

2019年11月9日

- 研究会「宇宙量子エレクトロニクス」

# 暗黒物質探索実験と 量子エレクトロニクス

身内賢太郎  
(神戸大学)

自己紹介  
暗黒物質探索実験  
量子エレクトロニクス  
まとめ

科研費  
KAKENHI

# 自己紹介：身内賢太郎（みうち けんたろう）

- いまのところずっと 暗黒物質直接探索 ⇔ 見つからない
- そろそろ 見つけて 性質解明 と行きたい



- D論 東大物理 みのわ研 LiFボロメータ
- PD～助教 京大物理 宇宙線研究室 ガスTPC
- 准教授 神戸大 粒子物理研究室 +=液体キセノン検出器

- 鹿野氏とUK-JPFoS(2017) で会う  
⇒ 本日に至る





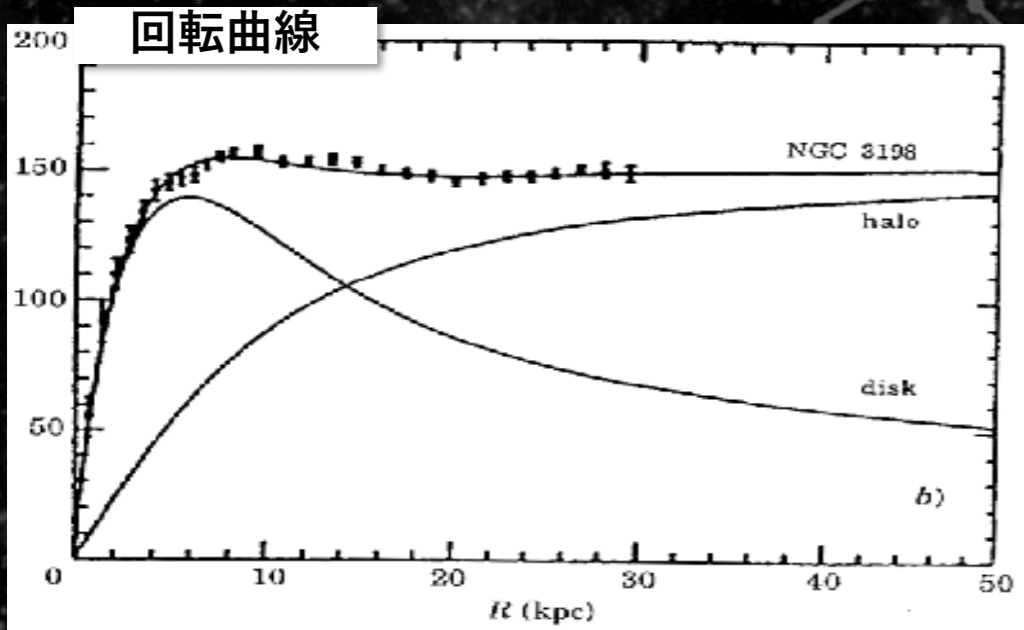
# 暗黒物質

現代の素粒子・宇宙物理の大問題の一つ



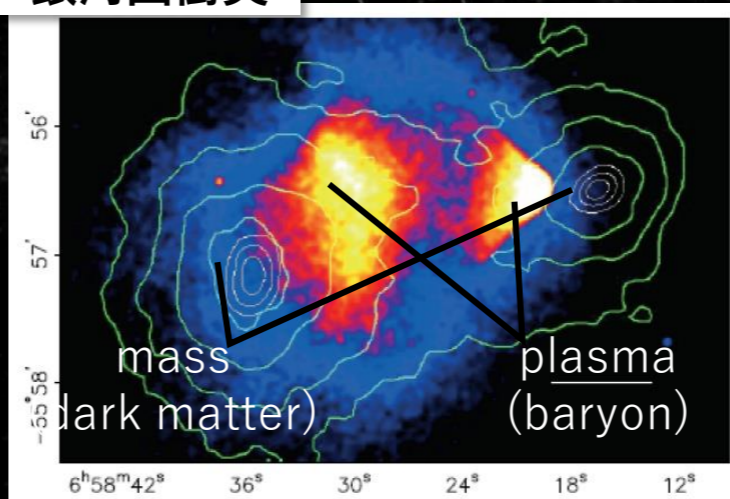
# • 暗黒物質: 宇宙のさまざまな階層で存在

- 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~)



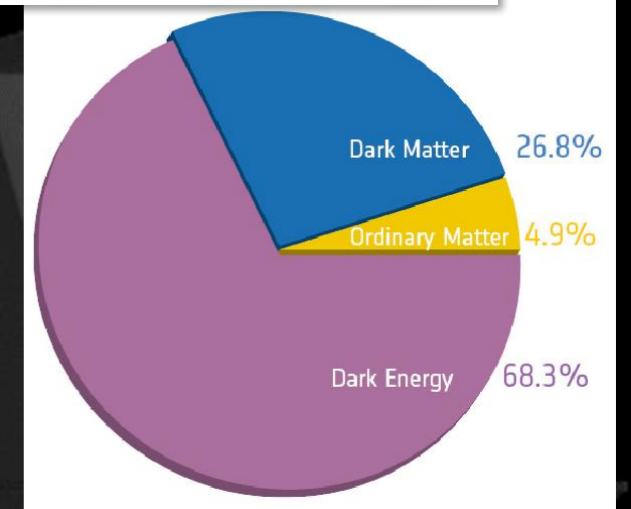
Annu. Rev. Astron. Astrophys. 29(1991)409

### 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

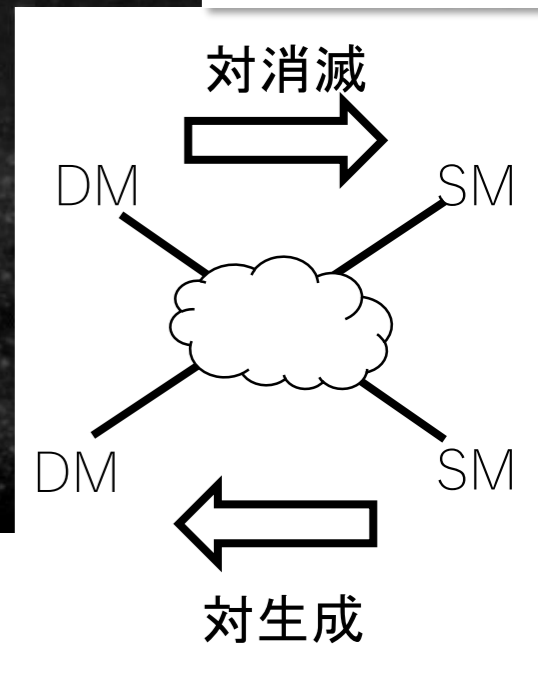
## 他の動機で導入される粒子が「よい」候補

- 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)

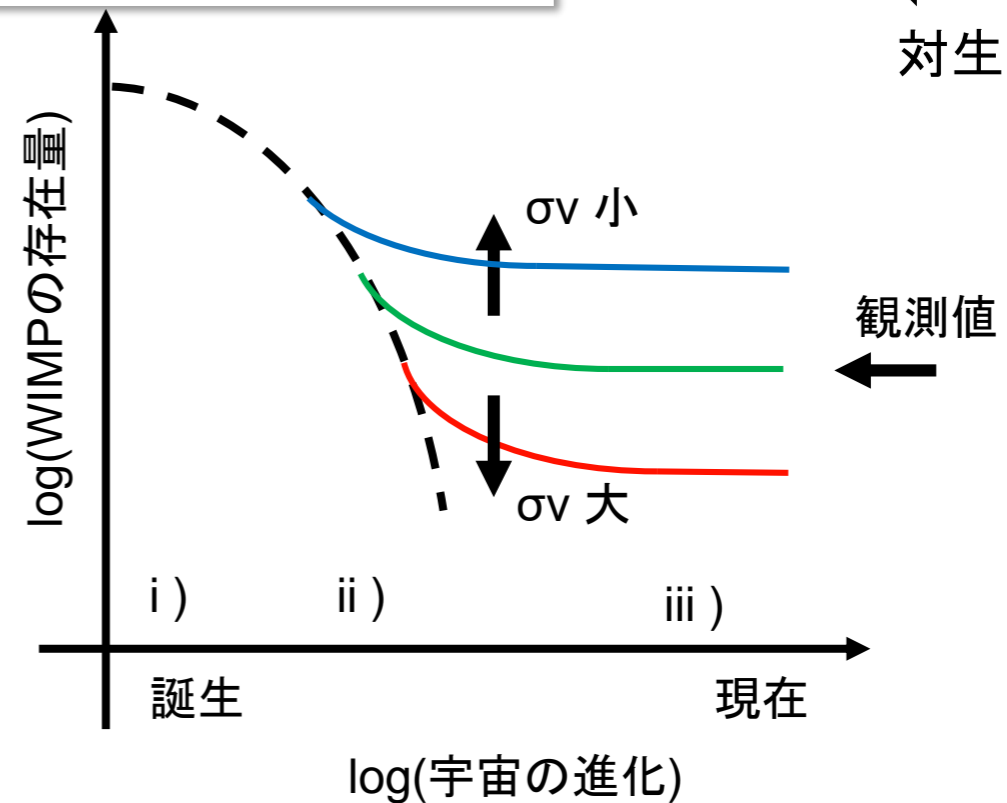
## WIMPの特徴

- 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

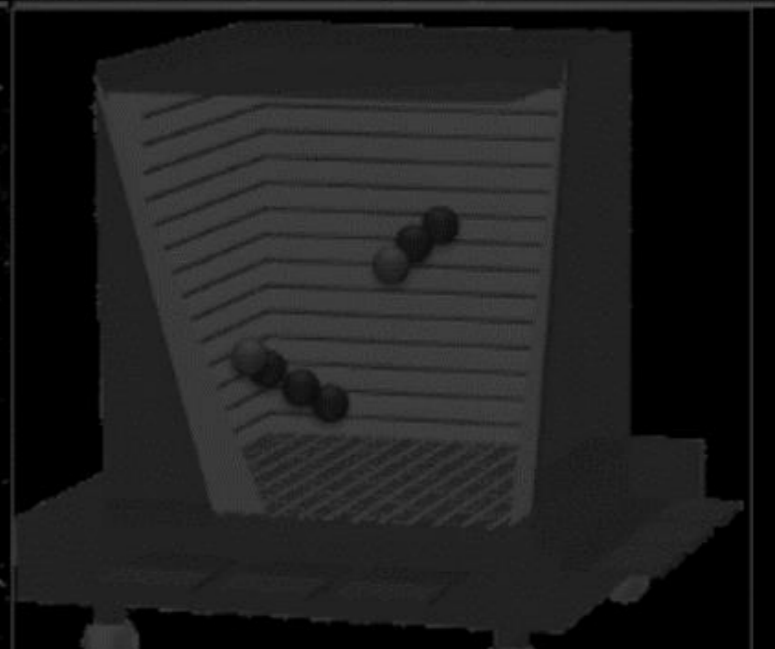
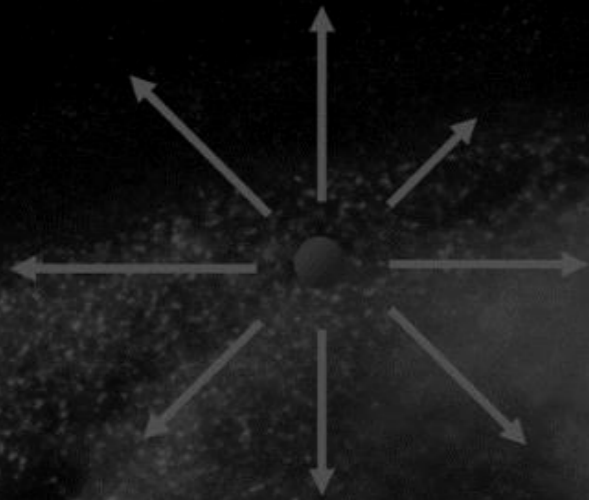
WIMPの反応



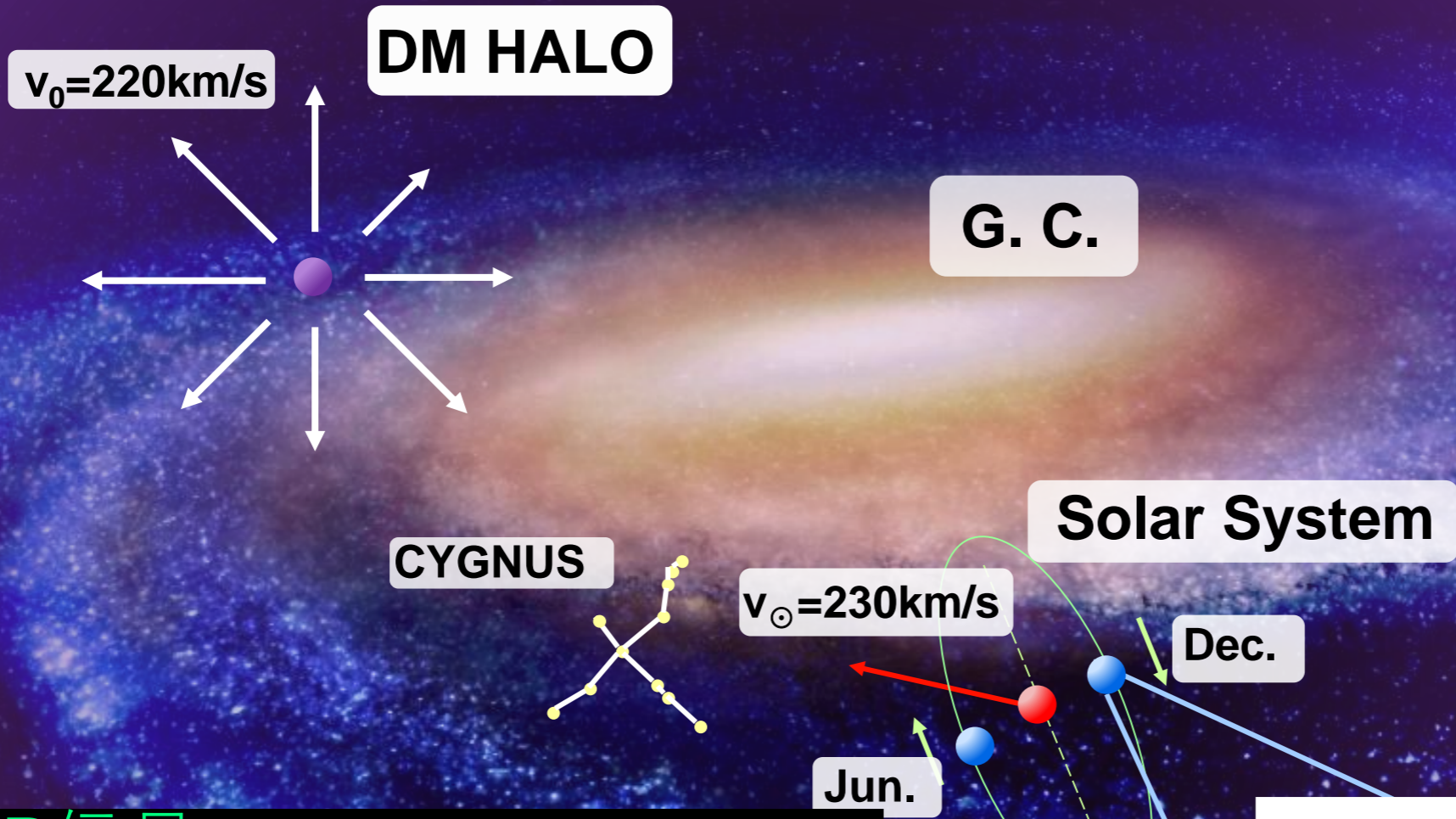
WIMP存在量の時間変化



# 直接探索のこれまで



# 直接探索

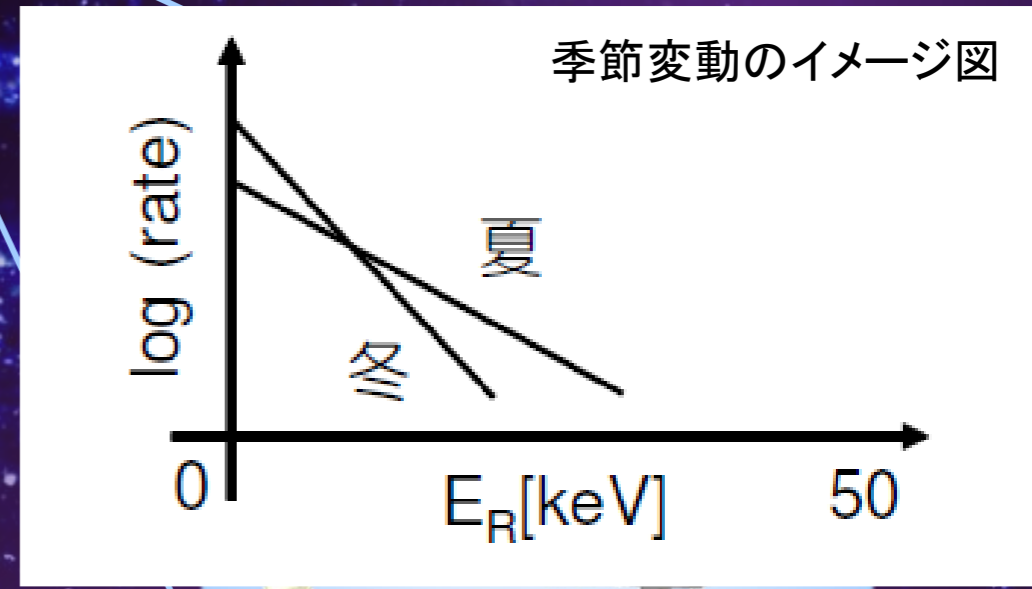


## WIMP信号

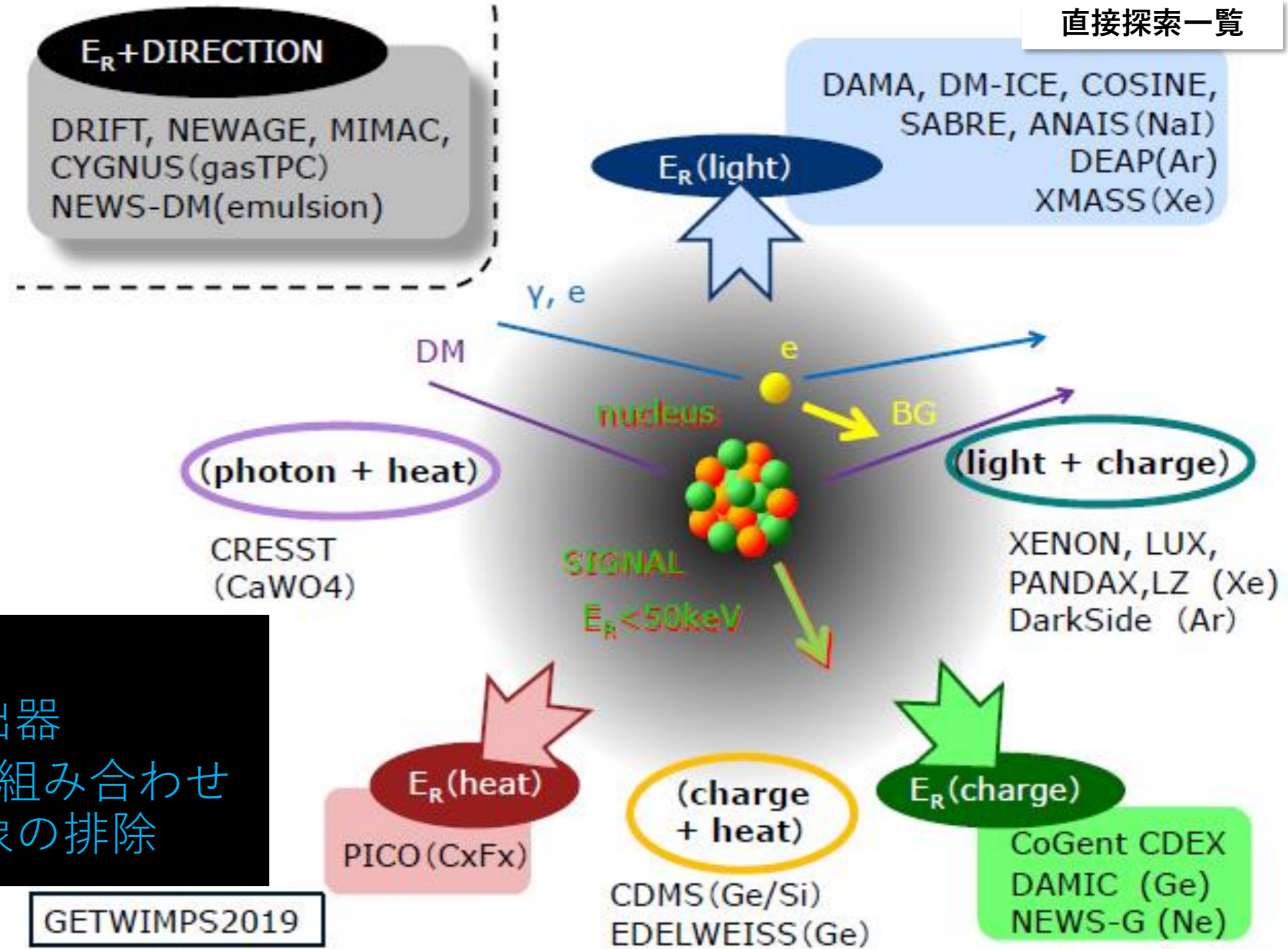
- 原子核反跳 エネルギー、方向
- 季節変動

## 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)



# 直接探索



GETWIMPS2019

- 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

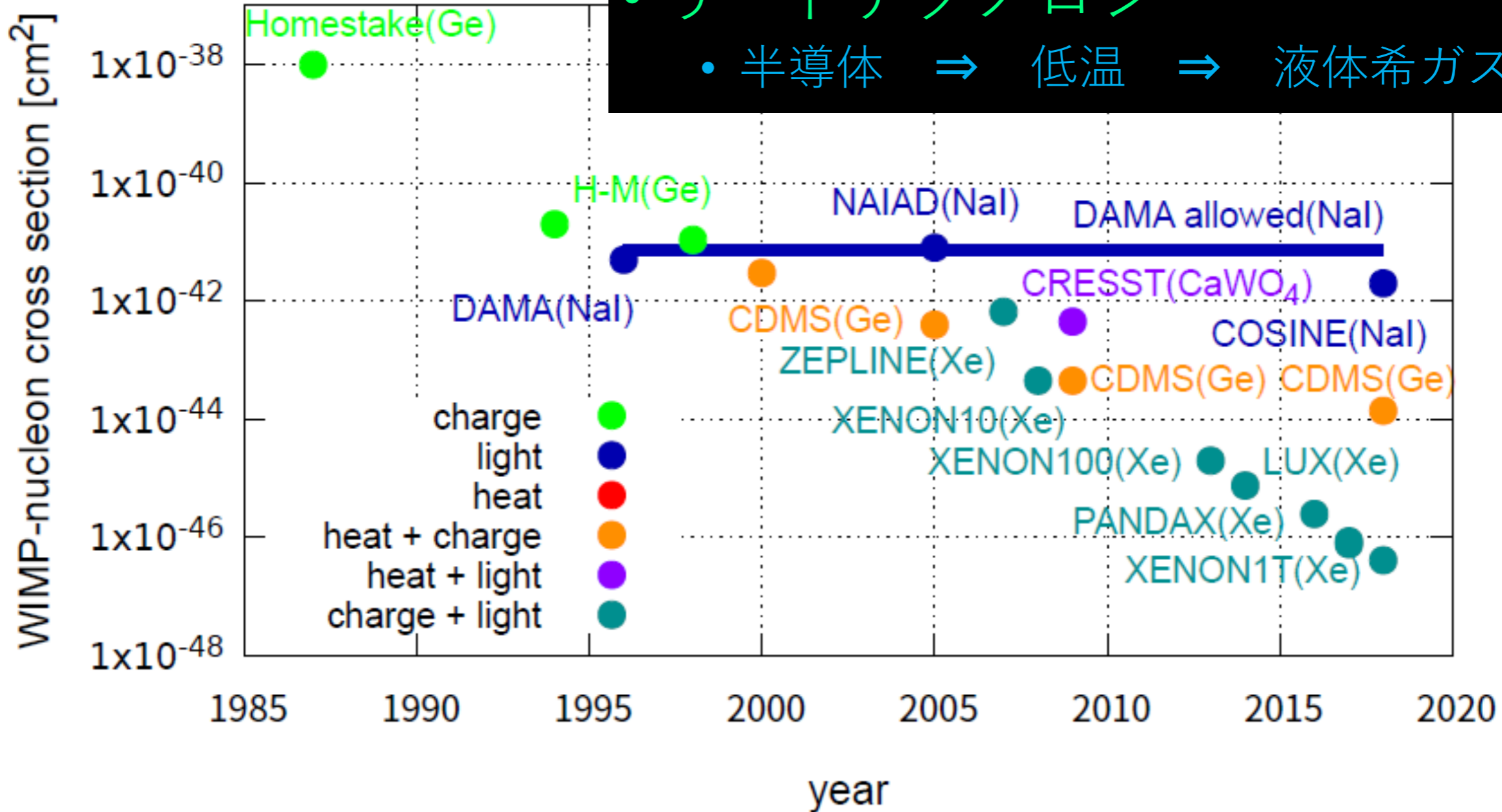


# 直接探索 (歴史)

WIMP探索の歴史

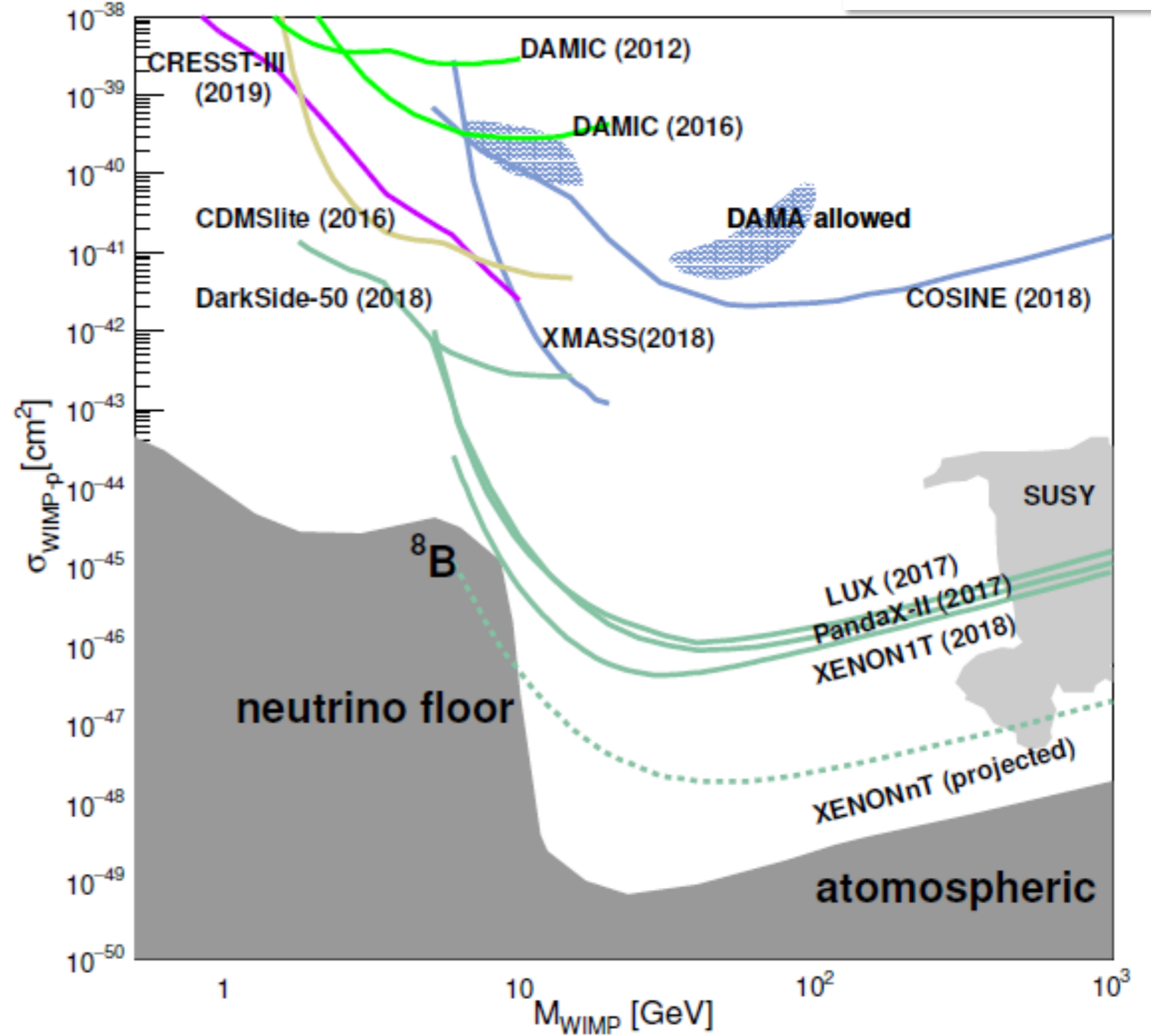
• リードテクノロジー

• 半導体 ⇒ 低温 ⇒ 液体希ガス



• 現状

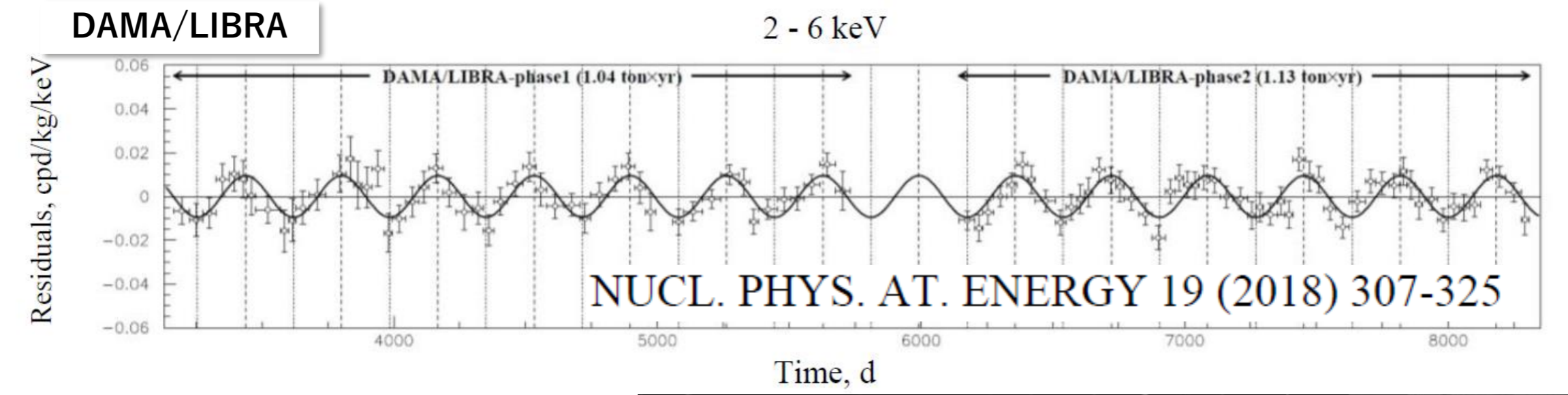
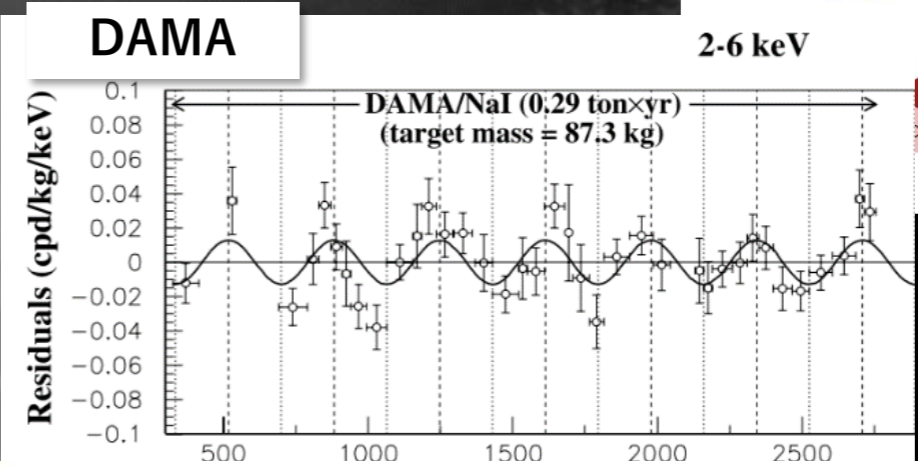
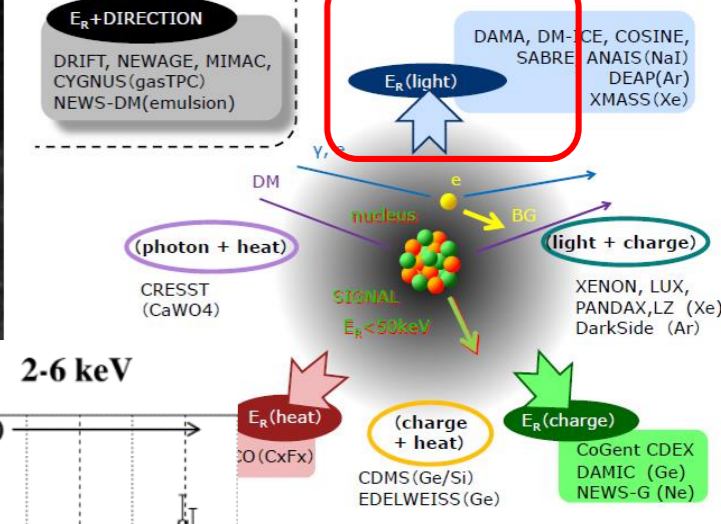
- DAMA 季節変動
- 低温検出器
- 液体キセノン



# DAMA (NaI)

- 250kg の NaIシンチレータ
- DAMA 最初の季節変動報告：1998年～
- 2.46 ton year  $12.9 \sigma$
- 何か見えている

Eur. Phys. J. C (2008) 56: 333–355  
DOI 10.1140/epjc/s10052-008-0662-y



考えうるBGは尽くされた。  
DMとしても自然なモデルでは説明できない。

# 低温検出器

低閾値 ⇒ 低質量DM

## Latest results of CRESST-III's search for sub-GeV/c<sup>2</sup> dark matter

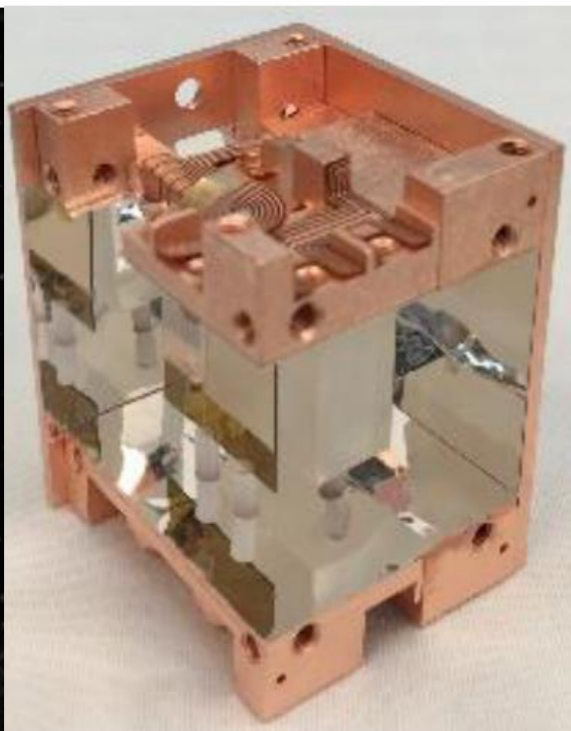
### CRESST-III 概要

Holger Kluck

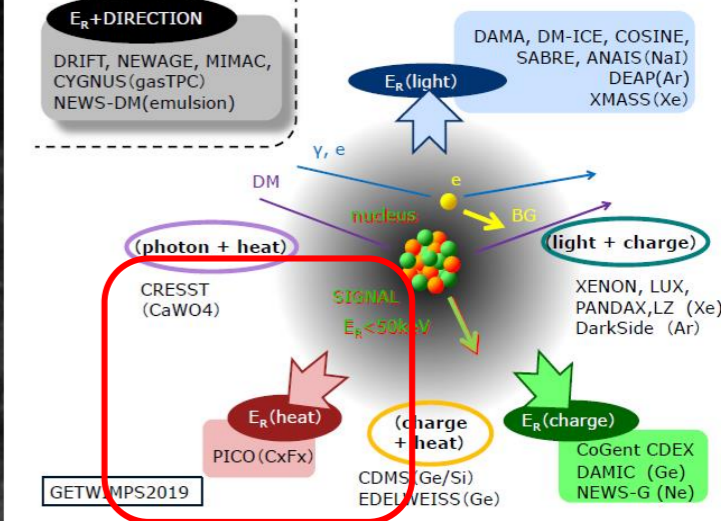
on behalf of the CRESST collaboration

16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019)

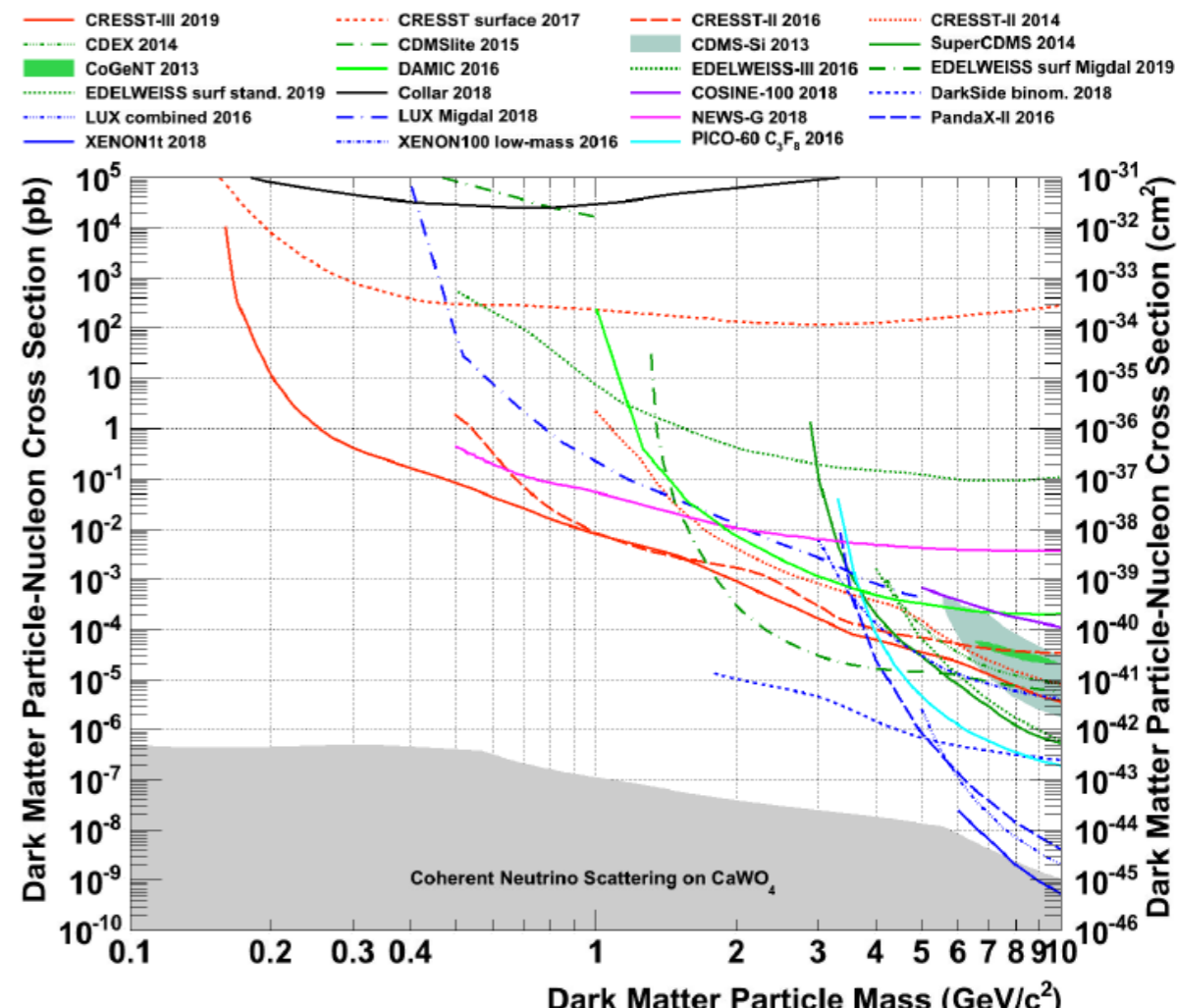
September 10, 2019



- May 2016: 10 CRESST-III modules installed
- Jul 2016 – Feb 2018: data taking (80% blinded, 20% training set)
- Detector A  
→ lowest nuclear recoil threshold so far: **30.1 eV**
- Target crystal mass: **23.6g**
- Gross exposure: **5.6 kg d**
- [arXiv:1904.00498], accepted by Phys.Rev.D  
→ this talk



### CRESST-III 結果



2019

Kenta

# 液体キセノン：1相式

## • XMASS

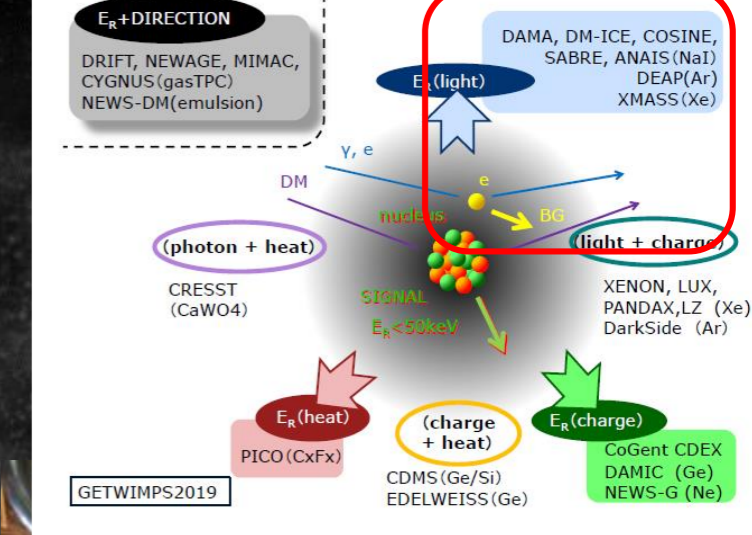
- 2013年11月～2019年3月 本観測
- 642本 光電子増倍管
- 800kgの液体キセノン
- 物理論文14編 技術論文6編

- 主な論文の一つ ”fiducial paper”
  - 液体キセノンの自己遮蔽を利用

Physics Letters B 789 (2019) 45–53

A direct dark matter search in XMASS-I

XMASS Collaboration\*

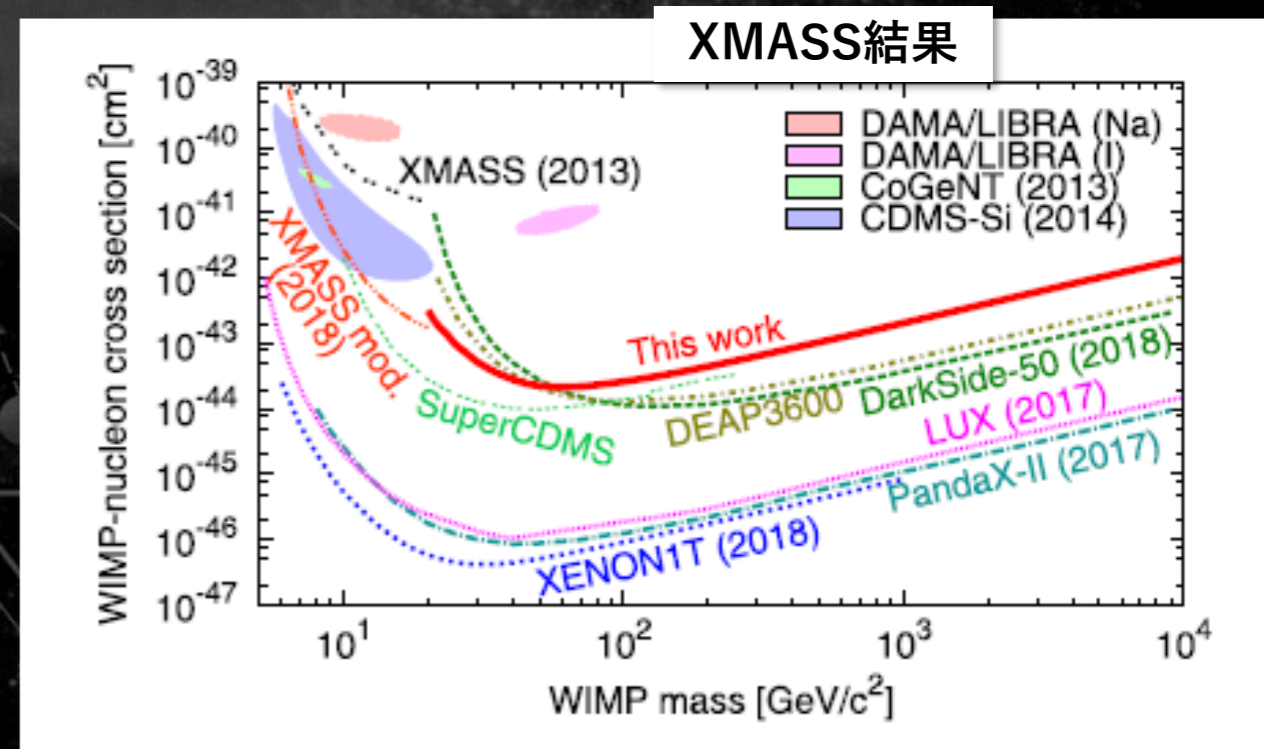
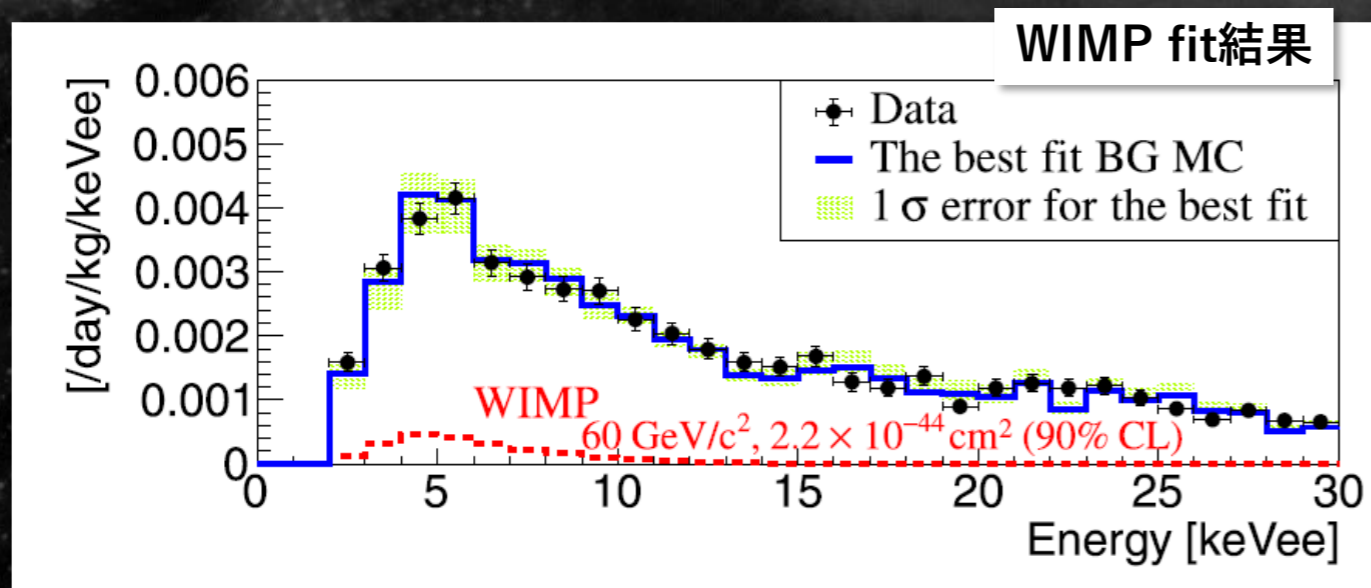


XMASS検出器



液体キセノンの直径 約1m

- XMASS fiducial paper: limit
  - BG model + WIMPでfit
  - データはBG modelとコンシステント



- 1相式キセノン（電子反跳）を用いた最良の制限
- (Learned lesson) BG reductionを行う際に系統誤差の評価 (+低減) が重要

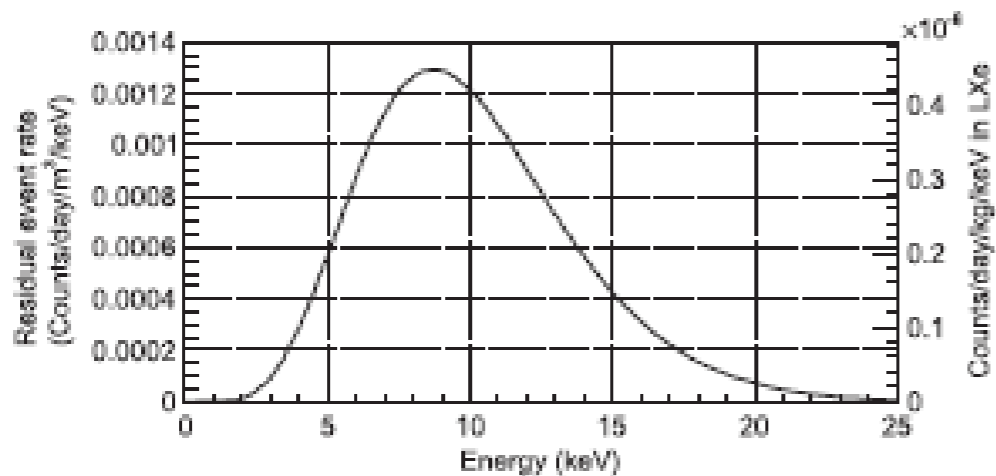
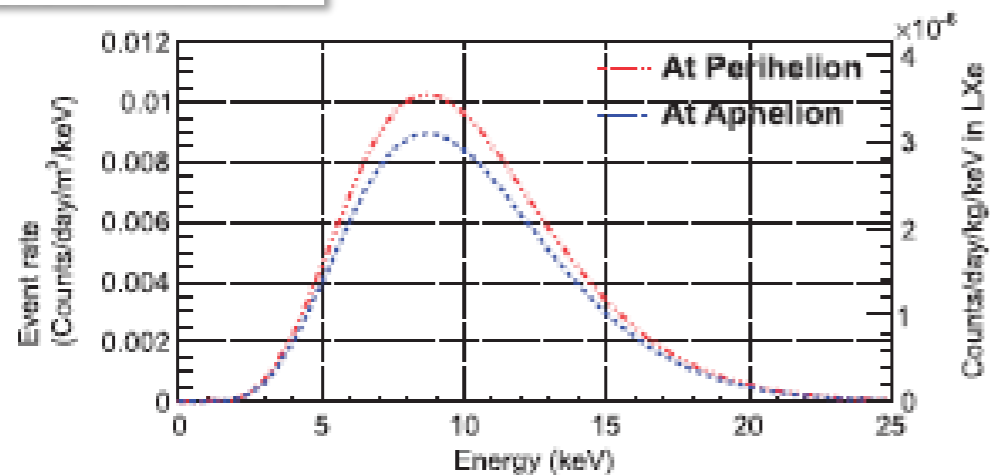
# • XMASS その他

- Kaluza-Klein (余剰次元) 太陽AXION
- 余剰次元のAXION keV程度の質量
- 太陽で熱的に生成 ⇒ 重力的にTRAP ⇒ 検出器内で崩壊

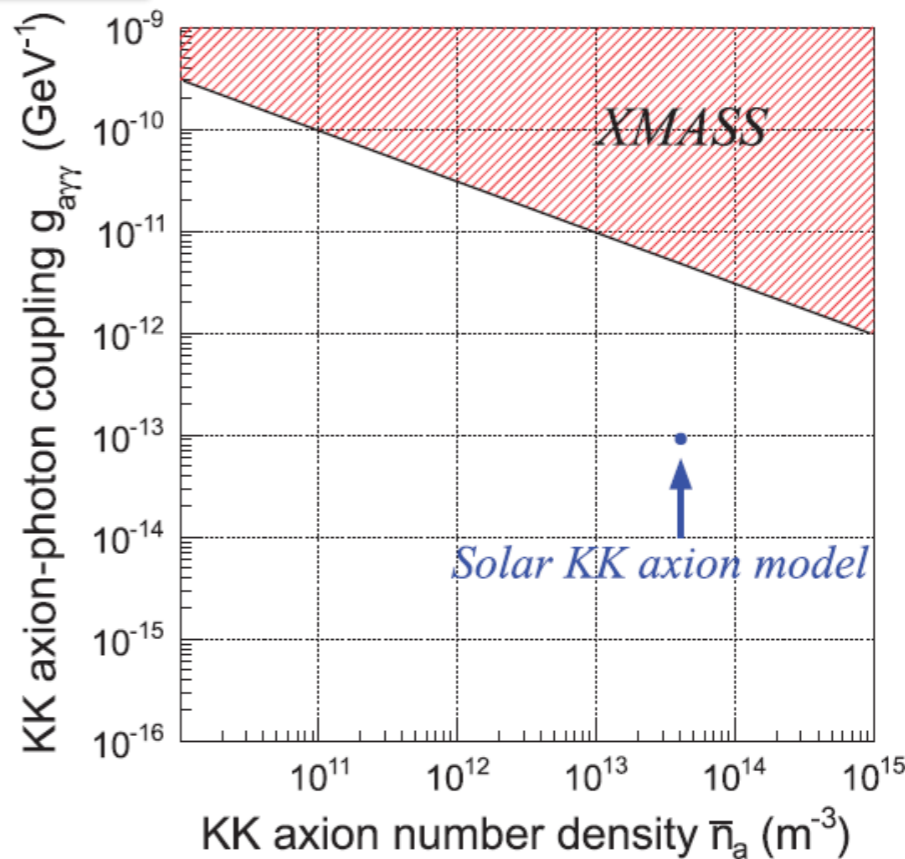
Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 103C01 (10 pages)

N.Oka et. al.

## 期待される信号



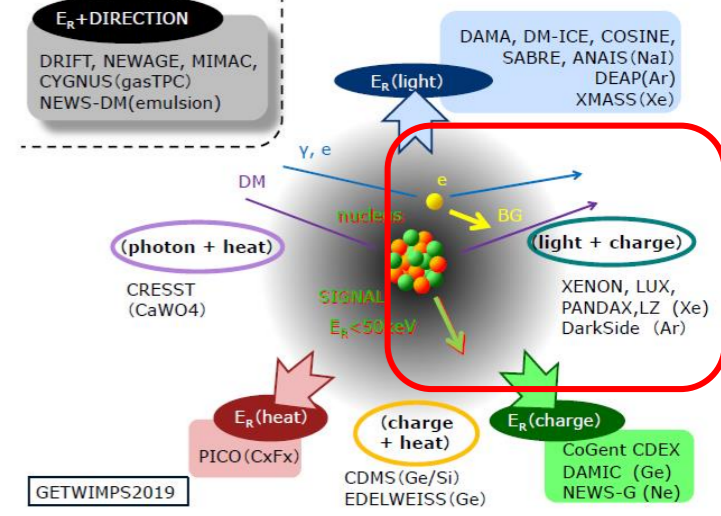
## 結果



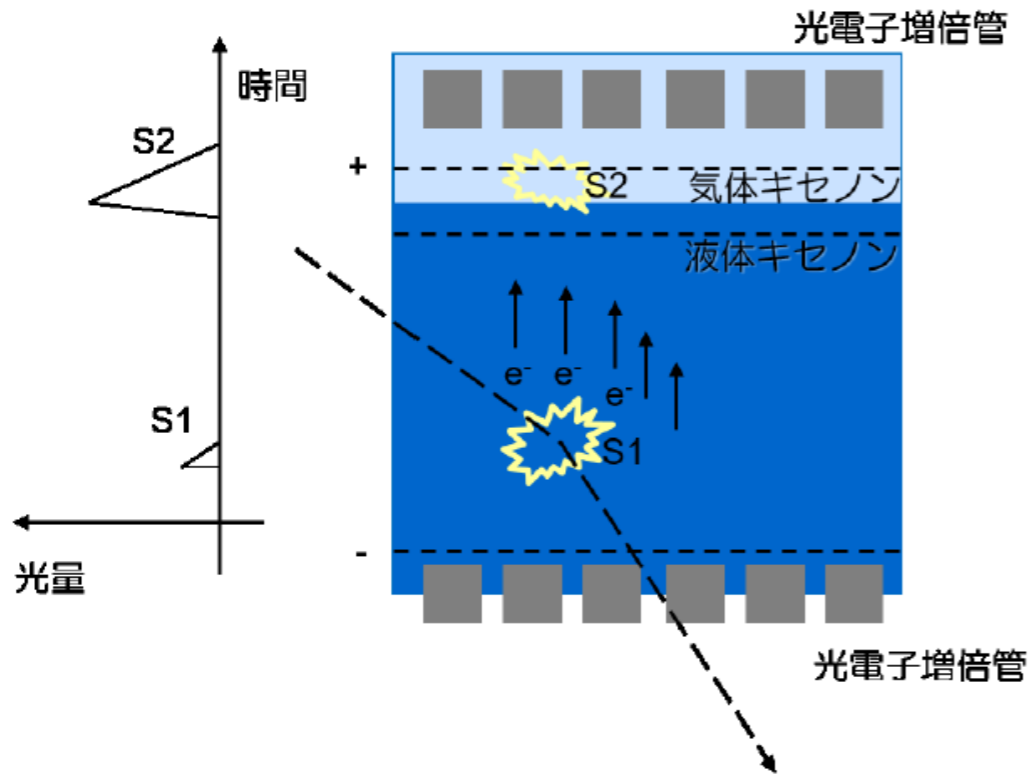
- 初の実験的制限!

# 液体キセノン：2相式

- XENON1T, LUX, PandaX-II
- 数100kg ~ 1ton
- 電子事象の排除が可能

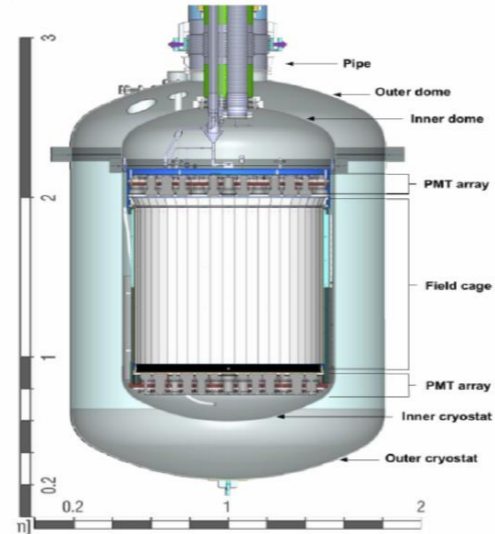


2相式検出器概念図

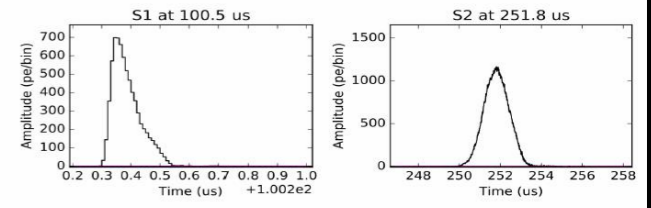


## XENON検出器

### The Time Projection Chamber (TPC)



- 248 3" low-bkg PMTs
- 1 m drift × ø1 m
  - 2 tons active LXe
  - largest LXe TPC built
- filled and functional since May 2016





• XENON1T

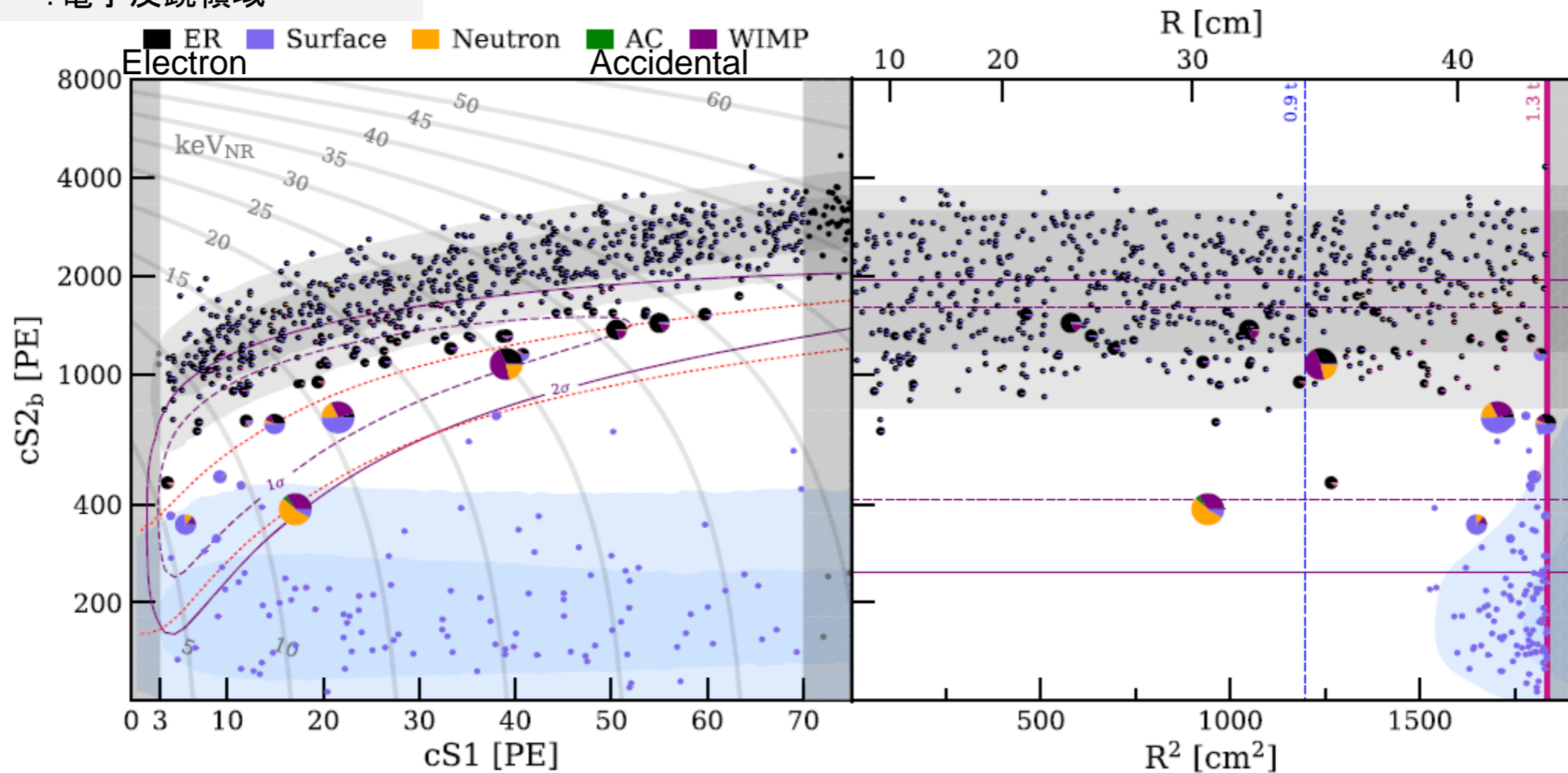
Dark Matter Search Results from a One Ton-Year Exposure of XENON1T

• ROIにも事象あり

• ER : ラドン neutron :  $\alpha$ 線起源の中性子

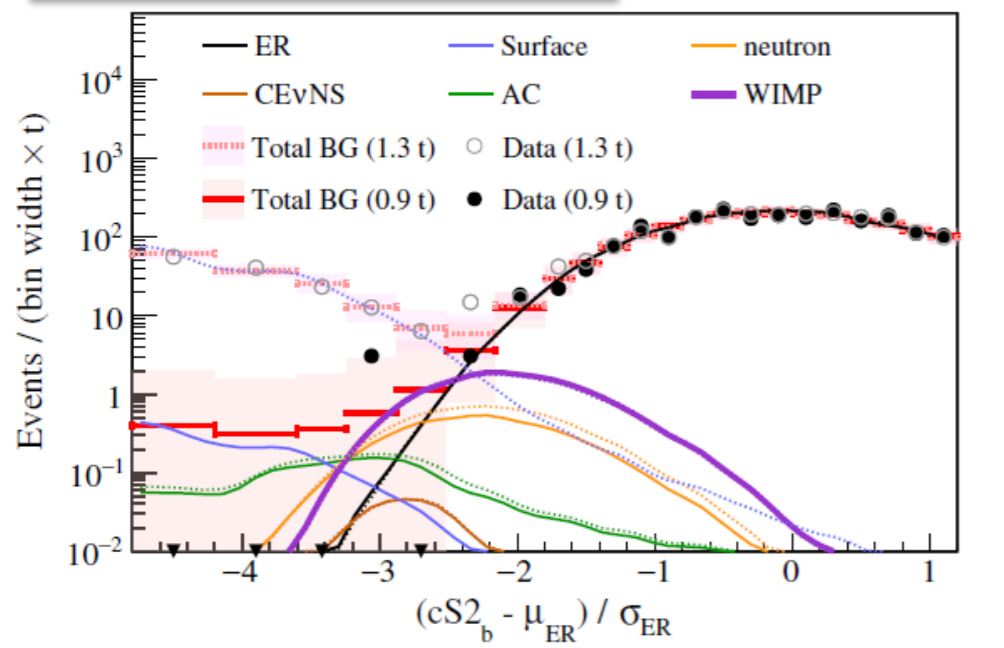
赤点線:原子核反跳領域  
グレー:電子反跳領域

PHYSICAL REVIEW LETTERS 121, 111302 (2018)



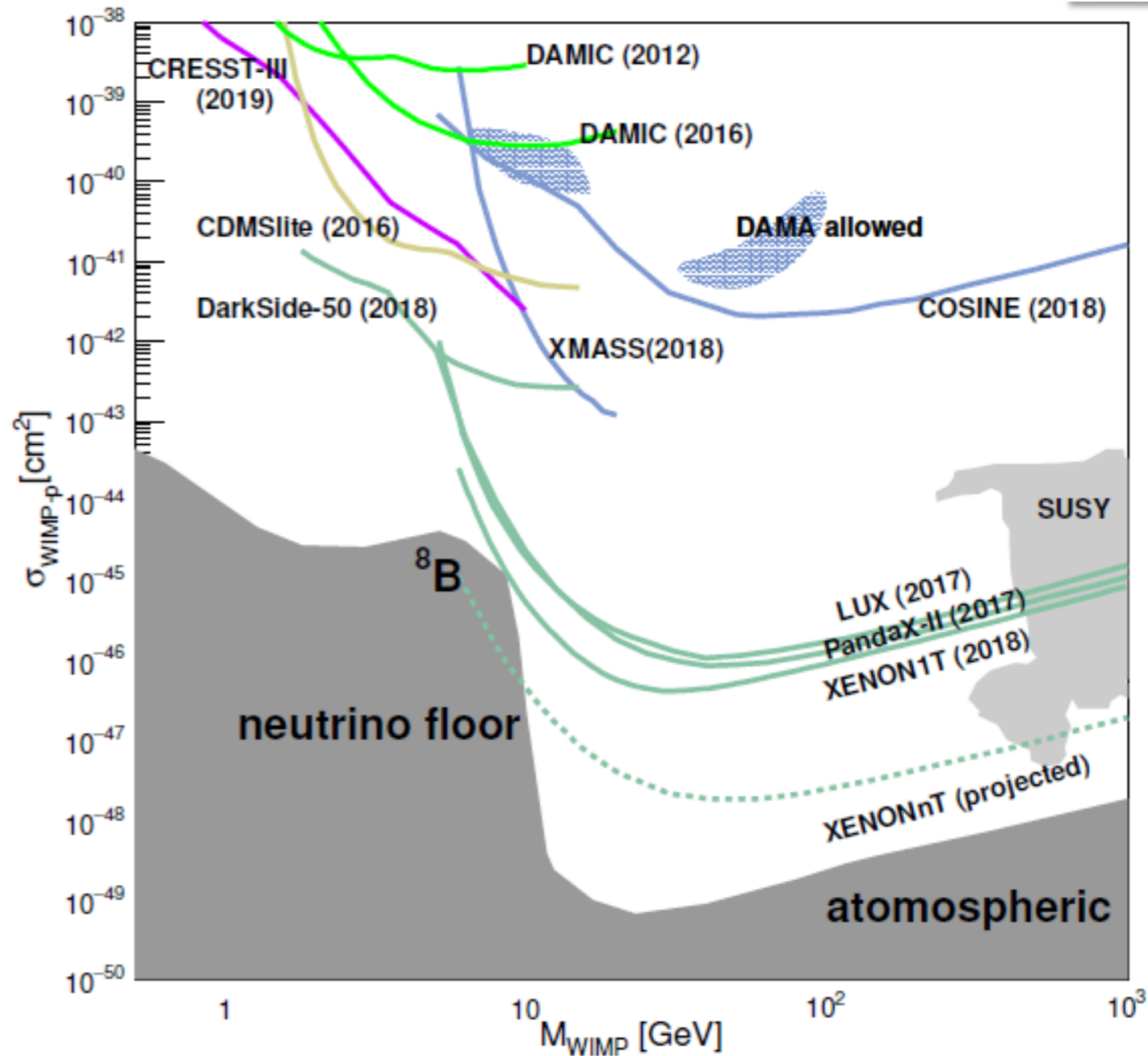
• XENON1T 1 ton • year limit

「ERらしさ」でフィット



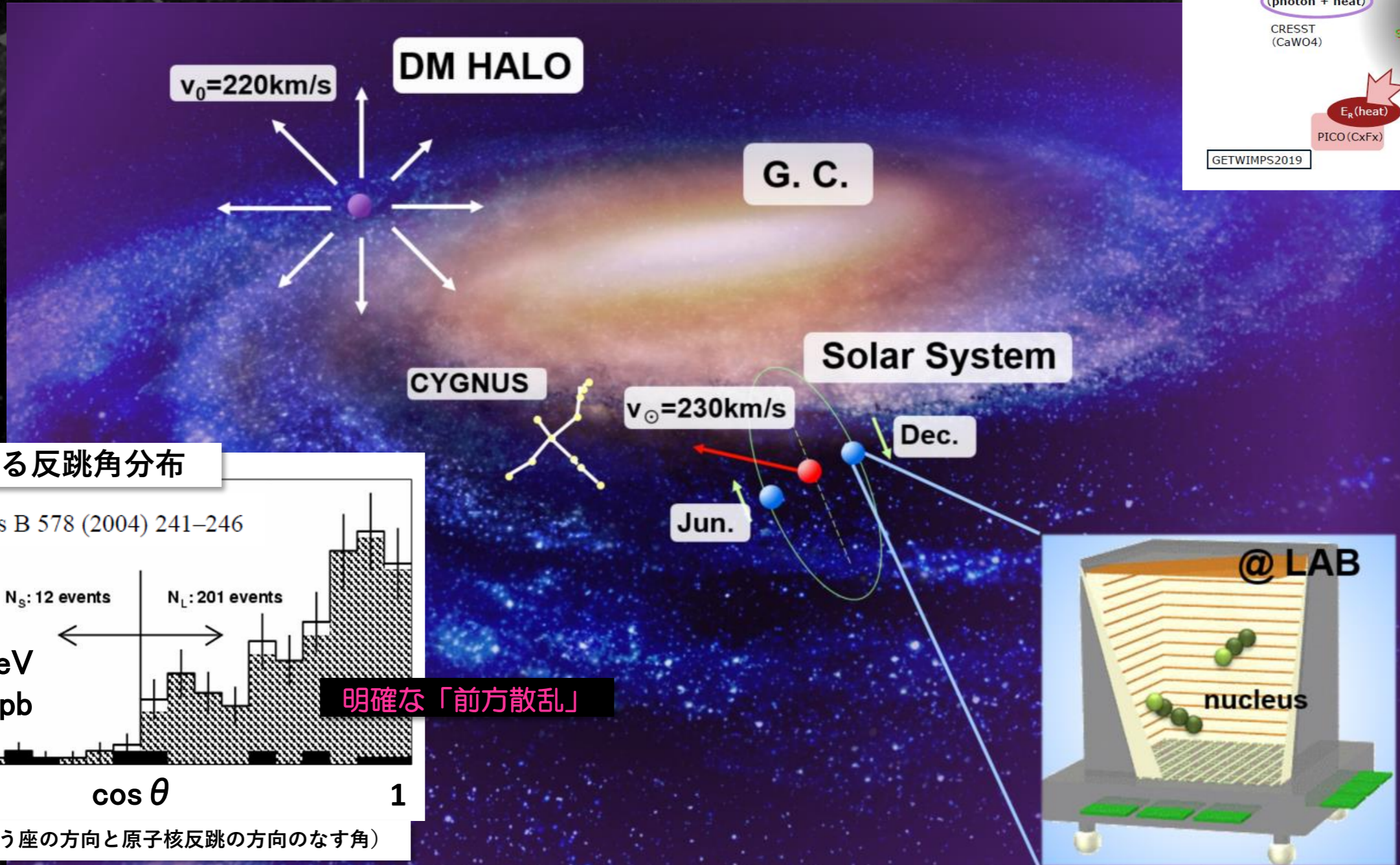
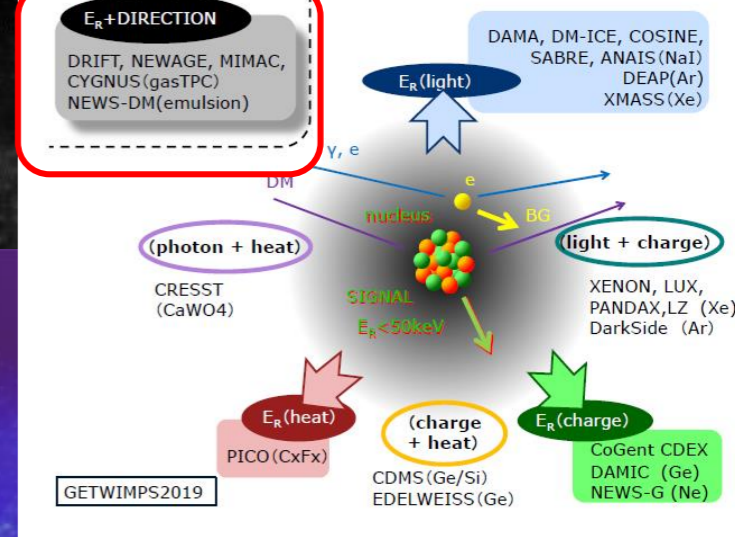
- 直接探索をリード
- SUSY領域の探索を進める

結果



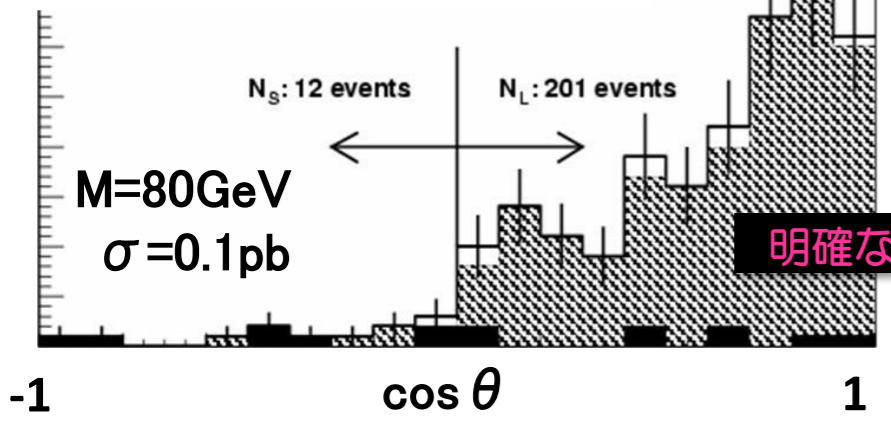
# 方向感度を持った探索：NEWAGE

DAMAの「季節変動」以上の信号 ⇒ 方向感度



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)

# 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

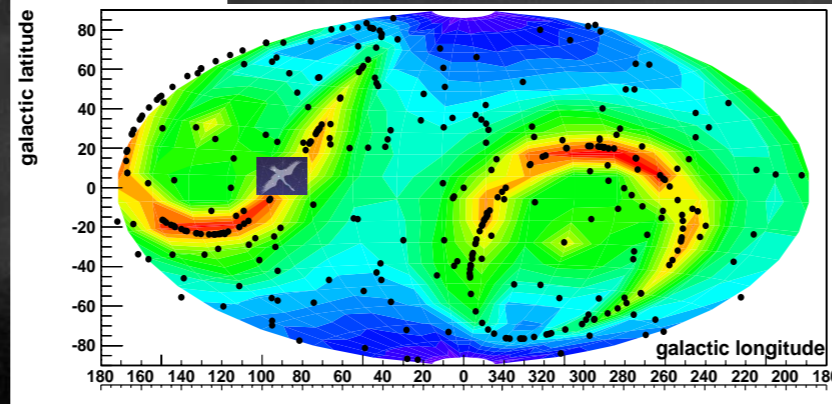
## 地上による初の方向感度探索

PLB 654 (2007) 58

## 地下実験による感度向上

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

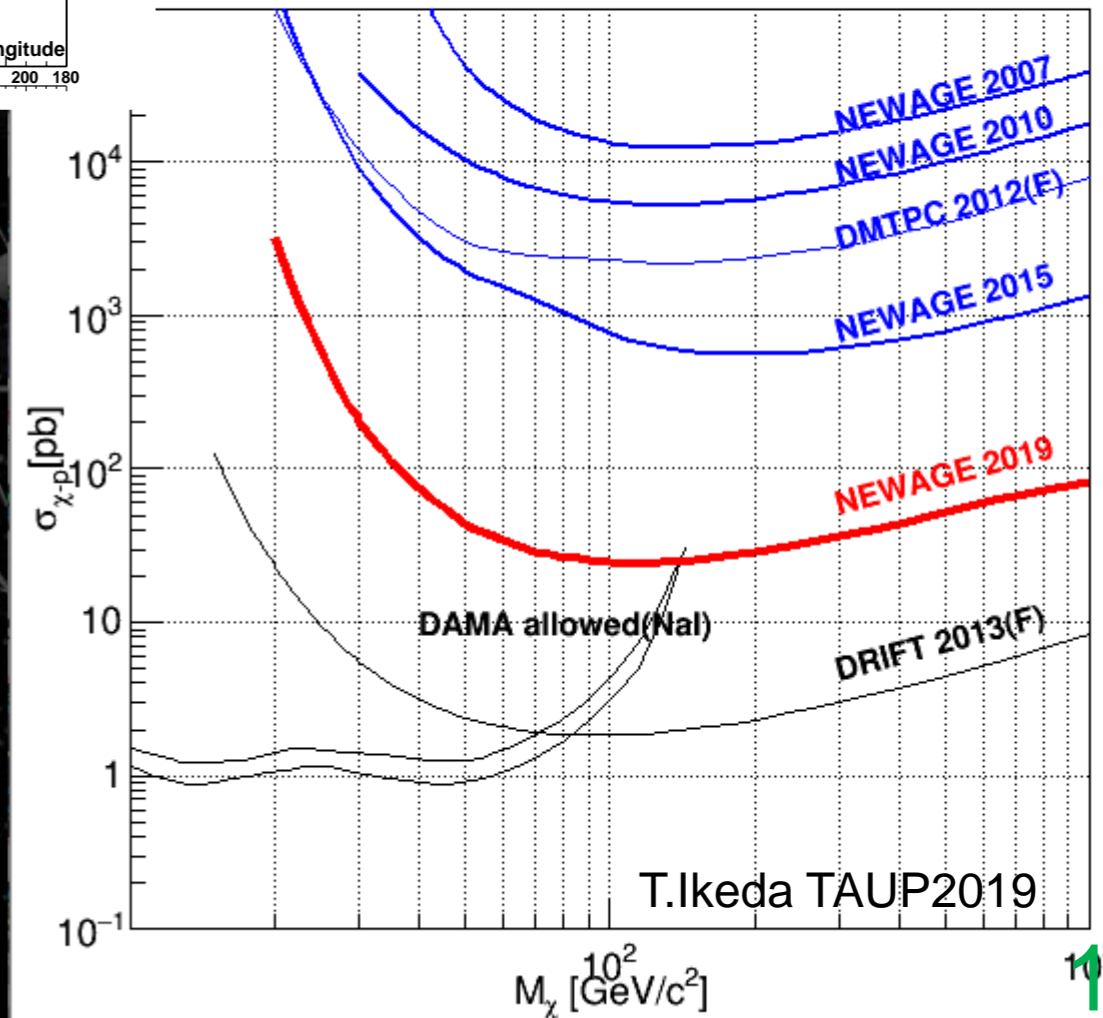
SKYMAP (measured DATA)



View Options Tools

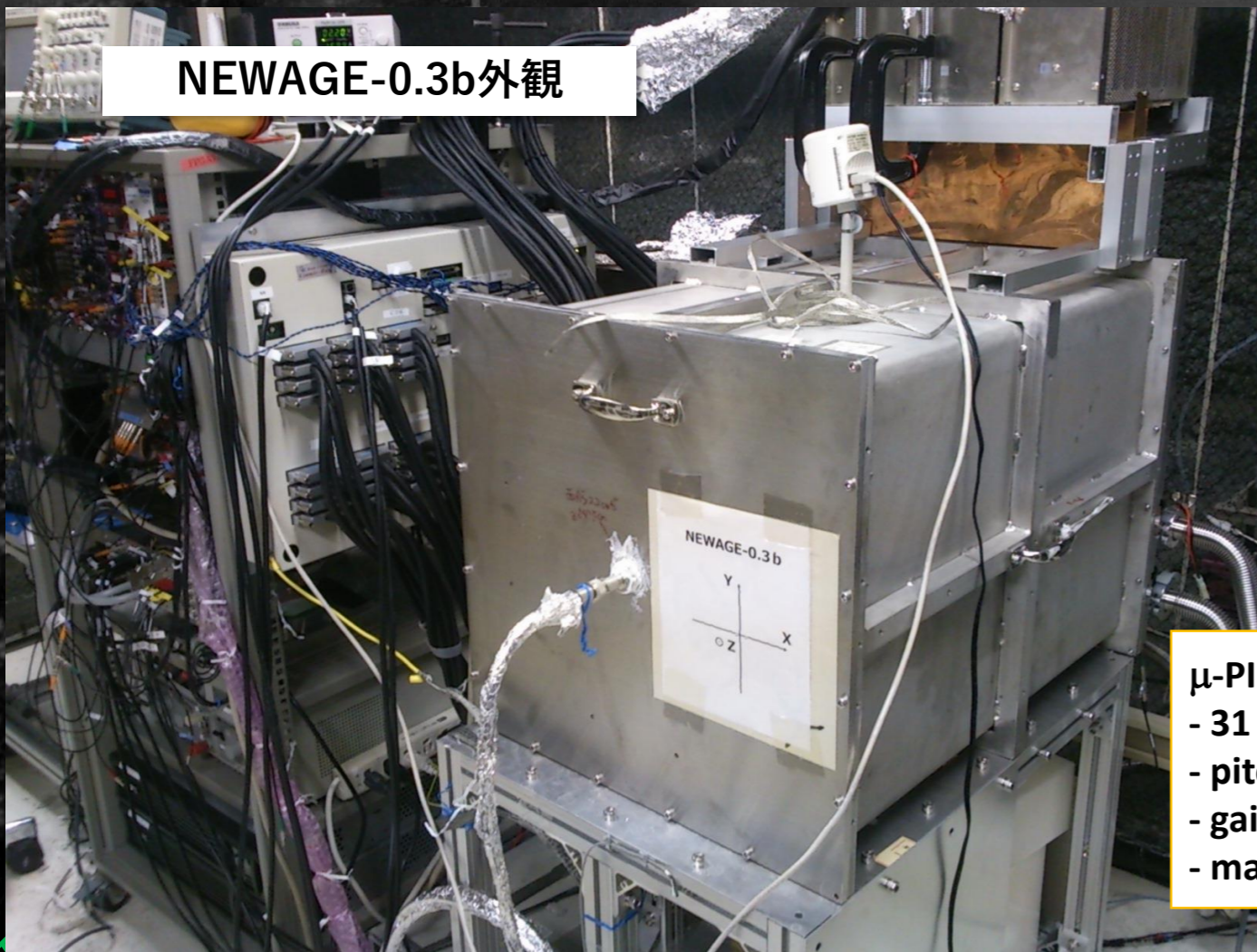
NEWAGEの歴史

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

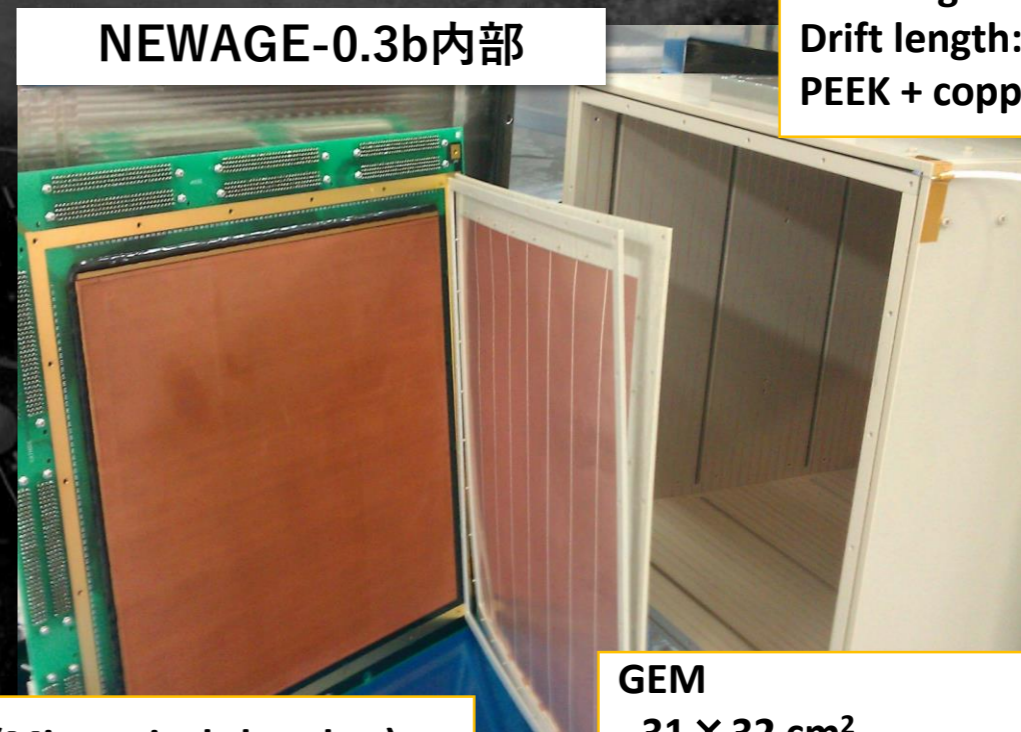


## • NEWAGE 検出器 NEWAGE-0.3b

- 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

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

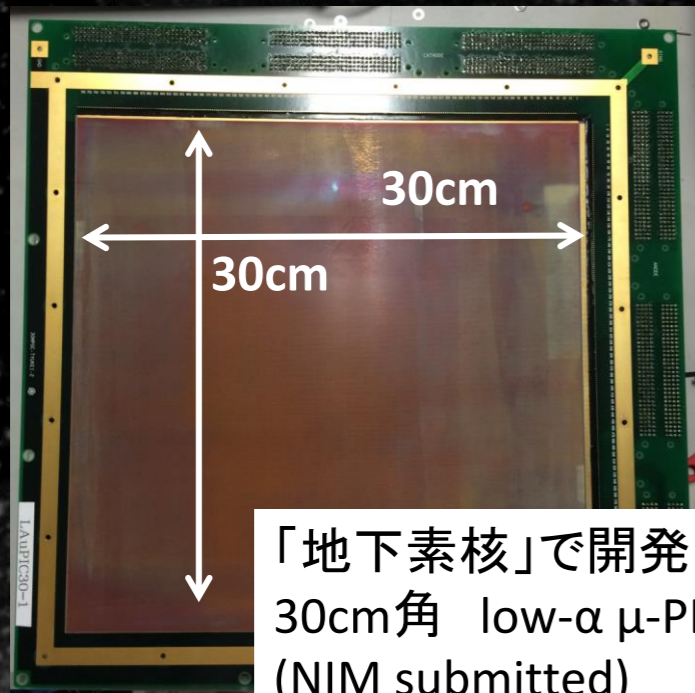
**GEM**  
-  $31 \times 32 \text{ cm}^2$   
- 8-segmented  
- hole pitch :  $140 \mu\text{m}$   
- hole diameter:  $70 \mu\text{m}$   
- insulator : LCP  $100 \mu\text{m}$   
- gain :  $\sim 5$   
- made by Scienergy, Japan

• 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)

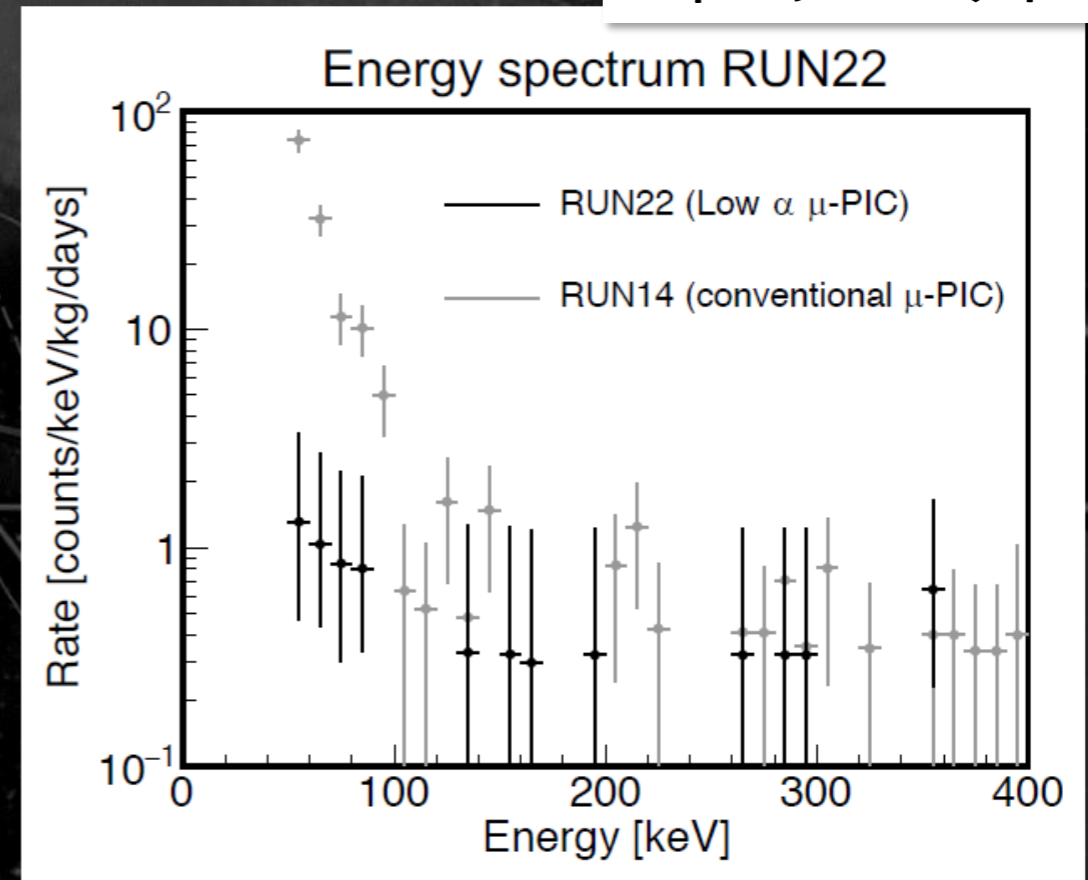
材料探索

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



「地下素核」で開発した  
30cm角 low- $\alpha$   $\mu$ -PIC  
(NIM submitted)

エネルギースペクトル

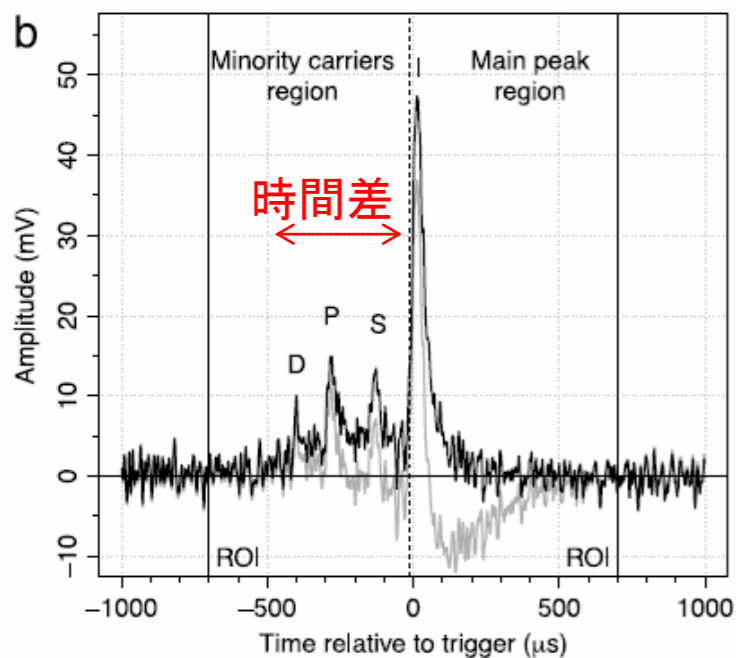


BGの低減(1/50以下)に成功  
さらなる低BG化 進行中

# 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 2019 J. Inst. 14 T01008

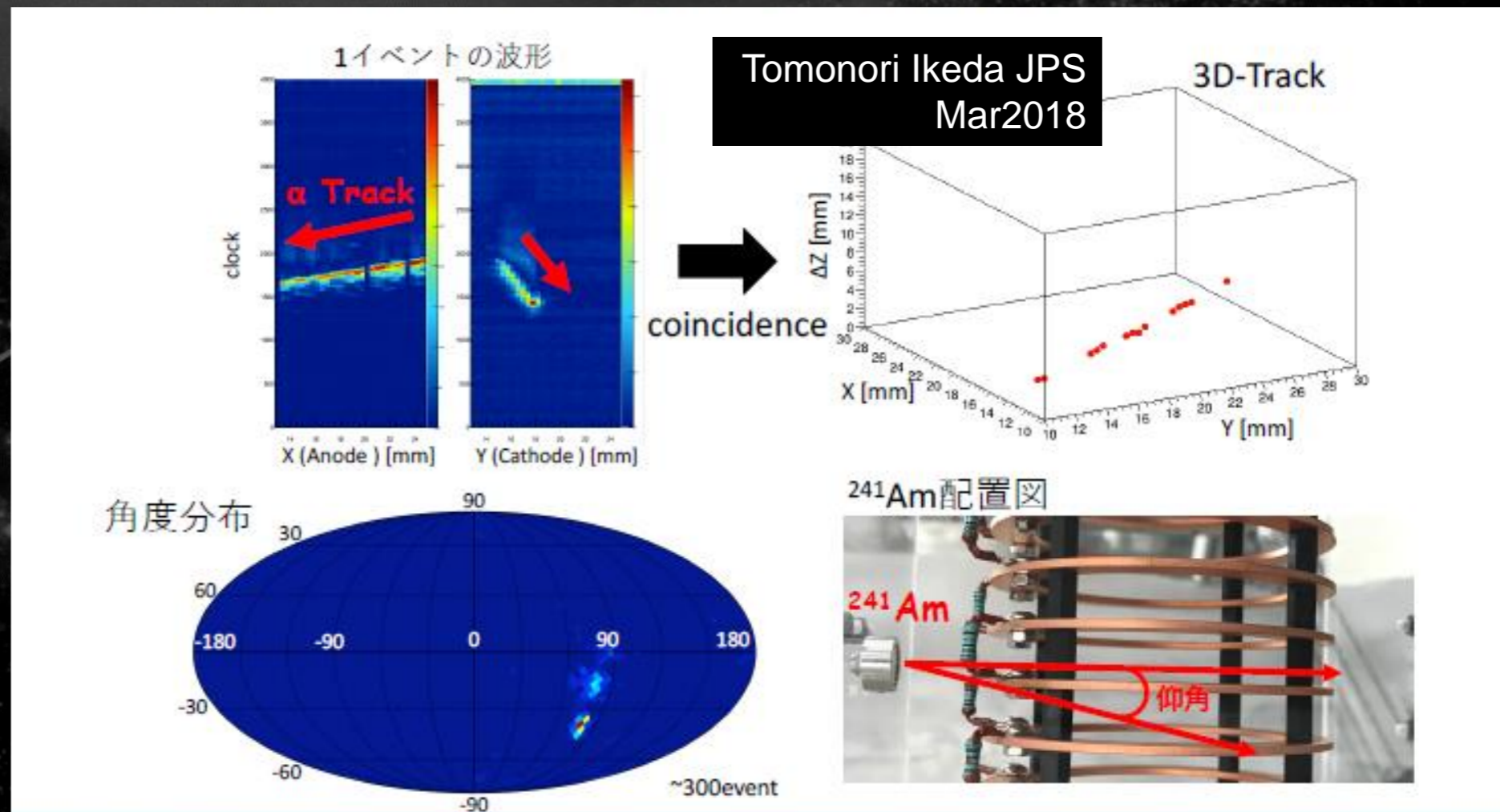
## 絶対値決定の例



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

Kentaro Miuchi



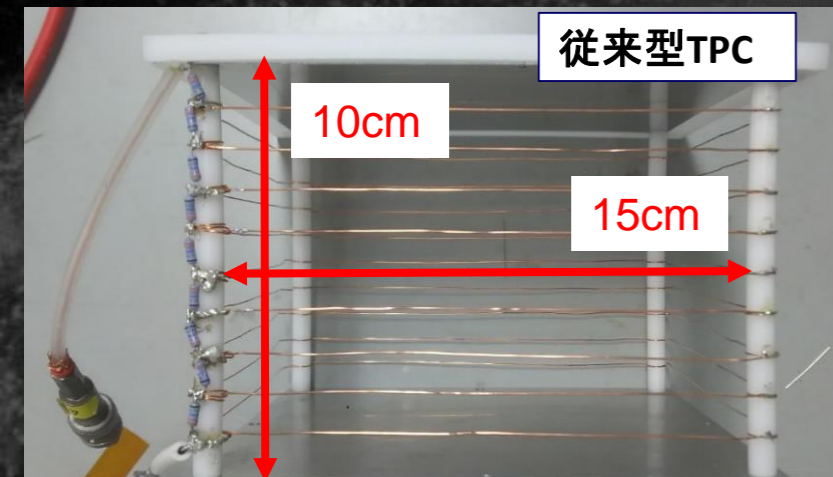
Tomonori Ikeda JPS  
Mar2018

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

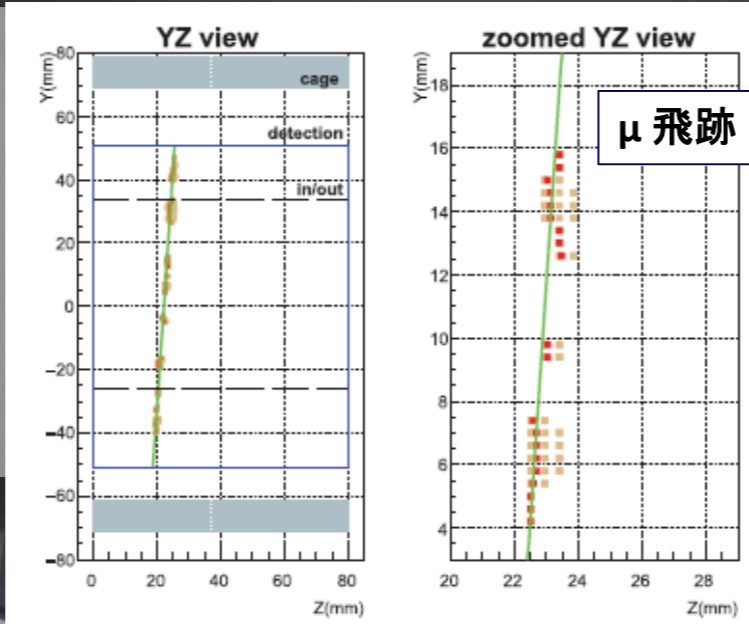
- 連続抵抗 (市販のシート) を使ったTPC電場形成
- ワイヤータイプよりシンプルな構造 ー様な電場



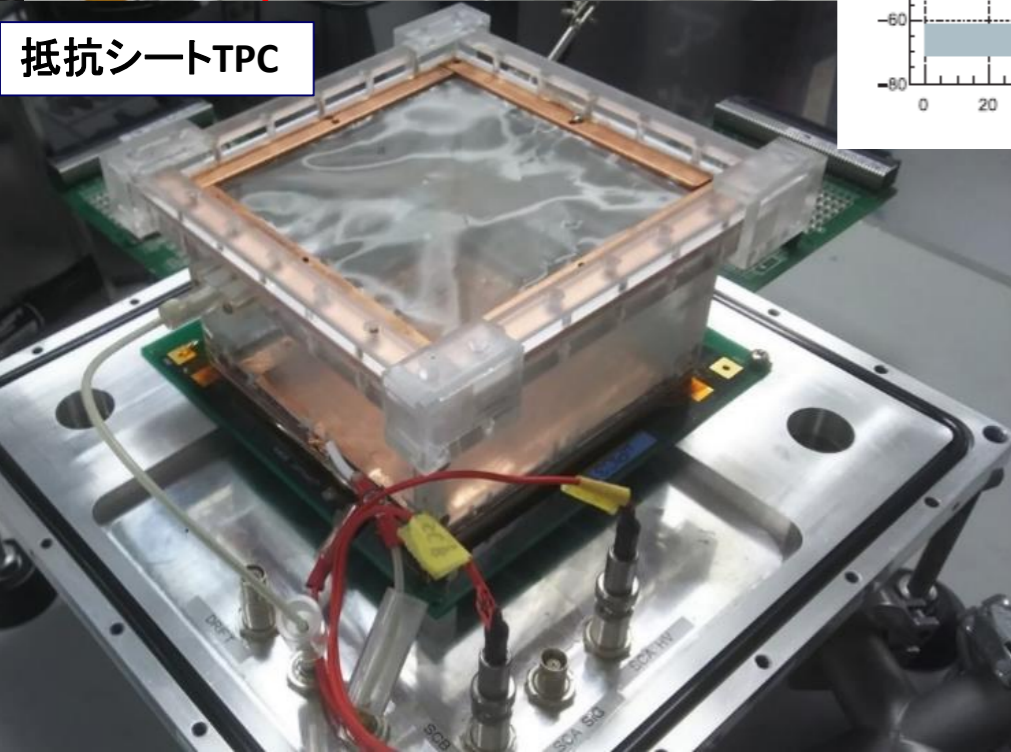
従来型TPC

10cm

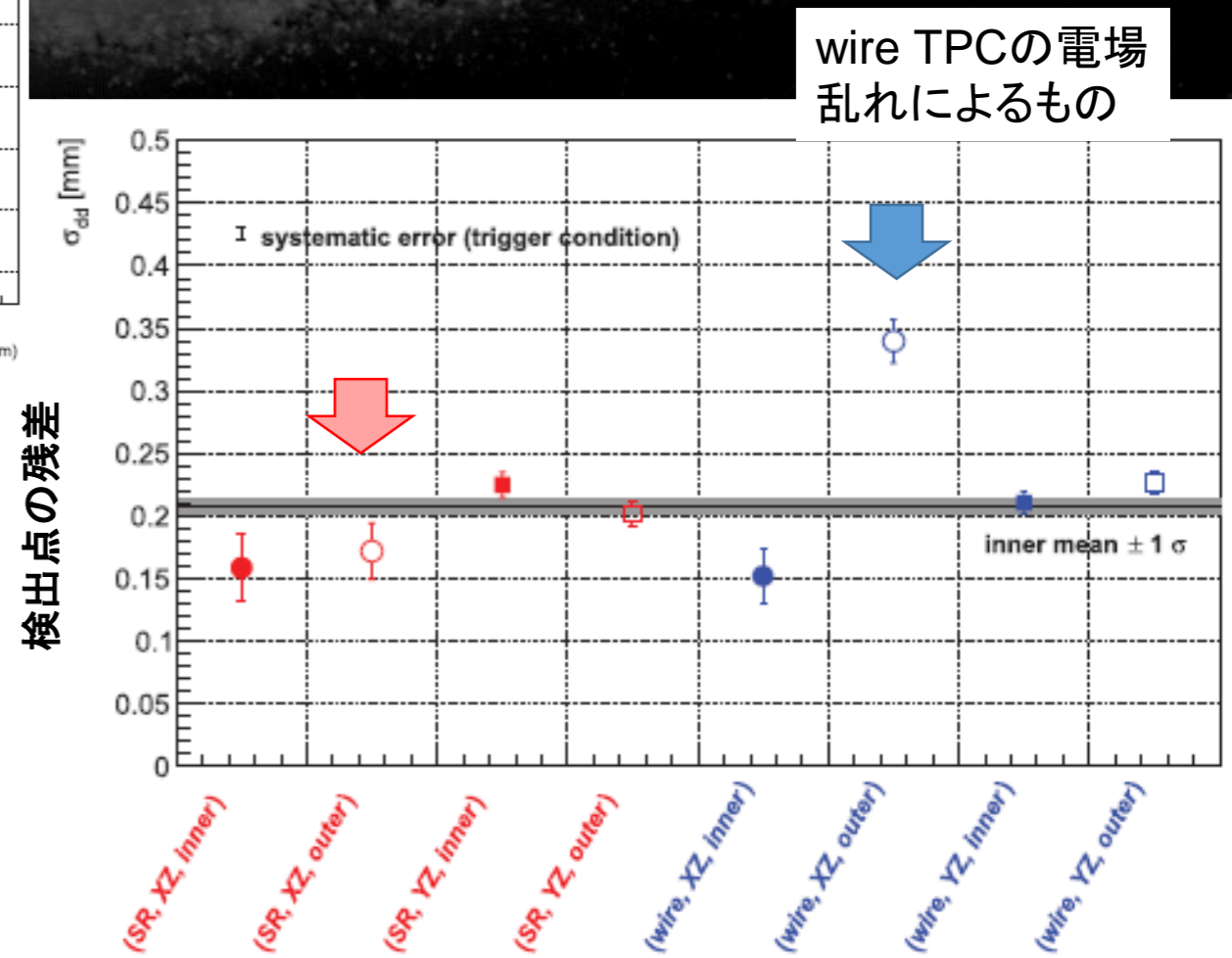
15cm



μ 飛跡



抵抗シートTPC



wire TPCの電場 乱れによるもの

検出点の残差





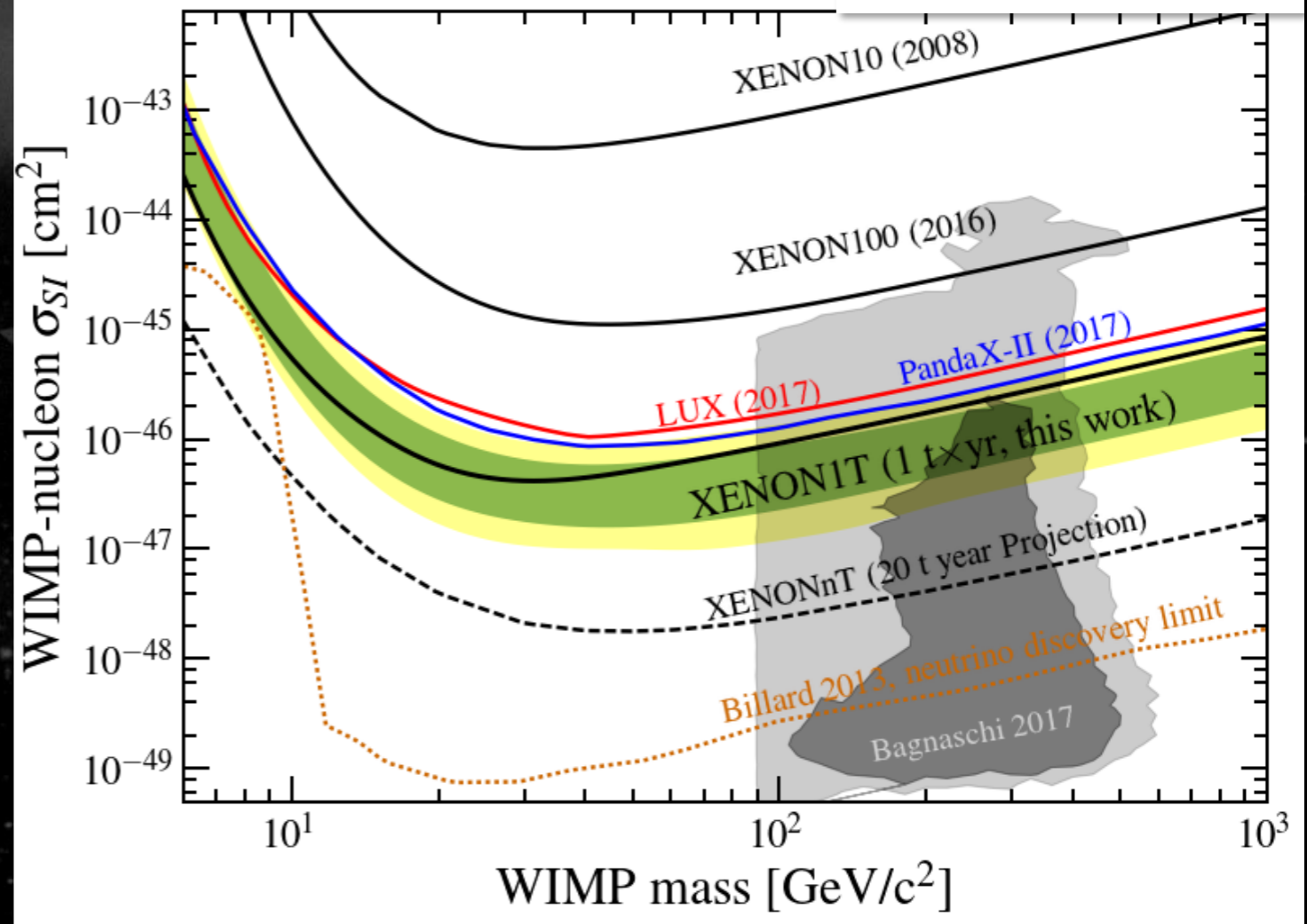
# 直接探索のこれから

- 暗黒物質
- これまで
- これから
- まとめ

# • XENONnT

- 2017年より日本グループ参画 (東大・名古屋・神戸)
- 建設中 2020年測定開始予定
- fiducial mass 4ton
- 目標探索感度  $2 \times 10^{-48} \text{cm}^2$

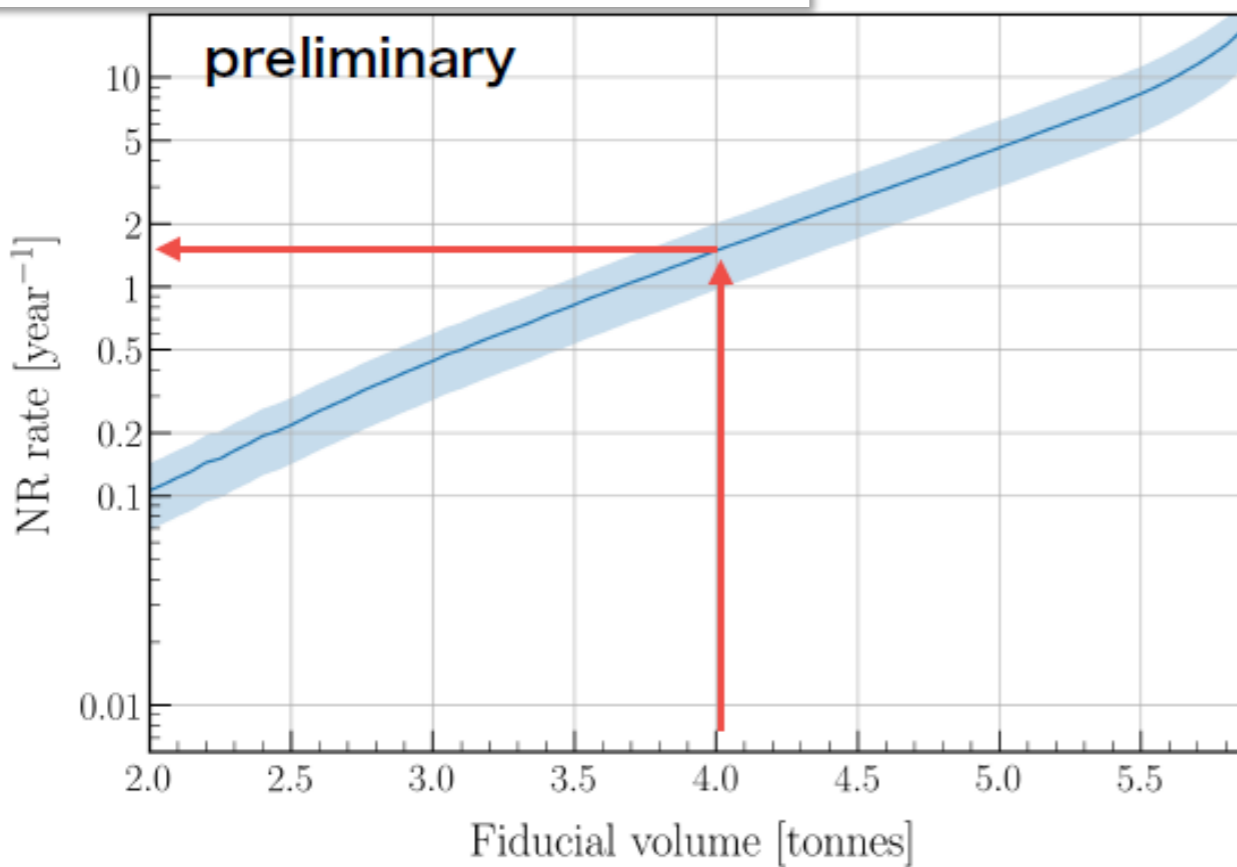
XENONnTの探索感度



# • XENONnT

- 中性子BGが重要 (1.3事象/4ton年) ⇒ nVetoシステム
- 水シールドにGdを0.2%溶解
- 目標：85%以上のVeto効率

XENONnTでの中性子BGの係数率

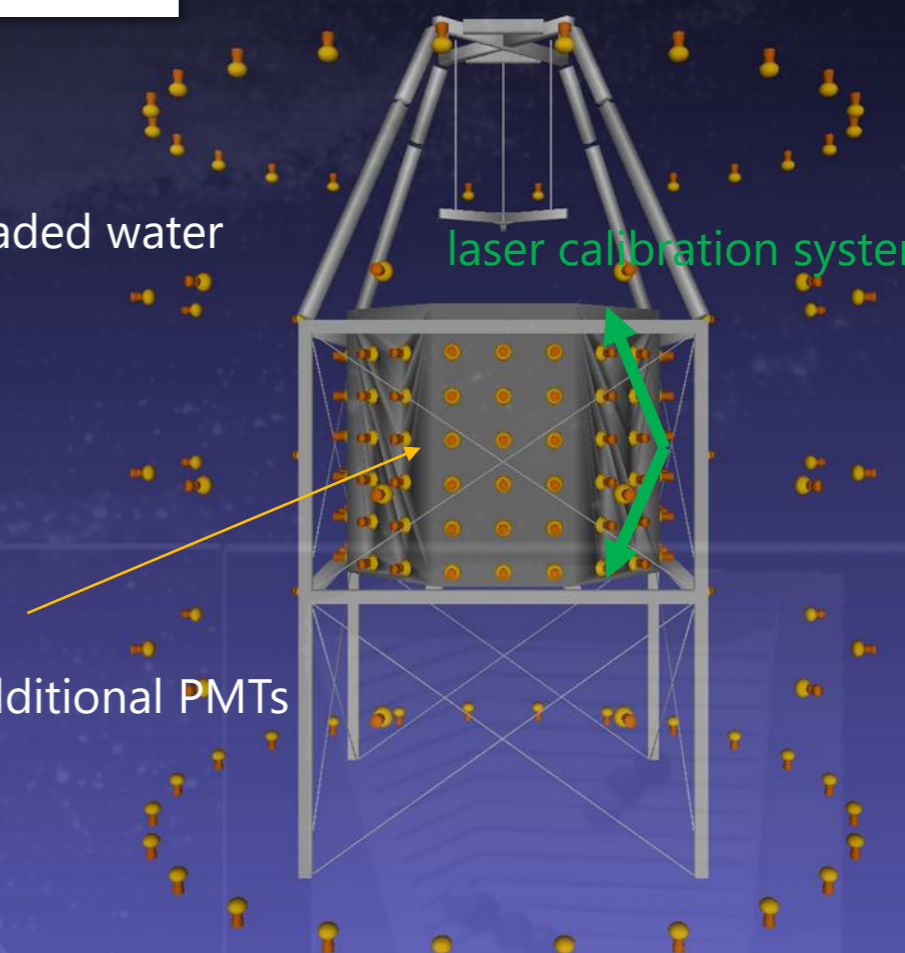


## nVetoシステム

0.2% Gd loaded water

laser calibration system

120 × additional PMTs



# NEWAGE/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

Sep 9<sup>th</sup>, 2019  
TAUP 2019  
Toyama, JAPAN

**CYGNUS**  
Kentaro Miuchi  
(Kobe University)

- Overview
- Activities
- Highlights
- Summary

科研費  
KAKENHI

## World-wide CYGNUS (ver. TAUP2019)

**CYGNUS-10**  
Boulby, UK  
10m<sup>3</sup> He:SF<sub>6</sub>  
GEM + wire readout

**CYGNUS-KM**  
Kamioka, Japan  
SF<sub>6</sub> / CF<sub>4</sub>  
Strip readout

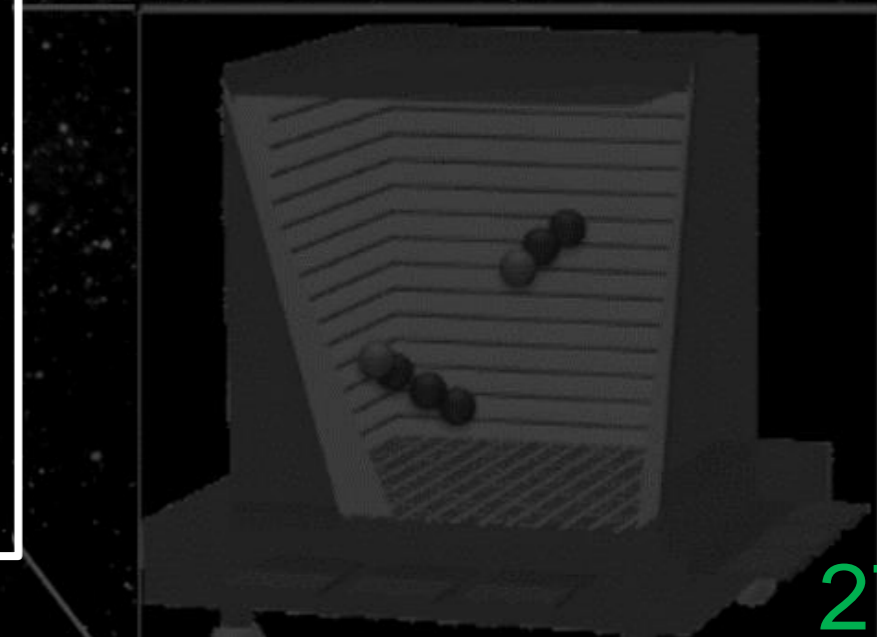
**CYGNUS-HD10**  
SURF, USA  
He:CF<sub>4</sub>:C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>  
Strip readout

**CYGNUS-OZ**  
Stawell, Australia  
R&D leading to 1 m<sup>3</sup>  
Long-term plan 10 m<sup>3</sup>  
TAUP2019

**CYGNUS-Initium**  
Gran Sasso, Italy  
He CF<sub>4</sub> (SF<sub>6</sub>)  
sCMOS+PMT readout

Kentaro Miuchi

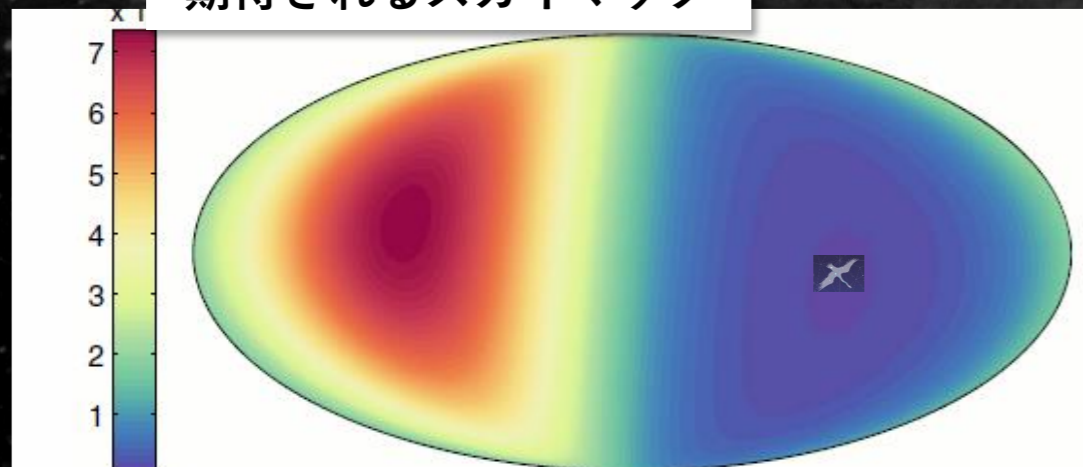
multi-site observatory



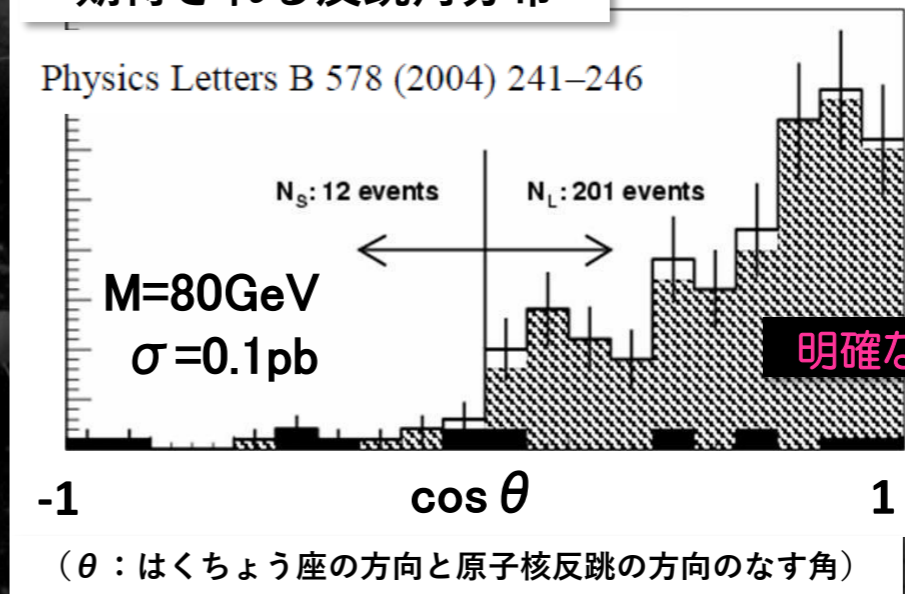
# • CYGNUS① 確実な証拠

- 世界を呼び込んで暗黒物質の発見 • 性質解明
- O(10) 事象で前方散乱の証拠 (c.f. 季節変動 O(1e4) 事象)

期待されるスカイマップ



期待される反跳角分布

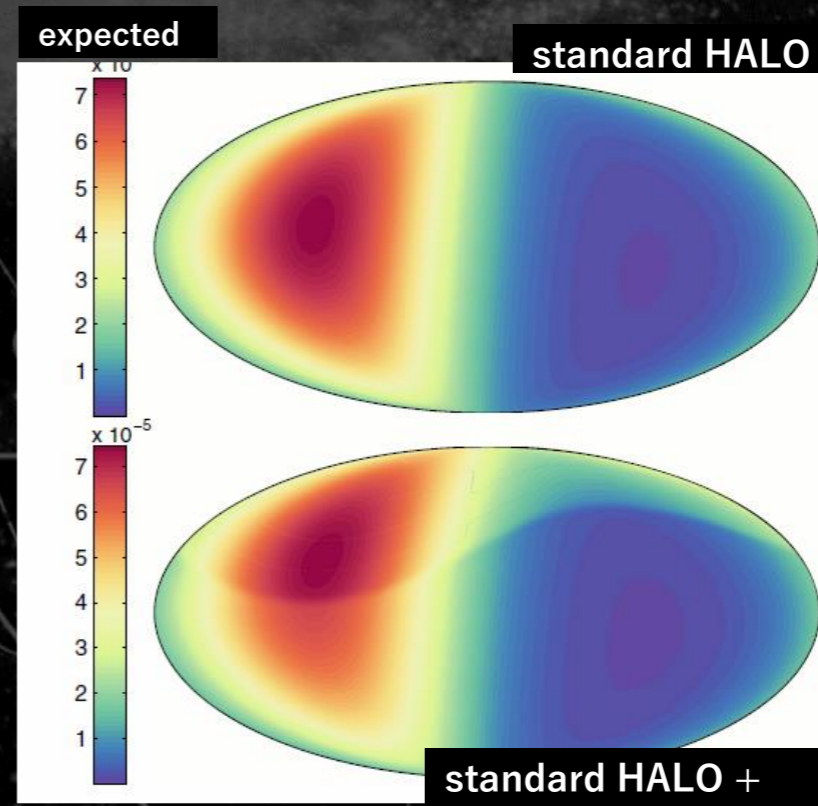
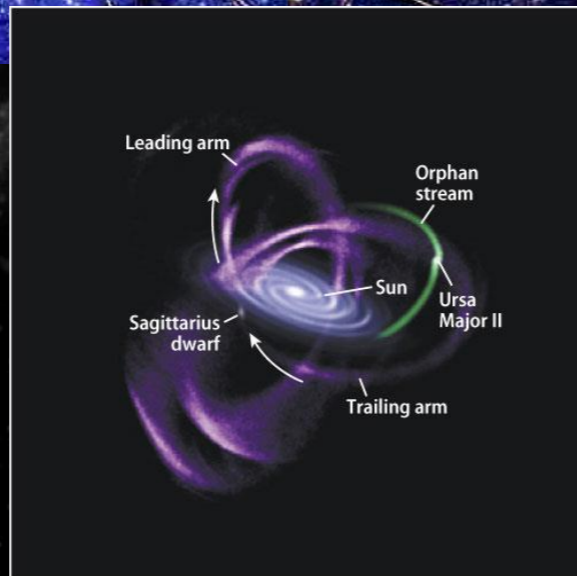
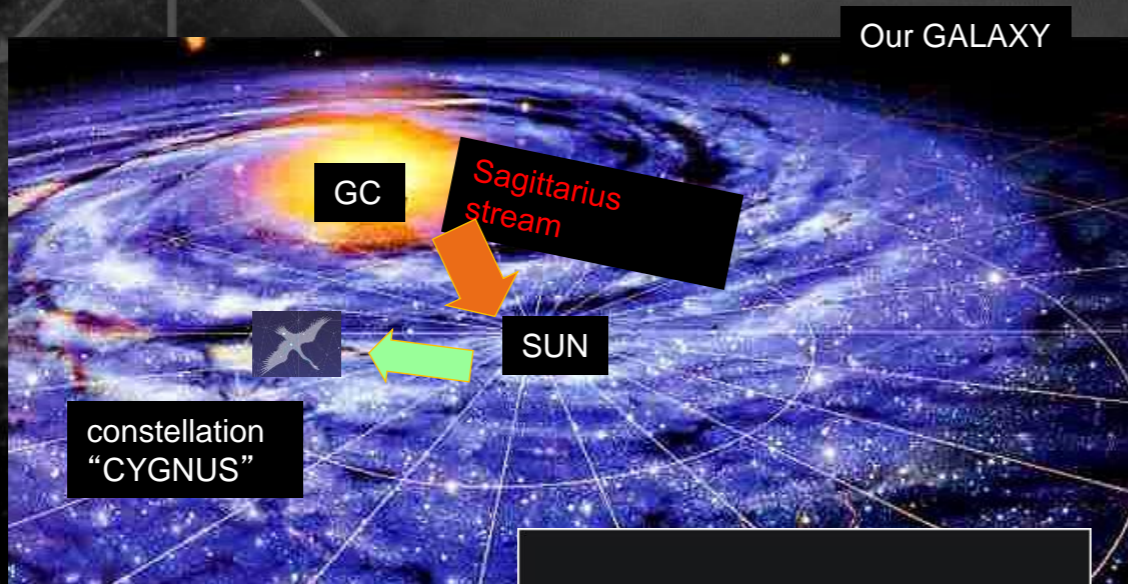


# • CYGNUS ② 宇宙論的性質解明

• HALOモデルの検証

• (例) Sagittarius stream スカイマップにゆがみ

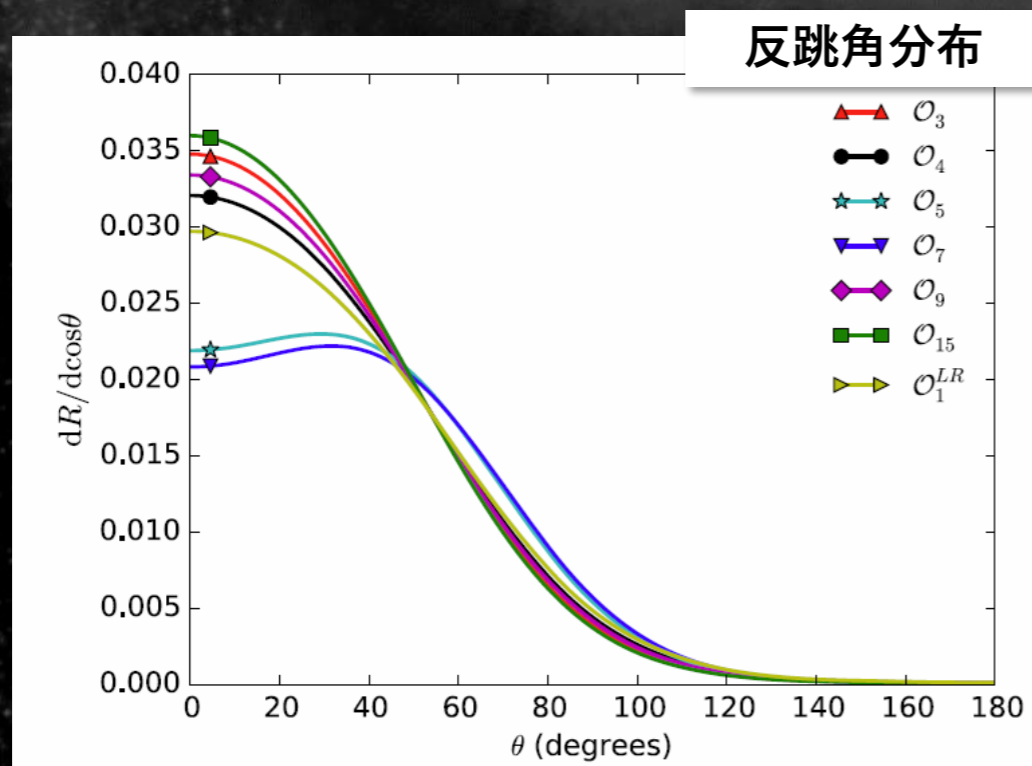
PHYSICAL REVIEW D 90, 123511 (2014)



galactic coordinate

● streams, debris...

- 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 $1$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$v_{\perp}^2$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$q^2$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$v_{\perp}^2 q^2$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$q^4$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$q^4(q^2 + v_{\perp}^2)$	$\rightarrow$	$\rightarrow$
$q^{-4}$	$\rightarrow$	$\rightarrow$

Correspondence between operators and reaction types:

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

# • 方向感度の重要性

- 2002年ノーベル物理学賞（ニュートリノ天文学）  
数を数えた実験（Davis） + 方向に感度を持つ実験（小柴）

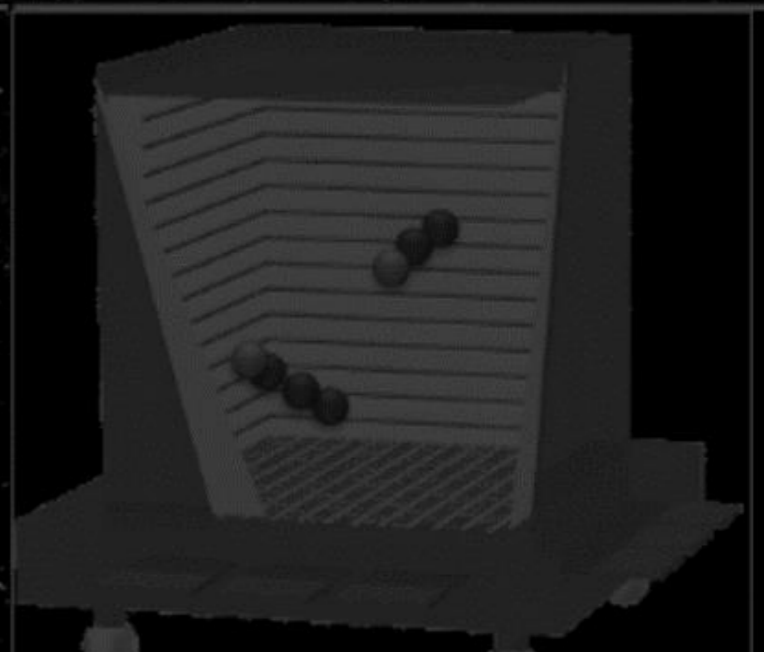
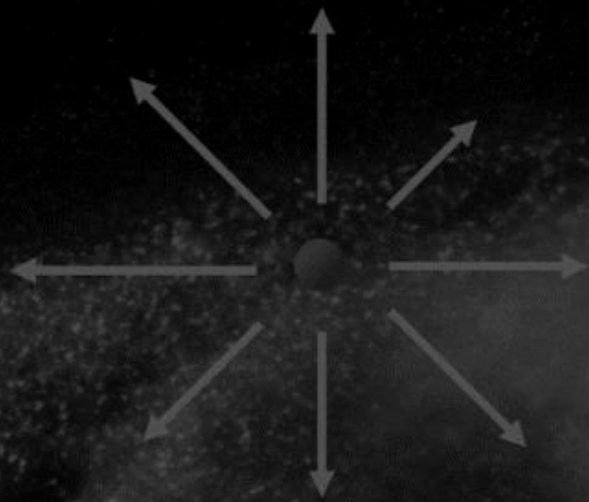


X 何とか

NEWAGE



# 量子エレクトロニクス



# 量子情報とダークマター ①

- 少ない数の電子を使ってダークマターサーチ
- DarkSide S2-only 解析

September 9<sup>th</sup> 2019  
TAUP 2019, Toyama Japan

Sandro De Cecco

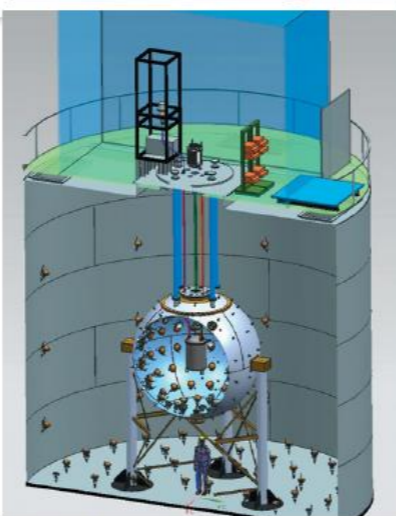
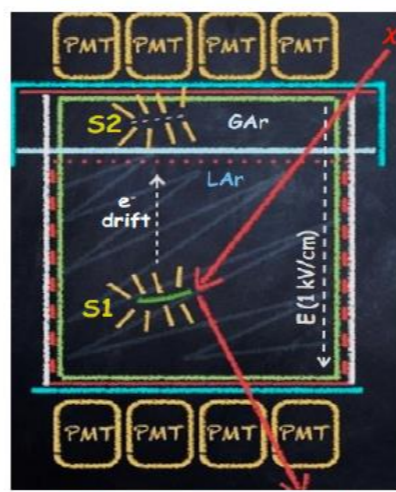
arXiv:1802.06994v1

## DarkSide-50 LAr TPC and vetoes



### DarkSide-50 in LNGS hall C :

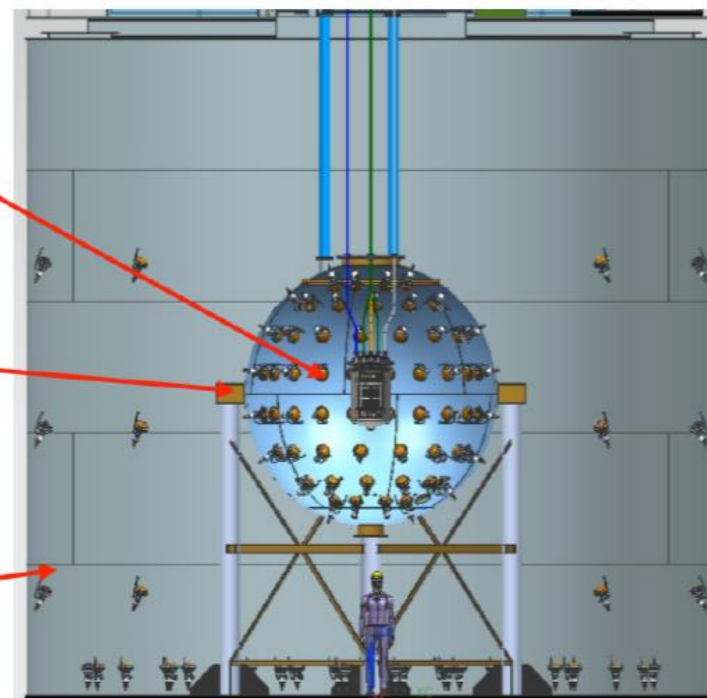
- 50 kg LAr active mass
- 19 PMTs top / 19 PMTs bottom cryogenic (LT bi-alkali photocathodes)
- Active neutron veto with borate-scintillator
- Data taking since 2014 and still running



Liquid Argon TPC  
153 kg <sup>39</sup>Ar-Depleted  
Underground Argon  
Target

4 m Diameter  
30 Tonnes  
Liquid Scintillator  
Neutron Veto

10 m Height  
11 m Diameter  
1,000 Tonnes  
Water Cherenkov  
Muon Veto

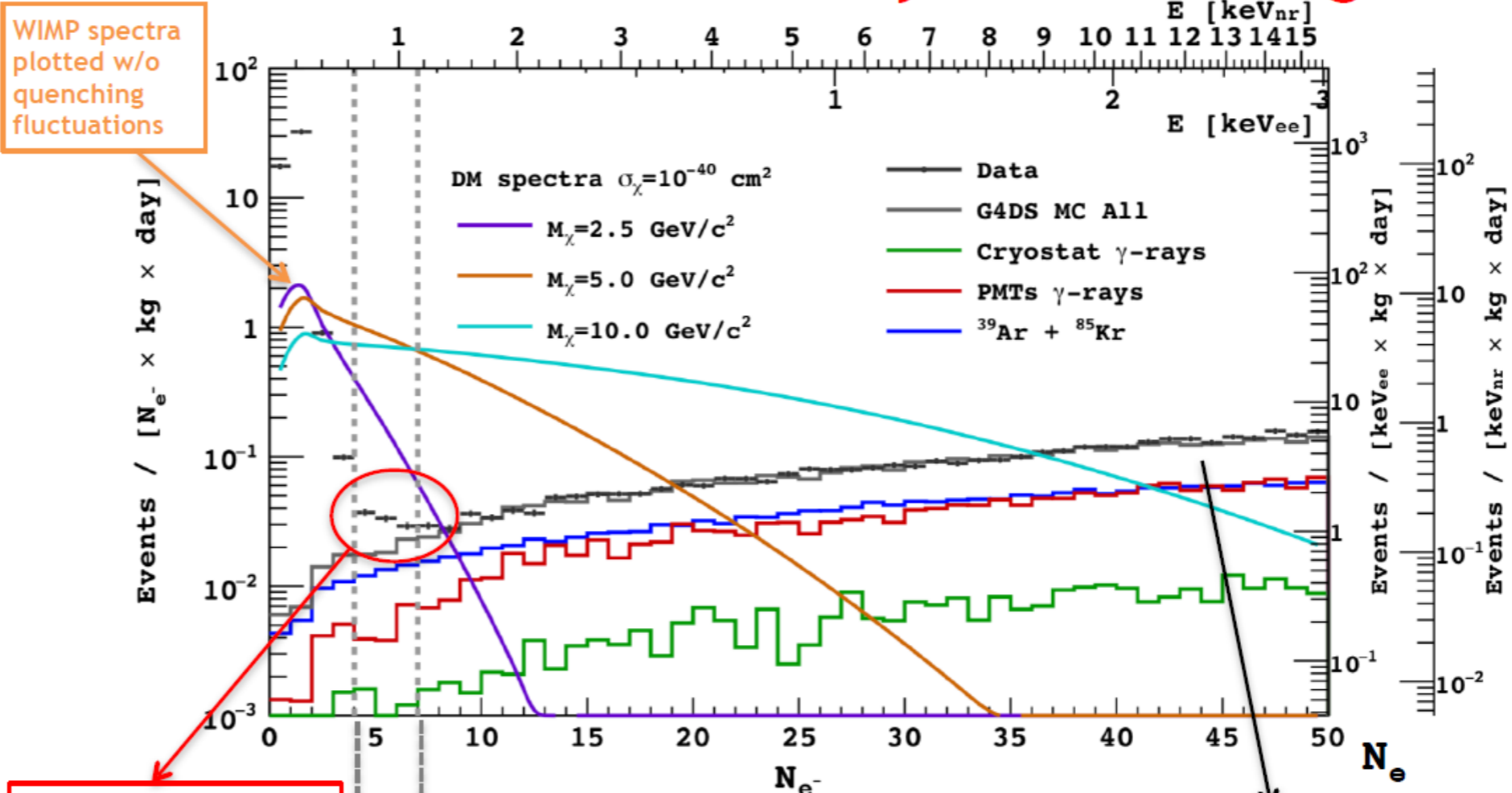


9/9/2019

Sandro De Cecco

- 電子数 $>4$ を利用

# Low Mass DM ionization only search background :



WIMP spectra plotted w/o quenching fluctuations

Excess of events wrt to background prediction due to trapped/delayed electrons peak.  
Also seen by XENON100. Further studies ongoing.

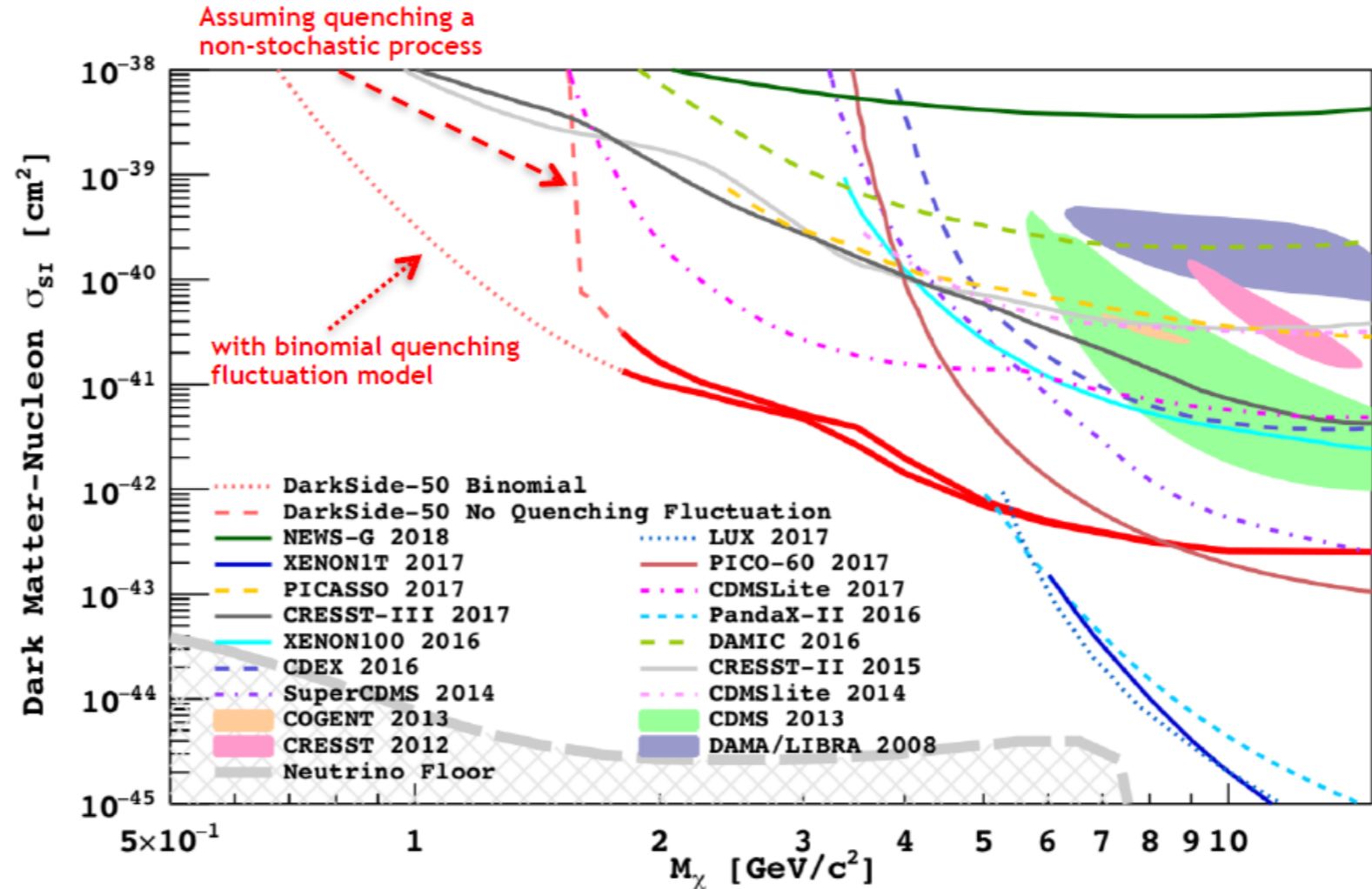
$N_e > 7$  analysis threshold for  $M_\chi > 3.5$  GeV in Data-MC good agreement region.

$N_e > 4$  analysis threshold for  $M_\chi < 3.5$  GeV. Region dominated by excess of Data over MC

In high  $N_e$  region, dominant ER backgrounds, level prediction with extrapolation from high energy spectrum MC fit, in very good agreement with data (at % level).

# Low Mass DM 90% C.L. exclusion limit result :

• 低質量DMでよい制限



- Profile Likelihood Method for  $N_e > 4$  and  $N_e > 7$  thresholds shown respectively for  $M_\chi < 3.5 \text{ GeV}$  and  $M_\chi > 3.5 \text{ GeV}$
- Uncertainties for both WIMP signals (NR ionization yield, single electron yields) and BG spectrum (rates, ER ioniz. yield)

Due to lack of knowledge about fluctuation at very low recoil energy, two cases :

- Binomial fluctuation for NR energy quenching, ionization, and recombination processes.
- No Fluctuation for NR energy quenching process. Corresponding to apply hard cut off in quenched energy  $\sim 0.6 \text{ keV}_{nr}$

# 量子情報とダークマター ②

- MIGDAL 効果
- 通常：原子核反跳 原子核の道筋で電離
- 低エネルギー現象 これは見えない
- ごくまれに 電子が1個 取り残される

arXiv:1907.12771v1

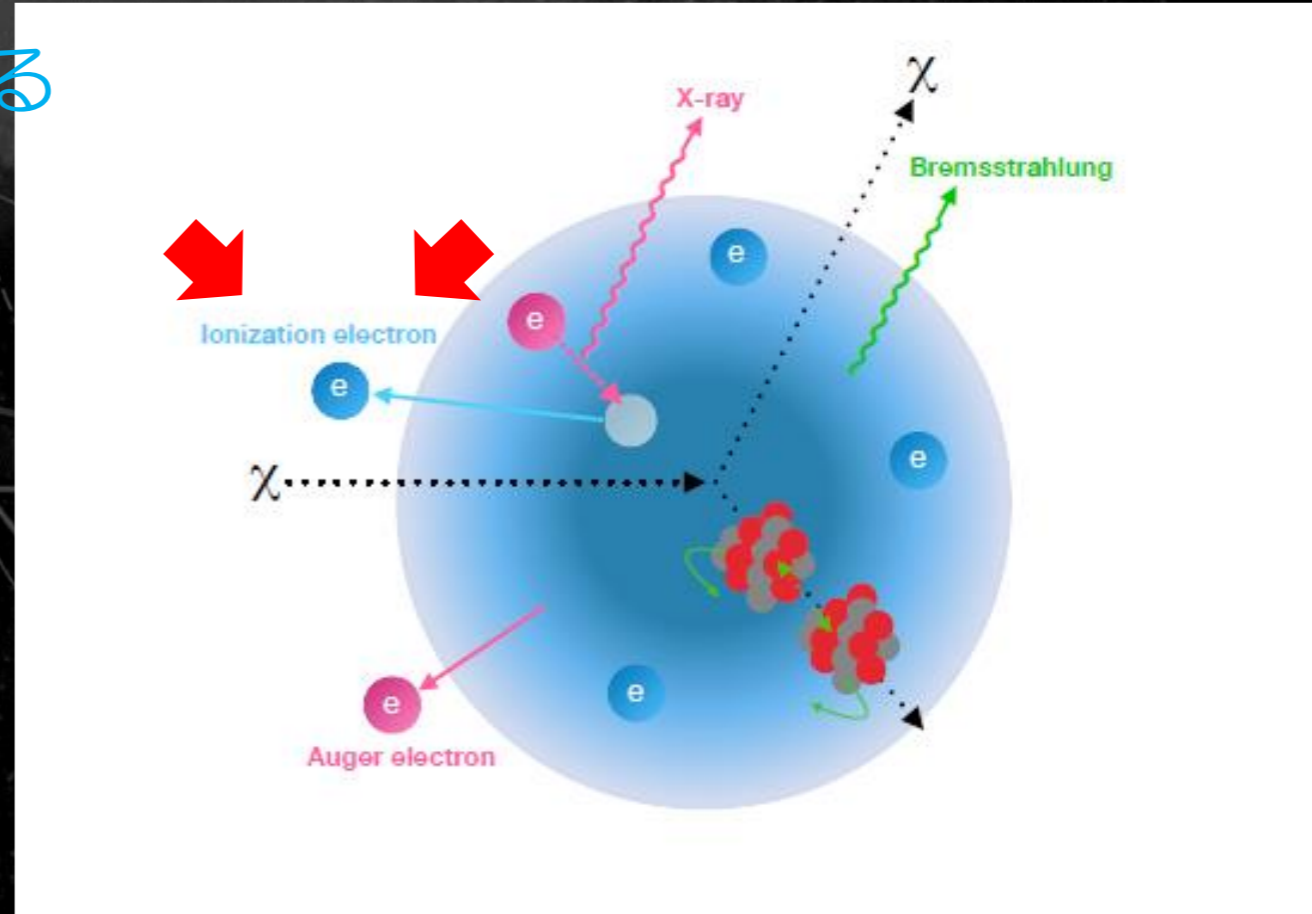
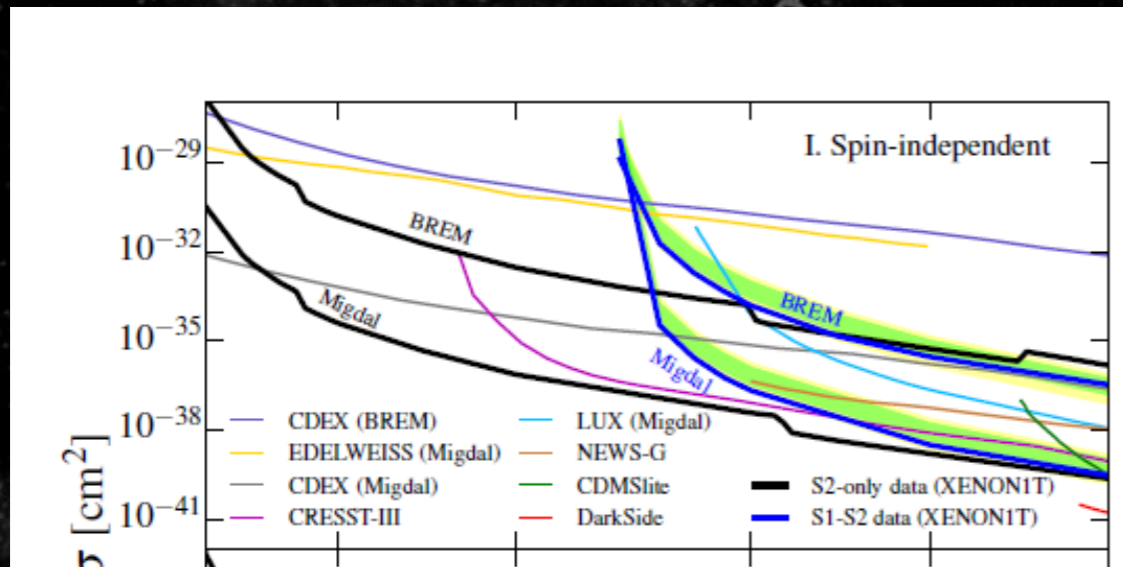


FIG. 1. Illustration of the ER signal production from BREM (green) and Migdal processes (pink) after elastic scattering between DM ( $\chi$ ) and a xenon nucleus.

# 量子エレクトロニクス

2018年1月 鹿野氏セミナー@神戸

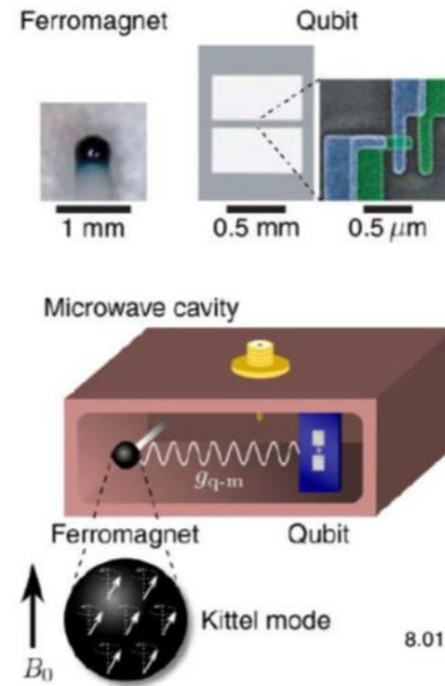
## Quantum Measurement and Interpretation via Weak value



Yutaka Shikano

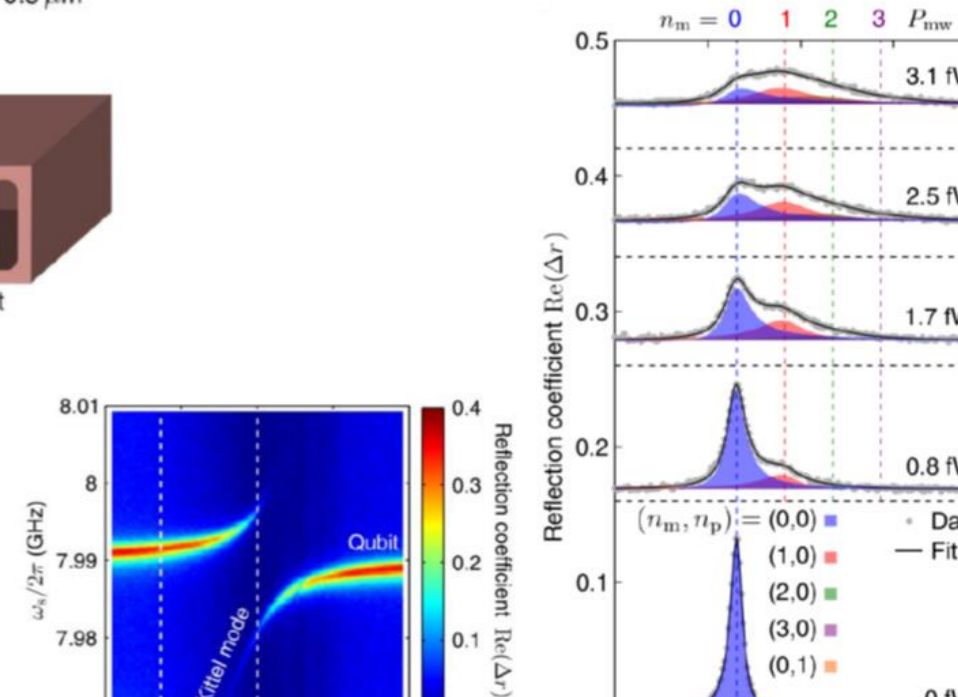


東京大学 先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology  
The University of Tokyo



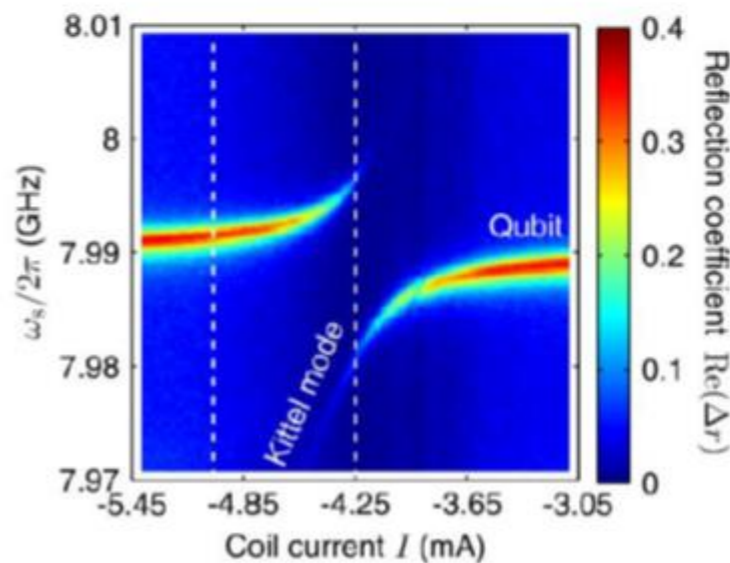
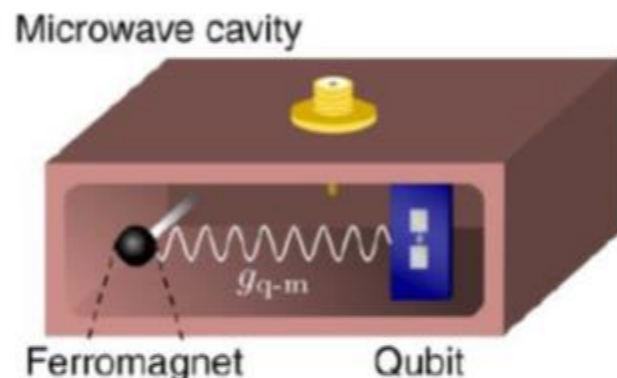
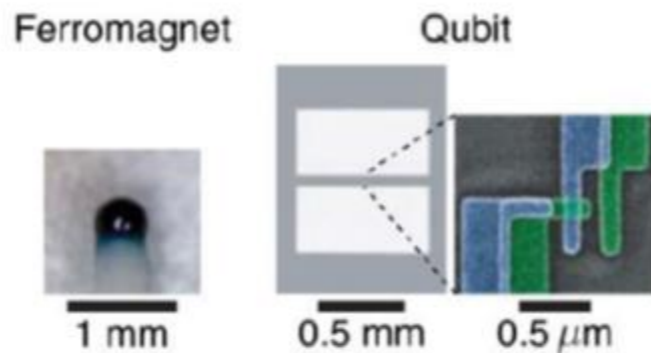
## Hybrid Quantum System

Y. Tabuchi et al., Phys. Rev. Lett., **113**, 083603 (2014)  
Y. Tabuchi et al., Science **349**, 405-408 (2015)  
D. Lachance-Quirion et al., Sci. Adv. **3**, e1603150 (2017).



# “QBIT”

- 磁場を感じる
- アクシオン探索  
できんじゃね？

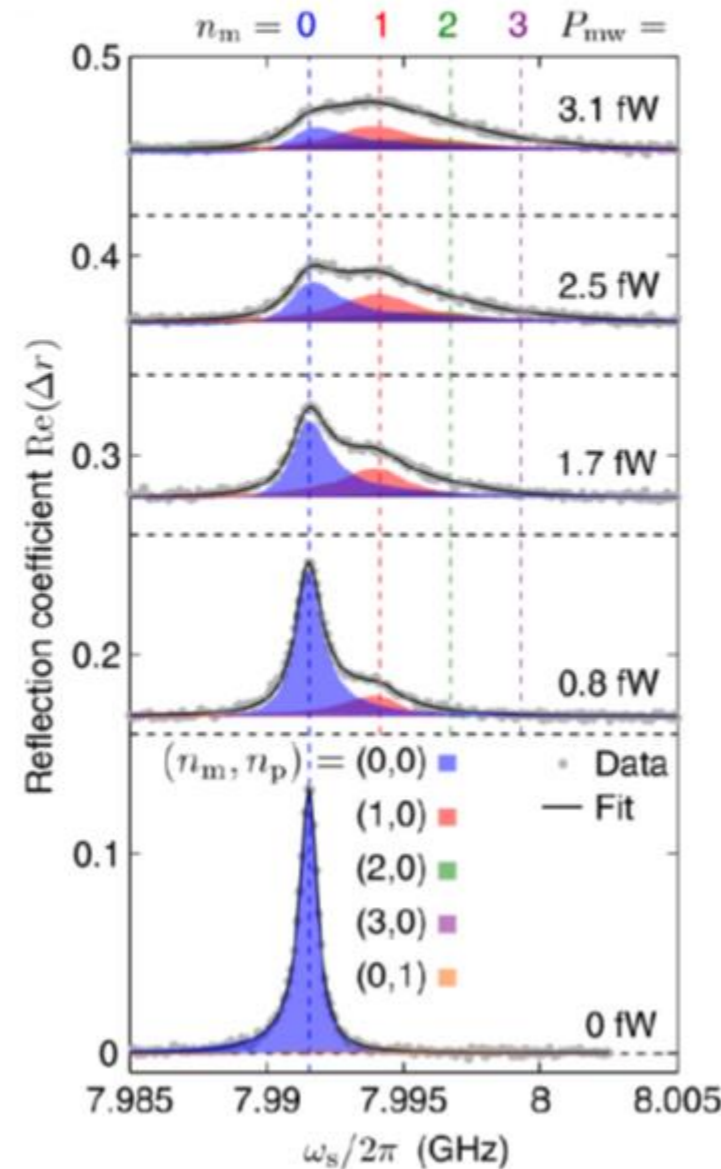


# Hybrid Quantum System

Y. Tabuchi et al., Phys. Rev. Lett., **113**, 083603 (2014)

Y. Tabuchi et al., Science **349**, 405-408 (2015)

D. Lachance-Quirion et al., Sci. Adv. **3**, e1603150 (2017).



# マグノン検出器を用いた アキシオン探索実験

池田 智法<sup>A</sup>

身内賢太郎<sup>A</sup>、伊藤飛鳥<sup>A</sup>、早田次郎<sup>A</sup>、鹿野豊<sup>B,C</sup>  
神戸大学<sup>A</sup>、慶応大量子<sup>B</sup>、チャップマン大量子科学研<sup>C</sup>

1. モチベーション
2. 観測原理
3. アキシオン探索実験結果
4. まとめ

2018/9/17

2018年JPS秋季大会

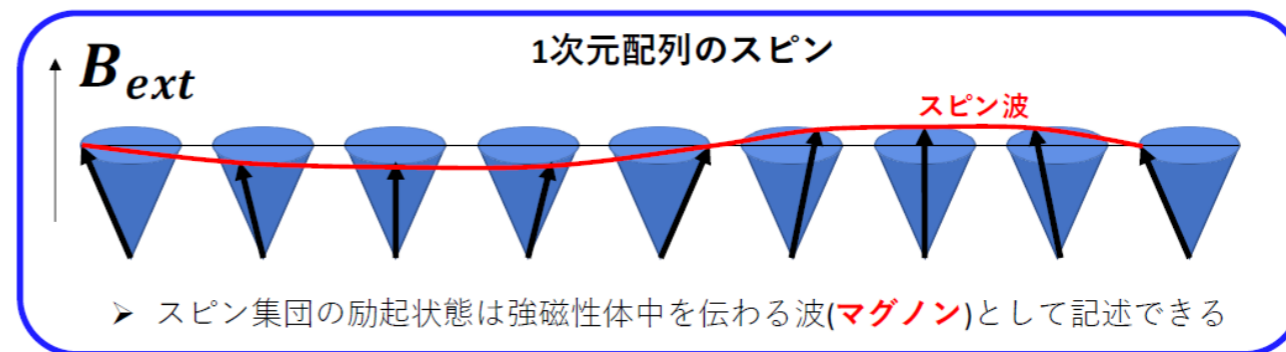
1

- DM アキシオン
- 電子と相互作用
  - 電子1個との相互作用は小さい  
⇒ 「マグノン」を用いる

## 電子のスピン集団

- ✓ 強磁性体中のスピン同士の相互作用

$$\hat{\mathcal{H}} = -g\mu_B B_z \sum_i \hat{S}_i^z - 2J \sum_{\langle i,j \rangle} \hat{\mathbf{S}}_i \cdot \hat{\mathbf{S}}_j, \quad \begin{array}{l} \text{隣り合うスピンの相互作用} \\ \text{隣のスピンの向きをわずかに傾ける} \end{array}$$



- ✓ マグノンとアキシオンの相互作用項

$$\mathcal{H}_{int} = \hbar g_{eff} (\hat{a}^\dagger \hat{c} + \hat{a} \hat{c}^\dagger), \quad g_{eff} \equiv \frac{g\mu_B B_a}{2\hbar} \sqrt{2sN}, \quad \sqrt{N} \text{倍大きい}$$

2018/9/17

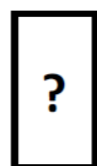
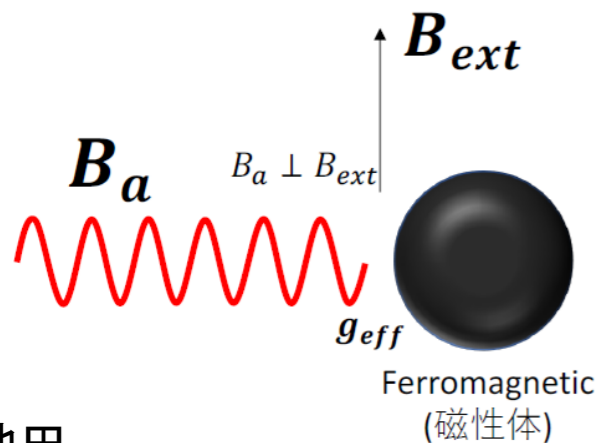
2018年JPS秋季大会

池田  
物理学会2018年秋

9



# アクシオンの検出方法

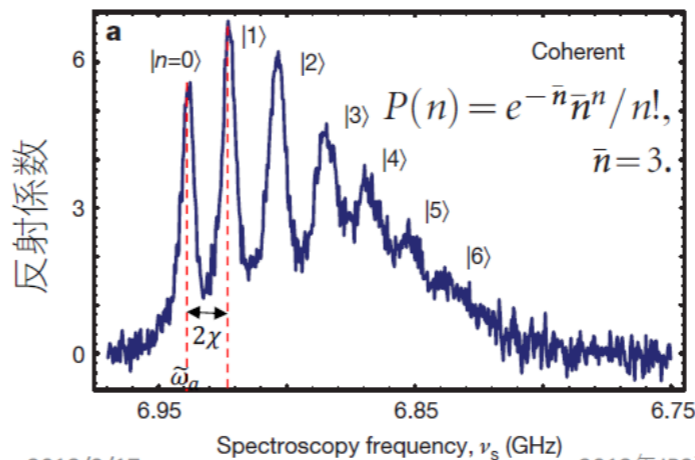
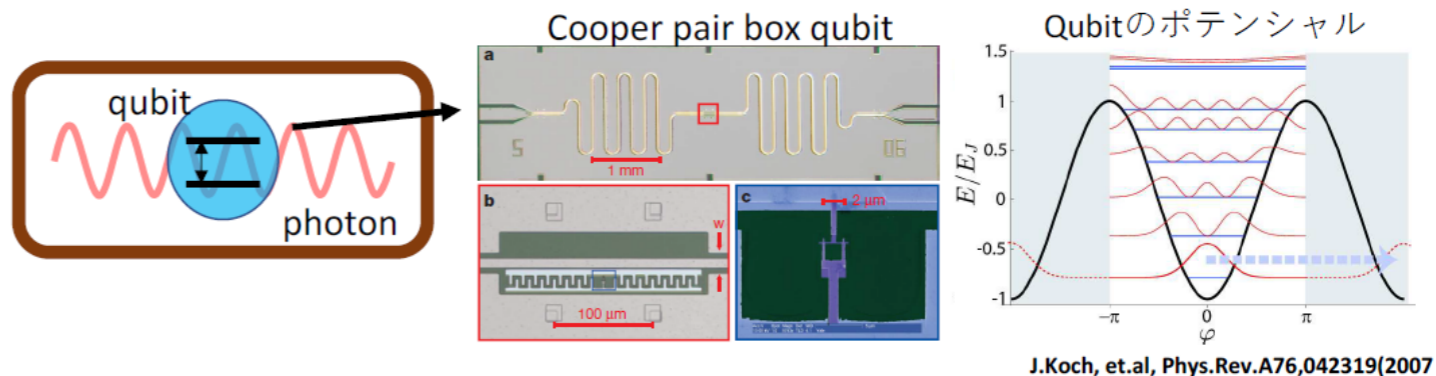


検出器  
 Amplitude・Phase測定  
 マグノン数測定

池田  
 物理学会2018年秋

# 人工原子(Qubit)を使った光子数測定

✓ リドベルグ原子から人工原子(Qubit)へ D.I.Schuster, et.al., Nature 445 515(2007)



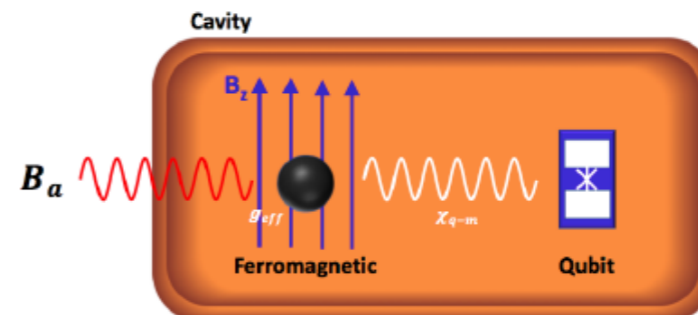
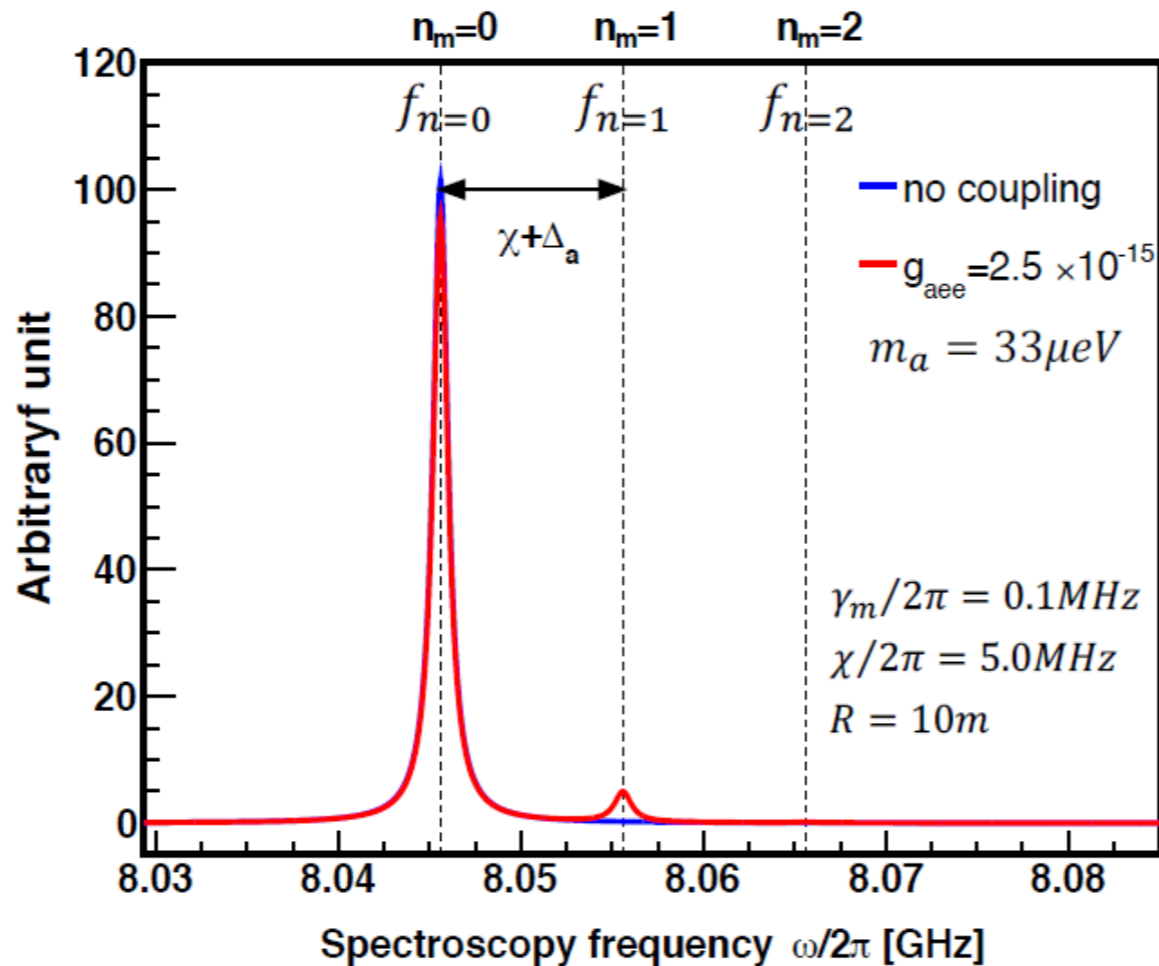
$$H_{\text{eff}} = \hbar\omega_r \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\hbar}{2} (\tilde{\omega}_a + 2\chi \hat{a}^\dagger \hat{a}) \hat{\sigma}_z$$

➤ Qubitの遷移周波数から光子数を決定できている

池田  
 物理学会2018年秋

2018年JPS秋季大会

# 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

池田

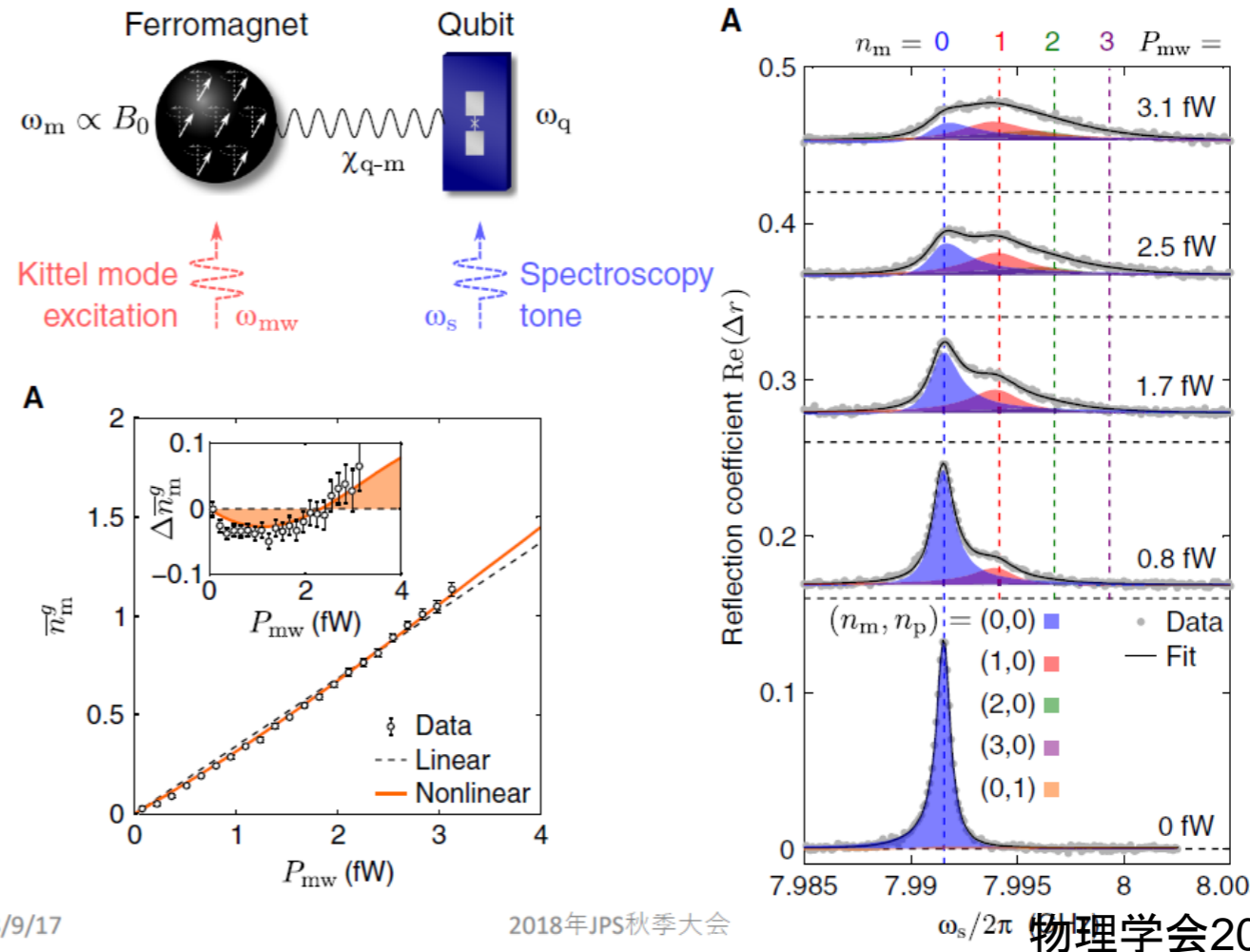
物理学会2018年秋

# 実験

- アクシオンデータ  
 といつか量子情報の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

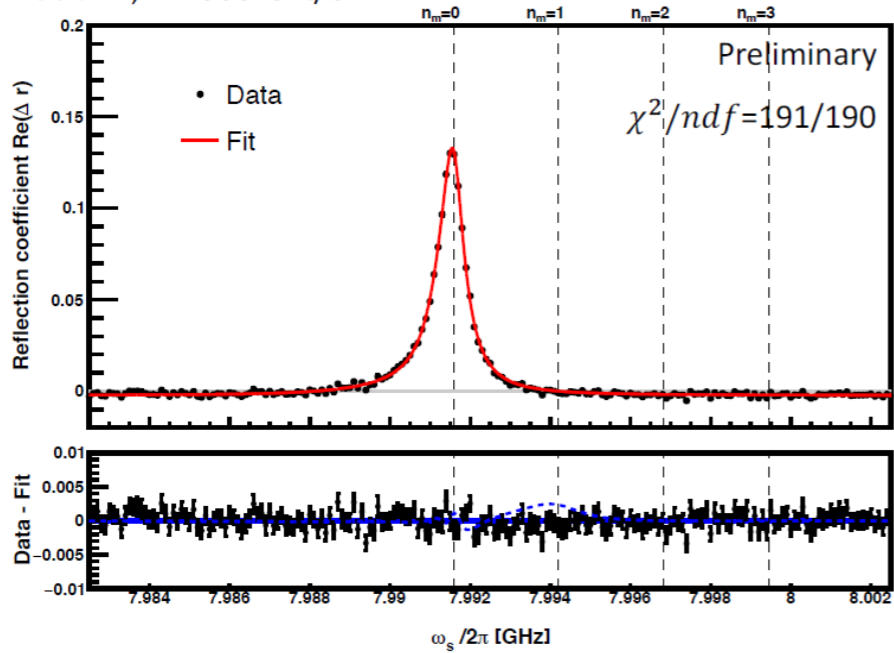
D.Lachance-Quirion, et.al., Sci.Adv. 2017;3:e1603150



• 結果

# DMRUN

- 2015年8月に取得された4時間分のデータ  
 $\Delta f = 100\text{kHz}$ , 50event/bin

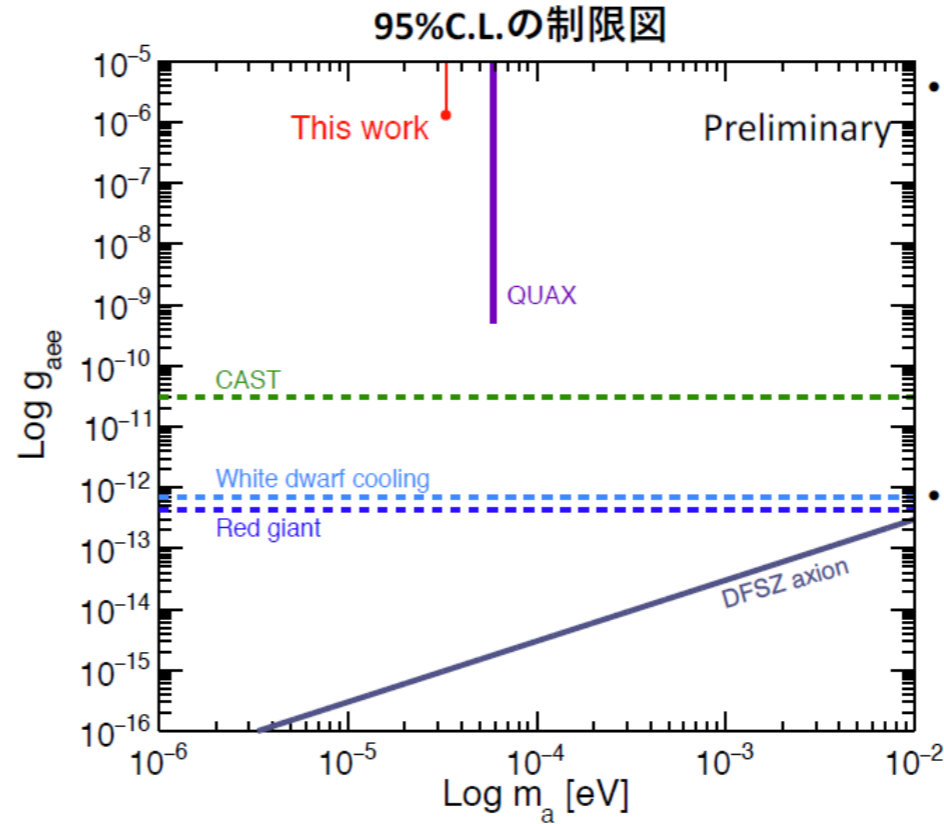


➤ 統計的に有意な差は見られなかった

2018/9/17

2018年JPS秋季大会

# 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

池田

物理学会2018年秋

2018/9/17

2018年JPS秋季大会

- この先：Q値（カップリング）を上げながら大きくしたい
- ちなみに：マグノン-GHz重力波のカップルもある（らしい）

1903.04843

# まとめ

- 暗黒物質：宇宙・素粒子の大きな問題
- 直接探索：暗黒物質と通常の原子核の弾性散乱
- 大質量検出器：液体キセノン（XMASS・XENON）
  - 探索のフロンティア
- 方向感度検出器：ガス検出器（NEWAGE・CYGNUS）
  - 確実な証拠・性質解明
- 量子エレクトロニクス技術
  - 新しい探索

