



ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験 AXELのための波形読み出し回路の ファームウェア開発と性能評価

東北大学理学研究科物理学専攻

素粒子実験(加速器)研究室

初見 聡太

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)

【ニュートリノの未解決問題】

- 質量固有値
- 質量順序
- **マヨラナ性の有無**
 - ✓ ニュートリノの質量が**不自然に軽い**理由
 - ✓ **物質優勢宇宙**の起源

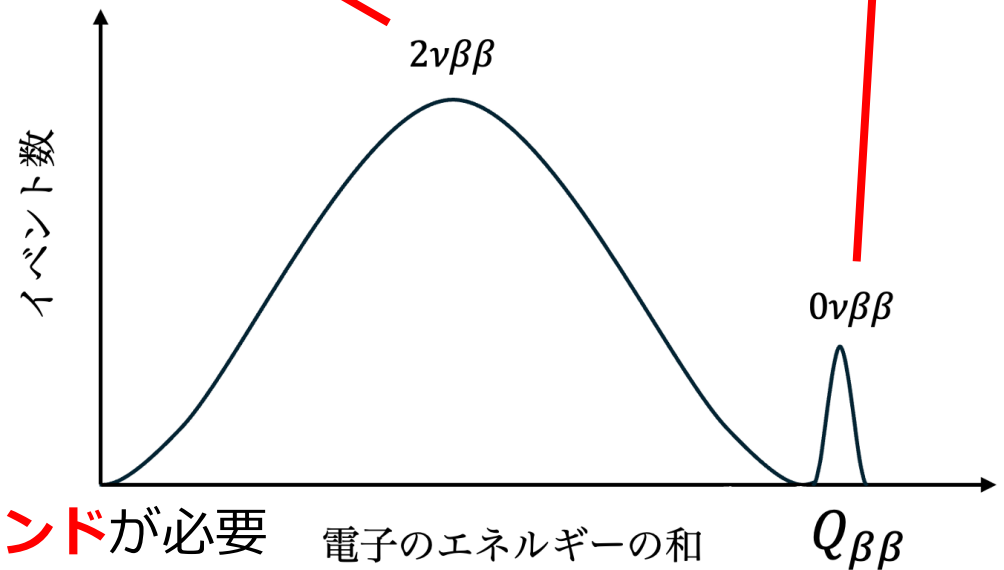
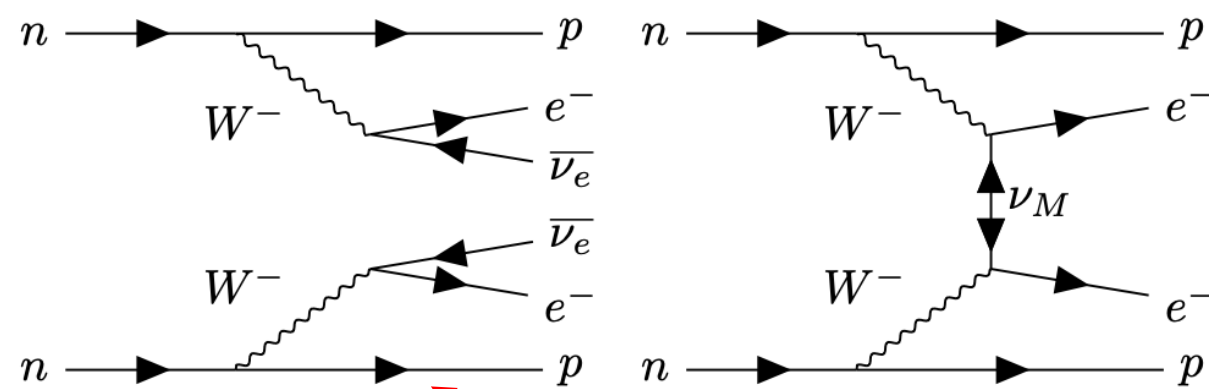
マヨラナ性のほぼ唯一の検証手段が $0\nu\beta\beta$ 探索

非常に稀な事象

- ✓ **半減期** $> 3.8 \times 10^{26}$ 年: ^{136}Xe (90 %信頼度) [1]

→ 探索には**大質量・高エネルギー分解能・低バックグラウンド**が必要

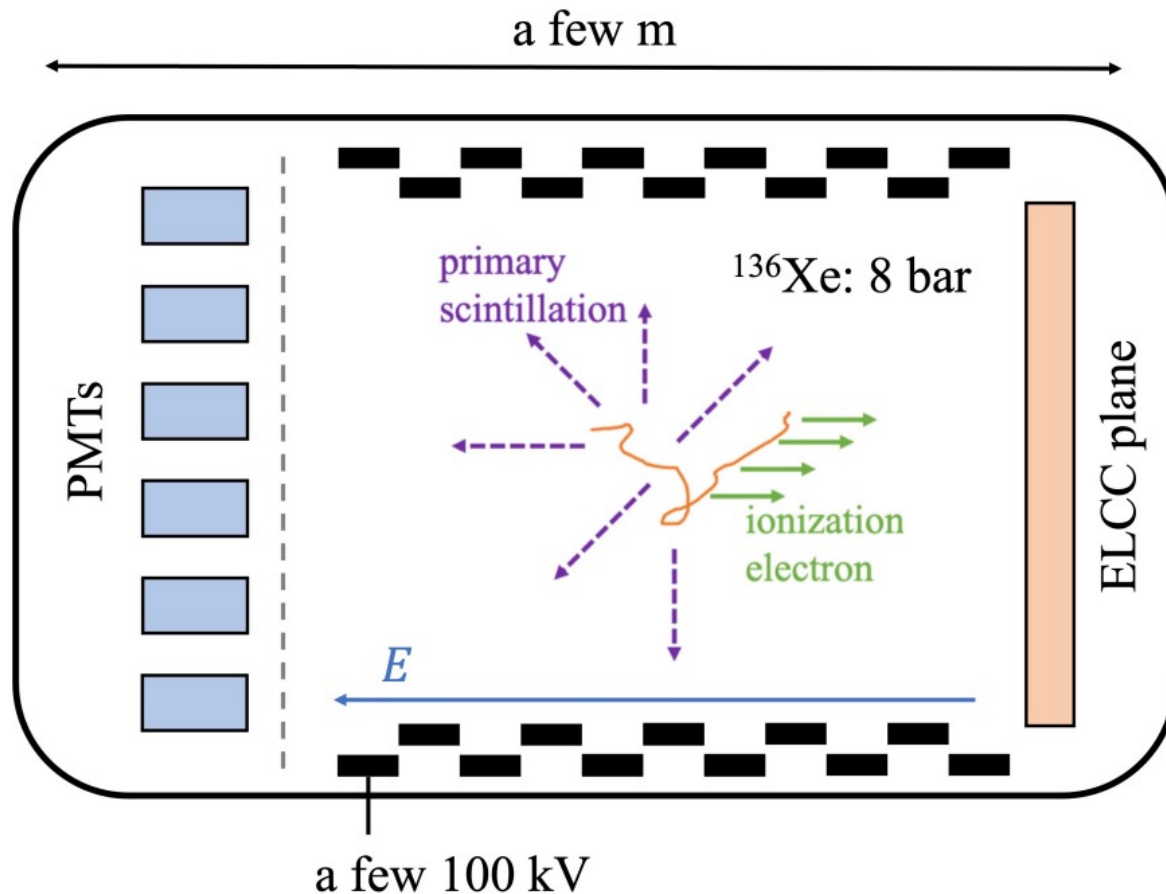
二重ベータ崩壊のファインマンダイアグラム



[1] KamLAND-Zen Collaboration, arXiv:2406.11438

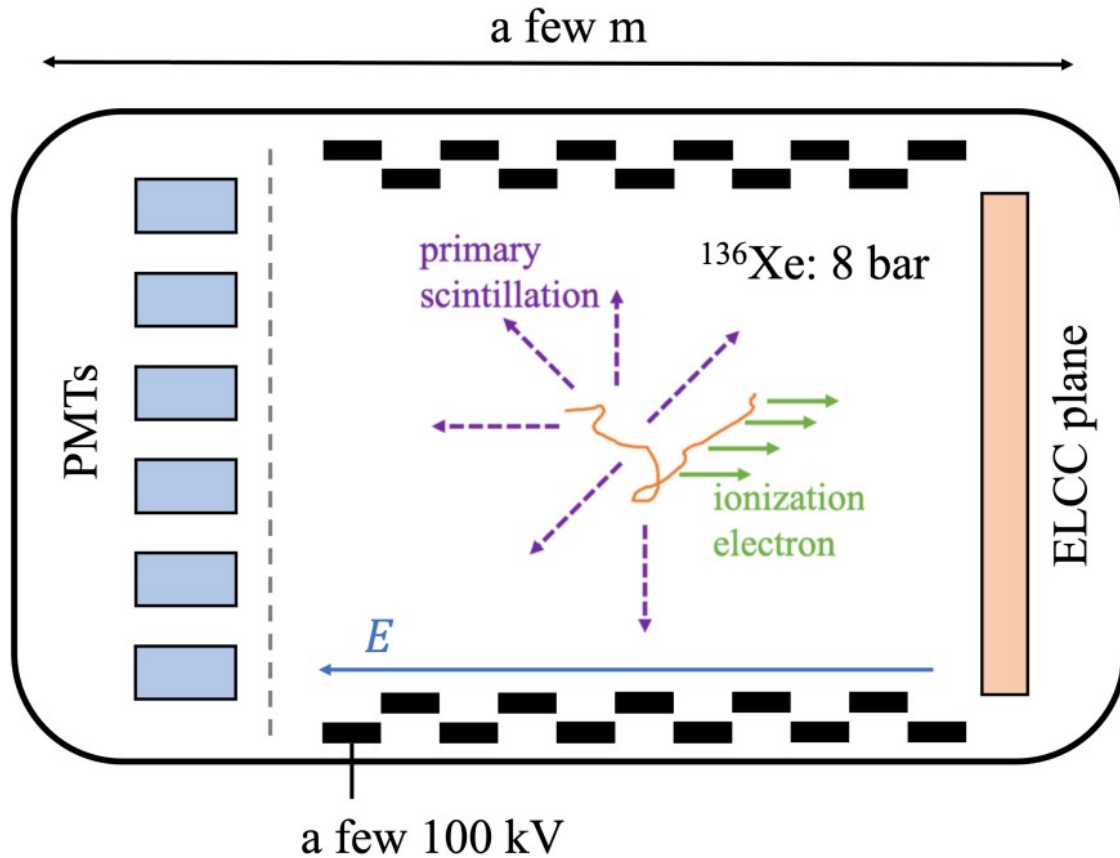
A Xenon ElectroLuminescence

高圧キセノンガスTPCを用いた $0\nu\beta\beta$ 探索計画



- ✓ 高圧キセノンガスによる測定
→ **大質量(大量の崩壊核)**
- ✓ ドリフト電子をElectroLuminescence (EL)過程にて線形増幅
→ **高エネルギー分解能**
- ✓ 飛跡再構成による背景事象の除去
→ **低バックグラウンド**

Time Projection Chamber(TPC)



【TPCの原理】

1. 荷電粒子がガス中でエネルギーに比例した数のキセノンを励起or電離
2. 励起原子は脱励起の際にシンチレーション光を放出(~数ns)
3. シンチレーション光はPMTで検出、その時刻を事象発生時刻 t_0 とする
4. 電離電子は一定の速度 v (~1 mm/us)でドリフト
5. 電子はELCC面(x, y)で検出、その時刻を t とする

電離電子発生位置

$$z = v(t_0 - t)$$

電離電子の読み出しと飛跡再構成

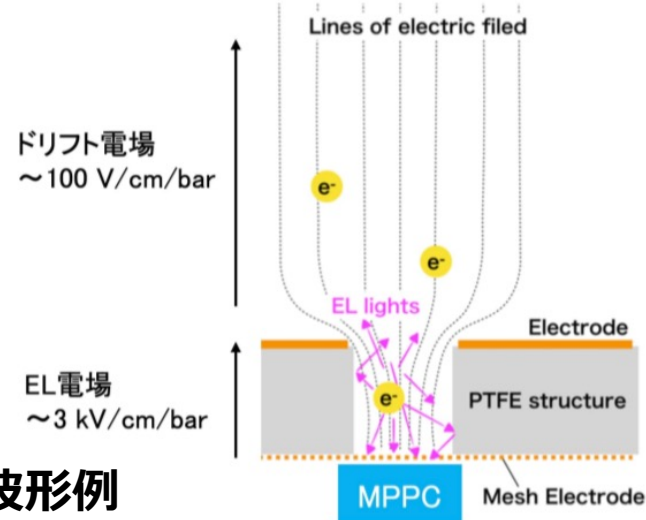
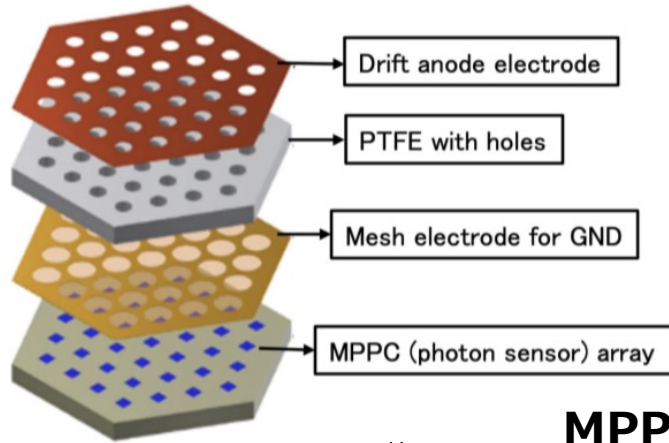


【ELCC】

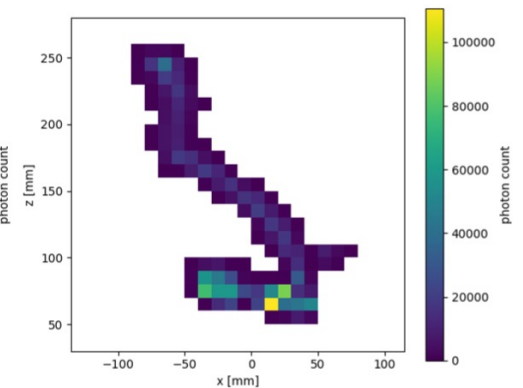
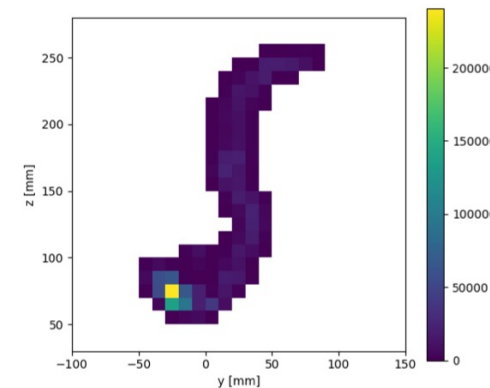
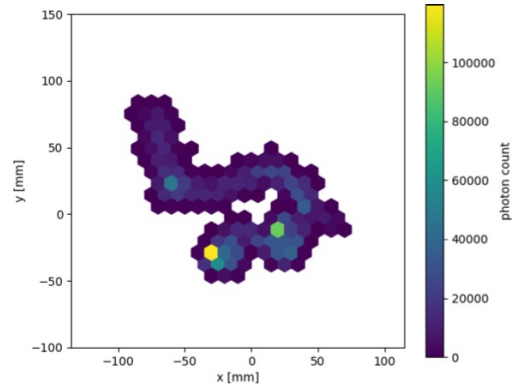
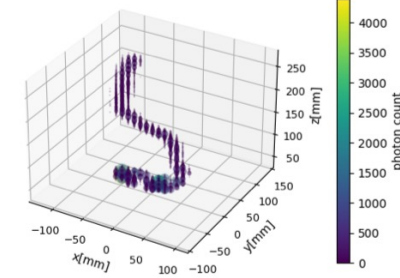
- AXEL独自の電離電子読み出しシステム
- 電離電子はEL過程で線形的に光子に変換
- 光子はMPPCで検出



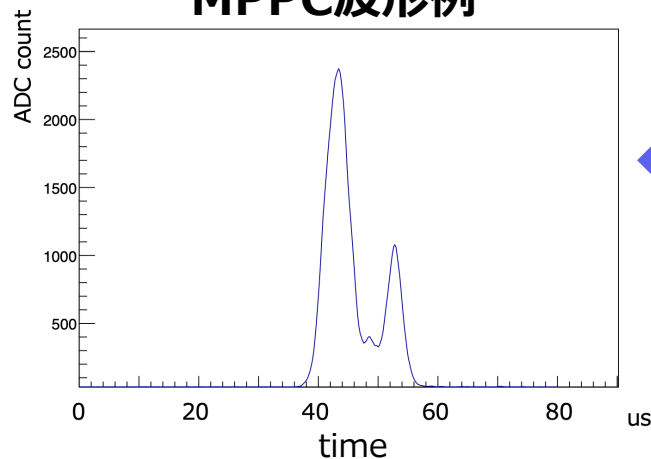
ELCC面の2次元情報と時間情報から
飛跡を再構成



再構成された飛跡の例



MPPC波形例



Multi-Pixel Photon Counter(MPPPC)



【MPPC】

- 半導体光検出器
- ピクセルに光子が入射すると一定の電荷を出力

1つのピクセルから出力される電荷

$$Q_{1 \text{ p.e.}} = C(V_{\text{bias}} - V_{\text{break}})$$

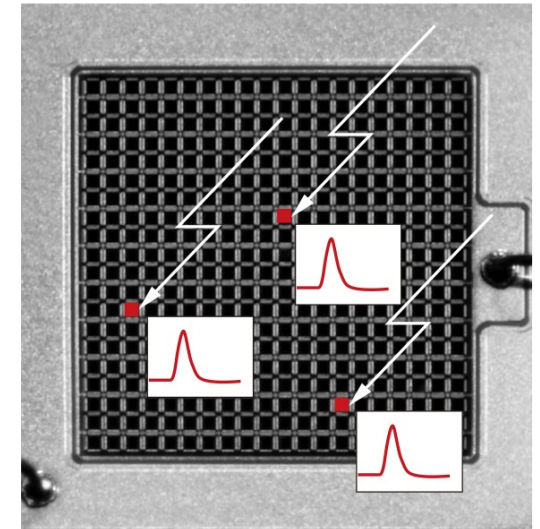
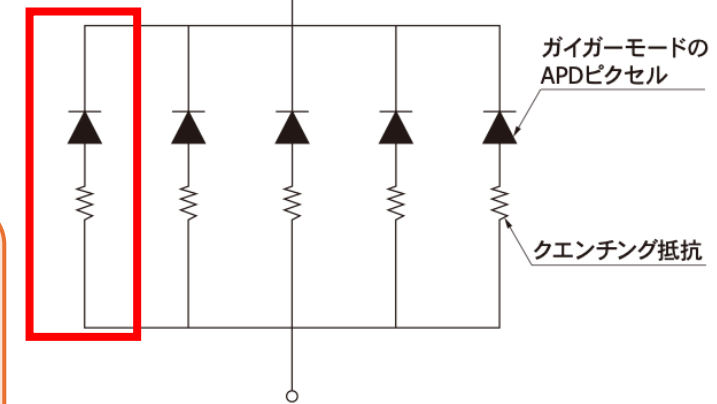
C : 静電容量、 V_{bias} : MPPC印加電圧、 V_{break} : ブレイクダウン電圧

光子が入射していないのにも関わらず信号を出力することがある

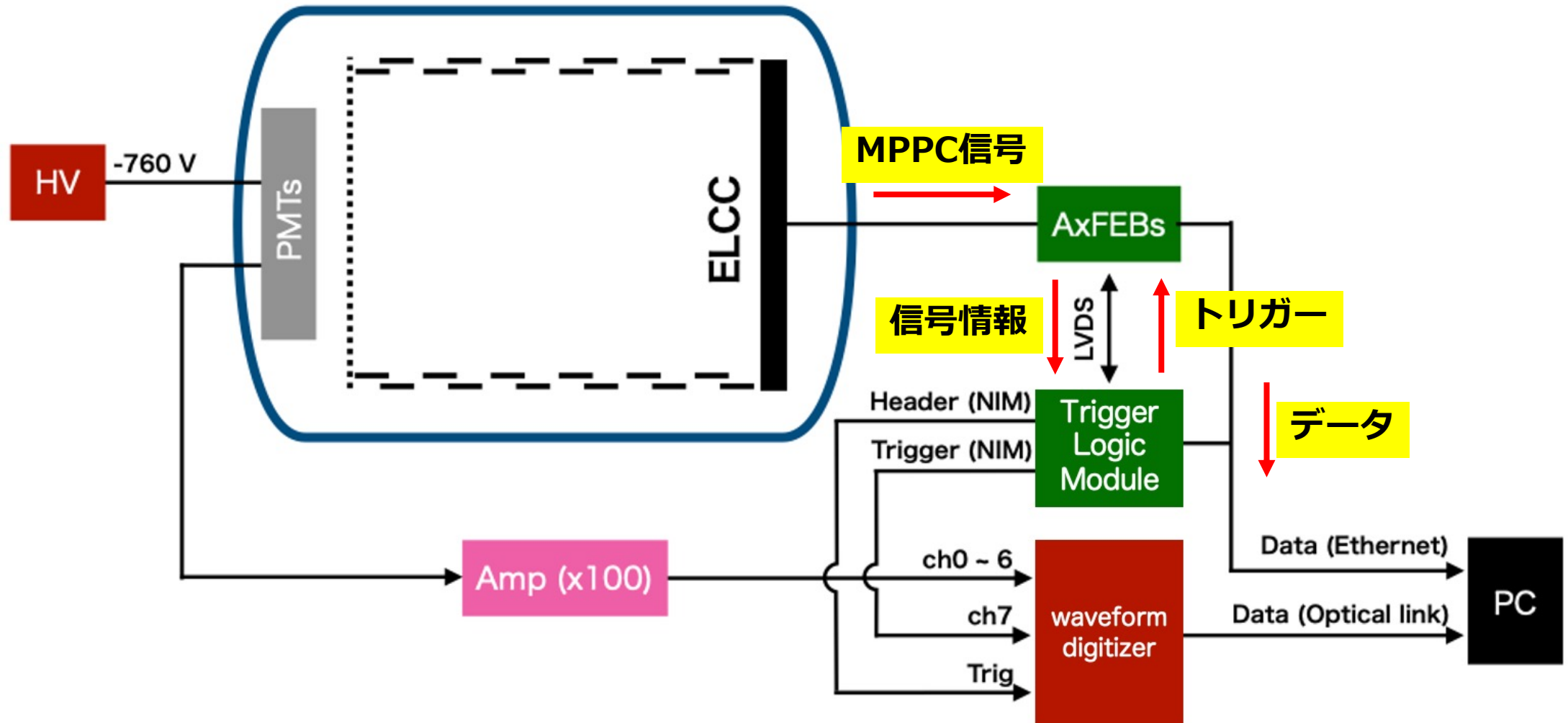
- 熱的に励起された場合もパルスを出力 : ダークパルス
- 光子を検出した隣のピクセルが信号を出力 : クロストーク
- 光子を検出した数百ns後に信号を出力 : アフターパルス

MPPCの等価回路

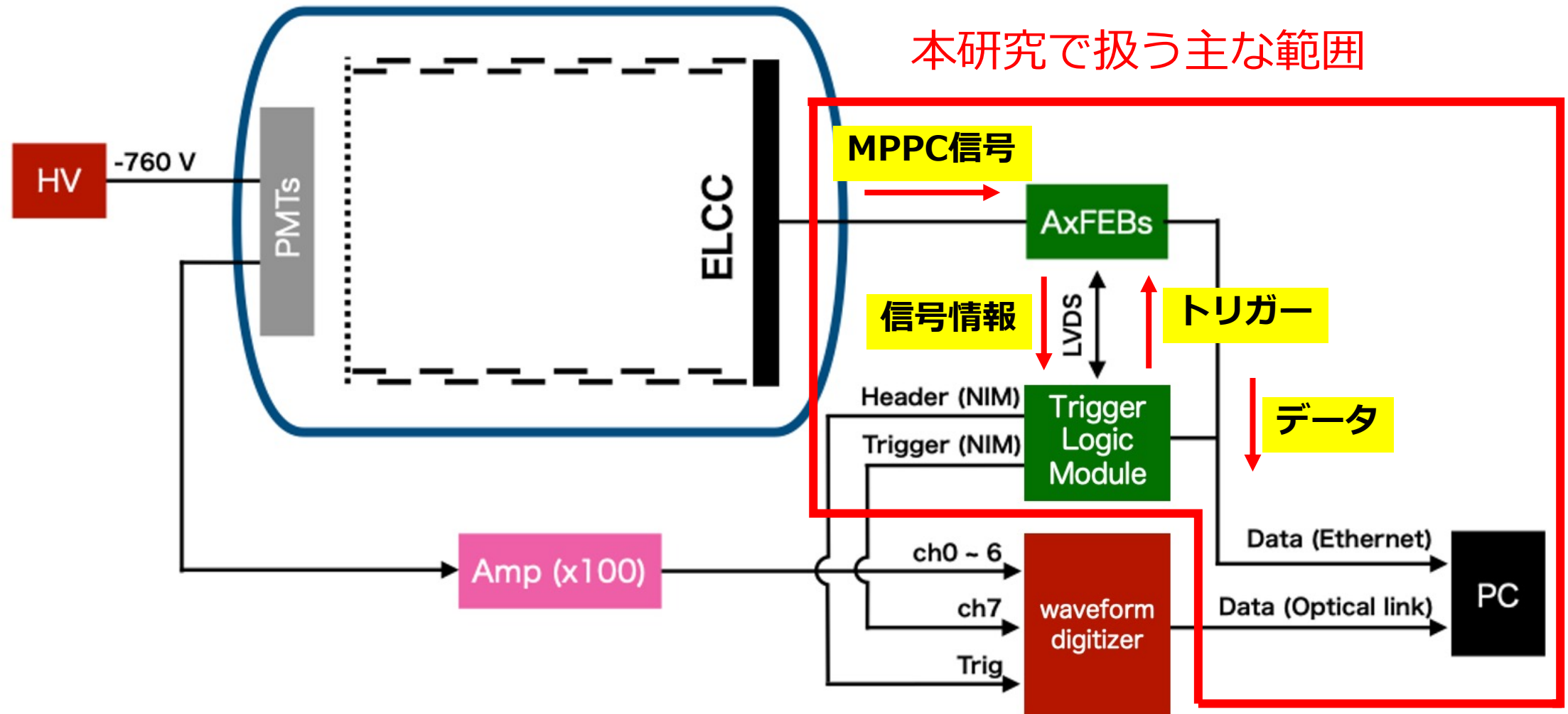
1ピクセル



信号読み出し系



信号読み出し系



AXEL実験のロードマップと課題



180 L検出器での性能評価&1000 L検出器の開発中

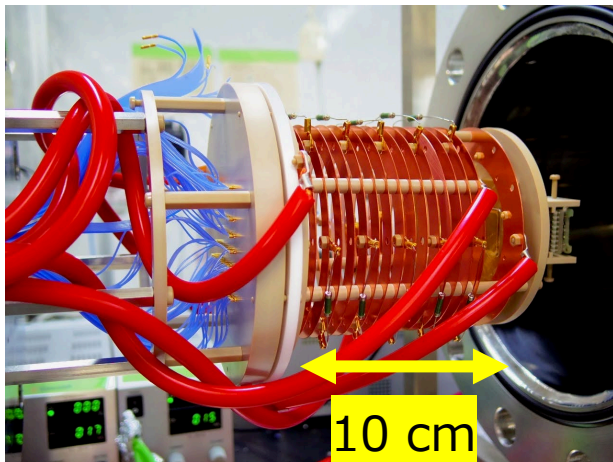
1000 L detector

- 2026-
- 30 kg@8 bar 6400 ch
- 地下での物理ラン

ton scale

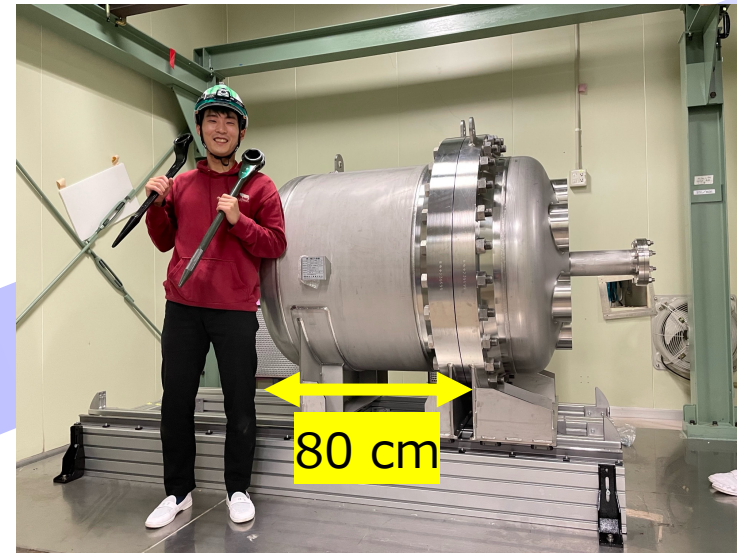
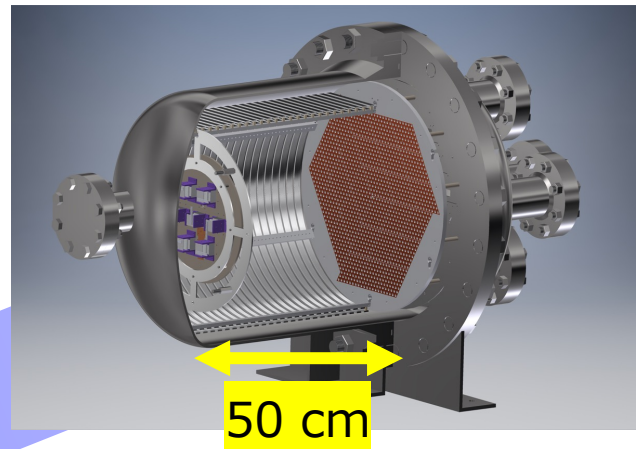
10 L prototype

- 2014-2018
- 0.05 kg@8 bar 64 ch
- ELCCコンセプトの検証



180 L prototype

- 2018-
- 4.5 kg@8 bar 672 ch
- Q値付近での分解能評価



- 読み出しチャンネル数は**6400程度**に！
- 基板の枚数も**100枚程度**に！
- 読み出し回路の**集積化**が必要

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

次期読み出し回路の基本性能の評価

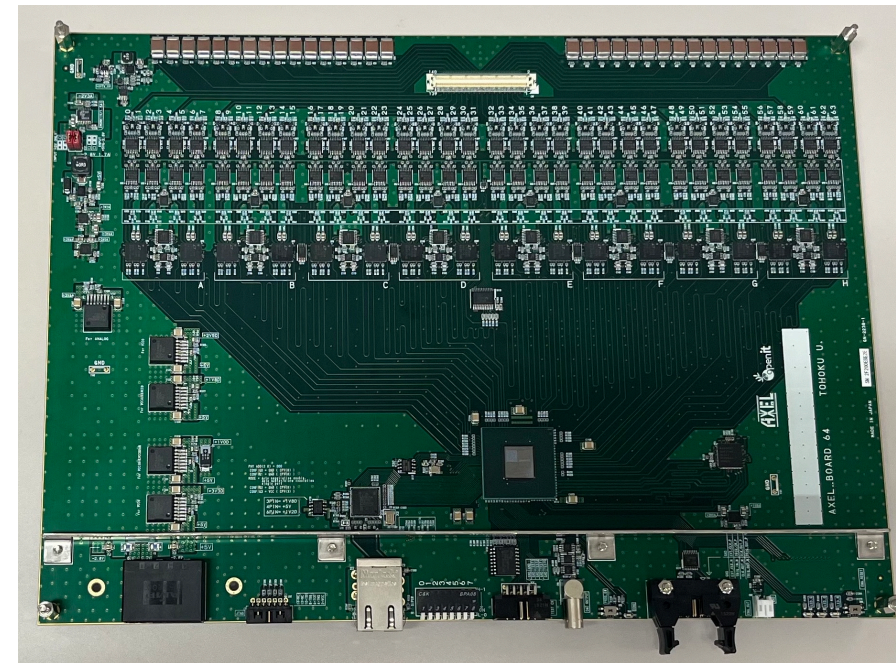


【開発背景】

- ✓ 検出器大型化による読み出しチャンネル数の増加
- ✓ 新型MPPCによるEL光量の増加

【次期読み出し回路への要求】

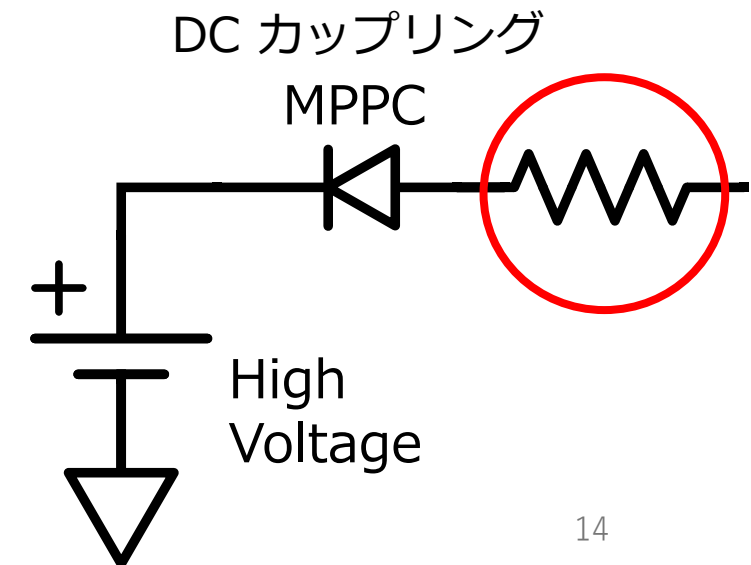
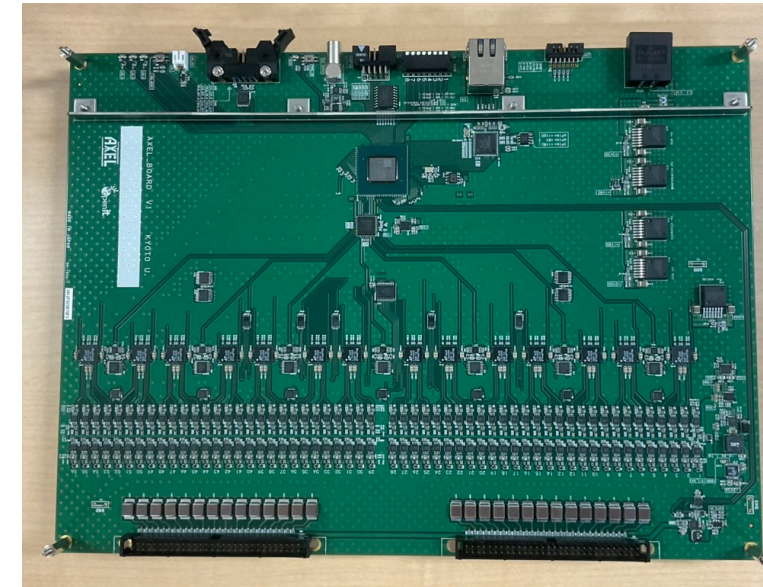
- ✓ **高いエネルギー分解能**を保ったまま読み出し
- ✓ 読み出し回路の**集積化**
- ✓ 信号**増倍率の最適化**



AXELBOARD

【特徴】

- **MPPCへの電圧供給**
MPPC増倍率を一様にすることも可能
- **増倍率の異なる2種類のデータ取得**
 1. Low gain(増幅率5倍 ; ADCサンプリングレート 5 MSPS)
 - TPCの大光量EL光の取得
 2. High gain(増幅率165倍 ; ADCサンプリングレート 40 MSPS)
 - MPPC 増倍率の調整
 - ダークパルスの監視
- **DCカップリング**
信号継続時間が長い信号を電荷量の歪みなく読み出し
- **LVDS通信**
複数枚のAXELBOARDに同時にトリガーをかける

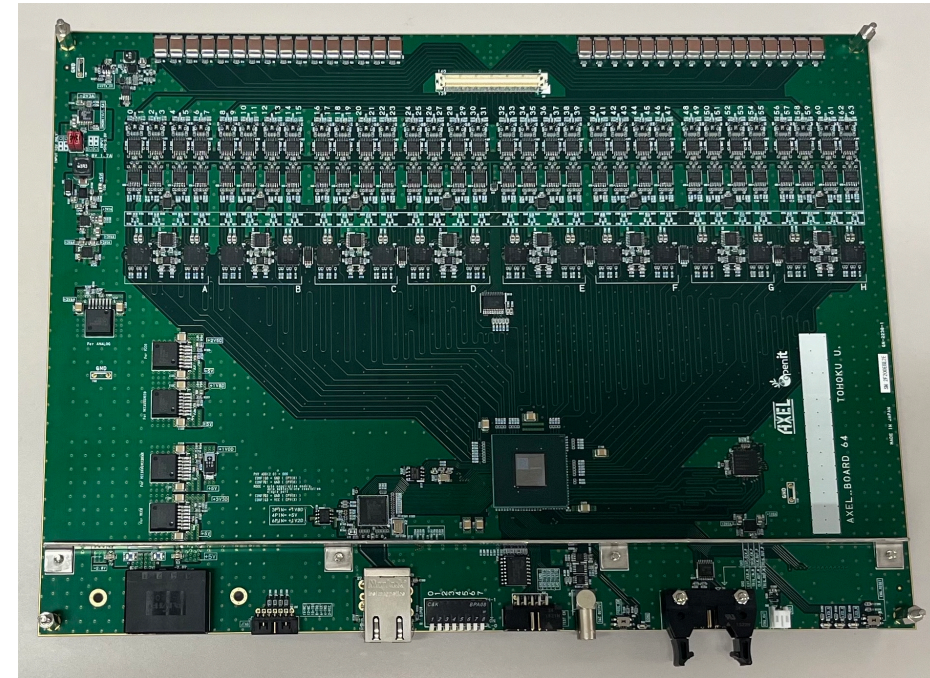


AXELBOARD64

前世代の読み出し回路をベースに集積化が図られた次世代読み出し回路

【変更点】

- **読み出しチャンネル数の増加**
基板面積はそのまま56チャンネルから64チャンネルへ
- **増倍率の変更**
次世代1000 L検出器では光量が約3倍に増加する見込み
➤ Low gainの増倍率が5倍から2倍へ



NEXT : AXELBOARD64の基本性能の評価

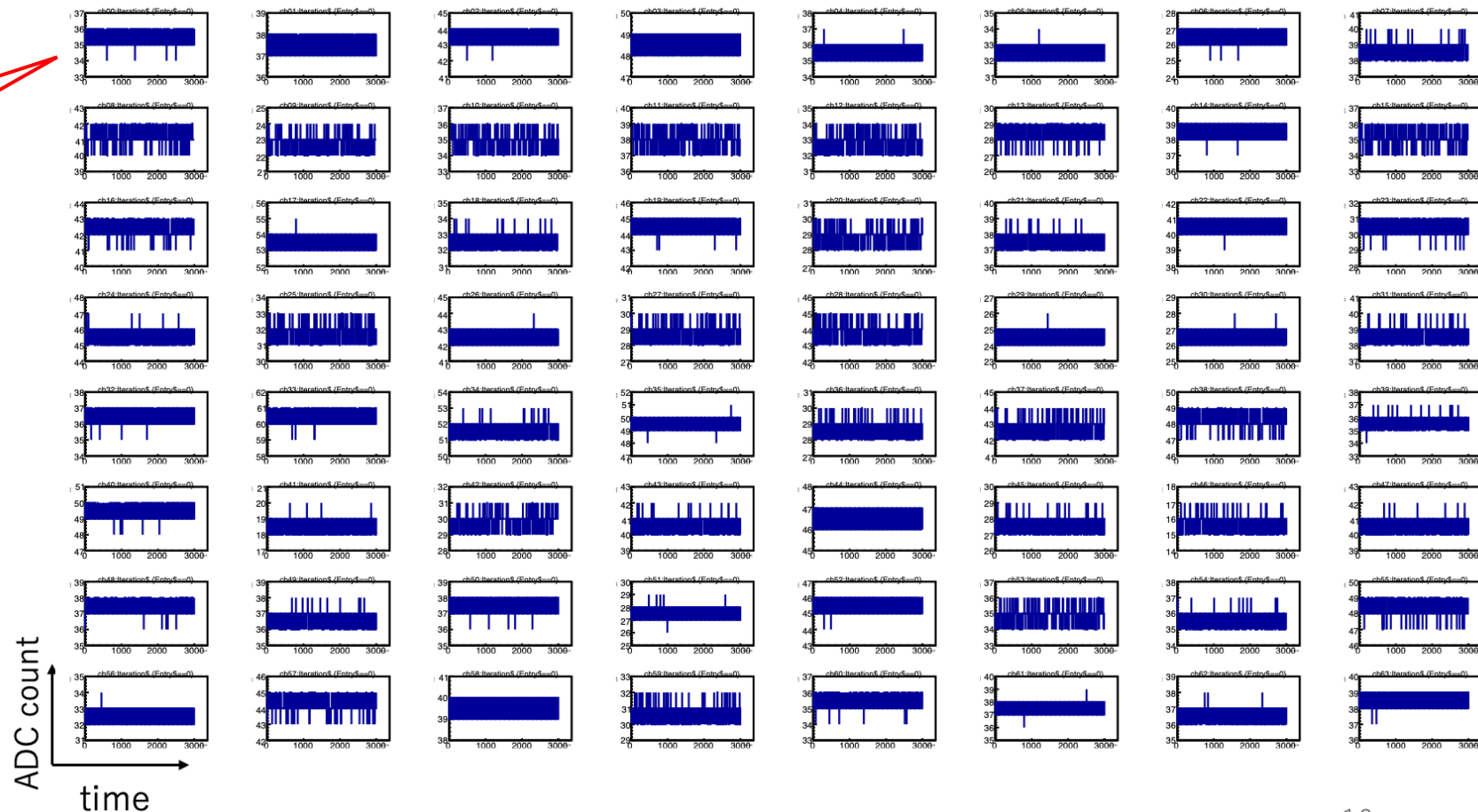
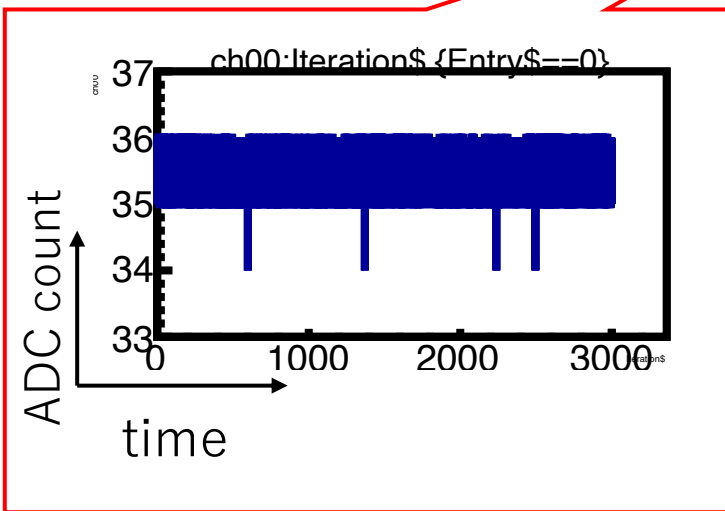
AXELBOARD64を動作させるために、**基板のファームウェアを新規に開発した(次章)**

Low gainのペDESTアル波形



次世代基板のADCデータのノイズを評価

ノイズ幅は2 ADC count以下 → 前世代基板と同程度



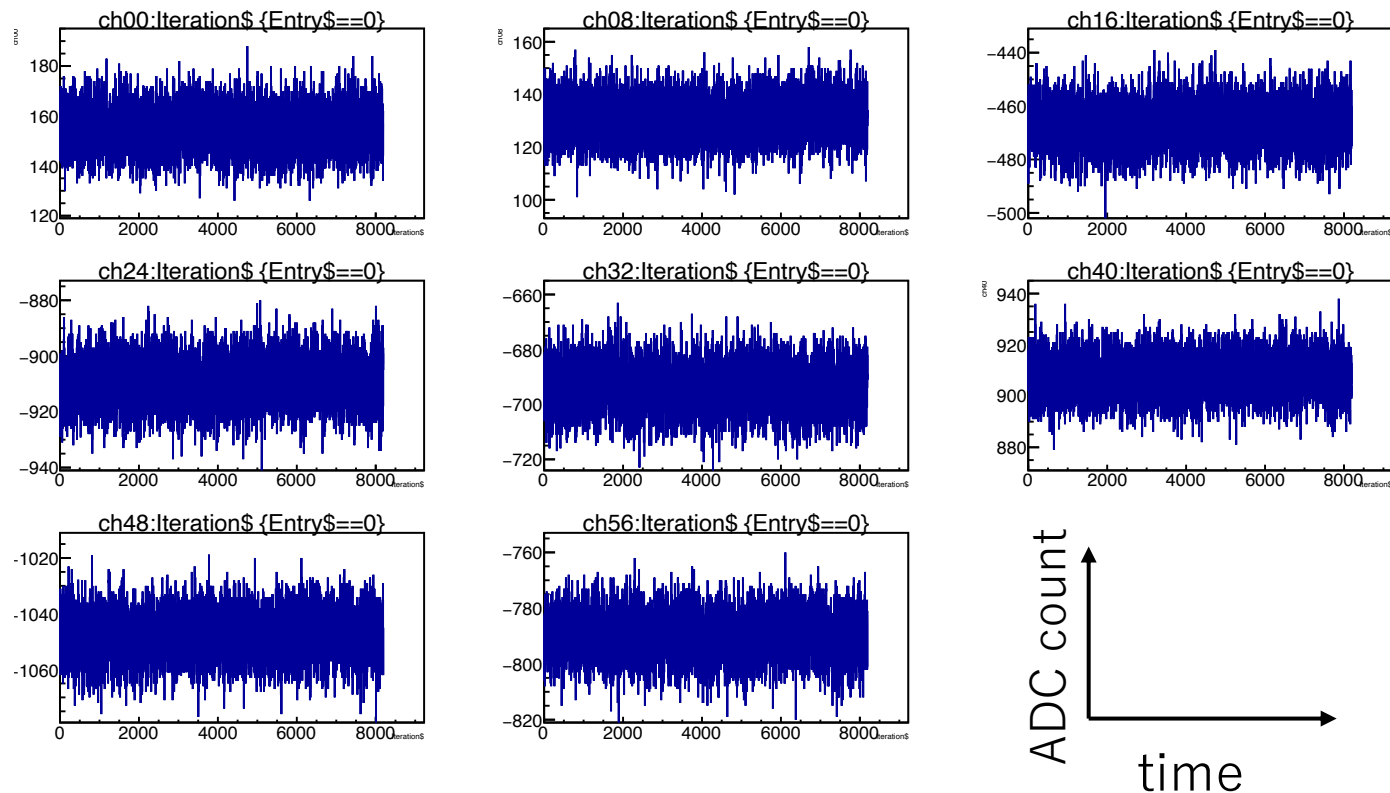
High gainのペデスタル波形



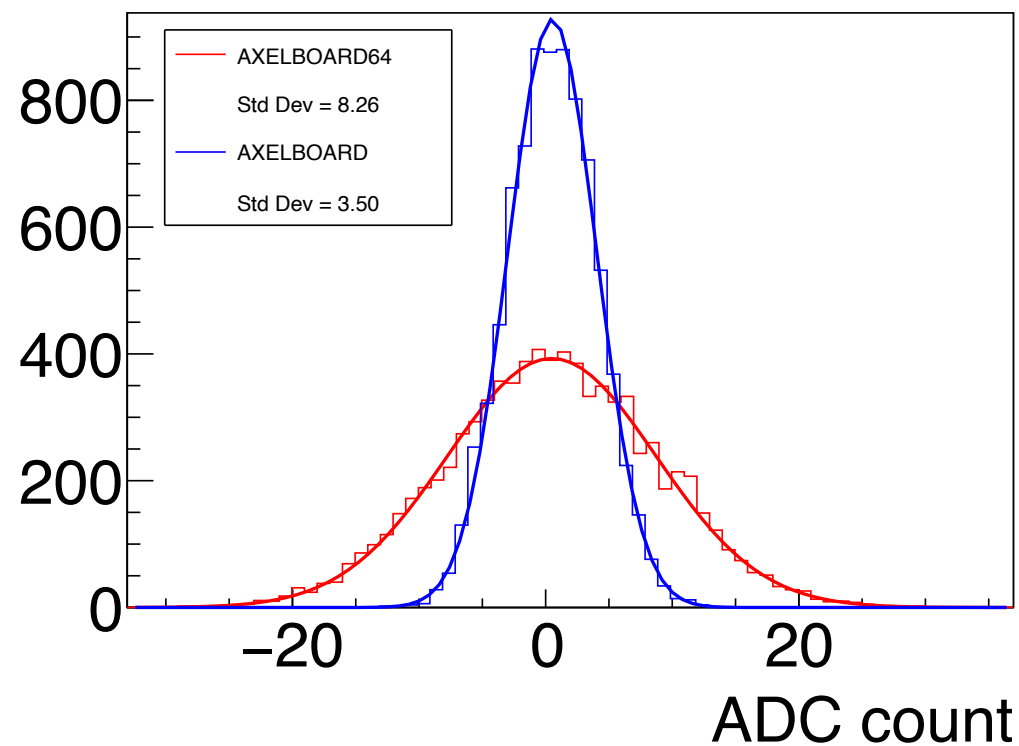
ノイズ幅：20 ADC count程度
標準偏差：前世代基板の2.3倍



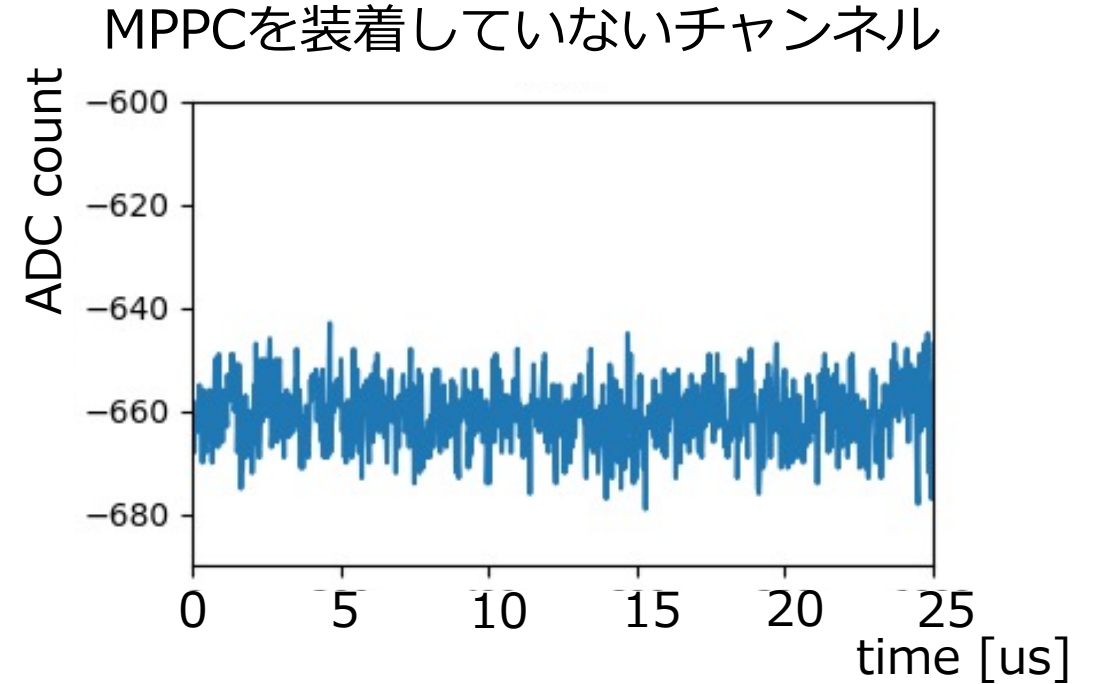
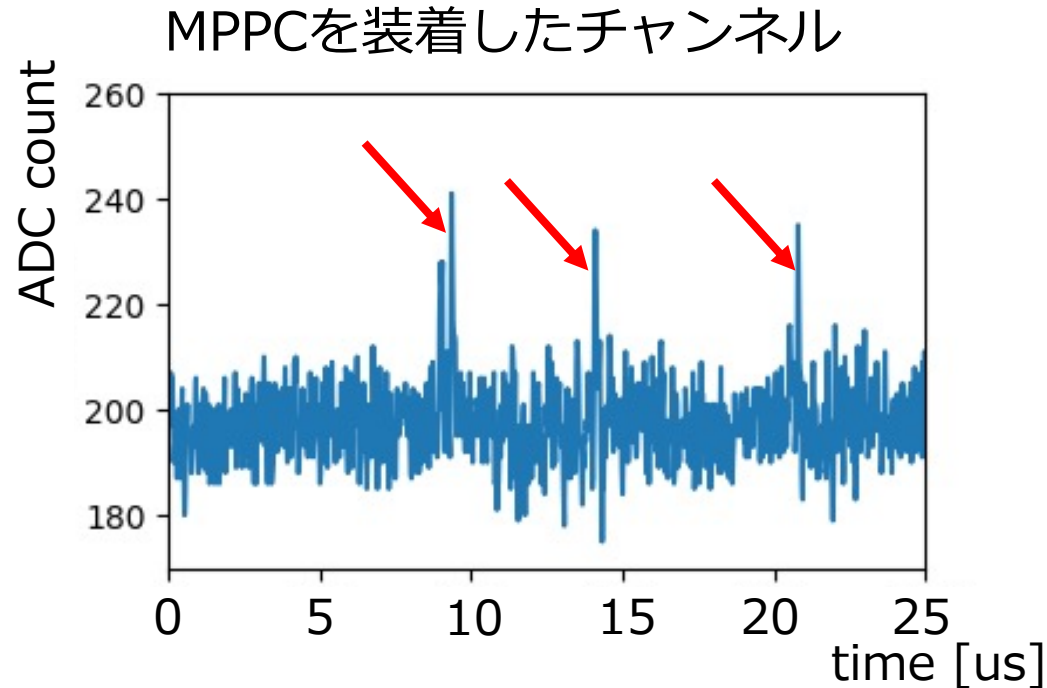
ダークパルスの大きさは60 ADC count
($\sim 7\sigma$)程度
問題なし



Entries



High gainによるMPPCの1 p.e.信号の取得



MPPC(S12572-025C)を装着したチャンネルと装着していないチャンネルのHigh gainデータを比較

【結果】

- MPPCが装着されたチャンネルで30~40 ADC count程度のピークが見える
- 装着されていないチャンネルには見えない

→High gainでダークパルスを観測

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

ファームウェアの開発

【背景】

- 読み出し回路はFPGAで制御
 - **次世代読み出し回路専用のファームウェアの開発が必要**
- 読み出しチャンネル数の増加
 - **Trigger Logicモジュールの改造も要求**

- **次世代検出器でデータを取得する仕様を考え、実装する**
- **前世代ファームウェアを参考に新規で開発**

AXEL実験に必要なデータ

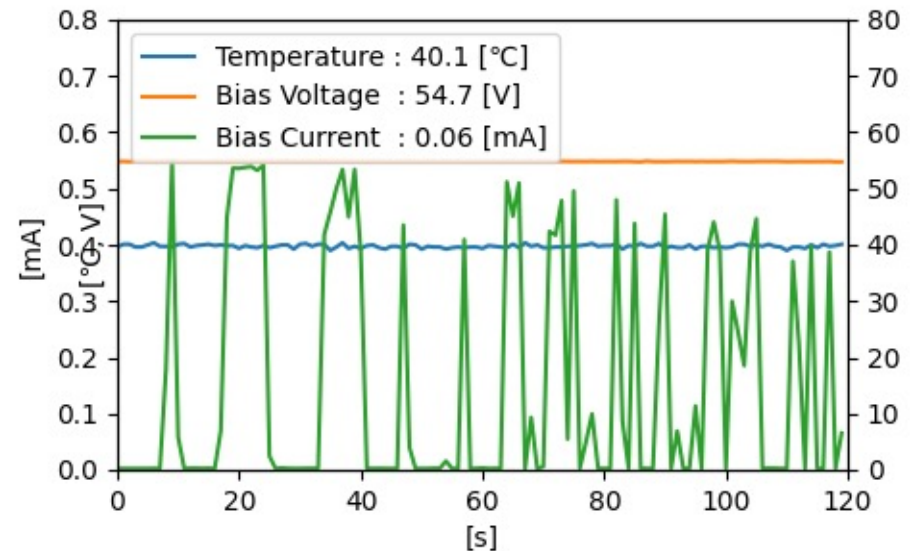
- | | |
|---|---------------|
| 1. $0v\beta\beta$ など、 光量の大きいEL信号 | 光子数 10^6 |
| 2. ELゲインのキャリブレーションに用いる比較的 光量が小さいEL信号 | 10^4 |
| 3. MPPCゲインの監視・調節に用いる ダークパルス | 10^0 |

前世代のファームウェアを参考にゼロから実装

✓ LEDインジゲーターによる基板の状態表示



✓ MPPC電圧・電流値のモニター

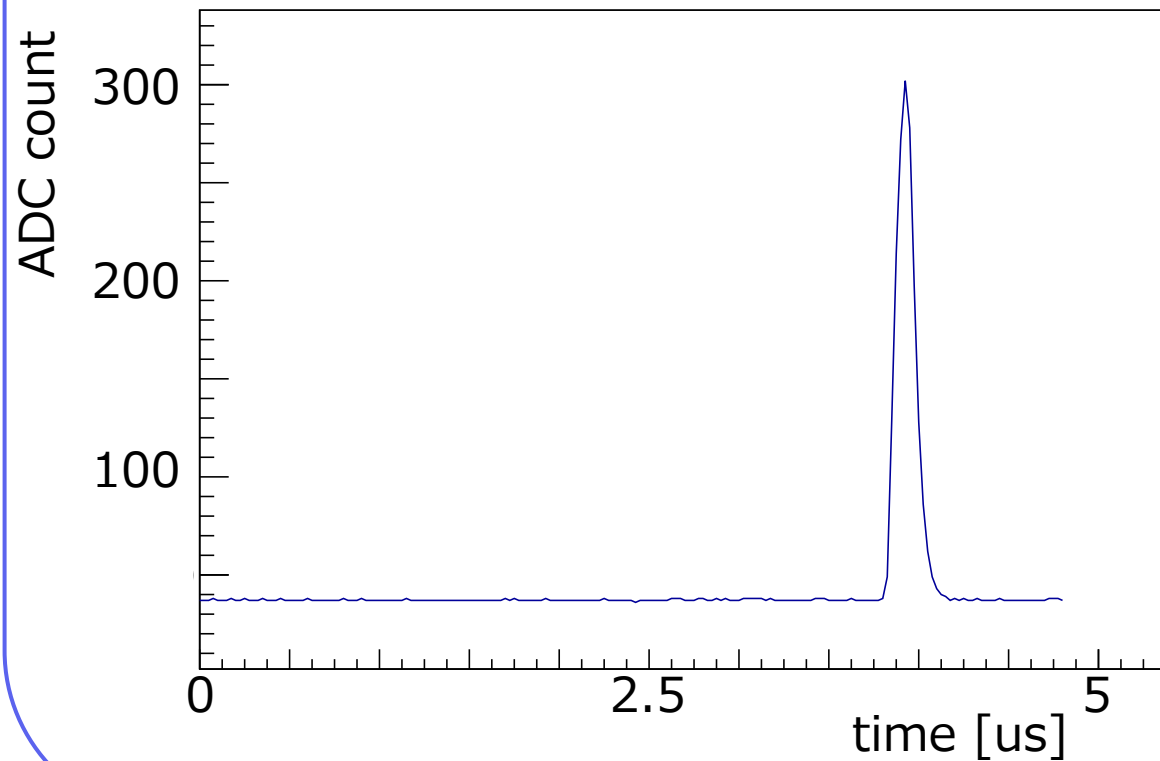


- ✓ MPPC印加電圧の制御
- ✓ PCとのTCP・UDP通信
- ✓ データ構造の64チャンネル化
- etc.

NEXT : Low gainとHigh gainのデータ取得

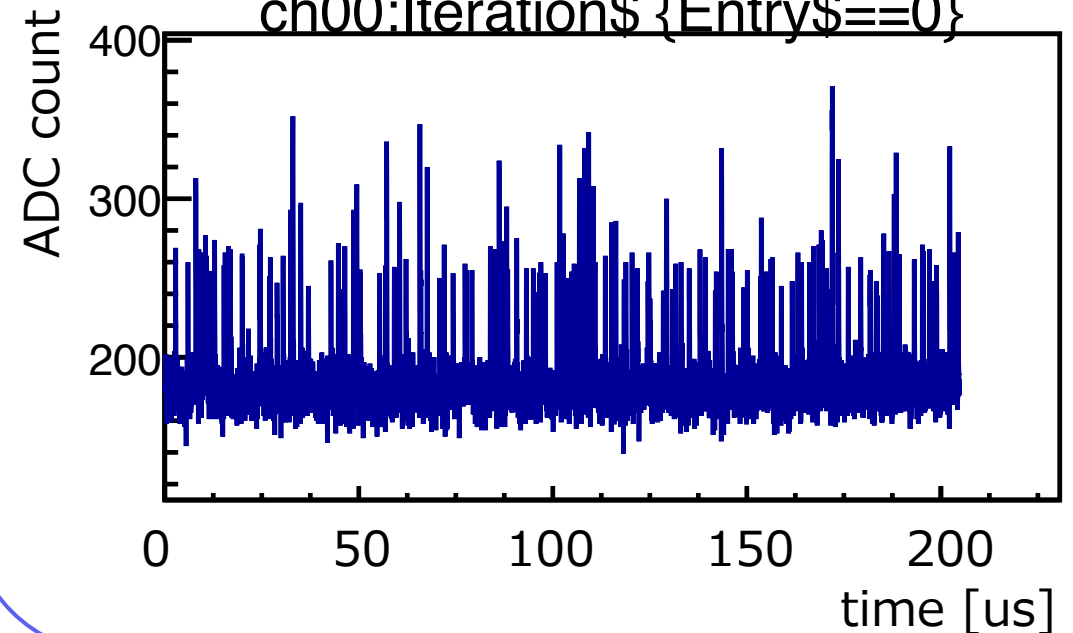
1. Low gain(増倍率2倍)

MPPCにLEDを照射して取得した波形



2. High gain(増倍率165倍)

MPPCダークパルス
ch00:Iteration\${Entry\$==0}



次世代基板によるデータ取得を実現

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

64チャンネルMPPCボード

浜松ホトニクス製MPPC(S16860-01)

【背景】

- EL光検出の統計揺らぎがエネルギー分解能を制限

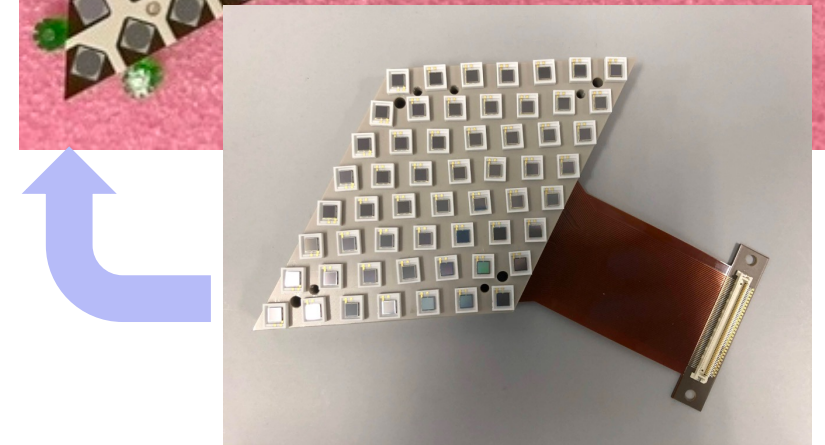
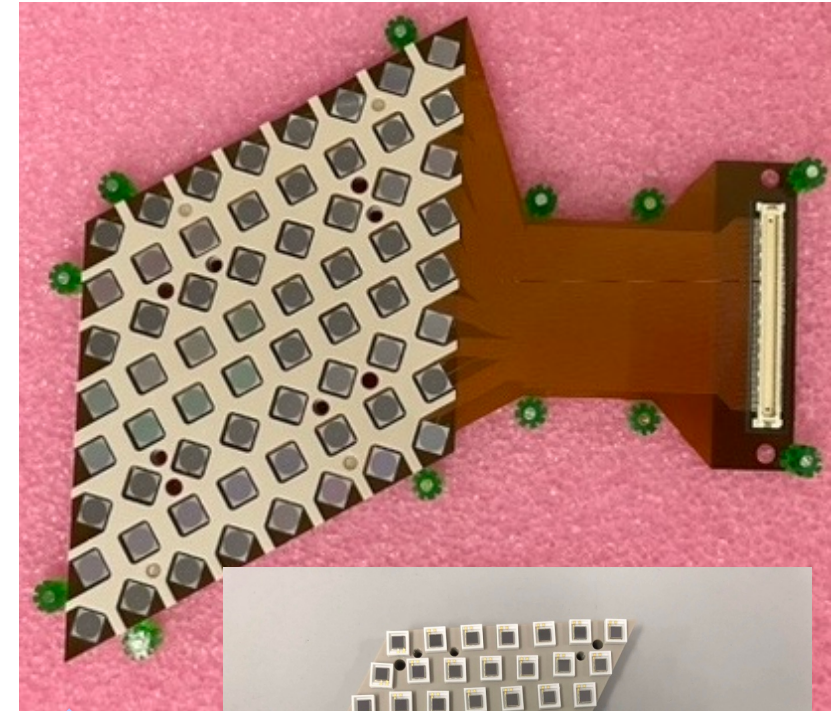
【目的】

- 検出光量増加によるエネルギー分解能の改善

【特徴】

- **MPPC受光面の大型化**
(3 mm角→4.7 mmφ : 1.93倍)
- **低BG化**
セラミックの使用を避け、MPPCチップをポリイミド回路に実装
- **チャンネル数の増加**
56チャンネル/基板 → 64チャンネル/基板

64チャンネルMPPCボード

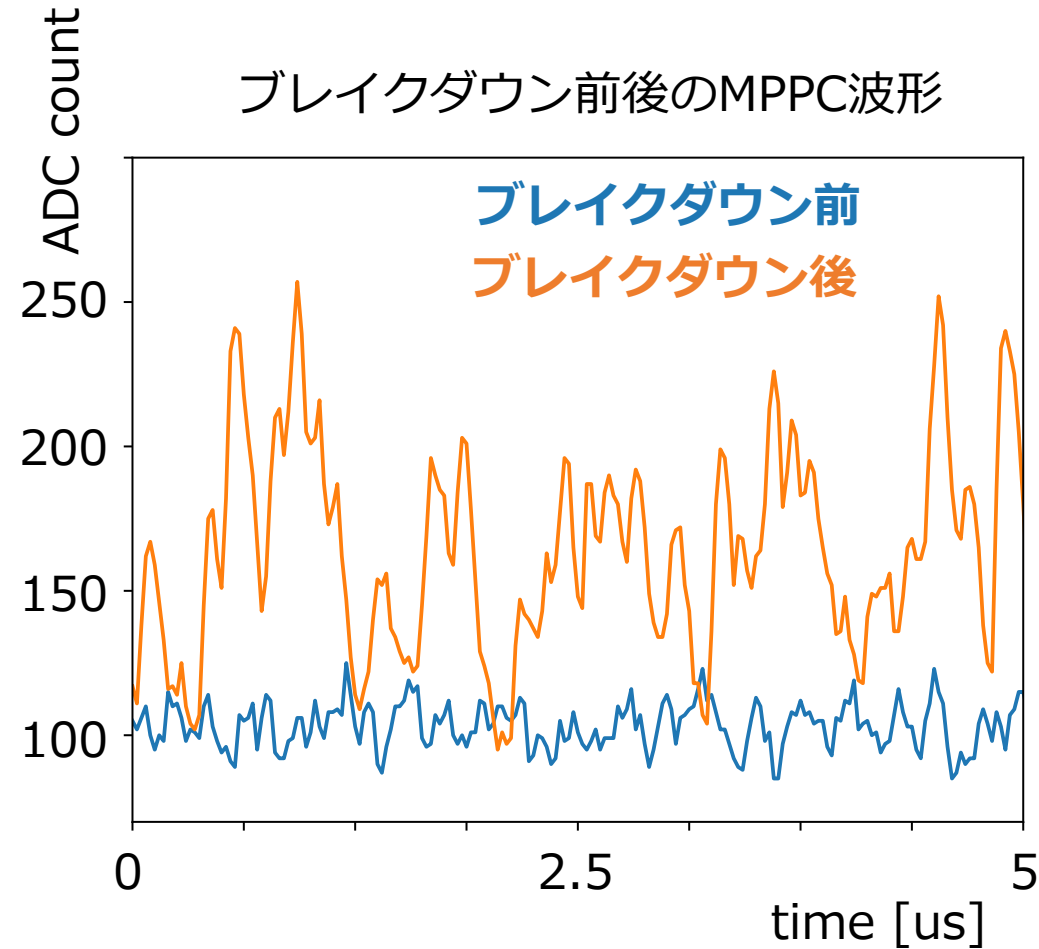


56チャンネルMPPC 24

64チャンネルMPPCボードの読み出し



ブレイクダウン前後のMPPC波形



64チャンネルMPPCボードを次世代基板に接続して読み出し

【結果】

- ブレイクダウン前後でパルスの有無を確認

【問題点】

- **パルスを1つ1つ明確に決定できない**
 - MPPCゲインはダークパルスの電荷量を用いて決定しているため、**MPPCゲインが求められない**

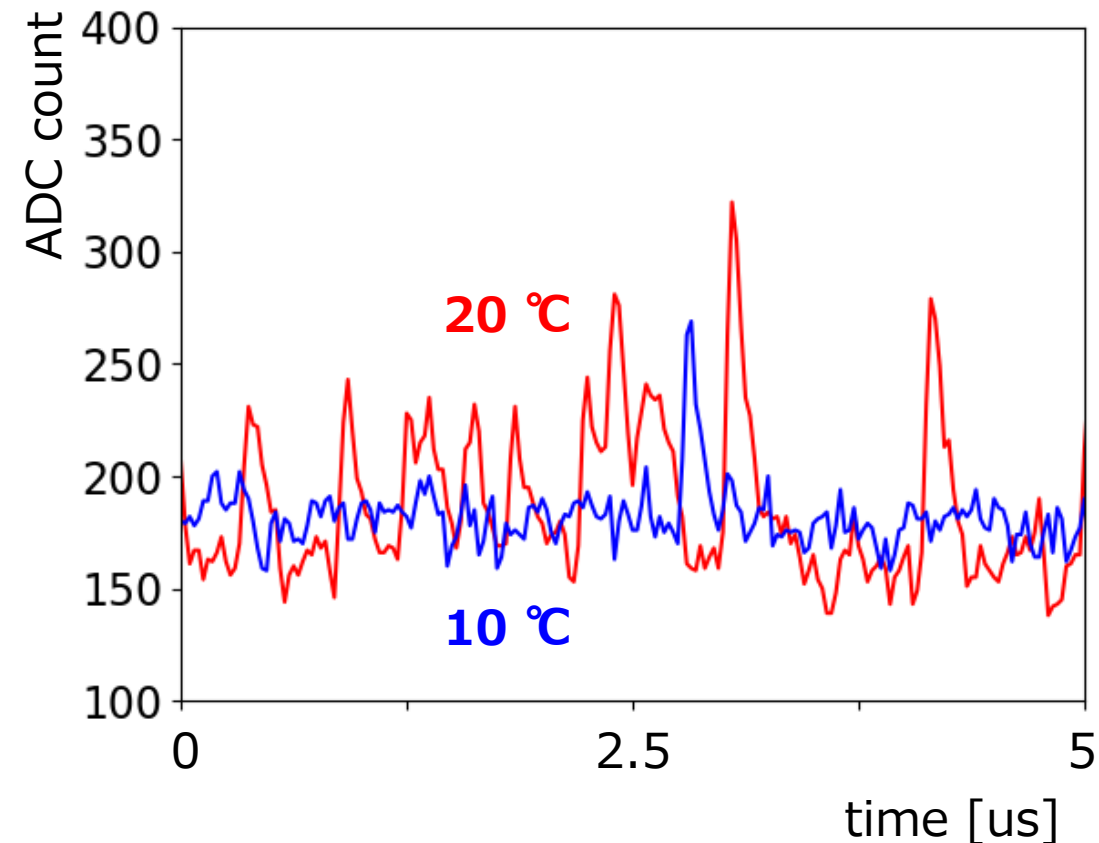
【原因】

- **MPPCのダークパルスレートが高く、ダークパルスがパイルアップしている**

64チャンネルMPPCボードの冷却



MPPC波形の温度による比較



MPPCのダークパルスは熱的に電子が励起された場合に発生する

➤ **MPPC温度を下げればダークパルスを抑制できる**

【方法】

MPPCを恒温槽に入れ、温度を変えて10分間冷却

【結果】

ダークパルスの抑制に成功

NEXT : MPPCのゲイン評価と温度依存性

新型MPPCのゲインの評価と温度依存性:結果



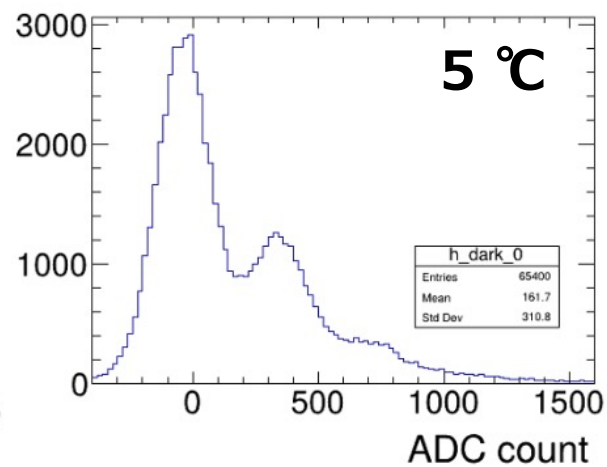
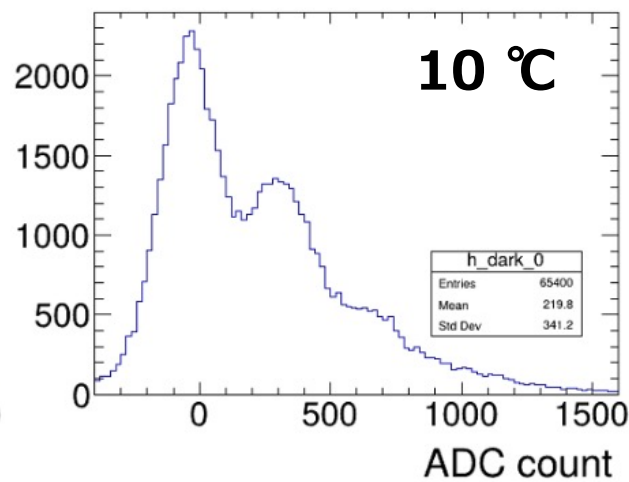
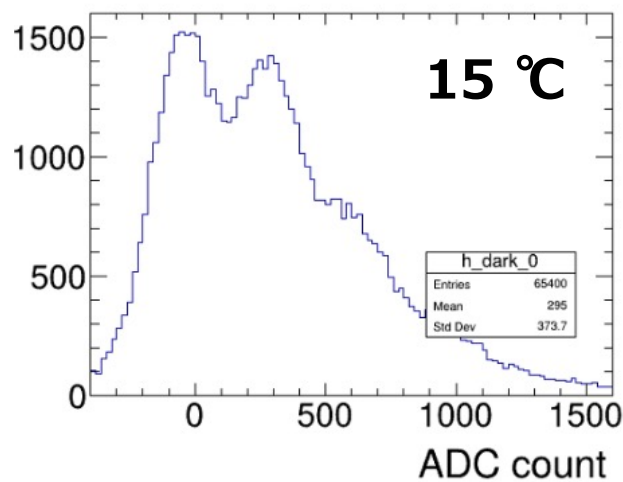
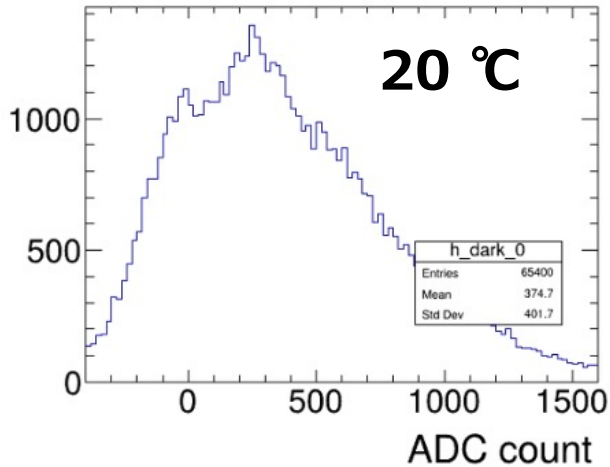
積分値分布の温度依存性(印加電圧一定)

ペDESTAL ↓ ↓ 1 p.e.

ペDESTAL ↓ ↓ 1 p.e.

ペDESTAL ↓ ↓ 1 p.e.

of entries



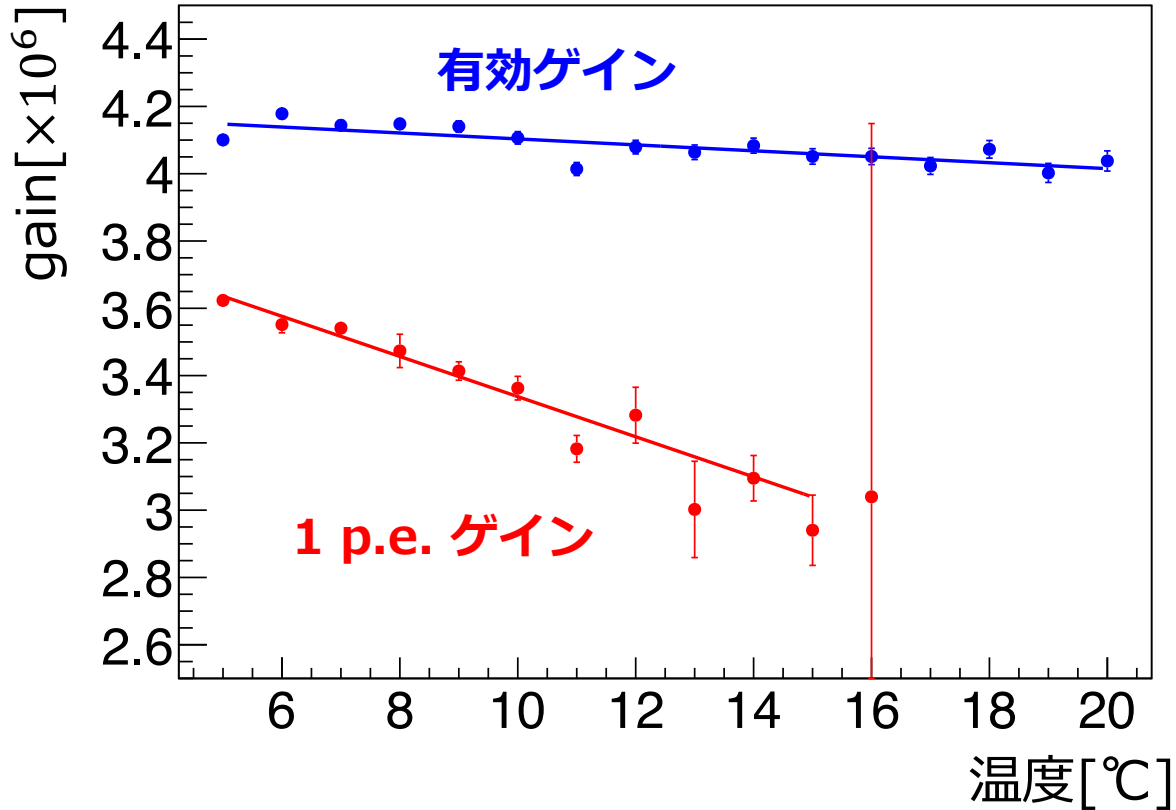
【結果と考察】

- ✓ 20°CではペDESTALと1 p.e.のピークが分離していない。
 - ダークパルスが多く、ウィンドウを跨ぐものが多いため。
- ✓ 15°Cになると分離

新型MPPCのゲインの評価と温度依存性:結果



1 p.e.ゲインと有効ゲインの温度変化(印加電圧一定)



エラーはフィット由来

1 photon equivalent(p.e.)ゲイン

1つのピクセルが1つのパルス信号を出したときのゲイン

有効ゲイン

1つのピクセルが反応したときの実効的なゲイン
(クロストーク・アフターパルスを含む)

【結果と考察】

✓ 1 p.e.ゲインは温度上昇に伴って小さくなる

➤ 結晶の格子振動が激しくなり、
キャリアの運動が妨げられるため。

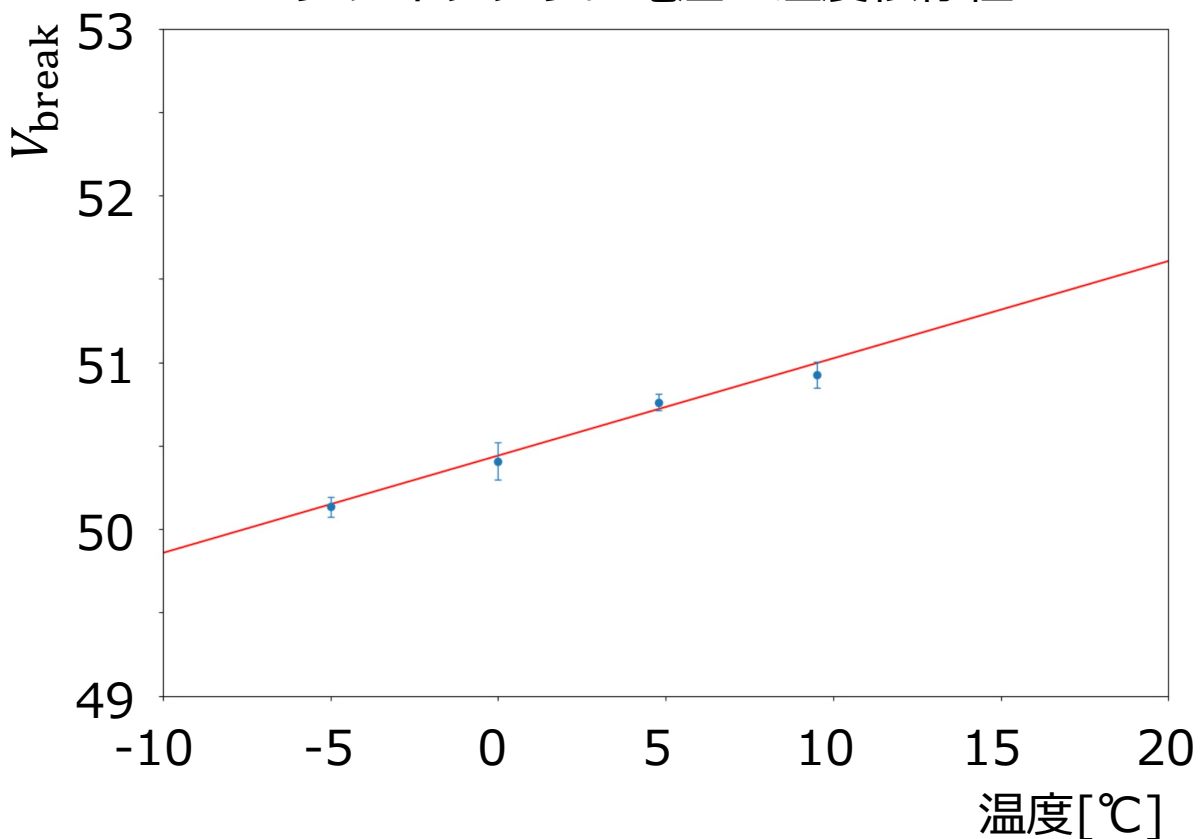
✓ 有効ゲインは1 p.e.ゲインよりも温度依存性が小さい

➤ クロストーク・アフターパルス確率が上昇し、1 p.e.ゲインの減少がキャンセルされるため。

新型MPPCの運用



ブレイクダウン電圧の温度依存性



MPPCのゲインは $V_{\text{bias}} - V_{\text{break}}$ が一定であれば一定
 $Q_{1 \text{ p.e.}} = C(V_{\text{bias}} - V_{\text{break}})$

- 実際の運用では、恒温槽で各温度での V_{break} から室温でのゲインを外挿して求める予定
 - **検出容器内での冷却は行わない**
- 運用上はMPPCゲインは、約10 %以内の精度で統一できればよい
 - 解析時にはキセノン K_{α} 線(30 keV)による補正も行われる

- ダークパルスレートが抑制された改良型MPPCが3月に納入される予定
 - **MPPCを冷却する必要がない可能性**

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

大光量下のMPPC非線形性

一般的なMPPC非線形性

1. MPPCのpixelが信号を出力
 2. pixelの充電され始める
 3. この間に光子が入ってくると実際の検出
光子数よりも出力電流が小さくなる
- 大光量下で**非線形性**を生じる

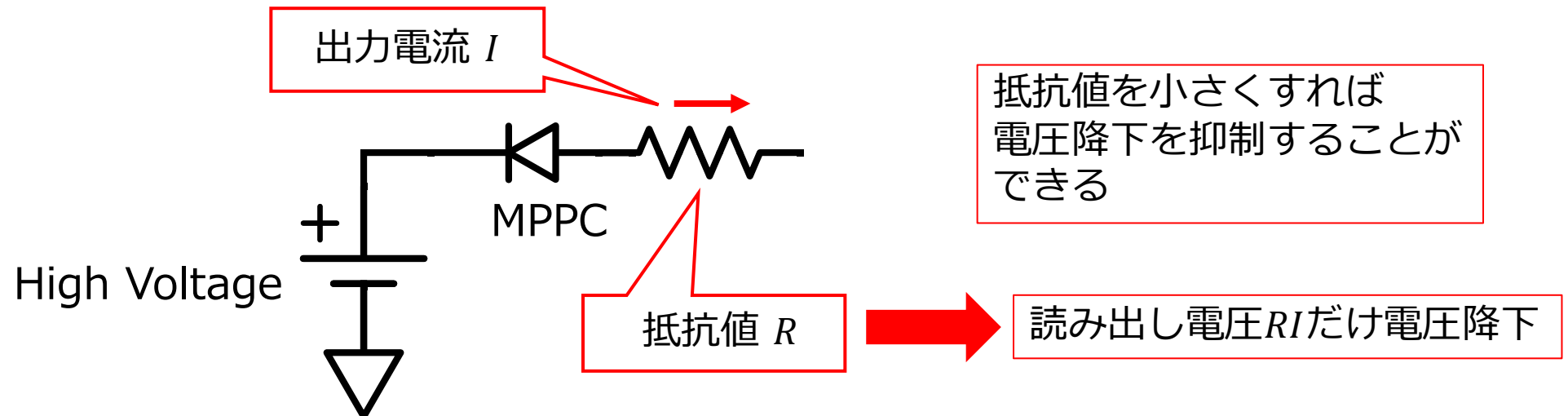
大光量下のMPPC非線形性

一般的なMPPC非線形性

1. MPPCのpixelが信号を出力
 2. pixelの充電され始める
 3. この間に光子が入ってくると実際の検出光子数よりも出力電流が小さくなる
- 大光量下で**非線形性**を生じる

本研究で扱うMPPC非線形性

1. MPPCが信号を出力
 2. 読み出し電圧の分だけMPPCの実効印加電圧が減少
 3. MPPCの実効的なゲインが下がる
- 大光量下で**非線形性**を生じる

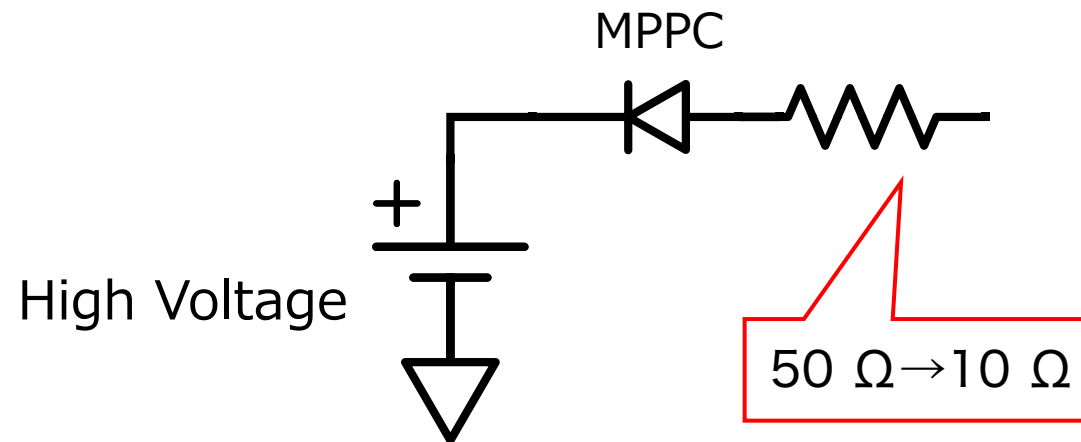


大光量下のMPPC非線形性抑制対策

先行研究では読み出し抵抗値を十分に小さくすることで**非線形性**を抑制できることが示された[2]。

この結果は次期読み出し回路に反映

- MPPC直後の抵抗値を**50 Ω**→**10 Ω**へ



[2] 疋田純也. 修士論文

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた高圧XeガスTPC AXELの電離信号読み出し面の改良

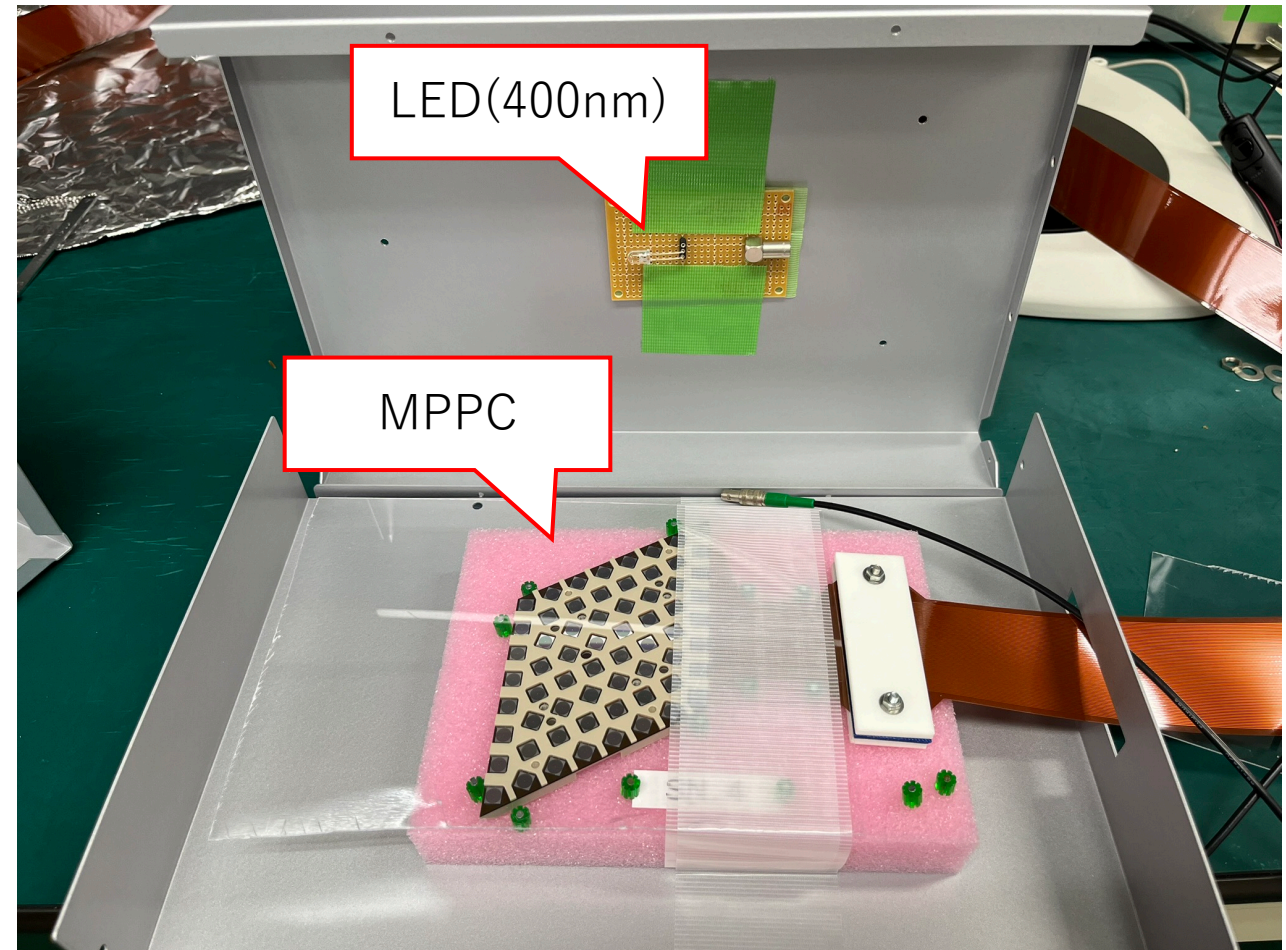
大光量照射実験

【目的】

MPPC非線形性対策の検証

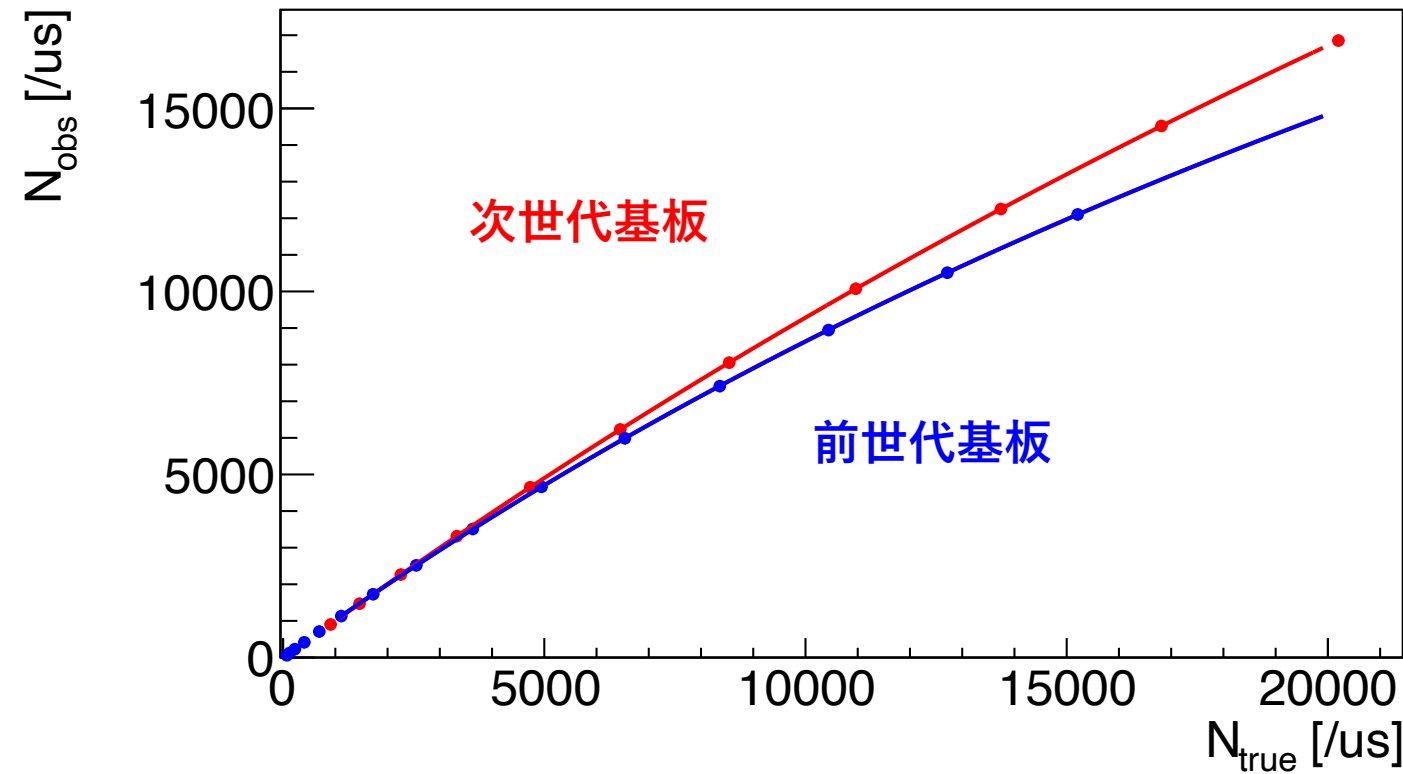
【条件】

- LEDの発光時間：1 us
- LED印加電圧を5.30~6.10 Vの範囲で0.05 V刻みで変化
- 各電圧で10000 event取得



解析と結果

MPPCの非線形性



次世代基板

回復時間 τ [ns]

82.7 ± 1.2

前世代基板

129.3 ± 1.5

【解析】

非線形性は回復時間 τ で評価できる
回復時間：ピクセルが信号を出力してから
充電が完了するまでの時間

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{true}}}{1 + k\tau} = \frac{N_{\text{true}}}{1 + \frac{N_{\text{true}}}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} \tau}$$

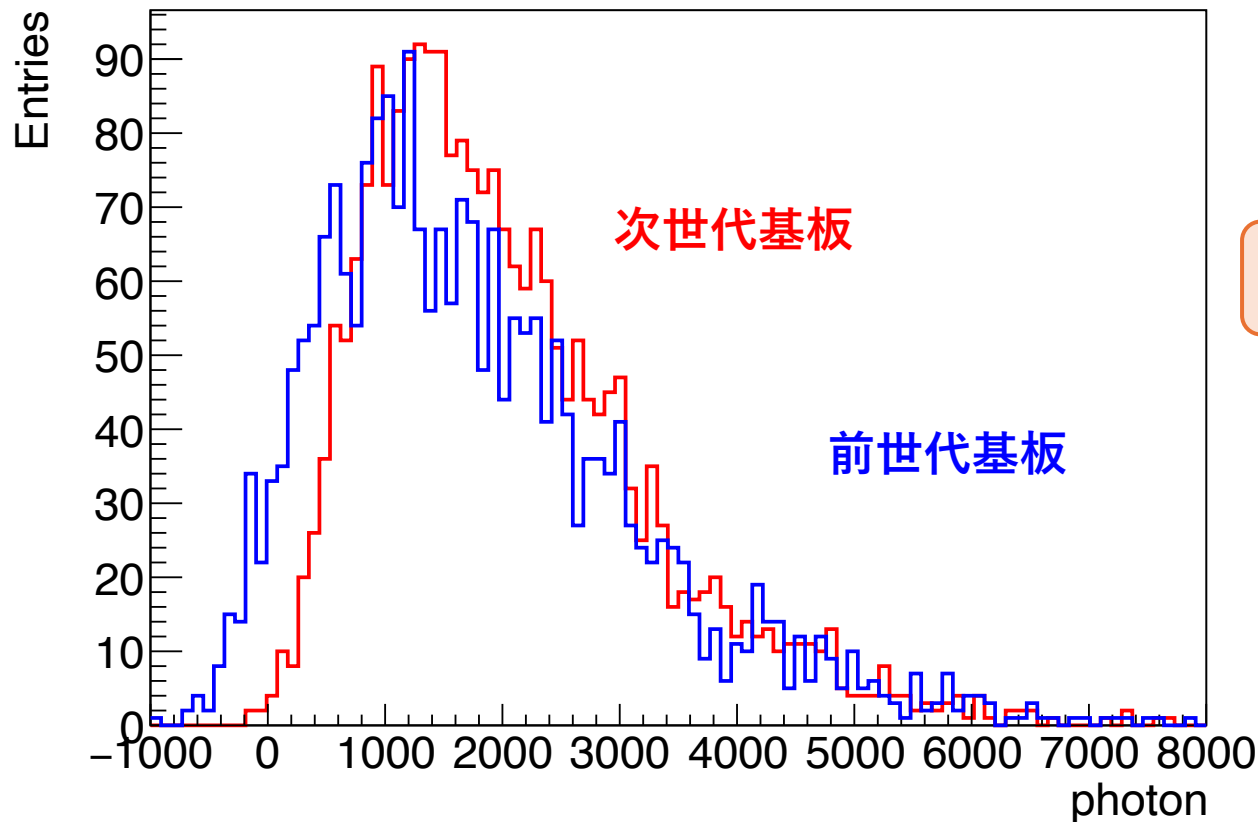
N_{obs} ：観測光子数、 N_{true} ：真の光子数
 k ：単位時間あたりの光量、 τ ：回復時間
 N_{pix} ：MPPCのピクセル数、 Δt ：信号の時間幅

【結果】

- ✓ 次世代基板は**非線形性が小さくなっている**
- ✓ 次世代基板の回復時間は前世代基板と比べて**約40%向上**

非線形性補正への影響

真の光子数と補正した後の光子数の差



光量平均値に対する標準偏差の割合 [%]

| | |
|-------|-------|
| 次世代基板 | 0.088 |
| 前世代基板 | 0.101 |

回復時間の差が非線形性補正後の光子数に与える影響を $0\nu\beta\beta$ のシミュレーションで確認 (by Yuko Watanabe)

修論の結果を更新しています

【結果】

- ✓ 次世代基板の回復時間では前世代基板よりもエネルギー分解能への寄与が $(0.101 - 0.088) \times 2.355 = 0.030\%$ 減少
- ✓ MPPC非線形抑制対策により、エネルギー分解能が向上した

エネルギー分解能への影響



MPPC非線形性補正の不正確さを考慮したエネルギー分解能の内訳(2615 keV)

| | | | |
|---|---------------------|---|-------------------------|
| Fluctuation of the number of initial ionization electrons | 0.25 % | → | 原理的な揺らぎ |
| Mis-reconstruction of z -position | 0.24 % | → | シンチ光検出効率upで~0%に |
| Fluctuation of the EL generation and detection | 0.20 % | → | MPPC受光面の大型化で0.14%に |
| Error in EL gain calibration | 0.18 % | → | 解析の改良で0.02%に |
| Error in time dependence correction | 0.18 % | | |
| Recombination | 0.17 % | → | 目標電場で~0%に |
| Variation in time bin of time variation correction | 0.12 % | | |
| Inaccuracy of MPPC saturation correction | ≤ 0.20 % | → | 新たに追加 補正の影響を減らすことが課題 |
| Offset of the baseline | ≤ 0.11 % | | |
| Error in z dependence correction | ≤ 0.06 % | → | シンチ光検出効率upで~0%に |
| Fluctuation of the attachment | ≤ 0.02 % | | |
| Accuracy of the MPPC recovery time | ≤ 0.03 % | | |
| Position dependence of the EL gain | ~ 0 % | | |
| Waveform filtering into the FEB | ~ 0 % | | |
| Estimation total | 0.56 % to 0.57 % | | |
| Data total | (0.67 ± 0.08) % | | |

1. 研究背景
2. 次期読み出し回路の基本性能の評価
3. 次期読み出し回路のファームウェアの開発
4. 次期読み出し回路を使った新型MPPCの基本性能の評価
5. 次期読み出し回路のMPPC非線形性抑制対策
6. まとめと今後の展望

まとめと今後の展望



次期読み出し回路の基本性能の評価

- ✓ 次期読み出し回路でのデータ取得を実現

ファームウェア開発

- ✓ 次期読み出し回路を動作させるために新規で開発し、データ取得を実現

新型MPPCの基本性能の評価

- ✓ 新型MPPCでダークパルスのデータを取得
- ✓ MPPCを冷却することでダークパルスレートを抑制
- ✓ MPPCのゲイン評価と温度依存性を確認

MPPC非線形性抑制対策

- ✓ 非線形性が抑制され、エネルギー分解能が向上していることを確認

今後の展望

- 多数の読み出し回路によるデータ取得の実現
- 180 L検出器に新型MPPCを導入し、データ取得

Back Up

AXELBOARD



56個のMPPCを読み出す前世代読み出し回路

【特徴】

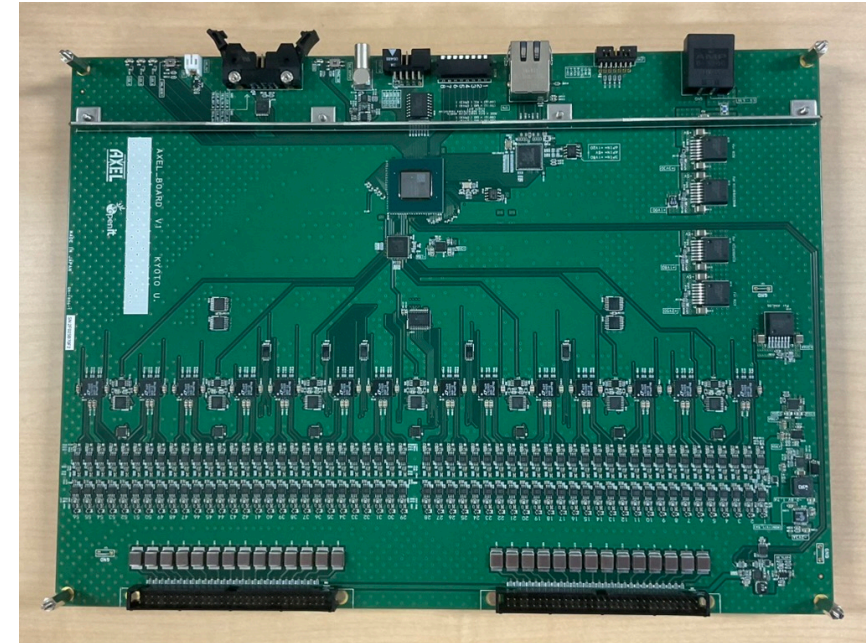
MPPCへの電圧供給

- 56個のMPPCのアノード側に一律に最大65 V印加可能
- 個々のMPPCのカソード側電位を10 mV単位で調整可能

➤ MPPC 増倍率の最適化

増倍率の異なる2種類のデータ取得

1. Low gain(増幅率5倍 ; ADCサンプリングレート 5 MSPS)
 - TPCの大光量EL光の取得
2. High gain(増幅率165倍 ; ADCサンプリングレート 40 MSPS)
 - MPPC 増倍率の調整
 - ダークパルスの監視



【特徴】

DCカップリング

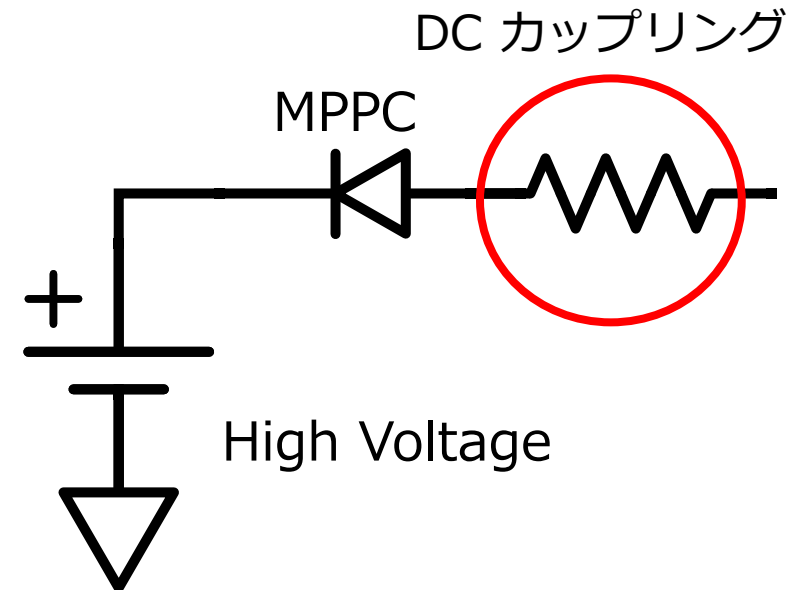
- 信号継続時間が長い信号を電荷量の歪みなく読み出すためDCカップリングを採用
- 高いエネルギー分解能を実現

LVDS通信

- 外部からのトリガー受信、ボード間の連携
- 複数枚のAXELBOARDに同時にトリガーをかける

SiTCPによるTCP/UDP通信

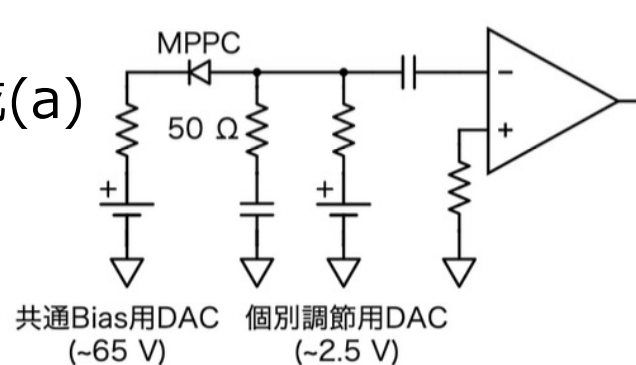
- 波形取得はTCP通信、ボード設定はUDP通信



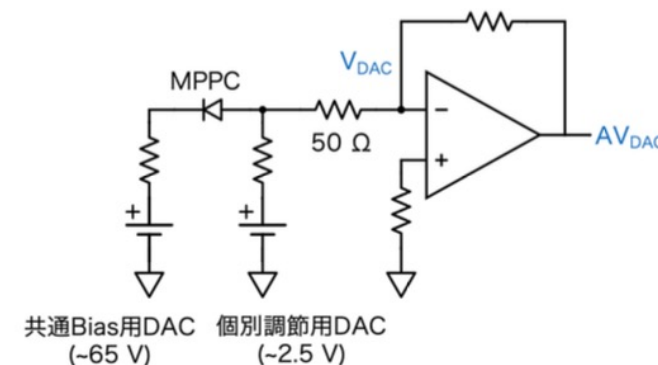
DC カップリングによる読み出し

ACカップリング

- 抵抗とコンデンサでハイパスフィルタを形成(a)
→信号継続時間の長い電荷の積分値が減少
→エネルギー分解能に影響



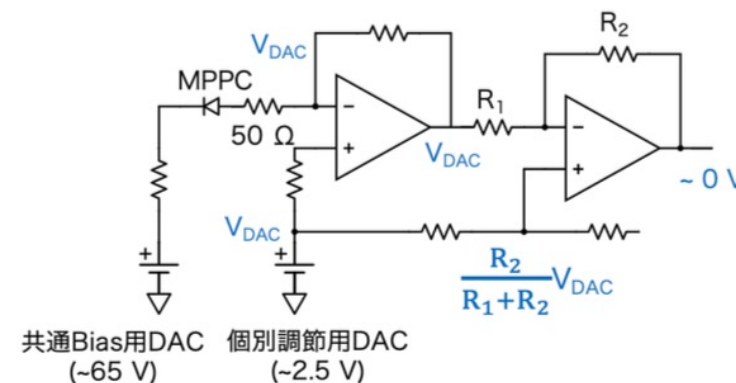
(a) ACカップリング



(b) DCカップリング

DCカップリング

- 個別で電圧を調整しようとするするとオフセットがアンプで増幅される(b)
- バーチアルショートで実行的に電圧を調整、オフセットは反転増幅回路でキャンセル(c)

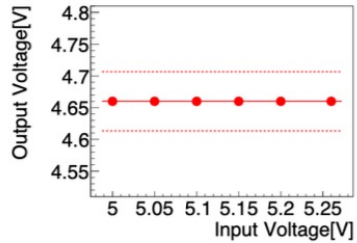


(c) 改良された DC カップリング

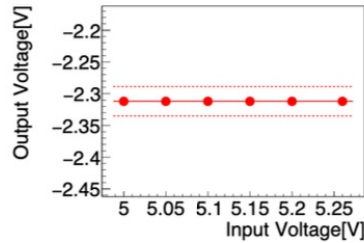
レギュレータ生成電圧と消費電力の評価



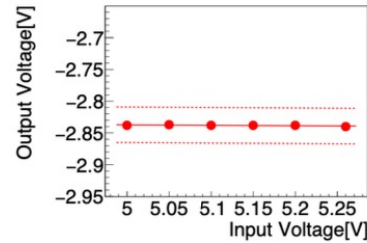
レギュレータで生成される電圧



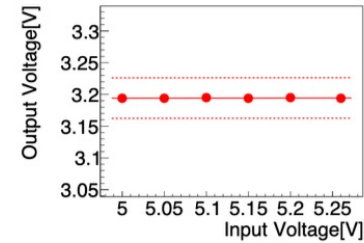
(a) 4V7A



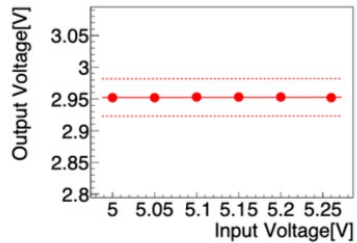
(b) -2V3A



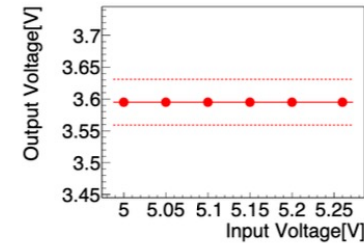
(c) -2V8



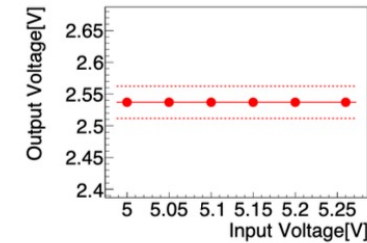
(d) 3V2A



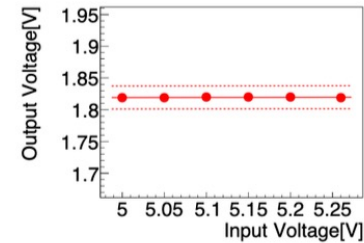
(e) 3V0A



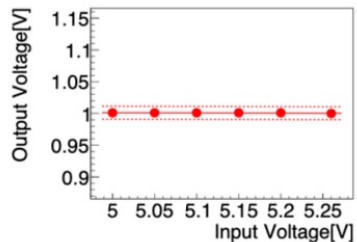
(f) 3V6D



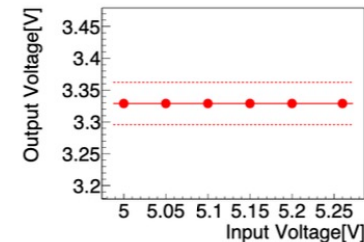
(g) 2V5D



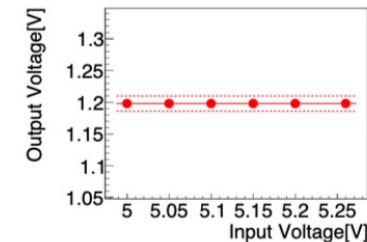
(h) 1V8A



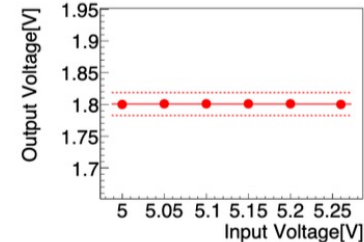
(i) 1V0D



(j) 3V3D



(k) 1V2D



(l) 1V8D

基板上で生成される電圧は
入力電圧を変動させても
設計電圧の**±1%以内**に
収まっている

設計上の消費電力は
14.7~18.6 W
計測ではおよそ15 W

点線は±1%を示す

ファームウェア開発



読み出し回路はFPGAで制御

- **次世代読み出し回路専用のファームウェアの開発が必要**

前世代のものを参考にVivadoでゼロから開発

使用FPGAはXilinx Artix 7

読み出しチャンネル数の増加

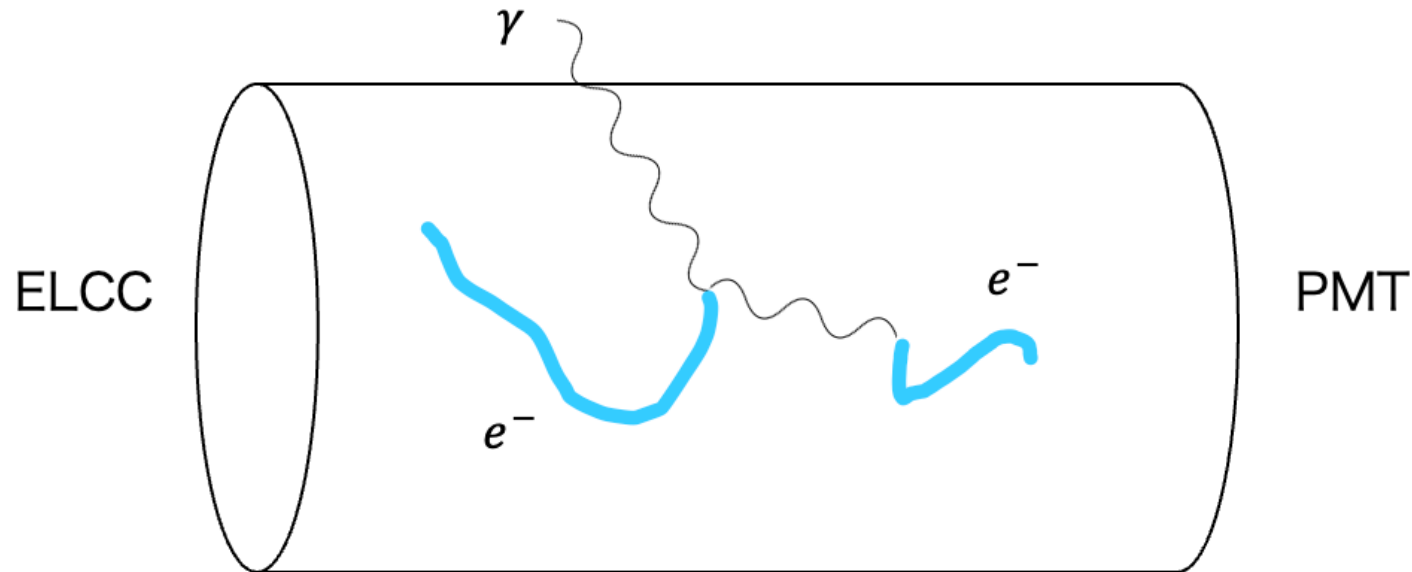
- **Trigger Logicモジュールの改造も要求**

使用FPGAはXilinx Kintex 7



データ取得要件定義

1. $0\nu\beta\beta$ やエネルギーの高い γ 線によるコンプトン散乱など、**光量の大きいEL信号**
→ **Low gain**で取得
 - $0\nu\beta\beta$ のバックグラウンド： ^{208}Tl からの2615 keV γ 線が2548 keV($0\nu\beta\beta$ のQ値)と157 keVに分離
→ z軸方向に飛んでも取得できるようにする
 - 荷電粒子の軌跡がTPC内に収まっているものはエネルギーを正しく再構成できない
→ veto領域に入ったものはデータとして保存しない



$0\nu\beta\beta$ のバックグラウンドのイメージ

データ取得要件定義



2. ELゲインのキャリブレーションに用いる比較的光量が**小さいEL信号**

→ **Low gain**で取得

キャリブレーション用の信号としてキセノンが放出する30 keVの K_{α} 線を使用

- 8気圧中では原子から約3 cm離れた位置に電離電子のクラスターを作る
- クラスターはELCCの1セル程度に収まる

→ キャリブレーション源として利用できる

3. MPPCゲインの監視・調節に用いる**ダークパルス**

→ **High gain**で取得

Low gainのデータ取得を妨げないタイミングで定期的を取得する

新型MPPCのゲインの評価と温度依存性:解析

【目的】

- MPPCゲインの評価
- 温度がMPPCゲイン評価に与える影響の検証

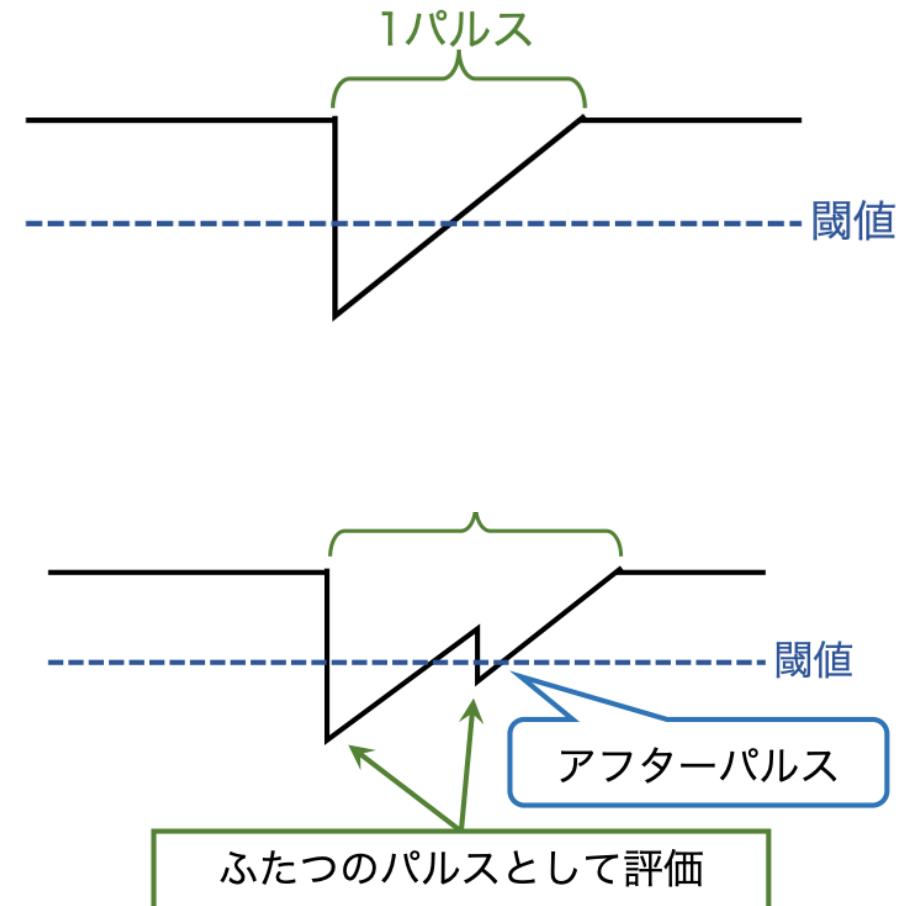
【スレッシュホールド法による解析】

- ✓ パルスが閾値を超えた範囲とその周囲のみを積分

【問題点】

- **アフターパルスを別のパルスとして識別**
- **閾値の値によって取り逃がすアフターパルスの割合が変わる**

スレッシュホールド法による解析



新型MPPCのゲインの評価と温度依存性:解析



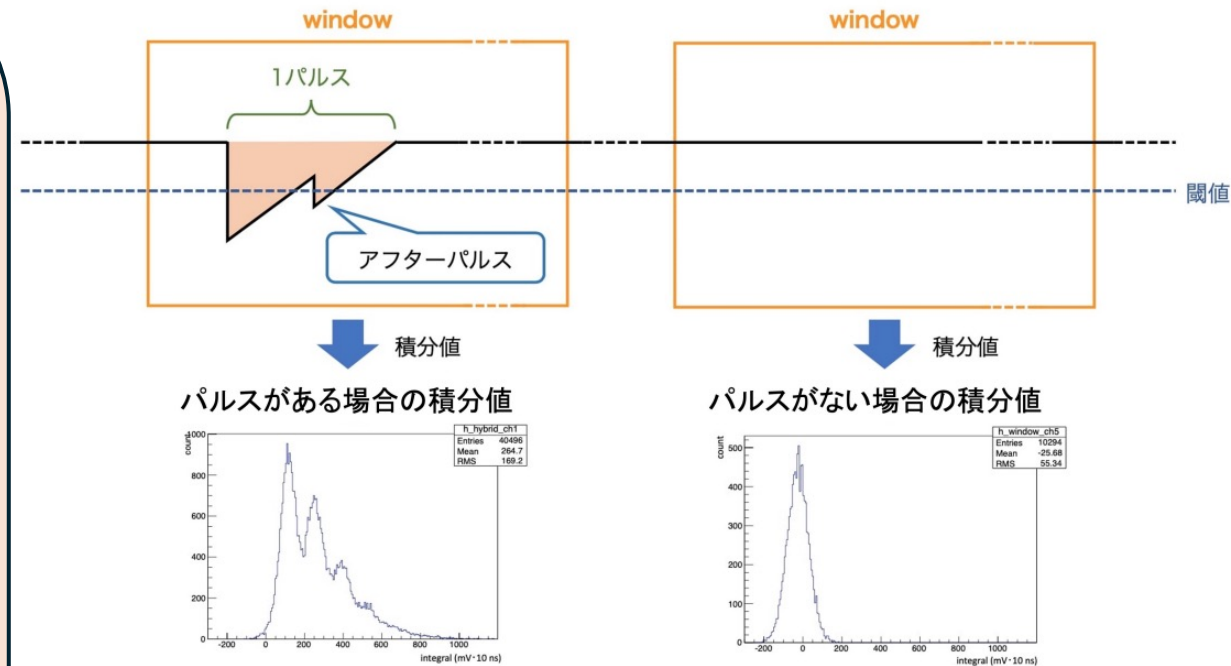
【目的】

- MPPCゲインの評価
- 温度がMPPCゲイン評価に与える影響の検証

【ハイブリッド法による解析】

- ✓ ウィンドウ中で閾値を越えたかでパルスの有無を決定。ウィンドウ全体を積分。
- ✓ パルスの有無で2種類の分布を作る。
- **1 photon equivalent(p.e.)ゲイン**
パルスが存在する分布の最初のピークとパルスが存在しない分布から算出
- **有効ゲイン**
(クロストーク・アフターパルスを含めたゲイン)
全ウィンドウの平均積分値をウィンドウ内の平均パルス数と素電荷で割る

ハイブリッド法による解析



ダークパルスのエネルギー分解能への影響



ダークパルスが増加

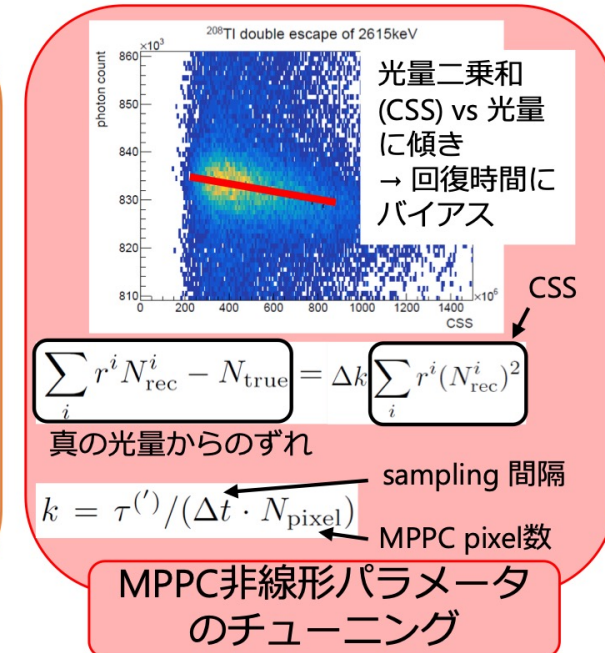
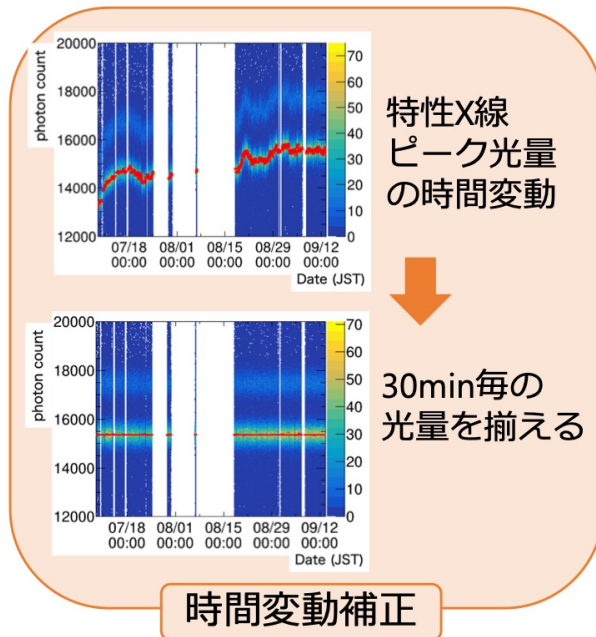
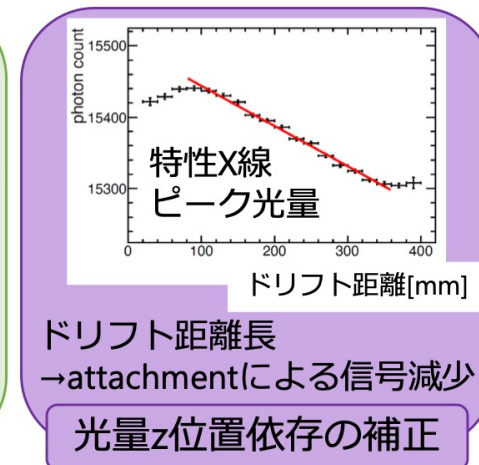
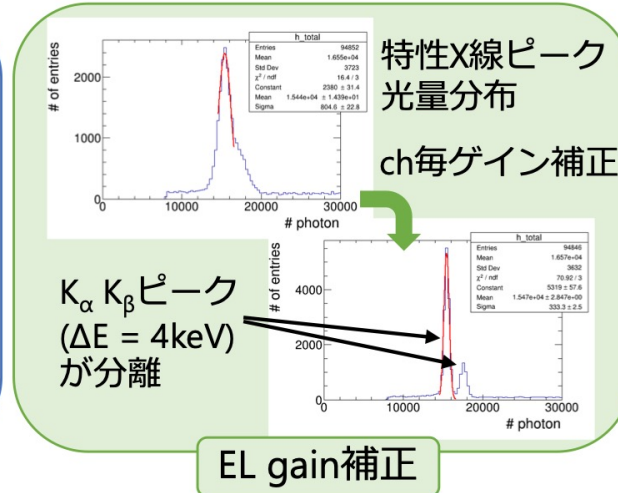
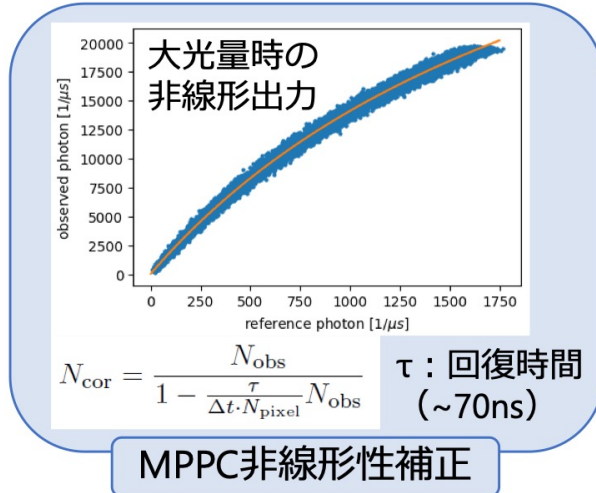
- $0\nu\beta\beta$ 信号がダークパルスによって揺らぐ
- **エネルギー分解能が悪化する可能性**

ダークパルスによるエネルギー分解能への影響は0.008 % (FWHM)

AXEL実験の目標エネルギー分解能は0.5 % (FWHM)

- **ダークパルスによる影響は十分に小さい**

解析の流れ

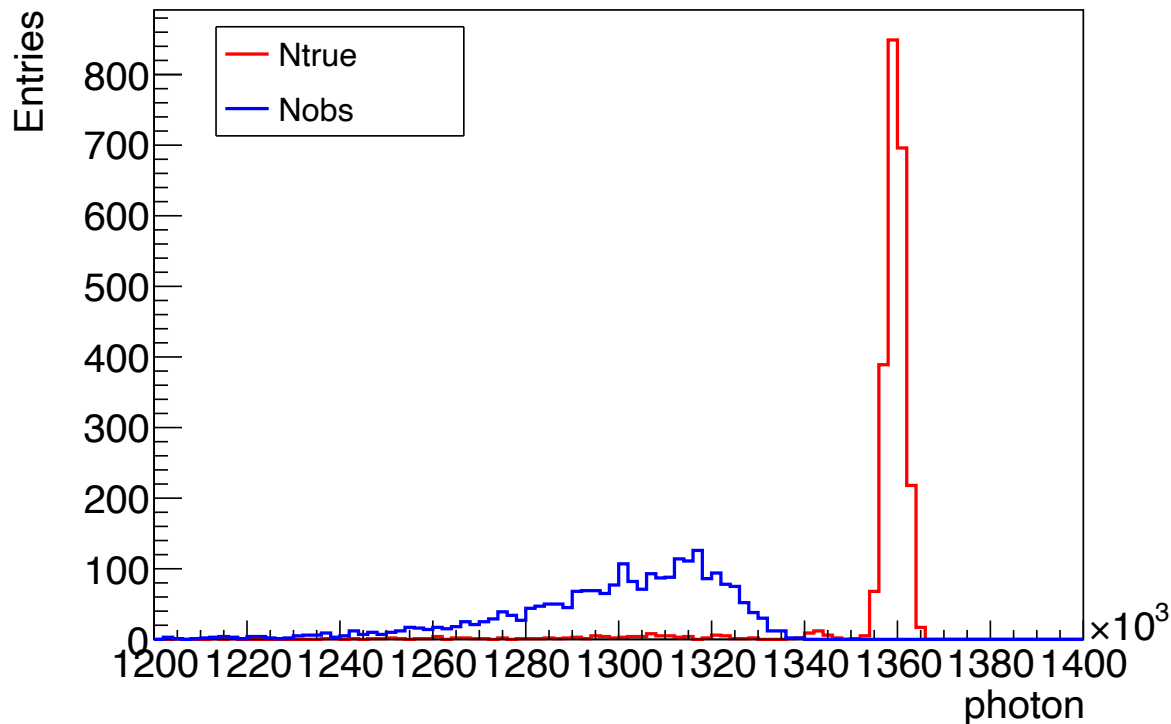


非線形性補正への影響

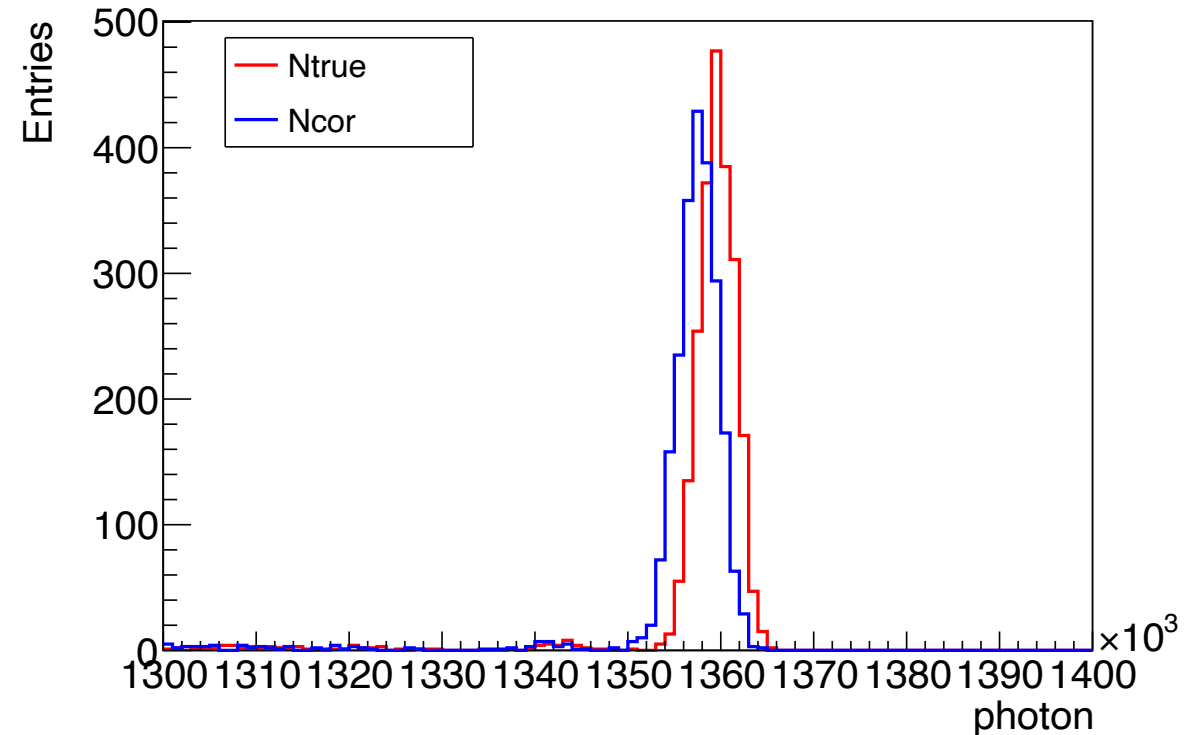


回復時間の差が非線形性補正後の光子数に与える影響を $0\nu\beta\beta$ のシミュレーションで確認

光子数を補正する前



光子数を補正した後

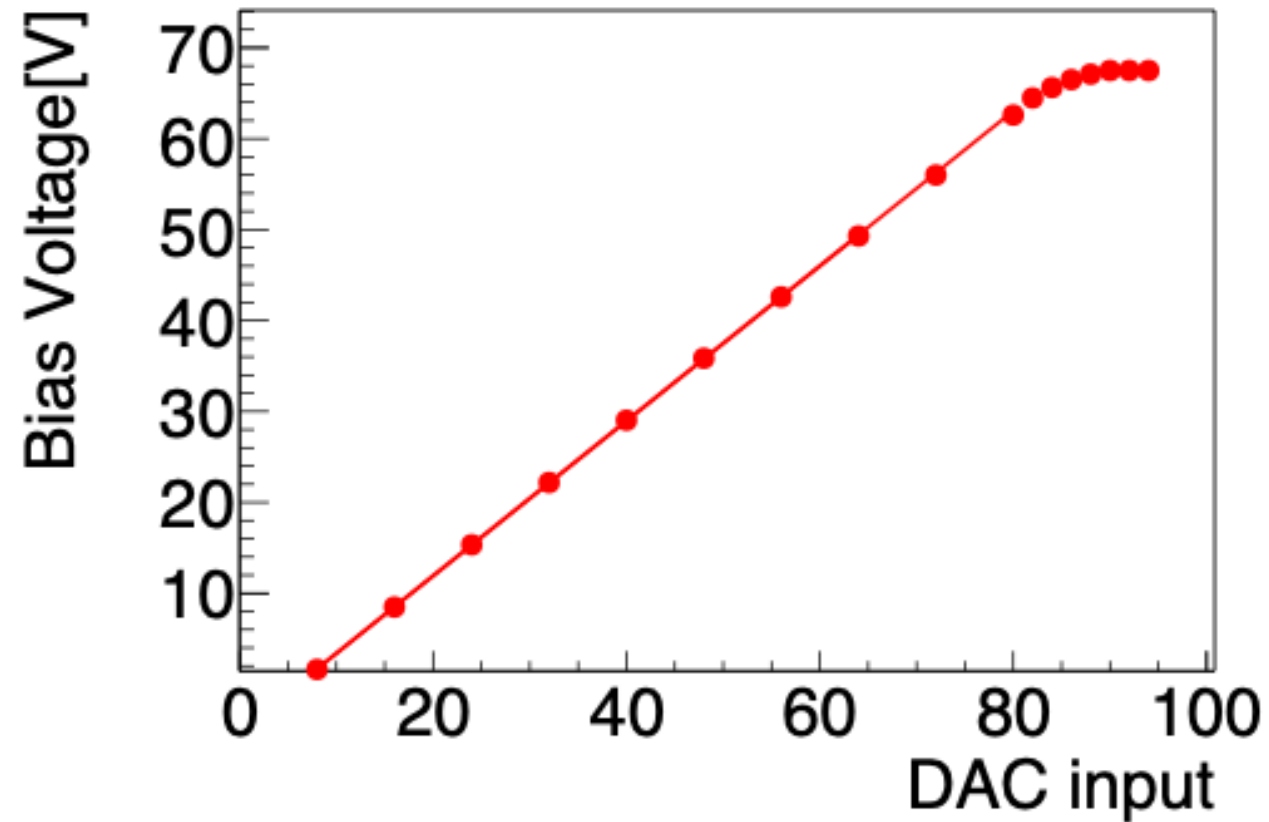


Ntrue : MPPCに入射した真の光子数

Nobs : MPPCで検出した光子数

Ncor : MPPCの非線形性を補正し計算した光子数

DAC生成電圧の評価



MPPCに一律に高電圧を印加する

DAC生成電圧の評価

