



# ガスキセノン検出器による原子核反跳 に伴ったミグダル効果観測

東北大学素粒子実験(加速器)研究室

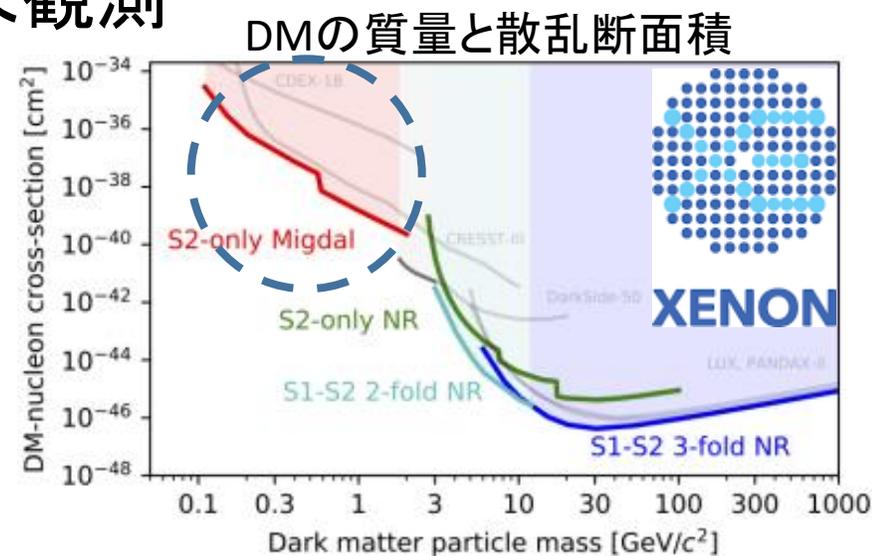
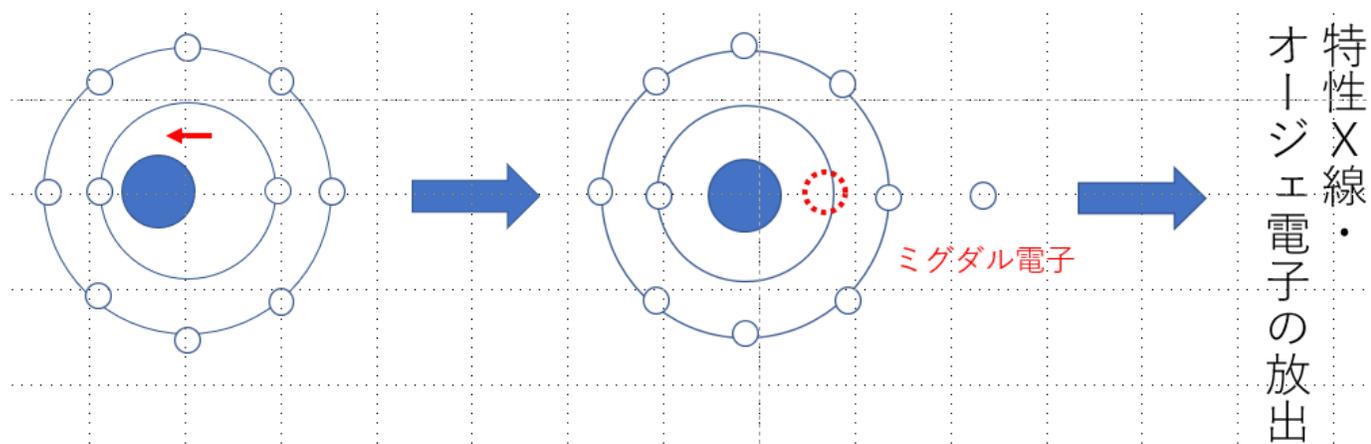
M2 内山偉貴

# イントロ

ミグダル効果とMIRACLUE実験

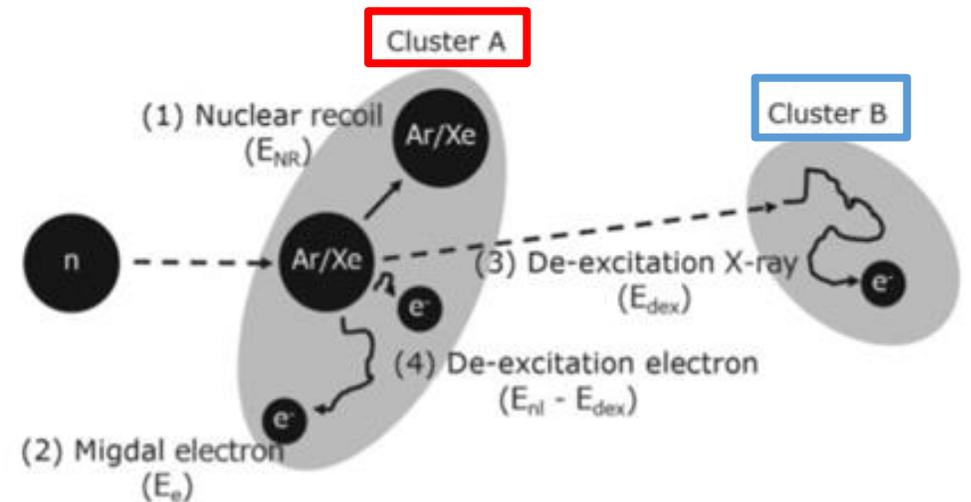
# ミグダル効果とは

- 原子核がエネルギーを得て動くときに、その原子核に束縛された電子が低確率で励起や電離を起こす現象
- 暗黒物質探索のエネルギー閾値が下がり、暗黒物質探索の感度が向上
- 原子核反跳に伴うミグダル効果は実験的に未観測



# ミグダル効果観測実験 (MIRACLUE実験)

- 中性子ビームをガス検出器に照射
  - 東北大: GXe検出器 (5atm)
  - 神戸大: GAr検出器 (1atm)
- 特徴的な2つのクラスターを観測
  - **クラスターA**: 反跳原子核 + ミグダル電子など
  - **クラスターB**: 特性X線



PTEP, 2021(1), 013C01

# ガスキセノン検出器

## • TPC検出器

### • ELCC

- 電離電子を**エレクトロルミネッセンス光**で読みだす
- 1cm間隔で計168chを六角形状に配列

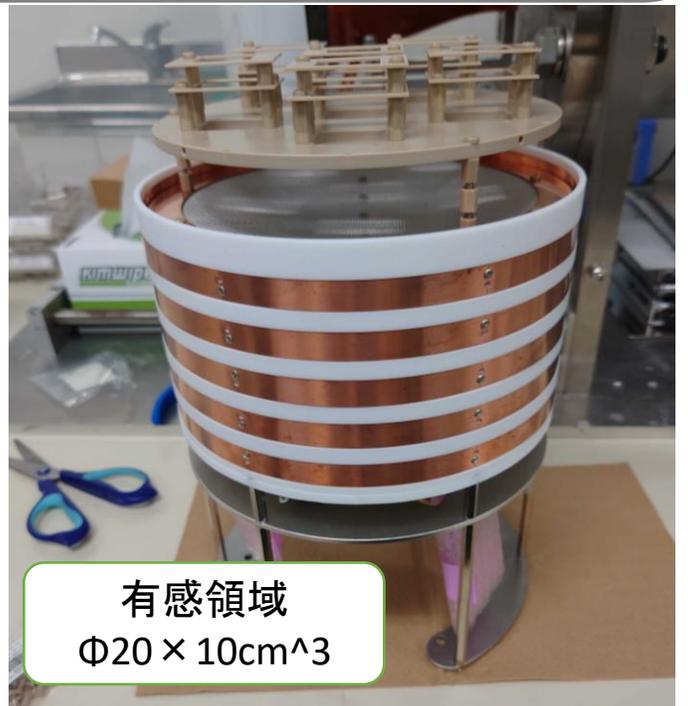
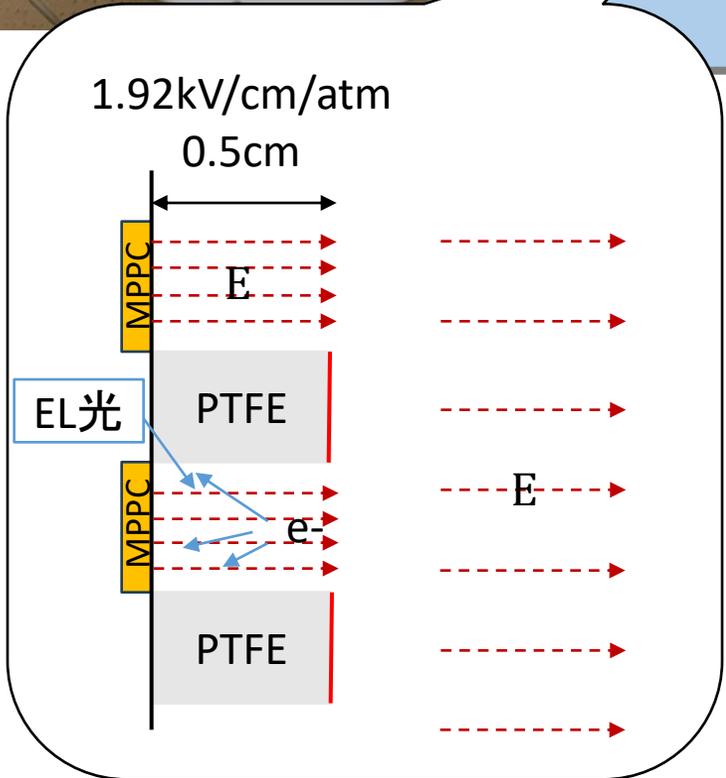
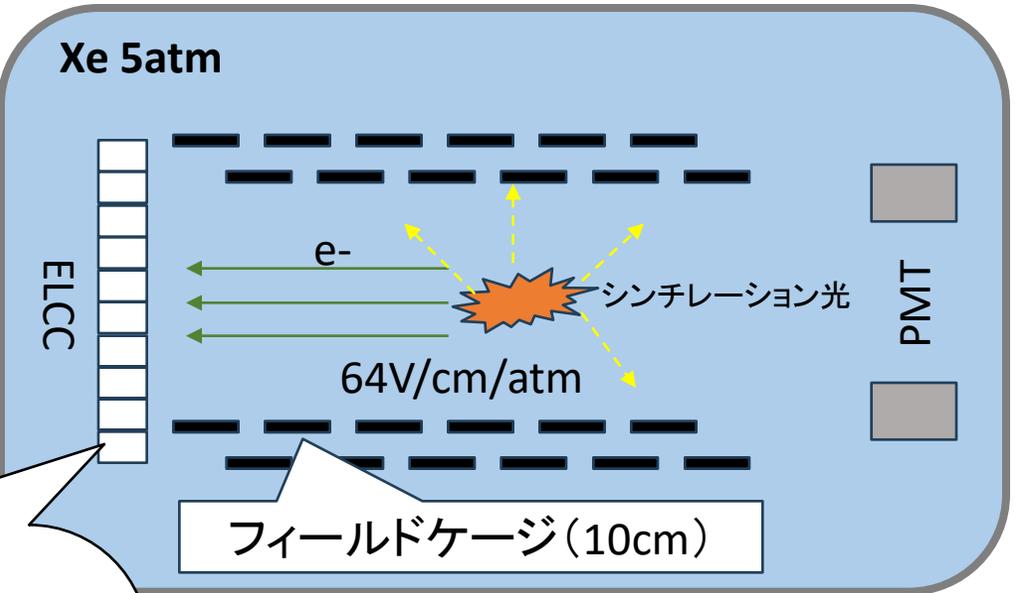
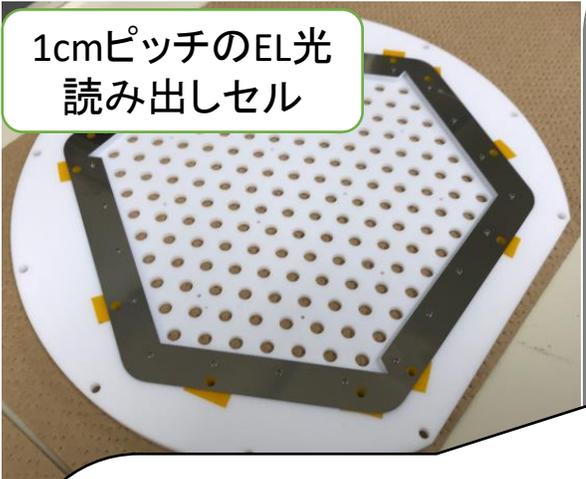
### • 有感領域

- $\Phi 20 \times 10\text{cm}^3$

## • ガスキセノン5気圧封入

## • 印加電圧8kV

- ドリフト電場:  $64\text{V/cm/atm}$
- ELCC内:  $1.92\text{kV/cm/atm}$



# ガスキセノン検出器のDAQ

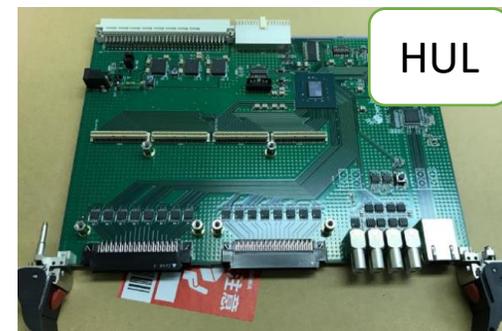
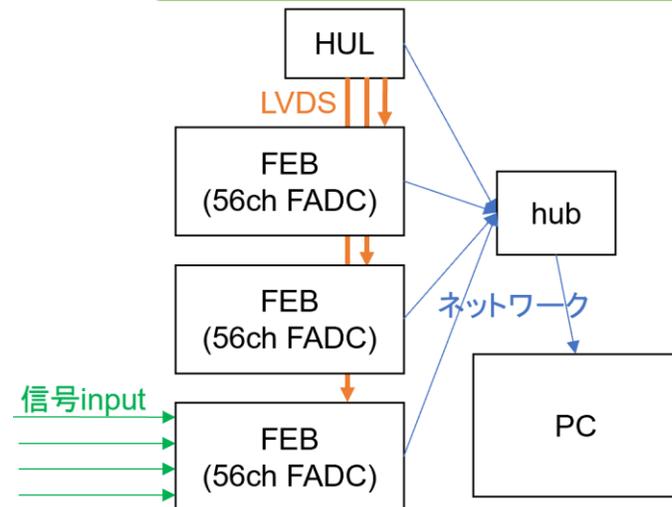
## 読み出し回路

- FEB3枚とHULボードを用いたAXELのシステムを流用
- FEB: 56ch読める
- HUL: FEBのトリガーをにかけている

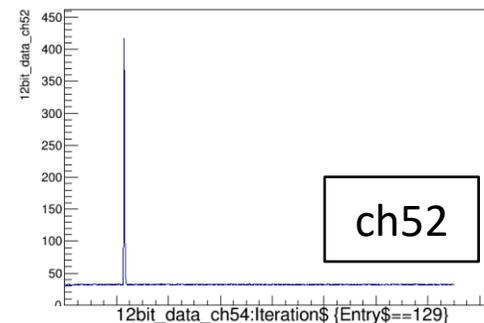
## DAQ

- EL光の波形取得
  - 5MHzで1500clock(300us分)取得
  - 12bitで最大2Vp.p.まで
- ダークカウント測定
  - 1p.e.ゲインを各chで取得

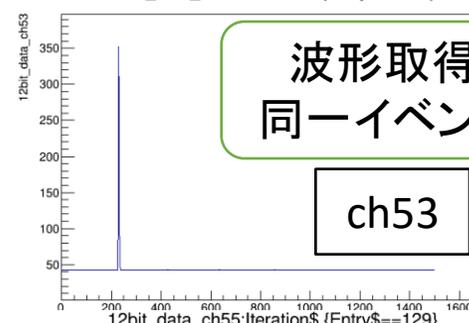
## データ取得の概略図



12bit\_data\_ch52:Iteration\${Entry\$==129}

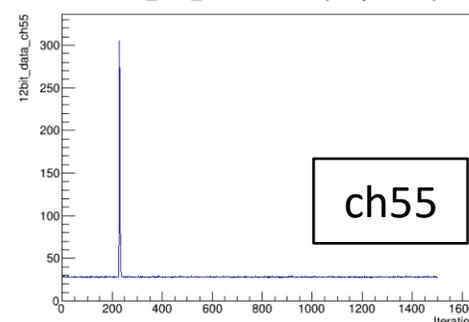
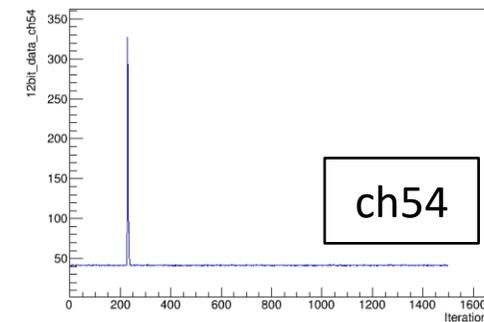


12bit\_data\_ch53:Iteration\${Entry\$==129}



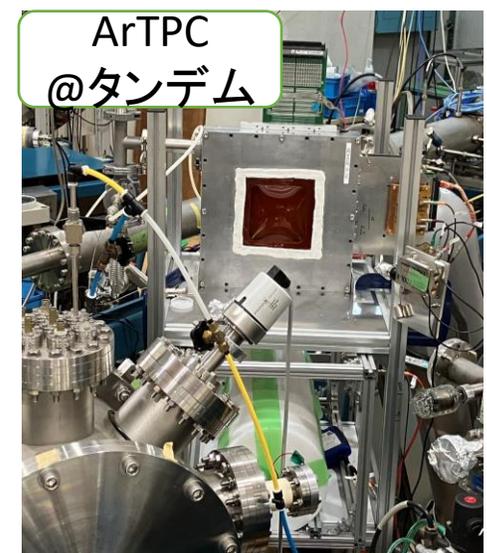
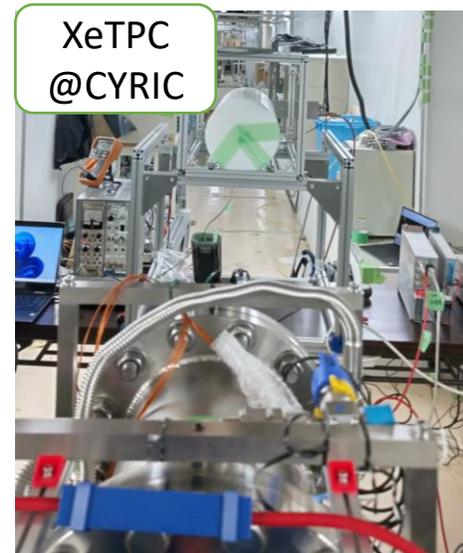
波形取得  
同一イベント

12bit\_data\_ch54:Iteration\${Entry\$==129}



# 実施した中性子ビーム試験一覧

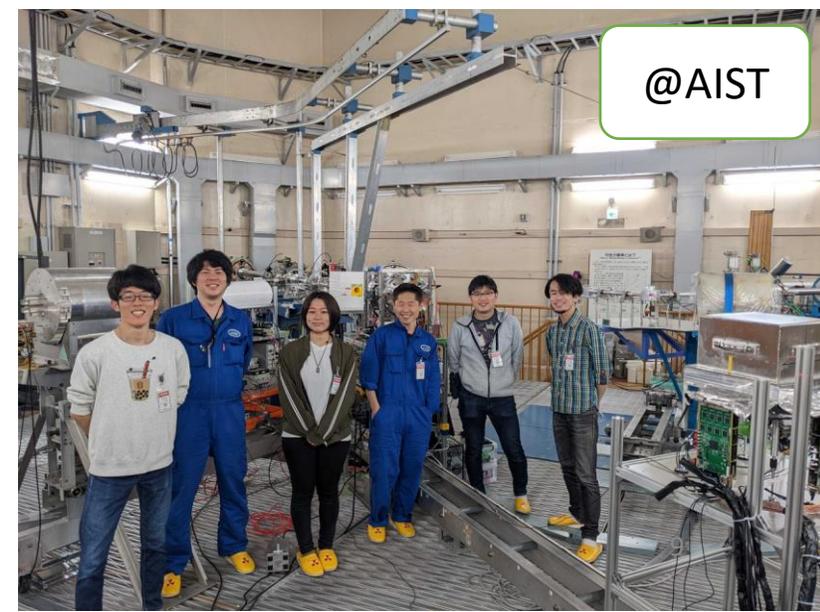
- 2022年4月@AIST
  - ミグダル効果観測実験
    - 565keV中性子をAr検出器、Xe検出器に照射
- 2022年12月@AIST
  - Ar検出器の性能評価実験(原子核反跳が見えるか)
- 2023年7月@CYRIC
  - 10MeV中性子をXe検出器に照射
- 2023年11月@タンデム
  - Ar検出器の放電耐性実験
  - 放電しないArとエタンのガス比率を探す



# ビーム試験結果

# 2022年4月の中性子ビーム試験

- KEK
  - プラットフォームCの支援
  - ビーム試験前日まで真空引き
  - 当日にXeガス5気圧を封入  
→AISTへ運搬
- AIST
  - ${}^7\text{Li}$  にpを衝突させ中性子ビーム生成
  - 565keV(@正面)
  - 1000 n/s/cm<sup>2</sup> (@1m)



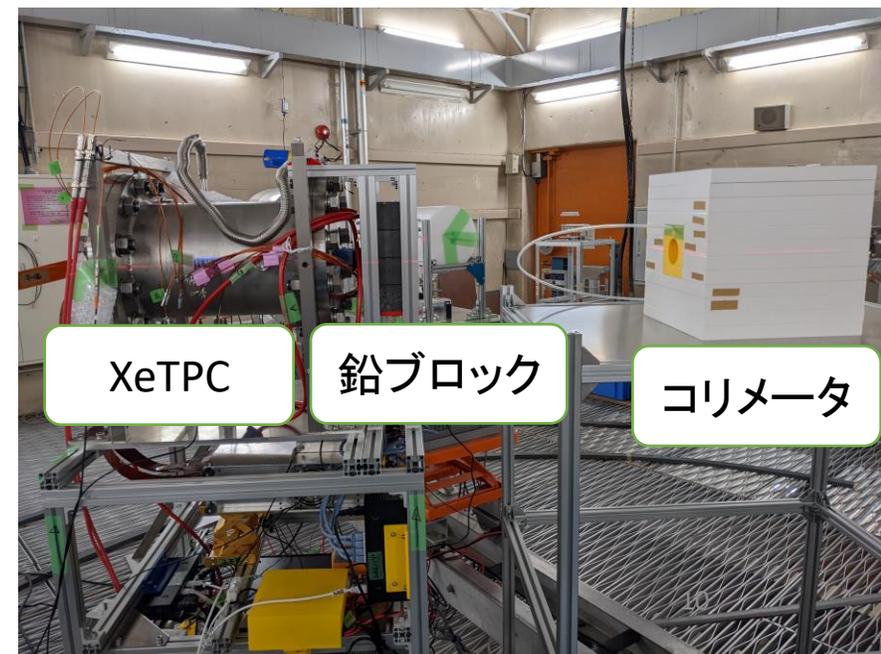
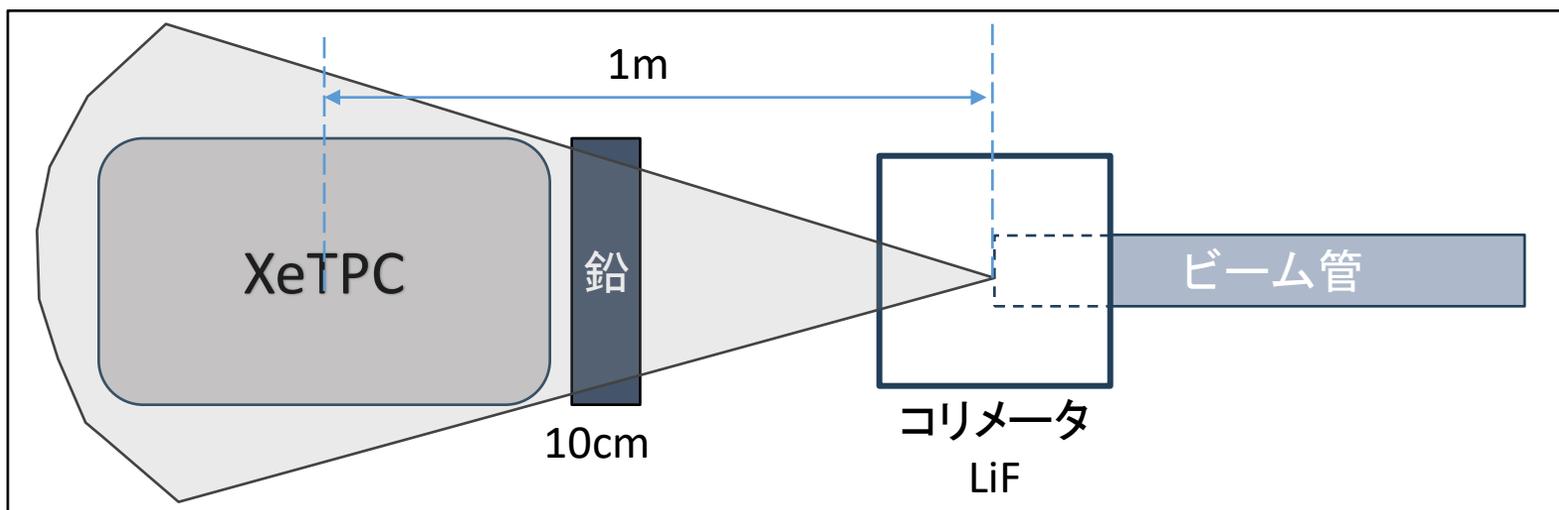
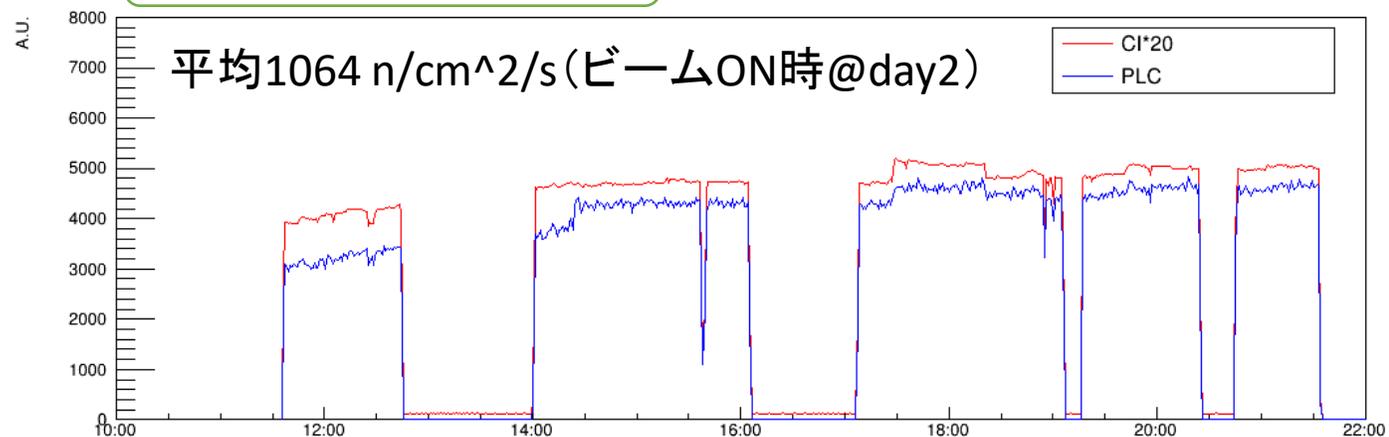
# 中性子ビーム試験@AIST

## • セットアップ

- ビーム口から1mの位置にXeTPC
- 壁や床での(n, $\gamma$ )を防ぐためのコリメータ
- 前方のLi(n, $\gamma$ )の $\gamma$ 線を遮蔽する鉛ブロック

## ビーム強度の時間変動

20220413



# runの状況

- ビーム試験を2日間実施
  - 1日目: Ar検出器@1m、その後ろにXe検出器
  - 2日目: Xe検出器@1m、その後ろにAr検出器
- 解析に使用したrun
  - 最も高いHVをかけたデータ
    - HVを上げながら測定
    - 8kVから8.4kVへ上げた際に継続的に放電したためHV8kVのデータを採用
  - 途中でデータ取得を止めたりエラーが生じたデータは除外

解析対象のrunのrealtimeとlifetime

run番号	realtime[s]	lifetime[s]	lifetime/realtime (%)
run020	1268.33	52.85	4.2
run022	1284.56	43.47	3.4
run024	1323.42	23.54	1.8
run025	1302.27	41.02	3.1
run028	1366.94	13.24	1.0

- 解析データの全runのlifetimeは174.12s
- lifetime/realtimeは3%程度

# 解析の流れ

- エネルギーの求め方

- 波形

MPPCの1p.e.ゲイン解析

- photon数

MPPCのサチュレーション補正

- photon数の補正

ELゲイン補正

- エネルギー

- クラスターの数の求め方

- Hitイベントの位置

クラスター識別

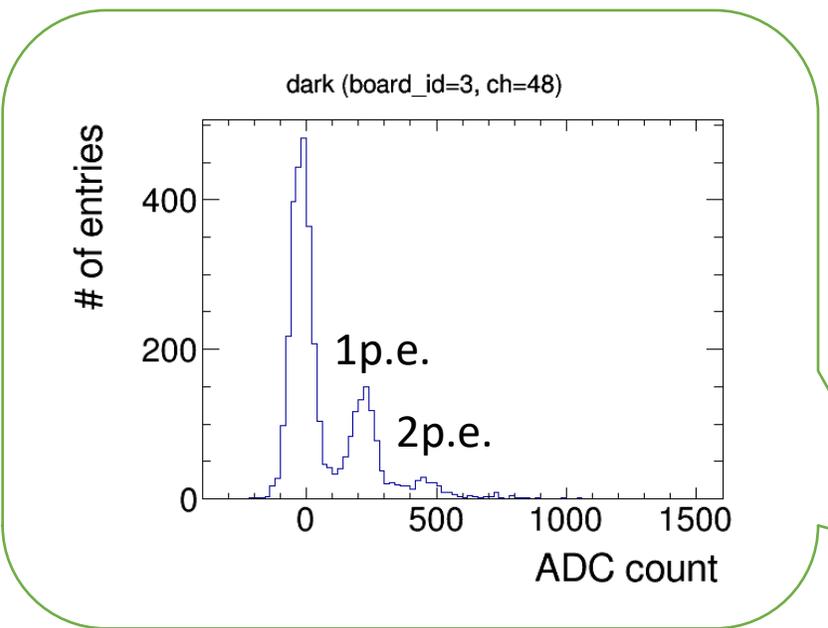
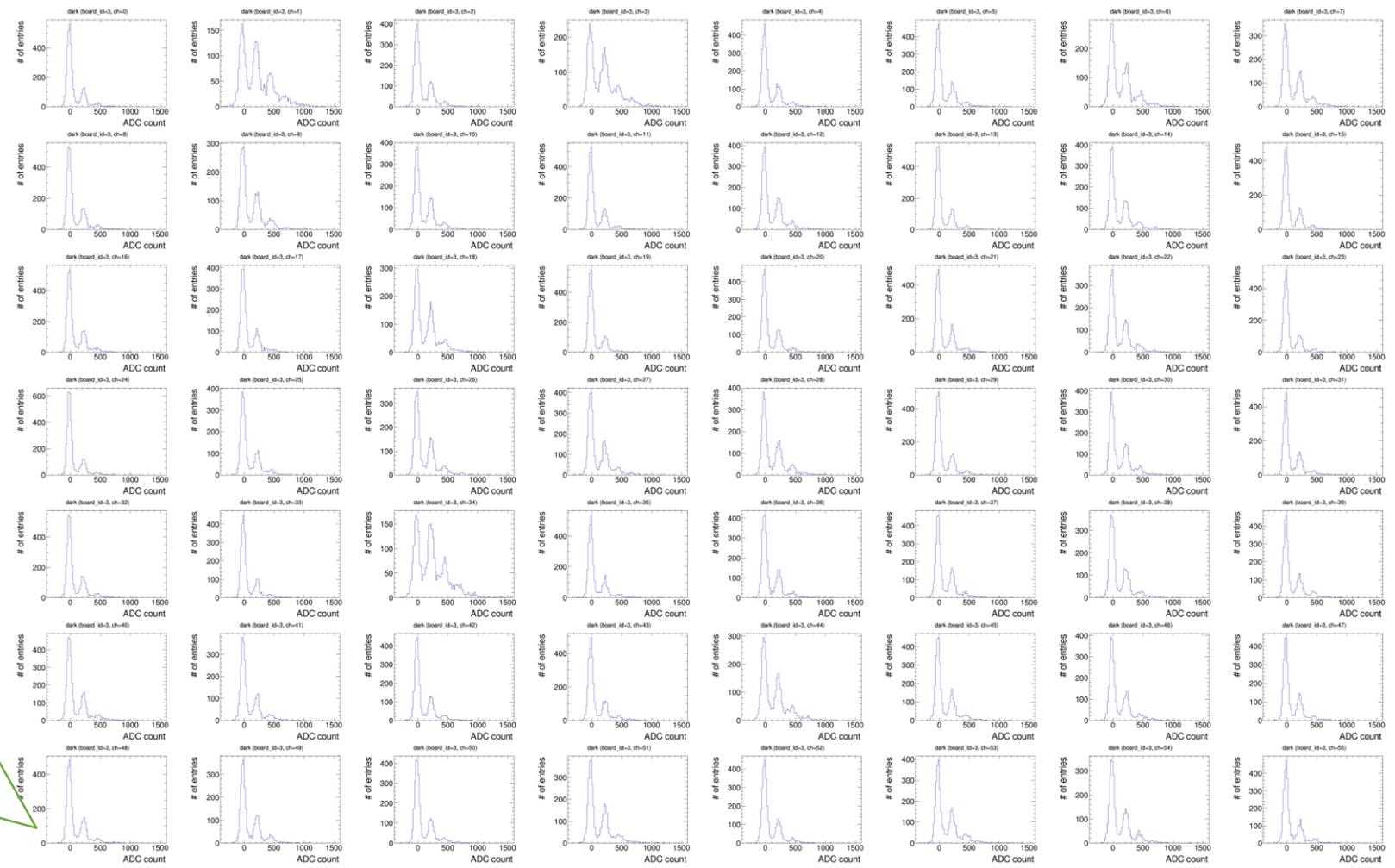
- クラスター数

# 1p.e.ゲイン

- MPPCのダークカウントを各ch(計168ch)で測定

→1p.e.ゲインをchごとに測定

※1枚のボード(56ch)のダークカウント測定の様子

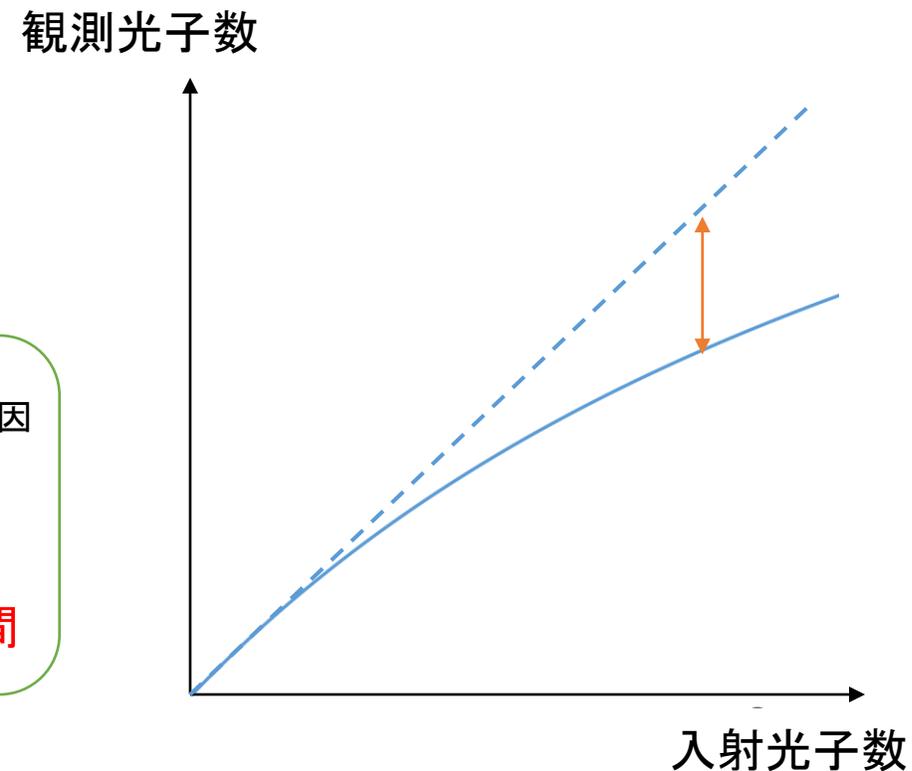


# MPPCの非線形性補正

- ・ 大光量下ではMPPCの応答が非線形になる
- ・ 非線形性はMPPCの回復時間で特徴付けられる
- ・ 各chで回復時間は異なるが、今回は典型的な回復時間を全chに適用し補正

$$N_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{true}}}{1 + k\tau} \quad \leftarrow \text{非線形性の原因}$$

$N_{\text{obs}}$ : 観測光子数、 $N_{\text{true}}$ : 入射光子数  
 $k$ : 1ピクセルあたりの単位時間光量、 $\tau$ : 回復時間

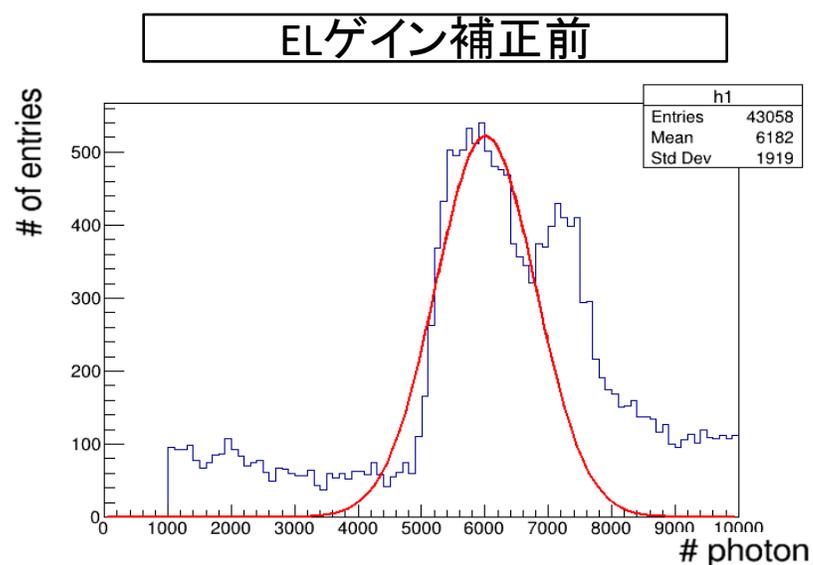


## ※参考文献

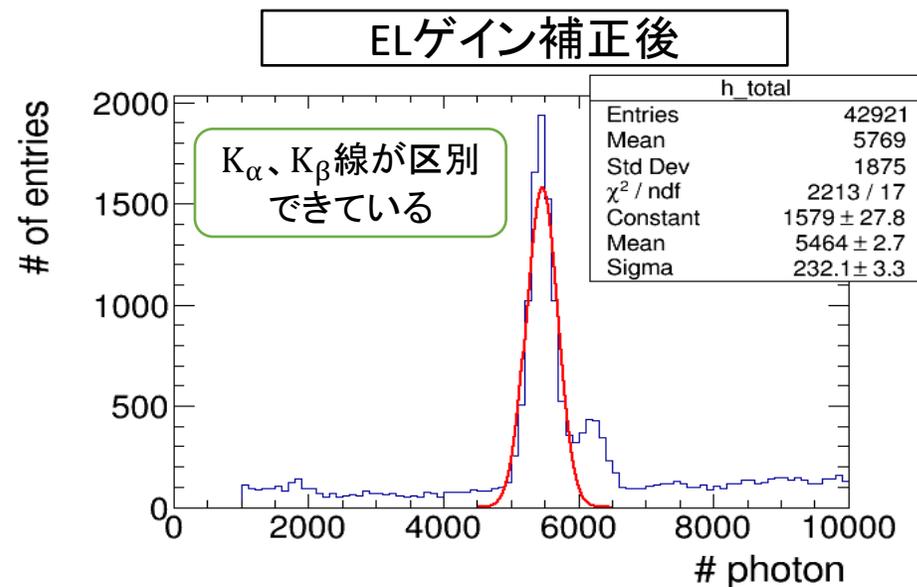
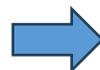
柳田沙緒里, “AXEL実験における高エネルギー分解能を達成するためのMPPCおよび読み出し回路についての研究”, 2016

# ELゲイン補正

- 各chでELゲインのばらつきを補正
  - 各chで $K_{\alpha}$ 線イベントを収集
  - $K_{\alpha}$ 線のエネルギーに対応するphoton数が各chで揃うようにELゲインの補正を繰り返す



FWHM: **31%** @30keV

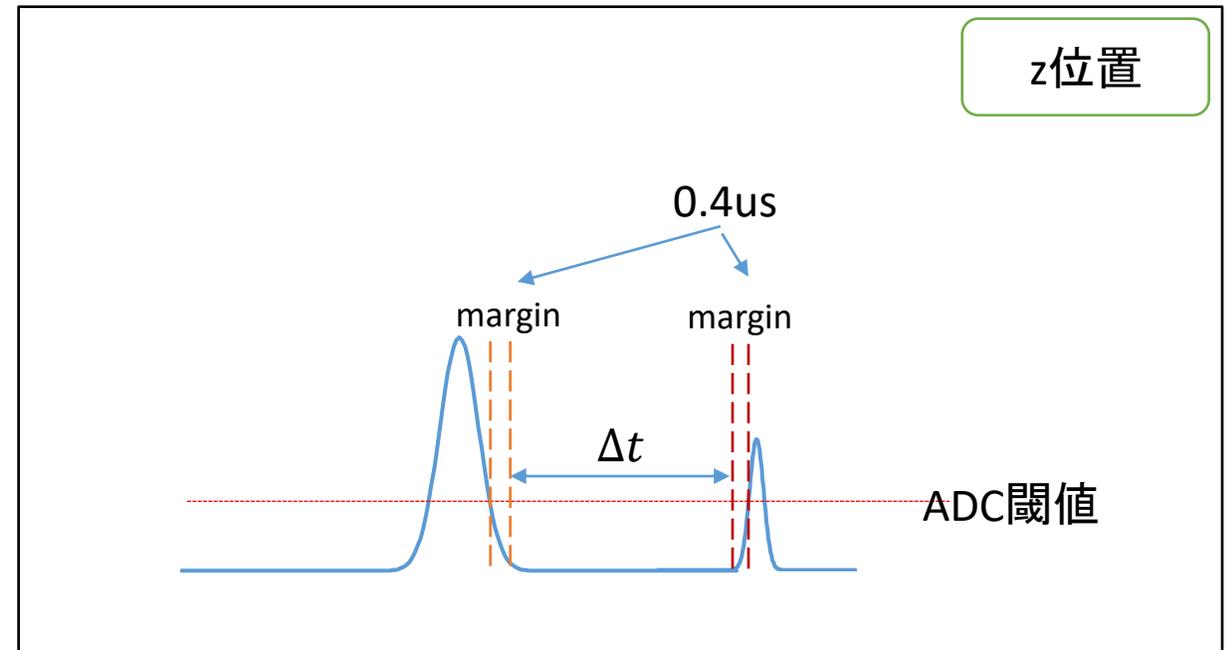
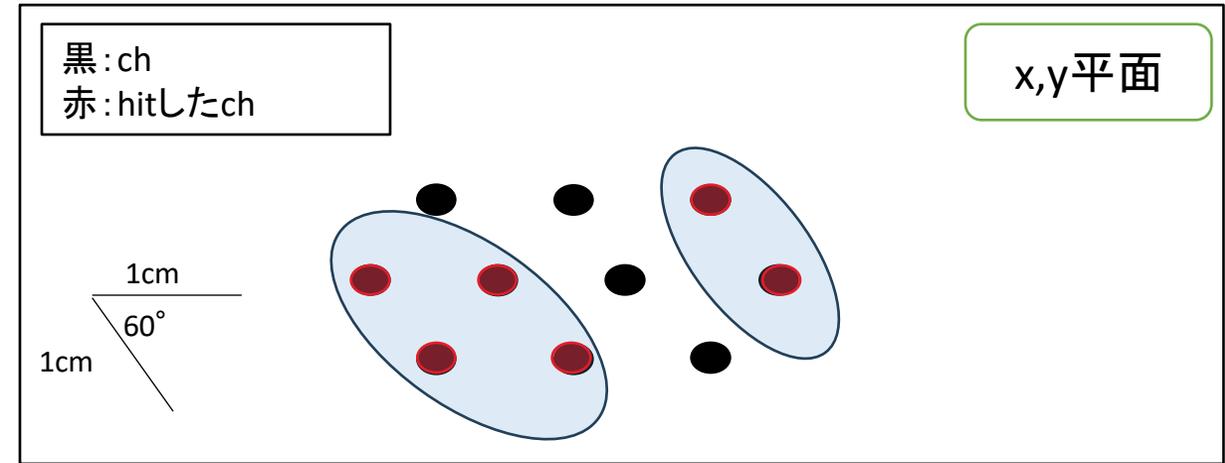


FWHM: **10%** @30keV

分解能が約3倍向上

# クラスター識別

- x,y平面 (ELCC面)
  - ドリフト電子は最大0.332cm拡散 ←セルのピッチ1cmより小さい
  - Hitしたchが隣同士か判定
- z位置
  - 最大0.095cm(0.95us相当)拡散
  - EL光発生タイミングに幅がある
  - $\Delta t > 0$ かどうかを判定
- Hitしたchが隣同士 &  $\Delta t < 0$  ならば同一クラスターと判断

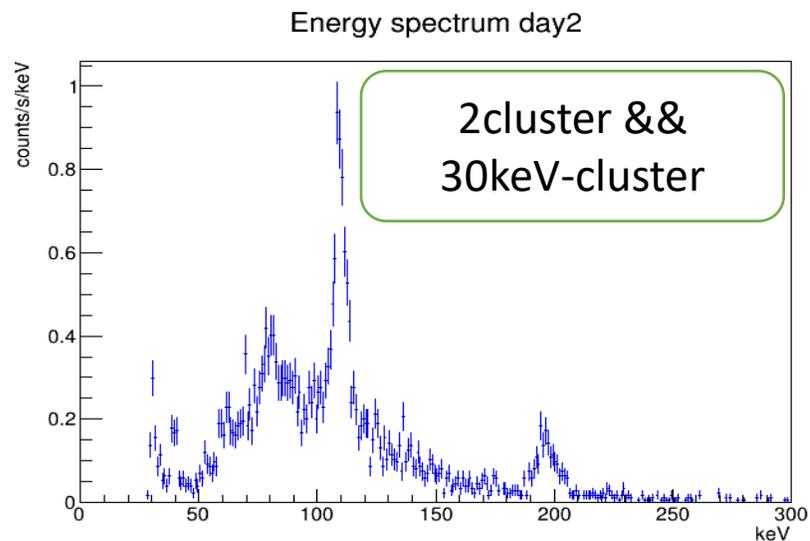
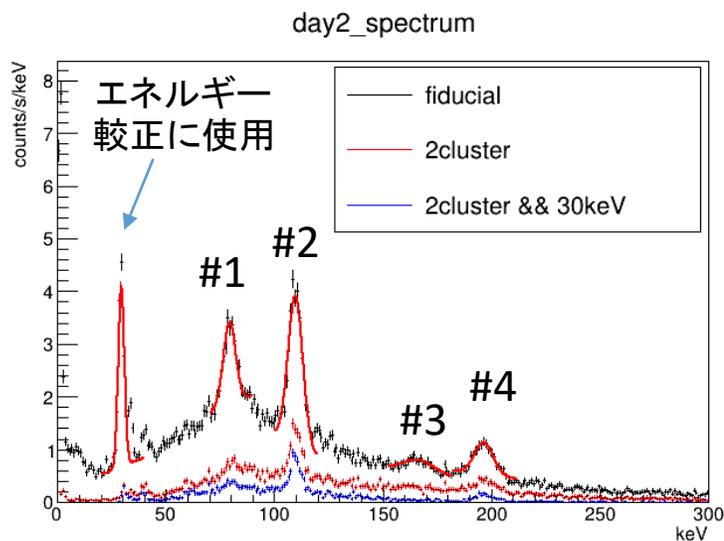


# ビーム試験結果

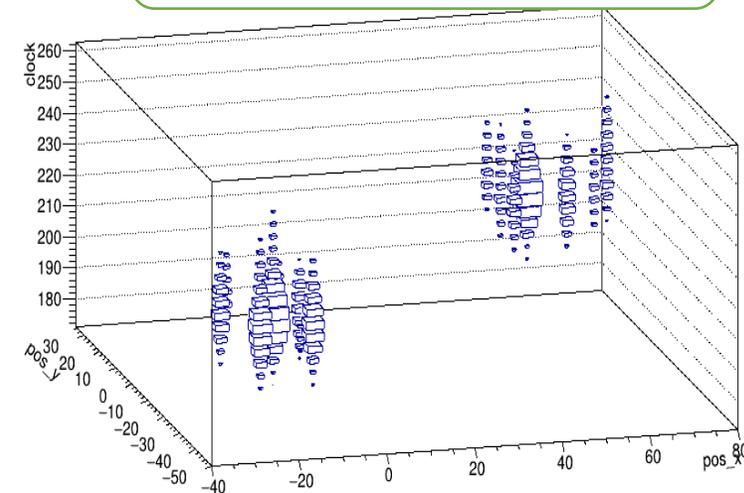
fit結果

- 観測ピーク(fiducial cut)
  - $K_{\alpha}$ 線の30keV
  - 129Xeの40keV
  - 19F( $n, n'\gamma$ )による110keVとそのエスケープ(80keV)
  - 19F( $n, n'\gamma$ )による197keVとそのエスケープ(167keV)
- 2クラスターかつ片方が30keVのセレクションをしたエネルギースペクトルを描画

番号	エネルギー[keV]	備考
#1	$79.3 \pm 0.14$	#2のエスケープ
#2	$109.7 \pm 0.08$	19F( $n, \gamma$ ) 110keV
#3	$166.5 \pm 0.74$	#4のエスケープ
#4	$196.5 \pm 0.25$	19F( $n, \gamma$ ) 197keV



2cluster & 30keV-cluster  
イベントディスプレイ



# ミグダル信号モデル生成

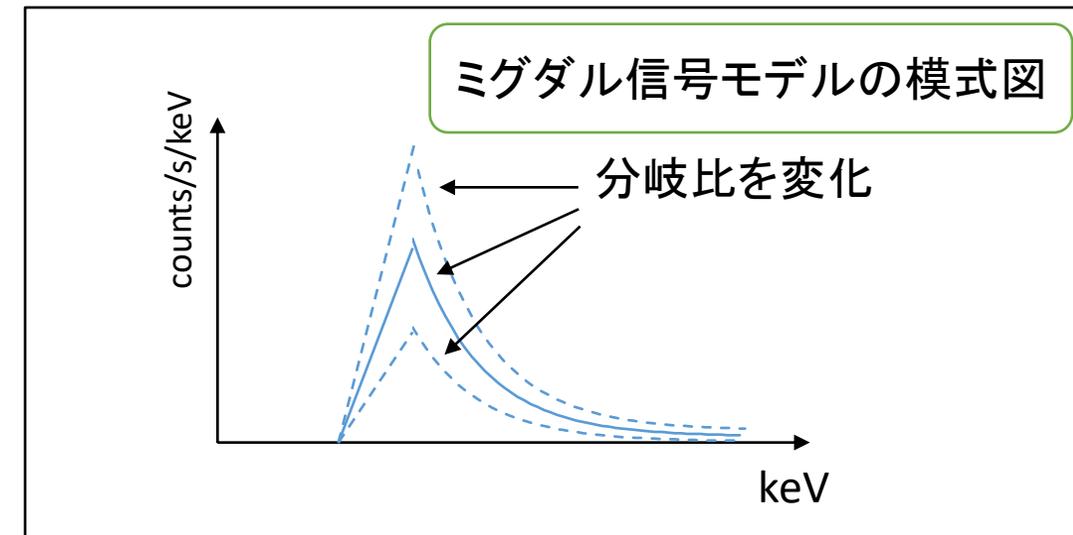
シミュレーションによるミグダル信号のエネルギースペクトル作成

# ミグダル効果の分岐比の解析

- ミグダル効果の分岐比は、理論計算ではK殻電子の運動量移行が511eVのとき $4.6 \times 10^{-6}$
- K殻電子の運動量移行が511eVのときのミグダル効果の分岐比の上限の決定を目指す
- 測定データを全てミグダル信号とみなしたときの上限値を決定したい
- 解析の流れ
  - Geant4でミグダルイベントを生成
  - 検出器応答のシミュレーション
  - Xe検出器の測定データ解析と同様の解析を適用
  - ミグダル効果の起きる分岐比をパラメータとして変化させ、測定のエネルギースペクトルと比較

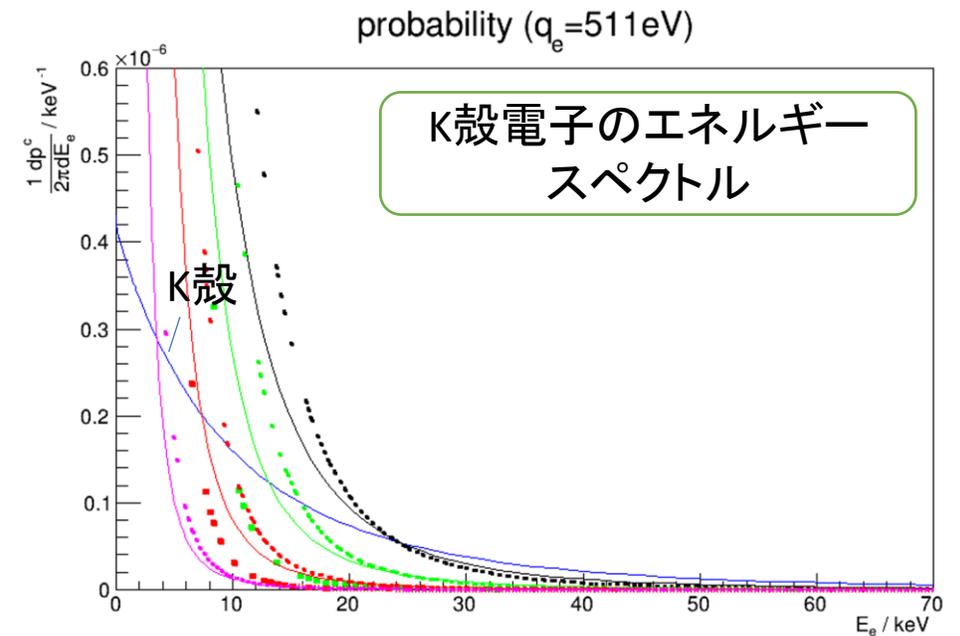
Xe ( $q_e = m_e \times 10^{-3}$ )						
$(n, \ell)$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 4f}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 5d}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6s}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6p}$	$E_{n\ell}$ [eV]	$\frac{1}{2\pi} \int dE_e \frac{dp^c}{dE_e}$
1s	–	–	–	$7.3 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^4$	$4.6 \times 10^{-6}$
2s	–	–	–	$1.8 \times 10^{-8}$	$5.4 \times 10^3$	$2.9 \times 10^{-5}$
2p	–	$3.0 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-9}$	–	$4.9 \times 10^3$	$1.3 \times 10^{-4}$

M. Ibe et al., Journal of High Energy Physics, 2018(3), 194 (Mar 2018)

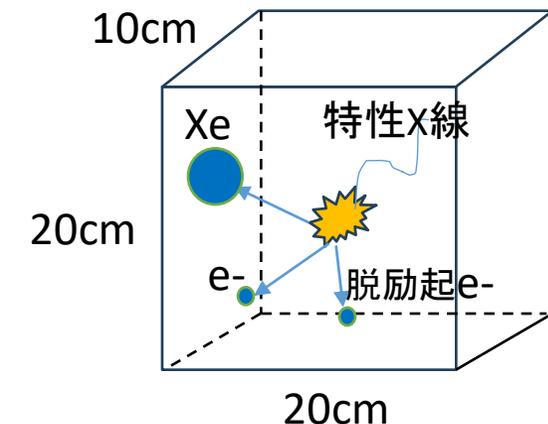


# ミグダルイベント生成

- 初期粒子の生成
  - Xe原子核、K殻のミグダル電子、特性X線、オージェ電子 (by脱励起)
  - K殻のミグダル電子のエネルギースペクトルは伊部論文に準拠
  - 特性X線の蛍光収率は文献値を使用
- Geant4
  - $20 \times 20 \times 10 \text{cm}^3$ の空間にランダムに生成
  - GXe5気圧内でのエネルギー損失を見積る



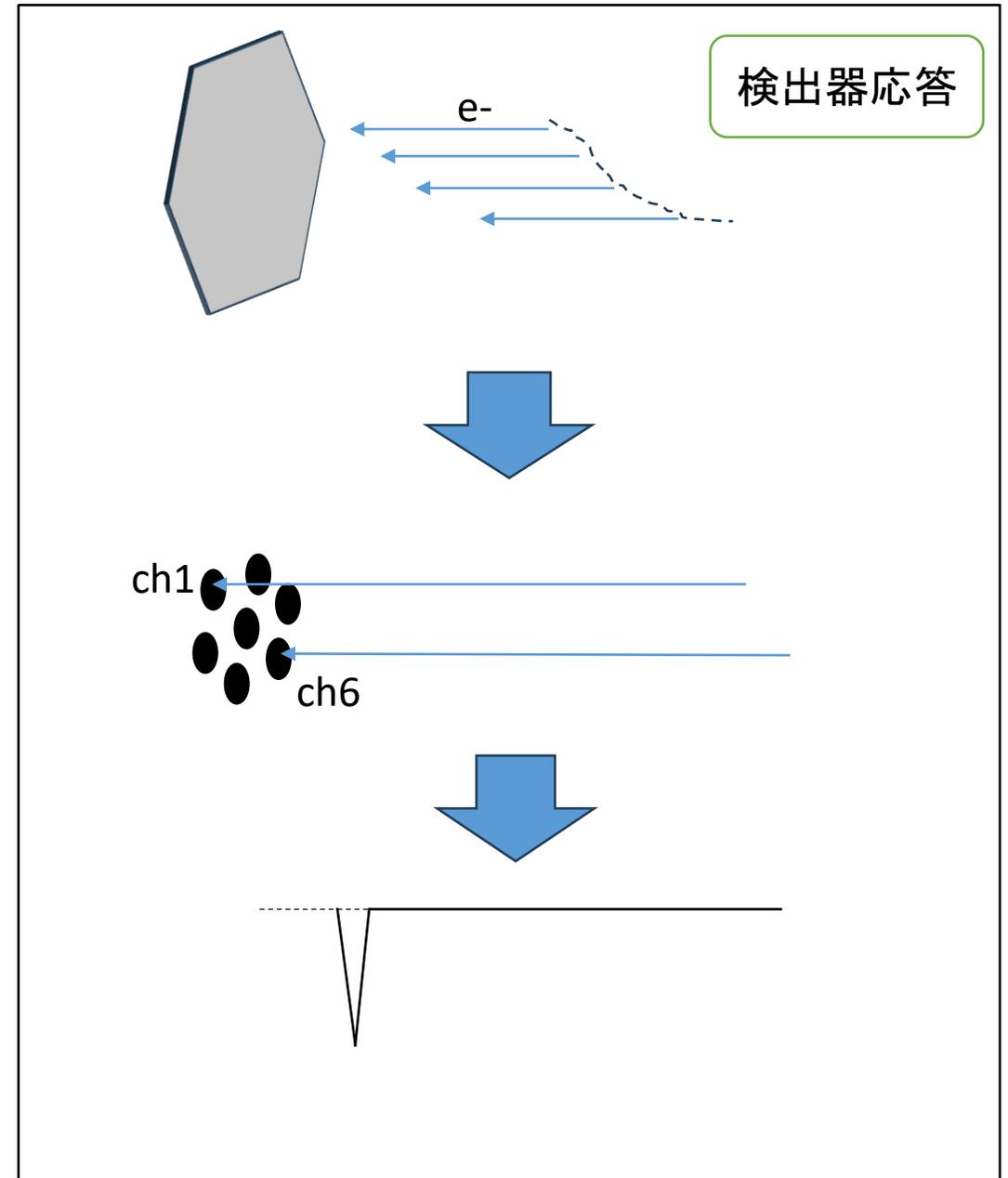
M. Ibe et al., Journal of High Energy Physics, 2018(3), 194 (Mar 2018)  
Available(<https://arxiv.org/src/1707.07258v3/anc>)



# ミグダル信号モデル作成

## 検出器応答

- 粒子のエネルギー損失から電離電子を生成、電子のELCC面のドリフト先を見積る
  - W値、Fano factor、diffusionを仮定
- ELCCのチャンネルマップと照合し、電離電子が入るチャンネル番号を決定
- ELCC内でEL光を生成し、波形として出力

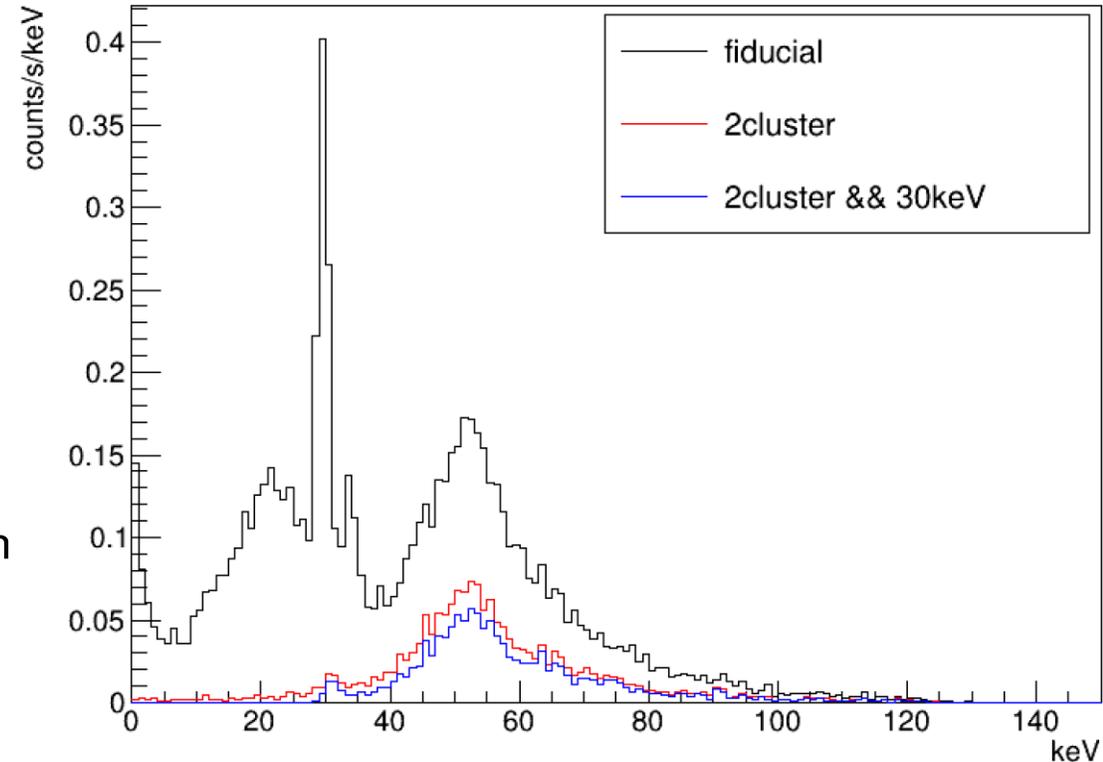


# ミグダル信号モデルのエネルギースペクトル

## ・エネルギースペクトル

- ・ 検出器応答を反映し、実データと同じ解析をしてスペクトルを描画できた
- ・ 以下を仮定
  - ・ フラックス:  $1064 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  (2日目の平均フラックス)
  - ・ 中性子の透過率: 0.095
    - ・ 鉛ブロックとXe検出器のSUS部分による遮蔽を考慮
    - ・ 565keV中性子との反応断面積を用いて手計算
  - ・ Xe原子と565keV中性子の弾性散乱の断面積: 6barn
  - ・ 分岐比:  $10^{-2}$  @511eV

Energy spectrum



※fiducial cutの段階では30keV未満にもイベントあり  
 $K_{\alpha}$ 線の30keVピークも見える

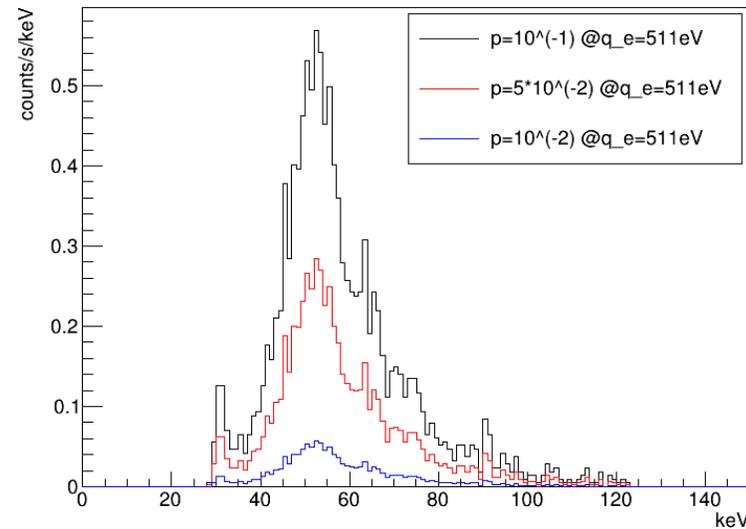
←有感領域以外で片方のクラスターがエネルギーを落としている

# 今後の予定(分岐比の上限値決定)

- 分岐比をパラメータとして変化させながら、測定結果と比較し上限値決定
- 50keV付近に着目して比較すると、上限値は $10^{-2}$ のオーダーになりそう

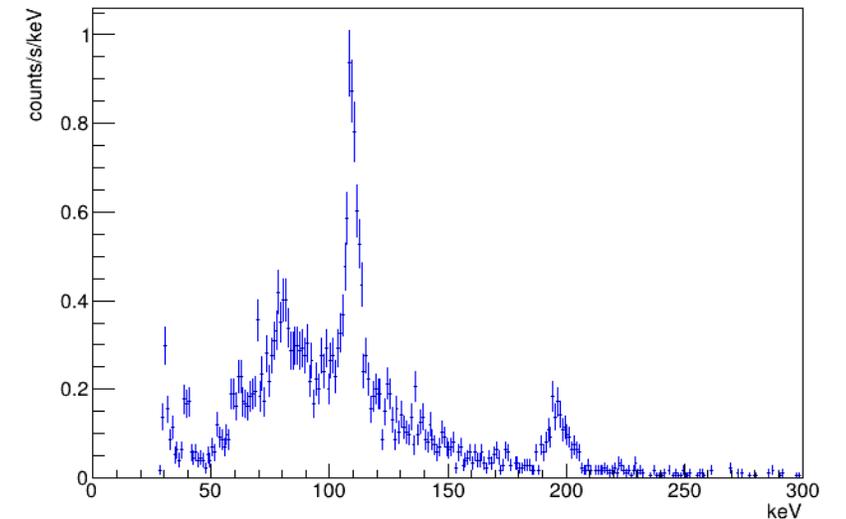
ミグダル信号モデル  
2cluster && 30keV

Energy spectrum



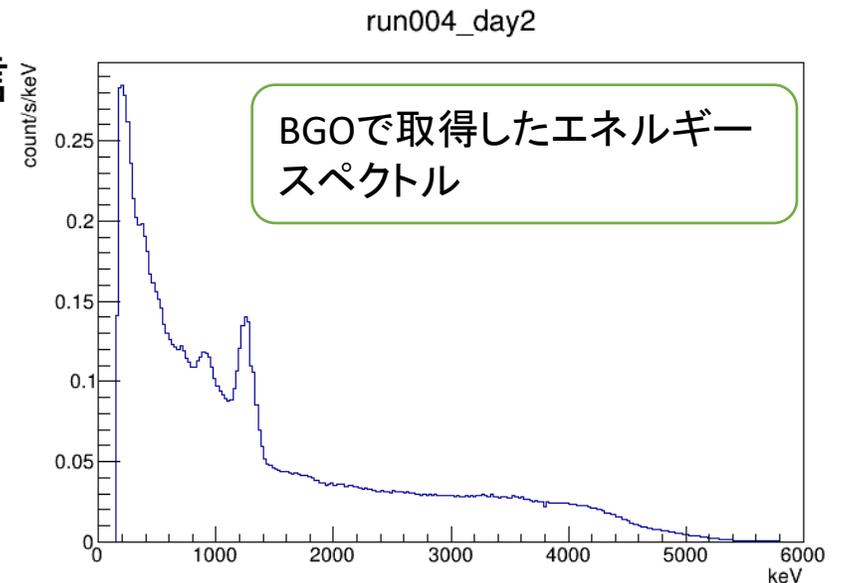
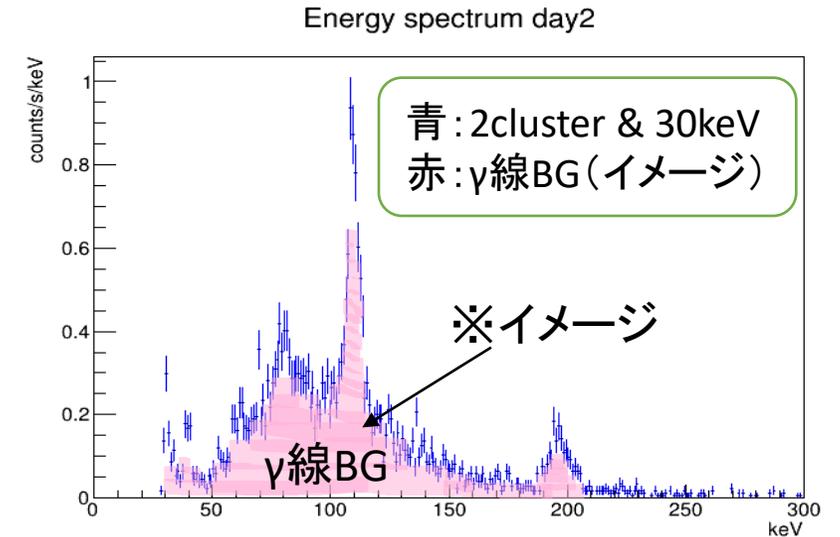
中性子ビーム試験結果  
2cluster && 30keV

Energy spectrum day2



# 今後の予定 (BG study)

- ガンマ線BGを見積ること、より良いミグダル効果の分岐比の上限値が得られる
- 高エネルギーな  $\gamma$  線の測定
  - キセノンガス検出器では500keV程度まで見れる
  - BGOシンチレータで高エネルギーな  $\gamma$  線(10MeVまで)を測定
  - BGOシンチレータで得られたスペクトルも合わせて、ミグダル信号領域のガンマ線BGを評価
- 詳細なシミュレーション
  - AISTの壁や床、検出器の構造物などを正確にシミュレーションへ反映((n,  $\gamma$ )反応)



# まとめ

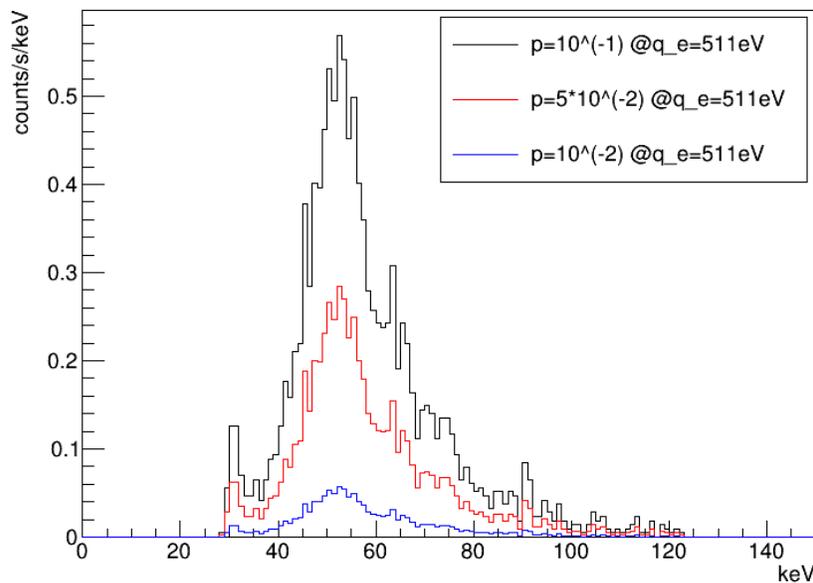
- MIRACLUE実験
  - 位置感度を持つガス検出器に中性子を照射するミグダル効果観測実験
- ガスキセノン検出器
  - 5気圧のキセノンガスが入った有感領域  $\Phi 20 \times 10\text{cm}^3$  の検出器
  - ELCCを用いたEL光の読み出し
- ビーム試験@AIST
  - キセノンガス検出器に中性子ビーム照射
  - エネルギーとクラスター数のcutをかけたエネルギースペクトルが得られた
  - ミグダル効果のシミュレーションによるエネルギースペクトルが得られた
- 今後
  - 中性子フラックスなどの系統誤差を考慮し、ミグダル効果の分岐比の上限の決定
  - ガンマ線BGを、BGOシンチレータでの測定結果も合わせて見積る

# 分岐比上限のクイックルック

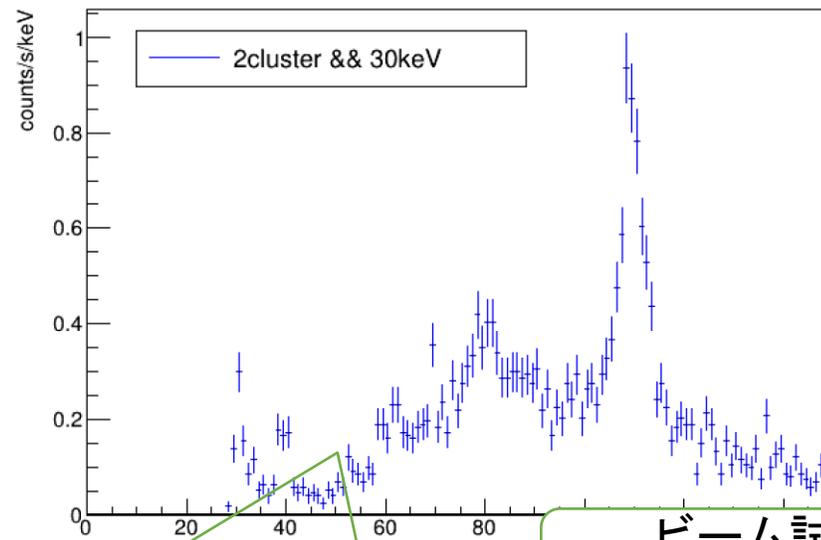
- 50keV付近
  - 実データ: 0.05 counts/s/keV
  - ミグダル信号モデル@ $p=0.01$ :  $\sim 0.05$  counts/s/keV

シミュレーション結果  
2cluster && 30keV

Energy spectrum



Energy spectrum day2



ビーム試験結果  
2cluster && 30keV

Energy spectrum day2

