

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)

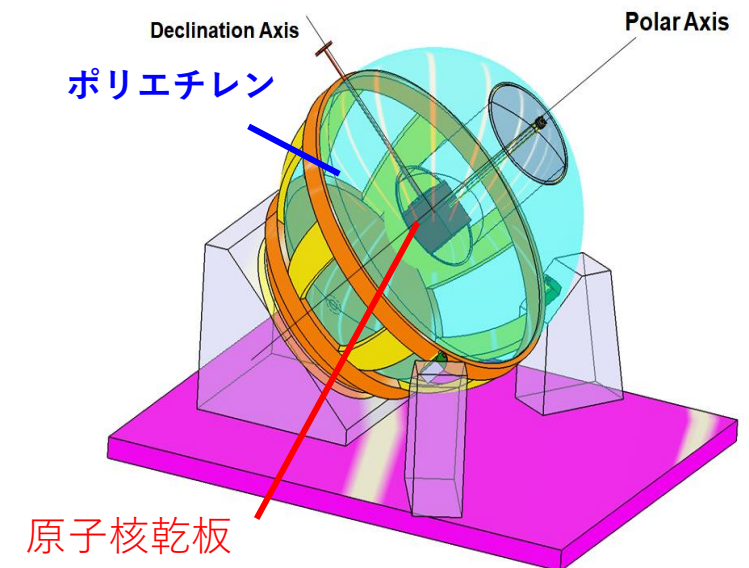
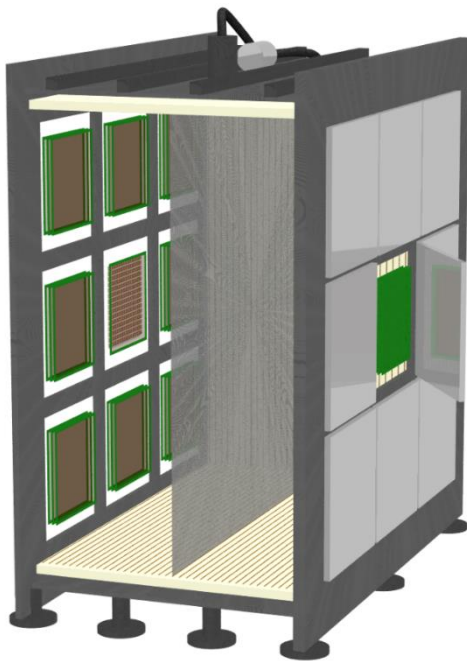
分担者：中竜大(東邦大学)

分担者：小川洋(日本大学)

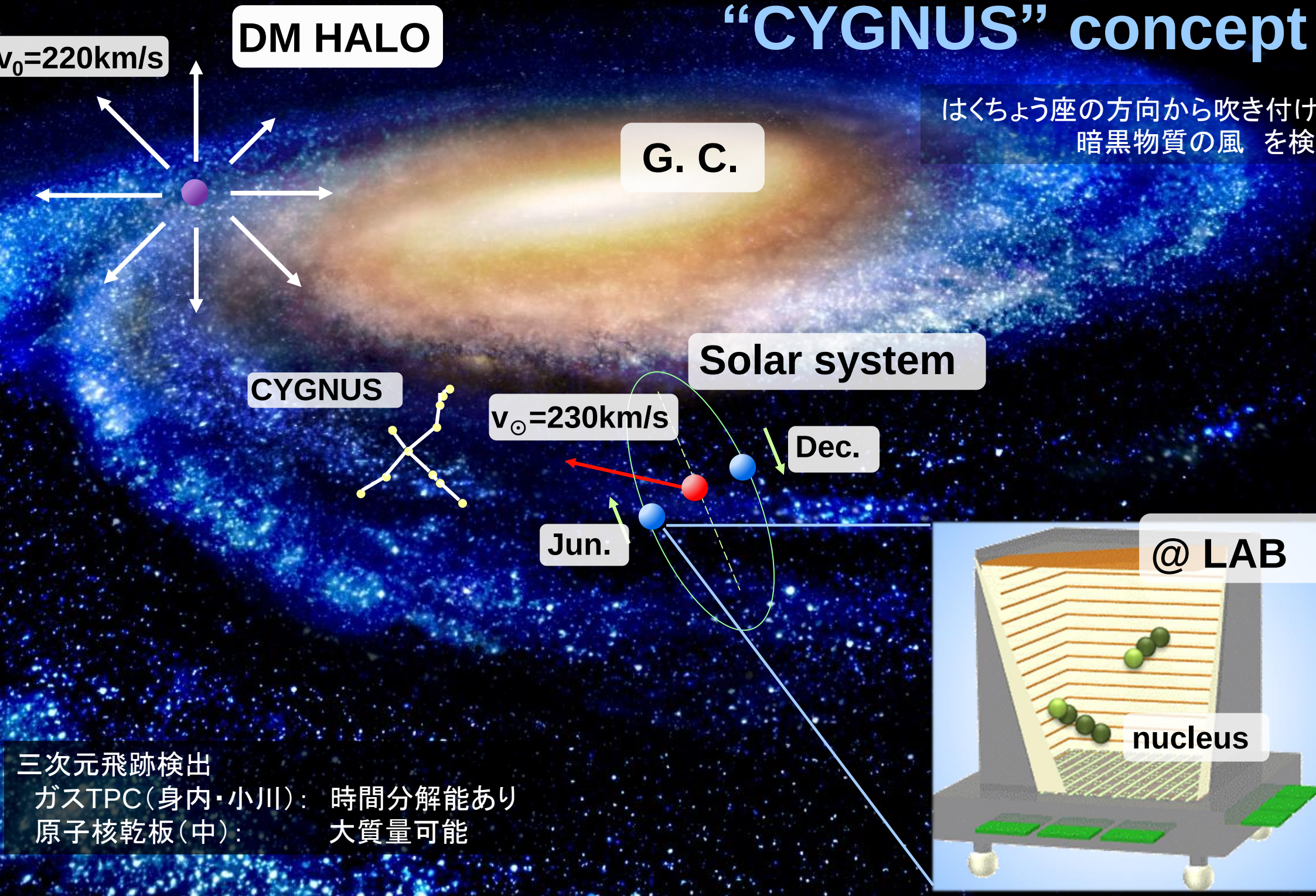
2020年6月3日

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

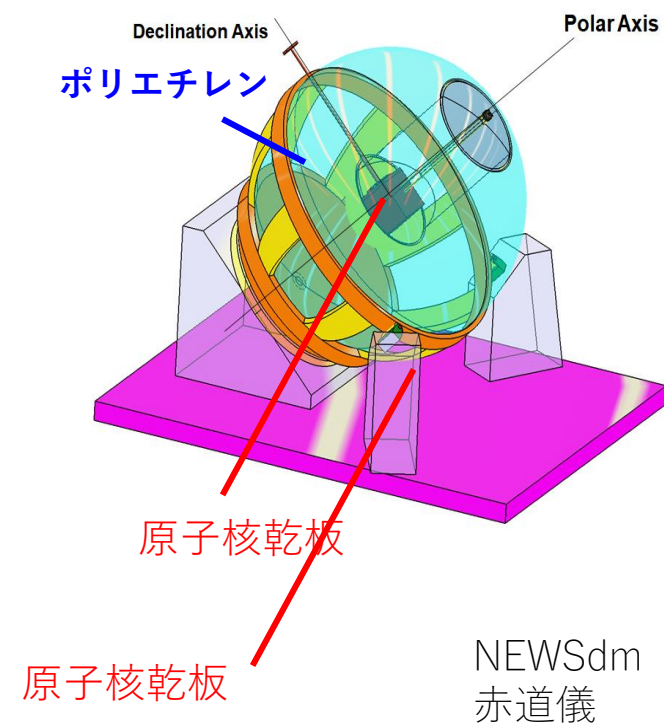
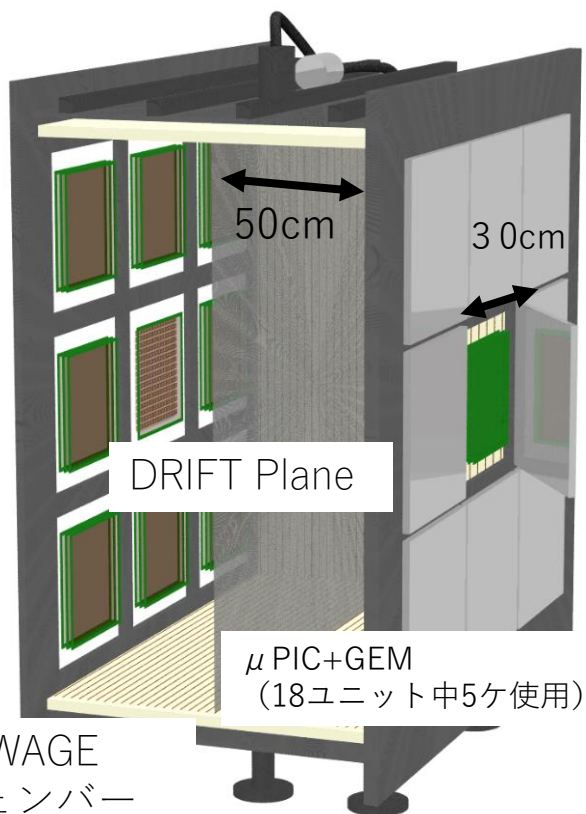
三次元飛跡検出
ガスTPC(身内・小川): 時間分解能あり
原子核乾板(中): 大質量可能

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
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012044](#)

国際活動

- Alpha-ray imaging chamber based on a micro-TPC in a low radioactivity structure
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012233](#)

w/ D01

- 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
[2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1468 012247](#)

w/ D01

- Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors
[Physics of the Dark Universe, Volume 27, January 2020, 100426](#)

Keiko I.Nagao, Tomonori Ikeda, Ryota Yakabe, Tatsuhiro Naka, Kentaro Miuchi

B02内協力

- 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

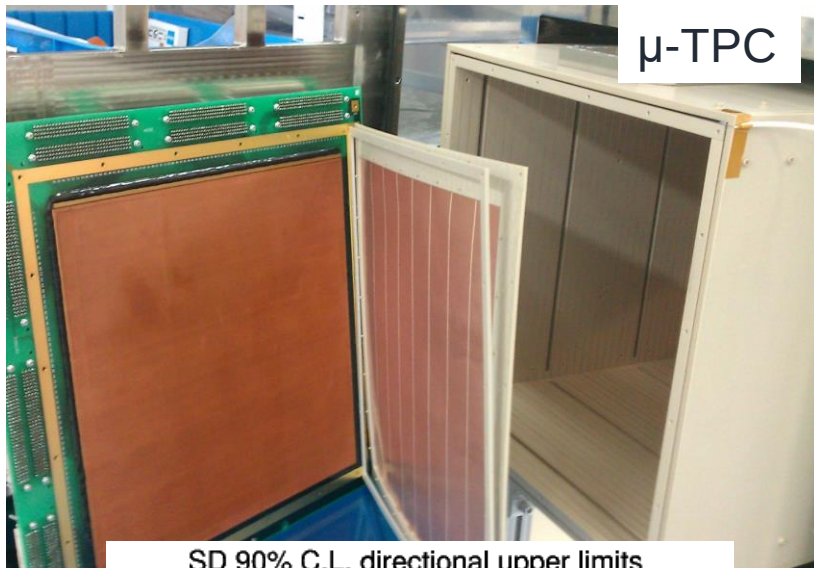
- Optical shape analysis based on discrete Fourier transform and second order moment calculation of the brightness distribution for the detection of sub-micron range low energy tracks
[arXiv:2003.12740](#)

- 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

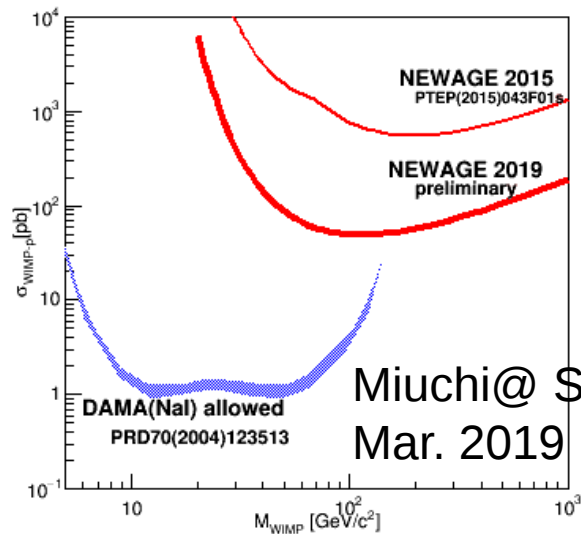
NEWAGE

NEWAGE 研究の背景

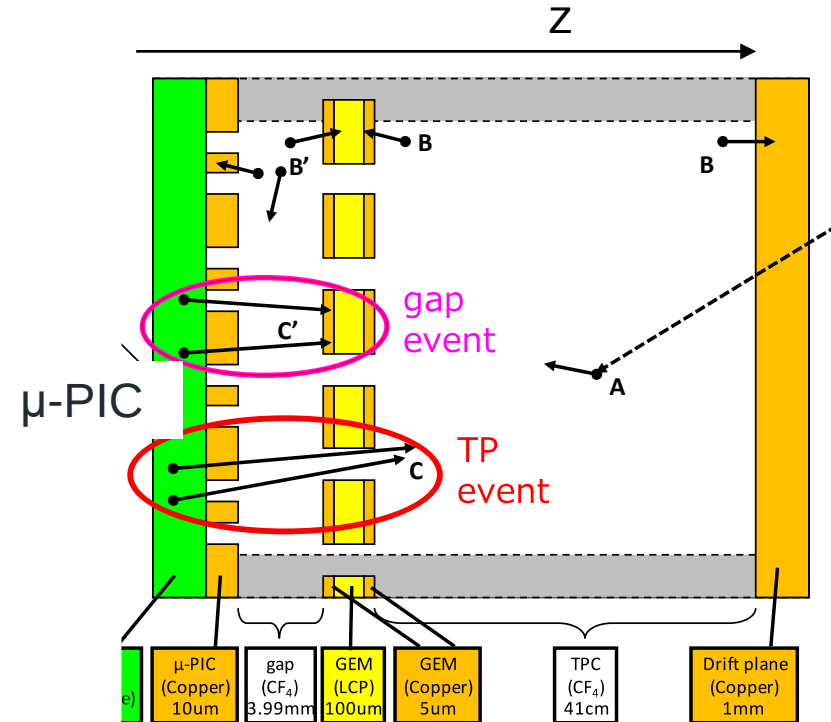
- NEWAGE-0.3b' 神岡でDM run
- μ -PIC (マイクロパターンガス検出器)
- Detection Volume: $31 \times 31 \times 41 \text{ cm}^3$
- Gas: CF_4 at 0.1atm (50keVee threshold)



SD 90% C.L. directional upper limits



- μ PIC表面からの α 線が問題
- 低 α μ -PIC開発により1桁感度改善 (～2019)



- 本計画研究：低BG μ -PIC開発によるさらなる感度改善

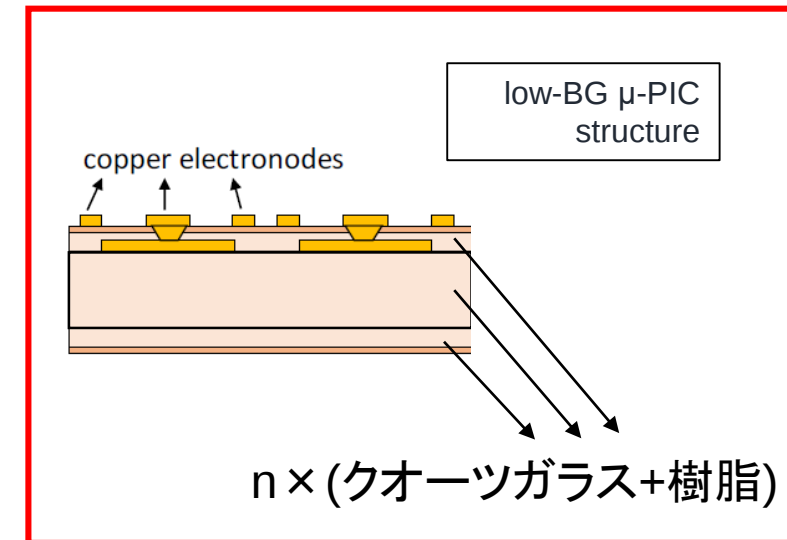
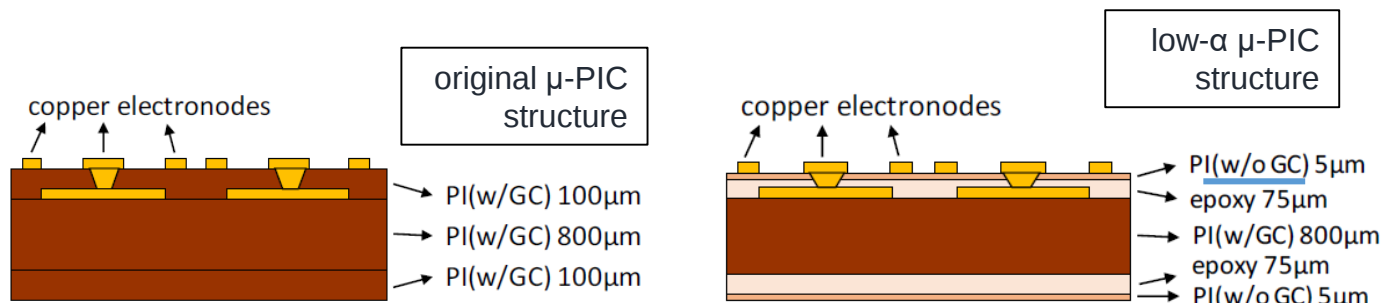
⇒関連パレルトーク: 石浦宏尚

NEWAGE 2020年度 **lowBG μ -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 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	^{238}U 中流 (ppm)	^{238}U 上流 (ppm)	^{232}Th (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)	$< 2.4 \times 10^{-3}$	$< 1.3 \times 10^{-2}$	$< 3.7 \times 10^{-3}$

← やわらかくて 構造材には使用不可

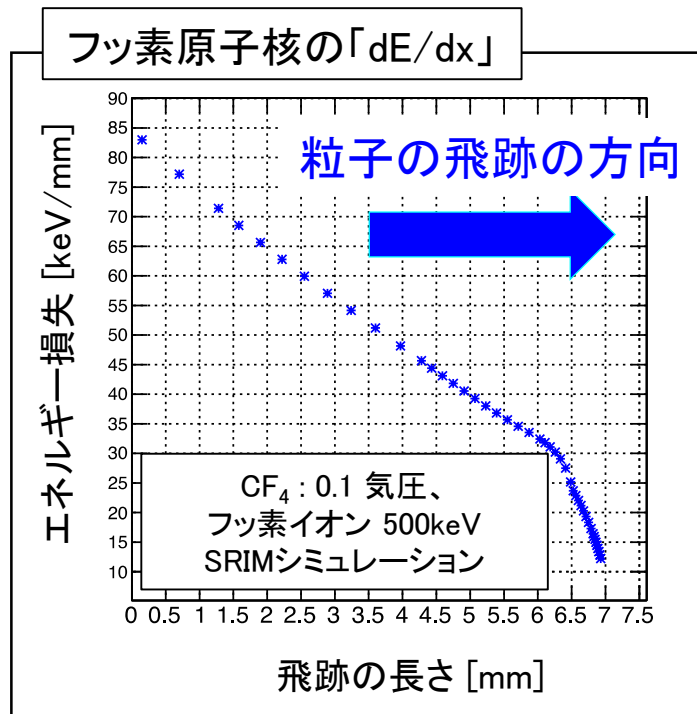
← 新規材料 w/ D01

2020年度試作について詳細を議論中

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）

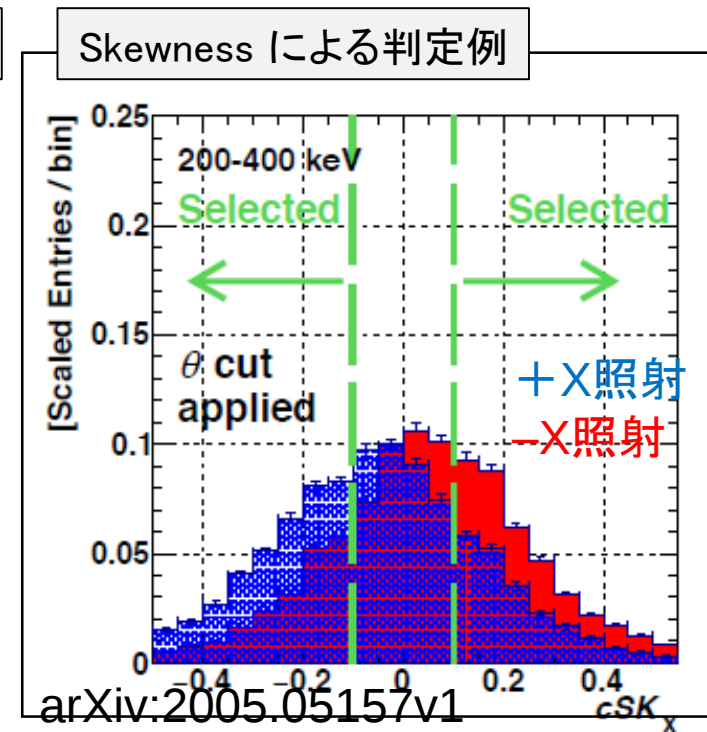


dE/dxの非対称性パラメータ: SKewness

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

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

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



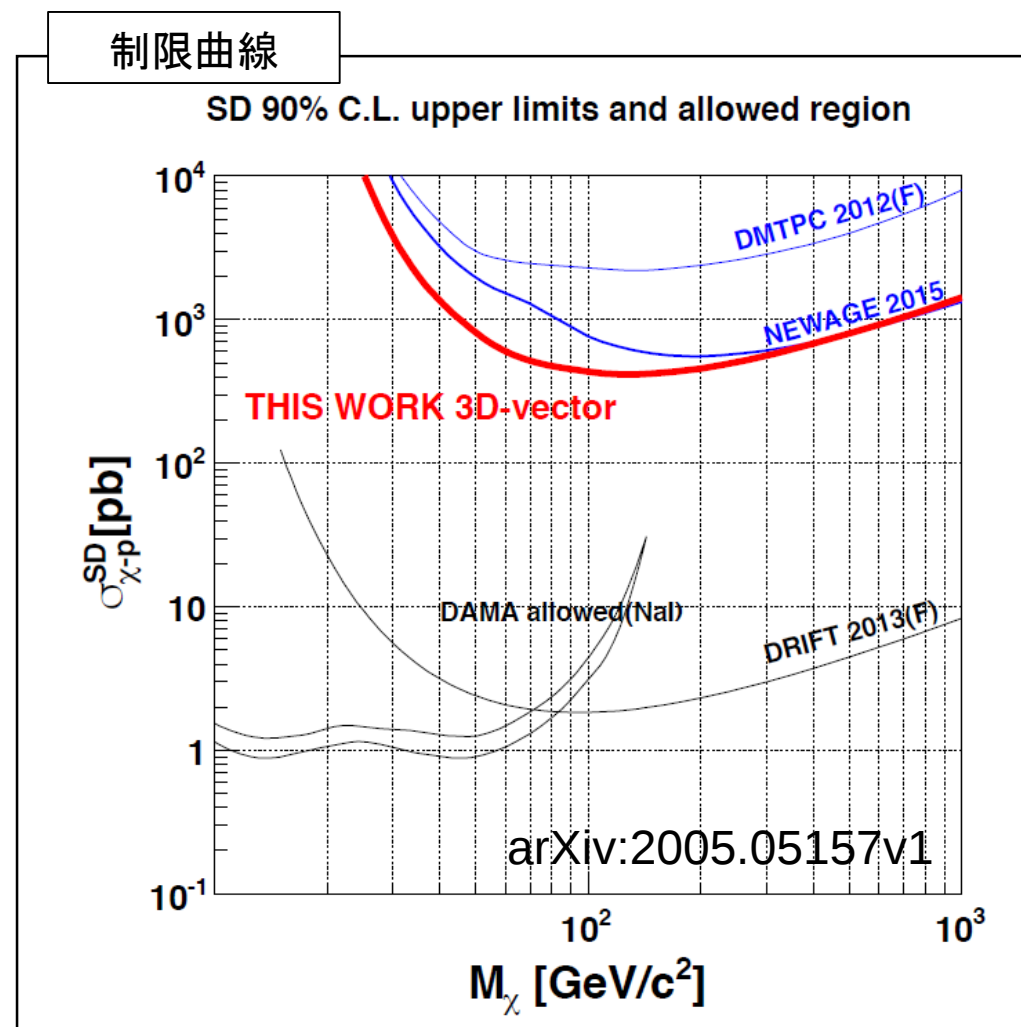
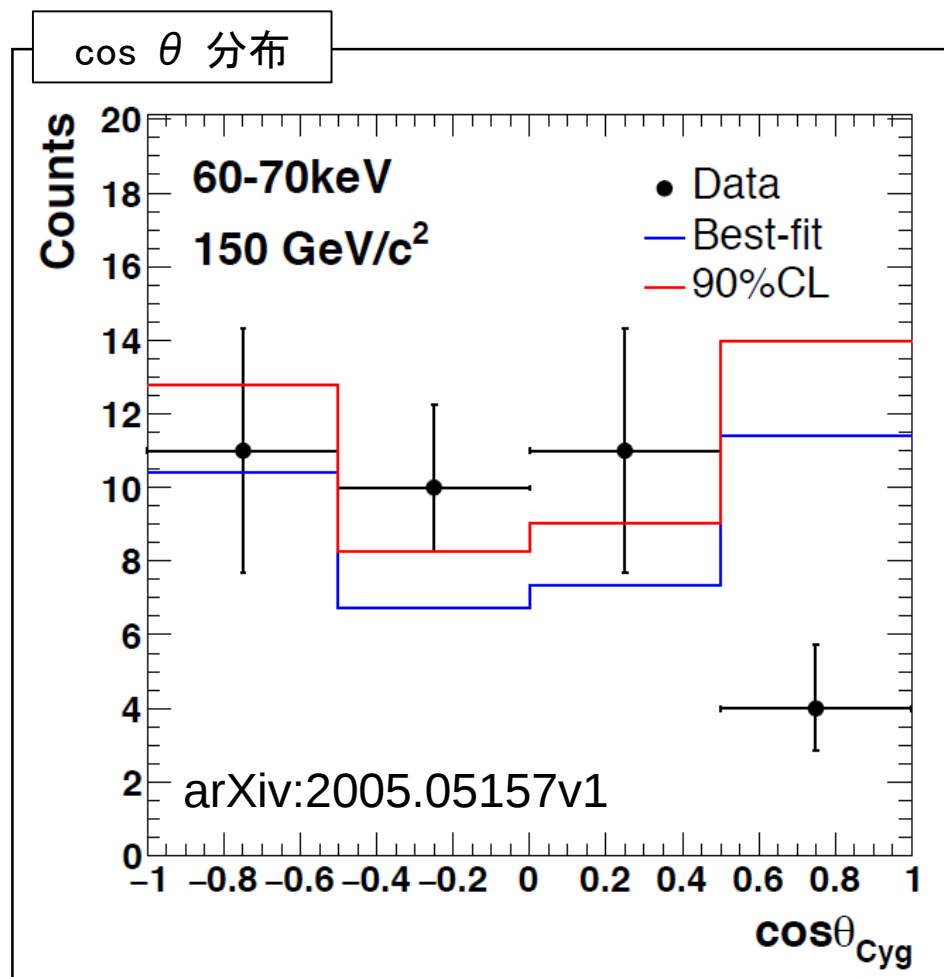
判定率

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

⇒関連パレルトーク: 島田拓弥

- 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

2019年度成果② :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

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

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

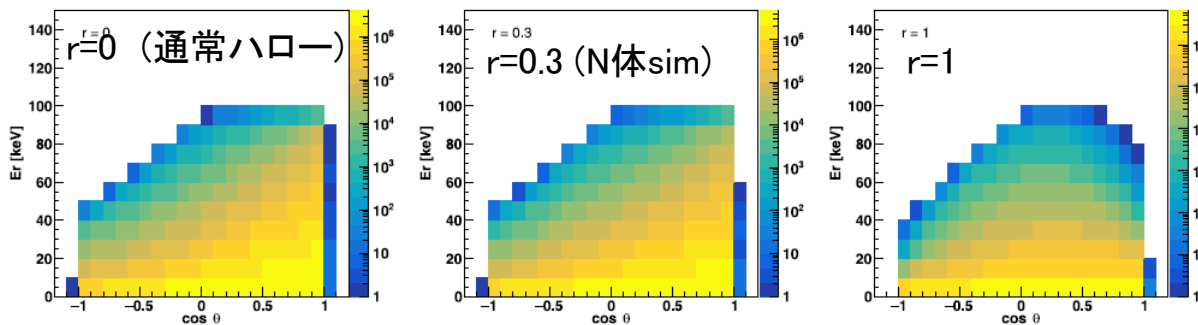


Fig. 2. E_R - $\cos \theta$ distribution for the $m_\chi = 3m_A$ case. The target nucleon is F (light) and the energy threshold $E_R^{\text{thr}} = 0$ keV is assumed in all the figures.

方向情報の応用例の一例

r の推定例

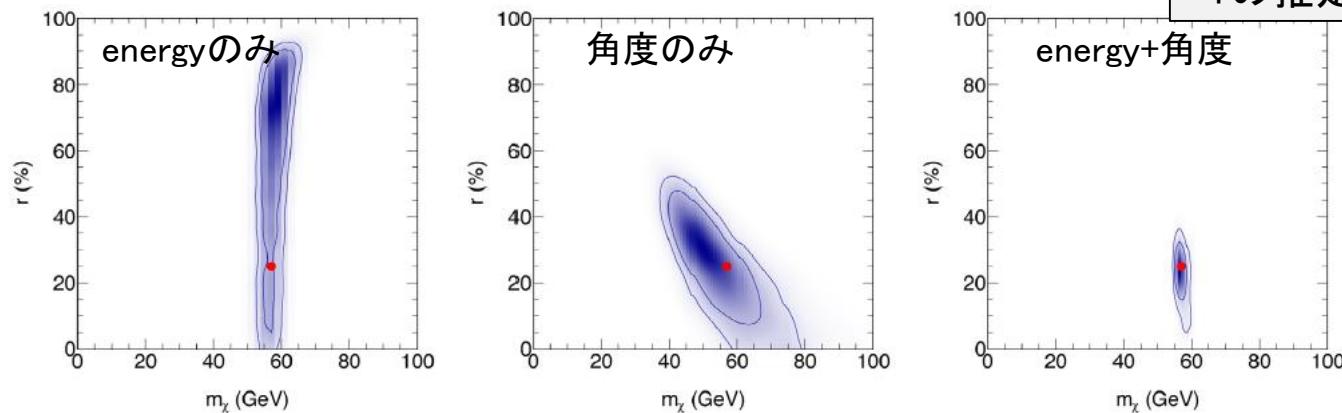
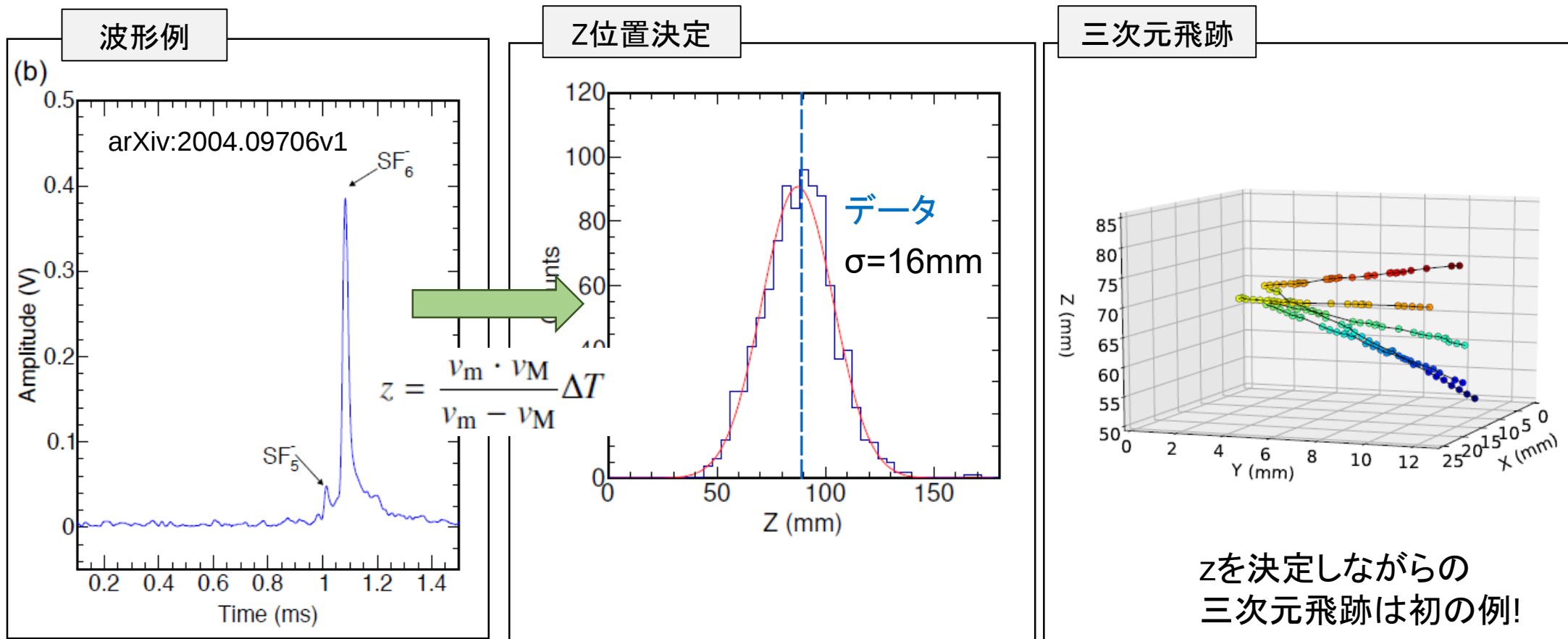


Fig. 13. The 2D posterior probability distributions in the dark matter mass and anisotropy space for target F. Red points indicate the input parameters in simulation. Inner and outer contours show 68% and 90% C.L., respectively. Left: Only data of recoil energy E_R is used. Center: Only data of scattering 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_6 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 μ PICと相乗的



⇒関連パラレルトーク: 窪田 諒

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

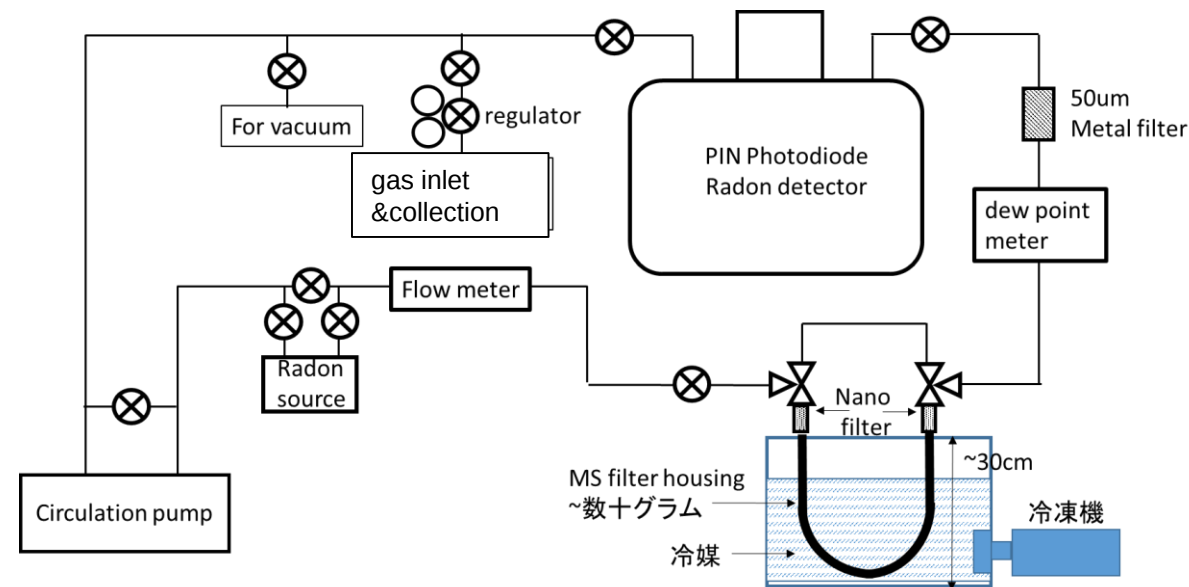
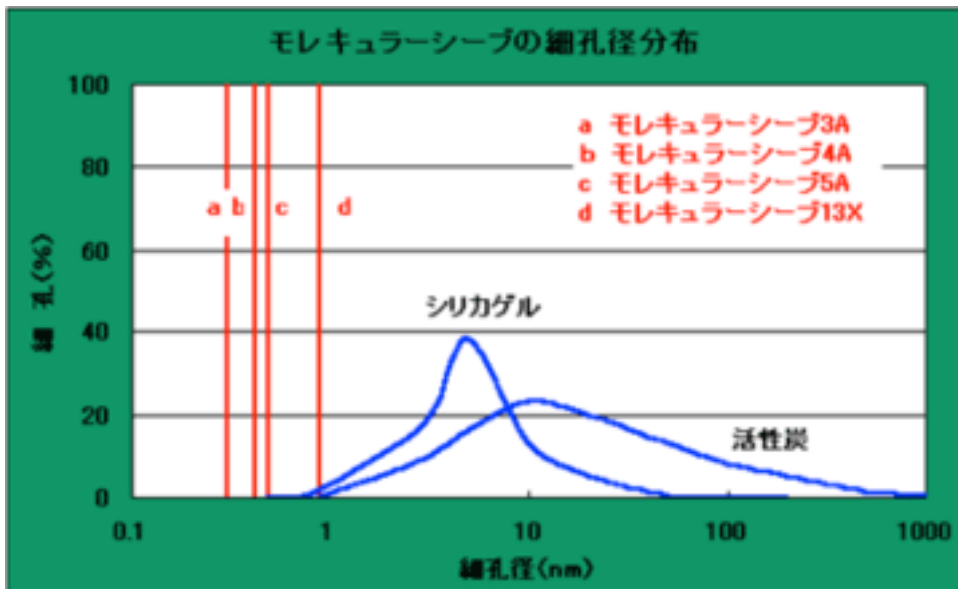


図3: ラドン除去試験セットアップ

⇒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

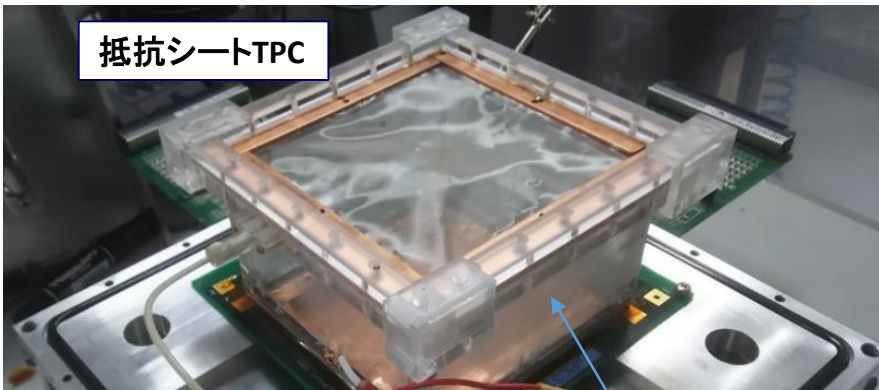
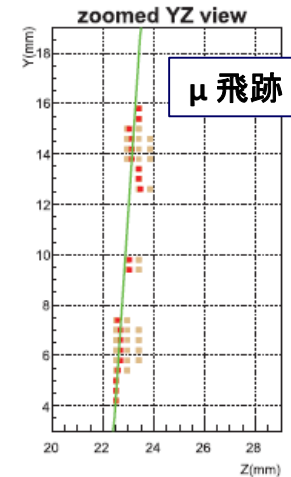
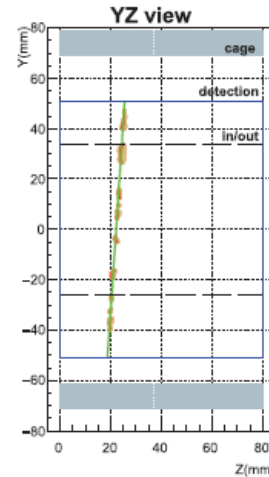
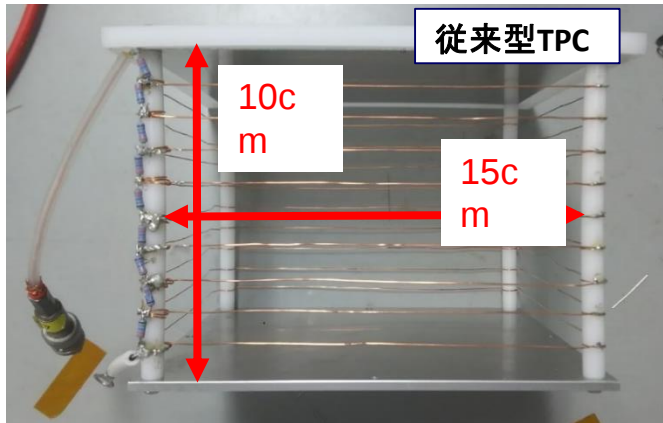
A1-2	マグノンを用いた軽いボソン暗黒物質の直接探索	千草颯(KEK)	Slide	Room2
------	------------------------	----------	-----------------------	-----------------------

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)	Slide	Room6
------	--------------------------	------------	-----------------------	-----------------------

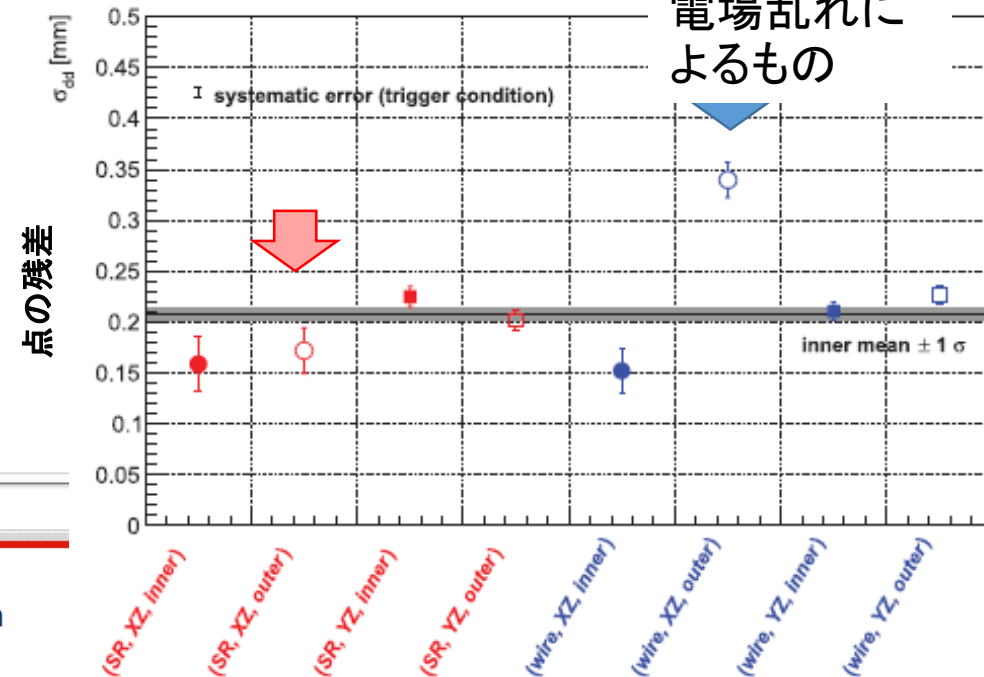
「新型TPC」

- 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
モノタロウ
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 | [\[ログアウト\]](#)

内張り

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)(パッキン品)
大板硝

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 MPX2200

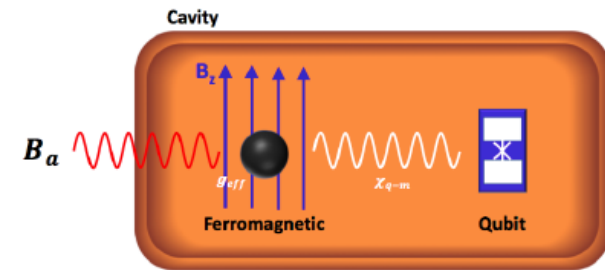
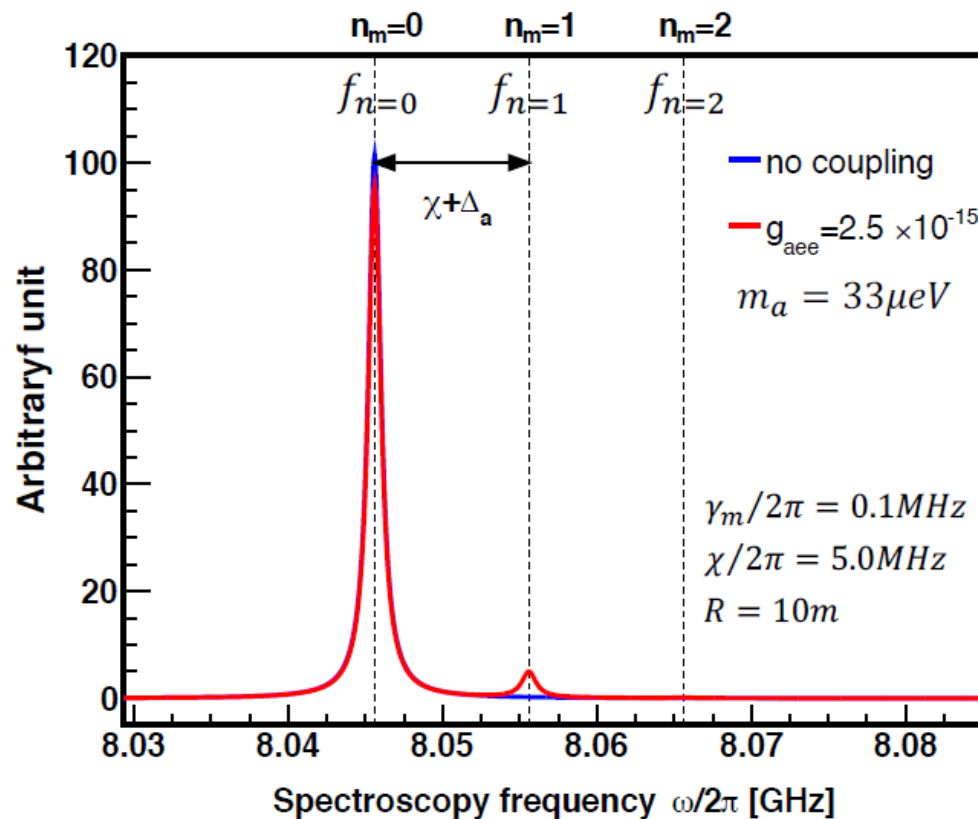
アキレス

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

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

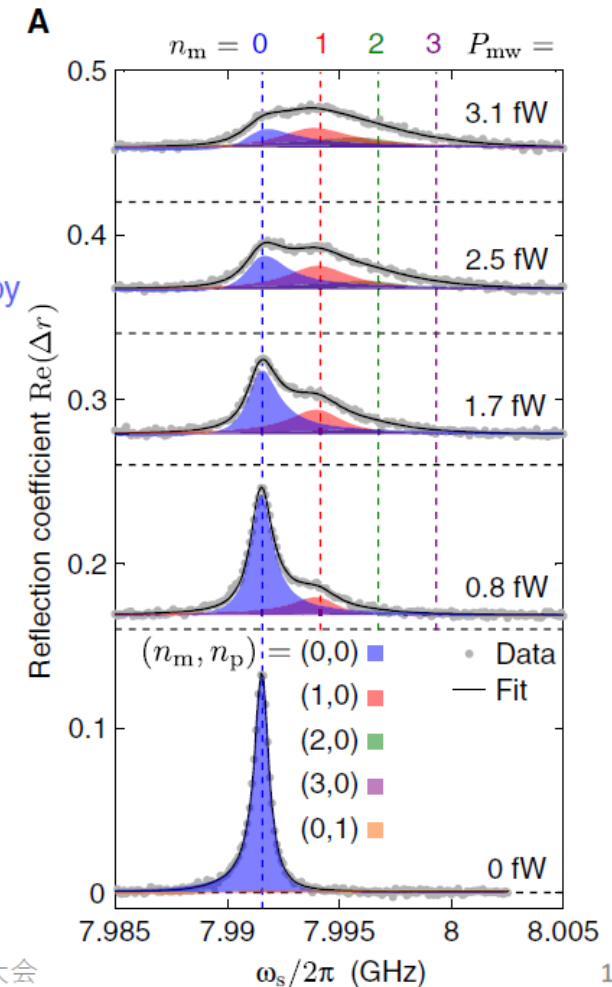
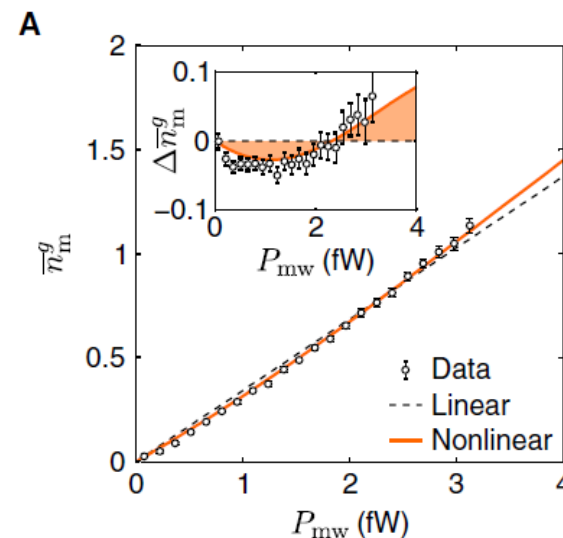
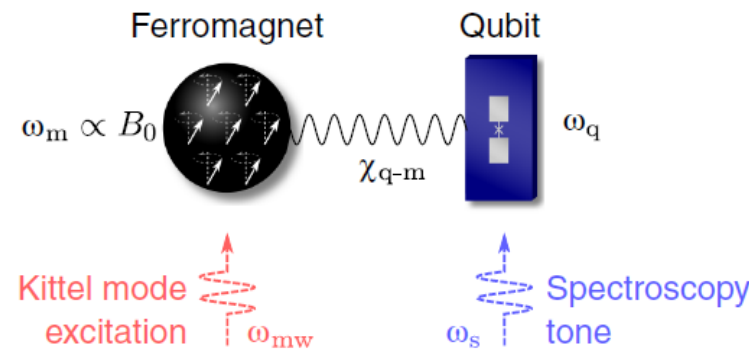
➤ アクシオンとマグノンが結合していれば、Qubitの遷移周波数 $f_{n=1}$ にピークがたつ

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

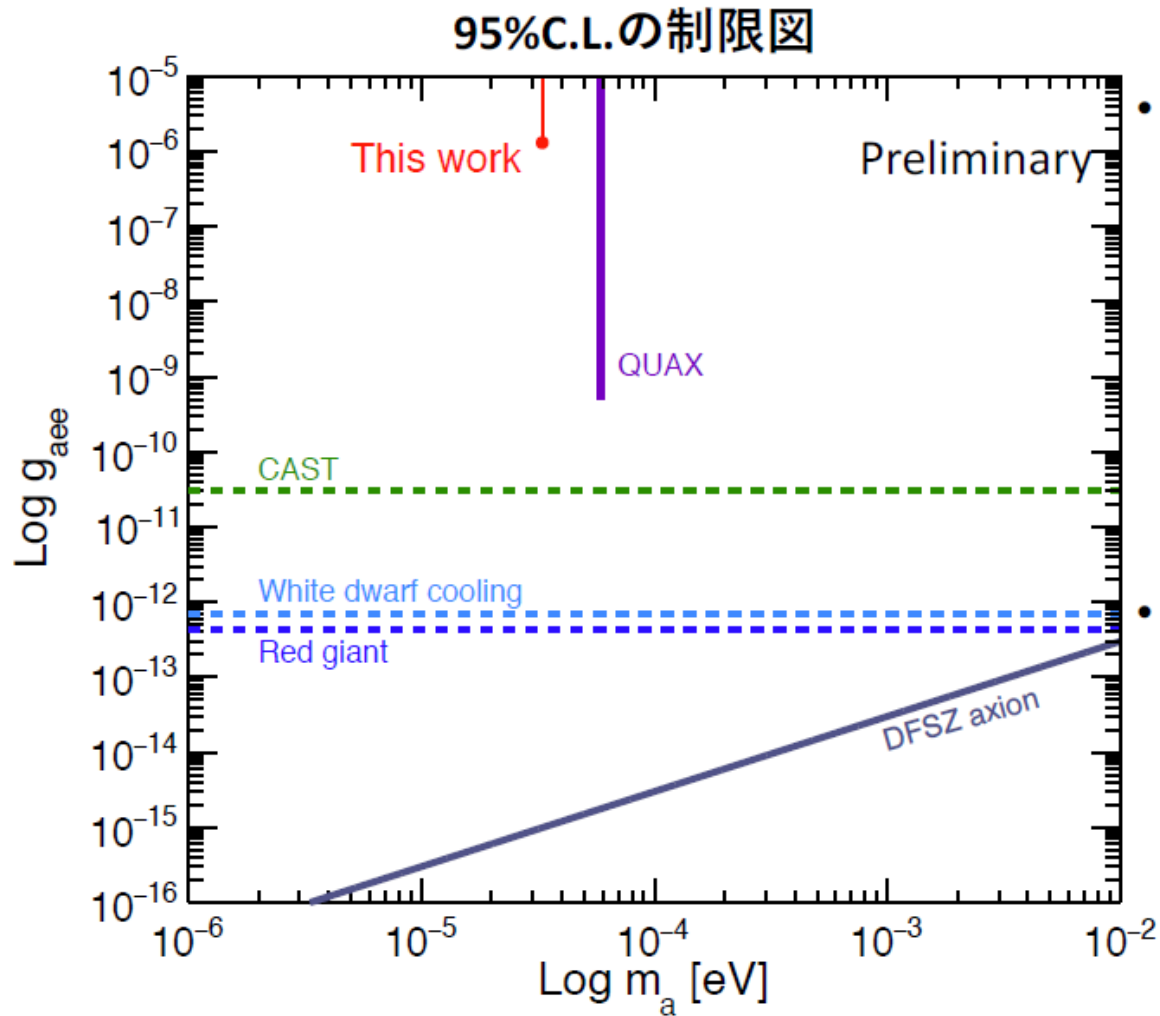
2018年JPS秋季大会

13

池田物理学会2018年秋

http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/presentations/JPS2018axion_IKEDA.pdf

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 μ -PICの開発
- 低BG MS開発