

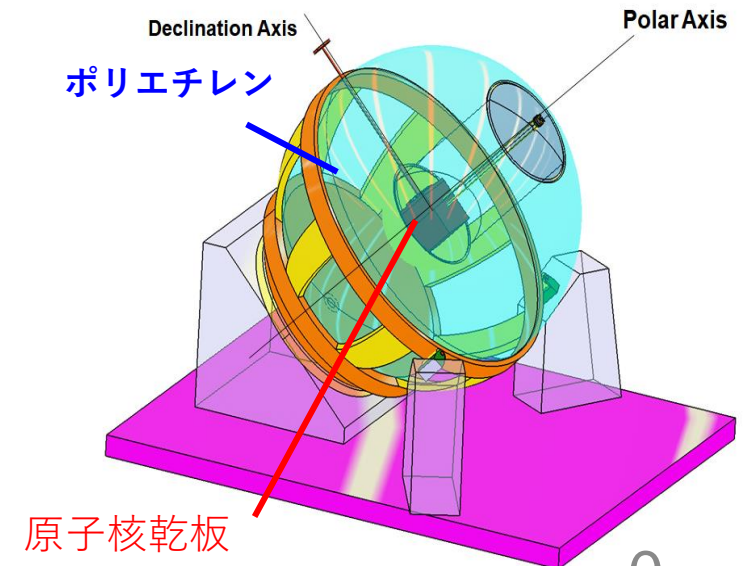
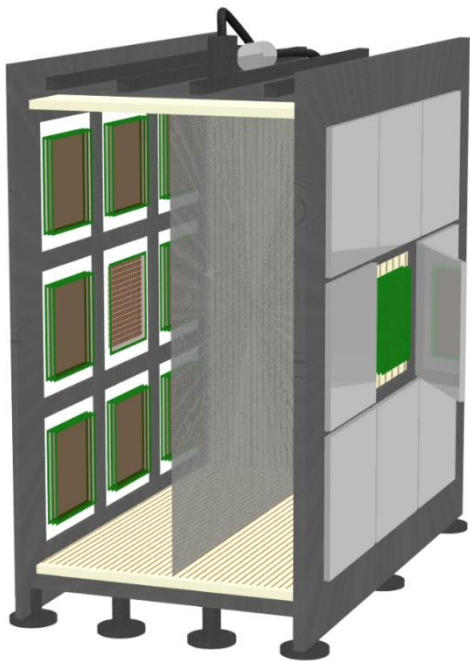
# 方向に感度をもった暗黒物質直接探索 (計画研究B02)

代表者：身内賢太郎(神戸大学)

分担者：中竜大(東邦大学)

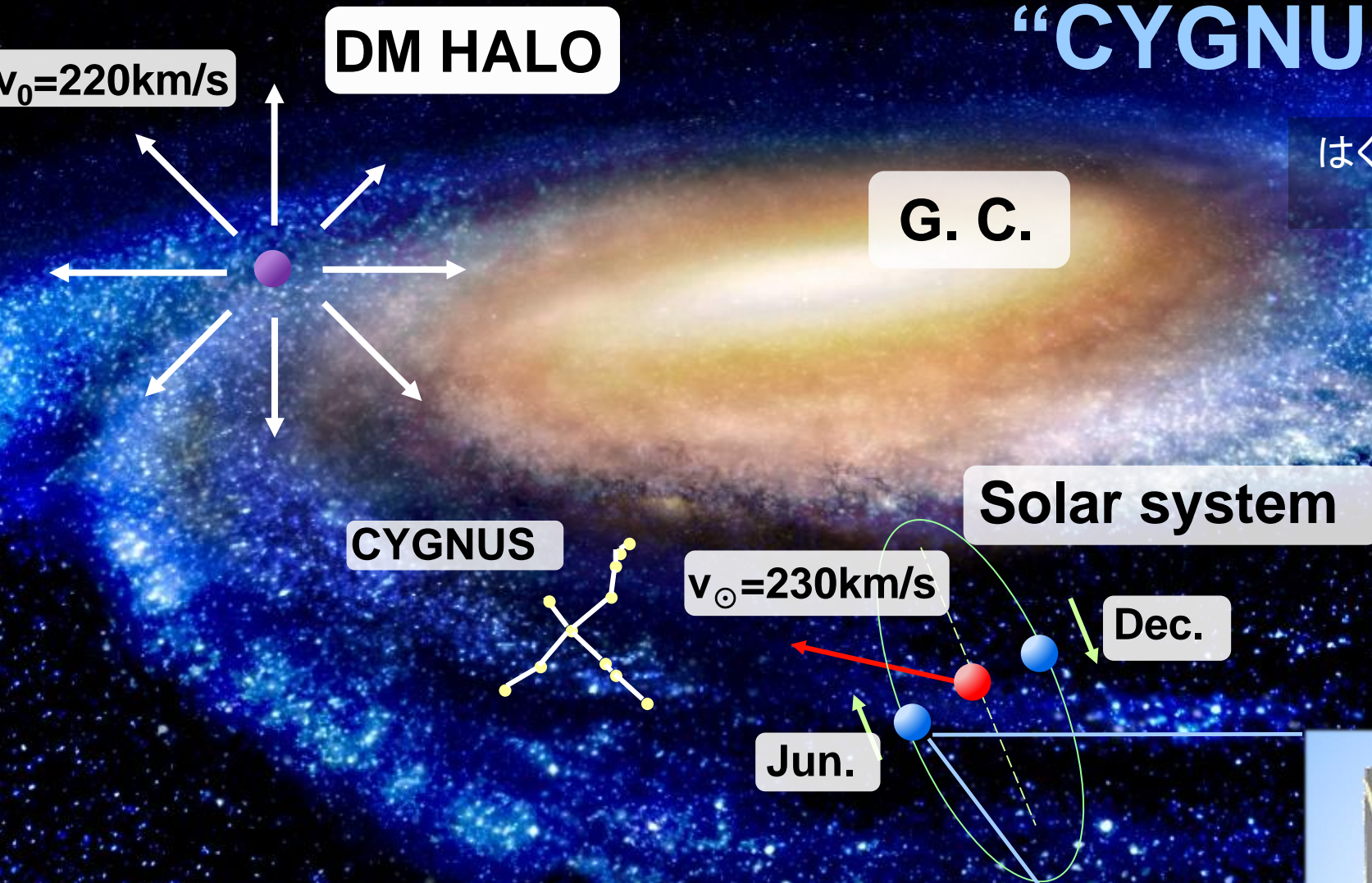
分担者：小川洋(日本大学)

2020年6月3日  
新学術領域研究「地下宇宙研究」  
第二回領域研究会

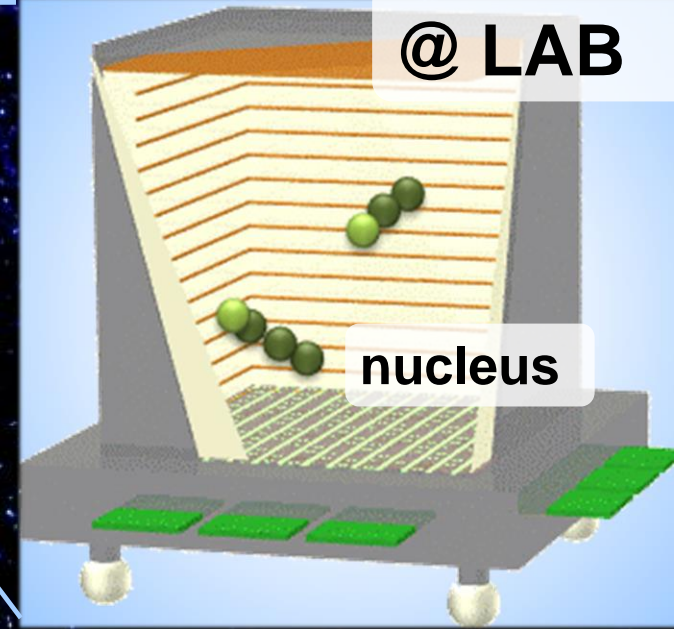


# “CYGNUS” concept

はくちょう座の方向から吹き付け  
暗黒物質の風を検



@ LAB



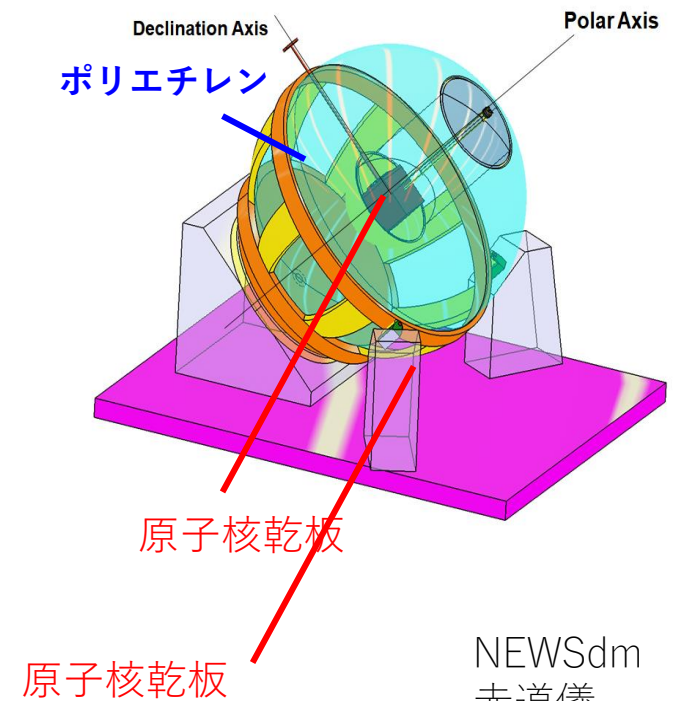
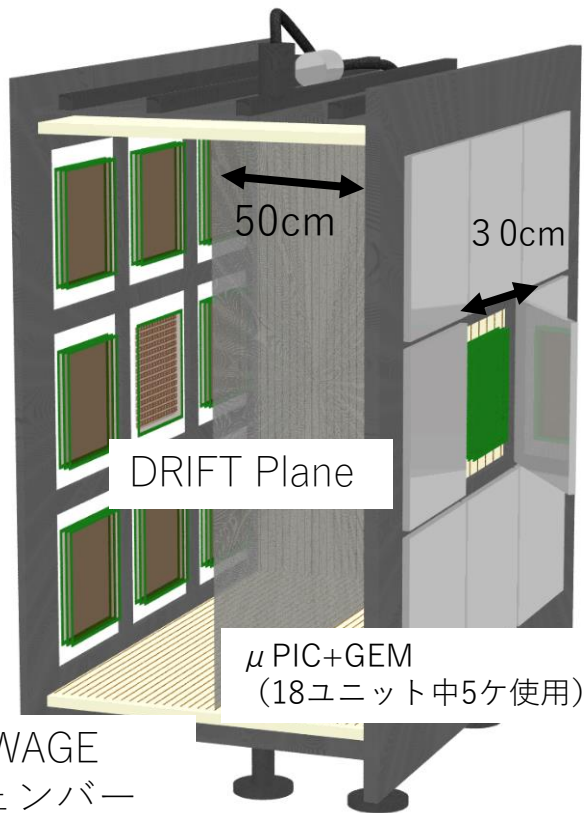
三次元飛跡検出  
ガスTPC(身内・小川): 時間分解能あり  
原子核乾板(中): 大質量可能

# 研究内容：方向に感度を持つ暗黒物質探索実験

ガス検出器 (NEWAGE) : DAMA領域の探索

ガス中からのラドンの除去 : 低BG吸着剤(MS)の開発

原子核乾板(NEWdm) : 低BG装置開発、暗黒物質探索実験



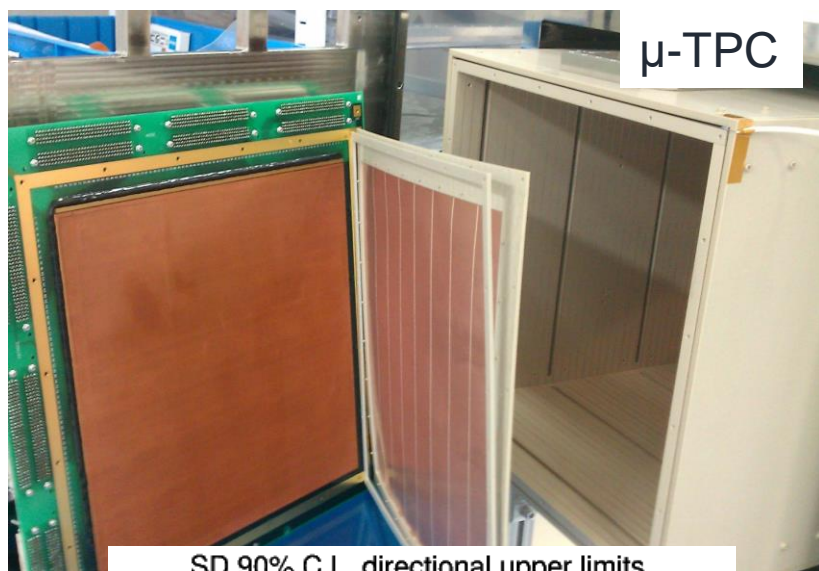
# 2019年度成果 <https://www.lowbg.org/ugap/result-b02.html>

- 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

NEWAGE

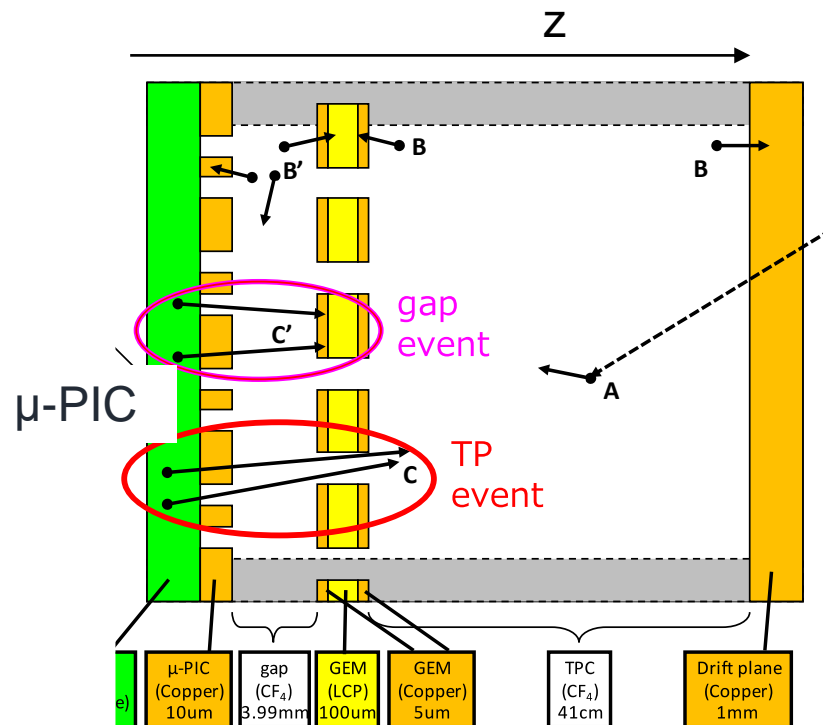
# NEWAGE 研究の背景

- NEWAGE-0.3b' 神岡でDM run
- $\mu$ -PIC (マイクロパターンガス検出器)
- Detection Volume:  $31 \times 31 \times 41 \text{cm}^3$
- Gas:  $\text{CF}_4$  at 0.1atm (50keVee threshold)

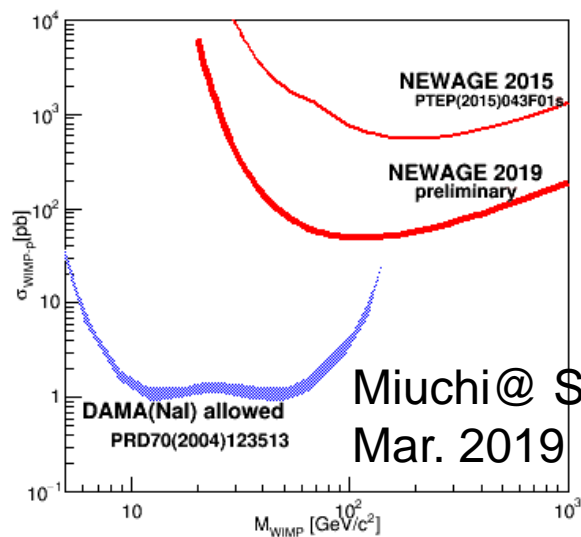


$\mu$ -TPC

- $\mu$  PIC表面からの  $\alpha$  線が問題
- 低  $\alpha$   $\mu$ -PIC開発により1桁感度改善 (~2019)



SD 90% C.L. directional upper limits



- 本計画研究：低BG  $\mu$ -PIC開発によるさらなる感度改善

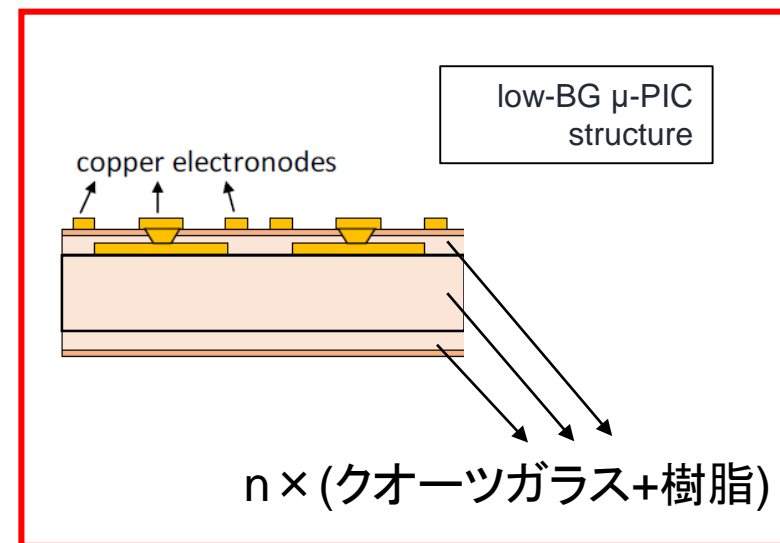
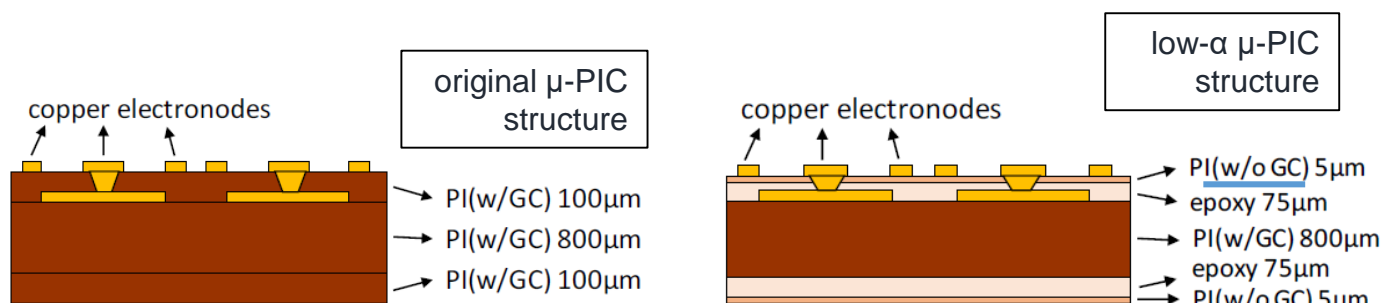
⇒ 関連パレルトーク: 石浦宏尚

# NEWAGE 2020年度 **lowBG $\mu$ -PIC** 試作

- 製作：DNP 材料（クオーツガラス）：信越化学
- 当初の予定「10cm角試作」 から 「30cm角試作」 へと前倒し （DNPの製作実績による）

## 経緯

- ORIGINAL  $\mu$ -PIC：ガラスクロスが汚い。
- 「low- $\alpha$   $\mu$ -PIC」：ガラスクロス排除。構造材(800  $\mu$ m厚)はそのまま使用した。  
( $\alpha$ 線の寄与はない、製作リスクを低減する。) 表面 $\alpha$ 線は無事落ちた。
- 「lowBG  $\mu$ -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 $\mu$ m (通常 $\mu$ -PIC材料)	$(3.9 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	$(3.8 \pm 0.1) \times 10^{-1}$	$1.81 \pm 0.04$
PI(w/o GC) 5 $\mu$ m+エポキシ 75 $\mu$ m (low- $\alpha$ $\mu$ -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)	$< 2.4 \times 10^{-3}$	$< 1.3 \times 10^{-2}$	$< 3.7 \times 10^{-3}$

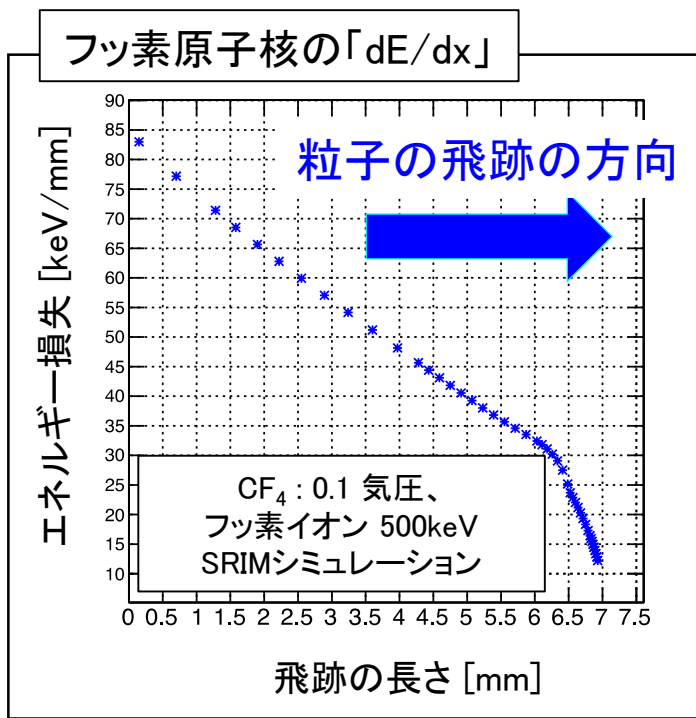
← やわらかくて 構造材には使用不可

← **新規材料 w/ D01**

# 2019年度成果① : First limits from a 3d-vector directional dark matter search with the NEWAGE-0.3b' detector

arXiv:2005.05157v1

- 三次元飛跡に前後判定導入 (3d-vector tracking)

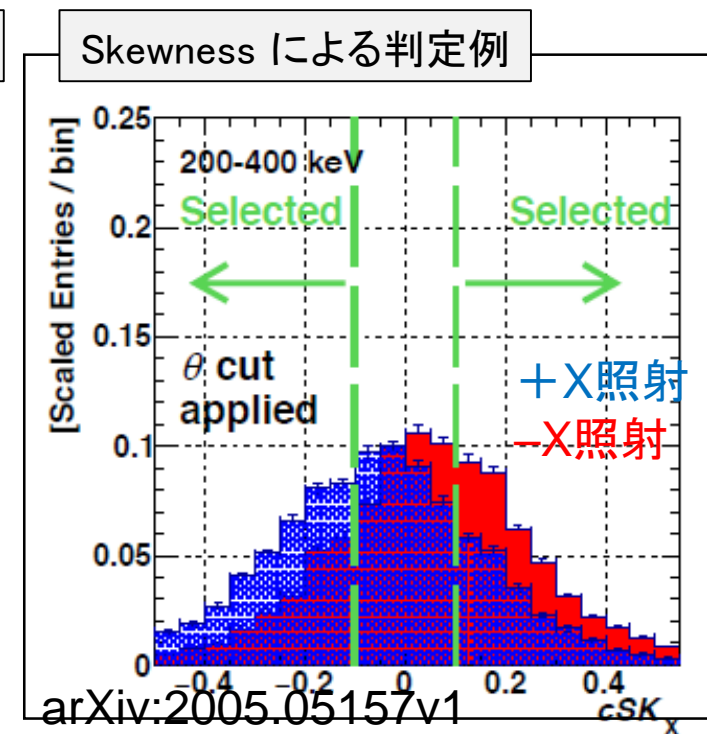


dE/dxの非対称性パラメータ: SKewness

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

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

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



判定率

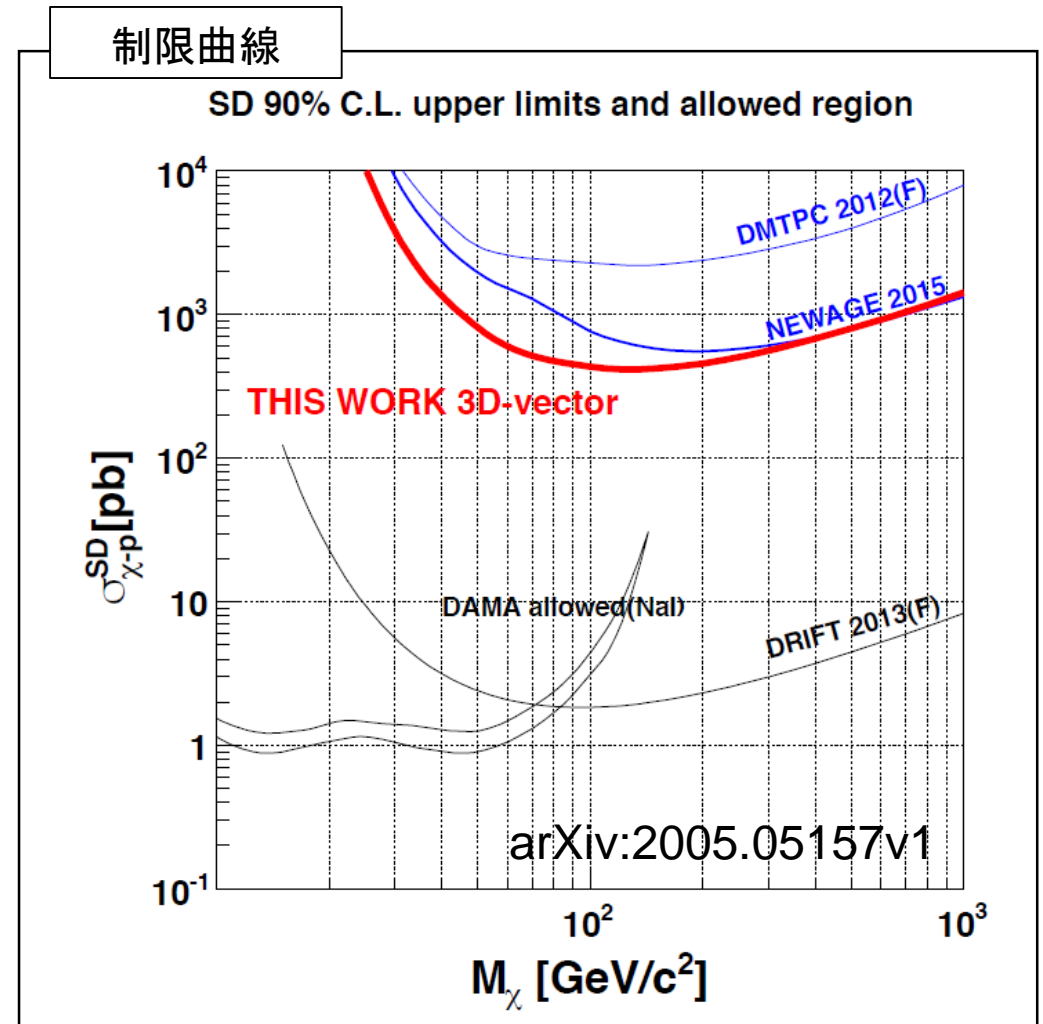
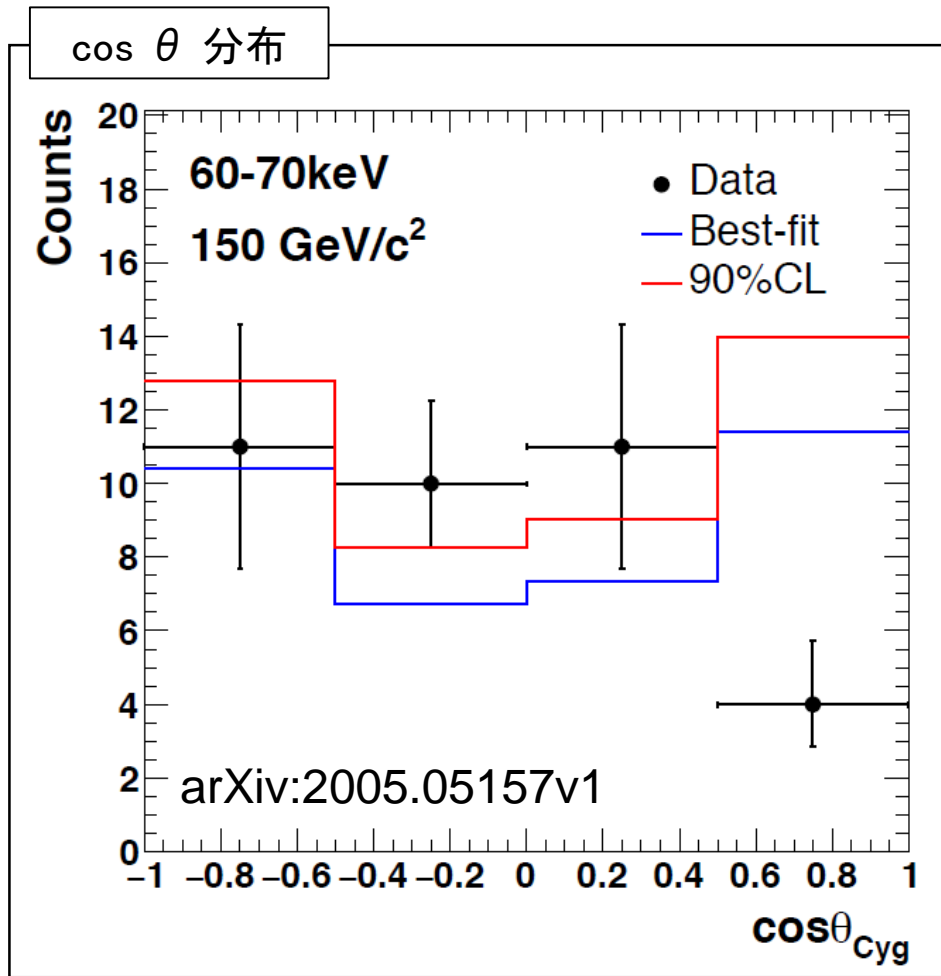
energy range	average [%]
50-100 keV	53.4 ± 0.5
100-200 keV	57.7 ± 0.4
200-400 keV	65.1 ± 0.5

⇒関連パラルトーク: 島田拓弥



- low- $\alpha$   $\mu$ -PIC導入前のDM run (435days)

- $\cos \theta_{\text{Cyg}}$  分布 ( $\theta$ : 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  $\theta$ 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

# 2019年度成果② : Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors

Keiko I. Nagao <sup>a,b,\*</sup>, Tomonori Ikeda <sup>c</sup>, Ryota Yakabe <sup>c</sup>, Tatsuhiro Naka <sup>d,e</sup>, Kentaro Miuchi <sup>c</sup>

[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

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

where the normalization factor  $N(v_0) = 2v_0\Gamma(3/2)$ ,  $v_{0,\text{iso.}} = 250$  km/s,  $v_{0,\text{ani.}} = 120$  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

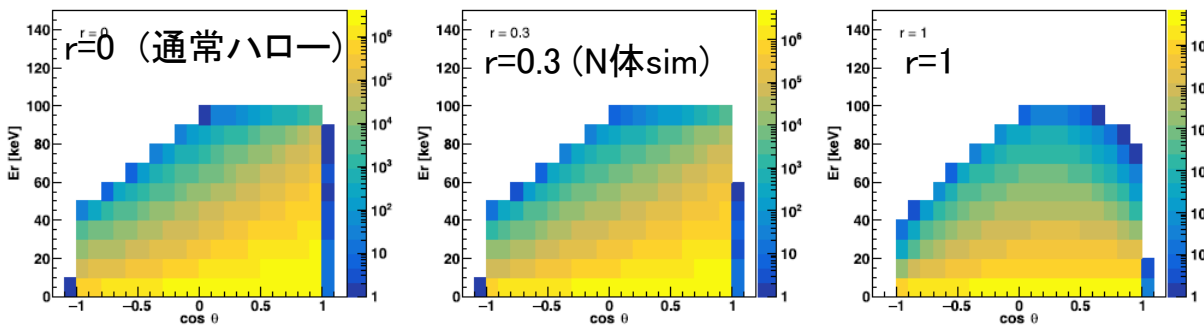


Fig. 2.  $E_R$ - $\cos\theta$  distribution for the  $m_\chi = 3m_A$  case. The target nucleon is F (light) and the energy threshold  $E_R^{\text{thr}} = 0$  keV is assumed in all the figures.

方向情報の応用例の一例

rの推定例

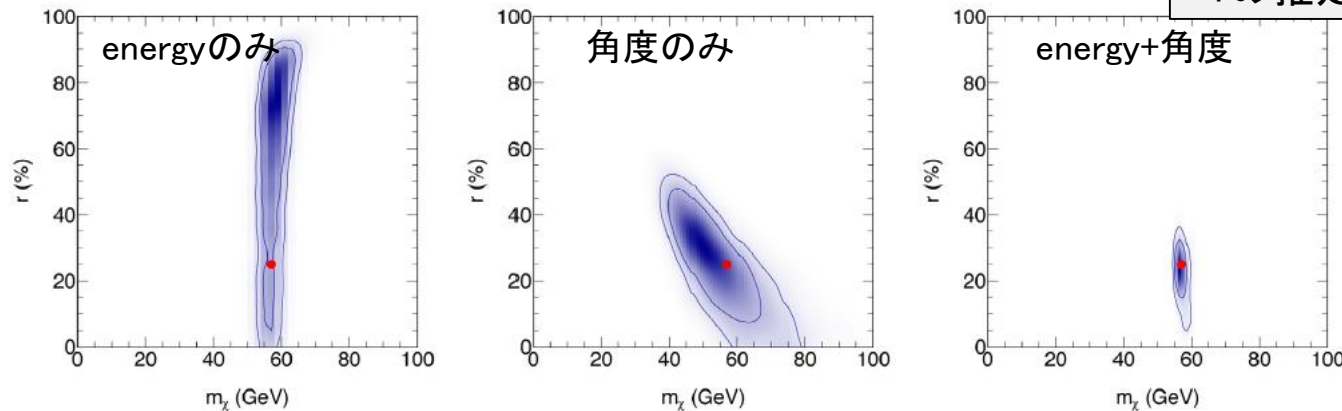
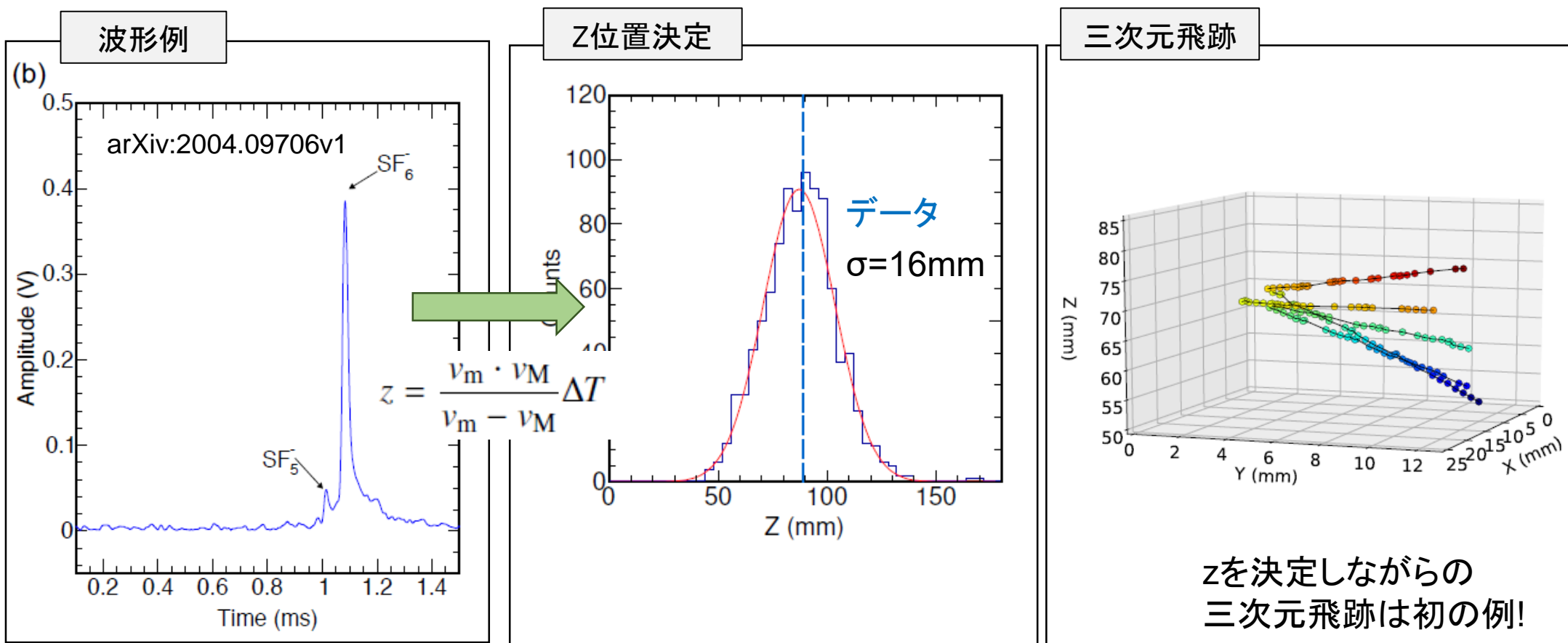


Fig. 13. The 2D posterior probability distributions in the dark matter mass and anisotropy space for target F. Red points indicate the input parameters in simulation. Inner and outer contours show 68% and 90% C.L., respectively. Left: Only data of recoil energy  $E_R$  is used. Center: Only data of scattering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

# 2019年度成果③ Development of a Negative Ion Micro TPC Detector with SF<sub>6</sub> Gas for the Directional Dark Matter Search

- 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  $\mu$  PICと相乗的



# 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

## • R元年度:

- 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(-R2年度)

 **ユニオン昭和株式会社** ホームページより

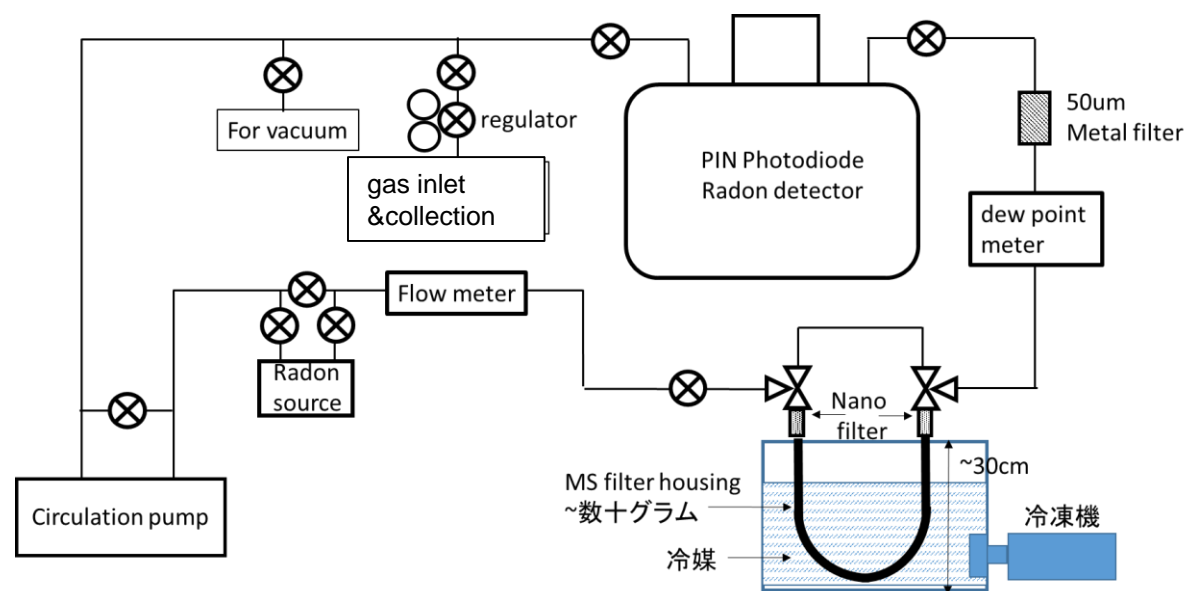
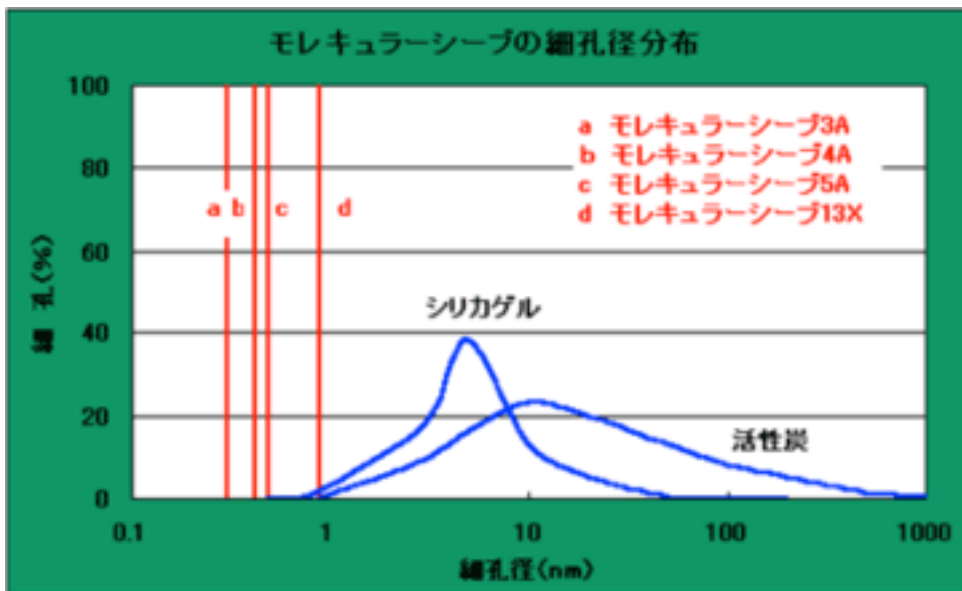


図3:ラドン除去試験セットアップ

⇒関連パラレルトーク:小川洋

はやりもの

若手賞おめでとうございます。

パラレルセッションA1 : 11:00 ~11:30

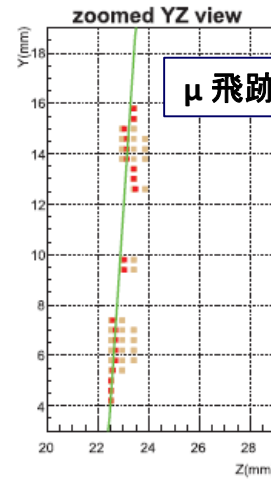
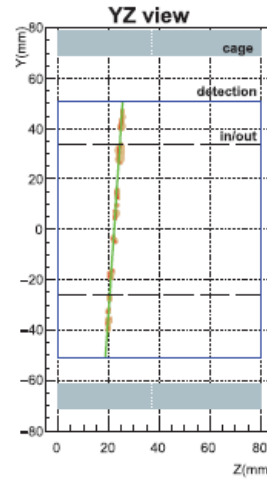
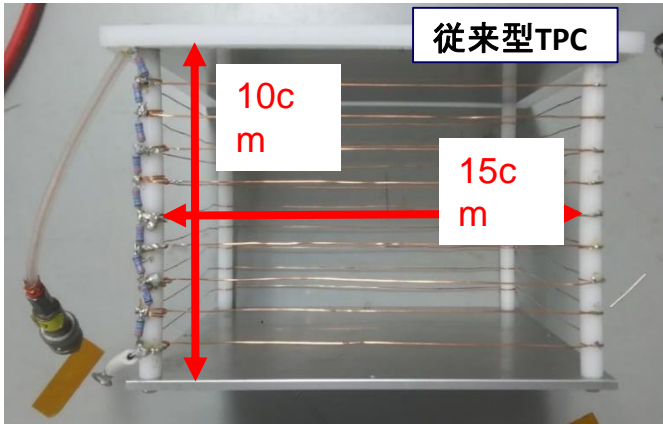
A1-2	マグノンを用いた軽いボソン暗黒物質の直接探索	千草颯(KEK)	<a href="#">Slide</a>	<a href="#">Room2</a>
------	------------------------	----------	-----------------------	-----------------------

A2-6	高抵抗薄膜を用いた新たな液体キセノンTPCの開発	山崎里奈(名古屋大)	<a href="#">Slide</a>	<a href="#">Room6</a>
------	--------------------------	------------	-----------------------	-----------------------

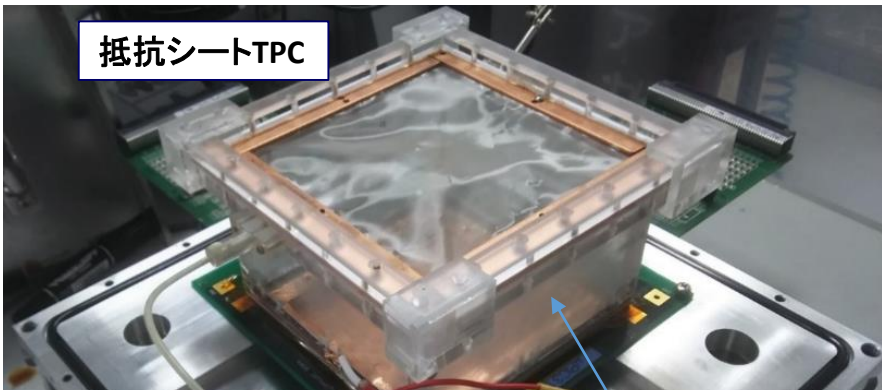
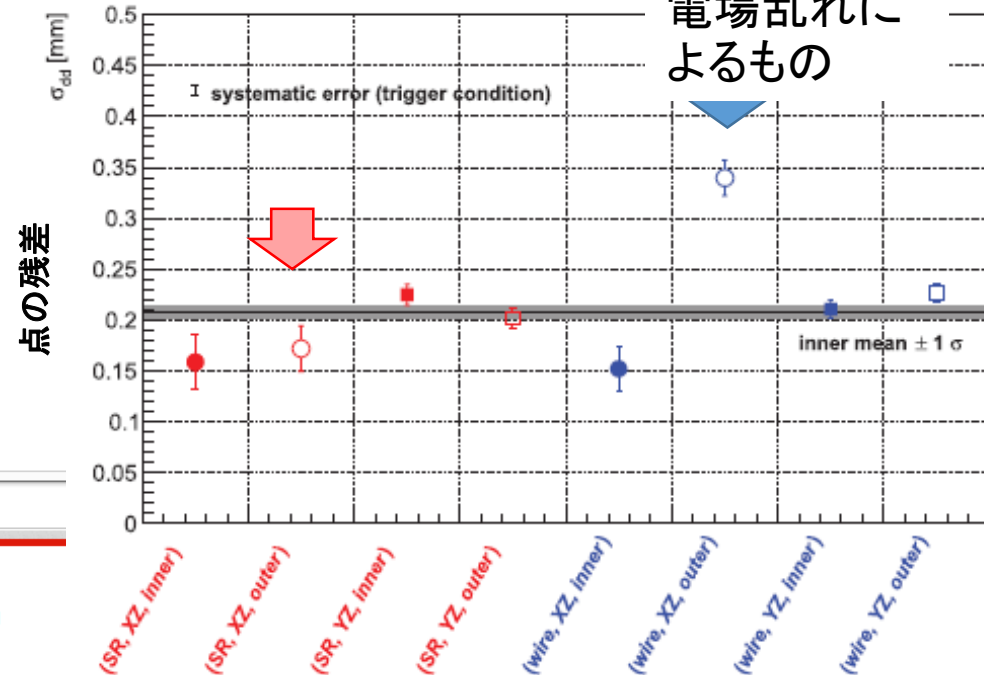
• 「新型TPC」

- 連続抵抗（市販のシート）を使ったTPC電場形成
- ワイヤタイプよりシンプルな構造 一様な電場

PTEP 2019 (2019)063H01



wire TPCの  
電場乱れによるもの



事業者向けサイト  
現場を支えるネットストア

取扱点数 1800万点 当日出荷 525,000点 翌日出荷 571,000点

国立大学法人神戸大学 | 大学 | マイページ | 定期注文

内張り

[ ログアウト ]

カテゴリから探す | クイックオーダー (品番注文) | すべてのカテゴリ | 商品名、キーワード、商品番号

マイページ

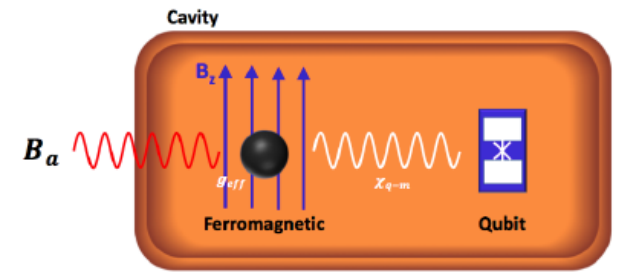
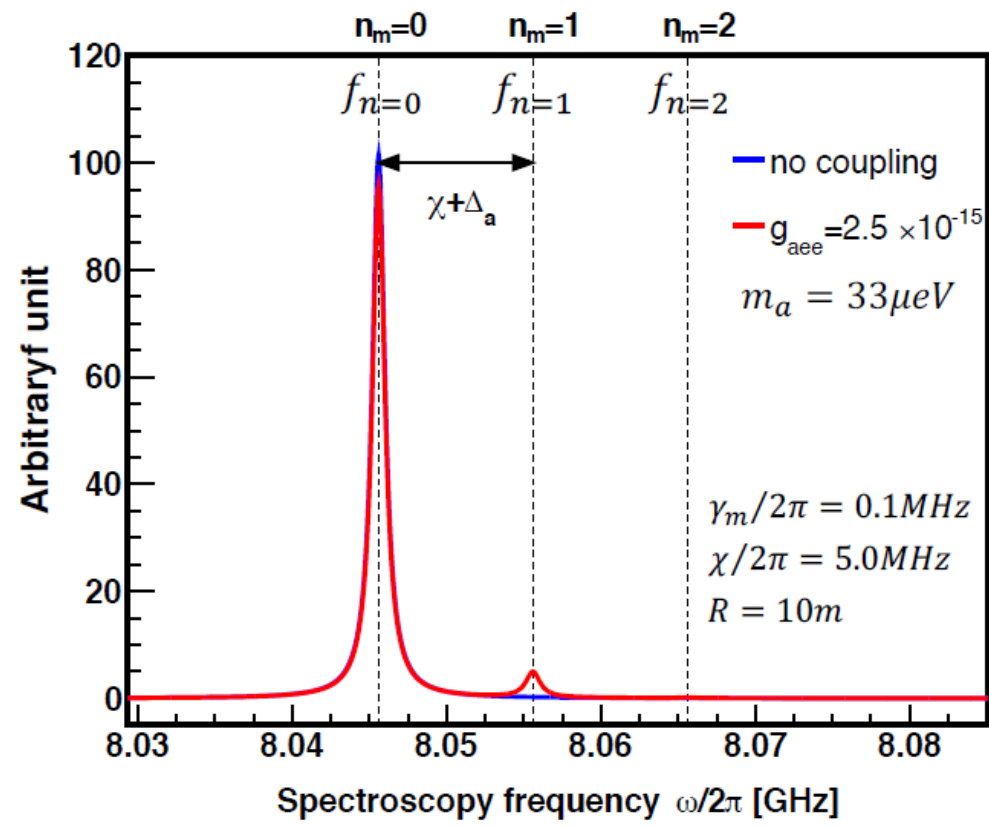
買ったものリスト

- (+)皿小ねじ (SUS430)(パック品)
- ICソケット 1列タイプ XR2 オムロン(omron)
- デジタル圧力センサ MFC 22

アキレス 帯電防止窓用フィルム ビニラス 透明0. 2×1000×10m

10GΩ/□

## アクシオン-マグノン結合の期待されるスペクトル



✓ アクシオンとマグノンの結合力

$$g_{eff} \equiv \frac{g\mu_B B_a}{2\hbar} \sqrt{2sN},$$

✓ 平均マグノン数

$$\bar{n}_{\pm}^m = \frac{g_{eff}^2}{\gamma_m^2/4 + (\Delta_a \pm \chi)^2},$$

➤ アクシオンとマグノンが結合していれば、Qubitの遷移周波数 $f_{n=1}$ にピークがたつ

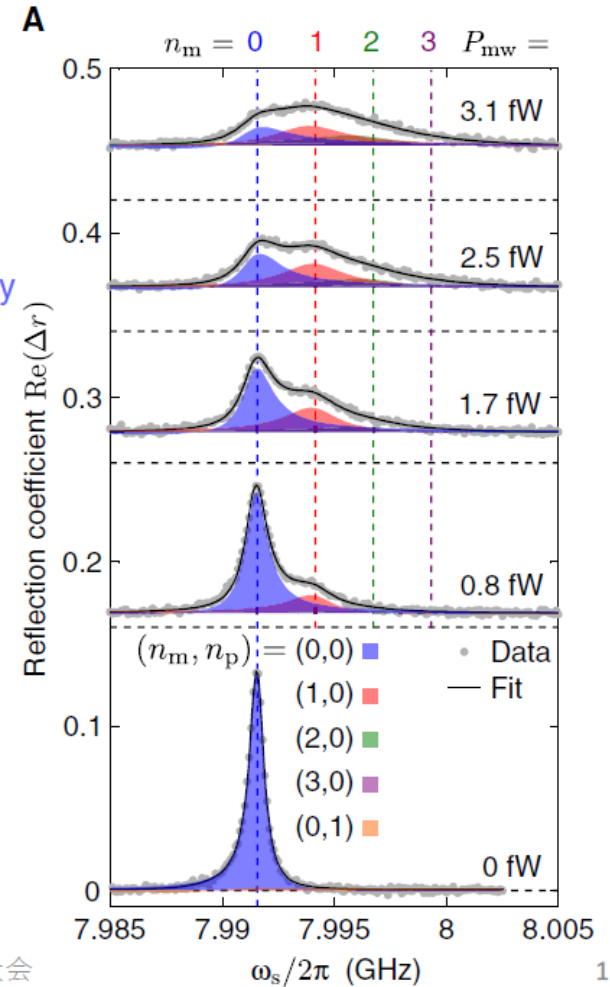
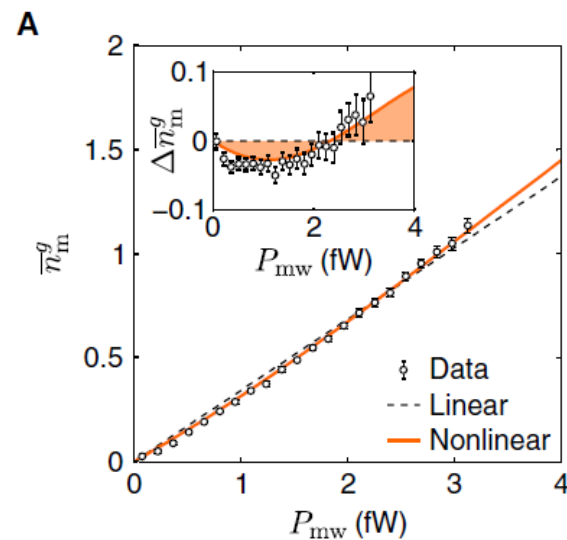
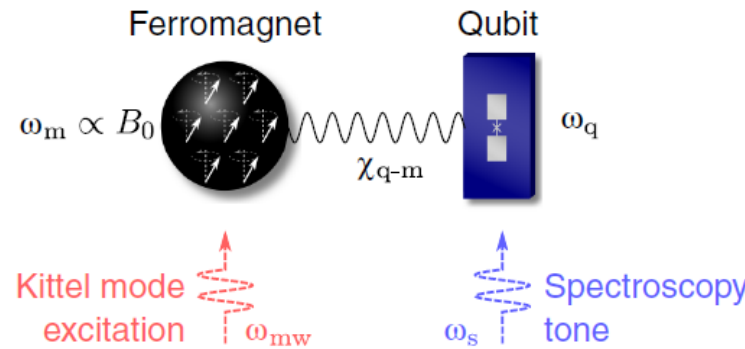


• 実験

- アクシオンデータ：量子情報のBGデータ
- 量子情報のデモンストレーション  
=我々のキャリブレーション

# キャリブレーションRUN

D.Lachance-Quirion, et al., Sci.Adv. 2017;3:e1603150

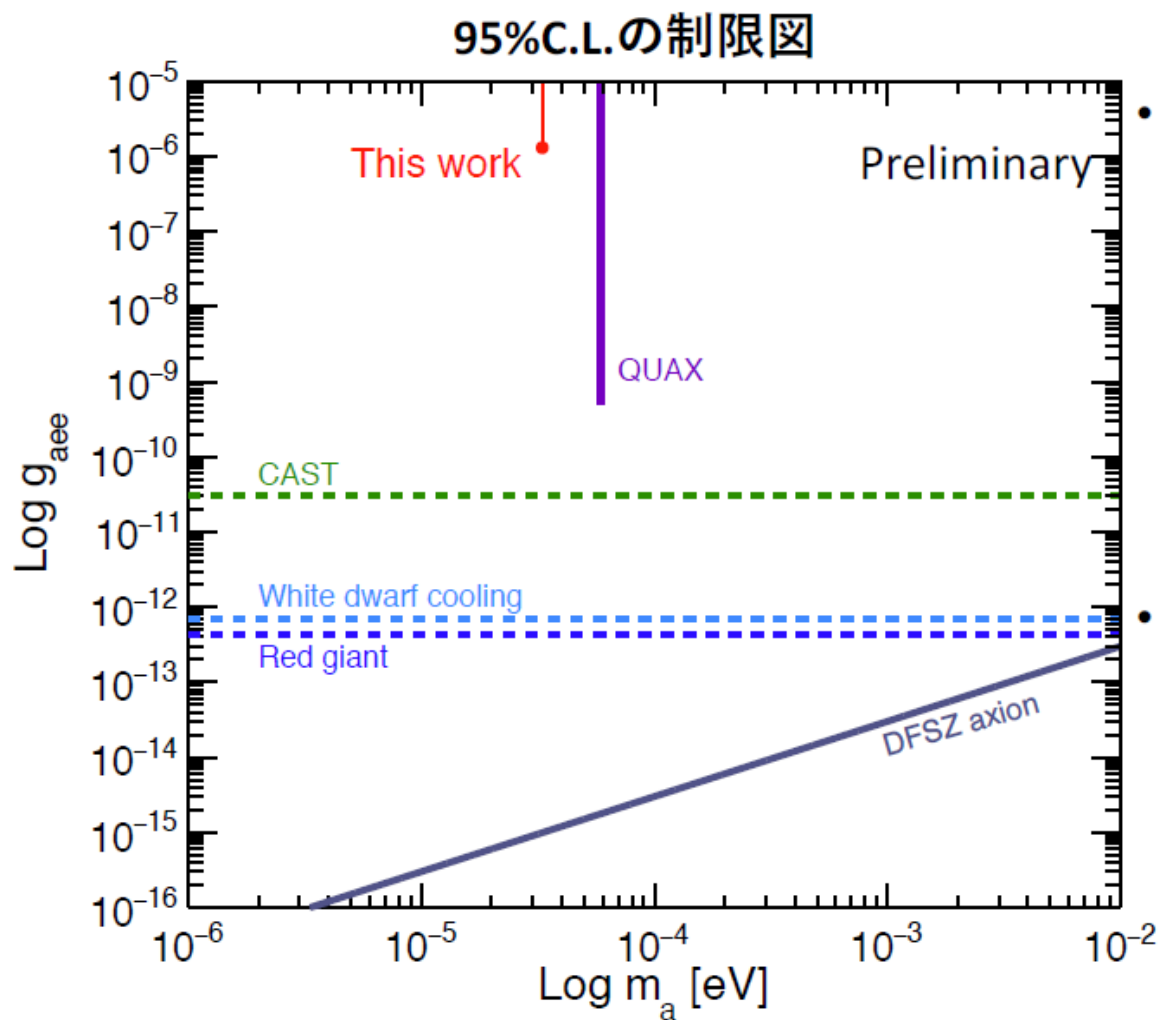


2018/9/17

2018年JPS秋季大会

13

# 制限図



- アクシオン質量 $33\mu\text{eV}$ について、95%信頼度の上限を与えた

$$B_a < 4.1 \times 10^{-14} \text{ [T].}$$

$$g_{aee} < 1.3 \times 10^{-6}$$

- 感度を制限している要因

✓ 強磁性体のQ値(約1000)

$$\bar{n}_{\pm}^m = \frac{g_{eff}^2}{\gamma_m^2/4 + (\Delta_a \pm \chi)^2},$$

現状CavityのQ値より3桁悪い

# まとめ

- NEWAGE
  - low-BG  $\mu$ -PICの開発
  
- 低BG MS開発