

すばる望遠鏡サイトに設置する 空気シャワー検出器の開発

大阪公立大学大学院 理学研究科 物理学専攻 修士1年
古坊 龍一

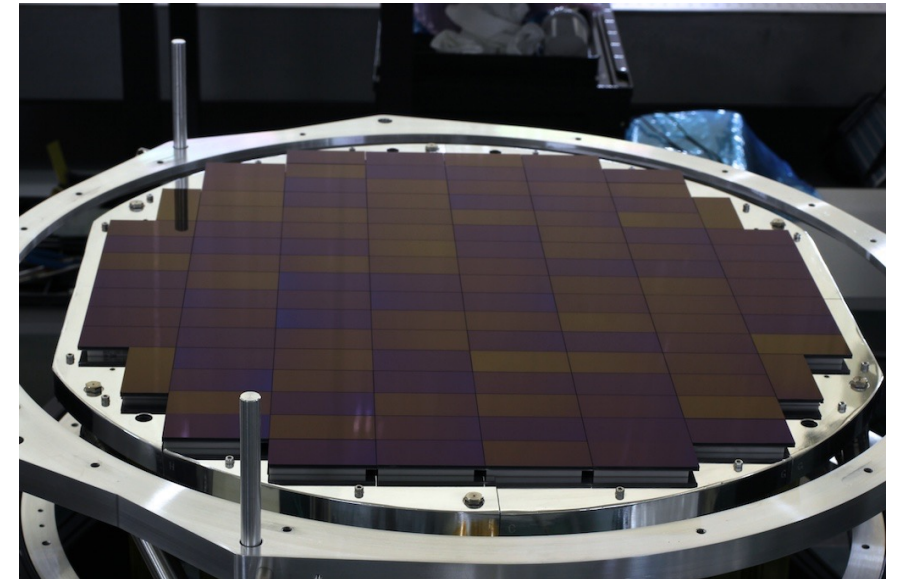
第7回空気シャワー研究会
3/26

すばる望遠鏡

- アメリカハワイマウナケア山
標高 4139m
- 有効口径 8.2m の光学赤外線望遠鏡
- Hyper Suprime-Cam(HSC)
 - 116枚の大型CCD素子
- 観測対象：星や銀河



credit : HSC project

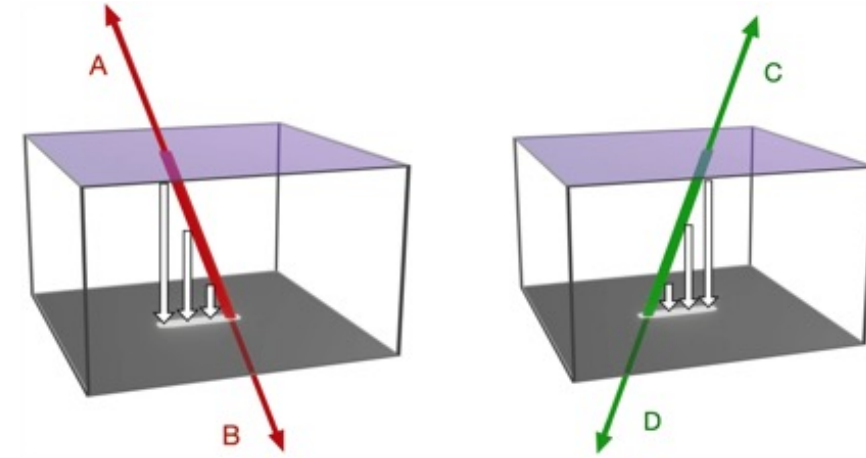
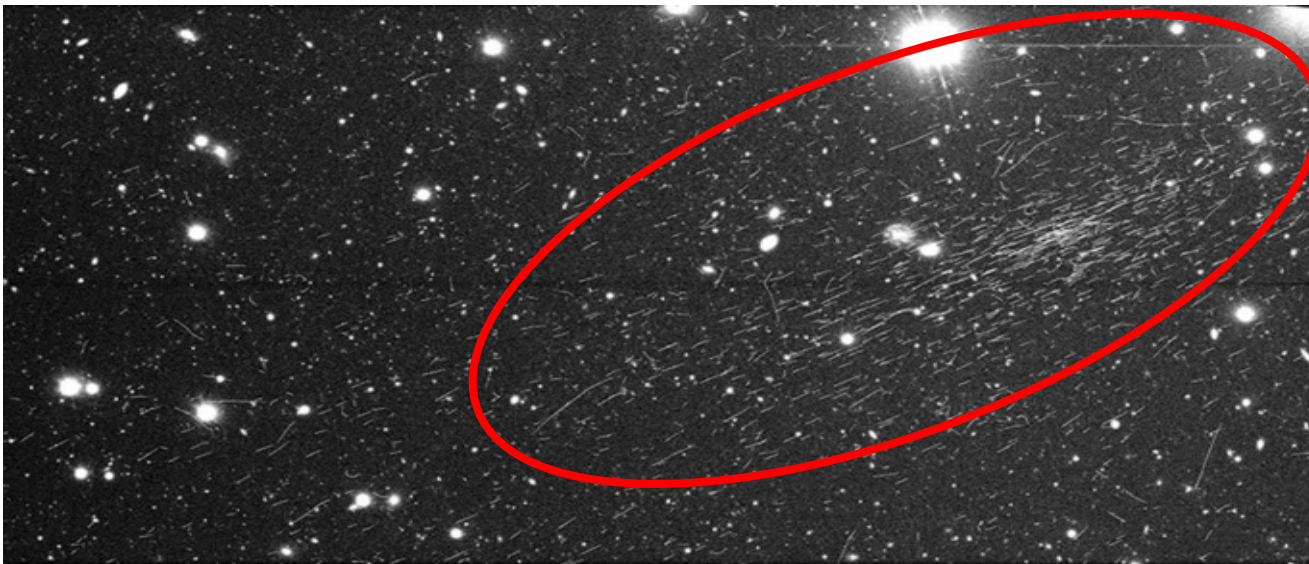


credit : HSC project

研究背景

- すばる望遠鏡のCCD素子で空気シャワーの可視化に成功
- この粒子の残したから飛程から粒子識別できる可能性
- 本来はノイズで除去されるものに着目

到来方向が不明



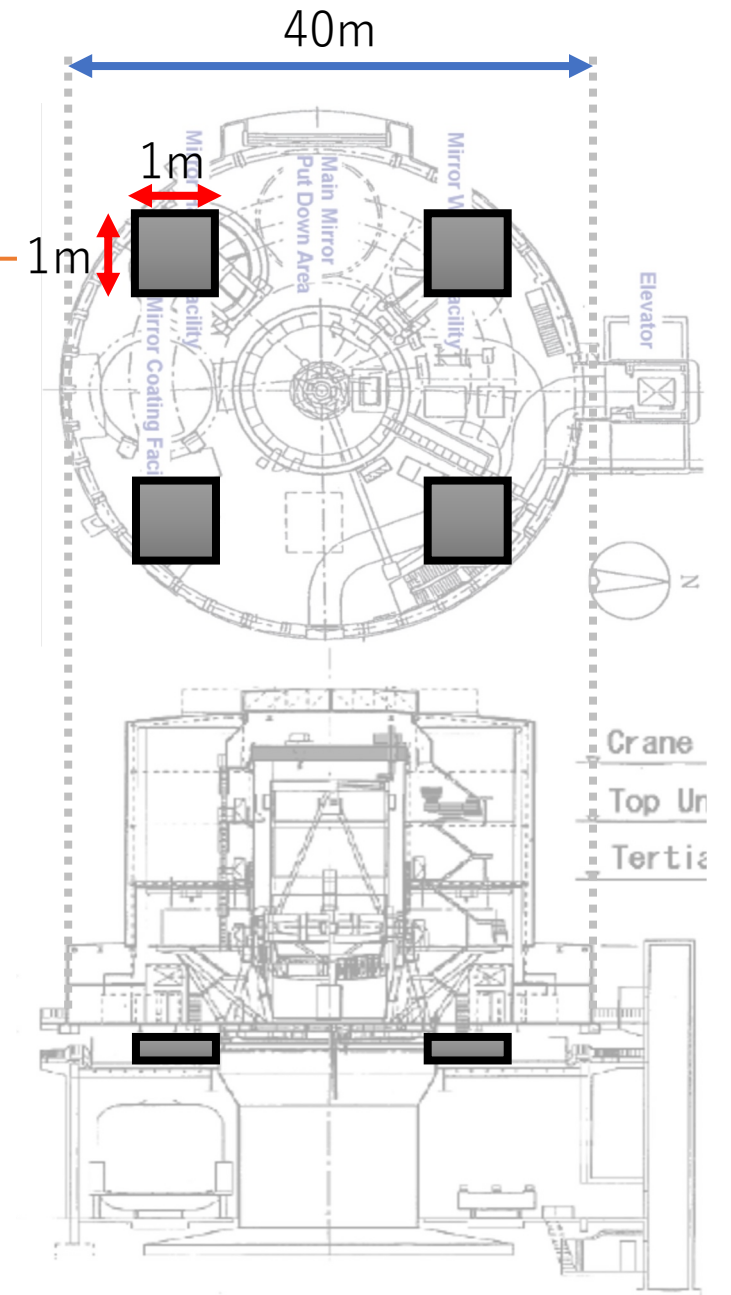
S.Kawanomoto *et al.*, Sci. Rep. {13}, 16091 (2023)

研究背景

すばる望遠鏡サイトに粒子検出器を併設

配置例は正方形形状を想定

→ 到来方向を決定



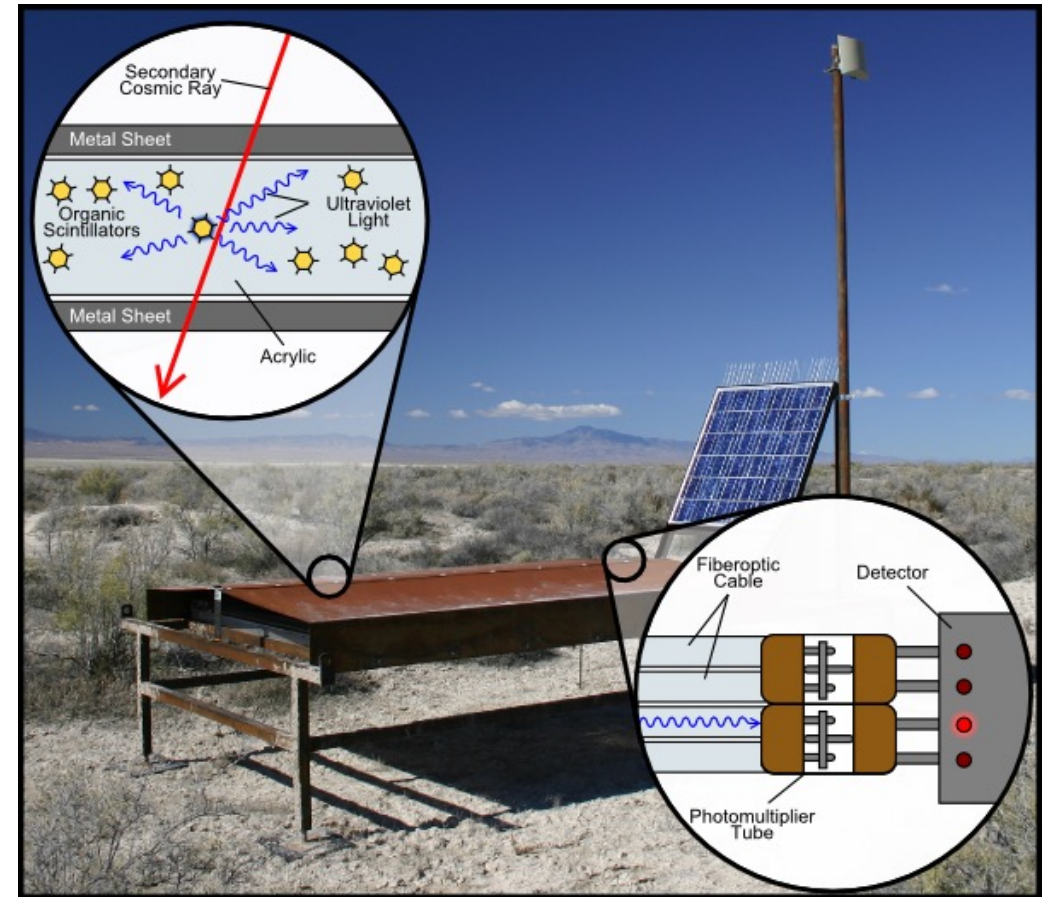
設置を予定している粒子検出器

テレスコープアレイ実験で用いている地表粒子検出器に似た検出器

粒子がシンチレータに入射
→シンチレーション光を光電子増倍管で電気信号として取り出す

収集しているデータ

- 空気シャワー粒子の到来時刻
- 空気シャワー粒子の数



credit: <http://www.telescopearray.org/index.php/about/surface-detection>

研究モチベーション

- CCD素子
 - 空気シャワーの微細な構造がみえる
 - CCDのみでは到来方向が不明
- 粒子検出器
 - 1次宇宙線のエネルギーの推定と到来方向が決定できる
 - 空気シャワーの微細な構造まで見ることはできない

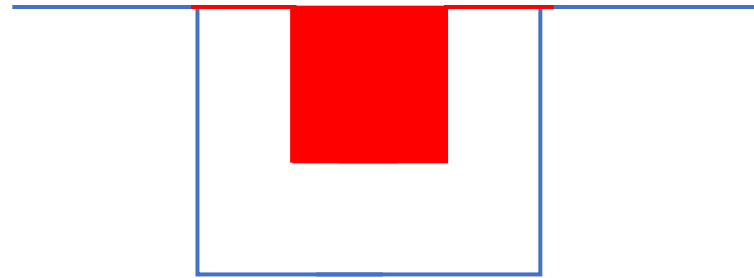
→ 2つの装置を組み合わせることで
空気シャワーの詳細な構造がわかる可能性がある

現在行っていること

- ADCの線形性検証
- 検出器の試作機を作製
- 1MIPの典型的な波形を確認
- 測定した波形から先行研究で報告されている光電子の数からゲインを計算
- イベントレートを測定

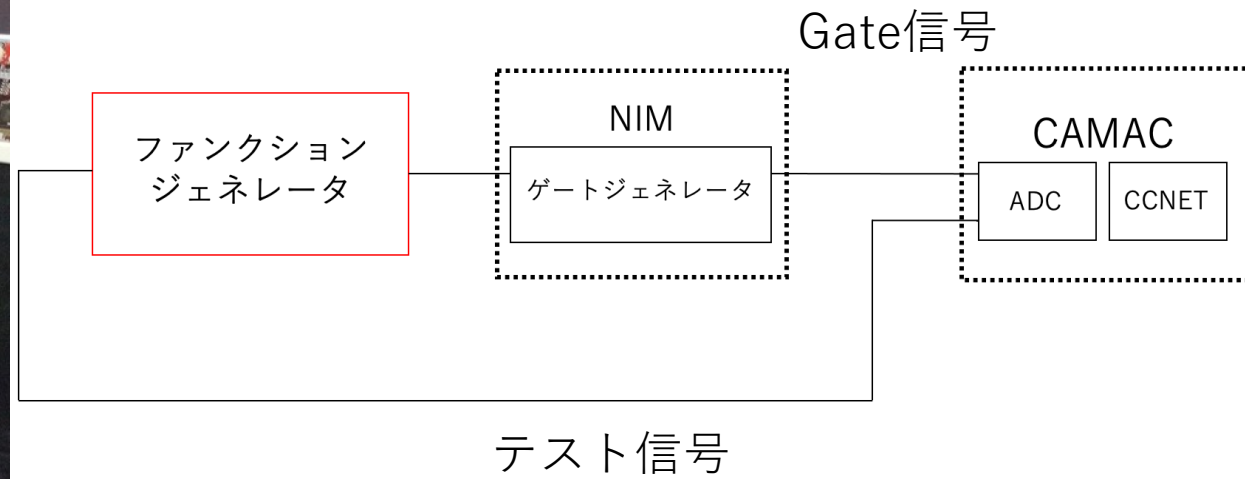
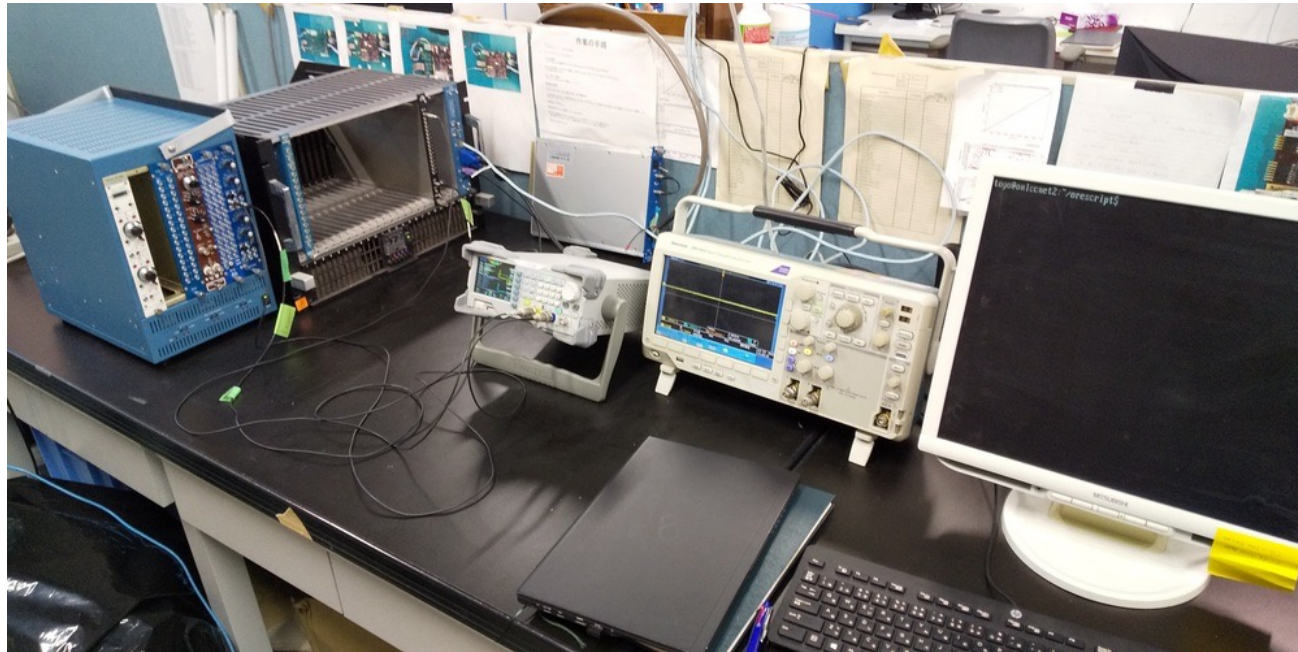
ADCモジュールとは

- ゲート信号内に入ったパルスの面積を数値化する装置
 - 青色がゲート信号
 - 赤色がテスト信号



→この赤く塗られた部分の面積が2倍になればADC値も比例して増えているのか確認

セットアップ



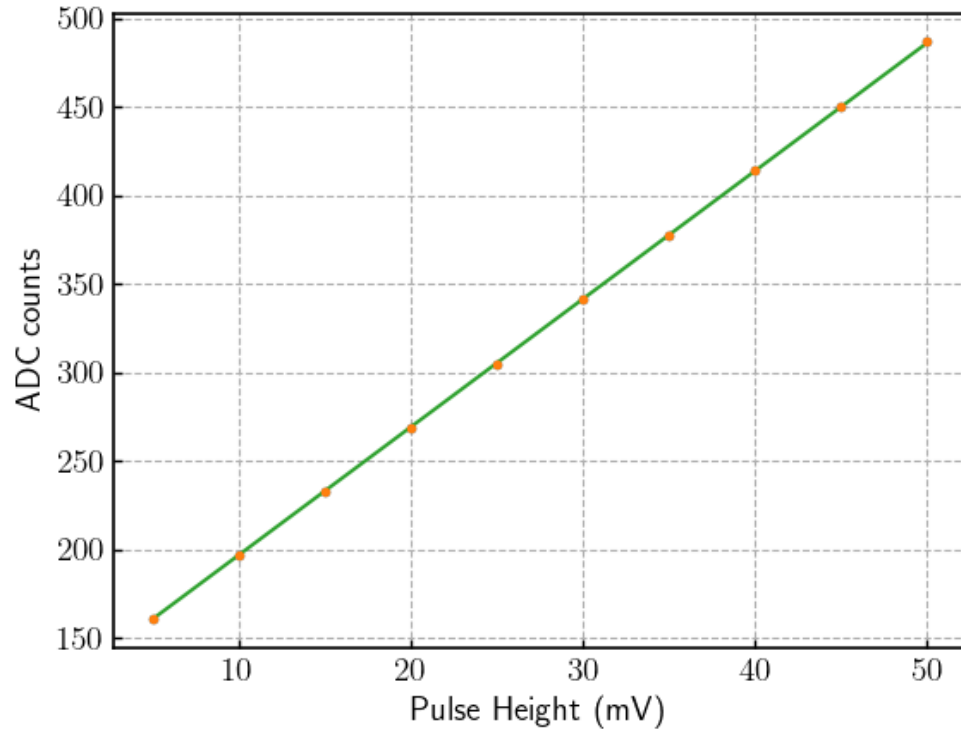
ADCの線形性測定

- ゲート信号
ゲート幅:100ns, パルスハイ ト:-800mV, パルスレ ー ト:500Hz
- 矩形波
パルス幅:300ns, パルスハイ ト:-5mV~-50mV 5mV刻みで 測定 パルスレ ー ト:500Hz

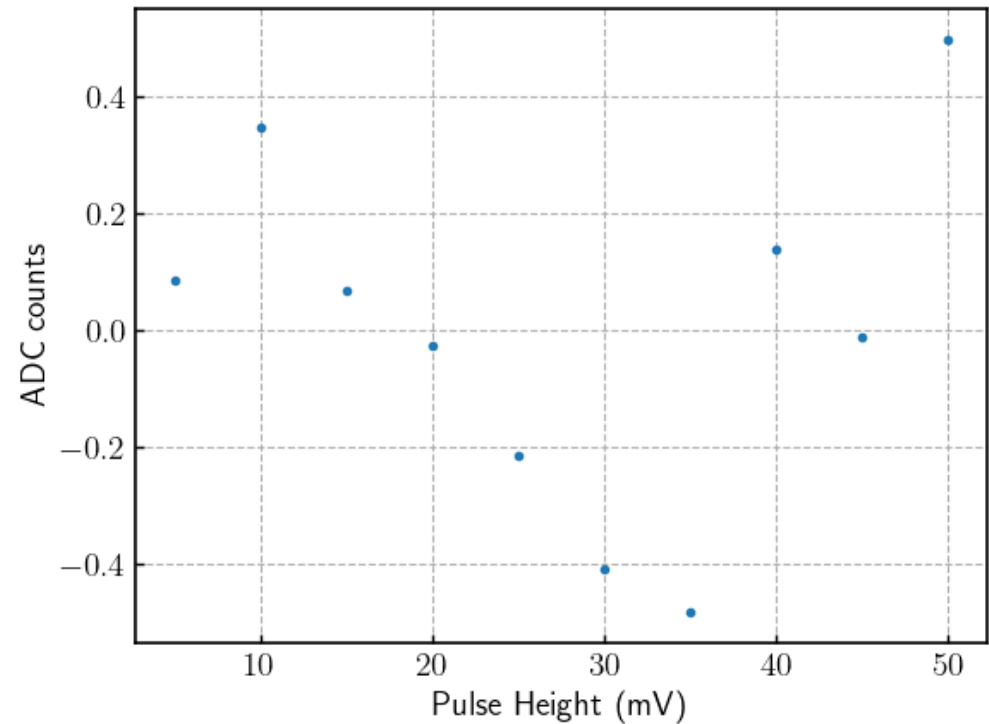
5mV刻みあたりのパルスハイ トごとに10000イベント測定

得られた結果

CH0番の線形性検証結果



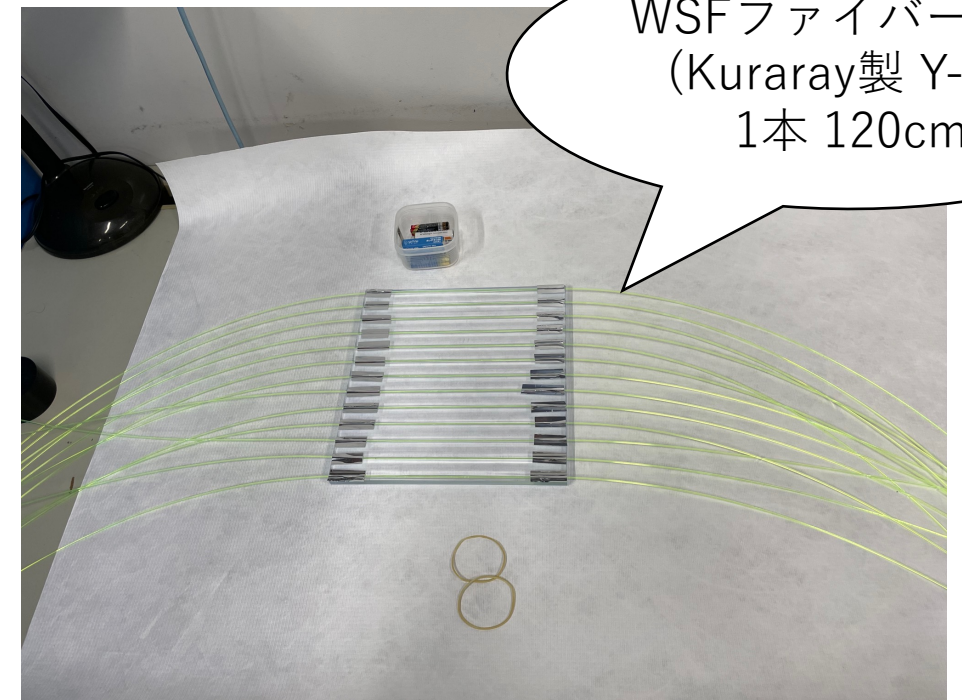
近似直線からの残差



約0.5ADCカウントくらいのふらつきがあることがわかった

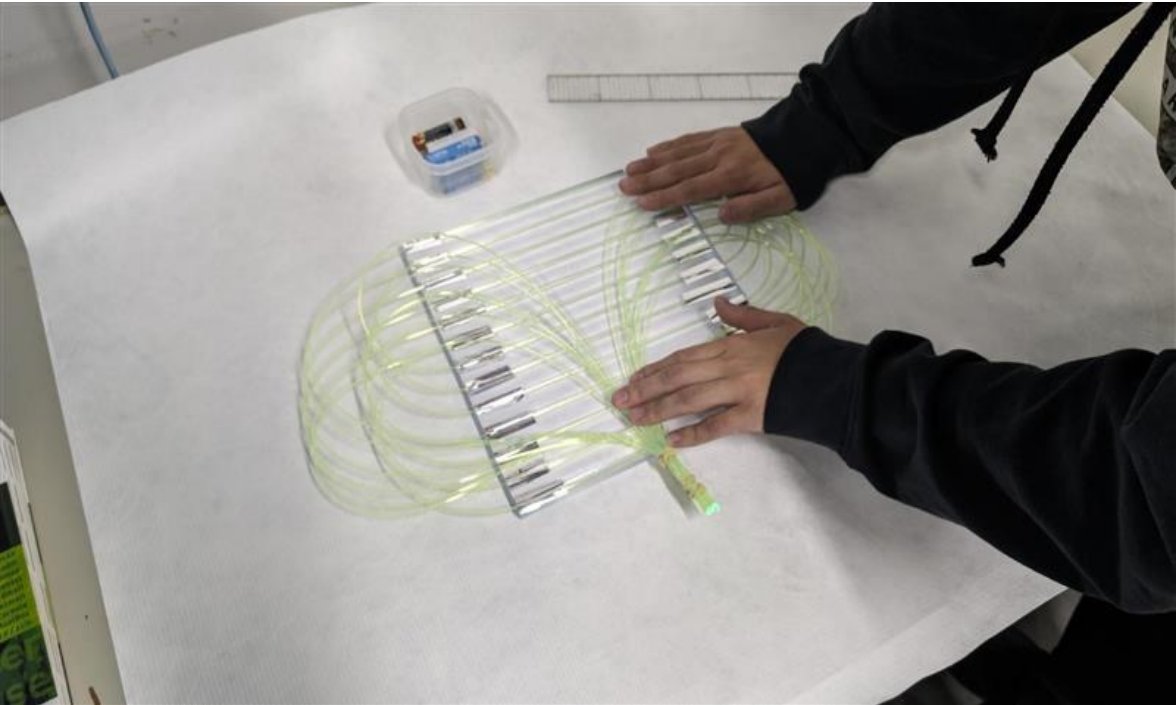
検出器の試作機作製の様子

光電子増倍管、シンチレータ、ブリーダー回路、光学ファイバー、タイベックシートはTA-SDと同じ型番の物を使用



シンチ
25cm × 25cm × 1.2cm (TA-SDの厚さと同じ)¹²

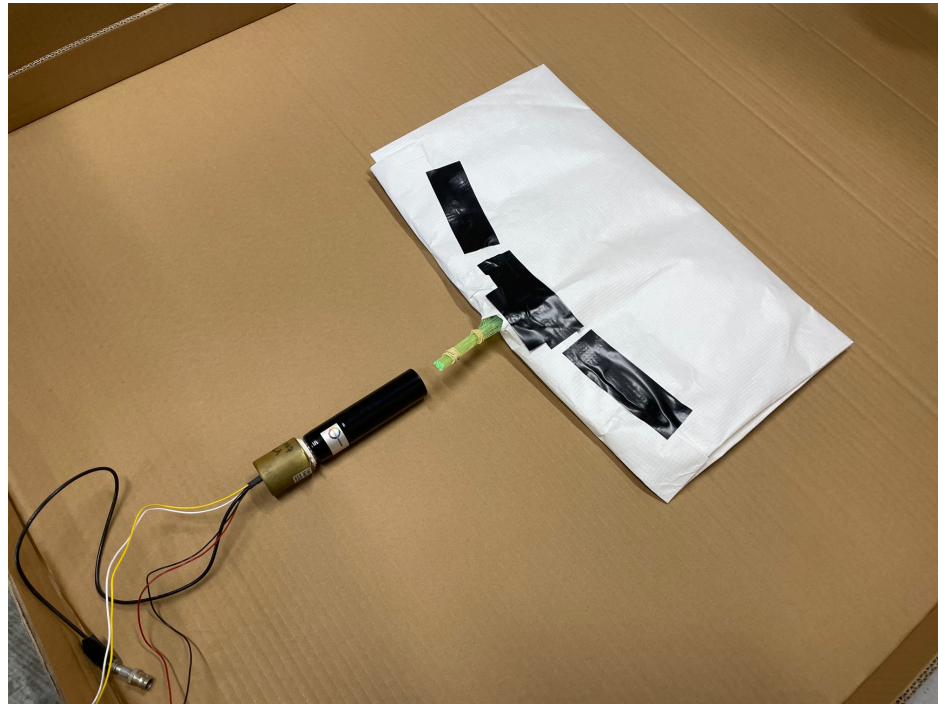
検出器の試作機作製の様子



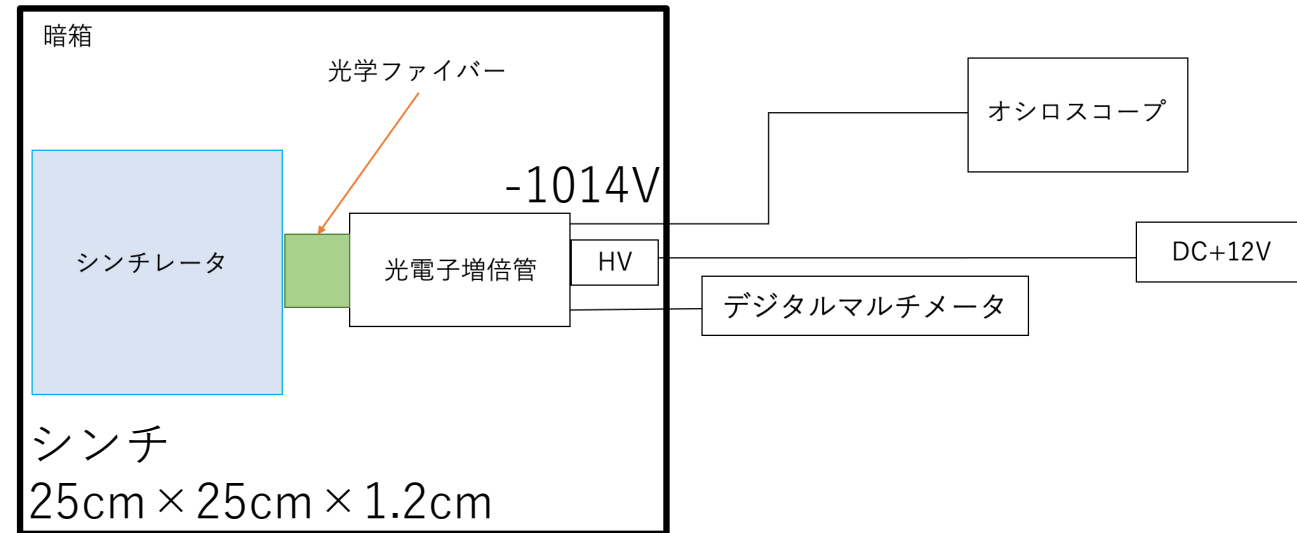
credit: I.Komae



検出器の試作機作製の様子



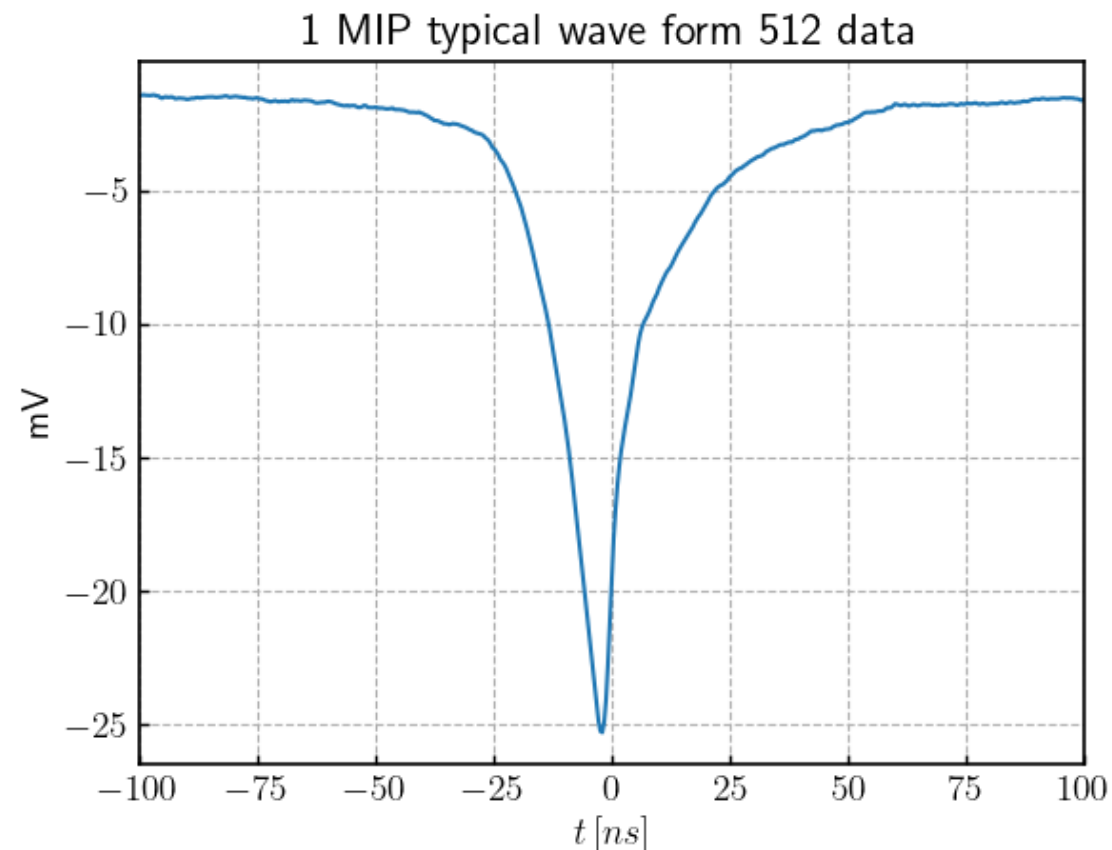
1MIP波形確認のためのセットアップ



512回測定した波形の平均

- オシロスコープを用いて、512回パルスを測定したその平均

→この測定値からゲインを計算

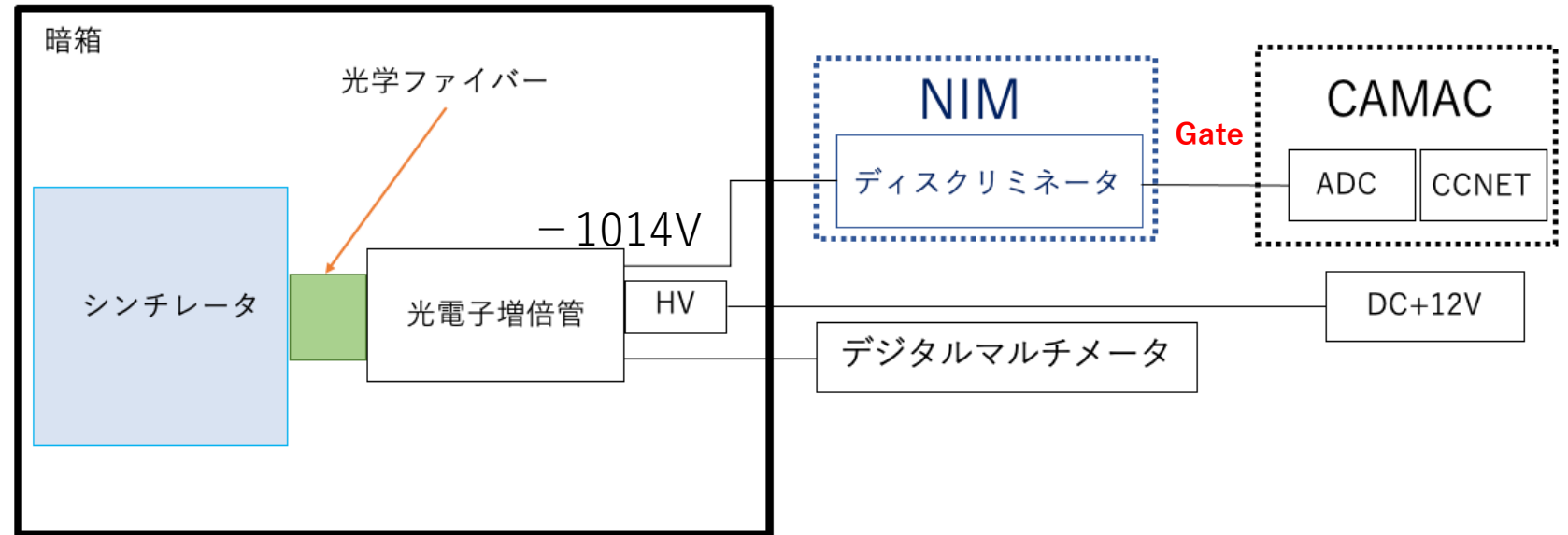


使用したPMTのゲインを計算

- 先行研究（TA-SD）：1MIP → 平均で22.7個の光電子
- 今回得られたパルスと報告されている光電子の数からPMTのゲインを計算
- 本研究で得られた計算結果： 3.4×10^6

イベントレート測定

- ディスクリミネータからの信号をADCのゲートに入力
→ ADCのトリガー回数からイベントレートを測定
- 測定時間：100s



結果

- 100s間で288イベント計測
- 試作機：2.9Hz

まとめ

- 先行研究からすばる望遠鏡のCCDカメラで空気シャワーを捉えることができた
→新たな知見を得るために**粒子検出器アレイを開発 & 設置**
- 粒子検出器の試作機を作製
→ミューオンによる信号が取得できていることを確認

今後

- 試作機を用いてペDESTアルピーク・1 MIPピークを確認
- 4台の検出器のデータ取得システム構築
- すばるサイトに設置する粒子検出器を制作
- 来年度中に粒子検出器を設置し、データ取得を開始
- Geant4を用いた検出器シミュレーション

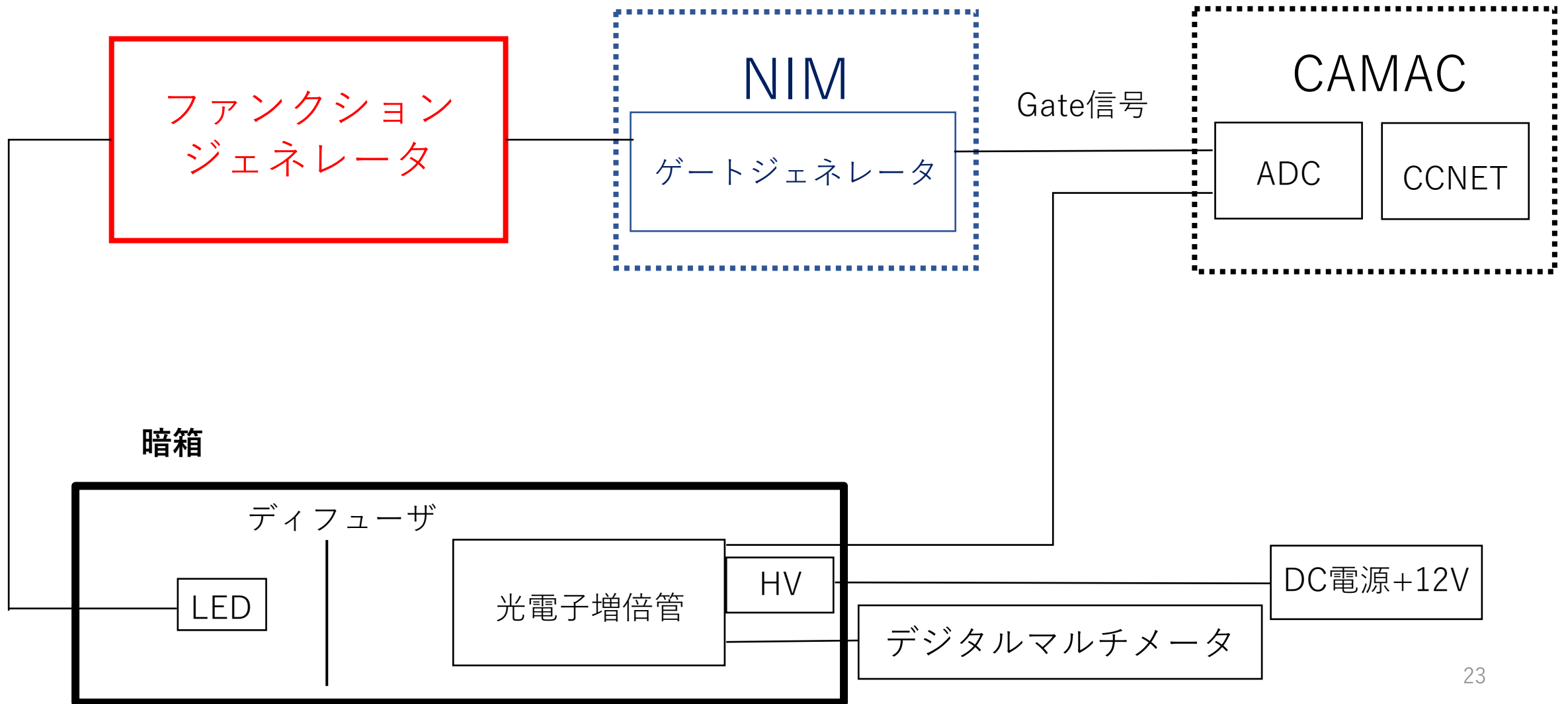
バックアップ

期待されるエネルギー範囲

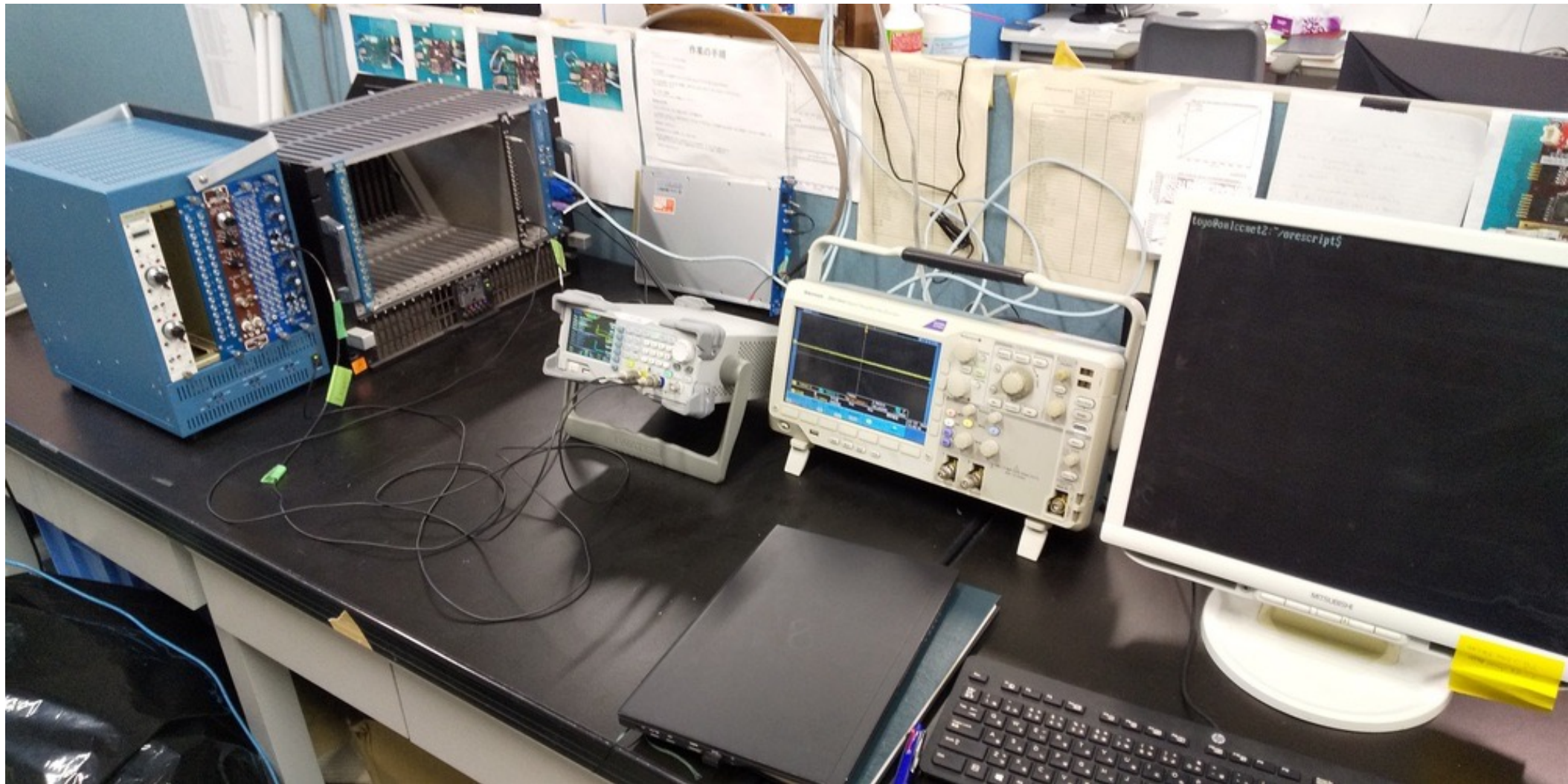
- すばるの高度の柱の深さ 600g/cm^2 , X_{max} , 検出面積を考慮すると

→ 1PeV のエネルギーを持つ宇宙線が限界

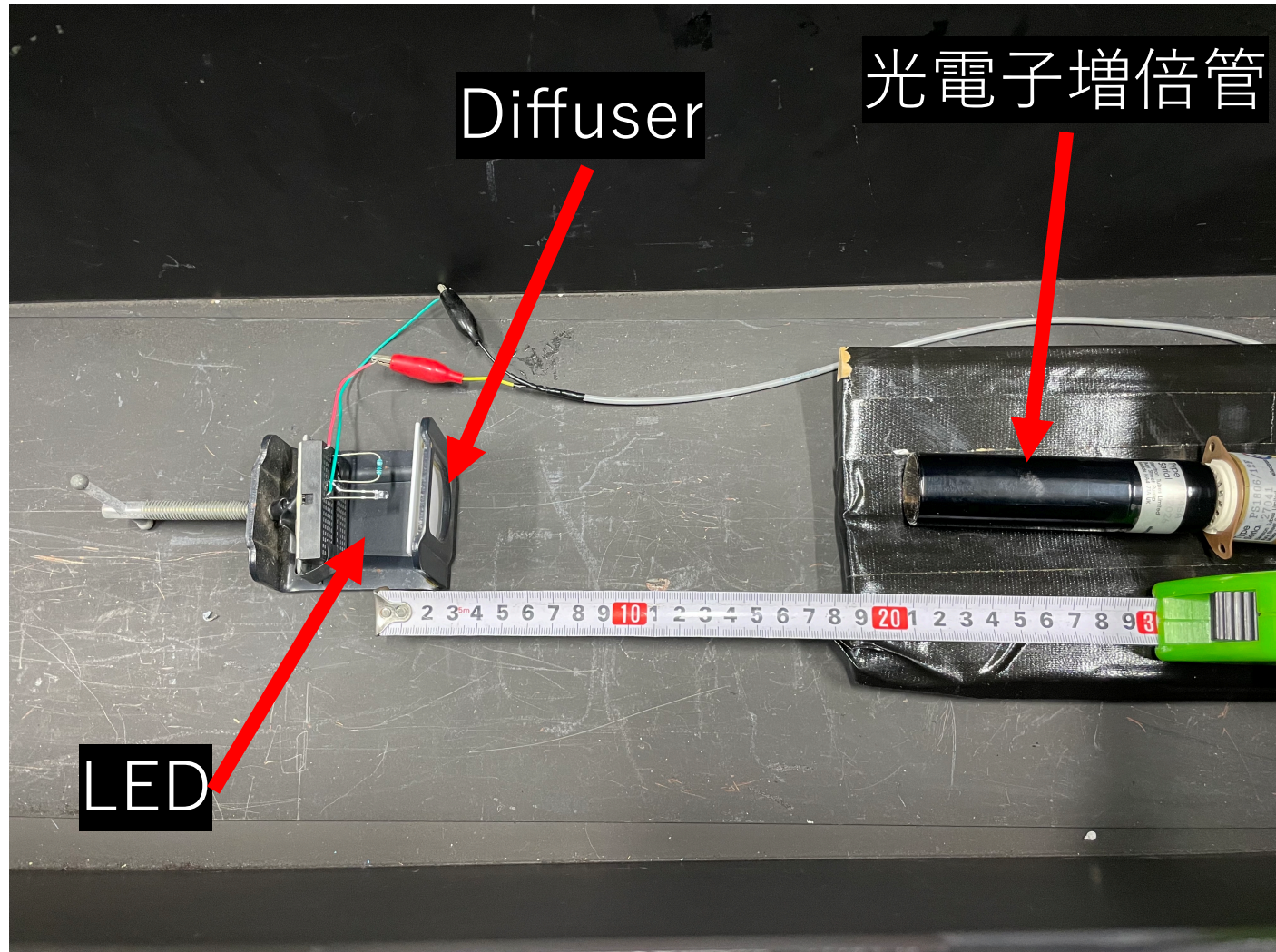
セットアップ



セットアップ



セットアップ

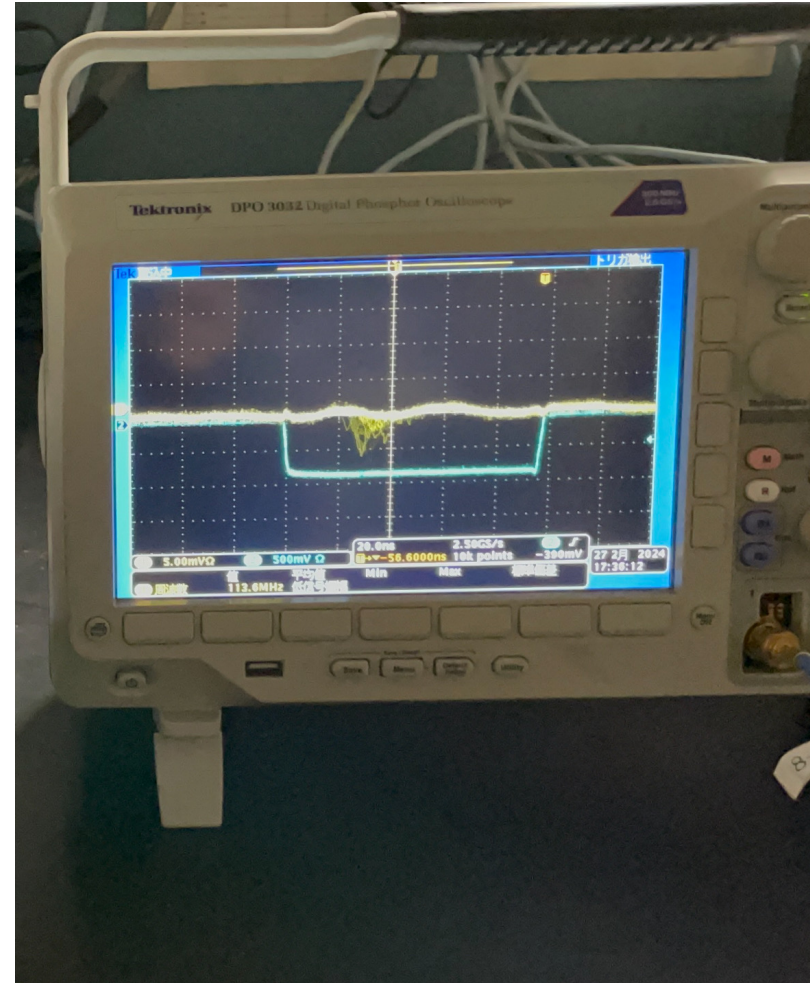


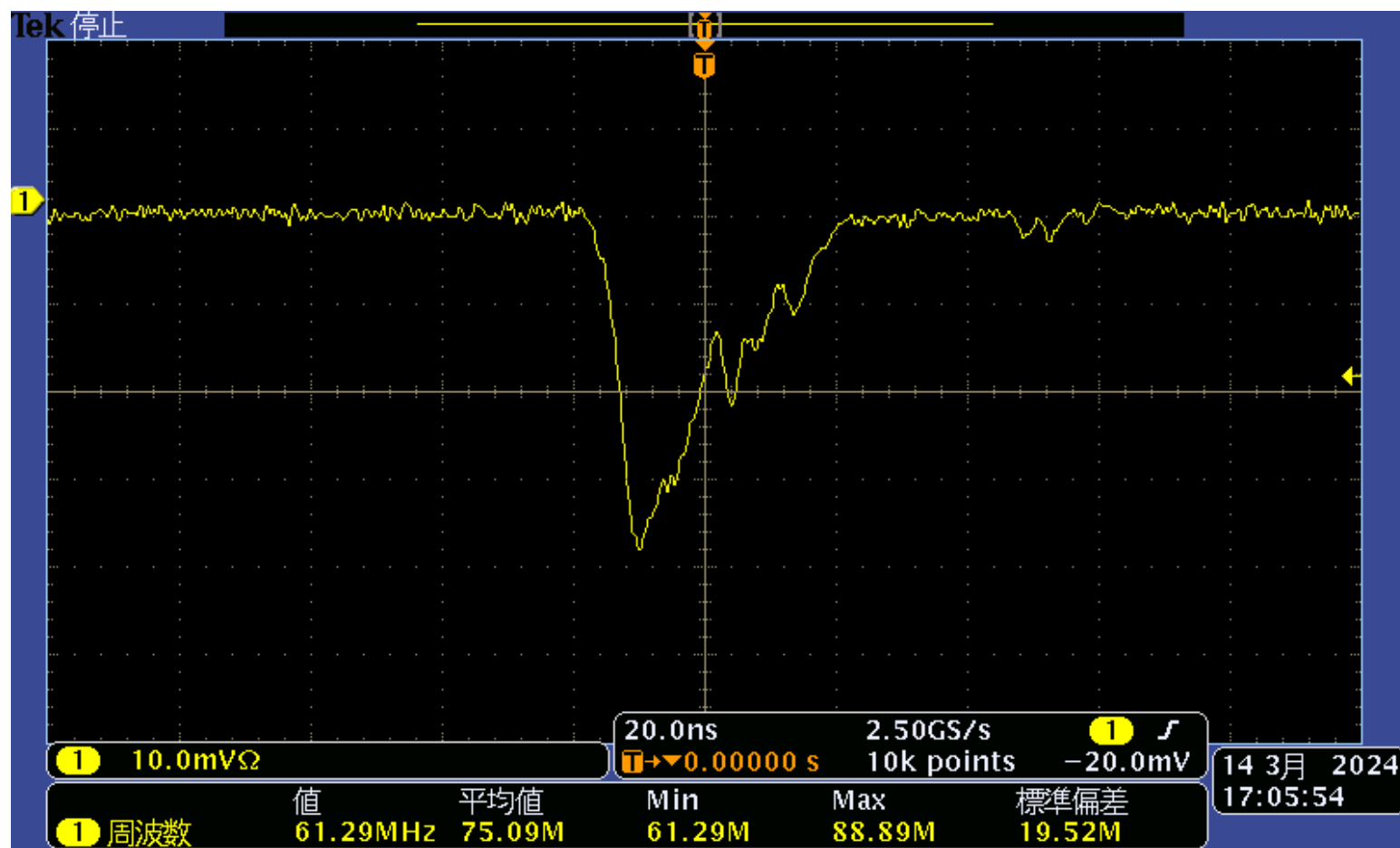
実験方法

- 1.LEDを光らせないでPMTのペDESTタルを測定
- 2.LEDを光らせてPMTの信号を測定
3. ADCからPMTソケットにつながっているケーブルを抜き、ゲート信号のみのペDESTタルを測定

ファンクションジェネレータの設定

- ゲート信号
 - パルスハイト：-800mV
 - パルス幅：100ns
 - パルスレート：500Hz
- LEDに入力した信号
 - パルスハイト：5V
 - パルス幅：50ns
 - パルスレート：500Hz





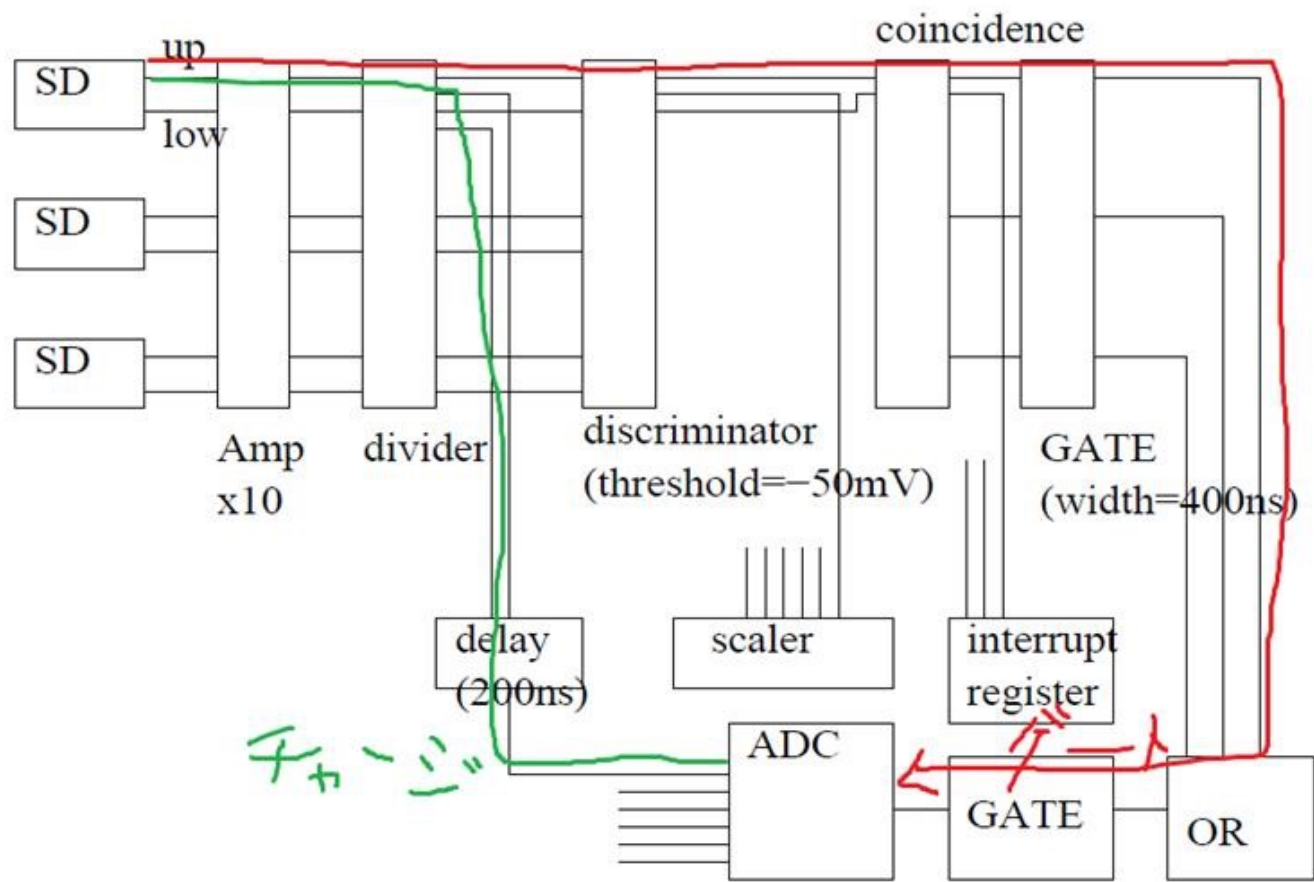
ADC線形性検証セットアップ



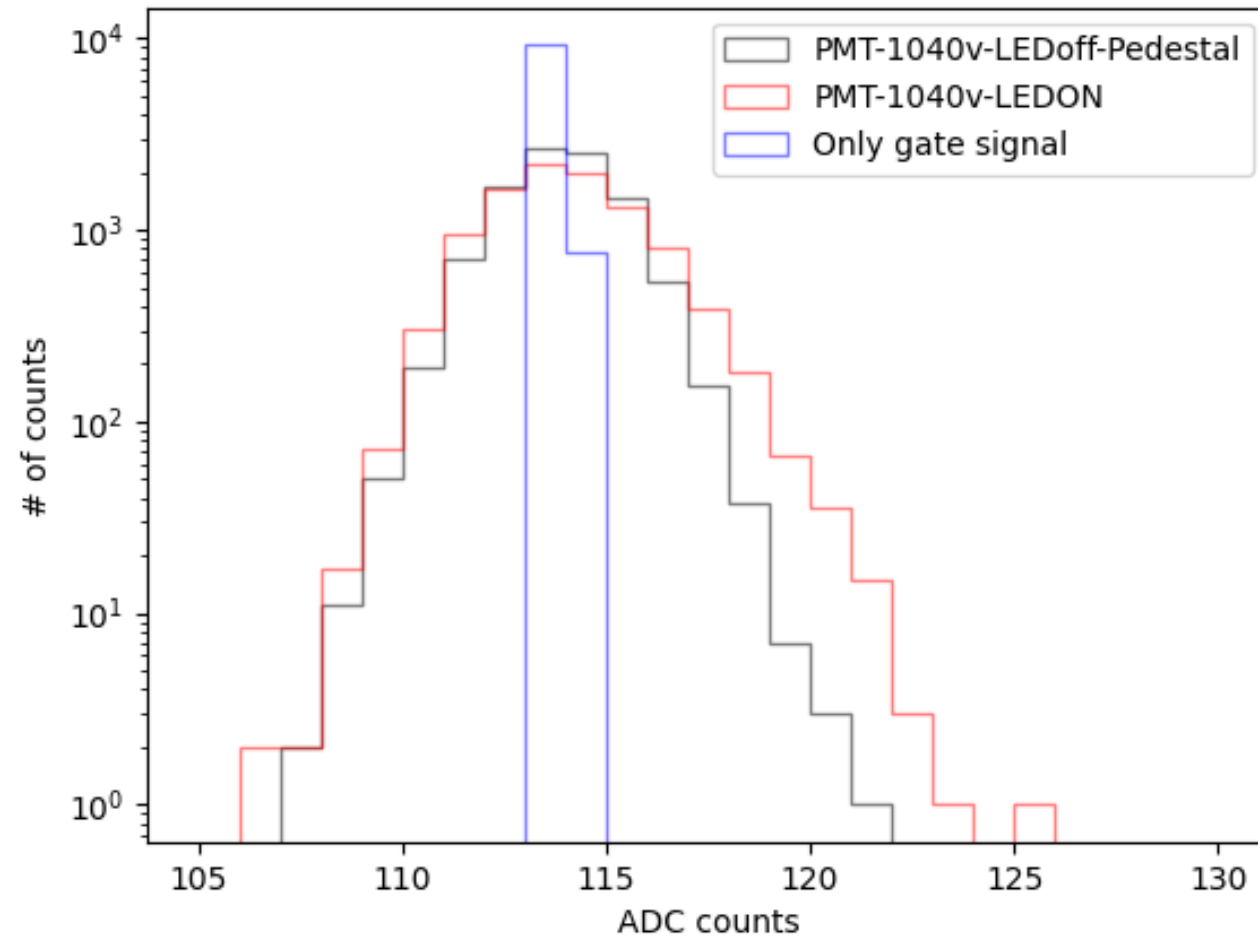
ADCの線形性測定

- ゲート信号
ゲート幅:100ns, パルスハイ ト:-800mV, パルスレ ー ト:500Hz
- 矩形波
パルス幅:300ns, パルスハイ ト:-5mV~-50mV 5mV刻みで 測定 パルスレ ー ト:500Hz

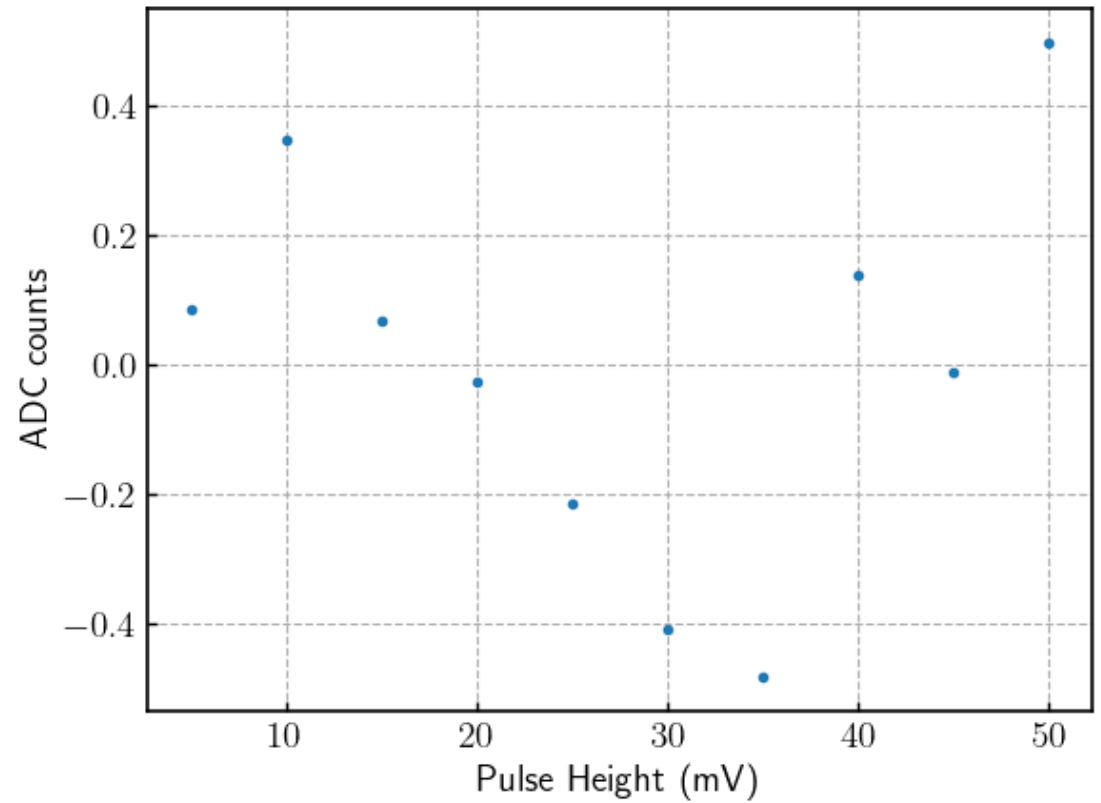
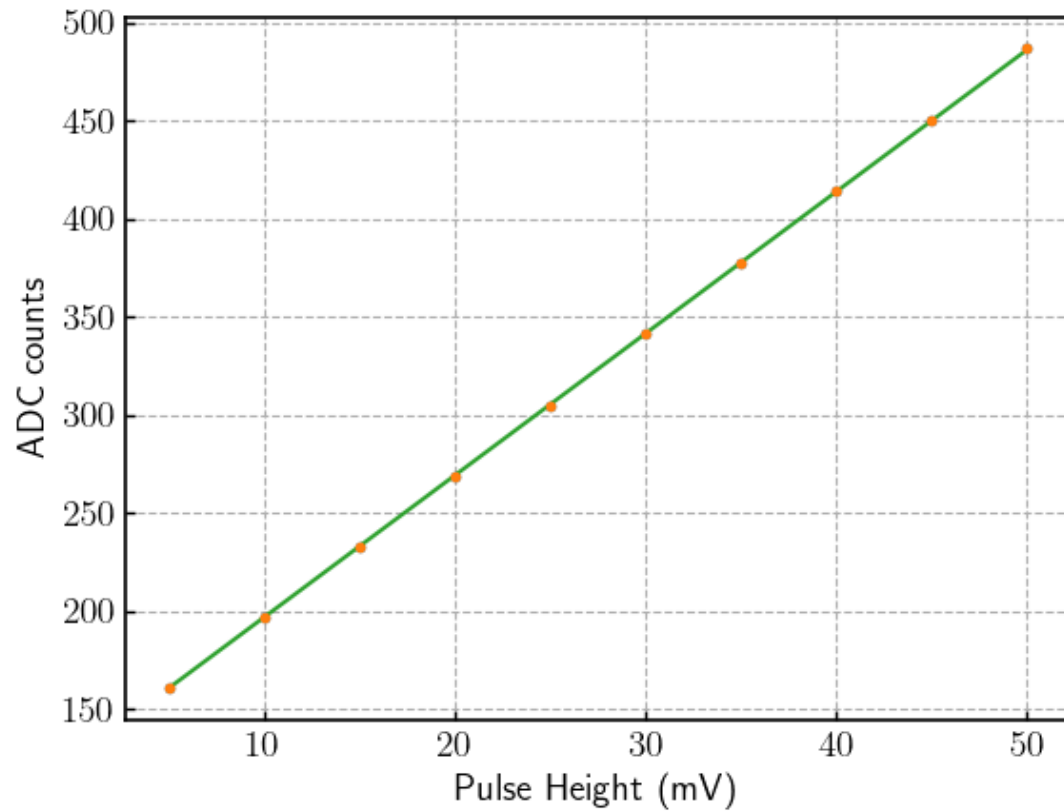
5mV刻みあたりのパルスハイ トごとに10000イベント測定



結果



ADCの線形性測定



ゲインを知りたい理由

1. 粒子の数がわかる。
2. コアから離れた粒子密度がわかる。
3. 粒子密度からエネルギーがわかる。

ADCの仕様書 RCP-022



仕様

CHANNEL	16ch
ANALOG INPUT	0~-4V DCカップル50Ωインピーダンス
GATE INPUT	Negative NIM 50Ωインピーダンス 入力信号幅 100ns~1000ns
CLEAR INPUT	Negative NIM 50Ωインピーダンス 入力信号幅 50ns
FULL SCALE	約-1000pc
DYNAMIC RANGE	12bit
LINEARITY	9Bit 相当
PRESET PEDESTAL	0~100 count
STABILITY	ゲイン 100 ppm ペDESTAL 0.5pc/°C
CONVERSION TIME	130 μs/module
PACKAGING	CAMAC 1 幅
POWER SUPPLY	+6V 420mA -6V 180mA +24V 50mA -24V 120mA
CAMAC FUNCTION	N・F(0)・A (0~15)・DATA READ (R1~R12) N・F(2)・A (0~15) DATA READ&DATA CLEAR N・F(9)・A (0) LAM&MODULE CLEAR

CCNET

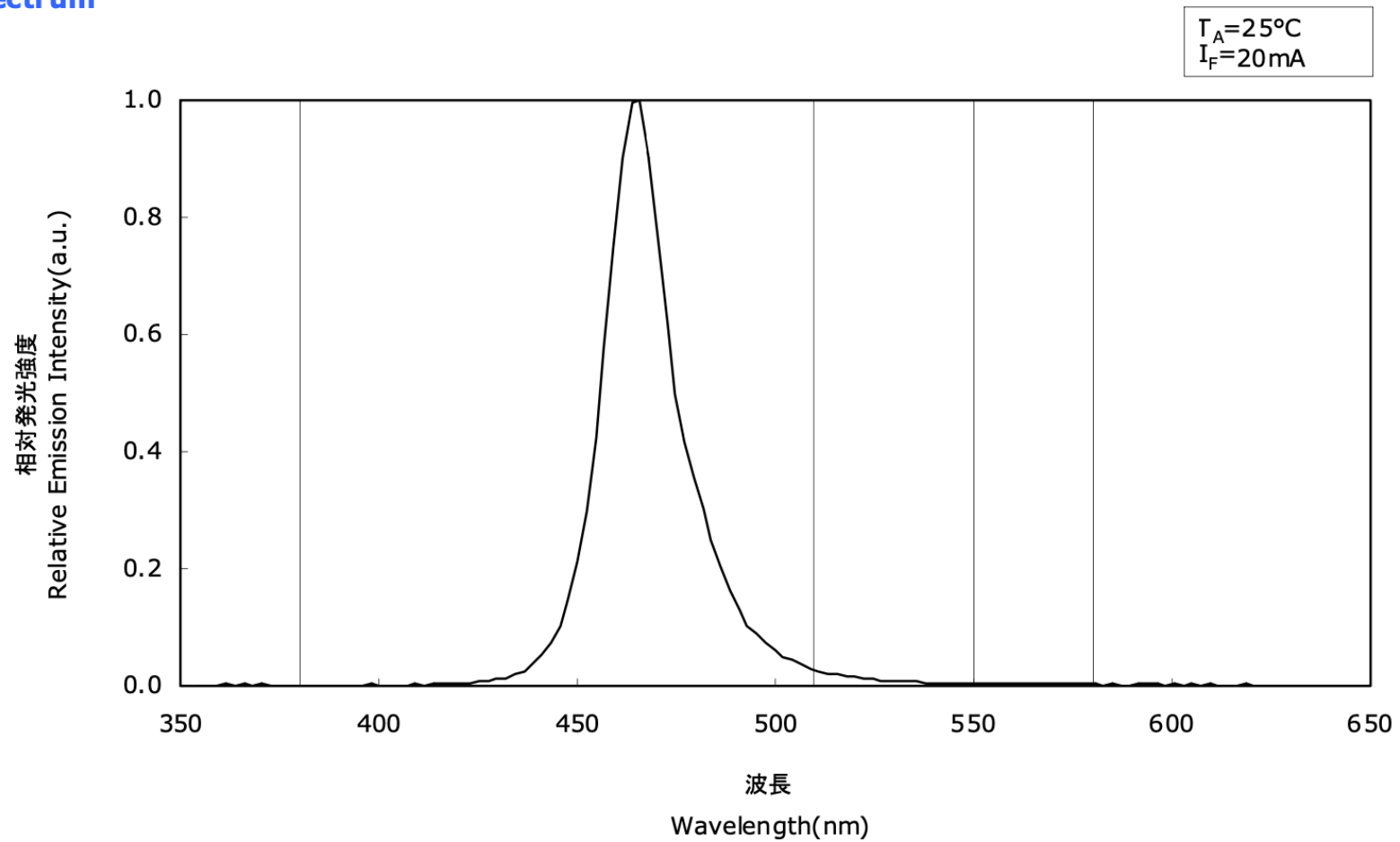
シングルボードコンピュータ Debian/GNU Linuxカーネル2.4

1.2. 外観説明

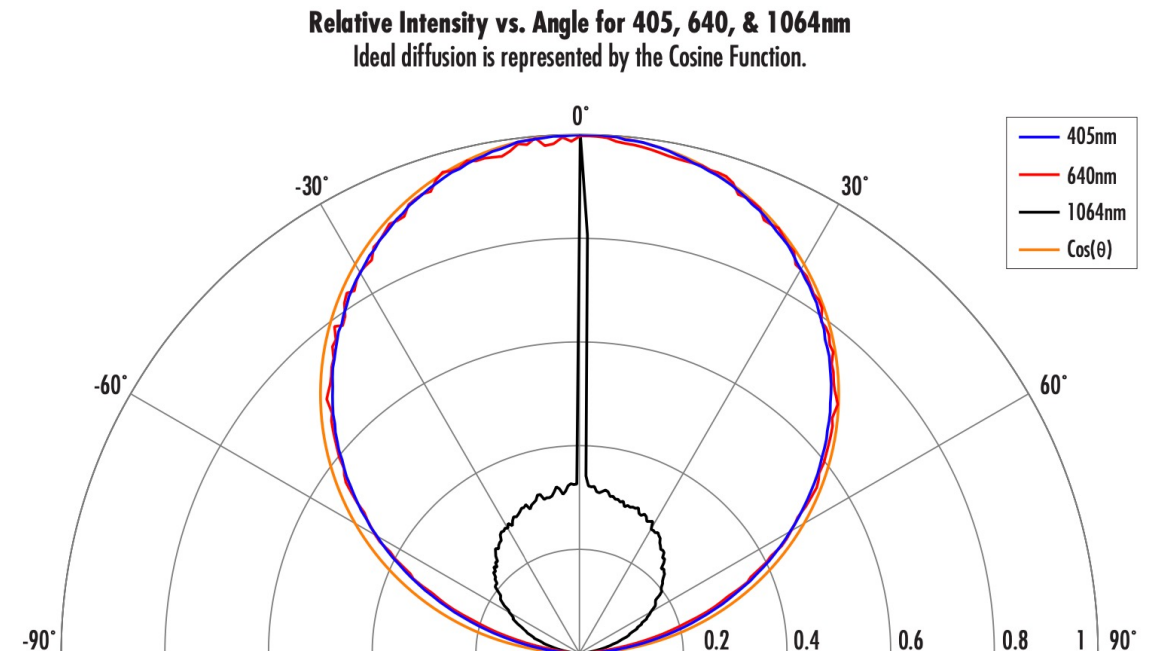
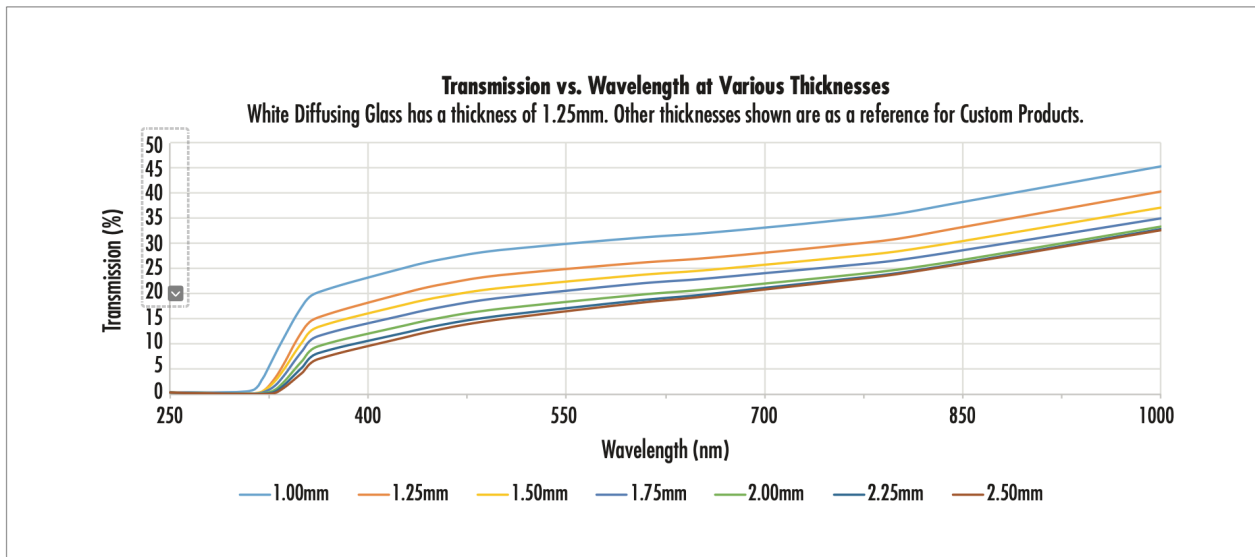


LED : NSP310B

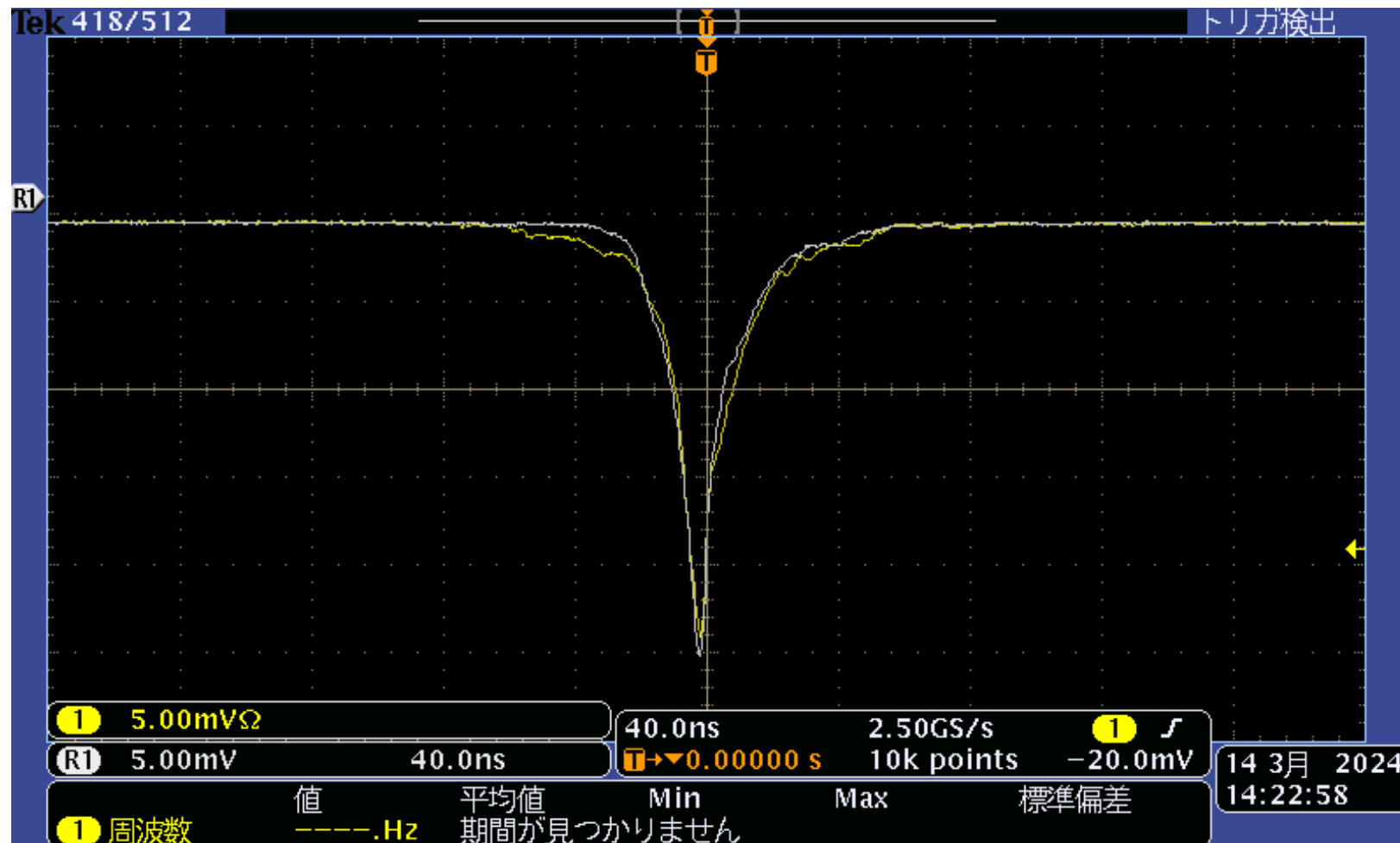
発光スペクトル
Spectrum



diffuser



1MIPの典型的な波形データ



シンチレータの性能

寸法	150cm×25cm×1.2cm
製品名	CIMS-G2 [43]
原料樹脂	MS-IM-62-01
Wavelength of Maximum Scintillation	420nm
Scintillation Efficiency	60 % Anthracene
Decay time	3.0-3.2 ns
Light Attenuation Length	90 - 110 cm
Refractive Index	1.5-1.58
Density	1.04 g/cm ³

E.Kido 修士論文

ディスクリミネータ

N019

8ch ディスクリミネータ

このモジュールは、アナログ信号がスレッシュホールドを越えた時にあらかじめ設定した幅のデジタルNIM信号を出力します。

■ 特長

- 高速特性の良いコンパレータを採用
(100MHz動作)
- スレッシュホールドと出力幅は、
フロントで一斉調節が可能
- 出力幅は各チャンネル毎に個別設定も可能
(内部ボリュームで設定)
- 出力信号の立上り・立下り時間は2nSec以下

■ 仕様

入カ

インピーダンス : 50Ωダイレクトカップル
スレッシュホールド : -20mV~-240mV
前面パネルのボリュームにより調整
モニターピンがありスレッシュホールド電圧が出力している

最小入力幅 : 2ns(100mV以上の信号)
入力保護 : +0.7V以上、-6V以下に対し
ダイオードによる保護

最大入力レート : 60MHz

VETO入力(出力禁止信号)

インピーダンス : 50Ω
電圧 : NIM規格スレッシュホールド電圧
-450mV

BIN GATE入力(後面NIMコネクタより受入)

インピーダンス : 1.3kΩ
電圧 : TTLシグナル
切替 : 後面スイッチによりON/OFF可

出カ

インピーダンス : 50Ω
信号レベル : NIM規格準拠
レベル0 0mA(0V)
レベル1 -16mA(800mV)

内部出力調整幅 : 20ns~150ns

外部出力調整幅 : ±25%

立上がり時間 : 2ns以下

立下がり時間 : 2ns以下

電源 : +6V 50mA +12V 50mA
-6V 2A -12V 50mA



PMTソケット：PS1806

- PS1806

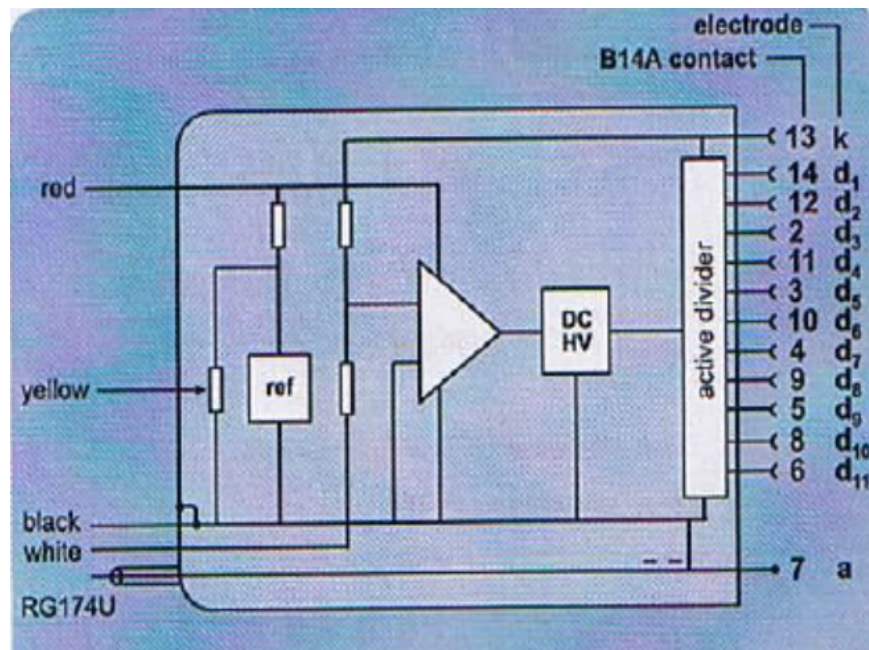


図 32: PS1806 回路図の概要 [49]

ソケット

ソケットでは、供給されたコントロール電圧を 1000 倍に増幅して PMT のダイノード間に電圧を供給するデバイスである。Electrontubes 社製の PS1806/12F を採用した。この素子を用いて PMT に、典型的には -1200V の電圧を供給している。

回路図の概要を図 32 に示す。アンプで増幅された電圧は active divider という、active な素子 FET を用いた divider を通してダイノード間の電圧を分割する。

この装置により、高圧をかけるのに必要な電力は 0.5W 程度に抑えられていて、パルスハイトのリニアリティは 20mA までの保証となっている。

但し、このソケットは電荷でも制限が付いていて、改造を加えないと時間積分して、大体 2000-3000pC 以上になる波形を出力すると、出力信号に問題が出る。我々は十分なリニアリティを確保するために、9 番目のダイノードとグラウンドの間に 22nF、10 番目のダイノードとグラウンドの間に 66nF、11 番目のダイノードとグラウンドの間に 66nF のコンデンサをはさんで電荷による制限を緩和した。

改造後 (PS1806/12F-02) の現在は時間で積分して、大体 70000pC 以上の出力波形になるまで問題は出ない。PMT からの出力電圧波形が幅 1-3 μ sec の矩形波の時の測定結果によると、矩形波の幅にほぼ依存せず PMT から 71000-74000pC の電荷が矩形波として出力されるまで波形に問題は出なかった。

PMT:9124SA

PMT

PMT は Electrontubes 社製 9124SA を採用した。光電面はバイアルカリ。有効な直径は 25mm。ダイノードは 11 段あり、カソードから最初のダイノードとの間に他のダイノード間の倍の電圧がかかる構造になっている。マイナス HV, アノードからはマイナスの電流が出力される。ミューメタルが巻かれていて、磁場に左右されないような処理をしている。

量子効率 QE は、我々の使用する波長領域では大体 10% である。QE の測定は 8 本について行った。

我々が使用する波長領域で、± 30% 程度のばらつきを確認した。

PMT 感面上の QE×CE 込みのトータルのゲインの位置依存性の測定を全ての PMT について行った。セットアップと測定結果の例が図 図 30。セットアップは LED を XY ステージで移動させながら、ピンホールからもれた光を PMT が検出するというものである。この測定の際は、基準となる PMT を用意していて、LED の発光量が変化したときは分かるようになっている。

測定結果の図はカラーが取得した ADC の値となっている。PMT のゲインは、single photo electron の測定から $4 \cdot 10^6$ に較正しているため、量子効率込みのゲインが調整されている訳ではないので、2 本の PMT に対して ADC

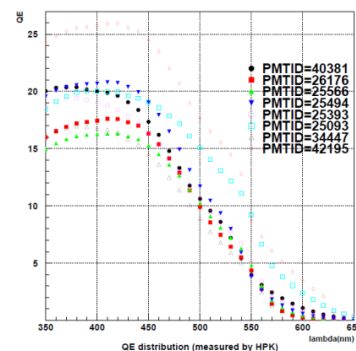


図 28: PMT 毎の量子効率の個性

の値の平均値は、ずれている。

PMT によっては感度の悪いところが 1 つ、あるいは 2 つとクラスター的に存在する。場所ごとの感度のばらつきが大き過ぎる、あるいは感度が悪い領域が大き過ぎると判断した PMT は実験には使用していない、測定結果の図の例は、右側の PMT に大きな感度の悪い領域があることが分かる。

暗電流は、暗室において、PMT が 4×10^6 のゲインの時に波高が大体 7.8mV (3 p.e. 相当) を越えるパルスが検出されるレートとして測定され、これが 10Hz 以上になるものは現在使用していない。PMT 毎のレートの分布が図 31 である。赤い線よりレートが大きいものは使用されていない。大気ミューオンは 0.3MIP³ (Sp.e. 相当) 程度の閾値で大体 700Hz ぐらいでトリガーされるので、比較すると十分小さいレートに抑えられている。

また、パルスリアリティが 5% ずれるところは、スペックシートによれば 25mA の電流がアノードから流れる時、温度係数は 0.5 %/°C、single photo electron がカソードから出てきたときの立ち上がり時間は 3ns、FWHM が 5ns、transit time は 33ns である。

WLS Fiberの構造と特性

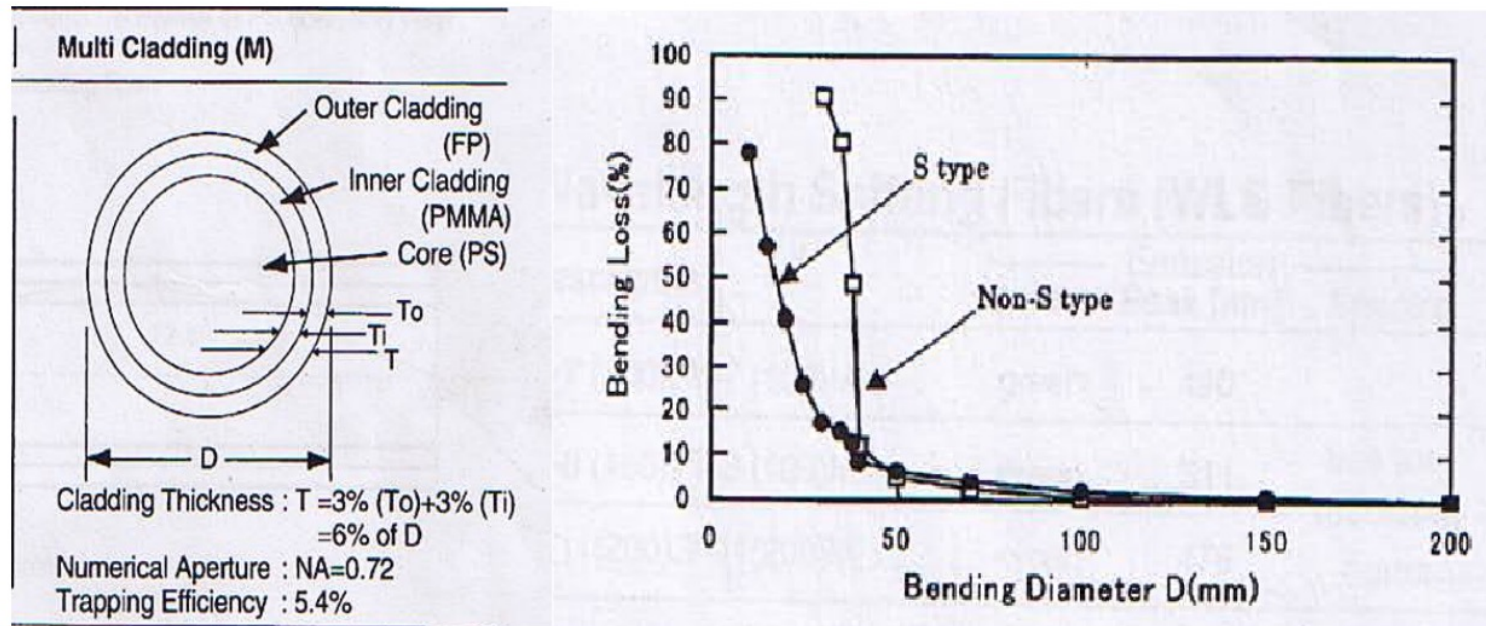
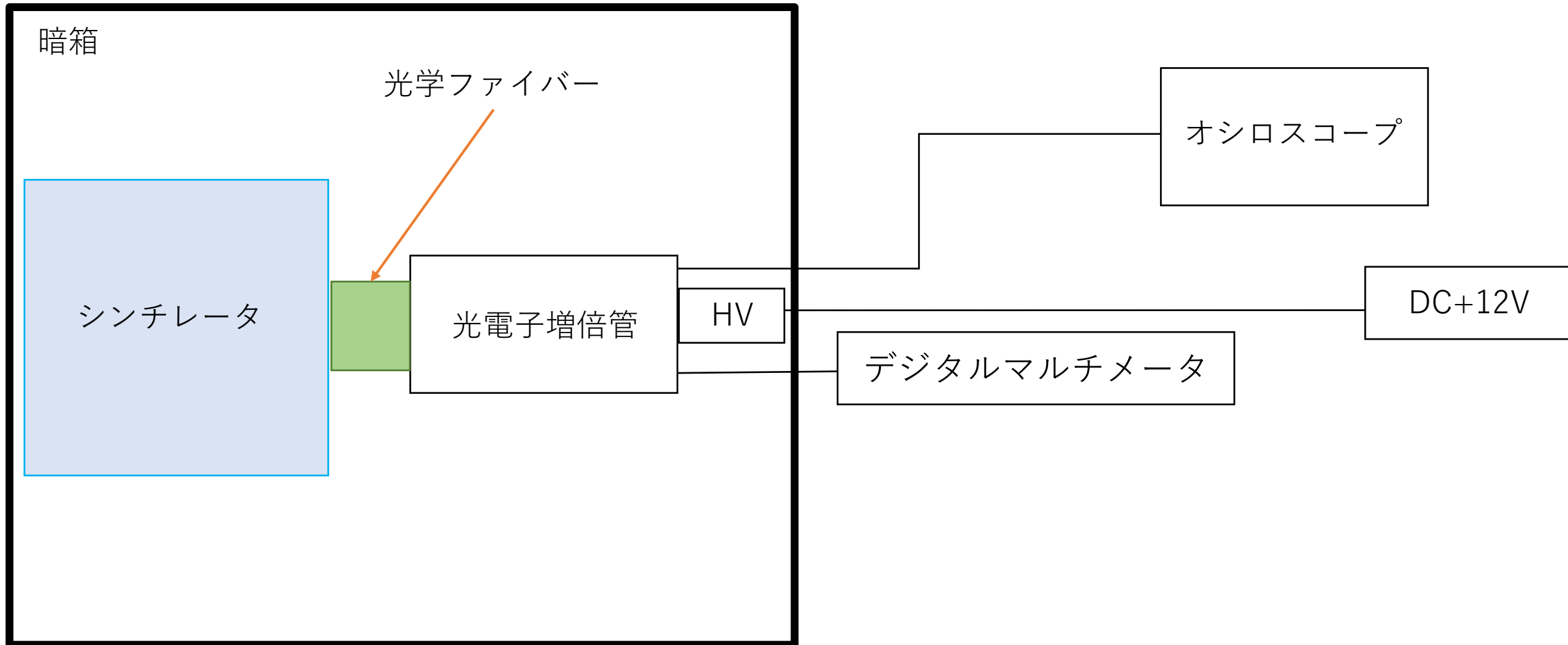


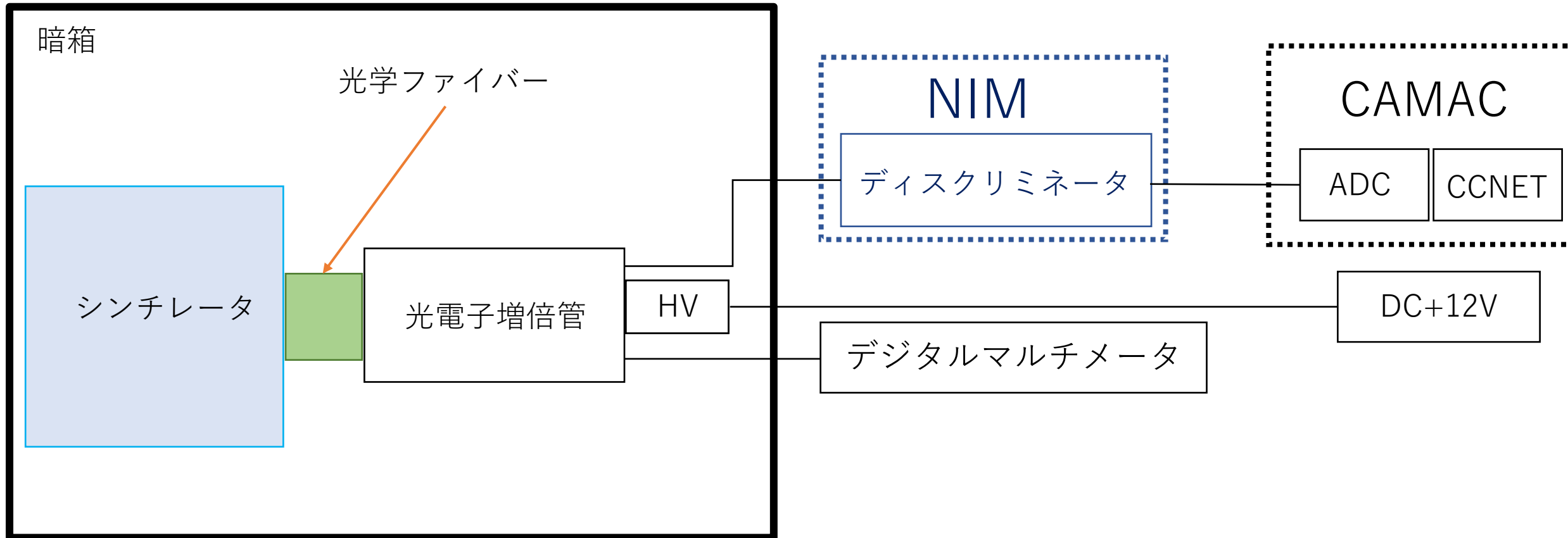
図 27: WLS Fiber の構造と特性 [44]

E. Kido 修士論文

セットアップ



セットアップ



柏で収集されたシグナルレート

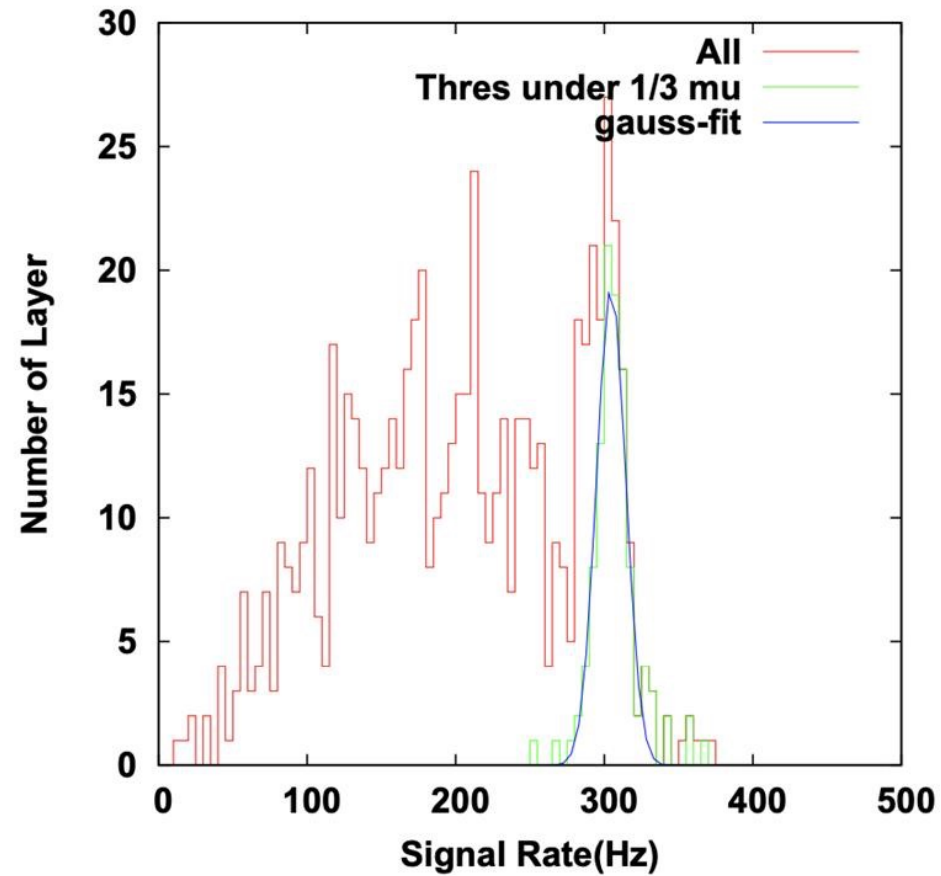


図 55: 柏で収集されたシグナルのレート
E. Kido修士論文

推定される光電子数の分布

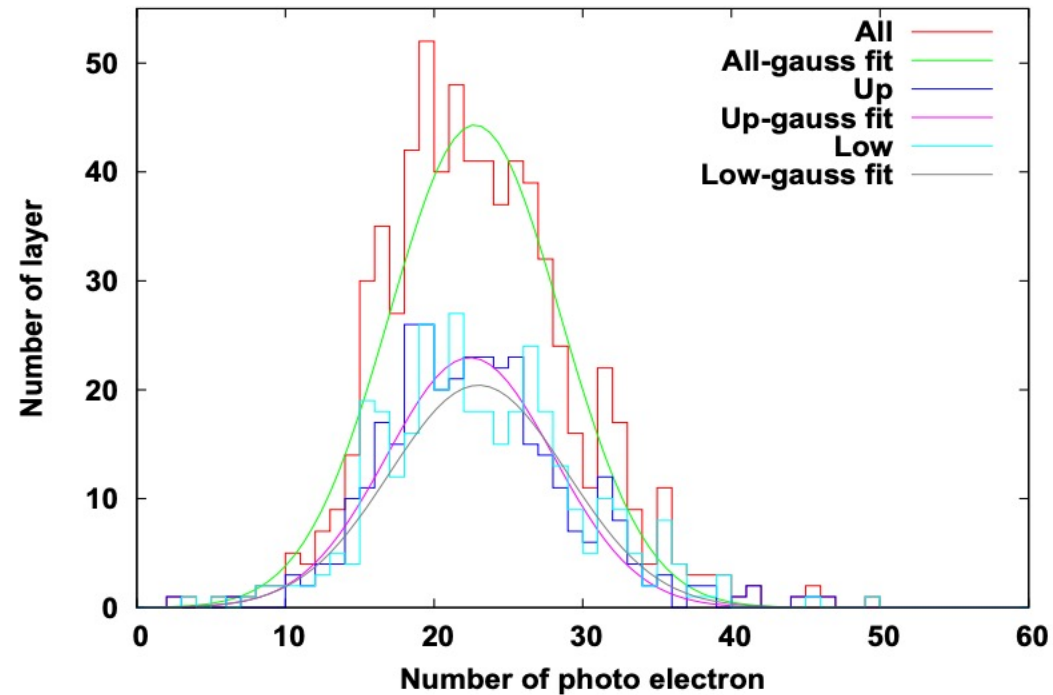


図 50: 宇宙線研究所での測定から推定される光電子数の分布

E. Kido 修士論文

課題と解決策

- ファンクションジェネレータの性能の問題
 - パルス高さを2倍にしたときに面積も2倍にならない可能性

→パルス幅を大きくして、より長方形に近い矩形波を再現



ゲイン測定の方法

- 1.ペDESTALの分布をガウシアンでフィット
- 2.ポアソン分布から 1 photonのピーク位置を推定
- 3.ペDESTALのピークと 1 photonのピークの差を取り、ADCカウンットの差を計算する。

結果

- 100s間で288イベント計測
- 先行研究と比較
 - 試作機：2.9Hz
 - TA-SD@柏：6.3Hz (310Hz × 面積比)

TA-SD@柏のものより低い値が得られた

考えられる原因：

- ディスクリミネータのしきい値の最小値は -20mV
- 1MIP のパルスハイトの平均はおよそ -25mV
 - 1MIPの中でもパルスハイトの高いものだけが計測された