

# 高圧キセノンガス検出器による ミグダル効果検証のための研究

中村輝石 (ICRR)

2021/03/24

第7回極低放射能技術研究会


# はじめに

- 公募研究(11月～)に採択いただき、ありがとうございます
- ミグダル観測はBGを減らすというよりは信号をエンハンスするという方向性です
- 近年では世界的に注目されているトピックかと思っています
- 自身のAXEL、NEWAGEの経験と技術を生かしてミグダル観測にこぎつけたいと思っています

# PTEP

• できました！

## Detection capability of the Migdal effect for argon and xenon nuclei with position-sensitive gaseous detectors

Kiseki D Nakamura , Kentaro Miuchi, Shingo Kazama, Yutaro Shoji, Masahiro Ibe, Wakutaka Nakano

*Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2021, Issue 1, January 2021, 013C01, <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa162>

**Published:** 09 November 2020 **Article history** ▼



PDF

Split View

Cite

Permissions

Share ▼

### Abstract

The Migdal effect is attracting interest because of the potential to enhance the sensitivities of direct dark matter searches to the low-mass region. In spite of its great importance, the Migdal effect has not been experimentally observed yet. A realistic experimental approach towards the first observation of the Migdal effect in the neutron scattering was studied with Monte Carlo simulations. In this study, the potential background rate was studied together with the event rate of the Migdal effect by a neutron source. It was found that a table-top-sized  $\sim (30 \text{ cm})^3$  position-sensitive gaseous detector filled with argon or xenon target gas can detect characteristic signatures of the Migdal effect with sufficient rates ( $O(10^2 \sim 10^3)$  events per day). A simulation result of a simple experimental set-up showed two significant background sources, namely the intrinsic neutrons and the neutron-induced gamma-rays. It is found that the intrinsic neutron background rate for the argon gas is at an acceptable level and some future study of the reduction of the gamma-rays from the laboratory would make the observation of the Migdal effect possible. The background for the xenon gas, on the other hand, is found to be much more serious than for the argon gas. Future works on the isotope separation as well as the reduction of the gamma-rays from the detector and laboratory will be needed before the Migdal effect can be observed for the xenon gas case.

# ミグダル観測検討会2020

- 地下新学術の援助のもと開催（ありがとうございます）
- slackもあるので、興味がある人は連絡ください



Migdal observation investigative workshop 2020  
ミグダル観測検討会2020

トップ  
Top

本研究会について  
About

プログラム  
Program

レジストレーション  
Registration

DAY 2 トーク登録  
Submission

連絡先  
Contact

## ミグダル観測検討会2020

### 本研究会について About

1940年代にA.B.Migdalによって計算された「ミグダル効果」が、近年暗黒物質直接探索実験に関連して注目を集めています。ミグダル効果は、原子核反跳に伴って低い確率で電子が放出される事象です。通常では電離能力が低くて検出されないような低エネルギーの反跳原子核についても、ミグダル効果によって検出が可能となると考えられています。暗黒物質直接探索実験では、エネルギー閾値を下げた観測が可能になり、0.1GeV程度までの軽い暗黒物質の探索が可能となっております。一方、ミグダル効果自体はこれまでに観測されたことがないため、今後の低質量暗黒物質直接探索のためにも、ミグダル効果の観測は重要だと考えられています。

本研究会は、**ミグダル効果の実験的な初観測に向けた検討**を行うことを目的とします。このため、研究会を2つの日程に分け、DAY 1では、Migdal効果についてのイントロダクションとして、これまでの取り組みなどの紹介を中心とします。DAY 1でのトーク・質疑を基にして、様々な側面から参加者の皆様にもご検討いただき、DAY 2でその成果を発表していただきたいと考えております。DAY 2では、なるべく多くの公募トークと、対面での深い議論による参加型研究会によって関連分野の叡智を結集、ミグダル効果の初観測に向けた第一歩を踏み出したいと考えております。

DAY 2については、講演者を中心に旅費の補助が可能です。申し込み時に希望してください。

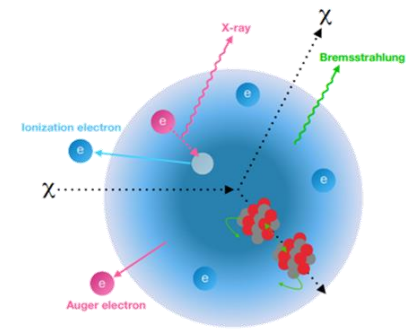
# ミグダル観測検討会2020

- DAY1でイントロ、DAY2で議論
- 実験＋理論の研究会

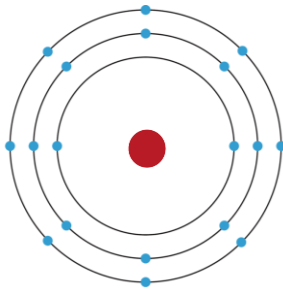
セッション 1		座長：中村 輝石
時間	タイトル	発表者
14:00-14:10	はじめに	中村 輝石 Kiseki Nakamura
14:10-14:40	Migdal 効果	伊部 昌宏 Masahiro Ibe
14:40-15:10	Migdal 効果による暗黒物質探索実験	風間 慎吾 Shingo Kazama
15:10-15:30	休憩 / Break	
Session 2 (in English)		Chair: Shingo Kazama
time	content	presenter
15:30-16:00	MIGDAL project	Pawel Majewski
16:00-16:20	Migdal effect detection capability	Kiseki Nakamura
16:20-16:30	休憩 / Break	
セッション 3		座長：身内賢太郎
16:30-	ミグダル観測に向けて	身内 賢太郎

セッション 1		座長：中村輝石
時間	タイトル	発表者
10:30-10:50	Migdal効果の現状～DAY1のおさらい～	身内 賢太郎 (神戸大)
10:50-11:20	液体キセノン2相式検出器での低エネルギーのBG review	水越 慧太 (神戸大)
11:20-11:40	136Xeを用いた実験、関連するバックグラウンド	亀井 雄斗 (東北大)
11:40-12:00	Migdal効果検出に向けた中性子ビームライン調査	東野 聡 (神戸大)
12:00-13:30	休憩 / Break	
セッション 2		座長：伊部昌宏
13:30-13:55	dark photon mediator模型でのMigdal効果とelectron scatteringの比較	中野 湧天 (東京大)
13:55-14:20	The Migdal effect in semi-conductors	庄司 裕太郎 (ヘブライ大)
14:20-14:40	(飛込講演)Notes on Inverse Primakoff Scattering of Axions	永田 夏海 (東京大)
14:40-15:00	休憩 / Break	
セッション 2		座長：風間慎吾
15:00-15:25	Migdal効果探索のためのCF4ガスマイクロTPCを用いた中性子ビームにおける背景事象の評価	島田 拓弥 (神戸大)
15:25-15:50	高圧キセノンガスTPC	吉田 将 (京都大)
15:50-16:10	アルゴンガス検出器による2クラスター検出デモンストレーション	池田 智法 (京都大)
16:10-	議論	中村 輝石 (ICRR)
	おわりのことば	関谷 洋之 (ICRR)

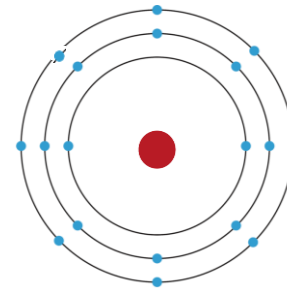
# Migdal effect



- Suddenly movement of nuclei --> additional ionization/excitation (low probability)
- First raised by Migdal 1939
- Calculated for nuclear recoil case to apply DM search analysis (JHEP 03 (2018) 194, arXiv:2011.09496)



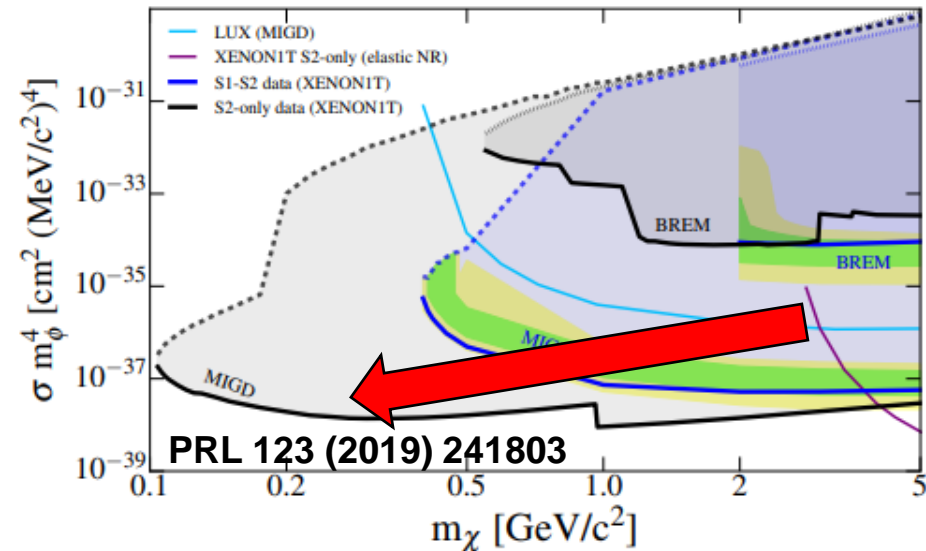
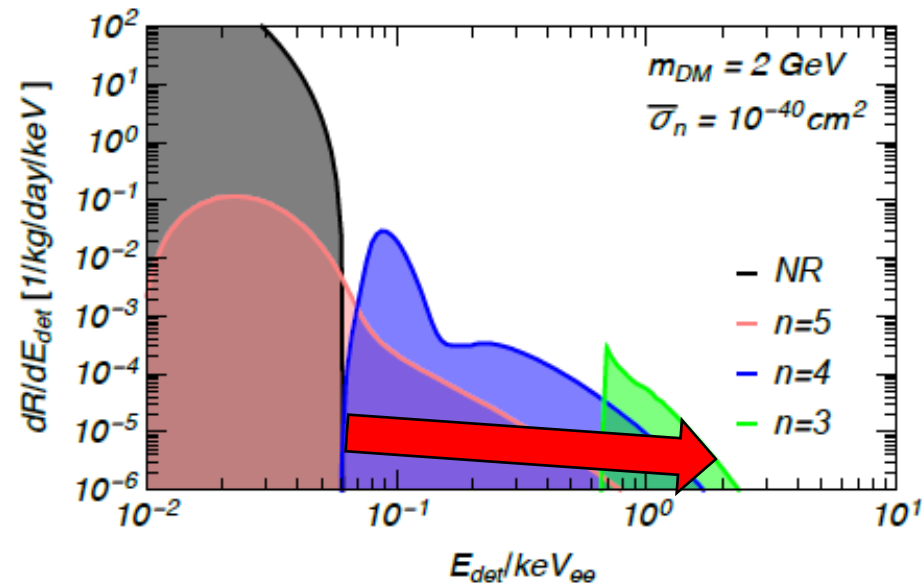
normal



Migdal

# Migdal for DM search analysis

- Nuclear recoil + Migdal effect
  - --> observable energy increase
  - --> low-mass sensitivity increase
- Understanding followings are important
  - Migdal effect
  - electron BG (S2 only)
  - detector response for NE+ER



# Migdal analysis

[EDELWEISS \(Germanium\)](#): "Searching for low-mass dark matter particles with a massive Ge bolometer operated above-ground", arXiv:1901.03588

[CDEX-1B \(Germanium\)](#): "Constraints on Spin-Independent Nucleus Scattering with sub-GeV Weakly Interacting Massive Particle Dark Matter from the CDEX-1B Experiment at the China Jin-Ping Laboratory" arXiv:1905.00354

[LUX \(Xenon\)](#): "Results of a Search for Sub-GeV Dark Matter Using 2013 LUX Data", arXiv:1811.1124

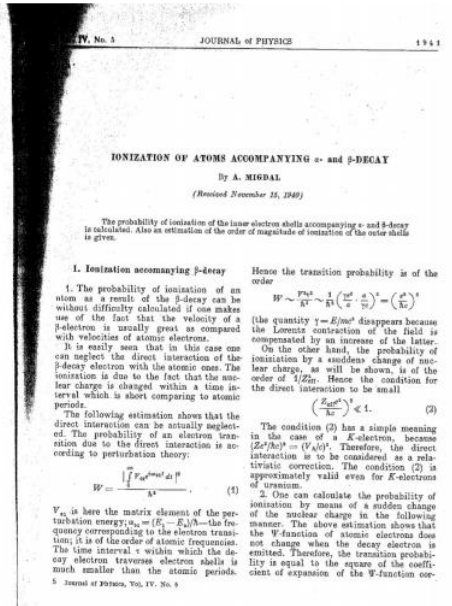
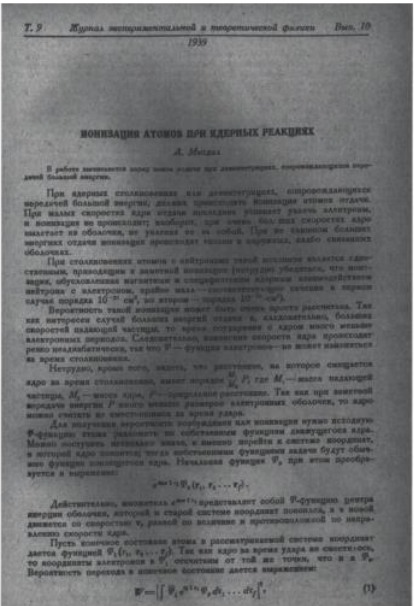
[XENON1T \(Xenon\)](#): "A Search for Light Dark Matter Interactions Enhanced by the Migdal effect or Bremsstrahlung in XENON1T", arXiv:1907.12771

[SENSEI \(Si\)](#): "SENSEI: Direct-Detection Results on sub-GeV Dark Matter from a New Skipper-CCD", arXiv:2004.11378

	CDEX-1B	EDELWEISS-SURF	LUX	XENON1T	SENSEI
Detector	Ge (charge-only) No ER/NR discri.	Ge (heat-only) (above ground)	LXe TPC (S1-S2)	LXe TPC (S1-S2, S2-only)	CCD (Si) (charge-only, 135 K)
Size	939 g	33.4 g	118 kg	~1.3 ton	~2g
Exposure	737.1 kg day	0.03 kg day (1-day blind, 5-days unblind)	13,775 kg day	S1-S2: 1 ton year S2-only: 22 ton day	~20 g day
Threshold	160 eVee	60 eVee	~1 keVee	S1-S2: ~1 keVee S2-only: 186 eVee	O(1) eVee (詳細不明) (1,2,3,4 e-)



# Is Migdal really occur ?



## 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 [ ]

**We want to measure this !**

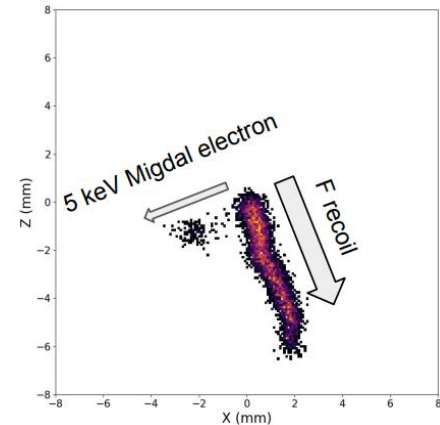
- [1] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri yadernykh reaktsiyakh*, ZhETF, 9, 1163-1165 (1939)
- [2] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri  $\alpha$ - i  $\beta$ - raspade*, ZhETF, 11, 207-212 (1941)
- [3] E. E. Berlovich et al., *Investigation of the "jolting" of electron shells of oriented molecules containing  $^{32}P$* , 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  $\beta$  Decay of Trapped  $^6He^+$  Ions*, PRL 108, 243201 (2012)
- [8] X. Fabian et al., *Electron Shakeoff following the  $\beta^+$  decay of Trapped  $^{19}Ne^+$  and  $^{35}Ar^+$  trapped ions*, PRA, 97, 023402 (2018)

# Migdal observation experiments

- As far as I know, two ideas are ongoing
  - different approach: complementary

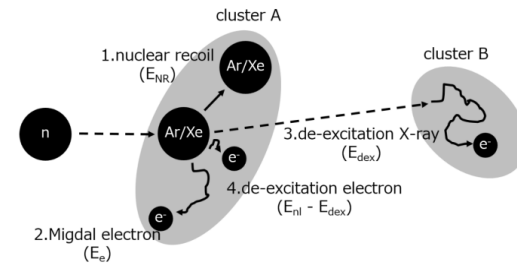
- 1. MIGDAL collaboration

- search for events where NR and ER start at the same vertex
- use very low pressure gaseous detector (CF4 50torr)



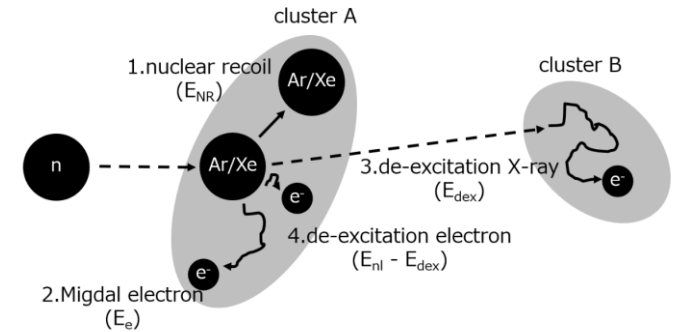
- 2. Our idea

- search for NR events associated with de-excitation X-ray as a second cluster
- use position sensitive gaseous detector (Ar 1atm/Xe 8atm)

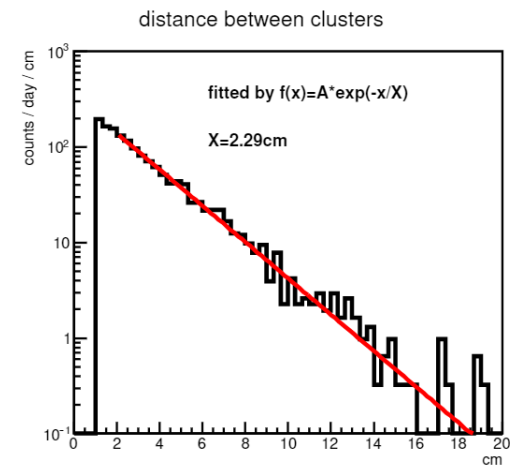
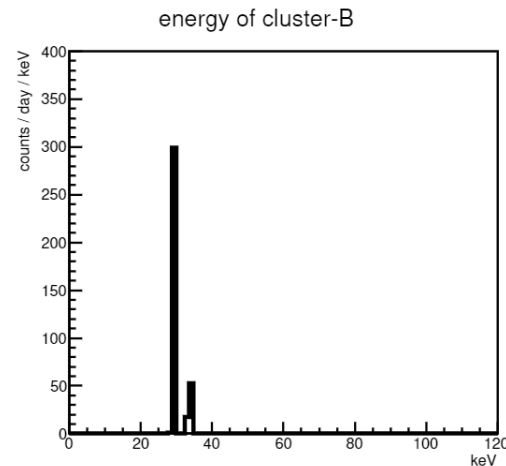
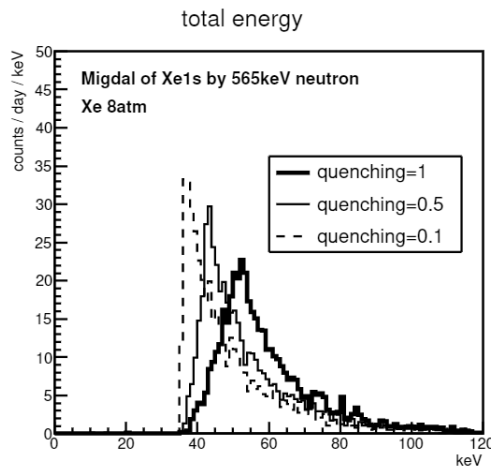


# Migdal signal (Geant4)

- after "cluster num == 2" selection
- mono-energetic cluster-B
- cluster distance is consistent to X-ray absorption length

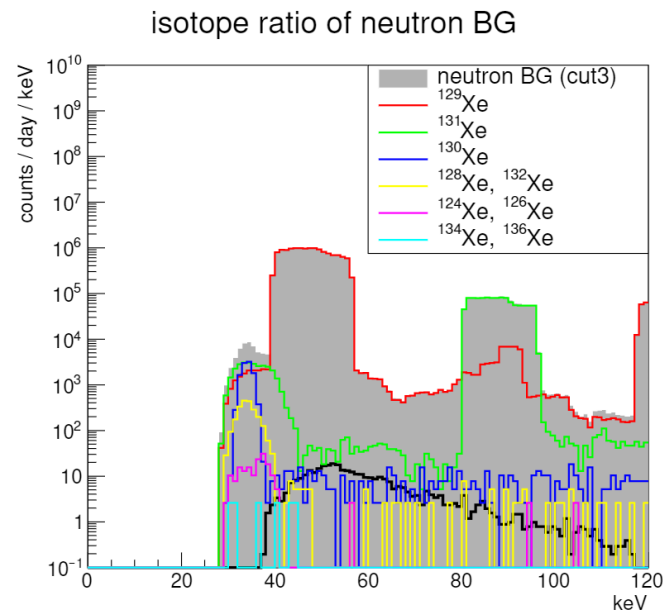
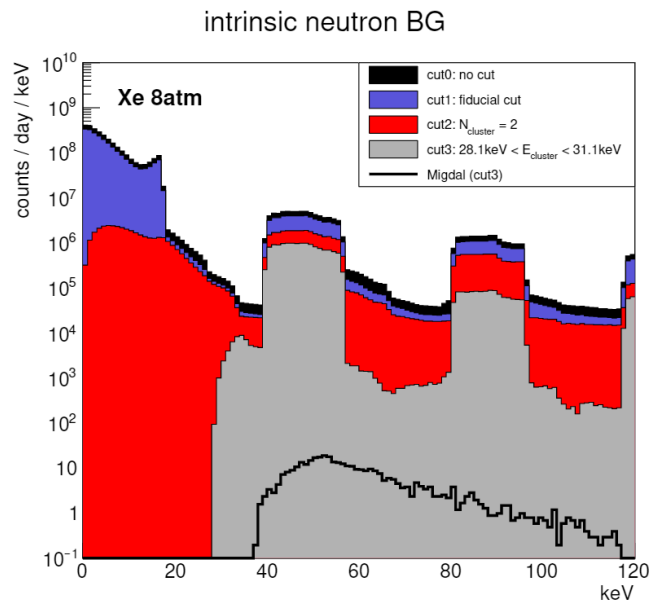
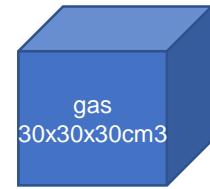


Xe 8atm



# Neutron BG (Xe 8atm)

- neutron --> gas target only
- dominant BG:
  - gamma-rays from  $^{129}\text{Xe}$  (inelastic)
  - gamma-rays from  $^{131}\text{Xe}$  (capture)
- $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{136}\text{Xe}$  selection is needed by enrichment



## KamLAND-Zen

Xe136	91%
Xe134	9%
Xe132	0.17%

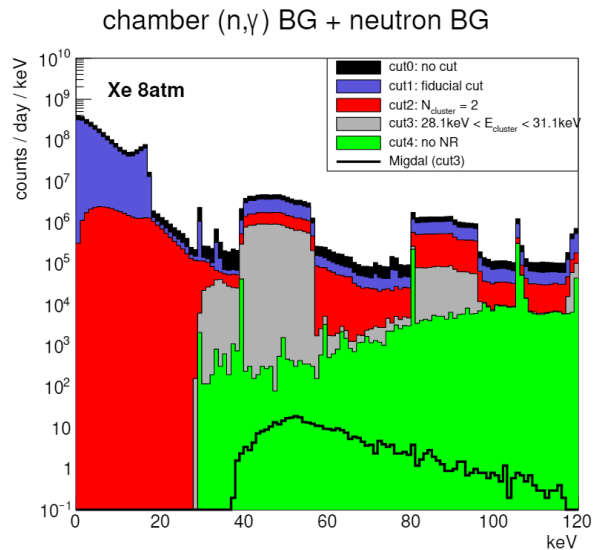
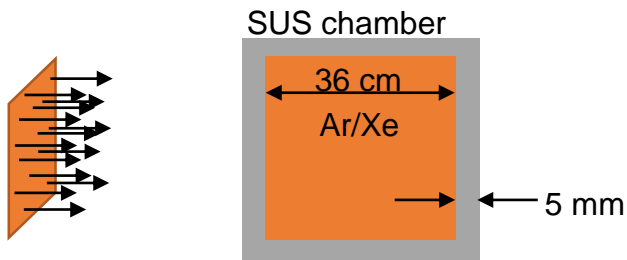
for example

from Kamei

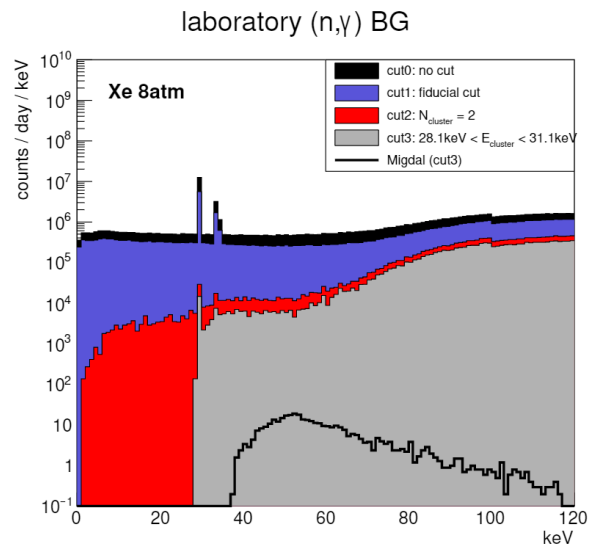
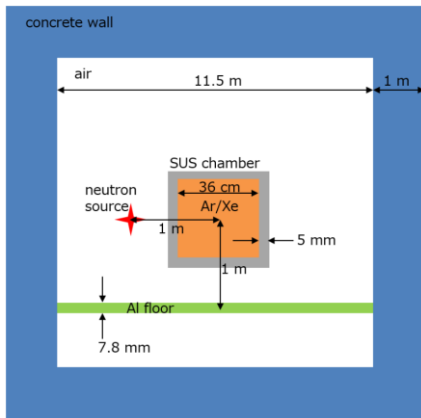
# Gamma ray BG

- Too much BG exist for the simple constitution

## chamber BG



## laboratory BG

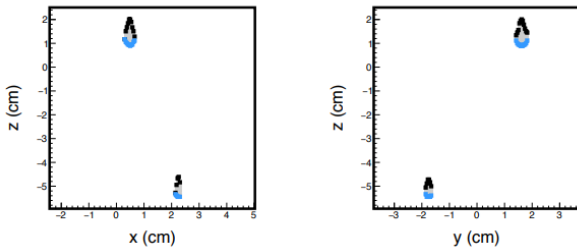
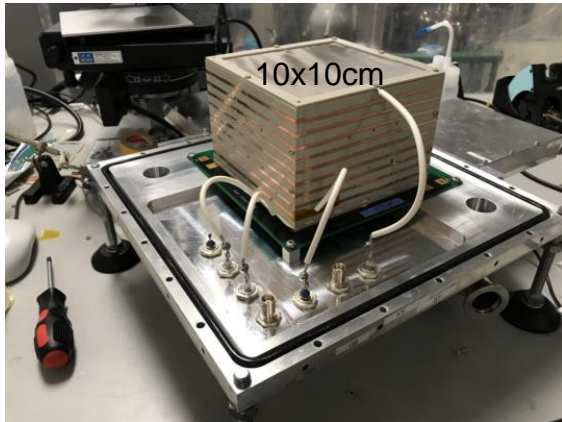




# 2-cluster demonstration

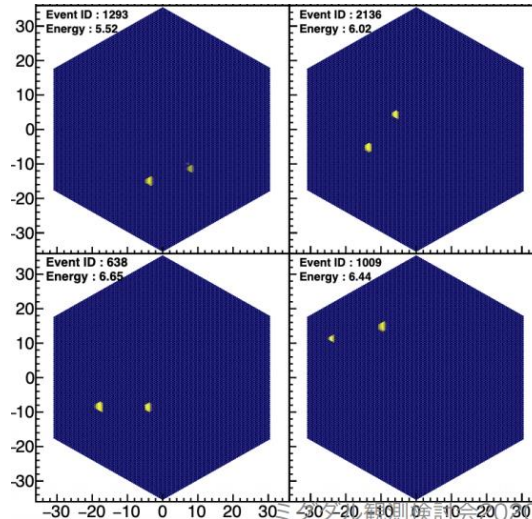
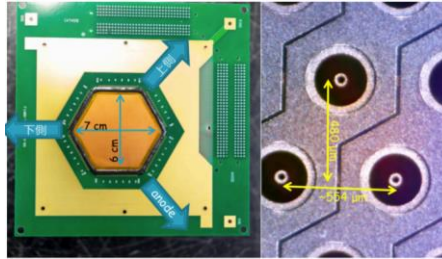
- u-PIC and EL readout can be used for a position sensitive gaseous detector

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



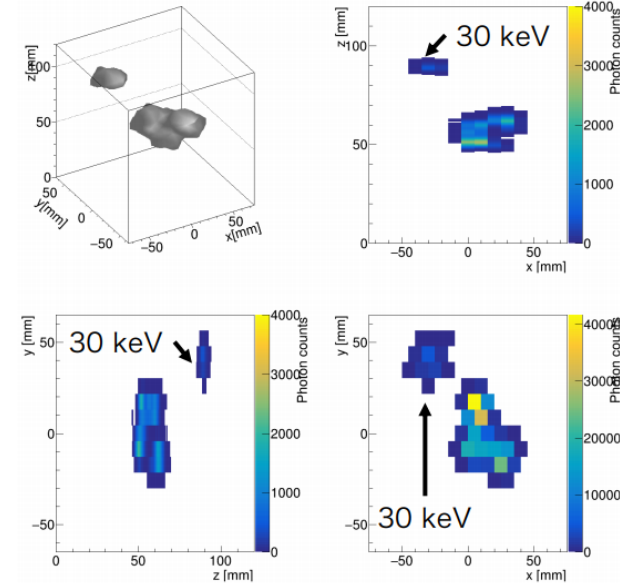
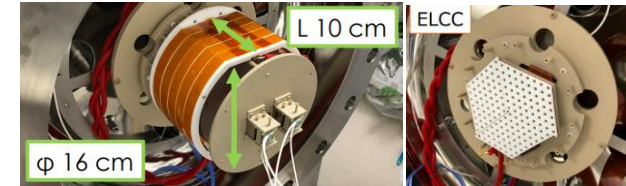
from Shimada

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



from Ikeda

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



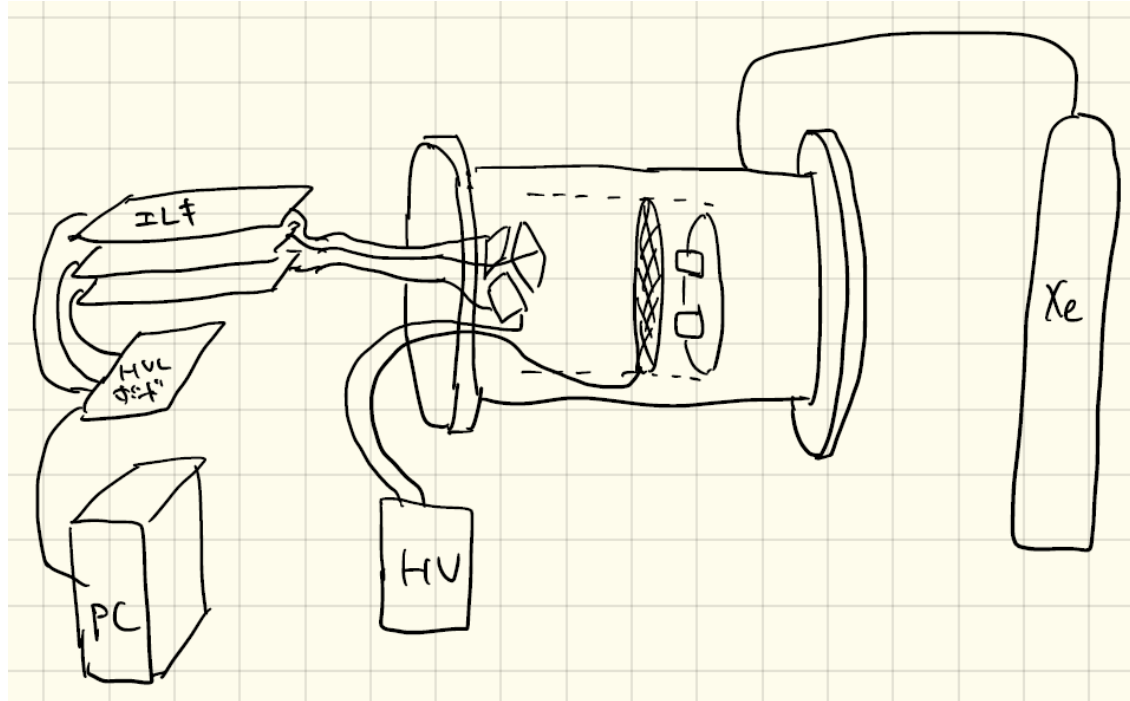
from Yoshida

# Schedule

- 1st neutron beam test (2021)
  - confirm gamma-ray BG
    - inelastic scattering of  $^{129}\text{Xe}$  --> check the consistency
    - (n,gamma) at chamber / laboratory --> input for shielding
  - measure quenching factor for 1atm Ar / 8atm Xe
    - for NR signal expectation
- 2nd neutron beam test (2022?)
  - install neutron shield
  - observation by Ar
- 3rd neutron beam test (2023?)
  - use  $^{136}\text{Xe}$  enriched xenon
  - observation by Xe

# Detector for 1st beam test

- 16cmφ × 16cmの検出領域 (168ch)
- 中性子BGとquenchingの測定
- 今年度はエレキと光センサを準備





# 作業場所

- 竹田さんの協力のもと、神岡で試験機組立の場所（電源も）を確保してもらっていた（Lab-A）
- 自分が異動になったので、異動先で作ることにした



## Lab-A 電源の増設工事

2021/01/20 竹田



- LINAC 室の配電盤に Outlet 1-3 のそれぞれに 30A のブレーカがついている。
- Outlet 1 は、分光器関連の冷蔵庫(10A)の他、水Rn 計(2台)用のポンプ2台、U字管冷却用の真空ポンプ、空気循環ポンプがあり、全てを稼働させると、30A を超えてしまう。
- Outlet 2 と 3 は、新学術D班のプロジェクトのため、両方とも 30A が必要。



- Outlet-4: Rn 用に新たに設置。
- Outlet-5: 伊藤さんのAICHAMと中村さんのミグダル実験用に設置。

# キセノンの同位体濃縮

- $^{134}\text{Xe}$ や $^{136}\text{Xe}$ は非弾性散乱や中性子捕獲をしない
- 3/9にイーエナジーから濃縮について打診
  - 神岡にある線源について問い合わせをして、仲良くしてもらった会社
- 引き続き連絡をとり、3rd stepへ

貴研究施設における線源の需要について

受信トレイ x 1 東大 x k.n x

saito

To Kiseki, Hidetomo, 中村, shogen.hideki, miyata.yoko

東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設  
中村様

いつもお世話になっております。イーエナジー斉藤です。  
ご無沙汰しております。

実はお願いがあり、この度は連絡させていただきました。

私共の親会社である双日が代理店をしております仏Orano社（旧AREVA）では保有している遠心分離の技術を活用し、様々な種類の安定同位体を製造し供給することを計画しています。

対象分野としては、核医療（診断、治療）、工業用（半導体、量子コンピュータ、NDAその他）、基礎研究用（素粒子物理学等）がありますが、その中に「カムランド禅」で多量に使用される予定のキセノン136もあります。我々はOranoより、これら安定同位体の販売先候補について調べる様に依頼されており、キセノン136をカムランド禅向けに供給することや、JAEA殿内で基礎研究を担っておられる部署にその他の同位体を紹介する可能性が無いかに関心を持っております。

そこで、中村様の研究室もしくは共同研究をされている研究施設のなかで、上記線源のについて興味をお持ちの部署があれば一度ご紹介させていただき、現在の需要についてもお伺いしたいのですが、お時間頂くことは可能でしょうか。

製品の詳細に関しては、現在Oranoの窓口として実務レベルでのやりとりをしております双日バリ店の庄源と宮田からお話をさせて頂ければと思います。

突然の連絡となり恐縮ですが、もし情報をお持ちでしたらお力添えいただけますと恐縮です。

ご検討のほど何卒よろしくお願い致します。

+++++

イーエナジー株式会社  
営業部燃料輸送グループ 斉藤美紀

〒105-0003  
東京都港区西新橋1-6-11(西新橋光和ビル2F)  
Tel: 03-6858-4856  
Fax: 03-6858-4831  
Mobile: 080-2013-1340  
E-mail: [saito@e-energy.co.jp](mailto:saito@e-energy.co.jp)  
URL <https://www.e-energy.co.jp>

3月9日(火) 15:34 ☆ 全員に返信

# まとめ

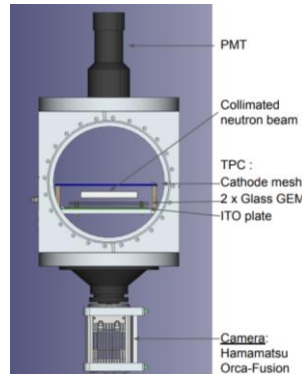
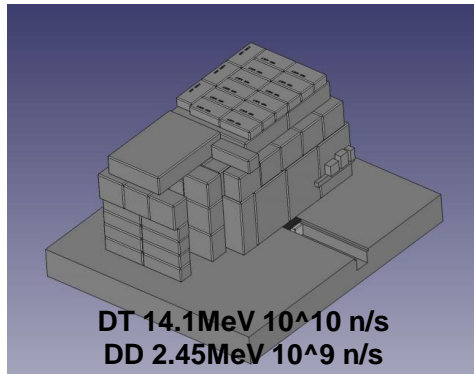
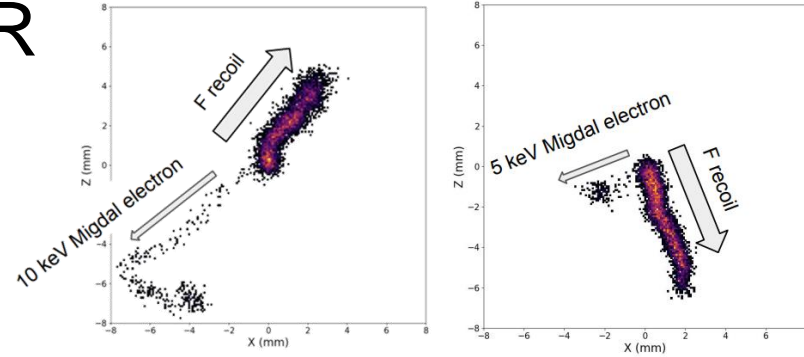
PTEP 2021 013C01

- ミグダル効果
  - 軽い暗黒物質探索の解析に重要
  - 中性子ビームで測定できると嬉しい
  - ミグダル観測検討会を開催
- ビーム実験
  - 2-cluster事象を選ぶ方針
  - 8気圧XeのTPCを想定
  - シミュレーションを進めてきた(PTEP 013C01 (2021))
  - 1st stepとして中性子BGとquenchingの測定を目指す
  - 検出器制作中

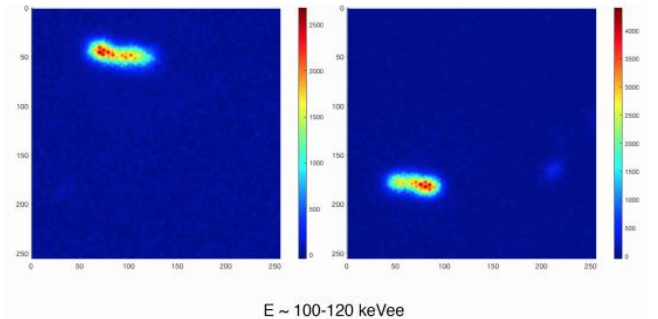
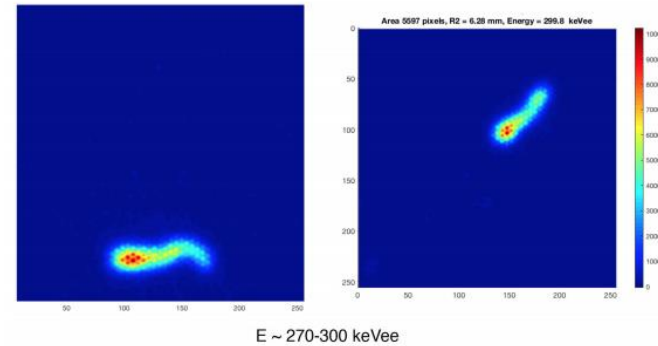
# MIGDAL collaboration

from Pawel

- Configuration to search NR+ER
  - low pressure (CF4 50torr)
  - optical readout
  - DT / DD neutron source
  - dedicated collimator

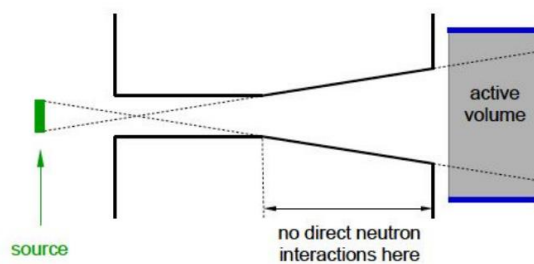
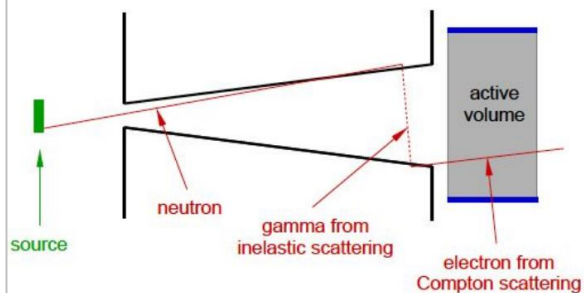


NR captured in the OTPC system at UNM by D. Loomba et al.



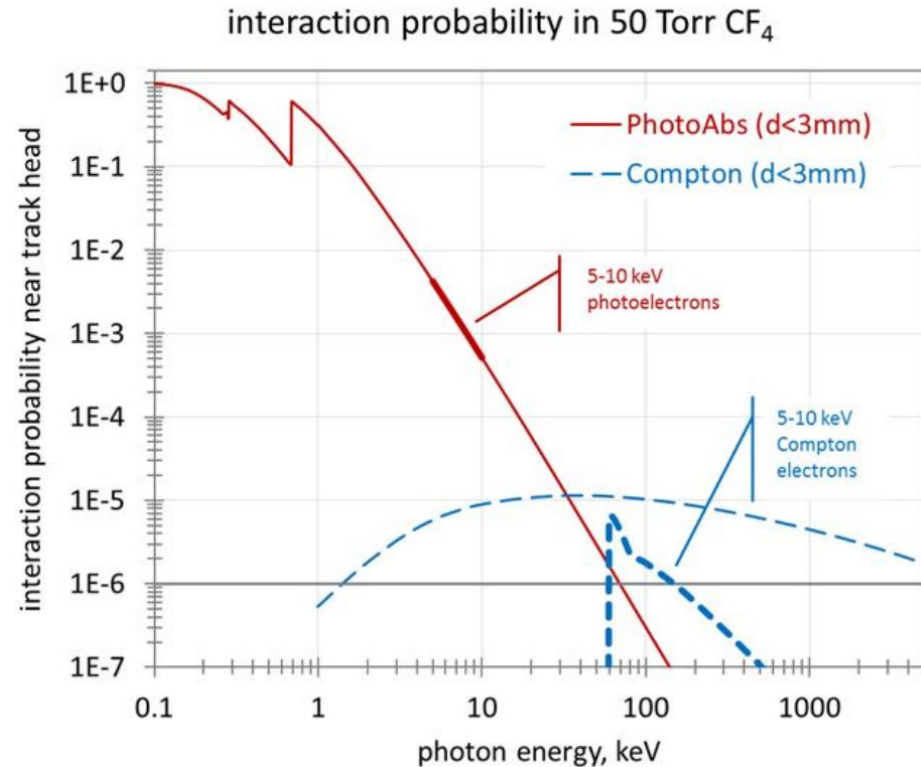
Simple trapezoidal collimator

Double-trapezoid collimator



# MIGDAL collaboration

- Merit
  - low BG for NR+ER from same vertex
- Difficulties
  - find out from a lot of single scattering BG
  - exposure



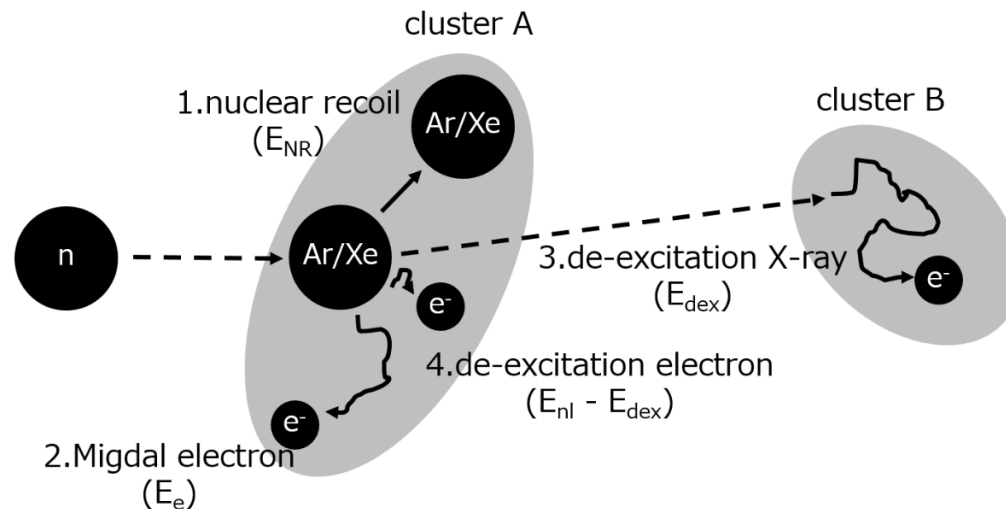
# Our idea

- Situation

- Migdal ionization (K-shell) --> Migdal electron and hole
- X-ray by de-excitation

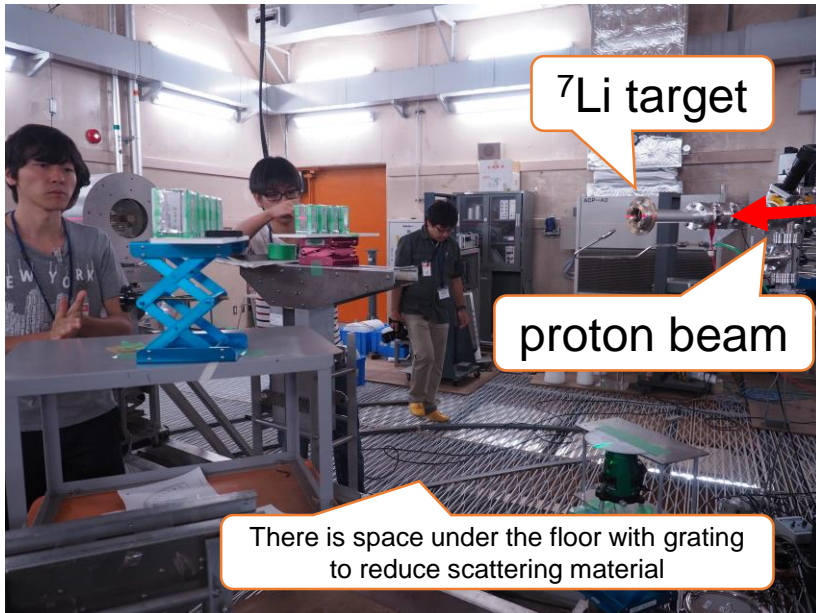
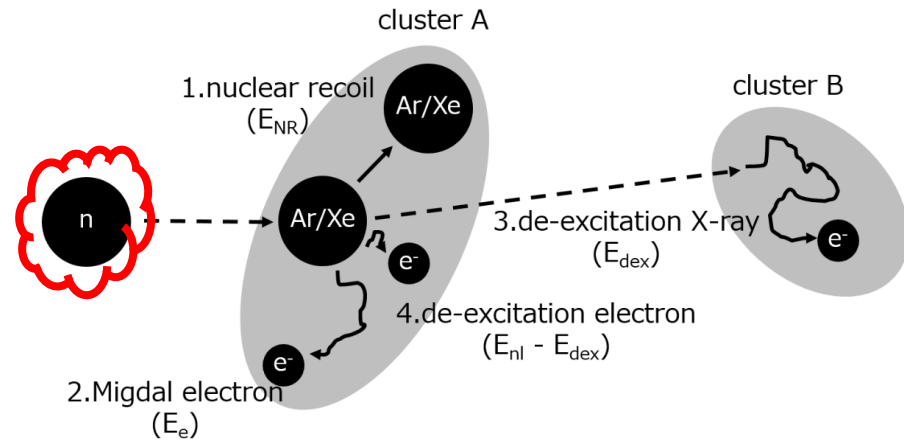
- Feature

- two cluster (in the gaseous medium)
- cluster-B is fixed energy
- --> position sensitive gaseous detector



# Neutron beam

- Neutron beam at AIST
  - interaction:  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$
  - energy: 565keV (on face)
  - flux: 1000 /s/cm<sup>2</sup> (at 1m)



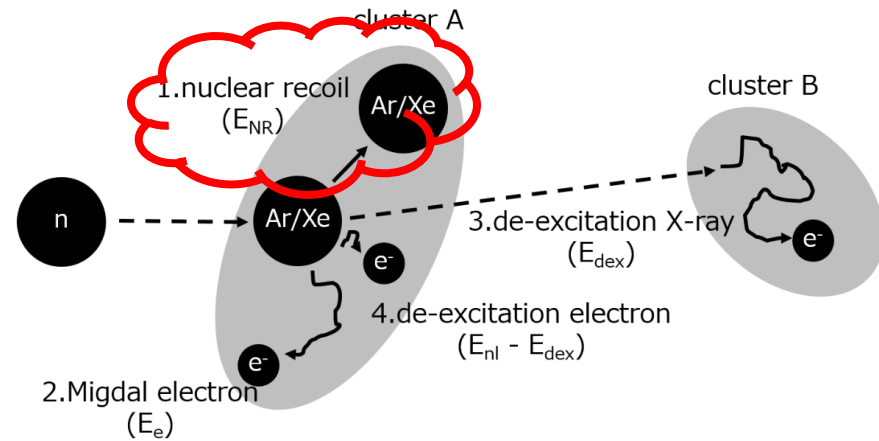
neutron beam lines in Japan

from Higashino

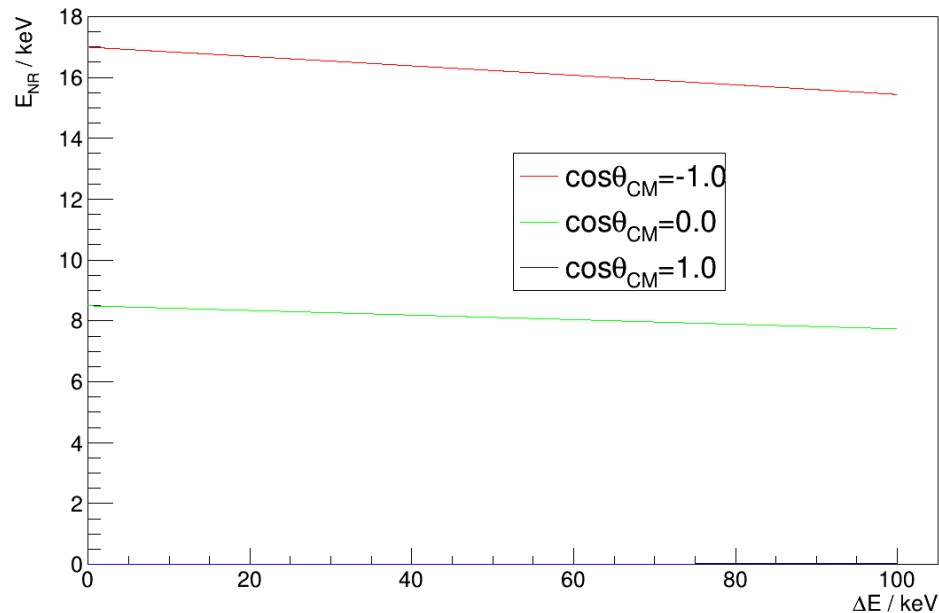
facility	energy	beam type	flux
RANS	7MeV (Be(p,n)B)	pulsed beam	$10^{12}/\text{s}$ @Be
KUANS	$\sim 1.6\text{MeV}$ (Be(p,n)B)	pulsed beam	?
AIST	24keV- 40MeV	DC beam ( $\rightarrow$ pulsed beam ?)	1000 /s/cm <sup>2</sup> @1m
KEK	15MeV (DT)	DC beam	



# Nuclear recoil



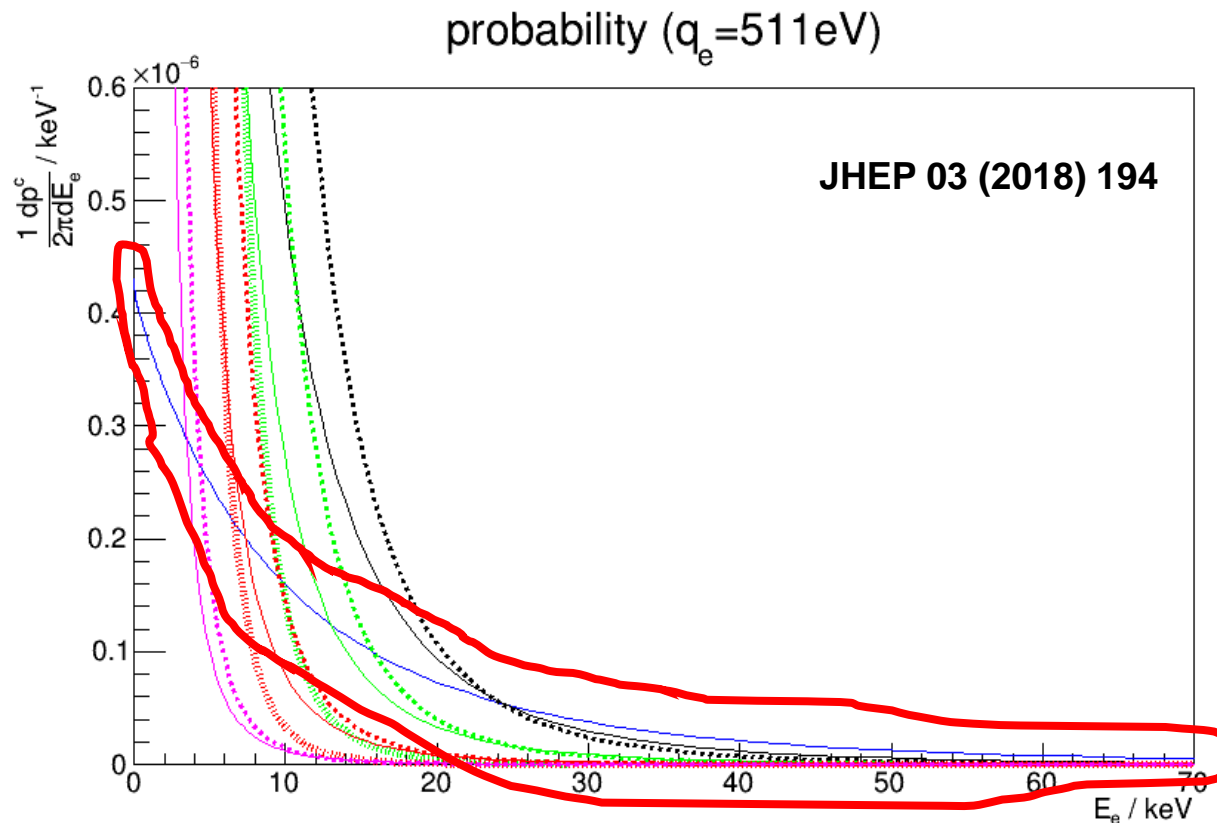
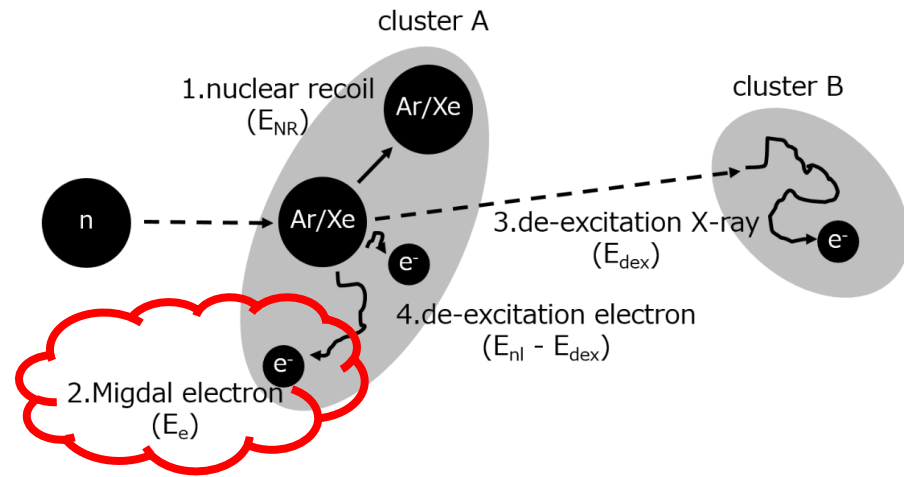
- "inelastic" effect is seen a little
  - due to transferred energy ( $\Delta E = E_e + E_{nl}$ )
  - Take into account it to the Geant4 simulation





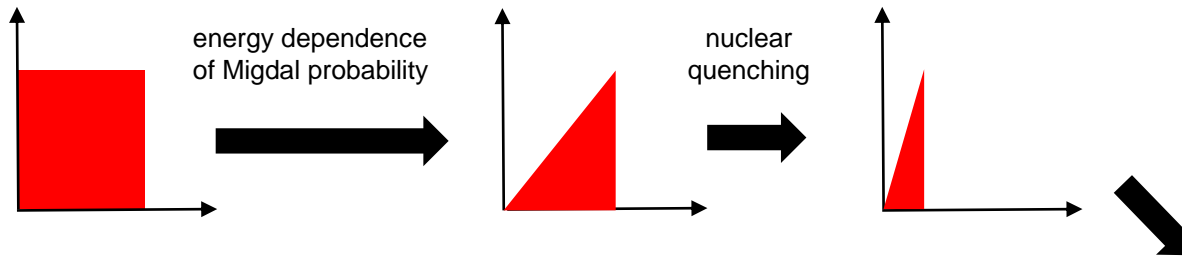
# Migdal electron

- For K-shell of Xe
  - typically 10keV
  - shape is like exponential



# Migdal signal

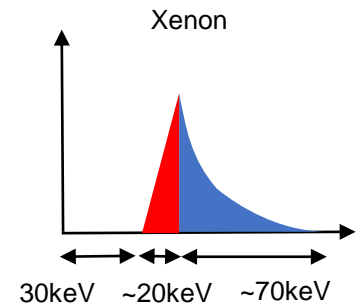
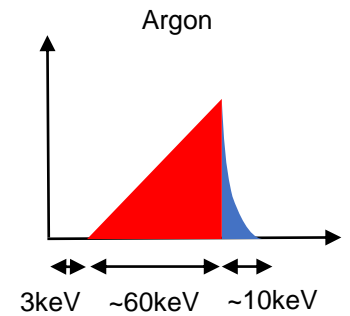
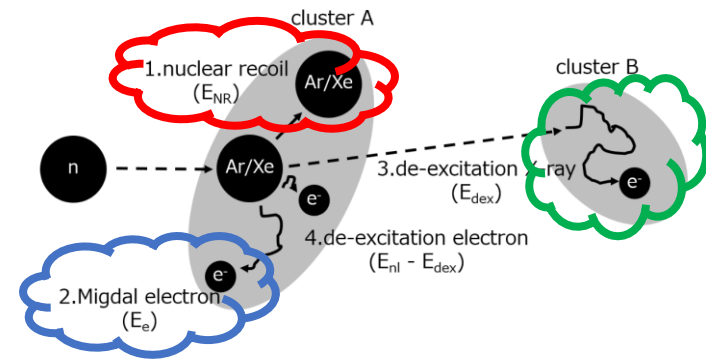
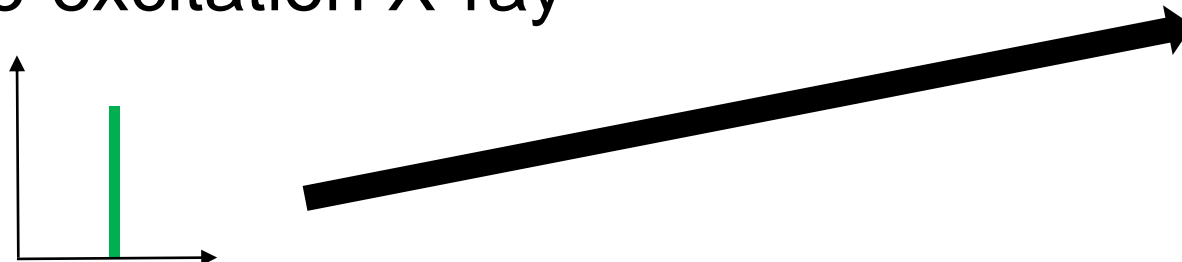
- nuclear recoil



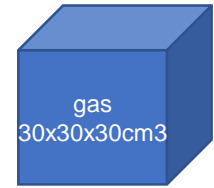
- Migdal electron



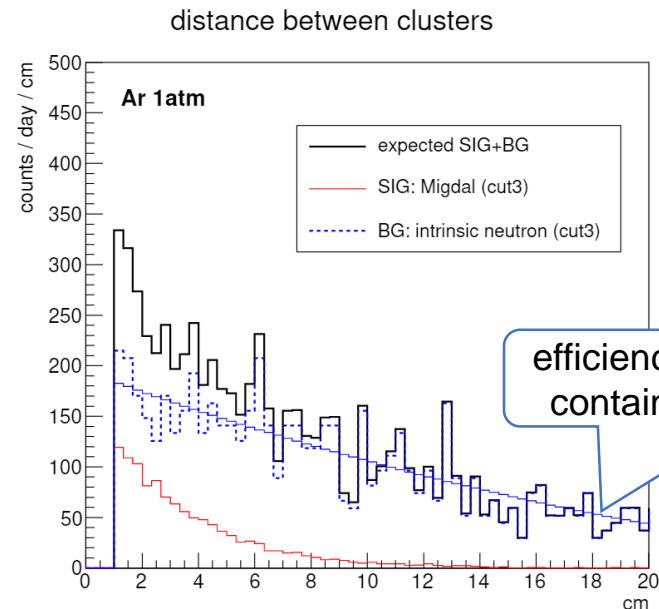
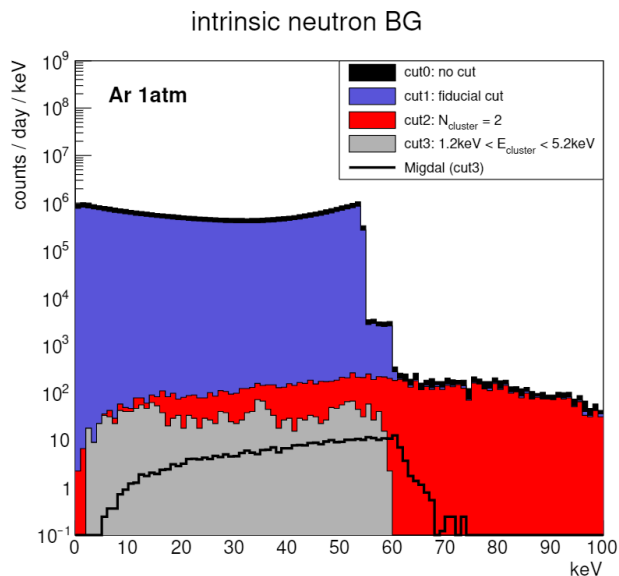
- de-excitation X-ray



# Neutron BG (Ar 1atm)

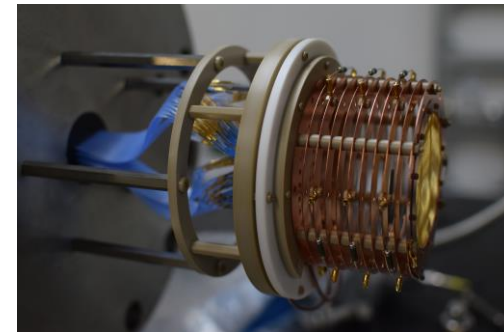
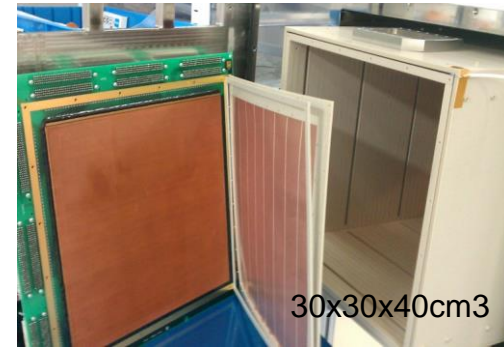


- neutron --> gas target only
- dominant BG : neutron multiple scattering
- cluster distance distribution is different to signal

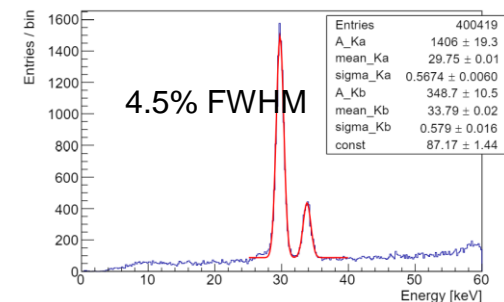


# Existing gas detector

- Argon target (1atm)
  - readout: u-PIC(MPGD) with 400um pitch
  - NEWAGE's technique
  - no inelastic scattering with neutron
- Xenon target (8atm)
  - readout: EL photon with 0.75~1cm pitch
  - AXEL's technique
  - good energy resolution (~5%)
- --> ~1000 ev/day is expected

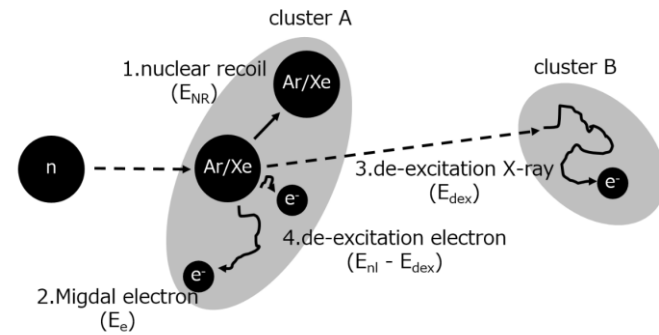


target	Ar 1atm	Xe 8atm
K-shell energy	4keV	30keV
absorption length	2.95cm	2.19cm
fluorescence yield	0.14	0.9
event rate	603 ev/day	975 ev/day

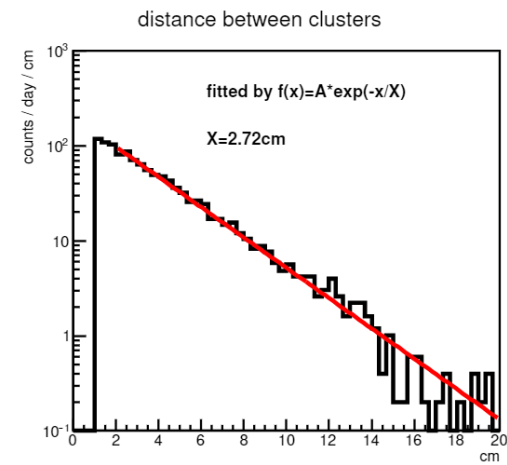
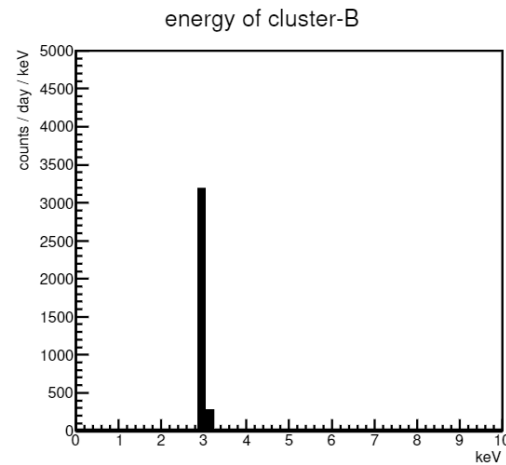
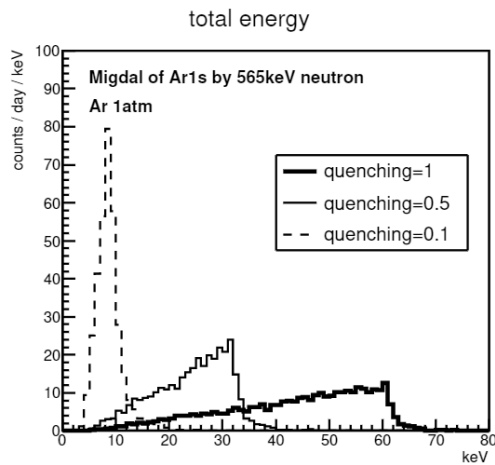


# Migdal signal (Geant4)

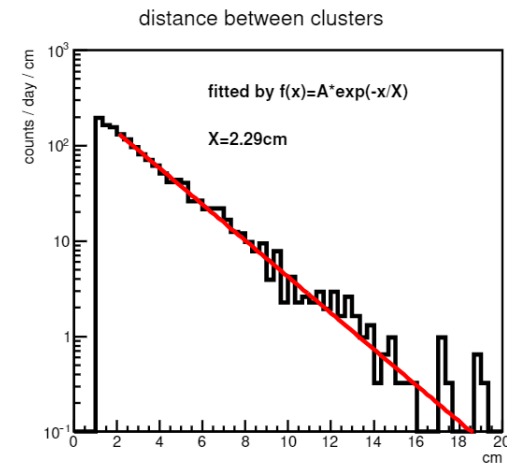
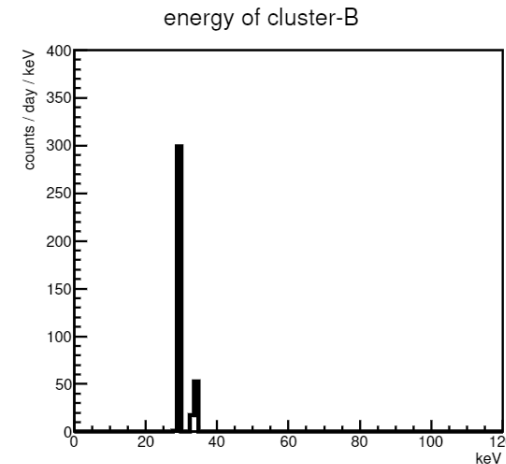
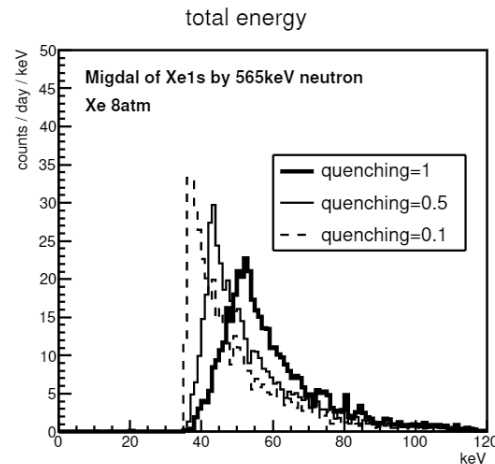
- after "cluster num == 2" selection
- mono-energetic cluster-B
- cluster distance is consistent to X-ray absorption length



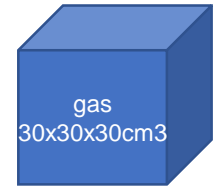
Ar 1atm



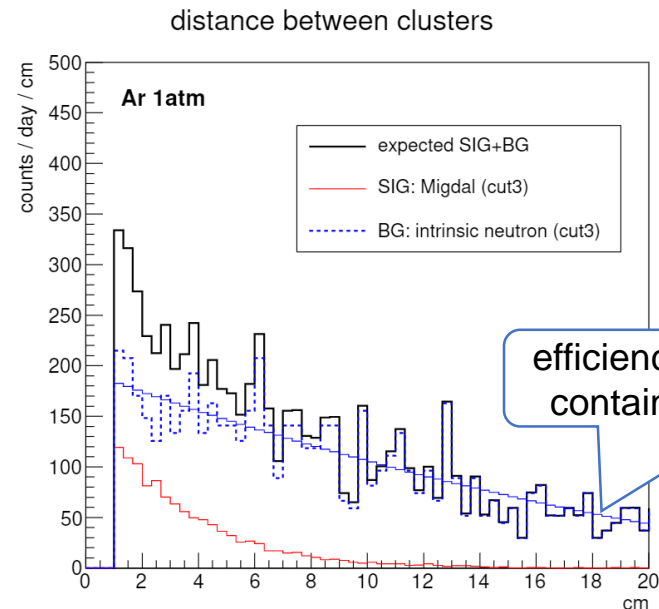
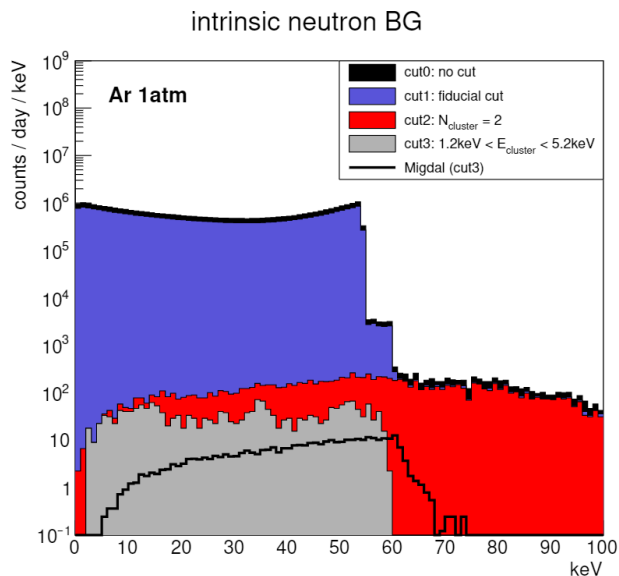
Xe 8atm



# Neutron BG (Ar 1atm)



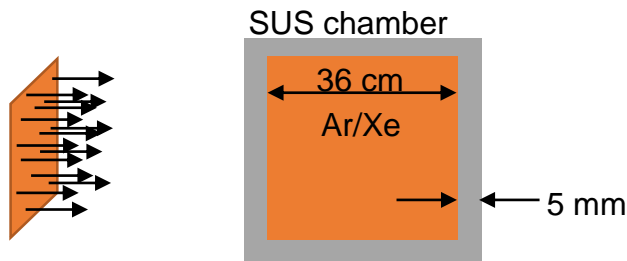
- neutron --> gas target only
- dominant BG : neutron multiple scattering
- cluster distance distribution is different to signal



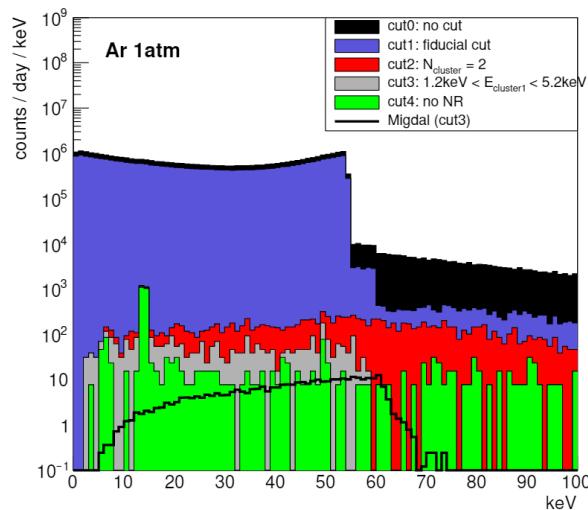
# Gamma ray BG

- Too much BG exist for the simple constitution

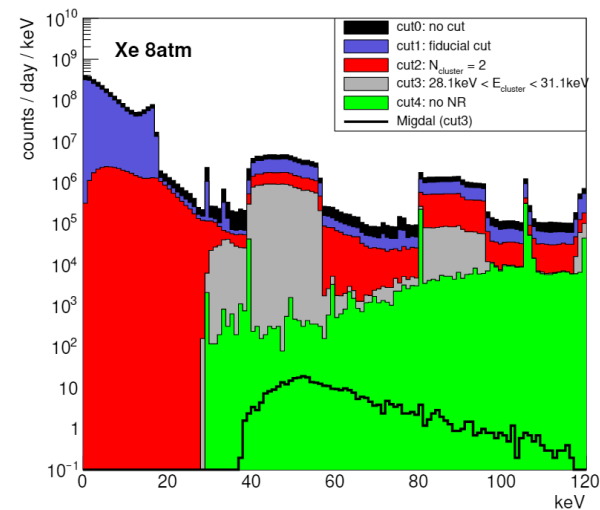
chamber BG



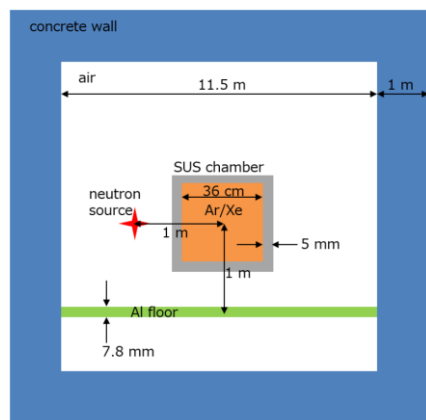
chamber (n, $\gamma$ ) BG + neutron BG



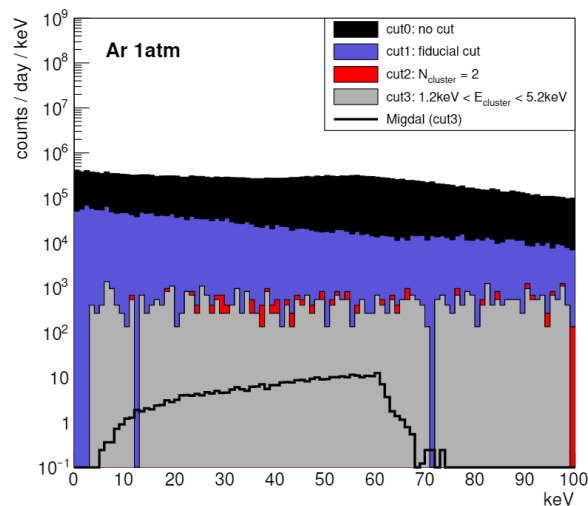
chamber (n, $\gamma$ ) BG + neutron BG



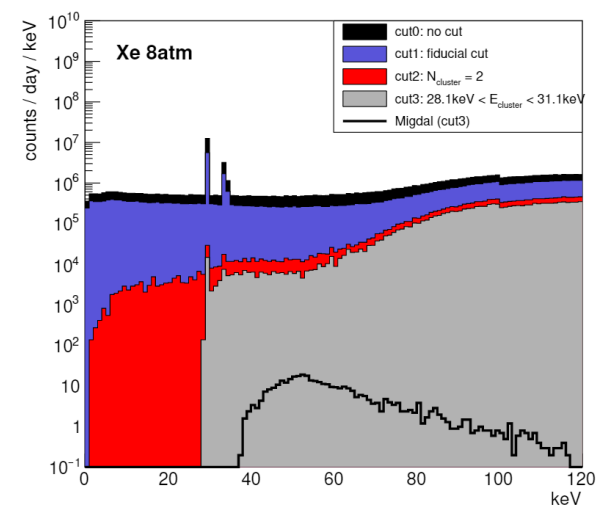
laboratory BG



laboratory (n, $\gamma$ ) BG

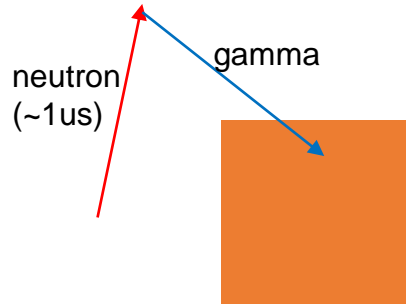


laboratory (n, $\gamma$ ) BG

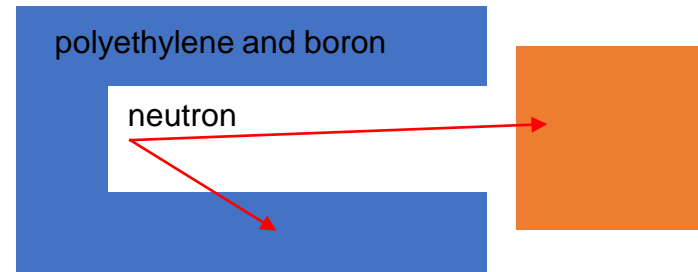


# Idea of BG reduction

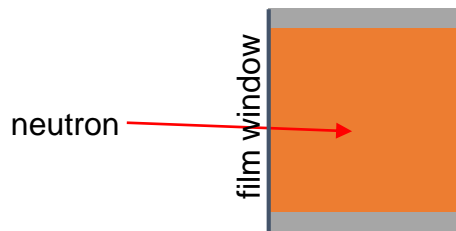
Pulse neutron beam



Neutron shield



Thin chamber



Active shield

