

高圧キセノンガスTPCで ミグダル効果の観測なるか？

京都大 吉田 将
for the AXEL Collaboration

2020/12/09
ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

Outline

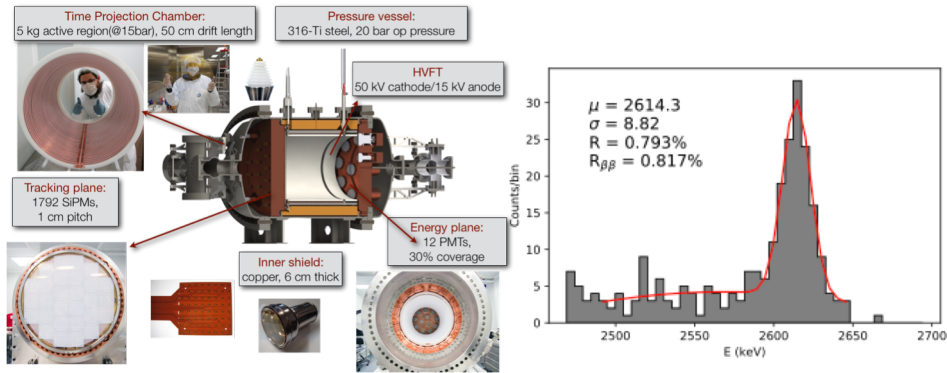
- Introduction
 - 高圧キセノンガスTPC
 - AXEL
- Detector Performance
 - エネルギー分解能
 - トラックイメージ
- Migdal effect observation
 - BG削減のアイデア

高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$

^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 探索のため、世界中で開発が進行中

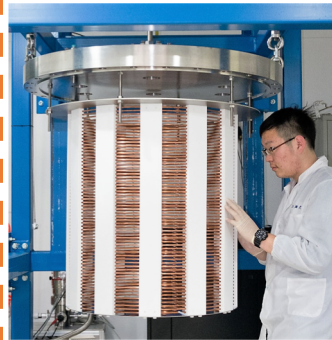
✓ NEXT(スペイン)・PandaX-III(中国)・AXEL(日本)

NEXT

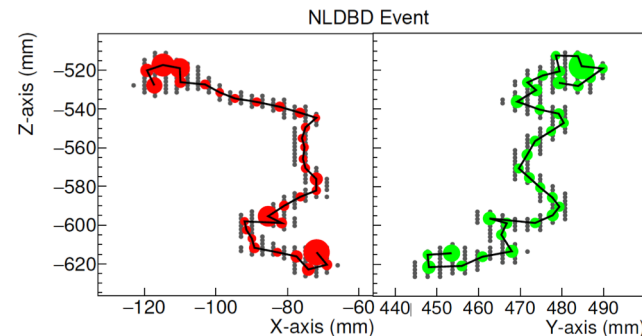


- pure Xe (^{136}Xe enriched)
- 15 bar
- エレクトロルミネセンス(EL)読み出し
- 0.8% FWHM @Q値(2458 keV)
- 5 kg試作機で測定
- 100 kg級検出器開発中

PandaX-III



- Xe + 1%TMA
- 10 bar
- アバランシェ読み出し
- ~3% FWHM@Q値
- 低拡散 → 飛跡◎
- 20 kg試作機でR&D



Ke Han and for the PandaX-III Collaboration

高圧XeガスTPCの特徴

良いところ

- ✓ エネルギー分解能
 - 原理的な限界は 0.25% FWHM @Q-value
 - 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

悪い(難しい)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

高圧XeガスTPCの特徴

ミグダル観測の
観点では……

良いところ

- ✓ エネルギー分解能
 - 原理的な限界は 0.25% FWHM @Q-value
 - 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

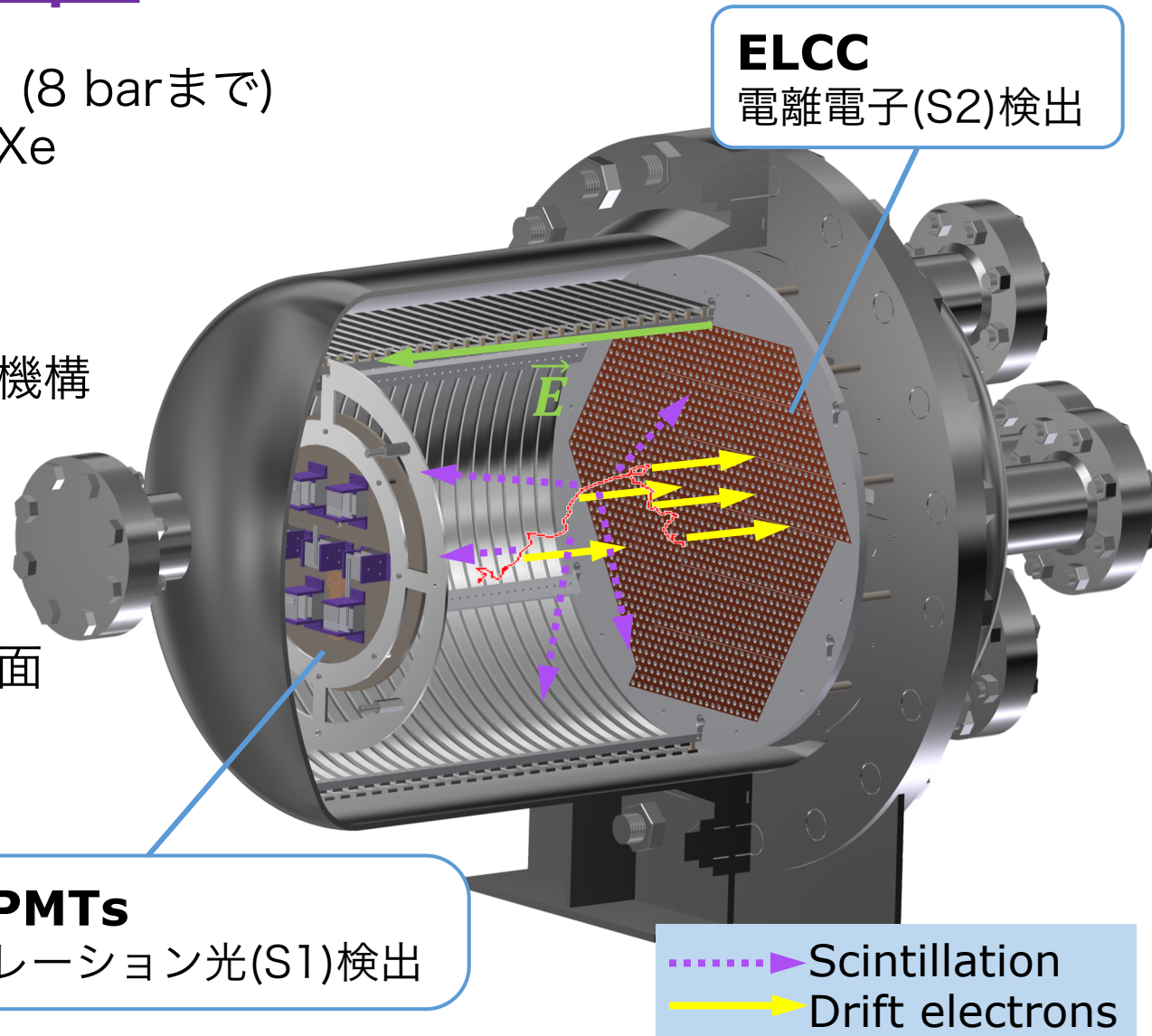
悪い(難しい)ところ

- × 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

AXEL concept A Xenon ElectroLuminescence detector

- 高圧キセノンガスTPC (8 barまで)
- 二重ベータ崩壊核: ^{136}Xe

- ✓ **高エネルギー分解能**
 - EL読み出し
 - 独自の電離電子検出機構 (ELCC)
- ✓ **大質量**
 - ^{136}Xe の濃縮が可能
 - 検出媒体 = 崩壊核
 - 拡張可能な電子検出面
- ✓ **背景事象除去**
 - 三次元飛跡再構成



VUV PMTs

シンチレーション光(S1)検出

ELCC

電離電子(S2)検出

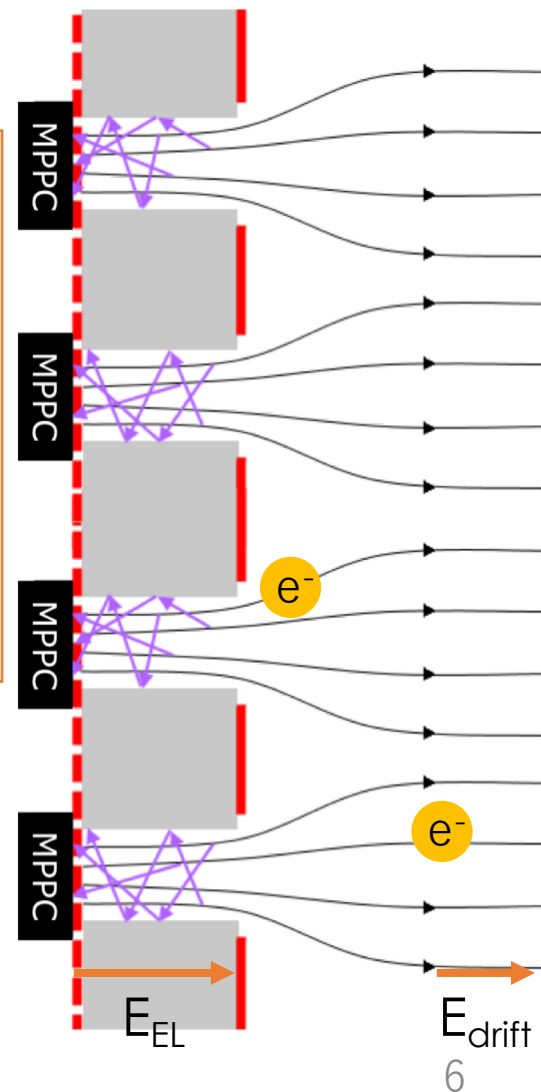
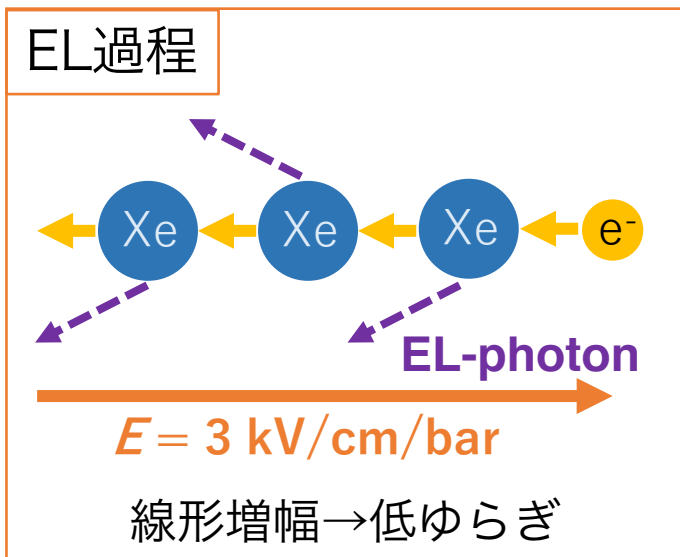
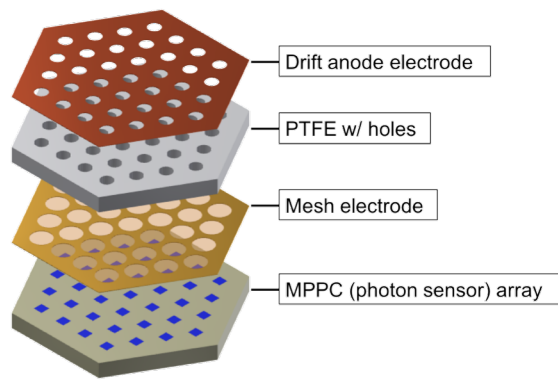
.....▶ Scintillation
————▶ Drift electrons

2020/12/09

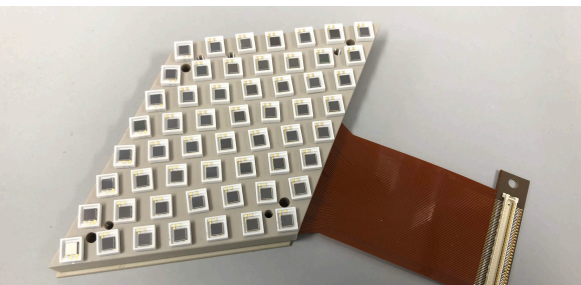
ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

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



- 56 ch/unit
- チャンネル間は10 mm



ユニットのMPPCアレイ部

2020/12/09

ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

Detector AXEL 180L試作機 phase1.1

フィールドケージ, PMT

L 10 cm

ϕ 16 cm

圧力容器, フィードスルー

MPPC波形取得回路→

ELCC

- ✓ $56 \text{ ch/unit} \times 3 \text{ units} = 168 \text{ ch}$
- ✓ フレキシブル基板のケーブルを通して波形取得回路へ
- ✓ 1 unitにつき1枚の回路

2020/12/09

ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

Detector AXEL 180L試作機 phase 1.2 大型化進行中!!

フィールドケージ, PMT

L 10 cm

ϕ 16 cm



L 20 cm

ϕ 50 cm

ELCC

2020/12/09

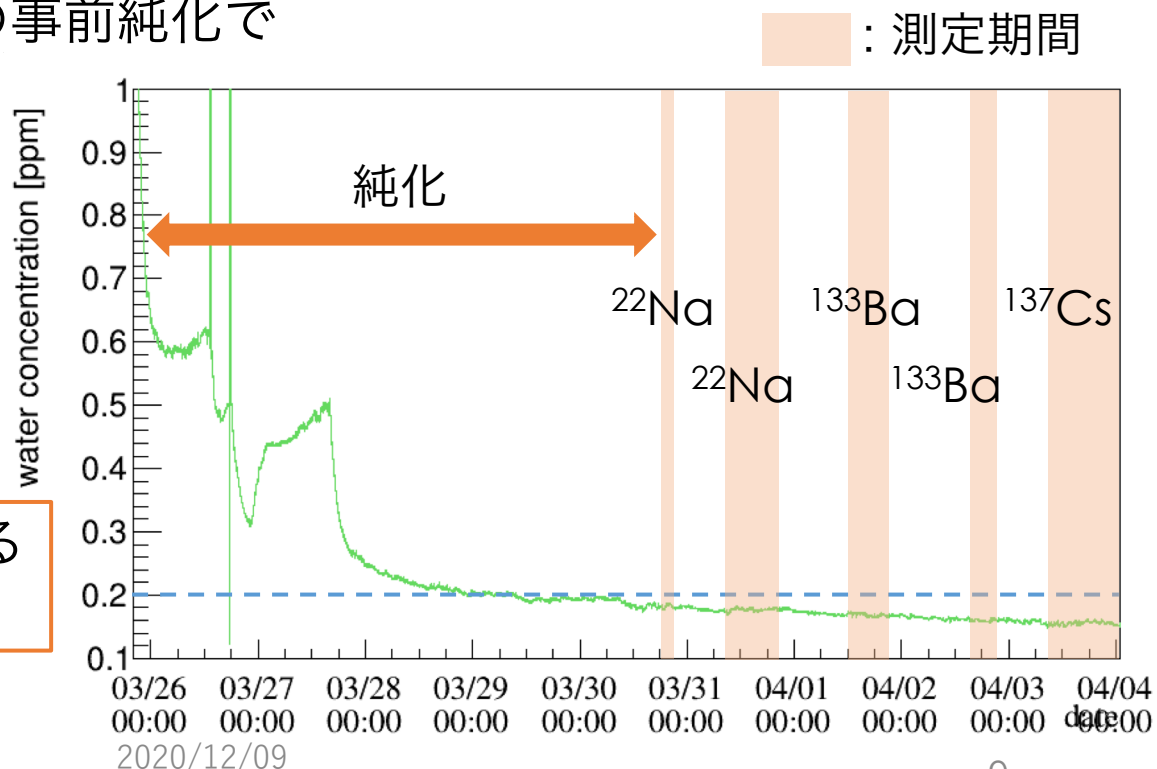
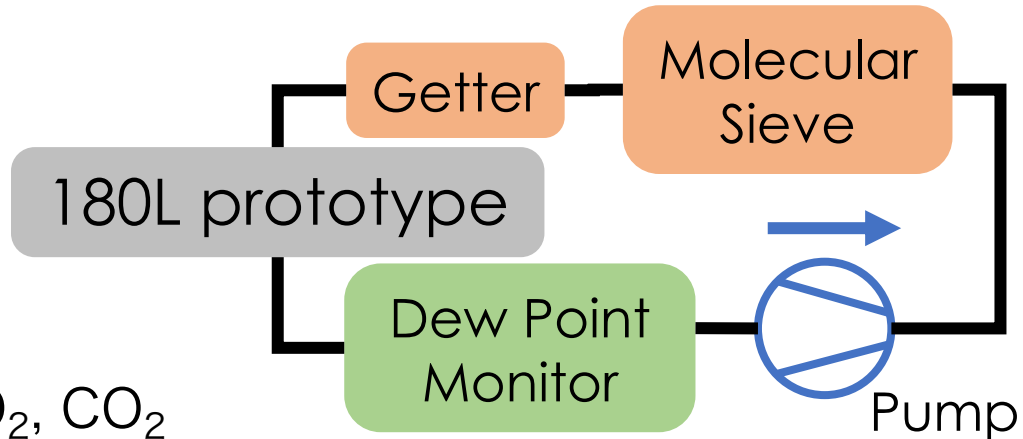
ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

Measurement

- 180L試作機phase1.1
- 導入キセノン圧力: 3.8 bar
- 2種類のフィルターを通して純化
 - モレキュラーシーブ: H_2O , O_2 , CO_2
 - ゲッター: N_2 も
- キセノン純度を露点計でモニター
 - キセノン導入後4日間の事前純化で水分量 < 0.2 ppm
 - 測定中も継続して純化
- 線源: ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs

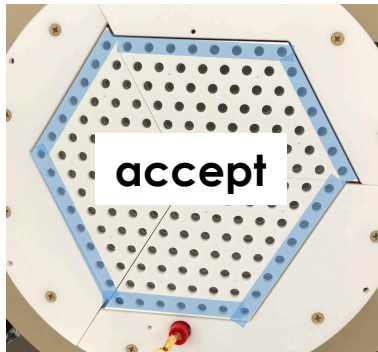


ガンマ線のエネルギーに対する分解能の依存性を確認

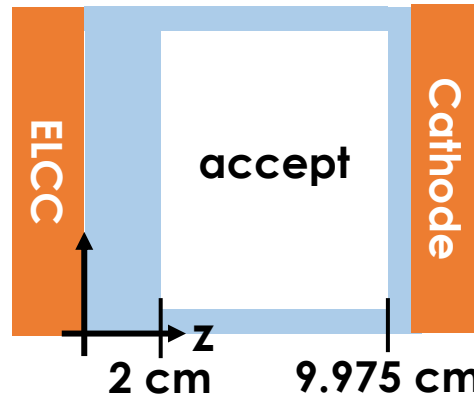


Analysis/Cut · Correction

- fiducial cut: 完全に収まるイベントのみ残す
- No cut → xy fiducial cut → z fiducial cut : total **15%** efficiency

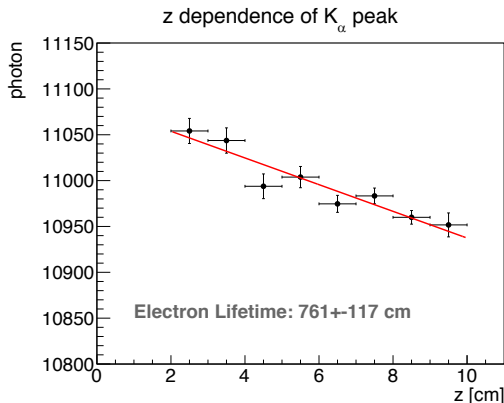
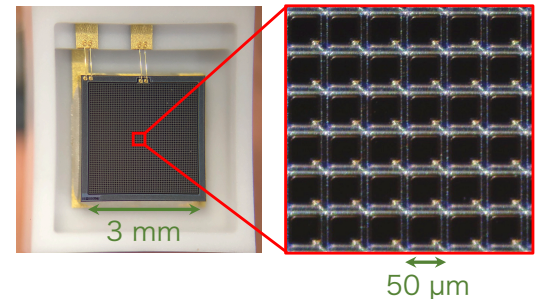
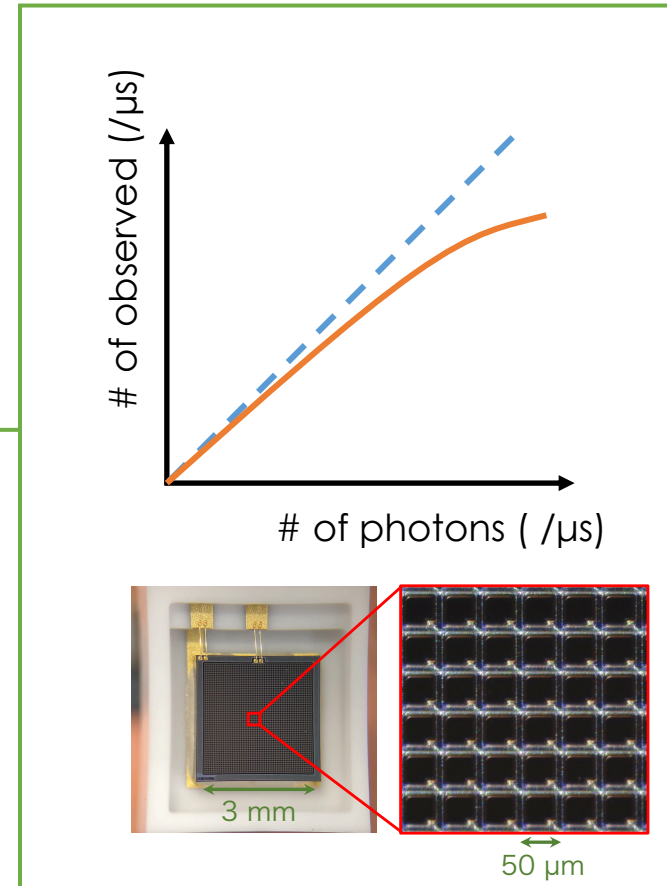


x 35%



x 40%

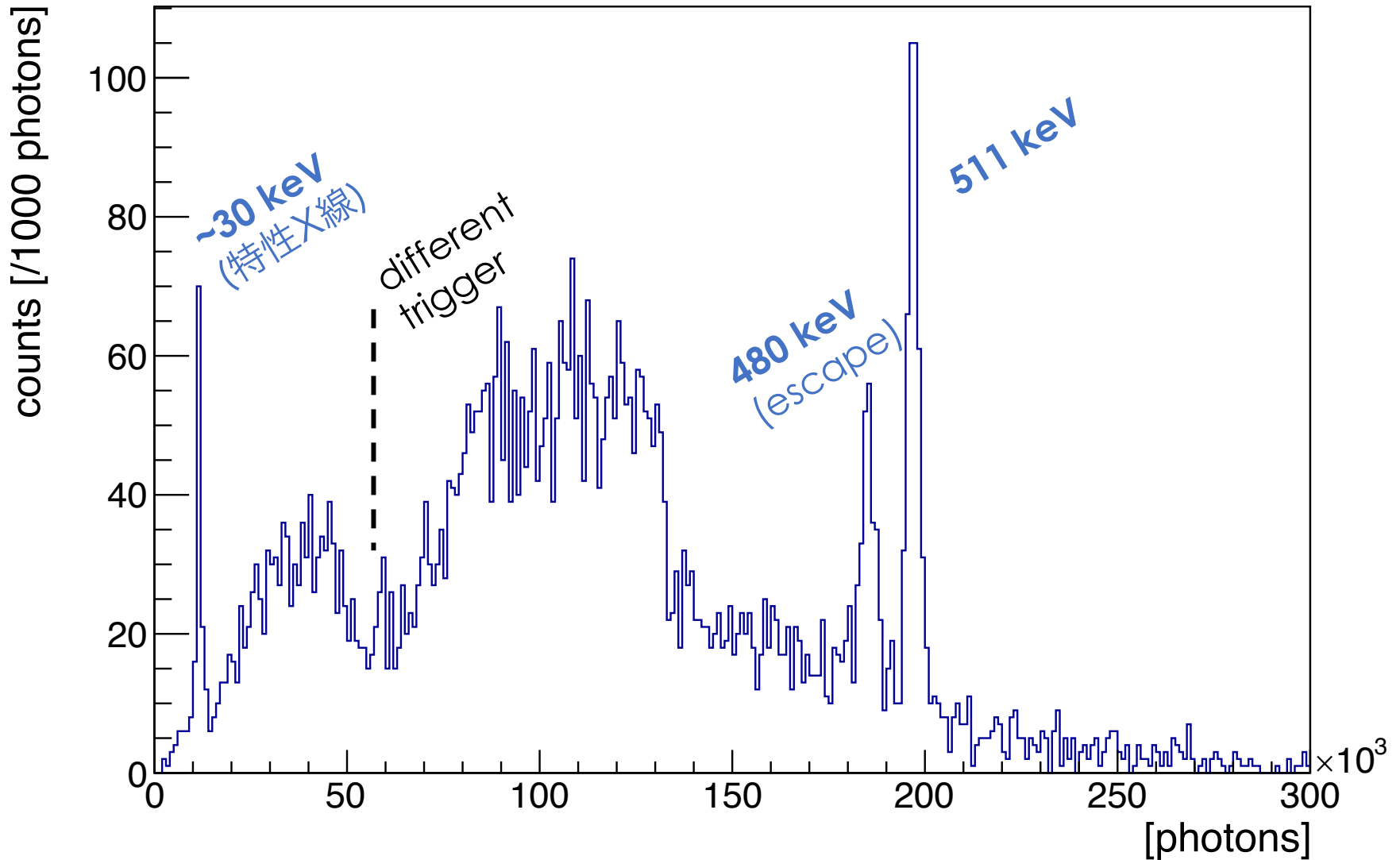
- EL増幅率を全チャンネルで揃える補正
- 大光量に対するMPPC出力飽和の補正
- 光量の時間変動の補正
- ドリフト中の電子吸着の補正



Obtained Spectrum

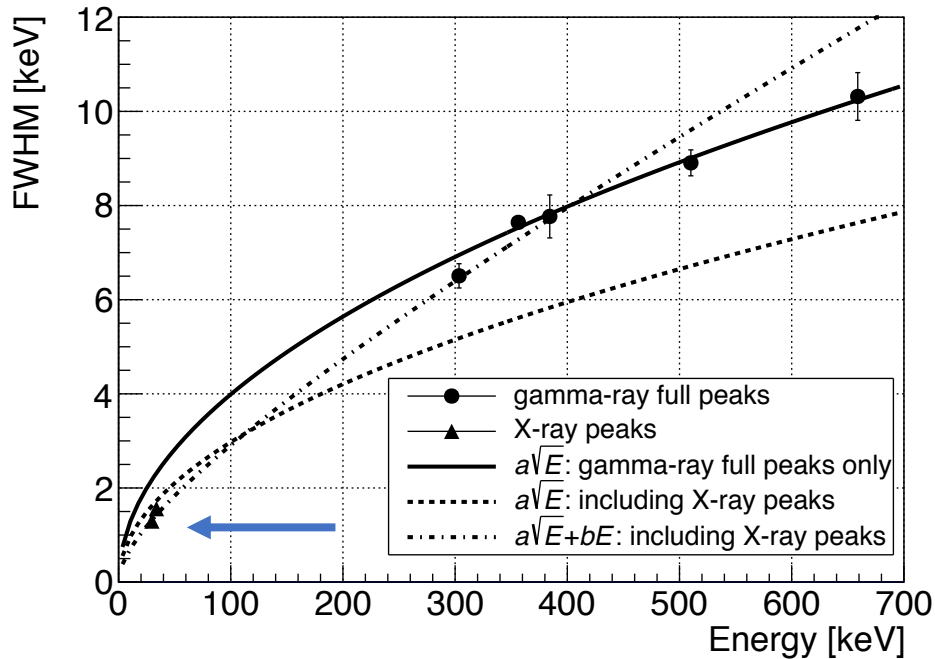
- ^{22}Na ランの光量分布
(エネルギースペクトルに対応)

Number of Photons



Energy Resolution

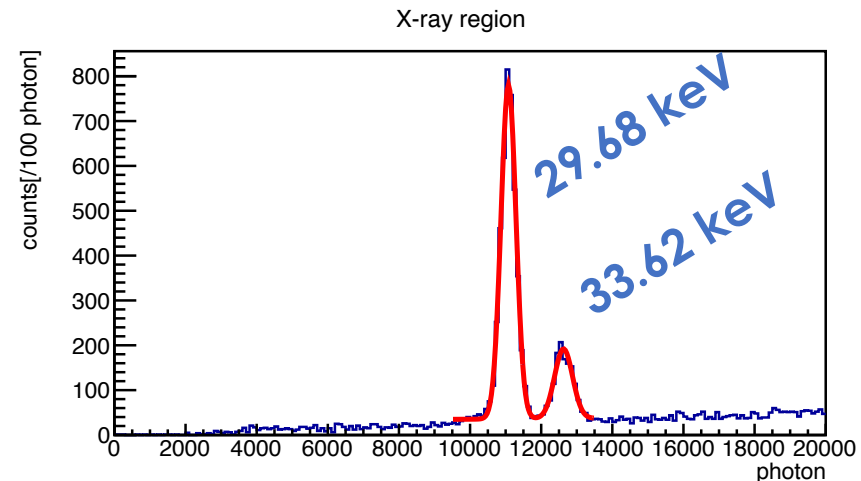
Energy Resolution



- ガンマ線フルピーク(黒丸)のエネルギー分解能は \sqrt{E} に乗っている → 統計ゆらぎ

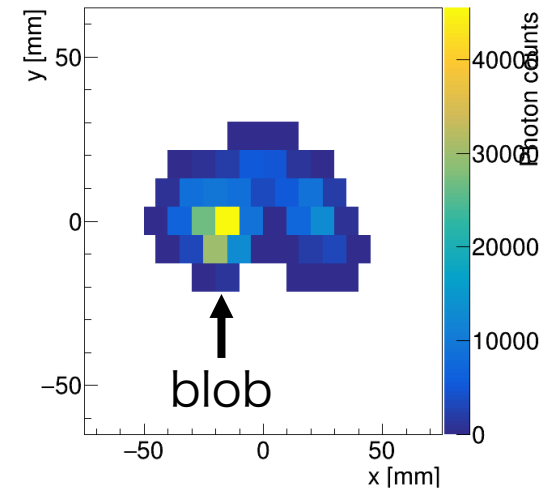
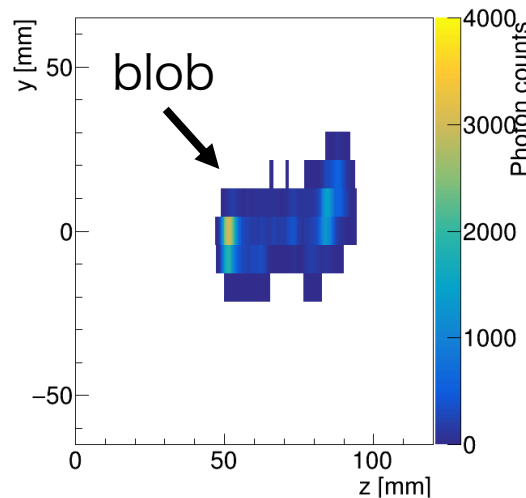
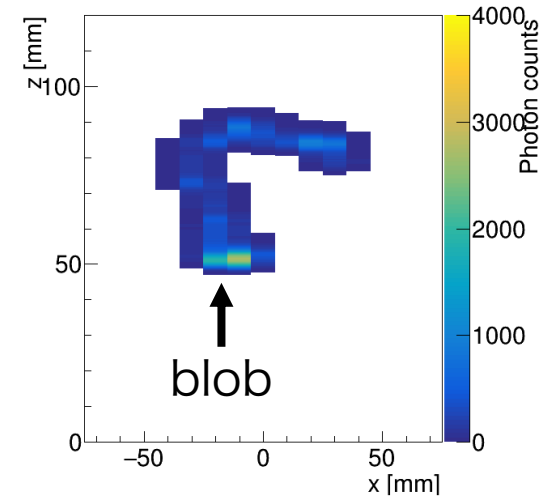
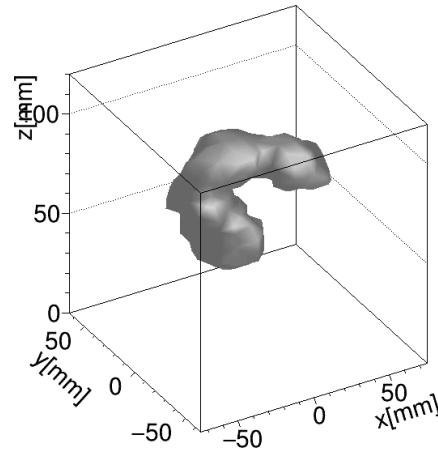
Q値 2458 keVまで外挿すると
0.8% FWHM
 (高圧XeガスTPCでは世界最高レベル)

- キセノンの特性X線
 ($K_{\alpha} = 29.68 \text{ keV}$, $K_{\beta} = 33.62 \text{ keV}$)
 に対してはもっと良い
 - 4.5% FWHM
 - Q値に外挿すると0.5%
- MPPCの飽和が少ない?



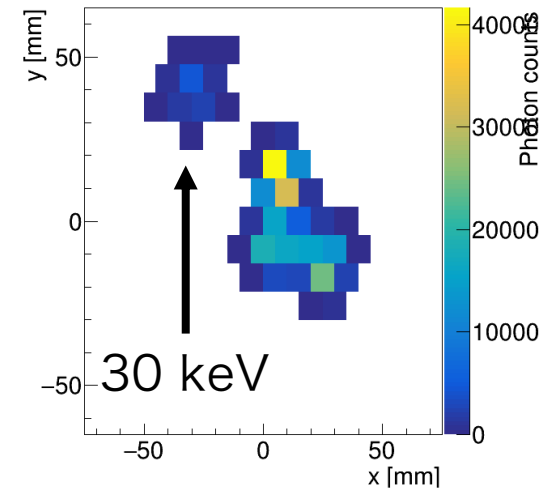
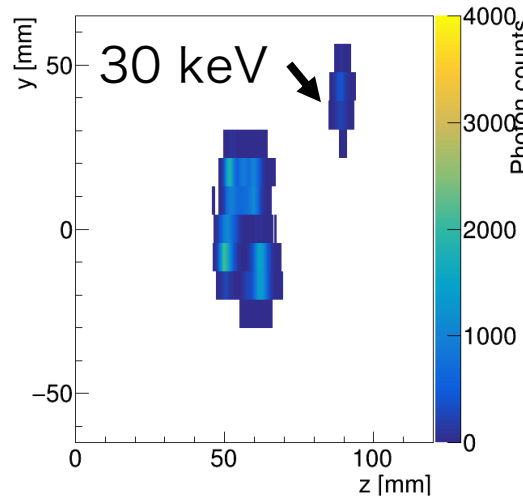
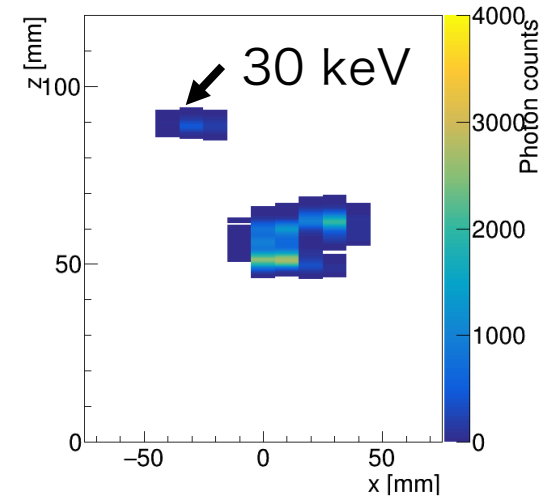
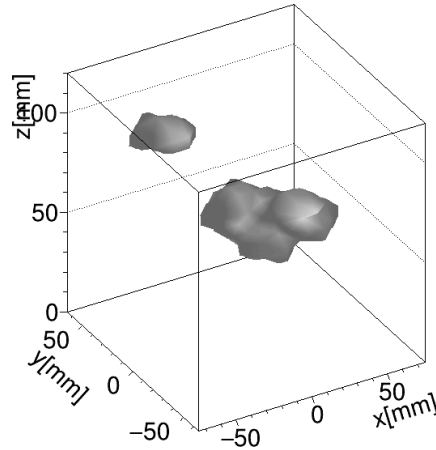
Event Display

- ^{137}Cs , 662 keVの典型的なイベント
- dE/dx の小さい部分と dE/dx の大きい終端(blob)が分かっている



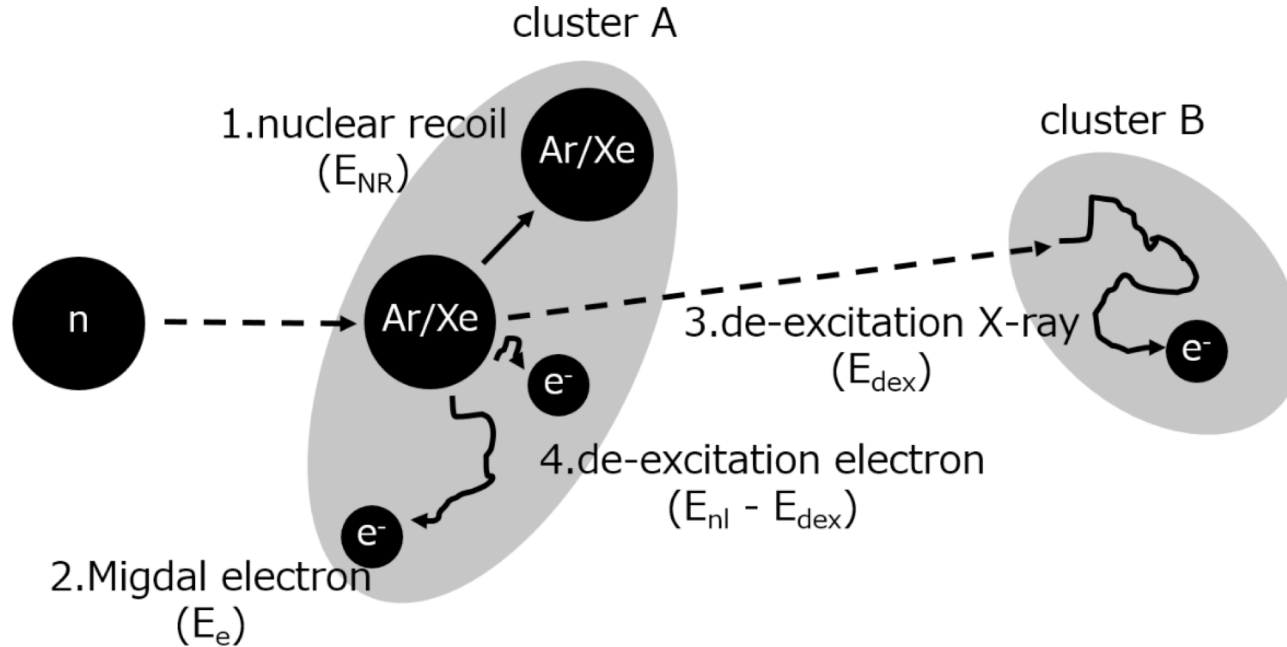
Event Display

- 同じく ^{137}Cs , 662 keVで30 keV特性X線がクラスター分離している (632 keV + 30 keV)
- 4気圧Xeでの吸収長~4 cm クラスター分離可能



Migdal観測への転用

図はDAY1の中村輝石さんtalkより



✓ 2クラスター 分離 → OK: (4 barでは)

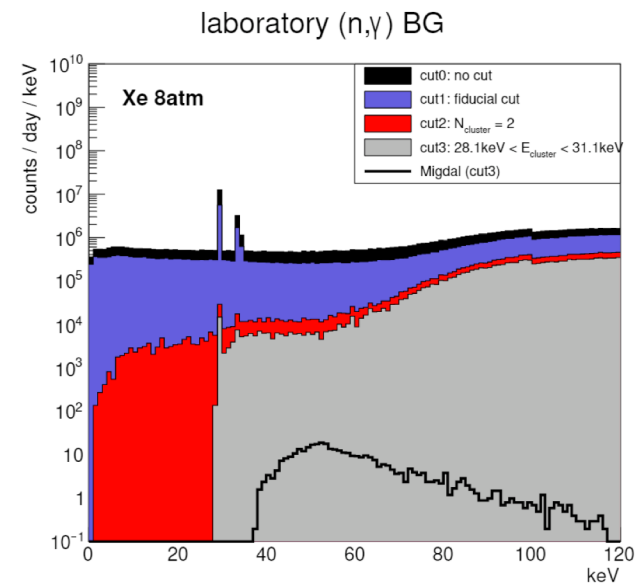
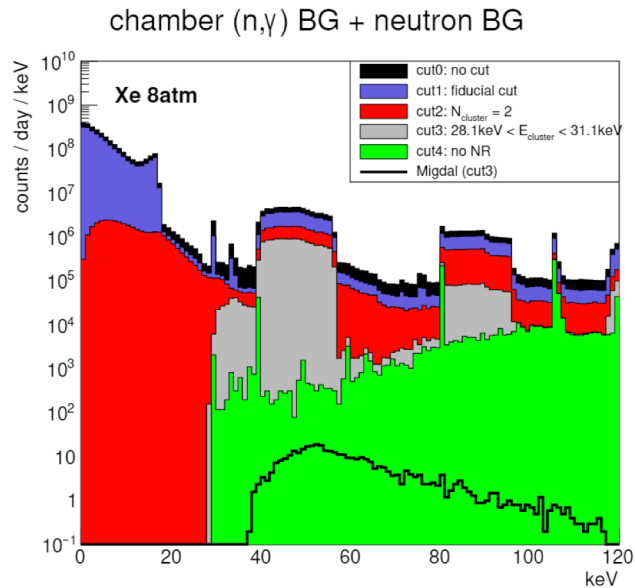
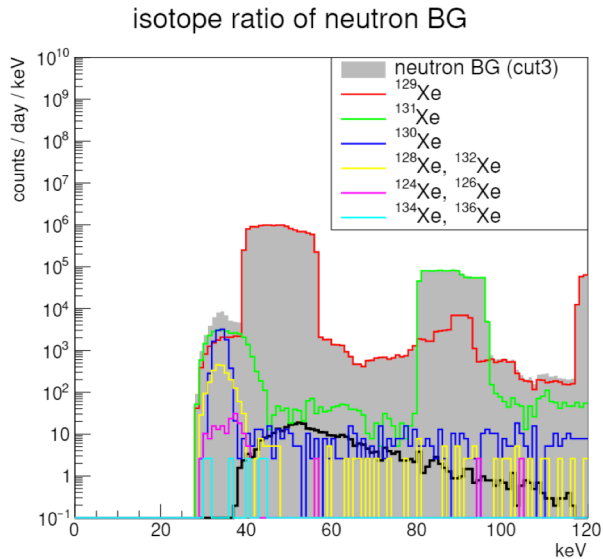
現在5.5 barで測定中, 目標は8 bar

✓ クラスターBのエネルギー測定 → OK: 分解能4.5%FWHM@30 keV

バックグラウンドを減らせるか？

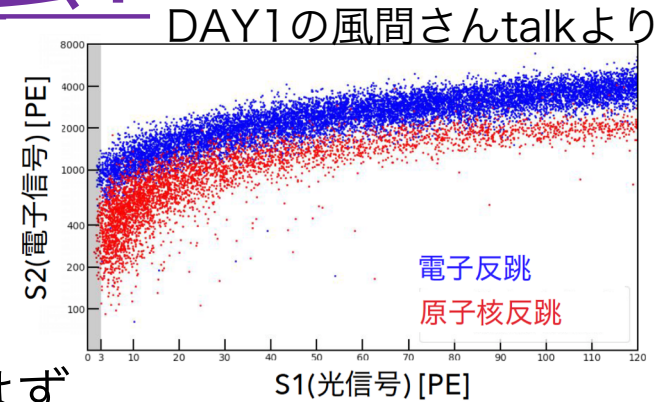
図はDAY1の中村輝石さんtalkより

- 中性子ビーム測定での主なバックグラウンド
 - キセノン由来: ^{129}Xe の非弾性散乱・ ^{131}Xe の中性子捕獲
..... ^{136}Xe 濃縮ガスは(高価だが)手に入る
 - チェンバー・実験室の(n, γ)
..... 2クラスターカット・クラスターBのエネルギーカットをしても残る
このBGはER x 2, Migdal事象はNR + ER

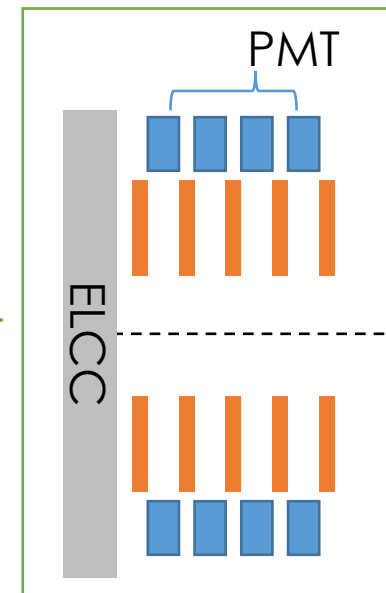


NR・ER分離によるBG除去?

- 2相式TPCではS2/S1によってERとNRの分離が可能



- 高圧キセノンガスTPCでも原理的にはできるはず
 - 過去に試みはあるがデータが少なくなんとも言えない
- クラスターごとにNR・ER分離ができれば、NR + ERの事象だけを選ぶ
→ Migdal事象だけを選択可能! ?
 - 現状のAXEL試作機ではS1をクラスター分離できず、クラスターごとにS2/S1を測ることは不可能
 - どうにかしてS1の位置分解能が出せればよい
ideas
 - ✓ PMTを側面につけて視野を絞りドリフト方向に分離?
 - ✓ マルチアノードPMT?(VUV・高圧対応で作れば)



2020/12/09

ミグダル観測検討会DAY2@神戸大学

Summary

- 高圧キセノンガスTPC
 - $0\nu\beta\beta$ 探索が物理目標
 - 高エネルギー分解能・飛跡再構成能力を持つAXEL

- 試作機開発中
 - Q値に外挿して0.8% FWHMのエネルギー分解能を達成
 - 30 keV特性X線に対しては4.5% FWHM
 - 飛跡再構成で30 keVのクラスター分離が可能

- Migdal観測のバックグラウンドはER・NR分離で減らせる？
 - クラスターごとにS2/S1を測れるかが鍵
 - S1の位置分解能の向上が必要