

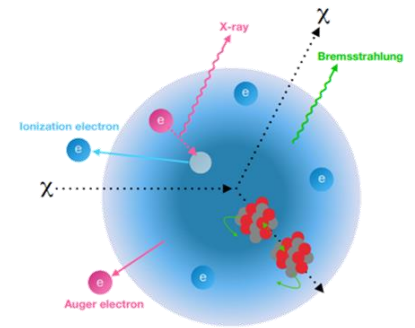
ミグダル観測に向けた ガス検出器開発

中村輝石 (ICRR)

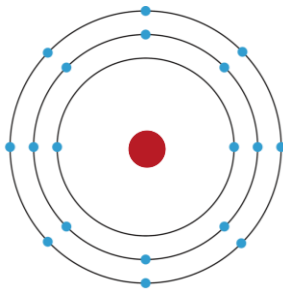
MPGD研究会

2020/12/26

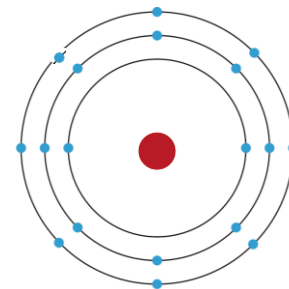
ミグダル効果とは



- 原子核反跳等で、追加の励起や電離が発生する
- まず原子核が動き、電子が追従する、という描像をちゃんと計算すると出てくる



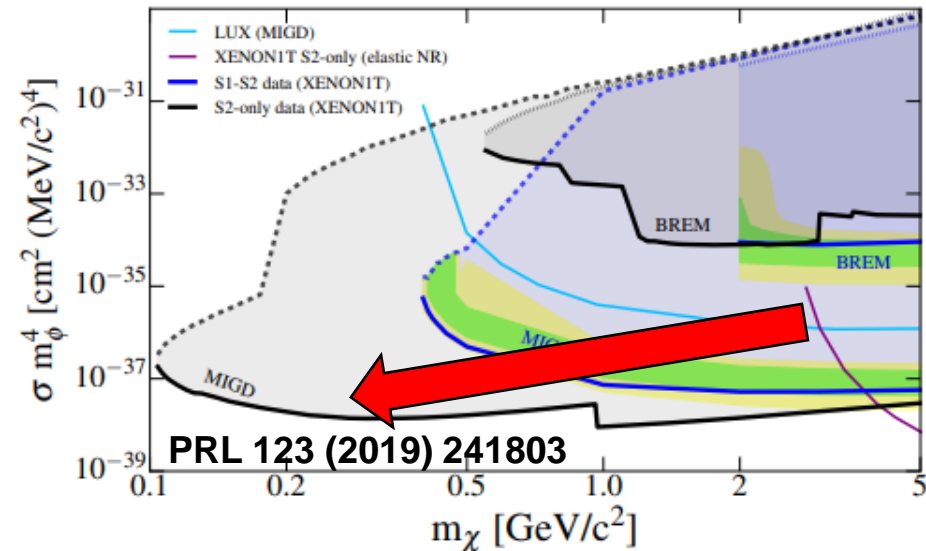
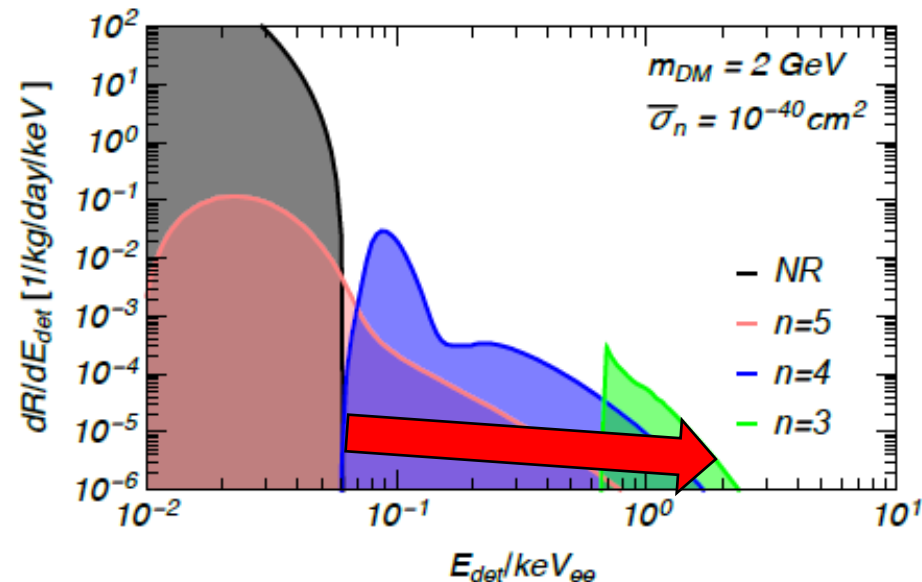
normal



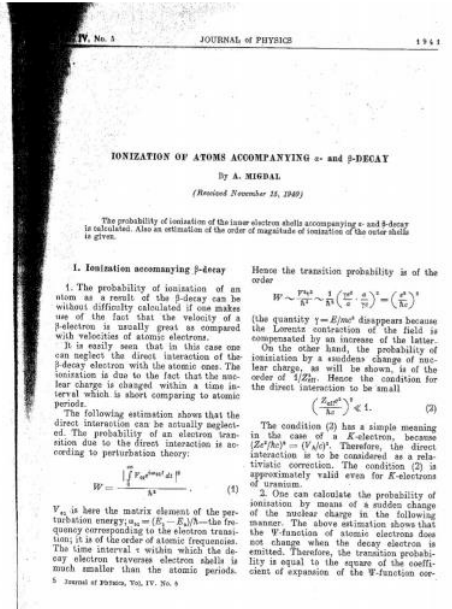
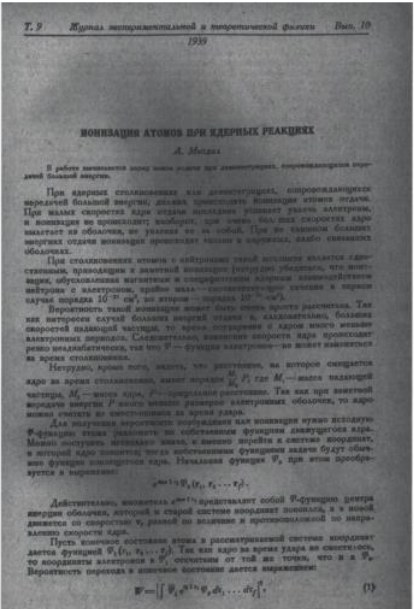
Migdal

暗黒物質探索でのミグダル効果

- 原子核反跳＋ミグダル効果
 - 検出エネルギーが増える \Rightarrow 閾値を下げれる
 - 軽い暗黒物質の感度向上
 - すでに、XENONやCDEXの解析で取り入れられている



ミグダルは起きるのか？



A. Migdal publications:

- Ionisation in nuclear reactions [1]
- Ionisation in radioactive decays [2]

First observations of the Migdal effect in :

- Alpha decay [3,4,5]
- Beta decay [6,7]
- Positron decay [8]
- Nuclear scattering []

原子核反跳は測定がない

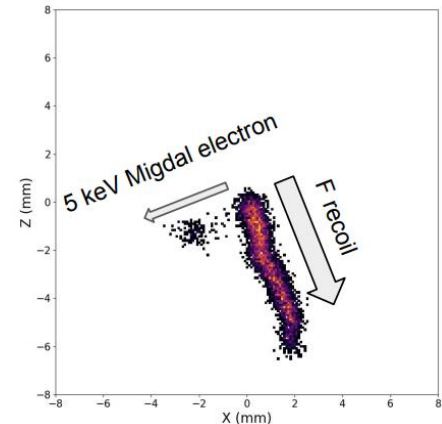
- [1] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri yadernykh reaktsiyakh*, ZhETF, 9, 1163-1165 (1939)
- [2] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri α- i β- raspade*, ZhETF, 11, 207-212 (1941)
- [3] E. E. Berlovich et al., *Investigation of the "jolting" of electron shells of oriented molecules containing ³²P*, Sov. Phys. JETP, Vol. 21, 675 (1965)
- [4] M.S. Rapaport, F. Asaro and I. Pearlman *K-shell electron shake-off accompanying alpha decay*, PRC 11, 1740-1745 (1975)
- [5] M.S. Rapaport, F. Asaro and I. Pearlman *L- and M-shell electron shake-off accompanying alpha decay*, PRC 11, 1746-1754 (1975)
- [6] F. Boehm and C. S. Wu *Internal Bremsstrahlung and Ionization Accompanying Beta Decay*, Phys. Rev. 93, Number 3, 518 (1954)
- [7] C. Couratin et al., *First Measurement of Pure Electron Shakeoff in the β Decay of Trapped ⁶He⁺ Ions*, PRL 108, 243201 (2012)
- [8] X. Fabian et al., *Electron Shakeoff following the β⁺ decay of Trapped ¹⁹Ne⁺ and ³⁵Ar⁺ trapped ions*, PRA, 97, 023402 (2018)

ミグダル観測実験

- いまのところ2種類存在する

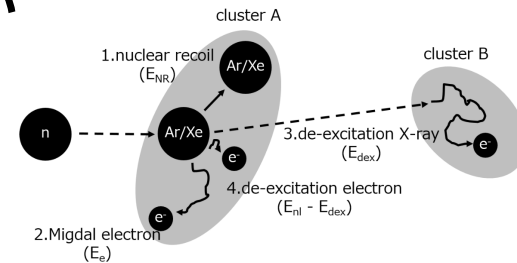
- 1. MIGDAL collaboration

- 同一点からの原子核+電子の飛跡を探す
- 低圧ガス: CF₄ 50torr



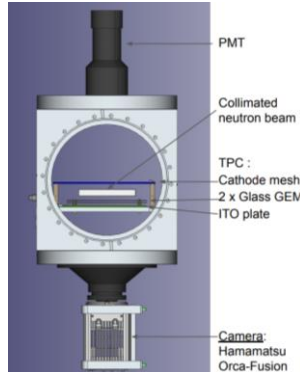
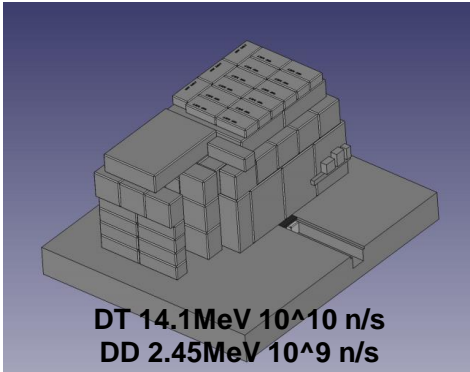
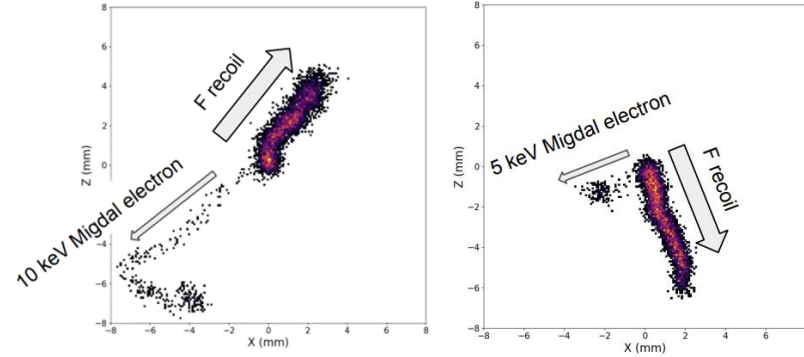
- 2. 我々の方法

- 原子核反跳事象に特性X線が附随しているイベントを探す
- 位置感度のあるガス検出器 (Ar1atm、Xe8atm)

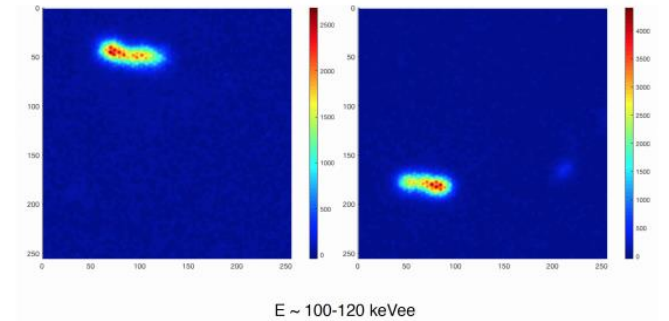
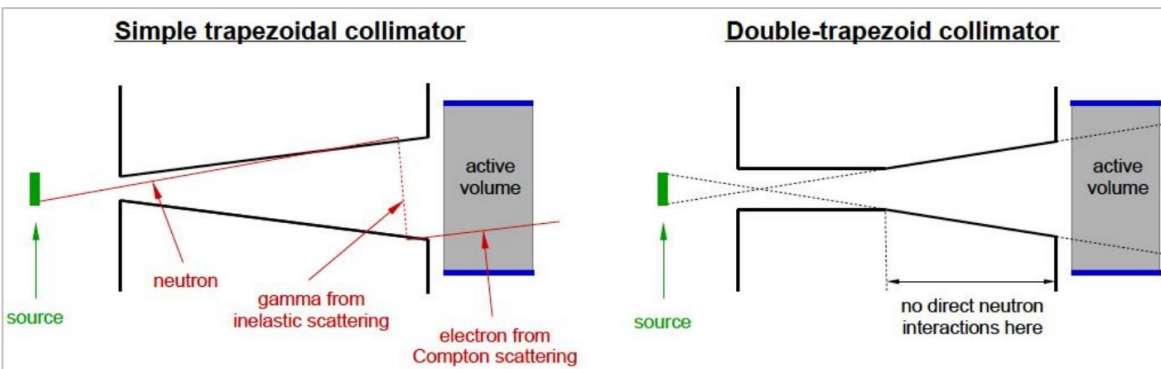
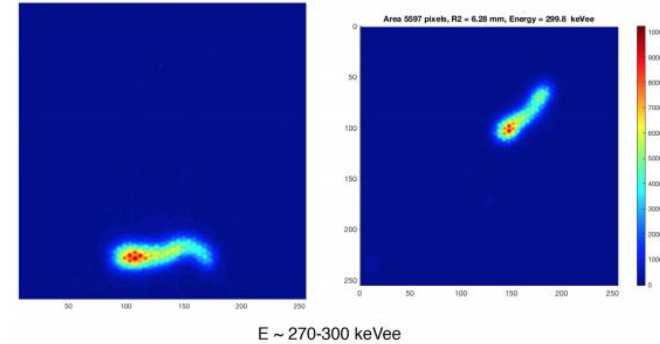


MIGDAL collaboration

- 低圧ガス: CF₄ 50torr
- 光学読み出し(カメラ)
- DT / DD 中性子源 + コリメータ

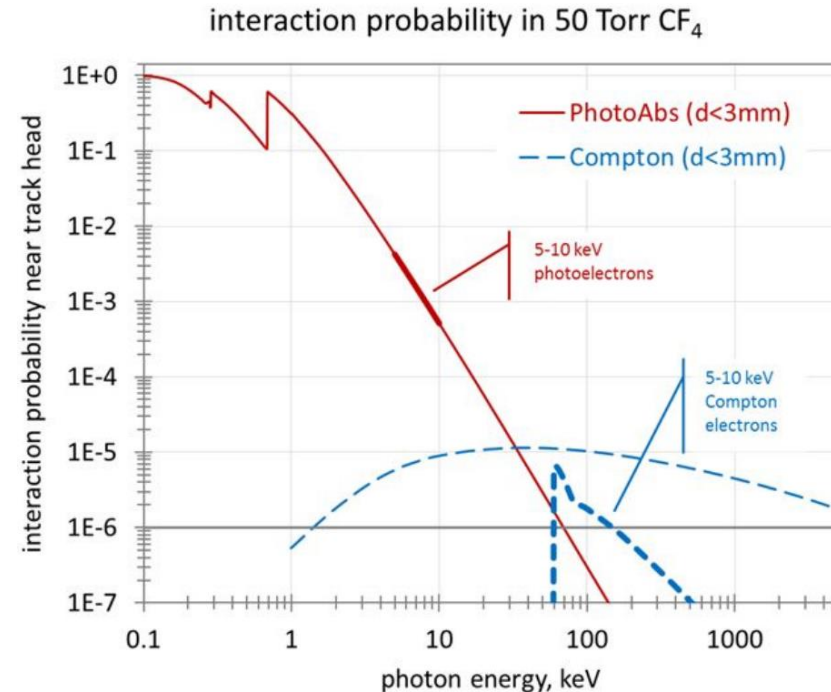


NR captured in the OTPC system at UNM by D. Loomba et al.



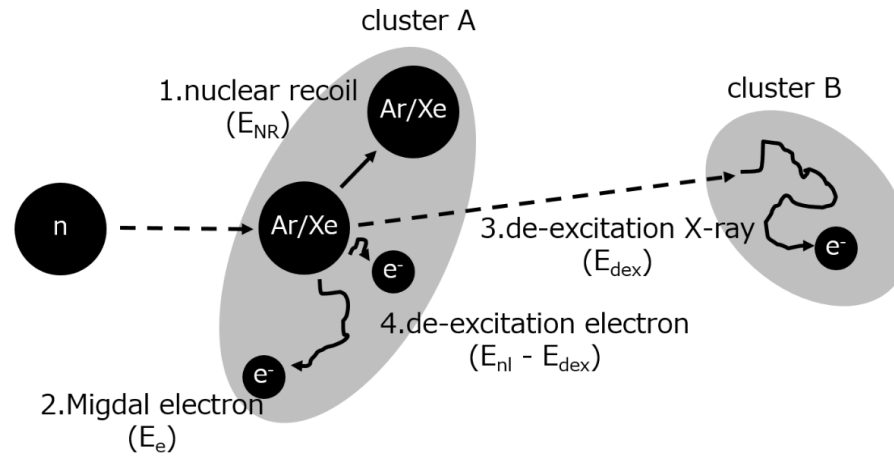
MIGDAL collaboration

- 利点
 - NR+ERが同一点に発生する、
というBGは少ない
- 難点
 - たくさんのsingle scattering
事象から信号を探す必要あり
 - 低圧ガスなので、exposureを
貯めるのが大変



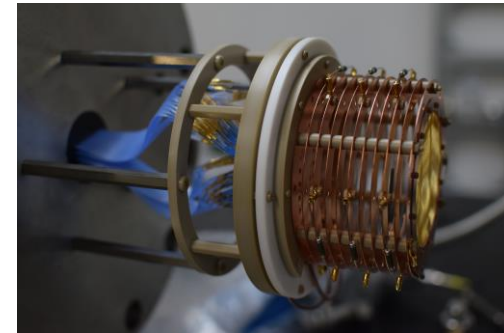
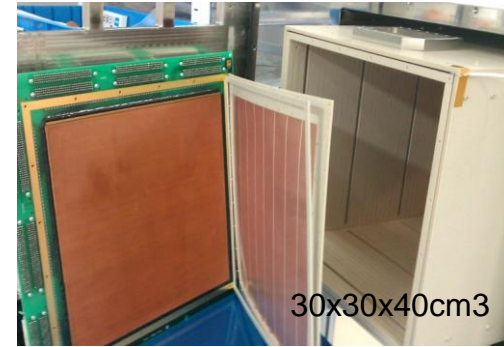
我々の方針

- 状況
 - K殻の電子が電離するミグダル
 - 脱励起のX線が発生
- 特徴
 - ガス中だと2つのクラスター
 - cluster-Bは特性X線のエネルギーになる
 - ⇒位置感度のあるガス検出器

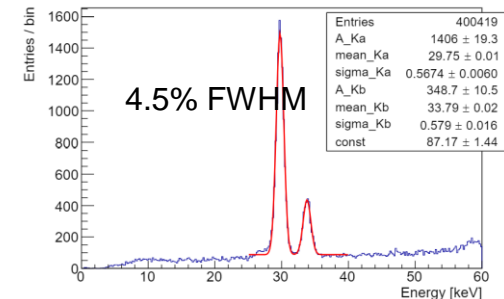


ガス検出器

- Ar 1atm
 - μ -PIC (400um ピッチ)
 - Arは非弾性散乱がなく、低BG
- Xe 8atm
 - pixelized EL readout (1cm ピッチ)
 - エネルギー分解能が良い
- \Rightarrow それぞれ、1000ev/日くらい



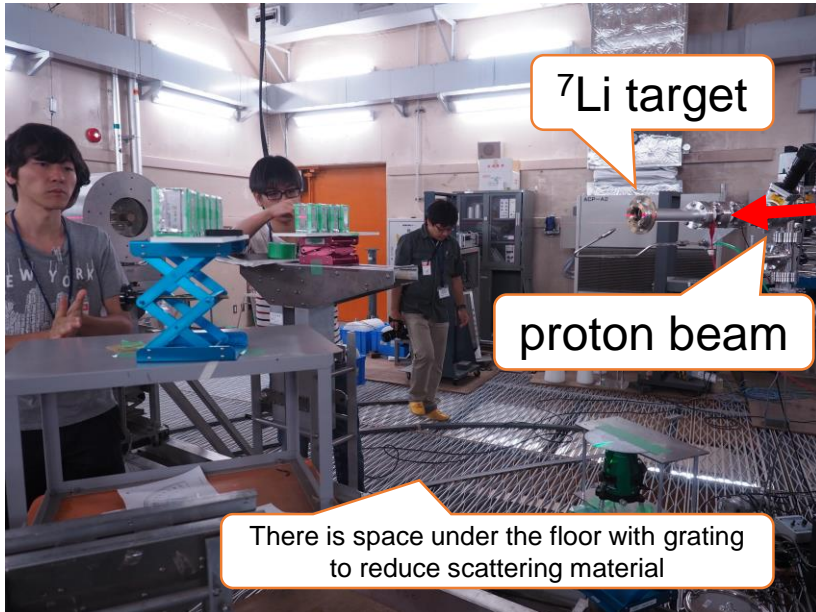
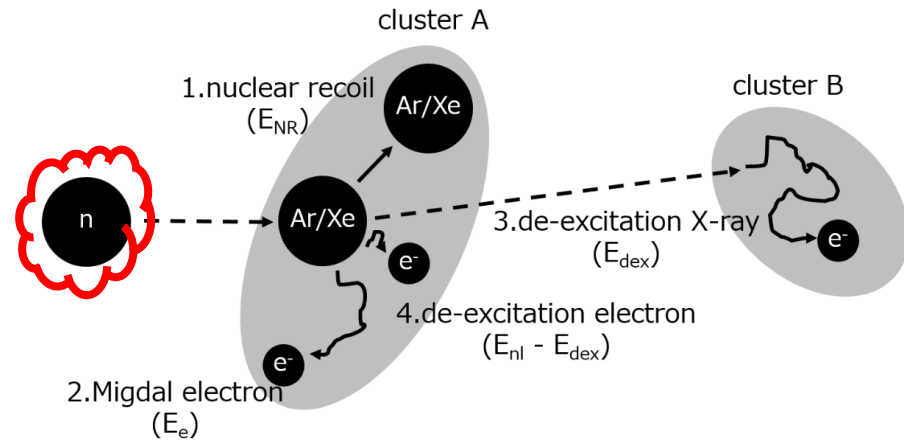
target	Ar 1atm	Xe 8atm
K-shell energy	4keV	30keV
absorption length	2.95cm	2.19cm
fluorescence yield	0.14	0.9
event rate	603 ev/day	975 ev/day



中性子ビーム

• 産総研の場合

- エネルギー: 565keV
- フラックス: 1000/s/cm² @ 1m
- DCビーム(今は)



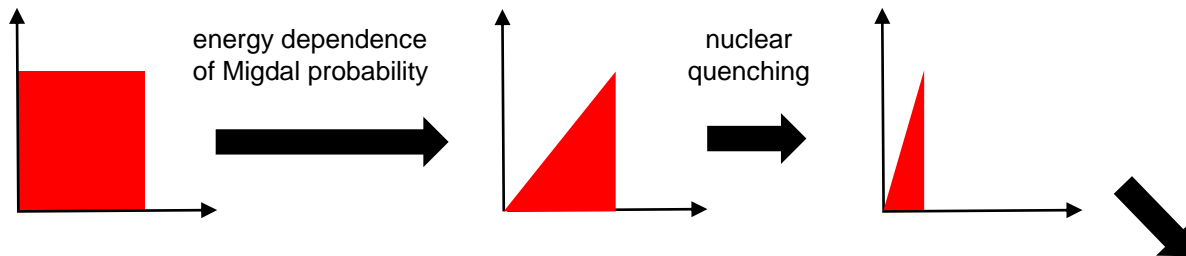
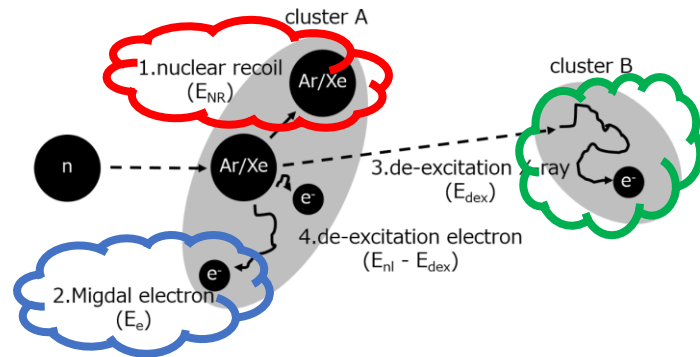
neutron beam lines in Japan

from Higashino

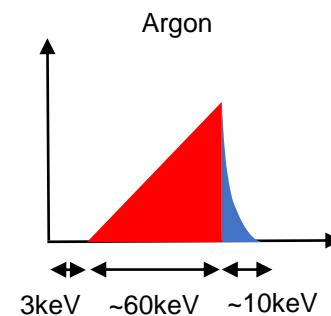
facility	energy	beam type	flux
RANS	7MeV (Be(p,n)B)	pulsed beam	10 ¹² /s @Be
KUANS	~1.6MeV (Be(p,n)B)	pulsed beam	?
AIST	24keV- 40MeV	DC beam (-> pulsed beam ?)	1000 /s/cm ² @1m
KEK	15MeV (DT)	DC beam	

ミグダル信号

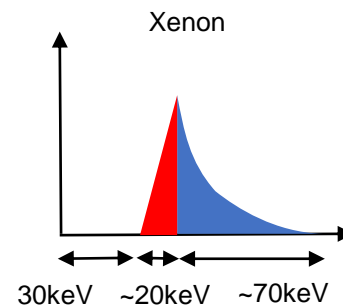
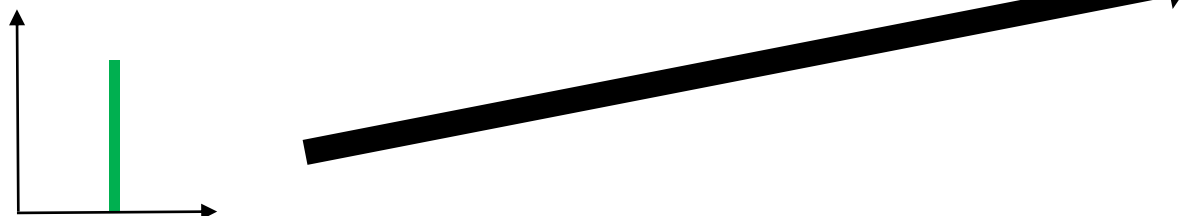
• 原子核反跳



• ミグダル電子

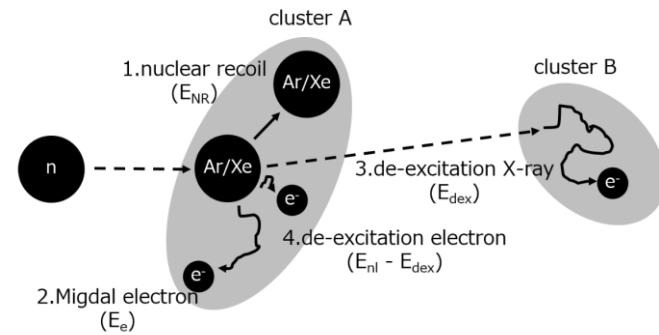


• 脱励起 X線

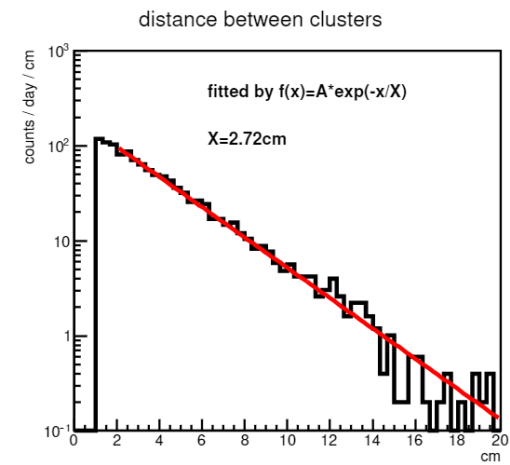
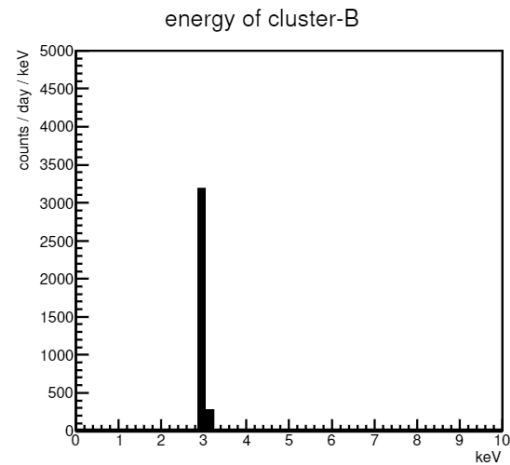
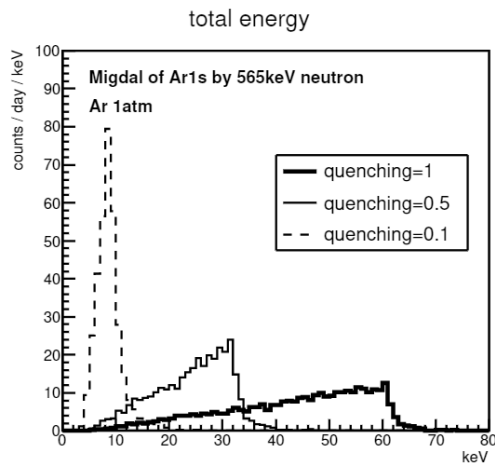


ミグダル信号 (Geant4)

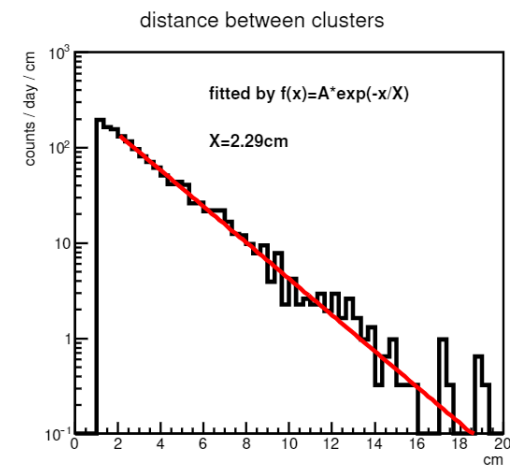
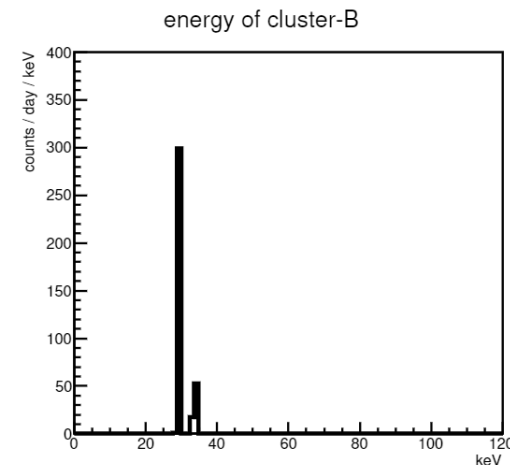
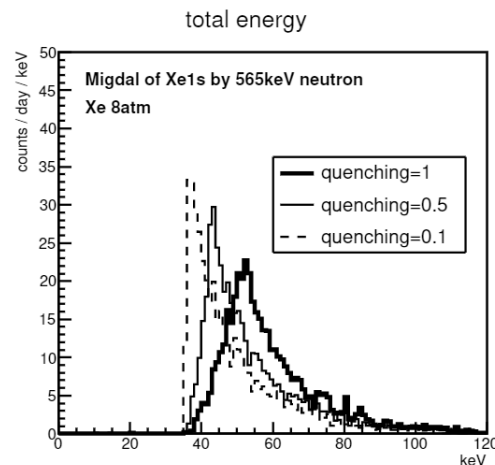
- クラスタ数が2という条件を課した後
- cluster-Bはモノエナジー
- クラスタ間距離分布はX線吸収長を反映



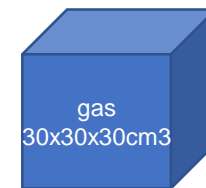
Ar 1atm



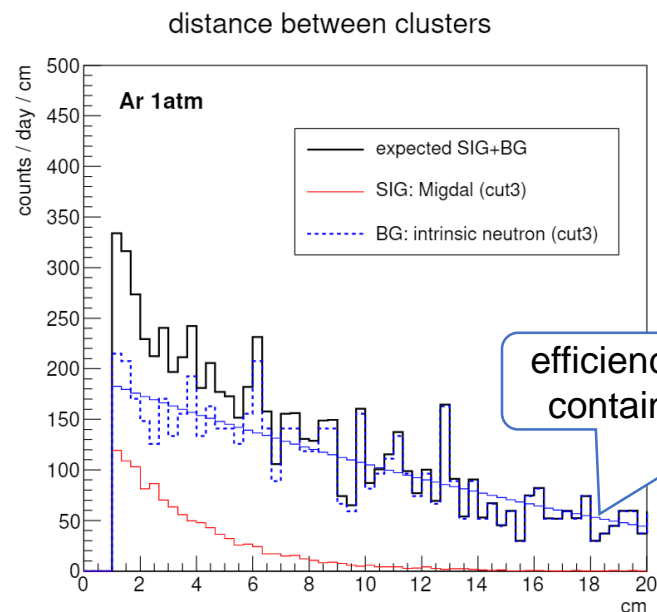
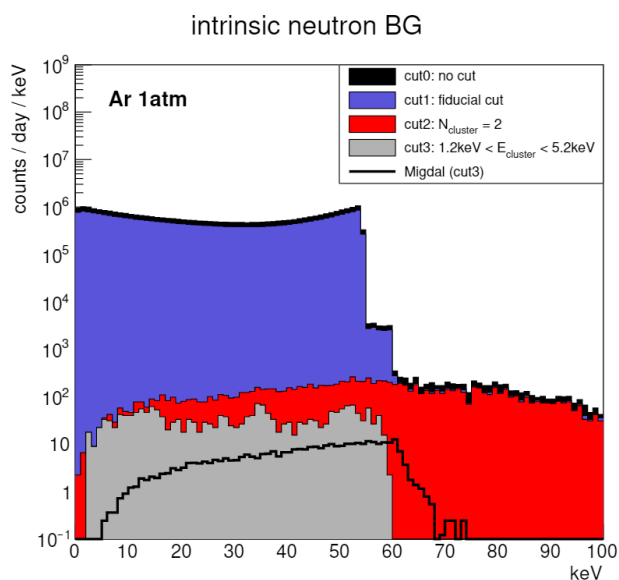
Xe 8atm



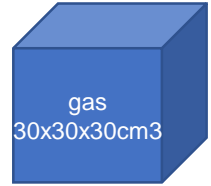
中性子 BG (Ar 1atm)



- 中性子 --> ガスのみ標的
- 主要なBG：中性子の多重散乱
- クラスタ-間距離分布は信号とBGで異なる

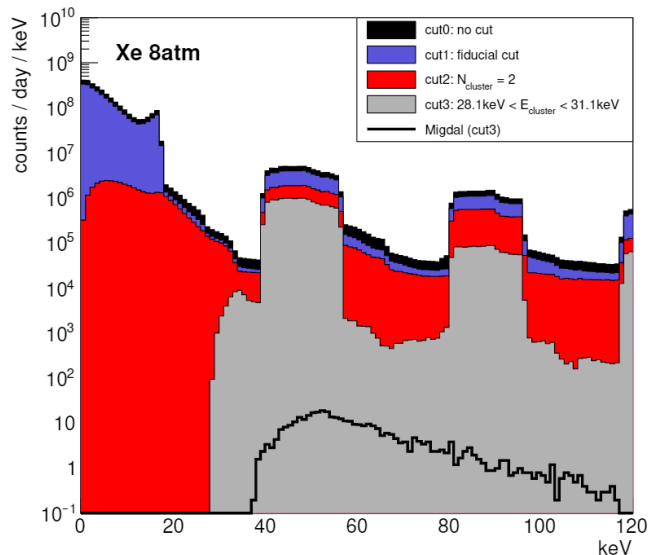


中性子 BG (Xe 8atm)

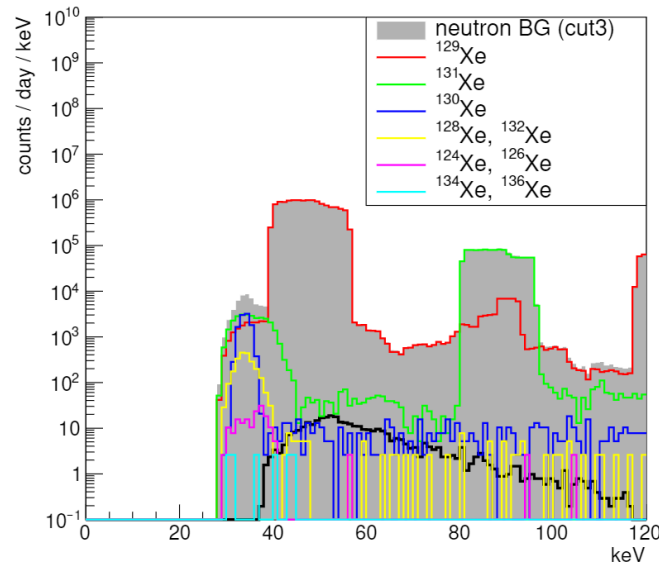


- 中性子 --> ガスのみ標的
- 主要なBG:
 - ガンマ線 from ^{129}Xe (非弾性散乱)
 - ガンマ線 from ^{131}Xe (中性子捕獲)
- ^{134}Xe 、 ^{136}Xe の元素濃縮が必要

intrinsic neutron BG



isotope ratio of neutron BG



KamLAND-Zen

Xe136	91%
Xe134	9%
Xe132	0.17%

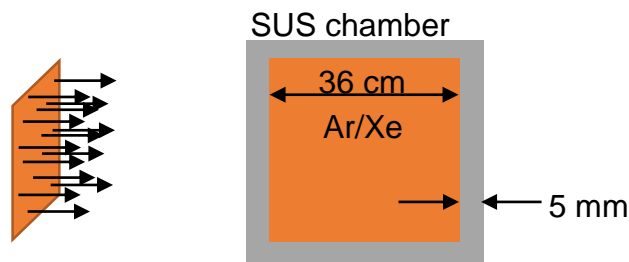
for example

from Kamei

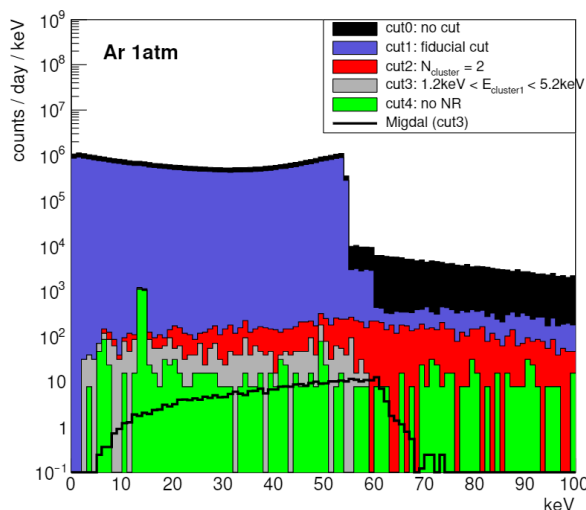
ガンマ線 BG

- シンプルな構成では、非常に多くのBGが存在することが分かった

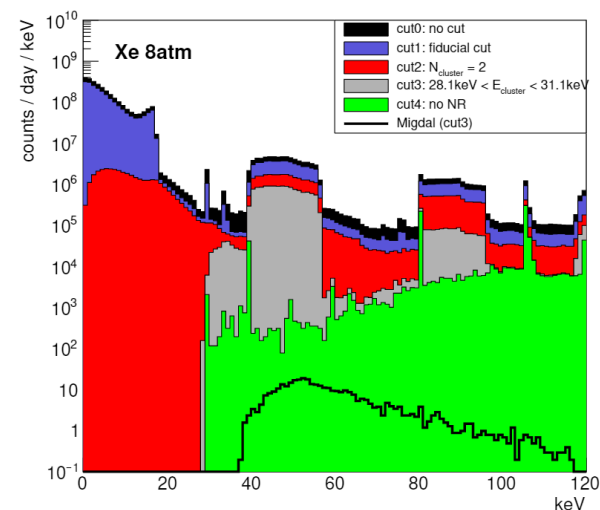
チェンバー BG



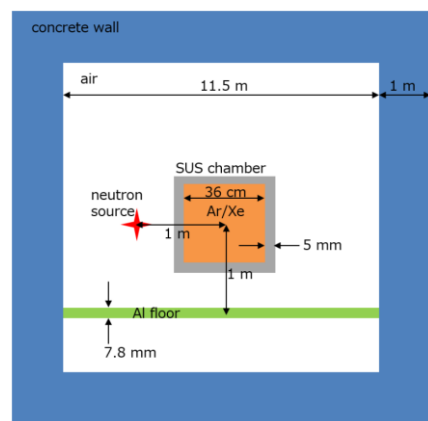
chamber (n,γ) BG + neutron BG



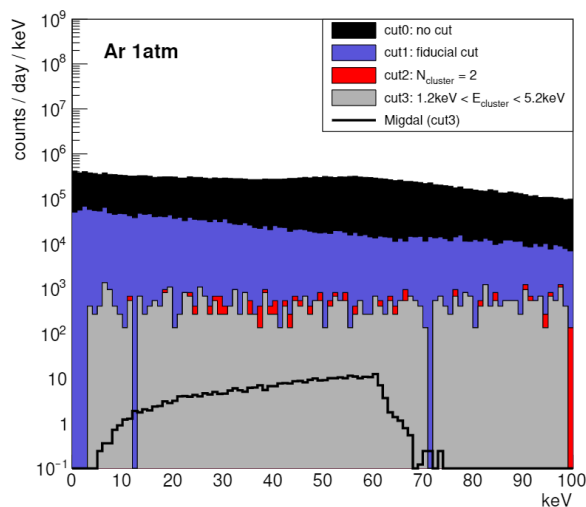
chamber (n,γ) BG + neutron BG



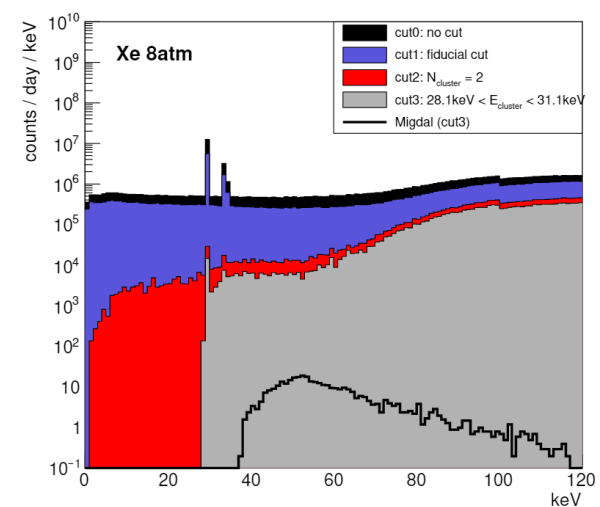
実験室 BG



laboratory (n,γ) BG

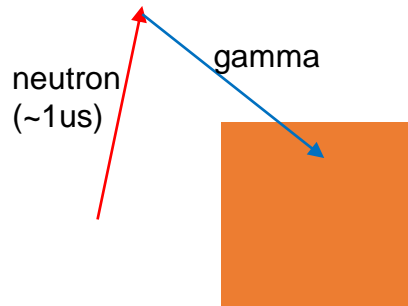


laboratory (n,γ) BG

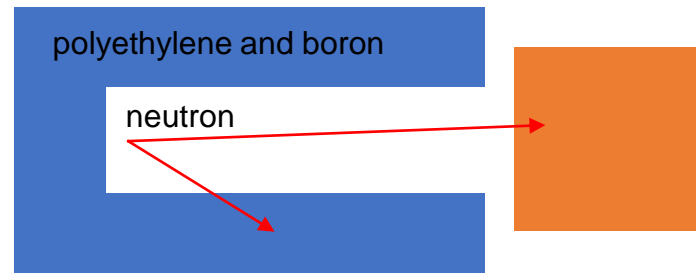


BG 削減のアイデア

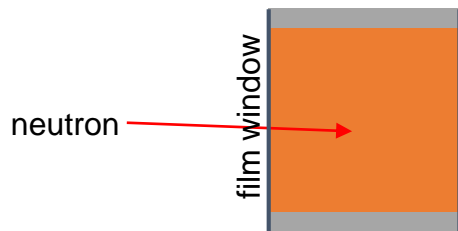
パルス中性子ビーム



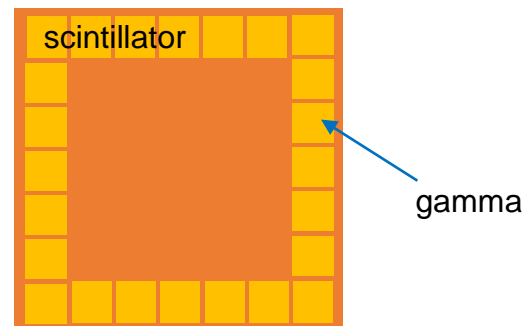
中性子シールド



薄い容器



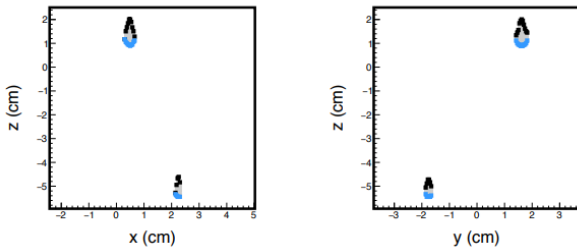
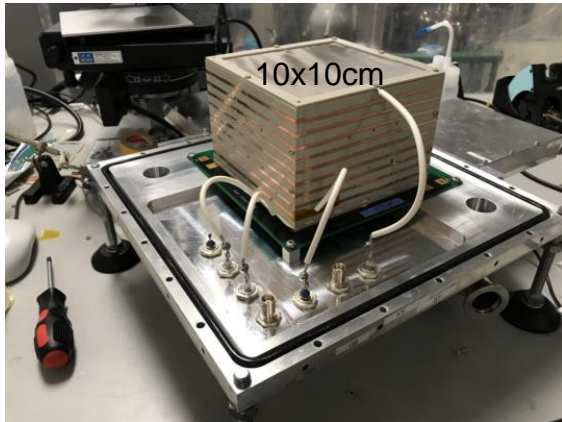
アクティブシールド



2-クラスター デモンストレーション

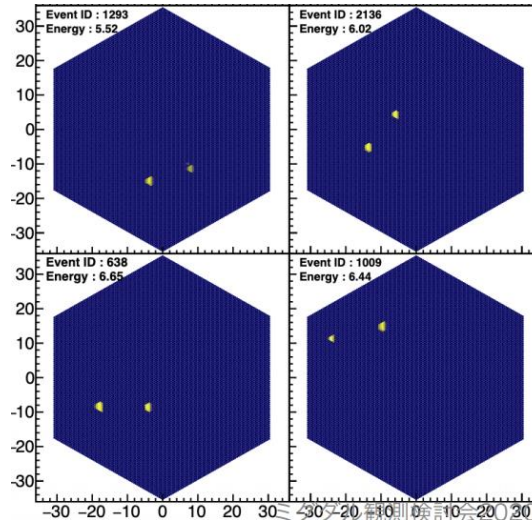
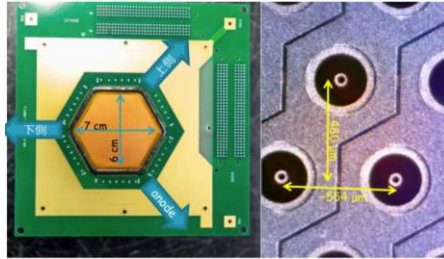
- u-PIC と EL readout は位置感度のあるガス検出器として使えそう！

CF4 0.1atm
400um-pitch
565keV neutron beam: NR+NR



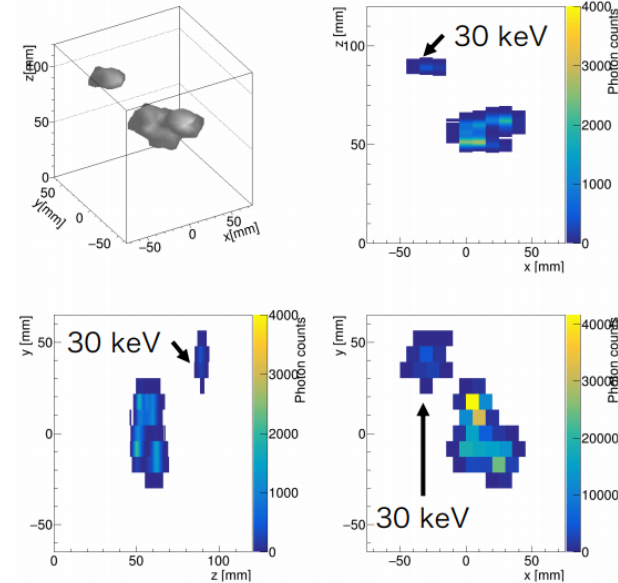
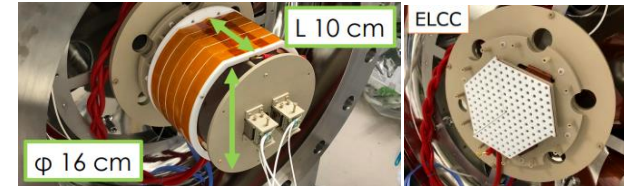
from Shimada

Ar 1atm
400um-pitch
5.9keV gamma (55Fe): ER+ER



from Ikeda

Xe 4atm
1cm-pitch
662keV gamma (137Cs): ER+ER



from Yoshida

まとめ

- ミグダル効果
 - ミグダル効果は暗黒物質探索の解析に使えると面白い
 - ミグダル効果の観測は非常に重要
- ミグダル観測に向けて
 - 2-クラスター事象を探そう
 - 検出器: 位置感度のあるガス検出器 (Ar/Xe)
 - 信号: $\sim 1000\text{ev/日}$ (悪くない)
 - BG: たくさん... (中性子BGとガンマ線BG)
 - --> 実験デザインを詰めていく必要がある
- ミグダル観測検討会2020
 - 11/24: 概要の紹介トーク @zoom
 - 12/9: より詳細な関連トーク @神戸大
 - --> slackで議論を継続していく

arXiv: 2009.05939