



ガスキセノン検出器を用いた 原子核反跳に伴うミグダル効果の探索

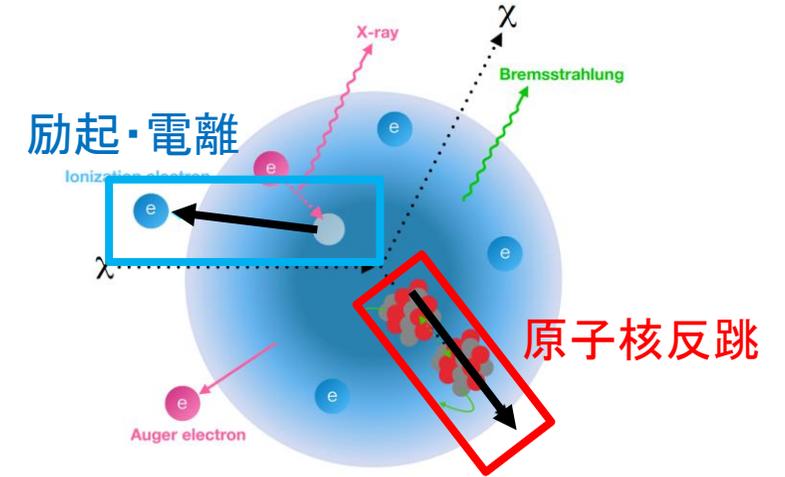
内山 偉貴

東北大学 理学研究科 物理学専攻 素粒子実験研究室

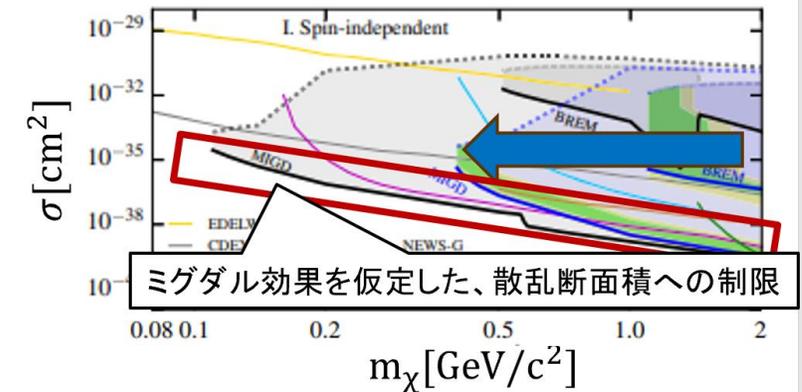
ミグダル効果

- 量子力学によって理論的に提唱された現象
 - 原子核が動き、追従できない束縛電子が励起・電離
- 理論的に以下の現象を予言
 - α 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1975)
 - β, β^+ 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1954)
 - 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果 ← **未観測**
- 原子核反跳に伴うミグダル効果
 - 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

原子核反跳が伴うミグダル効果



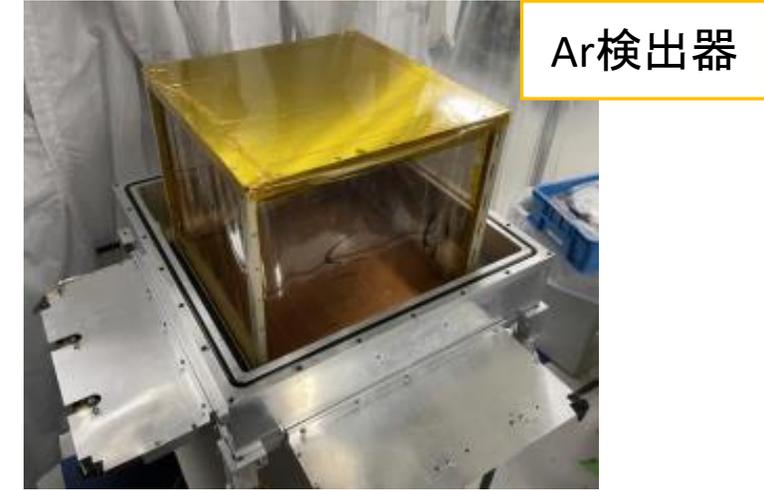
DMと核子の散乱断面積への制限



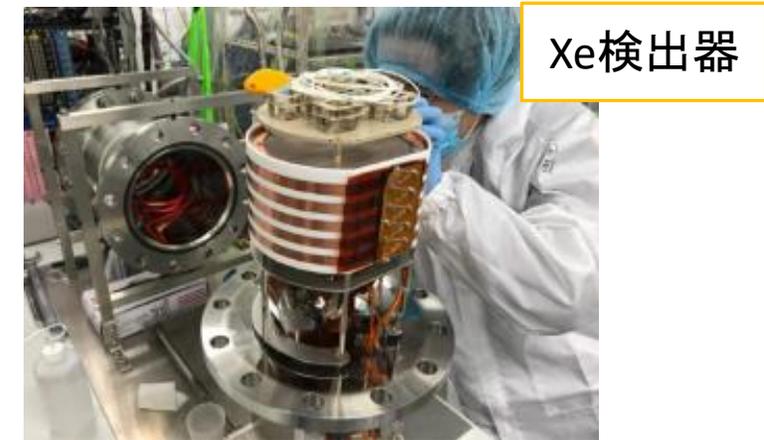
E. Aprile, et al., Phys. Rev. Lett. 123, 241803(2019).

ミグダル効果探索手法

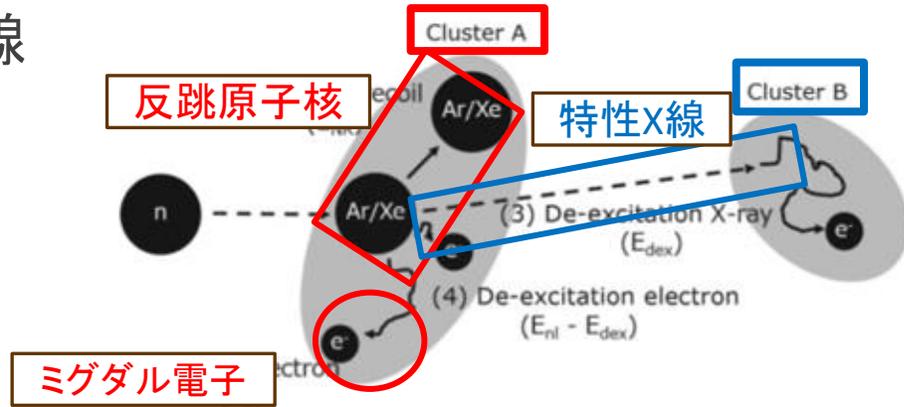
- 中性子ビームを位置感度のあるガス検出器に照射
⇒ K殻電子の電離が伴うミグダル効果の観測を目指す
- ガス検出器
 - 東北大: Xe検出器 (5atm)
 - 神戸大: Ar検出器 (1atm)
- 2つのクラスターを観測
 - **クラスターA**: 反跳原子核、ミグダル電子など
 - **クラスターB**: 特性X線



Ar検出器



Xe検出器

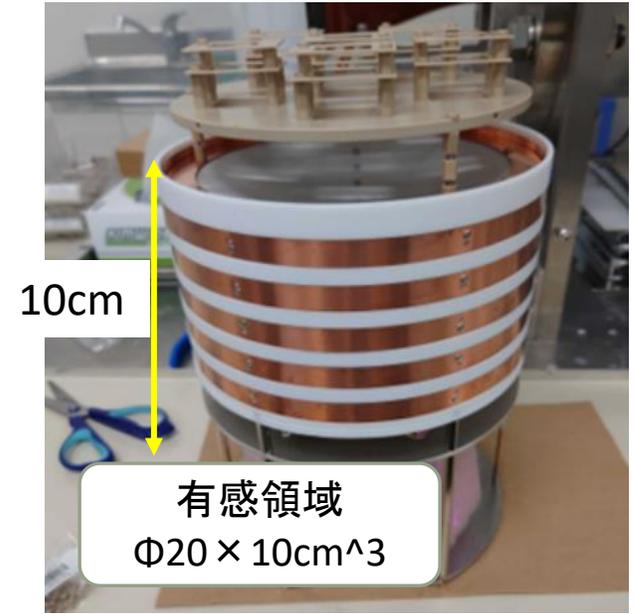
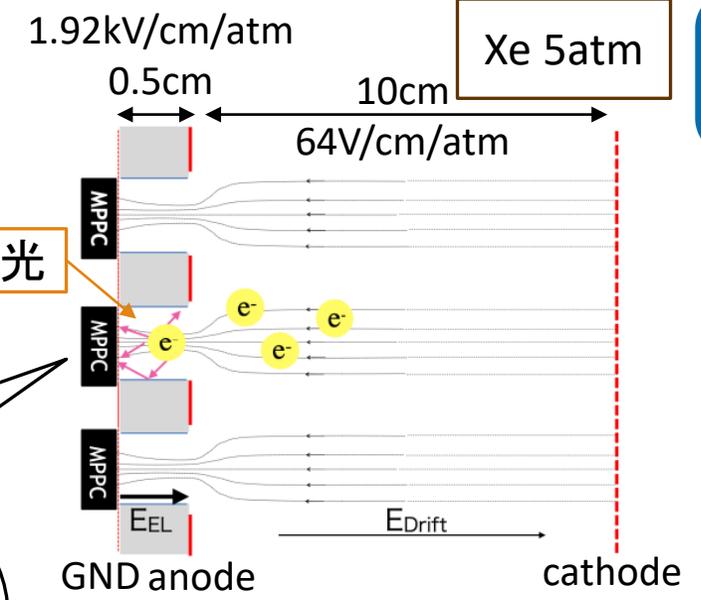
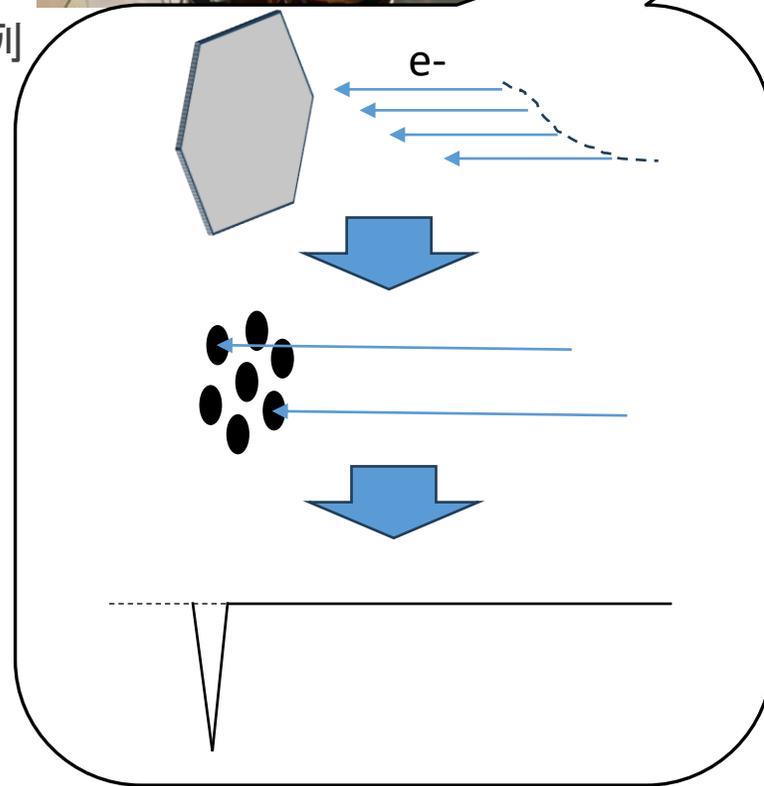
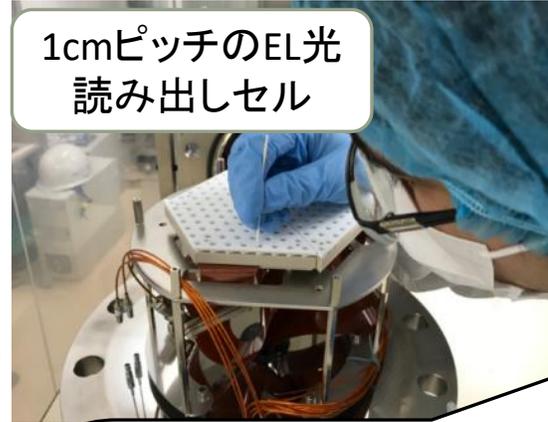


K. D. Nakamura, et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 21, 1, 013C01(2020).

Xeガス検出器

● Time Projection Chamber (TPC) 検出器

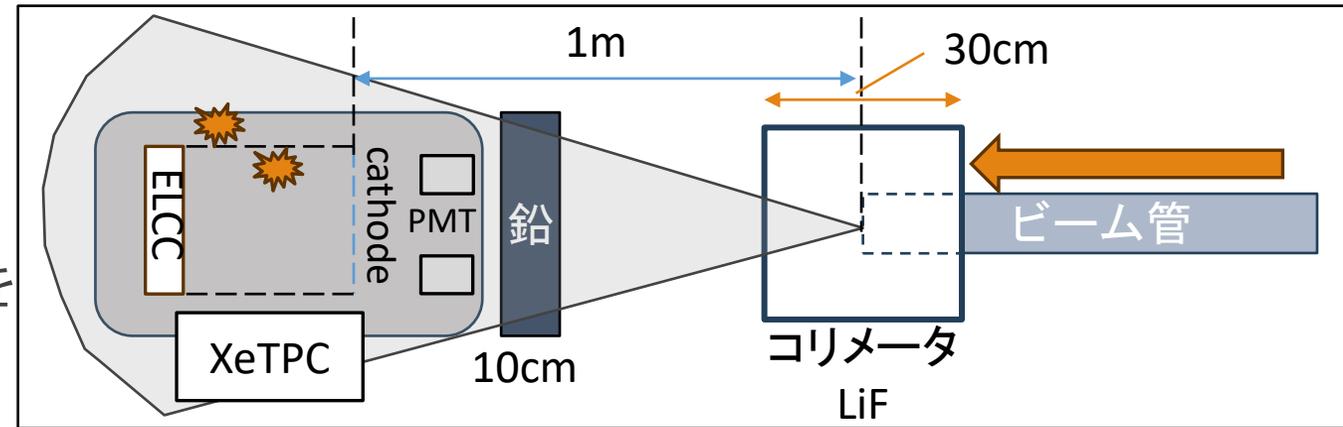
- ELCC
 - 電離電子をエレクトロルミネッセンス光 (EL光) で読みだす
 - 1cm間隔で計168chを六角形状に配列
- ガスキセノン5気圧
- 印加電圧8kV (GND-カソード間)
 - ドリフト電場 : 64V/cm/atm
 - EL電場 : 1.92kV/cm/atm



中性子ビーム試験

● 中性子ビームの概要

- 2022年4月実施
- 場所: 産業技術総合研究所
- ${}^7\text{Li}(p, n) {}^7\text{Be}$ 反応により中性子を生成
 - 陽子を2.3MeVに加速し、正面で565keVの中性子を生成
 - フラックス: 約2000個/cm²/s @1m



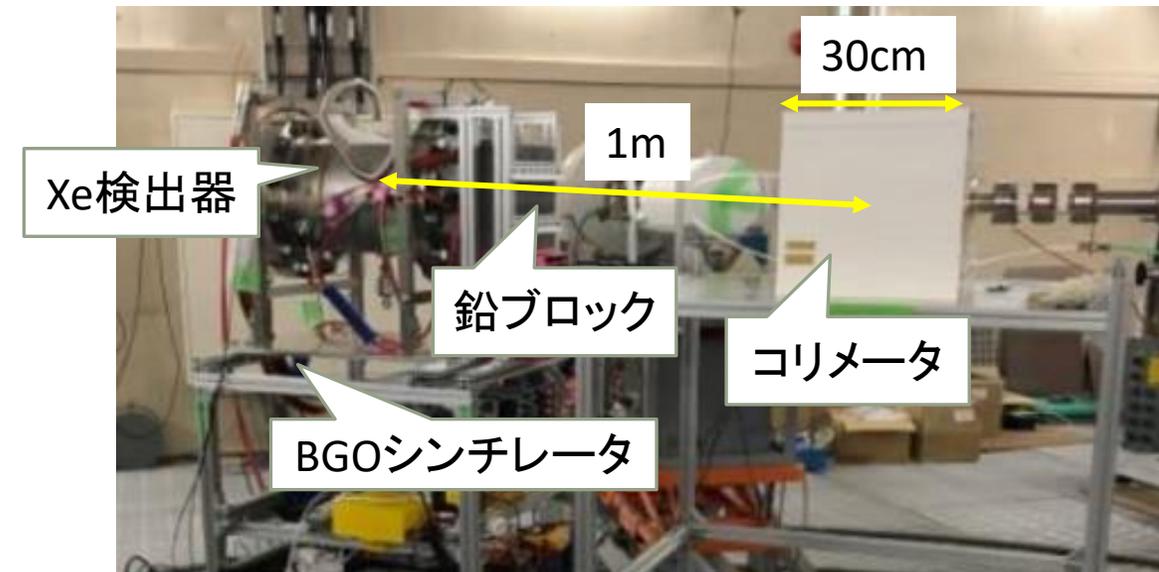
● LiF50%添加ポリエチレンのコリメータ

- 検出器以外の方向に発生する中性子の遮蔽
- ⇒ 床や壁での(n,γ)を防ぐ

● 鉛ブロック

- 前方から来るγ線の遮蔽
 - コリメータ由来の ${}^1\text{H}(n, n'\gamma)$ (2.2MeV)
 - Liターゲット由来の ${}^7\text{Li}(p, p'\gamma)$ (478keV)

● Xe検出器の傍にBGOシンチレータ(γ線測定用)



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

●クラスタの数の求め方

●Hitイベントの位置

クラスタ識別

●クラスタ数

●2クラスタかつ30keVのイベントレート

●イベントセレクション

イベントの数えすぎ・見逃しの見積もり

●イベントレートの補正

※エネルギー、クラスタの解析手法はAXELの解析手法を参考

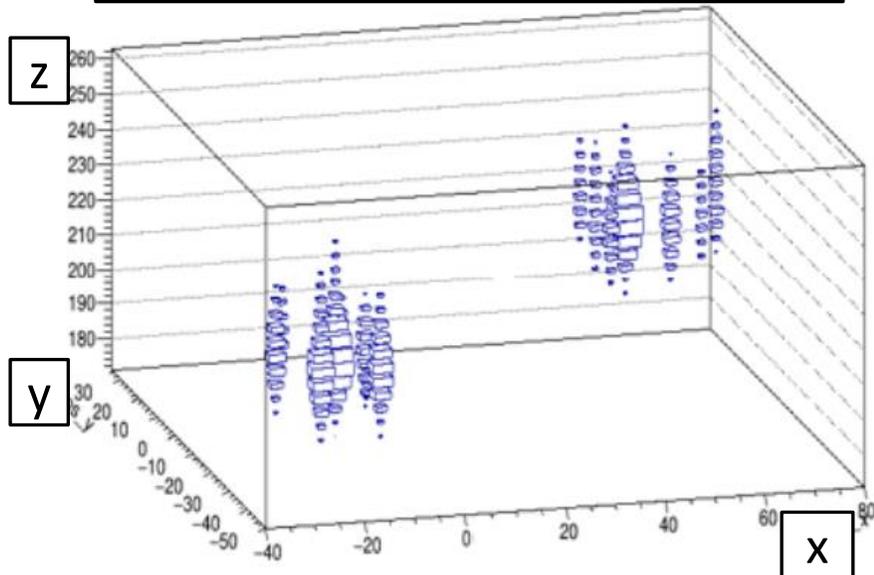
※クラスタ識別以外の詳細はback up参照

クラスター解析

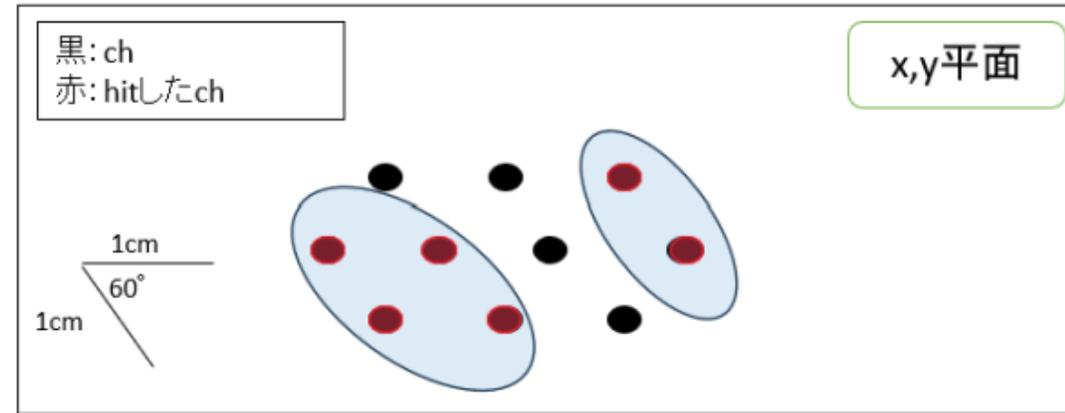
● Hitしたチャンネルが隣同士、かつ時間的に波形が重なっている場合⇒同一クラスターと判断

- (x,y) 平面でHitしたチャンネルが離れている ⇒ 別クラスター
- z位置に関して、時間的に波形が重なっていない ⇒ 別クラスター

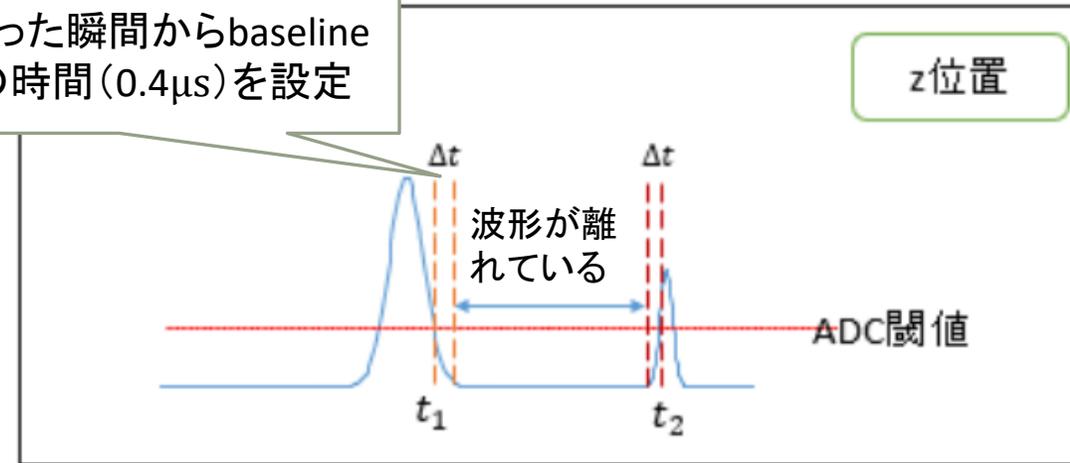
2クラスターのイベントディスプレイ



複数クラスターと認識される時の様子

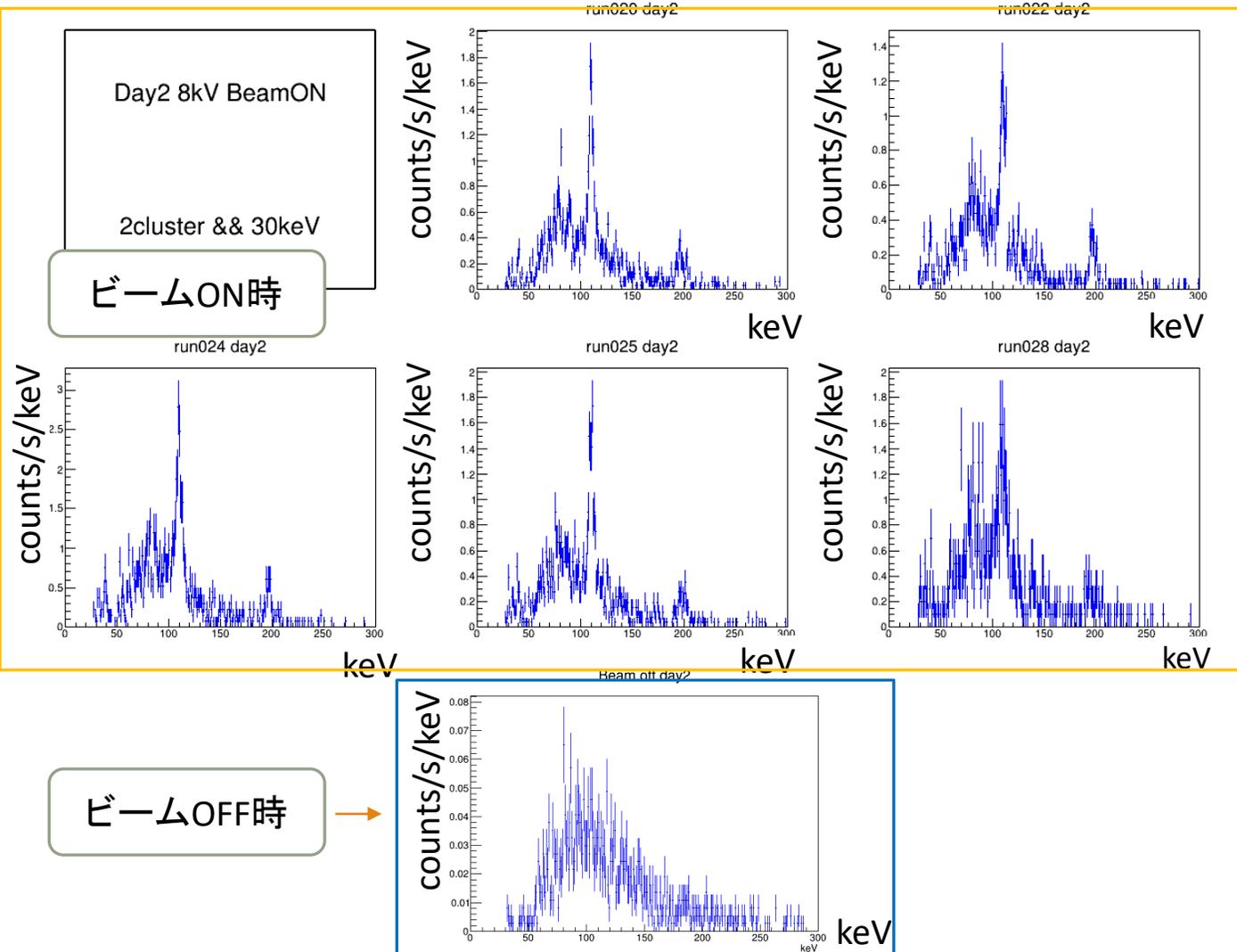


ADC閾値を取った瞬間からbaselineに戻るまでの時間(0.4 μ s)を設定

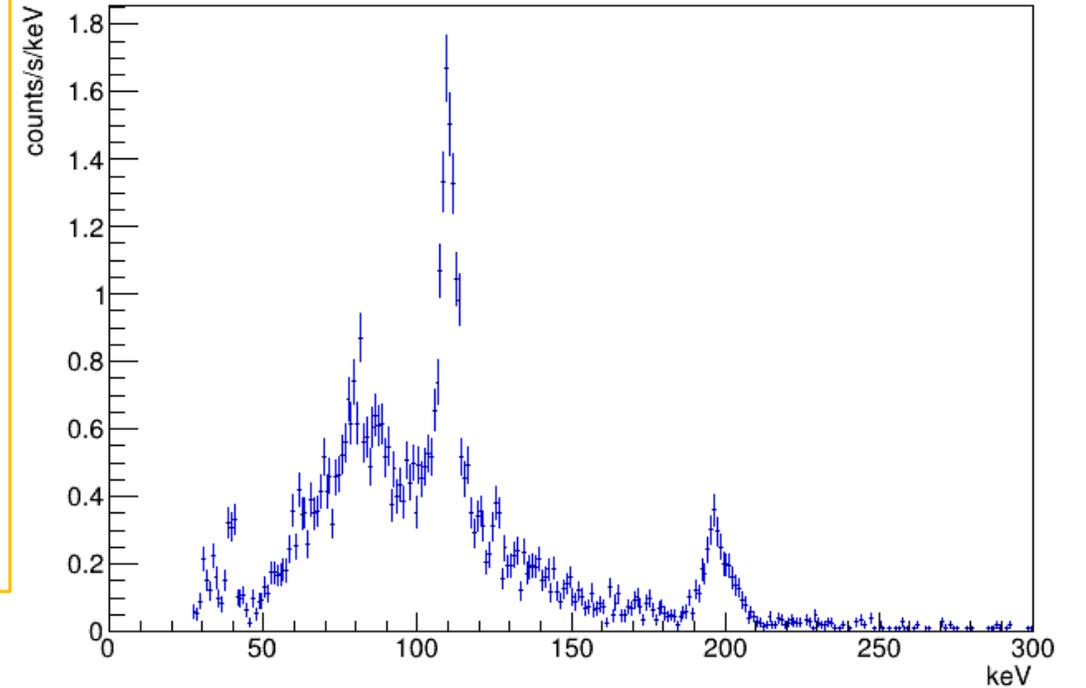


測定結果

● 2cluster-30keVのスペクトル(補正後)



● ビームON時のデータを合算し、ビームOFF時のデータを差し引いたイベントレート

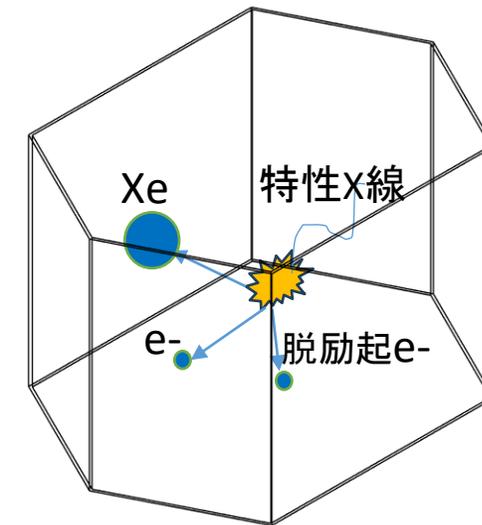
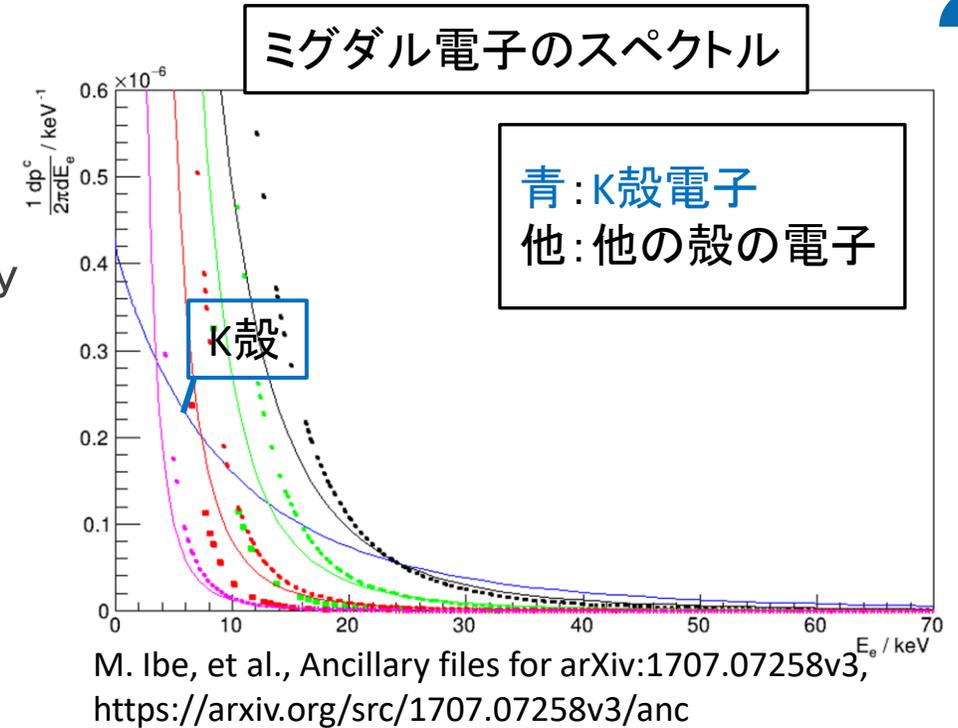


ミグダル効果探索の解析

- 565keVの中性子をXe検出器に照射した際の、K殻電子の電離が伴うミグダル効果のエネルギースペクトルをシミュレーションし、測定データを使ってミグダル効果を探索
- 本実験では信号よりも γ 線BGが支配的と予測されるため、分岐比の上限値を求める
- 分岐比の理論値と比較
- 解析の流れ
 - 初期粒子の生成、Geant4でエネルギー損失を見積る
 - 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
 - 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、測定エネルギースペクトルと比較

ミグダル信号モデル生成

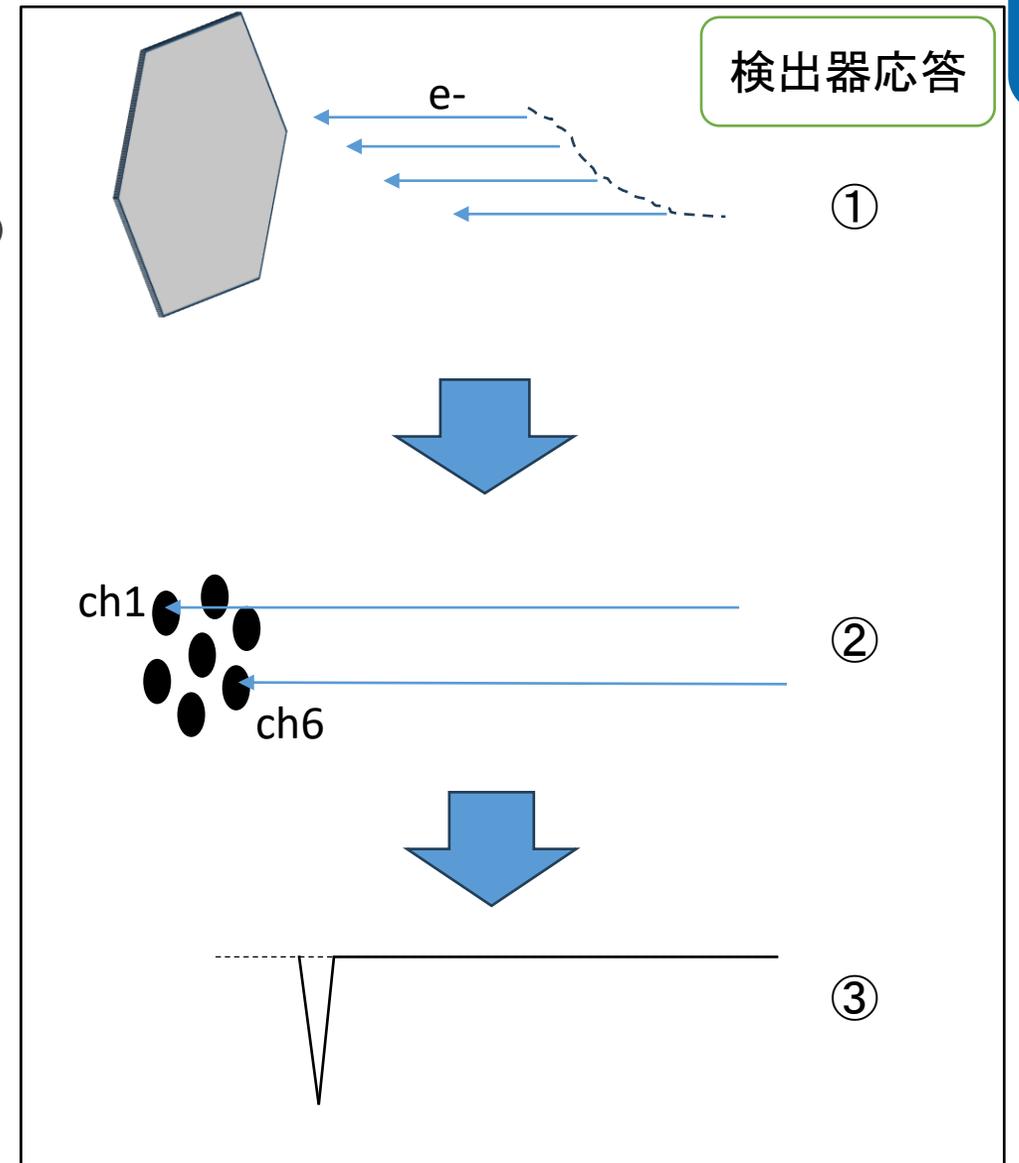
- 初期粒子の生成
 - Xe原子核、K殻のミグダル電子、特性X線、オージェ電子(by 脱励起)
 - K殻のミグダル電子のエネルギースペクトルは理論計算に準拠
- Geant4でのエネルギー損失の見積もり
 - 有感領域の空間にランダムに生成
 - GXe5気圧でのエネルギー損失を見積る



ミグダル信号モデル生成

● 検出器応答のシミュレーション

- ① 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 (22.1eV)
 - Fano factor (0.13)
 - 拡散係数 → (x,y)方向: $0.105\text{cm}/\sqrt{\text{cm}}$ 、z方向: $0.030\text{cm}/\sqrt{\text{cm}}$
- クエンチング
 - 原子核が電離させる場合、電子と比べて生成するイオンの密度が大きく再結合しやすい
 - ⇒ 最終的に残る電離電子数が少なくなる
 - 0.1~1でスキャン
- ② 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
- ③ ELCC内でEL光を生成し、波形として出力
⇒ 測定データの解析と同様の解析をかけられる



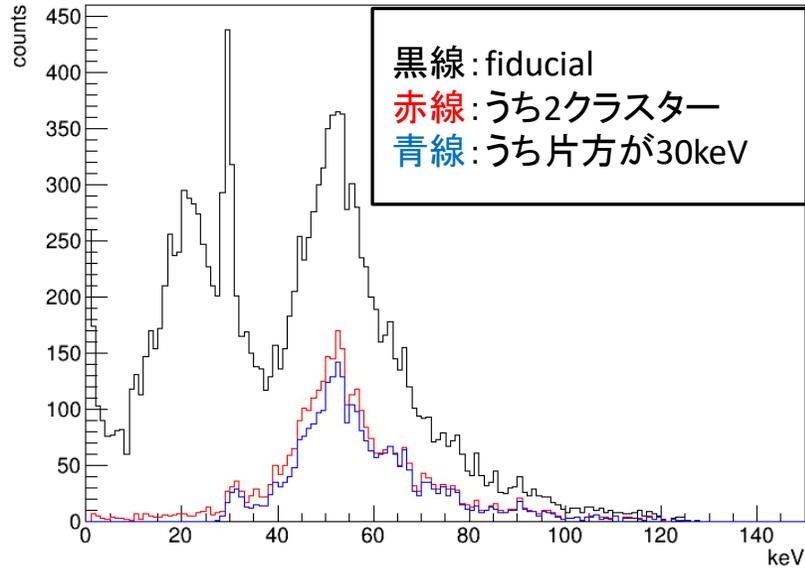
ミグダル信号モデルのエネルギースペクトル



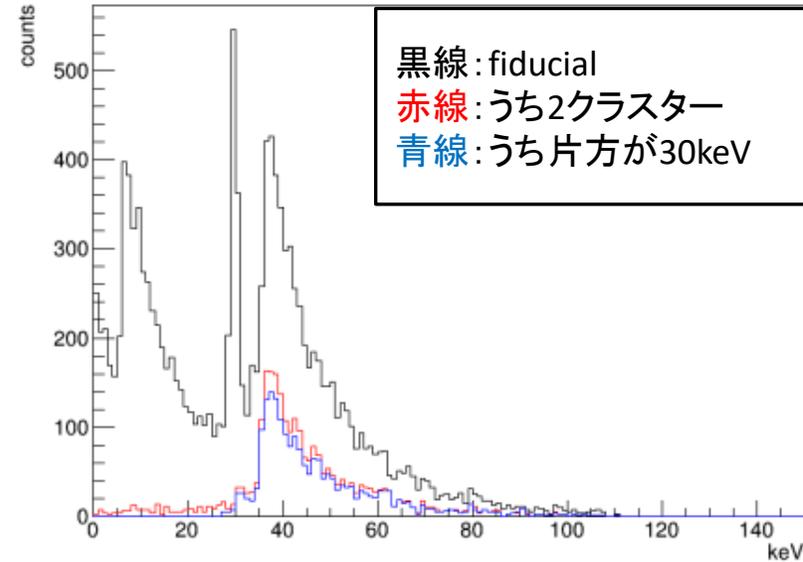
- エネルギースペクトル

- クエンチング値で形状が変化し、2cluster-30keVの感度のあるエネルギー領域が変化

クエンチングなし



クエンチング10%

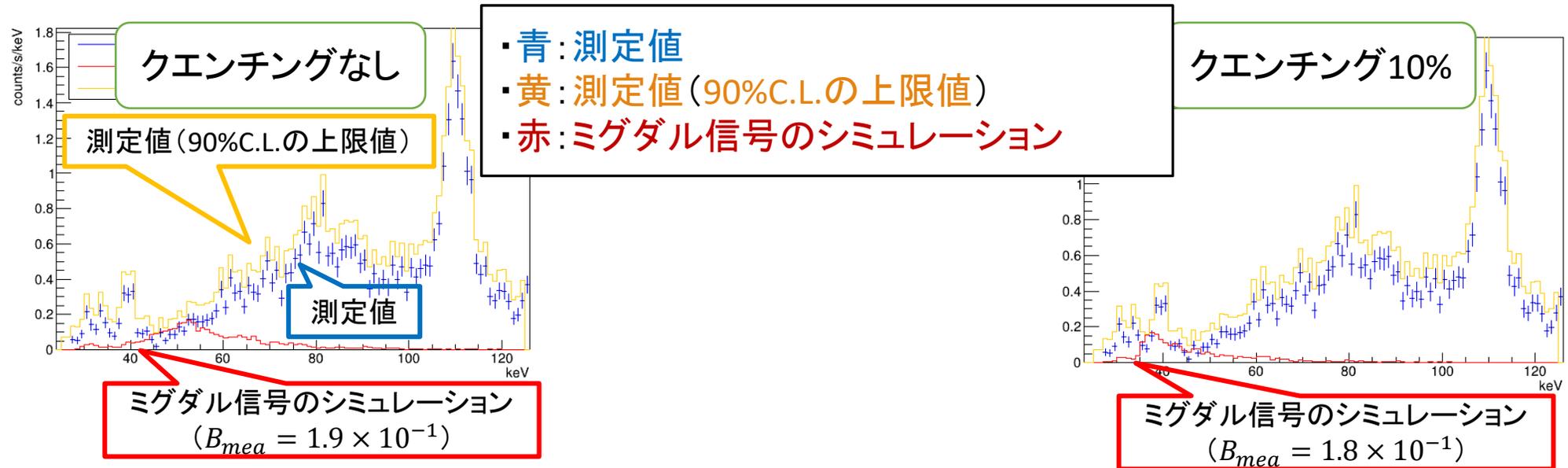


- イベントレート

- ミグダル効果の分岐比を仮定し、2cluster-30keVのイベントレートを計算
- 鉛ブロック、SUS容器による中性子の減衰効果は手計算

ミグダル効果の探索結果

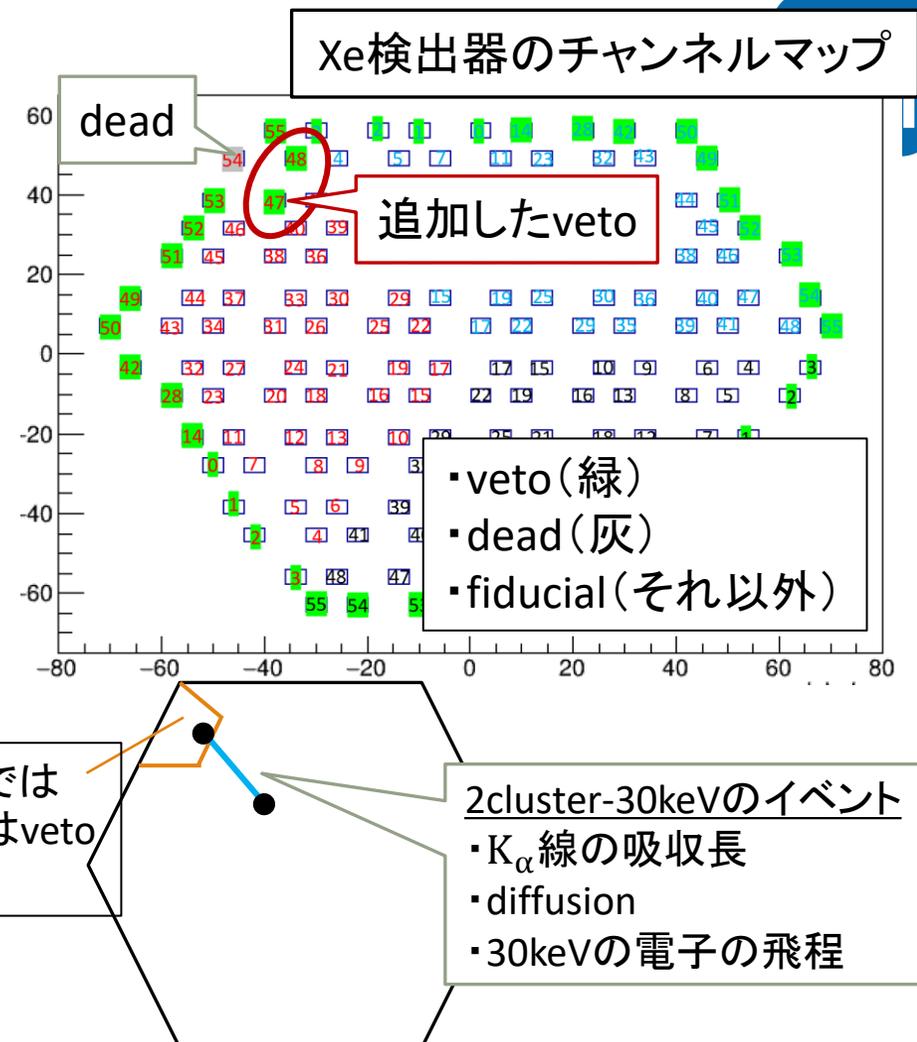
- 分岐比の上限値の算出
 - 測定値の90% C.L.の上限(黄)を描画し、信号シミュレーションがどのbinでも超えない最大の分岐比を上限とした
 - クエンチング値によって感度のあるエネルギー領域が変化 ⇒ 分岐比の上限値が変化



	クエンチングなし	クエンチング10%
分岐比の上限値	1.9×10^{-1}	1.8×10^{-1}
理論値との比	3.2×10^5	3.0×10^5

分岐比の上限値の補正

- シミュレーションと実際に異なる部分の補正
- 実際のXe検出器のfiducial領域
 - deadチャンネルがあり、vetoにするチャンネルを一部変更
⇒ fiducial領域が123/125倍に
- 検知されるイベント数の変化の見積もり
 - Toy-MCにより、有限サイズのイベントを生成し、simではfiducialだがdataではvetoになるイベントの割合を見積もる
- 実際のXe検出器のガス圧: 4.7atm
 - シミュレーションでは5atmを仮定



補正後の分岐比の上限値	クエンチングなし	クエンチング10%
分岐比の上限値	2.1×10^{-1}	2.0×10^{-1}
理論値との比	3.4×10^5	3.3×10^5

系統誤差と分岐比の上限値のまとめ

● 系統誤差

- Xe検出器の位置のずれ (± 1 mm)
- deadチャンネルの補正の誤差
 - イベントの大きさによる誤差
- ガス圧の違い (4.7 ± 0.05 atm)

系統誤差の内訳	分岐比の上限値に対する割合
Xe検出器の位置のずれ	$\pm 0.2\%$
deadチャンネルの存在	$\pm 0.2\%$
ガス圧の違い	$\pm 1.1\%$

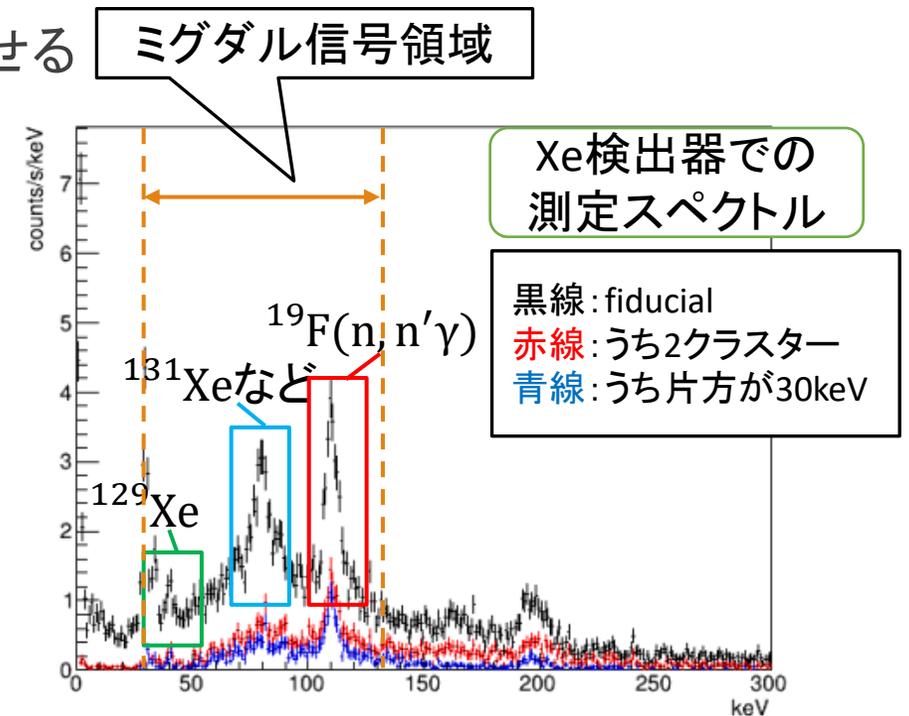
● 分岐比の上限値 (クエンチング 0.1~1.0)

- 理論値との比: $2.7 \sim 5.0 \times 10^5$
- 正確なミグダル効果探索のためにはクエンチング値の測定が必要

	q=0.1	q=0.2	q=0.3	q=0.4	q=0.5	q=0.6	q=0.7	q=0.8	q=0.9	q=1.0
分岐比	0.20	0.27	0.20	0.17	0.18	0.16	0.19	0.18	0.30	0.21
理論値との比	3.3×10^5	4.5×10^5	3.3×10^5	2.8×10^5	3.0×10^5	2.7×10^5	3.2×10^5	3.0×10^5	5.0×10^5	3.5×10^5

ガンマ線バックグラウンド

- BGOシンチレータでの測定結果から、 γ 線BGが支配的
- γ 線BGを削減するために
 - フィールドケージの絶縁体をPTFEではないものにする
 - $^{19}\text{F}(n, n'\gamma)$ の110keVとそのエスケープ(80keV)を落とせる
 - Xeガスを濃縮して ^{134}Xe や ^{136}Xe のみを使用する
 - $^{129}\text{Xe}(n, n'\gamma)$ の40keVと120keV、 $^{131}\text{Xe}(n, n'\gamma)$ の80keVを落とせる



まとめ

●ミグダル効果

- 急激な原子核の運動量変化により、追加で励起や電離が伴う現象
- 原子核反跳に伴うミグダル効果は低質量領域の暗黒物質探索に有用であるが、未だ観測例がない

●ガス検出器を用いた原子核反跳に伴ったミグダル効果の探索

- K殻電子の電離が伴うミグダル効果を探索
- 565keVの中性子を照射し、2クラスターのイベントを探索
- EL光の読み出しをする位置感度を持ったXeガス検出器を使用(東北大)

●中性子ビーム試験結果

- クラスター数とエネルギーのcutをかけたエネルギースペクトルが得られた
- ミグダル信号のモデルを生成し、分岐比の上限値を求めた

●将来展望

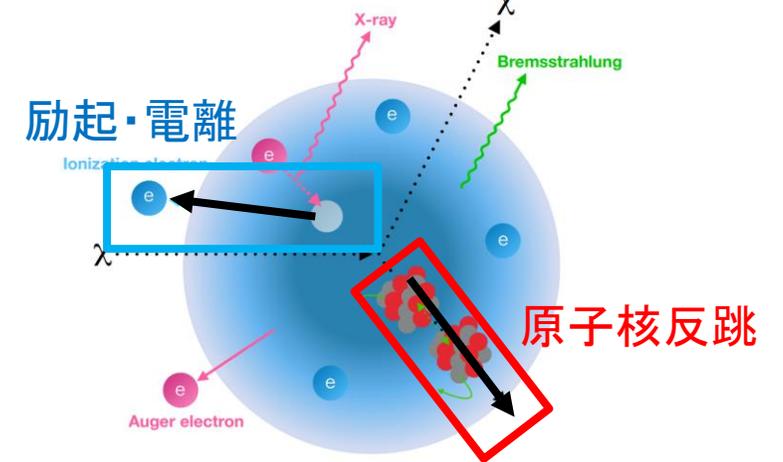
- γ 線BGの理解、削減が重要
- クエンチング測定が必要

Backup

ミグダル効果

- 量子力学によって理論的に提唱された現象
 - 原子核が動き、追従できない束縛電子が励起・電離
- 理論的に以下の現象を予言
 - α 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1975)
 - β, β^+ 崩壊に伴うミグダル効果 ← 観測済(1954)
 - 散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果 ← **未観測**
- 原子核反跳に伴うミグダル効果の性質
 - 生じる確率が電子の運動量移行の2乗に比例し、反跳原子核のエネルギーに比例する
 - 励起が伴う確率は電離の場合よりも $0(10^{-3})$ で小さい
 - 内殻電子ほど、励起や電離が伴う確率が小さくなる
 - (XeのK殻電子の電離確率は $0(10^{-6})$)

原子核反跳に伴うミグダル効果



E. Aprile, et al., Phys. Rev. Lett. 123, 241803(2019).

原子核反跳に伴うミグダル効果

量子力学によって導かれた現象

原子核反跳が起こった状態

$$|\phi_0'\rangle = e^{-iv_N \cdot r} |\phi_0\rangle$$

電子の位置

反跳原子核の速度

始状態

ミグダル効果の起こる確率(分岐比)

原子核が電子よりも速度が十分小さい場合、電子の運動量移行(q_e)の2乗に比例し、反跳原子核のエネルギー(E_R)に比例する

Xeのミグダル効果の分岐比($q_e = 511\text{eV}$)

(n, ℓ)	$\mathcal{P}_{\rightarrow 4f}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 5d}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6s}$	$\mathcal{P}_{\rightarrow 6p}$	$E_{n\ell}$ [eV]	$\frac{1}{2\pi} \int dE_e \frac{dp_e}{dE_e}$
1s	-	-	-	7.3×10^{-10}	3.5×10^4	4.9×10^{-6}
2s	-	-	-	1.8×10^{-8}	5.4×10^3	3.0×10^{-5}
2p	-	3.0×10^{-8}	6.5×10^{-9}	-	4.9×10^3	1.3×10^{-4}
3s	-	-	-	2.7×10^{-7}	1.1×10^3	1.1×10^{-4}
3p	-	3.4×10^{-7}	4.0×10^{-7}	-	9.3×10^2	6.0×10^{-4}
3d	2.3×10^{-9}	-	-	4.3×10^{-7}	6.6×10^2	3.6×10^{-3}

励起

M.Ibe, arXiv:1707.07258v5, 2023

電離

$$W = \left| \int \phi_n^* e^{-iv_N \cdot r} \phi_0 dr \right|^2$$

励起または電離した状態

$v_N \ll v_e$ 、(v_N がz方向と仮定)

$$W = v_N^2 |\langle \phi_n^* | z | \phi_0 \rangle|^2$$

$q_e \approx \frac{m_e}{m_N} q_N$, $q_N \approx m_N v_N$, $E_R \approx \frac{q_N^2}{2m_N}$
 (q_e, q_N : 電子、原子核への運動量移行)

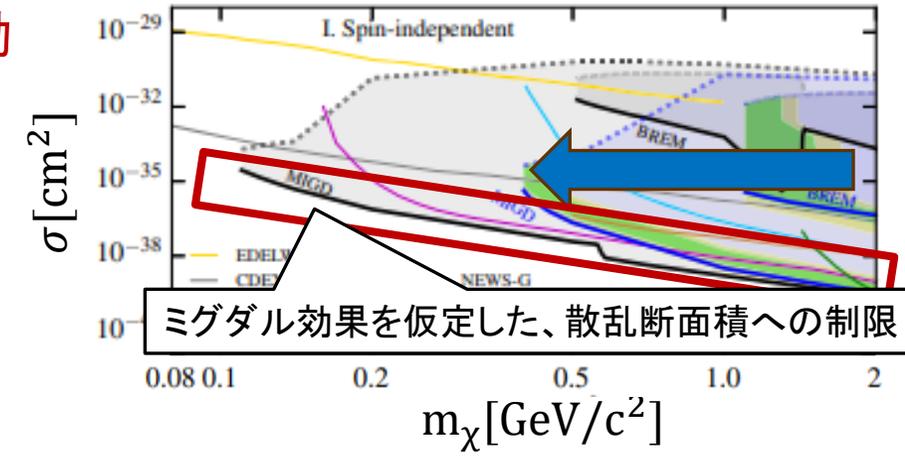
$$W \propto q_e^2, \quad W \propto E_R$$

- ミグダル効果の確率は小さい(例: 1s軌道電子の電離確率 $\Rightarrow O(10^{-6})$)
- 電離に比べ励起の確率はより小さい(同じ(n,l)のとき $O(10^3)$ ほどの違いがある)

暗黒物質探索と原子核反跳を伴うミグダル効果

- 暗黒物質探索において、**原子核反跳を伴ったミグダル効果**を使った探索が注目されている
 - 暗黒物質がターゲット原子核と弾性散乱し、**低確率で軌道電子の励起・電離が追加で生じる**(ミグダル効果)
 - ⇒ 原子核反跳(NR)と電子反跳(ER)が生成
 - ターゲット原子がXeの場合、 $m_{DM} < O(10)GeV$ で $E_{NR} < E_{ER}$
 - ⇒ 低質量領域の暗黒物質の感度を向上できる

DMと核子の散乱断面積への制限

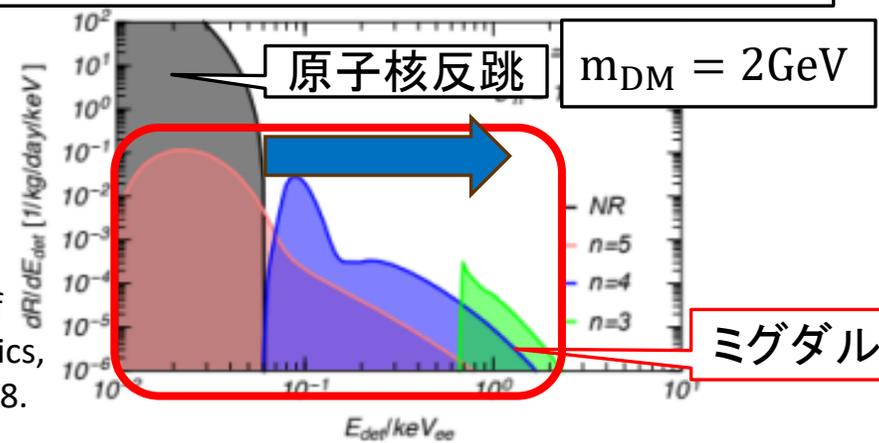


ミグダル効果を仮定した、散乱断面積への制限

E. Aprile, et al., Phys. Rev. Lett. 123, 241803(2019).



ミグダル効果によるエネルギースペクトル



ミグダル効果による信号

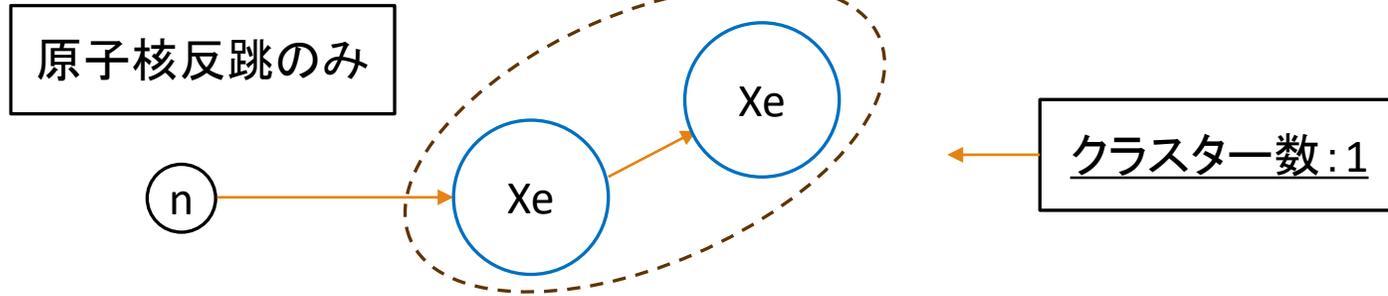
XENON実験
 ミグダル効果を仮定することで、これまで感度のなかった1GeV以下の質量領域へ感度が伸びた
 ⇒ 世界最高感度を達成

M. Ibe, Journal of High Energy Physics, 2018, 3, 194, 2018.

2クラスターイベント探索の利点と課題

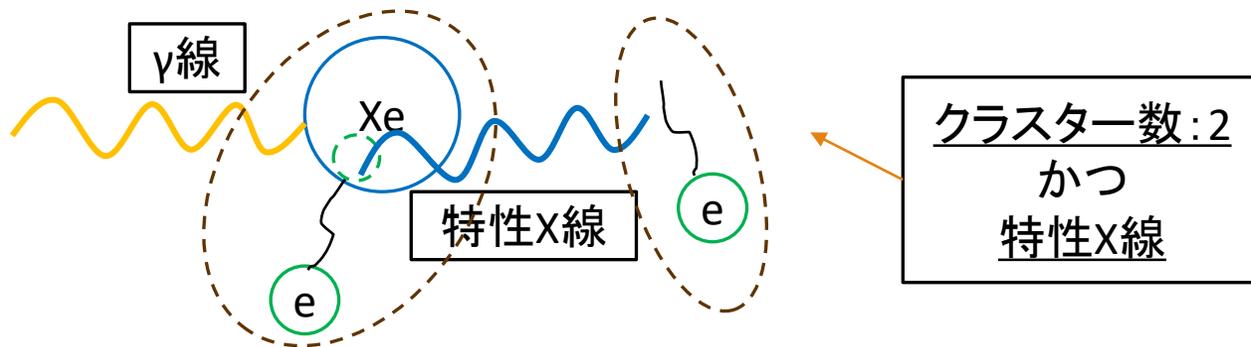
□ メリット

- 原子核反跳のみのイベントはクラスター数で区別できる



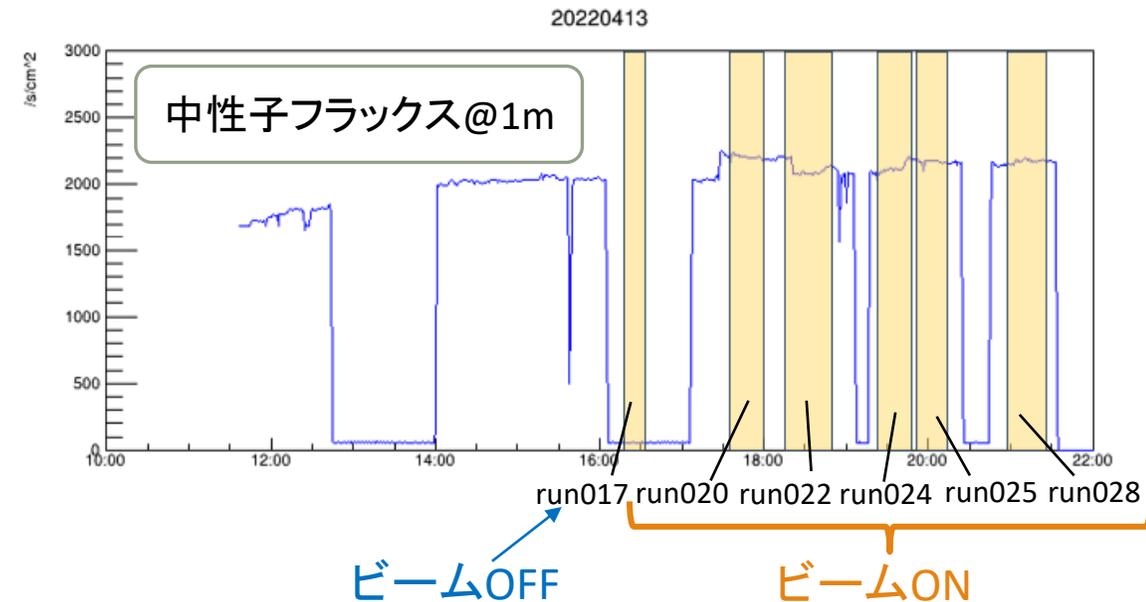
□ デメリット

- γ 線が光電吸収されてK殻電子が電離した場合と区別できない \Rightarrow γ 線BGの理解が必要



中性子ビーム試験

- 2022年4月に実施
- 中性子ビームの概要
 - 場所: 産業技術総合研究所
 - ${}^7\text{Li}(p, n) {}^7\text{Be}$ 反応により中性子を生成
 - 陽子を2.3MeVに加速し、正面で565keVの中性子を生成
- 中性子フラックス
 - 陽子加速器の電流値(CI)でモニター
 - フラックス: 約2000個/cm²/s @1m





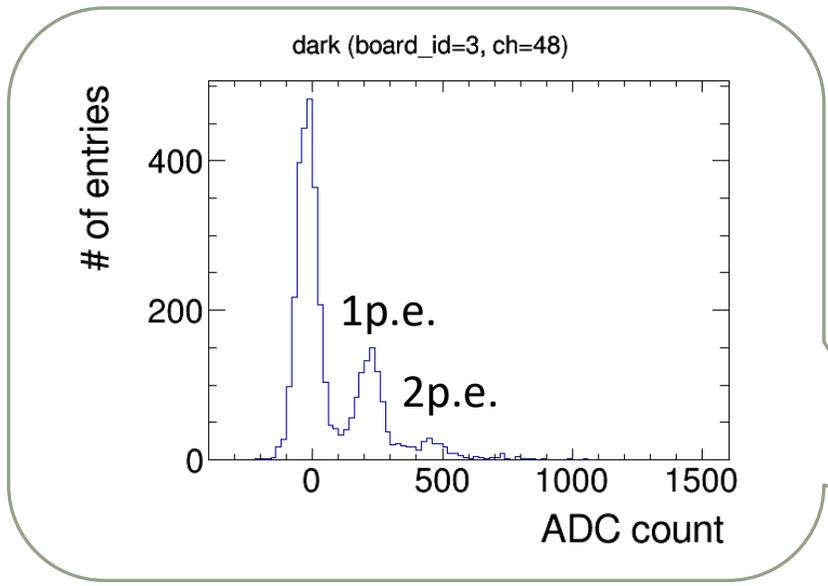
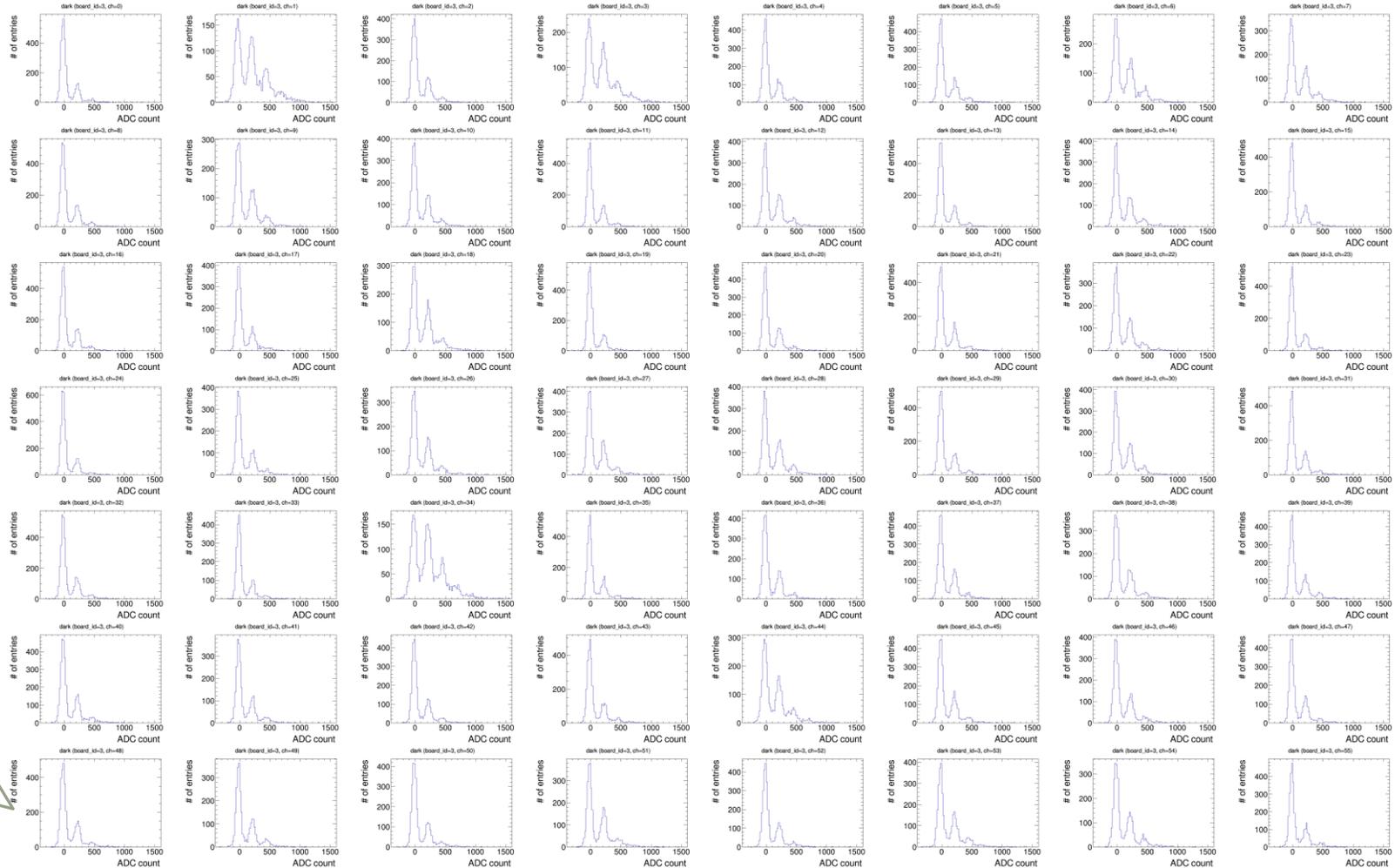
1p.e.ゲイン

□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

- ・fittingによりペDESTALと1p.e.に対応するADCカウントを求め、差を取る
- ・ダークカウント測定時と通常データ取得時それぞれの増幅率からスケーリングして1p.e.ゲインを算出

※1枚のボード(56ch)のダークカウント測定の様子



MPPCの非線形性補正の解析

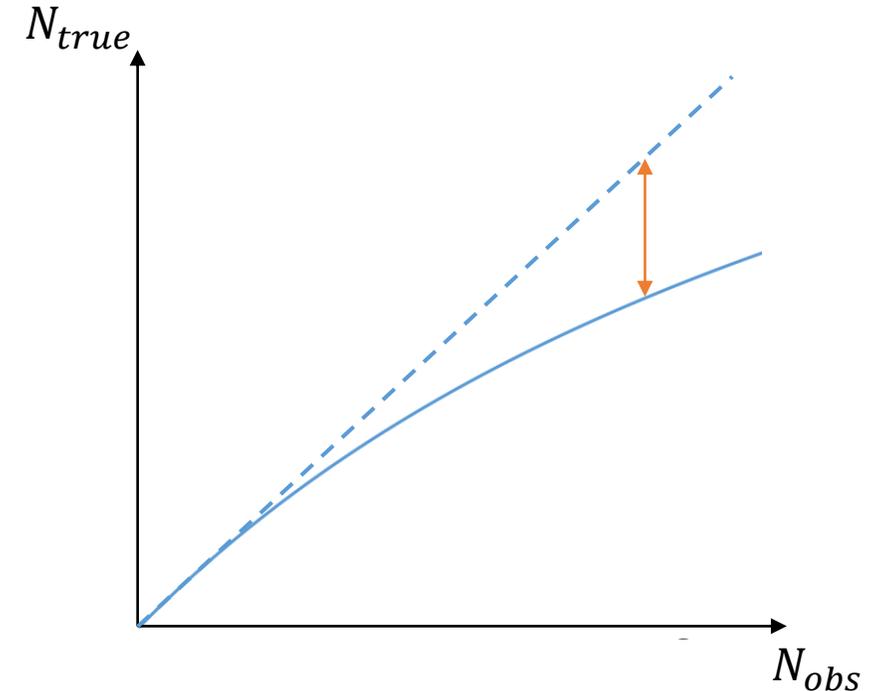
- 大光量下ではMPPCの応答が非線形になる
 - 同じピクセルに光子が同時に複数入った場合でも1光子分の出力しかされない
 - 回復時間: 出力をしてから次に所定の出力ができるようになるまでの時間
 - ⇒ 非線形性はMPPCの回復時間で特徴付けられる
- 各chで回復時間は異なるが、今回は典型的な回復時間を全チャンネルに適用し補正

$$N_{obs} = \frac{N_{true}}{1 + \tau \frac{N_{true}}{\Delta t \cdot N_{pix}}}$$

非線形応答の原因

N_{obs} : 観測光子数、 N_{true} : 入射光子数
 Δt : 単位時間、 N_{pix} : MPPCのピクセル数、 τ : 回復時間

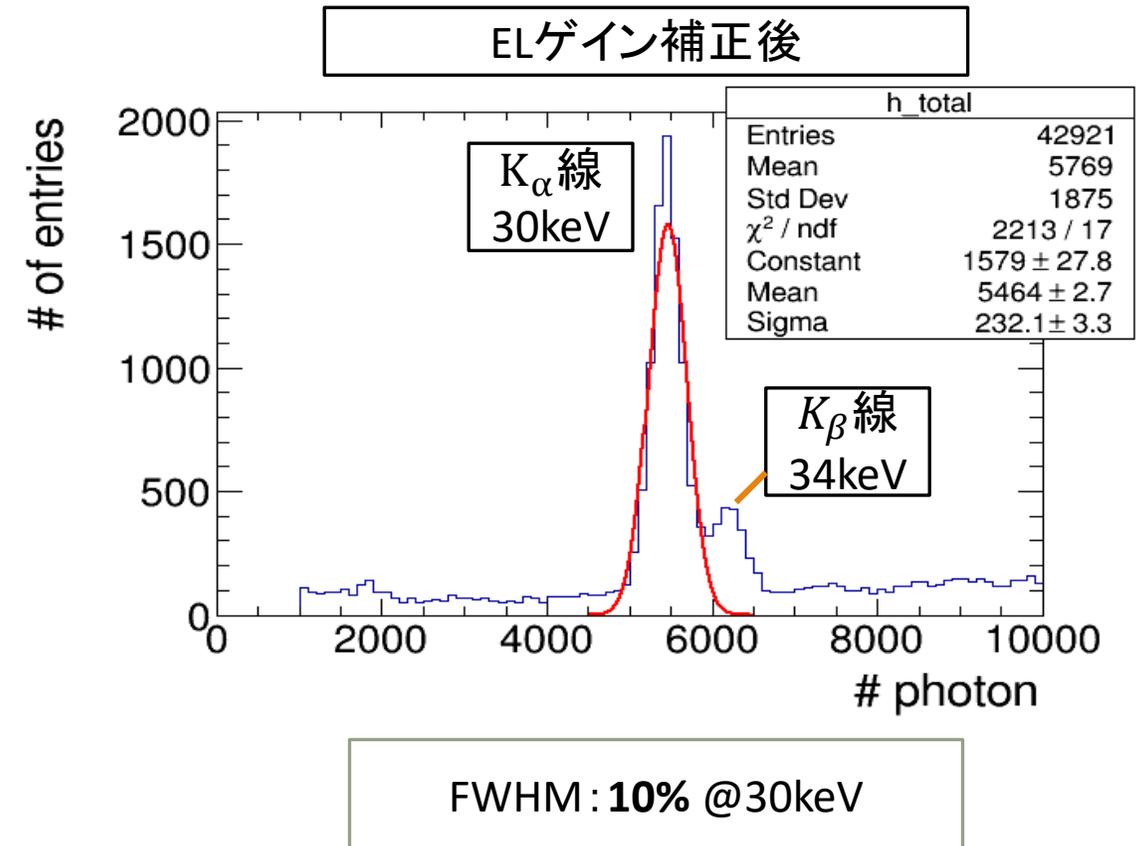
Kazuhiro Nakamura, "Development of a large-sized high-pressure xenon gas time projection chamber for neutrinoless double beta decay search", Doctoral thesis, Kyoto University, 2022



ELゲイン補正

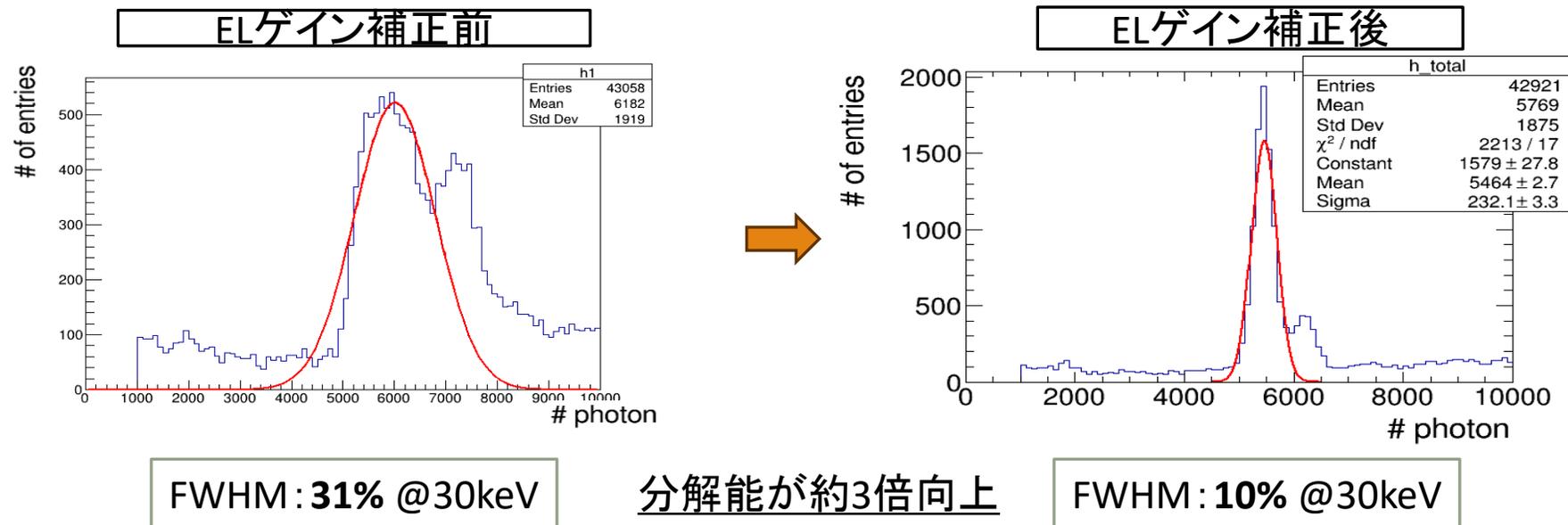
- K_{α} 線イベントを収集し、各chのELゲインのばらつきを補正
- K_{α} 線のエネルギーに対応するphoton数が揃うようにELゲインの補正を繰り返す
- ⇒ ELゲインのずれが大きいチャンネルを特定して補正できる

- ・ 30keVでのエネルギー分解能は10%
- ・ K_{α} , K_{β} 線が区別できている



ELゲイン補正の詳細

- K_{α} 線イベントを収集し、各chのELゲインのばらつきを補正
 - 光電効果により、 K_{α} 線のイベントがキセノンガス中の様々な場所で生じる
 - K_{α} 線イベントは大半のエネルギーを1つのチャンネルに落とし、残りは隣接するチャンネルに落とされる
 - ELCC面方向のdiffusionの最大の長さ: 0.33cm
 - 30keVの電子の飛程: 0.12cm
- ← 合計すると0.45cm < (ELCCのセル間隔1cm)
- K_{α} 線のエネルギーに対応するphoton数が揃うようにELゲインの補正を繰り返す
- ⇒ ELゲインのずれが大きいチャンネルを特定して補正できる



クラスター解析の詳細

□ x,y平面 (ELCC面)

□ ドリフト電子は最大0.33cm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

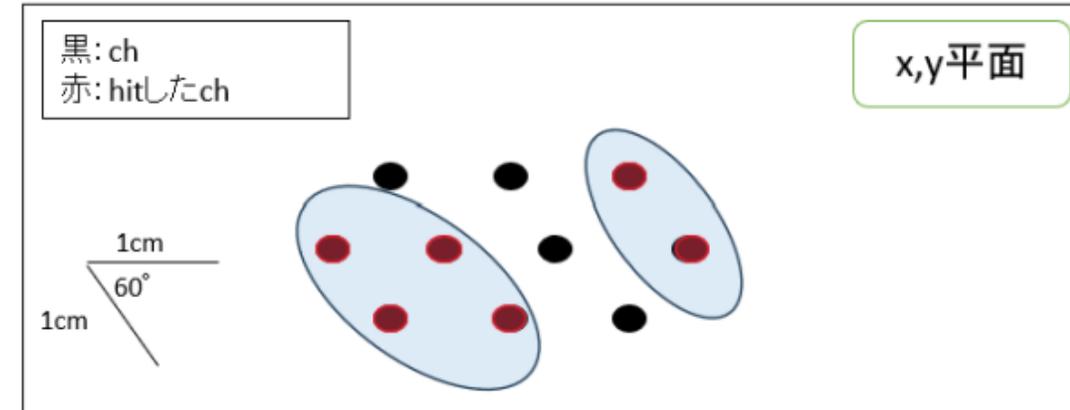
□ 時間的に波形が重なっているか判定

□ データ取得のADC閾値を設定しているため、

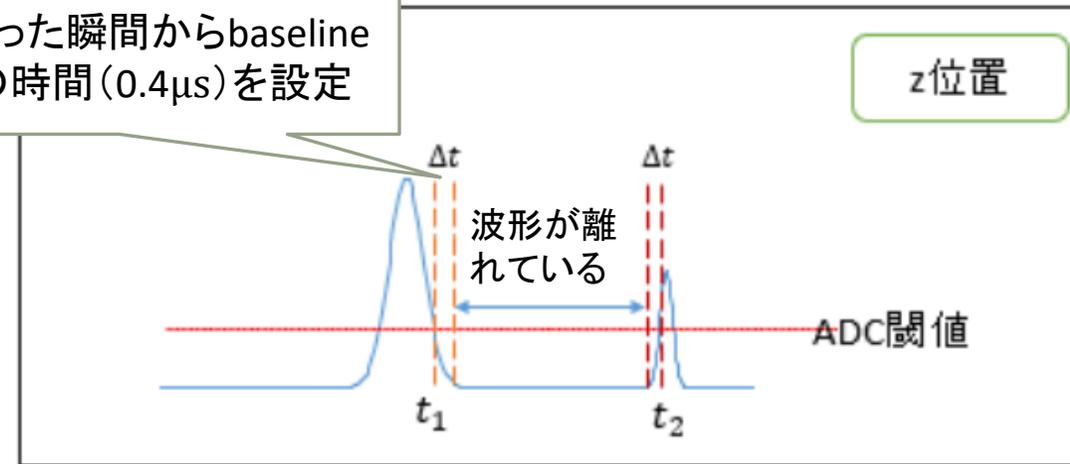
ADC閾値を取った瞬間からbaselineに戻るまでの時間(0.4 μ s)を設定

□ Hitしたchが隣同士、かつ時間的に波形が重なっている場合⇒同一クラスターと判断

複数クラスターと認識される時の様子



ADC閾値を取った瞬間からbaselineに戻るまでの時間(0.4 μ s)を設定



2クラスターかつ30keVのイベントレート

測定スペクトル

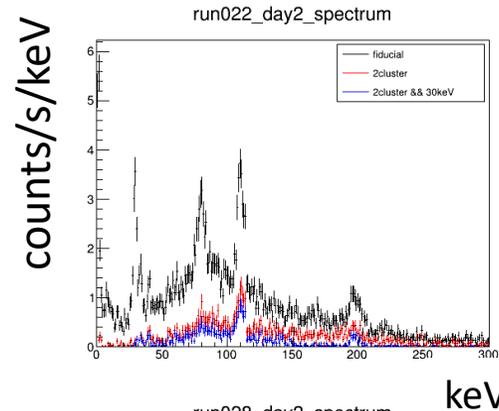
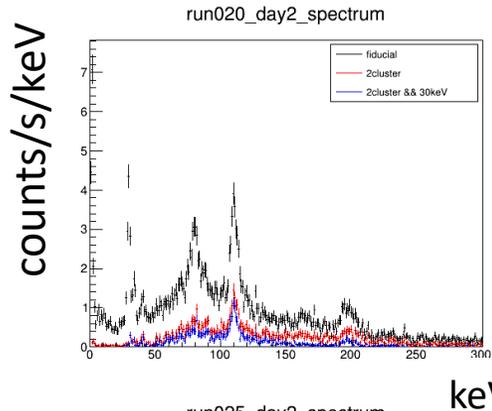
エネルギーのcut範囲: (30 ± 3.5) keV

↑ 各測定データの 3σ を含む幅

ビームON時

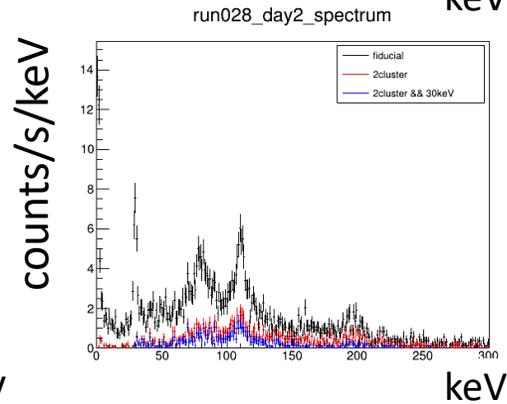
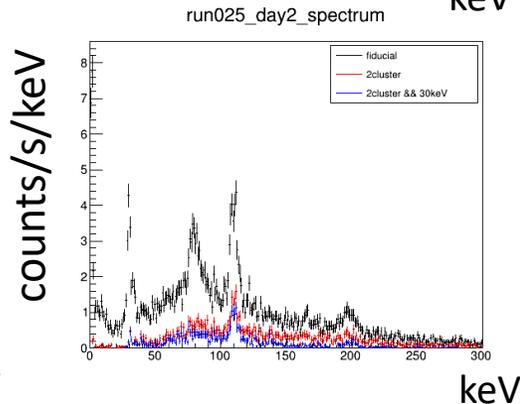
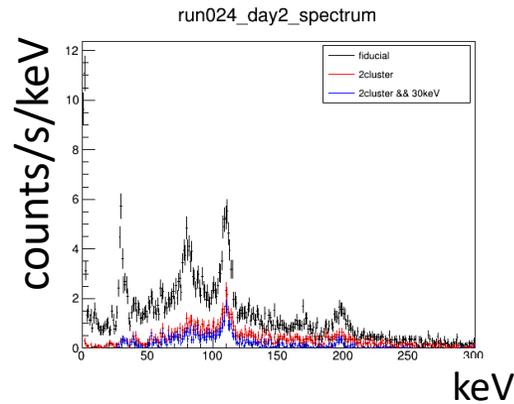
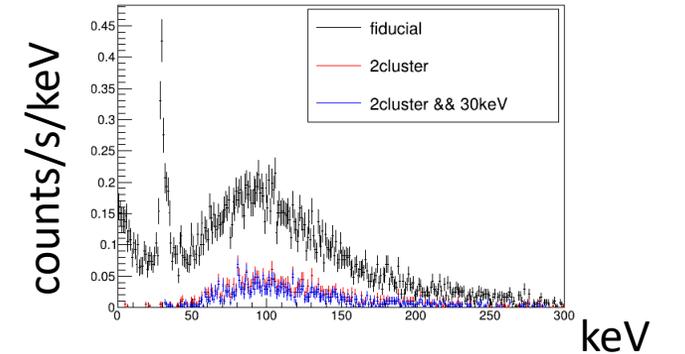
Day2 8kV BeamON

黒線: fiducial
赤線: うち2クラスター
青線: うち片方が30keV



ビームOFF時

Beam Off_day2_spectrum





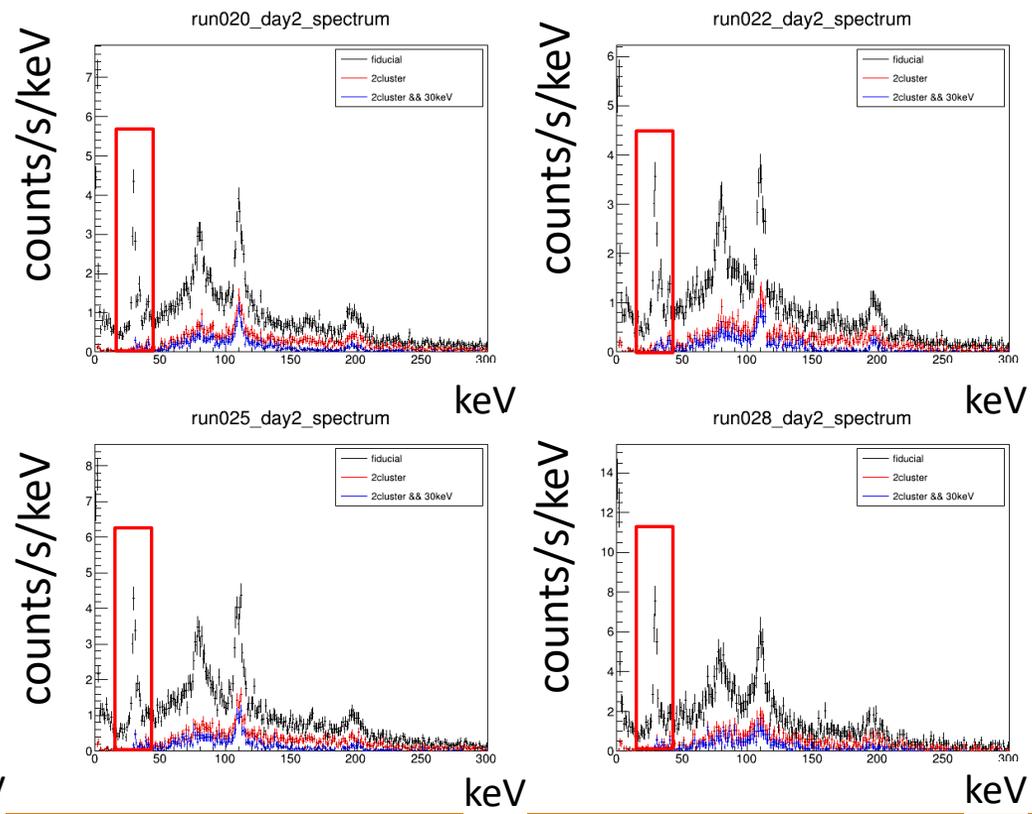
30keVにおける 3σ の幅

fiducialイベントの30keVのピークをフィッティング

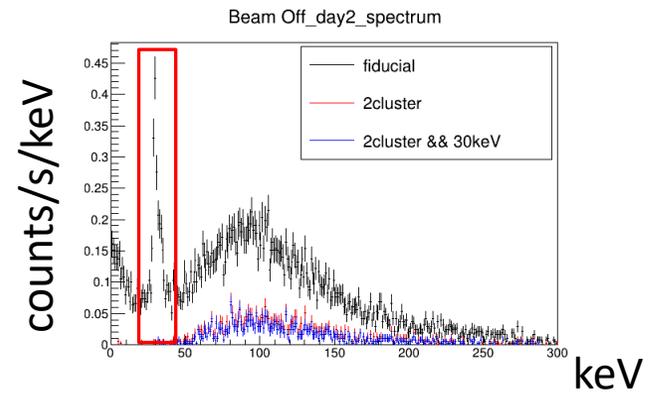
ビームON時

Day2 8kV BeamON

黒線: fiducial
赤線: うち2クラスター
青線: うち片方が30keV



ビームOFF時



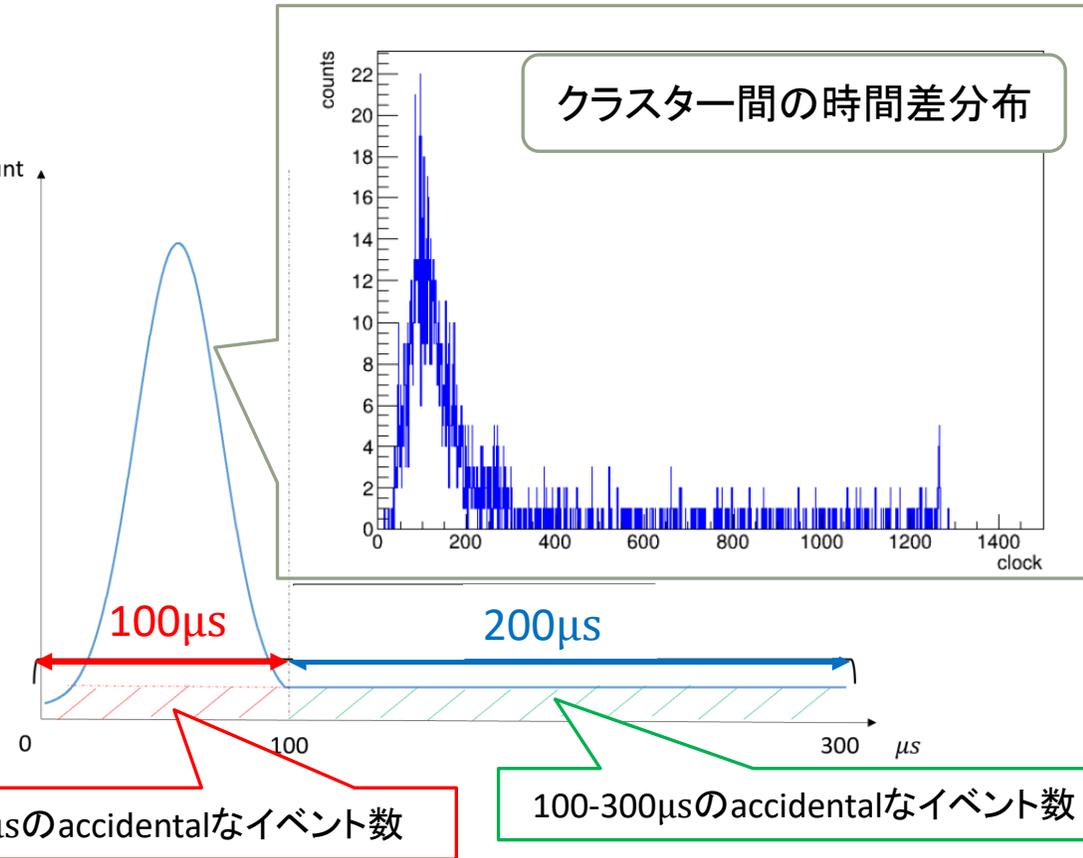
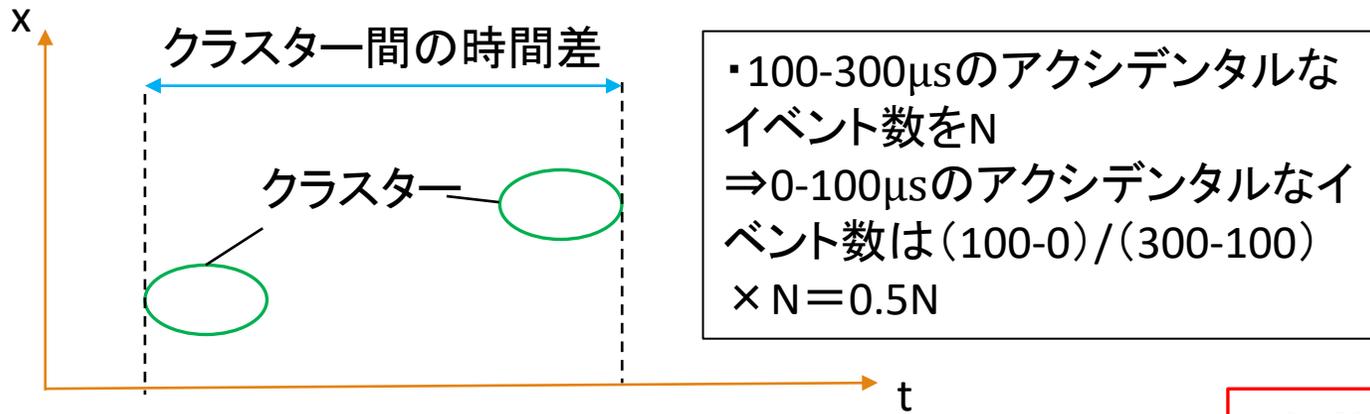
30keVピークの 3σ の幅

測定データ	3σ (keV) @30keV
run017 (OFF)	3.5
run020 (ON)	3.0
run022 (ON)	3.2
run024 (ON)	3.5
run025 (ON)	3.3
run028 (ON)	3.3

3.5keV程度

アクシデンタルなイベントを考慮した補正

- 2cluster-30keVのイベントレートを正確に見積るため、数えすぎたり見逃したりしてしまう場合を考える
- あるイベントと別なイベントが1ウィンドウ内でアクシデンタルに生じる場合
 - クラスタ数を1だけ多く判定してしまう
 - ・1クラスタイベントを2クラスタと判定 ← 数えすぎ
 - ・2クラスタイベントを3クラスタと判定 ← 見逃し
- ドリフト領域より大きい長さに相当する $100\mu\text{s} \sim 300\mu\text{s}$ の範囲はアクシデンタルなイベント
- 同じ頻度で $100\mu\text{s}$ 以内にも生じていると考えて見積る



アクシデンタルなイベントを考慮した補正の詳細

2クラスターかつ片方が30keV、3クラスターかつ30keVクラスターを含むイベントのクラスター間の時間差分布を描画

2クラスターかつ片方が30keVのイベント数: 1791

うち、100~300 μ sのイベント数: 230

⇒200 μ s間に入るアクシデンタルなイベント(本来は1クラスター)の数が230

⇒0~100 μ sのアクシデンタルなイベントは
 $230 \times (100-0)/200 = 115$ (←数えすぎなイベント数)

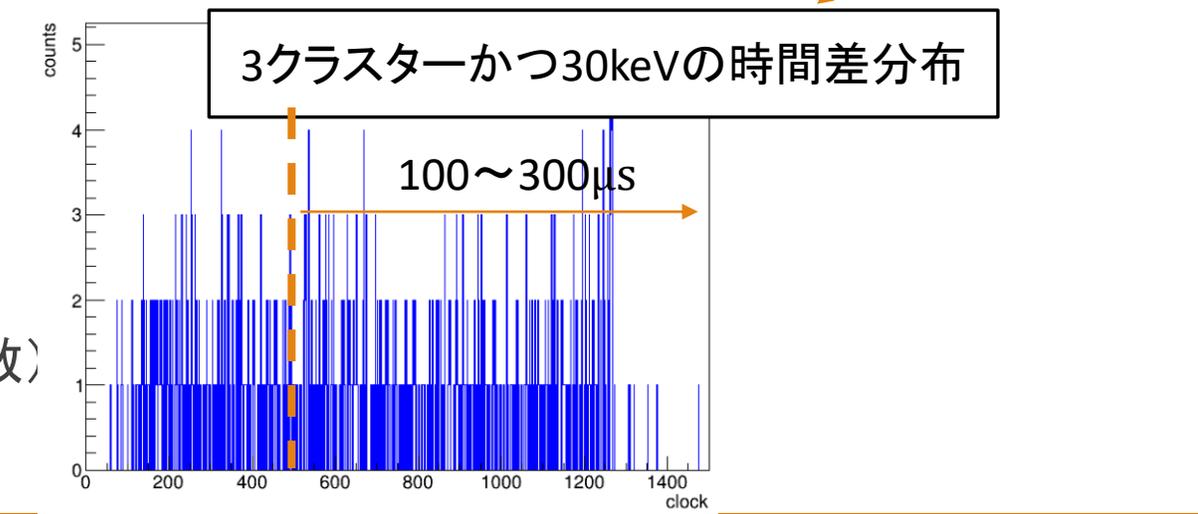
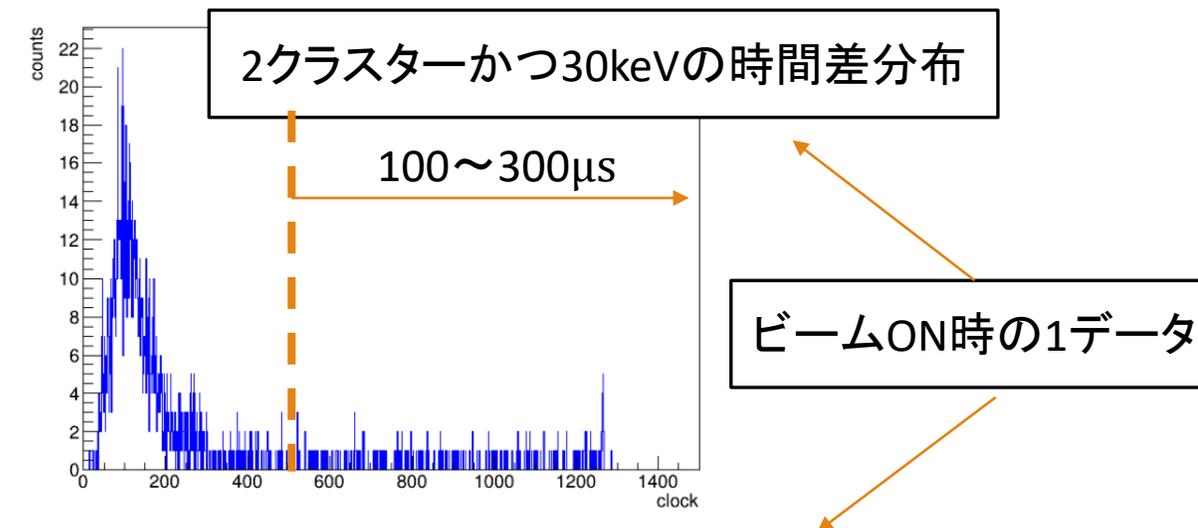
3クラスターかつ30keVを含むイベント

100~300 μ sのイベント数: 560

⇒200 μ s間に入るアクシデンタルなイベント(本来は2クラスターかつ30keV)の数が560

⇒合計のアクシデンタルなイベントは
 $560 \times (300-0)/200 = 840$ (←見逃しているイベント数)

※3クラスターかつ30keVを含むイベント数: 872



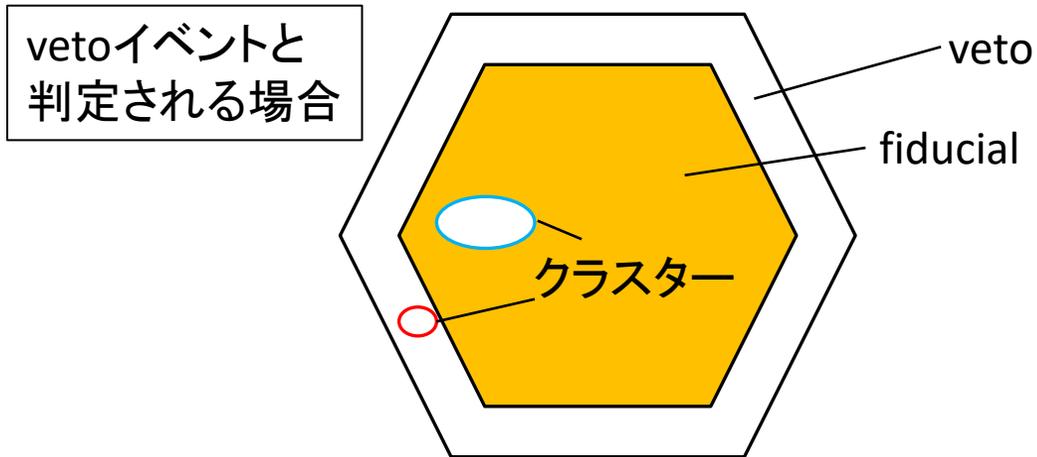
アクシデンタルなイベントを考慮した補正の結果

- 2clusterかつ30keVのセレクションによるイベント数に対して、
 - 1クラスター⇒2クラスターかつ30keVのイベント数の割合
 - 2クラスター⇒3クラスターかつ30keVのイベント数の割合 を算出
- イベントレートにかける補正のファクターを算出

測定データ	1クラスター⇒2クラスター	2クラスター⇒3クラスター	補正ファクター
run017 (OFF)	0.49%	0.86%	+0.37%
run020 (ON)	6.4%	47%	+41%
run022 (ON)	10%	42%	+32%
run024 (ON)	10%	34%	+24%
run025 (ON)	13%	42%	+29%
run028 (ON)	8.7%	32%	+25%

vetoイベントと判定される場合のための補正

- fiducial内でイベントが生じたがvetoにもイベントが生じたことでvetoイベントとして検知されてしまう場合 ⇒ 見逃し
 - whole-trigger: vetoに来たイベントもデータ取得するトリガー(100回に1回データを取得)
 - whole-triggerで検出されたイベントを調べ、vetoにHitしたイベント数と、その中でfiducial内にクラスターを持つイベント数を調べ、その割合を見積った
- ※ vetoにかかっている2クラスターイベントも含む(過大評価)



測定データ	fiducialイベントがvetoと判定される割合
run017 (OFF)	2.0%
run020 (ON)	40%
run022 (ON)	32%
run024 (ON)	30%
run025 (ON)	38%
run028 (ON)	24%

vetoのカウントの重複分の取り除き

- vetoの1イベントに対するvetoトリガーの重複分を取り除く
 - vetoのHitの様子を確認すると、1ウィンドウの時間幅(300 μ s)に連続していた箇所があった
← vetoイベントがHitした際にvetoトリガーが連続してかかってしまう可能性
 - vetoのHitがあった場合
 - Hitはカウントするが、データ取得をしない
⇒ vetoのトリガーはすぐにかかる状態になる
 - vetoの信号が長い場合、同じvetoイベントに複数のトリガーがかかる
- 1ウィンドウの時間幅以内に複数のvetoトリガーがかかっているものは重複しているとみなした



分岐比の理論値の算出

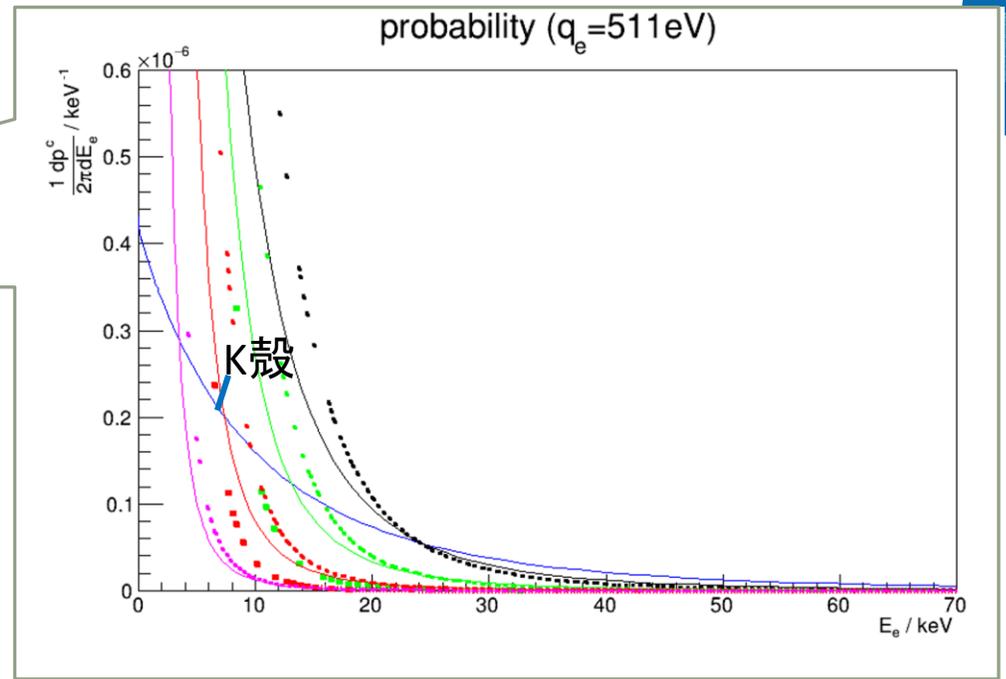
分岐比の計算式

$$B_{cal} = \int_0^{E_{e-max}} \int_0^{17.4} \frac{1}{2\pi} \frac{dp_{q_e}^c}{dE_e} \cdot \frac{1}{17.4} \frac{E_R}{E_{R0}} dE_e dE_R$$

規格化定数

反跳原子核のエネルギーの積分

ミグダル電子のエネルギーの積分



電子の運動量移行が511eVのときの分岐比(dp/dE_e)と、分岐比が原子核反跳エネルギーに比例する性質から算出

- q_e = 511eVに対応する反跳原子核エネルギーをE_{R0} ←
- dp/dE_e を、E_R/E_{R0}によってスケーリング
- E_Rについては最大反跳エネルギー17.4keVまで、E_eについてはE_{e-max} (70keV)まで積分

$$q_e \approx \frac{m_e}{m_N} q_N, \quad q_N \approx m_N v_N, \quad E_R \approx \frac{q_N^2}{2m_N}$$

(q_e, q_N: 電子、原子核への運動量移行)

⇒分岐比の理論値は6.0 × 10⁻⁷

ミグダル信号モデルのエネルギースペクトル



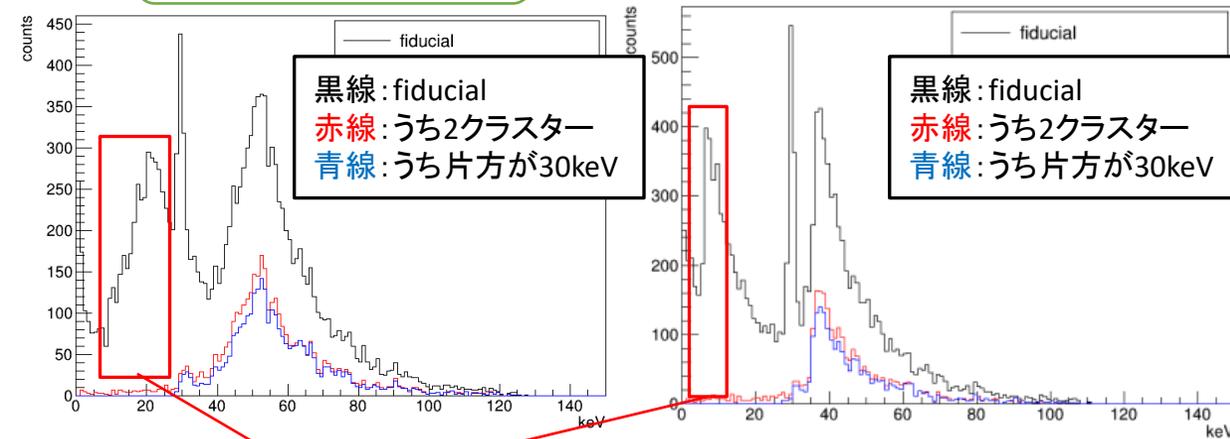
● エネルギースペクトル

□ 分岐比を仮定した2cluster-30keVのイベントレート

- フラックス: 測定データの平均フラックス
- 中性子の透過率
 - 鉛ブロックとXe検出器の圧力容器の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
- Xeガス5atmの数密度: $1.35 \times 10^{20} / \text{cm}^3$

クエンチングなし

クエンチング10%



反跳原子核

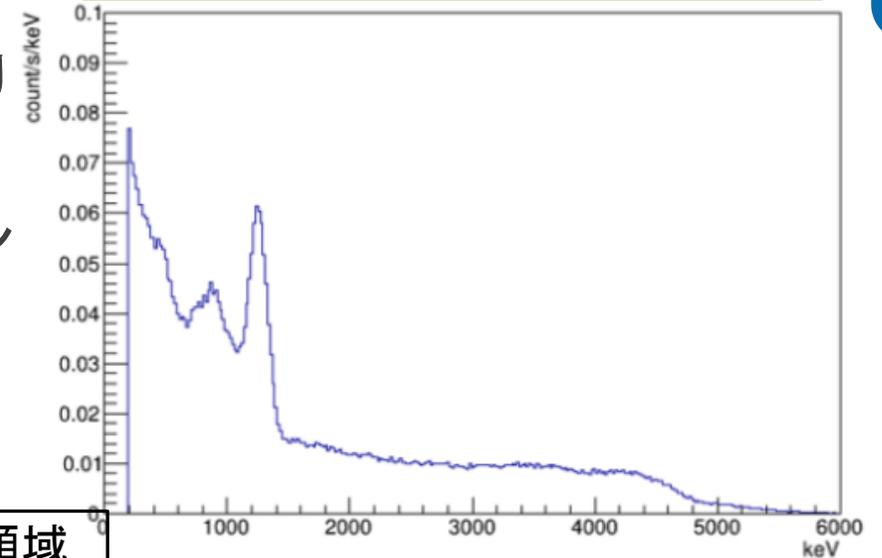
- ・クエンチングにより反跳原子核のエネルギー分布が変化
- ・2cluster-30keVの、感度のあるエネルギー領域が変化

γ線バックグラウンド



- BGOシンチレータを用いたγ線BGの大雑把な見積もり
 - 200~300keVのイベントレートを比較
 - 検出効率やサイズから、Xe検出器に入るγ線BGのイベントレートを見積った
 - 見積もり結果: $\sim 10^2$ counts/s
 - 測定スペクトル: 21 counts/s ← おおよそ同じオーダー
- ⇒ γ線BGが支配的と推測

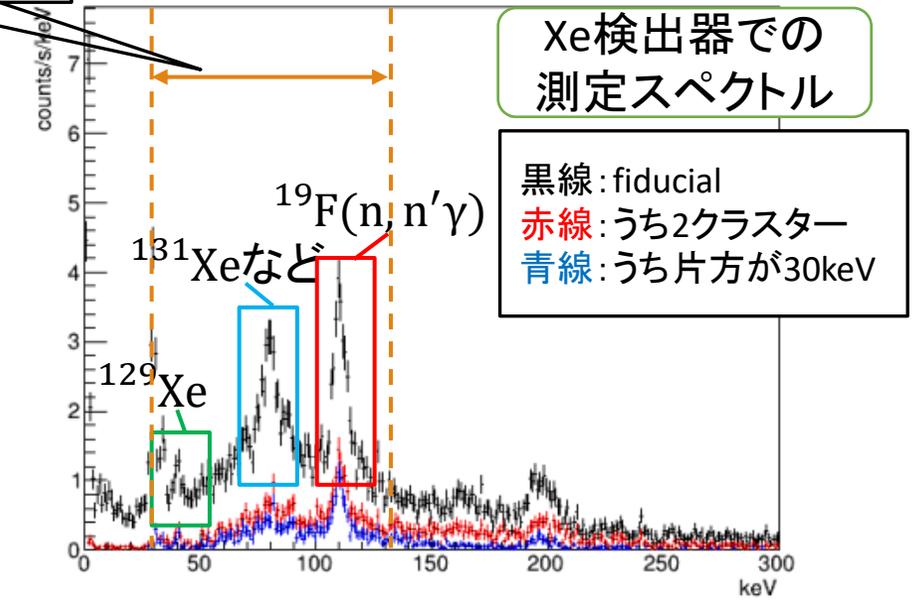
BGOシンチレータでのγ線スペクトル



- γ線BGを削減するために
 - フィールドケージの絶縁体をPTFEではないものにする
 - $^{19}\text{F}(n, n'\gamma)$ の110keVとそのエスケープ(80keV)を落とせる
 - Xeガスを濃縮して ^{134}Xe や ^{136}Xe のみを使用する
 - $^{129}\text{Xe}(n, n'\gamma)$ の40keVと120keV、 $^{131}\text{Xe}(n, n'\gamma)$ の80keVを落とせる

ミグダル信号領域

Xe検出器での測定スペクトル



今後の課題

□ミグダル効果のイベントを増やす

□10MeV単色中性子の使用

□ミグダル効果の起きる確率は反跳原子核のエネルギーに比例する

□565keV⇒10MeVで、約18倍のイベントが期待される

□Xe検出器の大質量化

□クエンチング測定

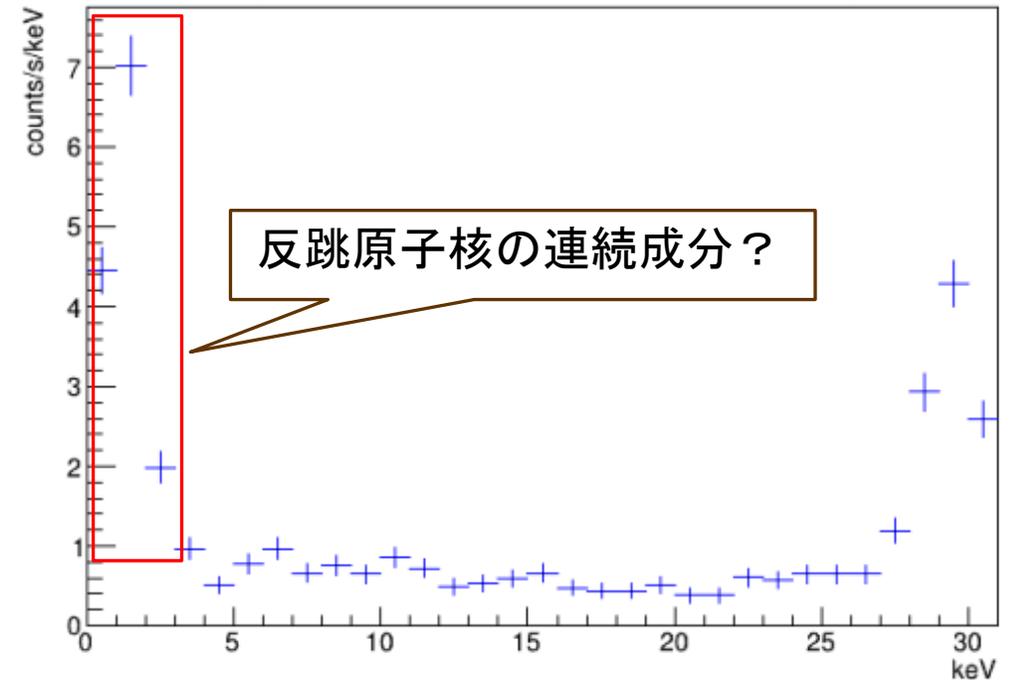
□Xe原子核のクエンチング値が分かれば、より正確なミグダル効果探索ができる

□今回の中性子ビーム試験で、3keV付近まで続く反跳原子核の連続成分のようなスペクトルを観測(Xeの最大反跳エネルギーは17.4keV)

⇒クエンチング値は0.17程度？

□エネルギーの異なる中性子をXe検出器に照射し、正確なクエンチング測定が必要

測定スペクトル(30keVまで)



ミグダル効果を探るために

□既に特定できている γ 線BGをなくす

⇒フィールドケージに使われているPTFEを別のものにする、Xeガスを濃縮する

□特定できていない γ 線BG

⇒シミュレーションを行い γ 線BGを理解する

- 壁や床などのジオメトリ、検出器の構造物を精密に構成
- Geant4で565keV中性子を照射した際の γ 線BGを見積る

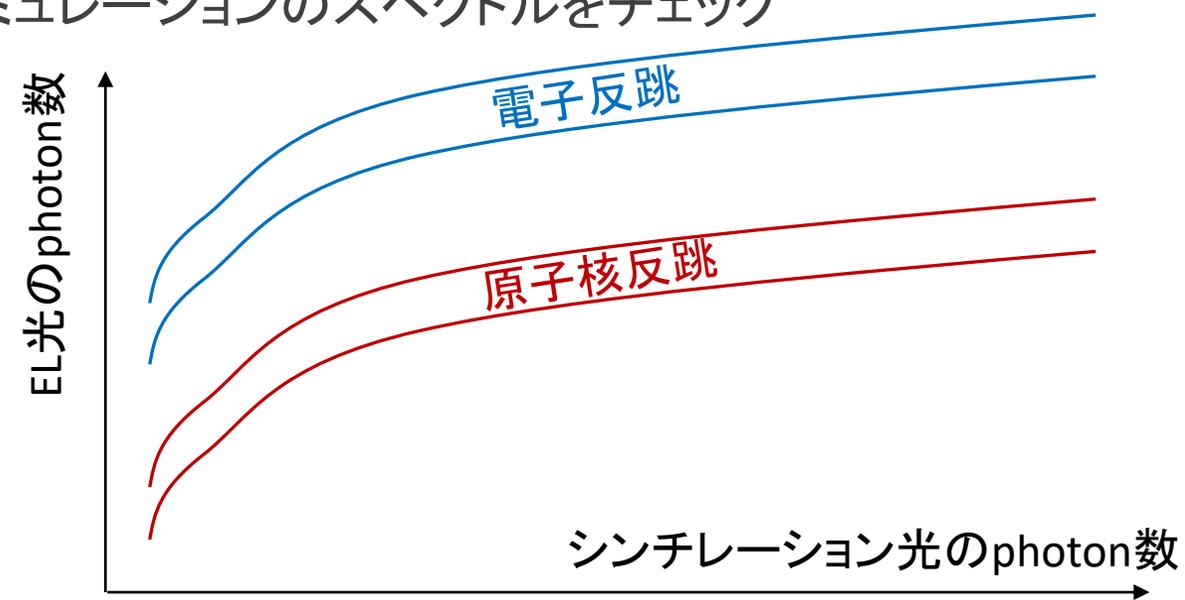
←BGOシンチレータやXe検出器のスペクトルを使って、シミュレーションのスペクトルをチェック

□原子核反跳＋電子反跳のイベントを探る

- PMTを使用した解析
- クエンチングにより、シンチレーション光のphoton数に対するEL光のphoton数の分布が原子核反跳と電子反跳で異なる

⇒ γ 線BGによる2クラスターイベントを排除できるか

シンチレーション光のphoton数
に対するEL光のphoton数分布



Xeガス検出器のデータ取得

読み出し回路

- FEBS3枚とHULボードを用いたAXELシステムを流用
- FEBS: 56ch読める
- HUL: FEBSのトリガーをかけている

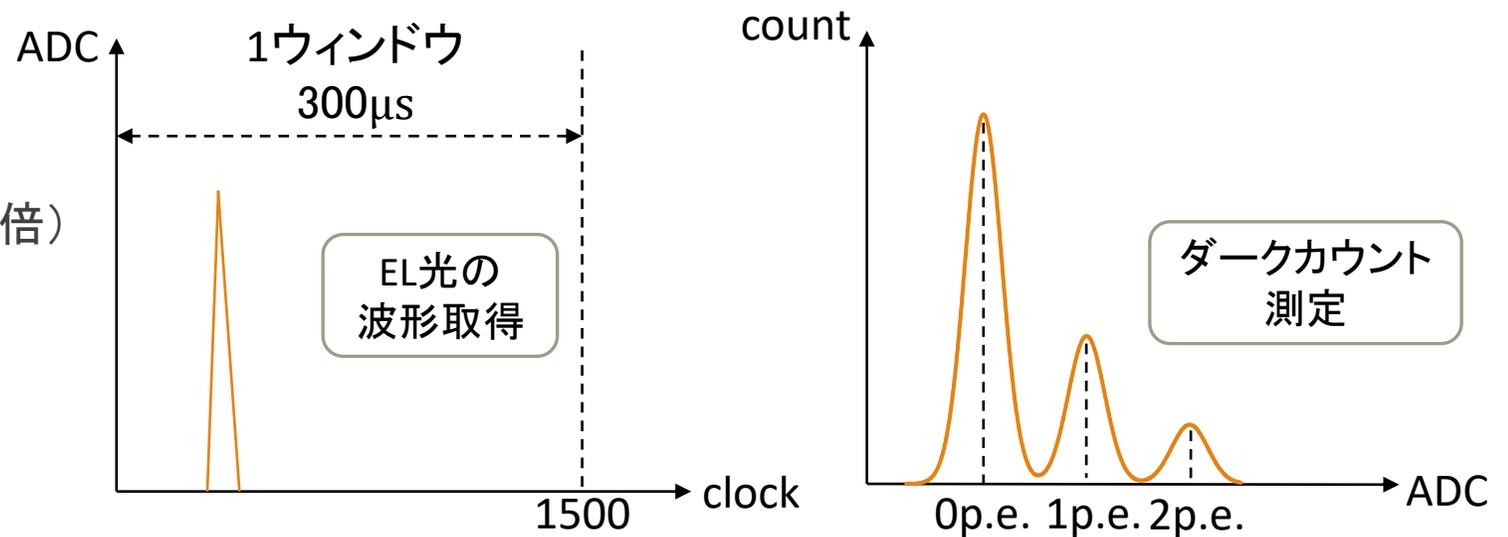
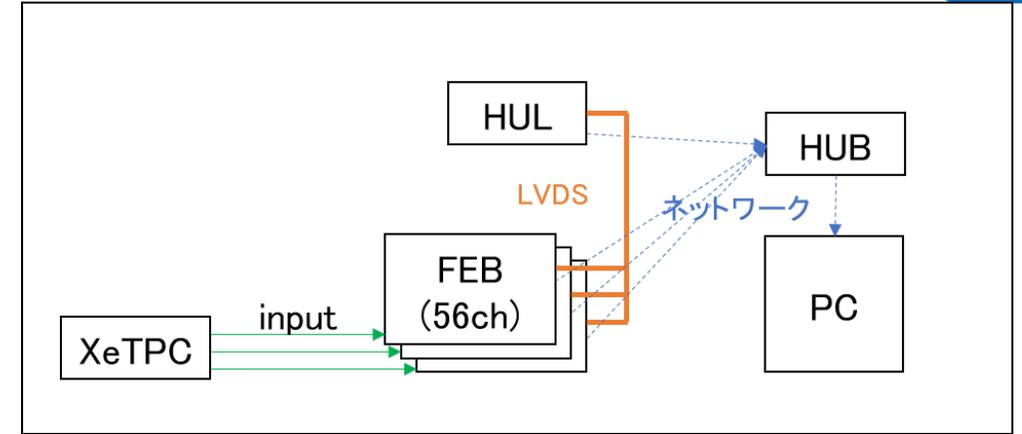
データ取得

EL光の波形取得

- 5MHzで1500clock(300 μ s分)取得
- 12bitで最大2Vp.p.まで
- DCカップリングで信号を読み出す

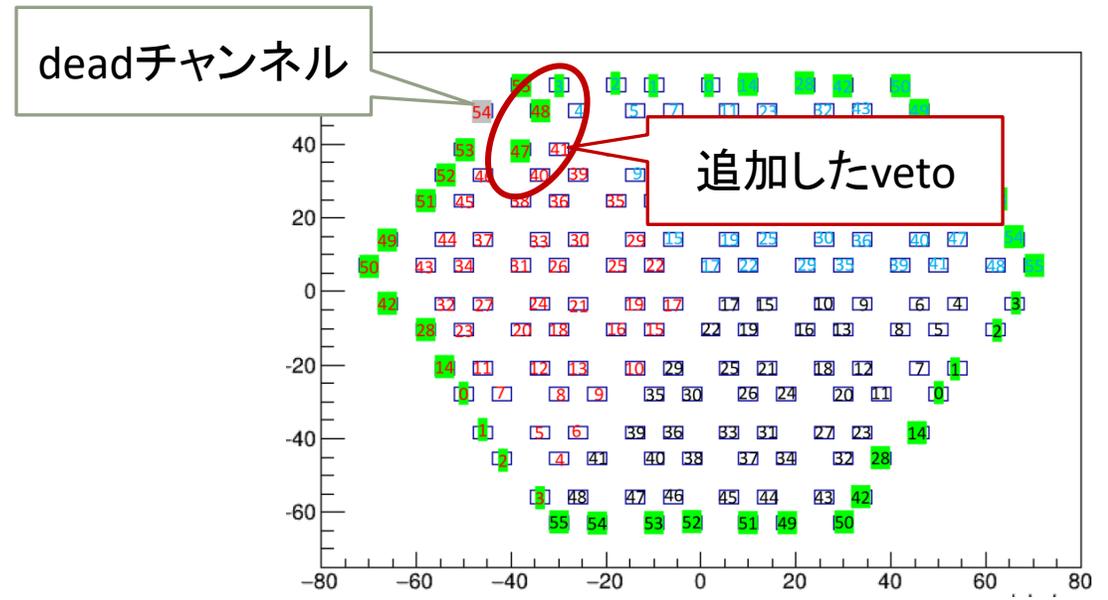
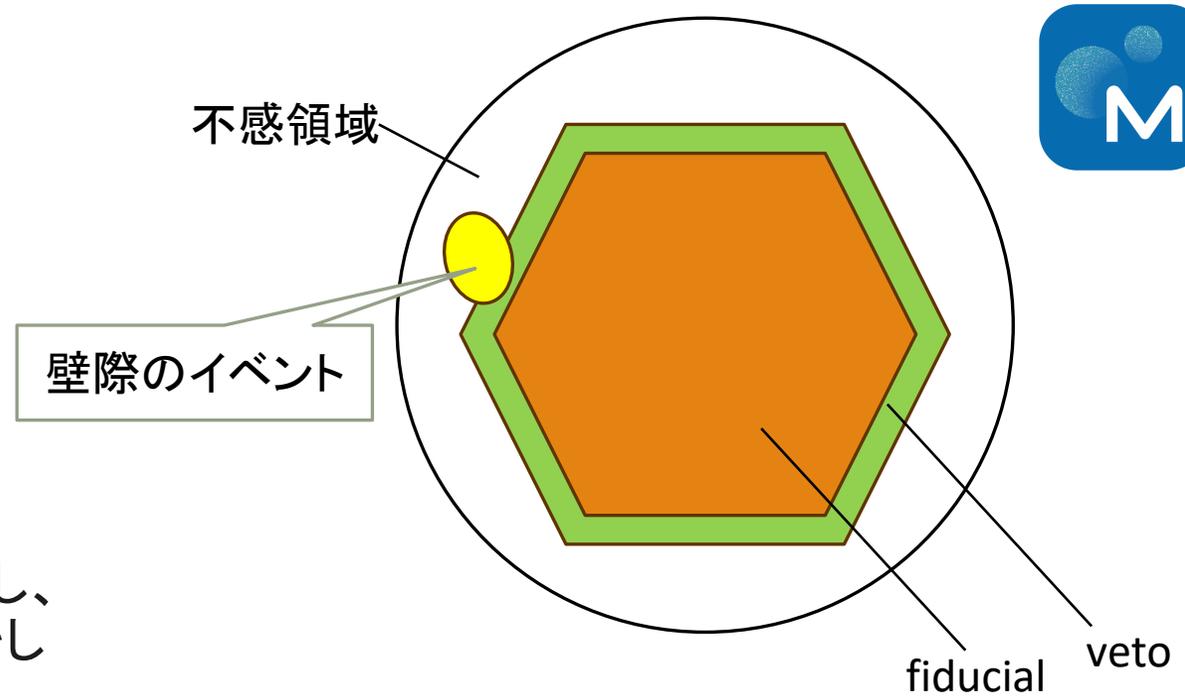
ダークカウント測定

- 増幅率の高いADC(通常データ取得の33倍)で計数
- 1p.e.ゲインを各chで取得



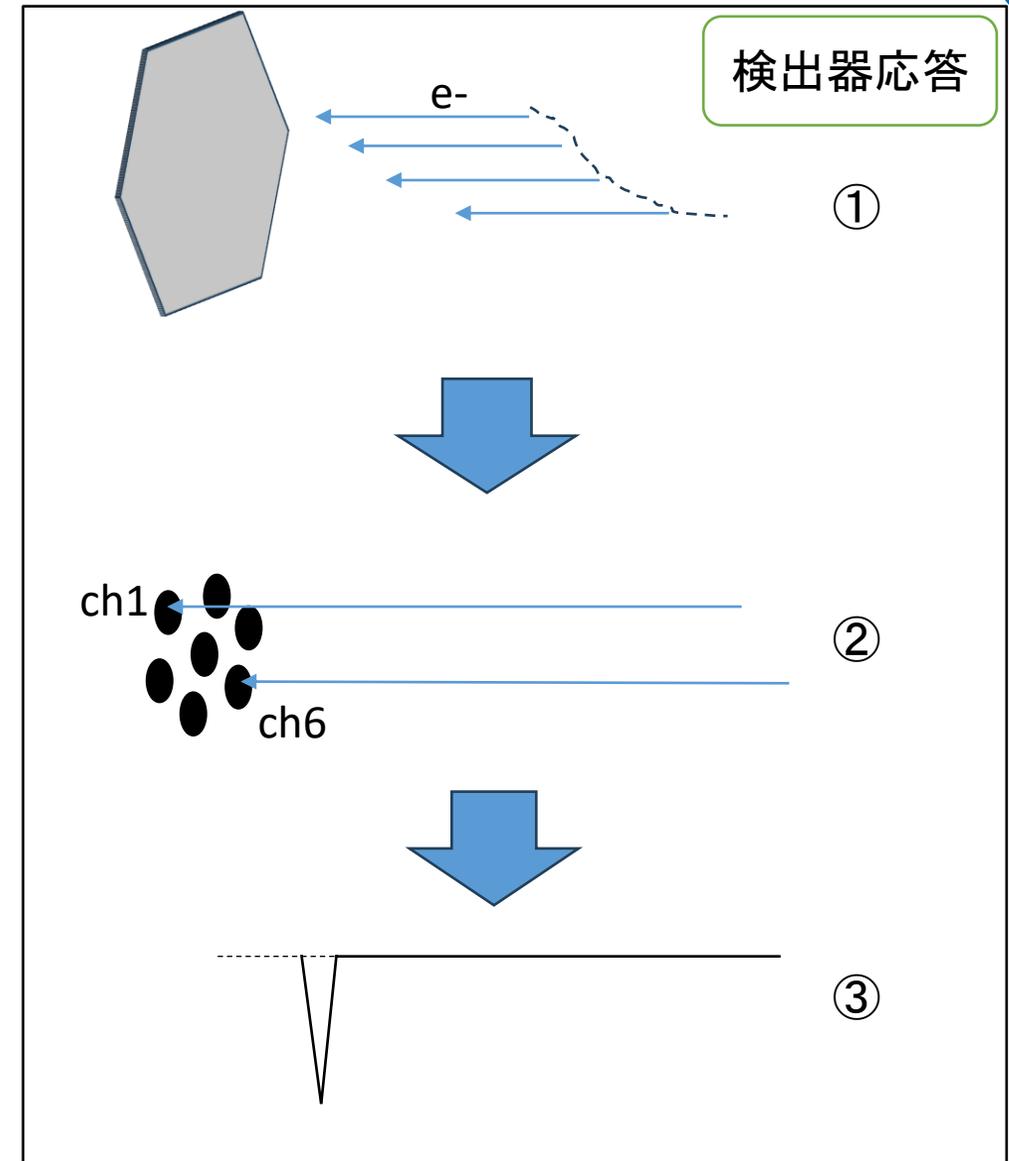
検出領域

- fiducial領域とveto領域の設定
 - 完全に収まるイベントを検出
 - 壁際のイベントはクラスターの一部が不感領域に入る
 - ⇒エネルギー損失の一部をとりこぼす
 - ⇒エネルギー分解能の低下
 - 有感領域の一番外側のチャンネルをvetoチャンネルとし、そこにHitしたイベントはvetoイベントとしてデータ取得をしない
- 今回は、元々vetoにしていたチャンネルの1つが使えなかったため、vetoのチャンネルを一部変更
- z方向のvetoの設定
 - PMTを2個使用したが足りず、PMTを用いた解析はしなかった
 - ⇒z位置の絶対座標が得られない
 - z位置にはveto領域を設定しなかった



検出器応答のシミュレーション

- 電離電子が入るチャンネル番号の決定 (②)
 - 使用したXe検出器のELCCのチャンネルの配置から、チャンネルマップを作成
 - ドリフト電子がELCC面に到達した時点での(x, y)座標から、Hitするチャンネル番号を付与
- ELCC内でEL光を生成し、波形として出力 (③)
 - ドリフト電子からEL光の生成
 - ELゲインは全チャンネルで一律
 - ELCC内でランダムな位置に生成
 - EL光の発生タイミングから、photonを縦軸、横軸clockの波形を生成
 - MPPC波形
 - MPPCサチュレーション補正により、photon数を補正
 - 1photon=0.9577 [ADC]と、1p.e.を固定(典型値)
 - 縦軸photon数からADCへ変換



コリメータ箱の設計

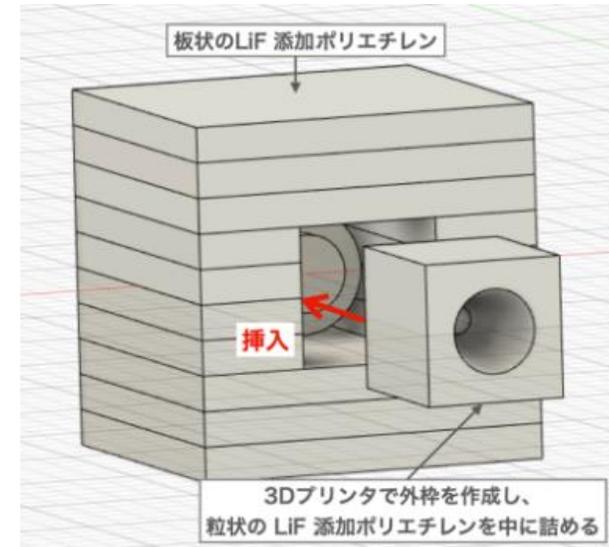
コリメータ

- 30cm × 30cm × 30cmのコリメータブロックの中に、10cm × 10cm × 15cmのコリメータ箱を挿入

コリメータ箱

- 中に粒状のLiF添加ポリエチレンを詰める
- Xe検出器方向に中性子ビームが向かうように、円錐状に空洞を設計
- Liターゲットが熱で溶けないように風を当てるためのチューブを通す設計

コリメータの概念図



金崎 奎, 修士論文, 神戸大学, 2023

コリメータ箱

