

ガス検出器による方向に感度を持つ暗黒物質探索

神戸大学 東野聡

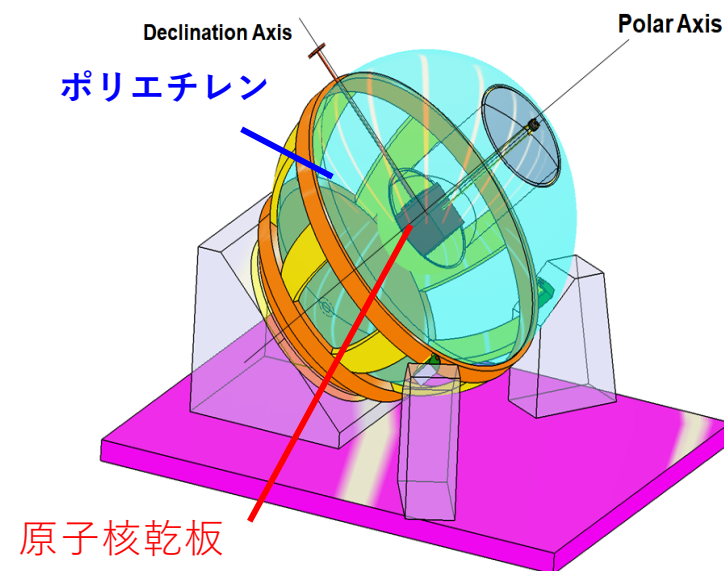
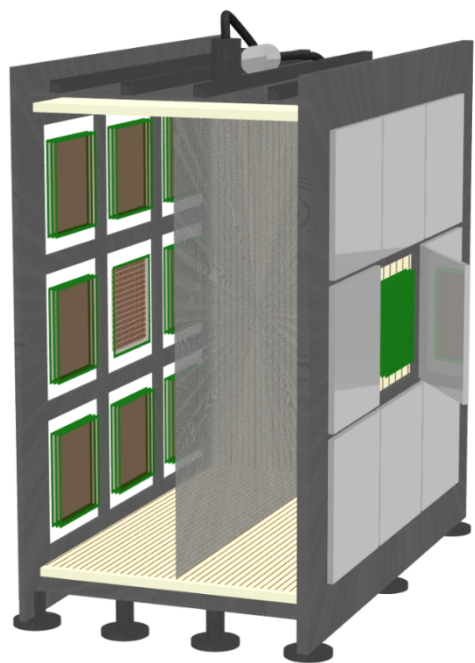
計画研究B02

代表者：身内賢太郎(神戸大学)

分担者：中竜大(東邦大学)

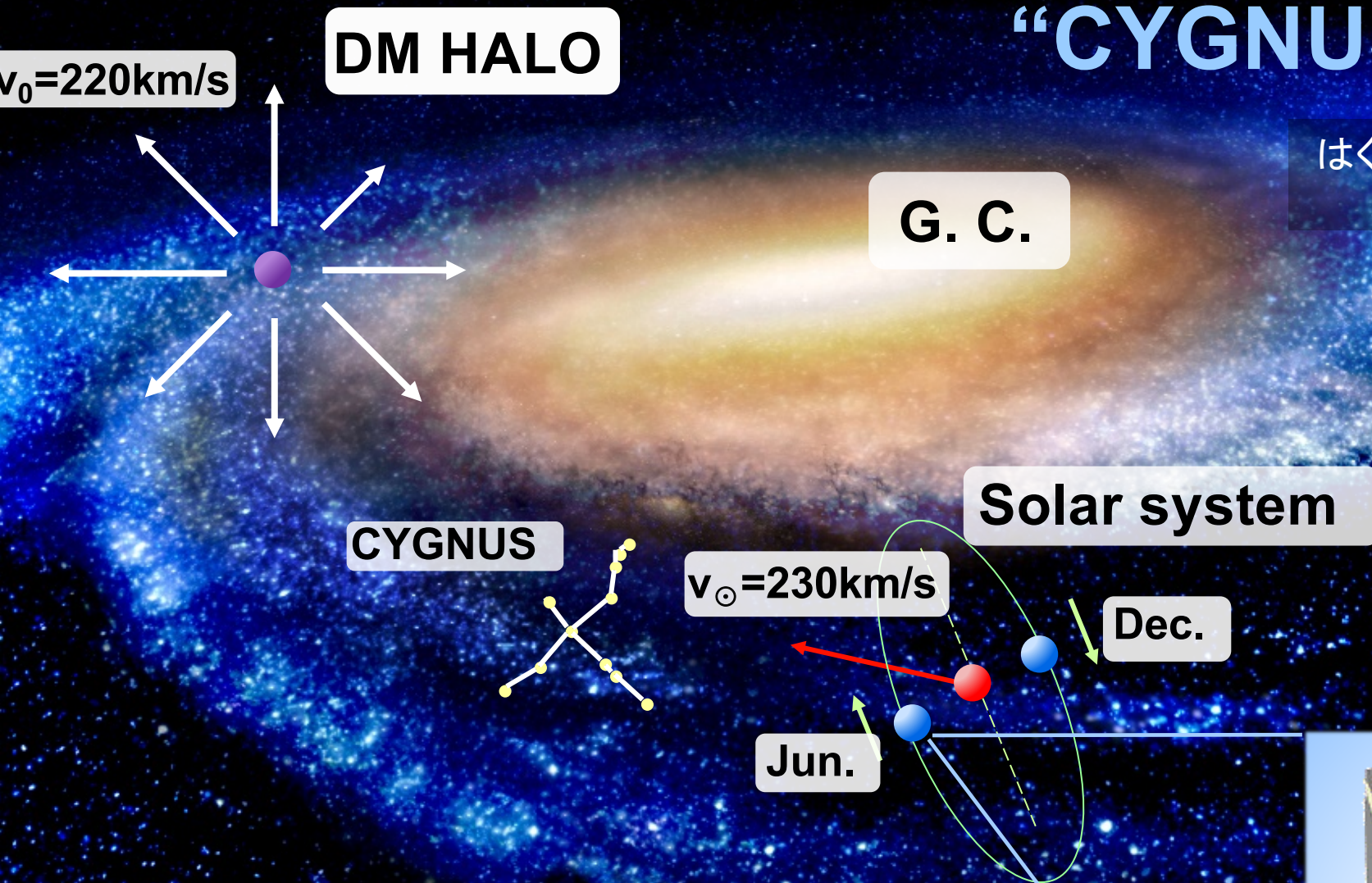
分担者：小川洋(日本大学)

2021年5月20日
新学術領域研究「地下宇宙研究」
第3回領域研究会



“CYGNUS” concept

はくちょう座の方向から吹き付け
暗黒物質の風を検



CYGNUS

Solar system

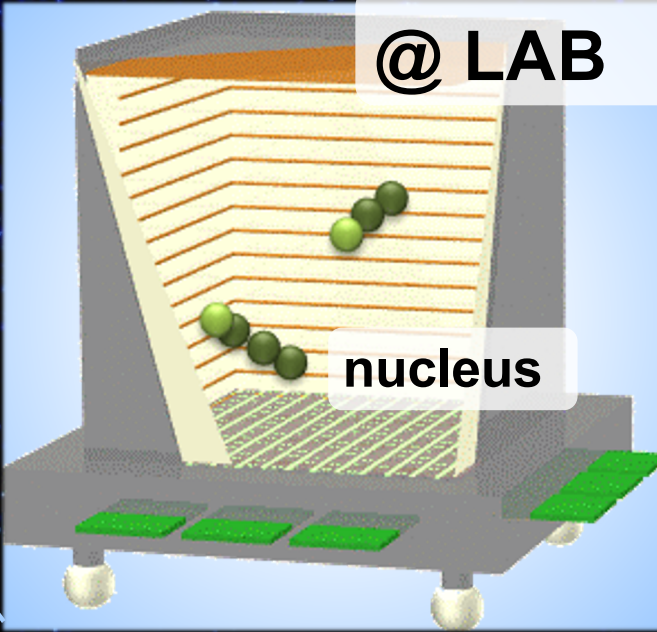
$v_{\odot}=230\text{km/s}$

Dec.

Jun.

@ LAB

nucleus

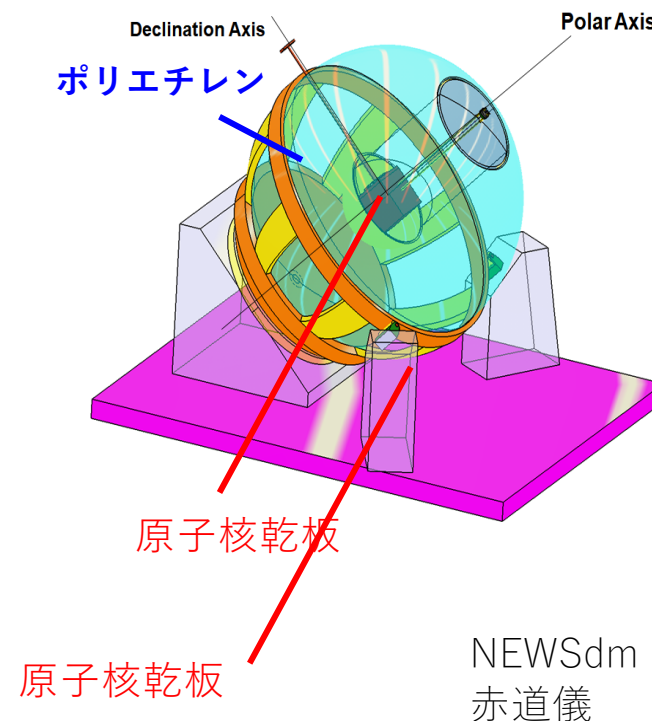
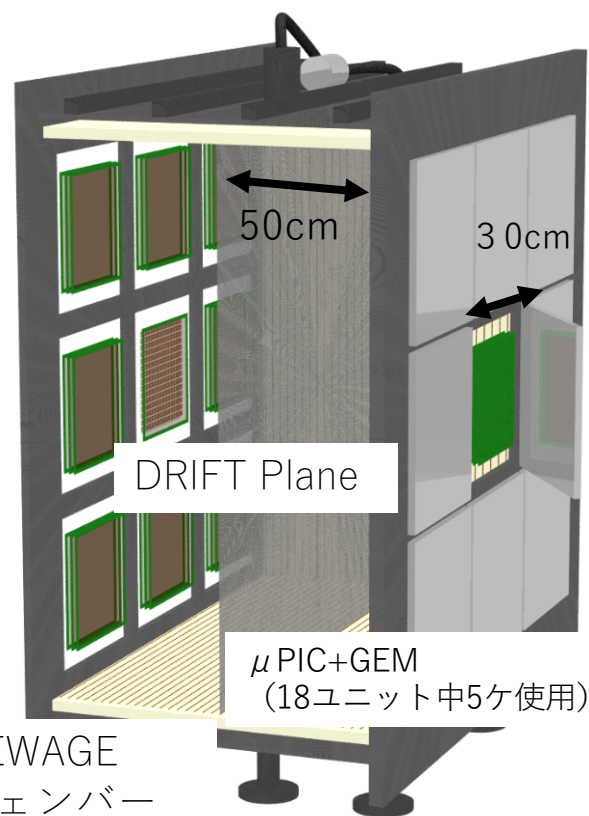


三次元飛跡検出
ガスTPC(身内・小川): 時間分解能あり
原子核乾板(中): 大質量可能

研究内容：方向に感度を持つ暗黒物質探索実験

東野 トーク
（ガス検出器（NEWAGE）：（5年目標 DAMA領域の探索）
（2年目標 低BG μ -PIC試作）
ガス中からのラドンの除去：（5年目標 低BG吸着剤(MS)の開発)
（2年 ラドン吸着MSの開発）

中トーク 原子核乾板(NEWSdm)：（5年目標 低BG装置開発、暗黒物質探索実験）
（2年 赤道儀試作）



2019年度成果 <https://www.lowbg.org/ugap/result-b02.html>

- 査読付き論文7編+3編投稿中
 - Results of a directional dark matter search from the NEWAGE experiment
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012042](#)
 - CYGNUS 国際活動
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012044](#)
 - Alpha-ray imaging chamber based on a micro-TPC in a low radioactivity structure w/ D01
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012233](#)
 - Development of an alpha-particle imaging detector based on a low radioactive micro-time-projection chamber
[NIM A Volume 953, \(2020\), 163050](#)
 - Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at Kamioka Observatory and future plan w/ D01
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012247](#)
 - Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors B02内協力
[Physics of the Dark Universe, Volume 27, January 2020, 100426](#)
Keiko I.Nagao, Tomonori Ikeda, Ryota Yakabe, Tatsuhiro Naka, Kentaro Miuchi
 - Analyses and design of nuclear emulsions for dark matter detection
Radiation Measurements 129 (2019) 106184
 - Development of a Negative Ion Micro TPC Detector with SF6 Gas for the Directional Dark Matter Search
arXiv:2004.09706v1
 - First limits from a 3d-vector directional dark matter search with the NEWAGE-0.3b' detector
arXiv:2005.05157v1
 - Optical shape analysis based on discrete Fourier transform and second order moment calculation of the brightness distribution for the detection of sub-micron range low energy tracks
[arXiv:2003.12740](#)
- 解説記事2編 著書(共著)1編 国際会議発表 18件 国内会議発表 12件

<論文>

査読付き論文 17編

著書 1編

解説記事 2編

博士論文 2編

修士論文 4編

<発表>

国際会議口頭発表 20件

国内会議口頭発表 57件

国内会議ポスター発表 4件

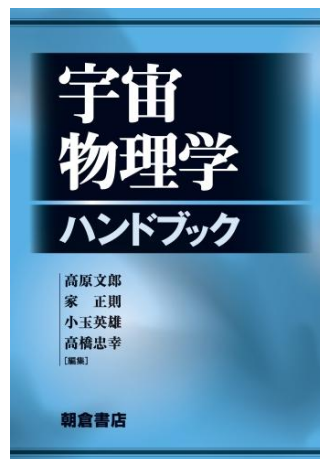
<アウトリーチ>

アウトリーチ・セミナー 3件

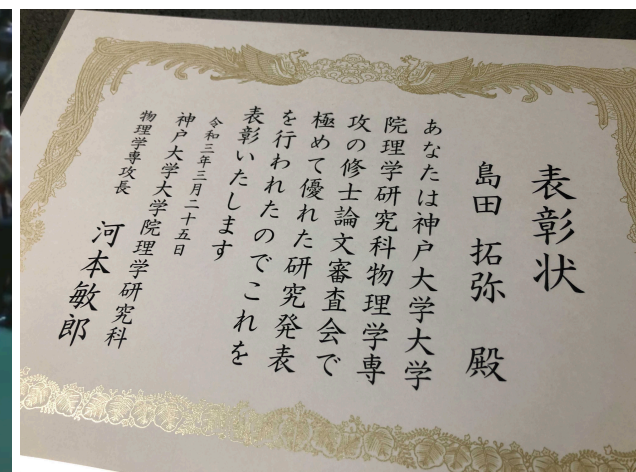
メディア掲載 2件

<受賞>

受賞3件

5.6.1 暗黒物質直接探査
(身内賢太郎)

- 神戸大学優秀修士論文発表賞（理学研究科総代）
島田拓弥 2021年2月「NEWAGEの到来方向に感度を持った暗黒物質探索と新しい試み」



- 日本写真学会論文賞, 中電大 200年8月

査読付き論文

論文発表 (査読あり)

2020年度

"Development of New Tracking Detector with Fine-grained Nuclear Emulsion for sub-MeV Neutron Measurement" T. Shiraishi, I. Todoroki, T. Naka, A. Umemoto, R. Kobayashi, and O. Sato, PTEP accepted (2021) <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab030>

"Test of low radioactive molecular sieves for radon filtration in SF6 gas-based rare-event physics experiments" R.R. Marcelo Gregorio, N.J.C. Spooner, J. Berry, A. C. Ezeribe, K. Miuchi, H. Ogawa, A. Scarff, JINST accepted (2021) arXiv:2011.06994

"Detection capability of 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, ptaa162 Published: 09 November 2020, 2009.05939v1 <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa162> →中村輝石

"Super-resolution high-speed optical microscopy for fully automated readout of metallic nanoparticles and nanostructures" Andrey Alexandrov, Takashi Asada, Giovanni De Lellis, Antonia Di Crescenzo, Valerio Gentile, Tatsuhiko Naka, Valeri Tioukov & Atsuhiko Umemoto, Scientific Reports, 10,18773(2020) <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75883-z>

First limits from a 3d-vector directional dark matter search with the NEWAGE-0.3b' detector Ryota Yakabe, Kiseki Nakamura, Tomonori Ikeda, Hiroshi Ito, Yushiro Yamaguchi, Ryosuke Taishaku, Miki Nakazawa, Hirohisa Ishiura, Takuma Nakamura, Takuya Shimada, Toru Tanimori, Hidetoshi Kubo, Atsushi Takada, Hiroyuki Sekiya, Atsushi Takeda, Kentaro Miuchi Progress of Theoretical and Experimental Physics, (2020) ptaa147 DOI: 10.1093/ptep/ptaa147

LTARS: analog readout front-end ASIC for versatile TPC-applications T. Kishishita, S. Sumomozawa, T. Kosaka, T. Igarashi, K. Sakashita, M. Shoji, M.M. Tanaka, T. Hasegawa, K. Negishi, S. Narita, T. Nakamura and K. Miuchi 2020 JINST 15 T09009 doi:10.1088/1748-0221/15/09/T09009

Development of a low-emitting μ -PIC as a readout device for direction-sensitive dark matter detectors Takashi Hashimoto, Kentaro Miuchi, Tomonori Ikeda, Hirohisa Ishiura, Kiseki D. Nakamura, Hiroshi Ito, Koichi Ichimura, Ko Abe, Kazuyoshi Kobayashi, Atsushi Takada, Atsuhiko Ochi, Takuma Nakamura, Takuya Shimada NIM A Volume 977, 11 October 2020, 164285 DOI: 10.1016/j.nima.2020.164285, <https://arxiv.org/pdf/2002.12633.pdf>

Development of a Negative Ion Micro TPC Detector with SF6 Gas for the Directional Dark Matter Search T. Ikeda, T. Shimada, H. Ishiura, K. D. Nakamura, T. Nakamura, K. Miuchi Journal of Instrumentation, Volume 15, July 2020, P07015 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/P07015> <https://arxiv.org/abs/2004.09706>

Atsuhiko Umemoto, Tatsuhiko Naka, Toshiyuki Nakano, Ryuta Kobayashi, Takuya Shiraishi, Takashi Asada "Optical shape analysis based on DFT and second order moment analysis of the brightness distribution for the detection of sub-micron range tracks in nuclear emulsion", PTEP <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaa132>

2019年度

T. Ikeda, K. Miuchi, T. Hashimoto, H. Ishiura, T. Nakamura, T. Shimada and K. Nakamura, "Results of a directional dark matter search from the NEWAGE experiment" 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012042 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012042> 国際活動

Kentaro Miuchi, Elisabetta Baracchini, Gregory Lane, Neil J. C. Spooner and S. E. Vahsen "CYGNUS" 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012044 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012044>

Keita Mizukoshi, Ryosuke Taishaku, Keishi Hosokawa, Kazuyoshi Kobayashi, Kentaro Miuchi, Tatsuhiko Naka, Atsushi Takeda, Masashi Tanaka, Yoshiki Wada, Kohei Yorita and Sei Yoshida; "Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at Kamioka Observatory and future plan" 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012247 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012247> →田中雅士 w/ D01

H. Ito, T. Hashimoto, K. Miuchi, K. Kobayashi, Y. Takeuchi, K. D. Nakamura, T. Ikeda, and H. Ishiura "Development of an alpha-particle imaging detector based on a low radioactive micro-time-projection chamber" NIM A Volume 953, (2020), 163050, arXiv1903.01090 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.163050> →伊藤博士 w/ 公募

H. Ogawa, K. Abe, M. Matsukura, H. Mimura, "Development of Low Radioactive Molecular Sieves for Ultra-Low Background Particle Physics Experiment", JINST 15 (2020), P01039 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/01/P01039>

Keiko. I. Nagao, Tomonori Ikeda, Ryota Yakabe, Tatsuhiko Naka, Kentaro Miuchi "Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors", Phys. of Dark Univ. Vol.27 (2020) 100426 <https://doi.org/10.1016/j.dark.2019.100426> B02内協力

Tadaaki Tani, Takayuki Uchida, Tatsuhiko Naka, "Analyses and design of nuclear emulsions for dark matter detection" Radiation Measurements 129 (2019) 106184 <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.106184>

2021年度

"Direction-sensitive dark matter search with a low-background gaseous detector NEWAGE-0.3b"; T. Ikeda, K. Nakamura, T. Shimada, R. Yakabe, T. Hashimoto, H. Ishiura, T. Nakamura, H. Ito, K. Ichimura, K. Abe, K. Kobayashi, T. Tanimori, H. Kubo, A. Takada, H. Sekiya, A. Takeda, K. Miuchi; PTEP (2021) ptab053

低BG μ -PIC

DM探索

物理

MS開発

(少し内容は古い)
publish論文の紹介+最近のactivity

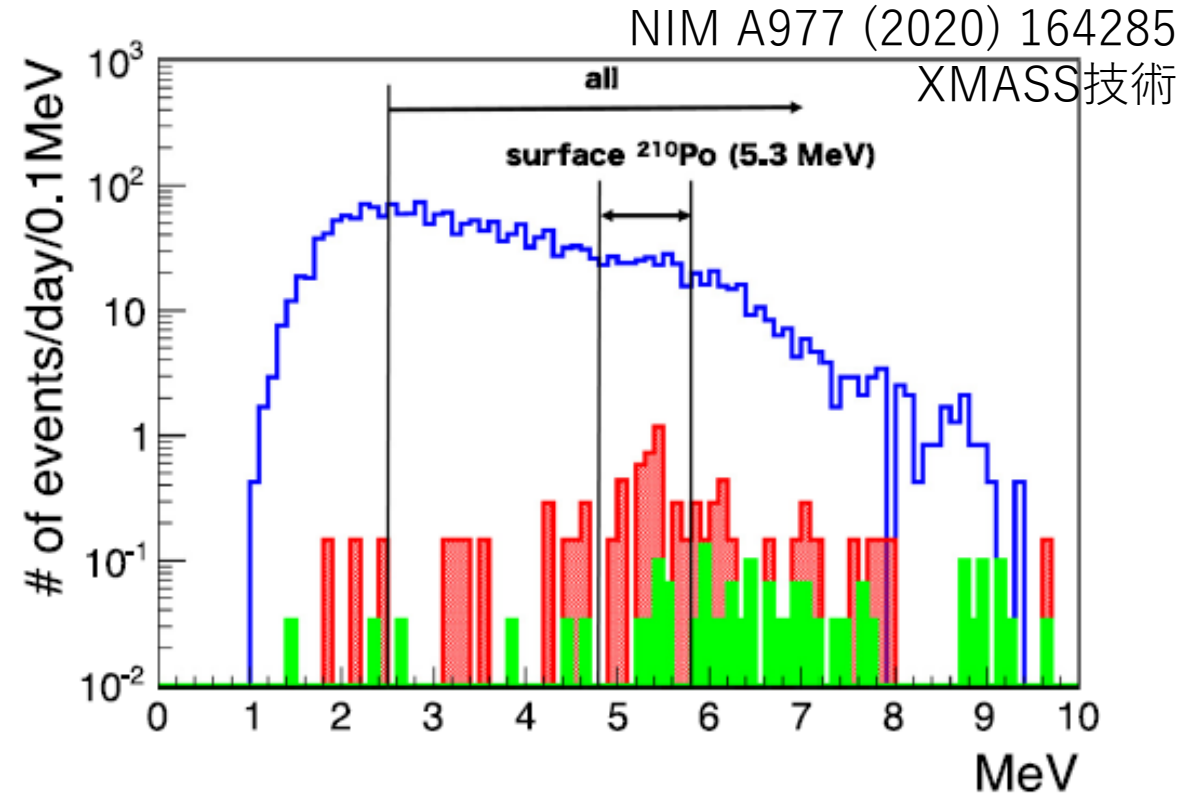
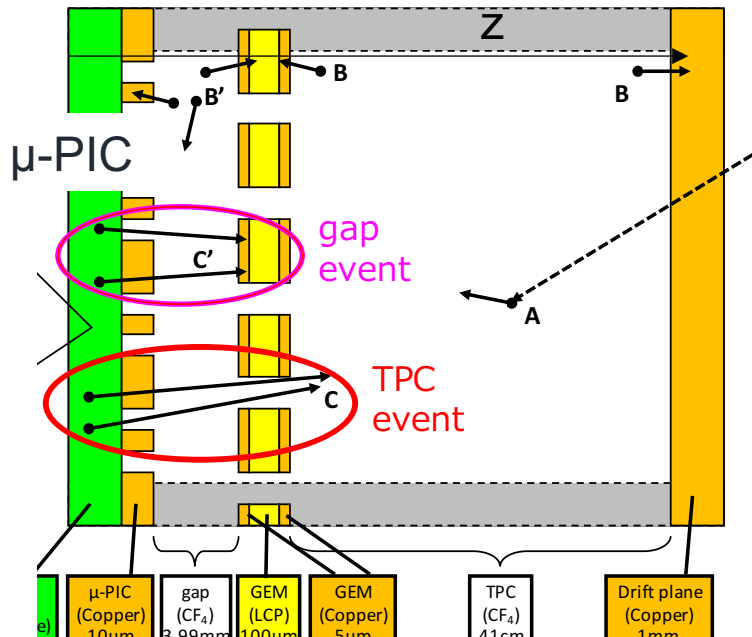
低BG μ -PIC

低 α μ -PIC (NIM A977 (2020) 164285)
低BG μ -PIC (石浦ポスター)

μ -PIC開発① Development of a low- α -emitting μ -PIC as a readout device for direction-sensitive dark matter detectors

NIM A977 (2020) 164285

- NEWAGE-0.3b' 神岡でDM run
- μ -PIC (マイクロパターンガス検出器)
- Detection Volume: 31 × 31 × 41cm
- μ -PIC表面からの α 線が問題



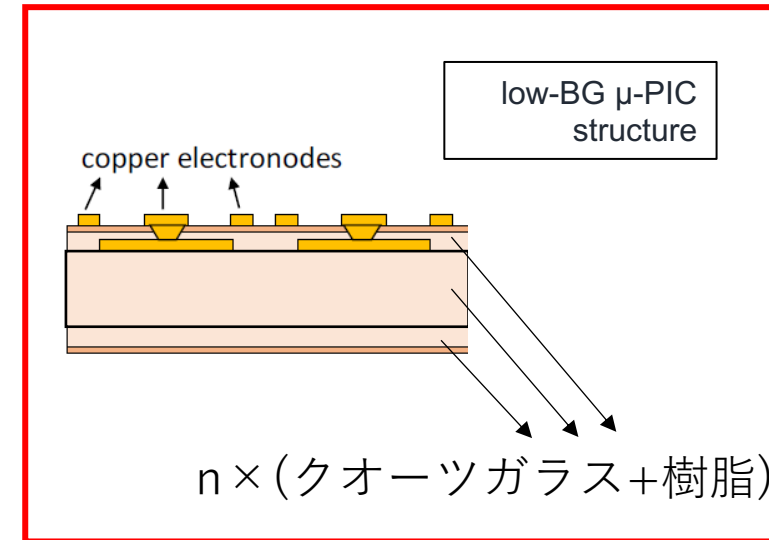
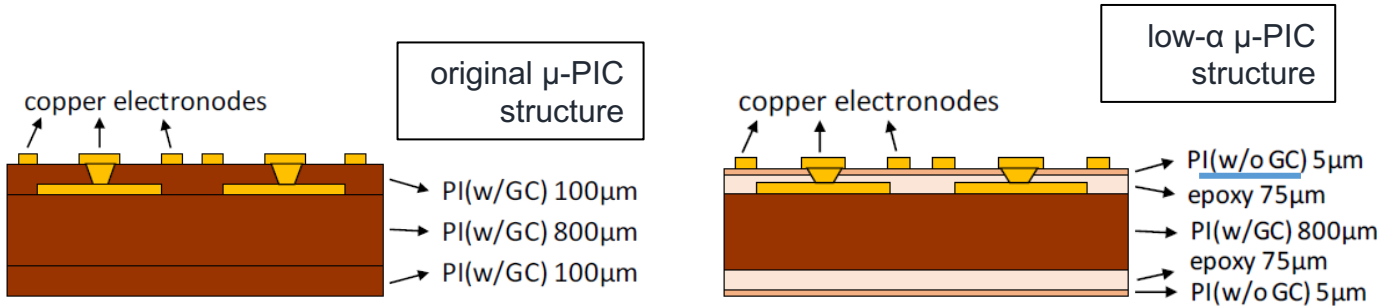
• $\times 1/100$ 低 α 化

• μ -PIC開発② lowBG μ -PIC製作

• 製作：DNP / 材料（クオーツガラス）：信越化学

• 経緯

- ORIGINAL μ -PIC：ガラスクロスが汚い。
- 「low- α μ -PIC」：ガラスクロス排除。構造材(800 μ m厚)はそのまま使用した。
(α 線の寄与はない、製作リスクを低減する。) 表面 α 線は無事落ちた。
- 「lowBG μ -PIC」：構造体も変更



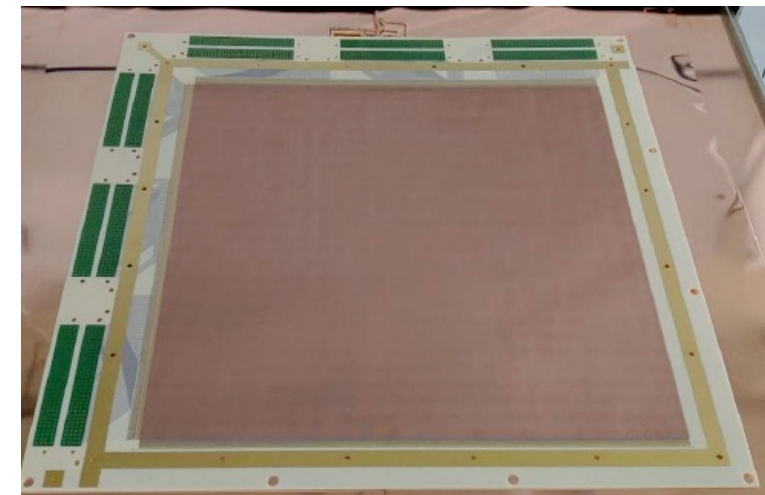
Ge検出器	238U 中流 (ppm)	238U 上流 (ppm)	232Th (ppm)
PI(w/GC) 100 μ m (通常 μ PIC材料)	$(3.9 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	$(3.8 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	1.81 ± 0.04
PI(w/o GC) 5 μ m+エポキシ 75 μ m (low- α μ -PIC材料)	$< 3.0 \times 10^{-3}$	$< 2.9 \times 10^{-2}$	$< 6.8 \times 10^{-3}$
信越化学新材料 (w/石英ガラス)	$< 2.4 \times 10^{-3}$	$< 1.3 \times 10^{-2}$	$< 3.7 \times 10^{-3}$

新規材料 w/ D01

低BG μ PIC完成!

動作は確認済

現在詳細評価中 (石浦ポスター)



領域内連携

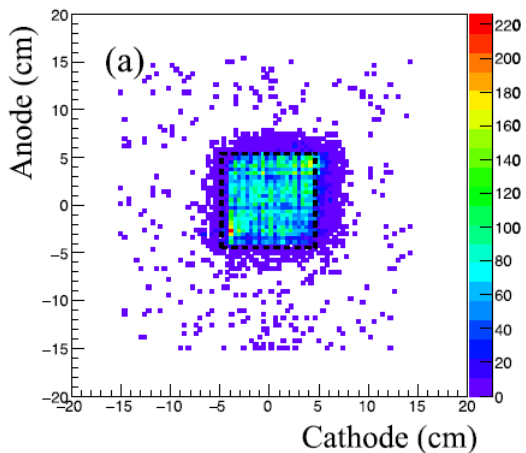
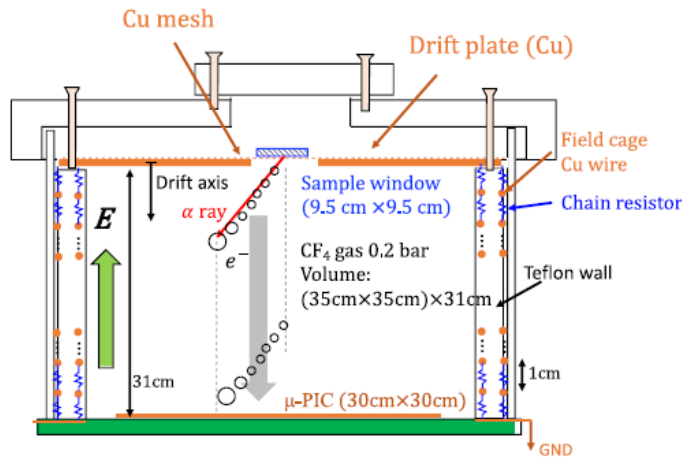
μ -PICの応用 (領域内連携)

AI-CHAM

(伊藤博士 TALK, NIM A953, (2020), 163050)

Development of an alpha-particle imaging detector based on a low radioactivity micro-time-projection chamber

模式図



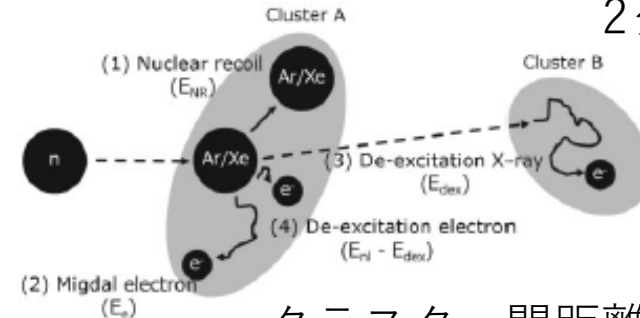
α 線イメージ

低BG μ -PICによる
感度向上を目指す

MIGDAL観測

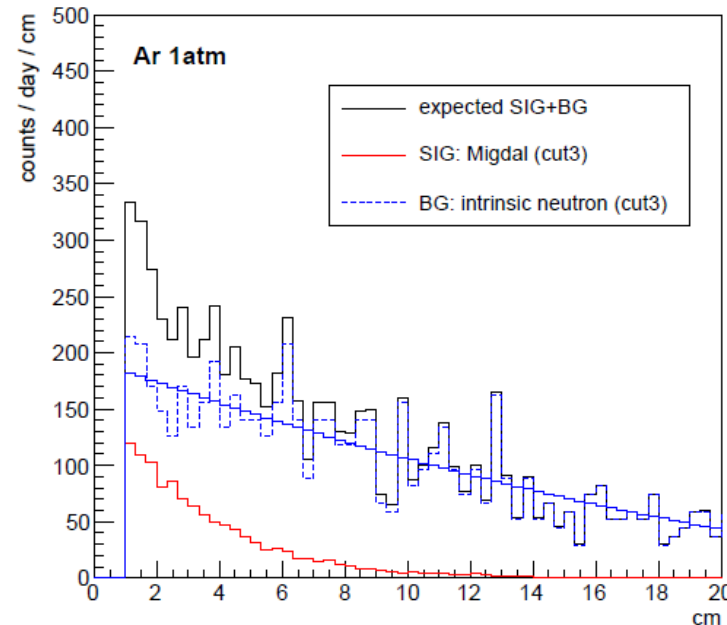
(中村輝石 TALKPTEP(2021, ptaa162))

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



2クラスター信号

クラスター間距離



30cm角 μ -PIC
アルゴンガスで
初観測を目指す

DM探索

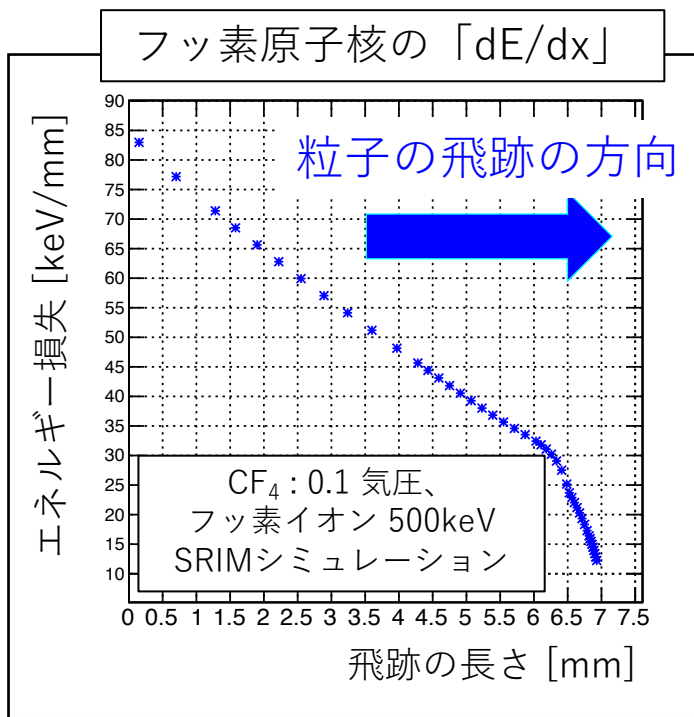
3D-vector解析 (PTEP 2020 ptaa147)
低 α μ -PIC run (PTEP 2021 ptab053)
次の一手 (島田修論・中山ポスター)

DM探索①：3d-vector解析

First limits from a 3d-vector directional dark matter search with the NEWAGE-0.3b' detector

PTEP 2020 ptaa147

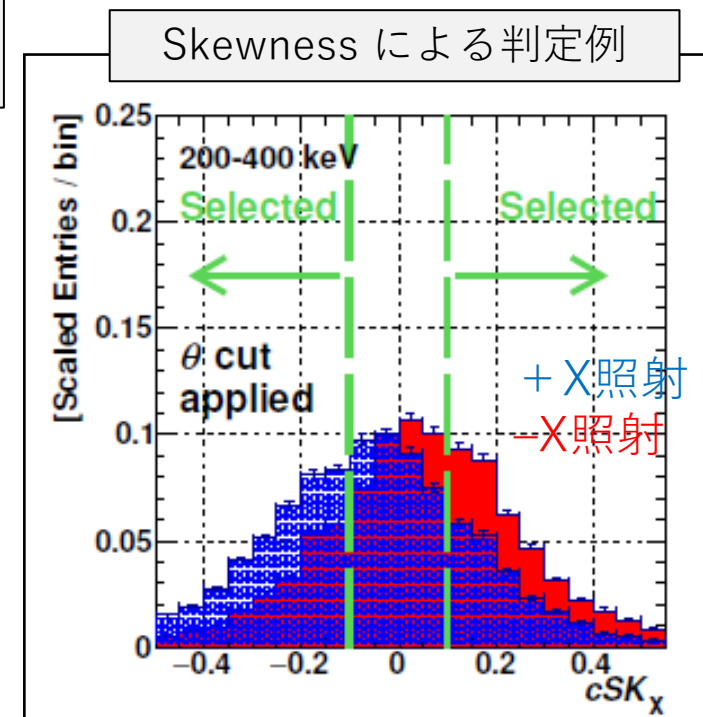
- 三次元飛跡に前後判定導入 (3d-vector tracking)



dE/dxの非対称性パラメータ：
Skewness

$$SK_x = \frac{S_{3x}}{S_{2x}^{3/2}},$$

$$S_{nx} \equiv \sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{(x - \langle x \rangle)^n \cdot TOT(x)}{TS_x},$$

$$\langle x \rangle = \sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{x \cdot TOT(x)}{TS_x},$$


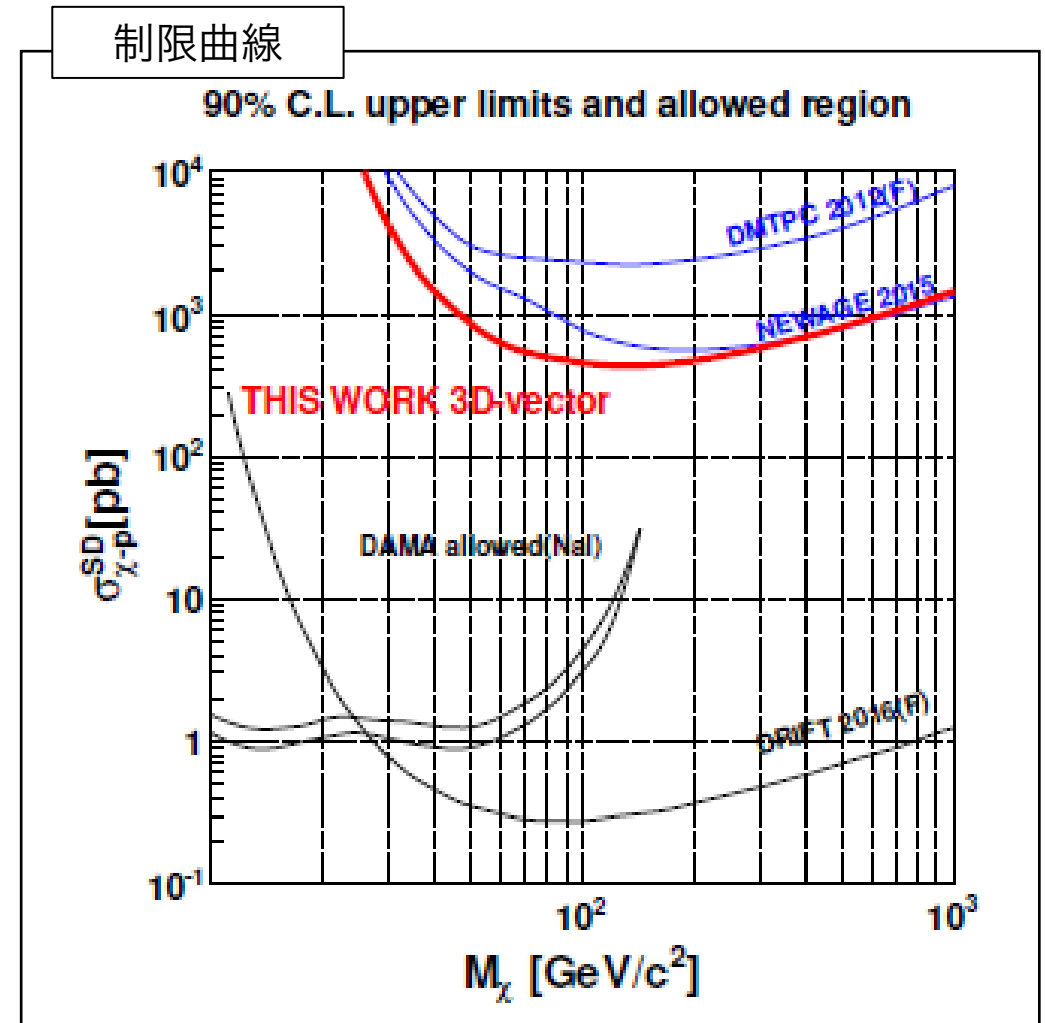
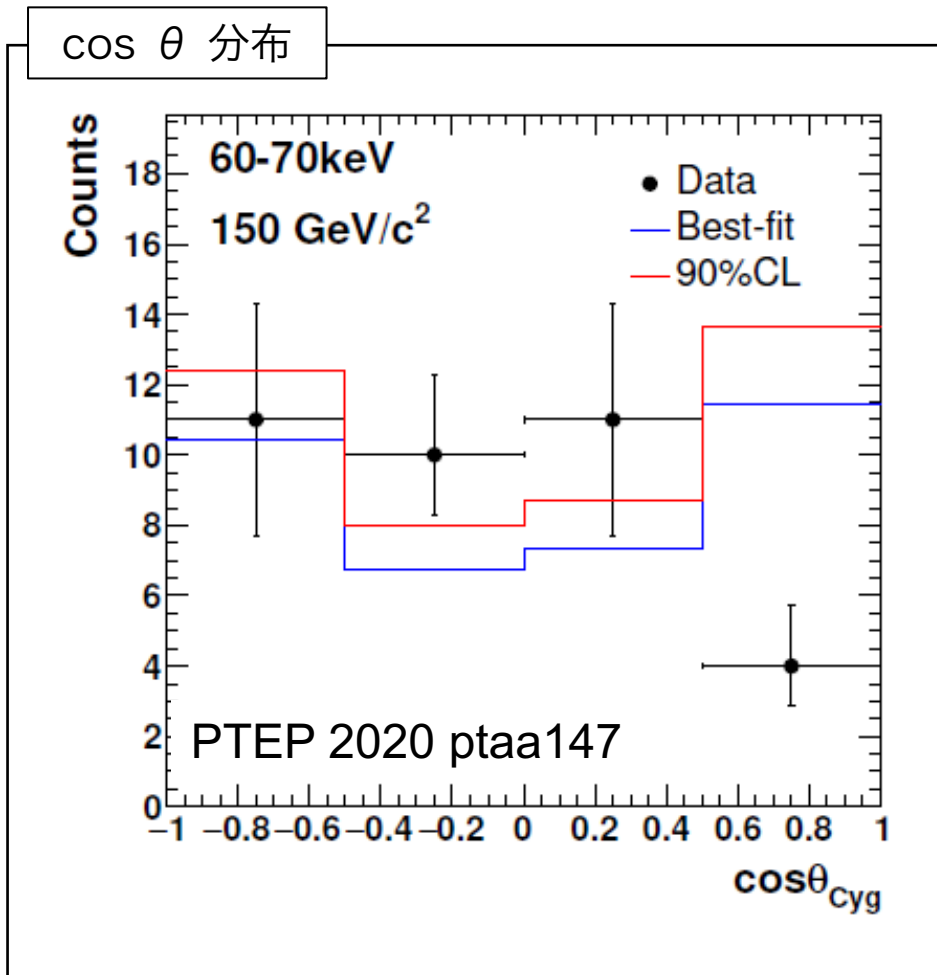
判定率

PTEP 2020 ptaa147

energy range	average [%]
50-100 keV	53.4 ± 0.5
100-200 keV	57.7 ± 0.4
200-400 keV	65.1 ± 0.5

- low- α μ -PIC導入前のDM run (435days)

- $\cos \theta_{\text{Cyg}}$ 分布 (θ : はくちょう座の方向と原子核のなす角) -1から1まで使用
- 方向感度を持つ解析による制限の更新 : カットの改良によって低質量側で改善



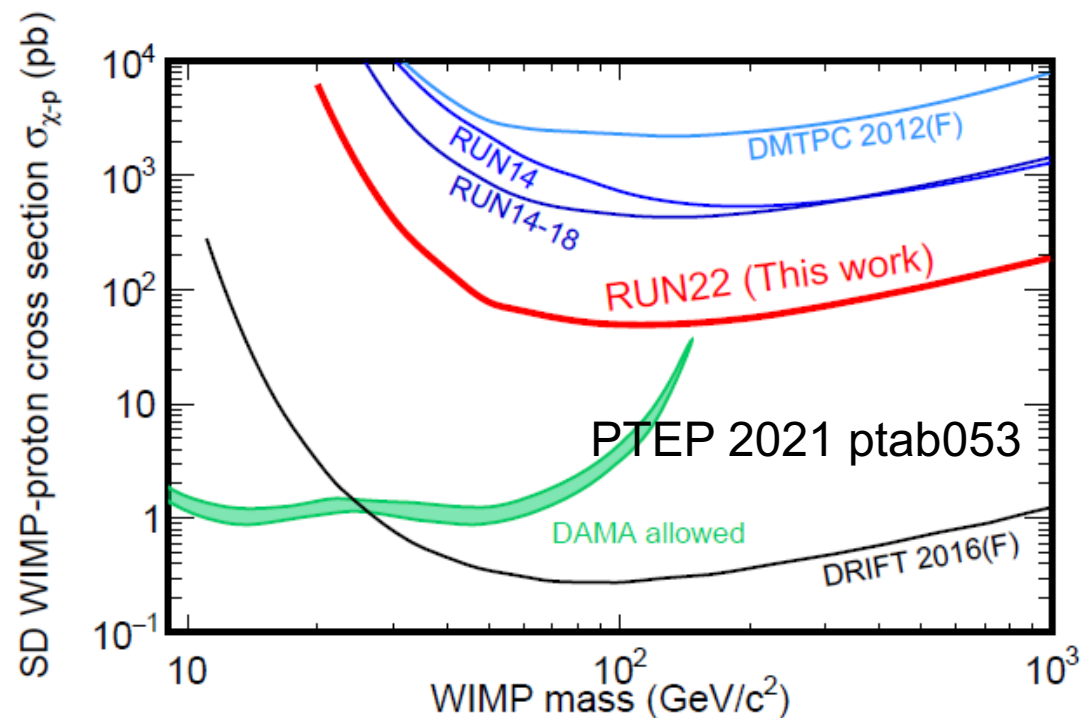
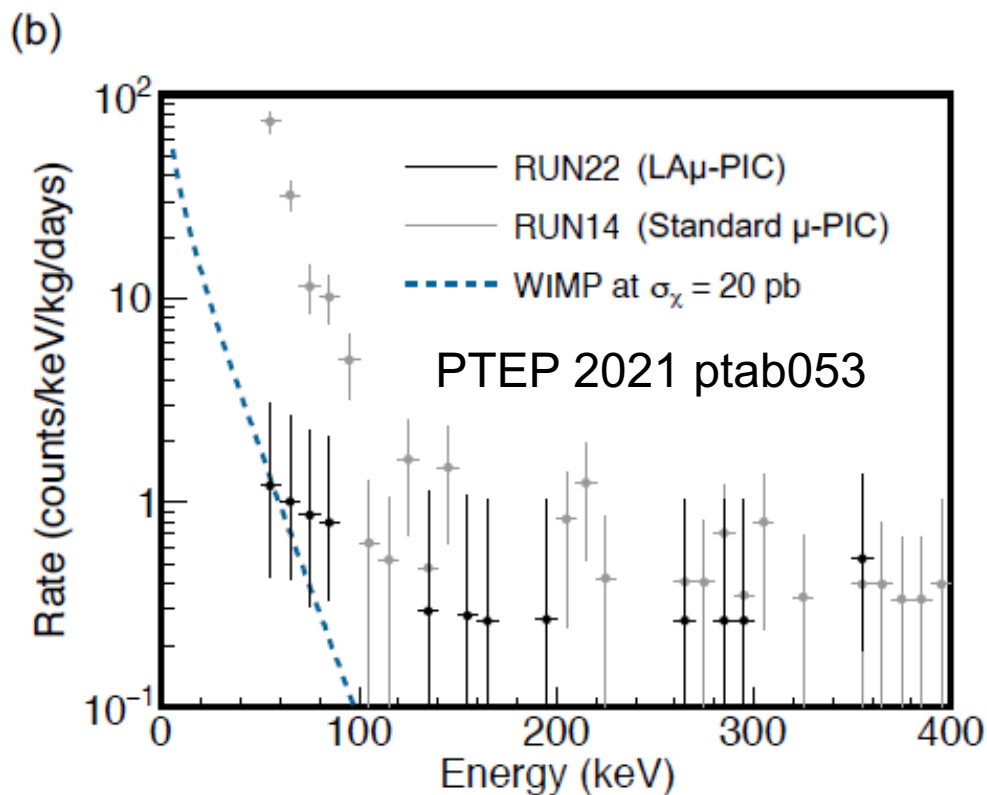
cos θ を-1から1まで使用した初めてのdemonstration
将来の探索・観測に向けた重要な一歩

DM探索②：低 α μ -PIC run

Direction-sensitive dark matter search with a low-background gaseous detector NEWAGE-0.3b”

PTEP 2021 ptab053

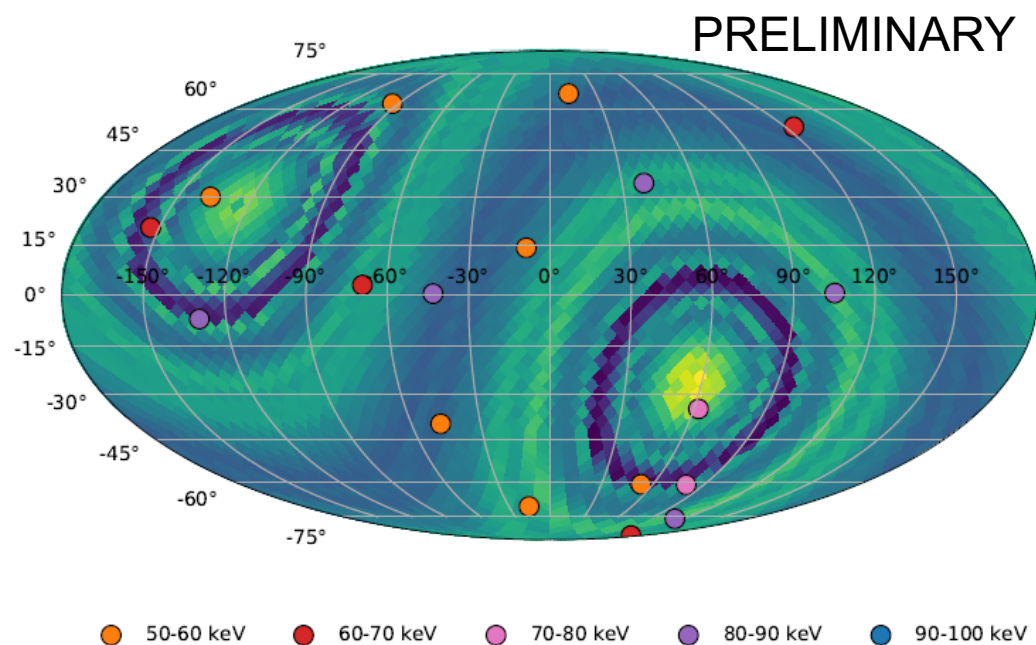
- 低 α μ -PIC 使用
- 107days (2018年)



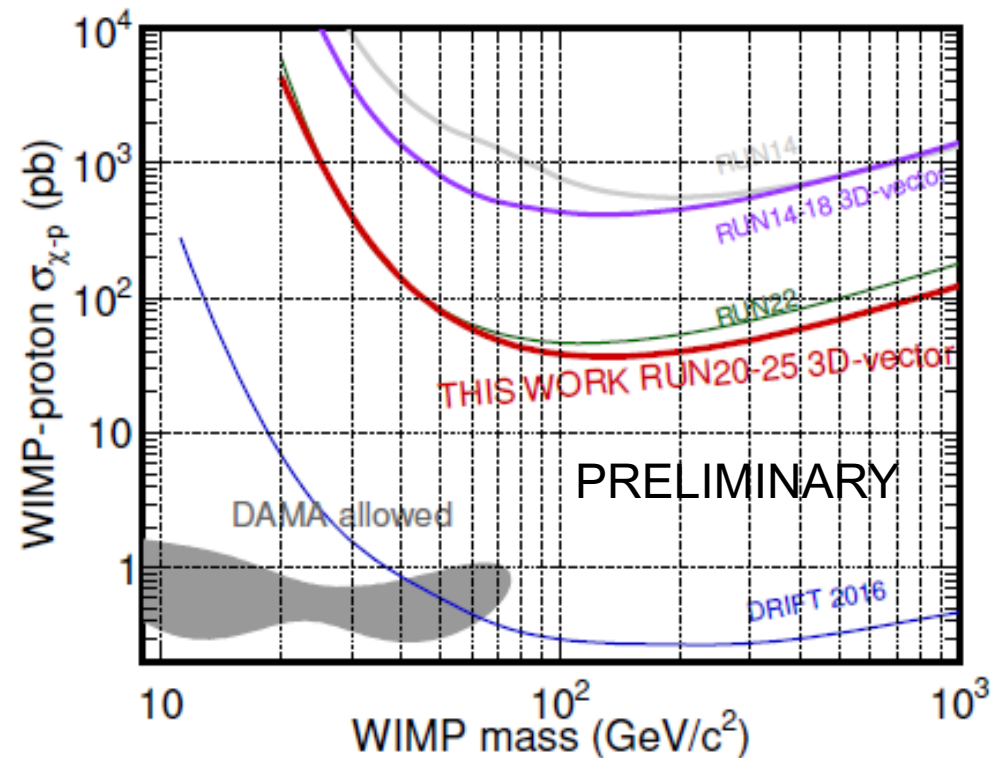
NEWAGE の到来方向に感度を持った 暗黒物質探索と新しい試み

島田拓弥 修士論文
神戸大学2021年2月

- 低 α μ -PIC + 3-d vector解析
- 318days (2017-2020年)



島田拓弥 修士論文
神戸大学2021年2月



- 3-d vector解析として 約1桁 制限更新
- NEWAGE2021から1.5倍更新
- 投稿論文準備中
- 2020年～：低閾値化測定（中山ポスター）
大型化（東野ポスター）

物理

anisotropicなDM速度分布 (Physics of the Dark Universe, Volume 27, January 2020, 100426)
宇宙線で加速される軽いDM

物理 ① :

Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors

Keiko I. Nagao^{a,b,*}, Tomonori Ikeda^c, Ryota Yakabe^c, Tatsuhiro Naka^{d,e}, Kentaro Miuchi^c

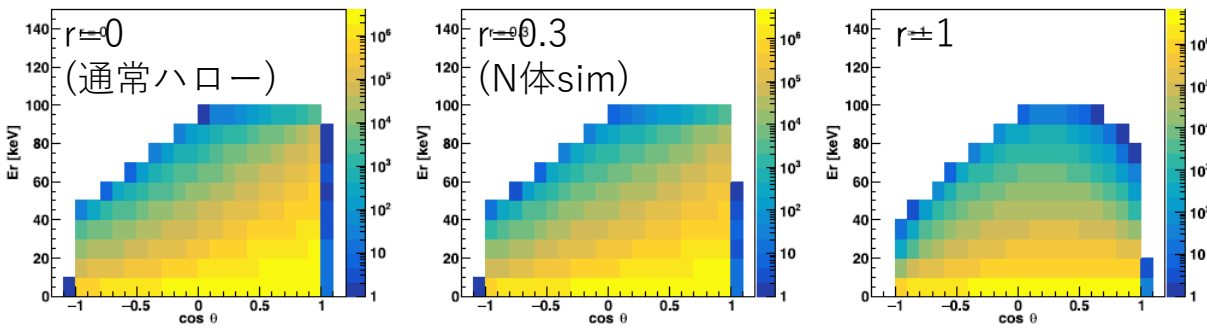
[Physics of the Dark Universe, Volume 27, January 2020, 100426](#)

- N体シミュレーションで示唆されるanisotropicな（回転成分を持つ）速度分布を持つDMハローを見分ける。
 - $r(<1)$ だけanisotropic成分があるモデル

$$f(v_\phi) = \frac{1-r}{N(v_{0,iso.})} \exp[-v_\phi^2/v_{0,iso.}^2] + \frac{r}{N(v_{0,ani.})} \exp[-(v_\phi - \mu)^2/v_{0,ani.}^2], \quad (1)$$

where the normalization factor $N(v_0) = 2v_0\Gamma(3/2)$, $v_{0,iso.} = 250$ km/s, $v_{0,ani.} = 120$ km/s and $\mu = 150$ km/s. The fraction factor of the double Gaussian component r is 0.25 in [26], and calculations

energy $\cos\theta$ 分布



方向情報の応用例の一例

rの推定例

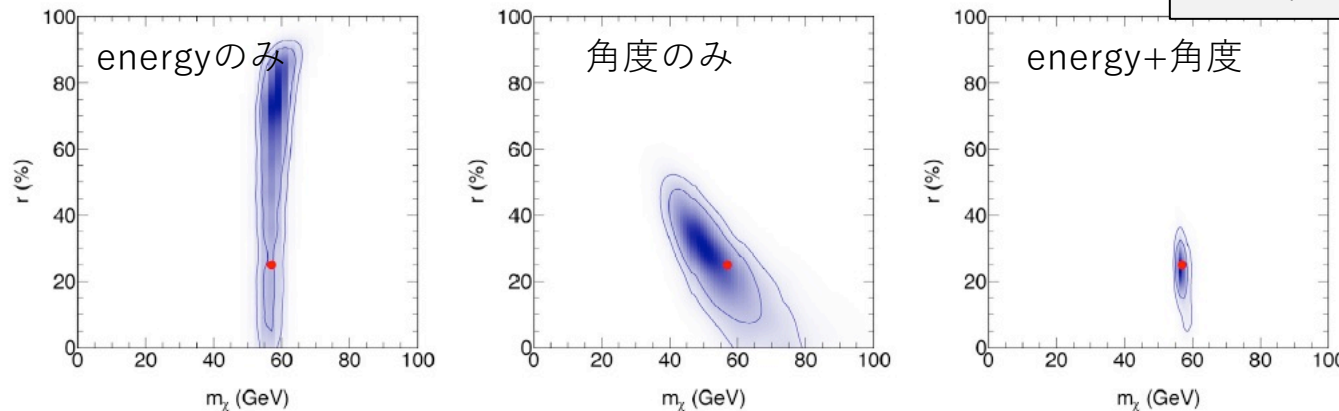
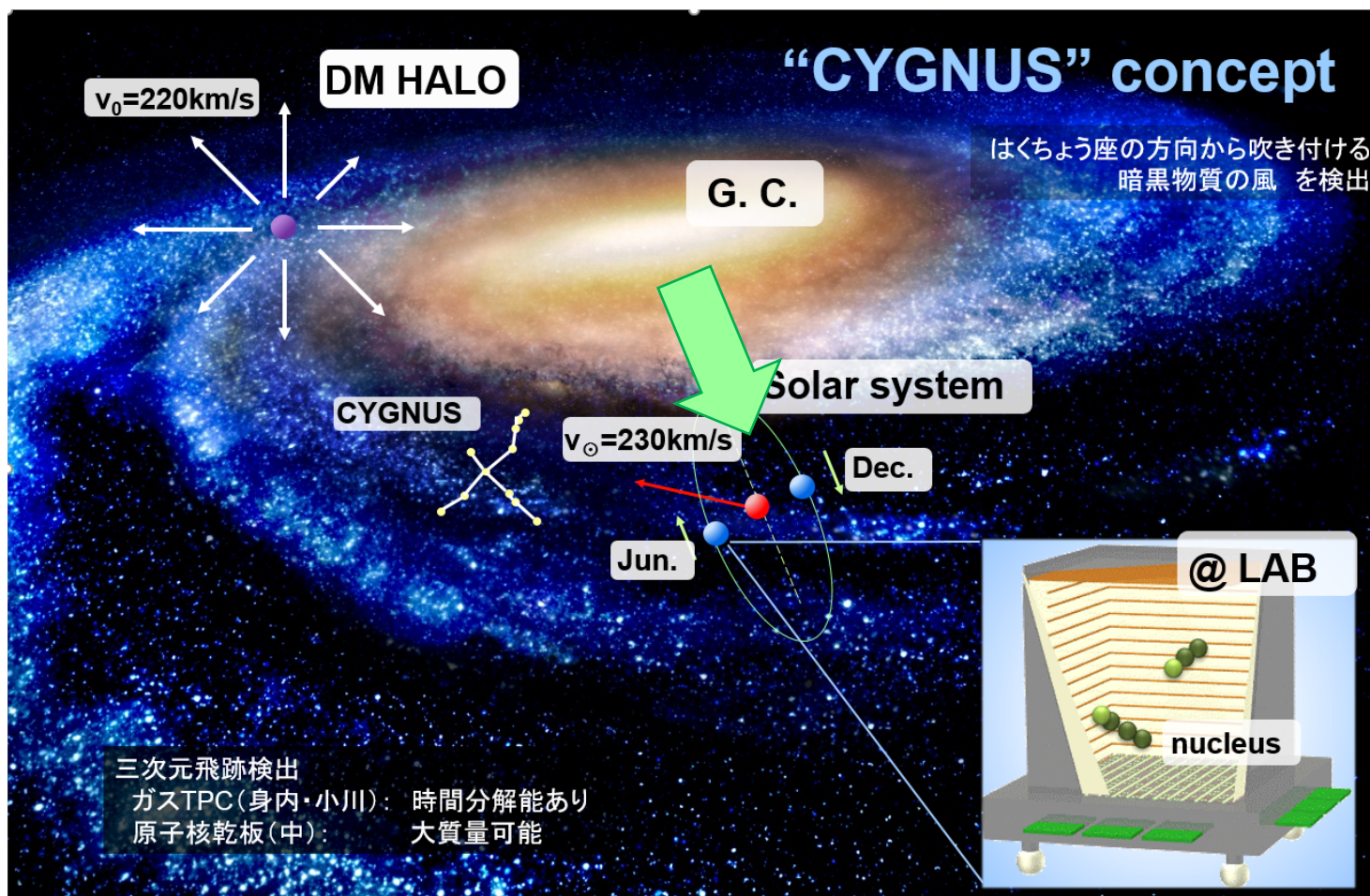


Fig. 13. The 2D posterior probability distributions in the dark matter mass and anisotropy space for target F. Red points indicate the input parameters in simulation. Inner and outer contours show 68% and 90% C.L., respectively. Left: Only data of recoil energy E_R is used. Center: Only data of scattering angle $\cos\theta$ is used. Right: Both recoil energy and scattering angle are used.

物理 ②：宇宙線加速DM

- 軽い($\ll 1\text{GeV}$)DM
- 銀河中心付近で宇宙線(p)によって加速
- 銀河中心（いて座）方向からの到来が増える

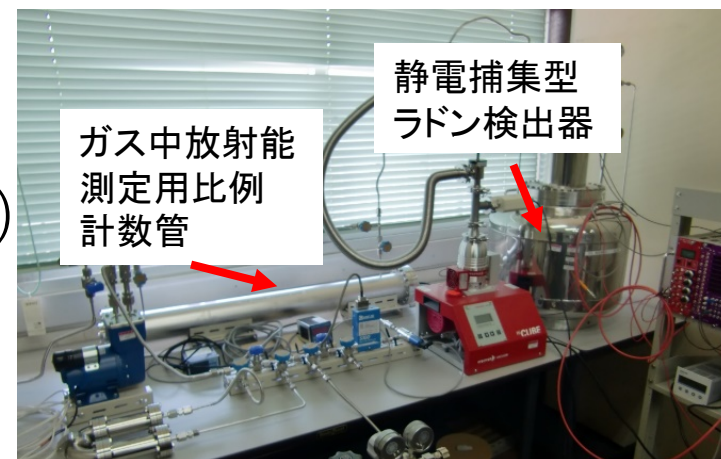


A01(畑) などと情報交換

ラドン吸着剤 (MS) 開発

ガス中ラドンのためのモレキュラーシーブ(MS)の開発

- 2019年度:
 - ラドン除去試験システムの構築 (@日大)
 - 汎用MSのラドン除去性能評価 (4A, 5Aを中心に)
 - ラドン除去に対して高性能なMSの開発 (-2020年度)



ラドン除去・放射線計測装置@日大

ユニオン昭和株式会社 ホームページより

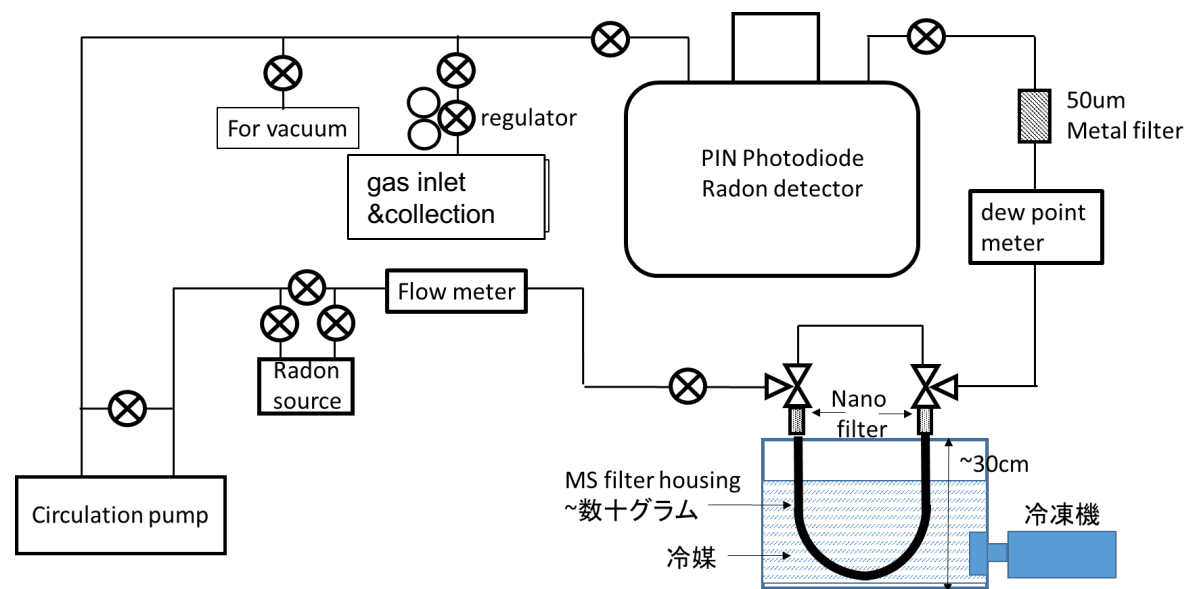
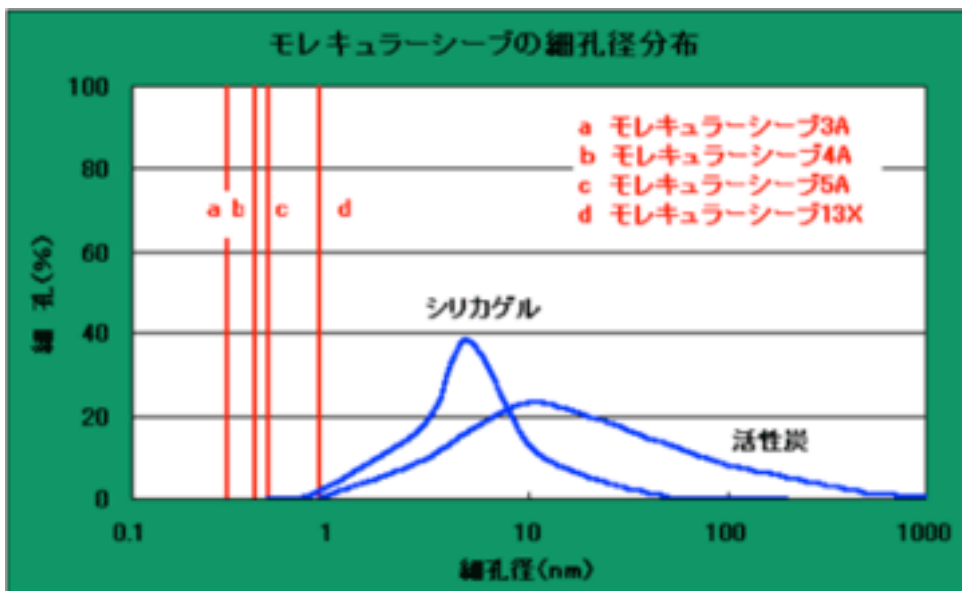


図3:ラドン除去試験セットアップ

- 日大製と既成品の比較

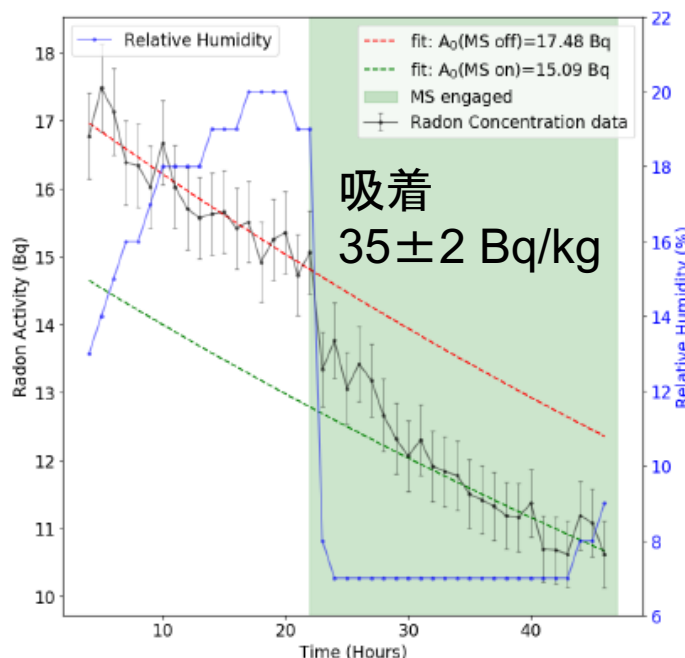


日大製

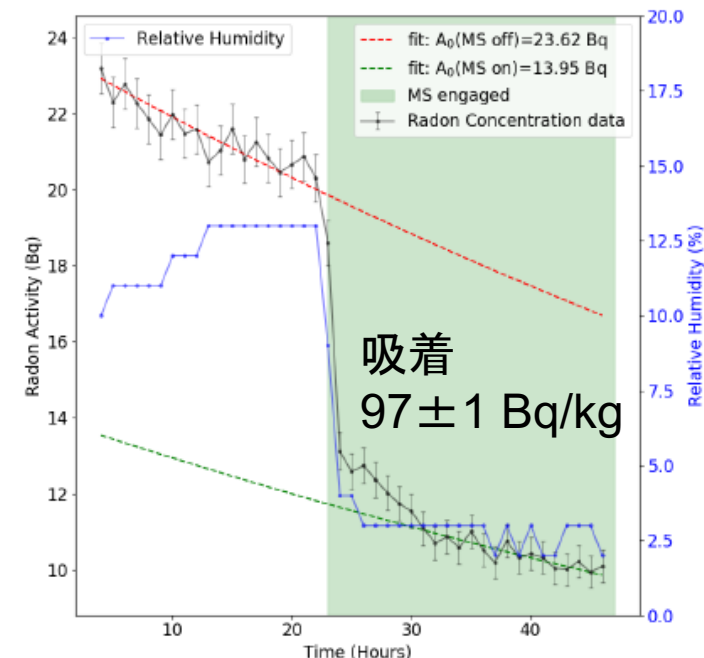


既成品
(Sigma-Aldrich)

日大製



既成品 (Sigma-Aldrich)



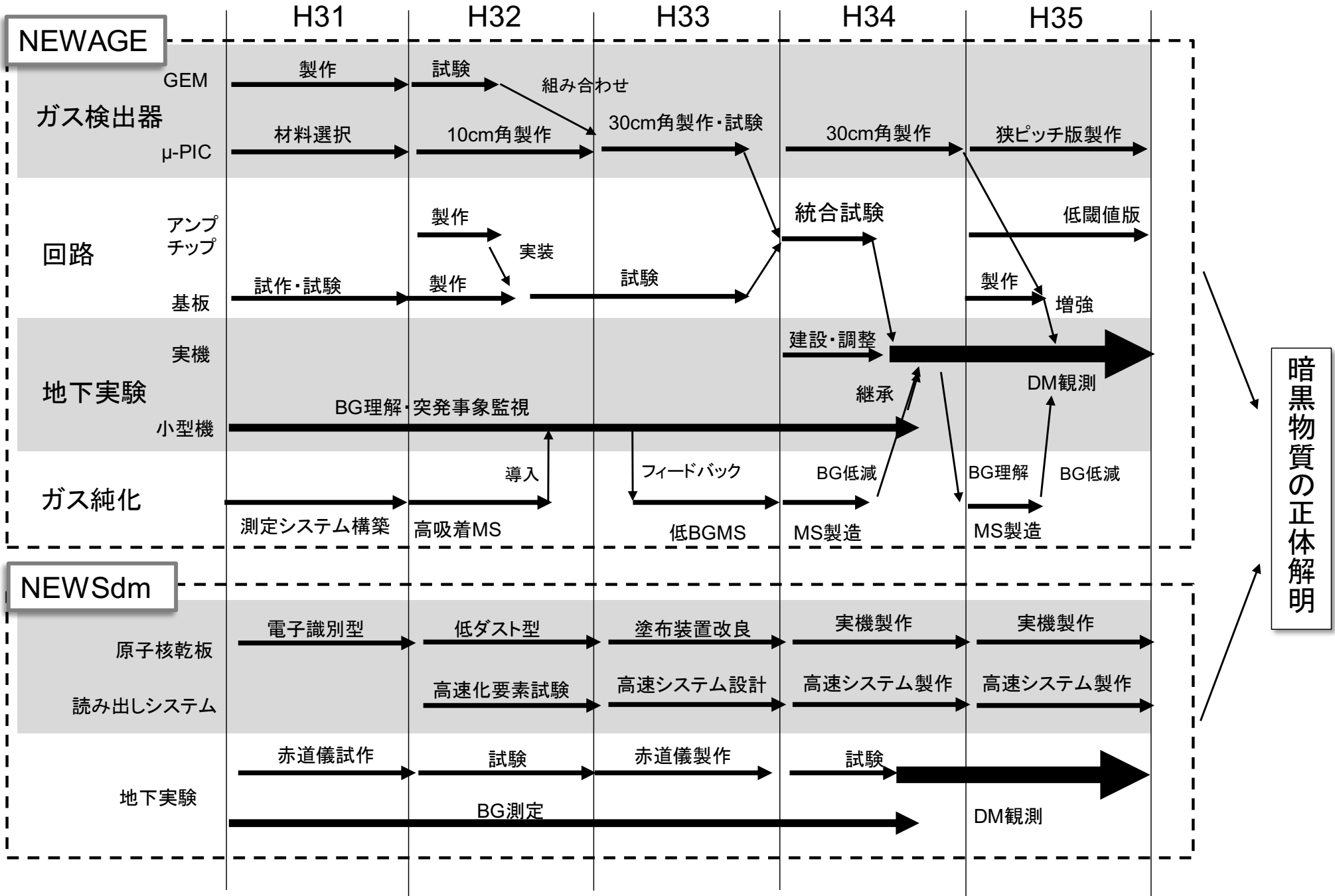
- 既成品：吸着も大きいですが、ラドン放出も多い。
- 単位吸着あたりの放出は日大製が上回る。

当初予定（吸着するものを製作）を上回り、既製品より性能の良いMSを製作できた。

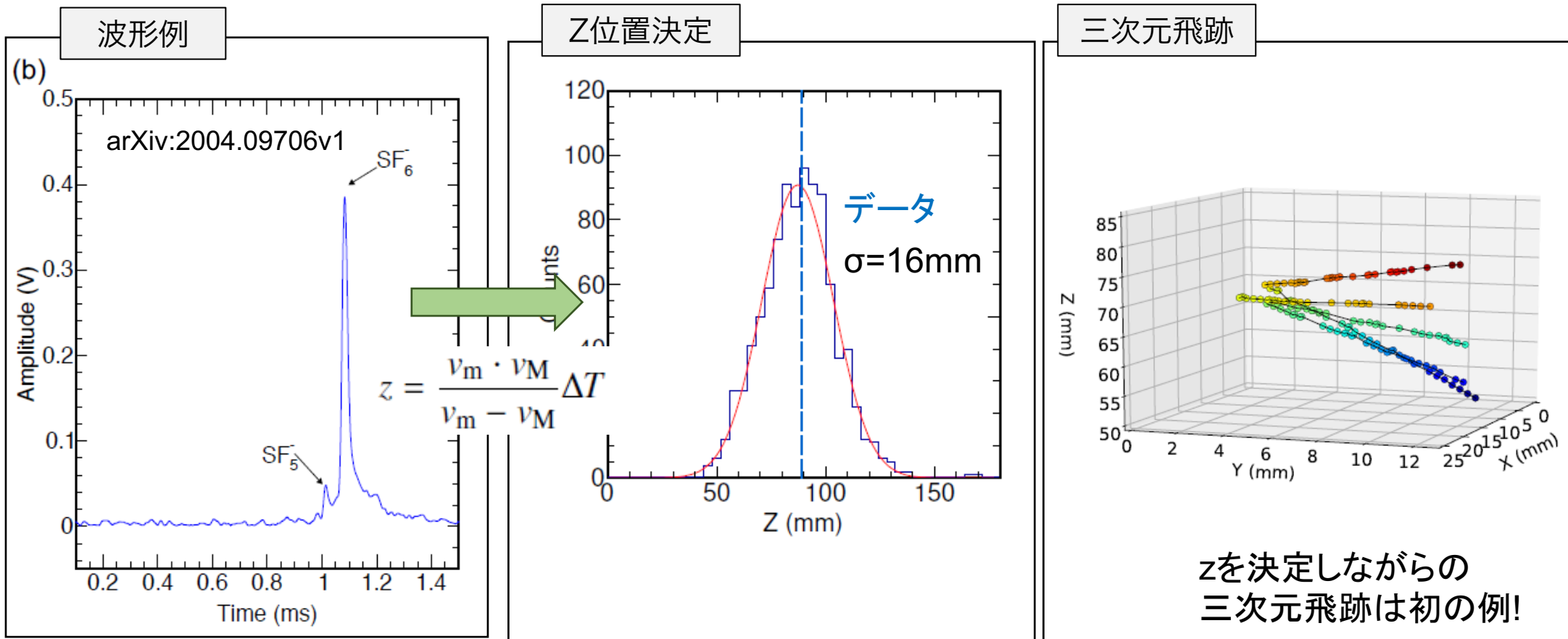
Molecular Sieve	²²² Rn Emanated per ²²² Rn captured (×10 ⁻³)
NU-developed	2.8 ± 0.7
Sigma-Aldrich	5.4 ± 0.4

- 低BGカルシウム材料入手 (with A02)
- O(100g) 製作 (2021年5月)

バックアップ



- 陰イオンガスTPC：ドリフト方向(z)の絶対位置を決定可能
 - 2種類以上のイオンの到達時間差を利用
- lowBG μPICと相乗的



まとめ

研究内容：方向に感度を持つ暗黒物質探索実験

ガス検出器 (NEWAGE) : (5年目標 DAMA領域の探索)
(2年目標 低BG μ -PIC試作)

試作機 (10cm) を予定していたが、実機 (30cm角) 製作できた
ガス中からのラドンの除去 : (5年目標 低BG吸着剤(MS)の開発)
(2年 ラドン吸着MSの開発)

ラドン吸着のみならず、放出比の良いものを製作できた

原子核乾板(NEWdm) : (5年目標 低BG装置開発、暗黒物質探索実験)
(2年 赤道儀試作) done

