

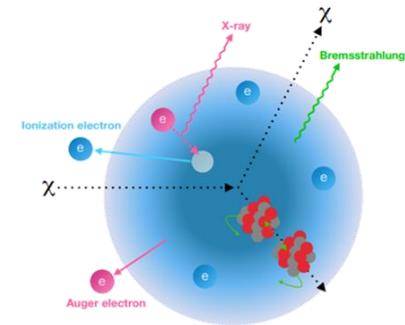
高圧キセノンガス検出器による ミグダル観測

中村輝石(東北大)

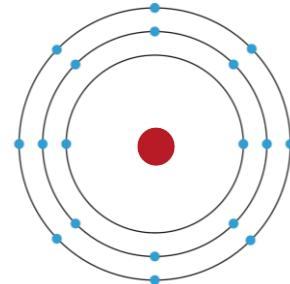
2021/05/20

新学術「地下宇宙」2021年領域研究会

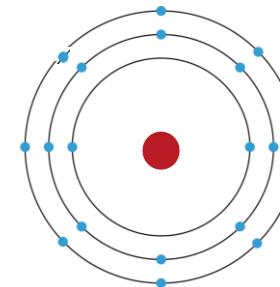
ミグダル効果



- 原子核が急に動くときに追加で電離・励起が起きる(低確率)
- 1939年にミグダルが提唱
- 近年、伊部さんらがDM探索用に計算 (JHEP 03 (2018) 194)



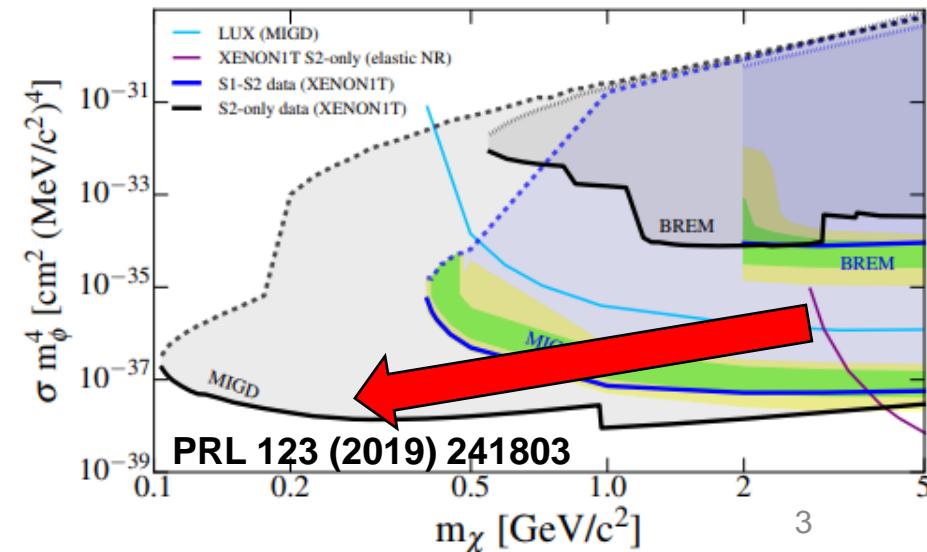
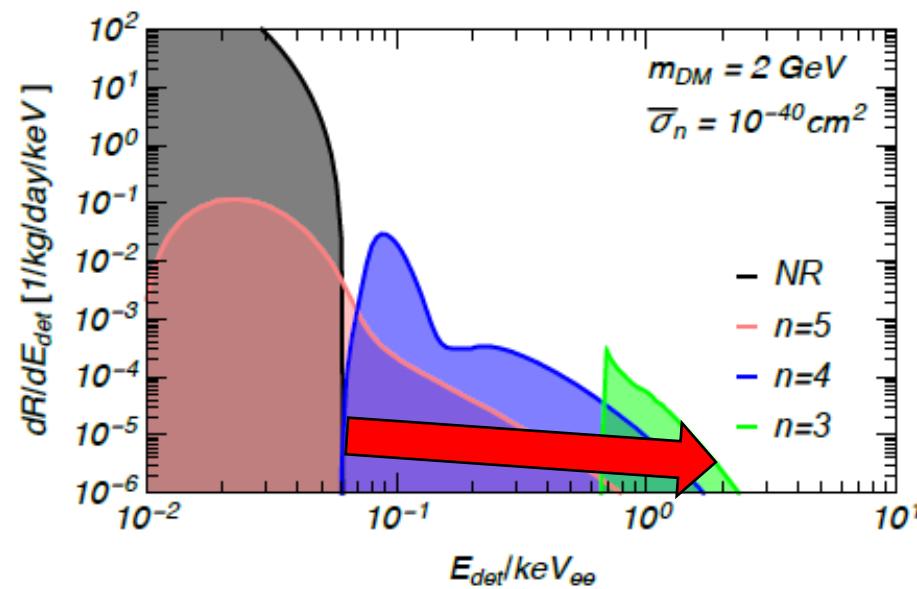
normal



Migdal

暗黒物質探索でのミグダル

- 原子核反跳+ミグダル効果
 - --> 観測エネルギーが増える
 - --> 軽い暗黒物質の感度上昇
- 以下の理解が重要
 - ミグダル効果そのもの
 - electron BG (S2 only)
 - 検出器応答 (NR+ER)



ミグダル解析

- すでに色々やられている

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

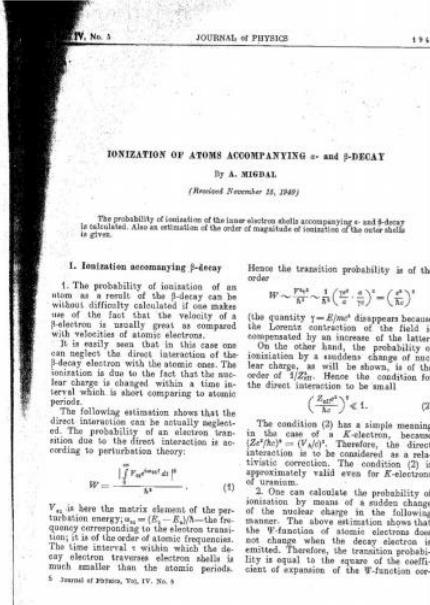
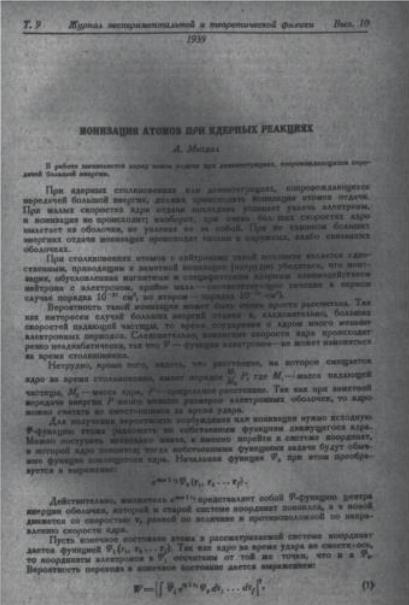
LUX (Xenon): "Results of a Search for Sub-GeV Dark Matter Using 2013 LUX Data", arXiv:1811.1124

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-) |

ミグダルは起きるか？



A. Migdal publications:

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

First observations of the Migdal effect in :

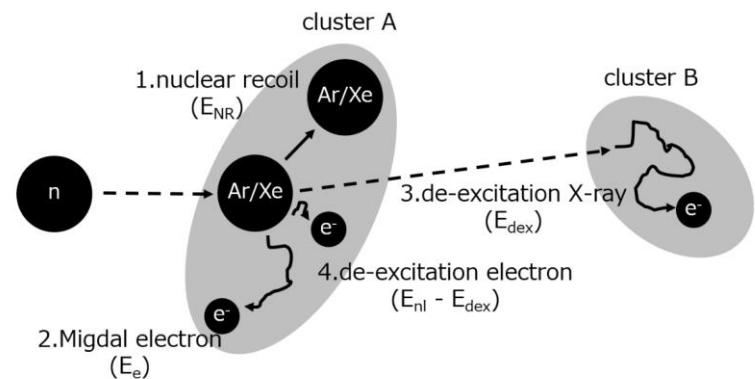
- Alpha decay [3,4,5]
- Beta decay [6,7]
- Positron decay [8]
- Nuclear scattering []

これを測定したい

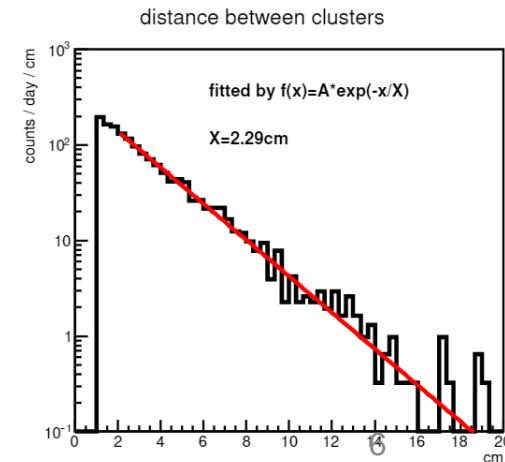
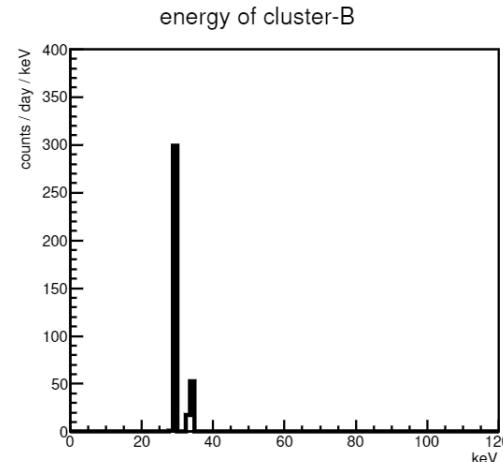
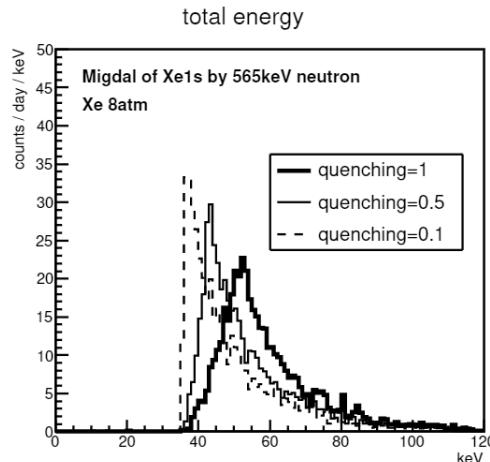
- [1] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri yadernykh reaktsiyakh*, ZhETF, 9, 1163-1165 (1939)
- [2] A. Migdal *Ionizatsiya atomov pri α- i β- raspade*, ZhETF, 11, 207-212 (1941)
- [3] E. E. Berlovich et al., *Investigation of the “jolting” of electron shells of oriented molecules containing ³²P*, Sov. Phys. 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)

中性子ビーム試験 (Geant4)

- キセノンガスTPCに中性子ビームを照射
- クラスター数が2個
- クラスターBは30keV
- クラスター間の距離はX線の吸収長になる
- イベントレートは1000個/日 くらい

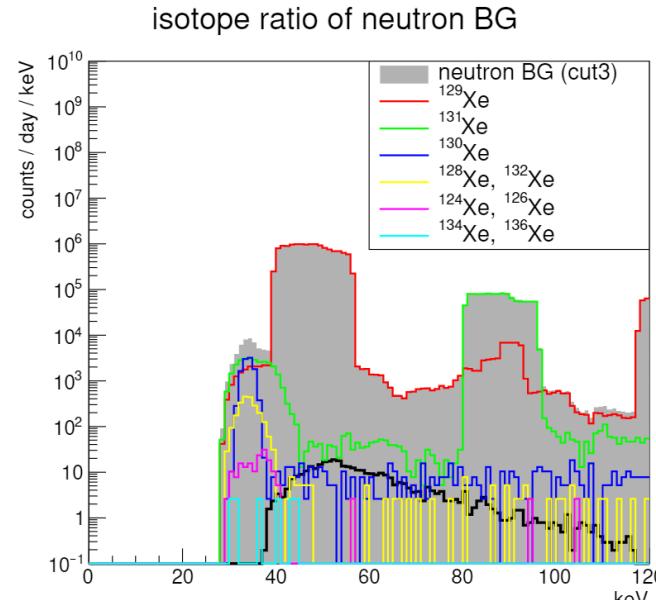
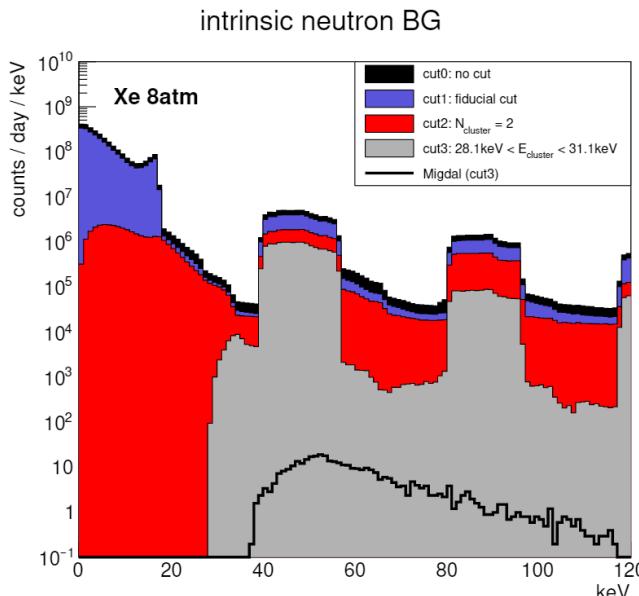
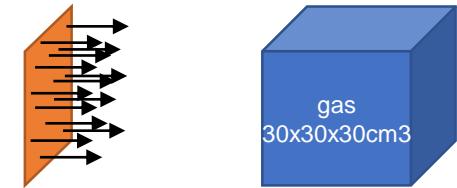


Xe 8atm



中性子 BG (Xe 8atm)

- 中性子をガス標的に照射
- メインのBG:
 - gamma-rays from ^{129}Xe (非弹性散乱)
 - gamma-rays from ^{131}Xe (中性子捕獲)
- いざれは ^{134}Xe , ^{136}Xe の元素濃縮が必要



KamLAND-Zen

| | |
|-------|-------|
| Xe136 | 91% |
| Xe134 | 9% |
| Xe132 | 0.17% |

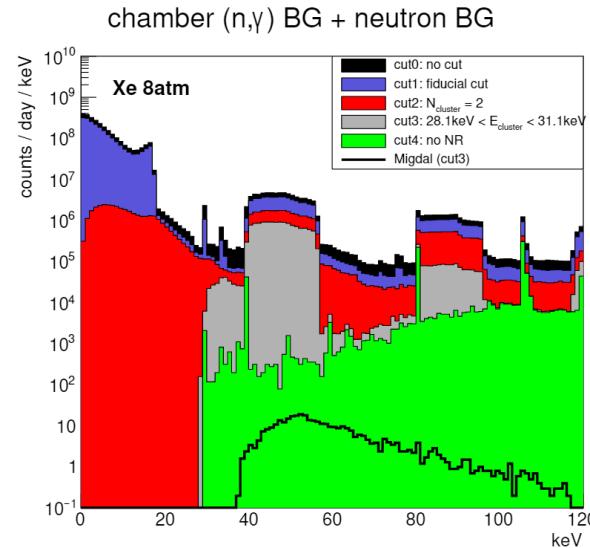
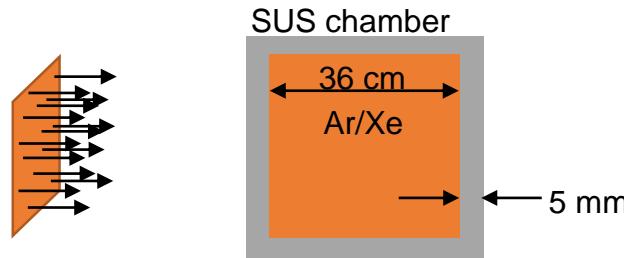
for example

from Kamei

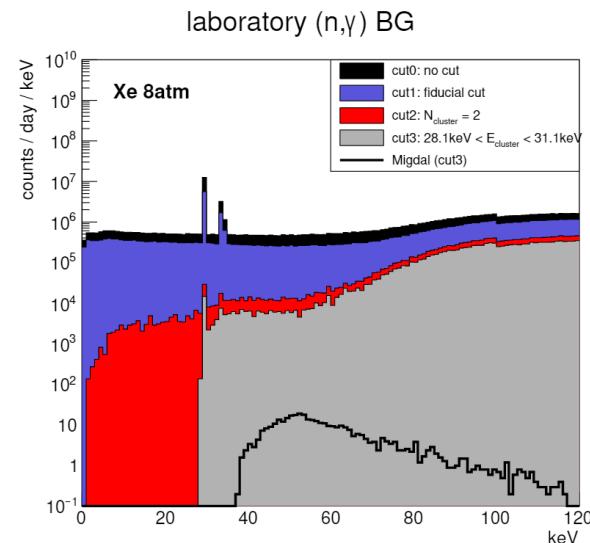
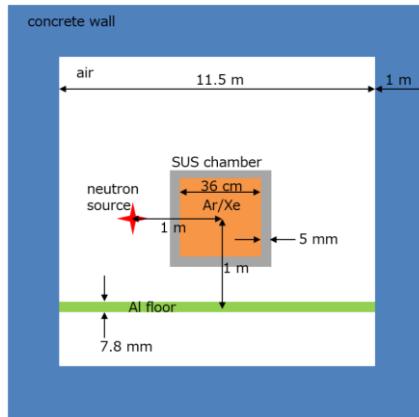
ガンマ線 BG

- ・シンプルな壁・容器を仮定するとたくさんのBGがある

chamber BG



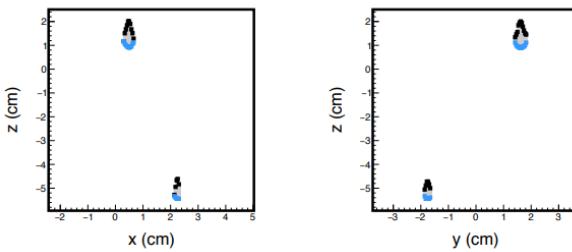
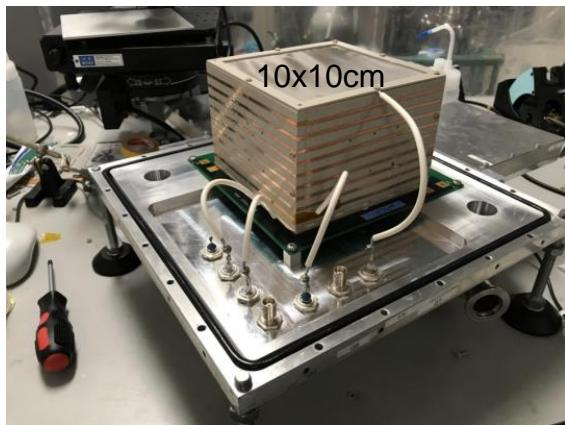
laboratory BG



2-cluster demonstration

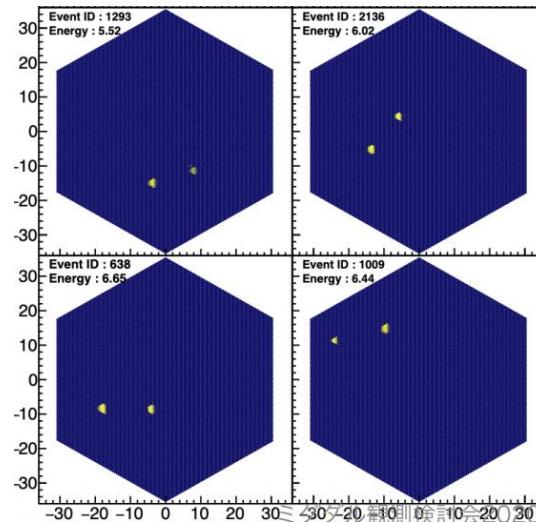
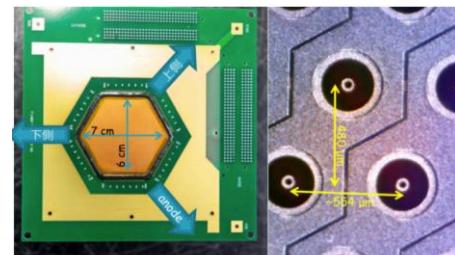
- u-PIC • EL readout ⇒ 使える !

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



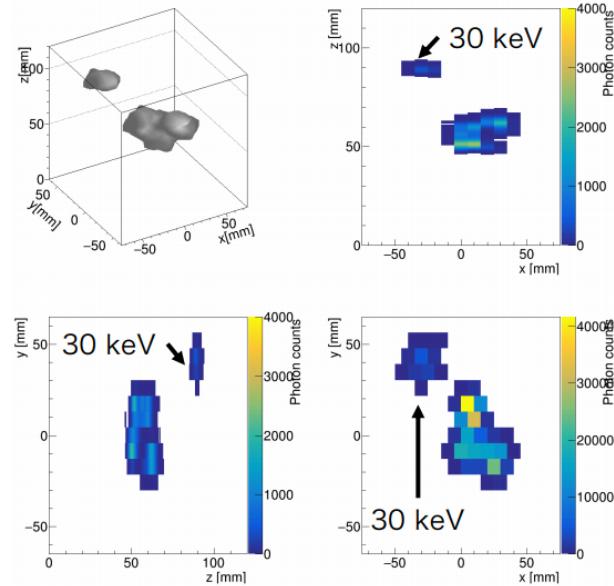
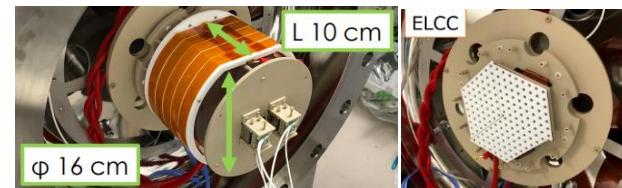
from Shimada

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



from Ikeda

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



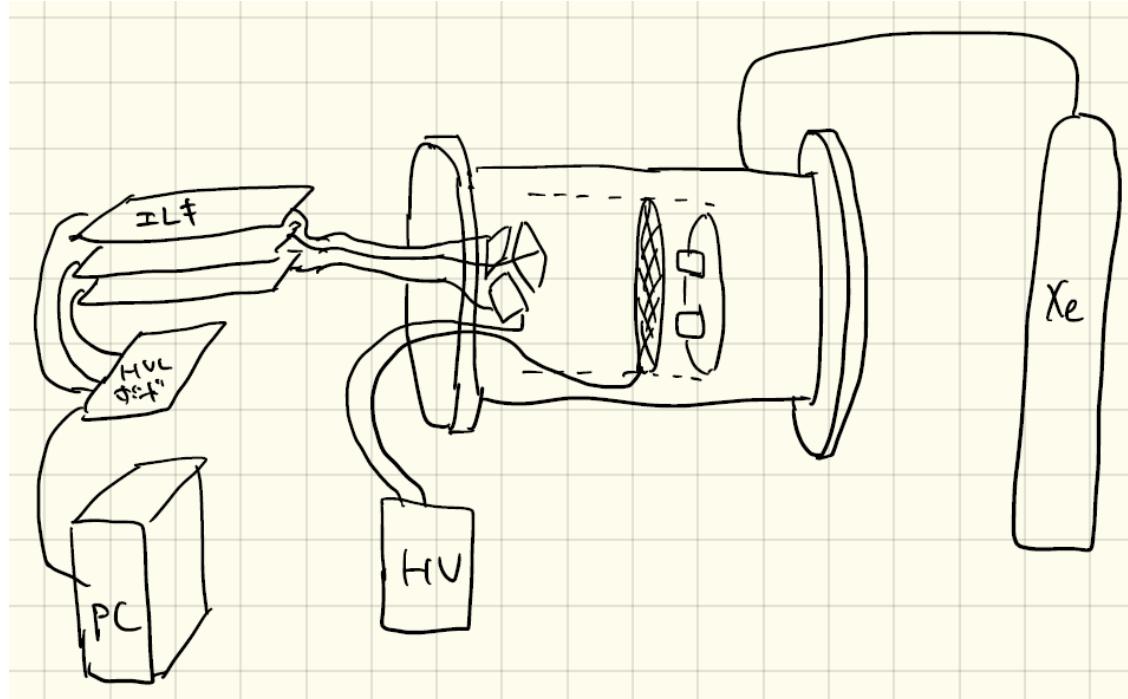
from Yoshida⁹

予定

- 1st neutron beam test (2021)
 - confirm gamma-ray BG
 - inelastic scattering of ^{129}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}Xe enriched xenon
 - observation by Xe

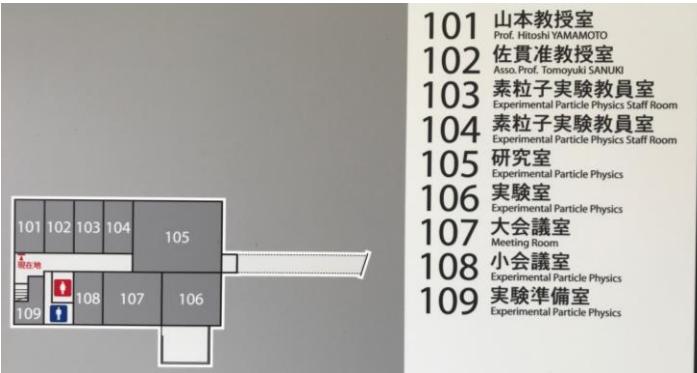
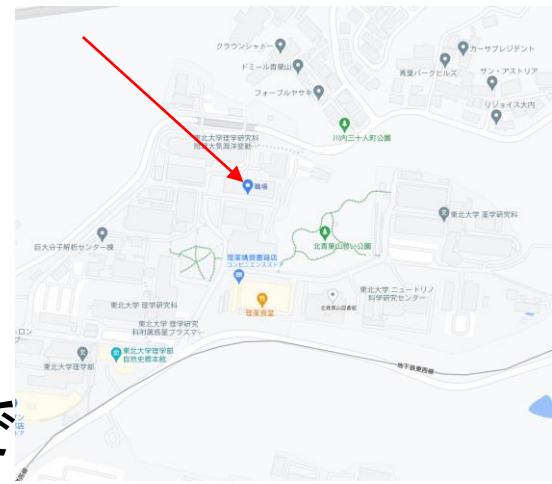
Detector for 1st beam test

- 16cm φ × 10cmの検出領域(168ch)
- 中性子BGとquenchingを測定予定
- 昨年度はエレキと光センサを準備



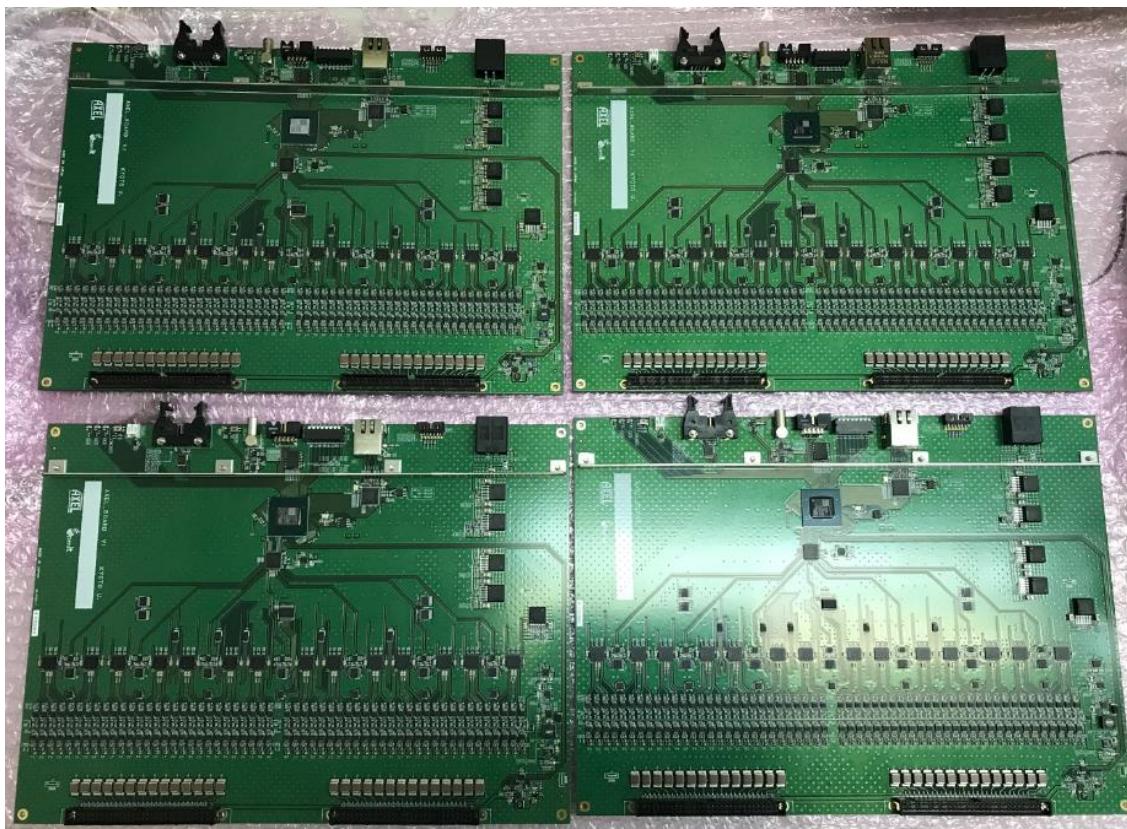
作業場所

- ・東北大の素粒子実験(加速器)研究室
- ・実験室は1つしかないので自分の居室で
- ・前任者の荷物の片付け



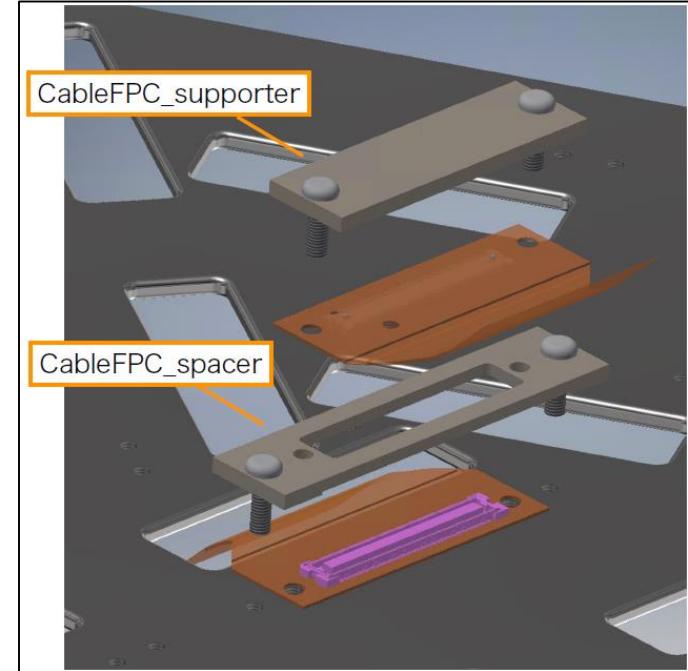
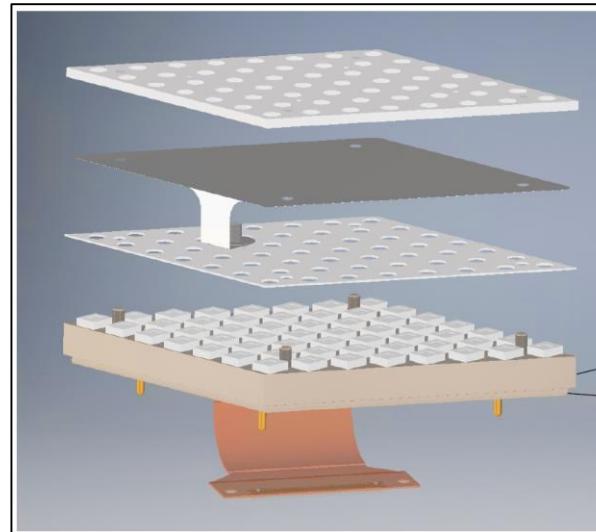
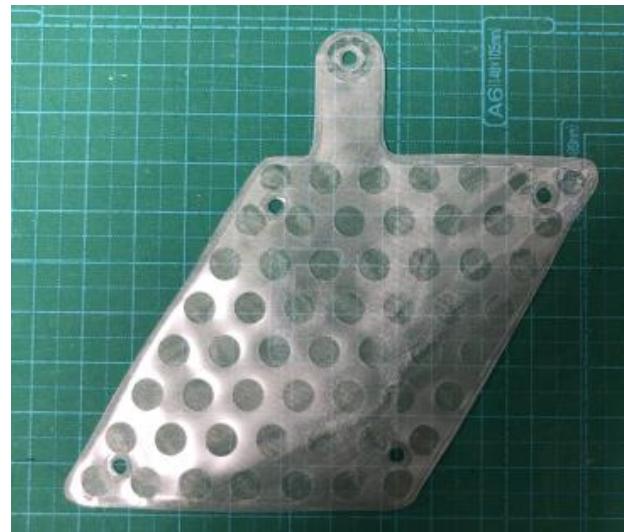
検出器の準備

- 納期が長めの物品
 - 回路(FEBx4、HULx1)
 - FPCケーブル ⇒ フィードスルー
 - ユニットFPC



検出器の準備

- ELCCユニットの開発@京都
 - ほつれの少ないメッシュ
 - 断線しにくい補強材
 - 放電を抑えるPTFE構造
- 5月上旬に京都で組立修行
- AXELで確立した技術を用いる



中村和広

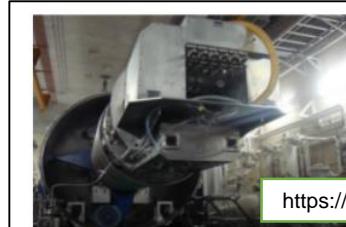
検出器の準備

- AXEL実験に影響を与えない物品を使わせてもらう
 - 圧力容器
 - TPCケージ
 - 不純物が少し混じったXe(?)



ビームテスト(1st step)の準備

- 神戸大のArチームとの協力
 - 定期的にミーティング
 - 10月にビームテストをすることにした
 - 共有できる物品(シールドや環境測定用検出器、ポンプなど)
- AISTとの連絡
 - 10月ビーム試験
 - 7月に詳細計画を伝える
 - パルス化は来年度以降に実装予定とのこと



ペレトロン加速器/パルス化装置。ペレトロン加速器でパルスビーム生成できるようになりました。

<https://unit.aist.go.jp/rima/ract-neu/neutron/newhp.html>

ビームテスト(2nd以降)にむけて

- SARAF@イスラエル

- 4/13にDARWINのwebinarでMigdal観測を紹介
- そのときのhostのRannyさんからパルス中性子ビームの情報をおいただいた
- p,D反応の中性子でエネルギーは高め
- 11月開催のMPGD研究会で見に行ける？



<https://rd51-public.web.cern.ch/meetings-mpgd>

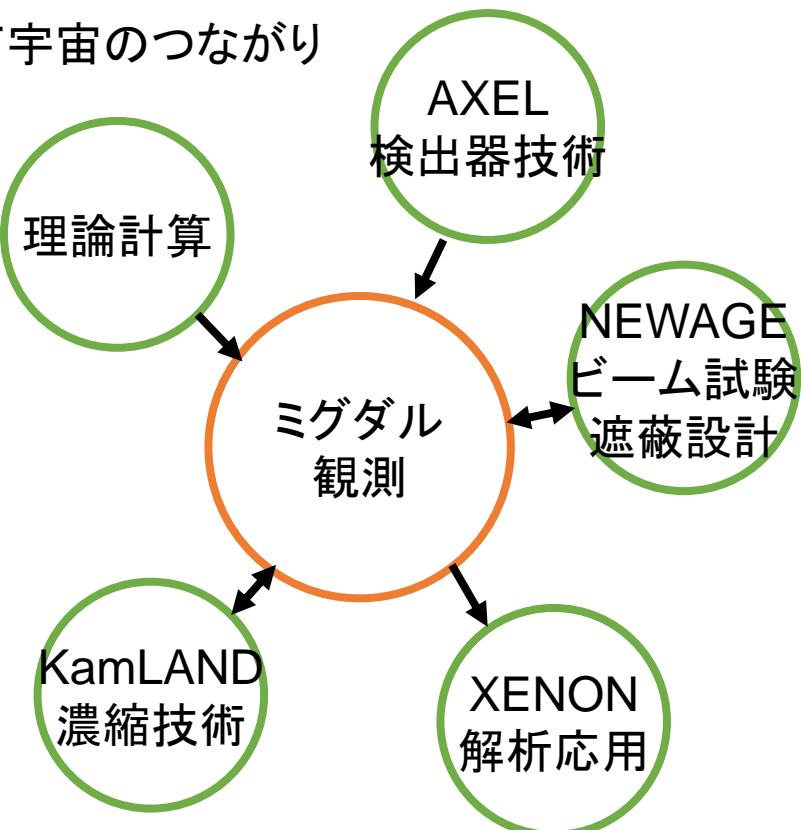
MPGD conferences

- MPGD2021 - 7th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors (Rehovot, Israel, 14-19 November 2021)
- [MPGD2019 - 6th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(La Rochelle, France, 5-10 May 2019\)](#)
- [MPGD2017 - 5th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(Philadelphia, USA, 22-26 May 2017\)](#)
- [MPGD2015 - 4th International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(Trieste, Italy, 12-15 October 2015\)](#)
- [MPGD2013 - 3rd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(Zaragoza, Spain, 1-4 July 2013\)](#)
- [MPGD2011 - 2nd International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(Kobe, Japan, 29 August - 1 September 2011\)](#)
- [MPGD2009 - 1st International Conference on Micro Pattern Gaseous Detectors \(Kolympari, Crete, 12-15 June 2009\)](#)

まとめ

- 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したい
- 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 ⇒ PTEP 013C01 (2021)
 - 1st stepとして中性子BGとquenchingの測定を目指す
 - 検出器準備中
 - **10月に予定してますので、結果をお楽しみに！**

地下宇宙のつながり



キセノンの同位体濃縮

- 134Xeや136Xe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 ✖ 東大 ✖ k.n ✖ ✖

3月9日(火) 15:34 ☆ ↵ 全員に返信

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。イーエナジー斎藤です。
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「カムランド禪」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をカムランド禪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
双日パ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。

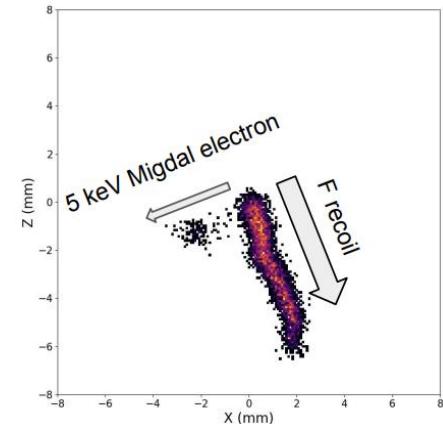
+++++
イーエナジー株式会社
営業部燃料輸送グループ 斎藤美紀

〒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
URL <https://www.e-energy.co.jp>

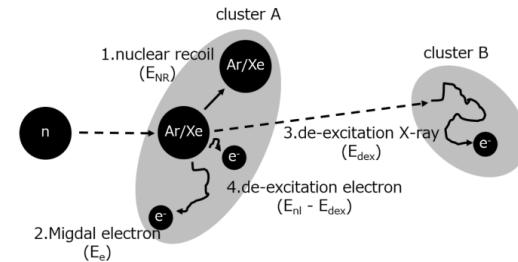
Migdal observation experiments

- 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)

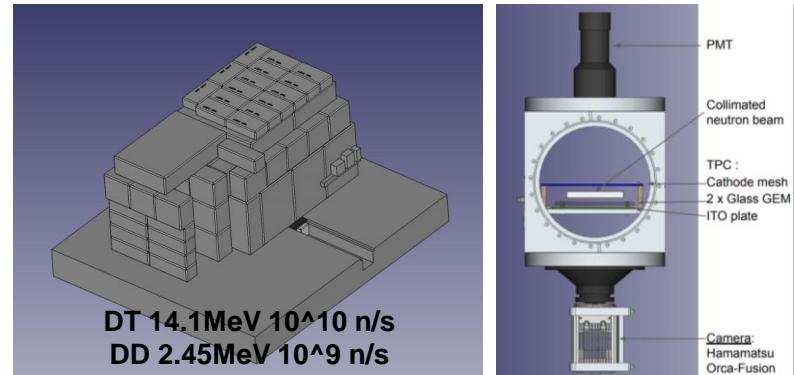
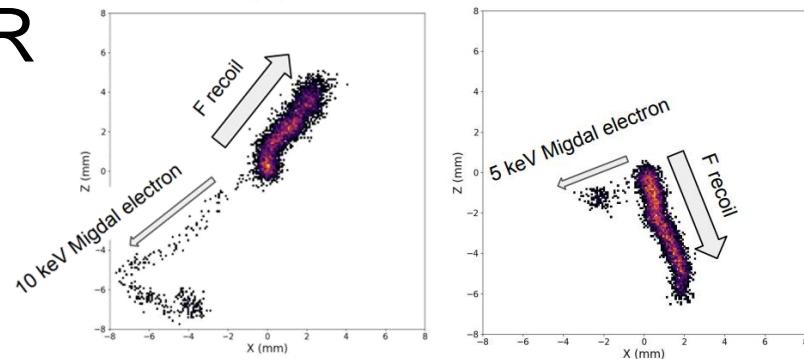


- 2. Our idea
 - search for NR events associated with de-excitation X-ray as a second cluster
 - use position sensitive gaseous detector (Ar 1atm/Xe 8atm)

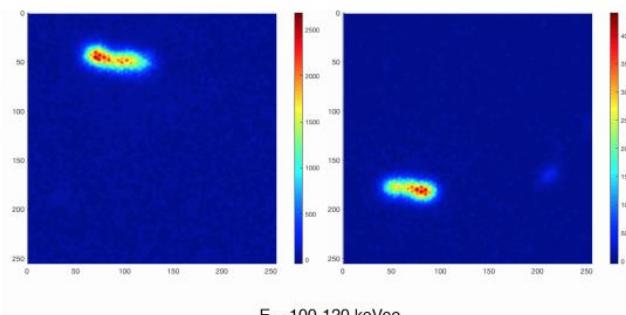
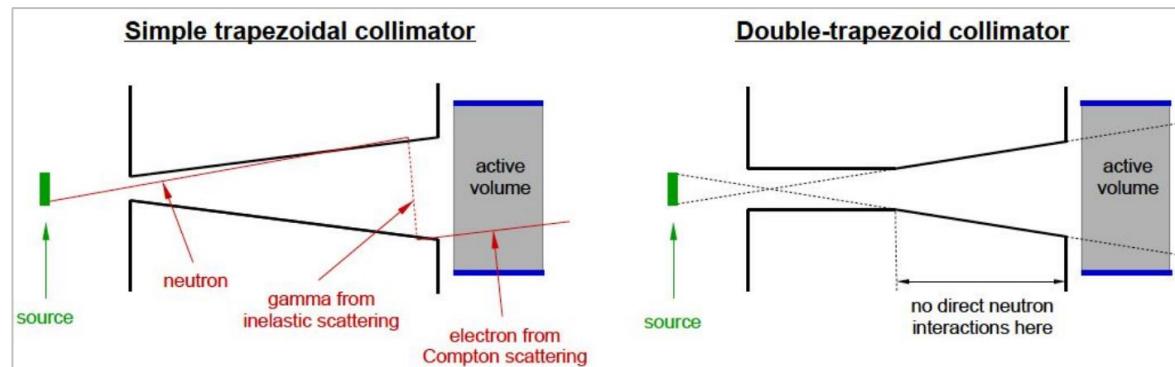
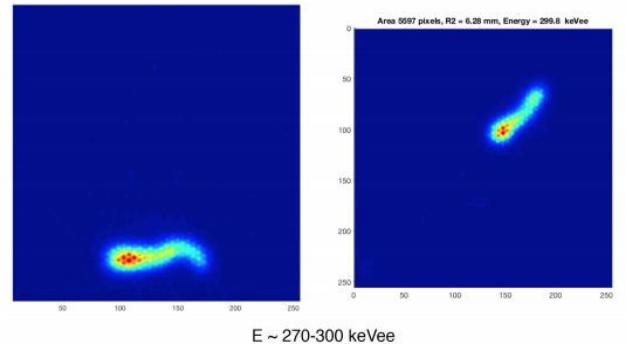


MIGDAL collaboration

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

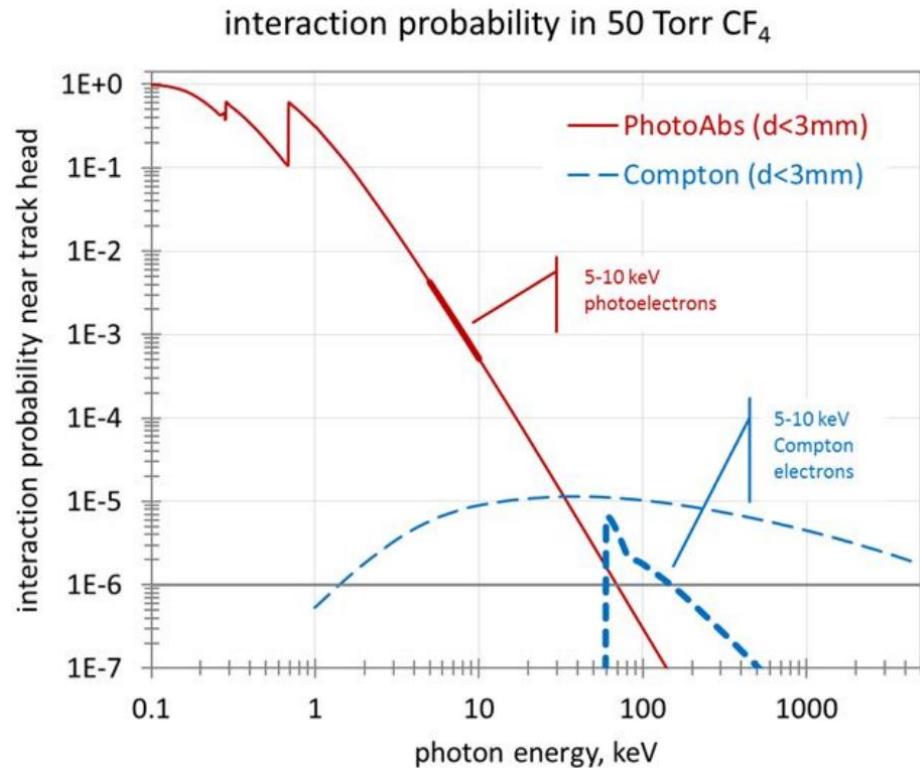


NR captured in the OTPC system at UNM by D. Loomba et al.



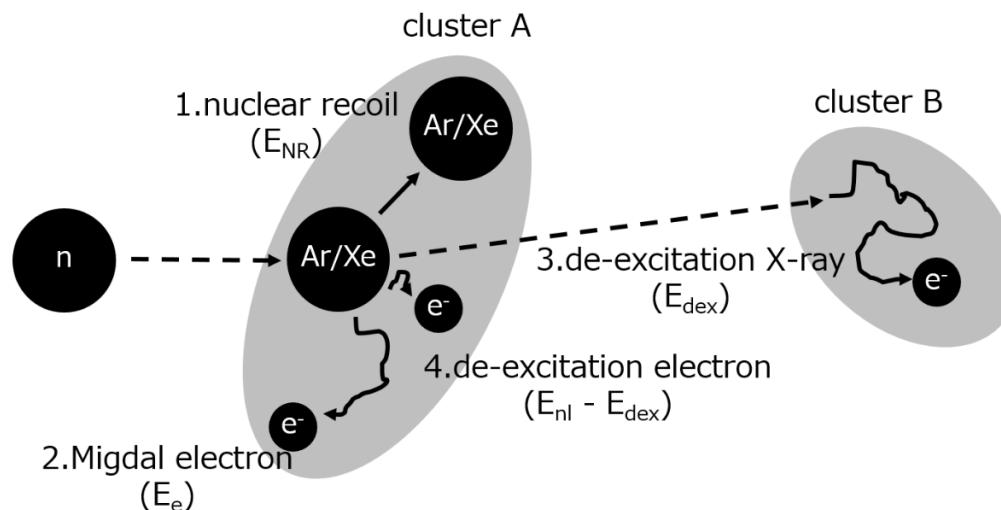
MIGDAL collaboration

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



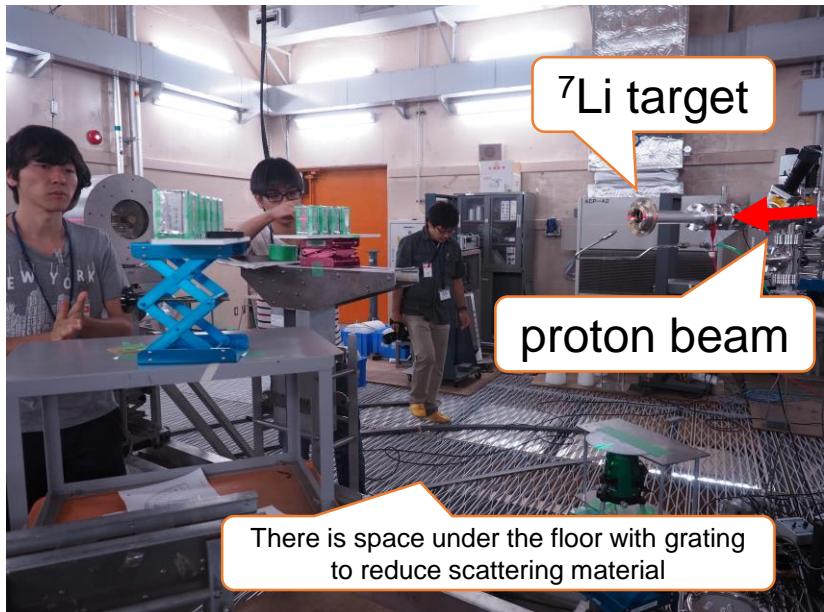
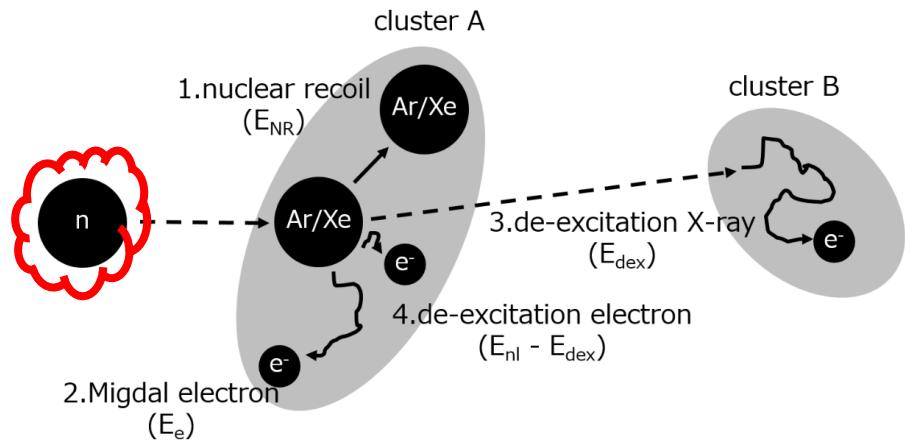
Our idea

- 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/cm² (at 1m)

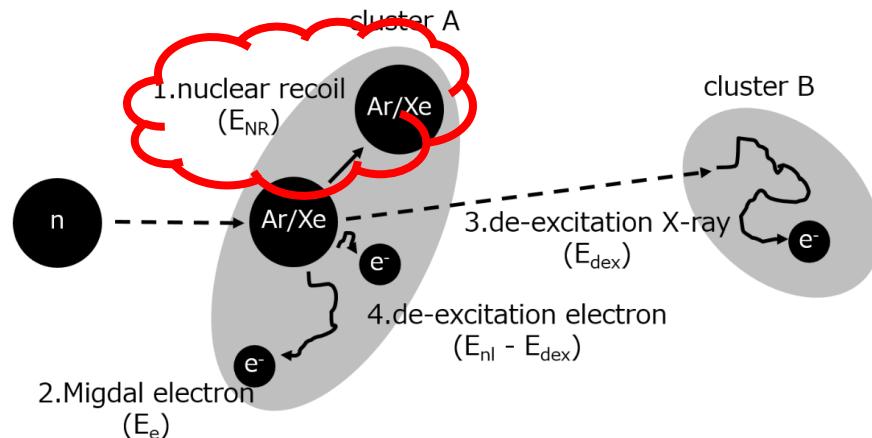


neutron beam lines in Japan

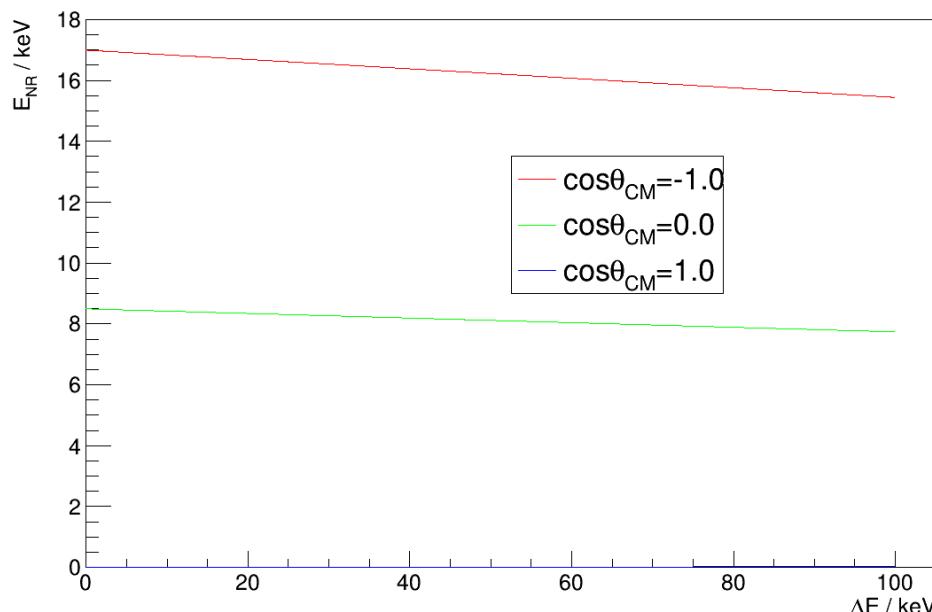
from Higashino

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

Nuclear recoil

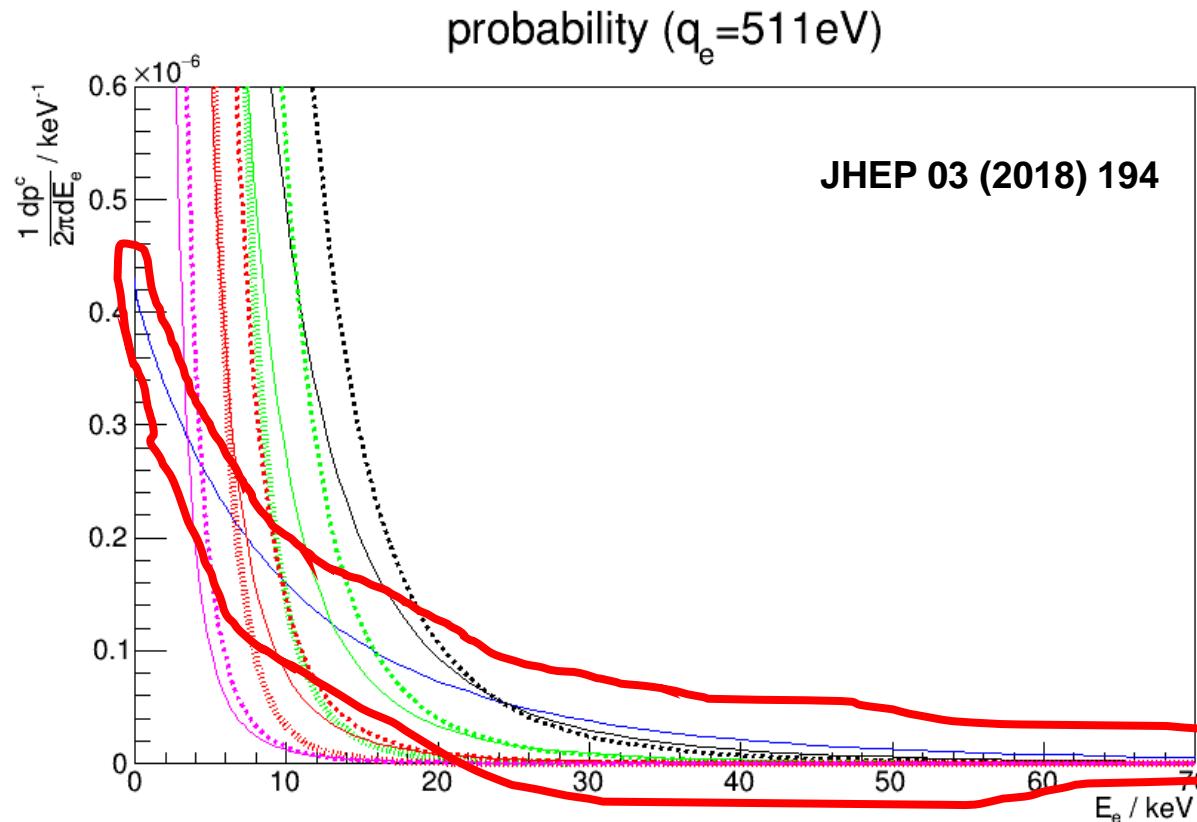
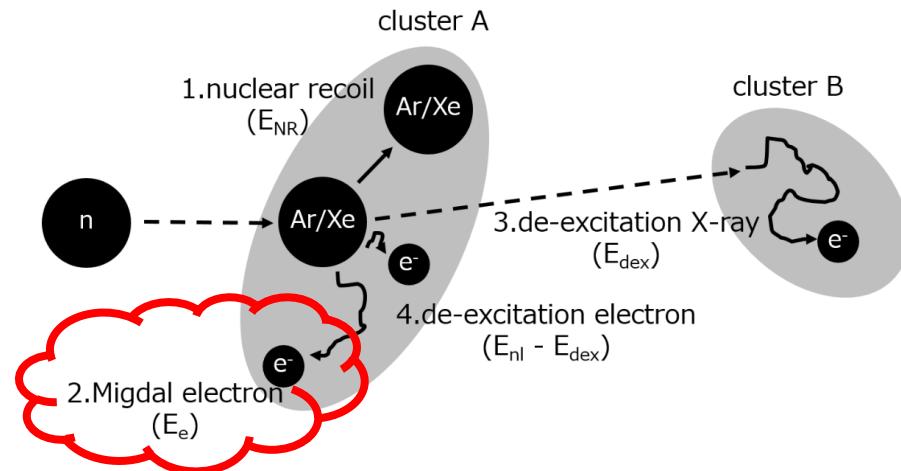


- "inelastic" effect is seen a little
 - due to transferred energy ($\Delta E = E_e + E_{nl}$)
 - Take into account it to the Geant4 simulation



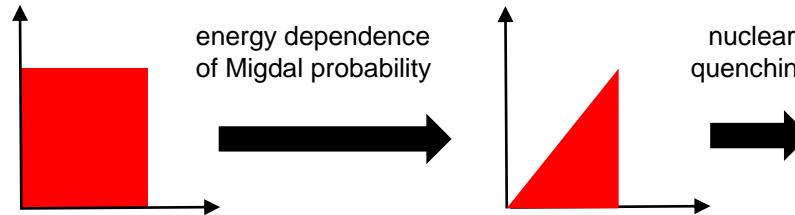
Migdal electron

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



Migdal signal

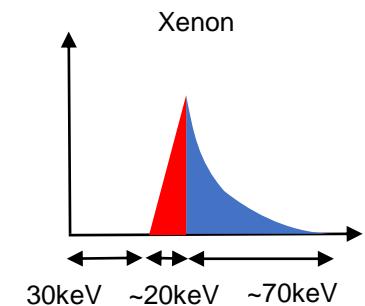
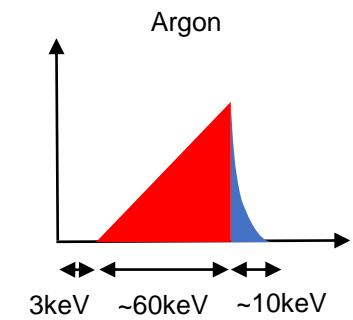
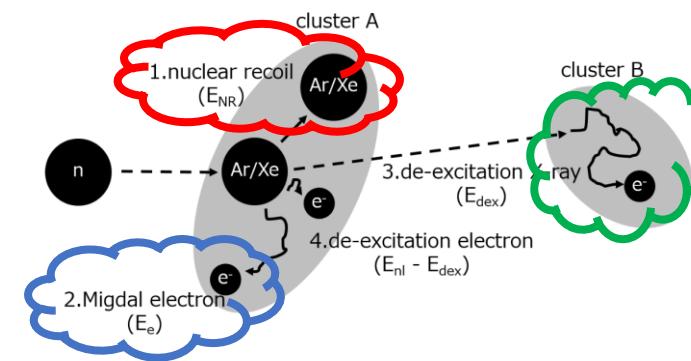
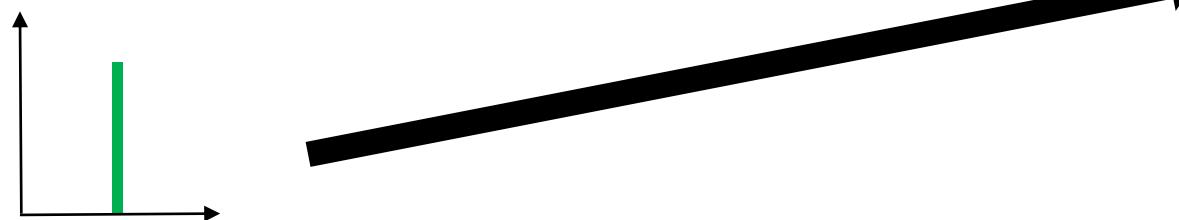
- nuclear recoil



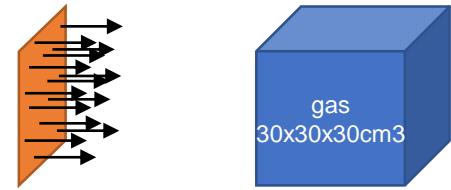
- Migdal electron



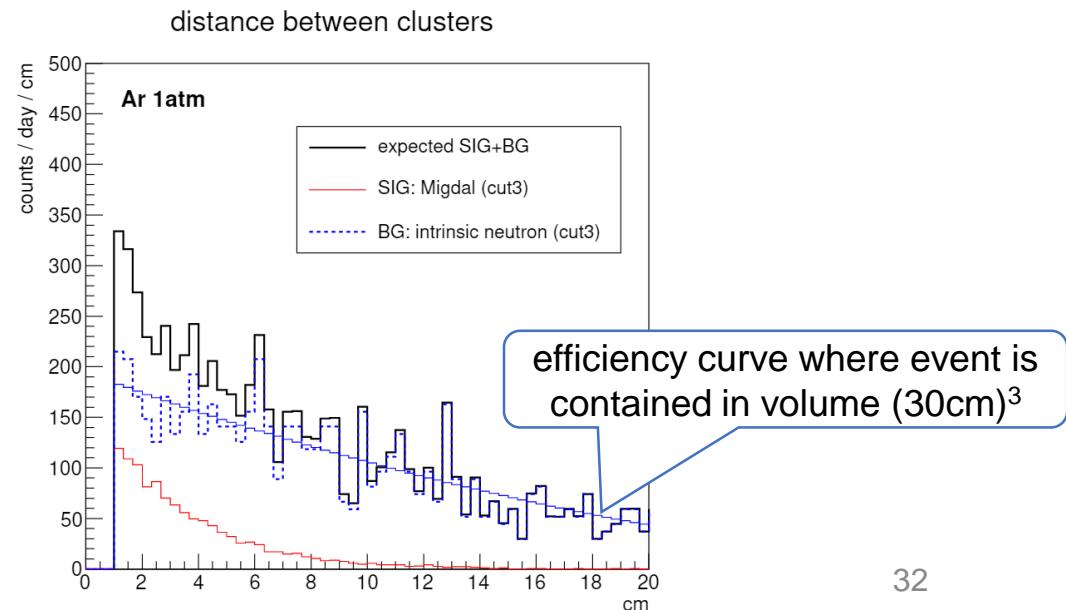
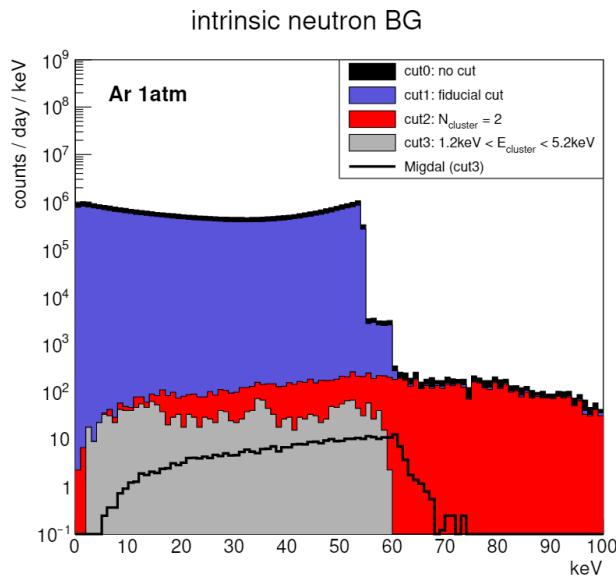
- de-excitation X-ray



Neutron BG (Ar 1atm)

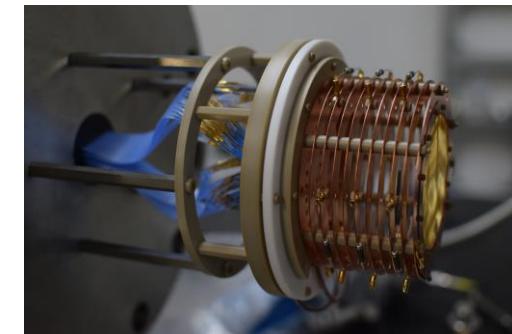
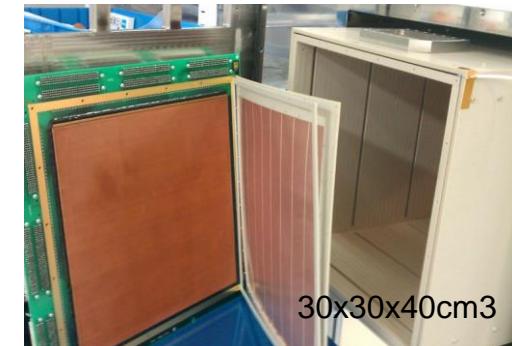


- neutron --> gas target only
- dominant BG : neutron multiple scattering
- cluster distance distribution is different to signal

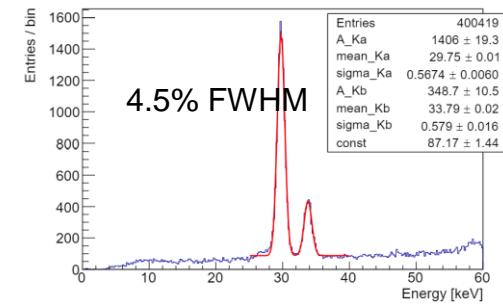


Existing gas detector

- 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

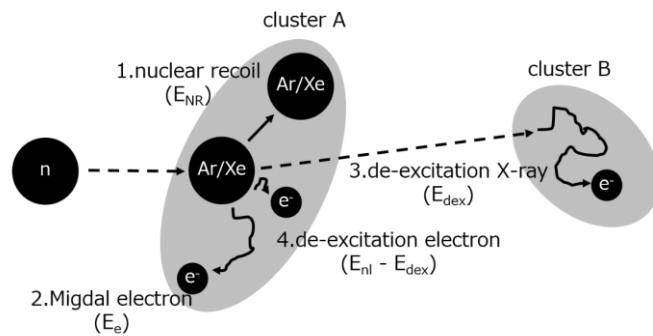


| target | Ar 1atm | Xe 8atm |
|--------------------|------------|------------|
| K-shell energy | 4keV | 30keV |
| absorption length | 2.95cm | 2.19cm |
| fluorescence yield | 0.14 | 0.9 |
| event rate | 603 ev/day | 975 ev/day |

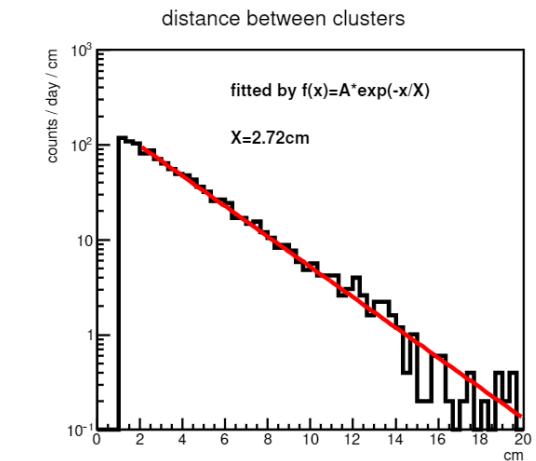
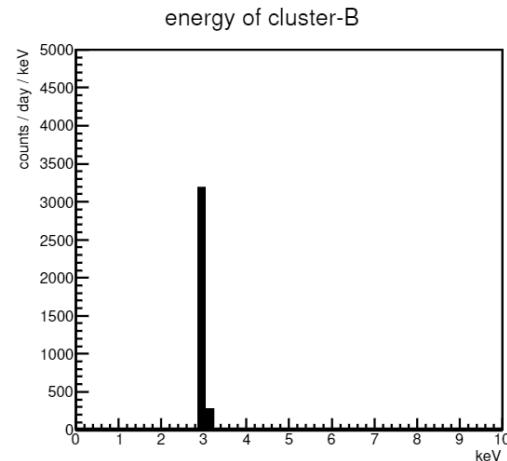
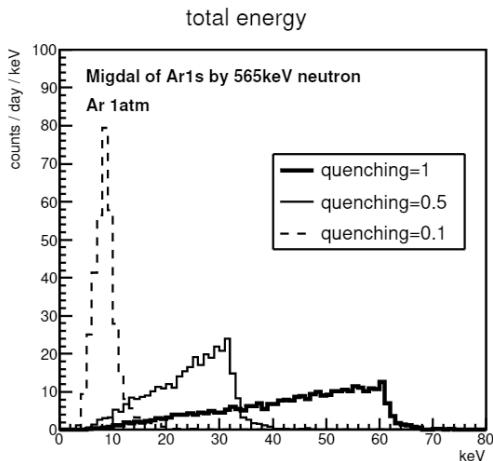


Migdal signal (Geant4)

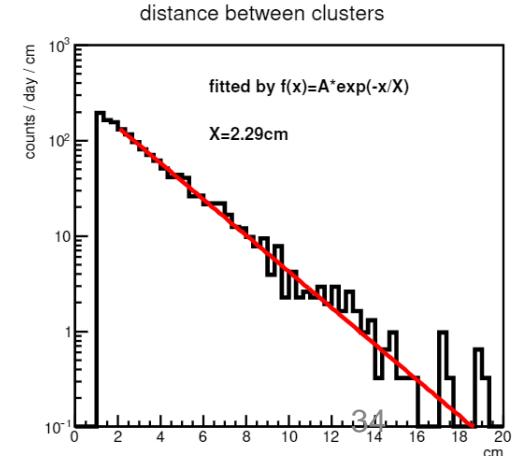
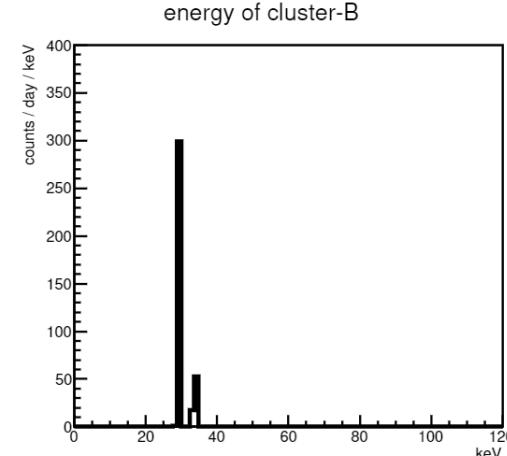
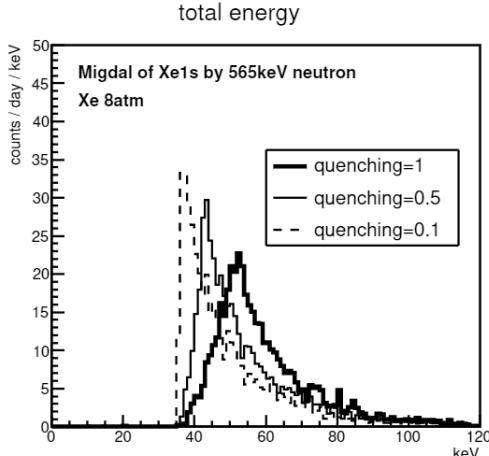
- after "cluster num == 2" selection
- mono-energetic cluster-B
- cluster distance is consistent to X-ray absorption length



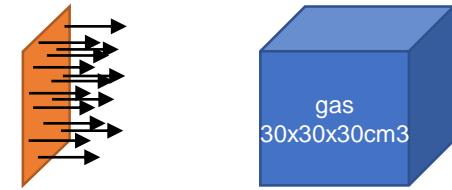
Ar 1atm



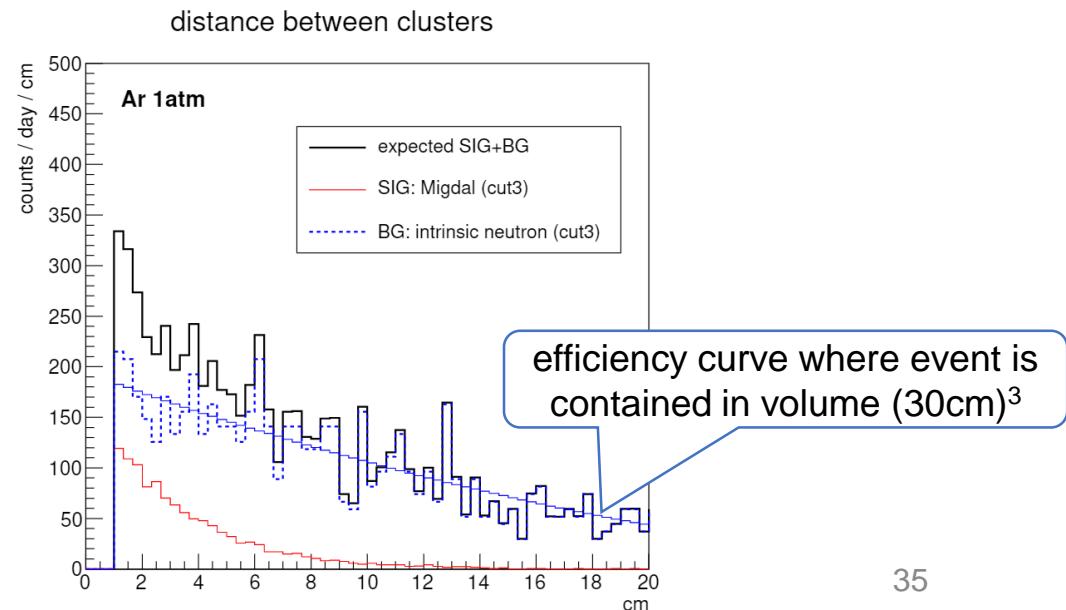
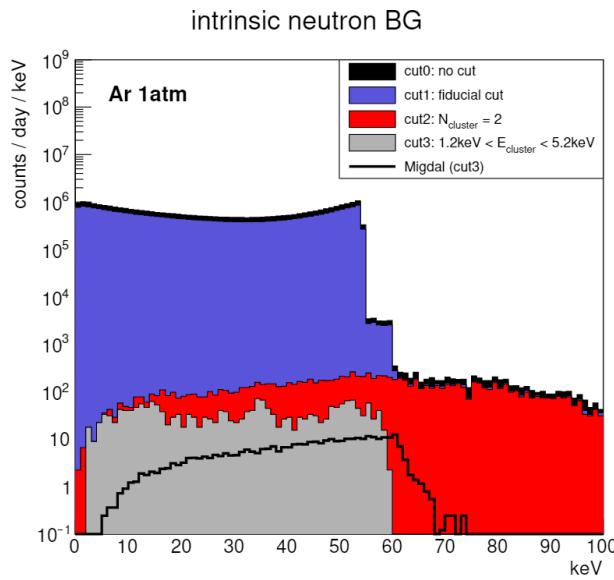
Xe 8atm



Neutron BG (Ar 1atm)



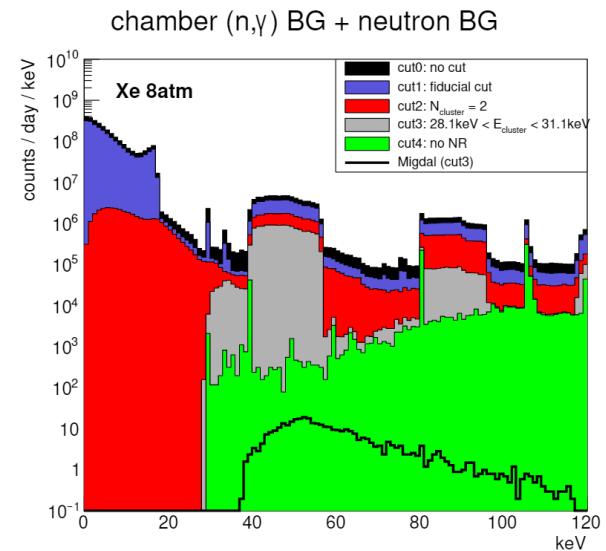
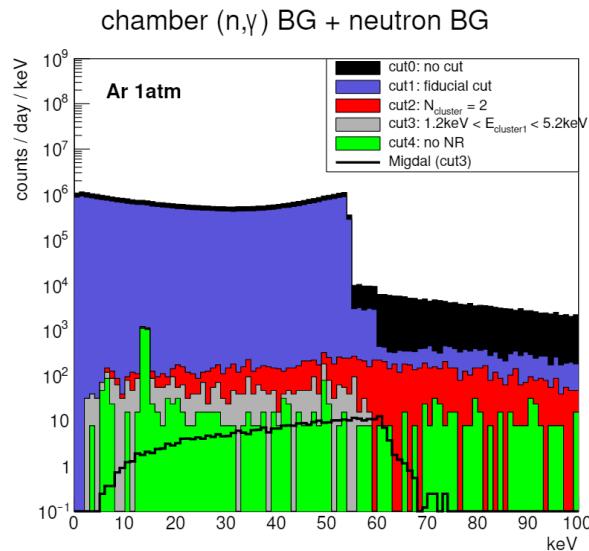
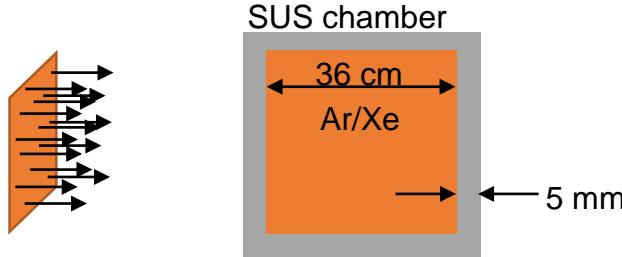
- neutron --> gas target only
- dominant BG : neutron multiple scattering
- cluster distance distribution is different to signal



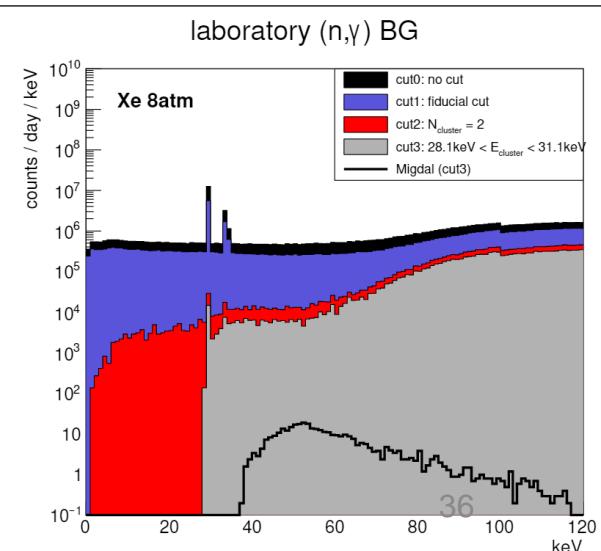
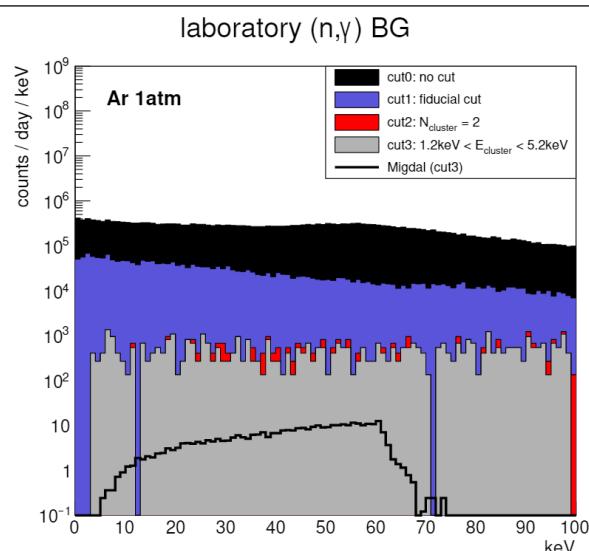
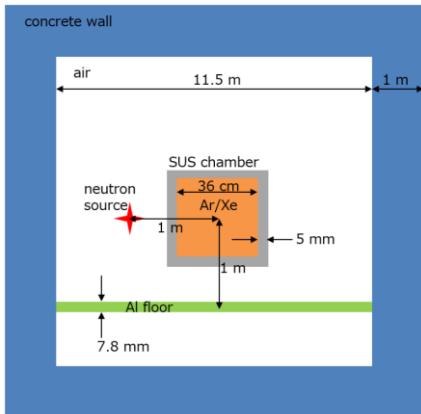
Gamma ray BG

- Too much BG exist for the simple constitution

chamber BG

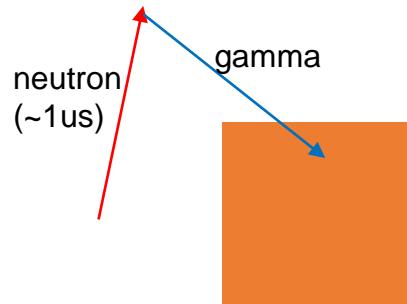


laboratory BG

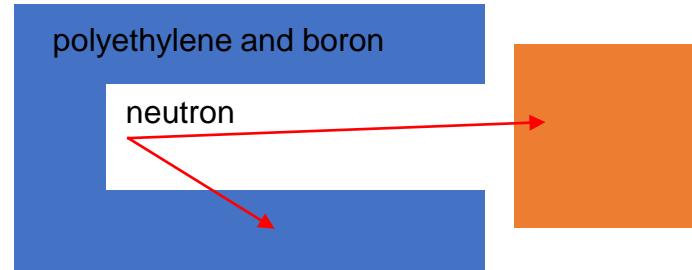


Idea of BG reduction

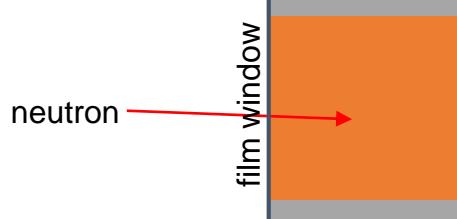
Pulse neutron beam



Neutron shield



Thin chamber



Active shield

