

MIRACLUE実験

ガス検出器による中性子ビームを用いたミグダル効果の探索

中村輝石(東北大)

for the MIRACLUE collaboration

今回の内容は内山修論になってます
そのうちwebに乗る予定ですので、興味のある方は連絡ください

ミグダル効果

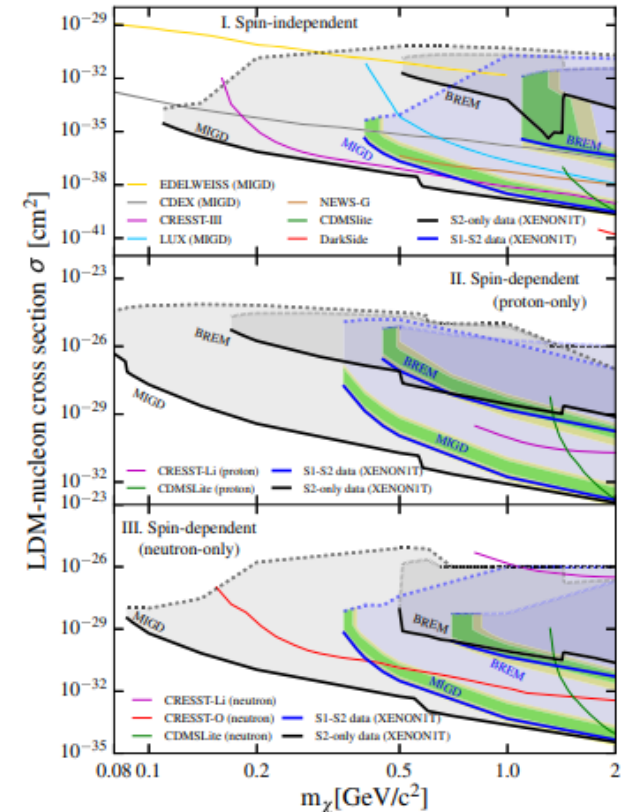
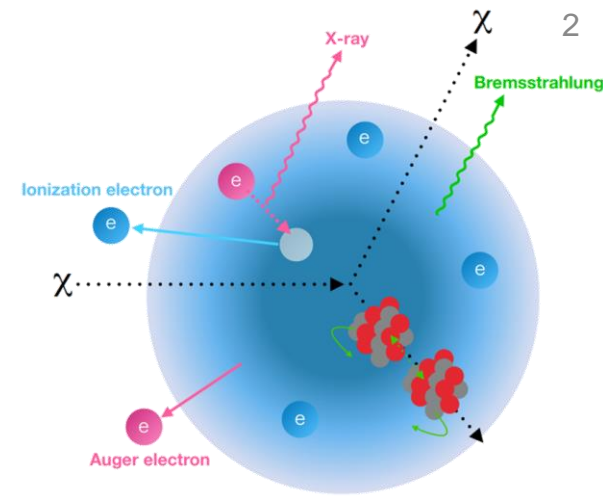
- 原子核が動き、追従できない束縛電子が励起・電離
 - 量子力学で予言されている(1939,1941 A.B.Migdal)
 - α 崩壊や β 崩壊に伴うミグダル効果は観測済だが、散乱に伴うものは未確認

- α 崩壊: Sov. Phys. JETP 21 (1965) 675
- α 崩壊: PRC 11 (1975) 1740-1745
- α 崩壊: PRC 11 (1975) 1746-1754
- β 崩壊: Phys. Rev. 93, Number 3 (1954) 518
- β 崩壊: PRL 108 (2012) 243201
- $\beta+$ 崩壊: PRA 97 (2018) 023402

- 暗黒物質探索の解析への応用

- 原子核反跳に加えて電子反跳事象が追加される
- 観測エネルギーが増え、低質量暗黒物質への感度が向上
- 多数の解析例がある

- LUX: PRL121(2018)101801
- XENON1T: PRL123(2019)241803
- LAr: JHEP11(2020)034
- 半導体: PRL128(2021)081805
- COSINE: PRD105(2022)042006
- SuperCDMS: PRD107(2023)112013
- DarkSide50: PRL130(2023)101001
- PandaX-4T: PRL131(2023)191002



散乱による原子核反跳に伴うミグダル効果

- 伊部論文で詳細に計算がある(JHEP03(2018)194)
 - 暗黒物質探索の解析や、ミグダル効果探索のためのバイブル
- 特徴
 - 発生確率は電子の運動量移行の2乗に比例
 - 原子核の速度が電離電子より遅い近似から来る。散乱の場合はほぼこの条件を満たす
 - 励起より電離の方がおきやすい(3桁くらい)
 - 励起は終状態が離散的だが電離は連続的なので
 - 内殻電子が電離される確率は低い
 - XeのK核電子の電離確率は $O(10^{-6})$

反跳原子核の速度

電子の位置

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

遷移確率

始状態

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

$$= v_N^2 |\langle \phi_n^* | z | \phi_0 \rangle|^2 \quad v_N \ll v_e$$

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]	$\frac{1}{2\pi} \int dE_e \frac{dp_e^2}{dE_e}$
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}

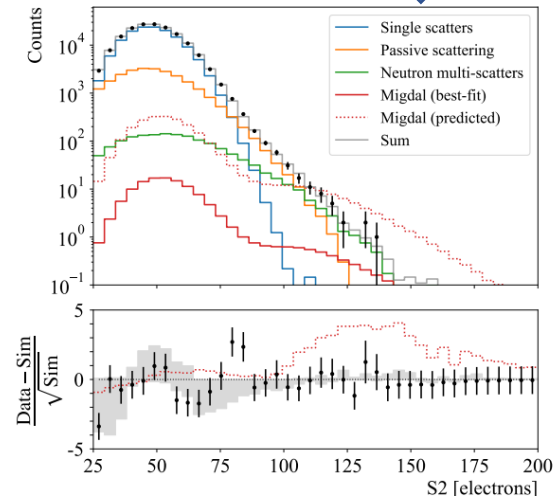
M.Ibe, arXiv:1707.07258v5, 2023

励起

電離

ミグダル効果の探索

- 中性子を照射して原子核反跳を起こし、それに伴うミグダル効果を探す
- MIGDAL実験: *Astropart. Phys.* 151 (2023) 102853
 - 低圧ガス中で原子核+電子の繋がった飛跡を探す
- LXe: arXiv2307.12952
 - M,L殻の電子が電離されるものを探索
 - ミグダル効果は見つかっていない
 - 液体キセノン中での原子核+電子の再結合がどれくらい起きるか、要調査
 - ※彼らのビームライン周りのセットアップは参考になりそう
- MIRACLUE実験: *PTEP* 2021 (2020) 013C01
 - 位置検出器のあるガス検出器で2クラスター事象を探す



MIRACLUE実験

• 実験概要

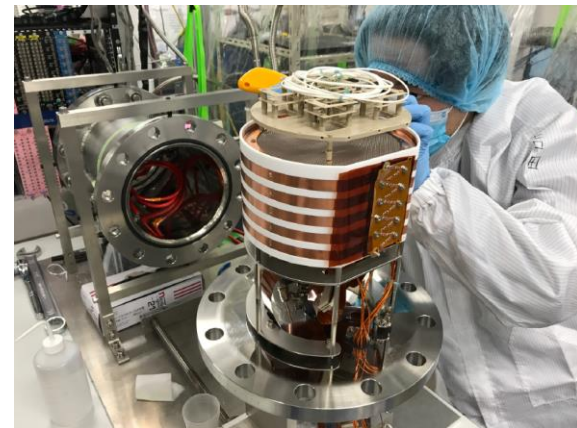
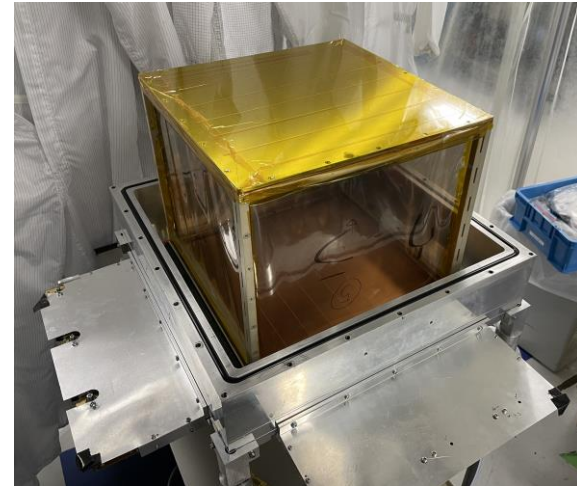
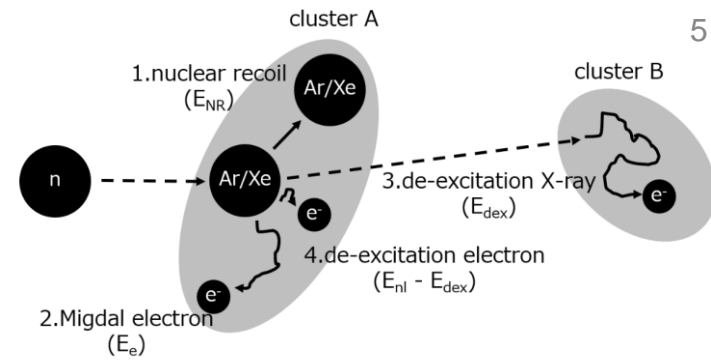
- ガス検出器を標的にした中性子ビーム試験
- ミグダル効果に起因する2つのクラスターを信号とする
- キセノン(東北)とアルゴン(神戸)の検出器開発

• アルゴン検出器

- NEWAGEの技術
- μ -PICによる詳細な飛跡取得
- 薄型TPCケーシング

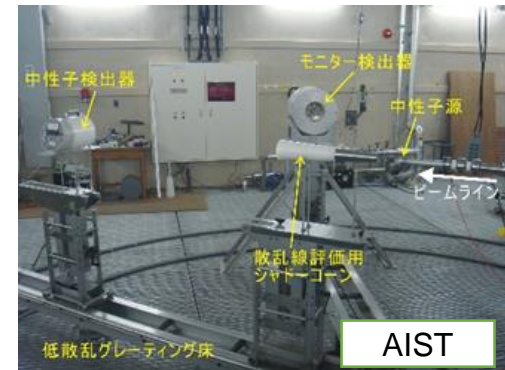
• キセノン検出器

- AXELの技術
- EL光によるピクセル読み出し
- エネルギー分解能が良い



これまでのビーム試験

- AIST(産総研)
 - 茨城県つくば市(KEKと近い)
 - エネルギー: 565keV(24keV~14.8MeVまで可変)
 - フラックス: ~1000個/cm²/sec
 - 中性子標準として正確なフルエンスを提供
 - 床がグレーチングになっている
- CYRIC(東北大)
 - 宮城県仙台市(Xe検出器の開発場所と近い)
 - エネルギー: ~10MeV
 - フラックス: ~1000個/cm²/sec
 - イオンを加速して水素標的に当てるため、中性子が前方に集中する
- 直近だと先月にAISTでAr検出器で中性子データを取得!



日付	場所	エネルギー	検出器	目的
2022年3月	AIST	565keV	He3、BGO	AISTの中性子環境測定
2022年4月	AIST	565keV	Xe、Ar	ガス検出器でのデータ取得
2022年12月	AIST	565keV	Ar、BGO	大型Arでのデータ取得
2023年7月	CYRIC	~10MeV	Xe、He3、BGO	CYRICの調査(古いキセノンガス)
2024年1月	AIST	565keV⇒14MeV	Ar、He3、BGO	Arでのデータ取得

キセノン検出器

- TPC

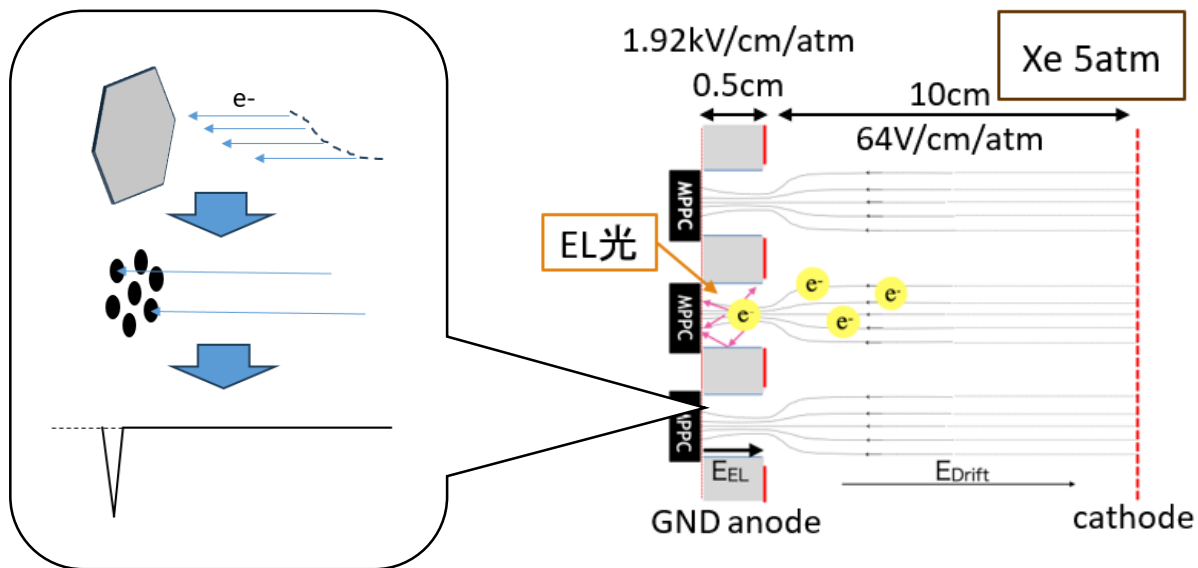
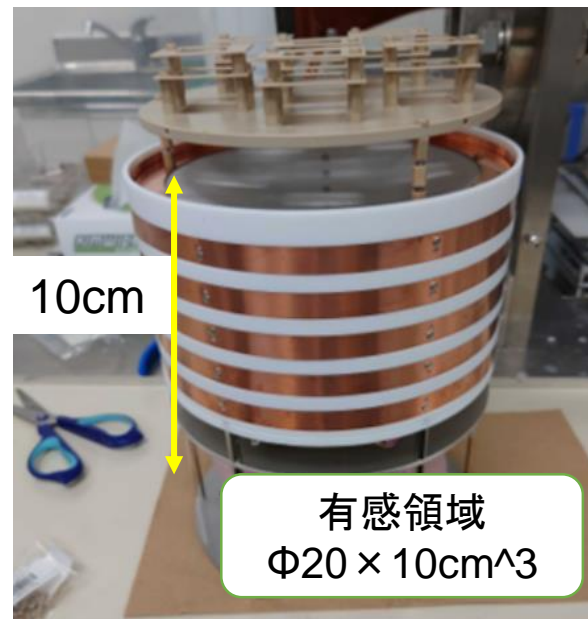
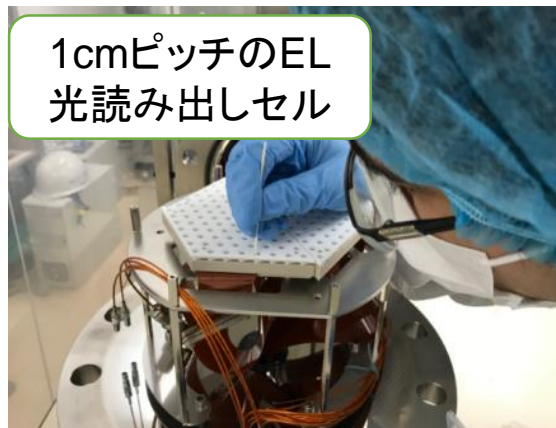
- EL光ピクセル読み出し
- 168ch 1cmピッチ

- ガス

- 5気圧キセノン

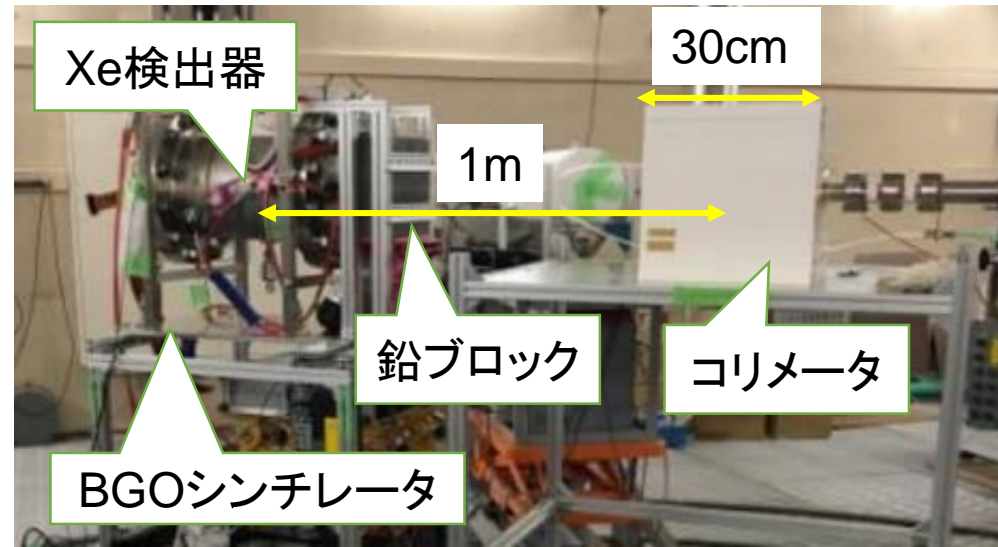
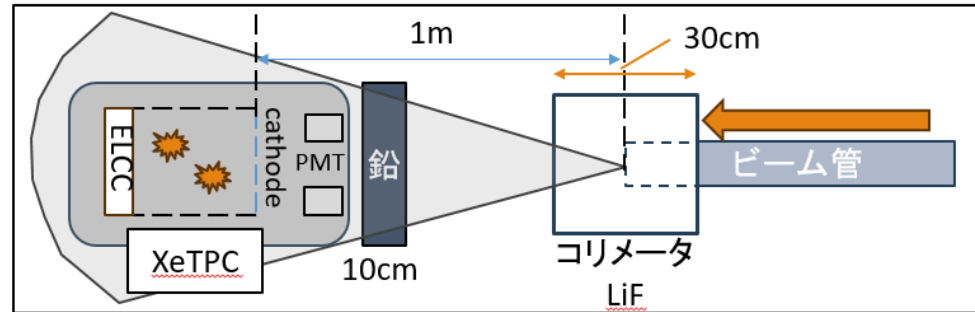
- 電圧

- 8kV (GND-cathode)
- ドリフト電場: 64V/cm/atm
- EL電場: 1.92kV/cm/atm



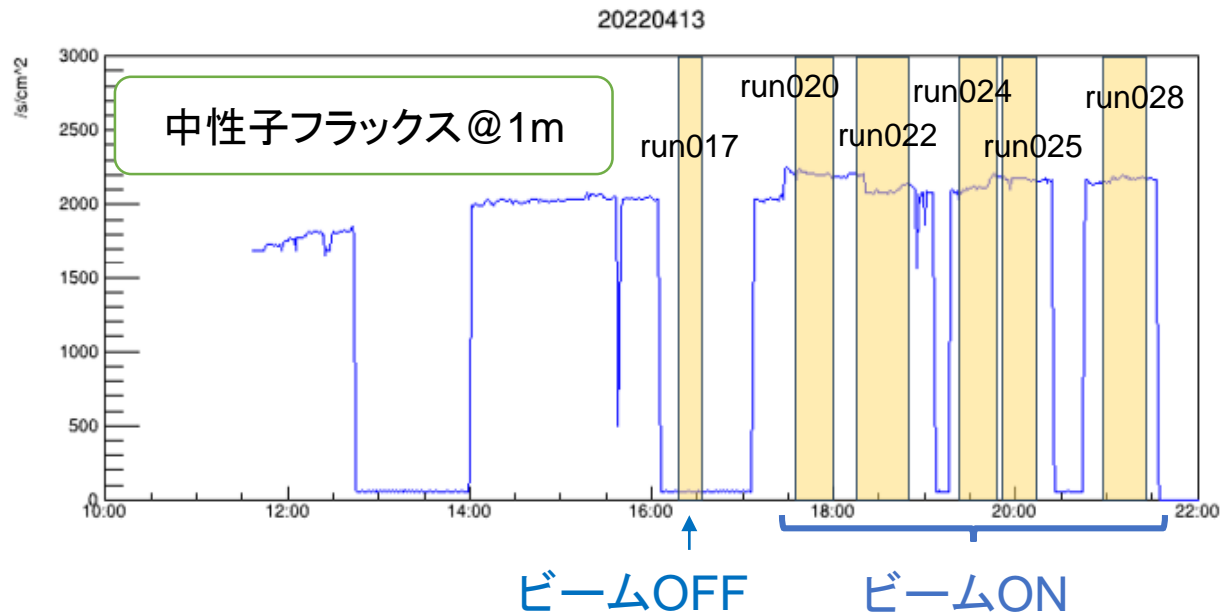
中性子ビーム試験

- 中性子ビーム
 - 場所: AIST
 - 反応: $\text{Li}(p,n)\text{Be}$ 反応
 - 2.3MeVの陽子をLiに照射
 - エネルギー: 565keV@正面
 - フラックス: 約1000個/cm²/sec@1m
- コリメータ
 - LiF50%添加ポリエチレン
 - 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
 - 前方から来るガンマ線の遮蔽
 - コリメータ由来の2.2MeV($^1\text{H}(n,n'\gamma)$)
 - ターゲット由来の478keV($^7\text{Li}(p,p'\gamma)$)



中性子フラックスとデータ取得

- 中性子フラックスモニタ
 - 陽子の電流モニタ(CI)で時間変化をモニタ
 - 中性子フラックスとの対応は事前にボナー球の測定で求めた
- データ取得状況
 - 4/12はアルゴン検出器へのビーム照射
 - 4/13はキセノン検出器に照射。午前中から徐々にcathode電圧を上げ、8kVで安定してデータ取得。DAQがエラーを吐かずに終了した5つのRUNを解析。DAQのデッドタイムがおおきく、live timeは5%程度だった



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のサチリ補正

- photon数の補正



ELゲイン補正

- エネルギー

- クラスタ数求め方

- Hitの位置



クラスタ識別

- クラスタ数

- エネルギースペクトルの作成

- イベントセレクション(2クラスタかつ片方が30keV)

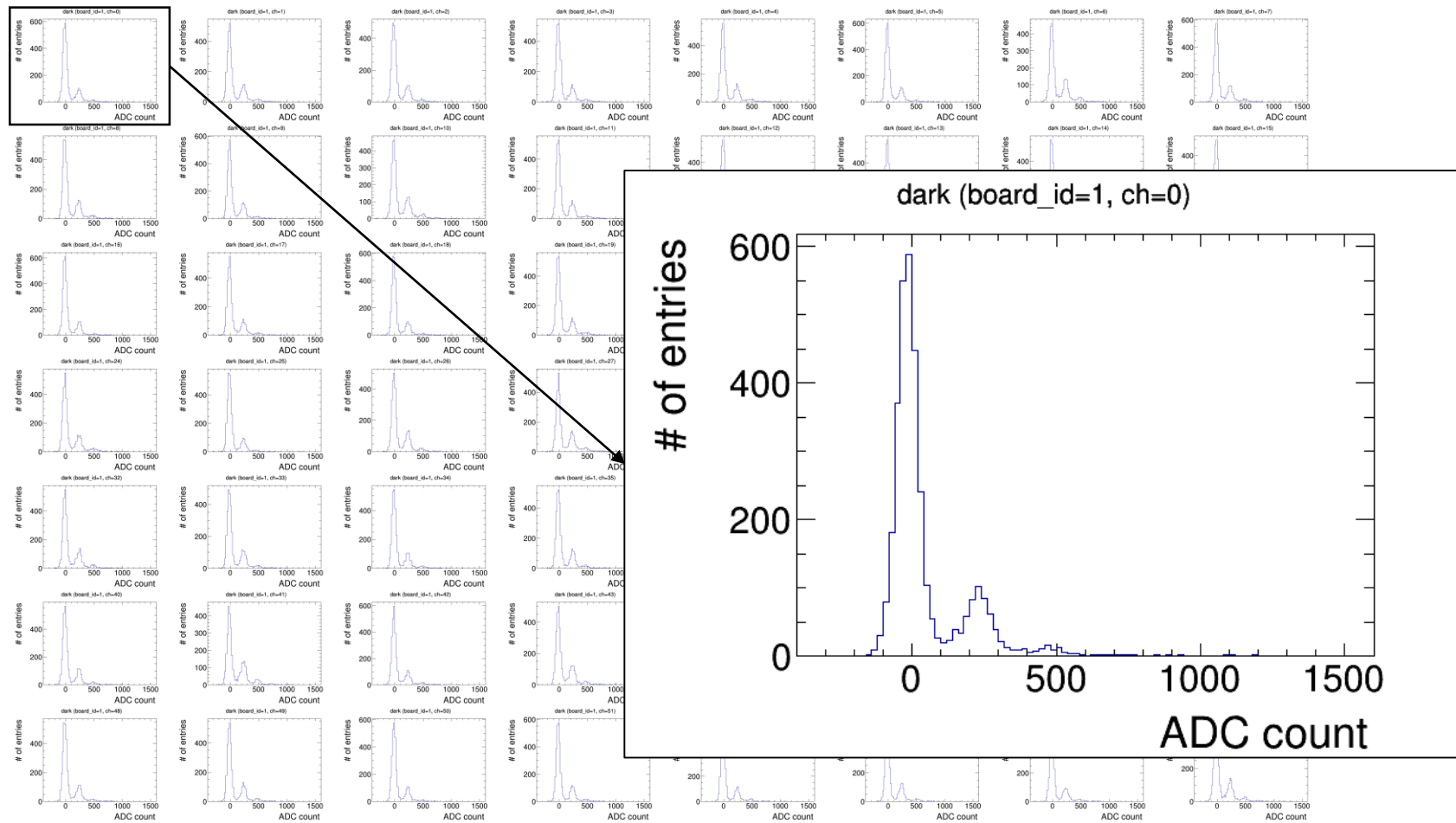


イベントの数えすぎ・見逃しの見積

- イベントレート

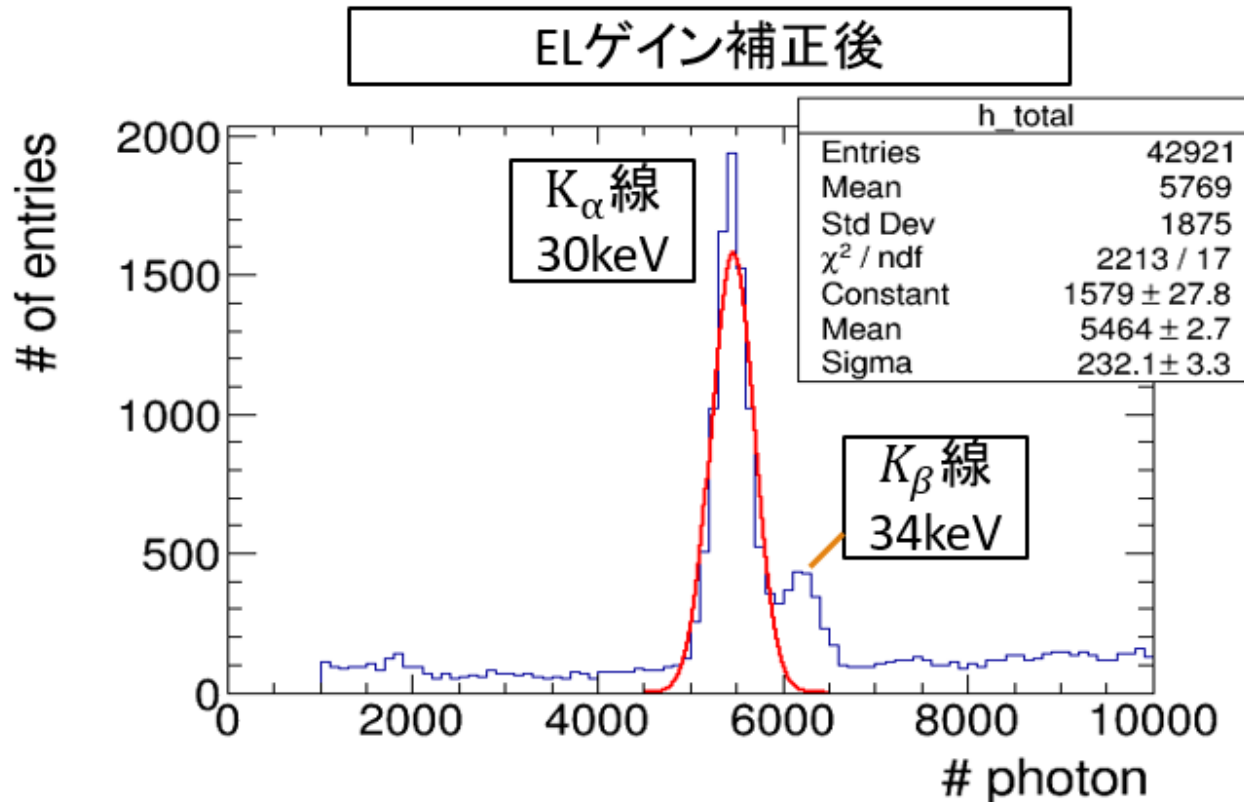
MPPCの1p.e.ゲイン解析

- 168チャンネルでダークカウントを測定
- 1p.e. のピークが分離できた



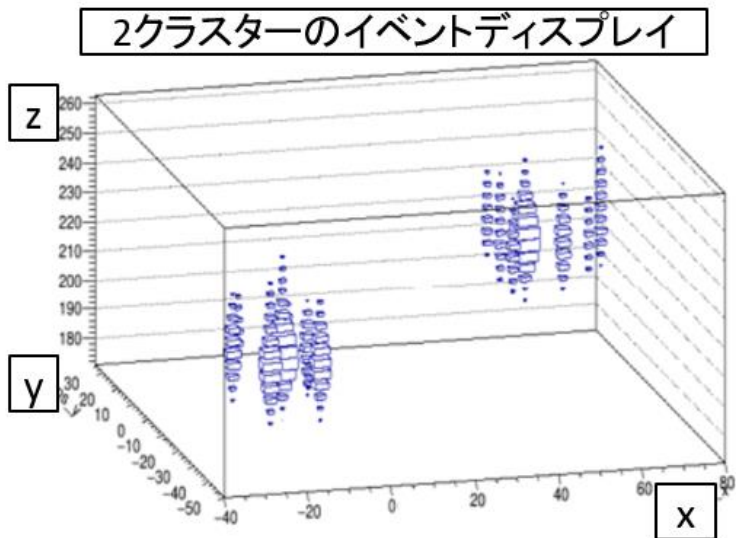
ELゲイン補正

- 各チャンネルのELゲインのばらつきを補正
 - ガス中に生じるキセノンの $K\alpha$ 線(30keV)を使用
 - 1セル程度に収まるので、セルごとのELゲインの違いを測定できる
 - イタレーション6回くらいで分解能はいいところに落ち着く

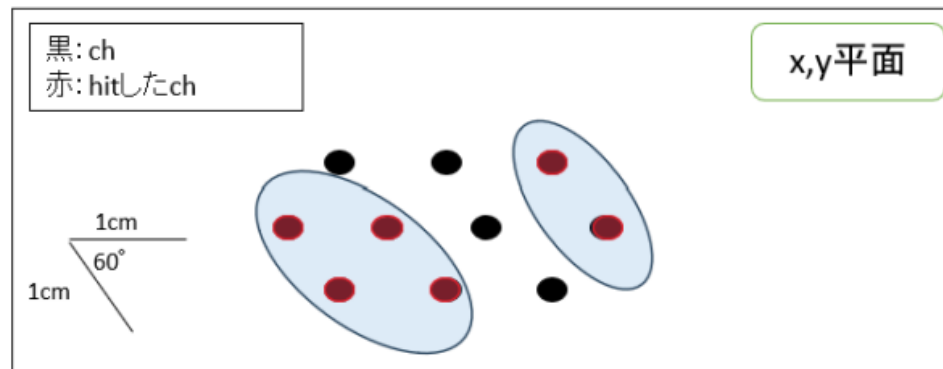


クラスター解析

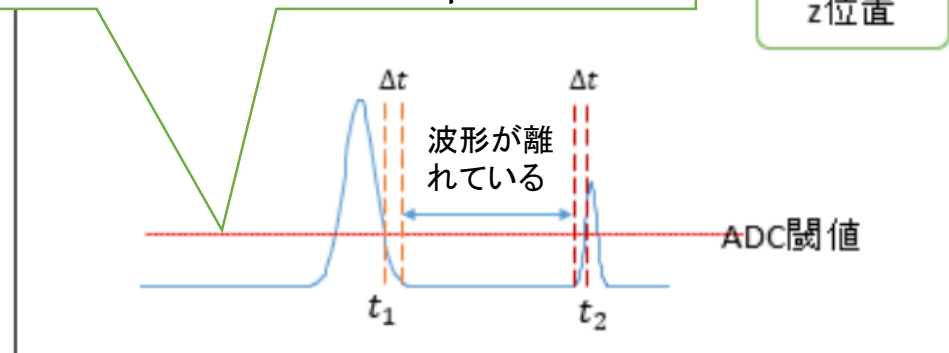
- Hitしたチャンネルが隣同士かつ時間的に波形が重なっている場合に同一クラスターと判定
 - (x,y) 平面: Hitしたチャンネルが離れていれば別クラスター
 - z方向: 時間的に波形が重なっていなければ別クラスター



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

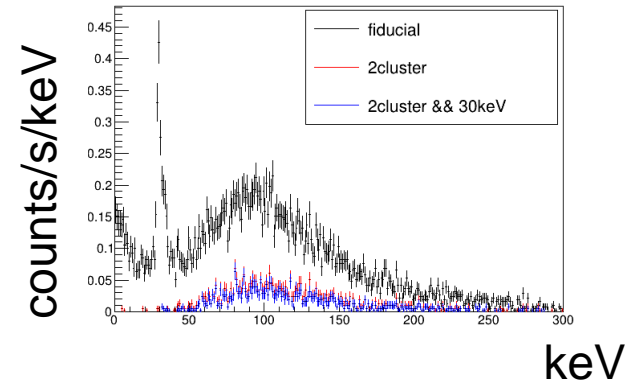


エネルギースペクトル

測定スペクトル

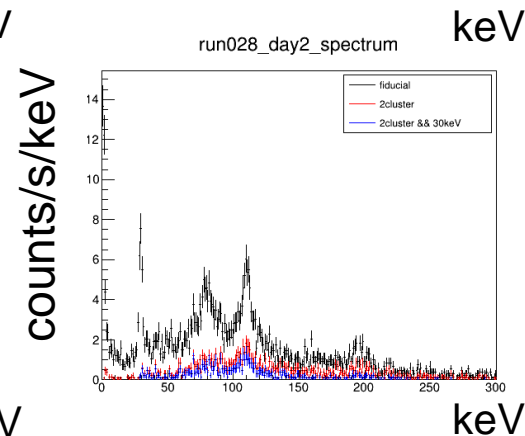
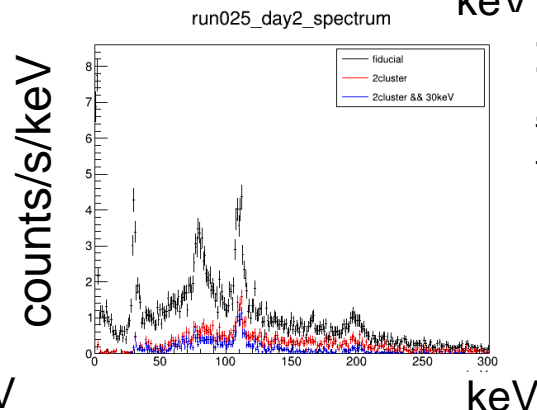
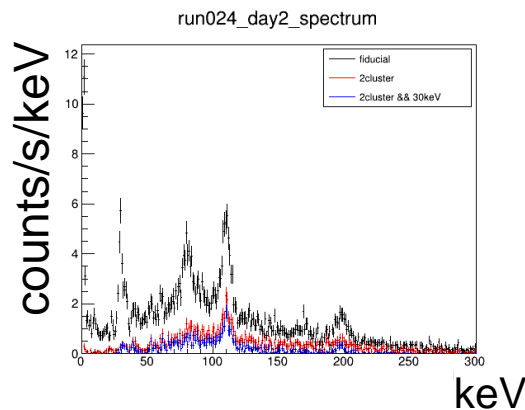
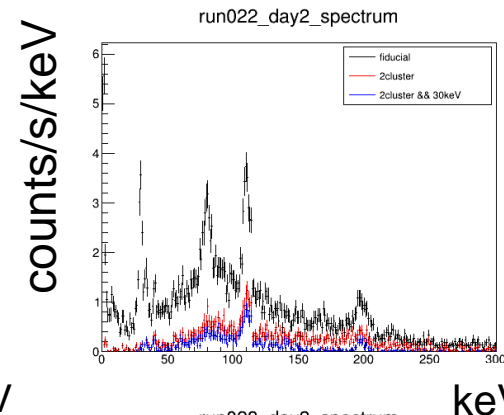
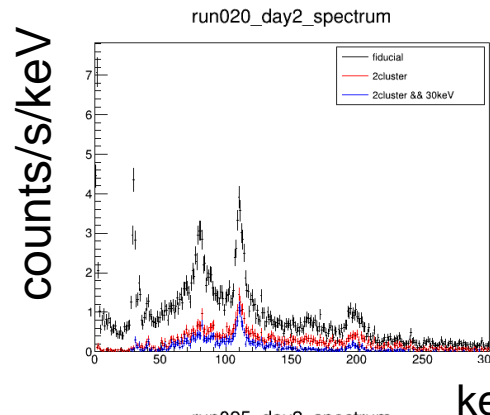
- 30keVのカット範囲は 30 ± 3.5 keV
- livetime割合 (エレキは結構かつかつだった)
 - ビームON時: 1~5%
 - ビームOFF時: 25%

ビームOFF時



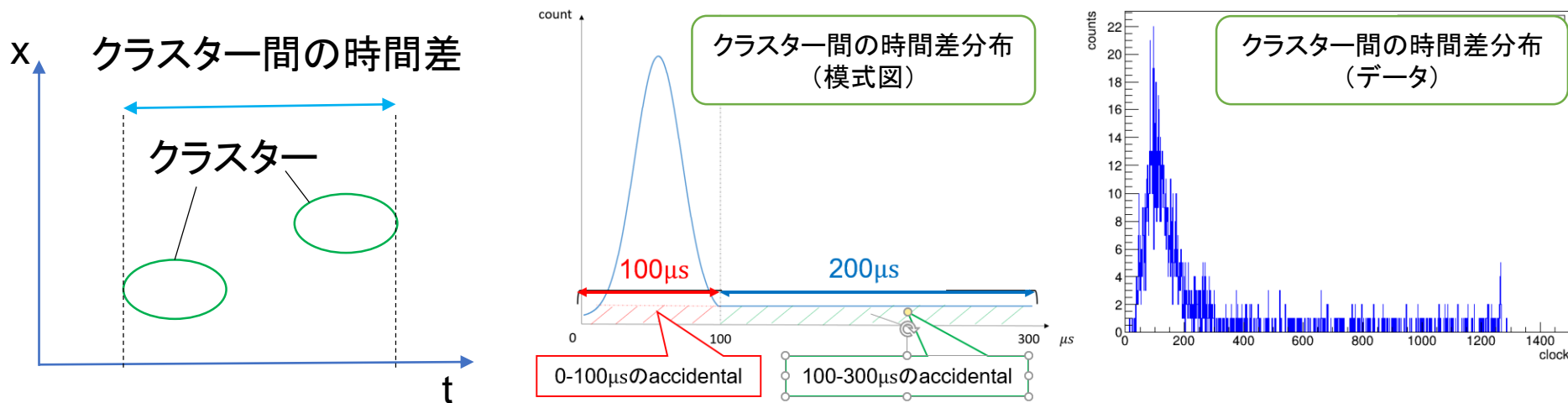
ビームON時

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



アクシデンタルの補正: 1

- 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大きく判定してしまう(1→2: 数えすぎ、2→3: 見逃し)
 - ドリフト領域(0-100 μ s)より大きい時刻(100-300 μ s)でアクシデンタルを見積もる

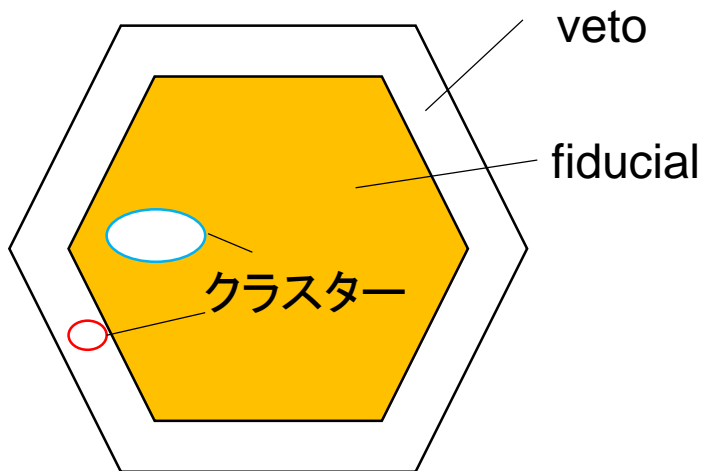


測定データ	1クラスター⇒2クラスター	2クラスター⇒3クラスター	補正ファクター
run017(OFF)	0.49%	0.86%	+0.37%
run020(ON)	6.4%	47%	+41%
run022(ON)	10%	42%	+32%
run024(ON)	10%	34%	+24%
run025(ON)	13%	42%	+29%
run028(ON)	8.7%	32%	+25%

アクシデンタルの補正:2

- 別のイベントがveto領域に生じる場合 ⇒ 見逃し
 - 通常はveto領域の閾値を超えたらトリガーを出さない
 - 時々vetoに来てもデータを取るモードで動いている (whole-trigger)
 - whole-triggerで取得したイベントの内、vetoにヒットがあるイベント数と、その中でfiducialにクラスターがあるイベント数を調べ、その割合を見積もった

vetoイベントと
判定される場合



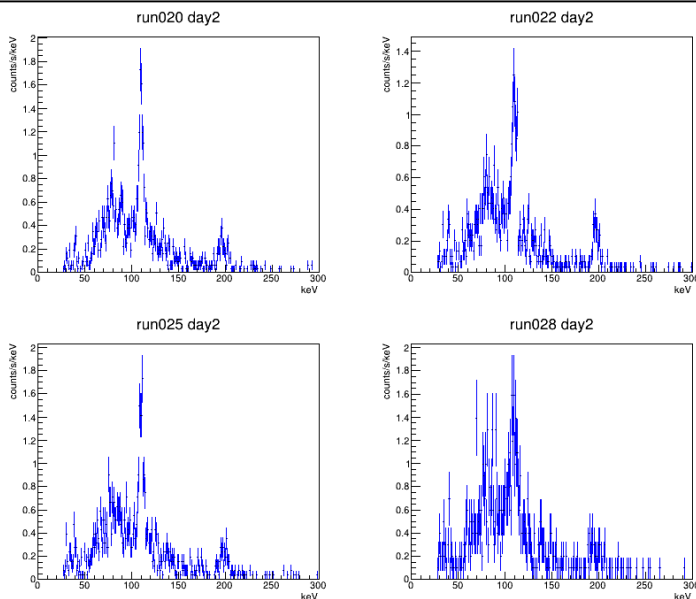
測定データ	fiducialイベントがvetoと判定される割合
run017 (OFF)	2.0%
run020 (ON)	40%
run022 (ON)	32%
run024 (ON)	30%
run025 (ON)	38%
run028 (ON)	24%

測定結果

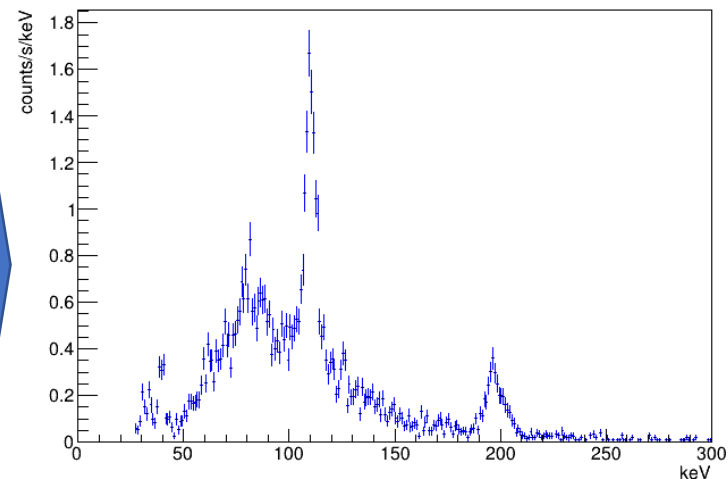
- イベントレートを補正した2cluster-30keVのエネルギースペクトル
 - 各runで同程度のイベントレートに揃った
 - ビームONからOFFを差っ引いた

Day2 8kV BeamON

ビームON時

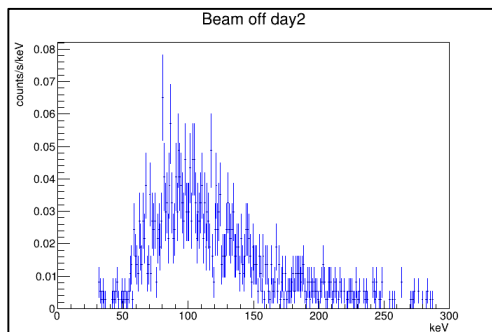


2-parameterの
エネルギースペクトル



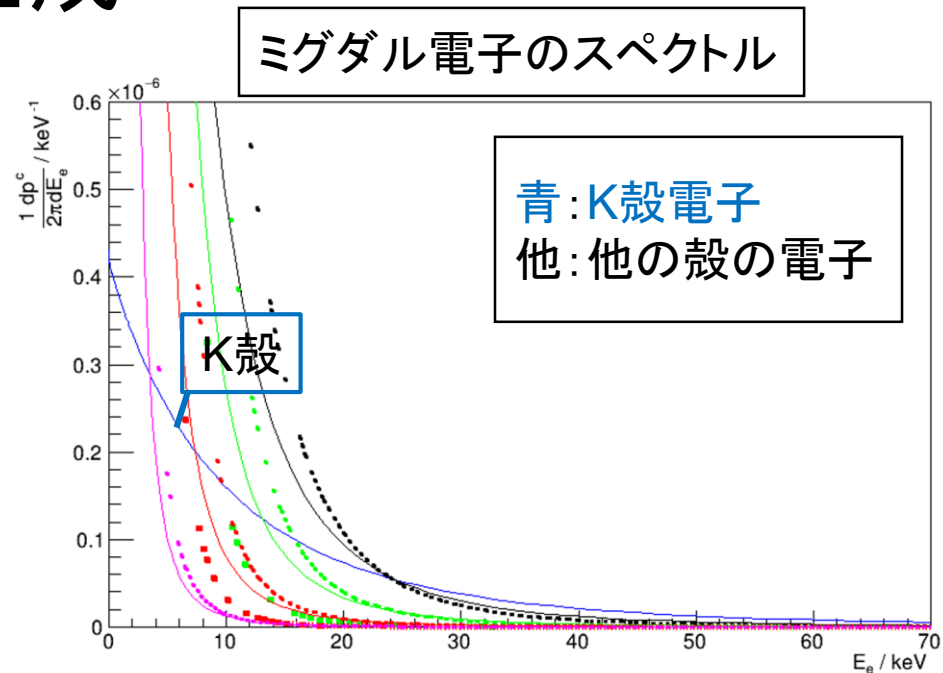
差っ引き

ビームOFF時

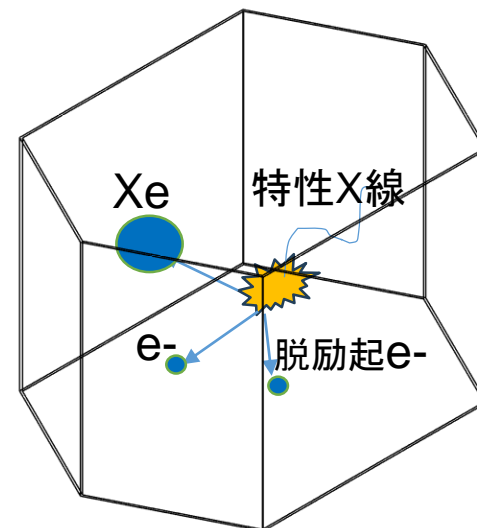


ミグダル信号モデル生成

- 初期粒子
 - Xe原子核、K殻のミグダル電子、特性X線、オージェ電子
 - K殻のミグダル電子のスペクトルは伊部さんの論文の値を使用
- ガス中でのエネルギー損失
 - Geant4で見積もる
 - 媒質: キセノンガス5気圧
 - 検出器の有感領域内に一様に生成 (中性子の弾性散乱の断面積は十分小さいので)



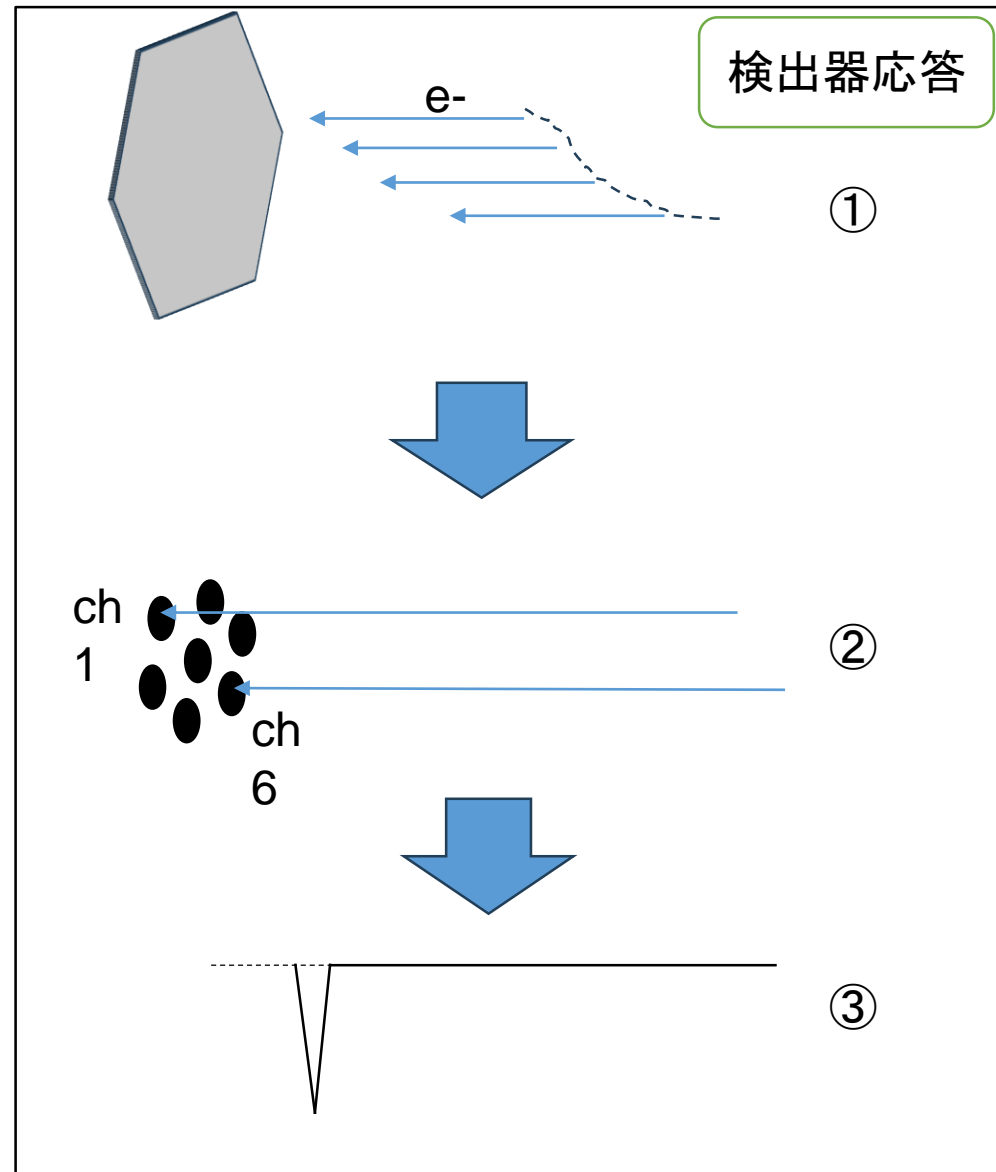
M. Ibe, et al., Ancillary files for arXiv:1707.07258v3,
<https://arxiv.org/src/1707.07258v3/anc>



ミグダル信号モデル生成

検出器応答

- ①電離電子とドリフト
 - W値: 22.1eV
 - Fano因子: 0.13
 - diffusion(x): 0.105cm@1cm
 - diffusion(y): 0.030cm@1cm
 - quenching: 0.1~1でscan
- ②ピクセル化
 - 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を決定
- ③波形生成
 - ELCC内でEL光を生成し、波形として出力
- ⇒データ解析と同様の解析をかけられるようになる

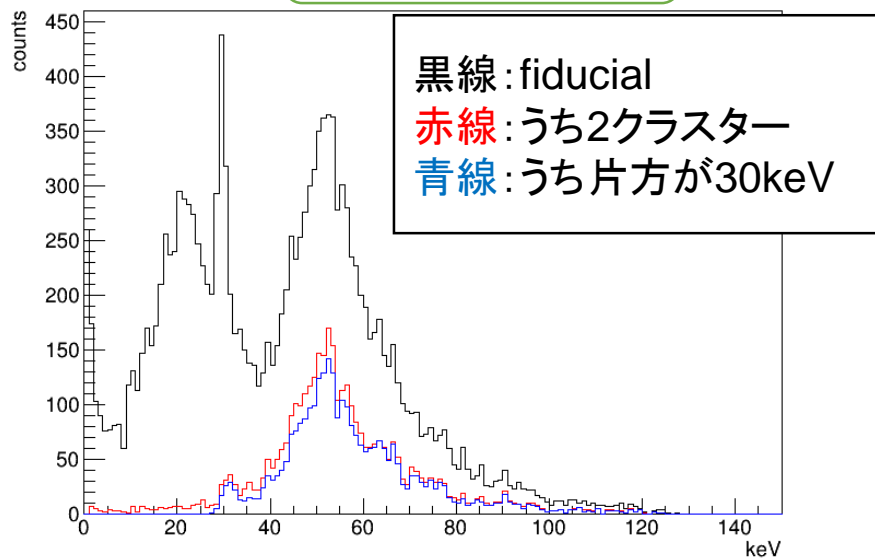


ミグダル信号モデル生成

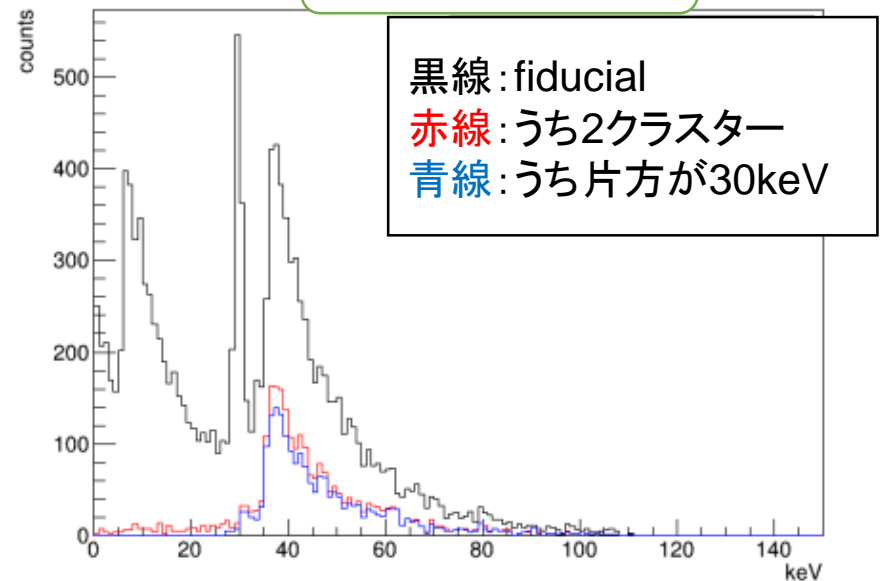
- エネルギースペクトル

- クエンチングの有無で形状が変化し、2cluster-30keVの感度のあるエネルギー領域が変わる

クエンチングなし



クエンチング10%



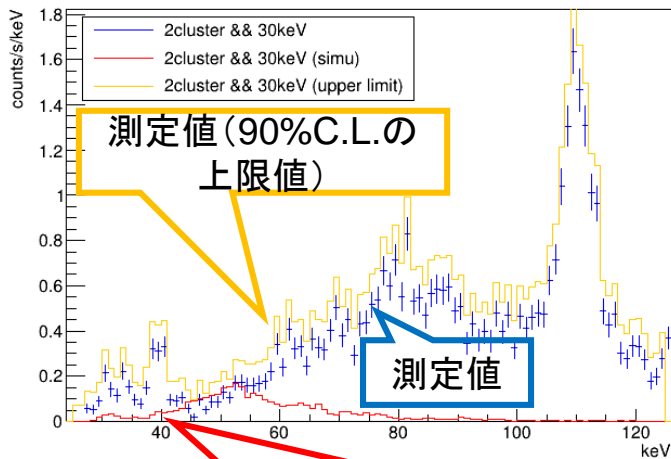
- イベントレート

- 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
- 鉛ブロックやSUS容器による中性子の減衰量は手計算

ミグダル効果の探索結果

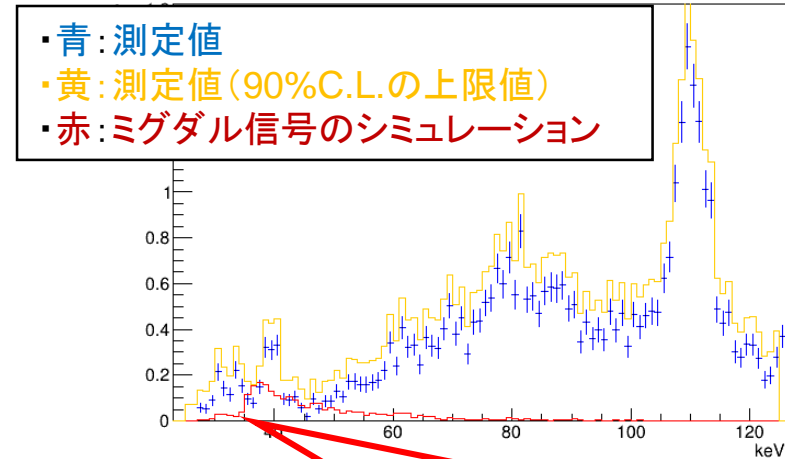
- 分岐比の上限値を求める
 - 測定値の90%C.L.上限を求め、信号シミュレーションがどのbinでも超えない最大の分岐比を上限とした
 - クエンチングによって感度のあるエネルギー領域が変わる

クエンチングなし



ミグダル信号のシミュレーション
($B_{mea} = 1.9 \times 10^{-1}$)

クエンチング10%

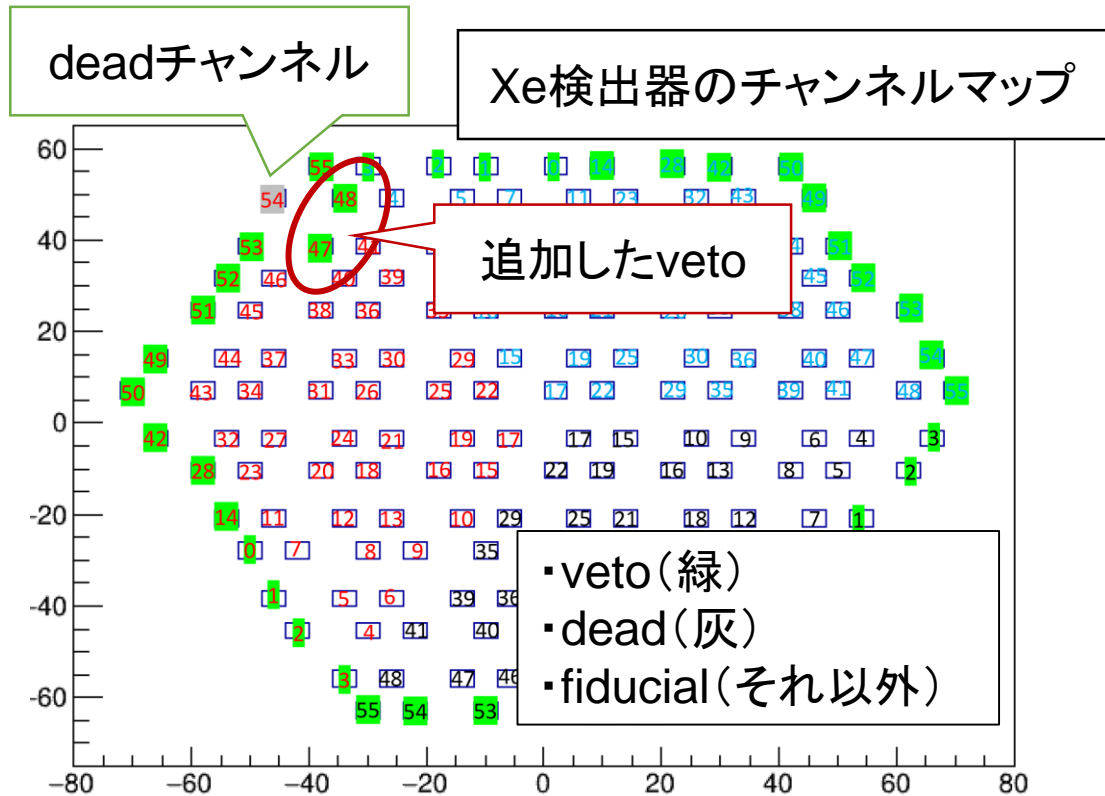


ミグダル信号のシミュレーション
($B_{mea} = 1.8 \times 10^{-1}$)

	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

補正

- シミュレーションと実際の違いを補正する
- fiducial領域
 - 左上にdeadチャンネル
 - fiducialは125/127倍になる
- 圧力
 - 実際は4.7atm (simは5atm)

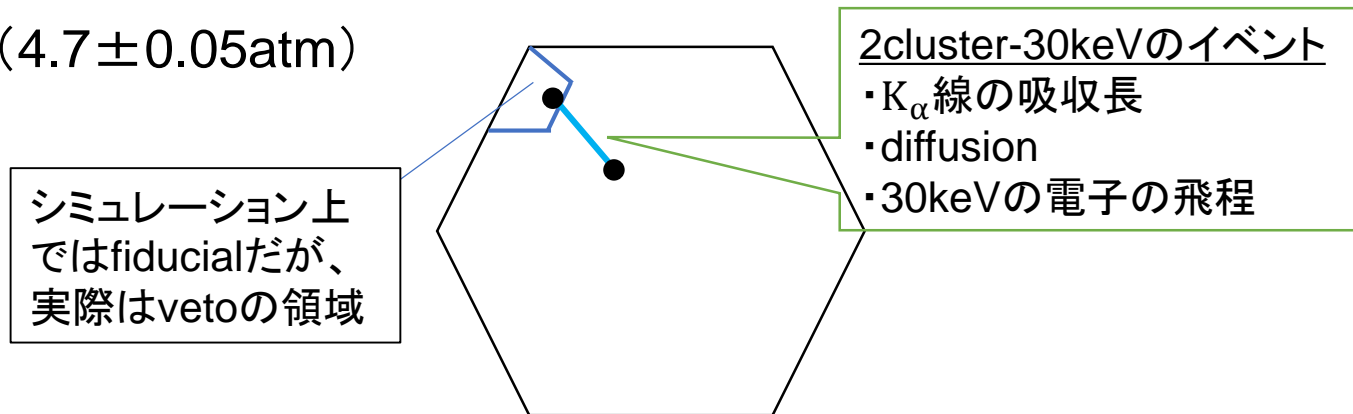


補正後の分岐比の上限值

	クエンチングなし	クエンチング10%
分岐比の上限值	2.1×10^{-1}	1.9×10^{-1}
理論値との比	3.4×10^5	3.2×10^5

系統誤差

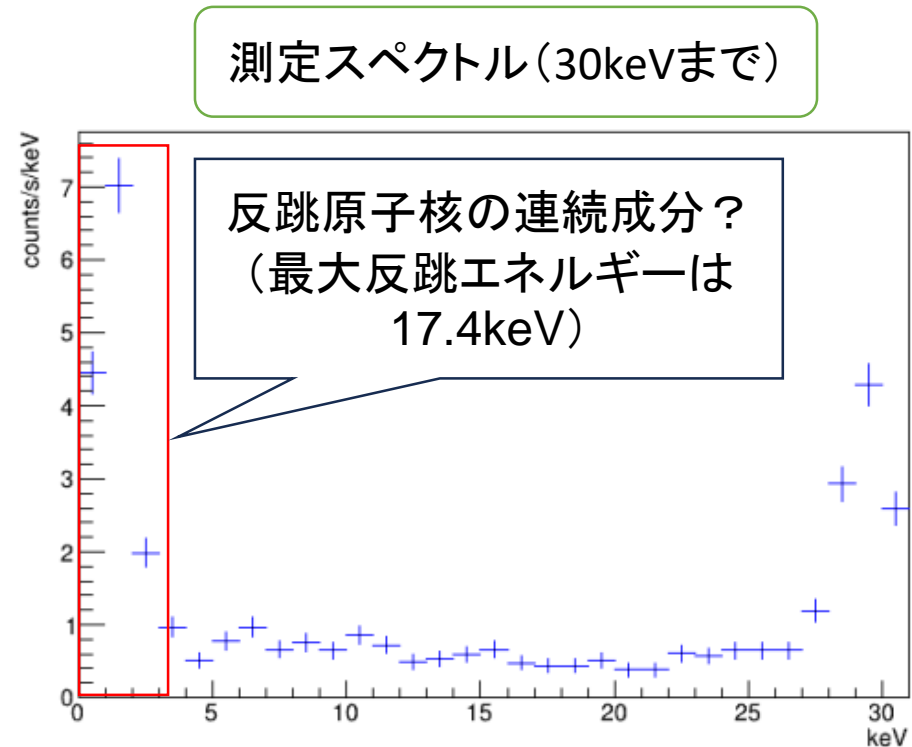
- 検出器の位置精度 ($\pm 1\text{mm}$)
- deadチャンネルの補正の誤差
 - 2cluster-30keVのイベントは有限の大きさを持つ
 - (点イベントを仮定するなら123/125倍)
 - Toy-MC有限サイズのイベントを生成し、simではfiducialだがdataではvetoになるイベントの割合を見積もる
- ガス圧の測定精度 ($4.7 \pm 0.05\text{atm}$)



系統誤差の内訳	系統誤差
Xe検出器の位置のずれ	$\pm 0.2\%$
deadチャンネルの存在	$+0.4\%$
ガス圧の違い	$\pm 1.1\%$

クエンチングについて

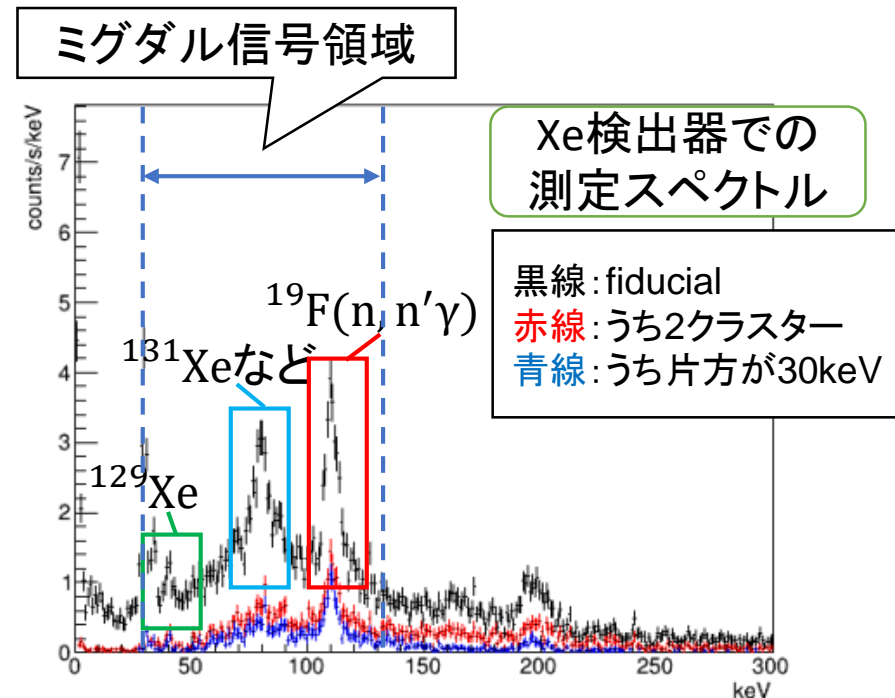
- SRIM計算によると0.2くらい
- 低エネルギーのスペクトルには3keVあたりに肩 \Rightarrow 0.17くらい？
- ガスキセノン中でのクエンチング測定が必要
 - 他のエネルギー(10MeV単色中性子)
- 今回は0.1~1.0までのquenchingをscanして分岐比の上限を出した
 - 分岐比上限: 0.16~0.30
 - 理論値との比: $2.7 \sim 5.0 \times 10^5$



クエンチング	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
分岐比上限	0.19	0.27	0.20	0.17	0.17	0.16	0.18	0.18	0.30	0.21
理論値との比	3.2×10^5	4.5×10^5	3.4×10^5	2.8×10^5	2.8×10^5	2.7×10^5	3.0×10^5	3.0×10^5	5.0×10^5	3.4×10^5

ガンマ線バックグラウンド

- 同時に測定したBGOのレートから、ガンマ線バックグラウンドが支配的
- キセノンのデータ中に確認できるピークの削減方法
 - フィールドケージの絶縁体のPTFEを使わないようにする
 - $^{19}\text{F}(n, n'\gamma)$ による110keVを削減
 - Xeガスを濃縮し、 ^{134}Xe や ^{136}Xe のみを使用する
 - $^{129}\text{Xe}(n, n'\gamma)$ による40keVと120keVを削減
 - $^{131}\text{Xe}(n, \gamma)$ による80keVを削減



まとめ

今日の内容は内山修論になってます
そのうちwebに乗る予定ですので、興味のある方は連絡ください

- 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
 - 原子核散乱に伴うミグダル効果は暗黒物質探索の解析に有用
- キセノンガス検出器を使った探索: MIRACLUE実験
 - 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つのクラスターを持つイベントを探す
 - EL光読み出しの位置感度を持つキセノンガス検出器を使用
- 中性子ビーム試験結果
 - クラスター数とエネルギーのカットをかけたエネルギースペクトルを得た
 - ミグダル信号モデルを生成し、分岐比の上限値を得た
 - 分岐比上限: 0.16~0.30
 - 理論値との比: $2.7 \sim 5.0 \times 10^5$
 - 現状はガンマ線バックグラウンドが支配的
- 将来
 - ガンマ線BGの理解と削減、中性子のエネルギーを上げる、検出器の大型化、クエンチング測定、中性子シールド、効率の良いトリガー作成、などなど

