



AXEL実験：大型試作機の511keV ガンマ線によるエネルギー分解能の 評価

A京都大学 理学研究科
博士後期課程 A潘 晟

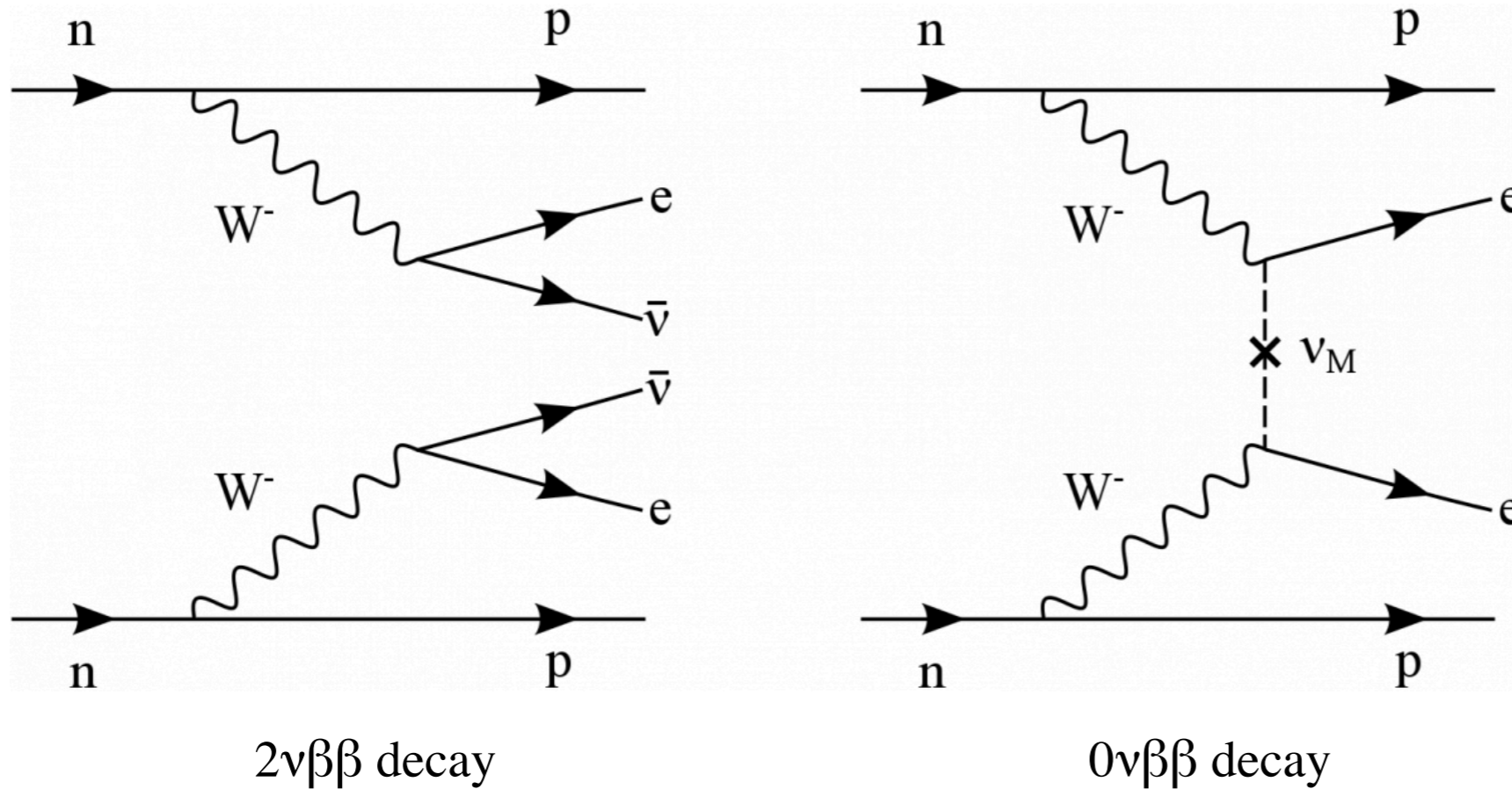
A市川温子、A中家剛、A木河達也、D中村輝石、A小原脩平、A吉田将、A中村和広、A菅島文悟
A廣瀬昌憲、B関谷洋之、B中島康博、C上島考太、D身内賢太郎、E南野彰宏、F坂下健、F中平武、G岩下芳久

B 東京大学 宇宙線研究所、C 東北大学 ニュートリノ科学研究センター、D 神戸大学 粒子物理学研究室
E 横浜国立大学 知能物理工学科、F KEK

第75回 年次大会

Introduction : Neutrinoless Double Beta Decay ($0\nu\beta\beta$ decay)

It occurs only if the neutrino has Majorana mass term

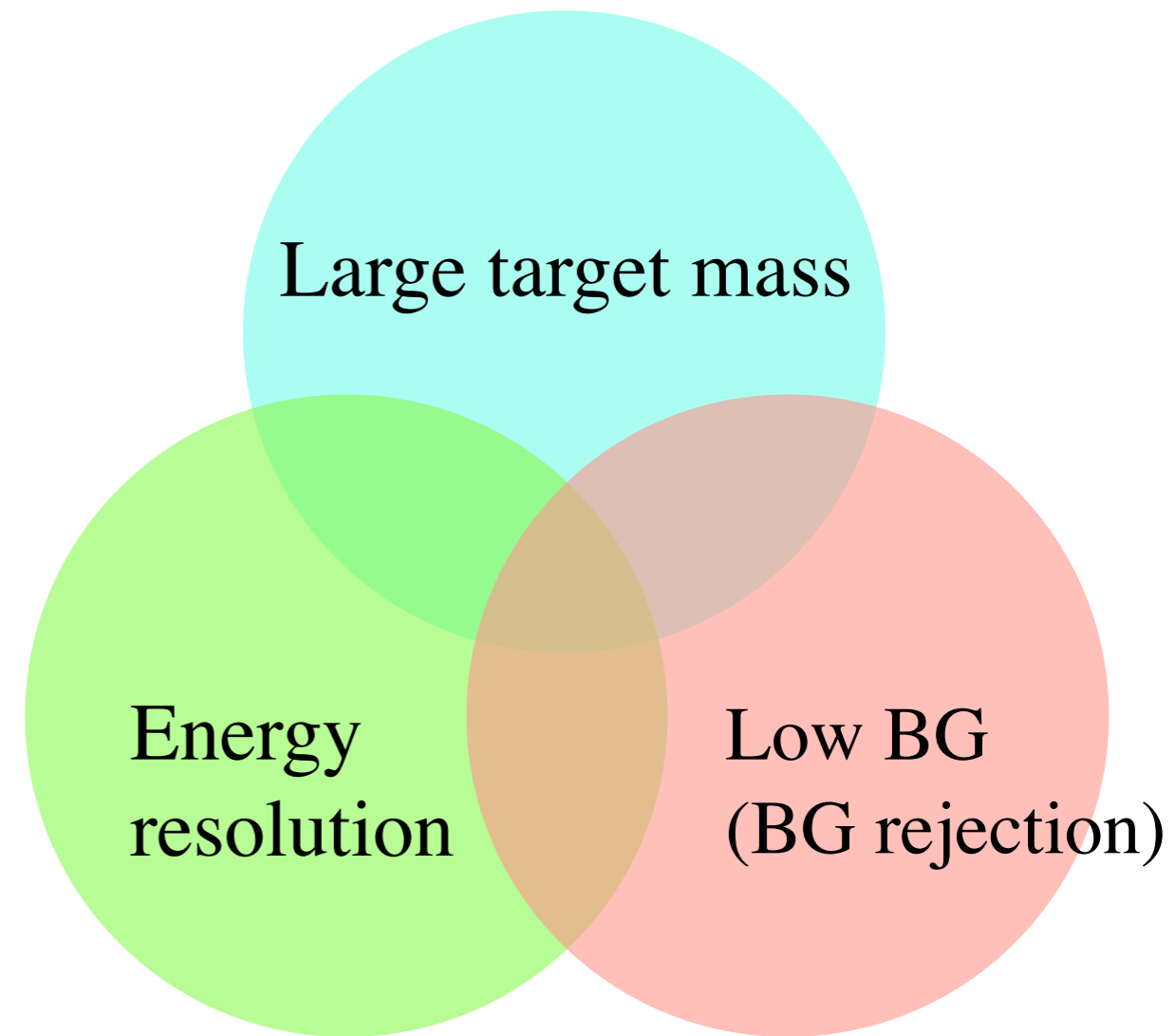
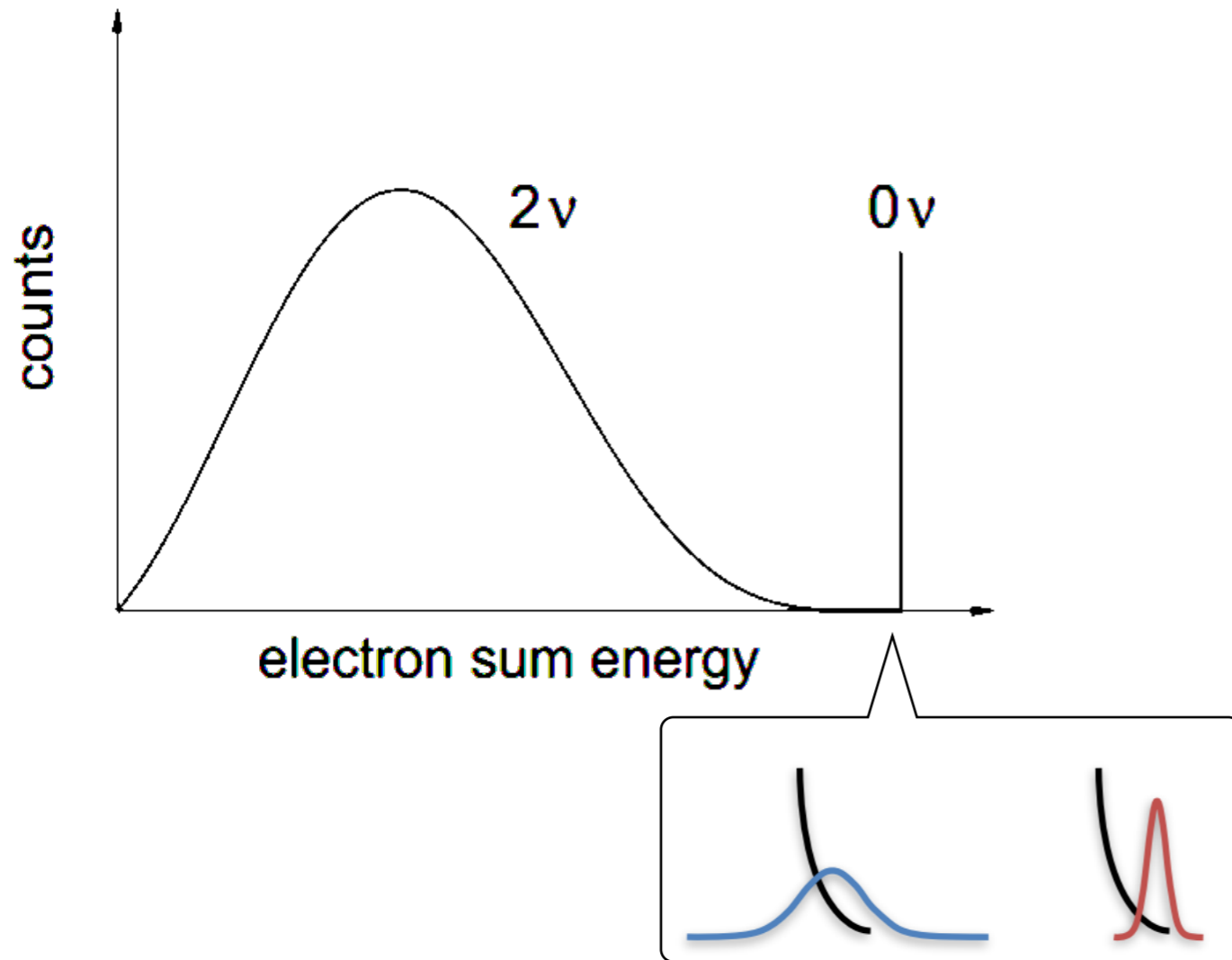


If the neutrino is Majorana

- naturally explains the smallness of the neutrino mass
- One of the conditions of Leptogenesis scenario

Introduction : Neutrinoless Double Beta Decay ($0\nu\beta\beta$ decay)

To discover $0\nu\beta\beta$ decay



上記の要求を満たす検出器の候補：

High pressure xenon gas time projection chamber (TPC)

with Electroluminescence mode

1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

3. まとめ

1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

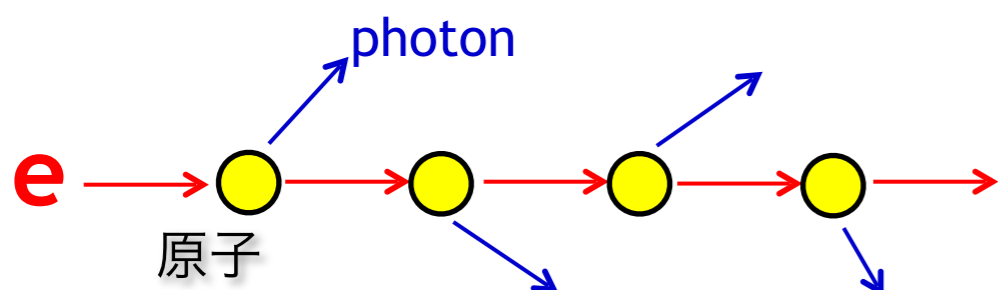
3. まとめ

AXEL -A Xenon ElectroLuminescence-

高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ decay search

電離信号の読み出し

- エレクトロルミネッセンス(EL)過程



掛けた電場に比例して増幅率が増加

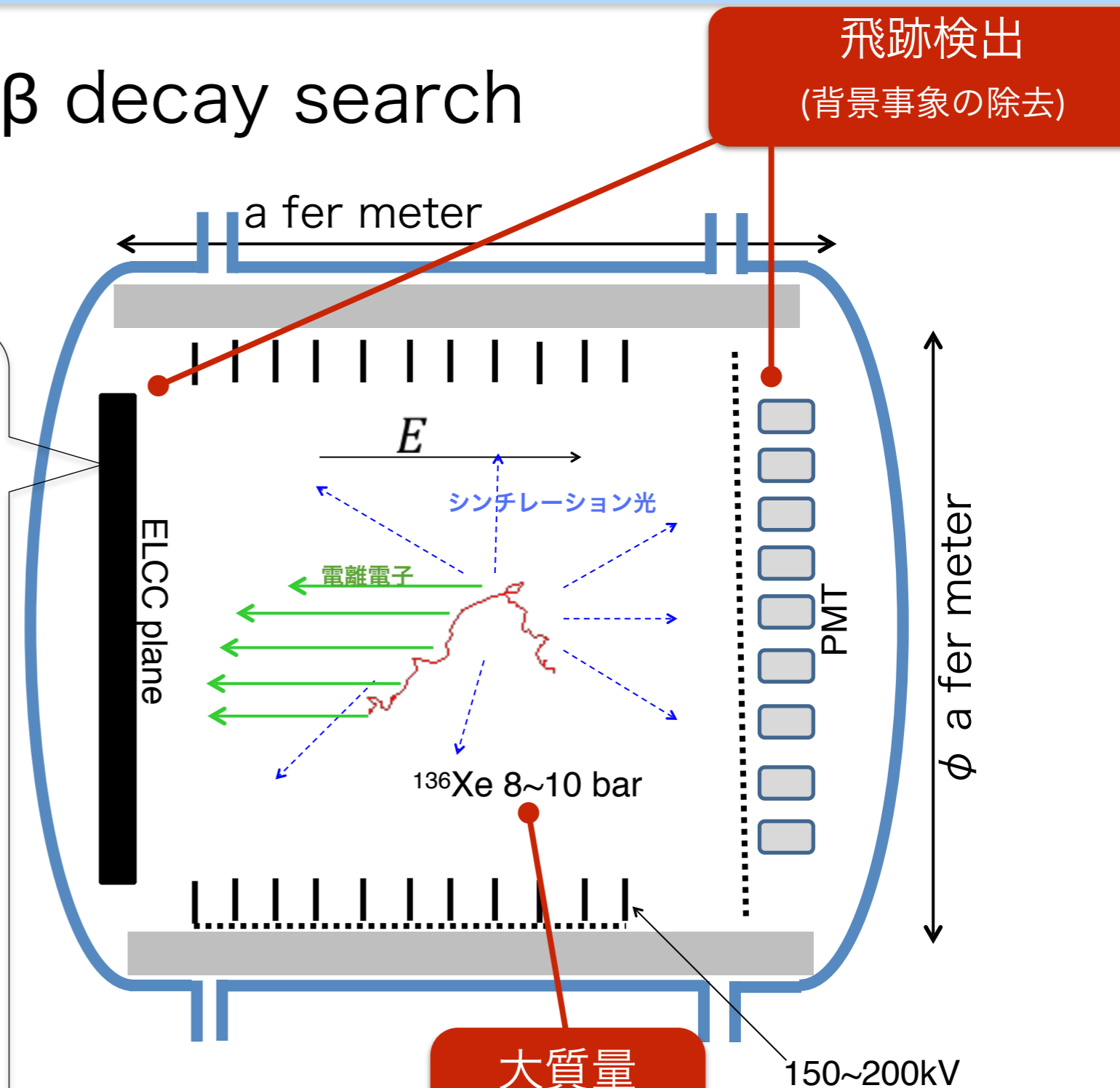
指数関数的増幅過程を伴わない

-> 増幅揺らぎが小さい

読み出し機構の詳細は次頁

高エネルギー分解能

-> 目標 : 0.5%FWHM @ Q値



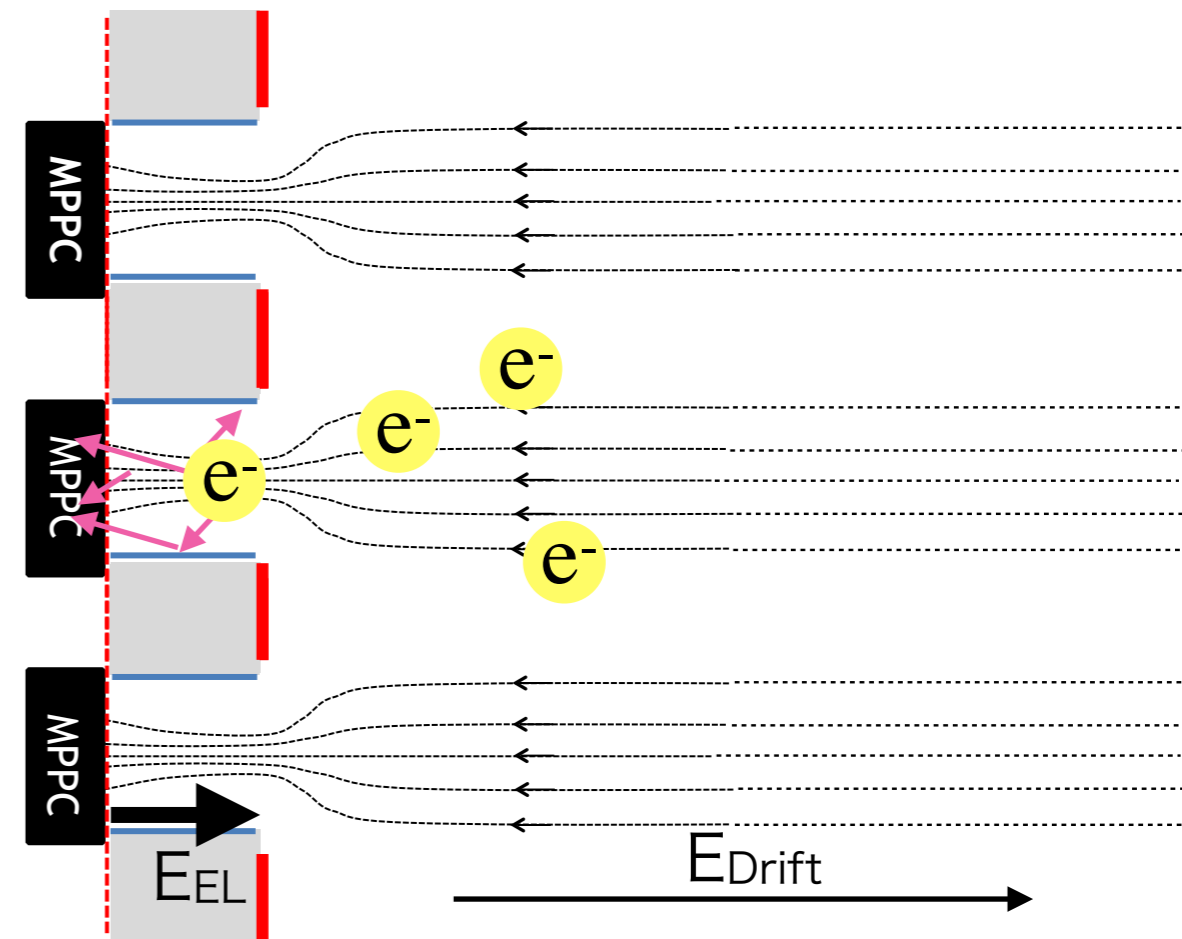
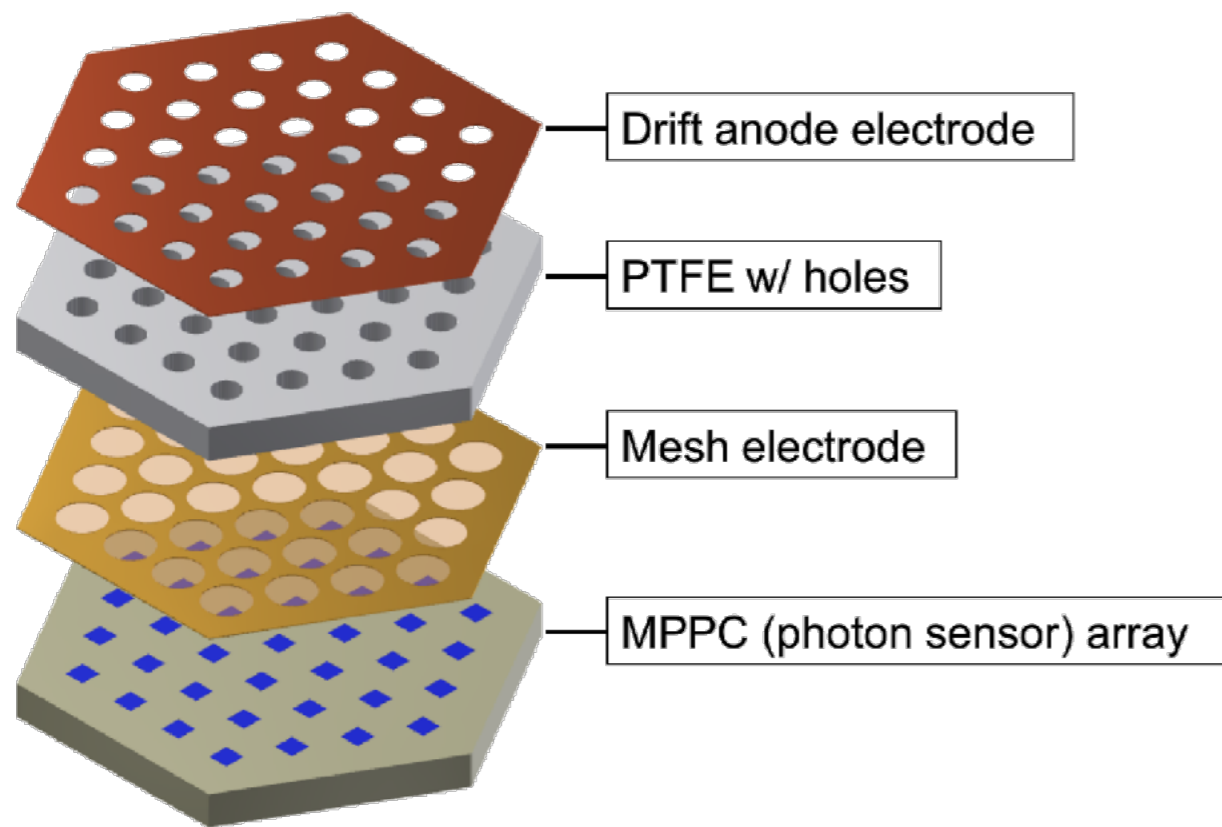
大質量

-> 約1トンの高圧 ^{136}Xe ガス

AXEL -A Xenon ElectroLuminescence-

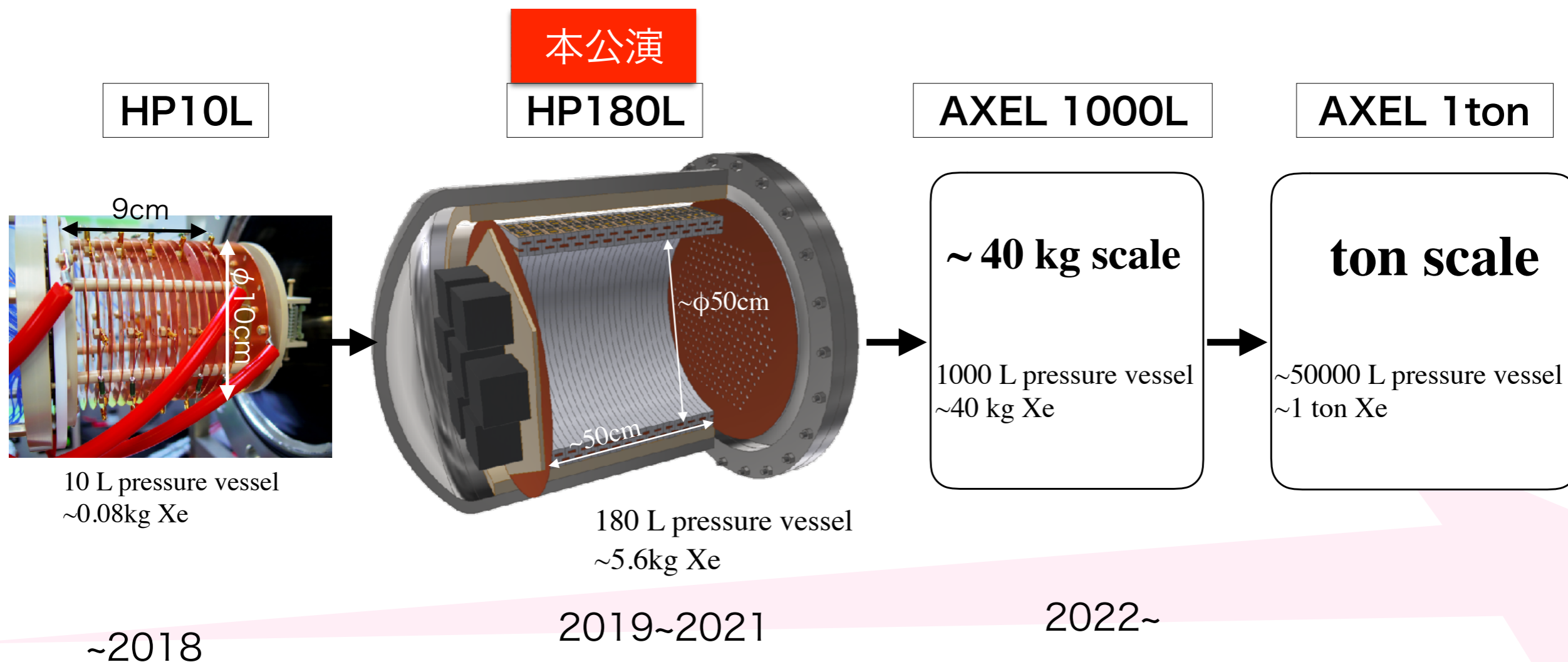
Electroluminescence Light Collection Cell : ELCC

- セル内に電子を引き込んで高電場によってEL光を発生
- 光量を測定してエネルギー情報、ヒットパターンからトラックを再構成
- PTFE bodyを骨格とする強固な造りなので、大型化が容易



Ionization electrons are collected into cells if $E_{EL} > E_{Drift}$, And converted into EL light

- 10L級 試作機：ELCCの原理実証、検出器コンセプトの証明→ **done (122keV, 356keV)**
- 180L級 試作機：大型化の技術獲得、高いエネルギー(~2.4MeV)での性能評価、BG調査
- 1000L級 検出器：物理探索、~40 kg ^{136}Xe enriched xenon、world record
- 1 ton級 検出器：Inverted mass orderingをsweep out



1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

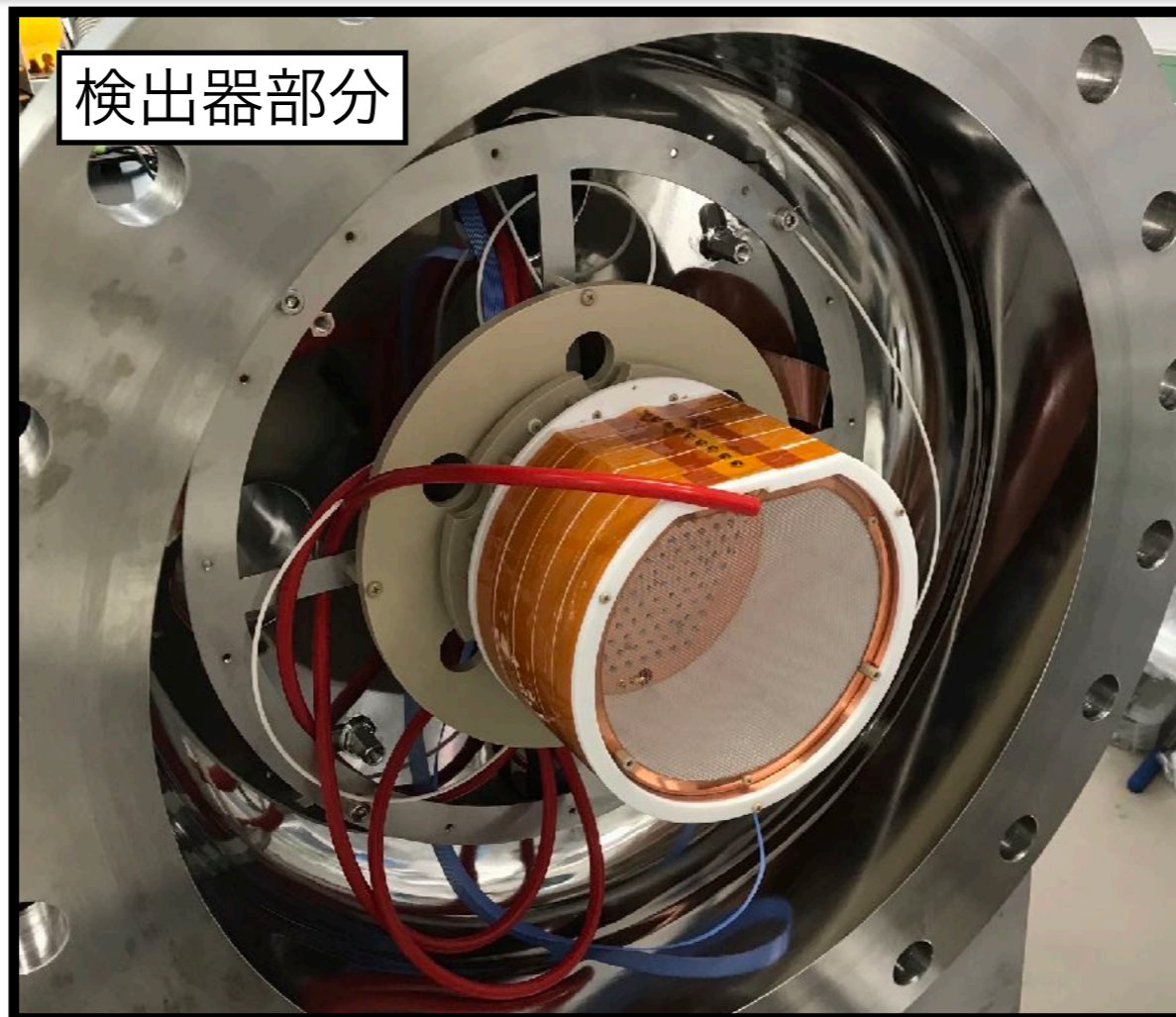
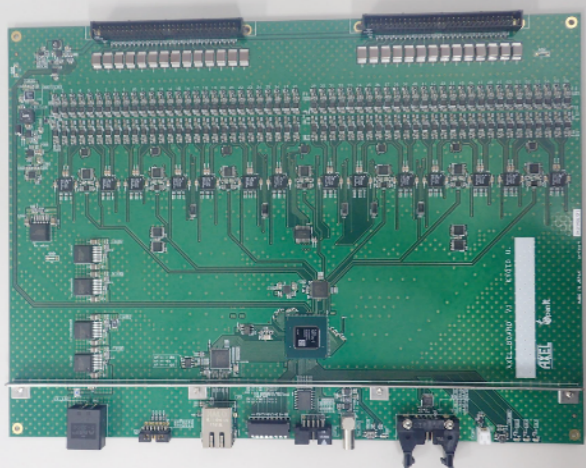
3. まとめ

AXEL試作機

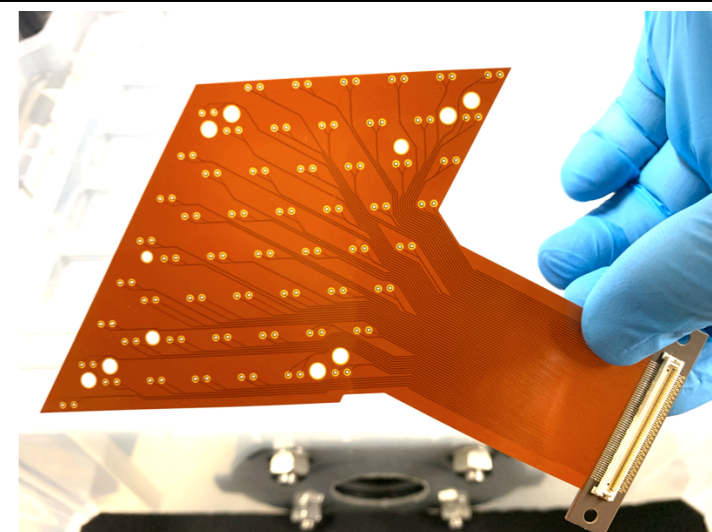
- 180L試作機
- 1st phase

データ取得用回路

ref: arXiv:2001.02104

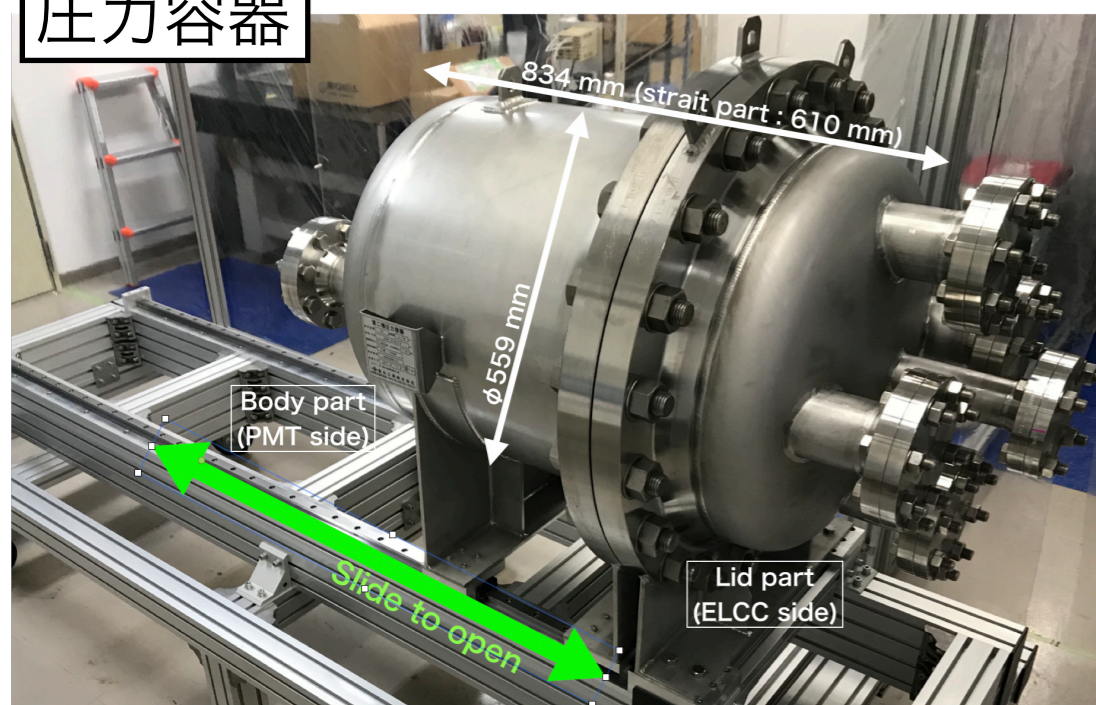


Flexible Printed Circuit

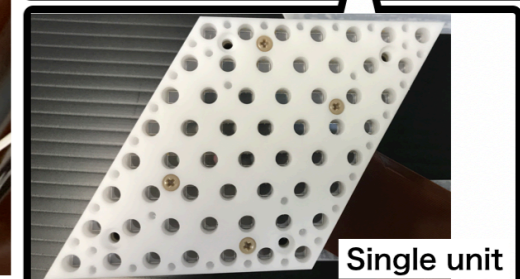
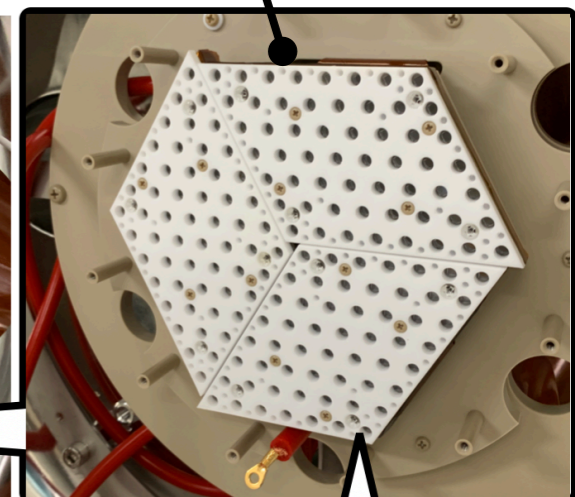
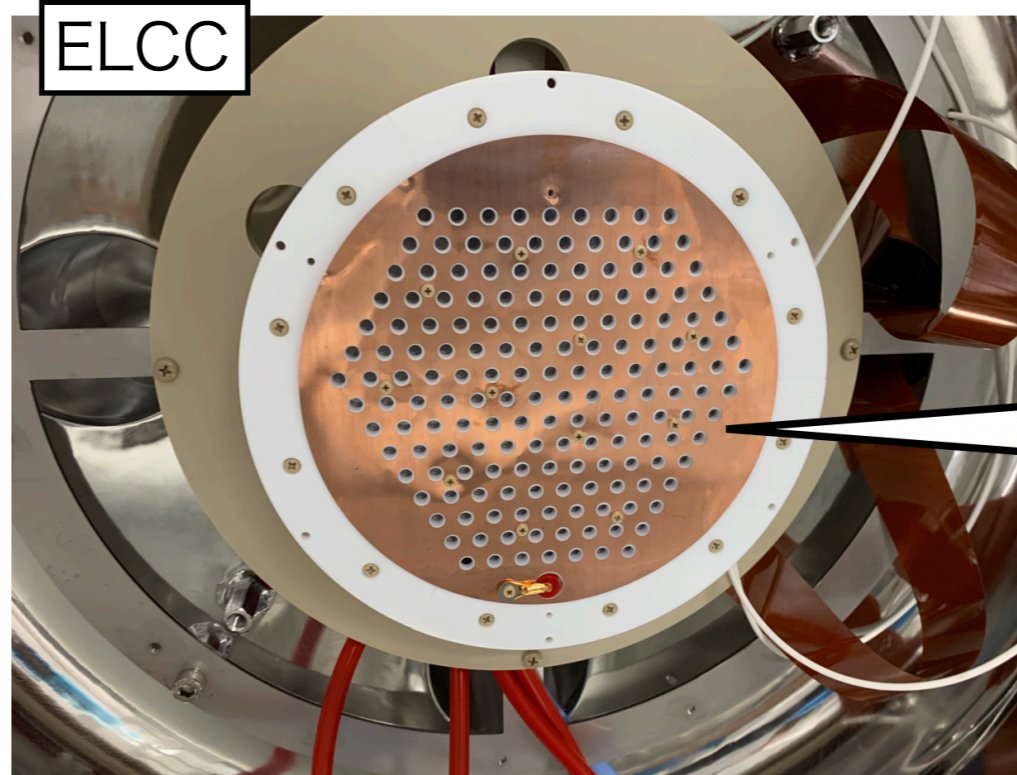


1ユニット: 56chの組み立て式
→ 大型化(多チャンネル化)が容易
(1st phaseは3ユニット: 168ch)

圧力容器



ELCC



1. AXEL実験

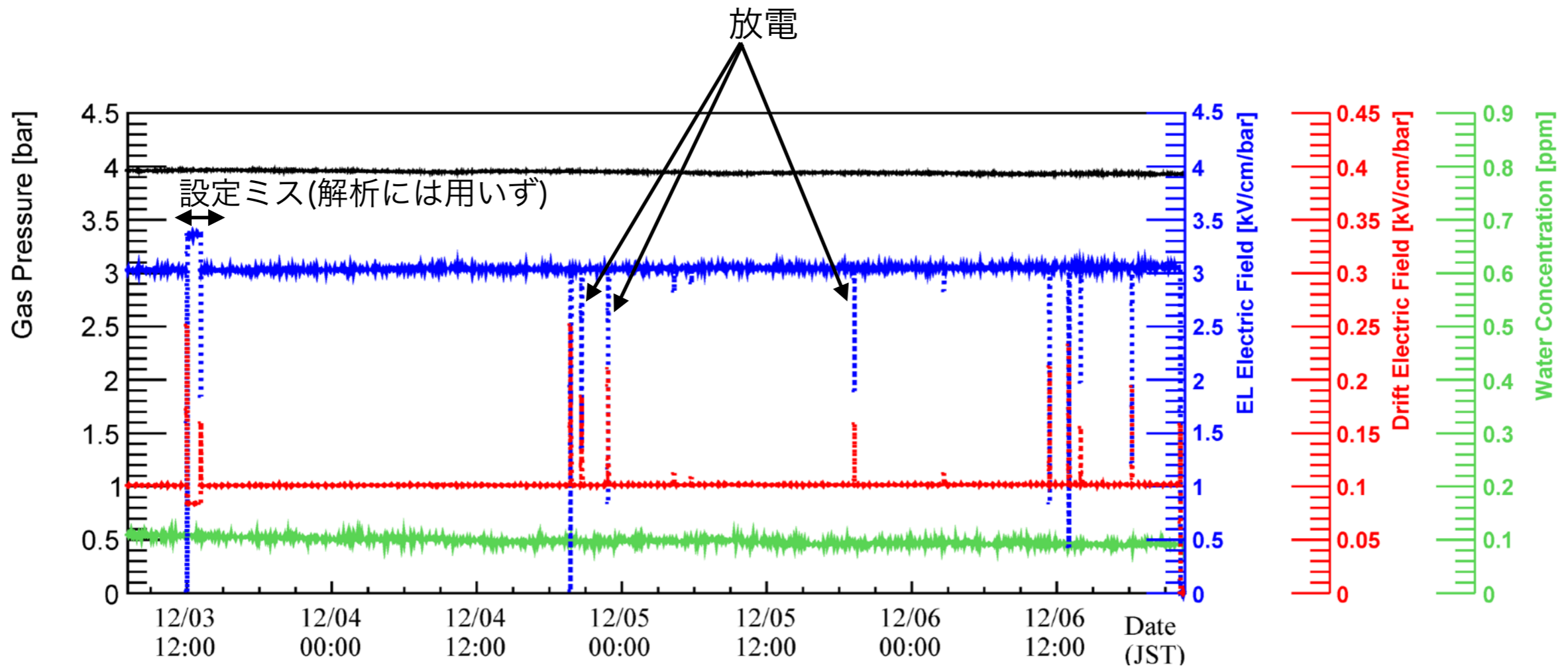
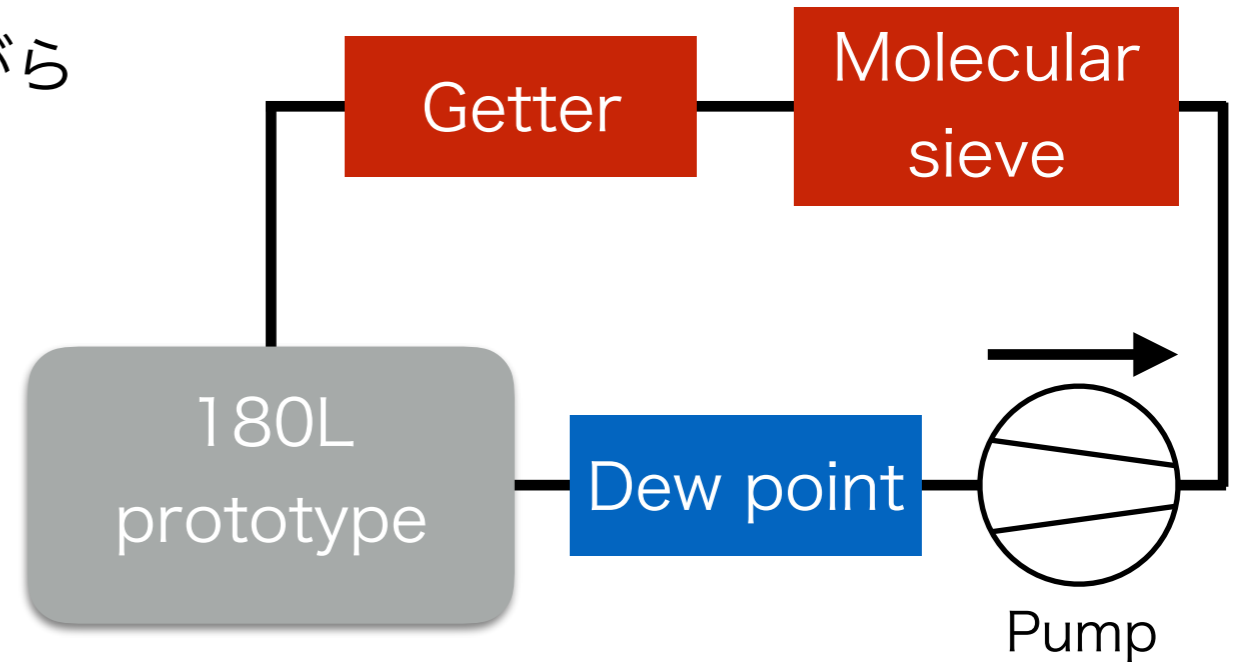
2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

3. まとめ

AXEL試作機：データ取得

- 4気圧のxenonを導入、循環・純化を行いながらデータ取得
- ^{22}Na を圧力容器外部に設置 (511keV γ 線)
- 圧力は安定、露点は僅かに下がっている
- 高電圧は数回の放電以外は安定
- データはDec, 2019に4日間取得



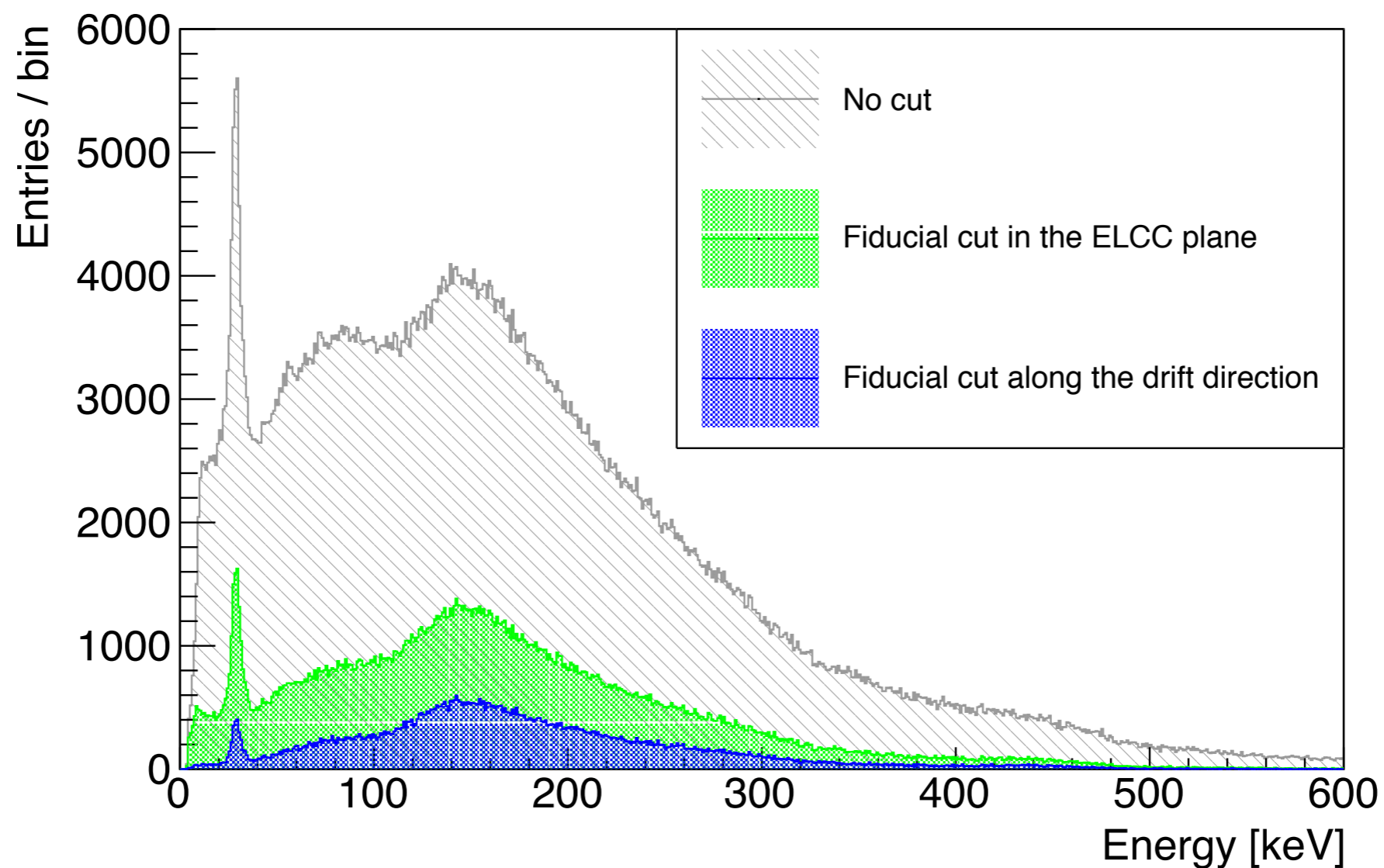
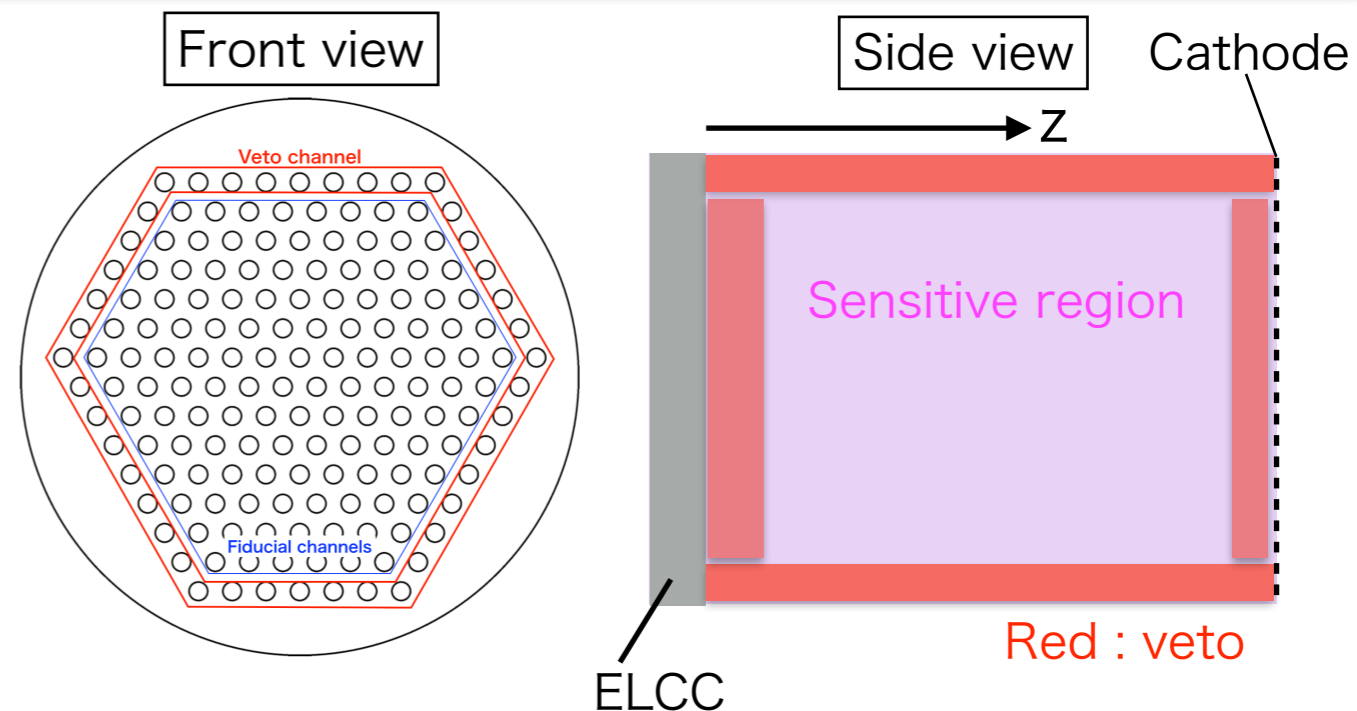
1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

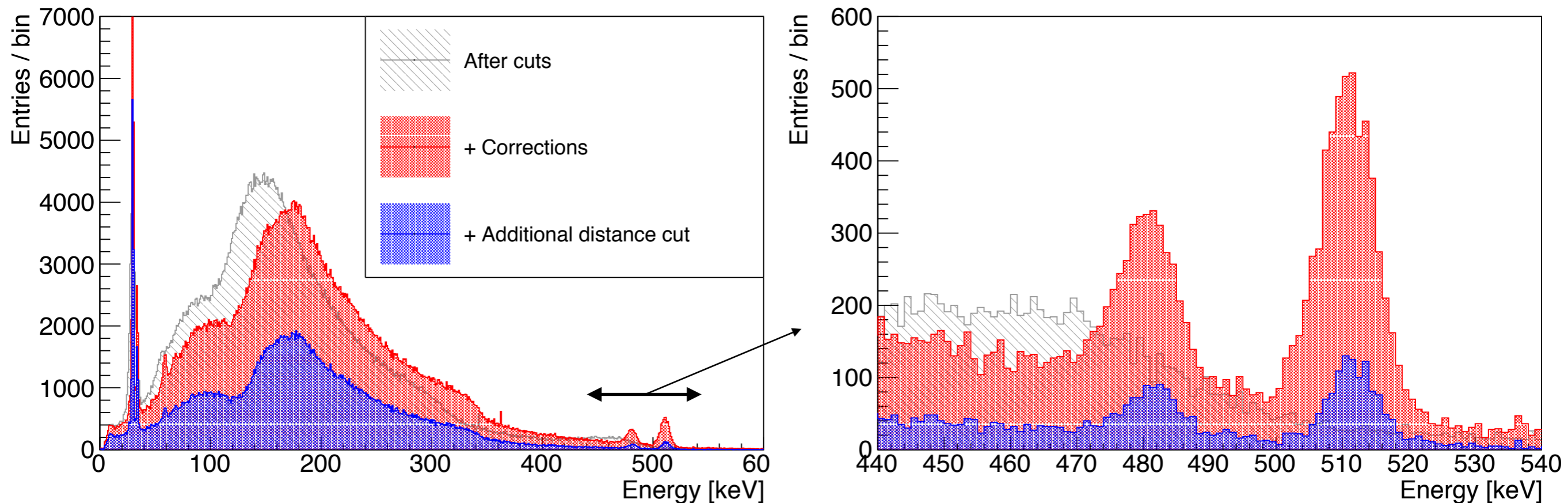
- データ取得
- 解析
- 性能評価

3. まとめ

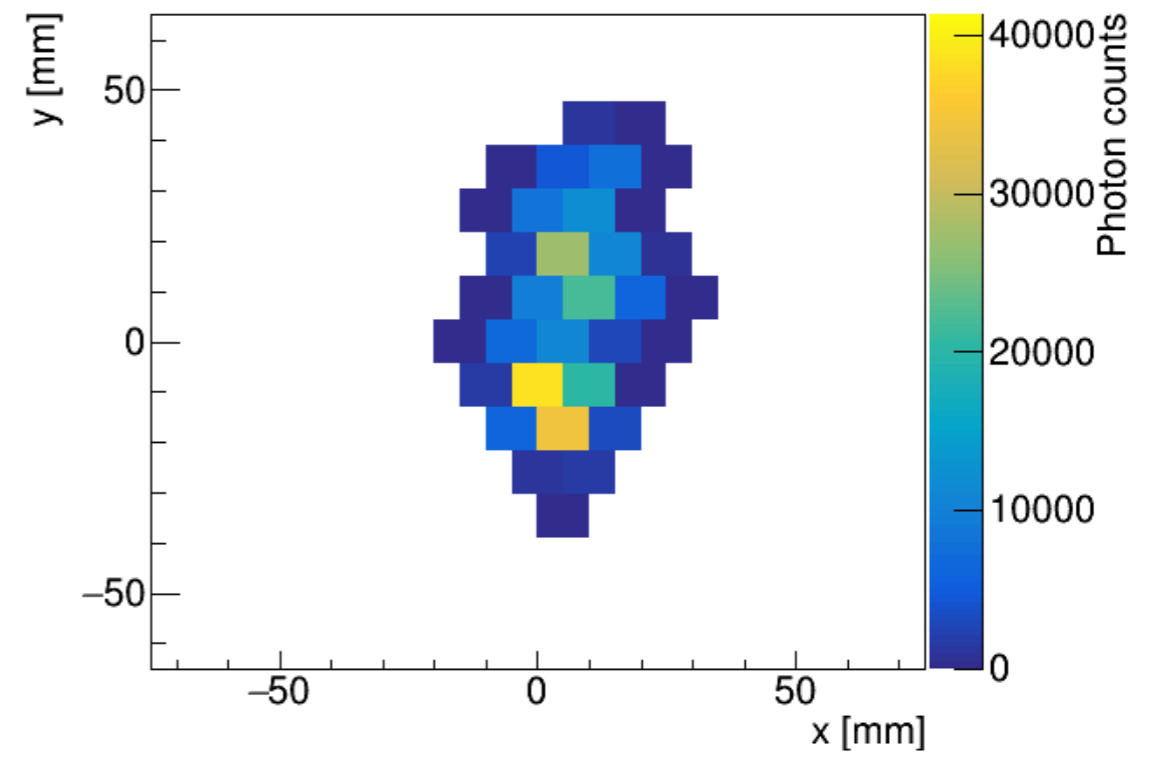
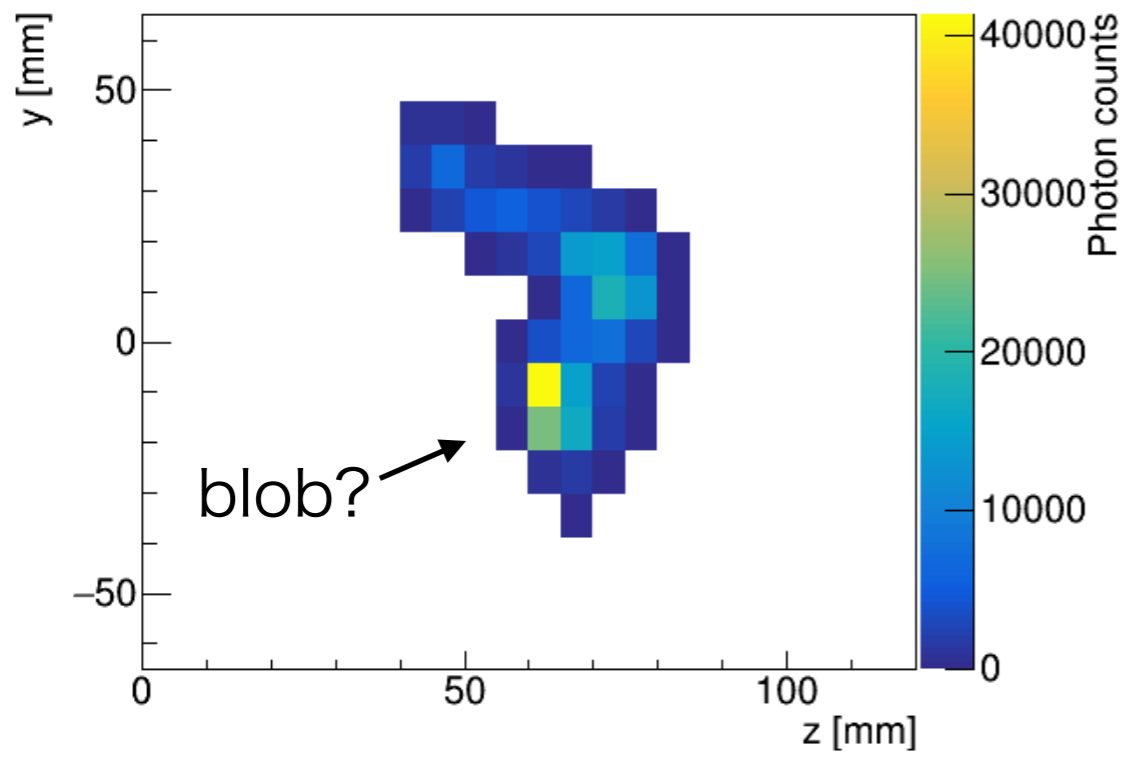
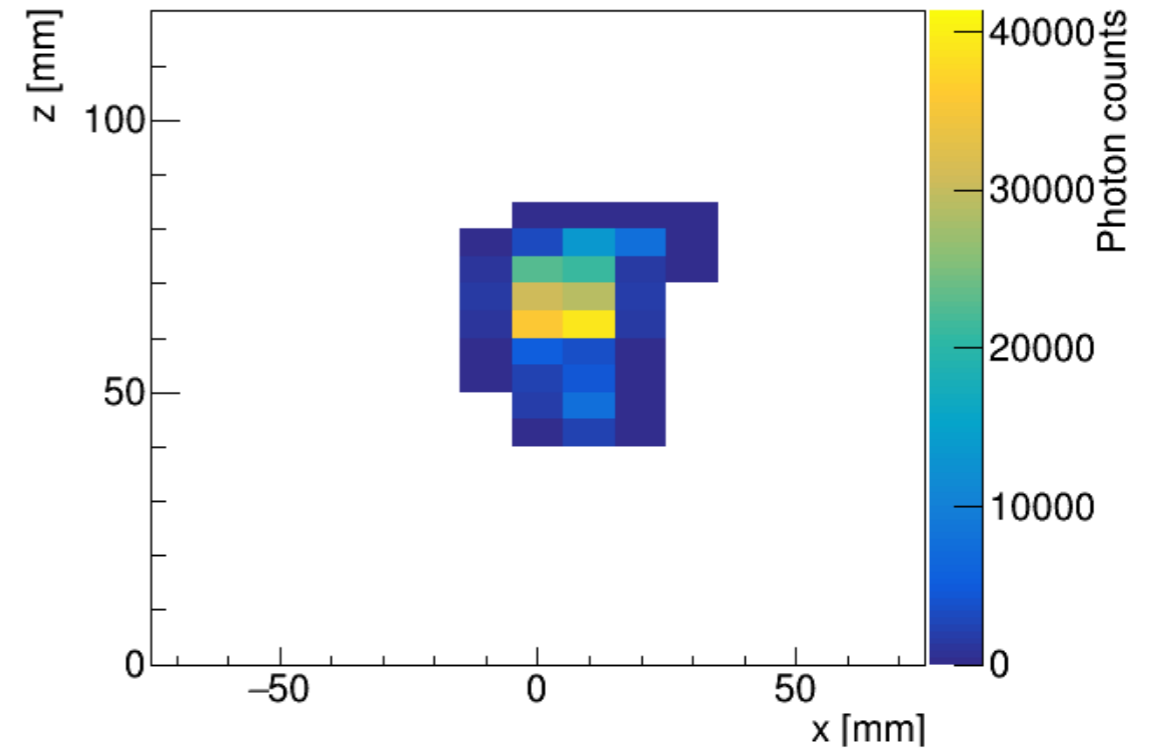
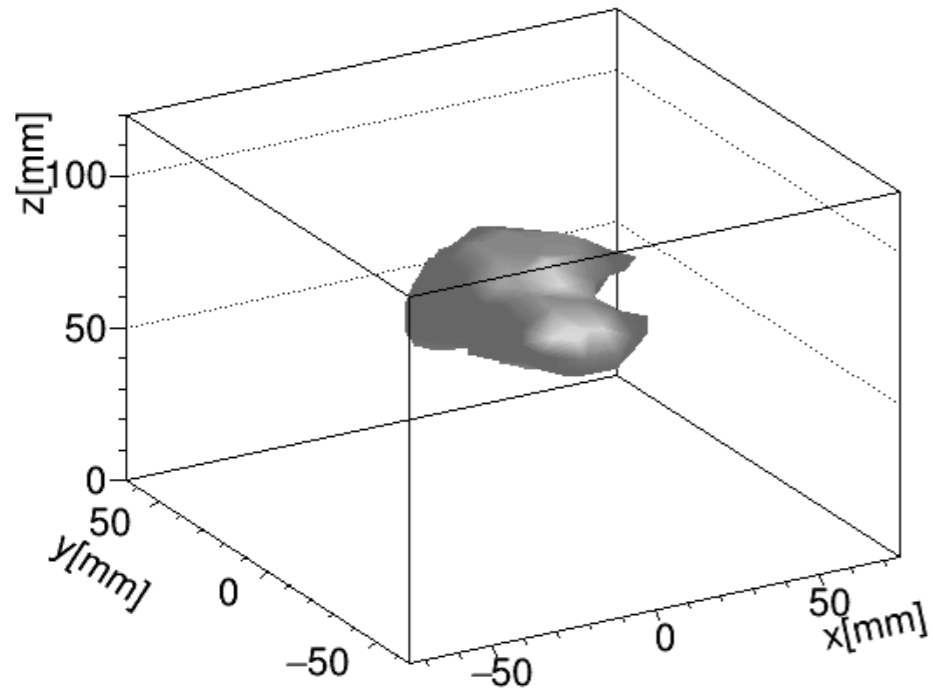
- Fiducial cut : 最外層のchannelをveto
Drift方向もfully contained
を要求



- 補正を適用
 - cell毎のEL gainを30keVピークを用いてキャリブレーション
 - MPPCのnon-linearityを補正
 - 光量の時間依存性を補正
 - 光量のz位置依存性を補正
- 511keVピークとキセノンの特性X線がエスケープしたピーク(~480keV)が見える
- ELCC付近の事象は位置依存性が大きいいため、ELCC直近3.7cmをさらにカット
(Additional distance cut)



イベント・ディスプレイ@511keV



1. AXEL実験

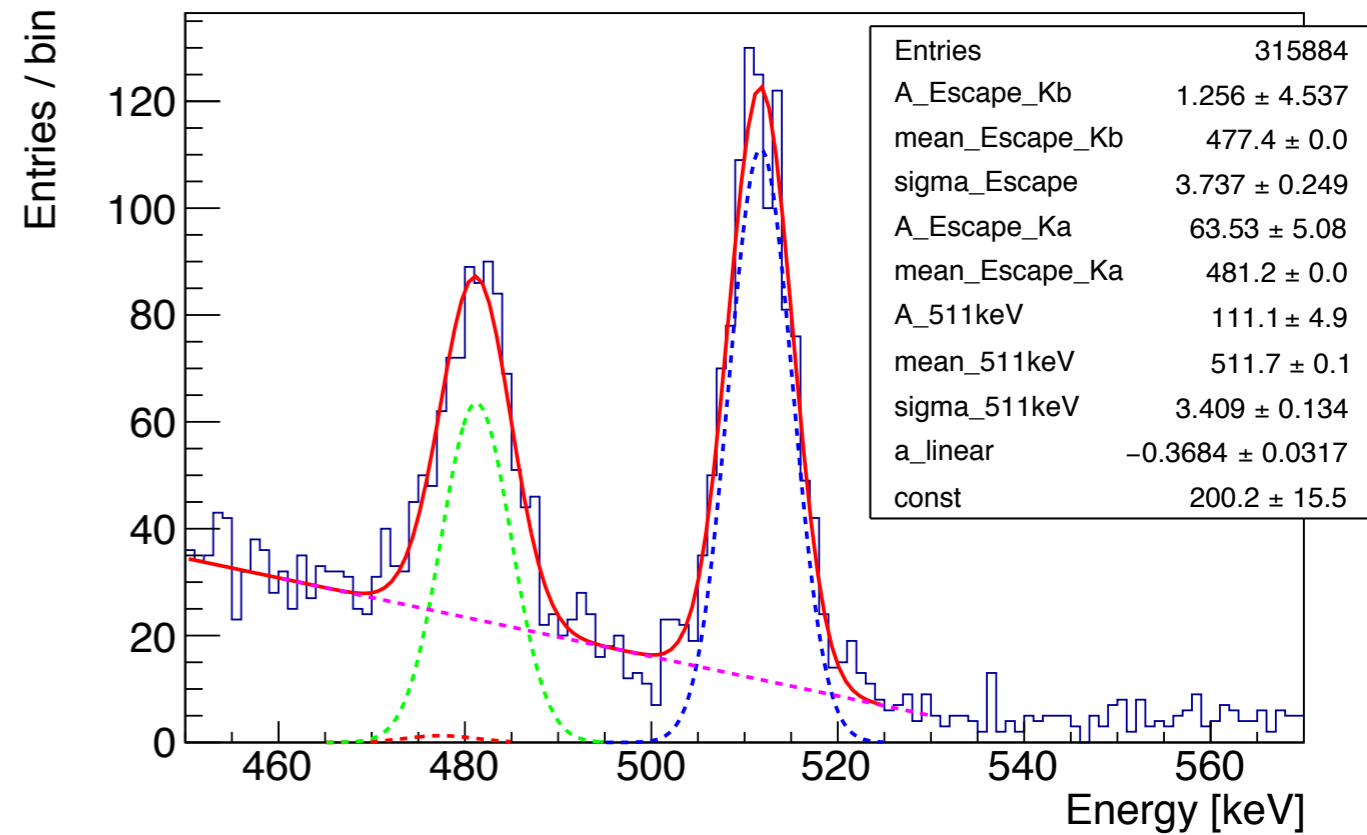
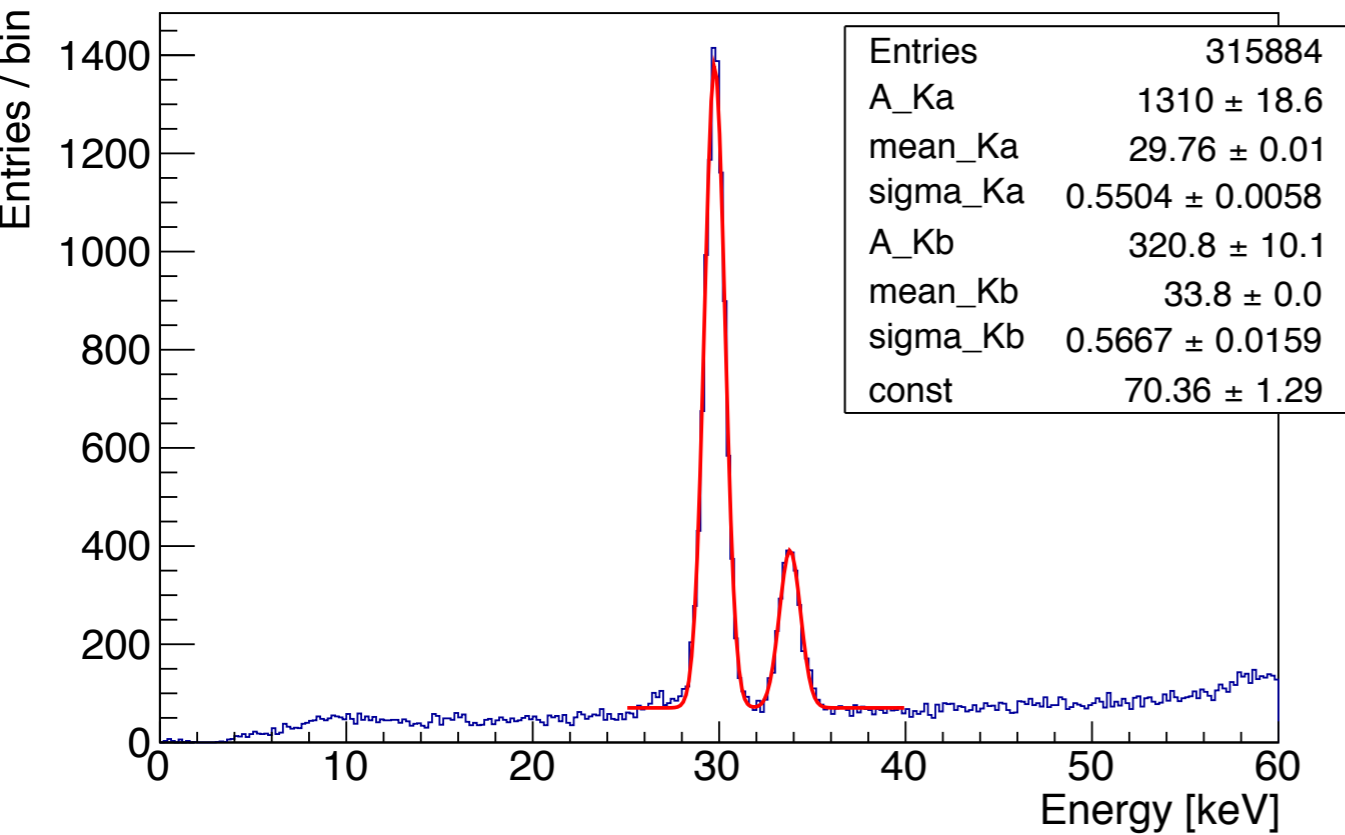
2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

3. まとめ

特性X線 (29.78 keV, 33.62 keV)と511keVピークを評価に用いる

- Gaussians + Linear (const)でfit
 - 30 keVのピークは、 \sqrt{E} で変換するとQ値で < 0.5% (FWHM) : **目標を達成**
 - 511keVのピークは、このエネルギーでは**世界最高のエネルギー分解能** (in $0\nu\beta\beta$ search experiment)
- ただし、両者のQ値での分解能に差があるため、単純に \sqrt{E} ではconversionできない可能性



Energy [keV]	29.78	33.62	511.0
FWHM	4.34%	3.94%	1.57%
FWHM @Q	0.48%	0.46	0.71%

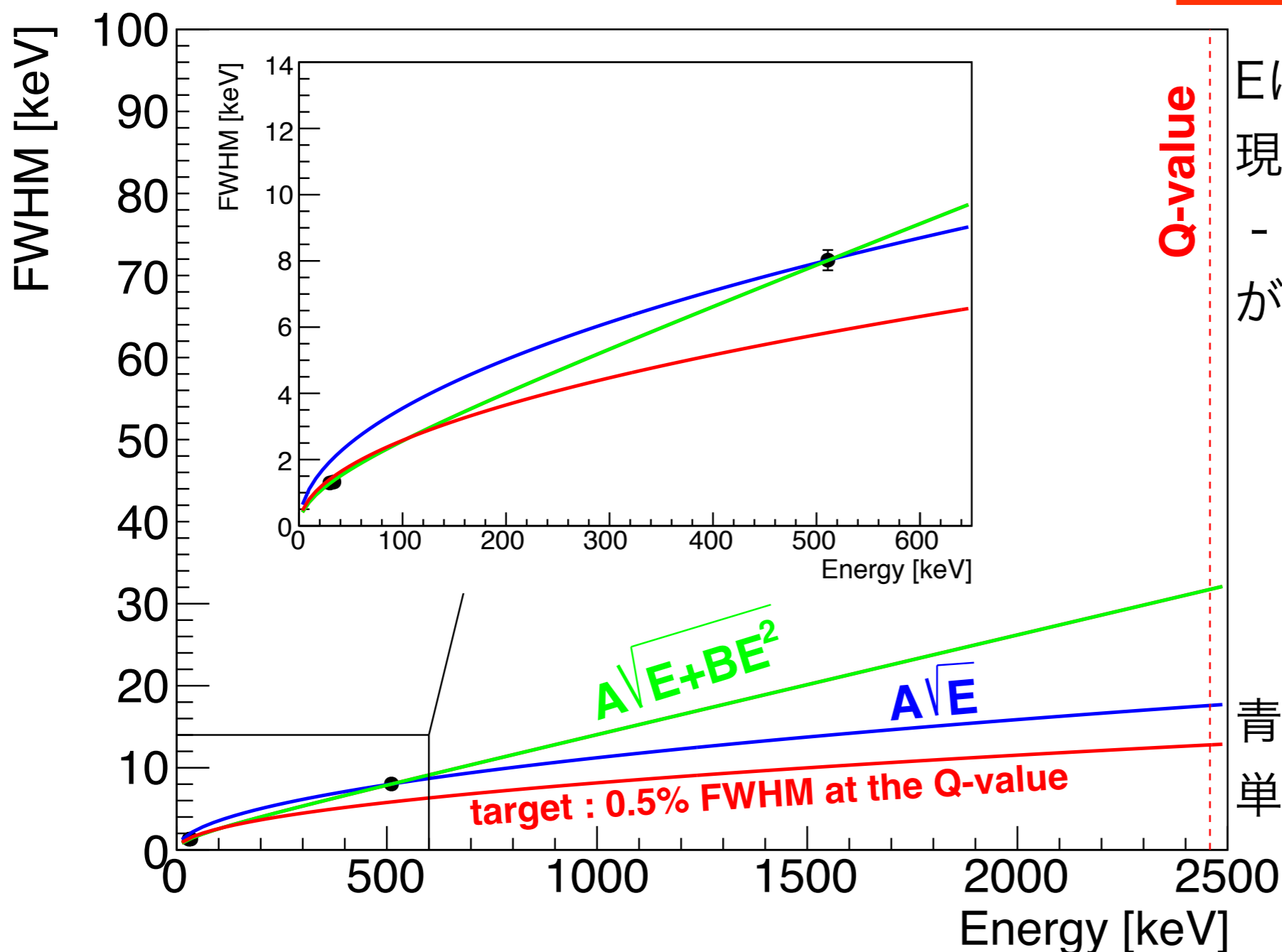
エネルギー分解能に \sqrt{E} に比例する項に加えて E に比例する項の効果も加えて評価を行う

$$A\sqrt{E + BE^2} \quad A = 0.226 \pm 0.003$$

$$B = 0.0029 \pm 0.0004$$

-> Extrapolate to Q-value

FWHM 1.29% (@2458keV)



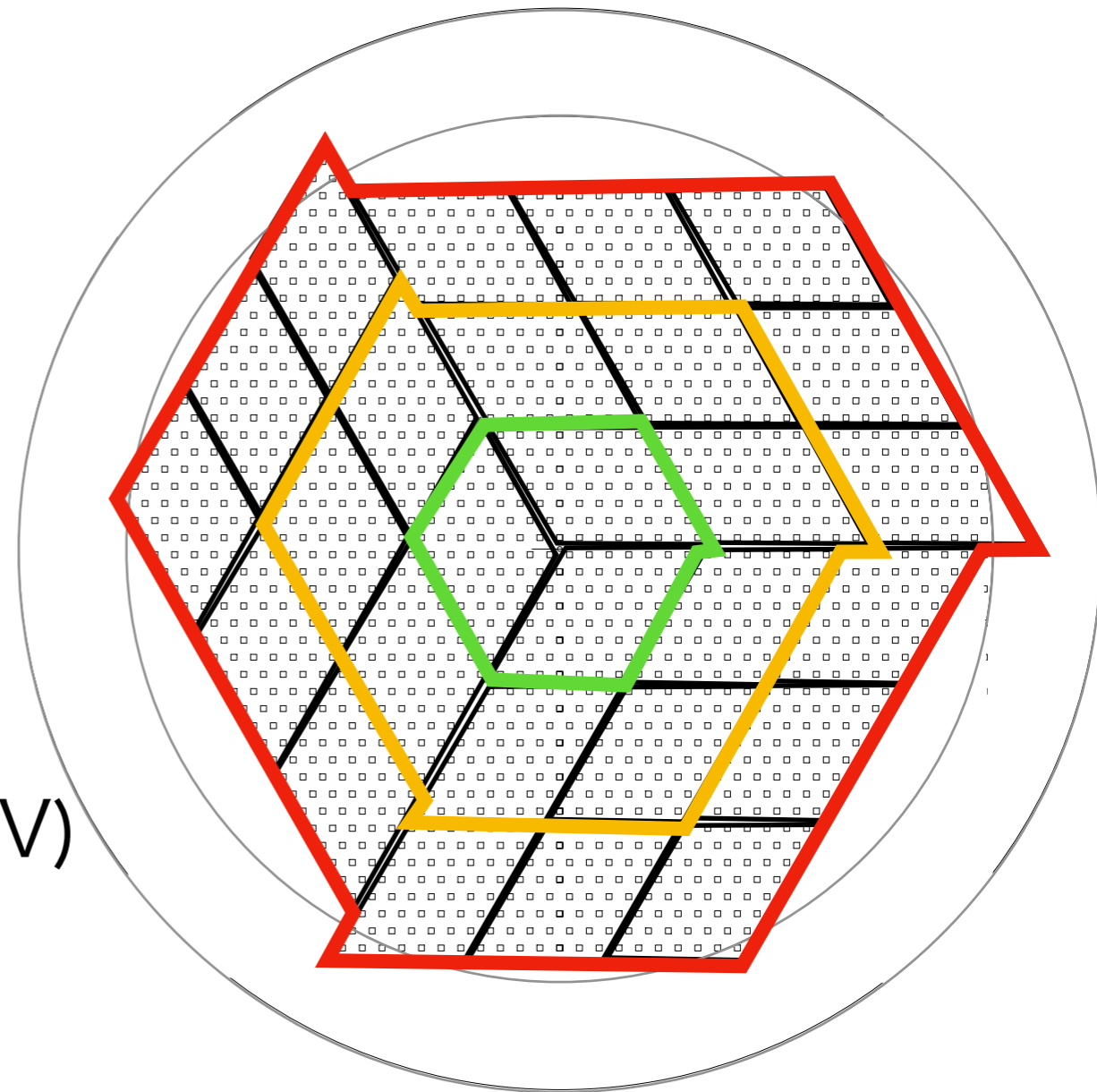
Q-value

E に1次で比例する項の起源は
現在調査中

- 時間依存性の補正
が原因の候補

青いラインは511keVを
単純に \sqrt{E} で変換した際の外挿

- Increase ELCC unit : 3 (2019) → 12 (2020) → 27 (2020)
- フィールドケーシングの拡張
 - ϕ 15cm, 10cm-long
 - ϕ 40cm, 50cm-long
- Evaluate the performance using gamma-rays with 511 keV, 622 keV, 1.1 MeV, 1.3 MeV, and near the Q-value (2.4 MeV)



1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

- データ取得
- 解析
- 性能評価

3. まとめ

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索は、ニュートリノがマヨラナ性の決定に不可欠

- ニュートリノがマヨラナなら、軽いニュートリノ質量や物質・反物質非対称宇宙の起源の理解につながる

高圧キセノンガスTPC：AXELを開発中

- Electroluminescence過程を用いたcell機構信号読み出しで高エネルギー分解能とトラッキング能力を兼ね備えている

試作機による性能評価

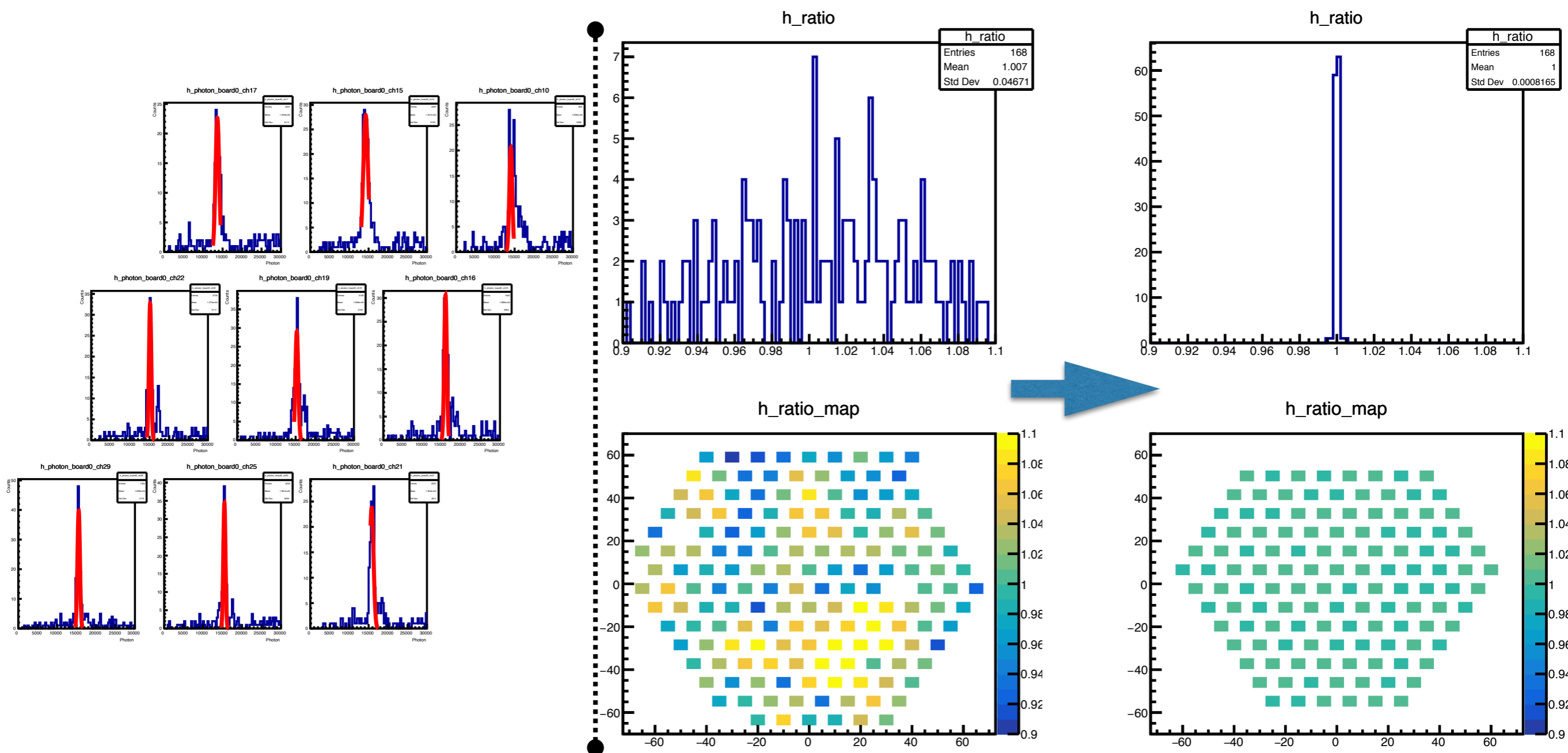
- 安定した長期runを達成
- 30 keV付近では0.5% FWHM (at Q-valueに換算)を達成
- 511 keVでは1.57% FWHM で、このエネルギーでは他のキセノン実験よりも良い値
- 30keVと511keVのQ値換算(by \sqrt{E})が異なる原因は調査中
- トラックもちゃんと見えた
- 今後はチャンネル数を拡大

AXELのさらなる高感度化は次の次のトーク(菅島くん)で

Back up

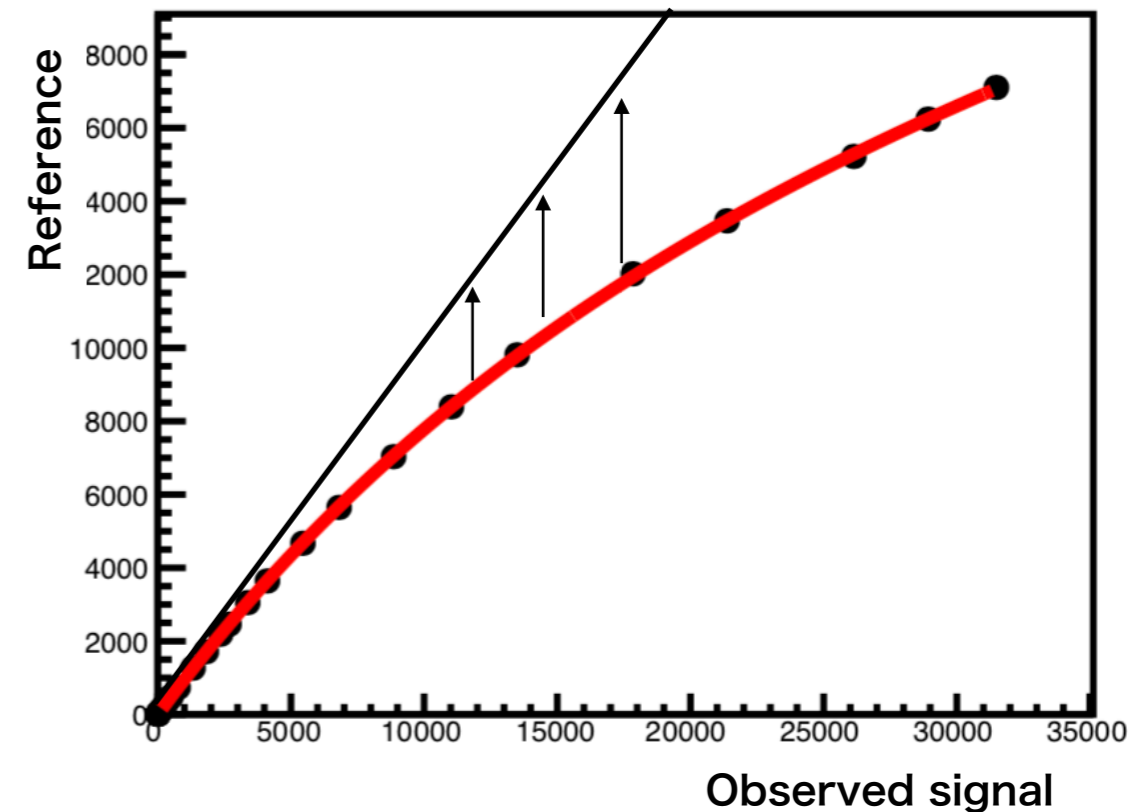
- 補正

- EL gain calibration: 30keVピークを用いてcellごとのゲインを校正
- veto領域も含めて全チャンネルで5回イテレーション→fiducialだけで4回イテレーション



- 補正
 - MPPC Non-linearity correction: MPPCの非線形性を補正
 - MPPCがピクセル化されたガイガーモードAPDから構成されているため、入射光量がピクセル数に近づくにつれ信号は飽和する
(同じガイガーモードピクセルに光子が同時入射する確率があがる)
 - MPPCのピクセル数を超える光子数でも、それが十分に長い時間をかけて入射する場合は補正が可能ながわかっていてる
 - 飽和の度合いは「回復時間」と呼ばれる量でパラメトライズ可能
 - 飽和のモデル式およびその補正には以下の関数を使用： τ が「回復時間」

$$N_{\text{observed}} = \frac{aN_{\text{true}}}{1 + \tau / (N_{\text{pixel}} \cdot \Delta t) N_{\text{true}}}$$

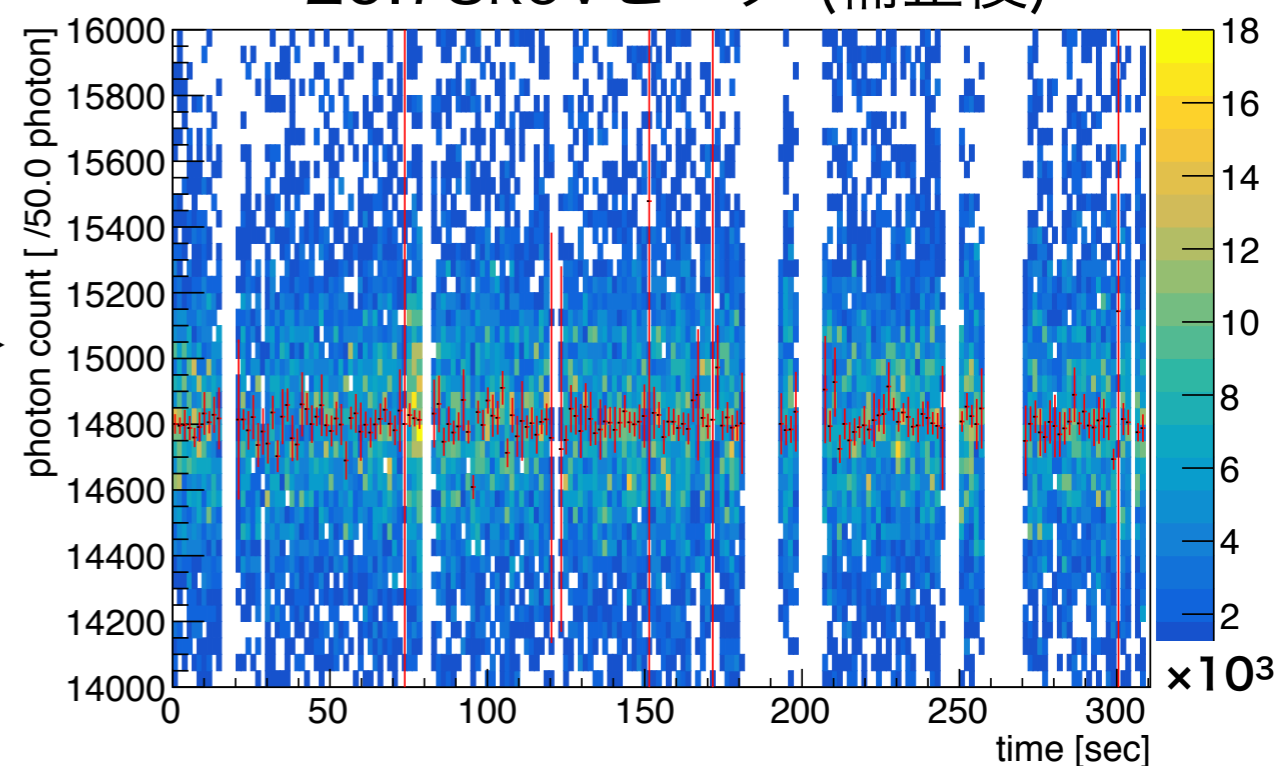
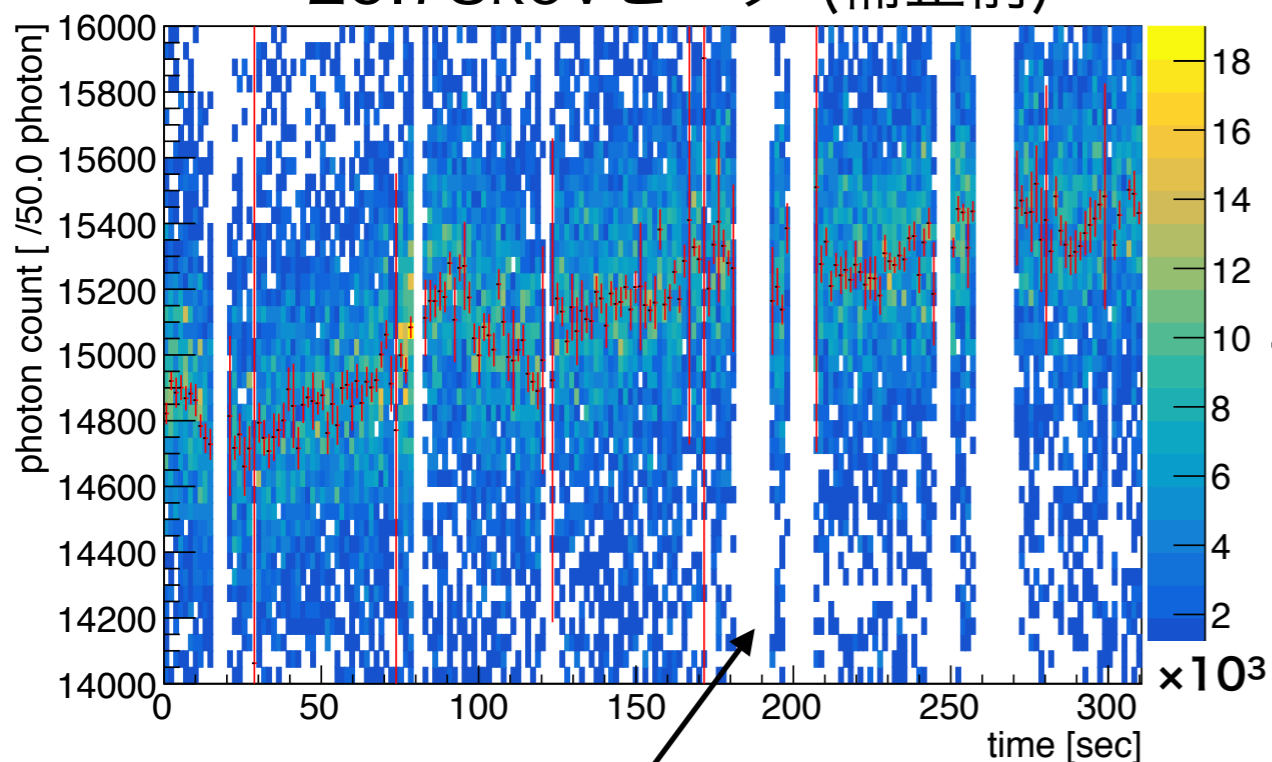


- 補正

- 光量の時間依存を補正
- 時間依存性はガス純度の向上や温度変化によるガス密度変化などが原因と思われる
- データ取得時間を200binに区切って各binでピークサーチ→補正

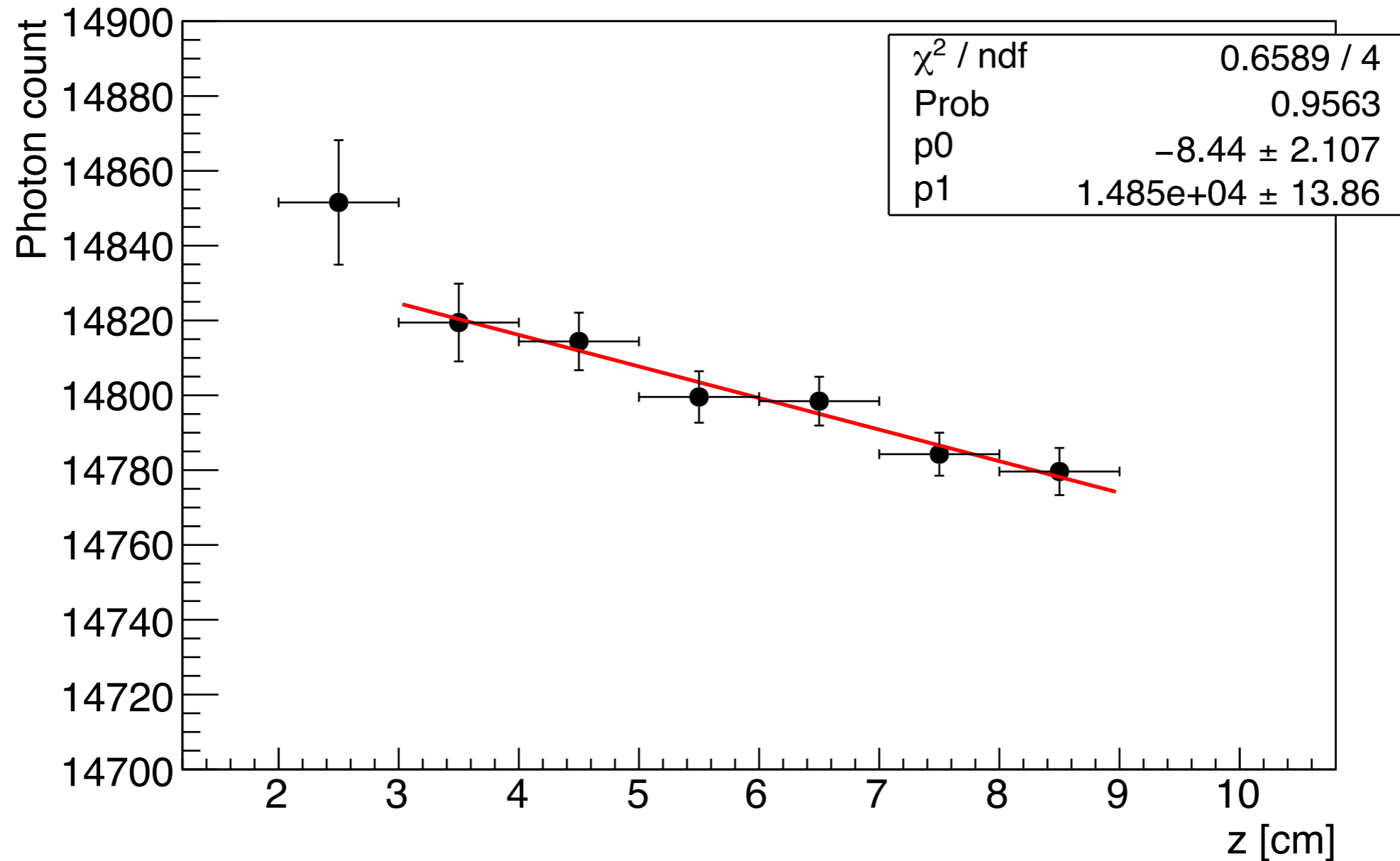
29.78keVピーク (補正前)

29.78keVピーク (補正後)



中めけになっているbinはrunの切り替えやDAQトラブル

- 補正
 - 光量のz位置依存を補正
 - ガスの不純物によると思われる



- 位置依存性

