

高圧XeガスTPC (AXEL)のための 多チャンネル読み出し回路の開発



京都大学

高エネルギー物理学研究室

田中駿祐

2017/2/20

目次

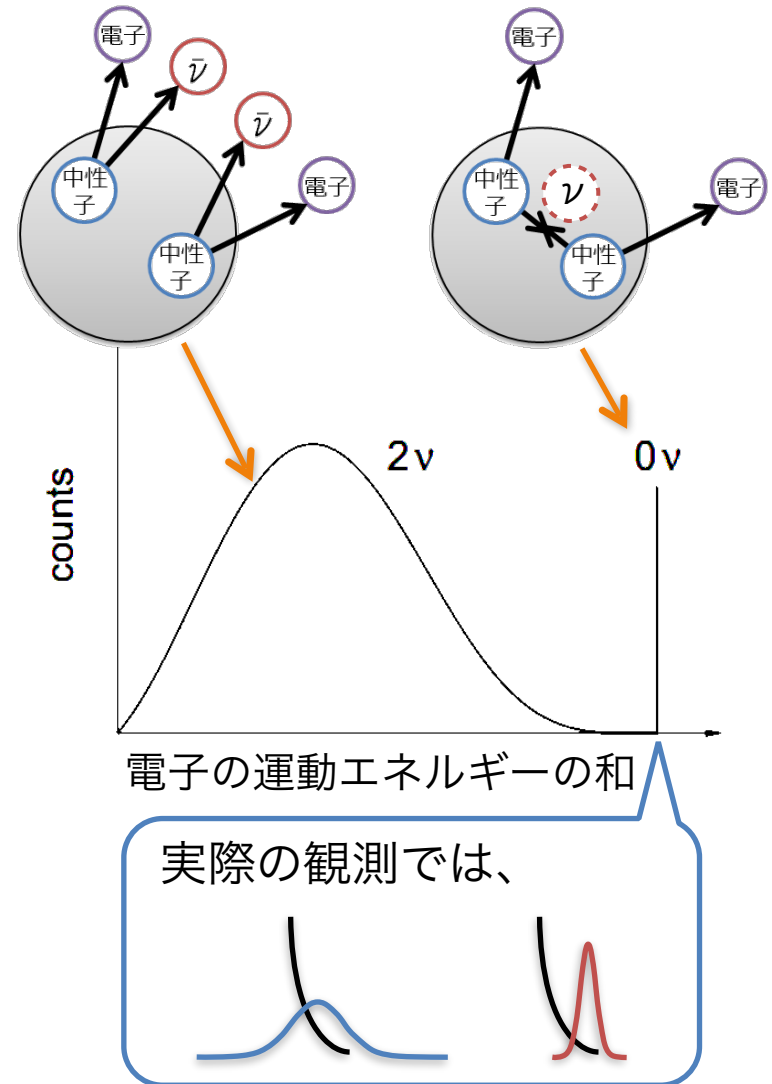


- AXEL検出器
- 読み出し回路への要求・構成
- アナログ部の評価
- まとめと今後の展望

ニュートリノレス二重 β 崩壊

3

- $0\nu\beta\beta$ 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。



AXEL検出器

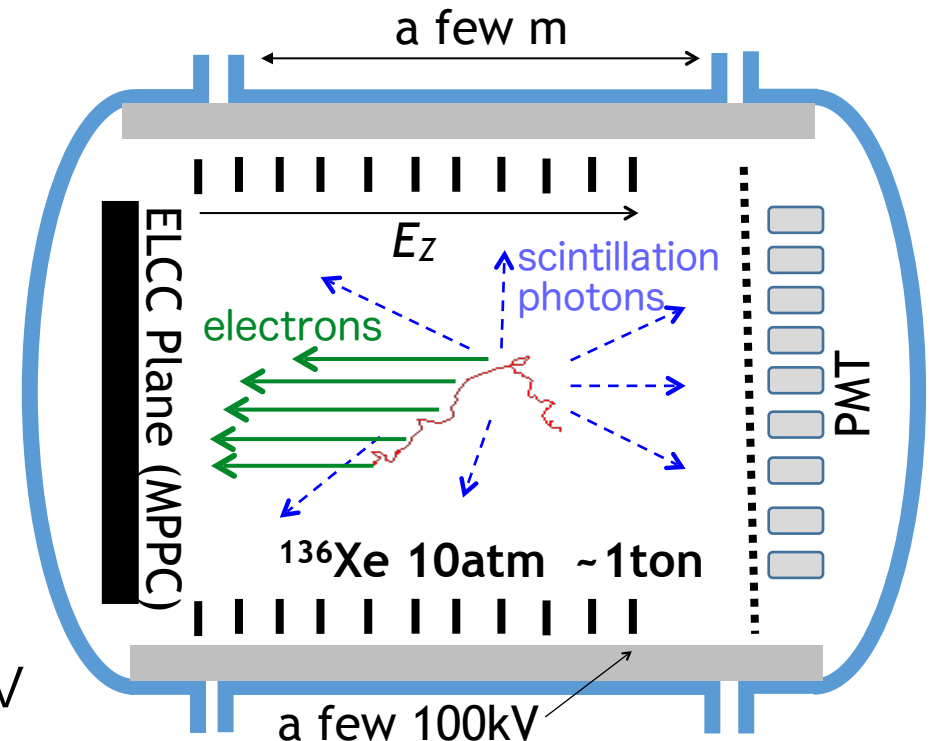
- ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を観測するための
高エネルギー分解能 高圧Xeガス TPC 検出器

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

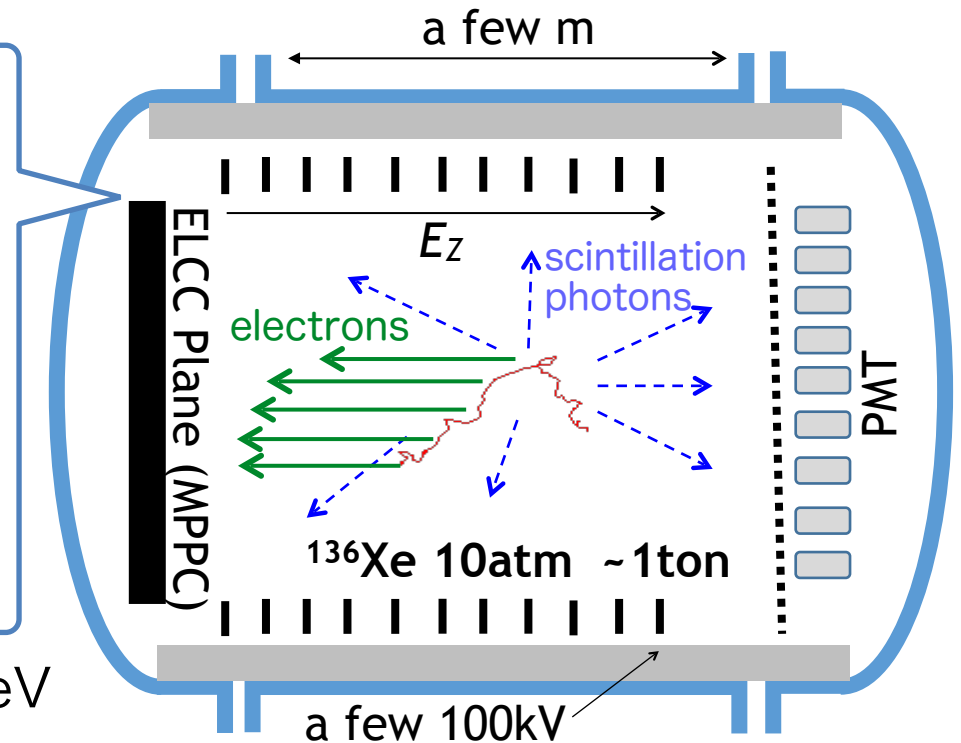


AXEL検出器

- ^{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

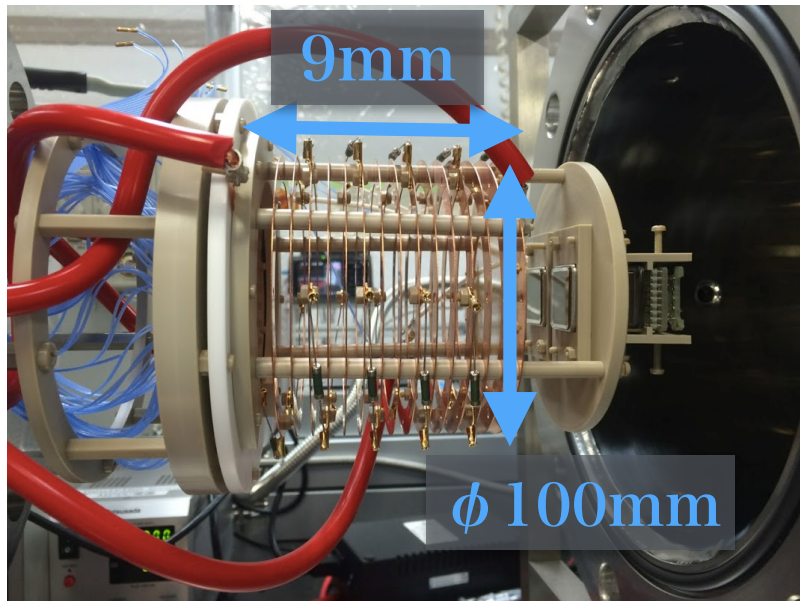
目標**0.5%(FWHM)**@2458keV **大質量** **飛跡検出(背景事象除去)**

- 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

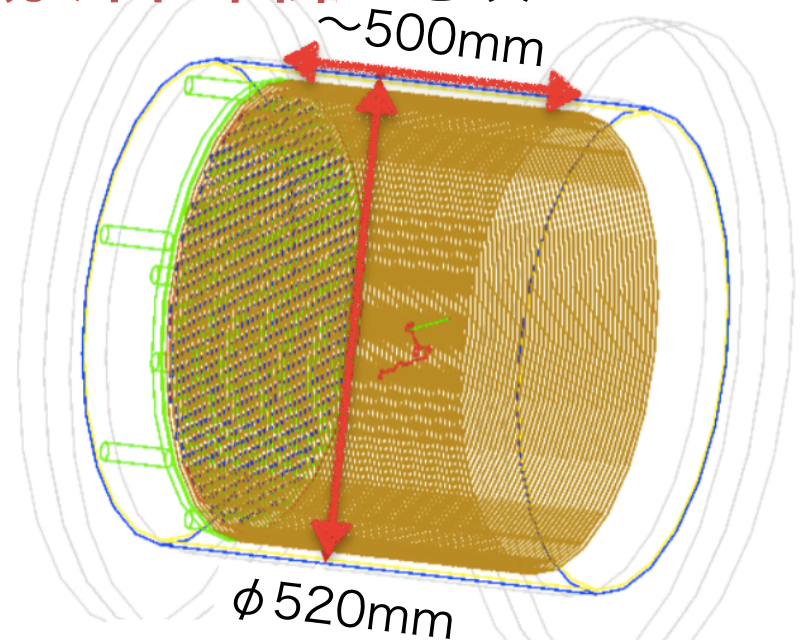


アップグレード計画

- 今年中に稼働予定の次期プロトタイプ検出器
- 約1000chのMPPCを使用予定
 - 将来的な物理探索用検出器では約50,000ch
- 検出器数が増大するため**専用の読み出し回路**が必須



64ch · Xe約10g

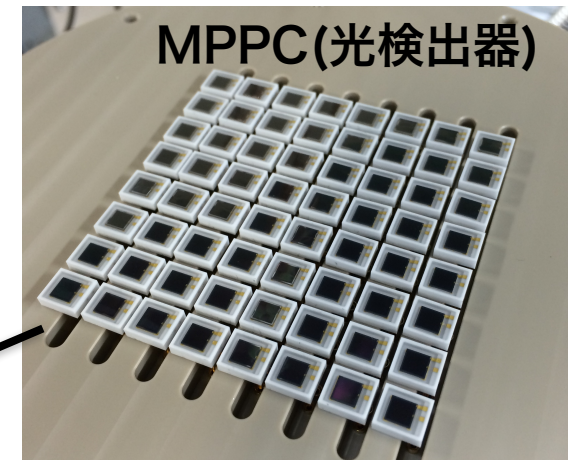
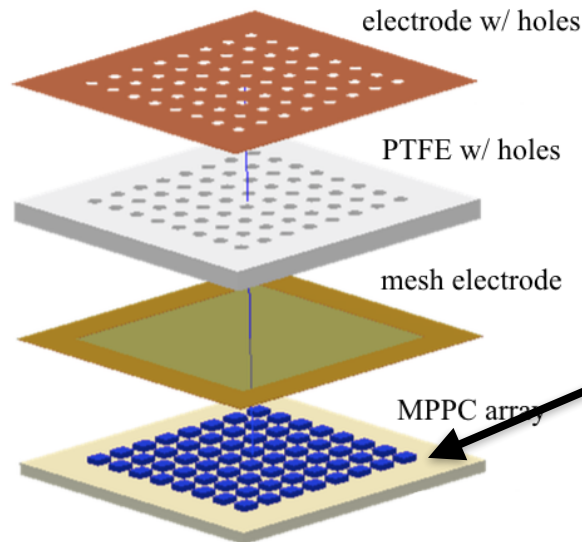
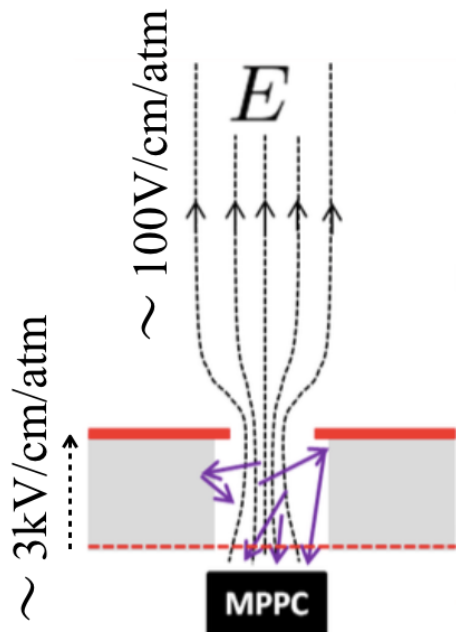


約1000ch · Xe約1kg

電離電子検出器 (ELCC)



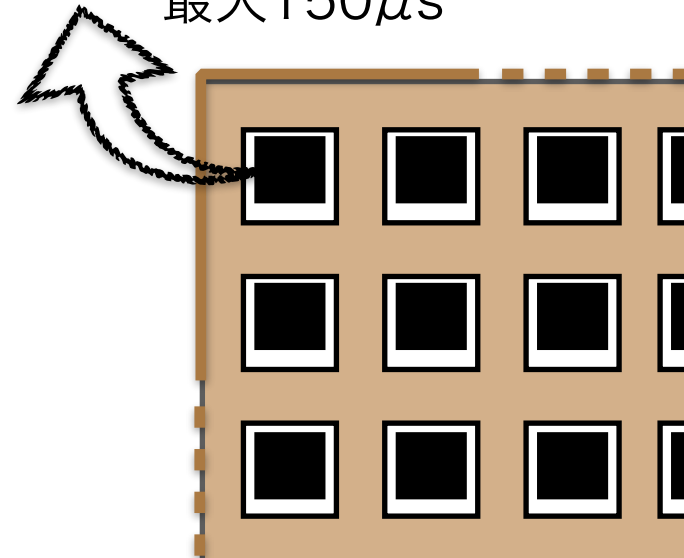
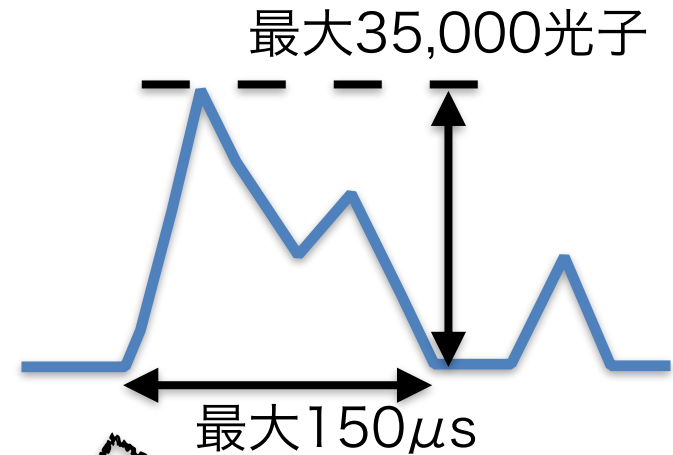
- セル状の検出器に、強い電場をかけて電離電子を収集する
- Xeは電子と衝突する際に励起され、脱励起光を発する。
 - Electroluminescence過程 (EL過程)
- EL過程を用いることで**精度の高い増幅**が可能



読み出し回路への要求

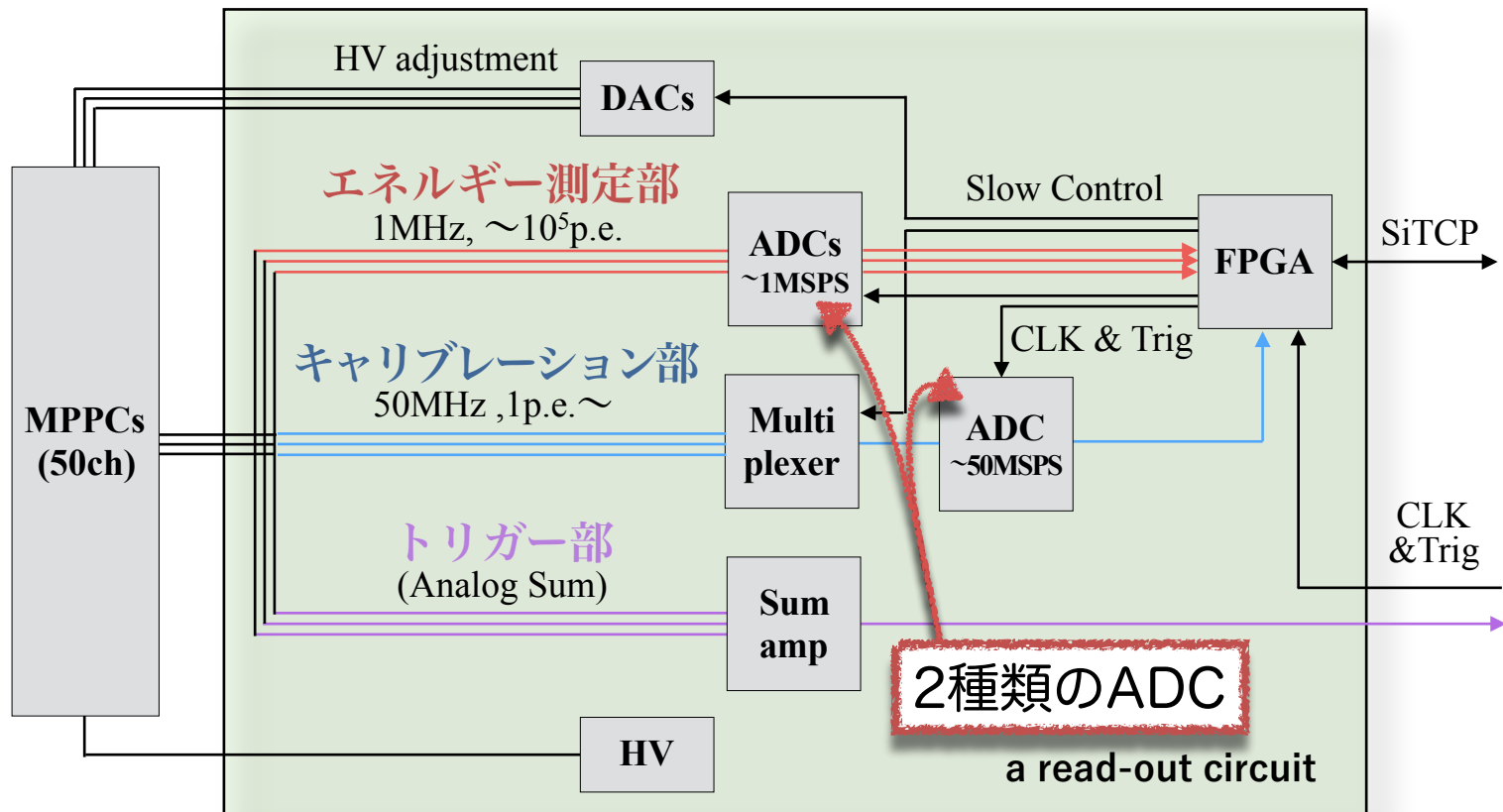


- **20 ~ 35,000個/ μs** の光子数の正確な測定
 - 3桁のダイナミックレンジが必要
- 最大**150 μs** 継続する信号の読み出し
- キャリブレーションのためのMPPCの**1光子波形**(約40ns)の測定
- 50個/boardのMPPCへの**電源供給**および各MPPCへの**個別の微調整**
- **低コスト**



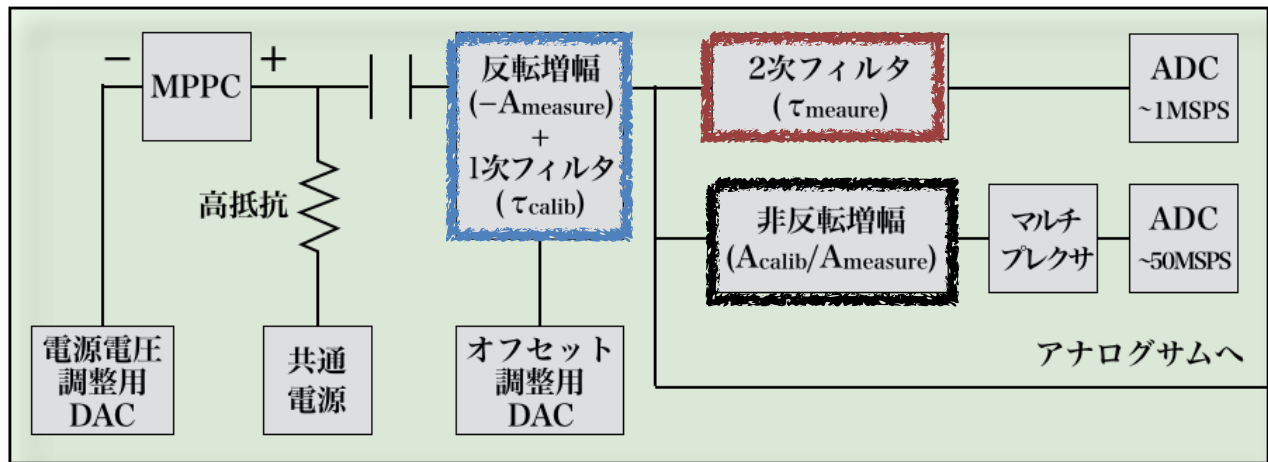
読み出し回路の構成

- 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



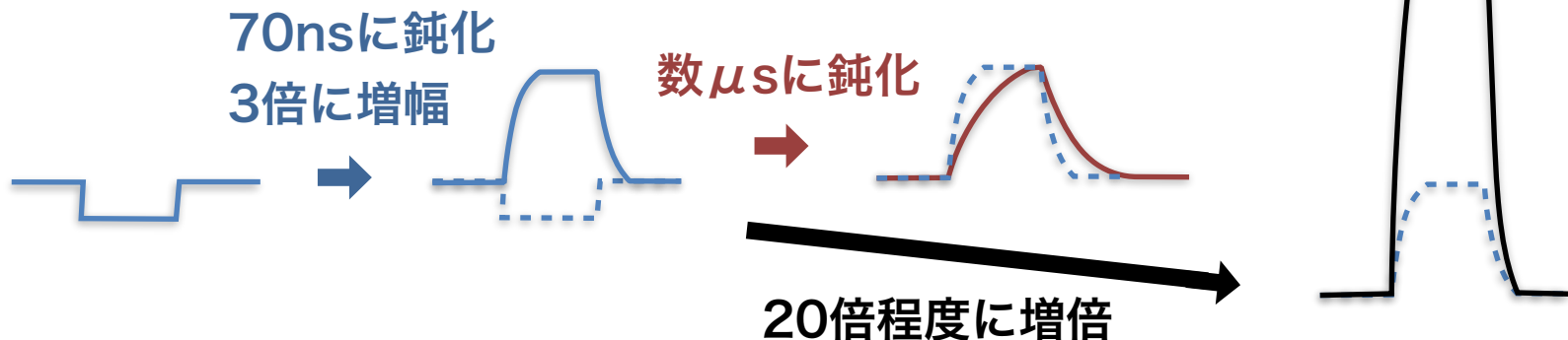
アナログ部の評価

- 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



エネルギー測定部

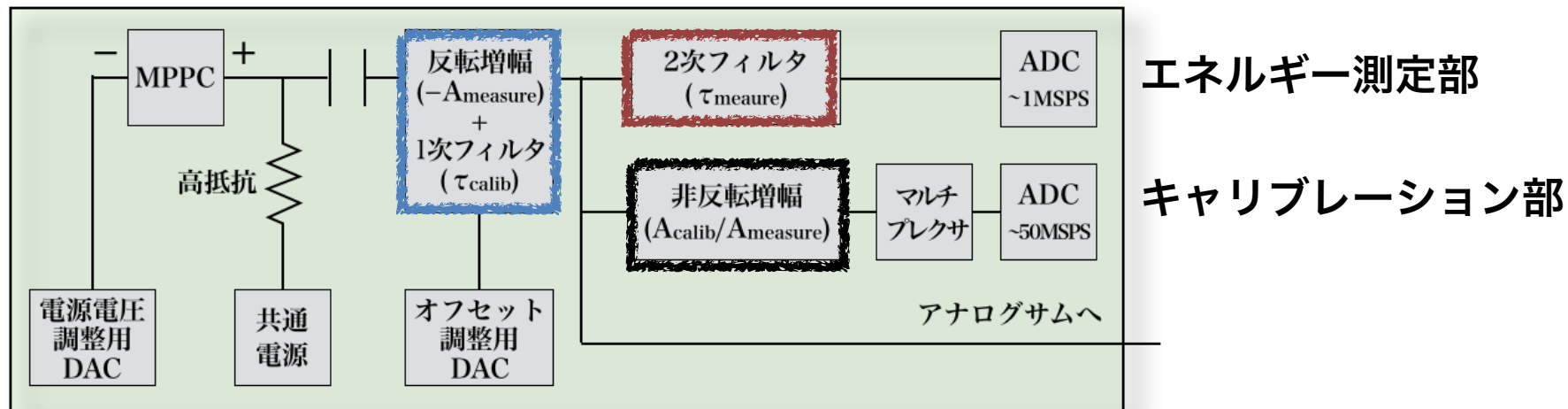
キャリブレーション部



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 $0v\beta\beta$ 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

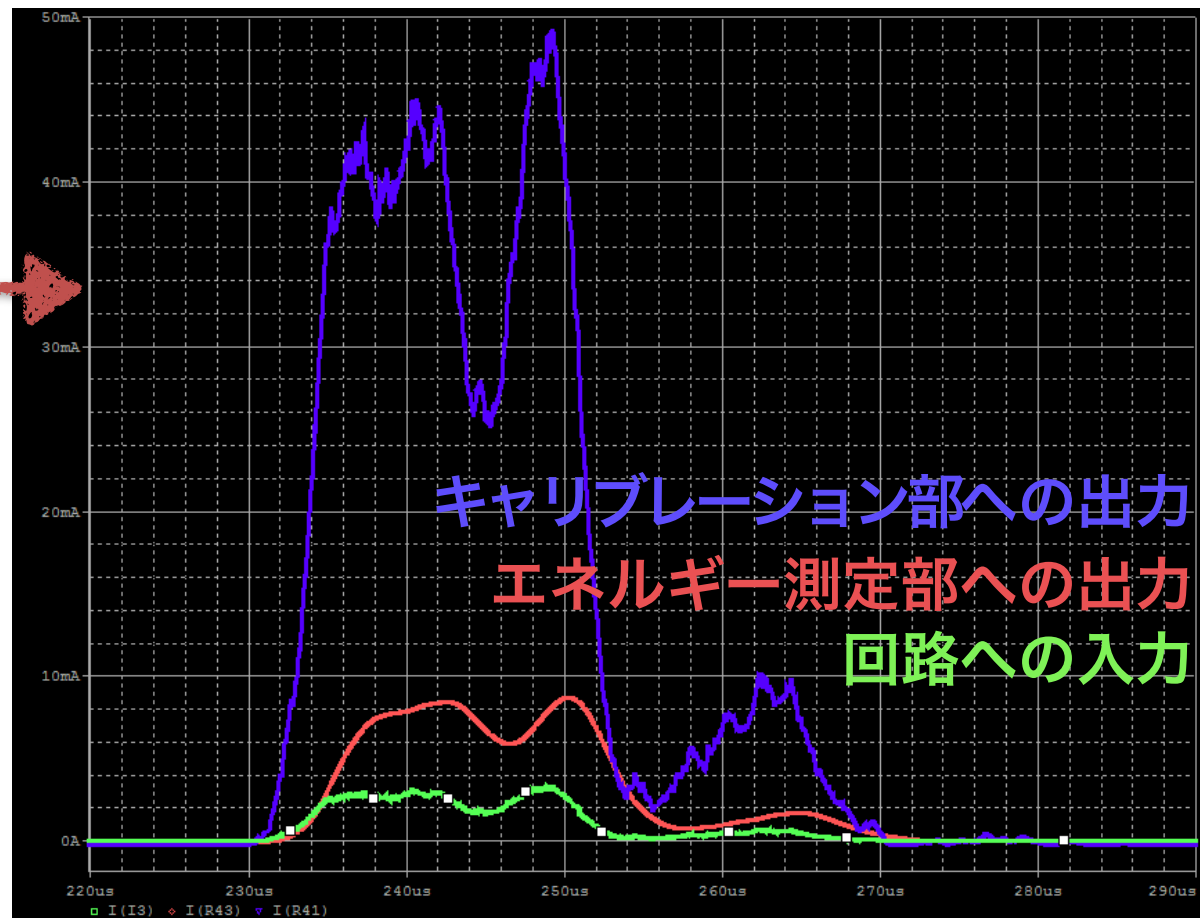
シミュレーションの概要



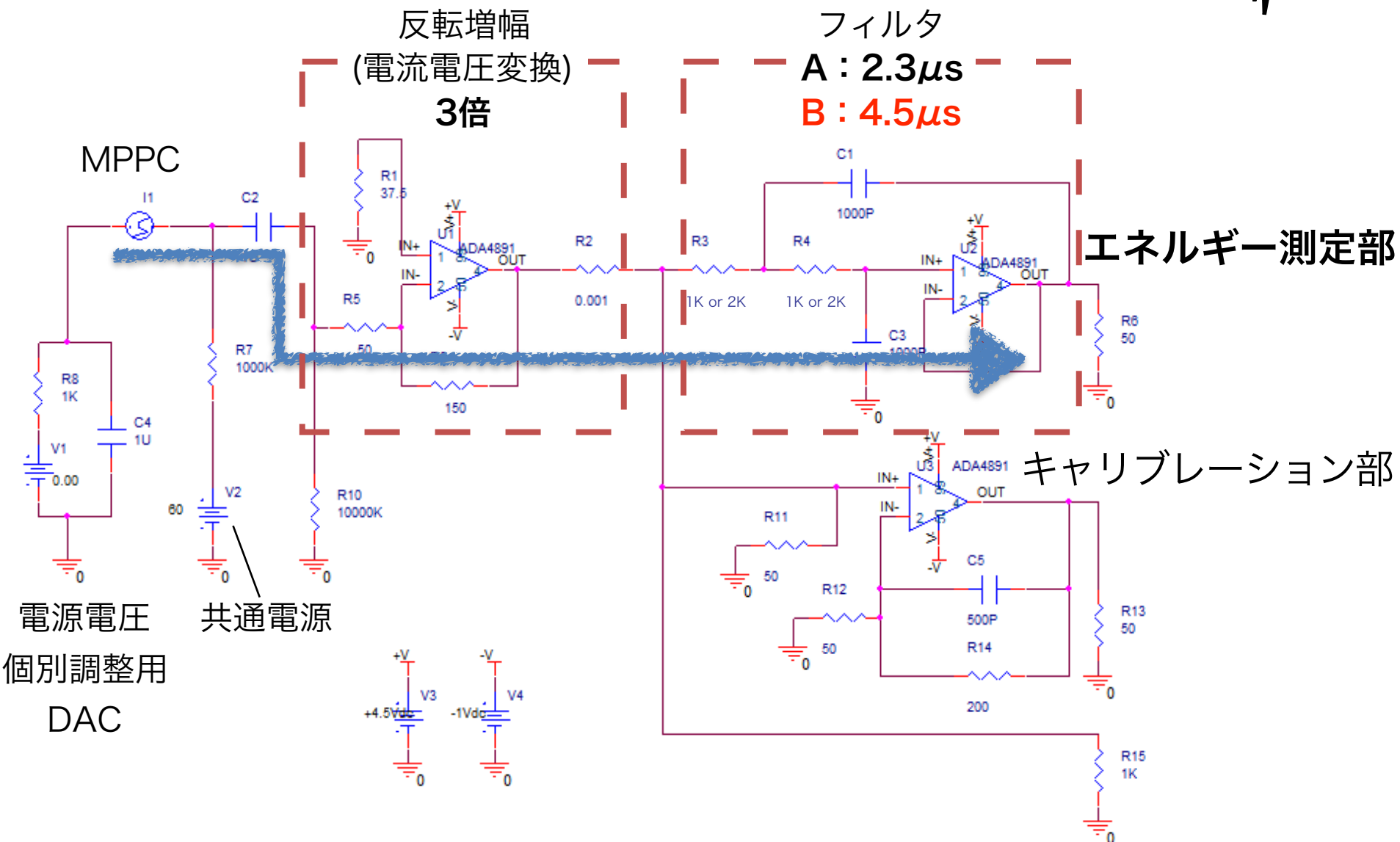
- Geant4とGarfield++を用いて $0\nu\beta\beta$ 崩壊をシミュレート
 - MPPCの出力波形(回路への入力波形)を算出

- **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

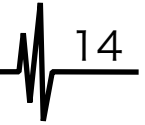
- 波形を1usごとにサンプリングし、12bitでデジタル化(エネルギー測定部)



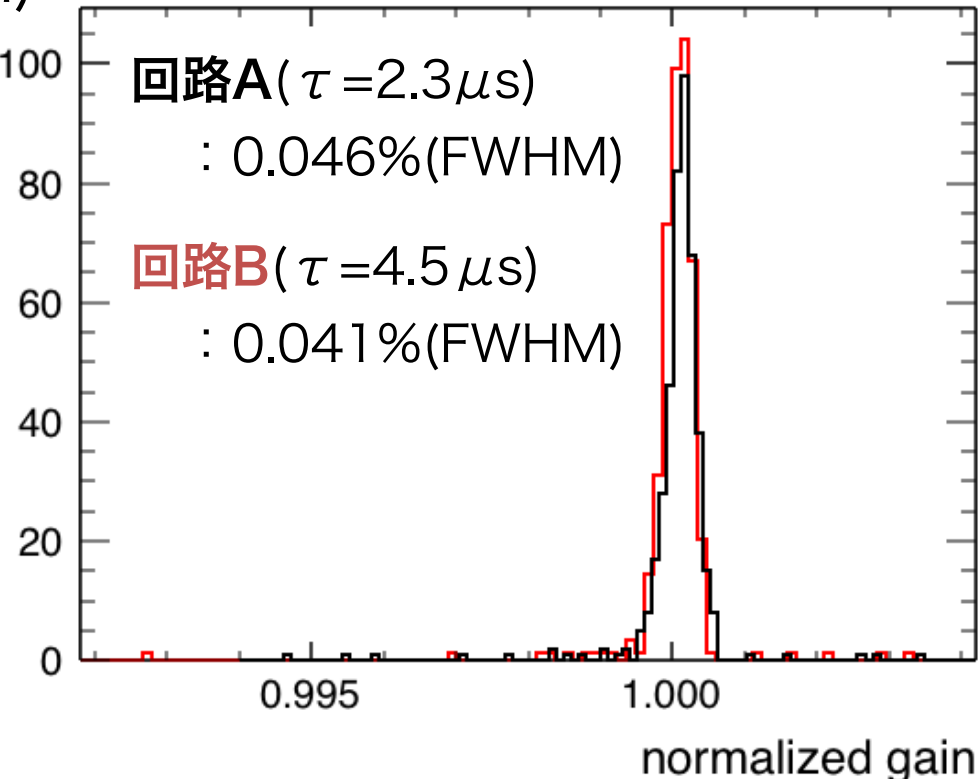
シミュレーションで用いた回路図



シミュレーション結果



- $0\nu\beta\beta$ 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**

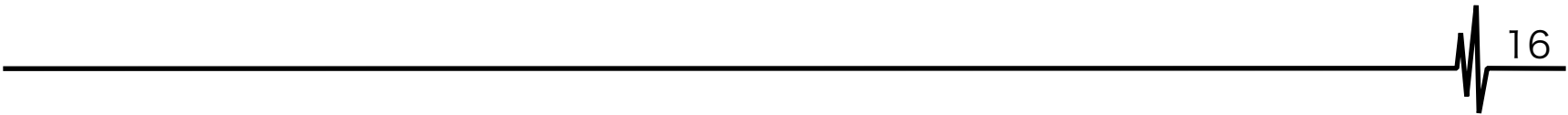


$0\nu\beta\beta$ 崩壊信号に対する積分値のゆらぎ

まとめと今後の展望



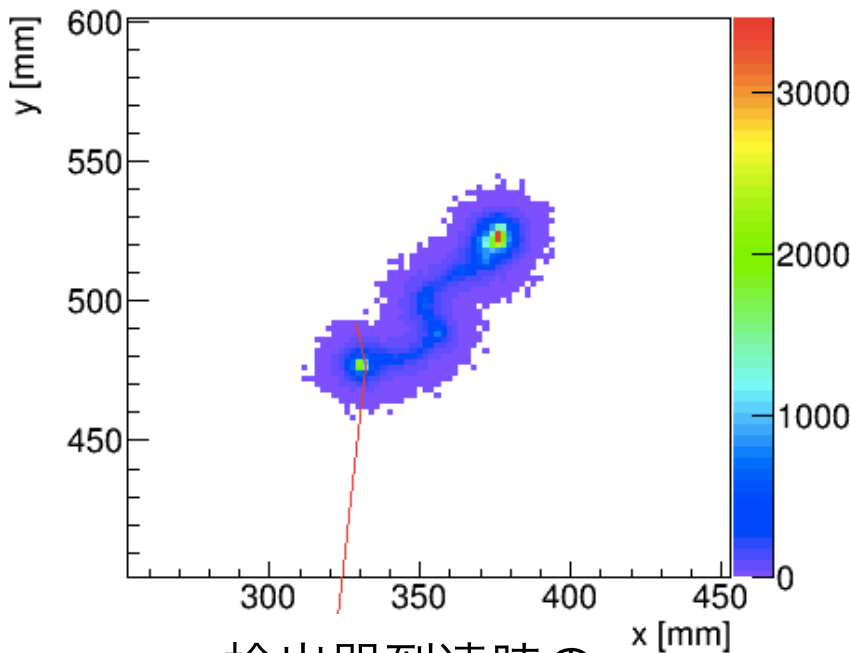
- 高圧XeガスTPCを用いた $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験 AXEL
 - **高エネルギー分解能**・飛跡検出
 - 多数のMPPCを、高エネルギー分解能 かつ 低コストで読み出すための専用の回路を開発中
- アナログ部のエネルギー分解能として以下を得た。
 - シミュレーション：**0.046%** (FWHM)
 - 試作機の非線形性：**<0.14%** (FWHM)
(電圧・パルス幅の非線形性など)
- 仕様変更に伴う回路の改良とデジタル部の回路図製作を行い、来年度頭には生産を開始したい



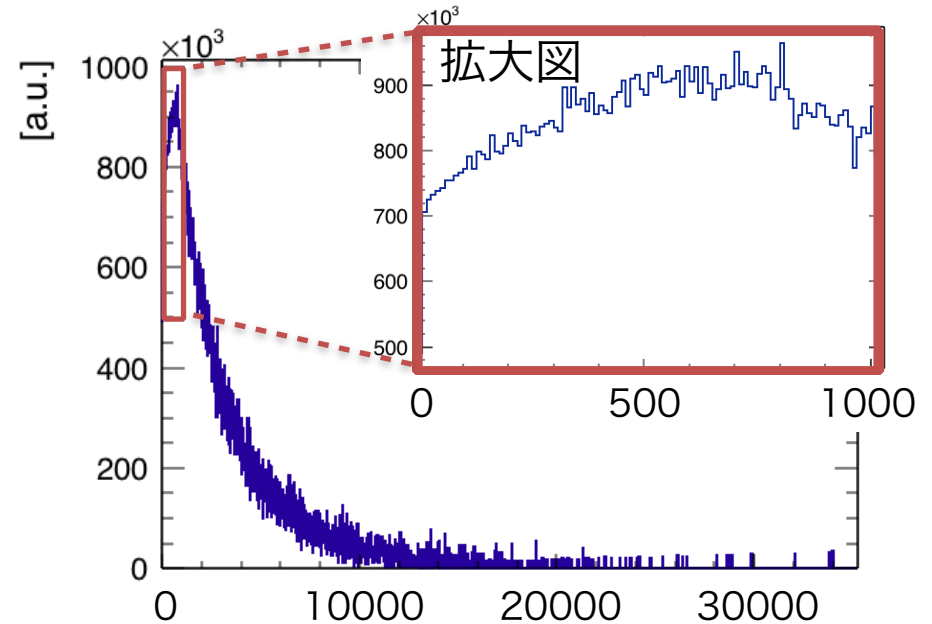
検出器の1セルに入射する電子数

17

- 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



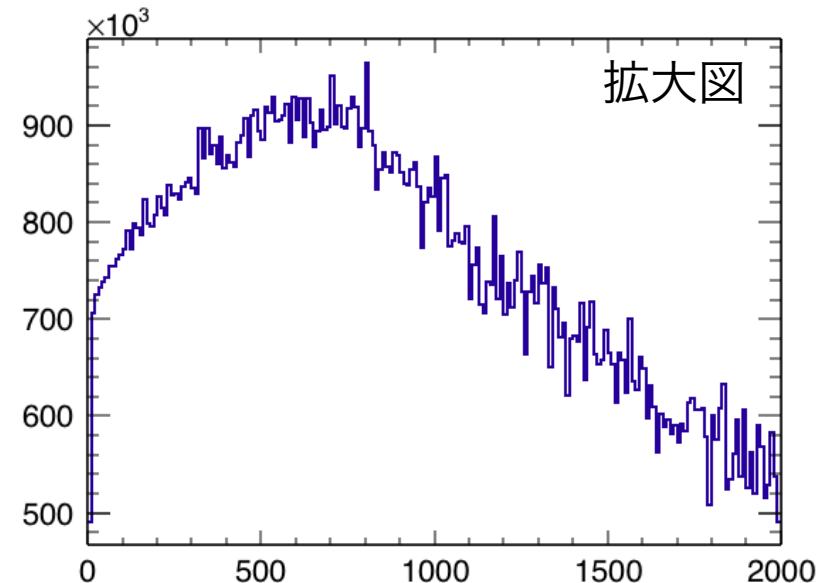
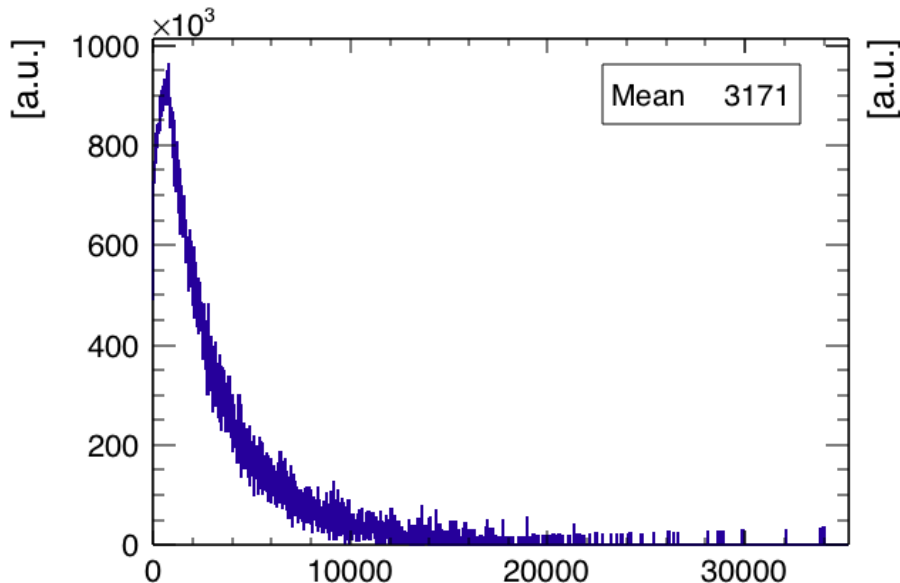
各MPPCに1us間に入射する光子数分布
(光子数で荷重したもの)

XeガスTPCの特徴

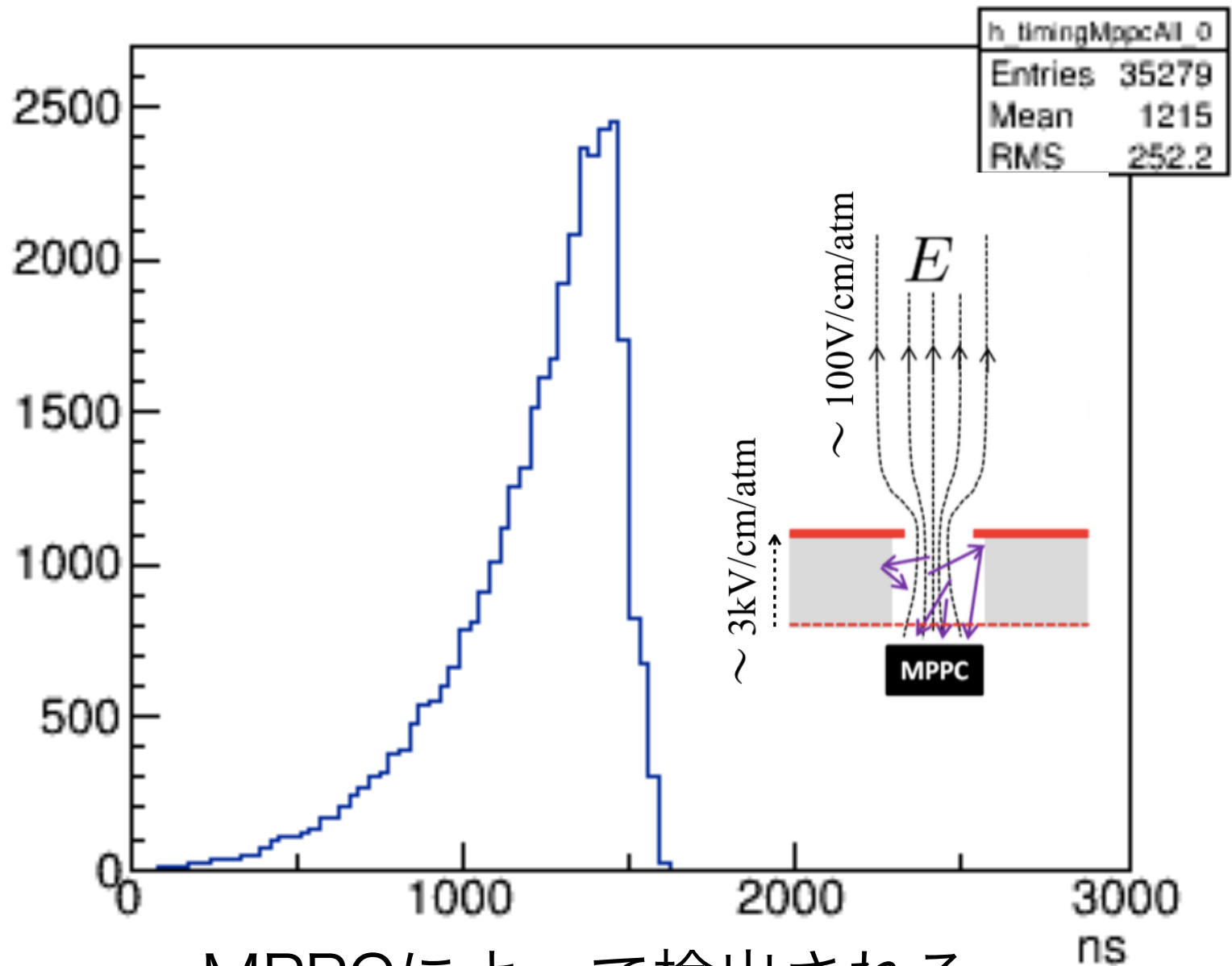
- **高エネルギー分解能**

- 発生する電離電子数の統計揺らぎが非常に小さい
 - 約0.24%(FWHM)@2458keV
- 脱励起光を用いた精度の高い増幅が可能

- ドリフト中の電子の**拡散が大きい** → 少光量の入射が多い



各MPPCに1usに入射する光子数分布(光子数で荷重したもの)



MPPCによって検出される
脱励起光の時間分布

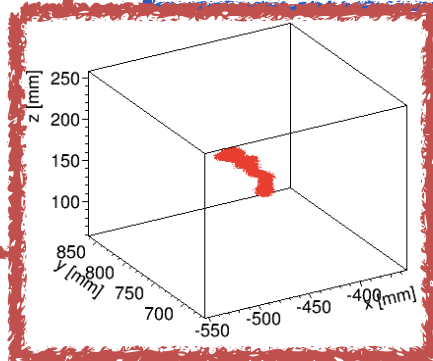
シミュレーションの概要

- Geant4を用いて $0\nu\beta\beta$ の飛跡と電離電子の数を算出

- 各地点でのエネルギー損失とイオン化エネルギーより電離電子数を求める

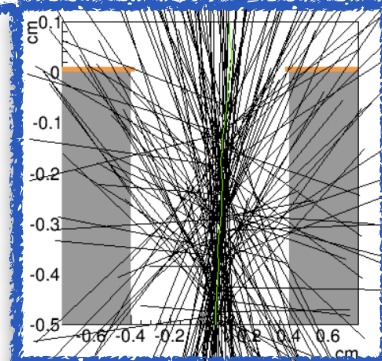
- Z位置を用いて

- 到着時間の計算
- XYZ方向へ拡散を行う



- Garfield++により1電子を加速、Xeの脱励起光を発生させる

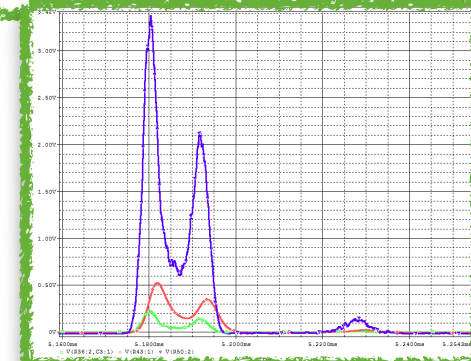
- MPPCで観測される平均光子数とそのタイミングを算出



- PSPICEを用いて回路の応答を評価

- MPPCへの入射光子数から、回路への入力波形を決定

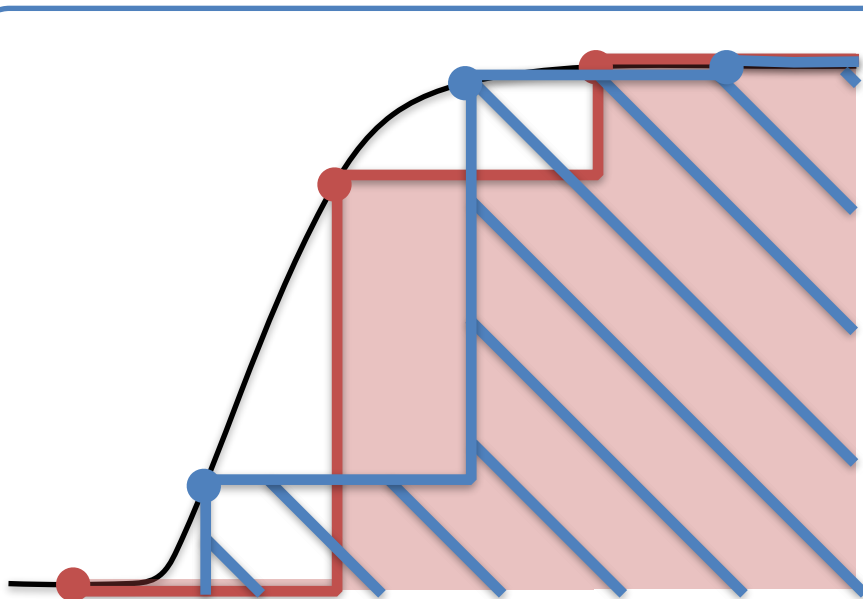
- 回路の出力を $1\mu\text{s}$ ごとにサンプリングし、デジタル化する



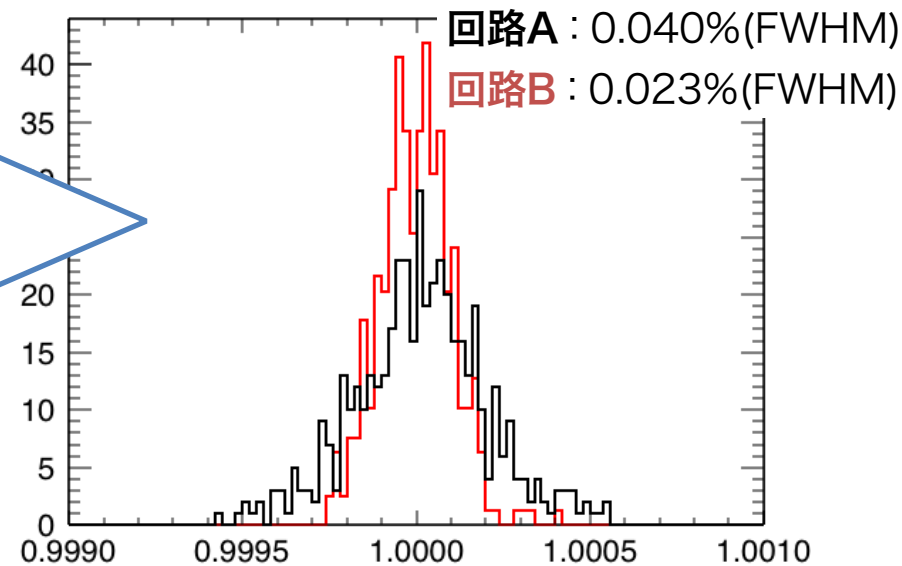
シミュレーション結果 ①

21

- **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**

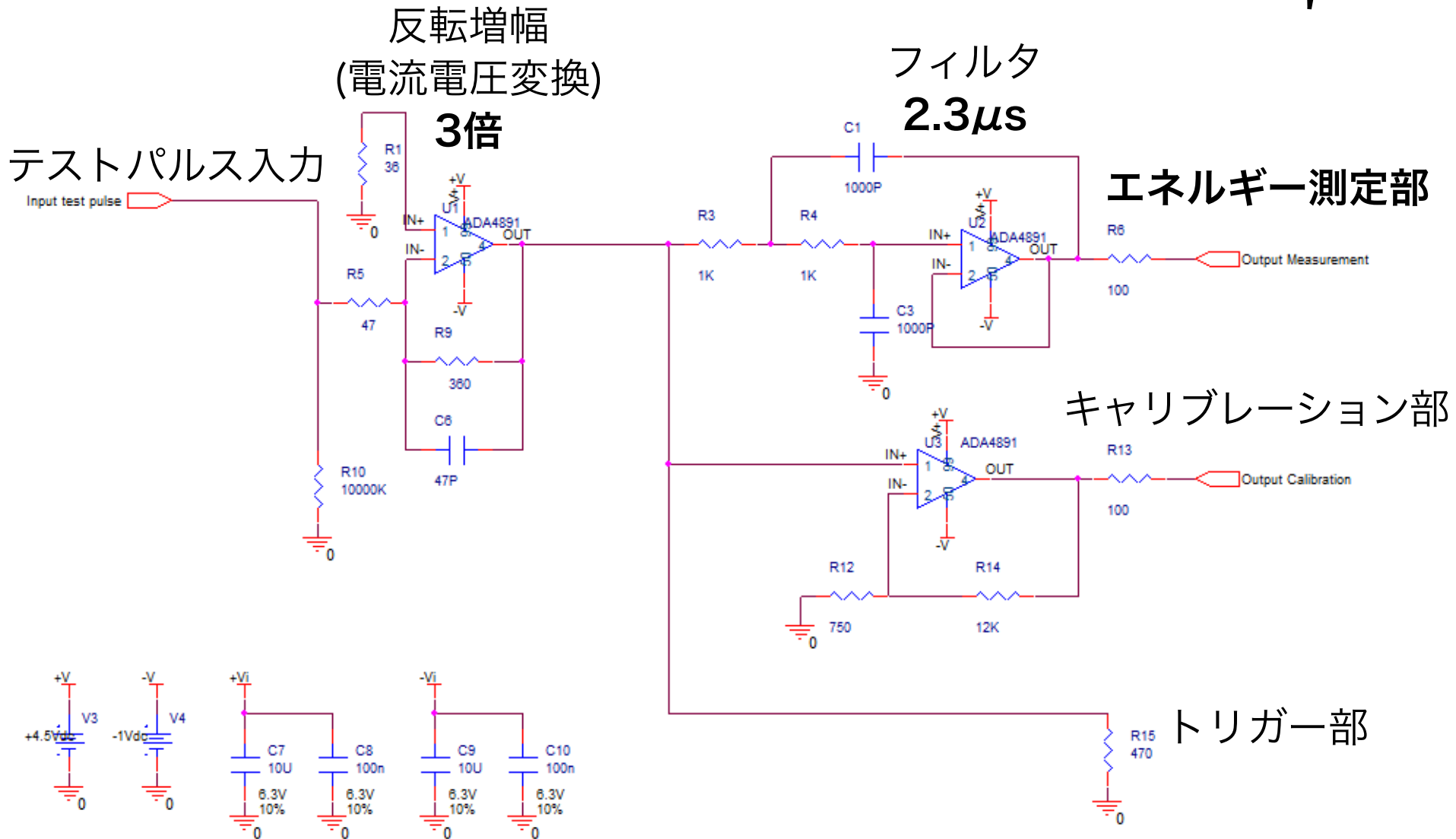


サンプルングタイミングの
変化によるゆらぎ = 赤と青の面積比



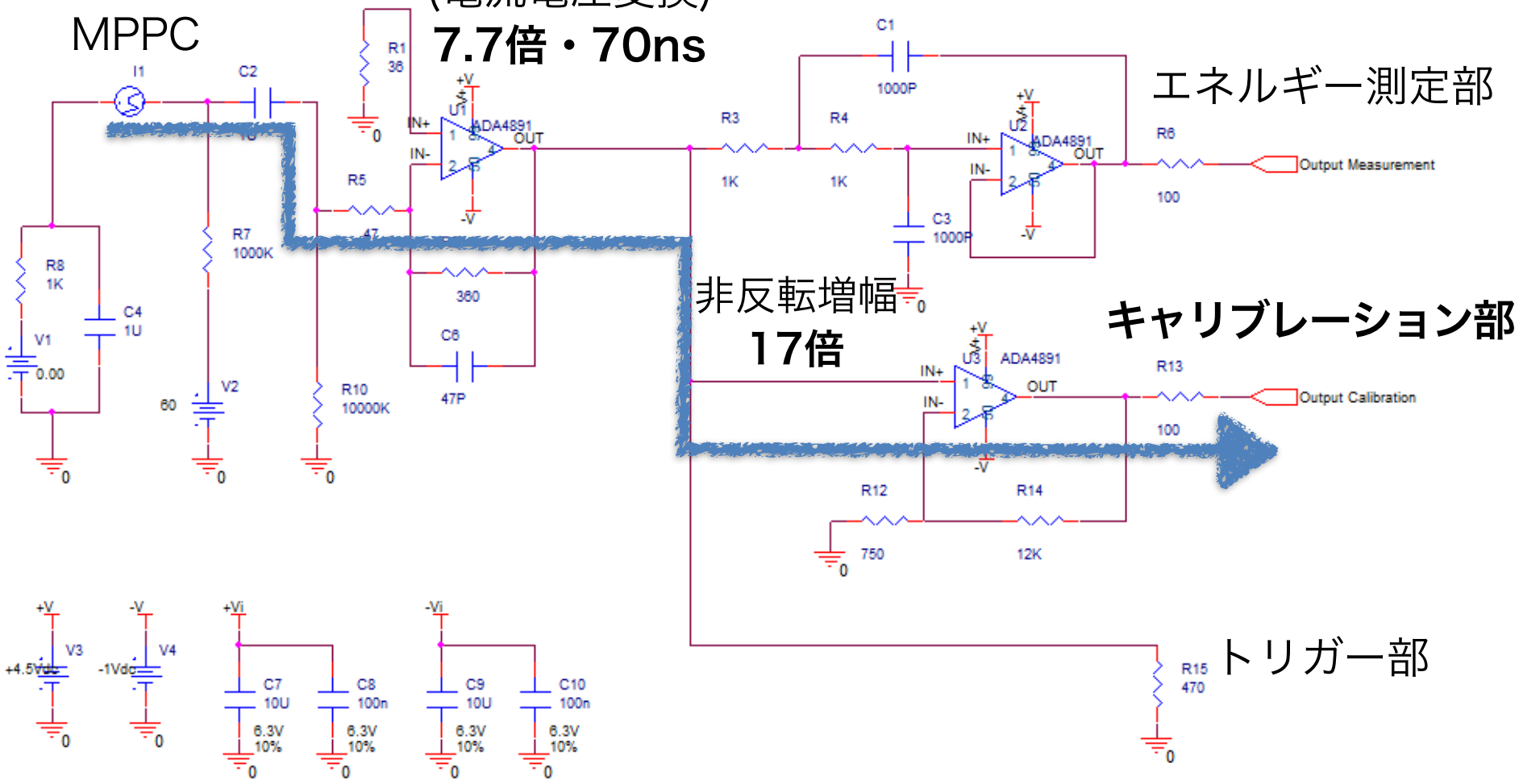
サンプルング timing ratio
を変えた際の電荷の比

試作機の回路図



キャリブレーション部の評価(試作機)

反転増幅&フィルタ
(電流電圧変換)
7.7倍・70ns



エネルギー測定部

キャリブレーション部

トリガー部

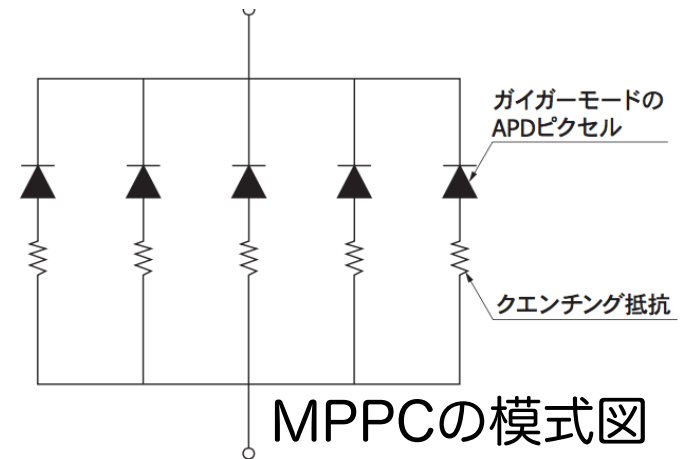
MPPC

非反転増幅
17倍

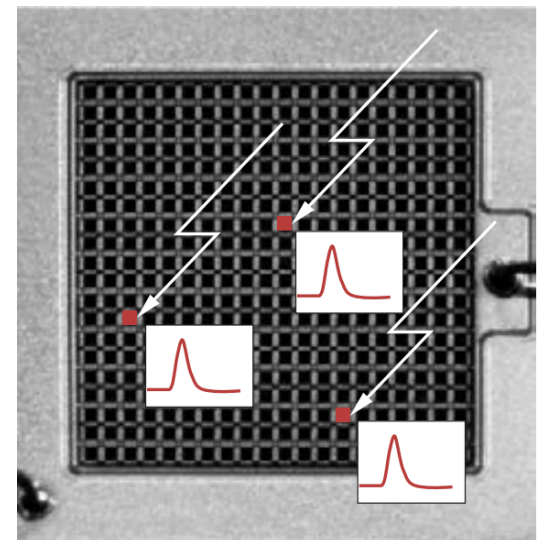
MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

24

- ガイガーモードのAPDピクセルを並列に接続した検出器
- 各ピクセルの出力波形はほぼ同じで、MPPCの出力はそれらの和
 - 光子数検出に優れている

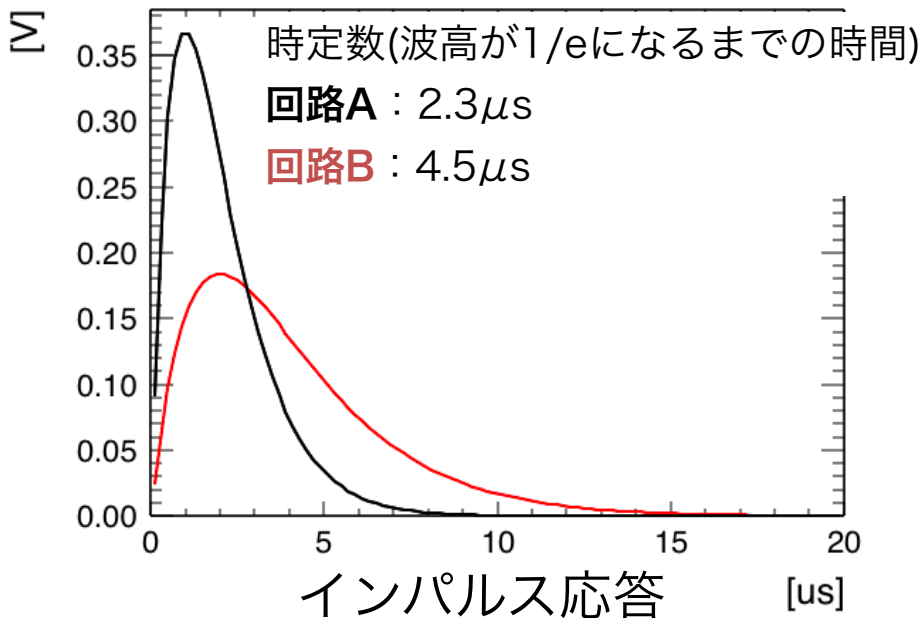


- 素子の熱揺らぎによって、約1MHzの**ダークカレント**が発生
- 1つのピクセルが反応すると、クロストーク・アフターパルスにより**数ピクセルが反応**することがある
- 素子によって**適切な電源電圧が異なる**

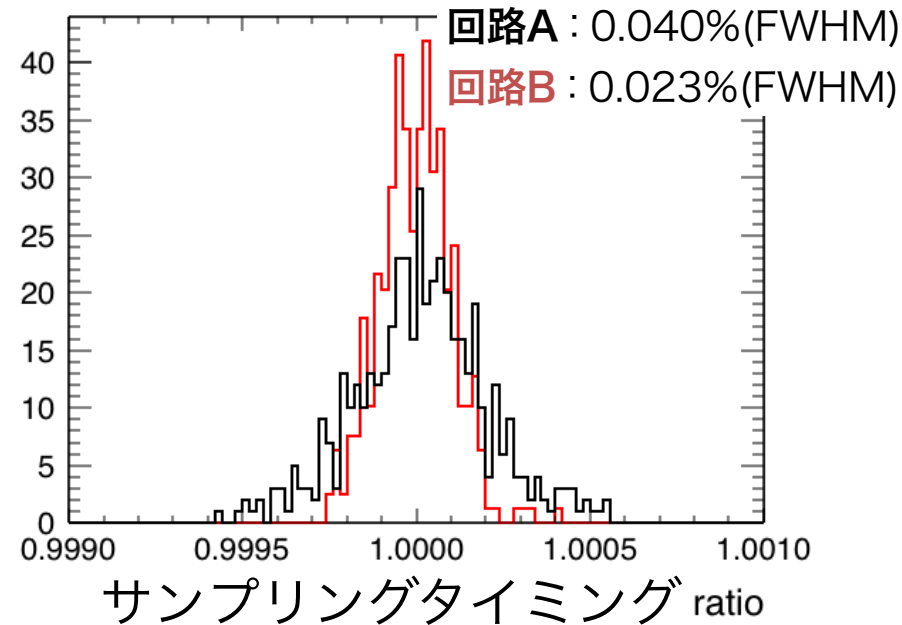


シミュレーション結果 ①

- **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
 - サンプリ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

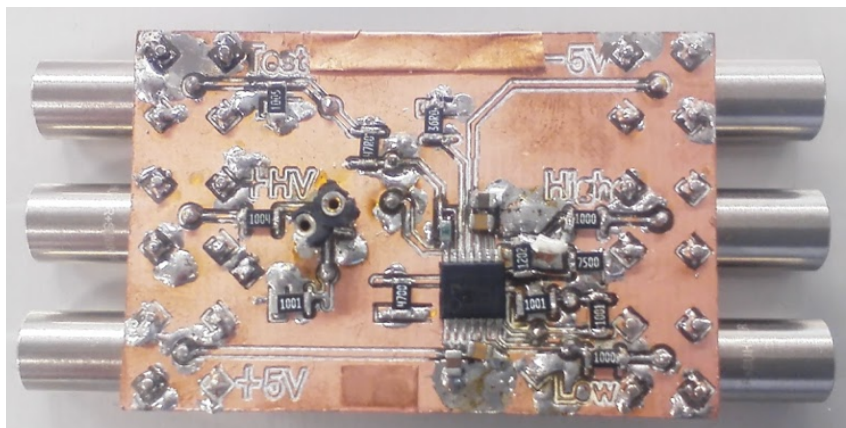
試作機による評価

- エネルギー測定部

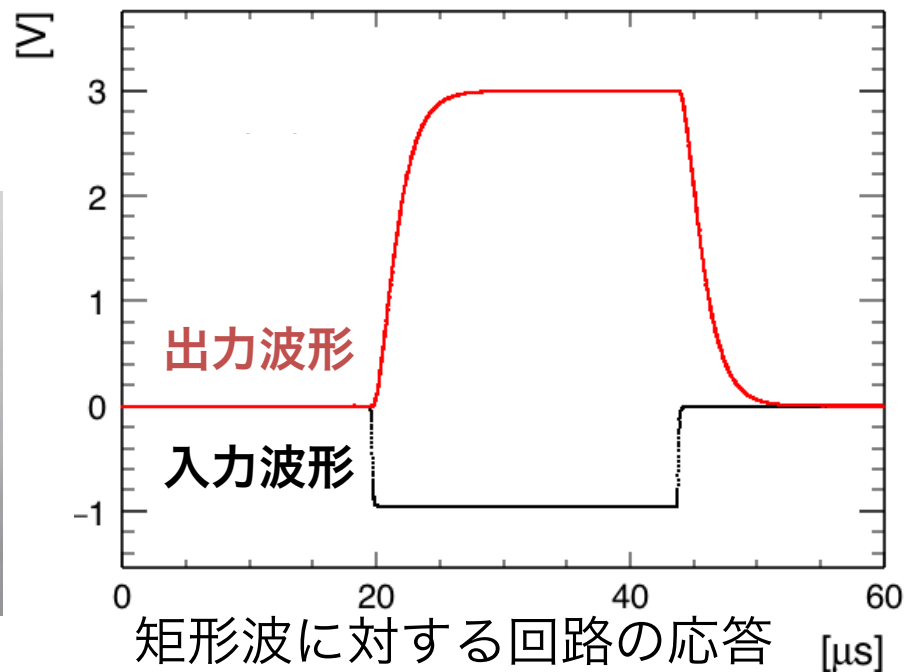
- ファンクションジェネレータで矩形波を生成し、回路の入力波形と出力波形を取得
- 入力と出力の積分値を用いて線形性を評価した

- キャリブレーション部

- MPPCの特性の決定精度を評価



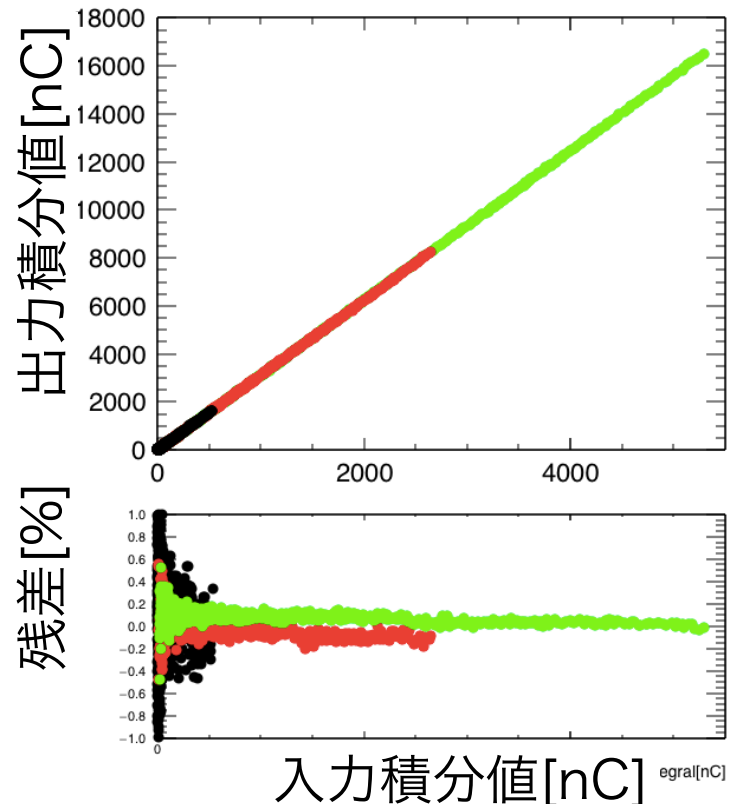
作成した試作機

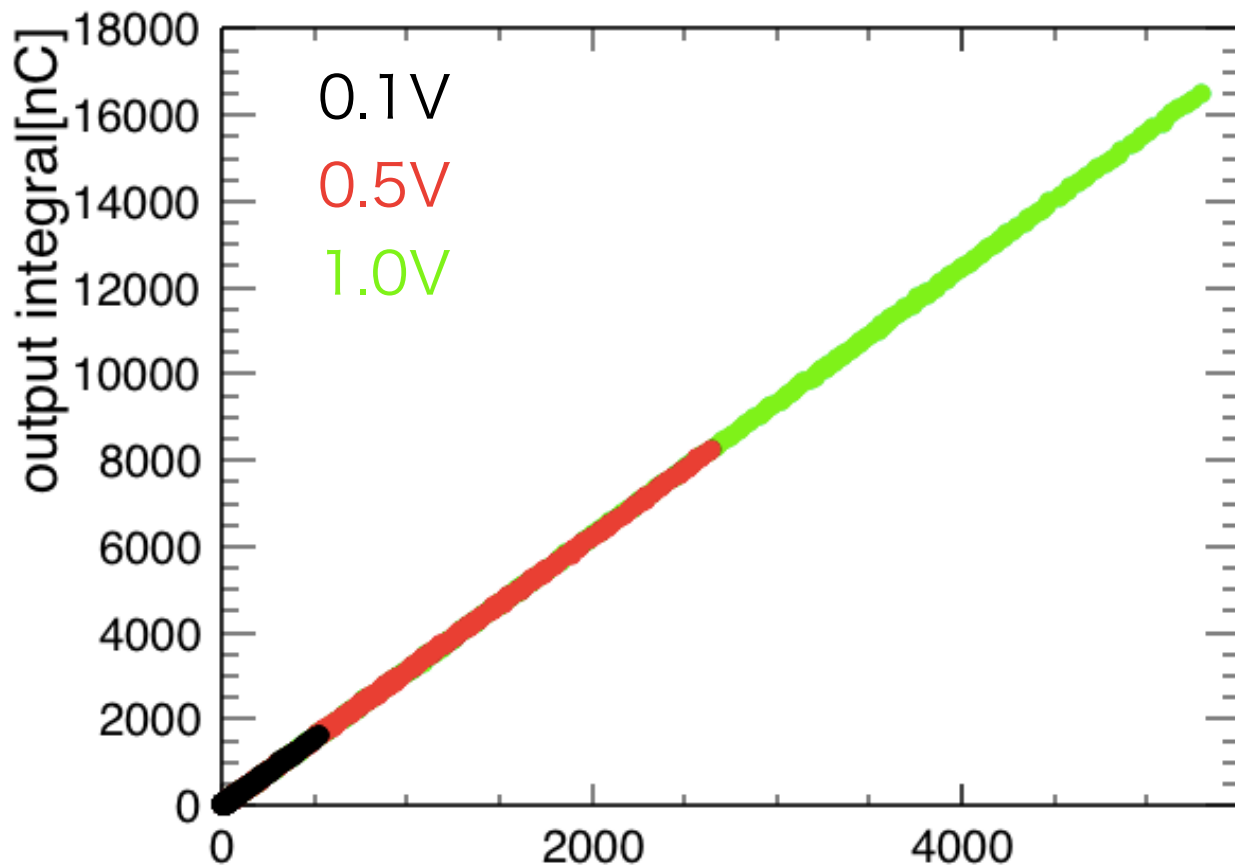


エネルギー測定部の評価

27

- パルス時間幅を変えながら、矩形波を入力した際の実線形性
 - 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%**





電圧依存性

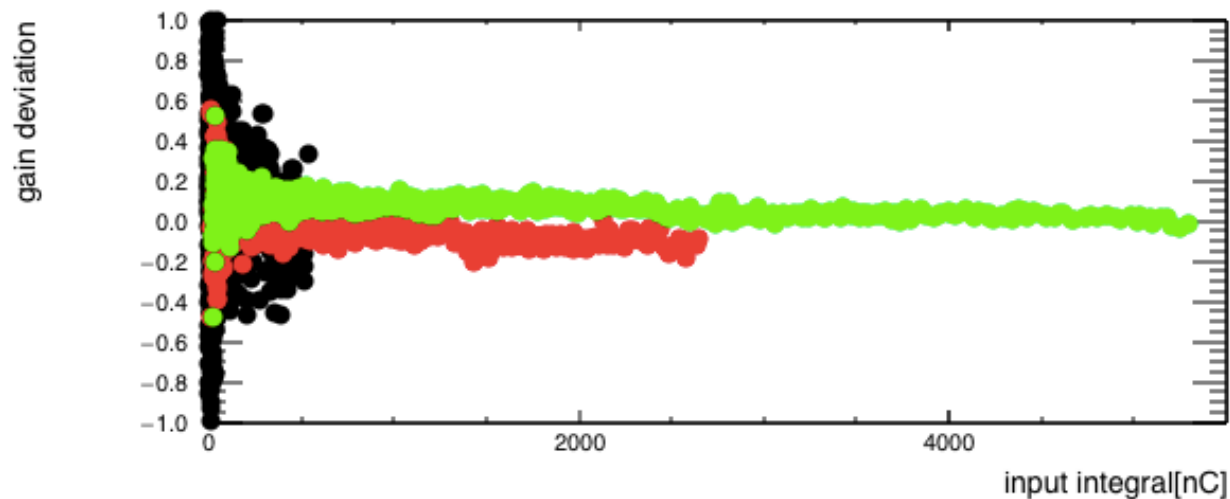
gain(傾き)

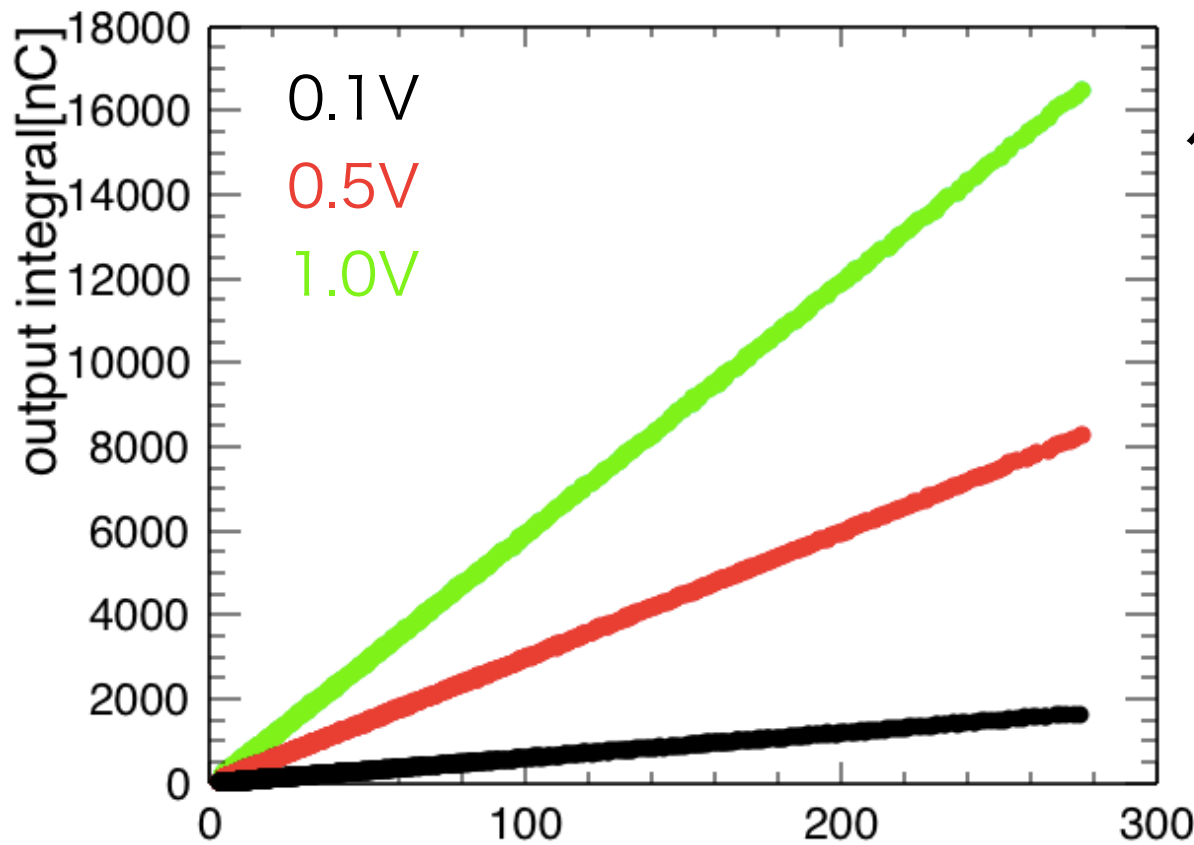
0.1V : 3.1148

0.5V : 3.1139

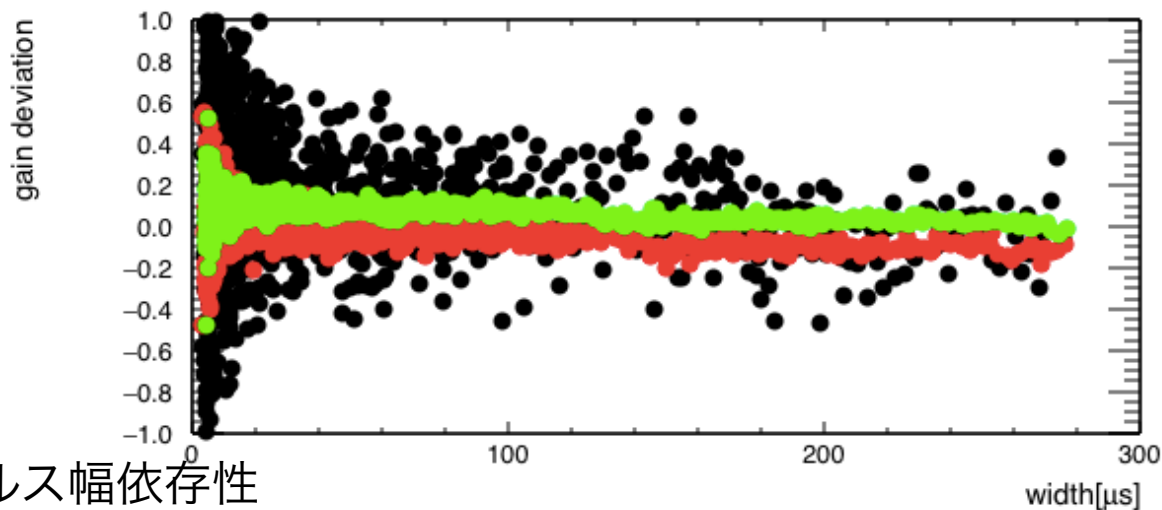
1.0V : 3.1151

ゆらぎ : 0.121%





パルス幅依存性



傾き

0.1V : $-1.74e-06$

0.5V : $-2.43e-07$

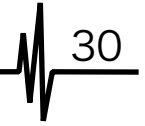
1.0V : $-7.66e-08$

最大パルス幅 $150\mu s$

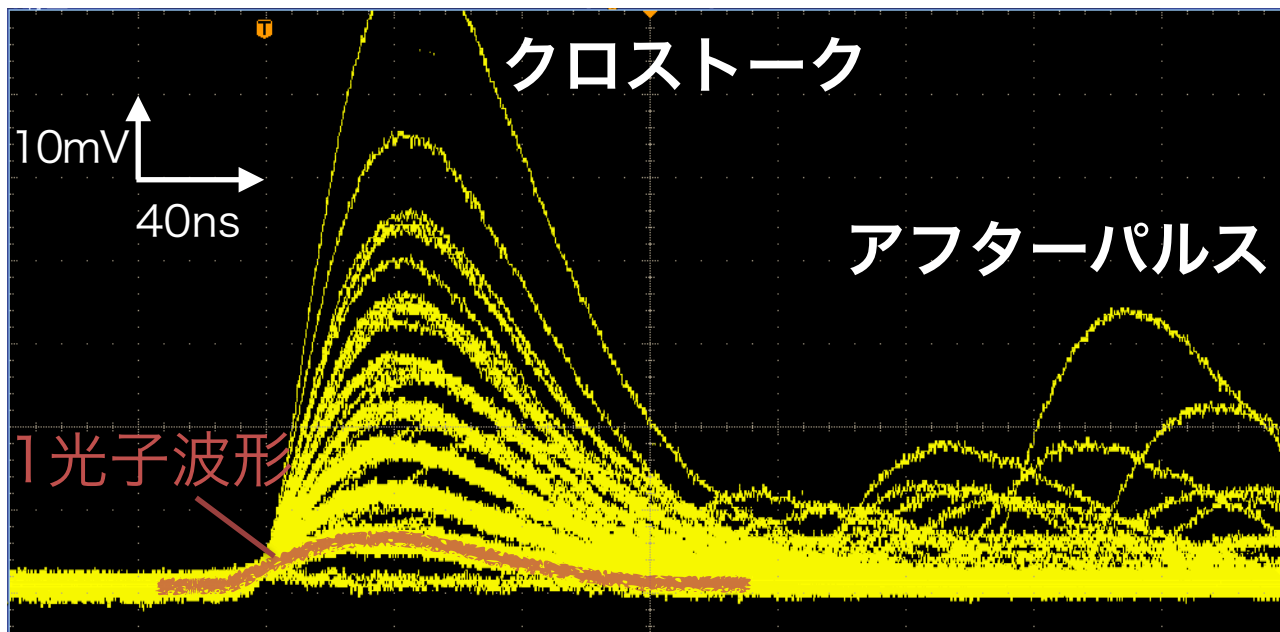
0.026%

パルス幅依存性

キャリブレーション部の評価



- 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

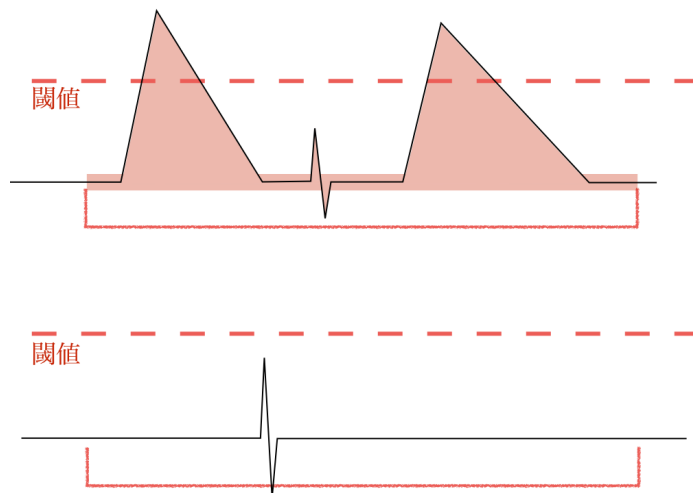


有効増倍率の測定方法

- クロストーク・アフターパルス確率を考慮した**有効増倍率**
= 1光子が反応した際に出力される平均電荷量を求めたい
- アフターパルスのせいで、**正確な反応数**がわからない
- そこで、一定時間幅の領域をランダムに決定し、
 N_{all} : 全イベント数、 N_0 : 信号のないイベント数 を求める
- ポアソンの確率 : $P(\mu, 0) = e^{-\mu} = \frac{N_0}{N_{all}}$
から、**領域内の平均反応数 μ** を求める

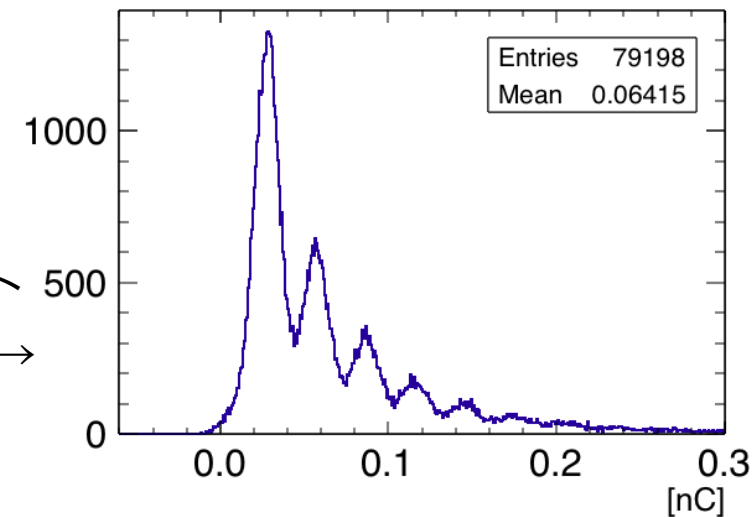
有効増倍率の測定方法

- 閾値を設けることで、 N_0 を正確に測定できる
 - 平均反応数 μ を正確に求められる
- 有効増倍率 = $\langle Q \rangle / \mu e$
 - μ : 積分範囲に含まれる反応の数の平均値
 - $\langle Q \rangle$: 積分範囲内の平均電荷量
 - e : 素電荷



← 模式図

ダークカレント
の積分値分布→



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