

# APDを用いた結晶シンチレーターの の読み出し光量測定

奈良女子大学

高エネルギー物理学研究室 4回生

尾崎 恵美

# 目次

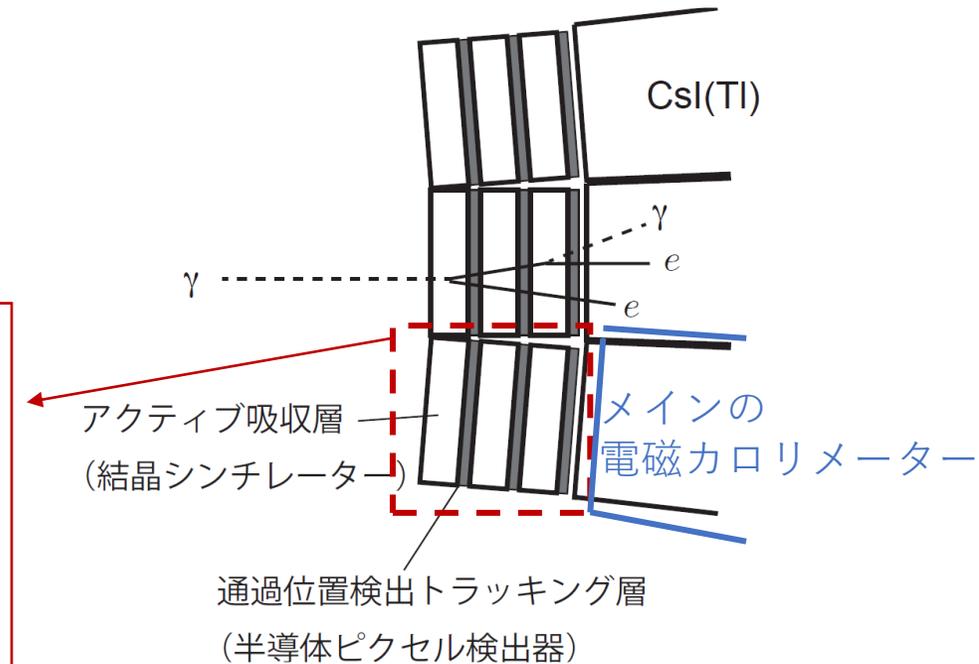
- 1.はじめに
- 2.測定準備
- 3.測定・解析
- 4.まとめ

# 概要

- $\gamma$ 線はシャワー( $e^+$ 、 $e^-$ 対生成と制動放射の連鎖反応)を形成させて検出する
- シャワーの形成によりエネルギー測定する検出器を電磁カロリメーターと呼ぶ

## プリシャワー検出器

- 吸収層とピクセル検出器を合わせたものを一層としてこれを三層重ねたもの
- シャワー中の $e^+$ 、 $e^-$ 通過位置を検出することで $\gamma$ 線の到来方向がわかる
- 低いエネルギーの $\gamma$ 線は3放射長で全て吸収されるものもある
- 吸収層の部分を通過中のエネルギー損失も測りたい  
→シンチレーターのAPD読み出しを試す



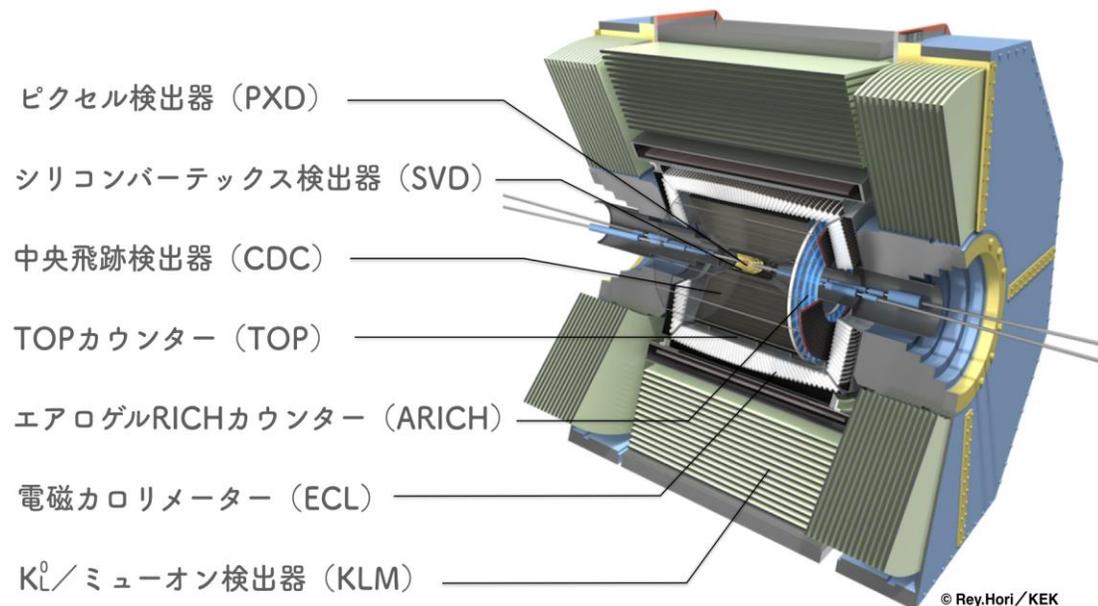
# Belle II 実験

## Belle II 測定器

- 7GeVの電子と4GeVの陽電子を衝突させる衝突型加速器(SuperKEKB加速器)の衝突点に配置されている
- 衝突によるB中間子と反B中間子の生成から、粒子と反粒子の対称性の破れや新しい物理法則を探索
- 異なる役割をもった7つの検出器で構成

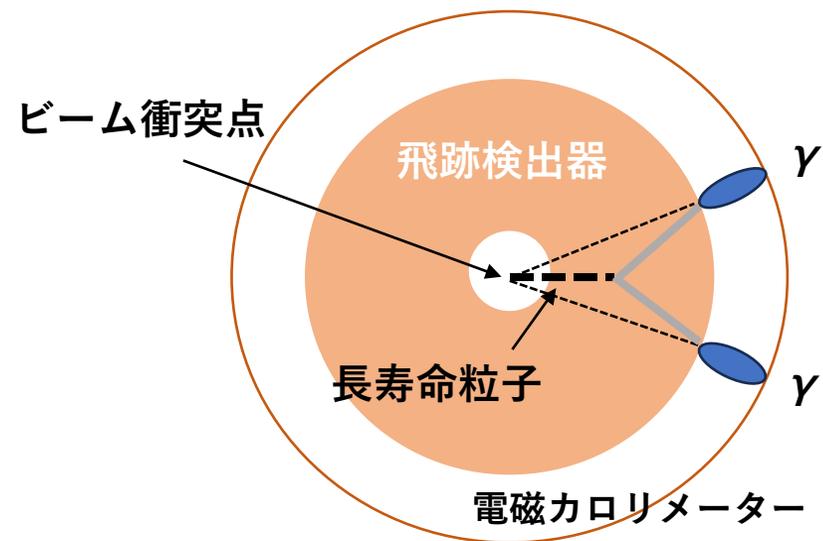
### [電磁カロリメーター]

- シンチレーターでシャワーが起こるとエネルギーに比例した量の光を発するのでこれを電気信号として読み出す
- 数十MeV～数GeVの広い範囲のエネルギーを検出可能
- 一方で $\gamma$ 線の到来方向への感度は乏しい



# $\gamma$ 線の到来方向の感度

- $\gamma$  対に崩壊する暗黒物質を Axion Like Particle (ALP) と呼ぶ
- ALP の中には衝突点から数十 cm 程飛行した後に崩壊する長寿命粒子となるものがあり得る
- $\gamma$  線は中性なので飛跡が見えない
- $\gamma$  線の到来方向の感度が良くなることで運動量ベクトルが正しく求められ、ALP の質量の再構成が改善

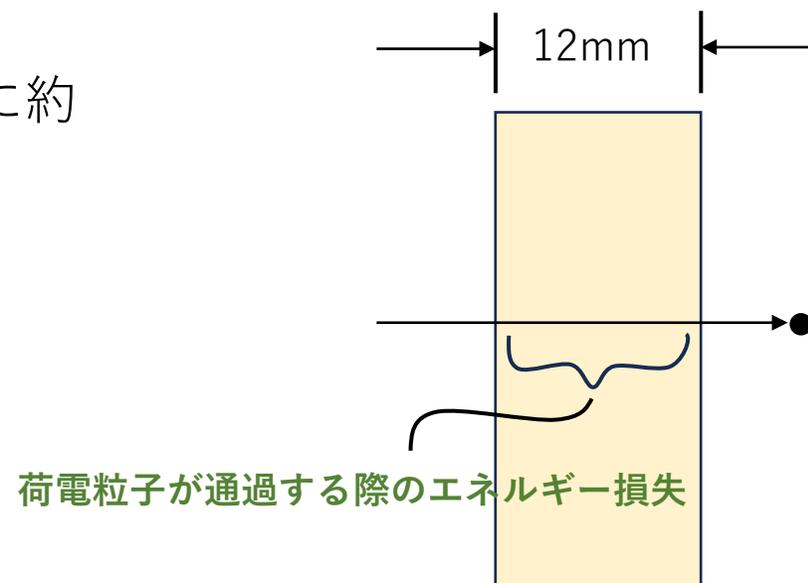


# アクティブ吸収層でのエネルギー損失

- 本研究ではアクティブ吸収層にFast-LGSOシンチレーターを用いる
- 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失う
- 単位長さ当たりのエネルギー損失は $\beta \gamma = 3$ 付近で最小となる  
=MIP(Minimum Ionizing Particle)
- このとき荷電粒子は $1g/cm^3$ の物質を1cm通過するとき約2MeV失う

本研究で使用した厚み12mmのFast-LGSO結晶では  
 $2[MeV] \times 7.4[g/cm^3] \times 1.2[cm] \approx 17.8[MeV]$

	Fast-LGSO
発光量(NaI(Tl)=100)	~90
減衰時間(nsec)	30~36
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.3~7.4



# APD (Avalanche Photodiode)とMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

- シリコン半導体の内部に強い電場勾配を作ること  
で電子なだれを引き起こし、信号を増倍させる機  
能を持つ半導体素子
- 降伏電圧以下の電圧で扱うことで、増幅率10~100  
倍程度で入射した光量に比例した出力を示す
- 本研究では浜松ホトニクス社製のS8664-55型を使  
用する
- ピクセル化されたガイガーモードで動くAPDを  
MPPCとよぶ。



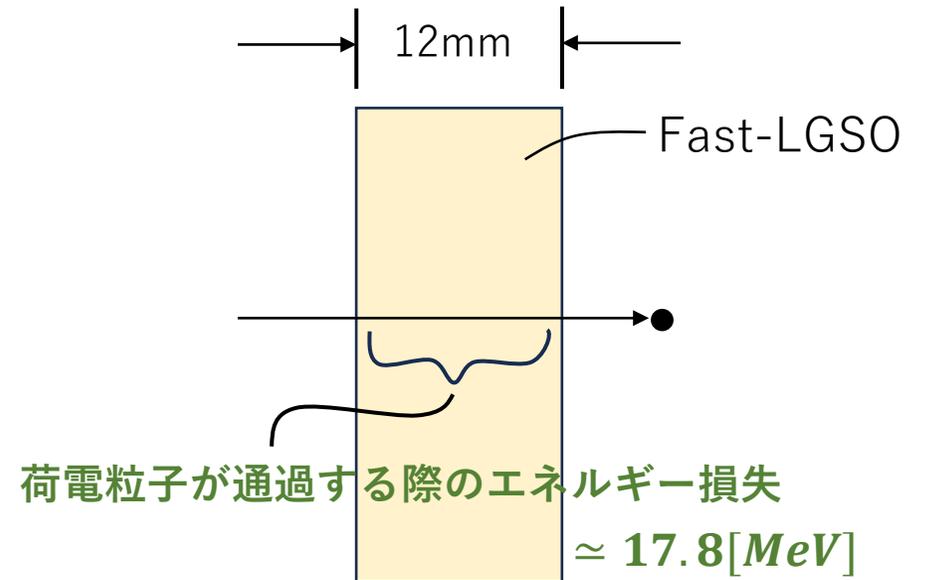
APD(S8664-55)



MPPC(S13360-6050CS)

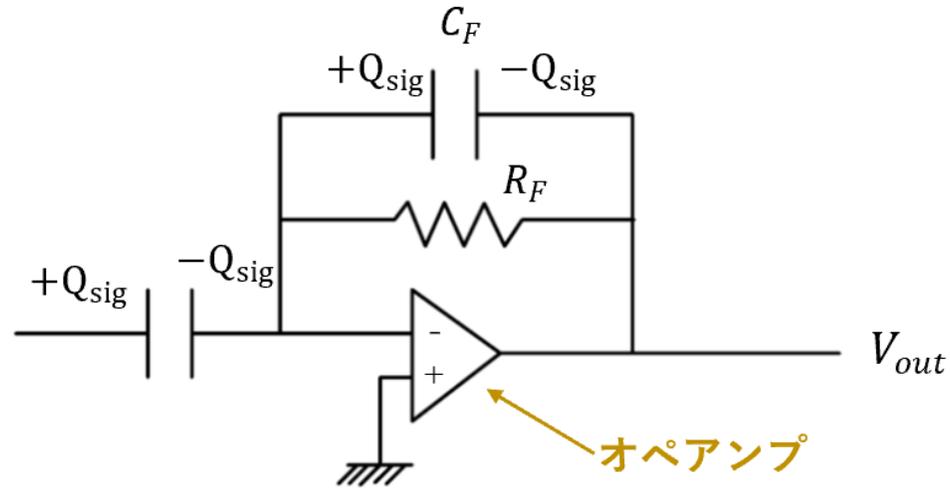
# APD読み出しにする動機

- 先行研究ではアクティブ吸収層にFast-LGSO結晶+MPPCで光量を測定した
- MPPCの特徴としては増倍率が約10万倍と高くフォトンカウンティング能力があるのでCs137線源からでる662keVの $\gamma$ 線が光電効果を起こす全吸収ピークを観測した
- 荷電粒子が貫通すると平均で十数MeVのエネルギー損失を起こすがMPPCは測定できる光子数の範囲（ダイナミックレンジ）が狭くて測れない



→そこで本研究ではダイナミックレンジの広いAPDとFast-LGSO結晶を用いて宇宙線の測定を行った。APDはMPPCと比べて増幅率が小さいため信号が微弱。信号を見るためには増幅器(チャージアンプ)を入れる必要がある。

# チャージアンプ(電荷積分アンプ)

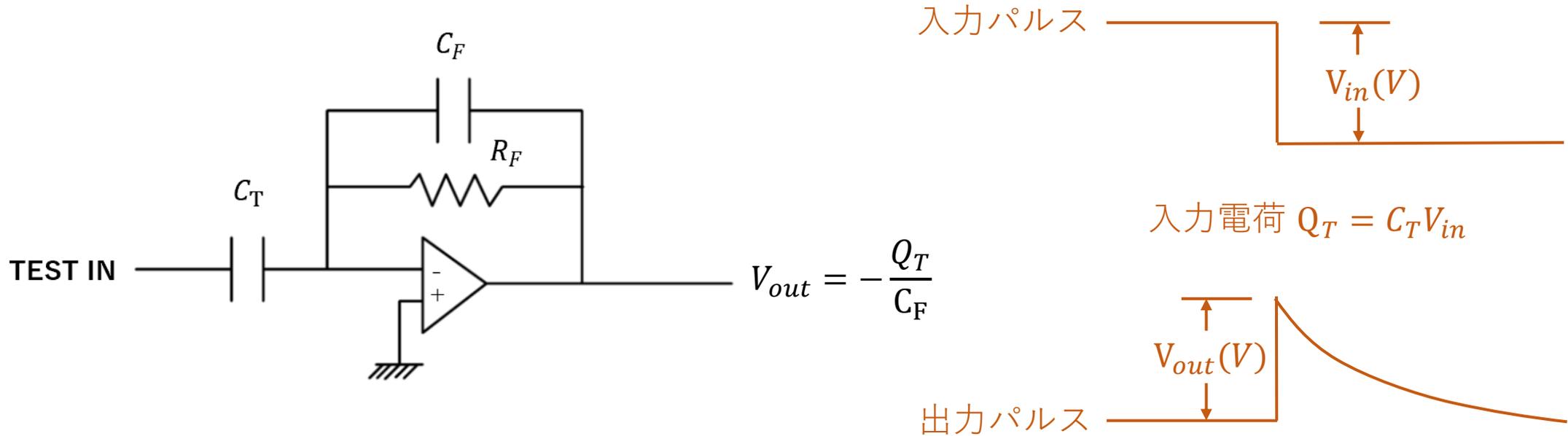


- ・ 電流信号を電圧信号に変換(反転増幅)

$$V_{out} = -\frac{Q_{sig}}{C_F} \times e^{-\frac{t}{C_F R_F}}$$

- ・ 時定数は $C_F R_F$ で決まる

# チャージアンプのテスト方法



- TEST INに右上のような矩形波を入れた時の出力は右下の波形になる
- 本研究ではオペアンプはtexas instruments社のLM6142を使用する

# 目次

1.はじめに

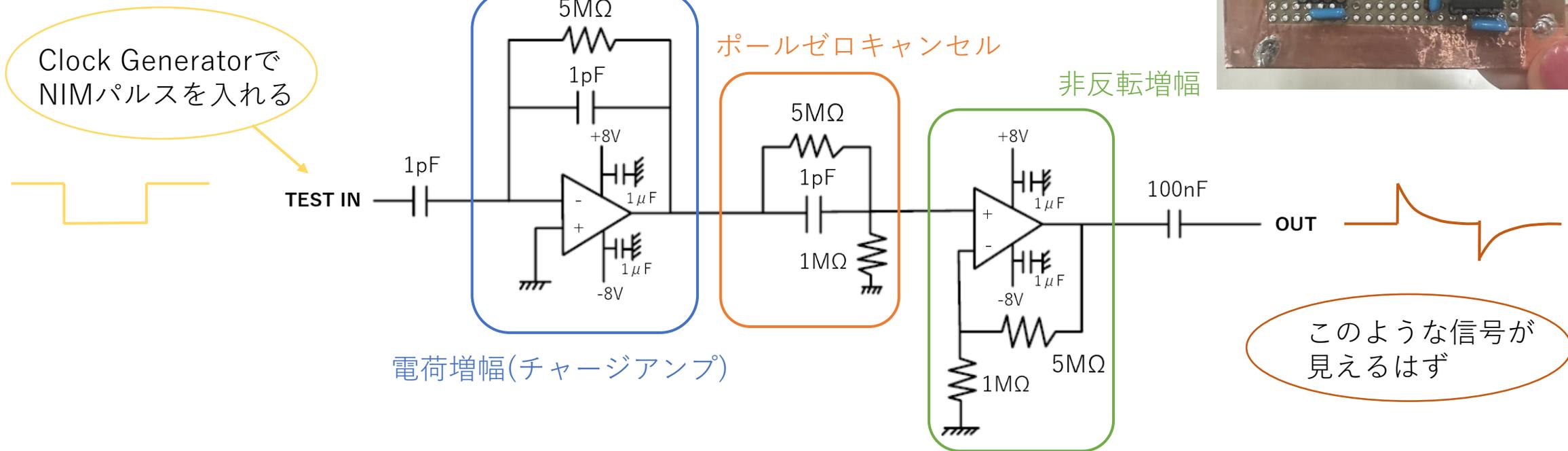
2.測定準備

- ・アンプの作成

3.測定・解析

4.まとめ

# アンプの作成：回路図



- チャージアンプだけでは出力インピーダンスが大きくなってしまったため、それを下げるためにポールゼロキャンセルを入れた
- ポールゼロキャンセル部分での信号減衰を回復させるために非反転増幅回路が入っている

# 使用した装置

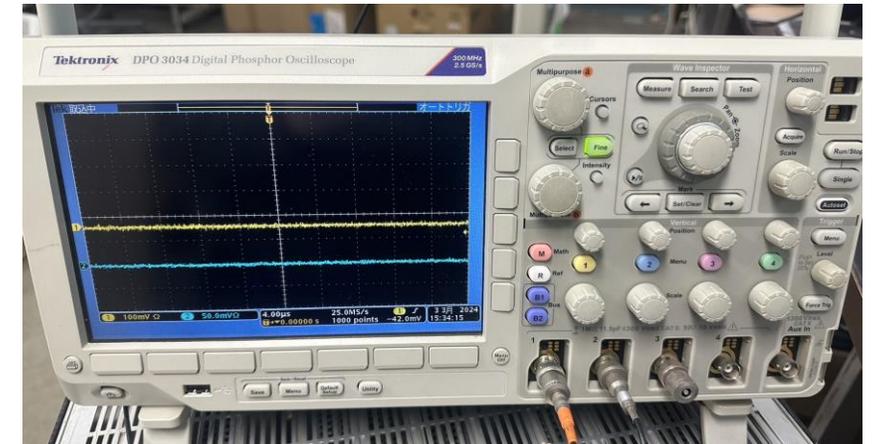


**Attenuator**  
信号を減衰させる装置

**Clock Generator**  
NIMパルスをTEST INに入れる



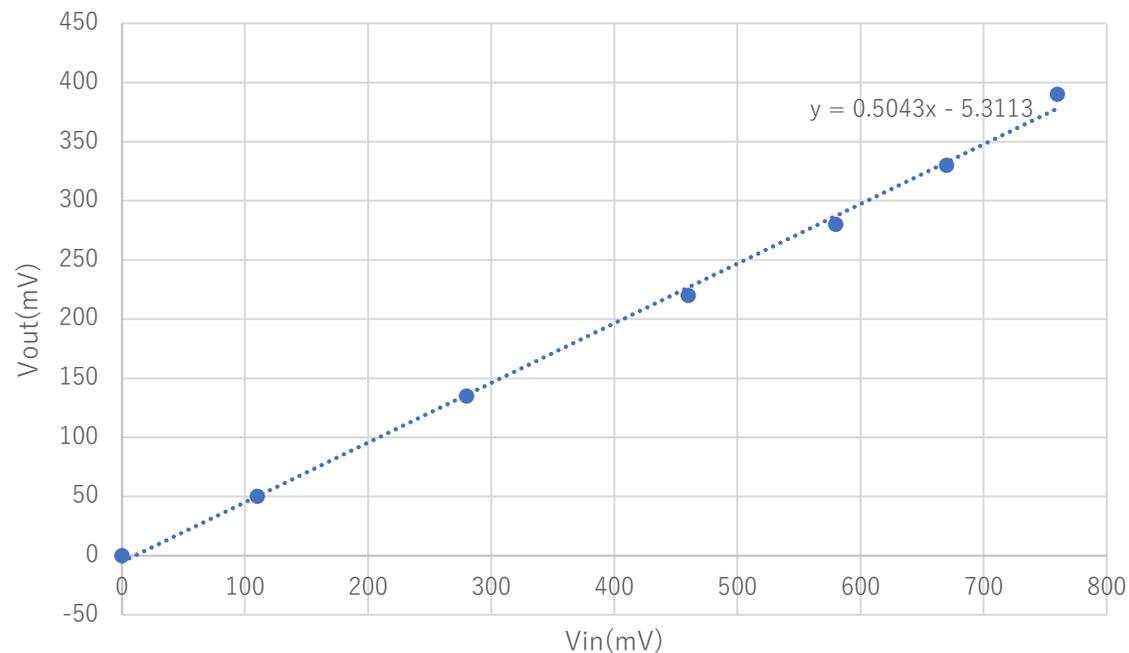
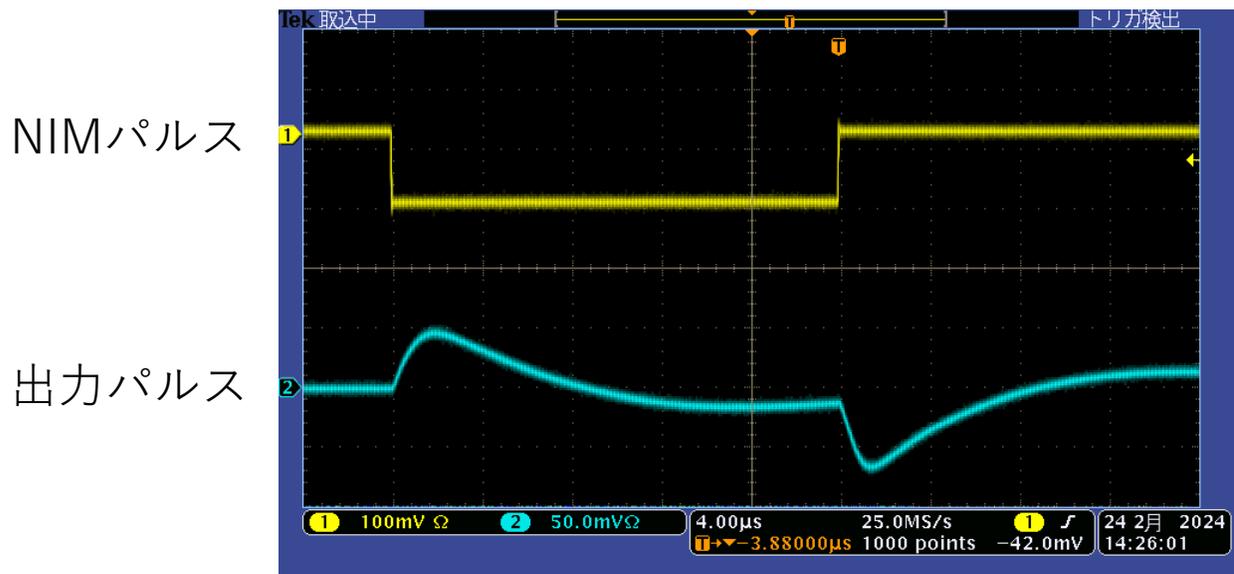
電源装置



オシロスコープ  
ch1 NIMパルス  
ch2 出力パルス  
トリガーはch1

# アンプの動作確認結果

# アンプの動作確認の結果



- 幅 $20\ \mu\text{s}$ 、電圧 $120\text{mV}$ のNIMパルスを入れた
- 時定数 $CR=1\text{pF} \times 5\text{M}\Omega=5\ \mu\text{s}$ とだいたい一致している
- 右図はAttenuatorでNIMパルスの電圧を変えて測定した結果である
- 増倍率は $0.5\text{V}/\text{pC}$ ほど
- テストした $0.8\text{pC}$ までの範囲では入力電荷と出力波高が正比例していることを確認した
- これを使って宇宙線測定を行う

# 目次

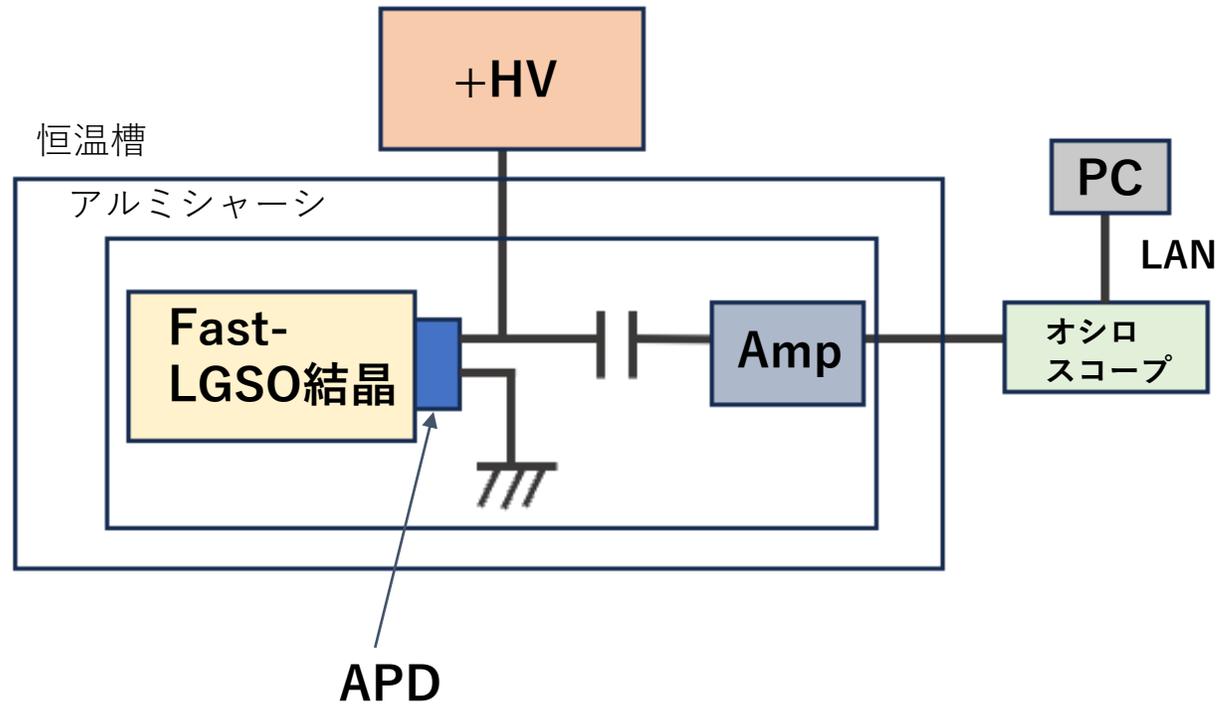
1.はじめに

2.測定準備

3.測定・解析

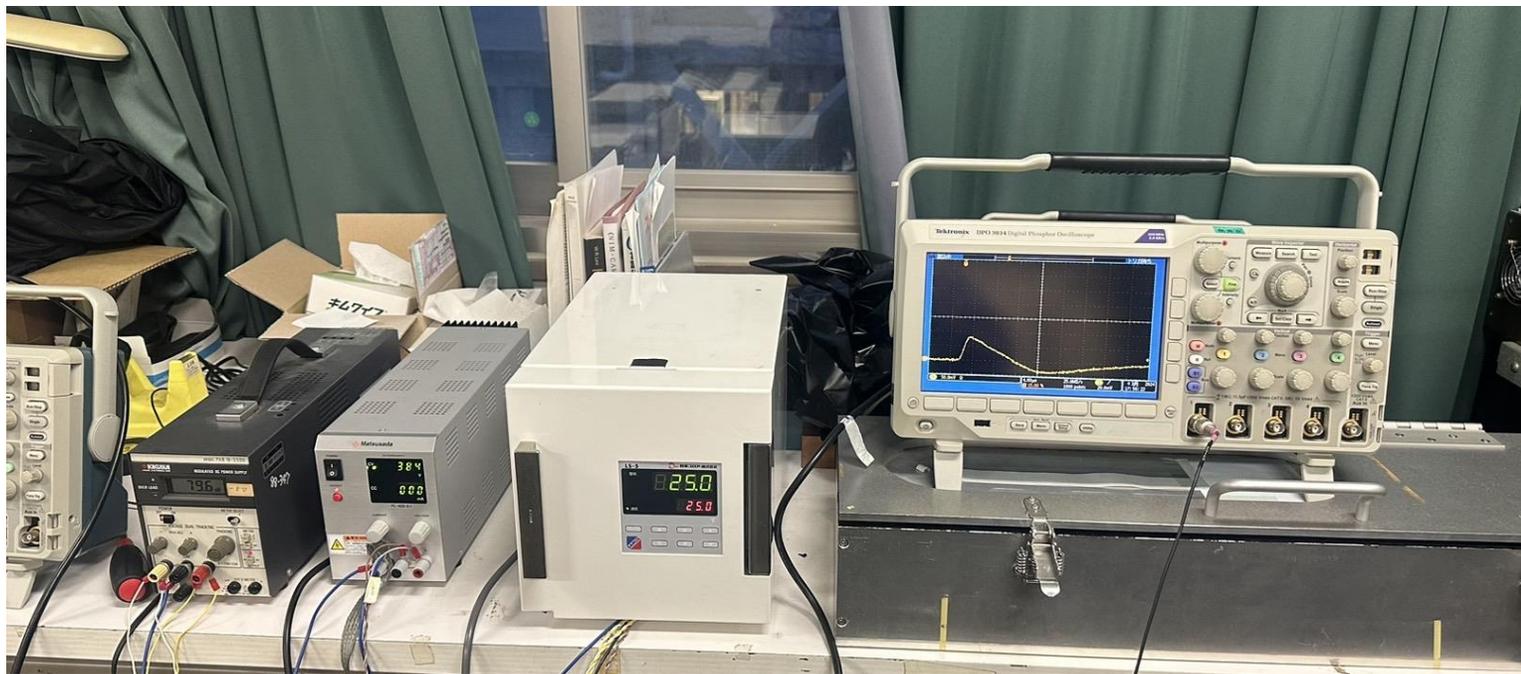
4.まとめ

# セットアップの概略図



- HVは384V
- 静電遮蔽するためにアルミシャーシに入れる
- APDは温度特性があるので恒温槽(25°C)に入れる

# 使用した装置



アンプの電源

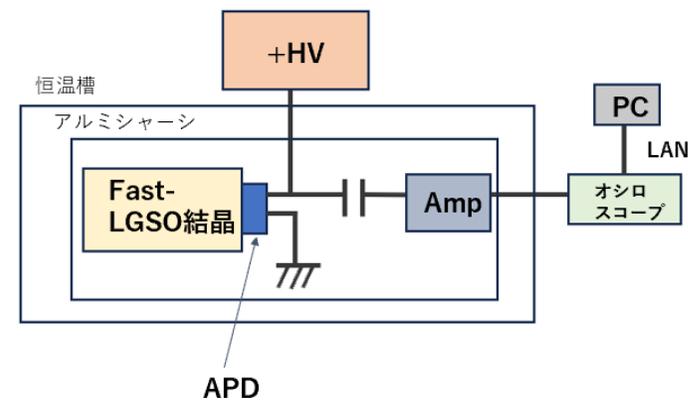
HV用電源

恒温槽

オシロスコープ



恒温槽の中



# 宇宙線の測定回路図

## ローパスフィルター

高周波数成分をカット

→HVのノイズを取り除く役割

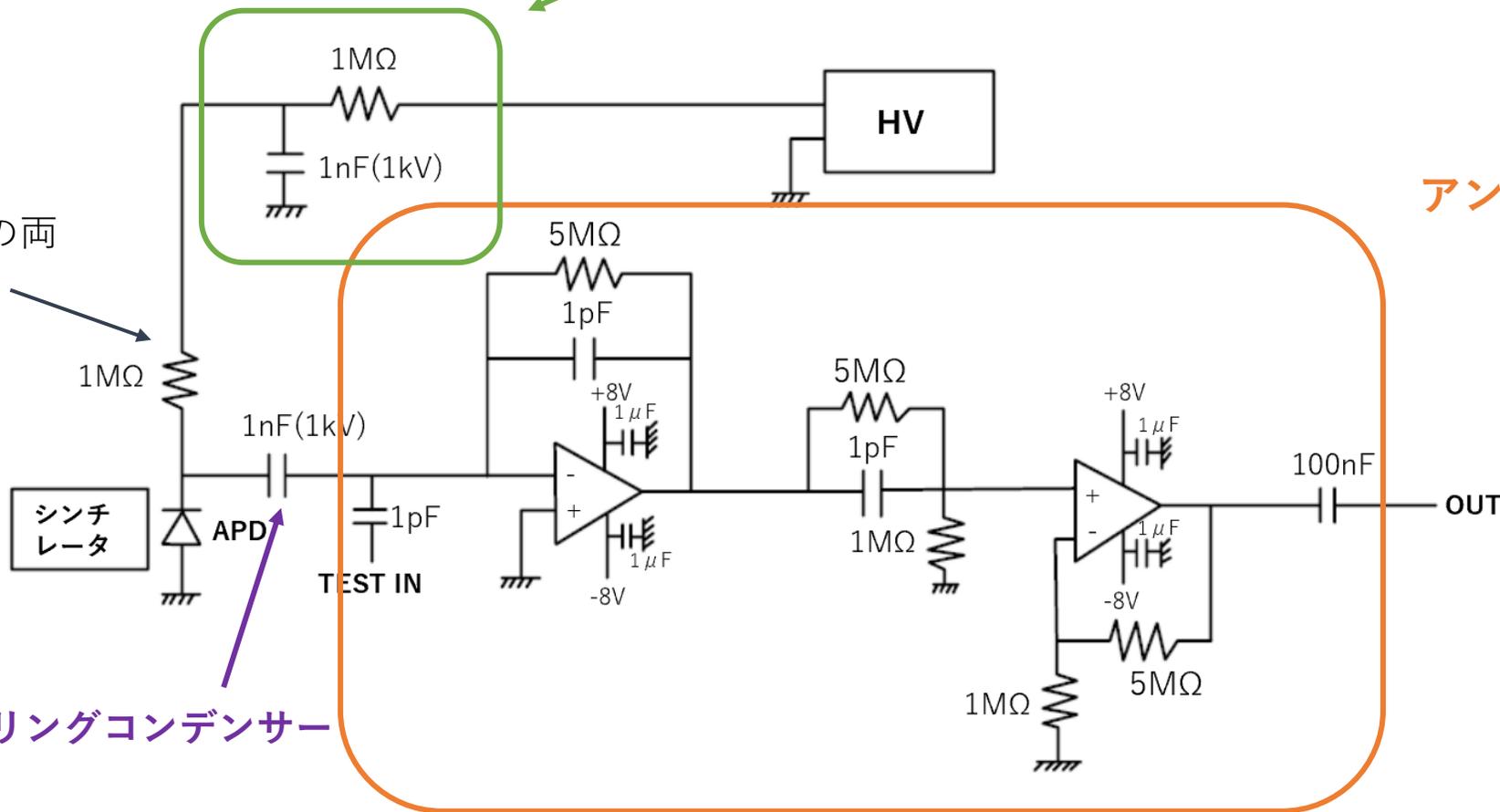
HVがかかっているのでコンデンサーは高耐圧のものを使用

## 保護抵抗

信号形成時はこれらの両端に電位差が発生

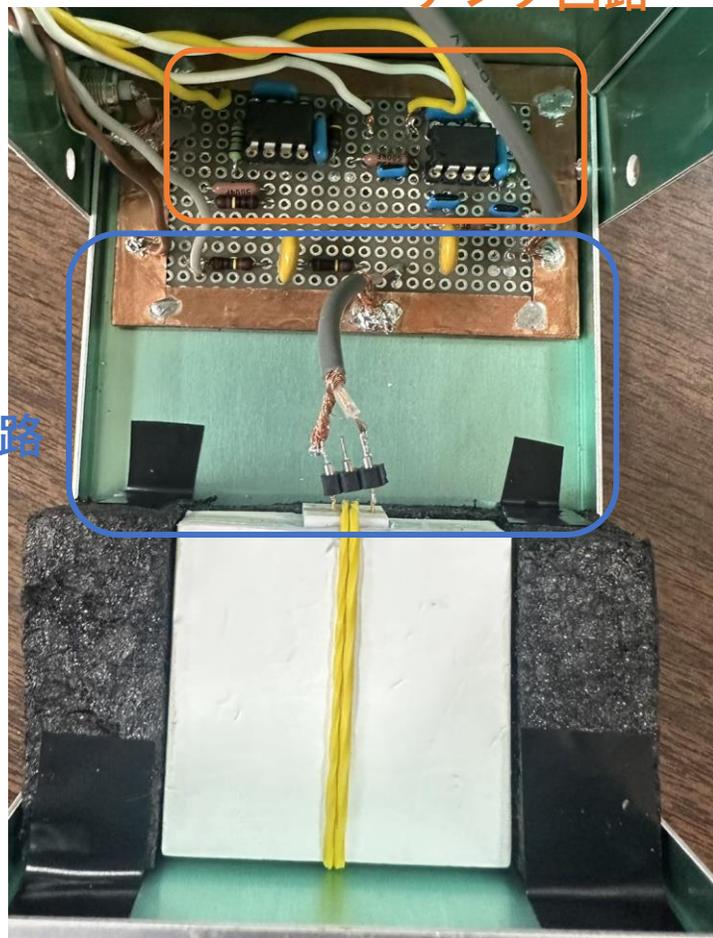
## カップリングコンデンサー

## アンプ回路



# 回路の写真

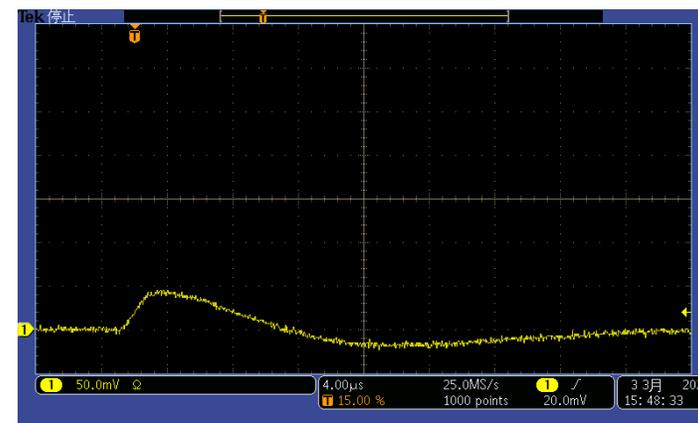
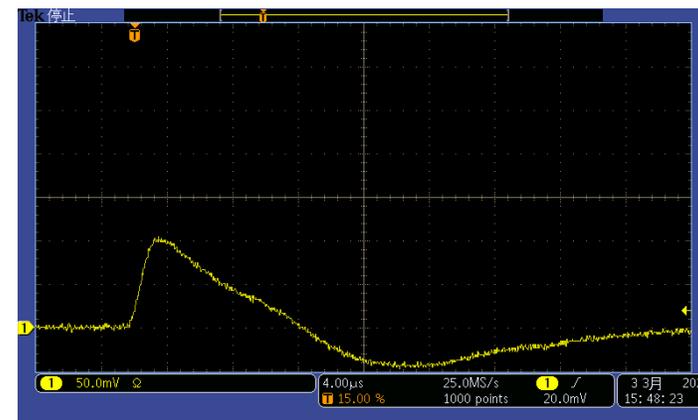
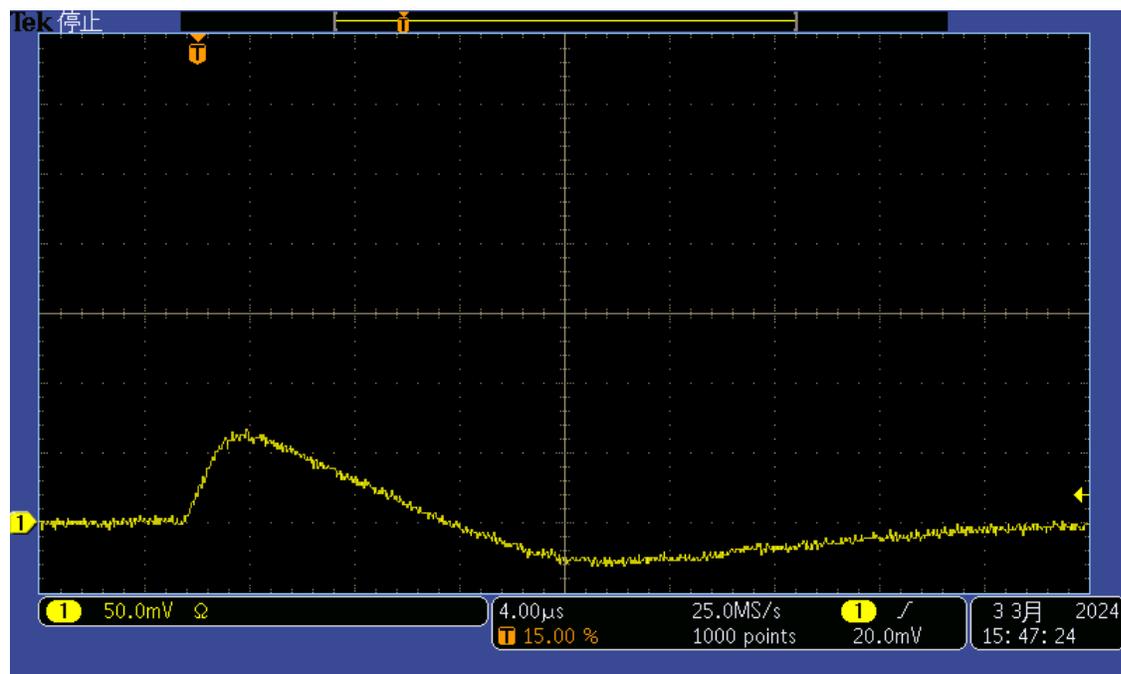
アンプ回路



- Fast-LGSO結晶の大きさ  
40.0mm × 40.0mm × 12.0mm
- 反射材の白色GoreTexシートで包んでいて、光検出器の受光面の大きさにあうように窓を開けている
- APDの受光面の大きさ  
5mm × 5mm

# 測定結果

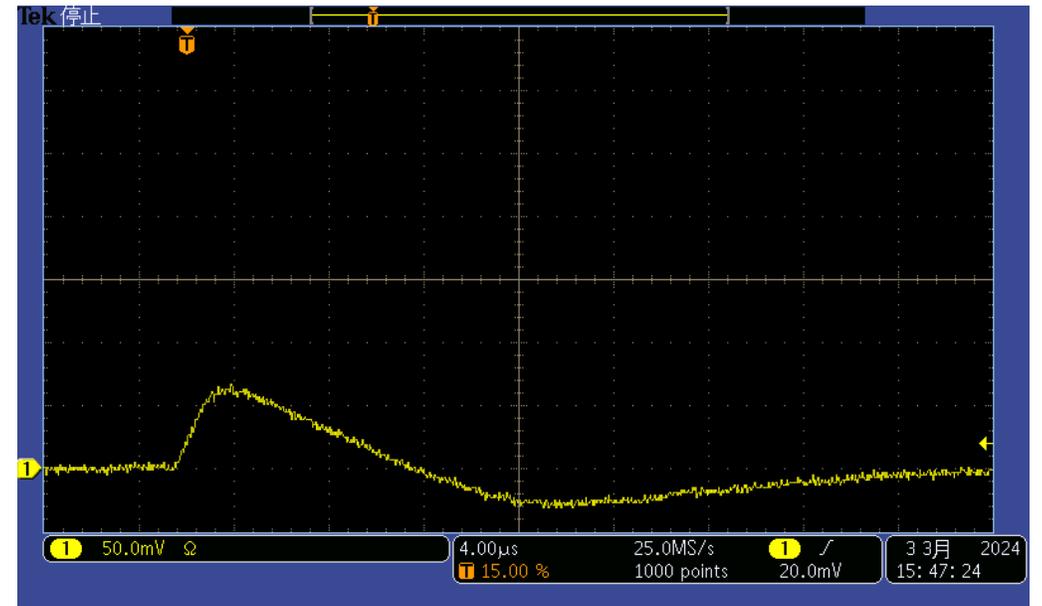
# 測定結果



- 数秒に一回信号が見えた
- 宇宙線は $1\text{cm}^2$ に一分に一回ほどの頻度
- 逆向きにオーバーシュートしているので解析時に手当

# データ収集方法

- アンプの出力パルス自体でトリガー
- イーサーネット経由でデジタルオシロスコープから波形データをPCにブロック転送することによりデータ収集した
- 10000イベントのデータが集まるように測定した



収集したデータを解析して信号電荷の分布をみる

# データ解析方法①

- 一つの波形は40nsec間隔で1000点の時系列データ
- 収集したデータは8bit整数値になっているので電圧値に直す必要がある
- $i$ 番目のデータの値を  $x_i$  とすると

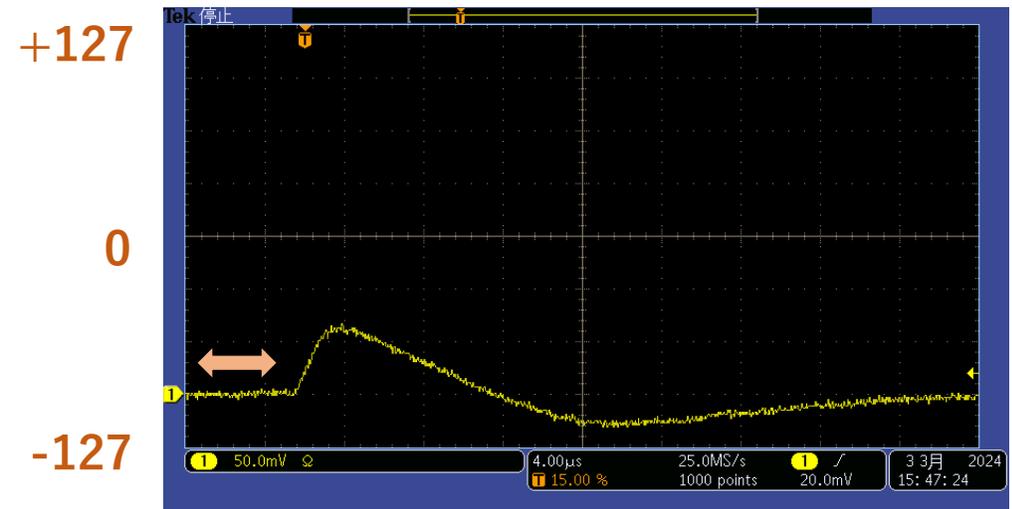
$$V_i = x_i \times \frac{50[\text{mV/div}] \times 8[\text{div}]}{256}$$

- 無信号時の基準値をとるために各イベントで100番目までのデータの平均をとりその値をゼロ点  $V_{ped}$  とした。

$$V_{ped} = \frac{\sum_0^{99} x_i}{100} \times \frac{50[\text{mV/div}] \times 8[\text{div}]}{256}$$

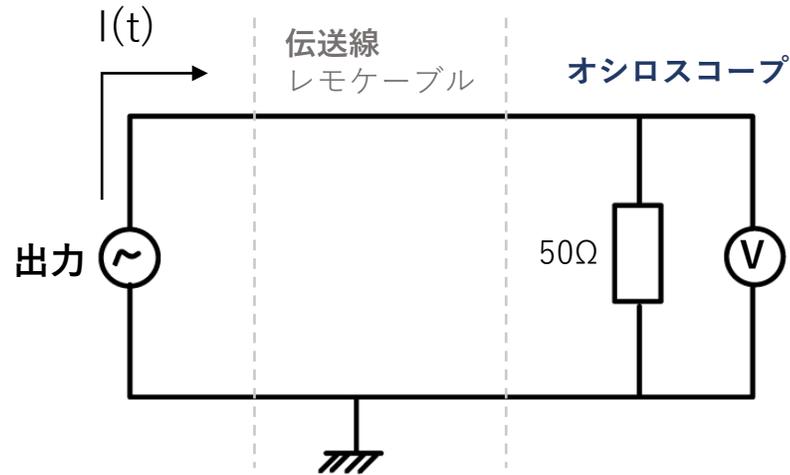
- 信号のデータとゼロ点との差を  $\Delta V$  とする

$$V_i - V_{ped} = \Delta V$$



# データ解析方法②

$$V(t) = I(t) \times R$$



レモケーブルの特性インピーダンスが50Ωなので、オシロスコープの終端抵抗は50Ωに設定

## 信号電荷の求め方

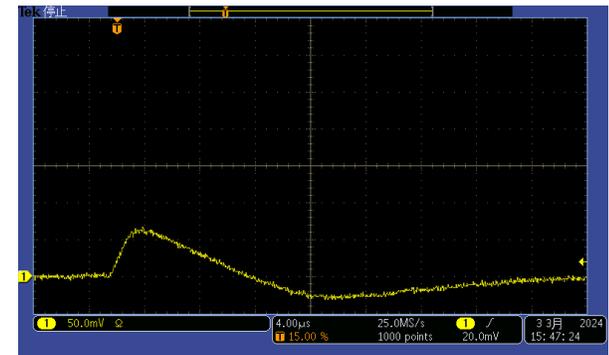
- 信号電荷は電圧値を積分して求める

$$\begin{aligned} Q &= \sum_j \Delta Q_j = \sum_j (I_j \times \Delta t) \\ &= \sum_j \frac{\Delta V_j}{R} \times \Delta t \end{aligned}$$

- $R=50\Omega$
- $\Delta t$ は1000点のデータの時間間隔

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

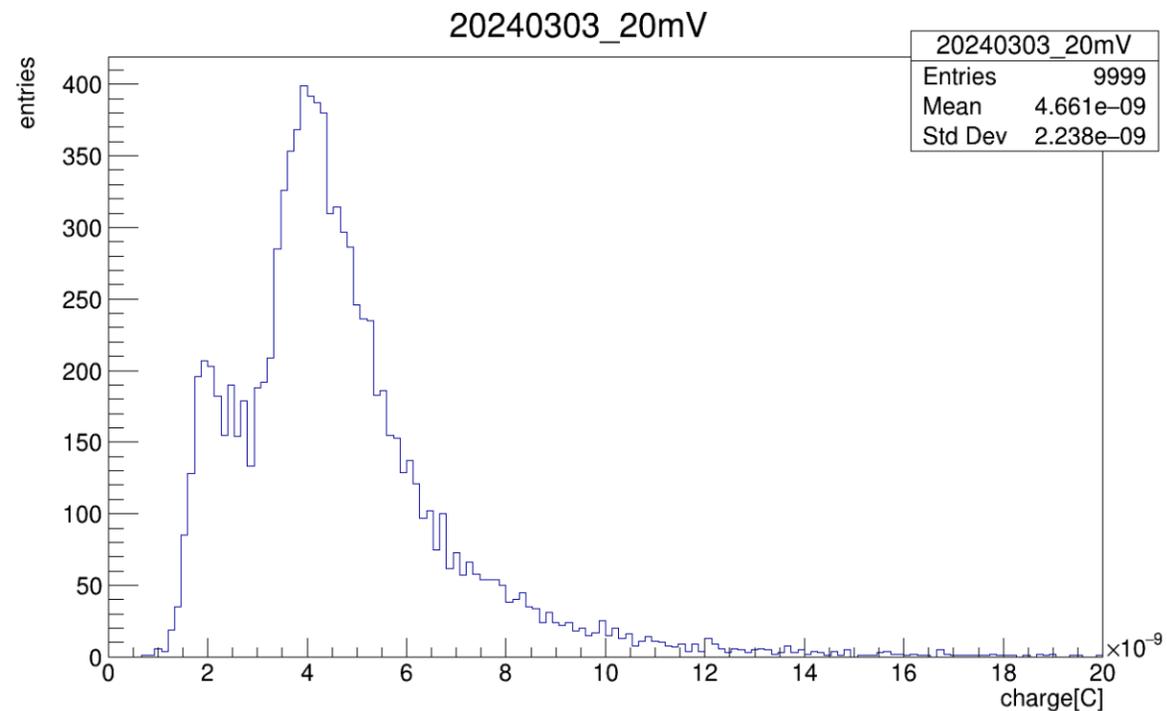
- オーバーシュートした部分を取り除くため  $\Delta V > 0$  のときだけ足し合わせる



# 解析結果と今後の課題

# 結果

- トリガーを20mVにしてデータを収集した
- 目で見てランダウ分布を確認できた
- エネルギーの低い部分でのイベントの集中が見られる

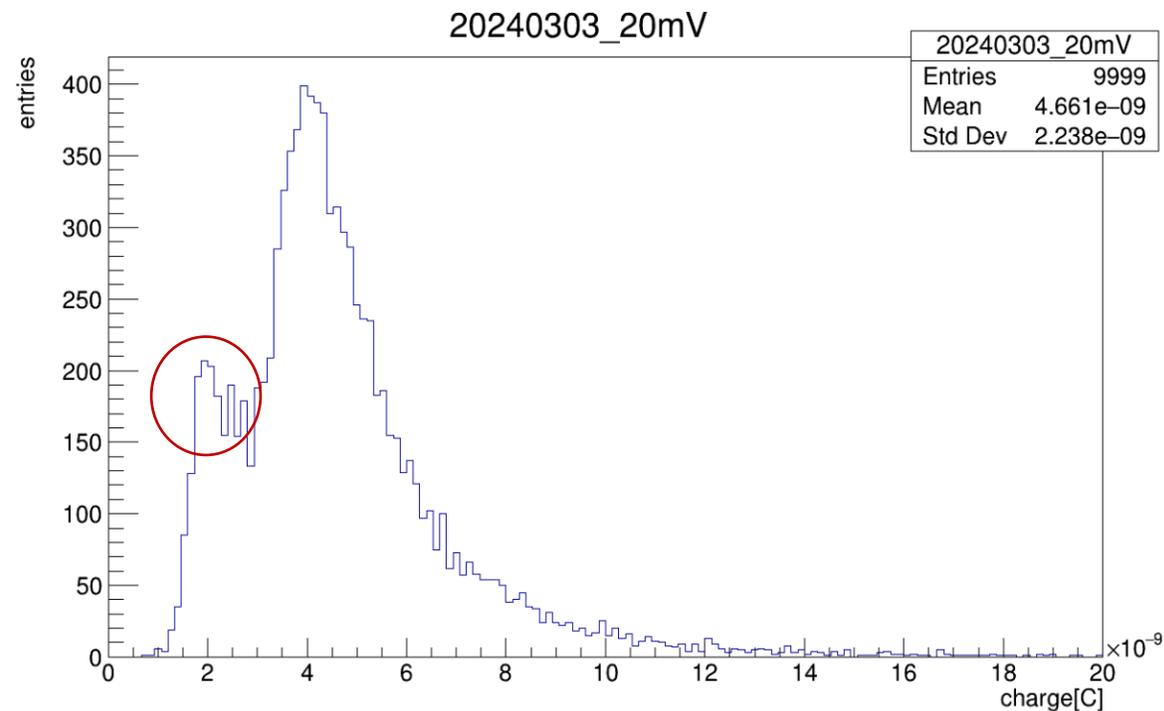


# 今後の課題

- トリガーを20mVにしてデータを収集した
- 目で見てランダウ分布を確認できた
- エネルギーの低い部分でのイベントの集中が見られる



理由を理解するためには宇宙線の天頂角分布をいれたシミュレーションを行いその結果と比較する必要があると考える



# 目次

- 1.はじめに
- 2.測定準備
- 3.測定・解析
- 4.まとめ

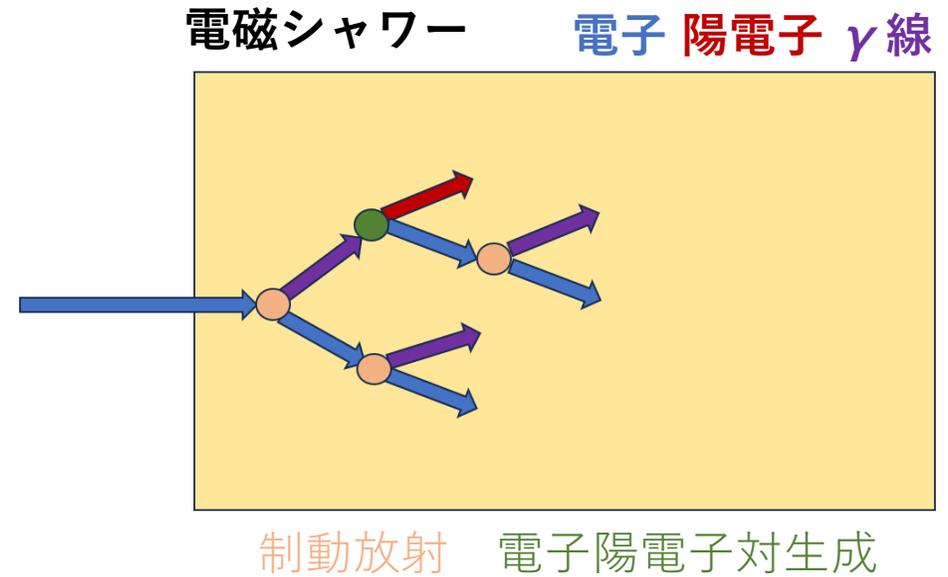
# まとめ

- 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
- 電荷積分型アンプを製作した。増幅率は0.5V/pCであった
- これらをつないだセットアップで宇宙線の信号が見えた
- 波高分布は荷電粒子が通過する際にみられるランダウ分布をしている
- エネルギー損失が小さい領域にイベントの集中があった
- 理由を理解するために宇宙線の天頂角分布を入れたシミュレーションが必要と考えられる

BACK UP

# 電磁シャワー

- ・ 高エネルギーの電子や光子は物質に入射すると、制動放射や電子陽電子対生成が連鎖反応的に起こる (電磁シャワー)
- ・ 物質が十分に重くて大きい場合、そのエネルギーのほとんどを物質中で失う。

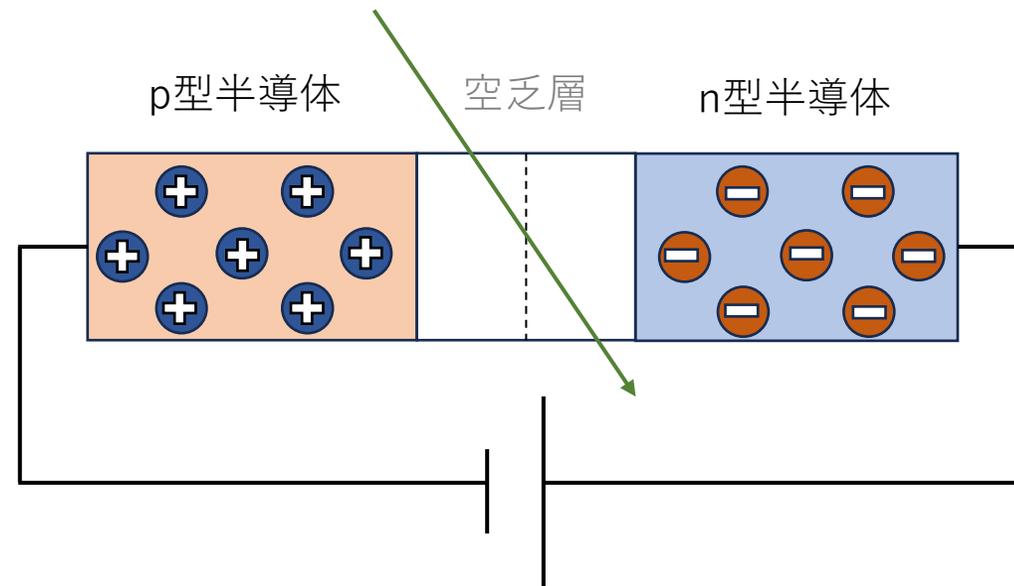


結晶シンチレーターで電磁シャワーが起こるとエネルギーに比例した量の光を発する。  
光検出器を使ってこの光の量を電気信号に変えて読み出す。

# 半導体検出器(光を電気信号パルスに)

## ダイオード

- ・ p型半導体とn型半導体を接合
- ・ 接合界面で電子と正孔が中和した空乏層が生成される
- ・ 逆バイアスを印加すると正孔がp側、電子がn側に寄せられ空乏層が広がる

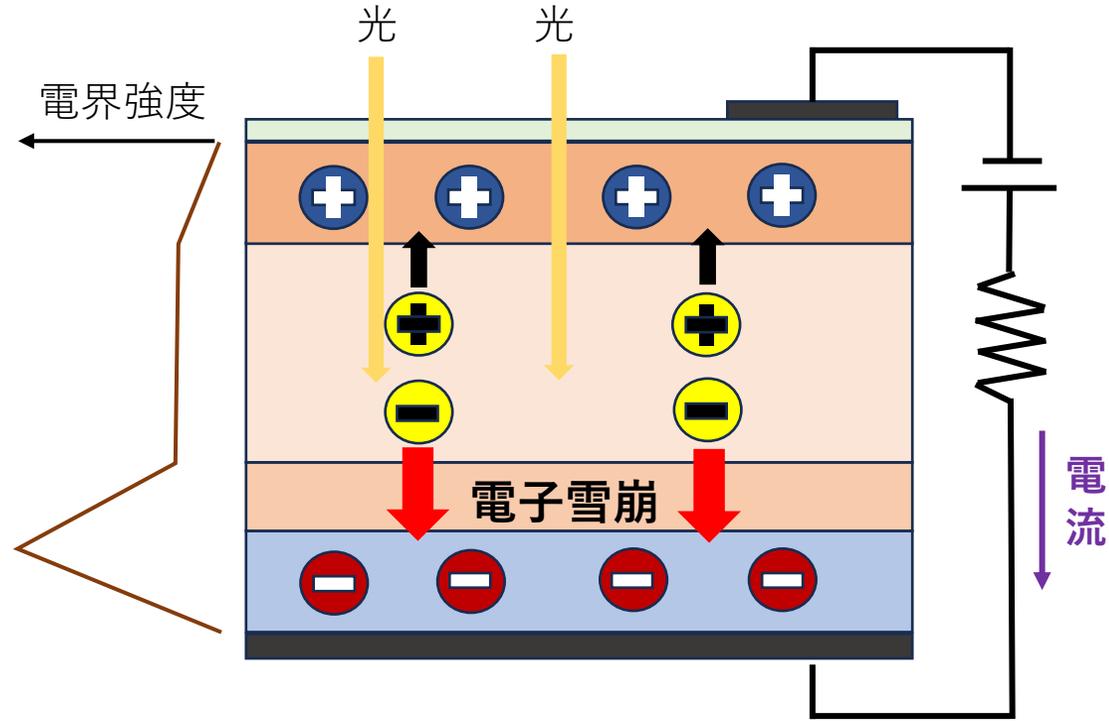
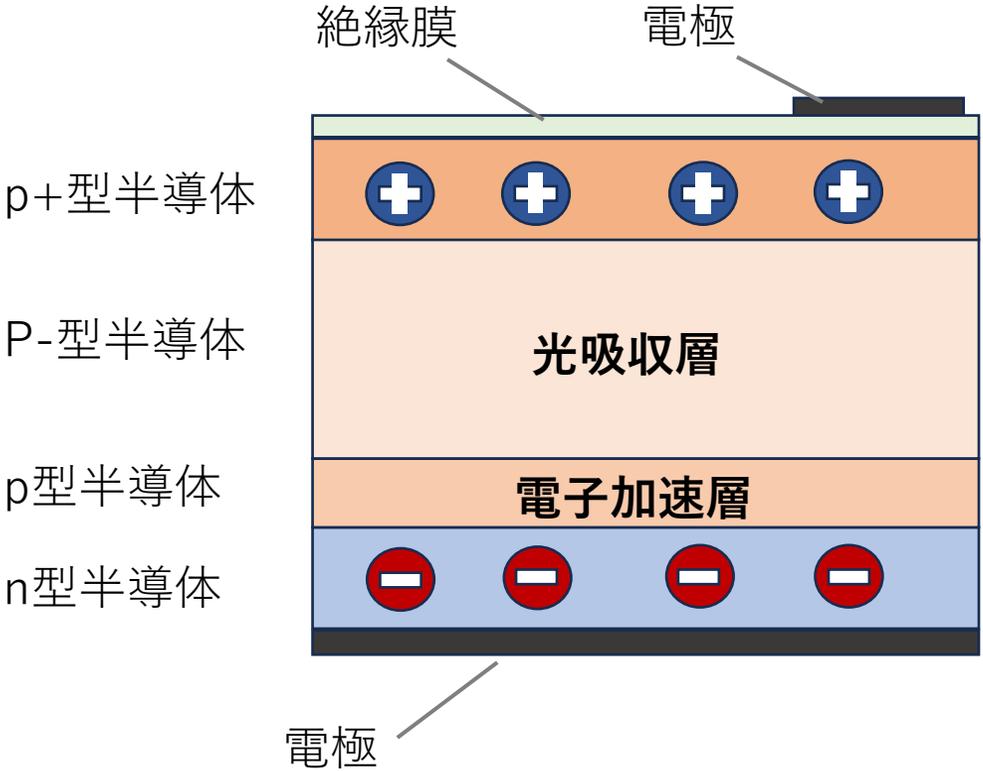


空乏層に光の入射や荷電粒子の通過があると、光電効果や電離により電子・正孔対が生成される。これが動くことにより電流が流れるので、信号パルスとして取り出す。

# APD(avalanche photodiode)

- ・シリコン半導体の内部に強い電場勾配を作ることによって電子なだれを引き起こし、信号を増倍させる機能を持つ半導体素子
- ・APDの動作モードにはガイガーモードとプロポーショナルモードの二つがある。ガイガーモードは電子なだれが起きるブレイクダウン電圧以上の電圧で全面にアバランシェが広がるモードであり、増幅率が高いがAPDに入射した光子数に無関係の出力信号パルスを出す。
- ・一方でプロポーショナルモードではブレイクダウン電圧以下の電圧でアバランシェを作るので増幅率は10～100倍程度となり、APDに入射した光量に比例した出力を示す。この実験ではプロポーショナルモードを使う

# APDの原理



# Fast-LGSOシンチレータ

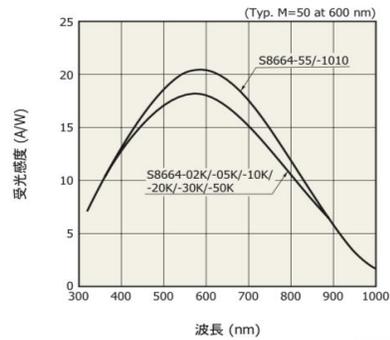
	CsI(Tl)	Fast-LGSO
発光量(NaI(Tl)=100)	165	~90
減衰時間(nsec)	1300	30~36
密度(g/cm <sup>3</sup> )	4.51	7.3~7.4
潮解性	若干有	無
発光波長(nm)	560	410



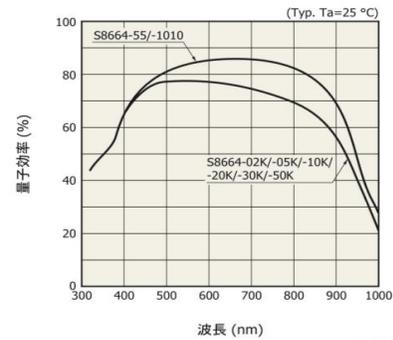
- ・発光時間が短い→パイルアップ軽減
- ・大きさは40.0×40.0×12.0mm
- ・反射材である白色Gore-Texシートで包んでいて、光検出器の受光面の大きさにあうように窓を開けている。

# APDのデータシート

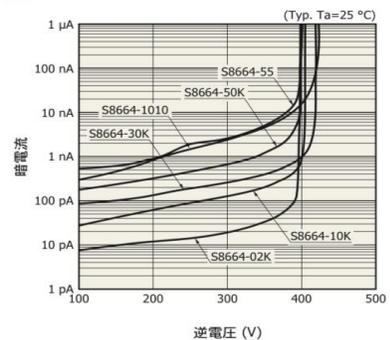
分光感度特性



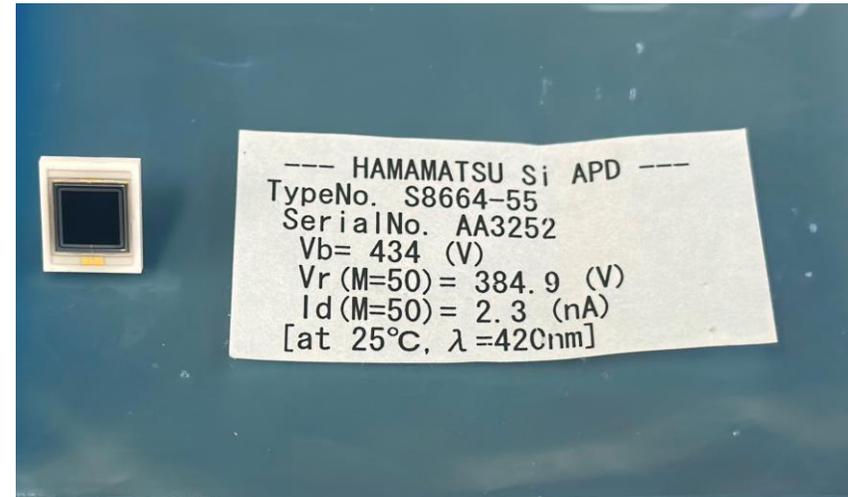
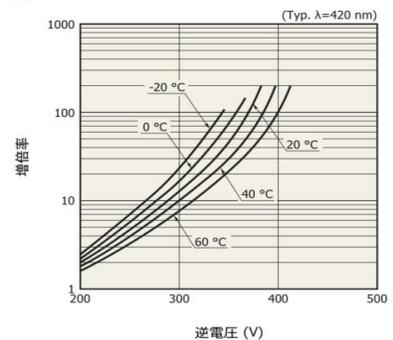
量子効率-波長



暗電流-逆電圧



増倍率-逆電圧



電気的および光学的特性 (指定のない場合はTyp. Ta=25 °C)

型名	感度 波長 範囲 λ (nm)	最大 感度 波長*4 λp (nm)	受光感度 S M=1 λ=420 nm (A/W)	量子効率 QE M=1 λ=420 nm (%)	降伏電圧 VBR ID=100 μA		降伏 電圧の 温度 係数 (V/°C)	暗電流*4 ID		遮断 周波数*4 fc (MHz)	端子間 容量*4 Ct (pF)	過剰 雑音 指数*4 λ=420 nm	増倍率 M λ=420 nm
					Typ. (V)	Max. (V)		Typ. (nA)	Max. (nA)				
S8664-02K	320 ~ 1000	600	0.24	70	400	500	0.78	0.1	1	700	0.8	0.2	50
S8664-05K								0.2	1.5	680	1.6		
S8664-10K								0.3	3	530	4		
S8664-20K								0.6	6	280	11		
S8664-30K								1	15	140	22		
S8664-50K								3	35	60	55		
S8664-55								5	50	40	80		
S8664-1010								10	100	11	270		

\*4: 特性表に記載された増倍率での値

・ Fast-LGSOの発光波長410nmで量子効率は約70%

浜松ホトニクス社カタログより抜粋

## ②APDの動作確認：回路図

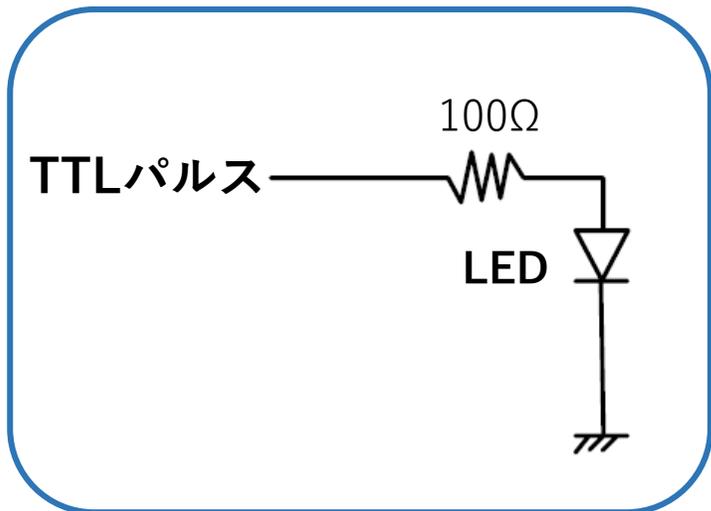
### ローパスフィルター

高周波数成分をカット

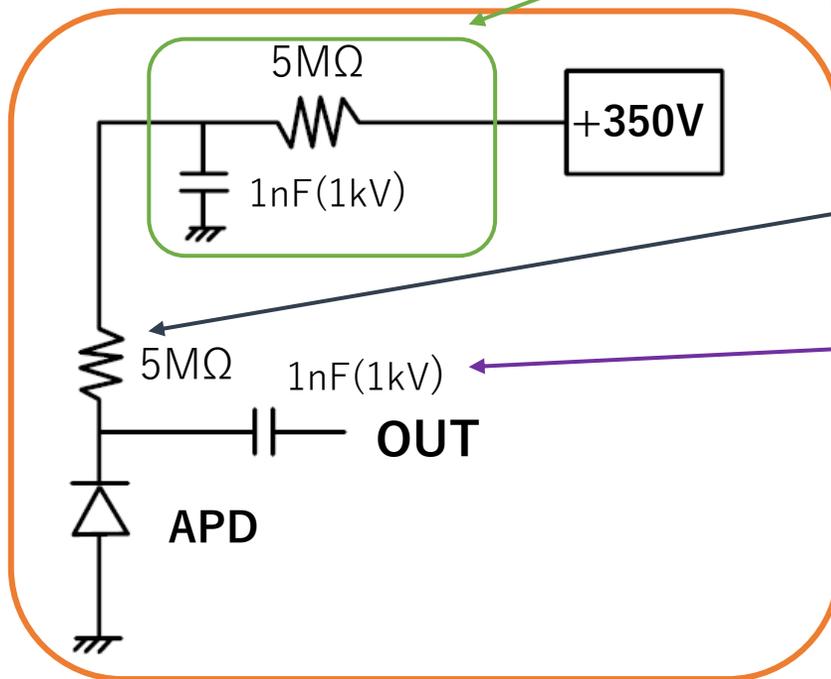
→HVのノイズを取り除く役割

HVなのでコンデンサーは高耐圧のものを使用

### LED回路



### APD回路

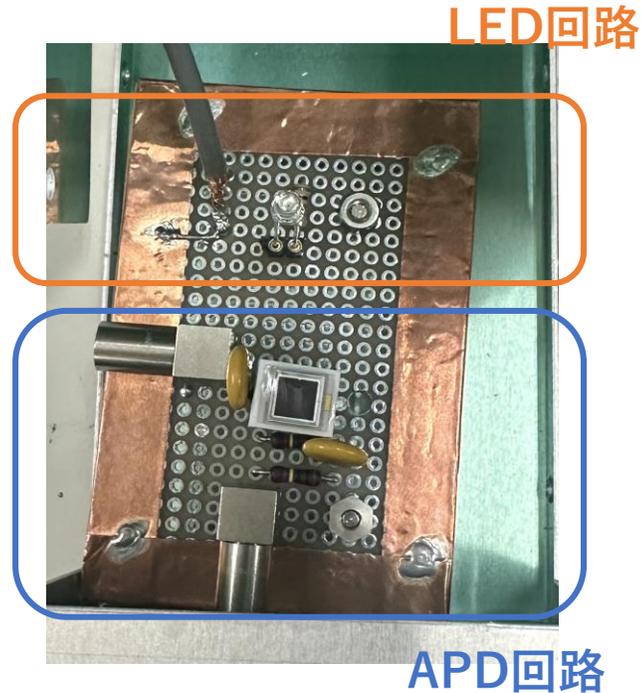


電流が流れるのを防ぐ

バイパスコンデンサ

- 使用したLEDは日亜化学工業株式会社製のNSPB320BS
- LEDを光らせるためにClock GeneratorからTTLパルスを入れた

## ②APD回路の動作確認：セットアップ



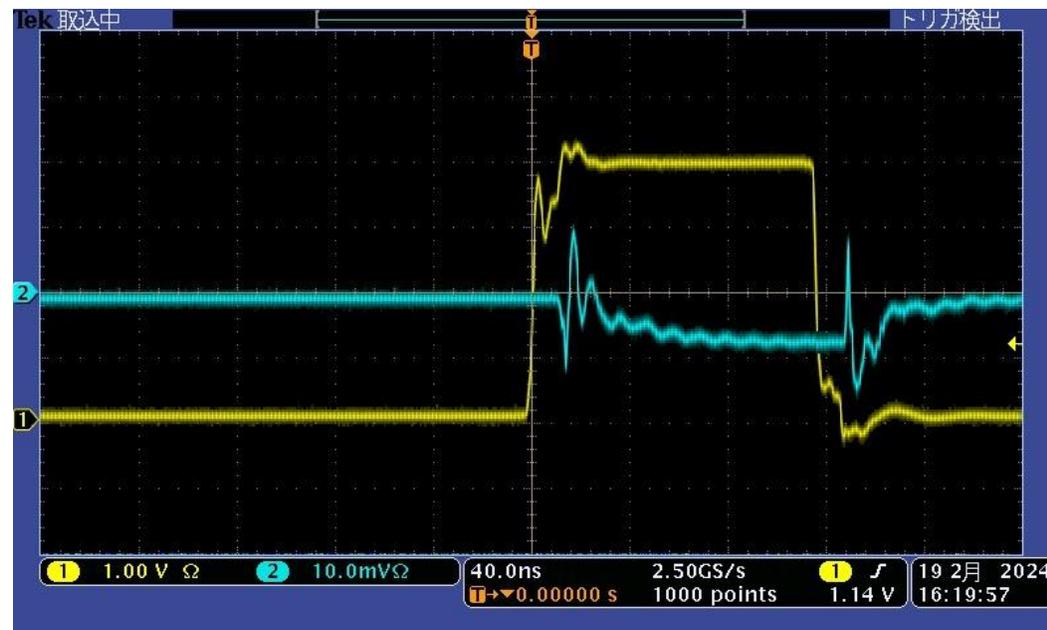
Clock  
Generator



- 回路基板をアルミシャーシにいれ静電遮蔽し、それを黒幕で覆うことで外からの光が入らないようにした

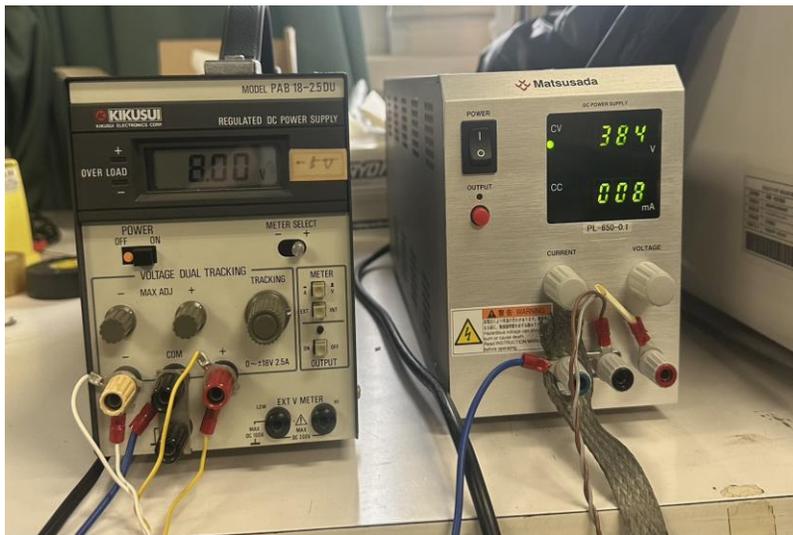
## ②APD回路の動作確認：結果

- 左はHVオフ、右図はオンにしたときのもの
- オンオフで差が見えるのでAPDが動作していることがわかった



→アンプの作成、APDの動作確認ができた

# 宇宙線測定の設定アップ：使用した装置



アンプの電源

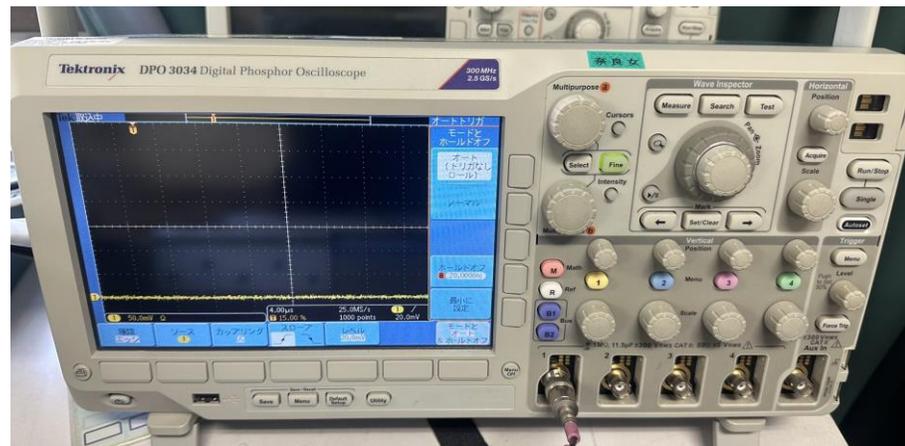
HV用電源



恒温槽(↓中身)



卒研発表会



オシロスコープ