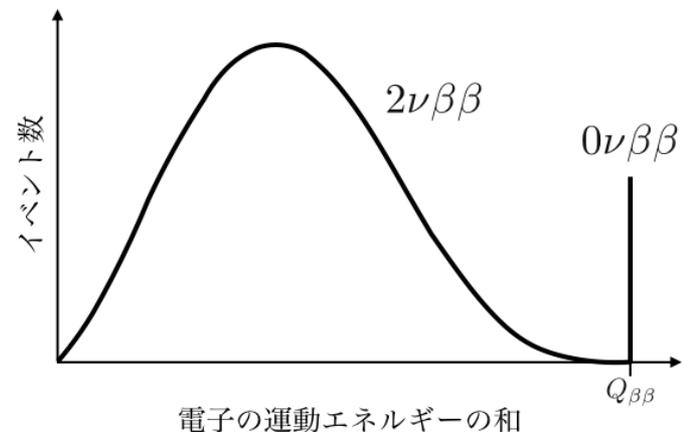
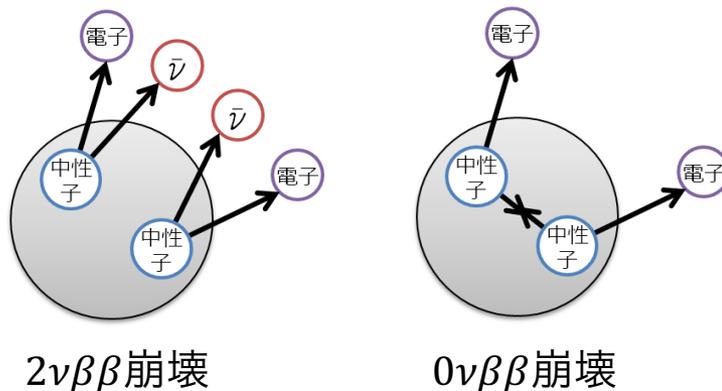


MPPCの応答特性評価の効率化のための システムの開発

24th ICEPPシンポジウム
京都大学高エネルギー物理学研究室
修士課程2年 中村 和広

物理モチベーション

- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) の探索
 - ニュートリノはマヨラナ粒子か？
 - ニュートリノが他の素粒子に比べて異常に軽い理由
 - 物質優勢宇宙
 - 起きたとしても非常に稀な現象 (^{136}Xe の場合：半減期 1.1×10^{26} 年以上 [1])
 - 大量の崩壊核を用意すること
 - 高エネルギー分解能な検出器の開発
 - 低バックグラウンド環境の構築

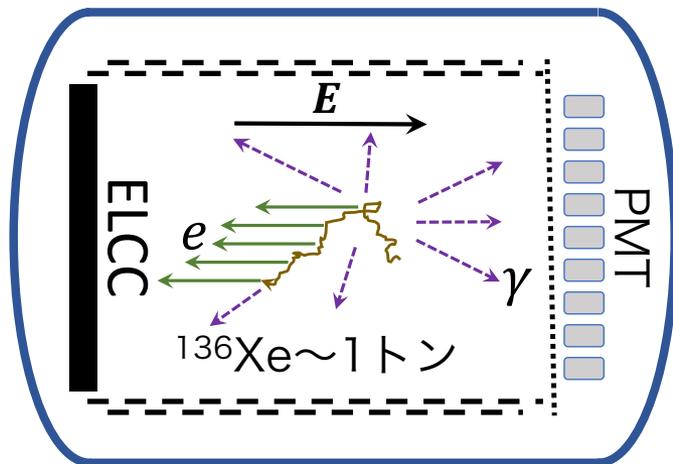


[1] A. Gando, et al. Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen. Phys. Rev. Lett., Vol. 117, p. 082503, Aug 2016.

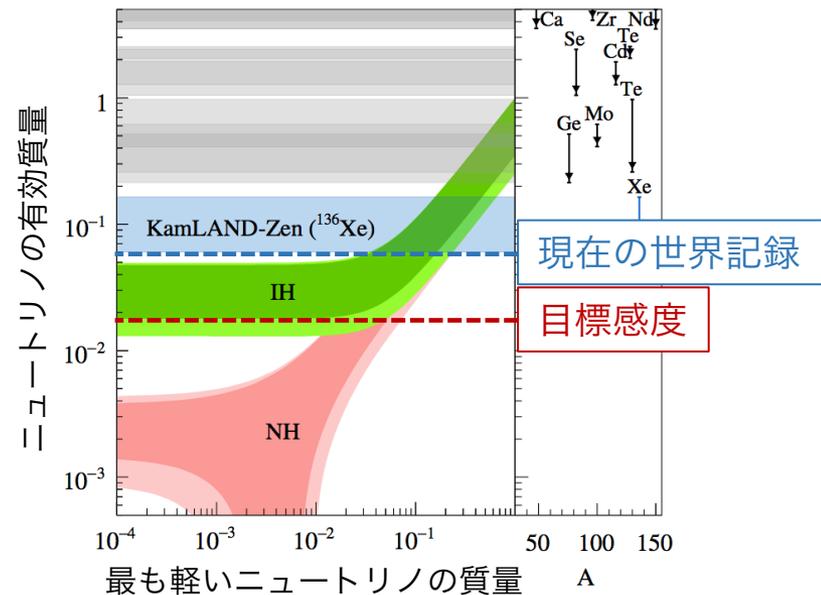
AXEL実験

● 検出器概要

- 高圧キセノンガスTPC (崩壊核: ^{136}Xe)
 - 崩壊核の大質量化 (~1トン)
 - 高エネルギー分解能 (目標エネルギー分解能: FWHM 0.5 % @ 2458 keV)
 - 飛跡検出によるバックグラウンドの除去
- 目標感度: 20 meV (ニュートリノの有効質量 $\propto T^{-1/2}$)

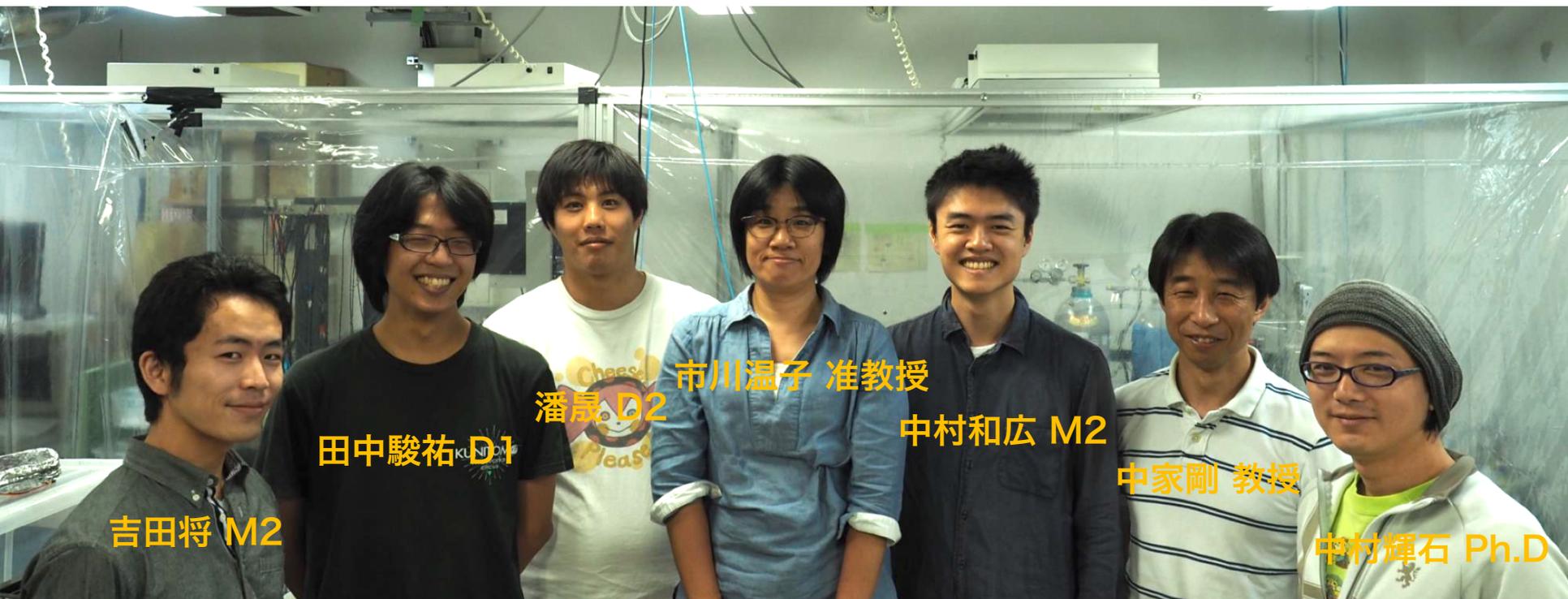


AXEL検出器の模式図



AXEL実験メンバー

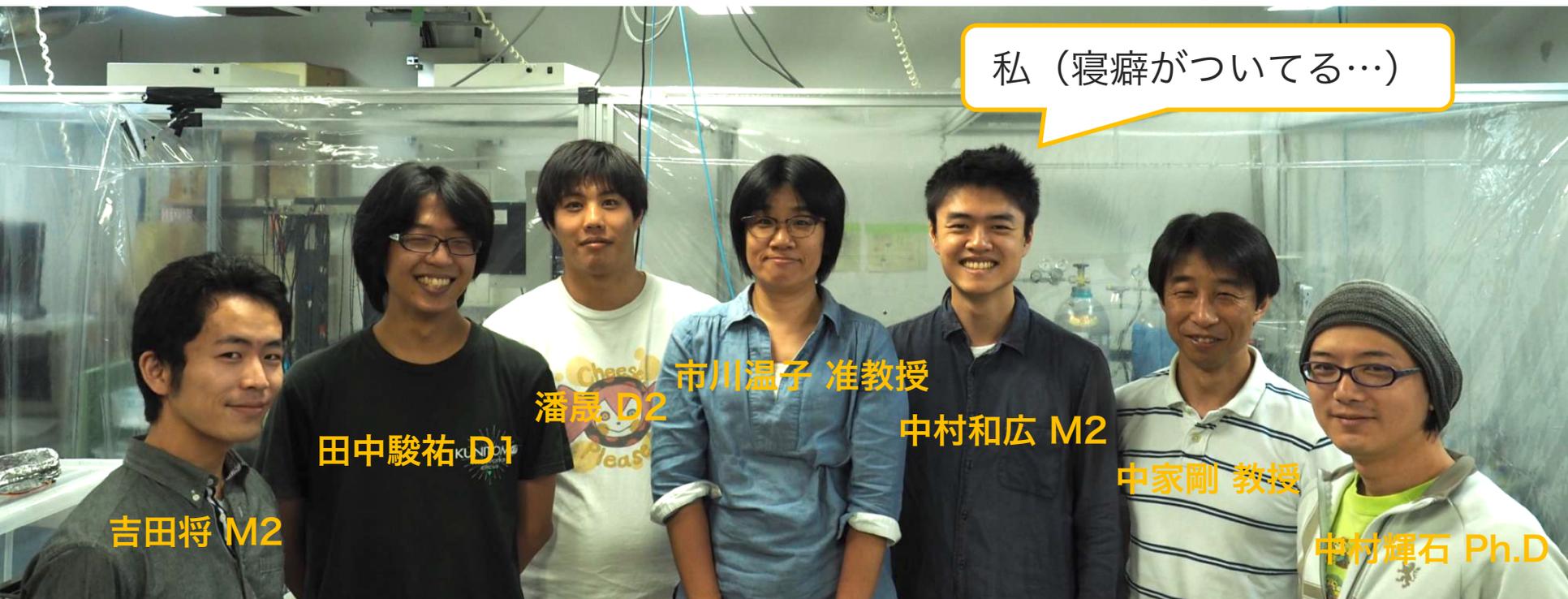
- 京大を中心に合計13名で構成



南野彰宏氏, 廣瀬昌憲氏, 関谷洋之氏, 中島康博氏, 上島考太氏, 身内賢太朗氏

AXEL実験メンバー

- 京大を中心に合計13名で構成



南野彰宏氏, 廣瀬昌憲氏, 関谷洋之氏, 中島康博氏, 上島考太氏, 身内賢太郎氏

AXELの歩み

2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018

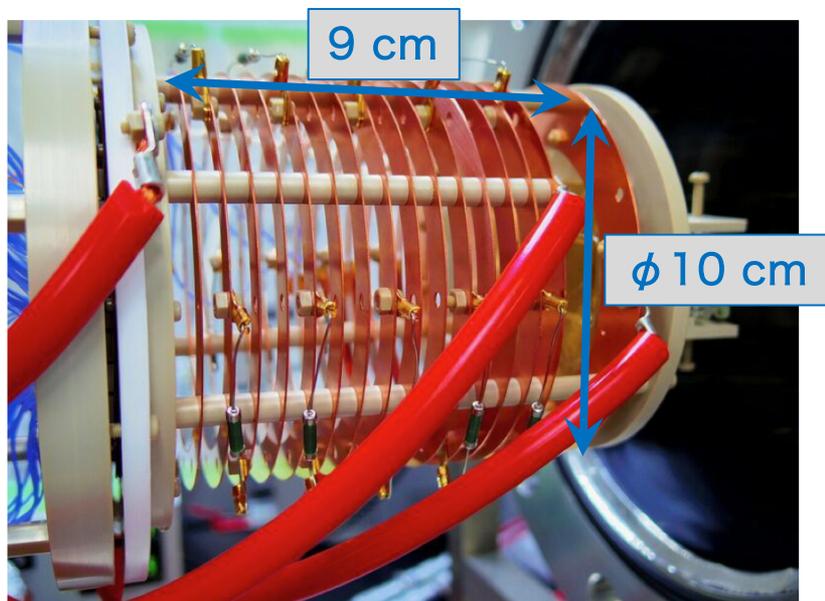
実験の提案

高圧XeのR&D開始

10L試作機

180L試作機

180Lチェンバー納入



10L試作機のフィールドケージ



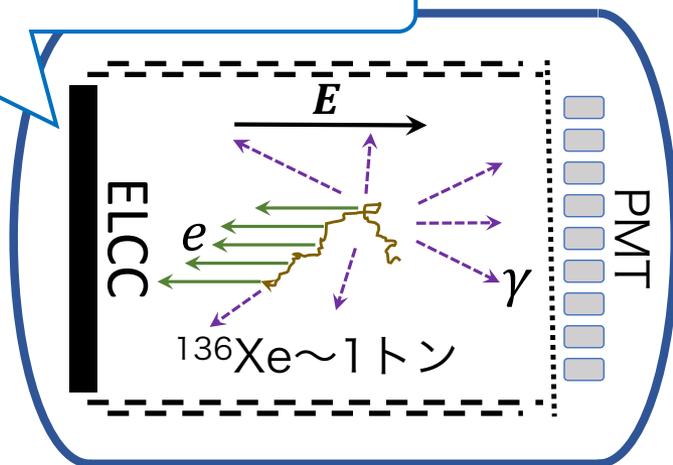
180L試作機のチェンバー

AXEL実験

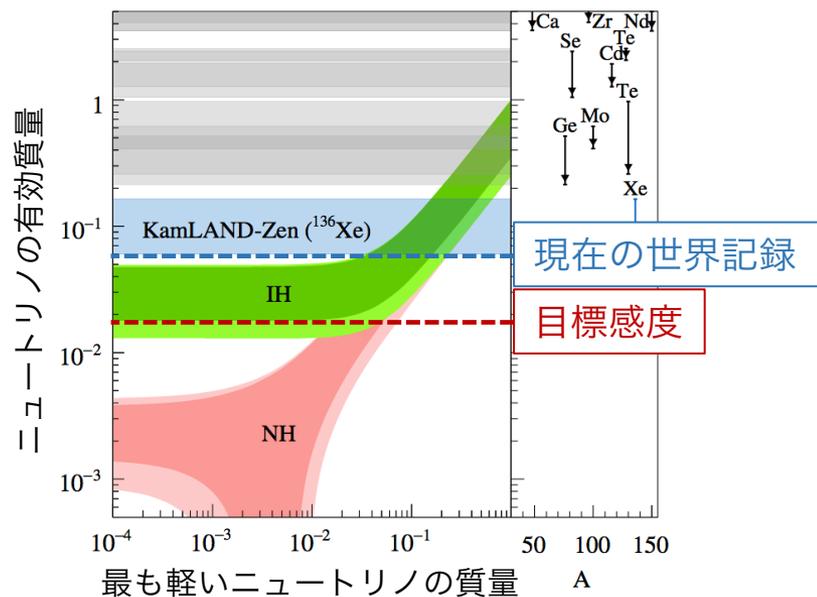
● 検出器概要

- 高圧キセノンガスTPC (崩壊核: ^{136}Xe)
 - 崩壊核の大質量化 (~1トン)
 - **高エネルギー分解能** (目標エネルギー分解能: FWHM 0.5 % @ 2458 keV)
 - 飛跡検出によるバックグラウンドの除去
- 目標感度: **20 meV** (ニュートリノの有効質量 $\propto T^{-1/2}$)

ここの構成要素をメインに話します



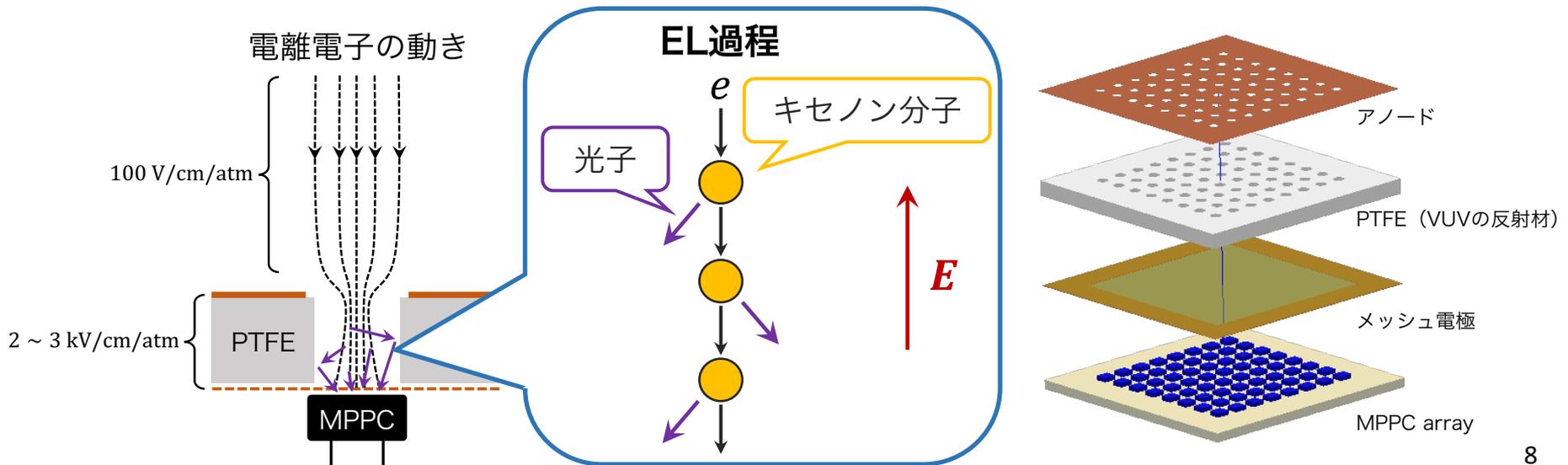
AXEL検出器の模式図



ELCC

● AXEL検出器内部の構成要素

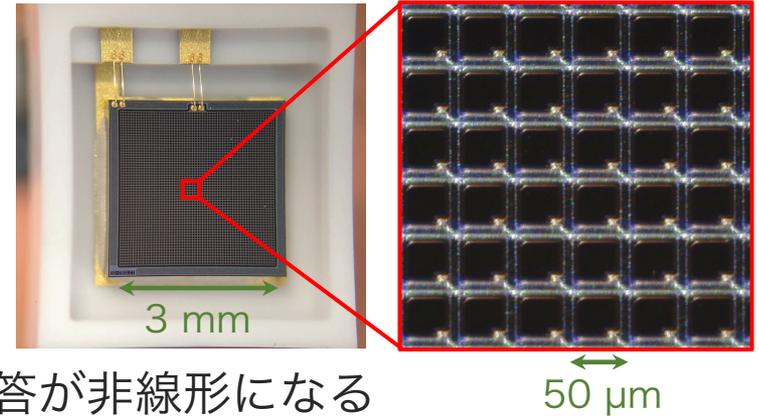
- ELCC: Electroluminescence Light Collection Cell
- Electroluminescence (EL) 過程を応用
 - ベータ線のエネルギーをゆらぎを小さく抑えた上で電気信号に変換できる
- 二次元状に配置された光検出器MPPCによるエネルギー測定と飛跡検出
- AXEL検出器が**高エネルギー分解能**を達成するには…
 - MPPCが**正確に光量を測定できること**が必須条件！



半導体光検出器MPPC

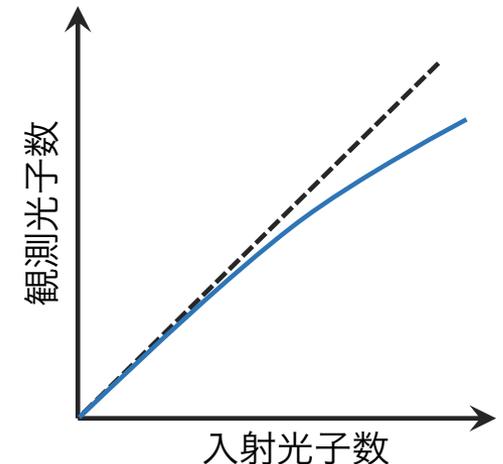
● 特徴

- APDとクエンチング抵抗を基本単位（ピクセル）
 - ピクセル数 N_{pix} の例：3600 個/MPPC
- 1光子に感度をもつ
- 比較的安価
- 光量に比例した信号（電荷）を出力
- 大光量下ではピクセル数の制限によって応答が非線形になる
 - AXEL検出器で予想される最大瞬間光量（1750 photons/50 ns）
 - あらかじめ非線形応答を測定しておけば補正可能 [2]



$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \tau / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$

N_{obs} : 観測光子数, N_{ref} : 参照光子数, τ : 回復時間,
 N_{pix} : MPPCのピクセル数, Δt : パルスの時間幅

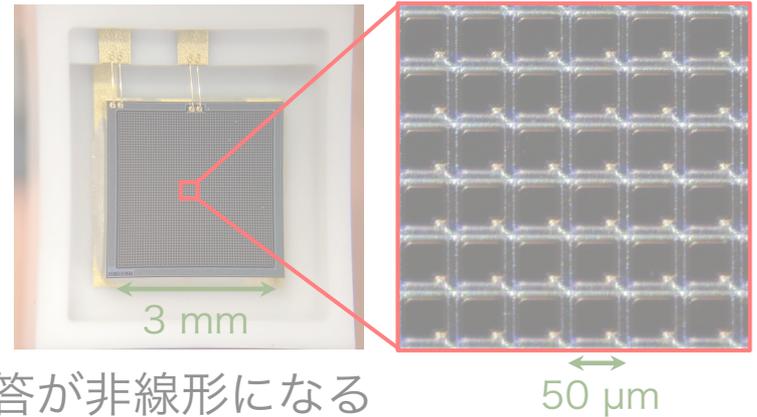


[2] 柳田沙緒里, 修士論文 AXEL実験における高エネルギー分解能を達成するためのMPPCおよび読み出し回路についての研究, 2016

半導体光検出器MPPC

● 特徴

- APDとクエンチング抵抗を基本単位（ピクセル）
 - ピクセル数 N_{pix} の例：3600 個/MPPC
- 1光子に感度をもつ
- 比較的安価
- 光量に比例した信号（電荷）を出力
- 大光量下ではピクセル数の制限によって応答が非線形になる

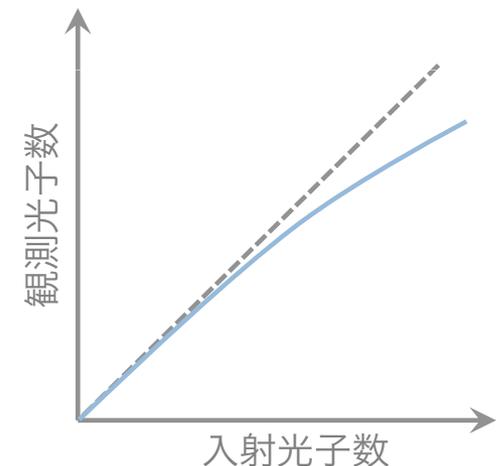


MPPCの非線形応答は回復時間 τ によって特徴付けられる (ns)

- あらかじめ非線形応答を測定しておけば補正可能 [2]

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \tau (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$

N_{obs} : 観測光子数, N_{ref} : 参照光子数, τ : 回復時間,
 N_{pix} : MPPCのピクセル数, Δt : パルスの時間幅



[2] 柳田沙緒里, 修士論文 AXEL実験における高エネルギー分解能を達成するためのMPPCおよび読み出し回路についての研究, 2016

AXEL10L試作機の現状

- ^{133}Ba ガンマ線源を用いた性能評価
 - 356 keVのピーク幅からエネルギー分解能を評価
 - 個々のMPPCの回復時間がわかっていなかった
 - $\tau = 89 \text{ ns}$ で一律補正

エネルギー分解能 (FWHM)

補正前	$\tau=89 \text{ ns}$ で一律補正
5.4%	3.1%

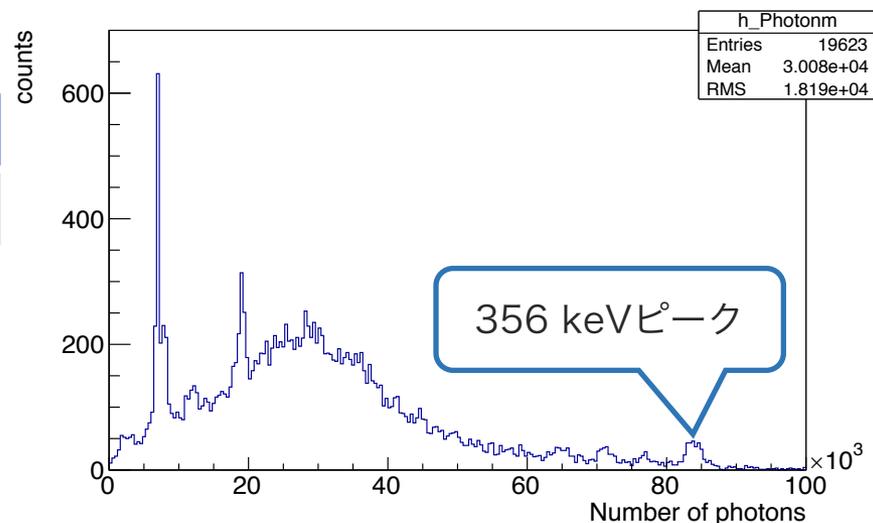
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊Q値換算：1.2% (FWHM)
 - 目標エネルギー分解能に対して不十分



個々のMPPCを補正することでエネルギー分解能が向上する可能性

→ 応答測定の実率化が必須

→ キャリブレーションシステム開発

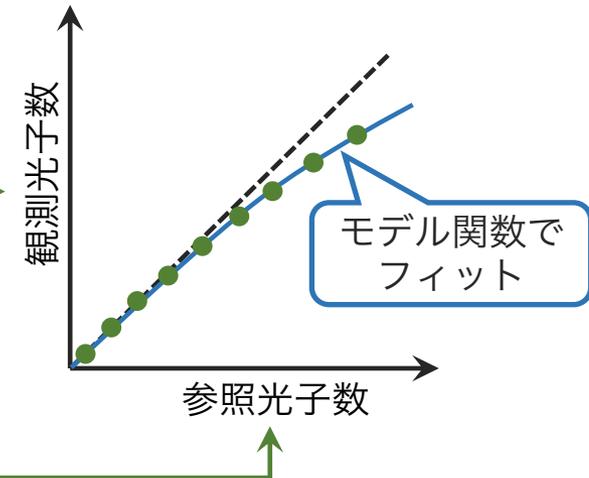
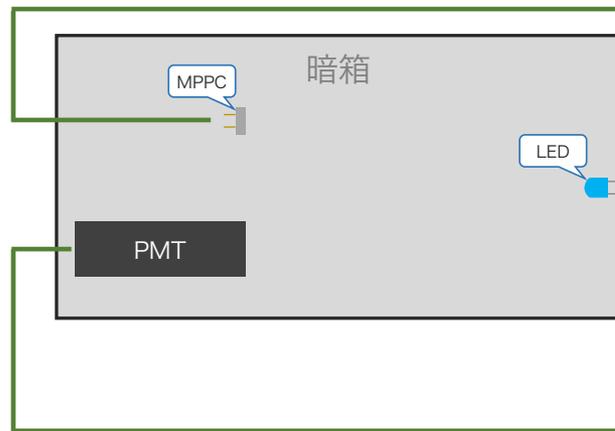


キャリブレーションシステム

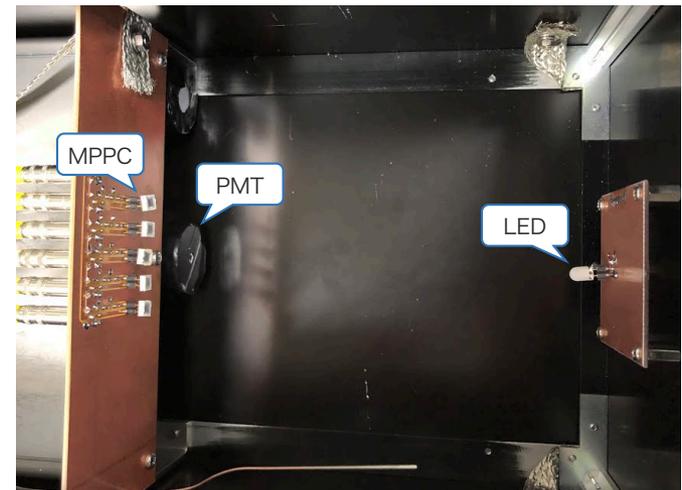
● 応答測定

- LEDをファンクションジェネレータでパルス状に光らせて非線形応答を測定

応答測定にかかる時間がネックに
~1 day/MPPC



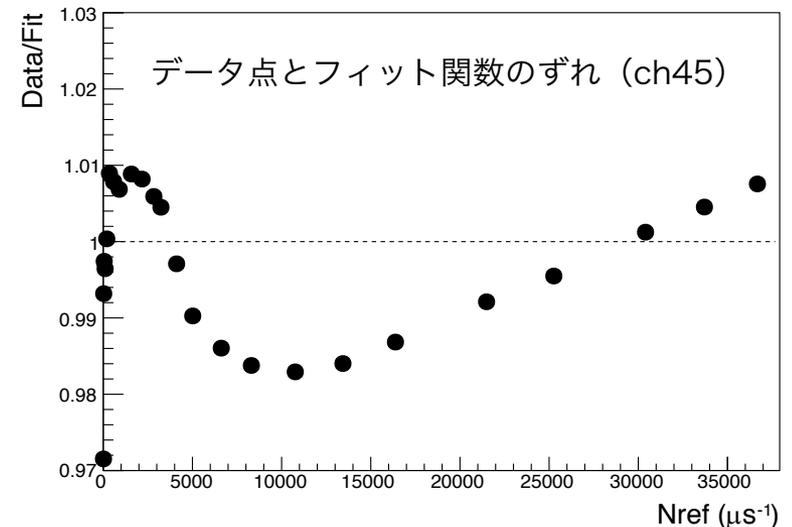
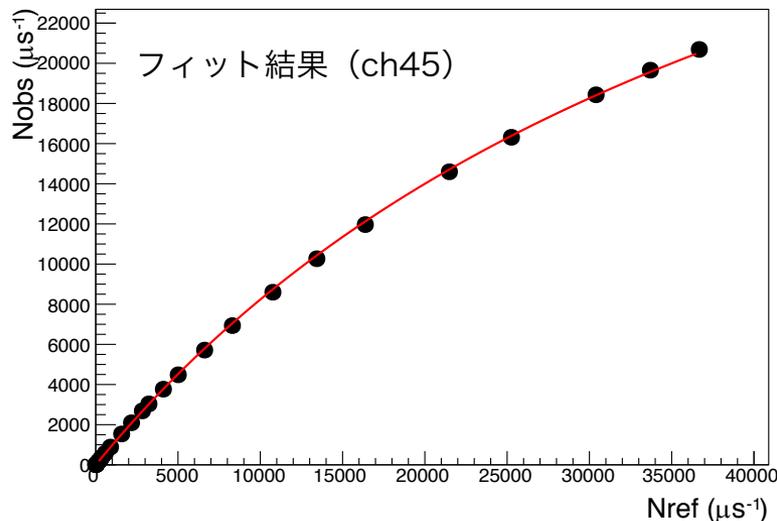
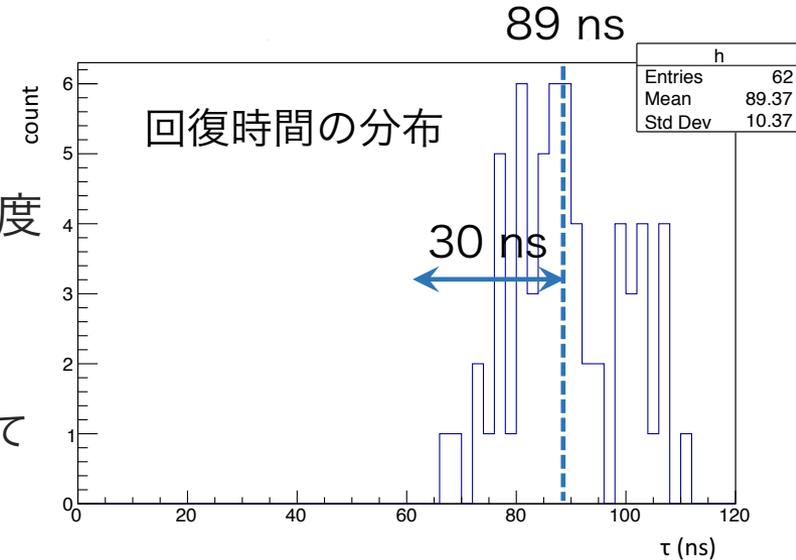
5ch同時測定 (×5倍)
+
MPPC電源部のレート耐性の強化 (×50倍)
+
応答測定の自動化
↓
応答測定にかかる時間を
1日/1ch→15分/5chに短縮



65ch分のMPPCの回復時間測定結果

● 回復時間の測定結果

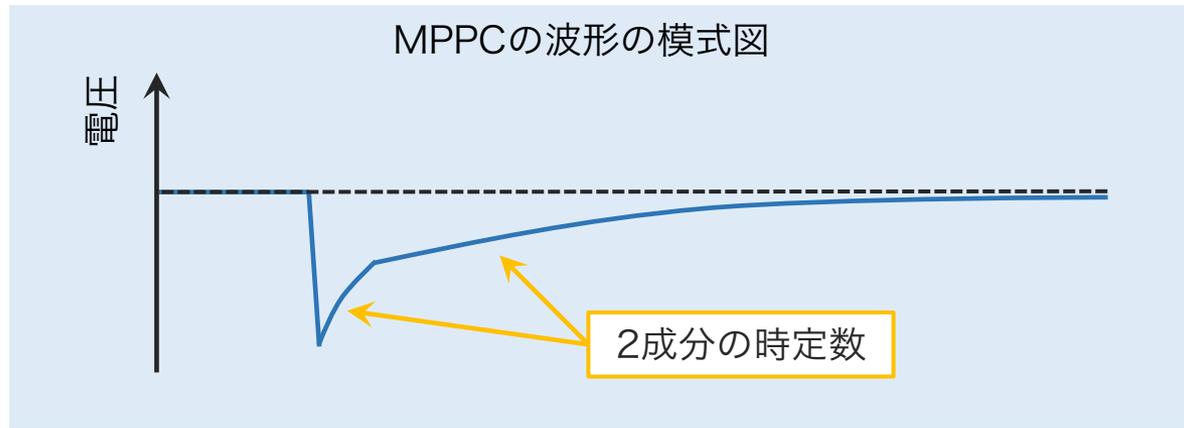
- 平均値89 nsを中心に30 ns程度の幅で分布
- データ点とフィット結果の間に最大で5%程度のずれ
 - 測定中に条件が変化？
 - モデル関数がMPPCの応答を十分に再現できていない可能性



応答モデル関数の修正

- 検討1：回復時間が2つのパラメータ τ_1 , τ_2 ($\tau_1 < \tau_2$) で表される場合
 - MPPCの波形の時定数には2成分あることが知られている [3]
 - 回復時間も2成分から構成されていることを考慮

$$N_{\text{obs}} = \frac{\alpha N_{\text{ref}}}{1 + \tau_1 / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}} + \frac{\beta N_{\text{ref}}}{1 + \tau_2 / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$



応答モデル関数の修正

● 検討2：出力波高がMPPCのゲインを低下させている場合

- MPPCのゲイン： $g = C\Delta V$

- 典型的な ΔV ：3~4 V

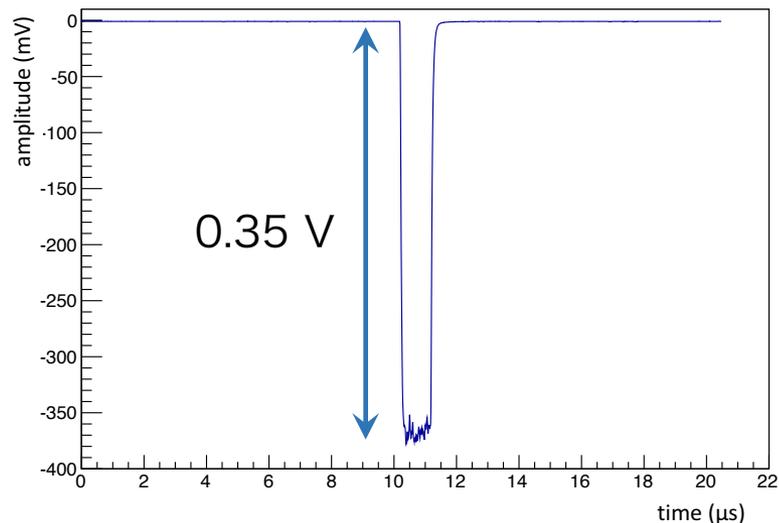
- 応答測定におけるMPPCの最大波高 v ：0.35 V

} 波高が ΔV の約10%

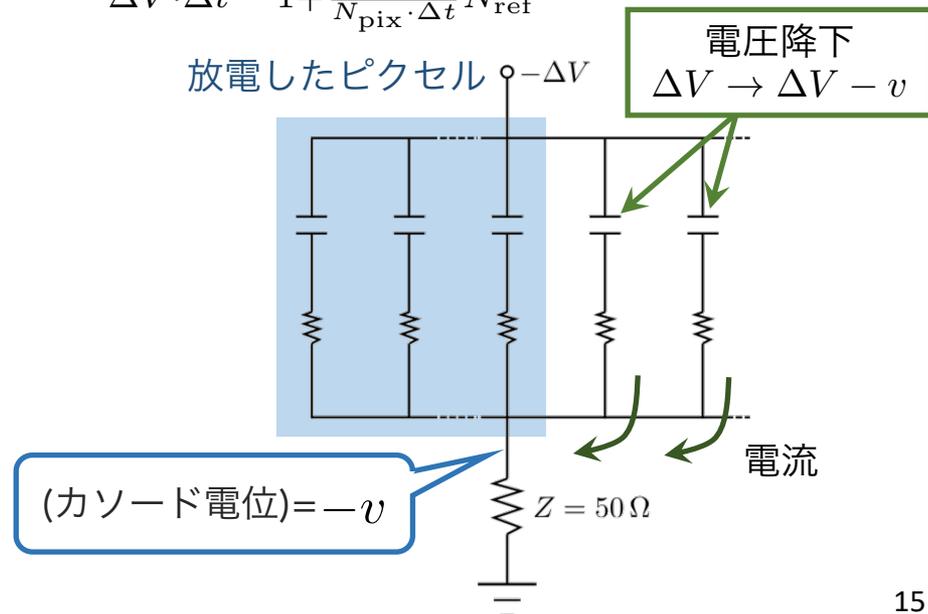
→MPPCの出力波高によってゲインが最大で10%低下

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{50g_0e}{\Delta V \cdot \Delta t} \cdot \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}}}$$

MPPCの出力波形の例



放電したピクセル $-\Delta V$



応答モデル関数の修正

- オリジナルモデル

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \tau / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$

オリジナルモデル

- 回復時間が2つのパラメータ τ_1 , τ_2 ($\tau_1 < \tau_2$) で表される場合

$$N_{\text{obs}} = \frac{\alpha N_{\text{ref}}}{1 + \tau_1 / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}} + \frac{\beta N_{\text{ref}}}{1 + \tau_2 / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$

2パラメータ補正モデル

- 出力波高がMPPCのゲインを低下させている場合

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{50g_0 e}{\Delta V \cdot \Delta t} \cdot \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}}}$$

ΔV 補正モデル

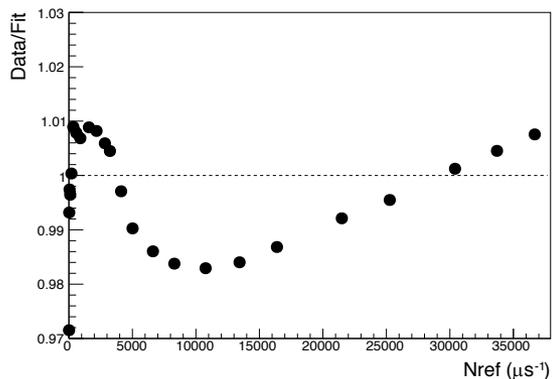
- 上の両方を考慮

$$N_{\text{obs}} = \frac{\alpha N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau_1}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{50g_0 e}{\Delta V \cdot \Delta t} \cdot \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau_1}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}}} + \frac{\beta N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau_2}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{50g_0 e}{\Delta V \cdot \Delta t} \cdot \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \frac{\tau_2}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t} N_{\text{ref}}}}$$

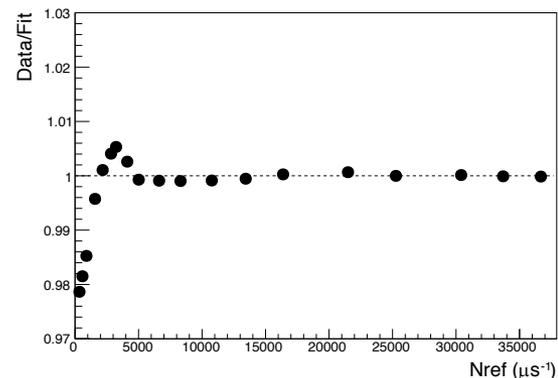
2パラメータ・ ΔV 補正モデル

各補正モデルの比較

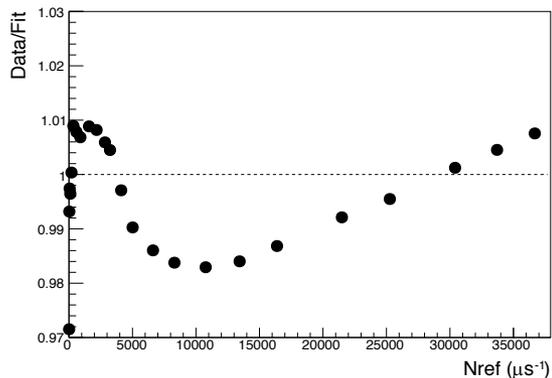
オリジナルモデル (ch45)



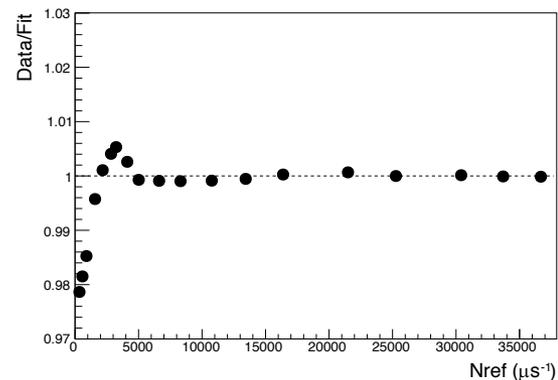
2パラメータ補正モデル (ch45)



ΔV 補正モデル (ch45)



2パラメータ・ ΔV 補正モデル (ch45)



- 2パラメータ補正モデルで補正した際にフィット結果が改善

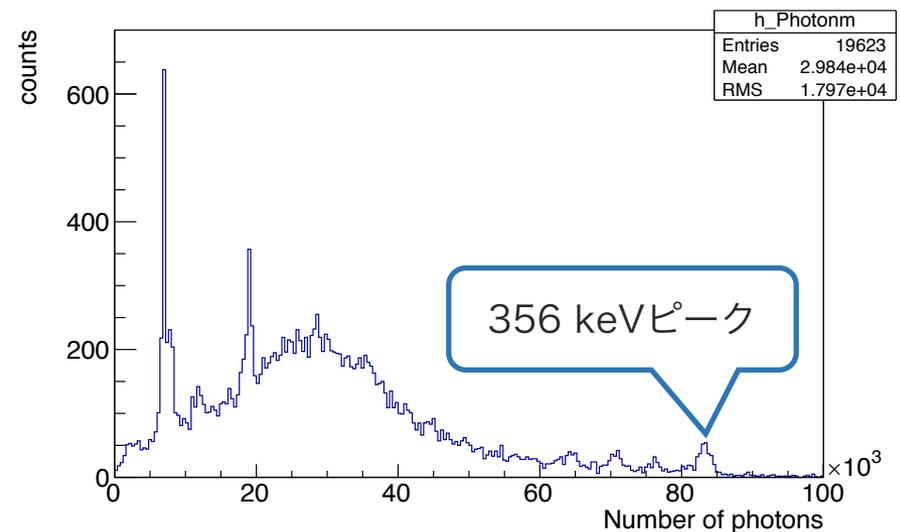
回復時間補正の適用

- ^{133}Ba ガンマ線源を用いた性能評価の解析に回復時間補正を適用
 - 356 keVのピーク幅からエネルギー分解能を評価

エネルギー分解能 (FWHM)

補正前	オリジナル一律 (89 ns)	オリジナル	2パラメータ
5.4%	3.1%	2.9%	2.5%

- 2パラメータ補正モデルを使って補正した際にもっとも良いエネルギー分解能が得られた
 - $0\nu\beta\beta$ 崩壊Q値換算：1.0% (FWHM)
 - ただし、目標エネルギー分解能0.5% (FWHM) には至っていない
 - MPPCの非線形応答以外の原因も含めて調査中



まとめ

- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のためにAXEL検出器を開発している
- 高エネルギー分解能を達成するには光検出器MPPCの非線形応答の理解が重要
- MPPCの非線形応答測定にかかる時間が問題になっていた
- 個々のMPPCの非線形応答を効率的に測定するためにキャリブレーションシステムを開発した
- 応答測定にかかる時間を1日/1chから15分/5ch程度にまで短縮した
- MPPCの応答をより正確に再現するために応答モデルの修正を行った結果、2パラメータ補正モデルでフィット結果の改善が見られた
- 2パラメータ補正モデルによる回復時間補正を適用した結果、356 keVのガンマ線のエネルギー分解能 (FWHM) が5.4%から2.5%に改善した

Back Up

回復時間を用いた非線形応答の補正

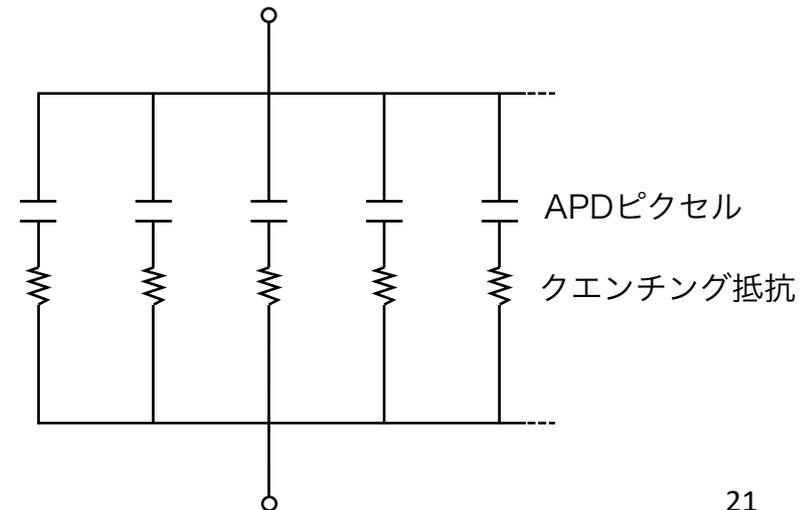
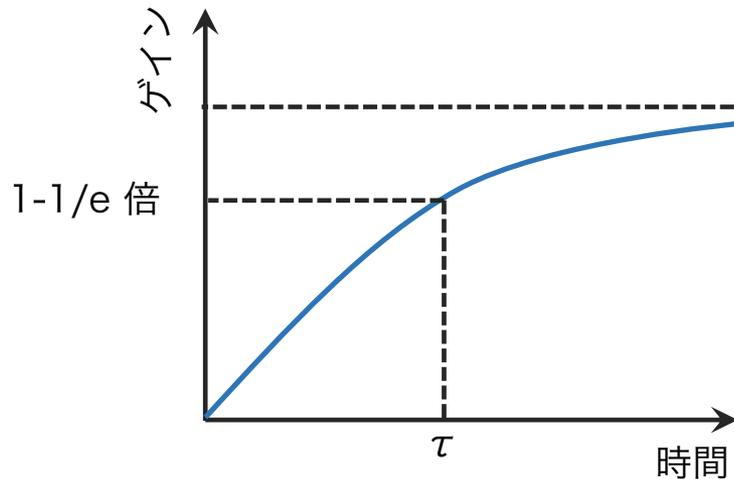
● 非線形応答のモデル関数

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{ref}}}{1 + \tau / (N_{\text{pix}} \cdot \Delta t) N_{\text{ref}}}$$

(N_{obs} : 観測光子数, N_{ref} : 参照光子数, τ : 回復時間, N_{pix} : MPPCのピクセル数, Δt : パルスの時間幅)

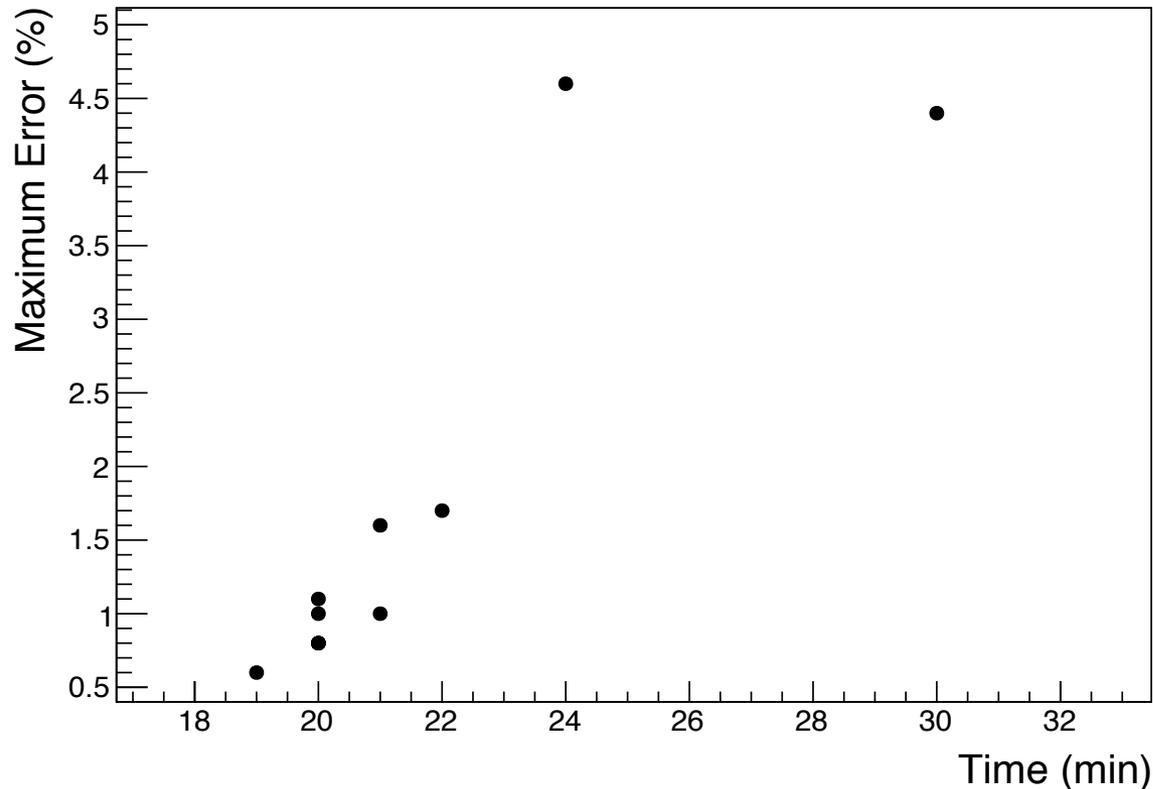
● 回復時間 τ

- 光子の入射によってMPPCのピクセルのゲインがゼロになってから元の $(1-1/e)$ 倍にまで回復するのにかかる時間 (定義)
- MPPCの充放電現象はAPDをコンデンサに置き換えることでRC回路の充放電現象として理解



測定時間とずれの関係

- 測定時間が長くなるとデータ点とフィット関数のずれが大きくなる傾向が見られた



測定時間を変えて測定した結果

● 測定時間を変えて測定

- 条件1：15分間
- 条件2：約12時間
- 温度変化： $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$

