

XeガスTPCを用いた

ニュートリノレス二重 β 崩壊探索実験AXELのための
高エネルギー分解能読み出し回路の開発

高エネルギー物理学研究室

田中駿祐

2017/2/2

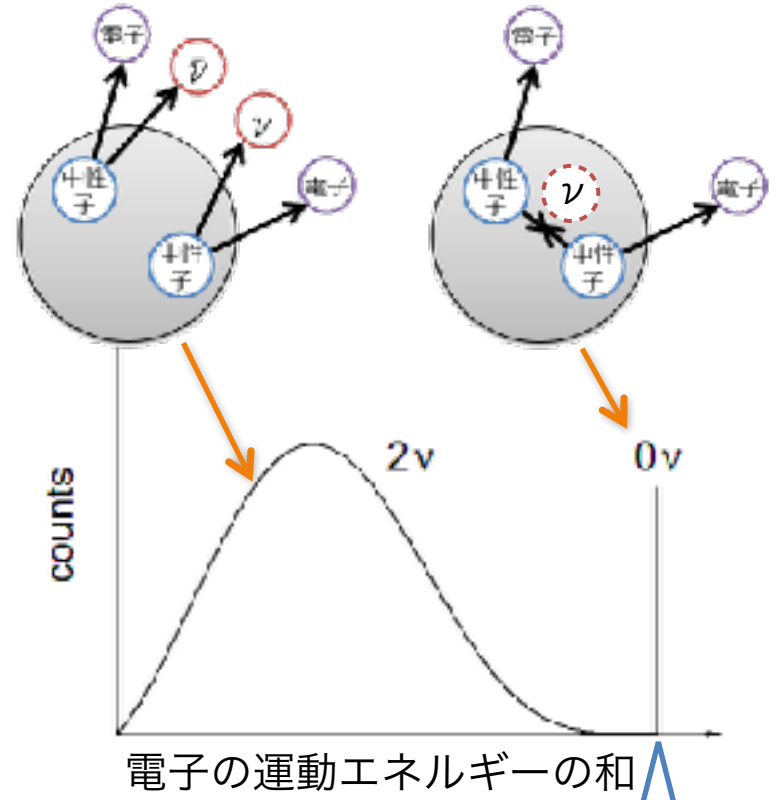
○ 目次

- AXEL検出器
- 読み出し回路への要求・構成
- アナログ部の評価
- まとめと今後の展望

ニュートリノレス二重 β 崩壊



- $0\nu\beta\beta$ 崩壊
- ニュートリノが**マヨラナ粒子**
 $\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$
であれば発生する。
- 非常に**稀な崩壊**
 - 半減期 $> 1.1 \times 10^{26}$ yr
- ニュートリノがマヨラナ粒子なら、
 - ニュートリノの軽い質量
 - 物質優勢宇宙などを説明できる可能性がある。



実際の観測では、

AXEL検出器

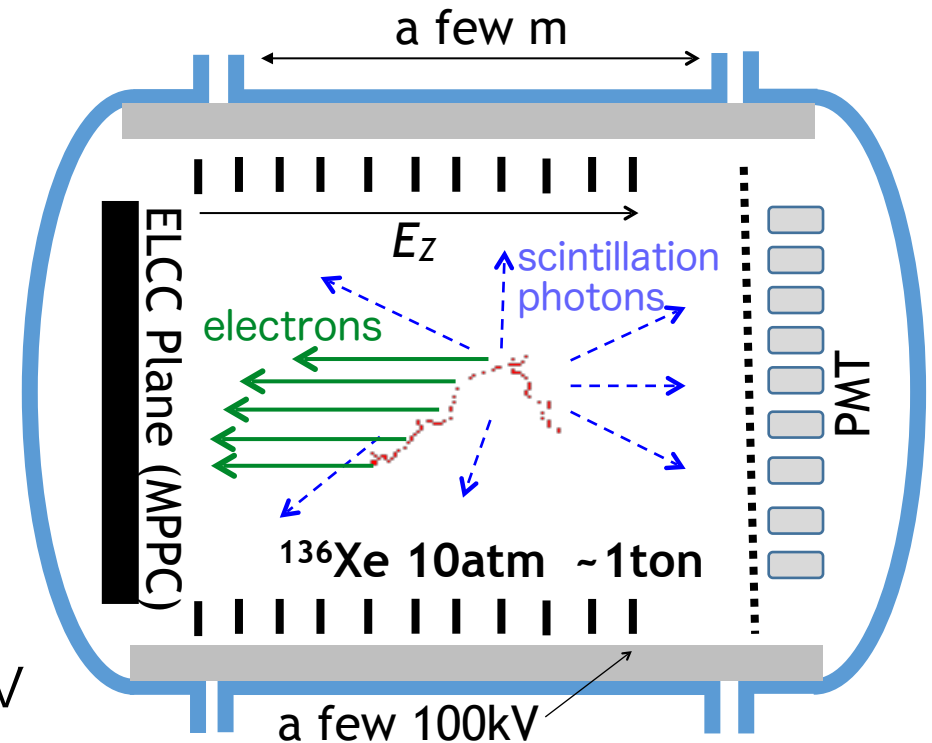
- ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を観測するための
高エネルギー分解能 高圧Xeガス TPC 検出器

目標**0.5%(FWHM)**@2458keV

大質量

飛跡検出(背景事象除去)

- 電離電子を、電場によって
検出面までドリフト
 - **3次元的な飛跡**：
電子が入射する位置・時間
 - **エネルギー**：電子の数
- Xeは発生する電離電子数の
統計揺らぎが非常に小さい
 - **0.24%(FWHM)**@2458keV

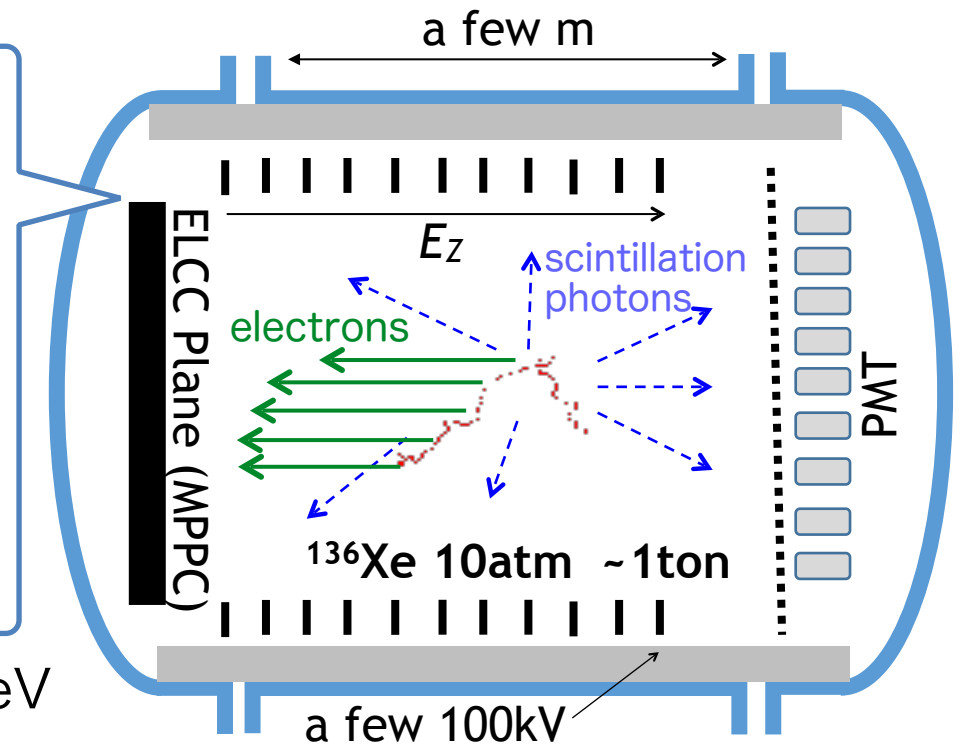


AXEL検出器

- ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を観測するための
高エネルギー分解能 高圧Xeガス TPC 検出器

目標**0.5%(FWHM)**@2458keV **大質量** **飛跡検出(背景事象除去)**

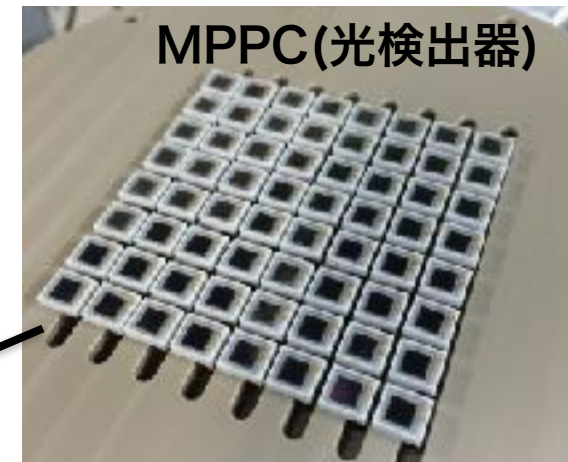
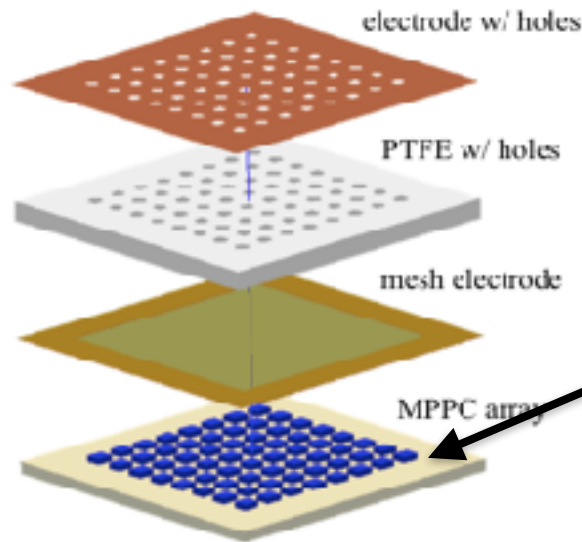
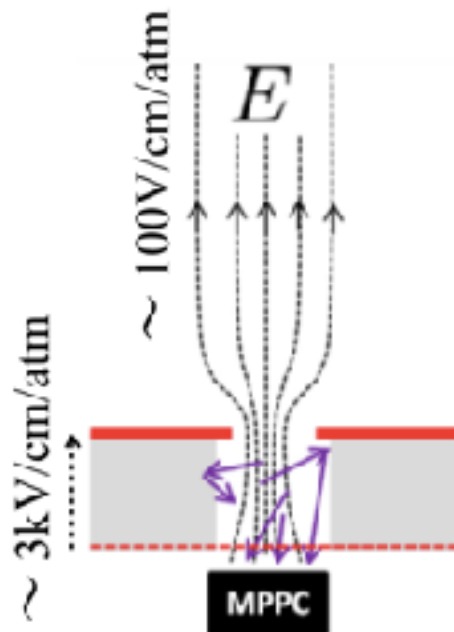
- AXELの最終目標：
エネルギー分解能 **0.5%**
崩壊核質量 **1000kg**
- 他実験の現状：
 - Xe 10%, 800kg
 - Ge 0.2%, 20kg
- **0.24%(FWHM)**@2458keV



電離電子検出器 (ELCC)



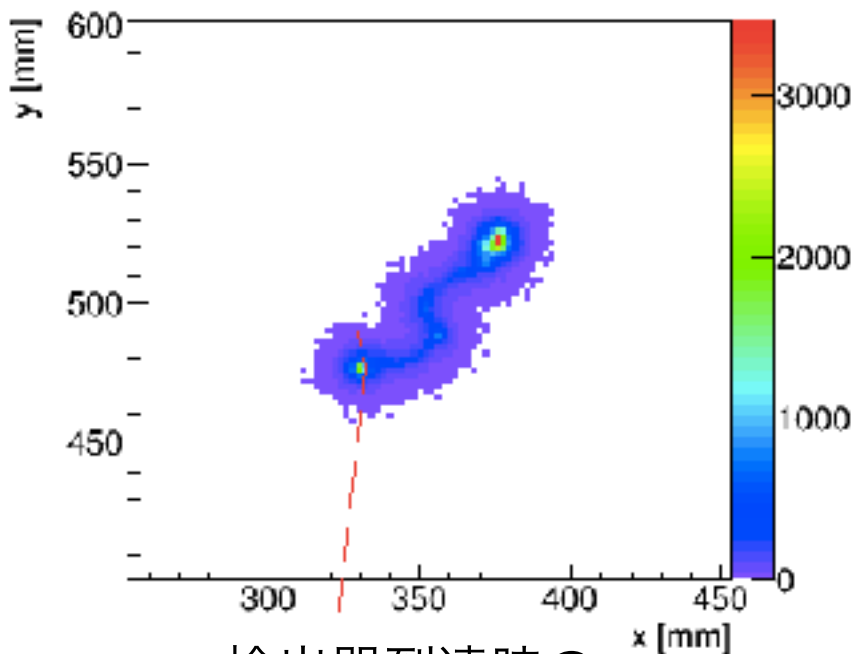
- セル状の検出器に、強い電場をかけて電離電子を収集する
- 脱励起光を用いることで**精度の高い増幅**が可能
- 大型化で検出器数が増大するため**専用の読み出し回路**が必須
 - 現在64ch → 次期検出器1,000ch → 物理探索用50,000ch



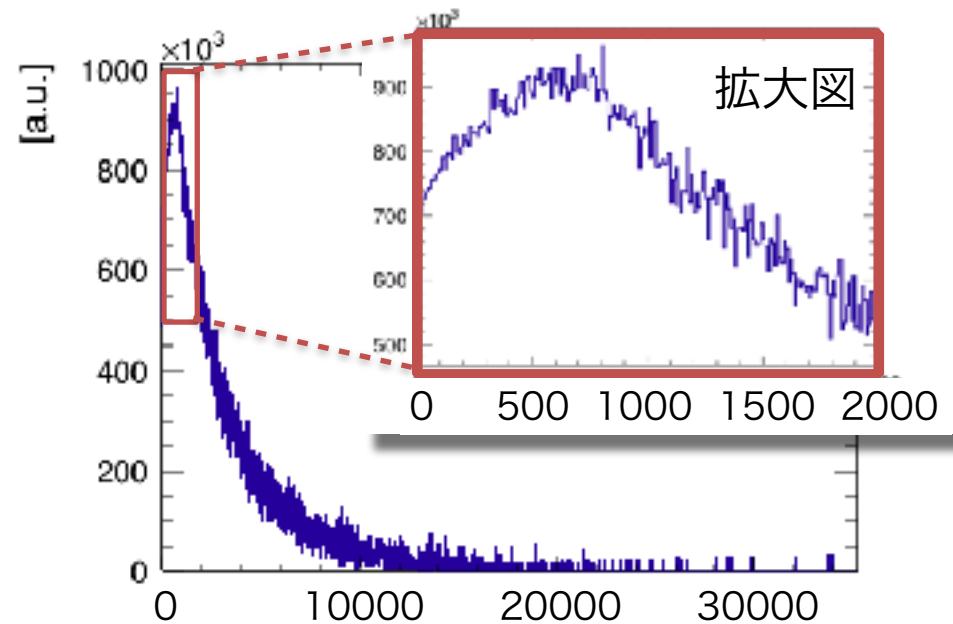
検出器の1セルに入射する電子数

5

- 高速荷電粒子が停止する際に**大きなエネルギー損失**が発生
→ 局所的に多くの電離電子が発生する
- ドリフト中の電子の**拡散が大きい** → 電子数個の入射も多い



検出器到達時の
典型的な電離電子の広がり

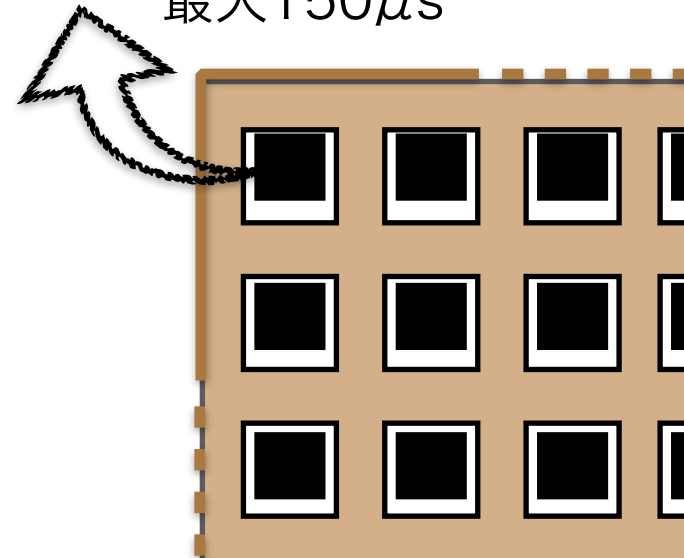
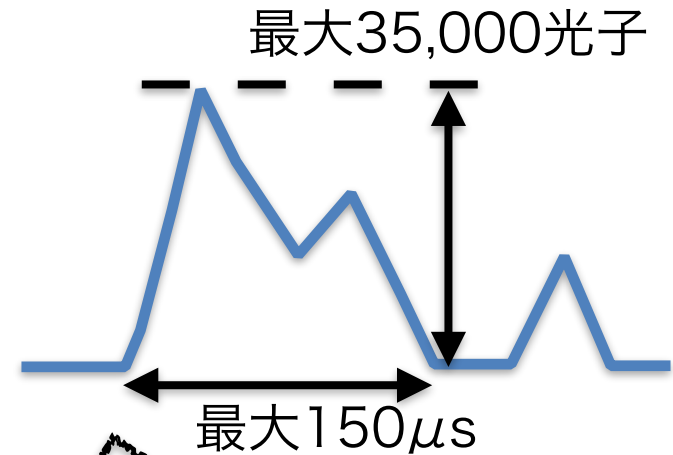


各MPPCに1us間に入射する光子数分布
(光子数で荷重したもの)

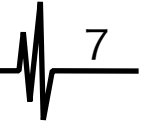
読み出し回路への要求



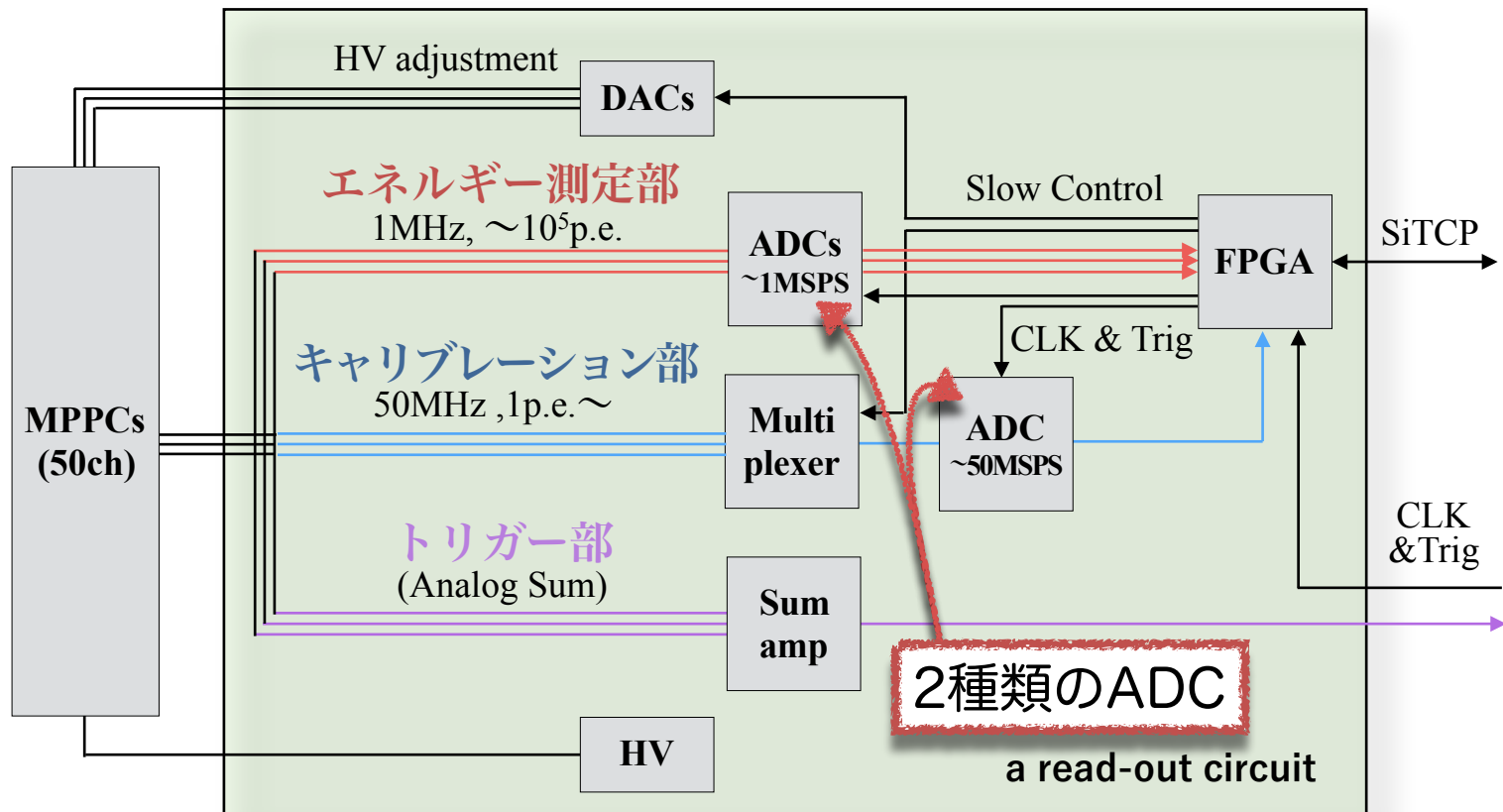
- **20 ~ 35,000個/ μs** の光子数の正確な測定
 - 3桁のダイナミックレンジが必要
- 最大**150 μs** 継続する信号の読み出し
- キャリブレーションのためのMPPCの**1光子波形**(約40ns)の測定
- 50個/boardのMPPCへの**電源供給**および各MPPCへの**個別の微調整**
- **低コスト**



読み出し回路の構成

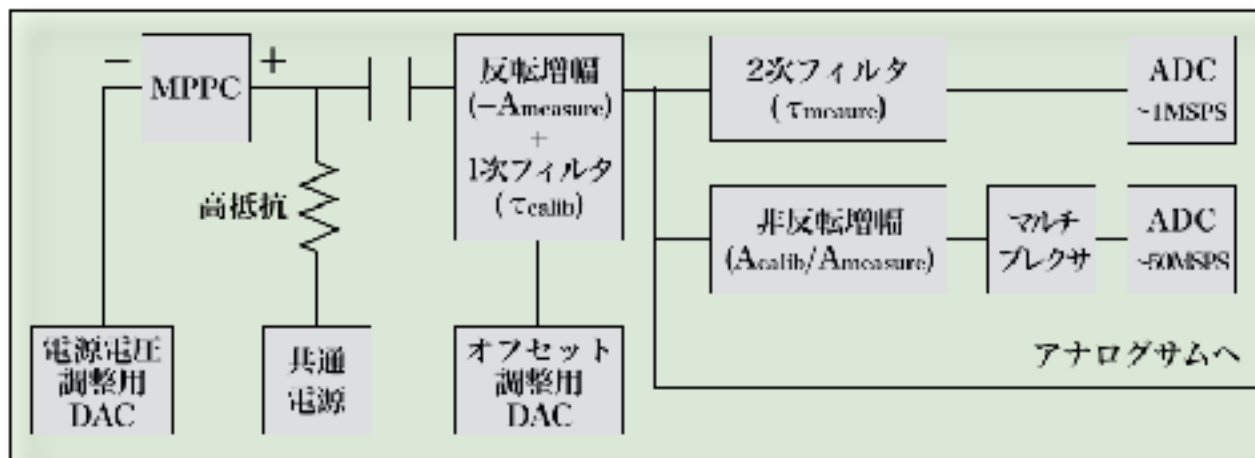


- エネルギー測定用ADC(低速(1MHz), 12bit) : 1個 /ch
- キャリブレーション用ADC(高速(50MHz),12bit) : 1個 /8ch



アナログ部の評価

- MPPCからの信号をADCに最適な波形に整形する
 - **高エネルギー分解能**を達成するために最も大切な部分
- 2種類の方法で評価
 - シミュレーションから求めた $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号を用いて **回路シミュレータ**で過渡応答を調べる
 - **試作機**を作製し、矩形波の入力やMPPCの測定を行うことで、回路の性能を評価した



エネルギー測定部

キャリブレーション部

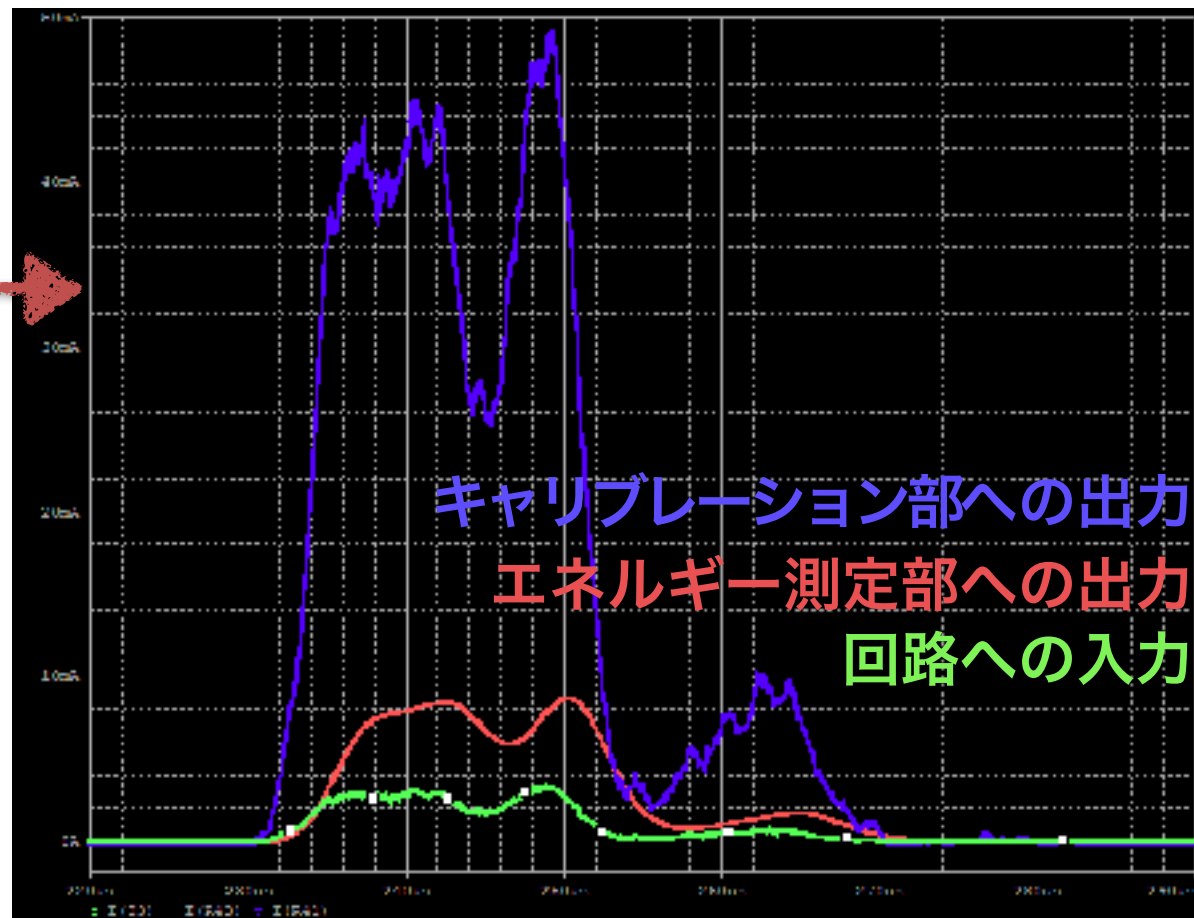
シミュレーションの概要

9

- Geant4とGarfield++を用いて $0\nu\beta\beta$ 崩壊をシミュレート
 - MPPCの出力波形(回路への入力波形)を算出

- **PSPICE**を用いて回路の過渡応答をシミュレート
 - 典型的な波形

- 波形を1usごとにサンプリングし、12bitでデジタル化(エネルギー測定部)



シミュレーションで用いた回路図



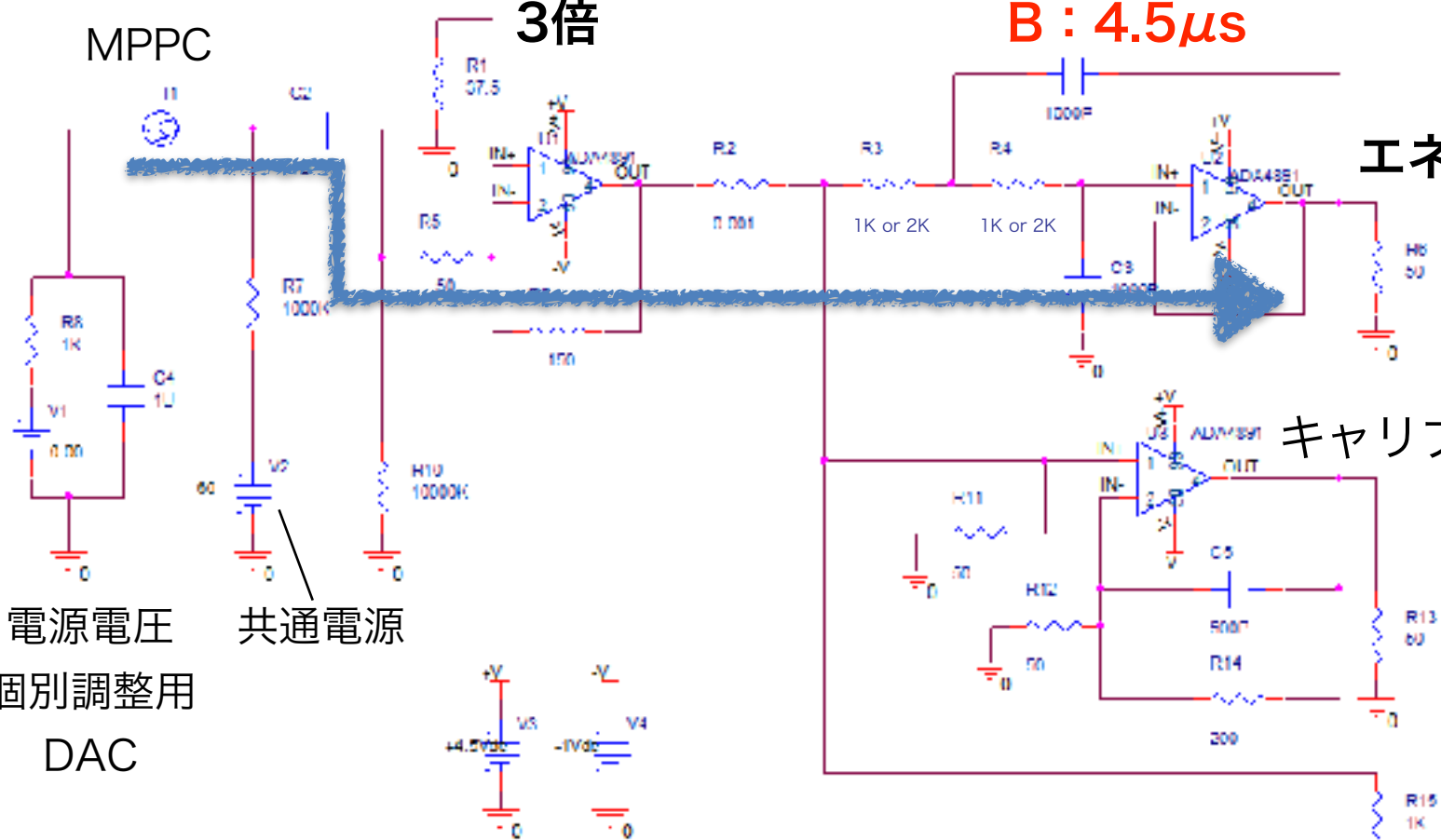
反転増幅
(電流電圧変換)
3倍

フィルタ
A : 2.3 μ s
B : 4.5 μ s

エネルギー測定部

キャリブレーション部

MPPC



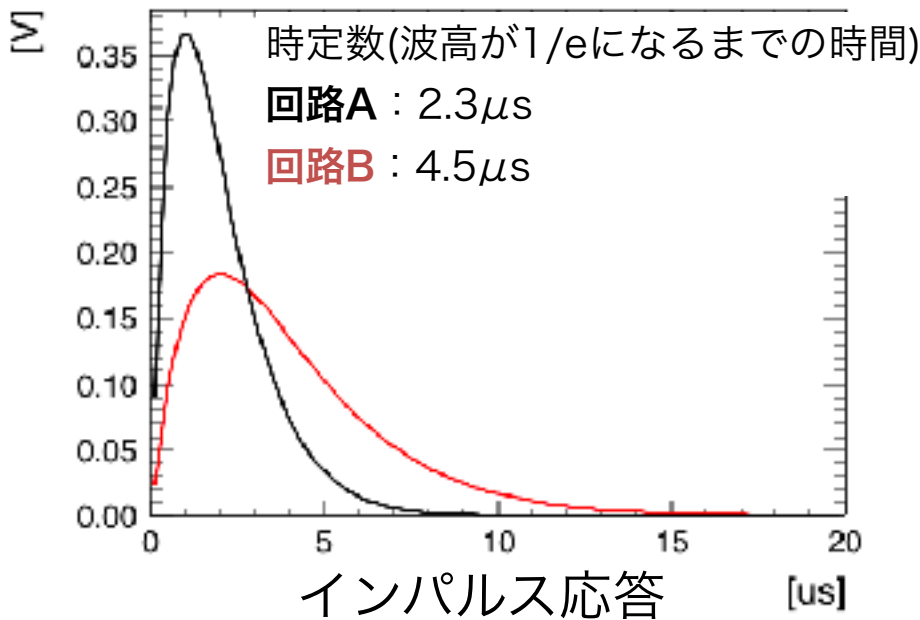
電源電圧
個別調整用
DAC

共通電源

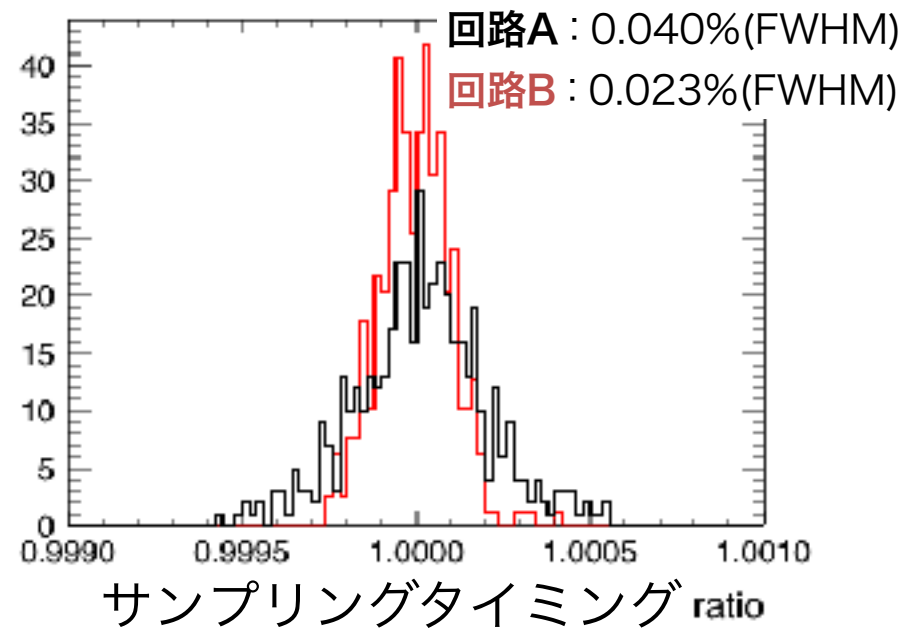
シミュレーション結果 ①



- **回路B** は 回路Aと比べて
 - 時定数が長い = 波形をより鈍らせている
 - サンプルングタイミングの変化の**影響が少ない**



(デルタ関数状パルスに対する応答)

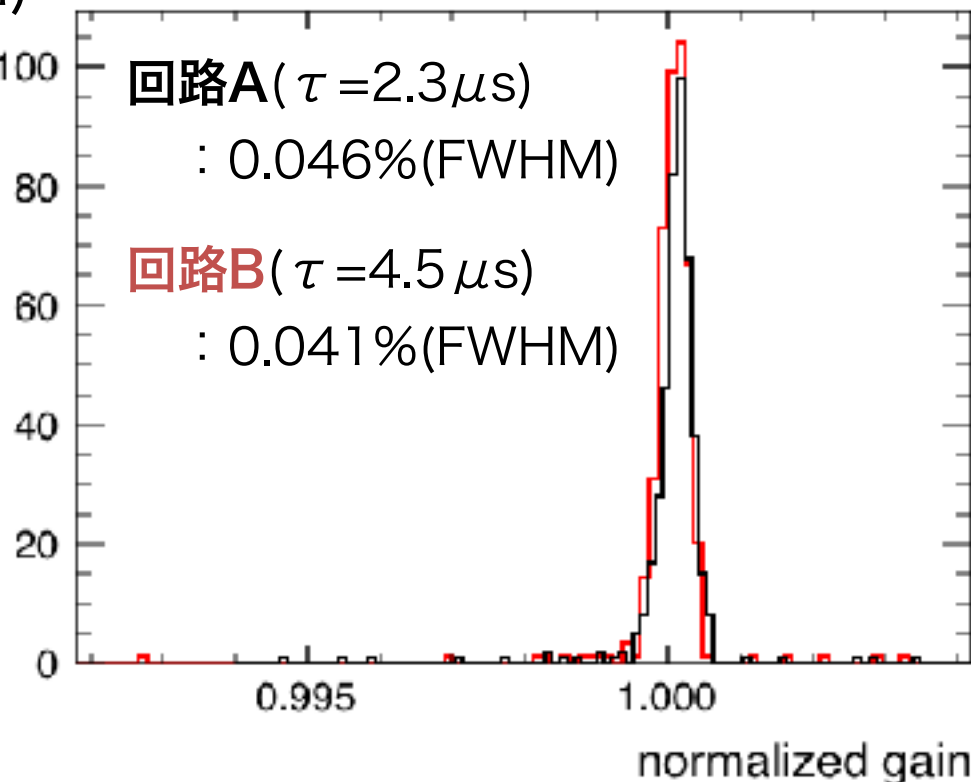


を変えた際の実出力電荷の比

シミュレーション結果 ②



- $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号に対する出力の積分値(全MPPCの和)のゆらぎ
 - 回路A : **0.046%**(FWHM)
 - 回路B : **0.041%**(FWHM)
- 電離電子数のゆらぎ0.24% (FWHM)を十分に下回る
- 回路Aの方が多少分解能が悪いものの、時定数が短く飛跡検出に有利である
 - **回路Aを採用する**
- 分解能をリミットしている原因は、**サンプリングタイミングによる誤差**



$0\nu\beta\beta$ 崩壊信号に対する積分値のゆらぎ

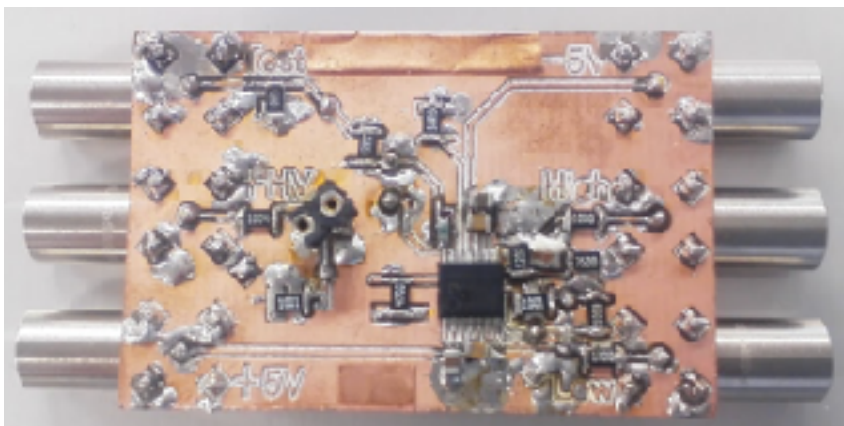
試作機による評価

- エネルギー測定部

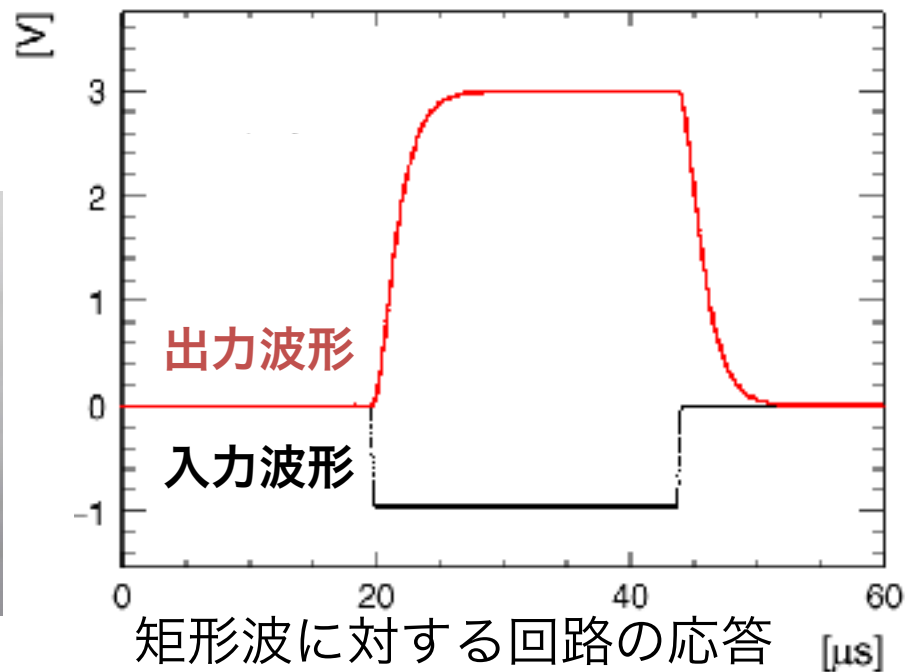
- ファンクションジェネレータで矩形波を生成し、回路の入力波形と出力波形を取得
- 入力と出力の積分値を用いて線形性を評価した

- キャリブレーション部

- MPPCの特性の決定精度を評価



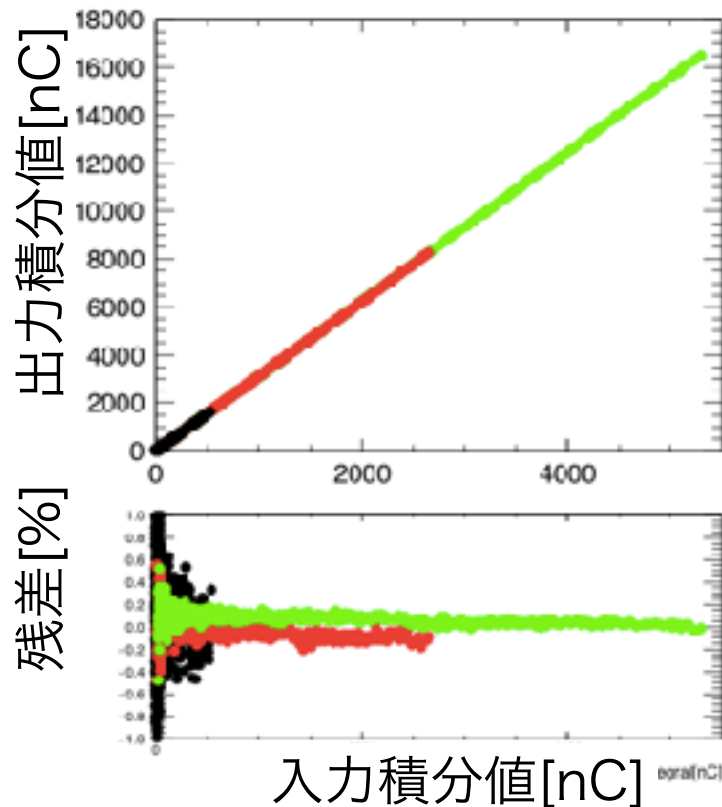
作成した試作機



エネルギー測定部の評価



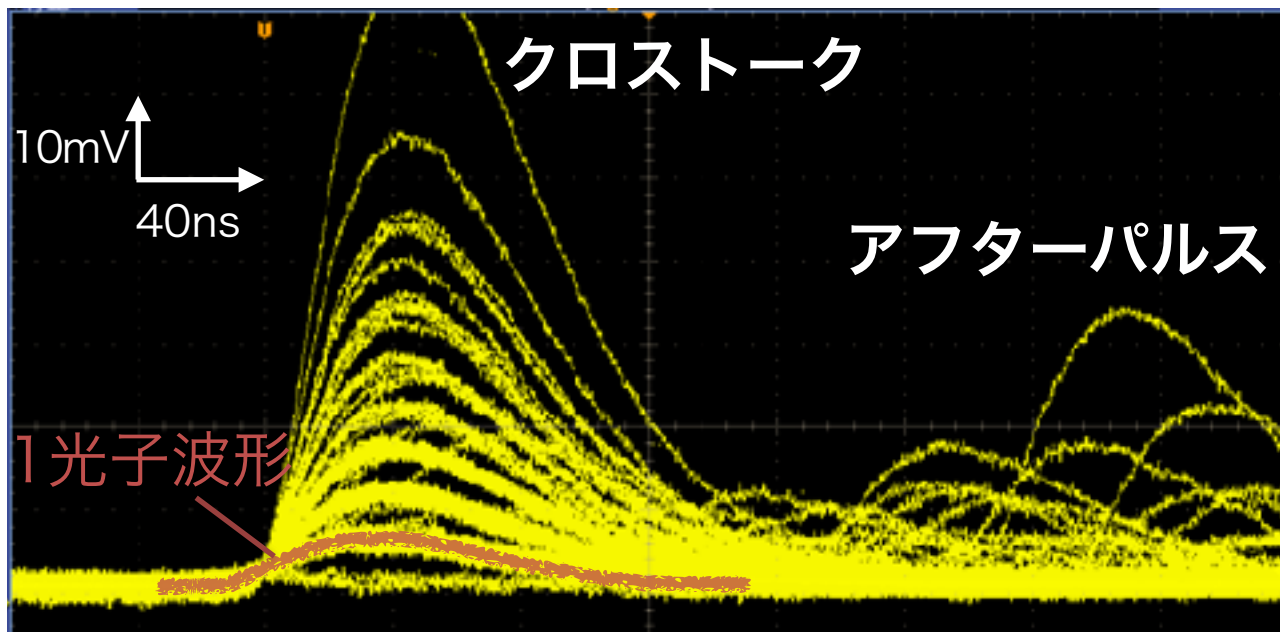
- パルス時間幅を変えながら、矩形波を入力した際の非線形性
 - 色の違いは入力電圧の違い
- パルス幅や電圧に比例した電荷が出力されるべきだが、**わずかに非線形性**が見られる
- 今回測定した範囲では、非線形性の最大値は
 - 電圧：**0.12%**
 - パルス幅：**0.03%**



キャリブレーション部の評価

15

- MPPCの通常の増倍率ではクロストークやアフターパルスの影響により、光子数を正確に測定できない
- これらの影響を含んだ**有効増倍率**の測定を行った
- MPPCの信号をキャリブレーション部を通じて読み出し、有効増倍率を**1%以下**の精度で測定できた



考察



○シミュレーション

➔ $0\nu\beta\beta$ に対するエネルギー分解能：**0.046%** (FWHM)

○試作機

- 電圧変化に対する非線形性：**0.12%** (max)

- パルス幅の変化に対する非線形性：**0.03%** (max)

- MPPCの有効増倍率の決定精度：**1%** (max)

- $0\nu\beta\beta$ 崩壊では平均40個程度のMPPCが反応するため
分解能への影響は $1/\sqrt{40} = \mathbf{0.16\%}$ (max)程度

➔ 試作機の非線形性：**<0.14%** (FWHM)

• これらを合わせた分解能は **<0.15%** (FWHM)

- 電離電子数ゆらぎ0.24%(FWHM)を下回る

まとめと今後の展望



- 高圧XeガスTPCを用いた $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験 AXEL
 - **高エネルギー分解能**・飛跡検出
 - 多数のMPPCを、高エネルギー分解能 かつ 低コストで読み出すための専用の回路を開発中
- アナログ部のエネルギー分解能として以下を得た。
 - シミュレーション：**0.046%** (FWHM)
 - 試作機：**<0.14%** (FWHM)
- 仕様変更に伴う回路の改良とデジタル部の回路図製作を行い、来年度頭には生産を開始したい