

# 暗黒物質直接探索 グループ

竹田 敦

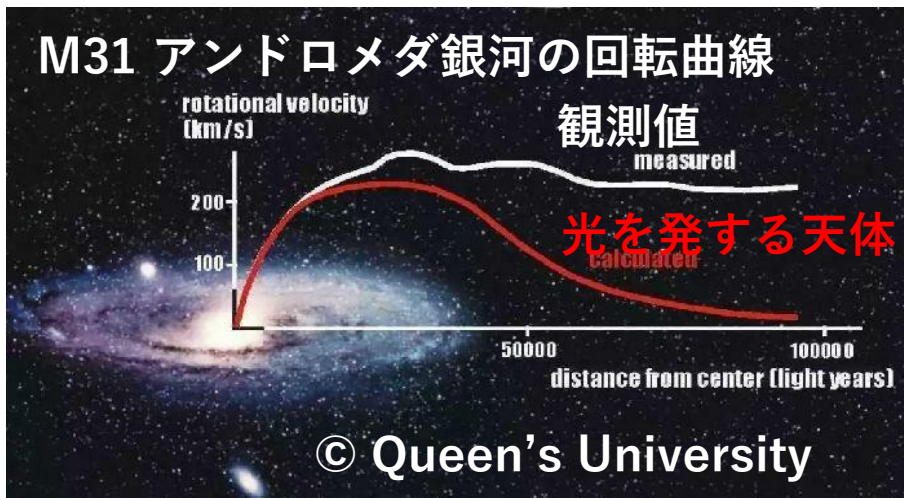
東京大学宇宙線研究所  
宇宙ニュートリノ研究部門

# かみのけ座銀河団

“Dunkle materie” (1933)



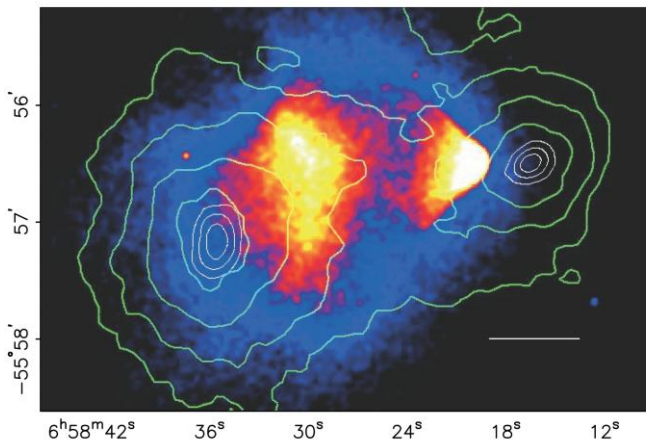
# 正体不明の重力源 暗黒物質



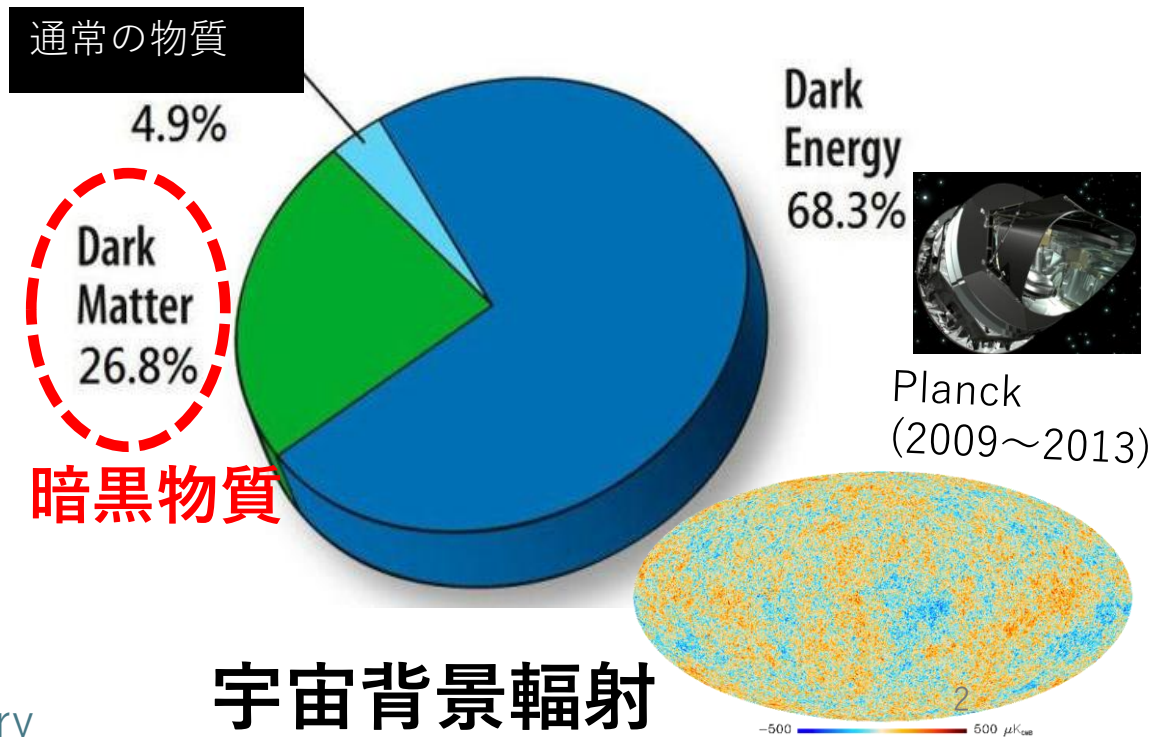
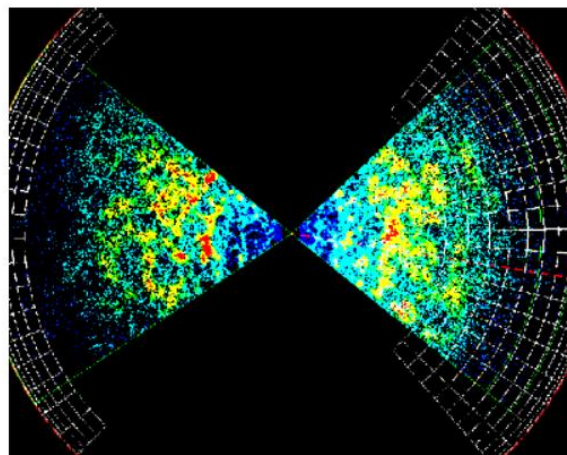
1933年かみのけ座銀河団の観測からその存在が提唱されて以降、銀河の回転曲線、銀河団衝突、宇宙の大規模構造、宇宙背景輻射の温度ゆらぎ、様々なスケールで暗黒物質の存在は確実にようになってきたが、その正体は依然として不明のまま。

## 銀河の回転速度

M31アンドロメダ銀河回転曲線 (1970)

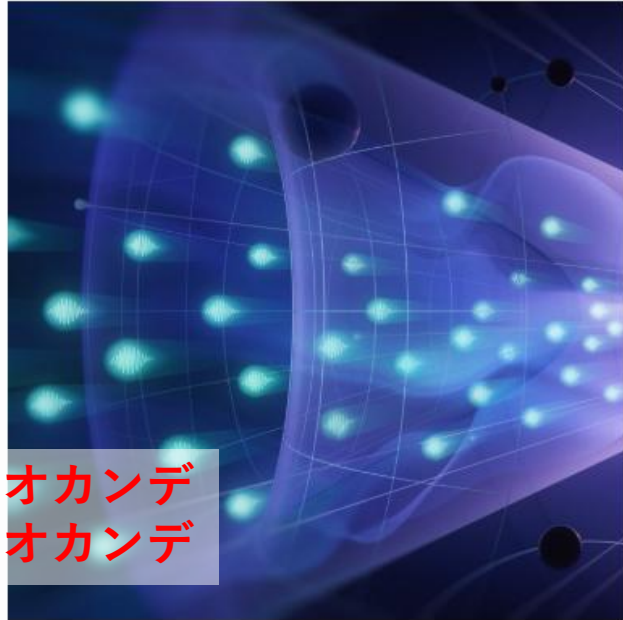


## 宇宙の大規模構造

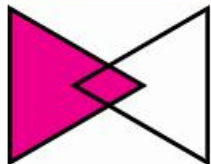


# 素粒子物理学研究における最優先事項

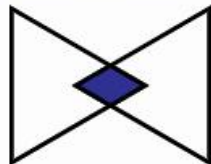
素粒子物理学に限らず”世界の物理学研究における最優先事項”には、下のP5に挙げられている事項が入ってくる。



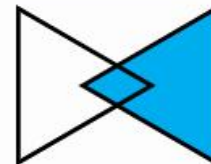
スーパーカミオカンデ  
ハイパーカミオカンデ



Decipher the Quantum Realm 量子世界を解き明かす



Explore New Paradigms in Physics 物理学の新しいパラダイムを探る



Illuminate the Hidden Universe 隠れた宇宙を照らし出す



Elucidate the Mysteries of Neutrinos ニュートリノの謎の解明

Reveal the Secrets of the Higgs Boson ヒッグス粒子の秘密の解明

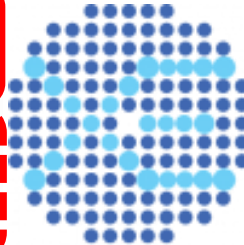
Search for Direct Evidence of New Particles 新粒子の探索

Pursue Quantum Imprints of New Phenomena 新現象の量子的痕跡の追及

Determine the Nature of Dark Matter 暗黒物質の正体解明

Understand What Drives Cosmic Evolution 宇宙進化を駆動する要因の理解

XENONnT



XENON

# 暗黒物質のてがかり

- **安定** ← 宇宙初期に生成されて現在までのこっている。
- **電氣的に中性** ← 通常の物質と電磁相互作用をしない。
- **通常の物質との相互作用が極めて弱い** ← 現在まで観測にかかっていない。
- **非相対論的速度** ← 銀河・銀河団に局所的に分布している。

これまで、以下のような候補が否定されてきた

- **ニュートリノ**: 質量をもつことが分かり暗黒物質の候補だったが、超相対論的速度であり宇宙の構造形成を説明するのが難しいことから暗黒物質の主成分ではないと考えられている。
- **MACHOs**: Massive Compact Halo Objects の略。惑星・褐色矮星・白色矮星・中性性星・ブラックホールといった暗すぎて光学的に観測できない天体。暗黒物質の主成分にはなり得ないと考えられている。

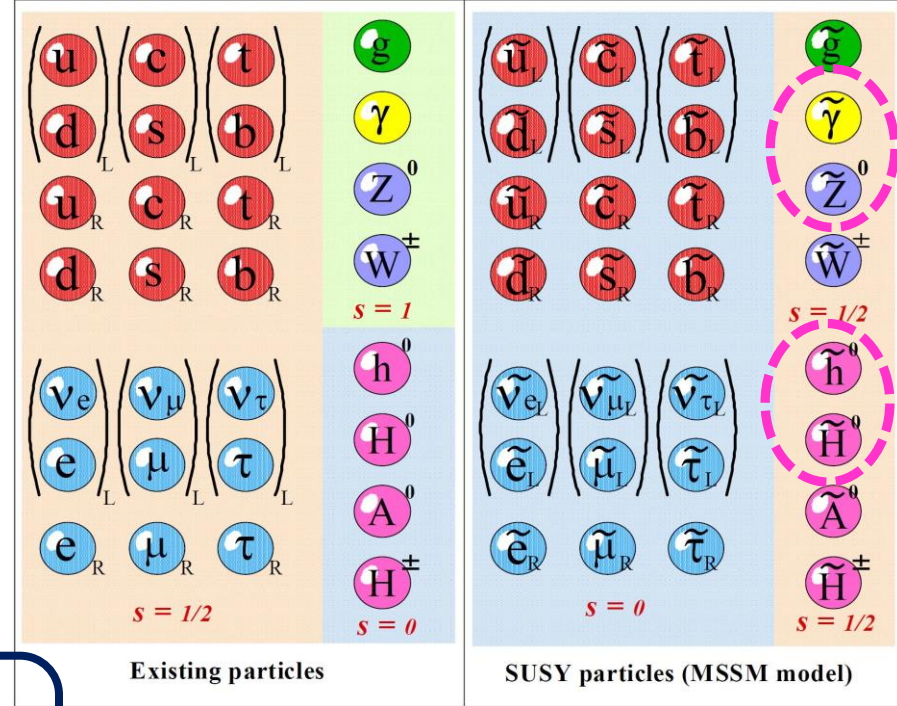
様々な候補が考えられる中、**他の動機** から導入されるような粒子が良い候補

- **アクシオン**: QCD において CP が破れることを防ぐために導入された。
- **原始ブラックホール**: 重力波観測されたブラックホール連星の起源の可能性がある。
- **WIMPs**: Weakly Interaction Massive Particles. 弱い相互作用スケールで現在の存在量を自然に説明できる

# WIMPsの有力候補

## 超対称性粒子 (Supersymmetric particles)

- 超対称性(SUSY): ボソンとフェルミオン間の対称性。
- SUSYを導入することで、標準模型の様々な問題の解決につながる。
  - 階層性問題: ヒッグス質量補正項の2次発散問題
  - ゲージ結合定数の統一: 大統一理論(Grand Unified Theory: GUT)への拡張に際して、標準模型を超対称性化することにより高いエネルギースケールでの統一が実現される。



### ヒッグス(H)粒子の2次発散

$$\Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2$$

$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

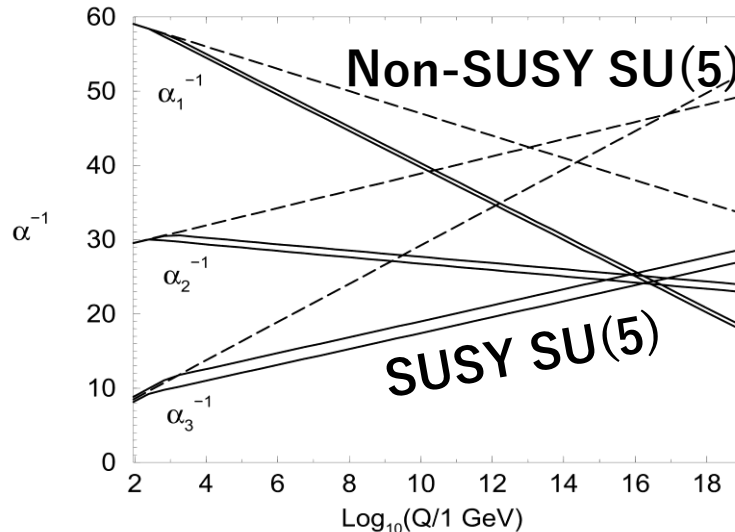
125 GeV
10<sup>38</sup>
-10<sup>38</sup>



$$\Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim \mathcal{O}(\log \Lambda)$$

→ SUSYを入れることで、Λをlog依存性にでき2次発散を回避できる。

### SU(5) GUT による結合定数の統一



S.P. Martin, arXiv:hep-ph/9709356

超対称性で最小限拡張した標準模型 (Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model; **MSSM**)

において、WIMPs の候補が自然に表れる。

$$\chi = a_1 \tilde{B} + a_2 \tilde{W}_3 + a_3 \tilde{H}_1 + a_4 \tilde{H}_2$$

ニュートラリーノ

# 暗黒物質 (WIMPs) 探索方法

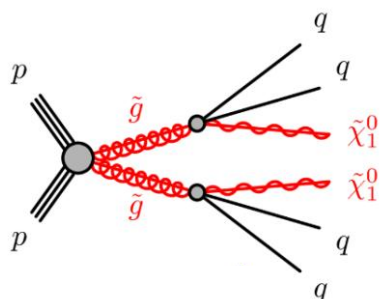
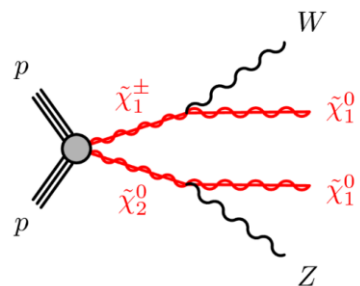
## 加速器実験

Collider



加速器での粒子衝突時の高エネルギーでWIMPsを生成する。

- 生成されたWIMPsが持ち去るエネルギーの測定 (LHC, ATLAS, CMS, ...)

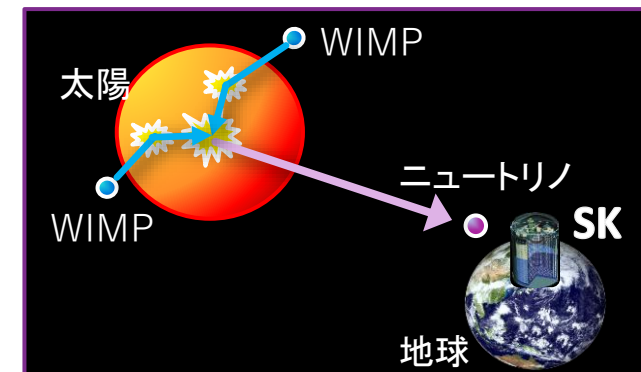


## 間接検出

Indirect search

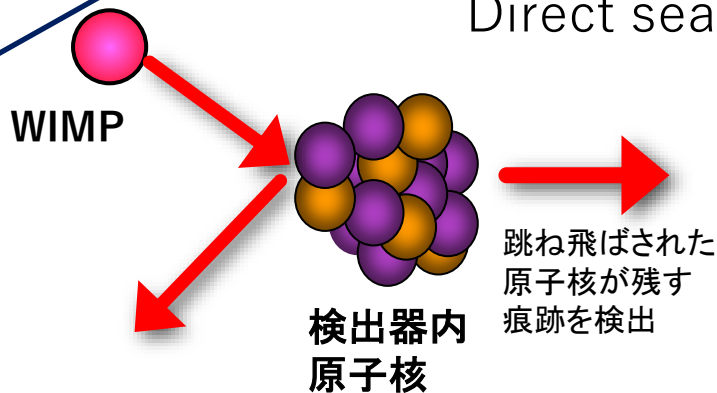
宇宙内の重力場の強いところに捕らえられているWIMPsが対消滅をして生成する通常物質を探索

- 銀河中心からのガンマ線 (Fermi衛星, CTA, ...)
- 太陽からのニュートリノ (Super-K, Hyper-K, IceCube, ...)



## 直接検出

Direct search

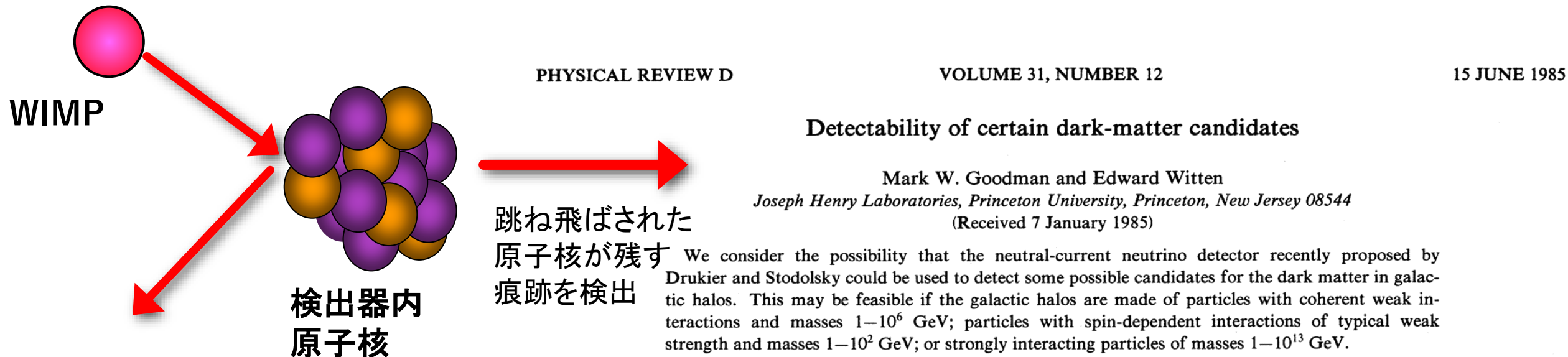


検出器内の通常の物質との反応の痕跡をとらえる。

- 液体キセノン原子核の散乱 (XENONnT, LZ, PandaX, XLZD, ...)

# 暗黒物質の直接検出

- 直接みつけられるといろいろ面白い。
- 最初の発見だけにとどまらず、暗黒物質の詳しい性質を明らかにしていける。  
(例: 原子核種による反応断面積の違い、スピンとの結合の研究など)

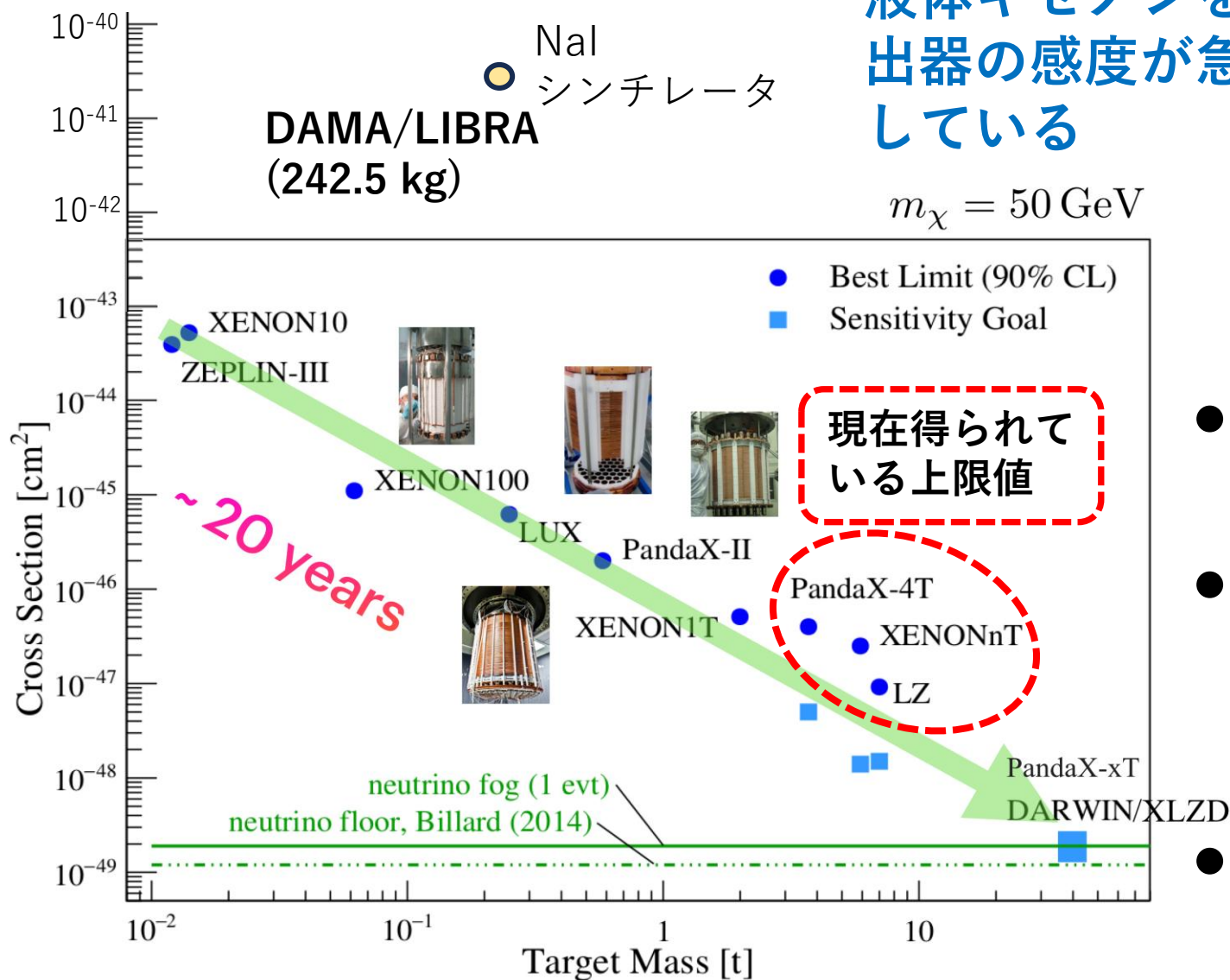


- 検出器に付与されるエネルギー分布で質量が決まる。
- 反応頻度から相互作用の強さが求まる。

# 暗黒物質に対する感度の進化



液体キセノンを使った検出器の感度が急速に進化している



○ NaI  
○ シンチレータ  
DAMA/LIBRA  
(242.5 kg)

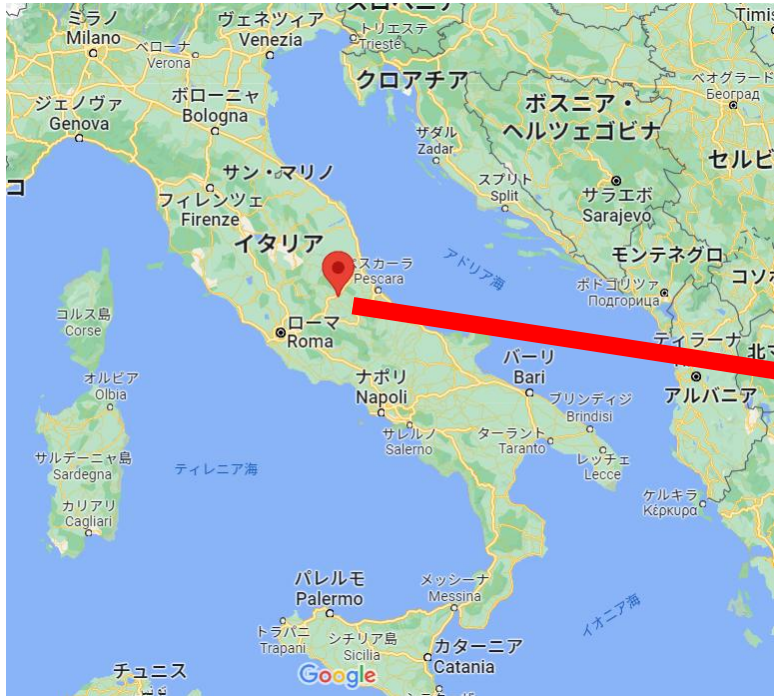
$m_\chi = 50 \text{ GeV}$

- 直接探索には様々な標的物質が用いられているが、現在のところ液体キセノンによる検出器が世界最高感度を争っている。
- シンチレータとして優れているだけでなく、液体で純化や大質量化が容易、単原子分子のためタイムプロジェクションチェンバー(TPC)としてもすぐれた性能を持っているなど様々な利点。
- 現在のところ、 $50 \text{ GeV}/c^2$  の質量をもつ WIMPs に対して、 $\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$  といった上限値が得られている。

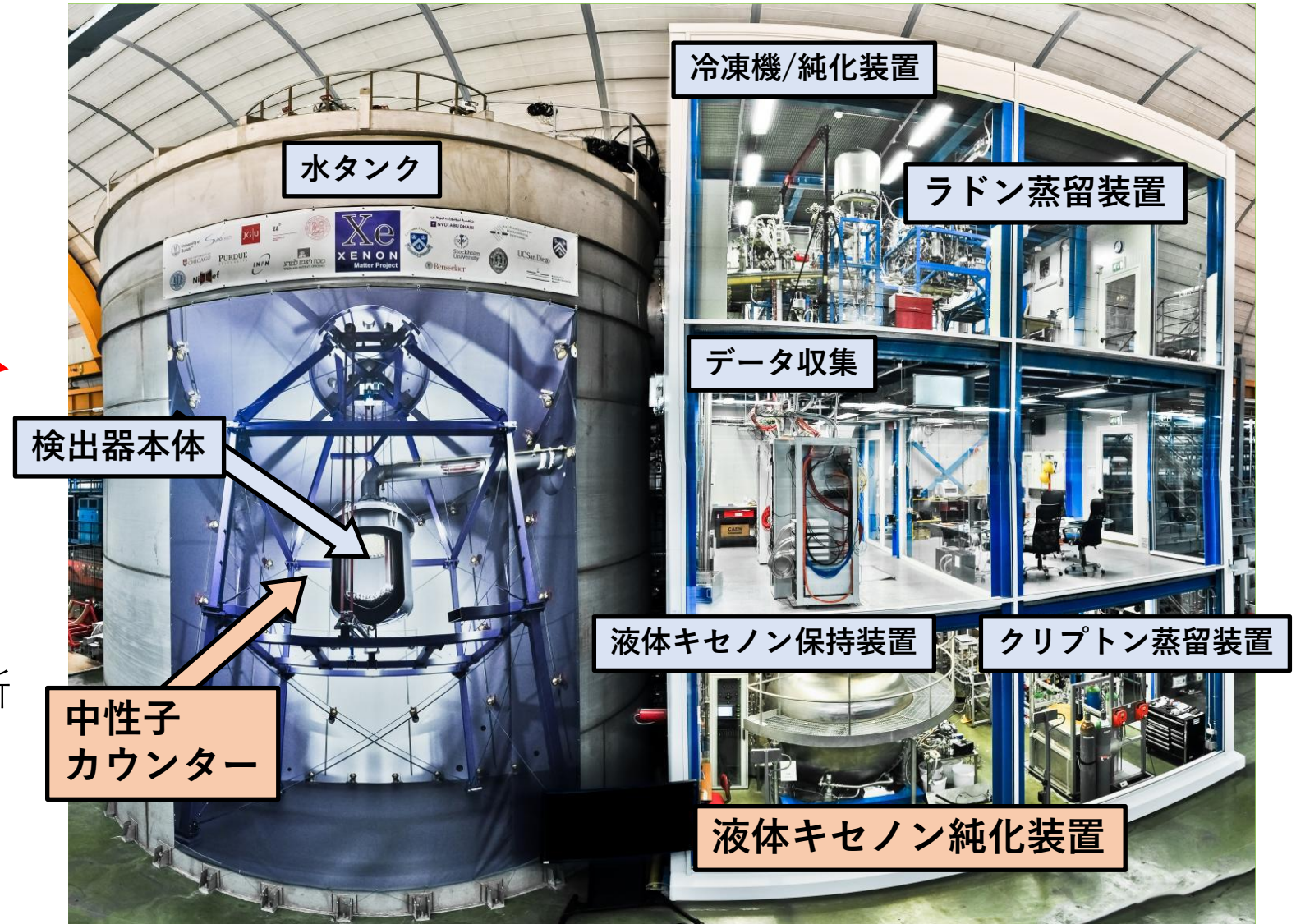
# XENONnT 検出器



世界最高感度レベルで暗黒物質探索を遂行中の大質量液体キセノン検出器の一つ



イタリア・グランサッソ国立研究所  
Laboratori Nazionali del Gran  
Sasso (LNGS) にある地下実験室に  
ある



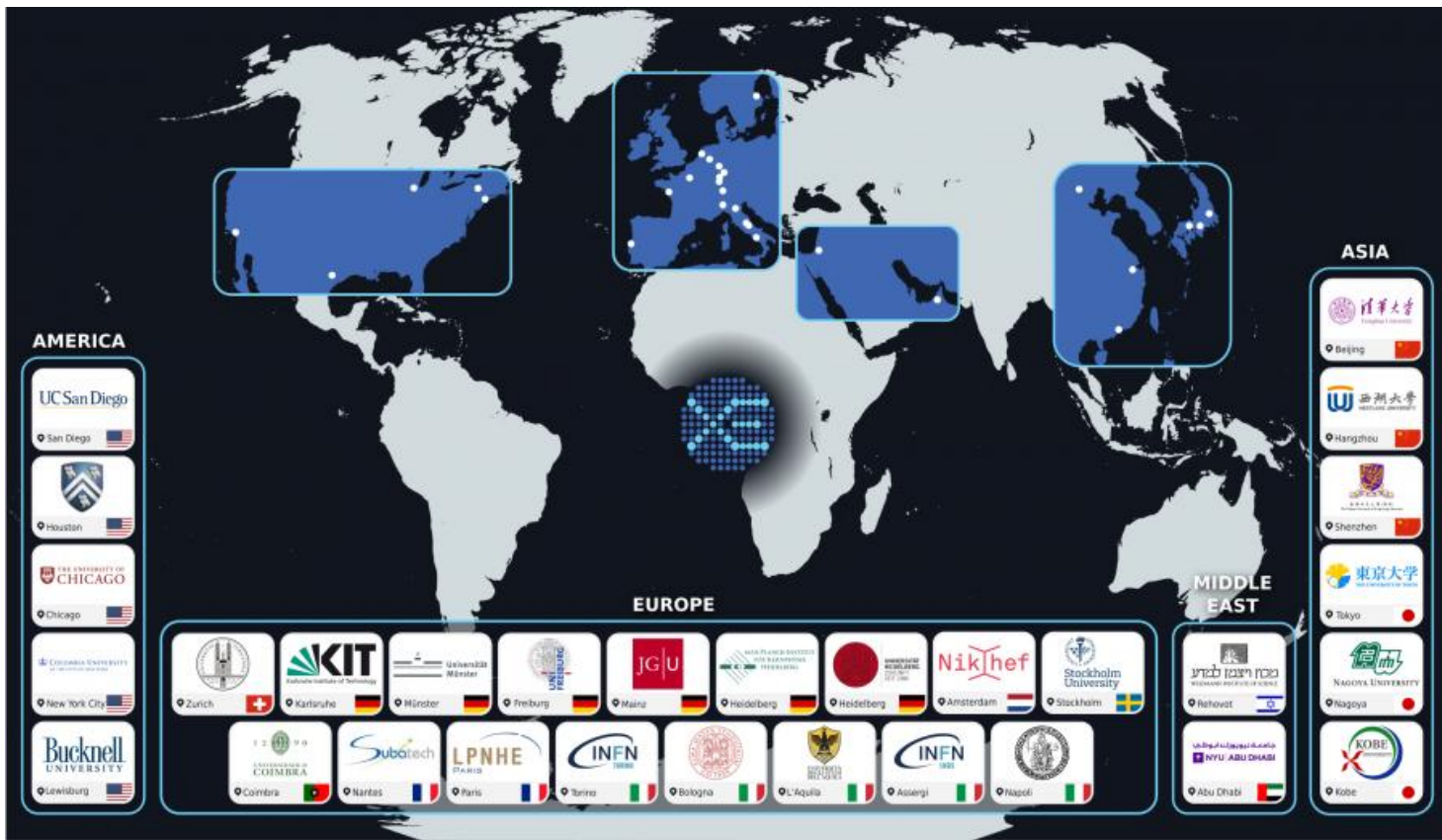
日本グループの貢献がとくに大きな箇所

# XENON collaboration



XENON

- 国際共同実験 (~200 scientists, 30 institution)
- 日本からは 21名 (東大宇宙線研8名、カブリIPMU3名、名古屋大6名、神戸大3名、東京科学大1名) が参加 (2026/5現在)



## 東京大学のXENONグループ

IPMU・Kai先生

ICRR・森山先生

ICRR・竹田



ICRR・伊藤先生



Credit: XENON Collaboration

Credit: XENON Collaboration

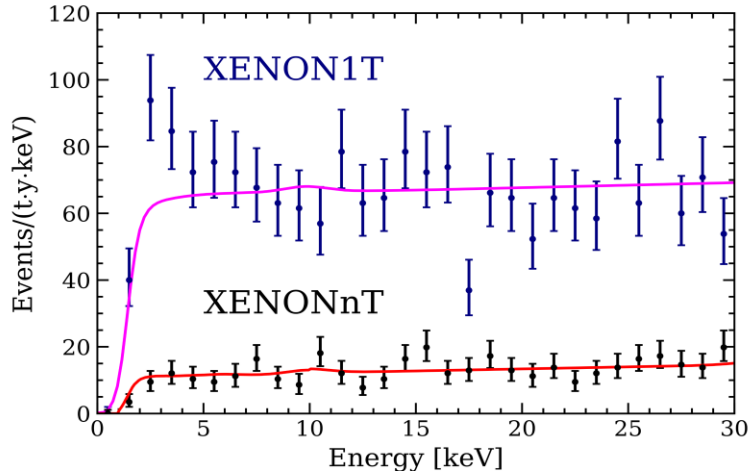


Credit: XENON Collaboration

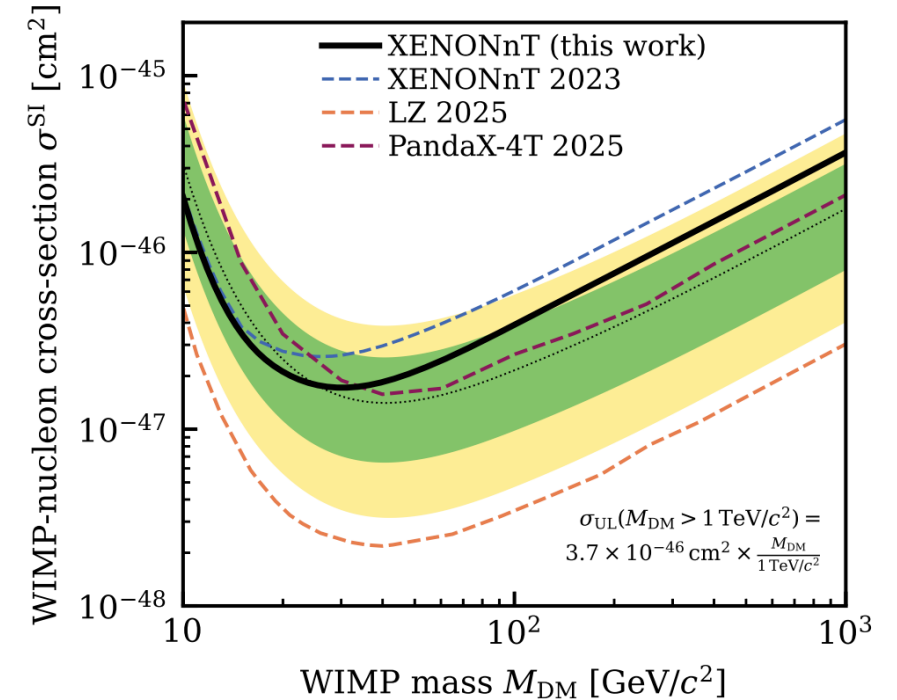
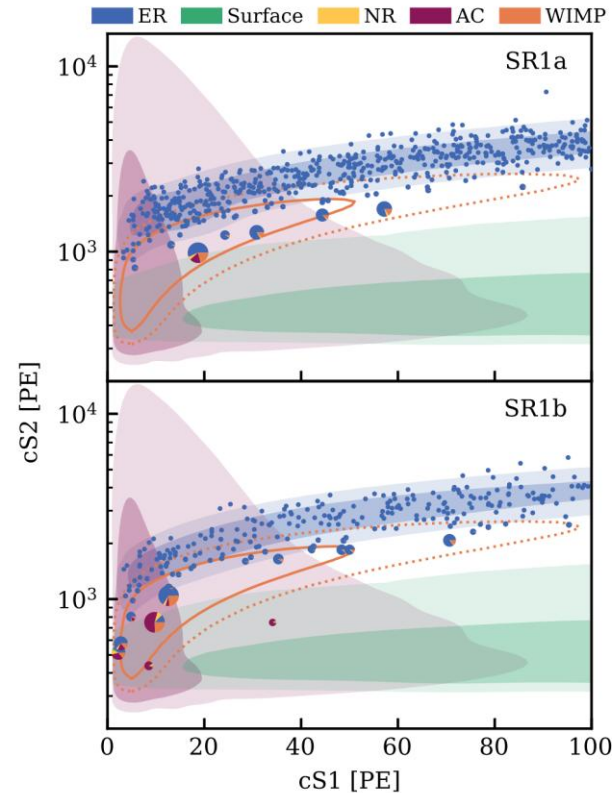
# XENONnT 実験の最新結果



- **電子散乱(ER):** XENONnTの前身検出器である XENON1Tで見えていた低エネルギー領域の信号超過を否定 (下左)。 $^{214}\text{Pb}$  ( $1.31 \pm 0.17 \mu\text{Bq/kg}$ )が主要なバックグラウンド。
- **核子反跳(NR):** バックグラウンドを超えた信号超過は見られず、**質量  $41 \text{ GeV}/c^2$  の WIMPs に対して  $1.4 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$  の制限を得た。**
- 現在、検出器の改良を実施し、さらなる感度上昇のもとで探索が実施される状況。

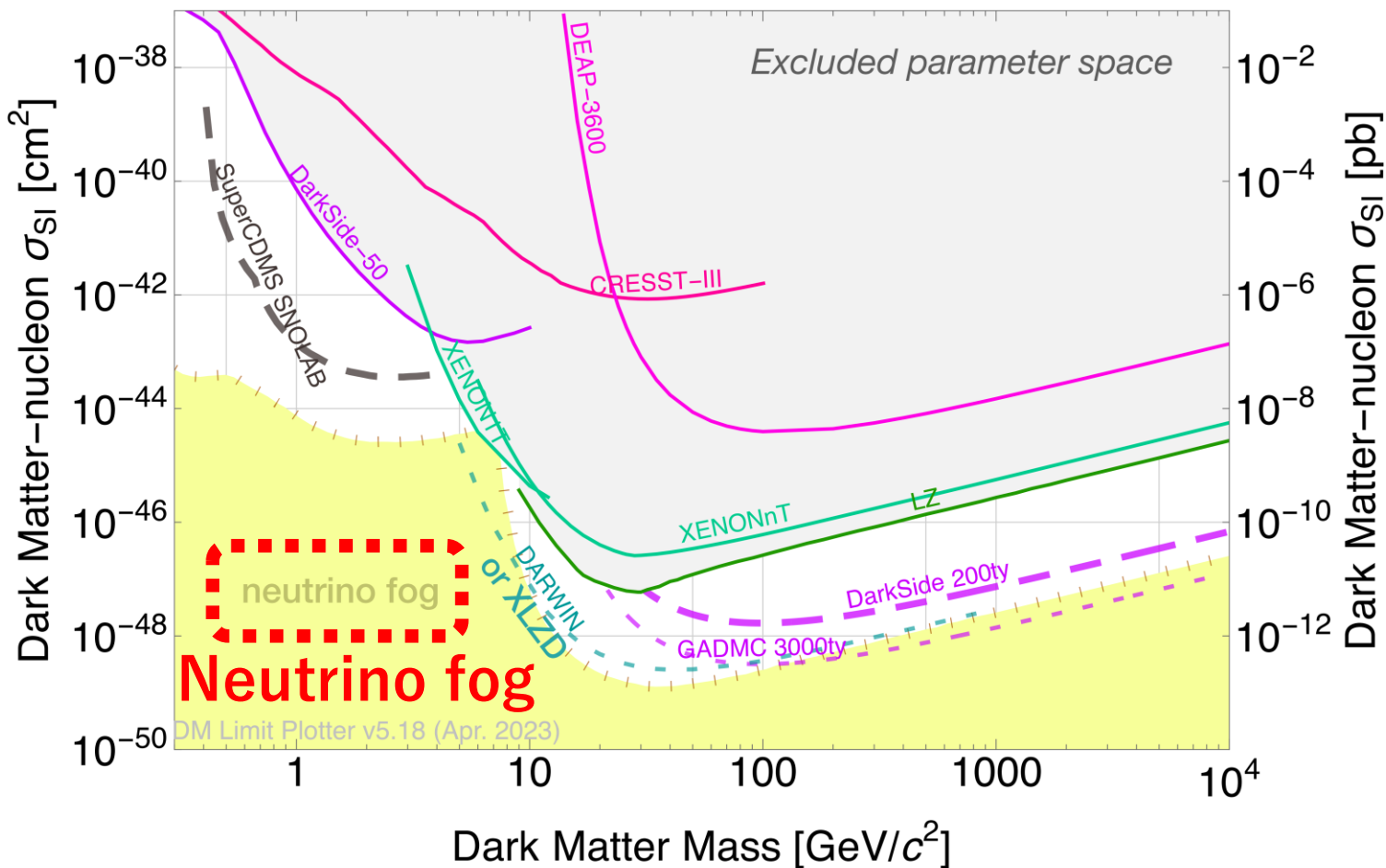


*Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 161805*



*Phys. Rev. Lett. 135 (2026) 041003*

# 今後の検出感度・XLZD



- XLZD (XENONnT + LZ + DARWIN)
- 2相式液体キセノンTPC
- 液体キセノンを40~80トン使用  
(40トンから段階的にスケールアップ)
- 2030年前半の実験開始を目指す
- **Neutrino fog** と呼ばれる太陽や大気ニュートリノがバックグラウンドとなる領域に到達する。  
→ SK/HK での精密測定でニュートリノフラックス不定性を小さくすることが重要

# XENONnT におけるICRR大学院生の活躍

森山研

<https://sites.google.com/view/xenon-ut/%E3%82%B0%E3%83%AB%E3%83%BC%E3%83%97>



## 2019年 宇宙線研究所梶田所長修士発表賞受賞

XENONnTのための液体キセノン純度モニターの開発研究 (加藤)



## 2019年 宇宙線研究所梶田所ポスター賞受賞

XENONnTのための中性子検出器のガドリニウムを添加した水の光透過率の測定方法確立(陳)

## 2023年 SMART2023会議にて優秀ポスター賞受賞

大質量液体キセノン暗黒物質探索実験における純化システムの研究 (神長、後側)



## 2024年 日本物理学会学生優秀発表賞受賞

$^{85}\text{Kr}$ による背景事象評価 (神長)



## 2024年 地下宇宙若手研究会で優秀発表賞受賞

$^{85}\text{Kr}$ による背景事象評価 (神長)

# 方向感度を持った暗黒物質直接探索

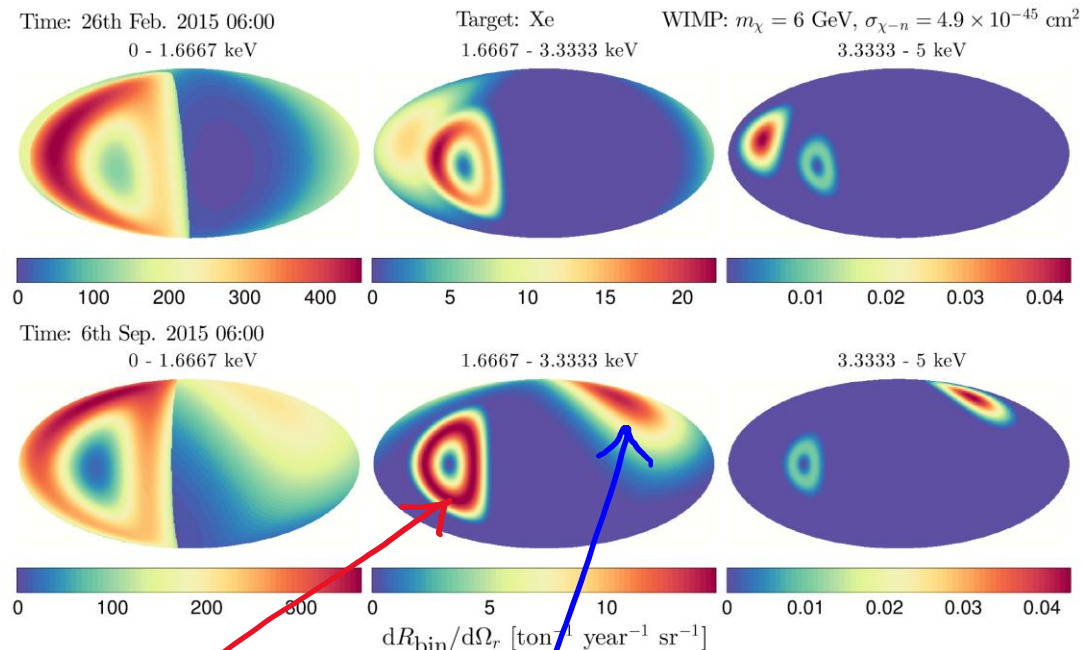
- 暗黒物質の到来方向が分かると、太陽系の進行方向 (白鳥座) から暗黒物質の風が検出可能になる。
- 太陽ニュートリノとの区別もつけられる。



暗黒物質

$V_0 = 220 \text{ km/s}$  で  
Maxwell分布

PHYSICAL REVIEW D 92, 063518 (2015)



<sup>8</sup>B 太陽ニュートリノ

WIMP

- トンスケールの大質量検出器はまだ実現されていないが、R&D・大質量化・低バックグラウンド化が進められている。
  - 異方性シンチレータ (ICRR 関谷研,  $\text{ZnWO}_4$ )
  - ガス検出器 (神戸大 身内研, NEWAGE)

# 新たな検出器開発1

「暗黒物質を直接捉える」といっても要は→  
**Step1:** とにかく「検出」しないと始まらない  
**Step2:** 検出率に暗黒物質の特徴がみられるか検証

Particle physics (cross section) × Astrophysics (flux)

$$R = \sigma_{\chi-N} \times n\langle v \rangle$$

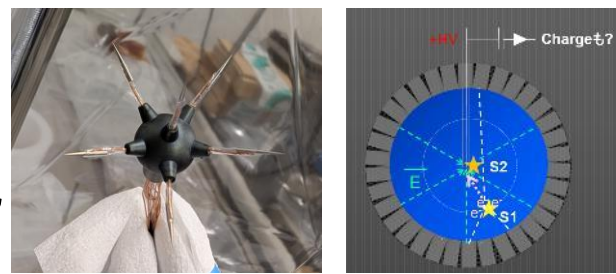
$$= \sigma_{\chi-N} \times \rho \int \vec{v} f(\vec{v}) d\vec{v}$$

$\sigma_{\chi-N}$  : WIMP-nucleus cross section  
 $\rho$  : WIMP density  
 $f(\vec{v})$  : WIMP velocity distribution

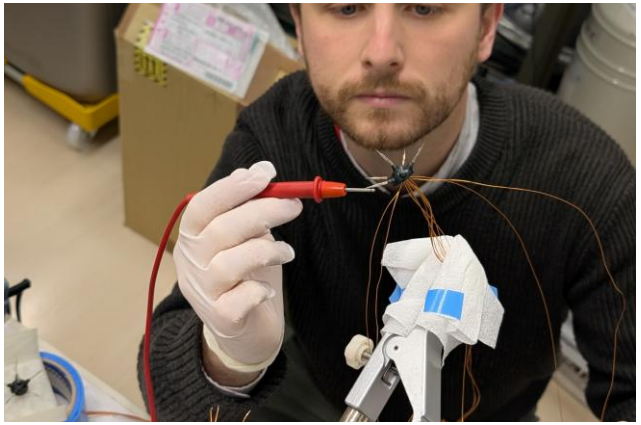
**Step1** とにかくバックグラウンド(BG)を低減してターゲット質量を増やす必要がある  
 「将来XENON-nTなどよりも大きな検出器を実現するにはどうしたらよいか」

## →球状液体キセノンTPC検出器+ウニ電極の開発

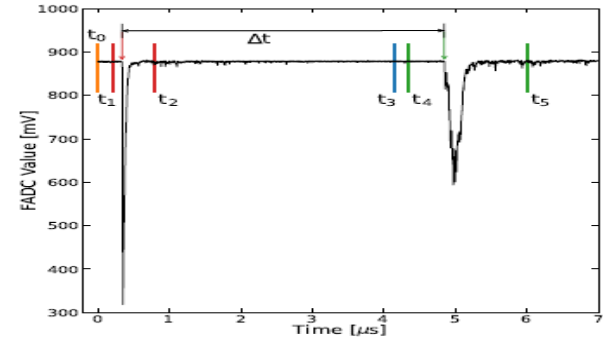
フランス CEA Saclay、イギリスBirmingham大  
 ギリシャ Thessaloníki大 スウェーデンESSとの共同研究



神岡での液体TPC実験の様子



初めて成功した時のシグナル  
 JINST 19 P10015 (2024)



# 新たな検出器開発2

**Step2** 暗黒物質の特徴は銀河中の地球の動きによって生まれる

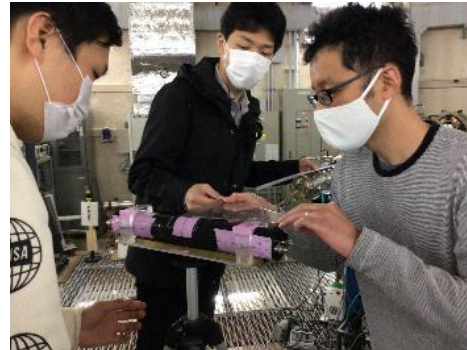
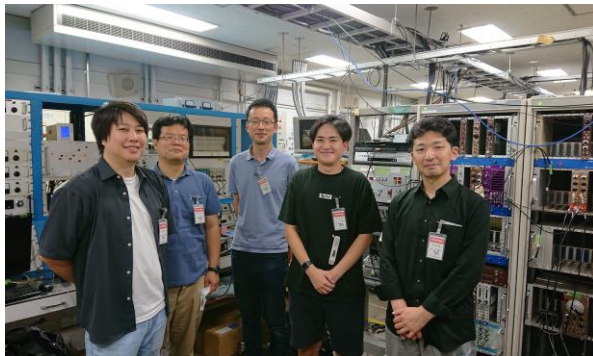
「暗黒物質の特徴を検証するにはどうしたらよいか」

→白鳥座方向からの入射方向に感度をもった検出器の開発

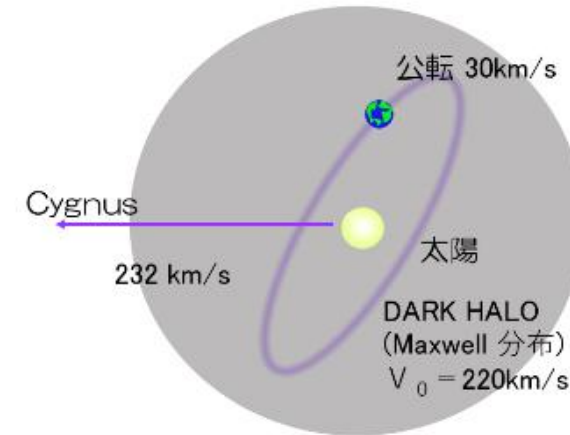
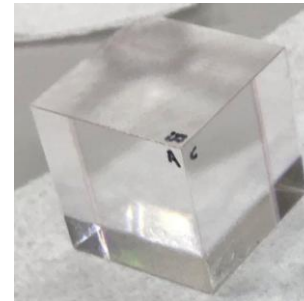
方向によって発光量の異なる結晶を利用する

東北大学、名古屋大、東大(理)、韓国IBSとの共同研究

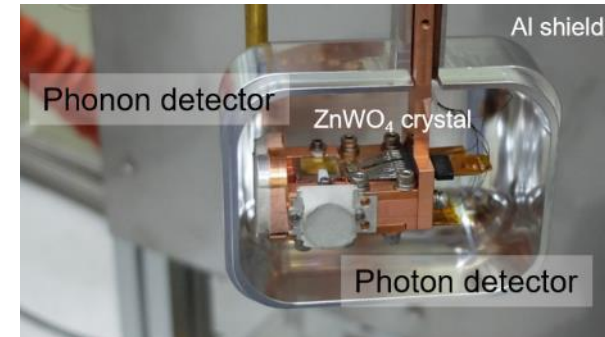
つくば産総研でのビーム実験の様子



修士学生1人でのテーブルトップ実験 → 投稿論文



韓国 IBSでの冷却実験



M.Shibata PTEP 2022, 013C01  
J.W.Pedersen PTEP 2020, 023C01

# 暗黒物質直接探索グループ

- 暗黒物質の存在は確実。
- 正体は全く不明。
- 発見したあとの詳細研究を考えると直接検出は魅力的。
- 世界中で発見を目指す熾烈な競争と、大型化に向けた国際共同研究が行われている。
- 暗黒物質特有の信号を引き出すためのアイデア・R&Dも大切。
- 一緒に研究したい人は大歓迎。

東京大学宇宙線研究所 宇宙ニュートリノ部門 暗黒物質直接探索グループの教員

[https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo\\_rp/neutrino-and-astroparticle-division/](https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/taxo_rp/neutrino-and-astroparticle-division/)



Shigetaka MORIYAMA

森山 茂栄

教授



Yoshitaka ITOW

伊藤 好孝

(R9年度 修士合格者を博士修了まで指導不可)

教授 (副所長)



Hiroyuki SEKIYA

関谷 洋之

准教授



Atsushi TAKEDA

竹田 敦

准教授