

Aug 10, 2021

● CRCタウンミーティング

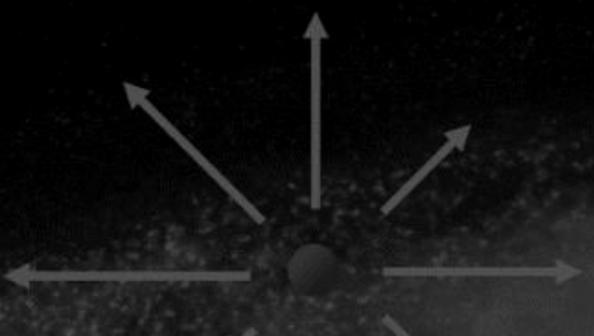
# NEWAGE/CYGNUS

(中型B)

身内賢太郎  
(神戸大学)

- 暗黒物質
- 提案内容

科研費  
KAKENHI



## 10. 実施内容

本計画は神戸大学を中心として、国内・海外の研究期間と協力して推進する。

国内の研究機関との協力 地下実験（東京大学宇宙線研究所）、MPGD 開発（京都大学）、低 BG 関連の R&D（東北大学、日本大学、東京理科大）、回路開発（KEK）

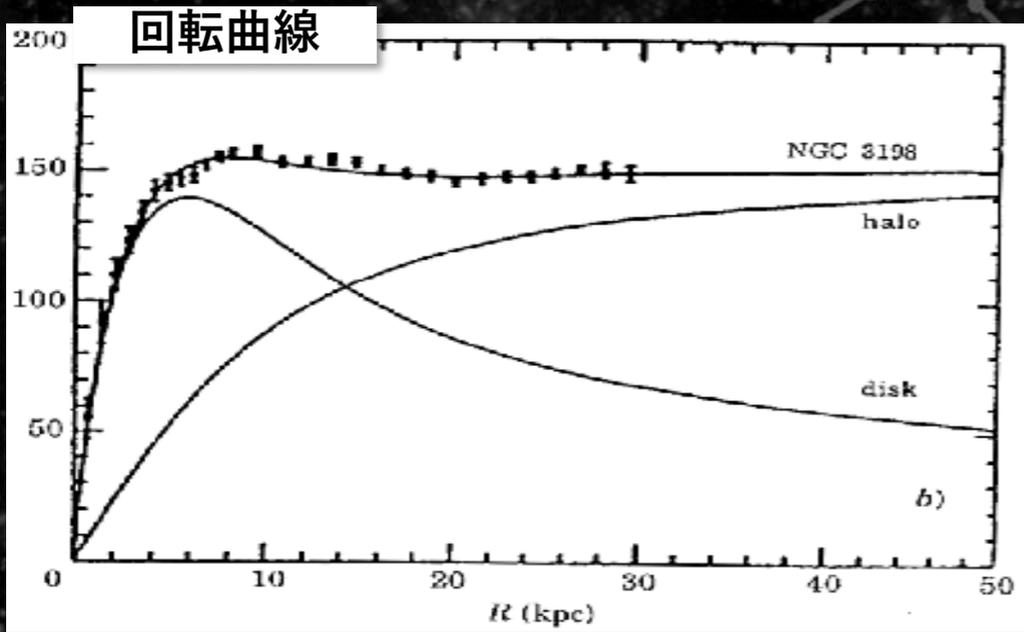
海外の研究機関との協力 CYGNUS steering committee(シェフィールド大学 Gran Sasso Science Institute ハワイ大 オーストラリア国立大学)



暗黒物質  
～方向に感度を持つWIMP直接探索～

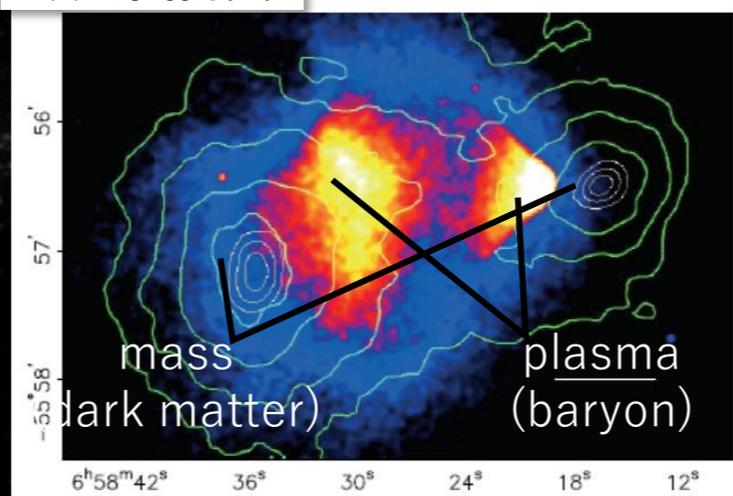
# • 暗黒物質: 宇宙のさまざまな階層で存在

- 銀河スケール: 回転曲線 (1970~)
- 銀河団スケール: 銀河団の衝突 (2007~)
- 宇宙全体:  
CMB and other observations (2002~)



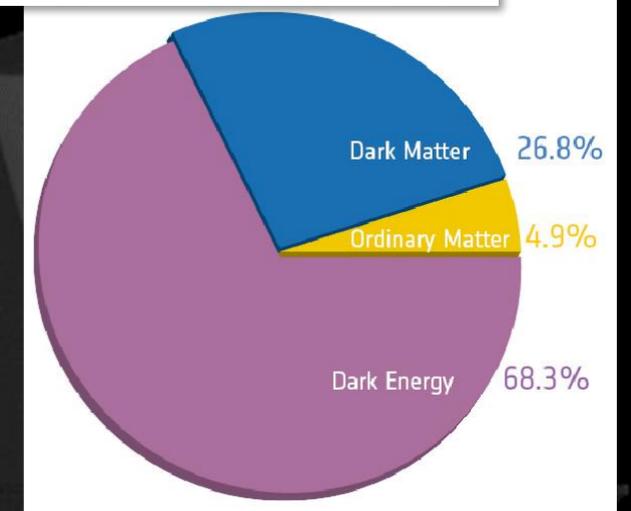
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 29(1991)409

銀河団衝突



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 648:L109–L113, 2006 September 10

宇宙のエネルギー組成



Planck team

# 暗黒物質候補

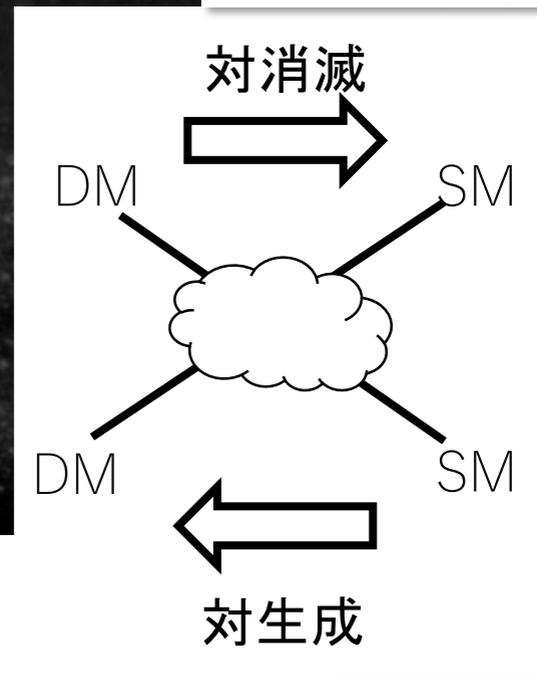
## 他の動機で導入される粒子が「よい」候補

- アクシオン (QCDのCP対称性)
- 初期ブラックホール(重力波によるブラックホール合体観測)
- WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) ⇒ 本講演

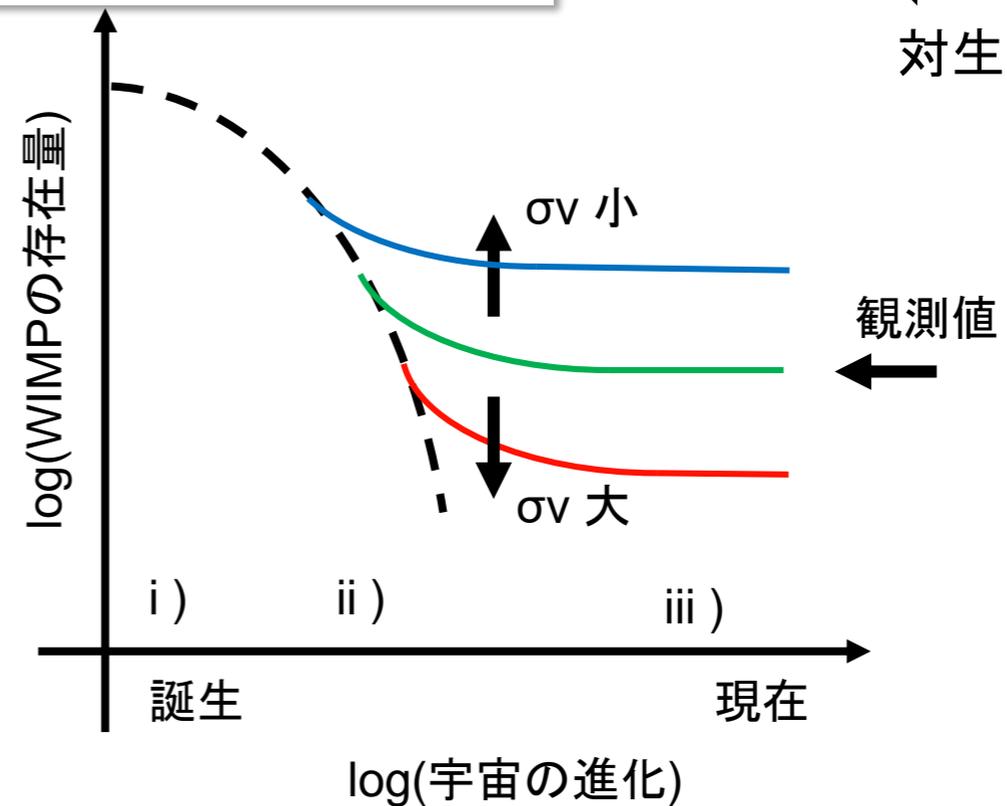
## WIMPの特徴

- 初期宇宙で生成
- 対消滅で減少
- ある時点で存在量固定
- weak scaleで現在の存在量を説明  
⇒WIMP ミラクル

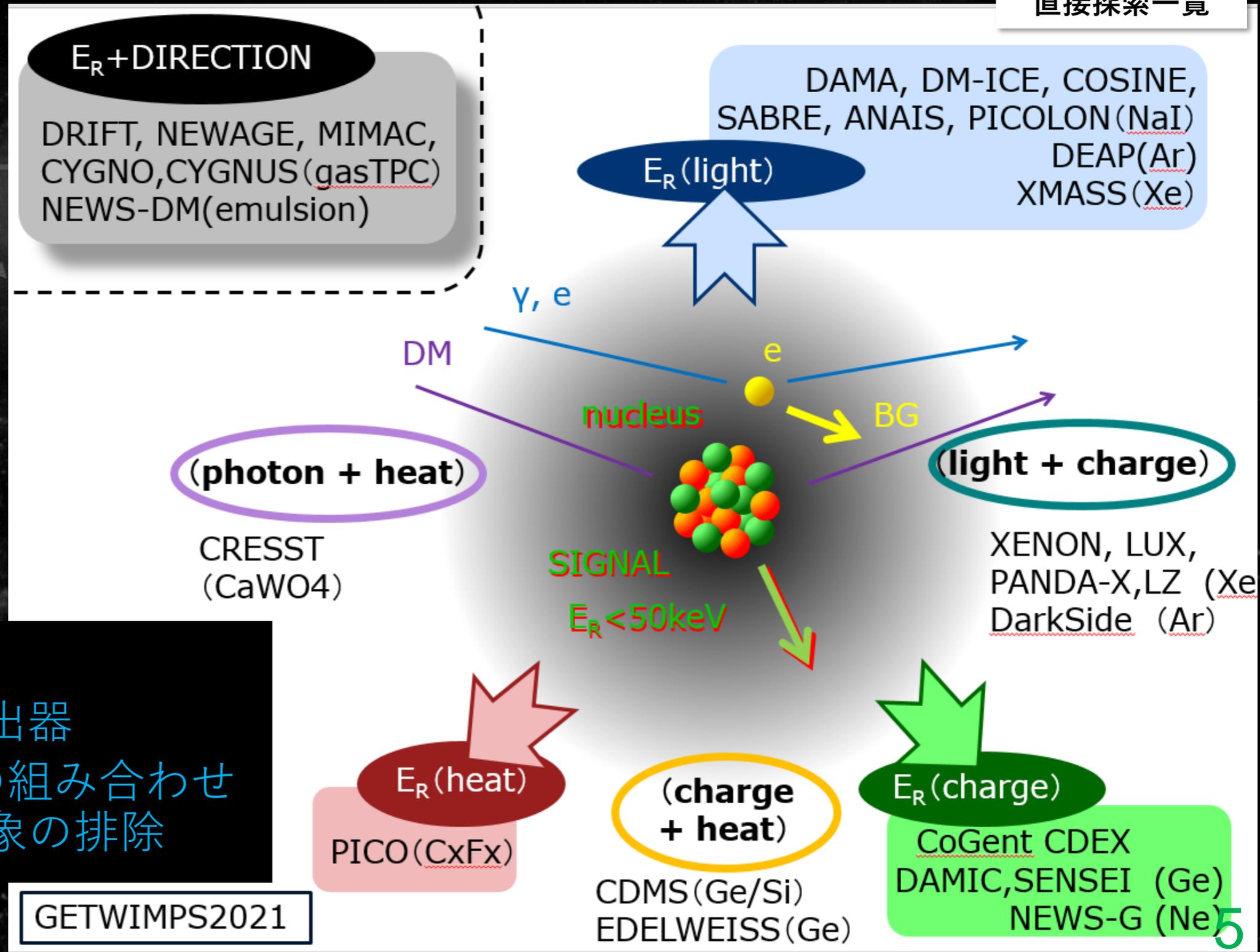
WIMPの反応



WIMP存在量の時間変化



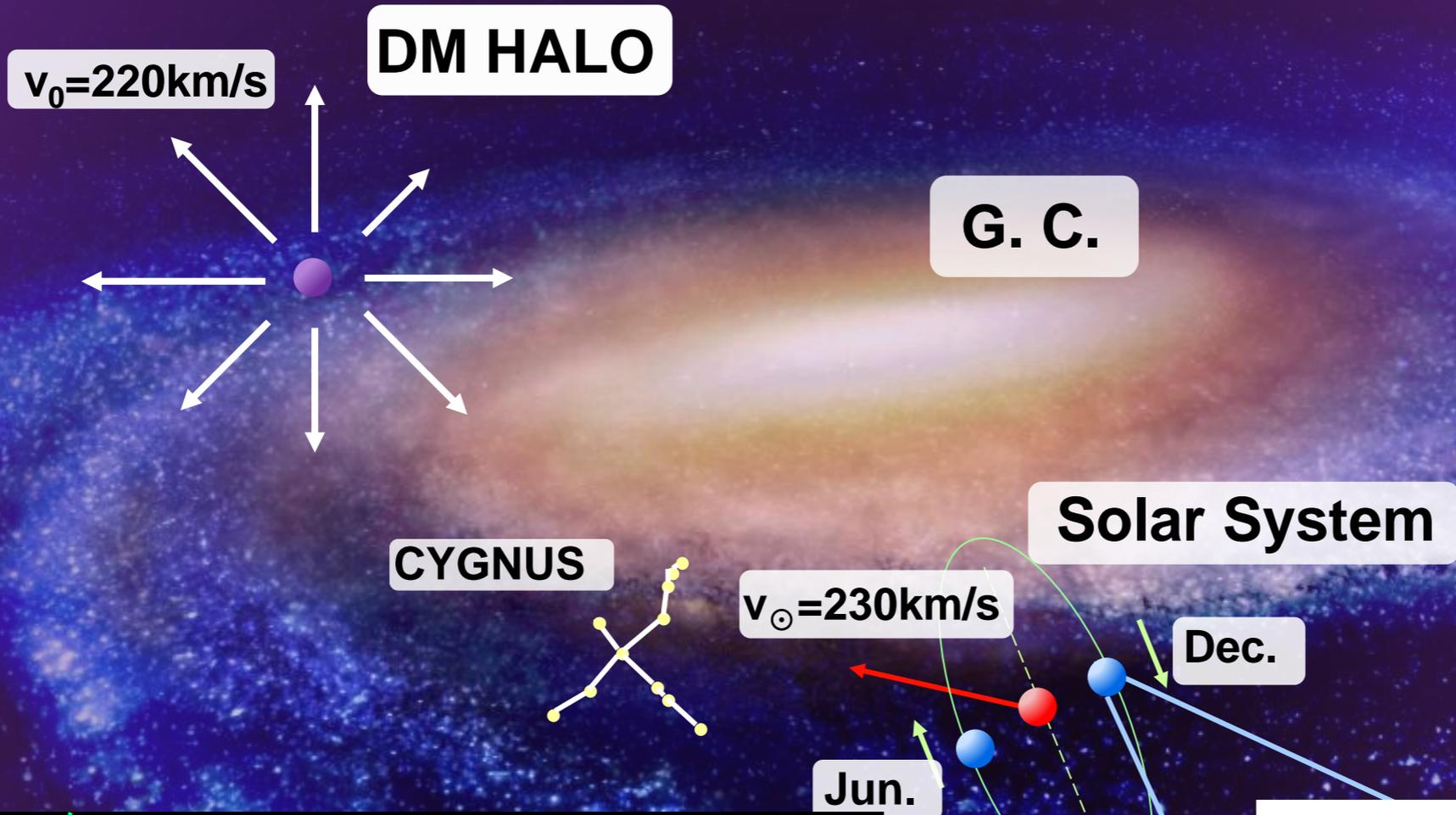
# WIMP直接探索



- テクノロジー
  - 通常の放射線検出器
  - 2つ以上の信号の組み合わせ  
 ⇒ 電子反跳事象の排除

GETWIMPS2021

# 直接探索

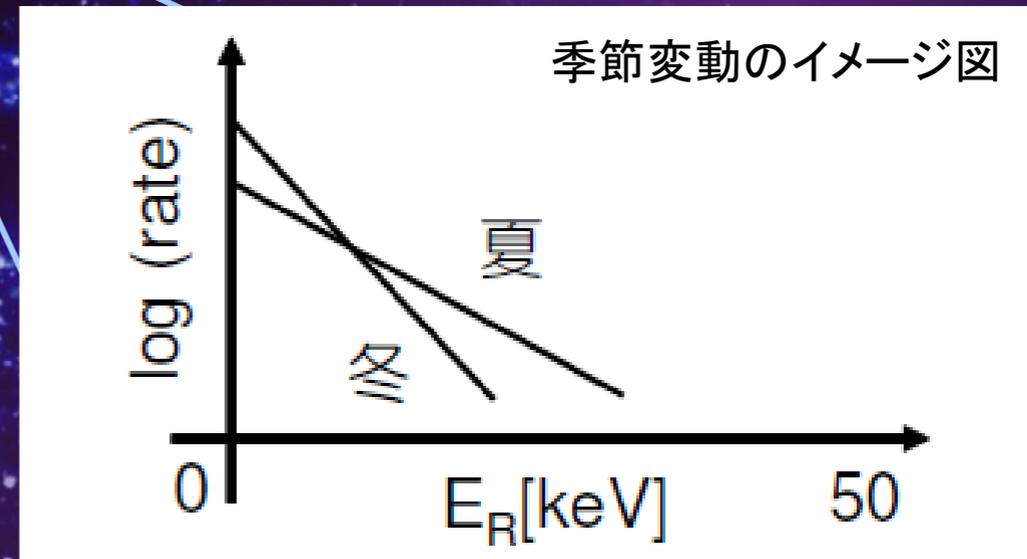


## WIMP信号

- 原子核反跳 エネルギー、方向
- 季節変動

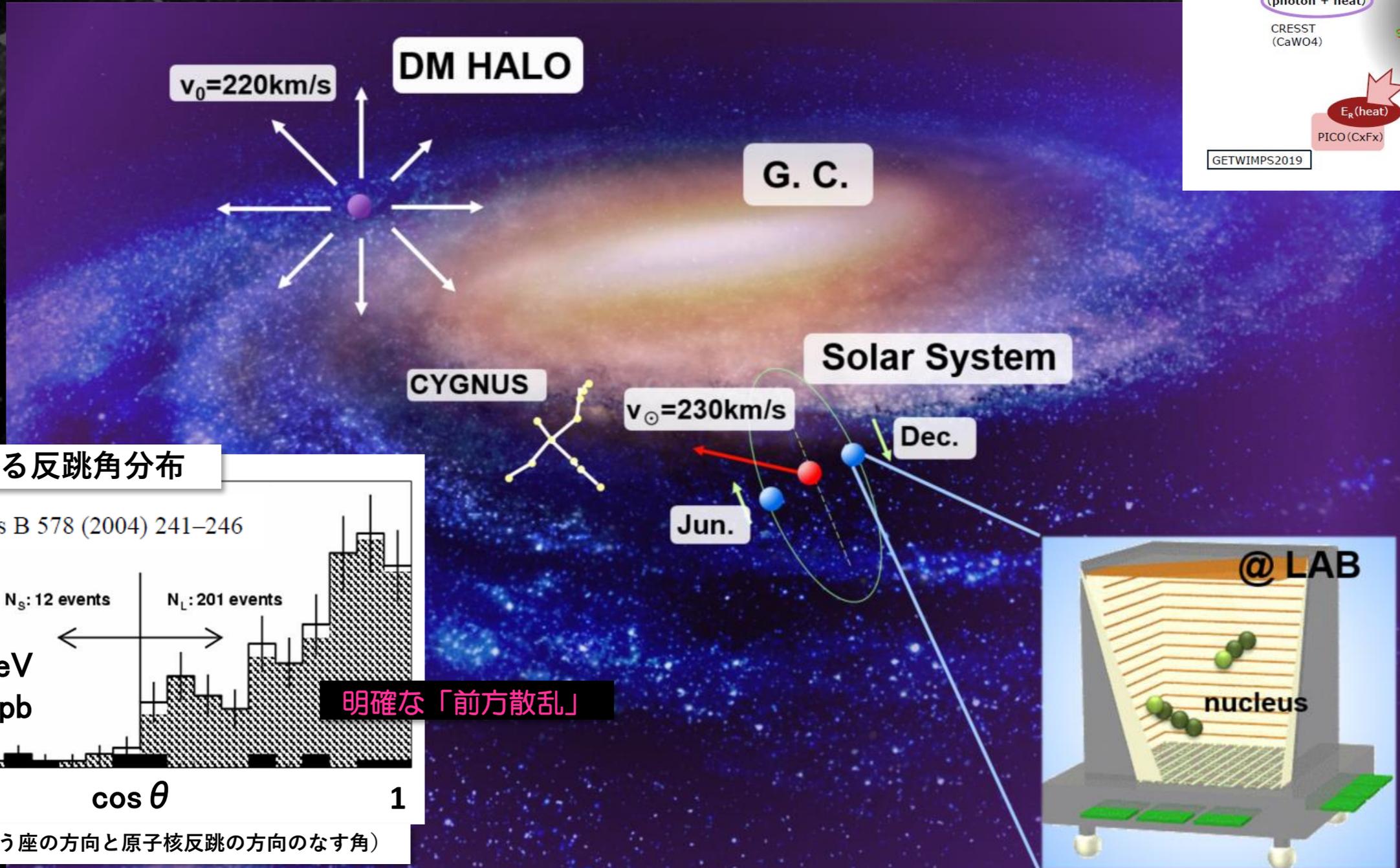
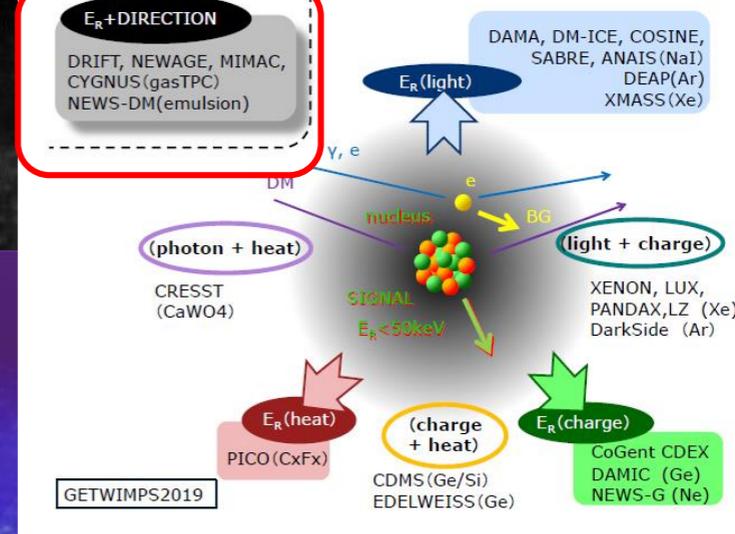
## バックグラウンド

- 電子反跳 (ガンマ線、 $\beta$ 線)
- 原子核反跳 (中性子)



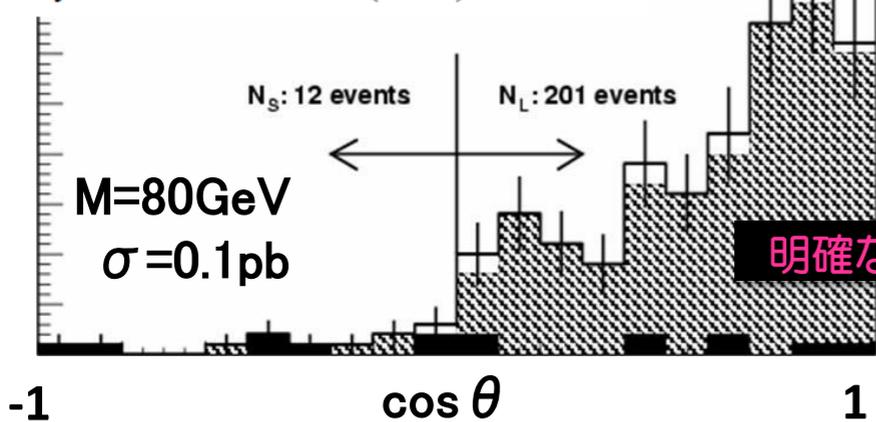
# 方向感度を持った直接探索：“CYGNUS”

- 発見の確実な証拠 & 発見後の性質解明



## 期待される反跳角分布

Physics Letters B 578 (2004) 241–246



明確な「前方散乱」

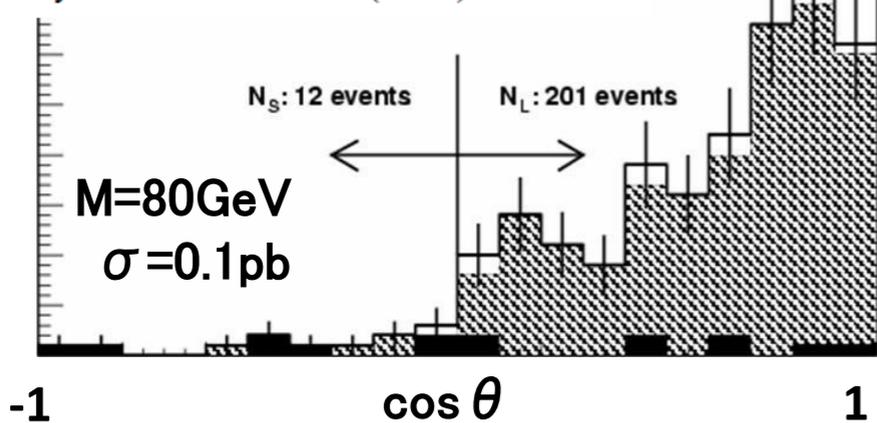
( $\theta$  : はくちょう座の方向と原子核反跳の方向のなす角)

• CYGNUS ① 確実な証拠

- O(10) 事象で前方散乱の証拠 (c.f. 季節変動 O(1e4) 事象)

期待される反跳角分布

Physics Letters B 578 (2004) 241–246

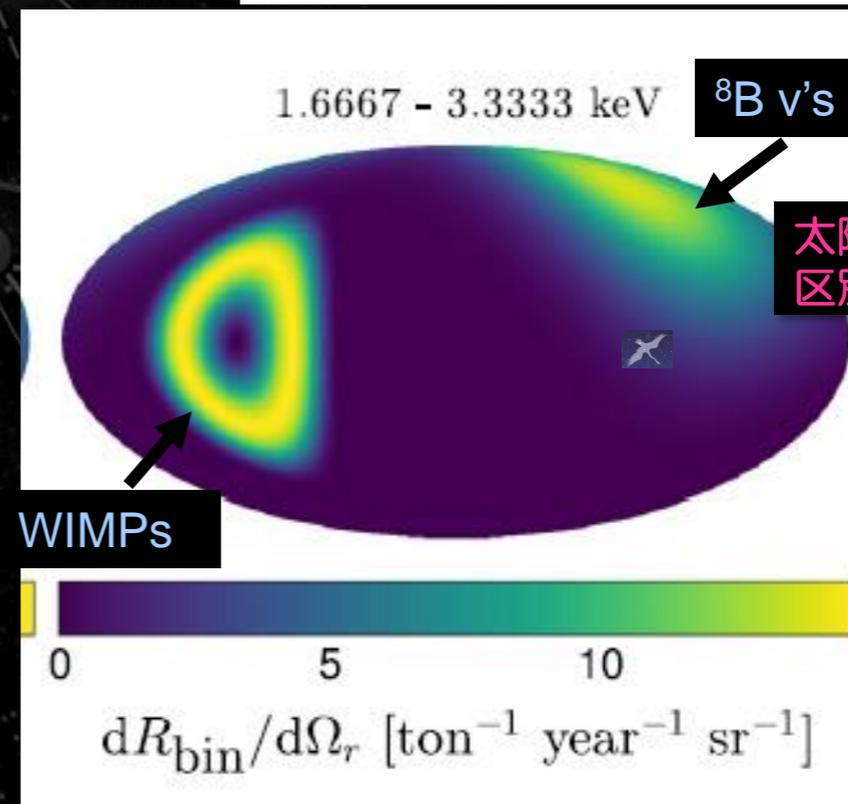


( $\theta$  : はくちょう座の方向と原子核反跳の方向のなす角)

明確な「前方散乱」

期待される  
原子核反跳スカイマップ

F. Mayet et al. / Physics Reports 627 (2016) 1–49



太陽ニュートリノも  
区別可能

# • CYGNUS ② 宇宙物理に関係した性質

ストリーム

Our GALAXY

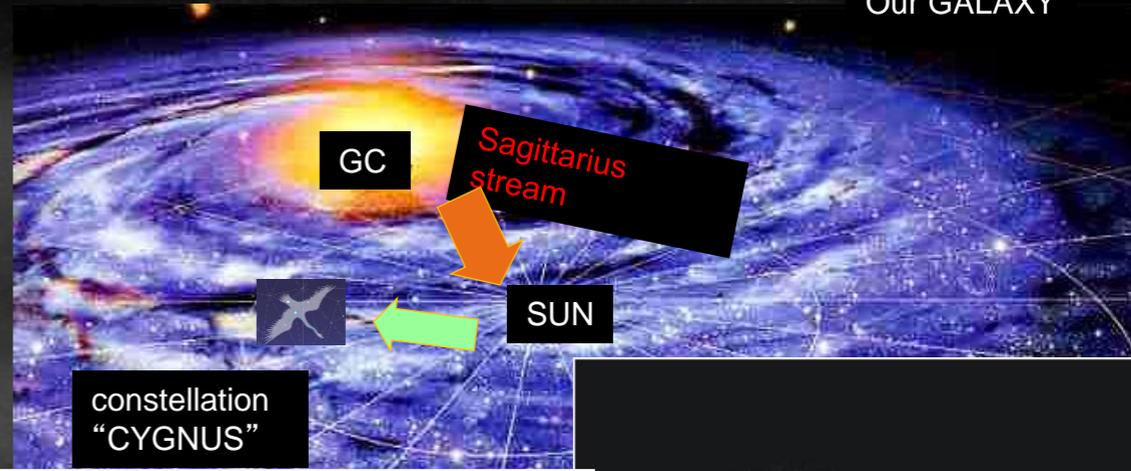
## • ハローモデル検証

ハロー非等方成分

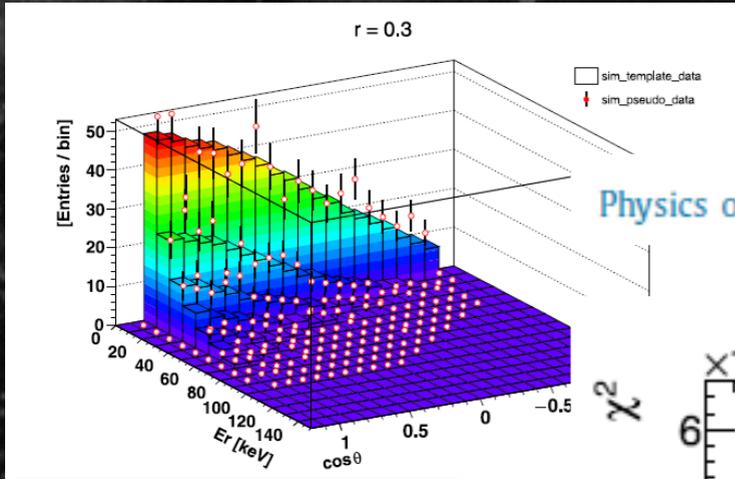
(多体シミュレーションは  $r \sim 0.3$  を示唆)

Discrimination of anisotropy in dark matter velocity distribution with directional detectors

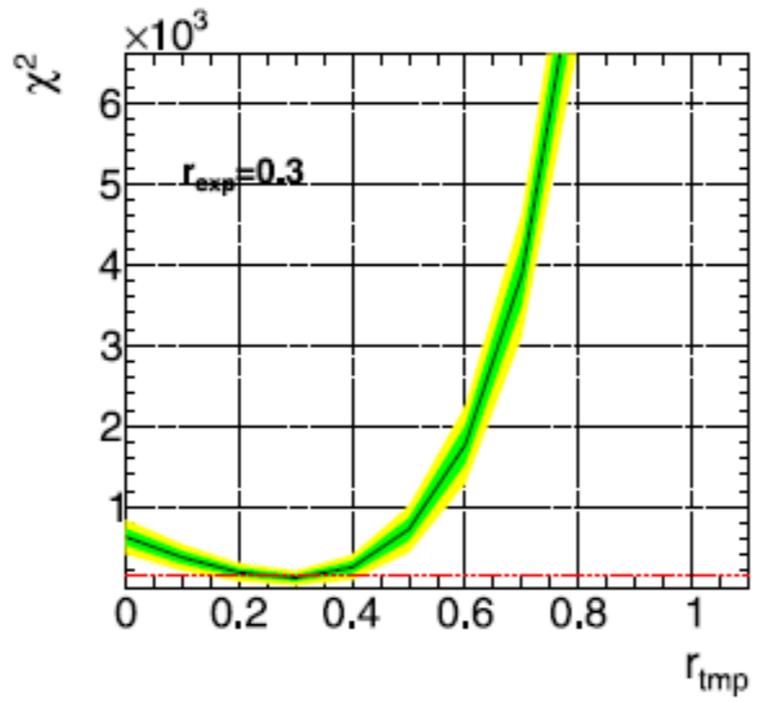
Keiko I. Nagao<sup>a,b,\*</sup>, Tomonori Ikeda<sup>c</sup>, Ryota Yakabe<sup>c</sup>, Tatsuhiro Naka<sup>d,e</sup>, Kentaro Miuchi<sup>c</sup>



PHYSICAL REVIEW D 90, 123511 (2014)

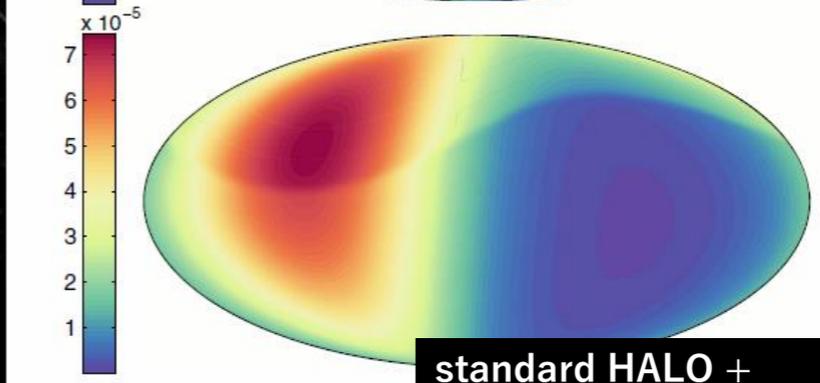
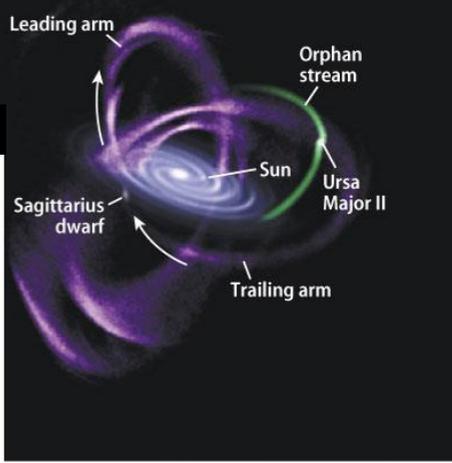
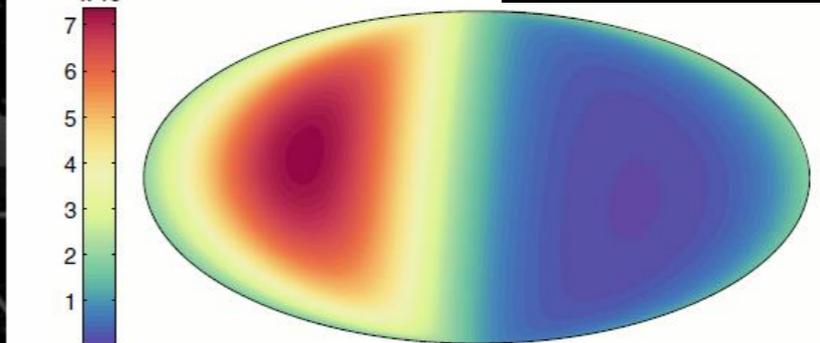


Physics of the Dark Universe 27 (2020) 100426



エネルギーと散乱角

expected standard HALO

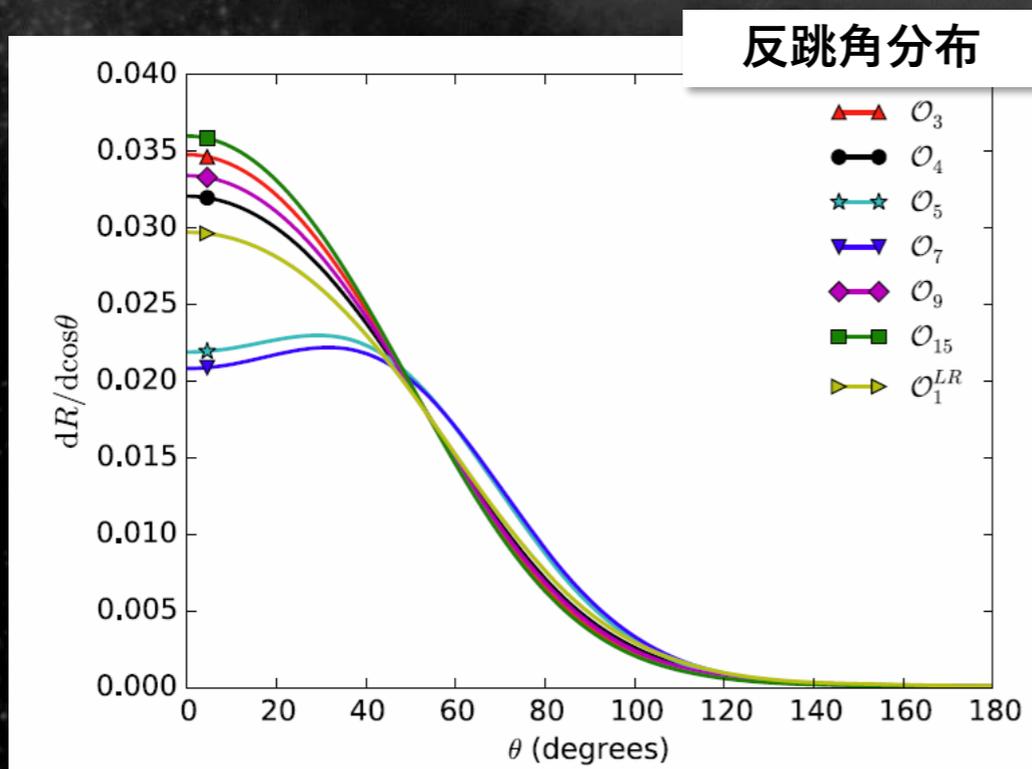


standard HALO + stream

galactic coordinate

## • scan r value

- CYGNUS ③ 素粒子的性質解明
  - 反応形式によって角度分布が異なる

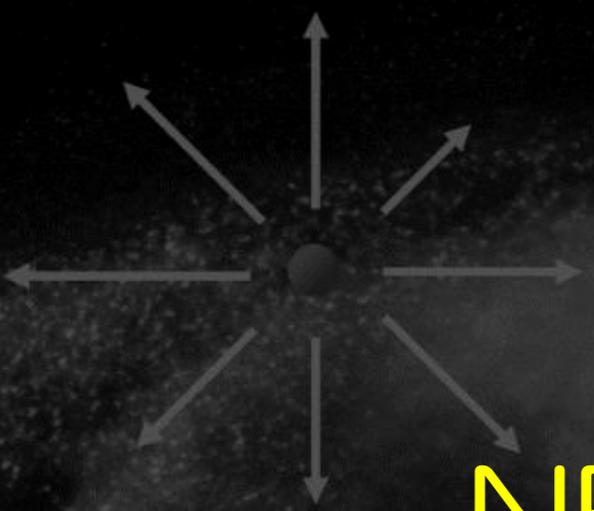


PHYSICAL REVIEW D 92, 023513 (2015)

反応オペレータ	SI	SD
Proportional to $1$	$\swarrow$	$\swarrow$
$v_{\perp}^2$		
$q^2$		
$v_{\perp}^2 q^2$		
$q^4$		
$q^4(q^2 + v_{\perp}^2)$		
$q^{-4}$		

$1$	: $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_4,$
$v_{\perp}^2$	: $\mathcal{O}_7, \mathcal{O}_8,$
$q^2$	: $\mathcal{O}_9, \mathcal{O}_{10}, \mathcal{O}_{11}, \mathcal{O}_{12},$
$v_{\perp}^2 q^2$	: $\mathcal{O}_5, \mathcal{O}_{13}, \mathcal{O}_{14},$
$q^4$	: $\mathcal{O}_3, \mathcal{O}_6,$
$q^4(q^2 + v_{\perp}^2)$	: $\mathcal{O}_{15},$
$q^{-4}$	: $\mathcal{O}_1^{LR}.$



# 提案内容

## NEWAGE/CYGNUS

1. ガス飛跡検出器による暗黒物質の正体解明
2. 問い合わせ先：神戸大学大学院理学研究科・准教授・身内賢太郎・  
miuchi@phys.sci.kobe-u.ac.jp
3. 想定される提案者（計画遂行の責任を担う大学・機関・部局の長等）  
中型 B 選択のため、該当なし
4. 計画規模：大型・中型 A・**中型 B**（どれかひとつを選択してください）
5. マスタープラン 2017, 2020 への採否状況  
提案なし

# NEWAGE これまで

## 三次元飛跡検出

- $\mu$ -PIC
- SKYMAP

## CF<sub>4</sub> gas

- ガス拡散小
- Spin-Dependent search

## 実験提案

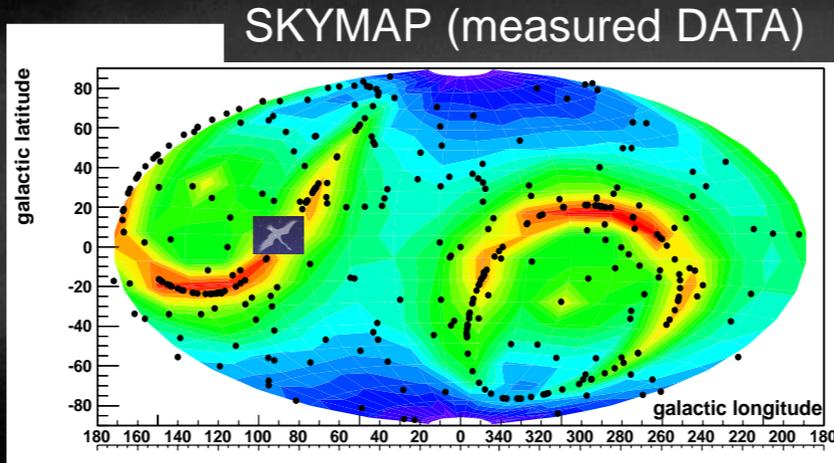
PLB 578 (2004) 241

## 地上による初の方向感度探索

PLB 654 (2007) 58

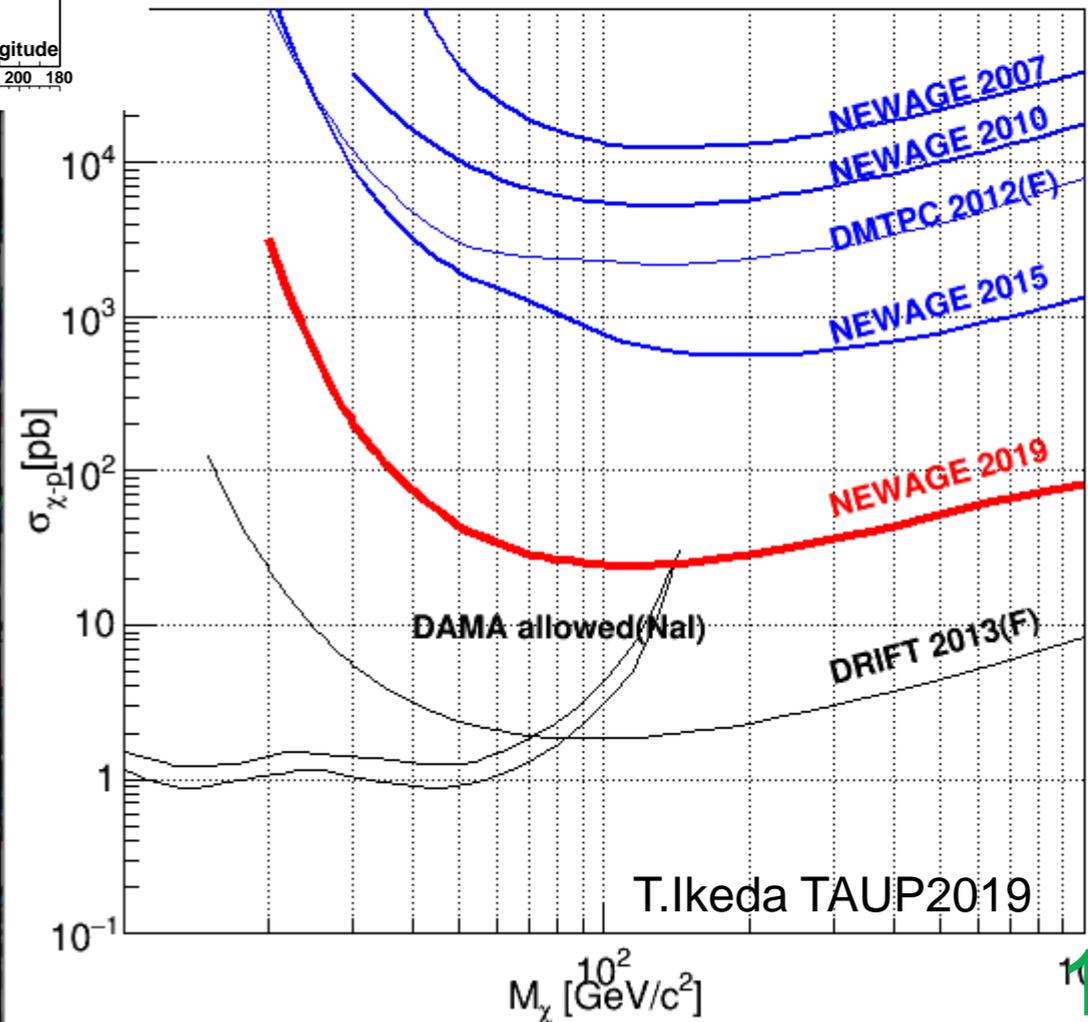
## 地下実験による感度向上

PLB 686 (2010) 11, PTEP (2015) 043F01S, TAUP2019



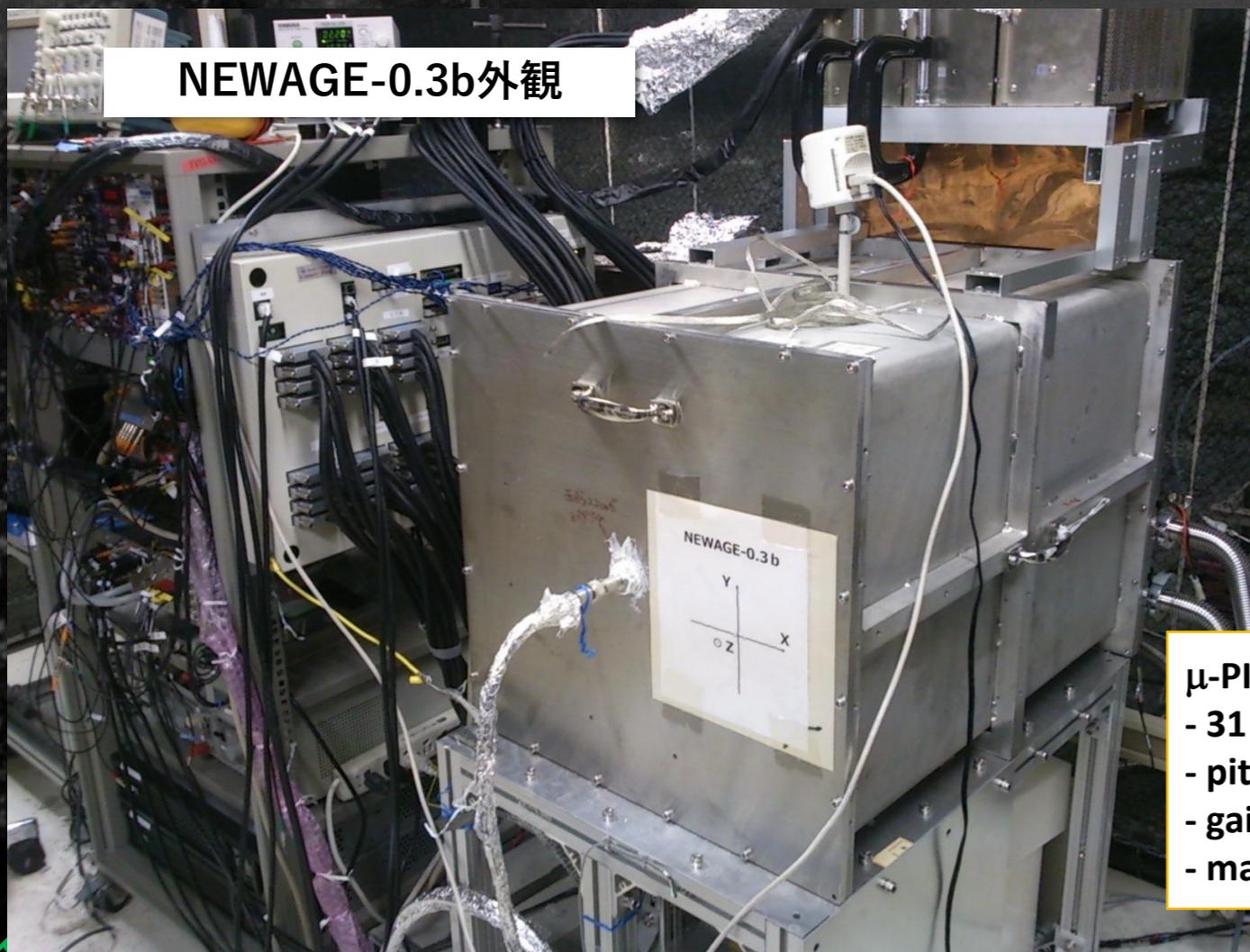
NEWAGEの歴史

SD 90% C.L. upper limits and allowed region

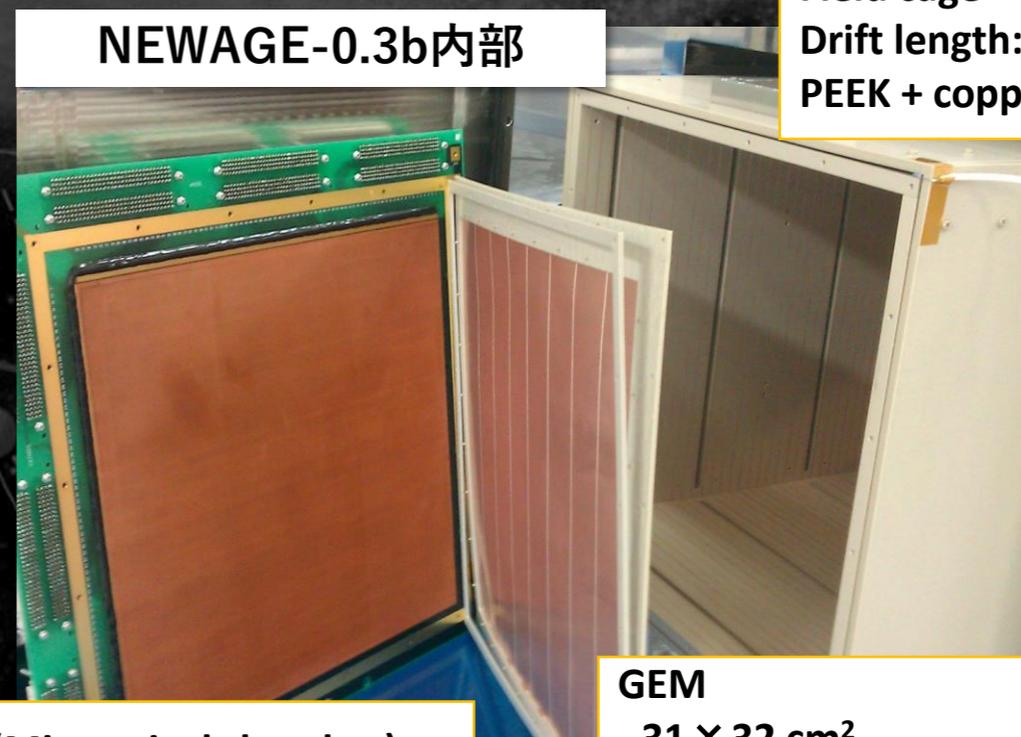


## • NEWAGE 検出器 NEWAGE-0.3b

- 検出容積:  $31 \times 31 \times 41 \text{ cm}^3$
- ターゲットガス:  $\text{CF}_4$  at 0.1気圧 (エネルギー閾値 50keVee)
- 冷却活性炭を用いたガス循環システム



NEWAGE-0.3b外観



NEWAGE-0.3b内部

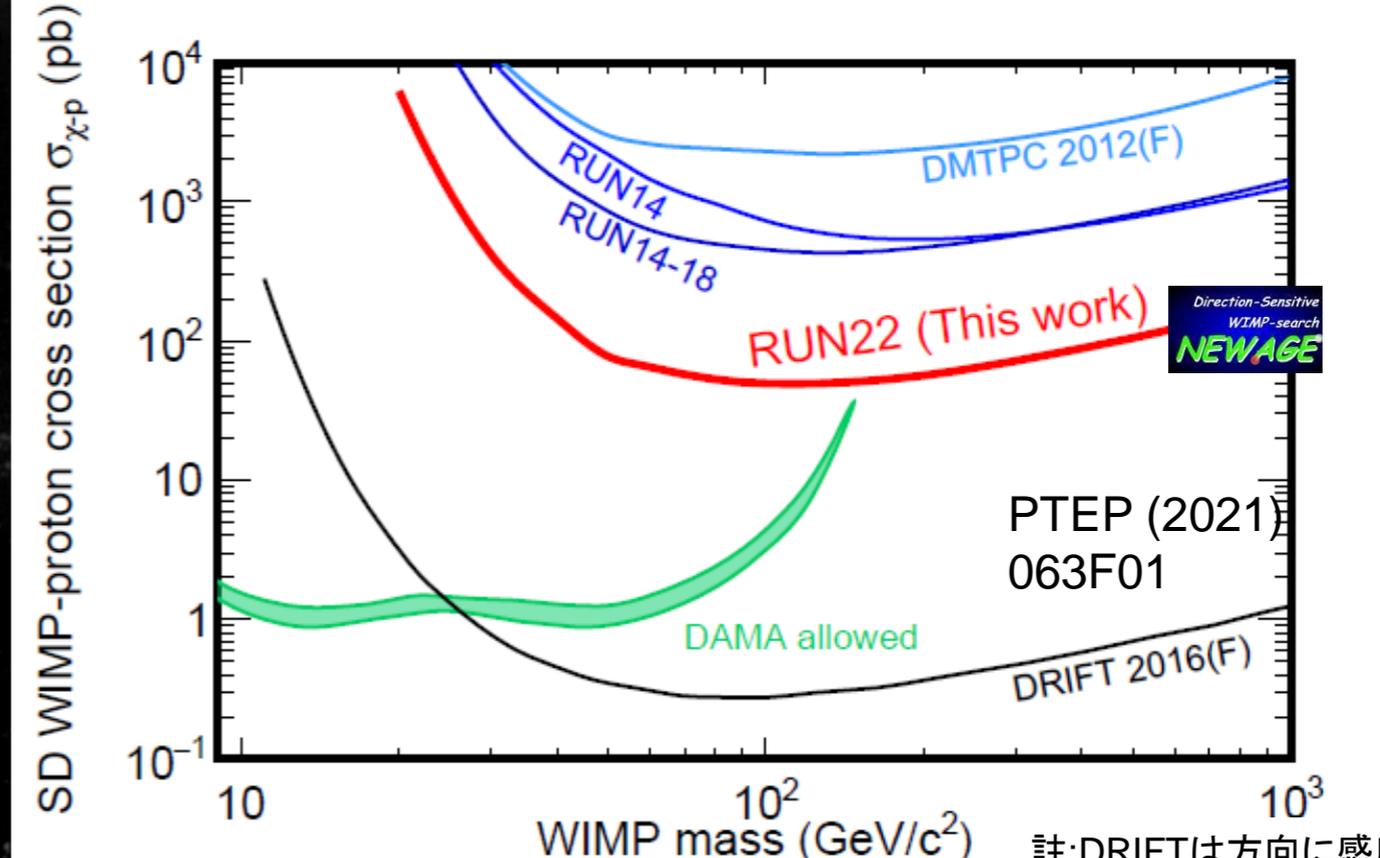
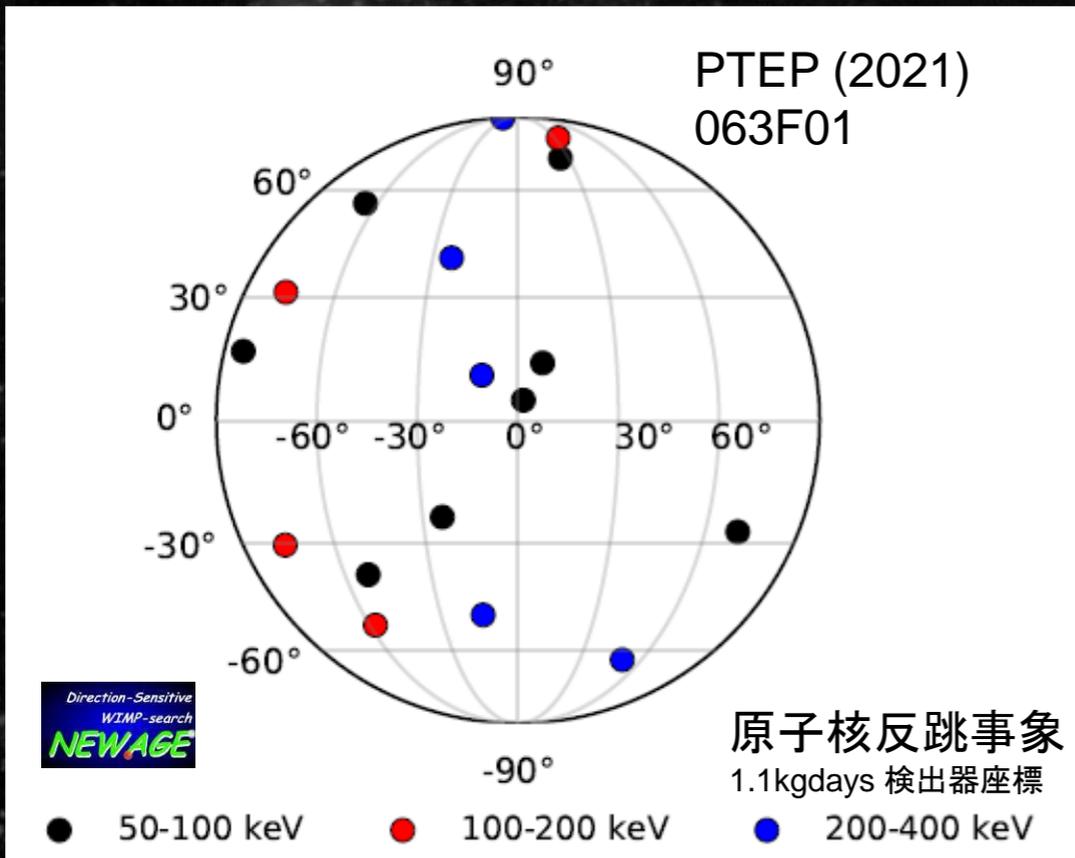
Field cage  
Drift length: 41cm  
PEEK + copper wires

$\mu$ -PIC(Micro-pixel chamber)  
-  $31 \times 31 \text{ cm}^2$   
- pitch :  $400 \mu\text{m}$   
- gain :  $\sim 1000$   
- made by DNP, Japan

GEM  
-  $31 \times 32 \text{ cm}^2$   
- 8-segmented  
- hole pitch :  $140 \mu\text{m}$   
- hole diameter:  $70 \mu\text{m}$   
- insulator : LCP  $100 \mu\text{m}$   
- gain :  $\sim 5$   
- made by Scienergy, Japan

# 分野の現状

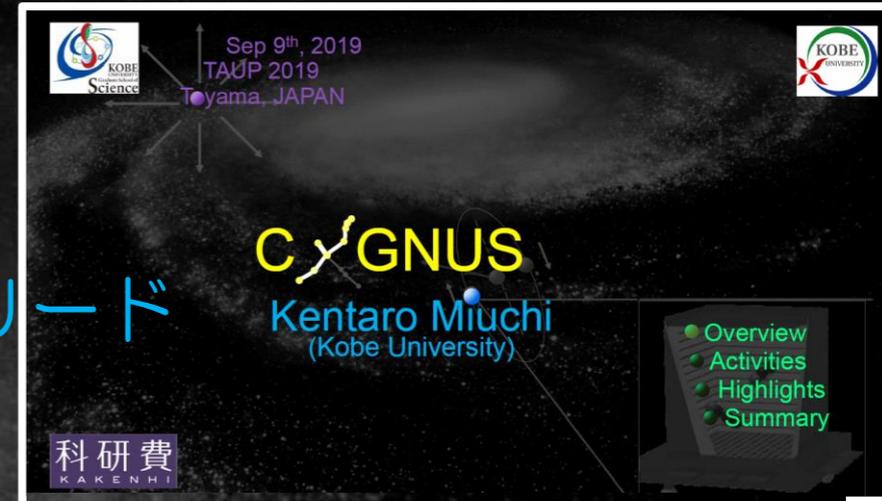
- DRIFT (英) が開拓 (方向感度よりも低BG化を優先)
- NEWGAE (日) が方向感度探索を牽引 (2007- 神岡地下)
- イタリアグループなどの技術開発



註:DRIFTは方向に感度をもつ解析を未実施

# 分野の現状 CYGNUS

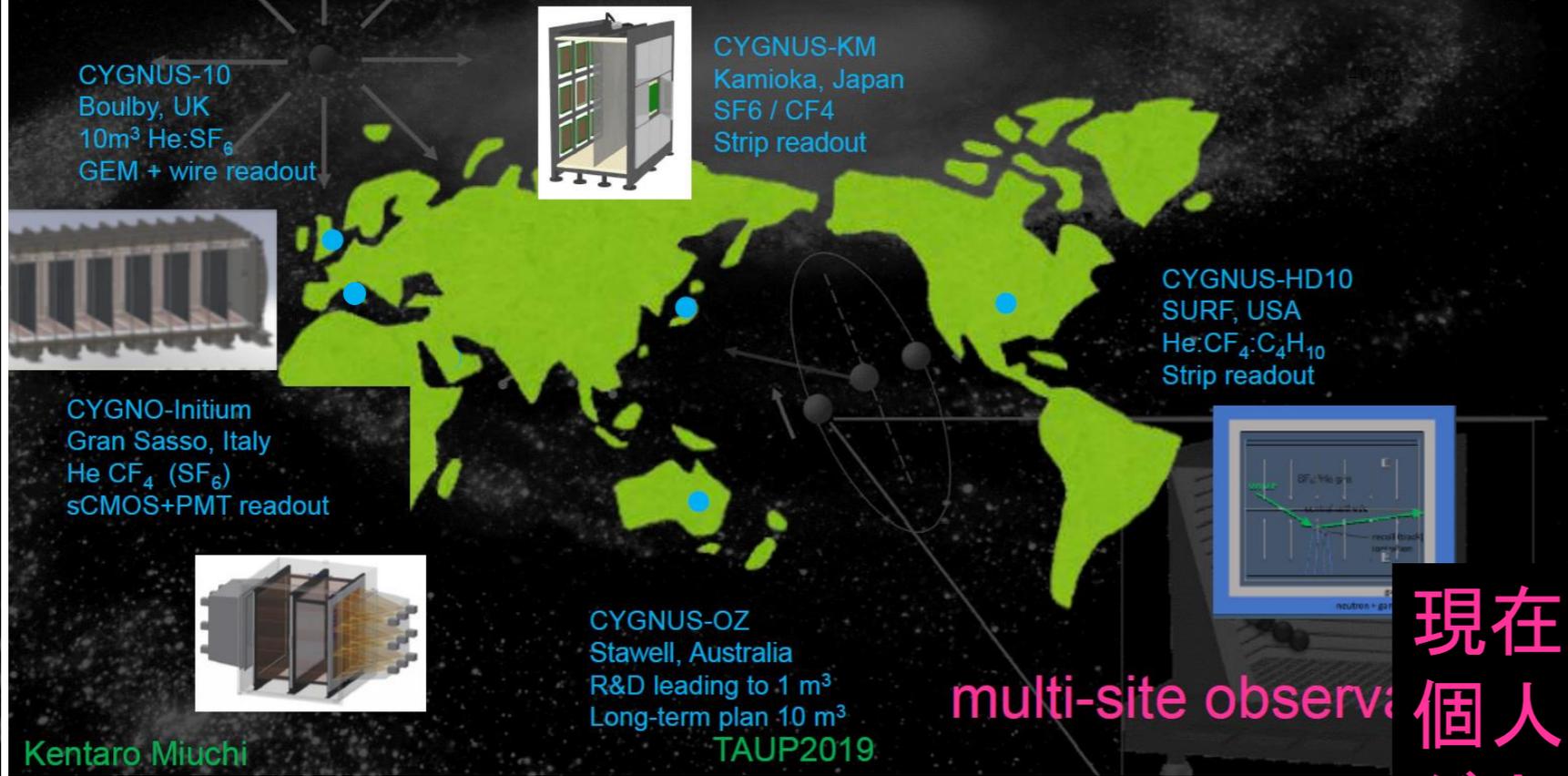
- 方向感度の国際共同フレームワーク：CYGNUS
- 5人のsteering committeeの1員として議論をリード



steering committee

- E. Baracchini (GSSI)
- G. Lane (ANU, Canberra)
- K. Miuchi (Kobe)
- N. Spooner (Sheffield)
- S. Vahsen (Hawaii)

## World-wide CYGNUS (ver. TAUP2019)



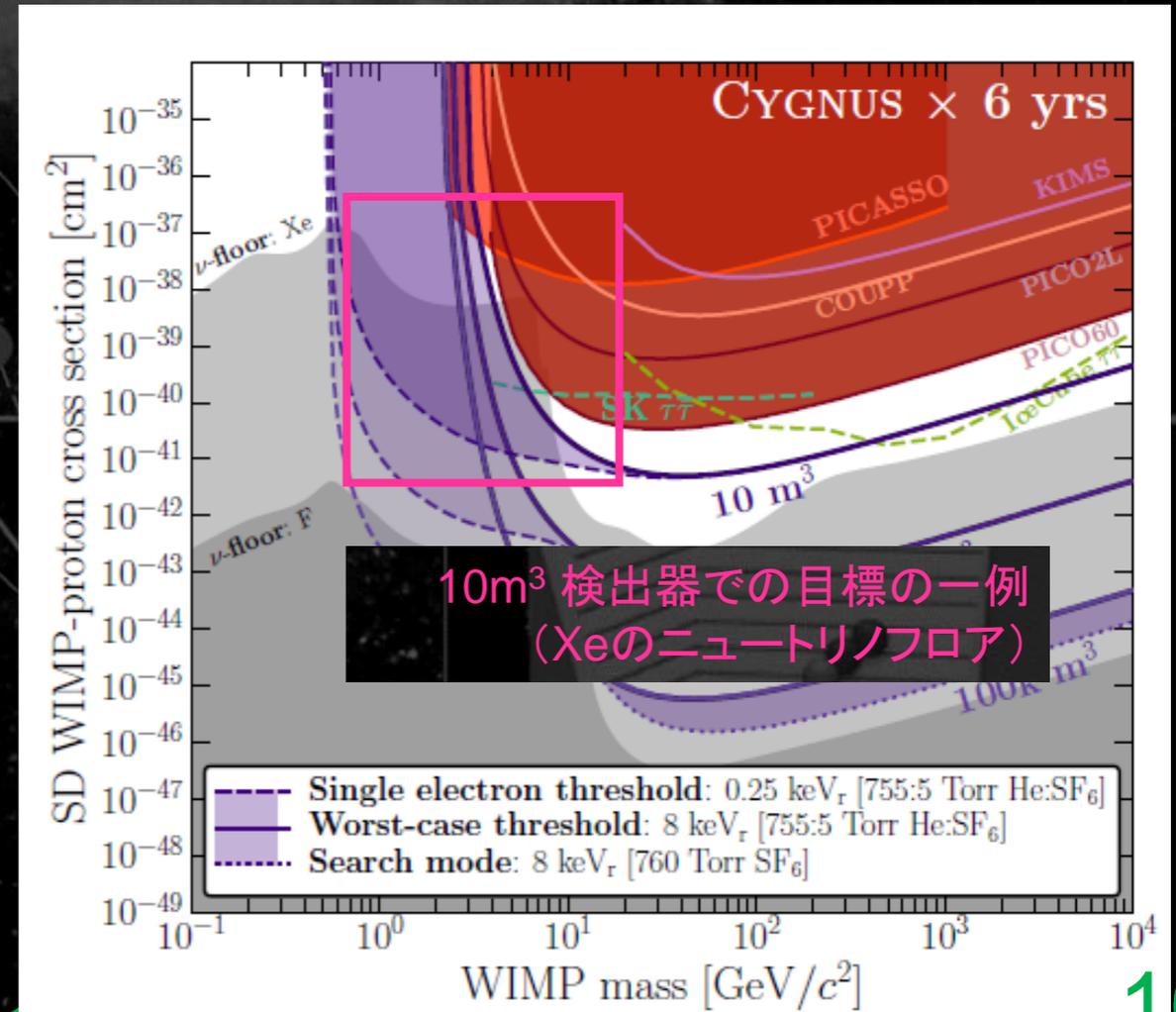
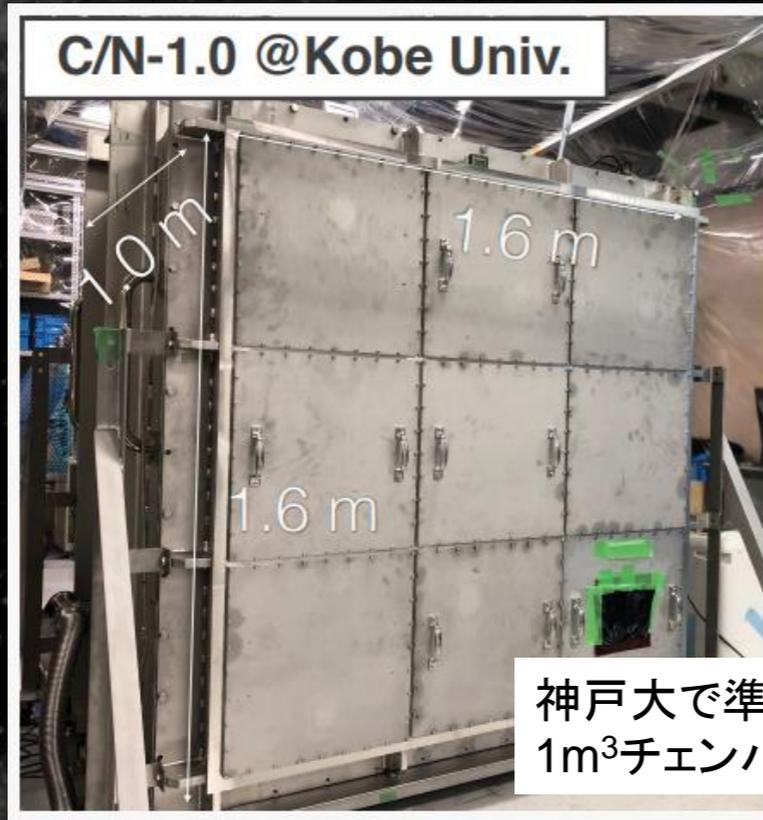
multi-site observatory

現在の議論：多地点での観測  
個人的観測：  
ダウンセレクションは否まない

# • タイムライン

- フェーズ 1 (2021-2026) NEWAGE • CYGNUS 1m<sup>3</sup> 検出器
  - 製作 2億円 (主に読み出し回路) 運転経費 0.5億円/年
- フェーズ 2 (2026-2031) CYGNUS 10m<sup>3</sup>検出器
  - 製作 10億円 運転経費 1億円/年

arXiv 2008.12587

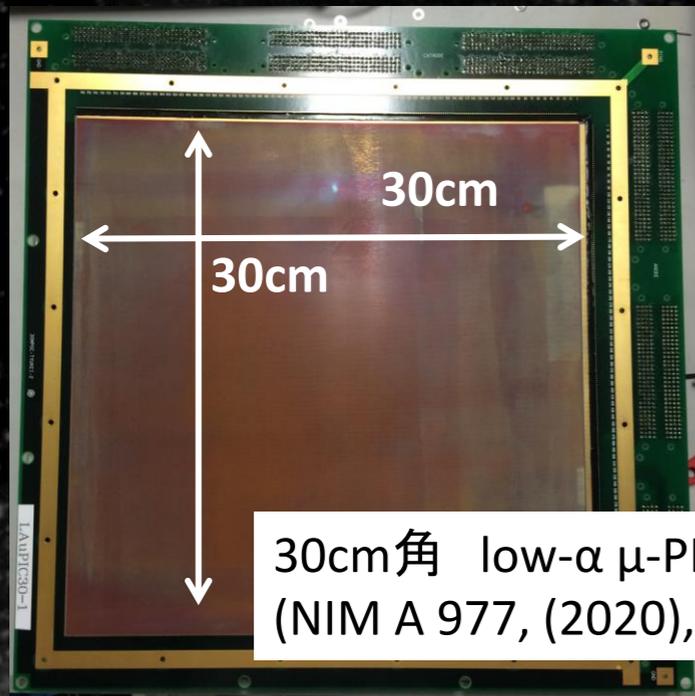


• NEWAGE技術 (1/3) : 「低放射能」

- 低バックグラウンド (低放射能) 化 : 材料中のウラン、トリウム (U、Th) を低減
- 新学術「地下素核」 (H26-H30)、「地下宇宙」 (R1-R5)

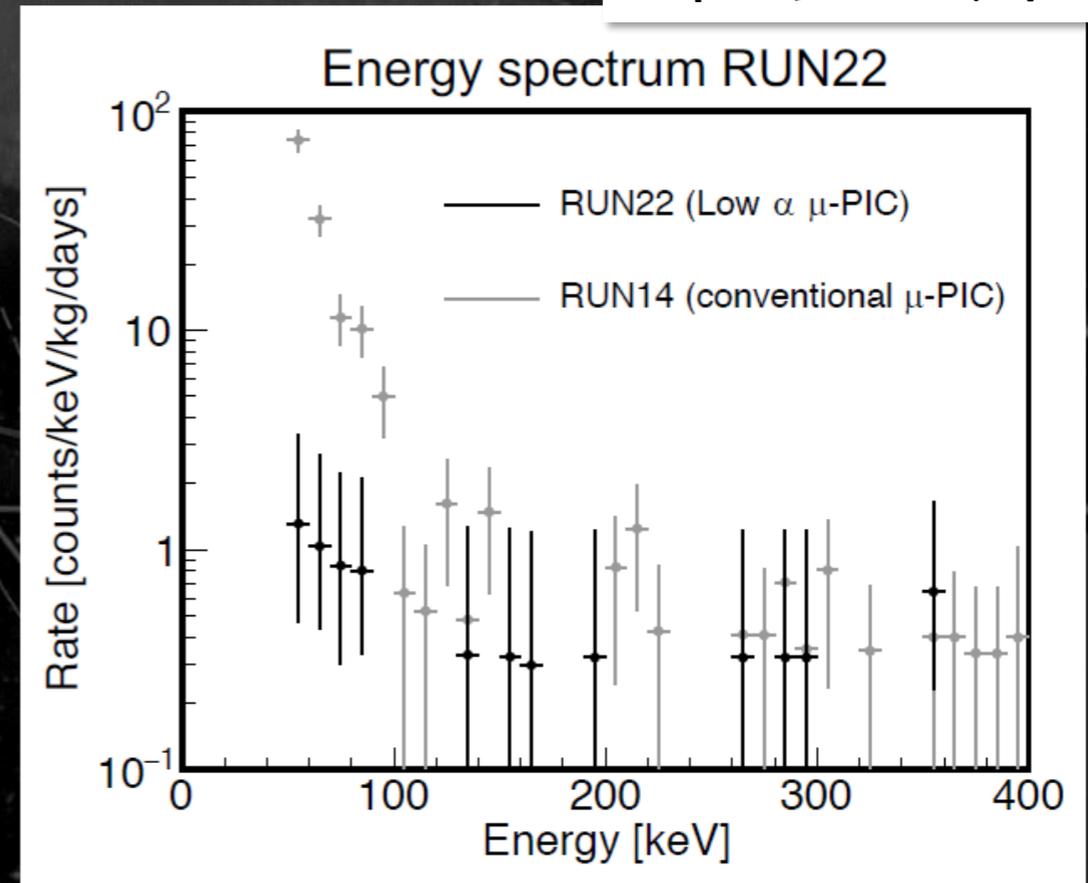
材料探索

	$^{238}\text{U}$ [ppm]	$^{232}\text{Th}$ [ppm]
Standard material (PI+glass cloth)	$0.39 \pm 0.01$	$1.81 \pm 0.04$
New material (PI+epoxy)	$< 2.98 \times 10^{-3}$	$< 6.77 \times 10^{-3}$



30cm角 low- $\alpha$   $\mu$ -PIC  
(NIM A 977, (2020), 164285)

エネルギースペクトル

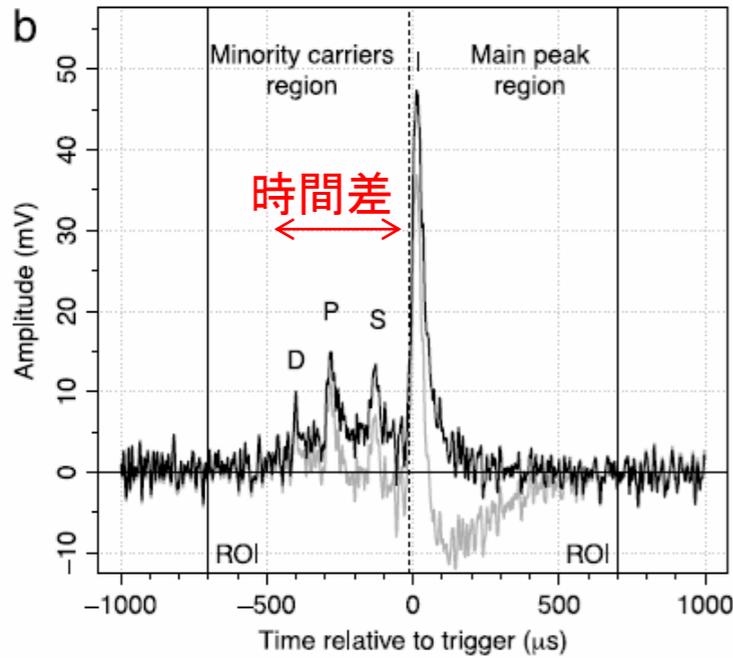


BGの低減(1/50以下)に成功  
さらなる低BG化 進行中

# NEWAGE技術 (2/3) : 「陰イオンガスTPC」

- セルフトリガーのTPCでは不可能だったドリフト方向の絶対値決定
- 海外グループによって初報告
- 三次元飛跡検出 (w/ASIC開発) と組み合わせた独自の発展

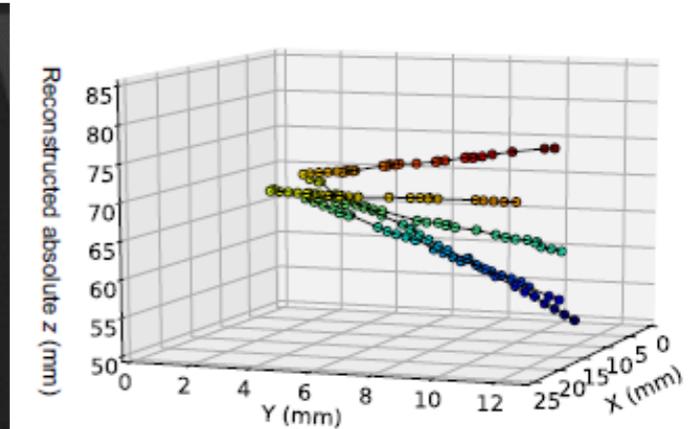
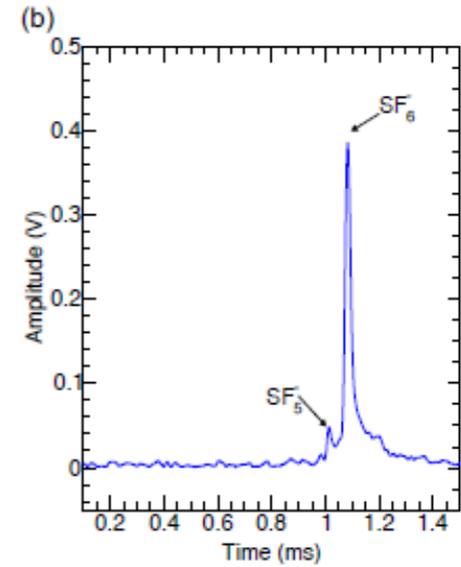
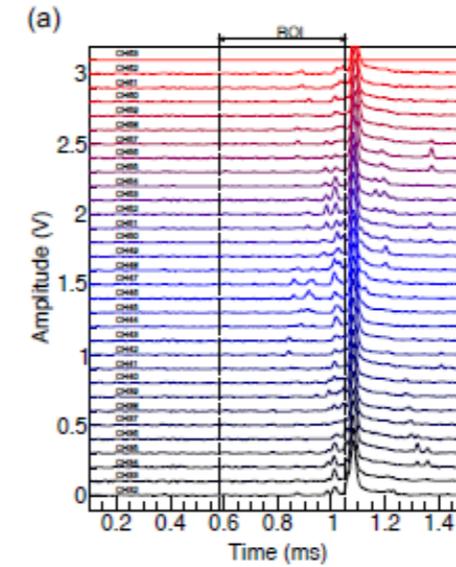
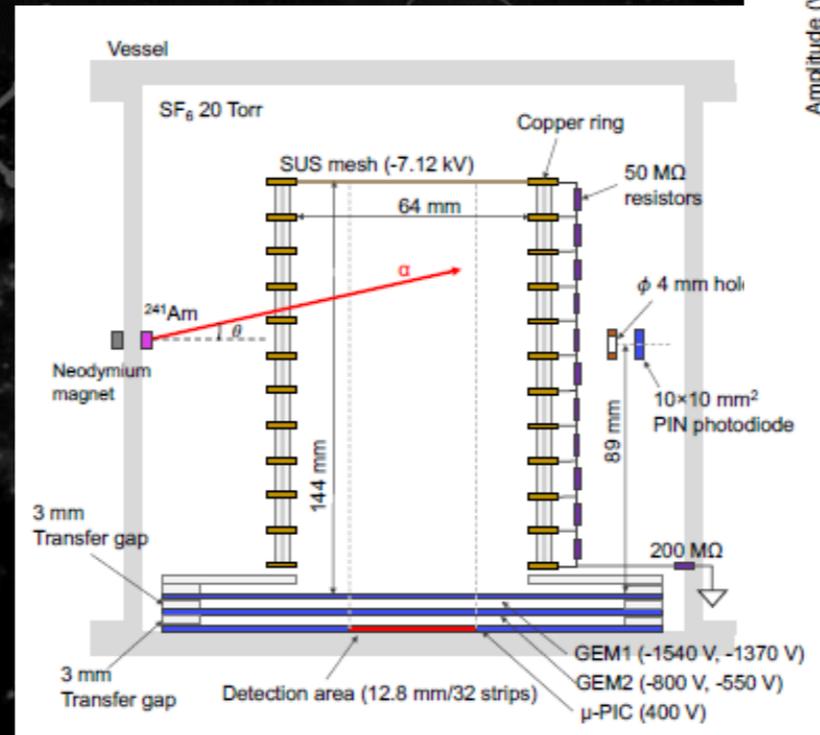
## 絶対値決定の例



J.B.R. Battat et al. / Physics of the Dark Universe 9-10 (2015) 1-7

ドリフト速度の違う複数種のイオン  
⇒ 時間差から絶対値

JINST (2020)  
P07015

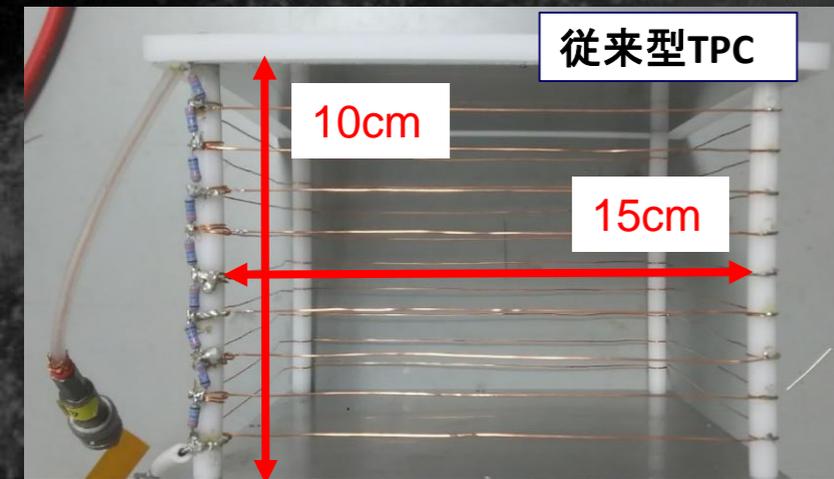


三次元飛跡+絶対値決定のはじめての例

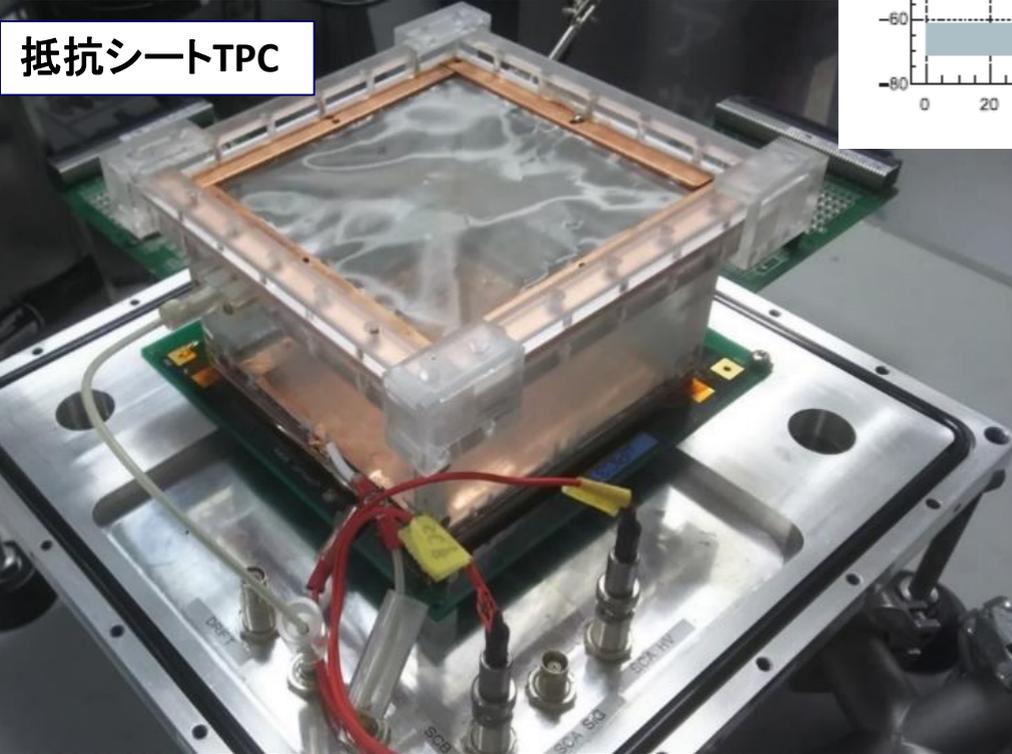
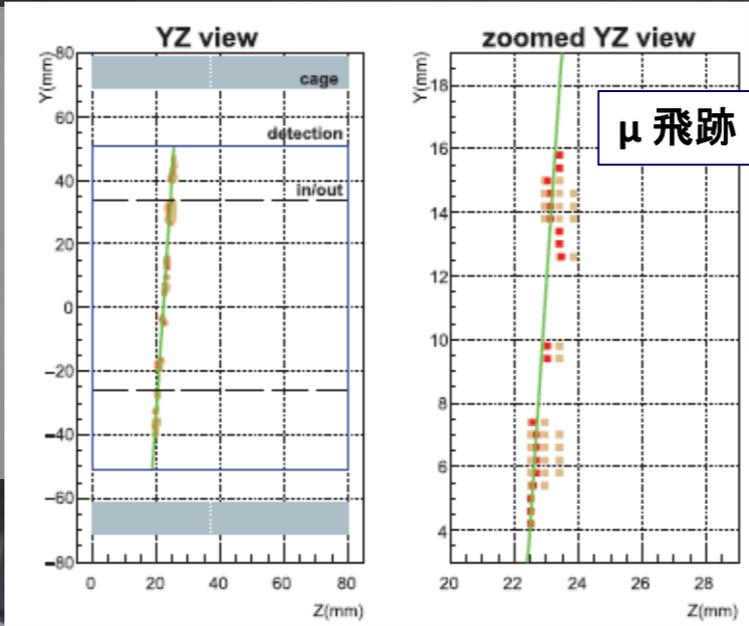
# NEWAGE技術 (3/3) : 「抵抗シートTPC」

PTEP 2019 (2019)063H01

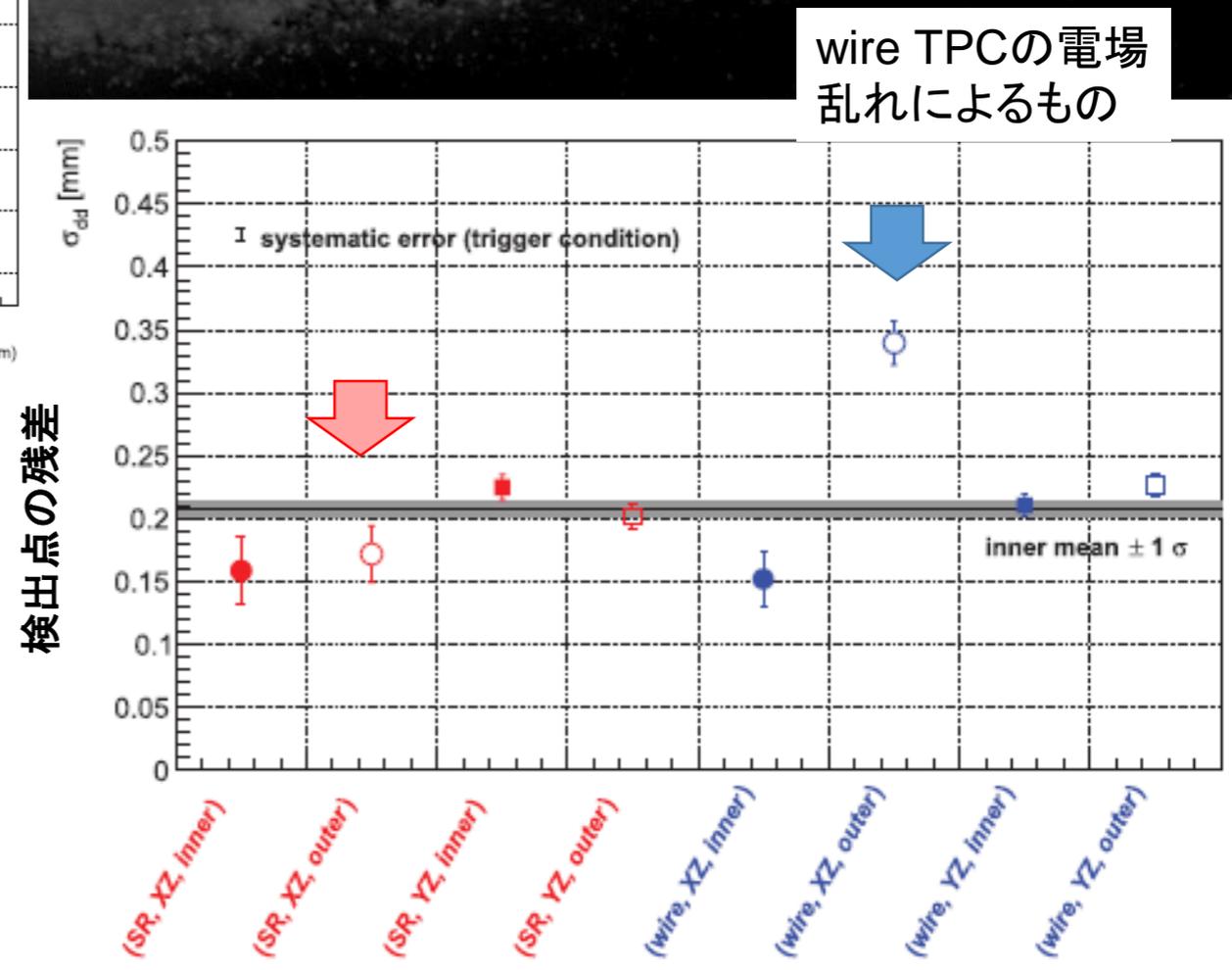
- 連続抵抗 (市販のシート) を使ったTPC電場形成
- ワイヤータイプよりシンプルな構造 ー様な電場



従来型TPC



抵抗シートTPC



# まとめ

- 方向に感度を持つ暗黒物質直接探索
  - 確実な発見の証拠
  - 暗黒物質の性質解明
- NEWAGE/CYGNUS
  - 重要拠点の一つとして国内（神岡）に設置

