



0v $\beta\beta$ 探索実験AXEL

- 実験計画と大型試作機での測定結果 -

京都大 吉田 将

for the AXEL Collaboration

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会@理研和光キャンパス

Outline

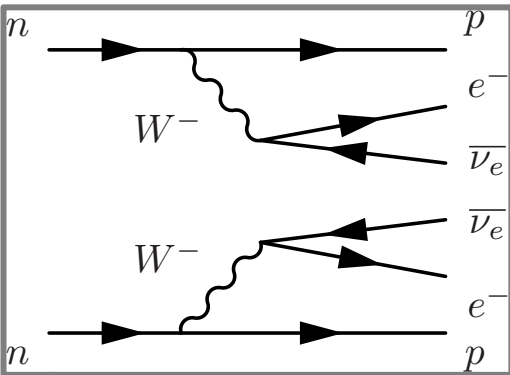
- Introduction
- Detector & Facility
- Recent result
- Summary

Introduction

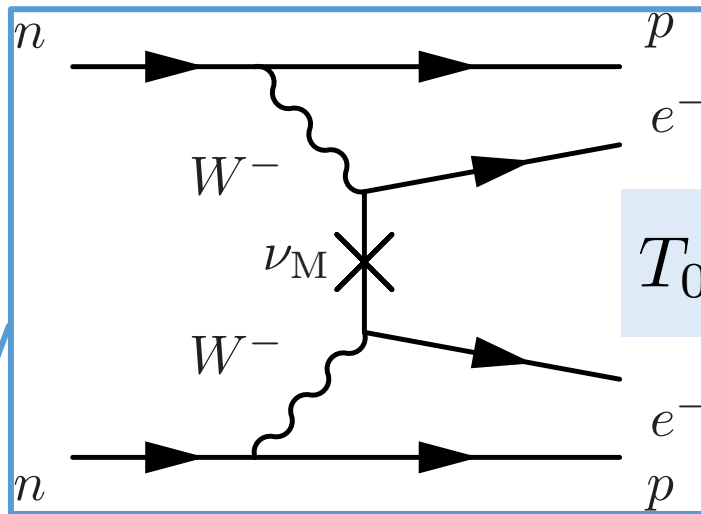
- ✓ $0\nu\beta\beta$
- ✓ AXEL

Physics

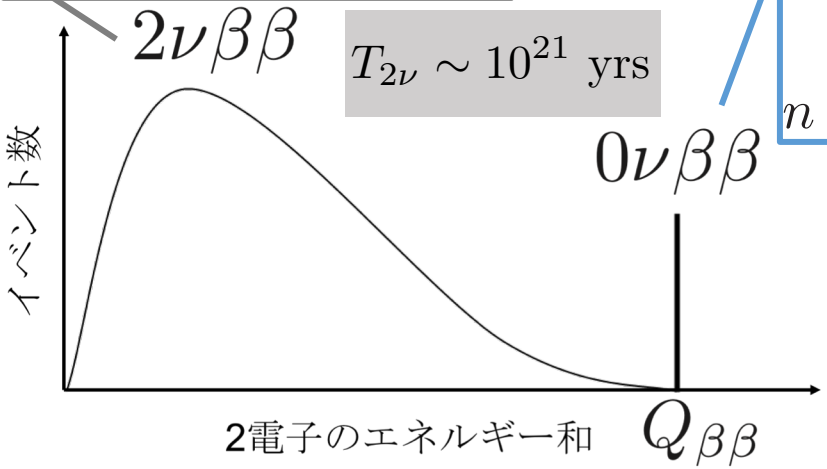
二重ベータ崩壊… 2νモードと0νモード, 1回のβ崩壊は抑制



$2\nu\beta\beta$
 $T_{2\nu} \sim 10^{21}$ yrs



$T_{0\nu} > 10^{26}$ yrs



0νββの発見
 =ニュートリノのマヨラナ性の直接証拠
 → 軽いニュートリノ質量や
 物質優勢宇宙の起源に迫る

How to search for $0\nu\beta\beta$?

$$\left(T_{1/2}^{0\nu}\right)^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

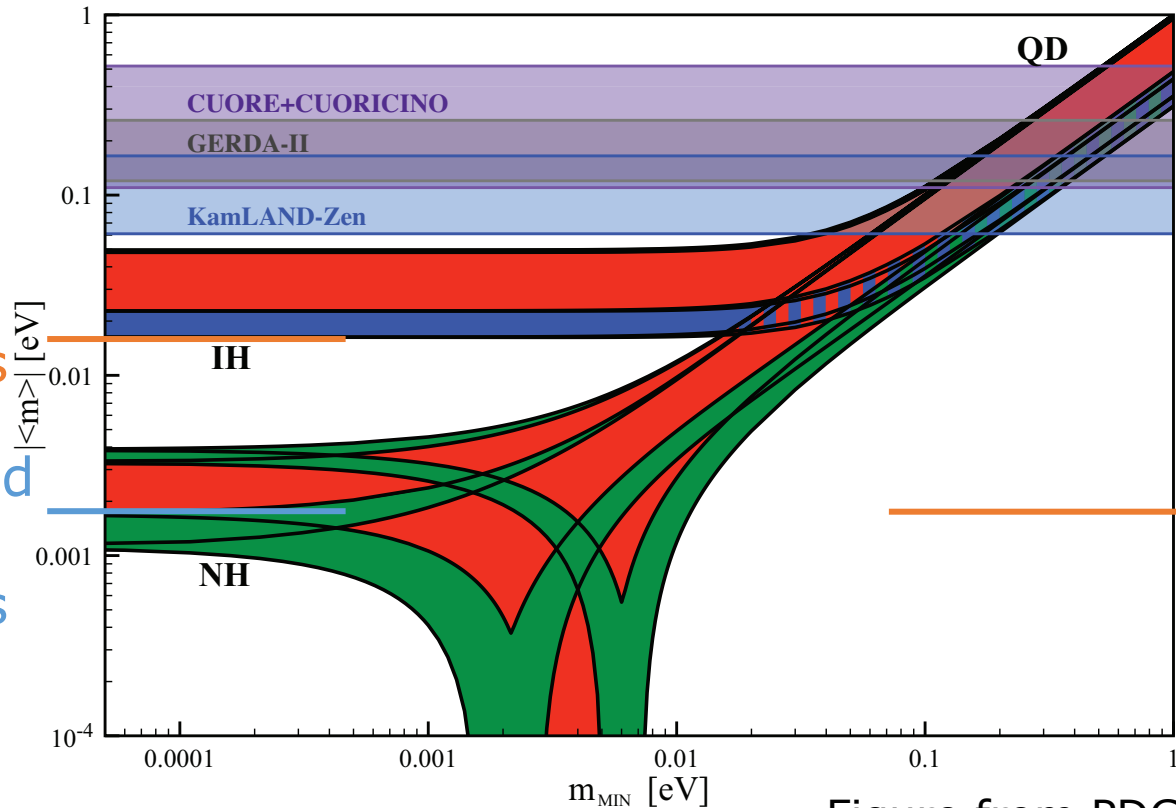
ν 交換に寄与するマヨラナ有効質量

BG-limited

$$\propto \left(\frac{b\Delta E}{MT}\right)^{1/4}$$

a few ton
x a few years

a few hundred
ton
x a few years



BG-free

$$\propto \frac{1}{\sqrt{MT}}$$

a few ton
x a few years

Figure from PDG2019

ton-scale & BG-free Detector!!

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$

^{136}Xe : $0\nu\beta\beta$ 候補核, Q-value = 2.458 MeV

良いところ

- ✓ エネルギー分解能
 - intrinsic **0.25%** FWHM @Q-value, $W=21$ eV
 - 読み出し→EL-process is better
- ✓ トラッキング
 - イベントトポロジーによる事象選別, 背景事象↓
- ✓ 大型化しやすい
 - ^{136}Xe の濃縮方法は確立
 - 検出媒体 = 崩壊核

世界中で開発・探索が進行中
NEXT, PandaX-III, **AXEL**

悪いところ

- × 放電しやすい
 - クエンチングガス→エネルギー分解能↓ (no EL-process)
- × 自己遮蔽できない
 - 容器や内部構造物からの γ 線→背景事象

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

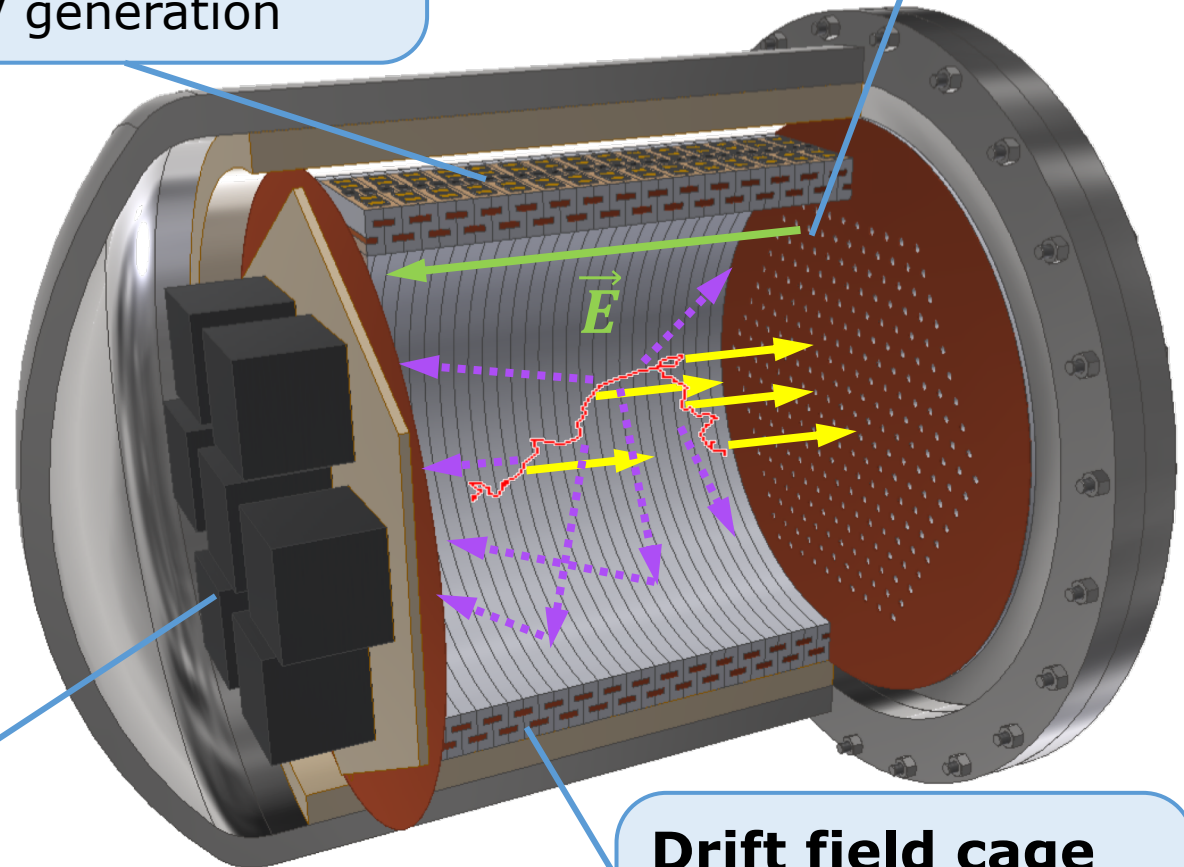
AXEL (A Xenon ElectroLuminescence detector)

**Cockcroft-Walton
Voltage multiplier**
for HV generation

ELCC
for energy & tracking

- ^{136}Xe for $0\nu\beta\beta$ nuclei
- Pure xenon gas TPC
- High pressure (6 to 8 bar)

VUV PMTs
for T_0 signal



Drift field cage
for uniform drift field

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会
@理研和光キャンパス

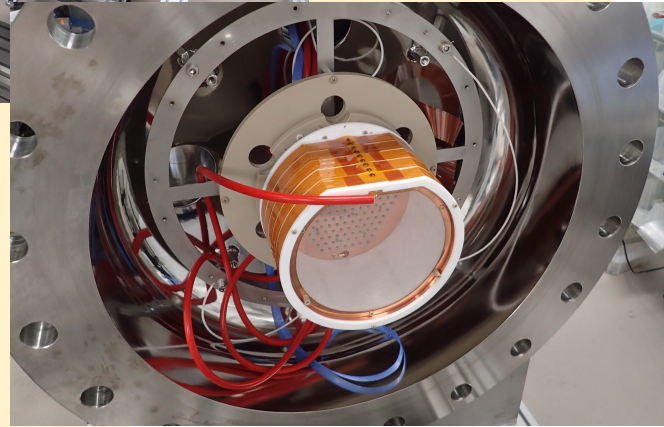
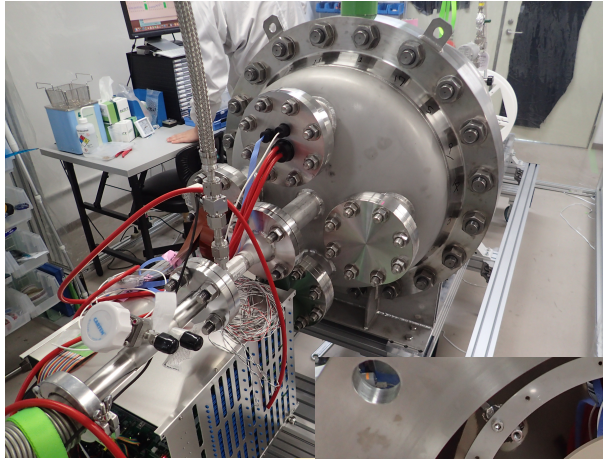
Project Roadmap

1 ton scale

100 kg scale

202?-

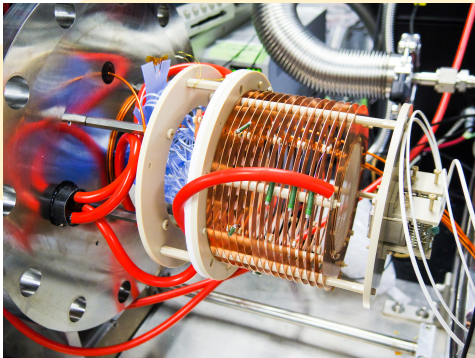
- 地下物理測定



10-L prototype

2014-2018

- ~ 0.05 kg @8 bar
- ELCCの原理検証
- 分解能評価 ≤ 356 keV



180-L prototype

2018-

- ~ 4.5 kg @8 bar
- 分解能評価@Q値
- 大型化のノウハウ

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

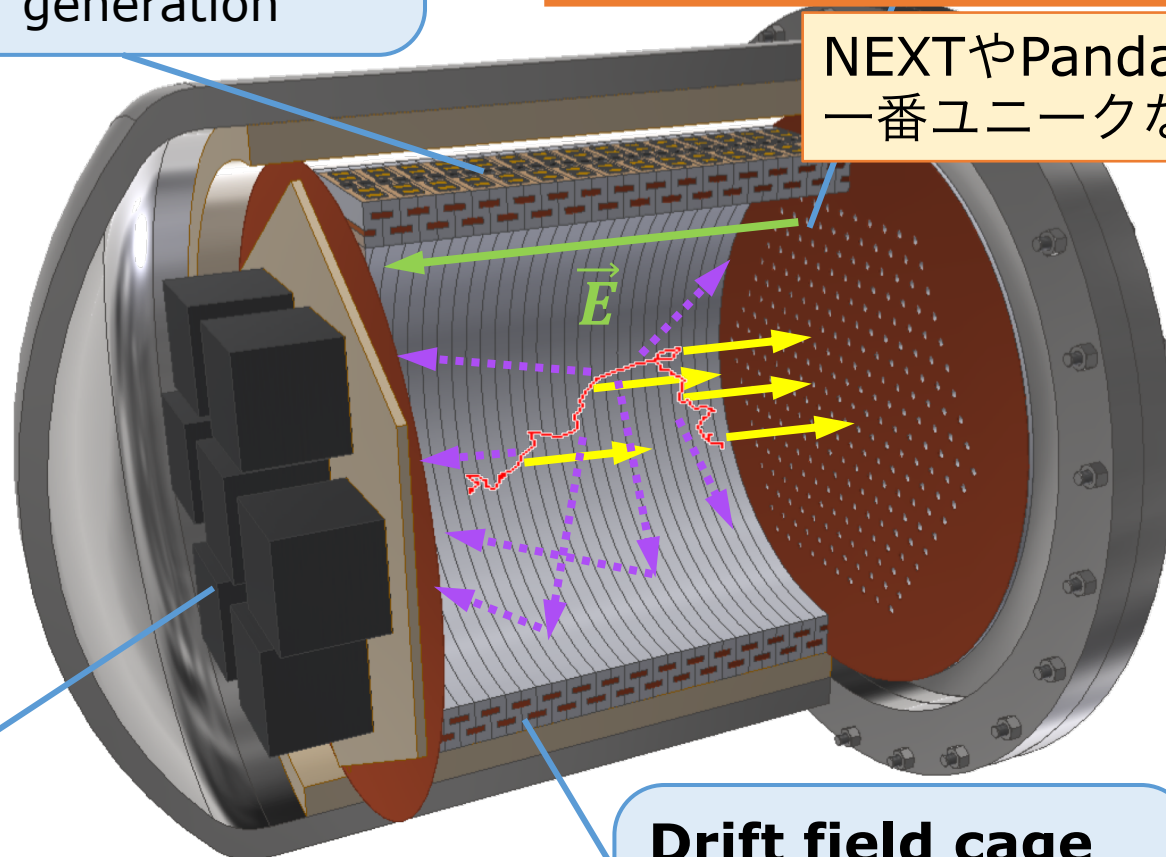
Detector & Facility

- ✓ ELCC
- ✓ Readout
- ✓ Field cage
- ✓ Cockcroft-Walton
- ✓ Gas Line

**Cockcroft-Walton
Voltage multiplier**
for HV generation

ELCC
for energy & tracking

NEXTやPandaXと比べて
一番ユニークなところ



VUV PMTs
for T_0 signal

Drift field cage
for uniform drift field

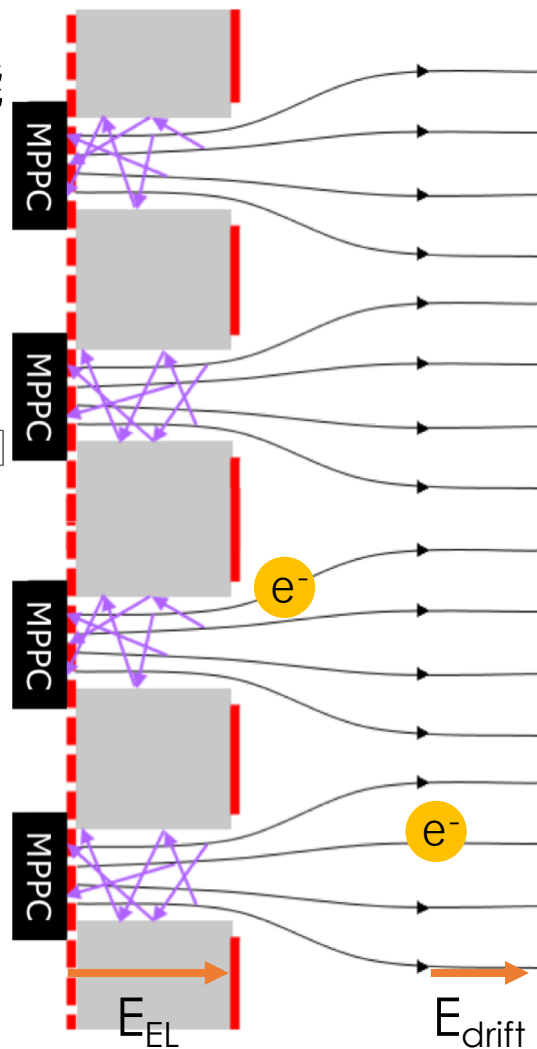
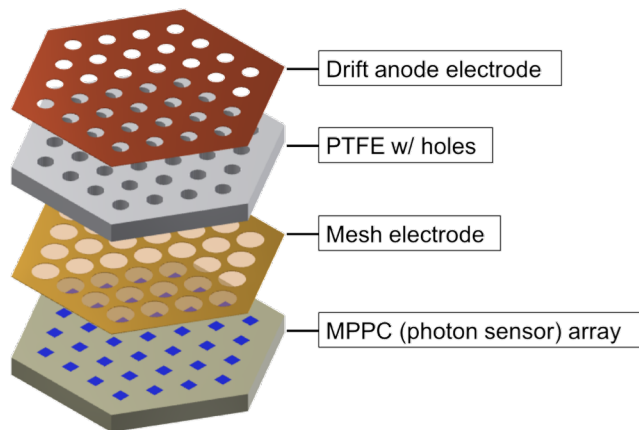
2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

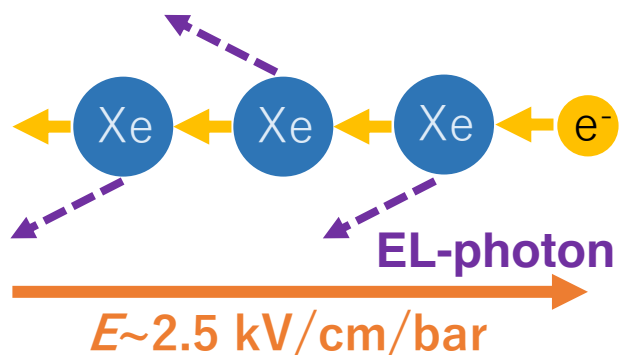
@理研和光キャンパス

ELCC (Electroluminescence Light Collection Cell)

- 電子をセルに引き込んでEL → エネルギー測定+飛跡検出
- 低い位置依存性
- 堅牢構造 & ユニット化 → 容易に大型化可能



EL過程



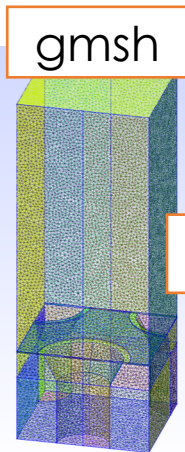
線形増幅 → 低ゆらぎ

2019/12/06

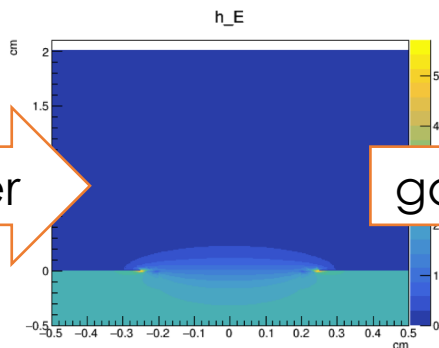
MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会
@理研和光キャンパス

ELCC optimization

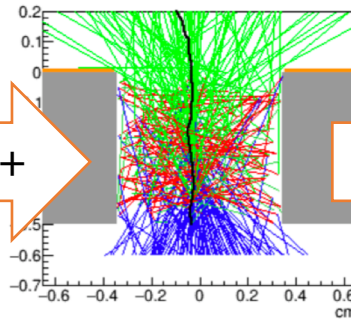
- ELゲインの電離電子位置に対する依存性をシミュレーションでチェック
 - 位置依存性があるとエネルギー分解能が悪化
 - 電場計算(gmsh + elmer) → トラック生成(garfield++)
→ EL光生成・反射(手製MC)



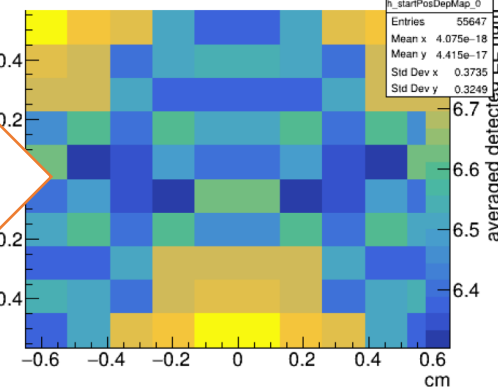
elmer



garfield++



ELゲインの初期位置依存性
(ダメな例)



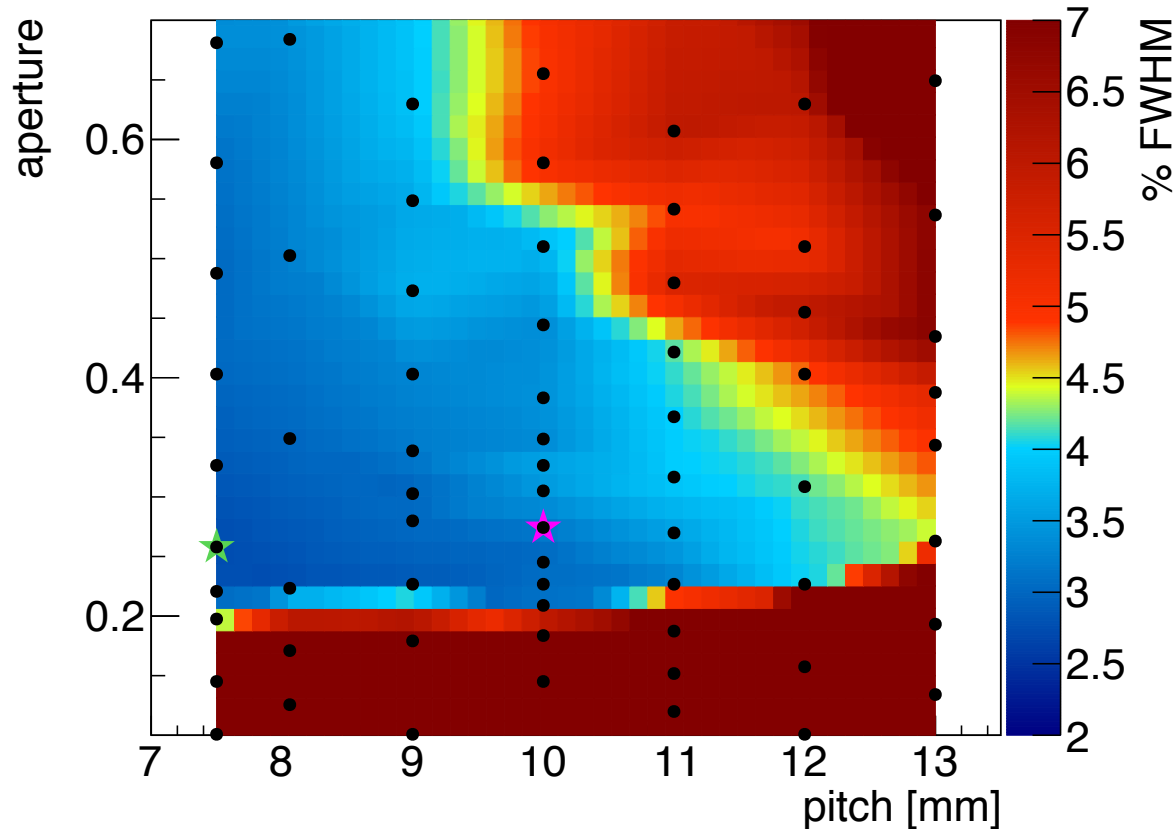
2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会
@理研和光キャンパス

ELCC optimization

- 穴径・ピッチなどジオメトリをスキャン
→ Geant4で作った30 keVのXe特性X線イベントに対する分解能で最適化

Simulated energy resolution for 30keV e-



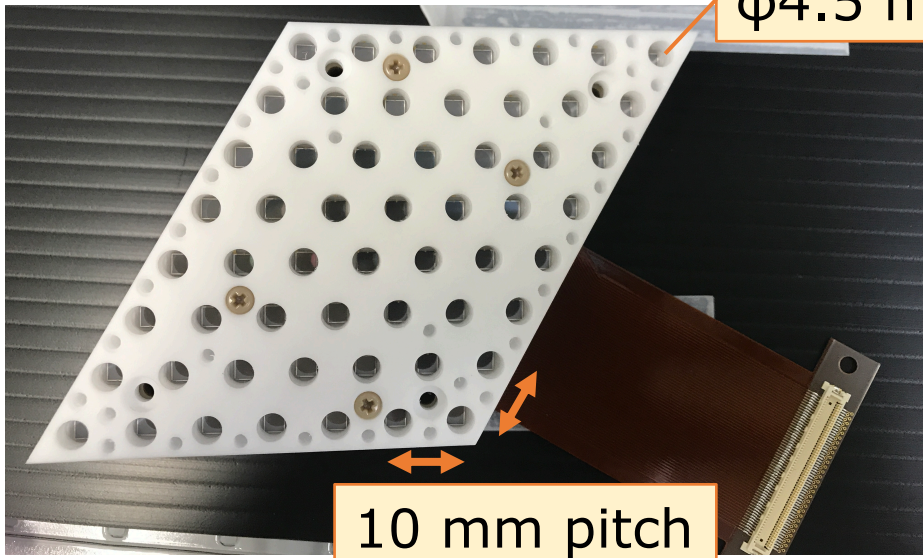
深さ 5 mm, 穴径 5.5 mm, ピッチ 10 mm の六角形配置

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

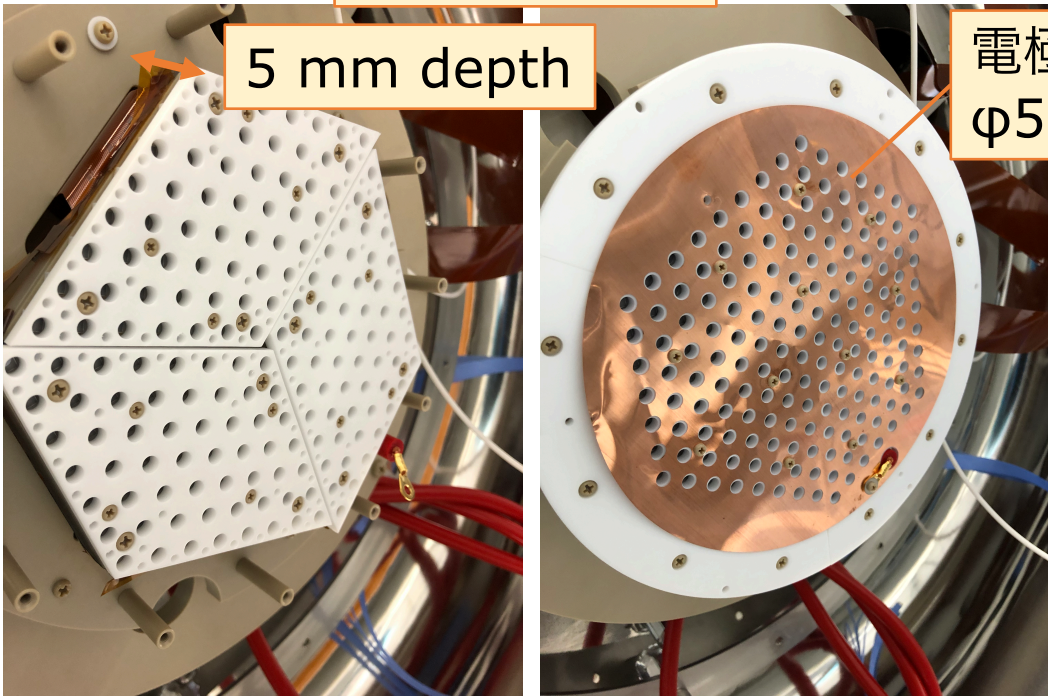
ELCC unit



φ4.5 mm

10 mm pitch

- セルのサイズはシミュレーションで最適化
- 7 x 8 ch for 1 unit
- 3 units → 12 units → 27 units

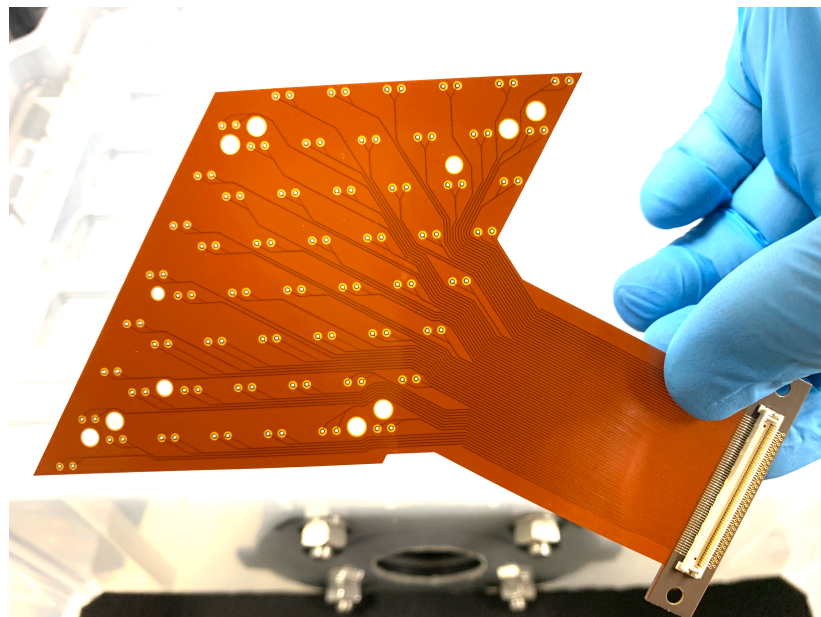


5 mm depth

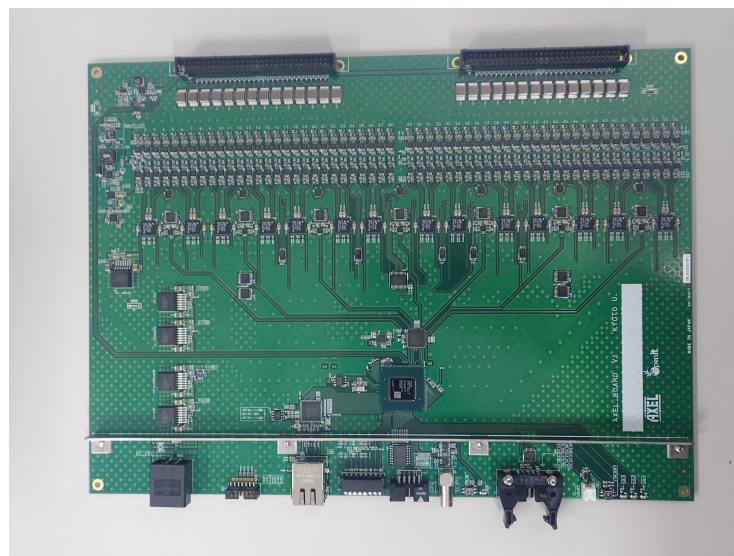
電極の穴は
φ5.5 mm

- PTFEを挟む電場は
3 kV/cm/bar
→ 放電対策が必要
(next talk)

Readout



- 各ELCCユニットを1つのFPCで読み出し
- フィードスルーを通してチェンバー外の読み出しボードへ
→ 簡単配線・省スペース
- 一つのELCCユニットが1枚のボードに対応

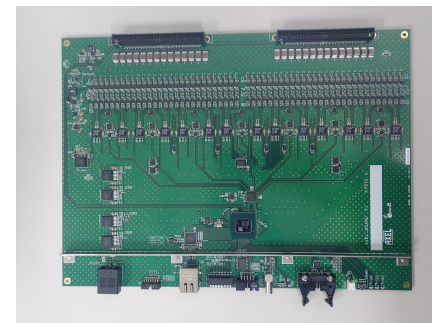


2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会
@理研和光キャンパス

Front end board

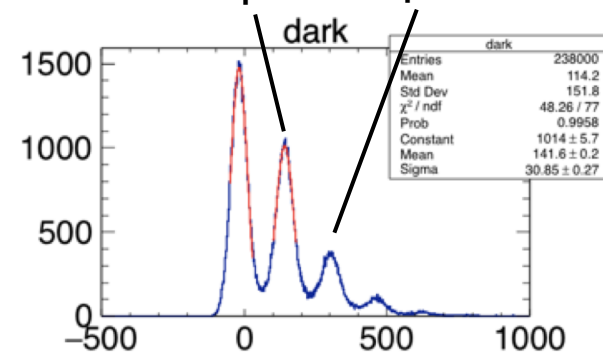
- MPPC波形取得用フロントエンドボード



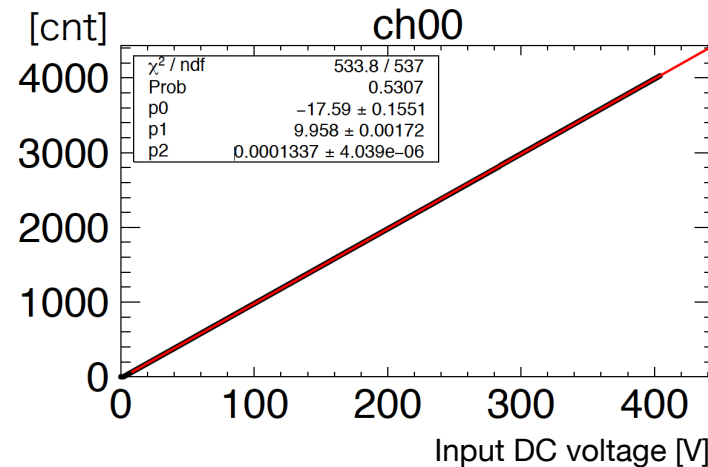
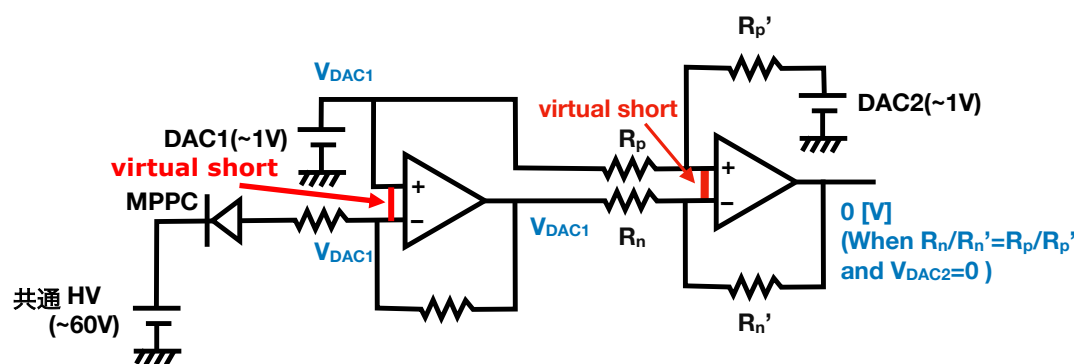
- ✓ 1 - 10^5 photon/ μ s を1枚でカバー
 - 2種類のADC
(high: dark current / low: EL signal)
 - 1 p.e. 分離も, 大光量までの線型性もOK

- ✓ MPPCのバイアス電圧を個々に調整(56個)
 - EL信号が長いのでACカップリングだとダメ
 - オペアンプのバーチャルショートを使用

1 p.e. 2 p.e.



矩形波入力に対する応答



2019/12/06

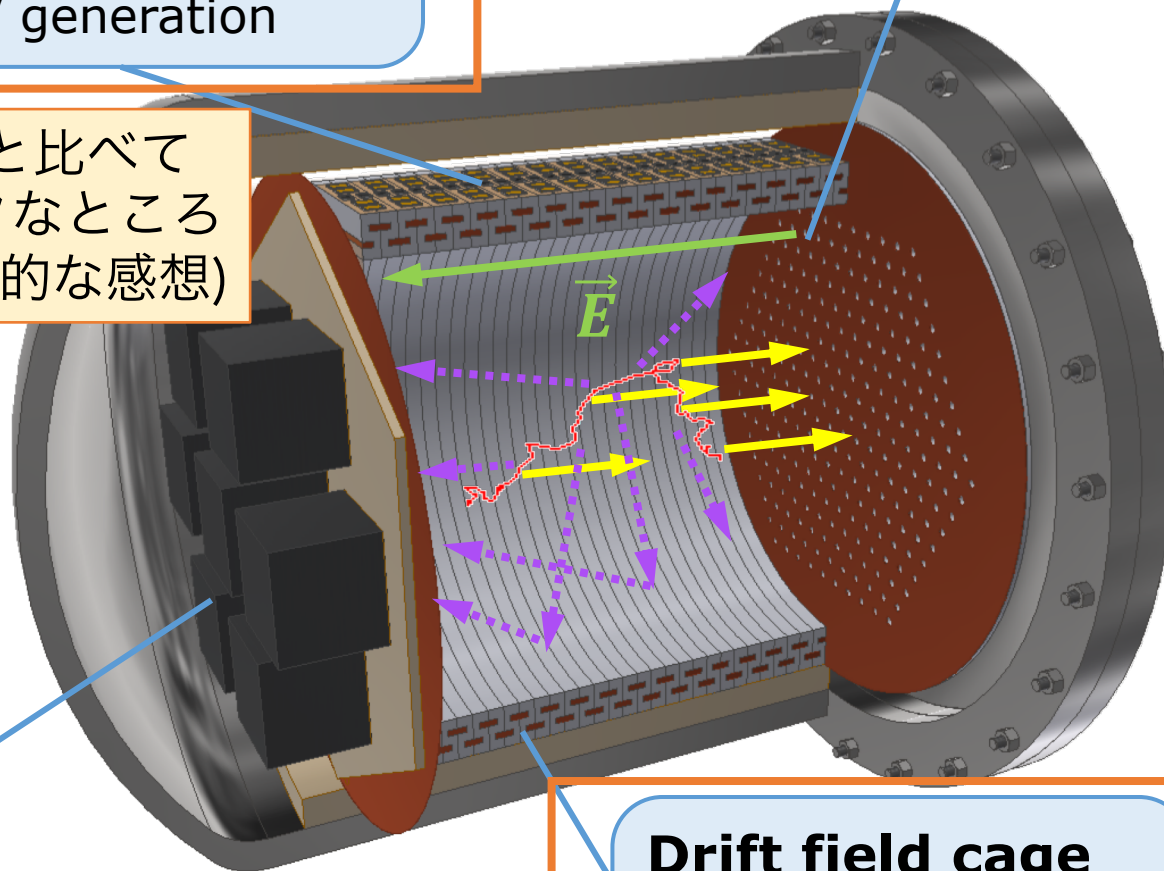
**Cockcroft-Walton
Voltage multiplier**
for HV generation

ELCC
for energy & tracking

NEXTやPandaXと比べて
二番目にユニークなところ
(個人的な感想)

VUV PMTs
for T_0 signal

Drift field cage
for uniform drift field



2019/12/06

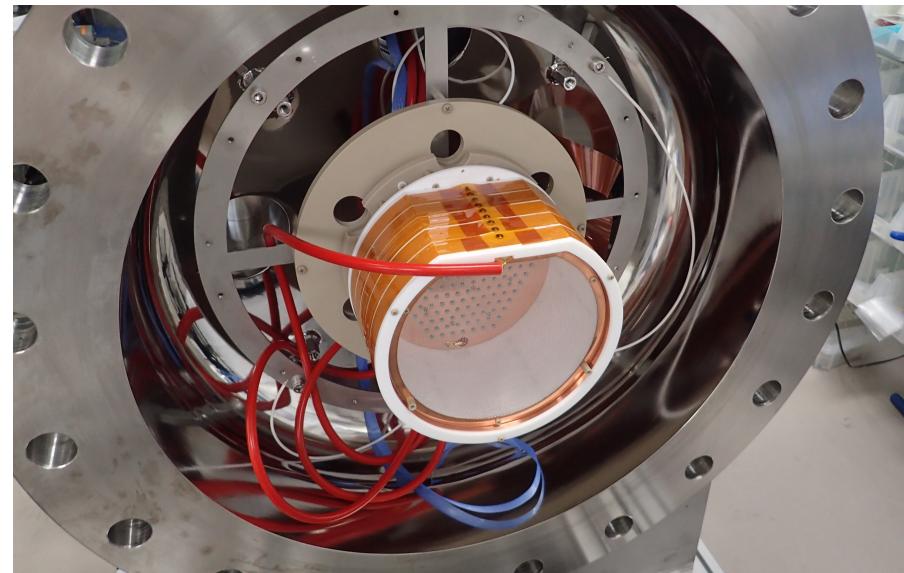
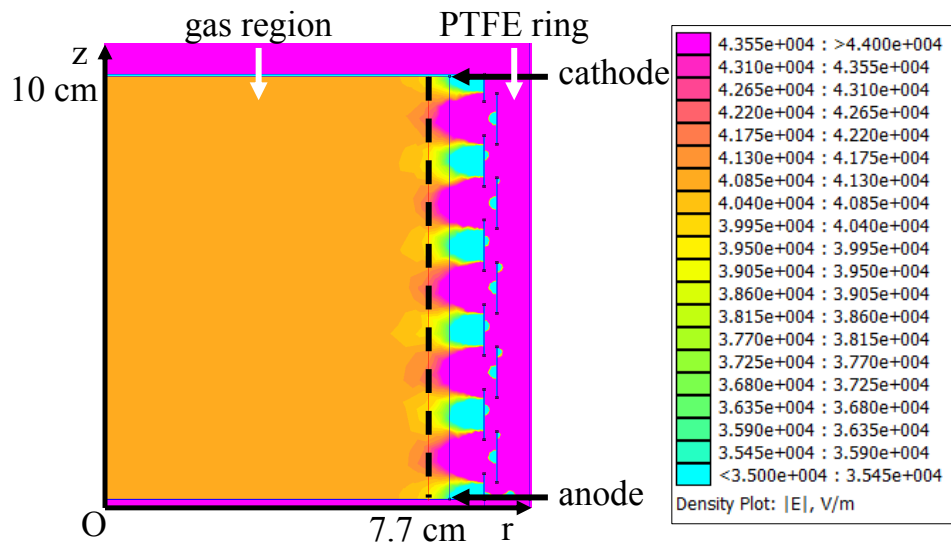
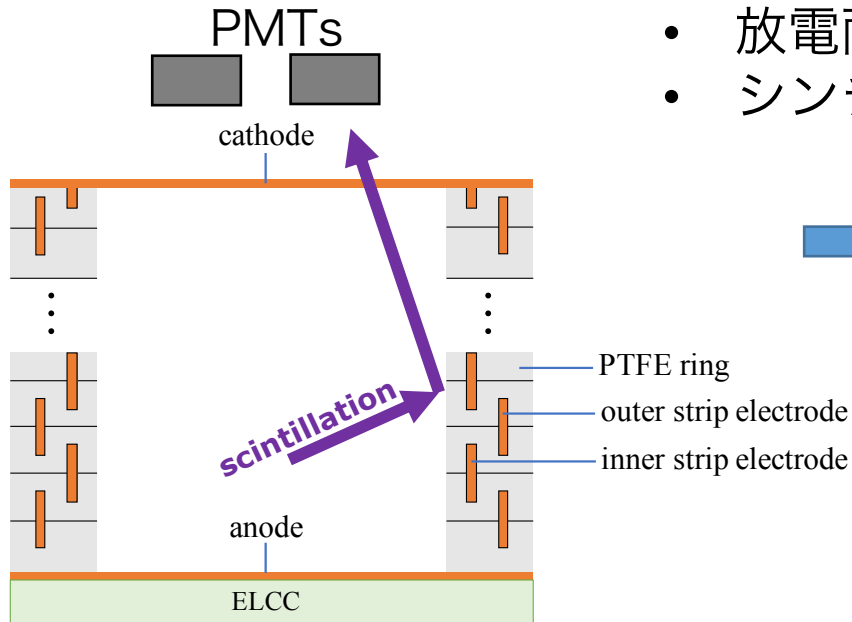
MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

Field cage

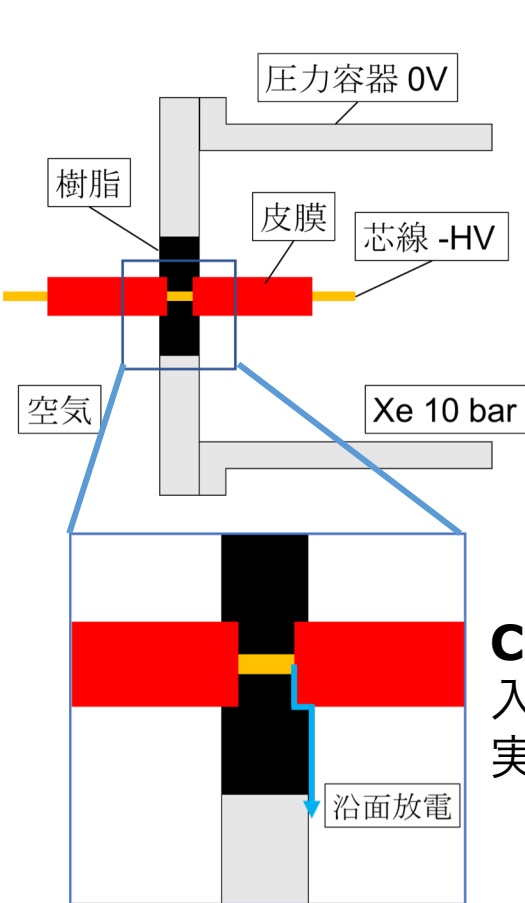
- 一様で強いドリフト電場: $100 \text{ V/cm/bar} \pm 5\%$
→ 電離電子の再結合を抑制・低位置依存
- 放電耐性
- シンチレーション光の反射

二重の帯状電極で外の電位を遮蔽
+
PTFEリングで絶縁・反射

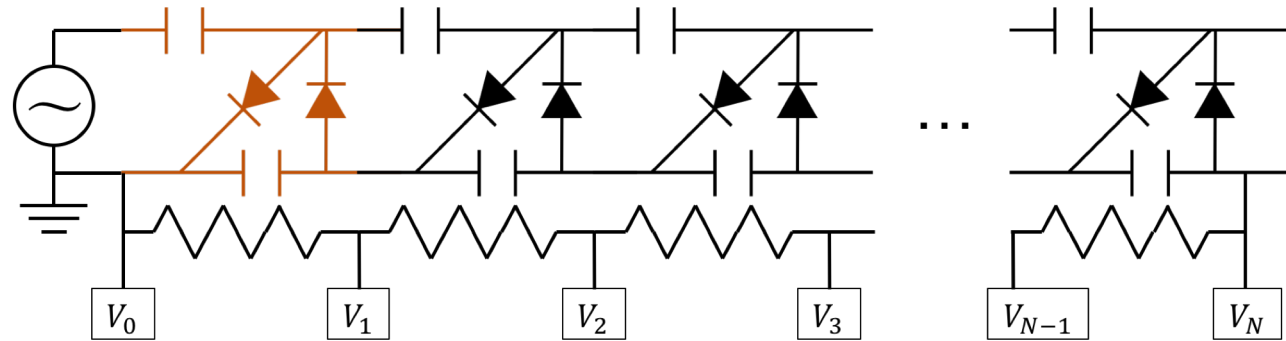


圧力容器内への高電圧導入

- ドリフト領域・EL領域 電場 $\uparrow \Rightarrow$ エネルギー分解能 \uparrow (再結合 \downarrow , EL-gain \uparrow)
- \Rightarrow ドリフト電場: 0.1 kV/cm/bar, EL電場: 3 kV/cm/bar
- プロトタイプではEL領域12 kV+ドリフト領域40 kV= 52 kV
- \Rightarrow 圧力容器内に直接導入すると導入口で放電



コッククロフト-ウォルトン(CW)回路により
容器内で昇圧



CW回路:

入力振幅 U に対して理想的には N 段で $2NU$ の直流を出力
実際には負荷抵抗や寄生容量のせいで電圧降下

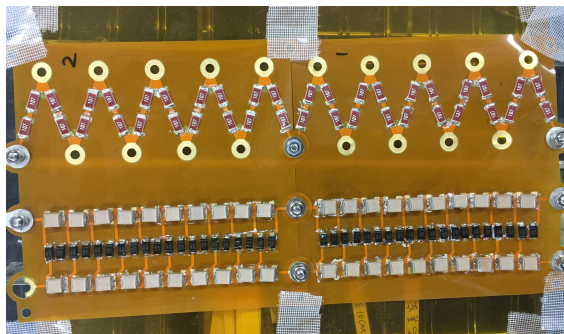
2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

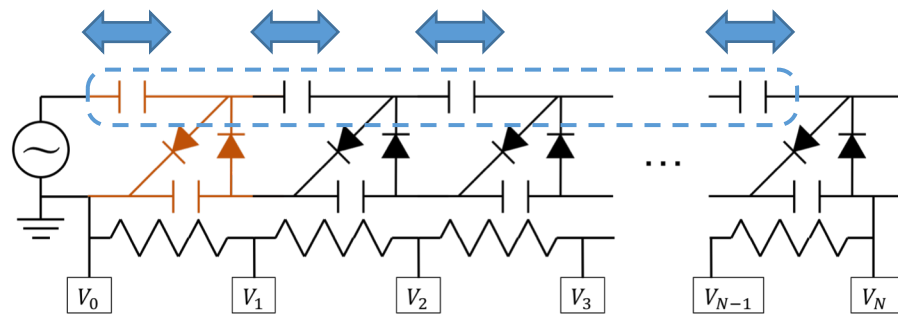
@理研和光キャンパス

CW回路

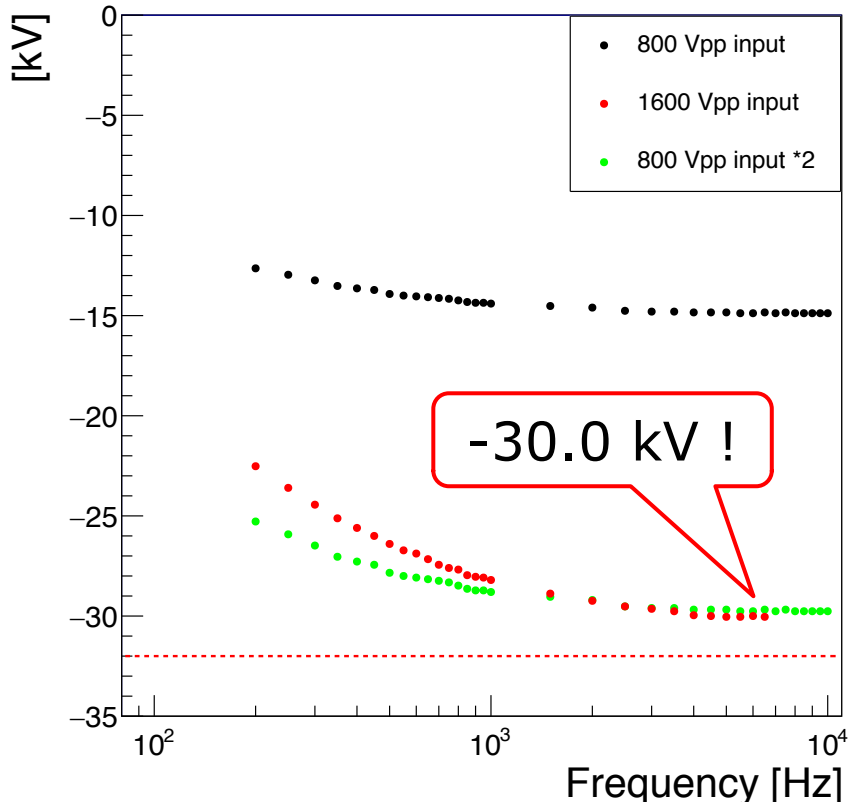
- 低アウトガス素材
 - ✓ ポリイミドベースFPC, 真空用ハンダ



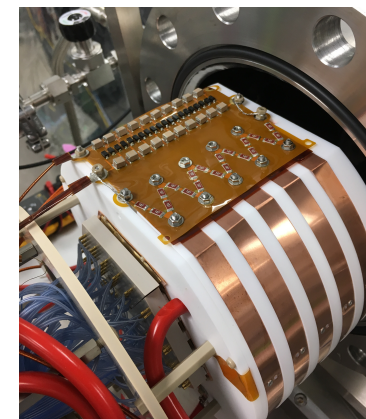
- 出力電圧降下は抵抗による電荷流出がメイン
→ 入力周波数を上げると改善
- 1.6 kVpp, 5 kHzの入力で20段で**30.0 kV**の出力に成功



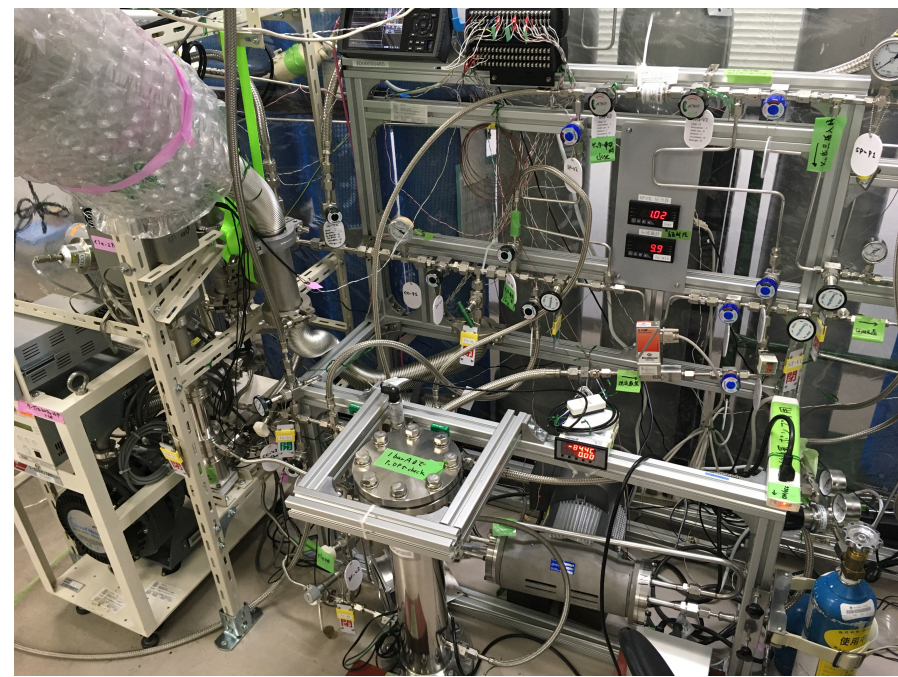
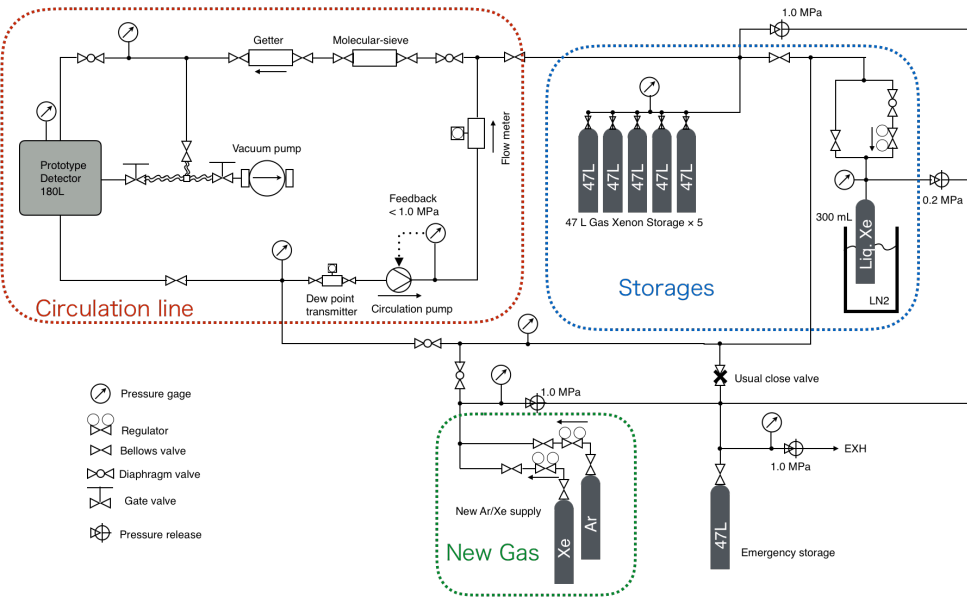
Output Voltage



- コンデンサの振動電位由来のノイズをチェック
→ MPPCのダークカレントに比べて negligible
- 今後 xenon TPC としての初動作を目指す



Gas Line



- 循環 + 純化
 - モレキュラーシーブ: N_2 以外(O_2 , H_2O , CO_2)
 - ゲッター : N_2
- ガス純度モニター
 - 露点計 : DAQ中常時モニター(水分のみ)
循環純化~3日で~0.1 ppm達成
 - RGA (next talk) : Xe導入前後

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

Recent result

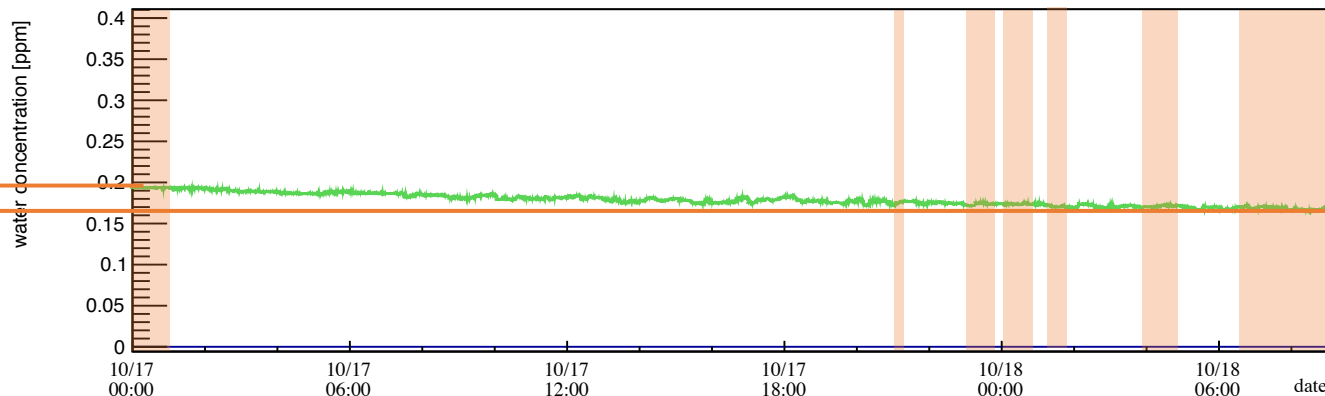
Measurement

- Xe: 4.1 bar
- circulation: 10 NL/min ← 一周1h10m
- source: ^{22}Na
511 keV γ でのエネルギー分解能評価

測定中の水分量

0.195 ppm

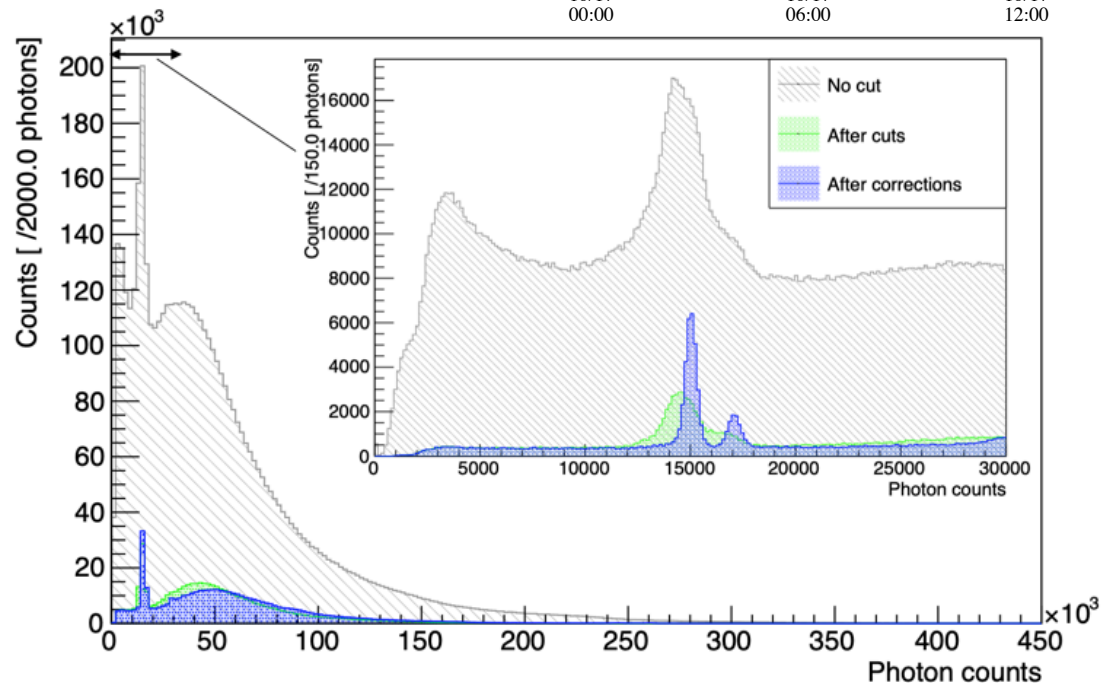
0.175 ppm



DAQ期間

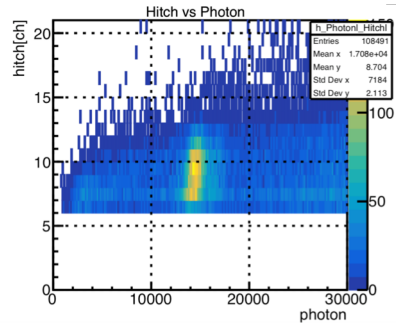
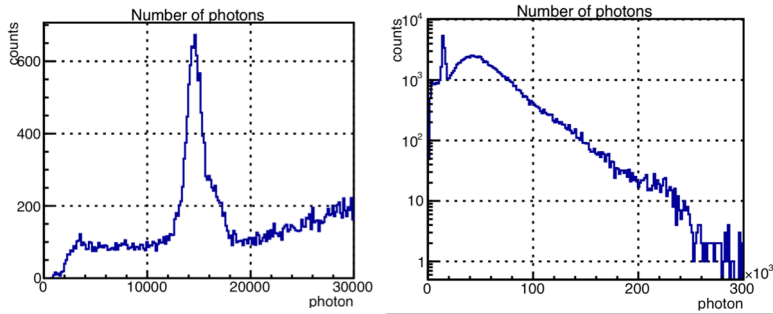
before cuts
: 49,063,444 entries

fiducial+ other cuts
: 473,530 entries



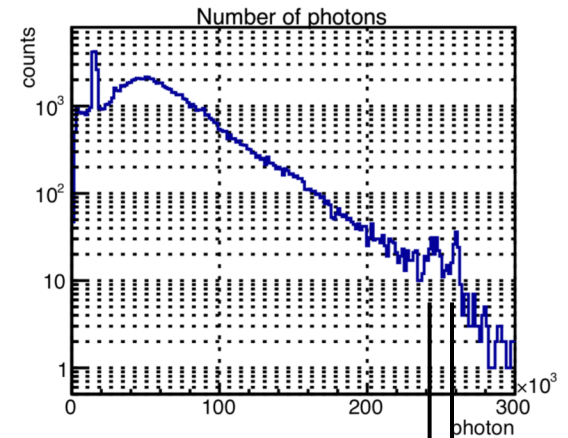
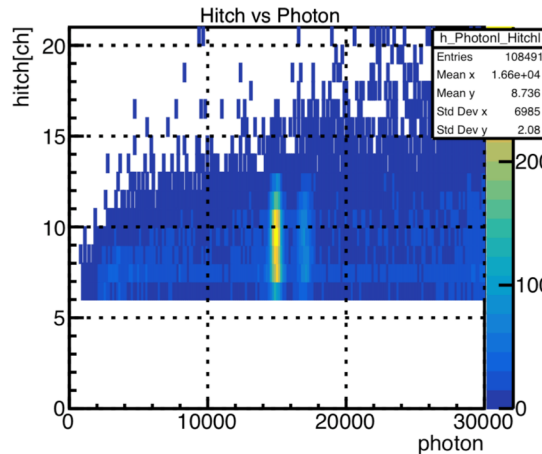
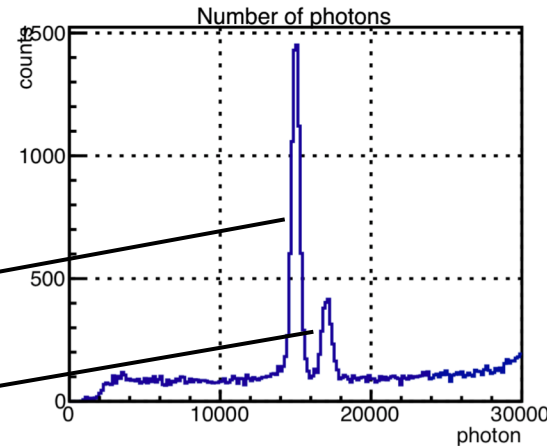
Correction

- ✓ セル毎のELゲインを揃える補正
 - ✓ MPPCの飽和補正
- を適用するとピークが明らか



K_{α} : 29.8 keV

K_{β} : 33.6 keV

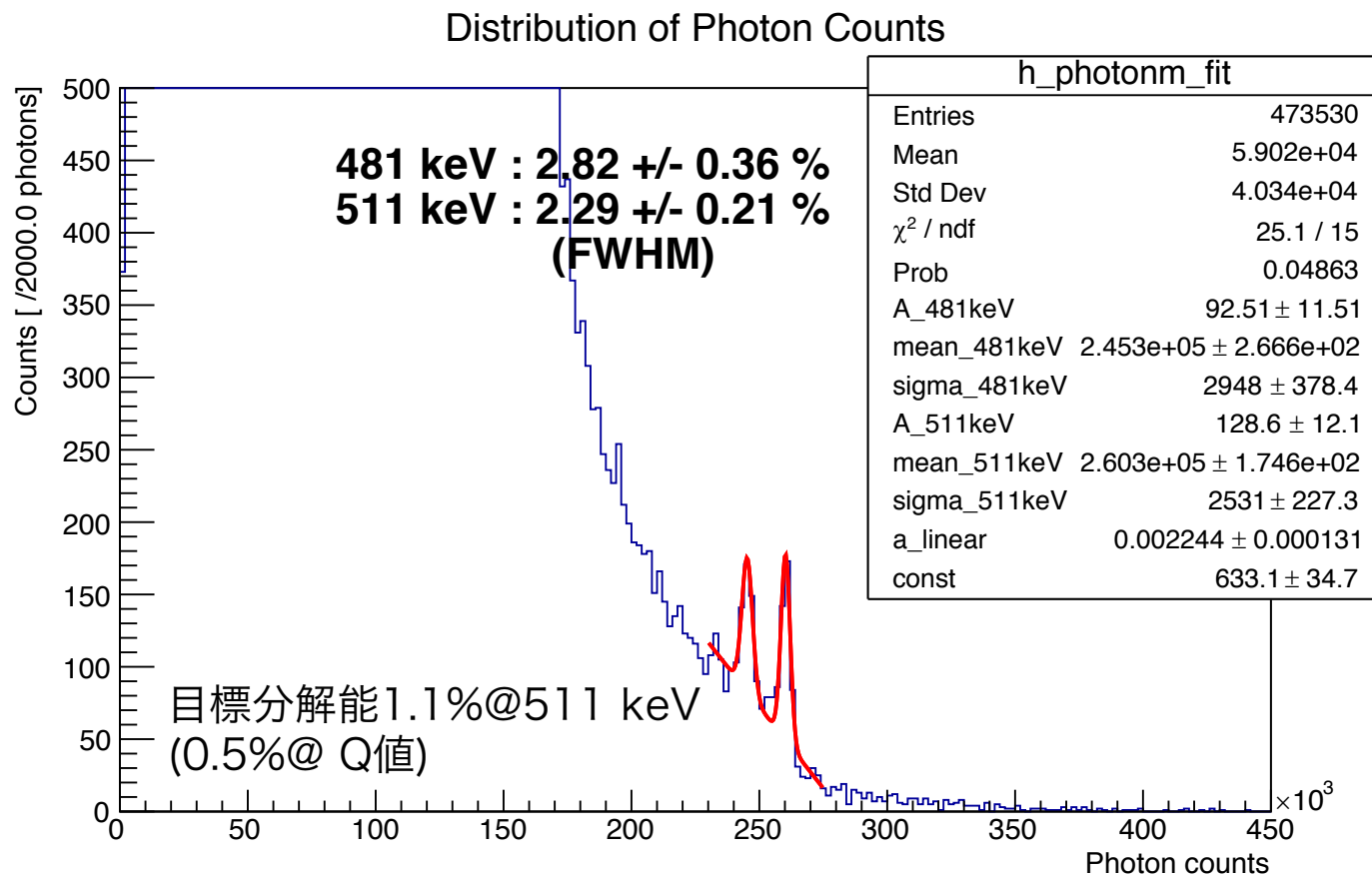


481 keV
エスケープピーク

511 keV

Result

481 keV, 511 keVを
gaussian + linearでフィットして分解能評価



PMTによるz再構成が入っていないので目標分解能には達していない
すでにPMTを含めたデータを取得済みで解析中!!

2019/12/06

MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

@理研和光キャンパス

Summary

- 高圧XeガスTPCによる $0\nu\beta\beta$ 探索実験AXEL
- Q値でのエネルギー分解能評価・大型化のノウハウ獲得のため180 L試作機を開発中

- ELCC, 読み出し系, フィールドケージ, CW回路, ガス系統など検出器の要素はほぼ完成

- ^{22}Na を使って分解能評価
- 511 keVのピークははっきりと見えた!!

Back up