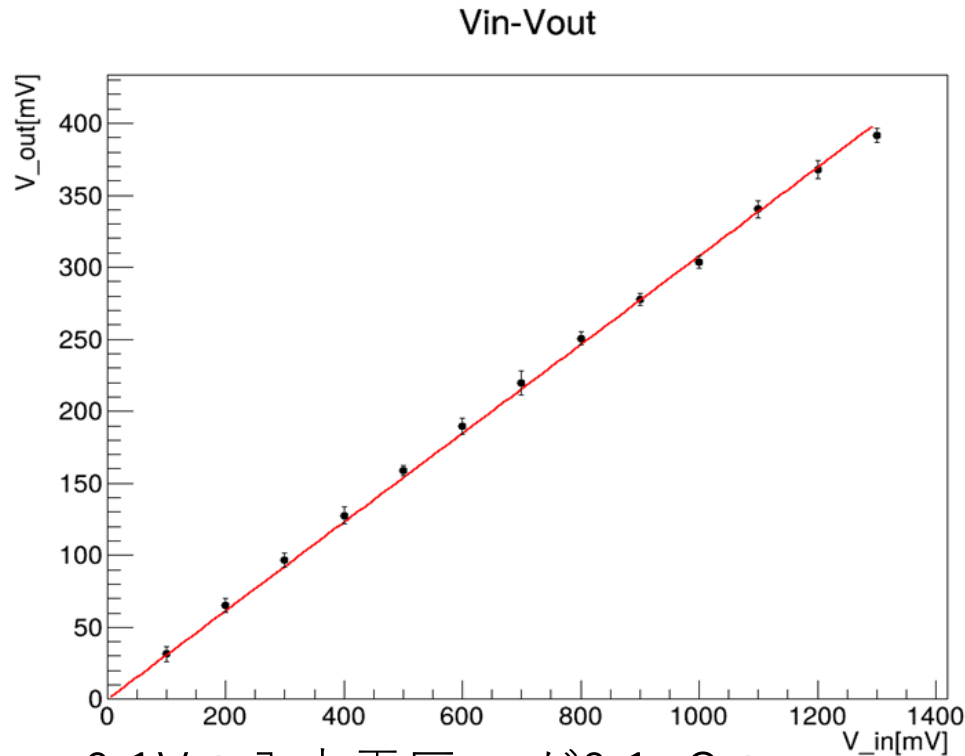


- $C_F R_F$ で決まる値で、出力が最大値の36.8%の値まで減衰する時間
- 入力パルス幅：150 μ s 電圧値：1.0V



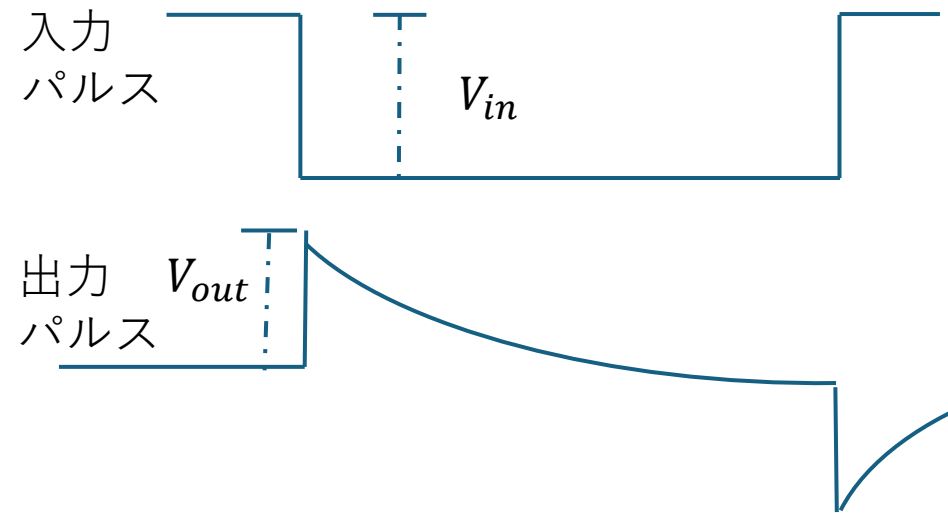
設計値：10 μ s
→測定値：約20 μ s

測定2：増幅率



0.1Vの入力電圧 V_{in} が0.1pCの
入力電荷に対応する

- V_{in} を0.1Vずつ変化させ、 V_{out} の最大値を測定
- 同じ V_{in} に対する V_{out} を10回測定し平均値を採用した



設計値：1.0V/pC

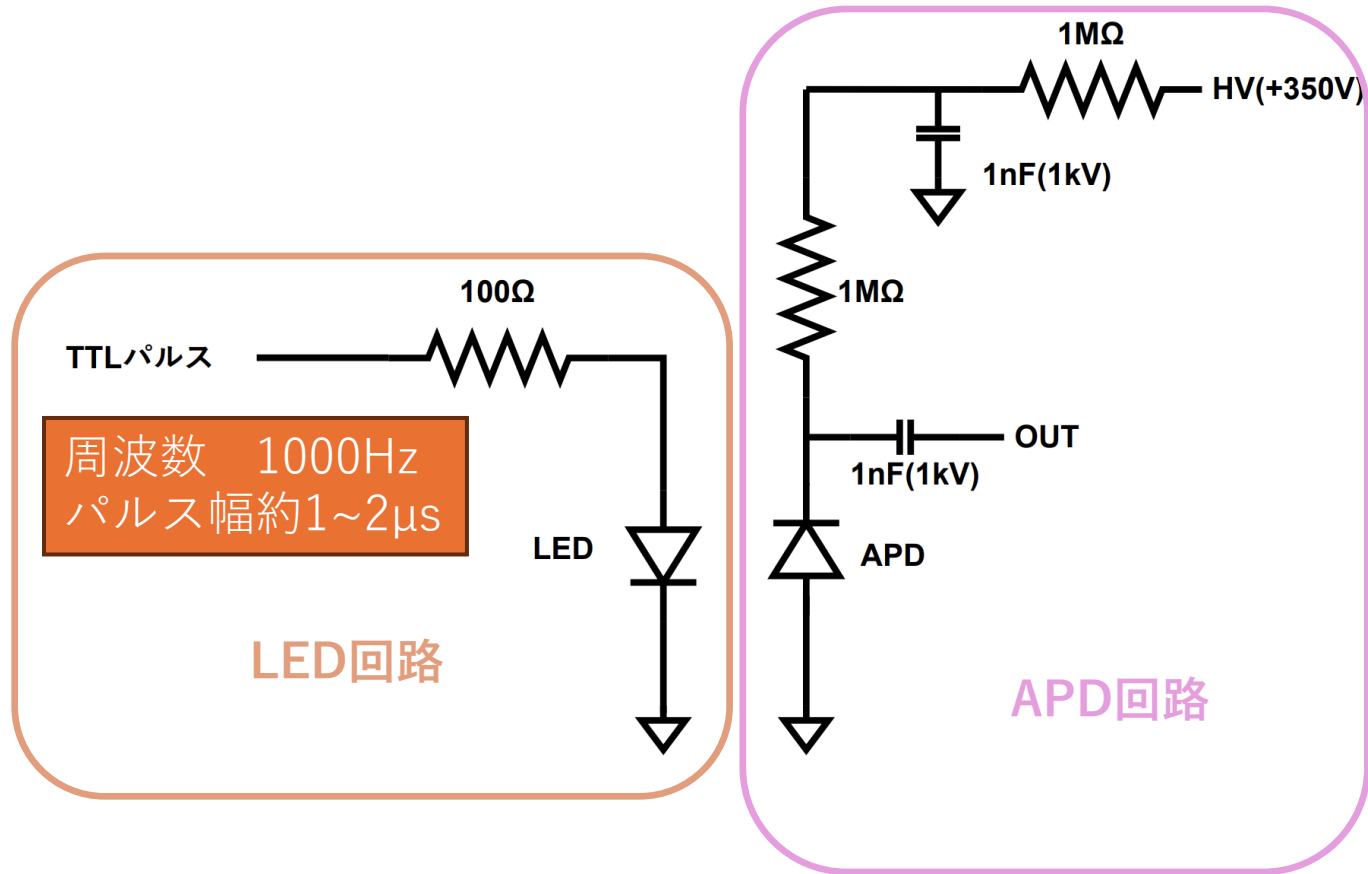
→測定値：**0.31V/pC**

目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

APD動作確認

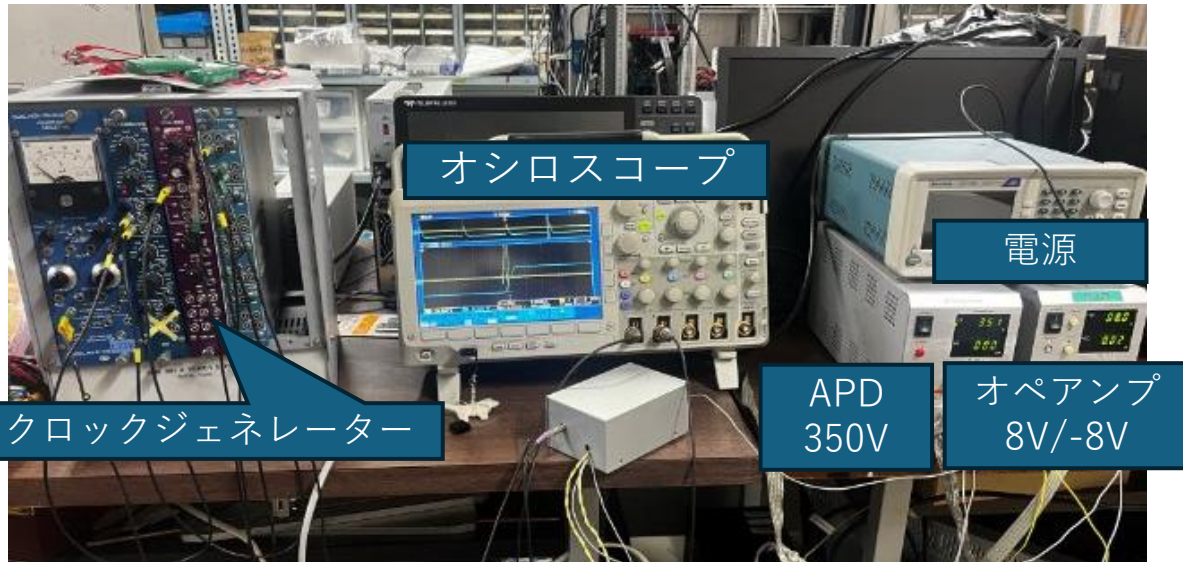
APD動作確認の回路図



- LED光に対するAPDの応答確認
- APDのみ
- APD+プリアンプ

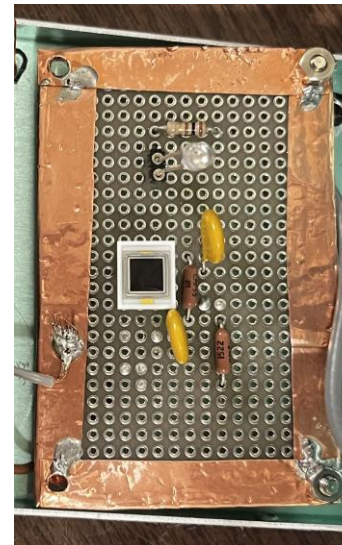
APD動作確認

・セットアップ

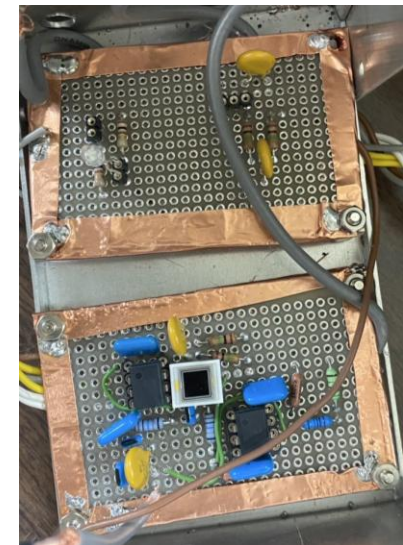


アルミシャーシを暗幕で覆って遮光した状態で測定した

・作成した基板

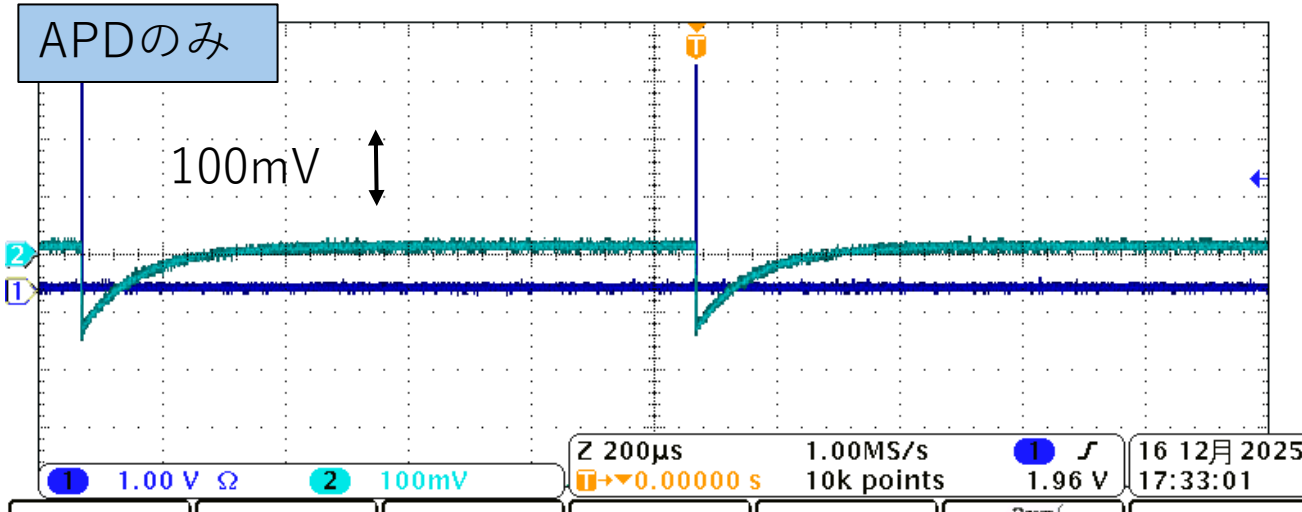


APDのみ

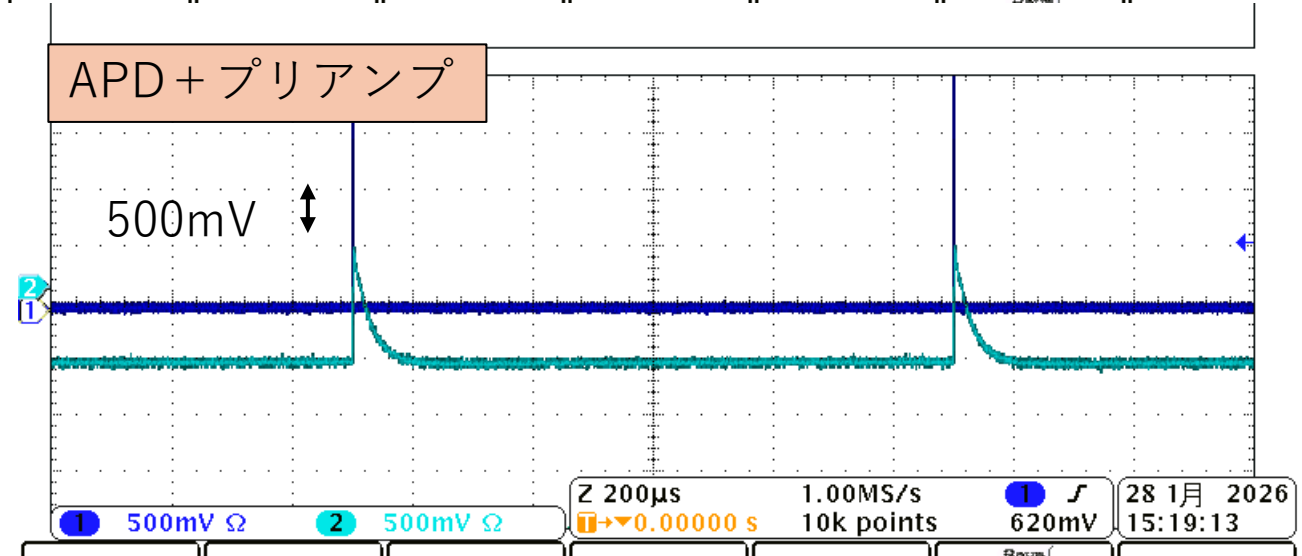


APD+プリアンプ

APD動作確認結果



Ch1 (青色) : LEDに入力したTTLパルス
Ch2 (水色) : 出力パルス



- APDのLED光に対する応答を確認できた
- APDの信号がプリアンプによって増幅されていることを確認できた

目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

トリガーカウンタ 動作確認

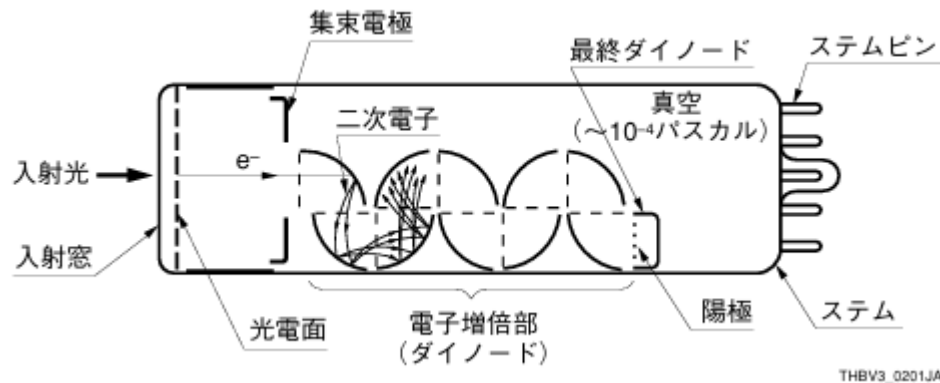
光電子増倍管(Photon Multiplier Tube)



トリガーカウンター：光電子増倍管(PMT)

浜松ホトニクス社製H3178

入射窓に約3cm×2cm×1cmのプラスチックシンチレータを取り付けた



THBV3_0201JA

光電子増倍管 その基礎と応用 第3版

<光電子増倍管 (PMT)>

- 入射窓から光が入射すると、光電面で光電子をたたき出し、後ろの電子増倍部で二次電子を放出して信号を増幅
- 増幅率は約 $10^5 \sim 10^6$
- 光電面の材質はバイアルカリで、シンチレータの発光波長に感度が高い。

トリガーカウンターの動作確認



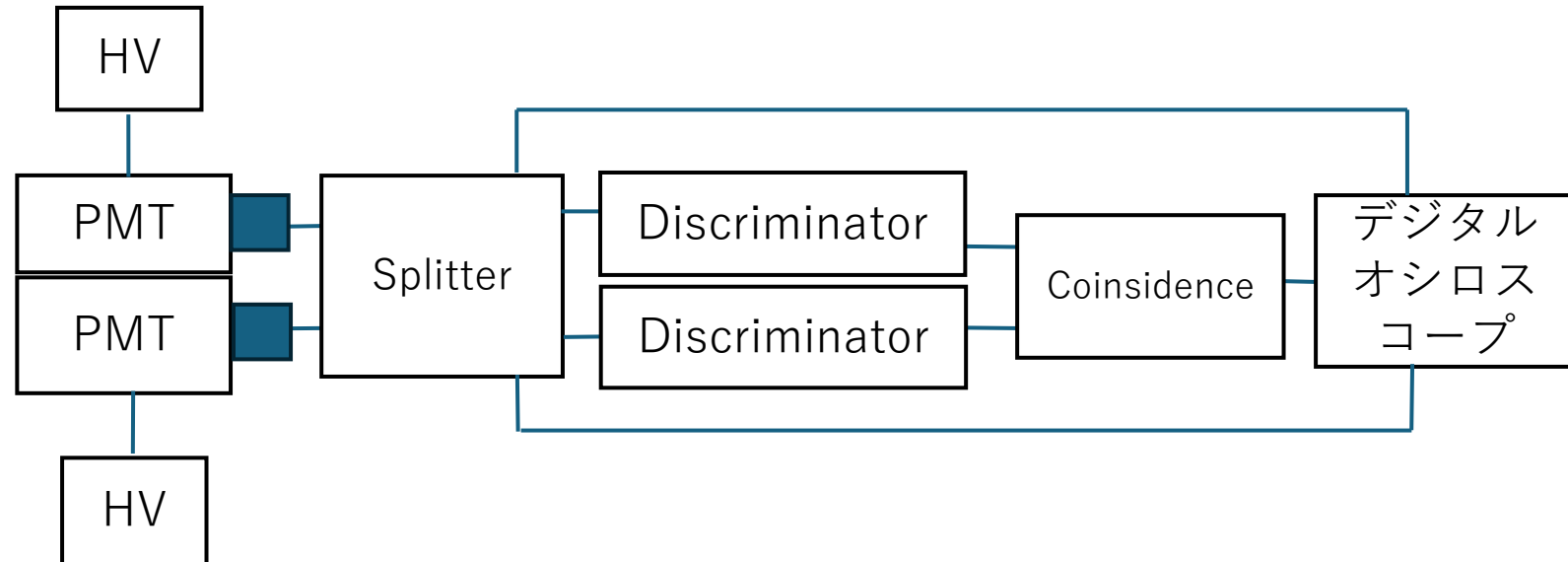
・左のようにPMT読み出しのシンチレータを重ね動作確認を行なった

電源電圧：-1300V

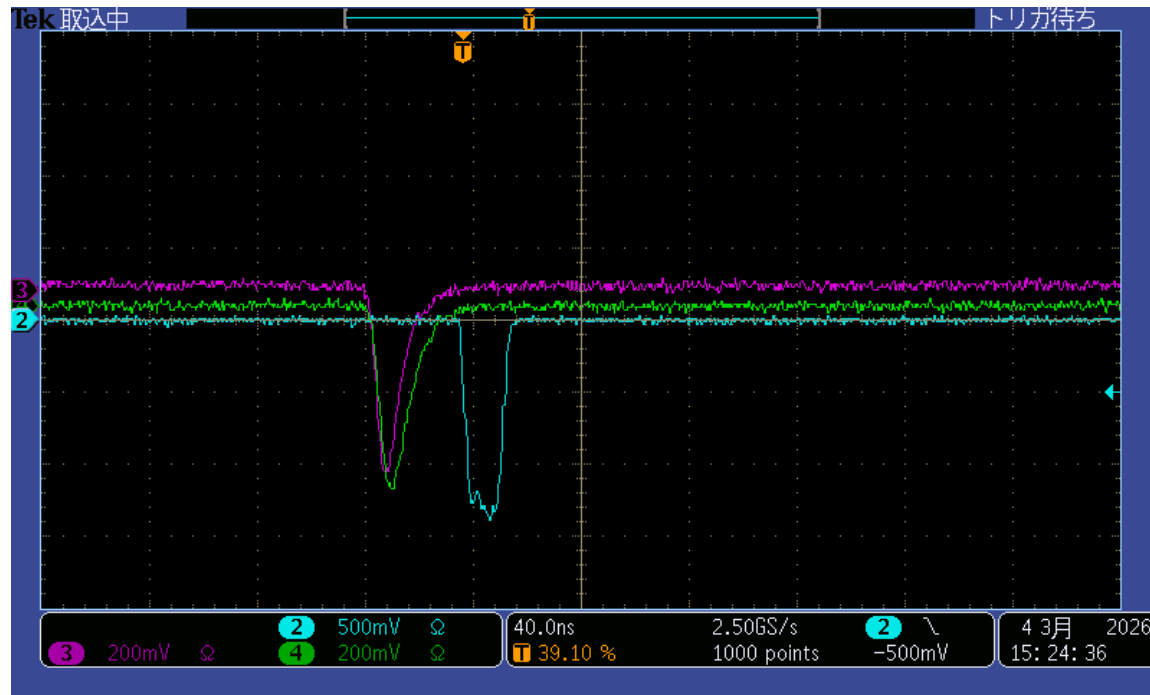
ディスクリミネータのトリガ：0.3V

ディスクリミネータからの出力：0.9V

コインシデンスからの出力：1.3V



トリガーカウンターの動作確認結果



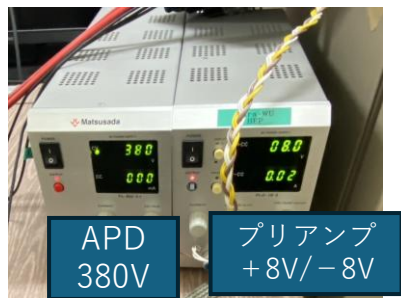
緑、紫：トリガーカウンターからの信号
青：2つのPMTでコインシデンスをとった信号

宇宙線が通過した際に出力を確認でき、コインシデンスが動作していることが確認できた

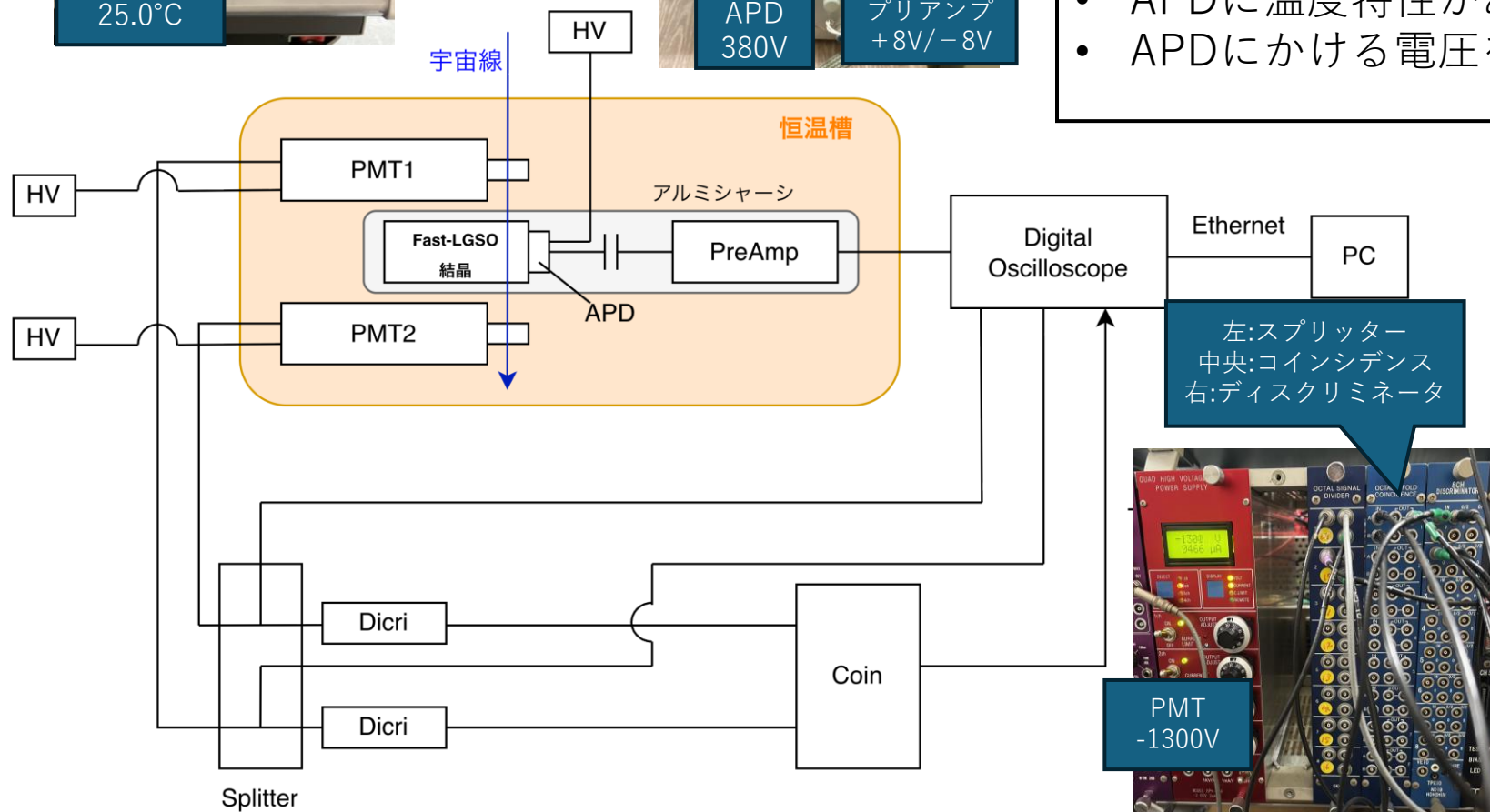
目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

宇宙線測定の設定アップ

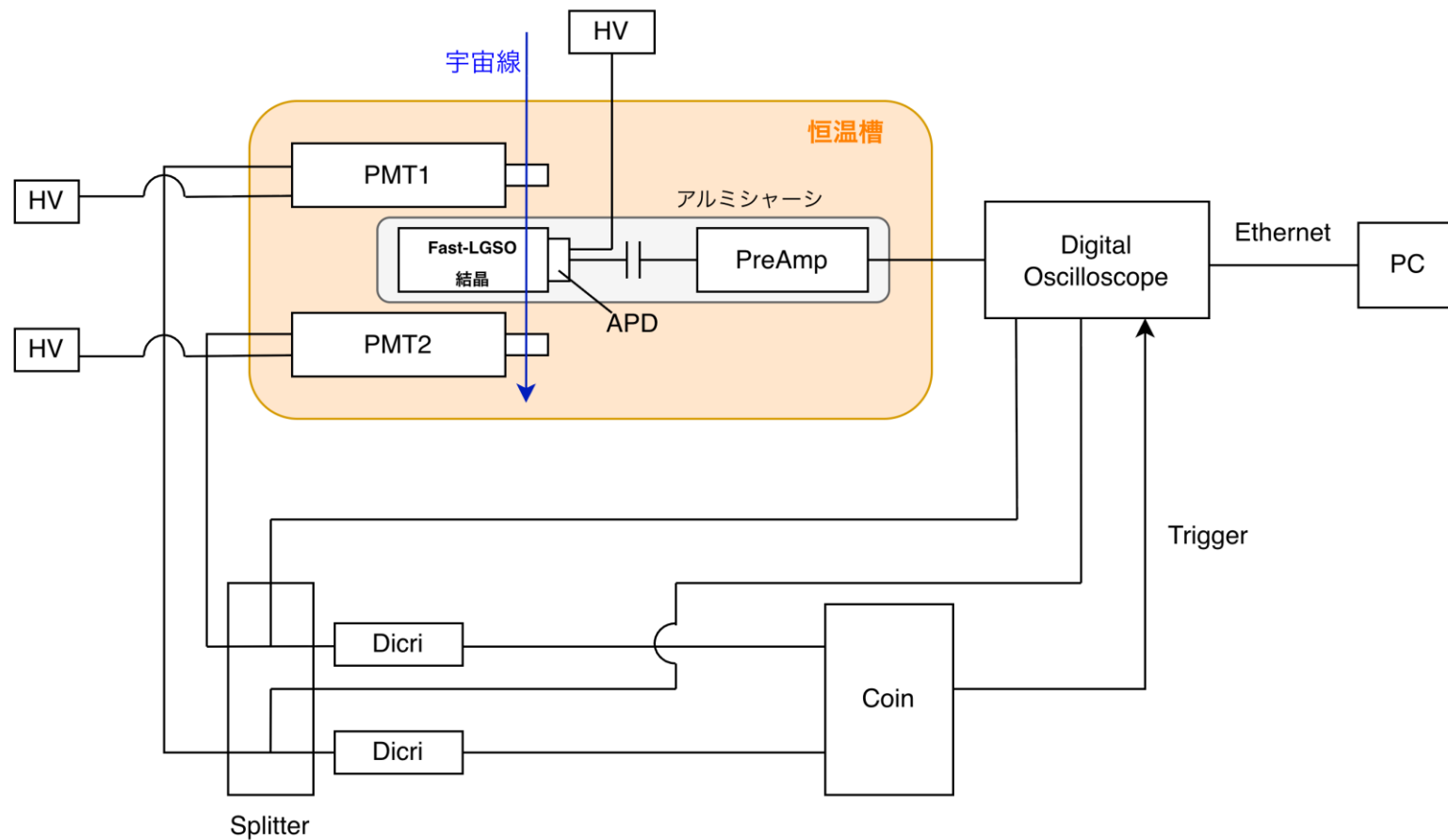


- トリガーカウンターからの信号をトリガーとして、APDの信号をオシロスコープで収集した
- APDに温度特性があるため、恒温槽(25.0°C)に入れた
- APDにかける電圧を変化させて測定した



セットアップ全体





恒温槽の中のセットアップ

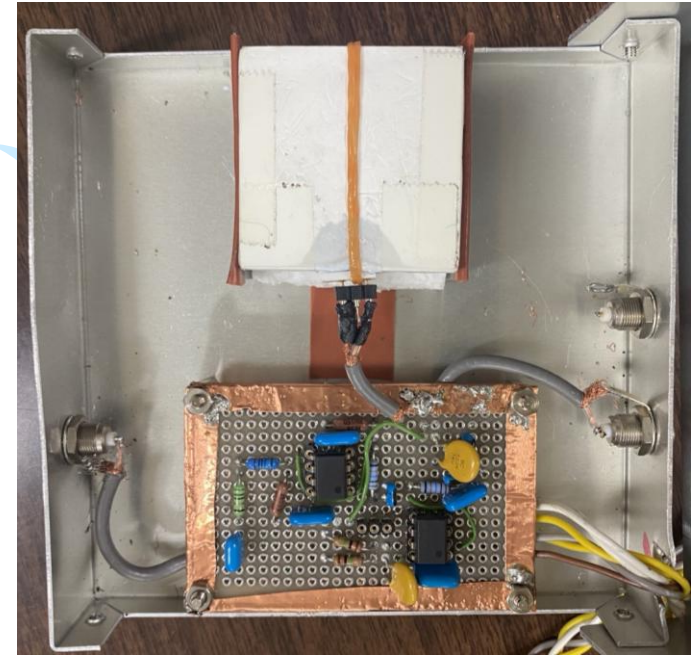


写真：恒温槽内部
装置に暗幕をかけた



写真：アルミシャーシと光電子増倍管の
セットアップを横からみた様子

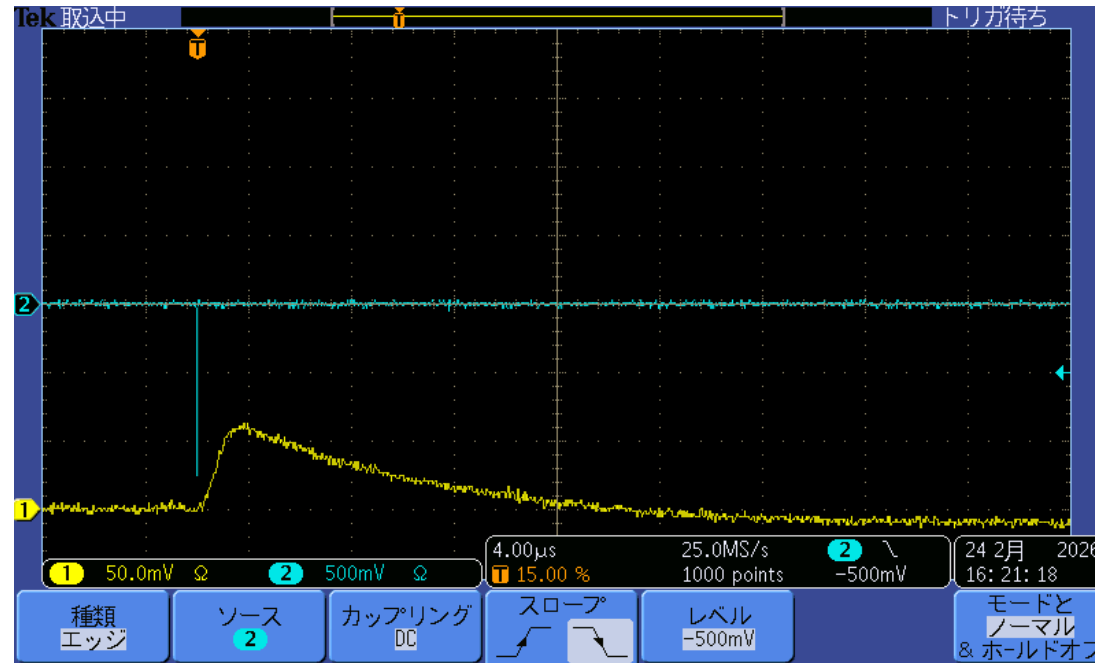
アルミシャーシ内のAPD読み出し結晶シンチレーターを光電子増倍管のプラスチックシンチレーターで挟んだ3段になっている



写真：アルミシャーシの中

APD読み出し結晶シンチレーターとプリアンプを繋げてアルミシャーシの中に入れた

宇宙線が貫通した候補イベント



- ・ APD読み出しの信号とコインシデンスの信号が確認できた。
Ch1 (黄色) : APD + 結晶シンチレータ
Ch2 (青色) : 2本の光電子増倍管からのコインシデンス

目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

解析手法

データ収集について

【収集方法】

- トリガーカウンターからのコインシデンス信号をトリガーとして、APDの信号を収集した
- イーサネット経由でオシロスコープから波形データをPCにブロック転送した

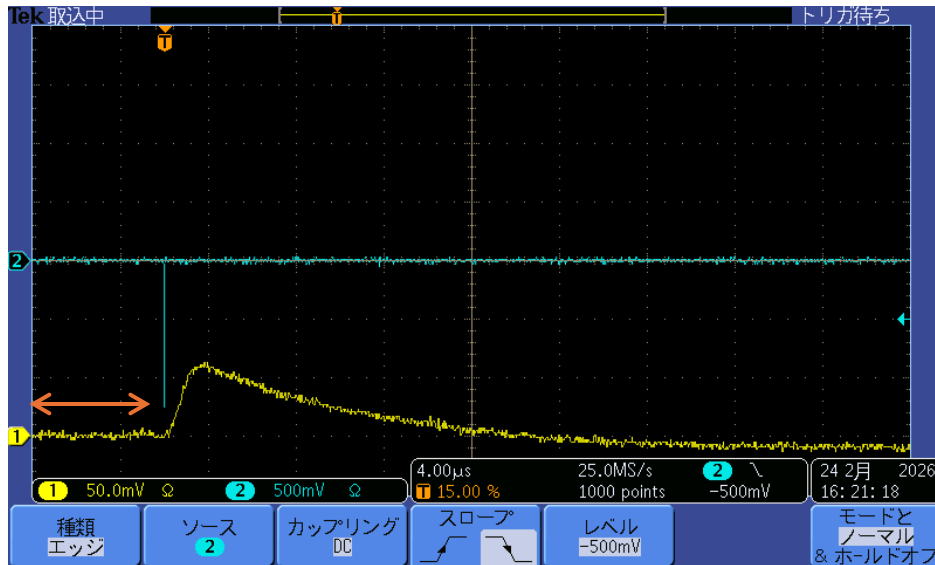
【波形データ】

- 一つの波形は40ns間隔で1000点の時系列データ
- 1点は $-127 \sim +127$ の8bit整数値

→ **8bit整数値を電圧値に変換後、信号を積分して信号電荷を求める**

データ解析手法 電圧値に変換する

- データは-127~127の8bit整数値で送られる
- i 番目の8bit整数値を x_i として、電圧値 V_i にするには $V_i[V] = x_i \frac{0.02[V/div] \times 8[bit]}{256}$
- 無信号時の基準点は、各イベントの1~100番目の平均値とした $V_{ped}[V] = \sum_{i=1}^{100} \frac{V_i}{100}$
- 実際の信号値 ΔV_i は $\Delta V_i[V] = V_i - V_{ped}$



+127 8bitデータの一部抜粋
 -76 -77 -76 -75 -75 -75 -74 -76 -75
 0 x_1 x_2 75 -75 -75 -76 -75 -74 -73 -76
 -76 -75 -76 -75 -76 -76 -75 -75 -75 -75
 -75 -75 -75 -76 -73 -76 -75
 -127

$i = 1000$ まで続き、左のような1波形分の情報となる

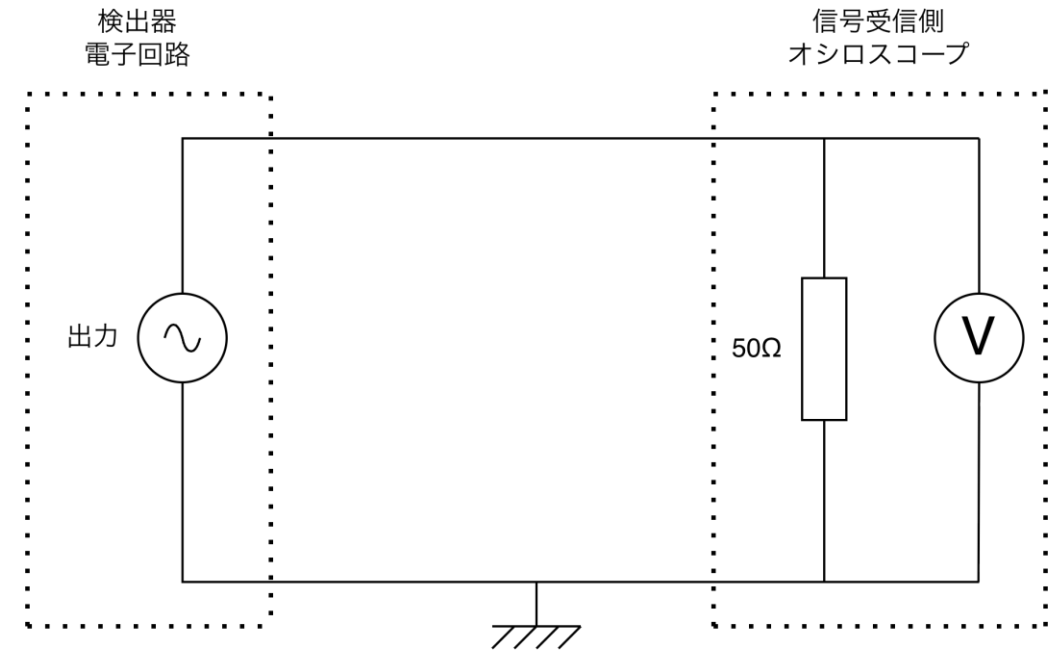
データ解析手法 信号電荷を求める

- ・ 電圧値を積分することで、信号電荷 Q_{sig} を求める

$$Q_{sig} = \sum_{i=0}^{1000} \Delta Q_i = \sum_{i=0}^{1000} (I_i \times \Delta t) = \sum_{i=0}^{1000} \left(\frac{\Delta V_i}{R} \times \Delta t \right)$$

- ・ R はオシロスコープの終端抵抗 50Ω
- ・ Δt は1000点データの時間間隔

$$\Delta t = \frac{4[\mu s/div] \times 10[div]}{1000} = 40[ns]$$

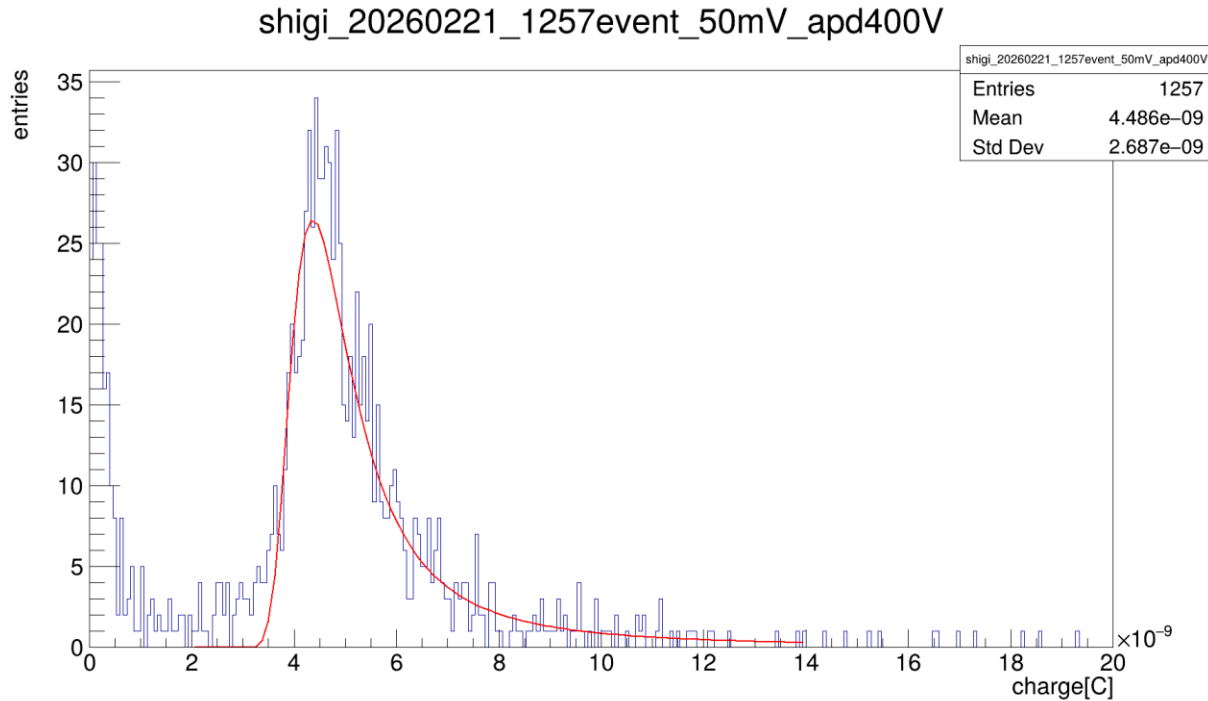


目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

解析結果

解析結果

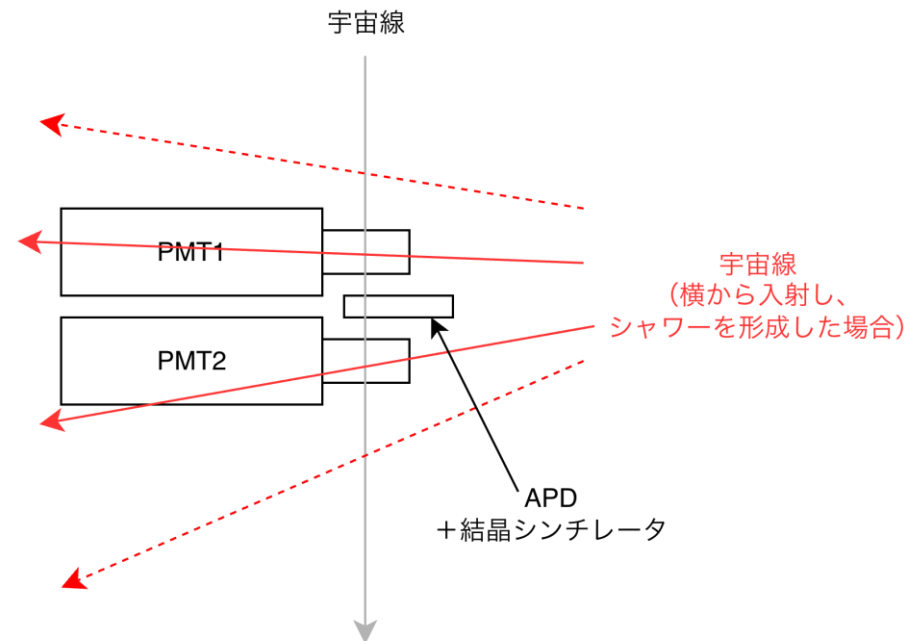
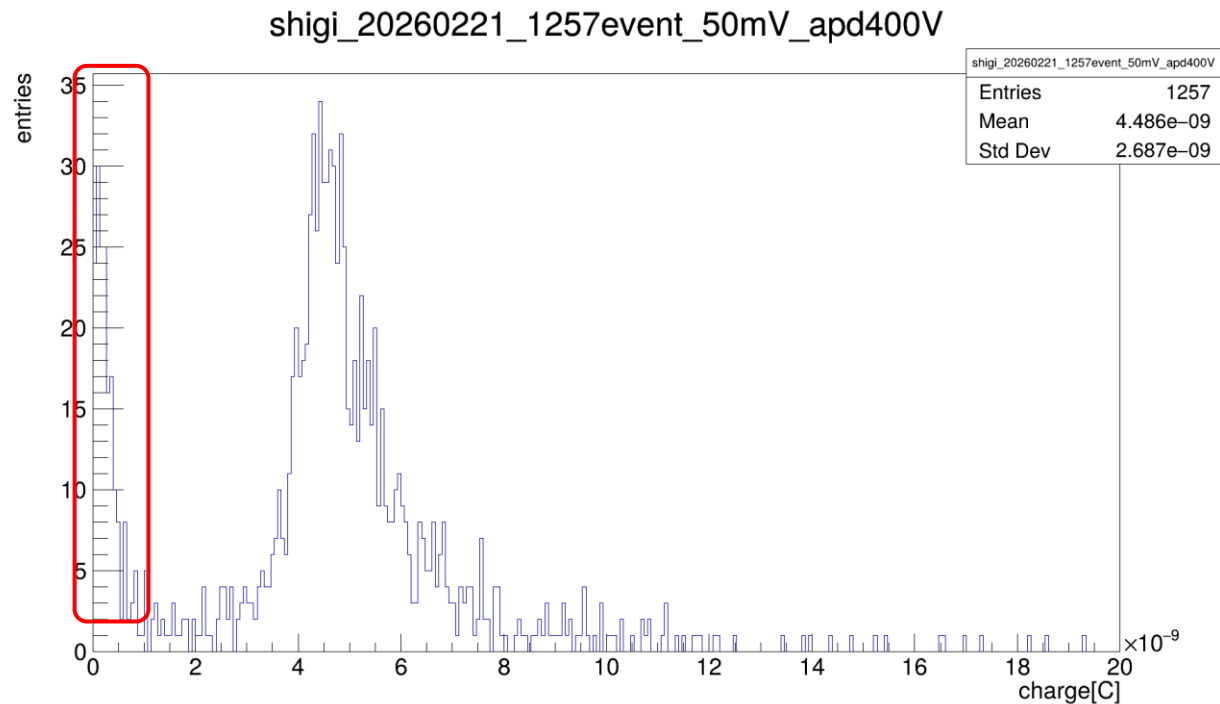


APD400V 1257イベント

ランダウフィットした
ピーク：**4.45 ± 0.03nC**
 $\chi^2/Ndf=1.11$

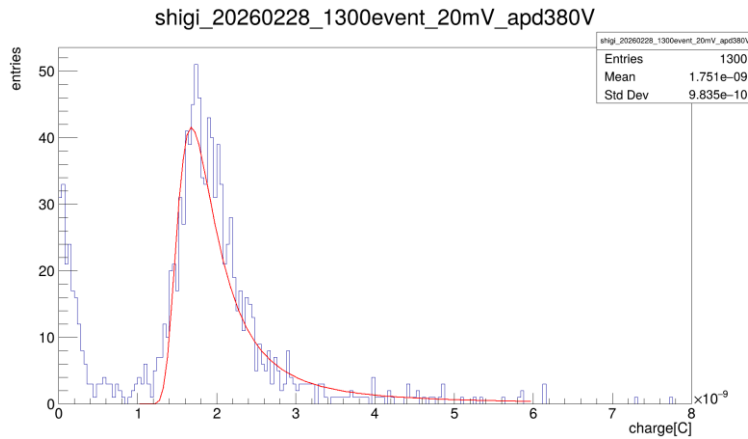
- 荷電粒子が物質を通過する際のエネルギー損失のランダウ分布を確認
- 先行研究に見られたような、ランダウ分布に少し重なる程度のエネルギー損失の低い領域のイベント集中は見られなくなった
- エネルギー損失がより低い0付近にイベント集中が見られた

0付近にピークが集まる原因

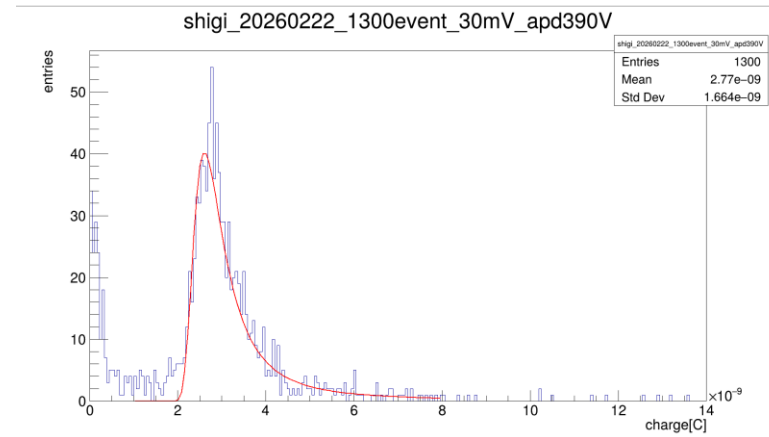


- 宇宙線はシャワーを形成しながら入射することがある
- 図のように宇宙線がシャワーを形成しながら、横からトリガーカウンターのみに入射した場合のデータが寄与したと考えられる

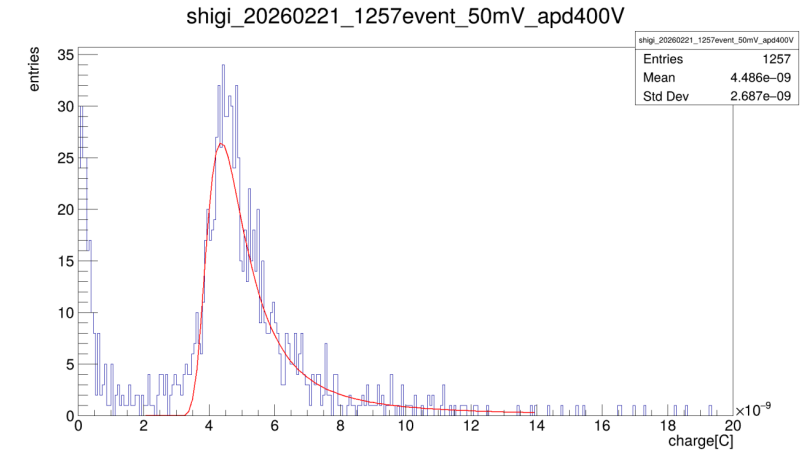
APDの電圧とピークの関係



APD380V 1300event
ピーク $1.71 \pm 0.013\text{nC}$
 $\chi^2/Ndf=1.33$



APD390V 1300event
ピーク $2.66 \pm 0.017\text{nC}$
 $\chi^2/Ndf=1.47$



APD400V 1257event
ピーク $4.45 \pm 0.03\text{nC}$
 $\chi^2/Ndf= 1.11$

- APDにかける電圧を380V、390V、400Vと変化させて同様の測定を行なった
- APDの電圧を上げると増幅率が大きくなり、ピーク的位置が右にずれる

目次

1. 概要
2. 測定準備
3. 測定
4. 解析
5. まとめ

まとめ

- プリシャワー検出器のアクティブ吸収層プロトタイプを製作した
(Fast-LGSOシンチレーター + S8664-55型APD)
- APD信号を増幅するためプリアンプを製作した。
(増幅率:0.31V/pC 時定数:約20 μ s)
- APD読み出し結晶シンチレーターをトリガーカウンターで挟むセットアップで宇宙線の信号を確認した
- 信号電荷のヒストグラムは荷電粒子が物質を通過する際のエネルギー損失の分布であるランダウ分布を確認できた