



超大型液体キセノン検出器で解明する 宇宙暗黒物質の謎 (B02班)

代表者:

風間慎吾 (名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所)

分担者:

安部航 (東京大学 宇宙線研究所)

小林雅俊 (名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所)

中村正吾 (横浜国立大学大学院 工学研究院)

Kai Martens (東京大学 カブリIPMU)

森山茂栄 (東京大学 宇宙線研究所)

地下稀事象 領域研究会@大阪大学



- 候補: 10^{-55} g から 10^{40} g と 100 桁近くの幅広い領域が許されている
- B02 班のターゲット: **Thermal Dark Matter with Weak Charge (WIMP)**

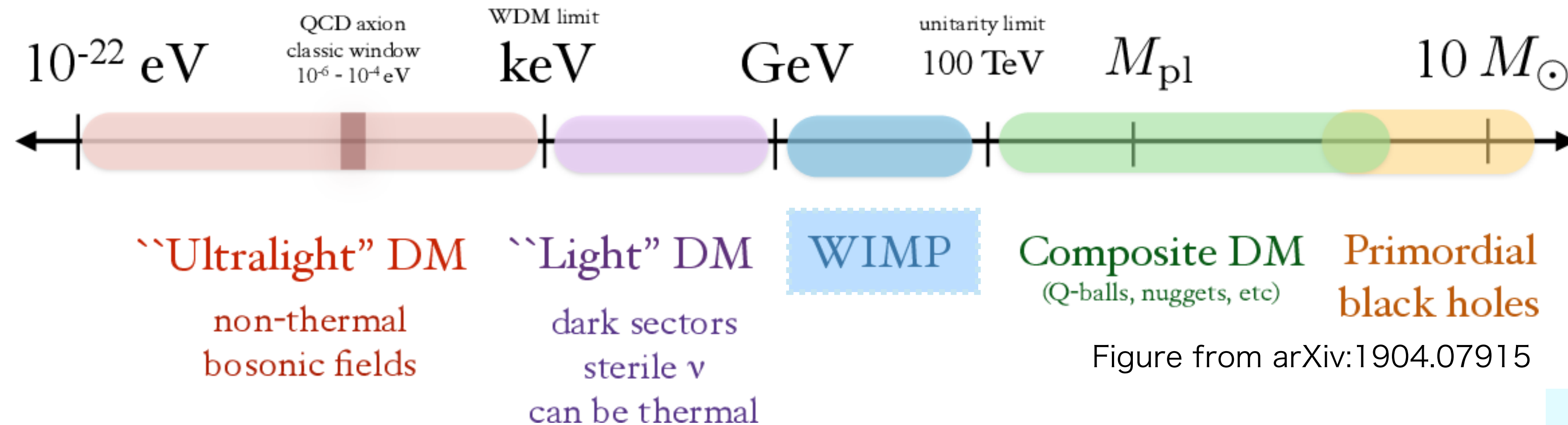
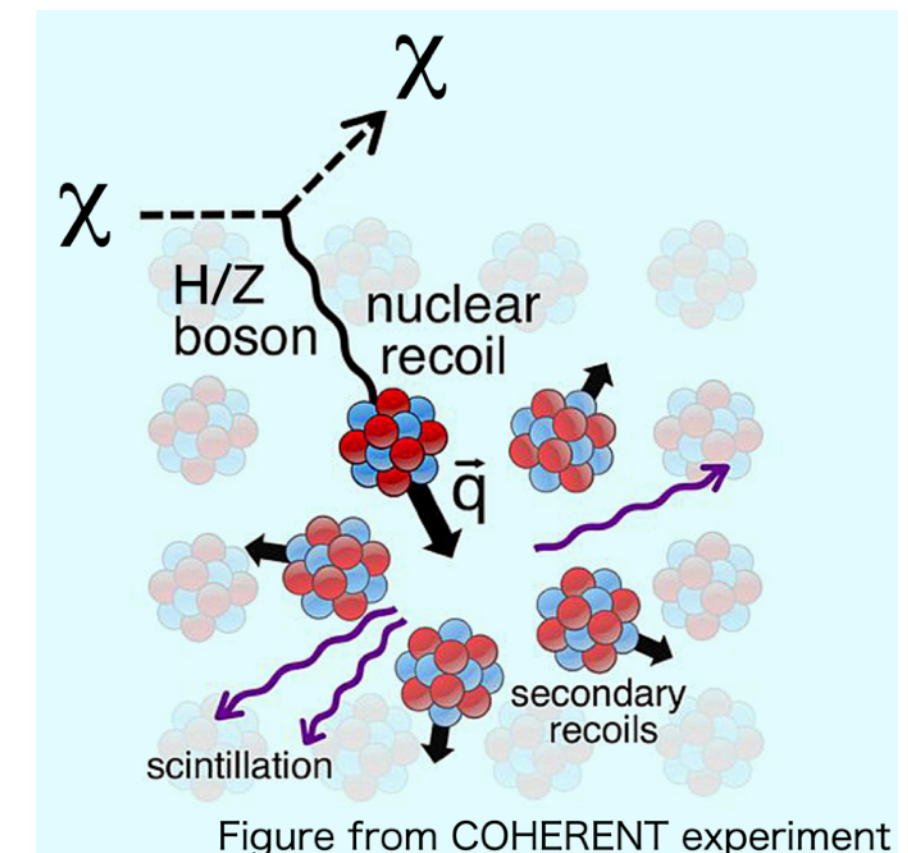


Figure from arXiv:1904.07915

- 暗黒物質の直接探索: 弾性散乱により反跳された原子核の痕跡を捉える



暗黒物質の直接探索

3

- 弾性散乱により反跳された原子核の痕跡を捉える: 反応は極稀 (我々は標的にキセノンを使用)
- 反跳エネルギー: $< O(10) \text{ keV}$
- ガンマ線・ベータ線・中性子などの放射線が背景事象
→ “低閾値” + “大質量” + “低BG” が重要

シグナル

WIMP

χ

χ

Nuclei

Axion

a

e^-

e^-

BG

Neutron

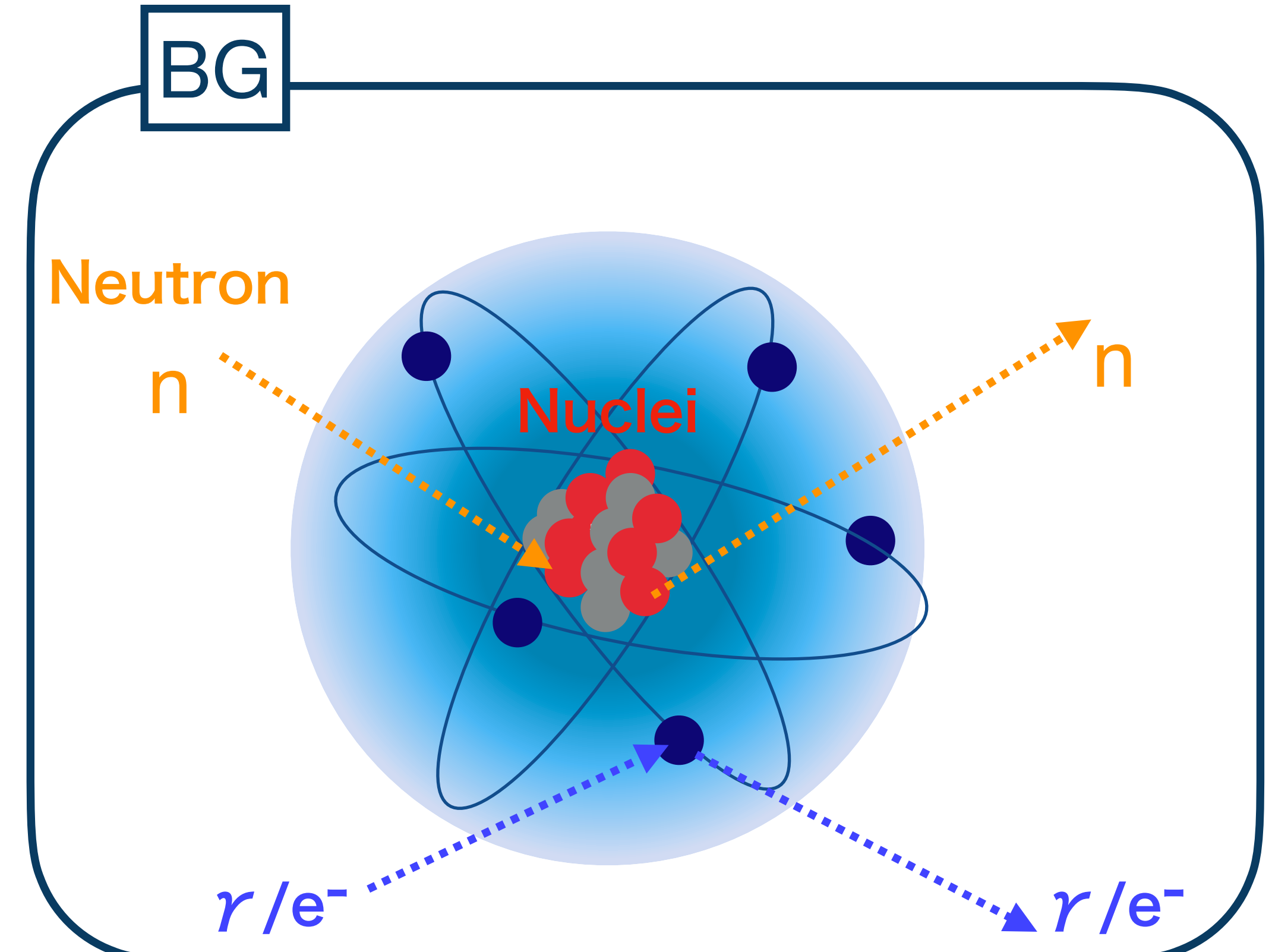
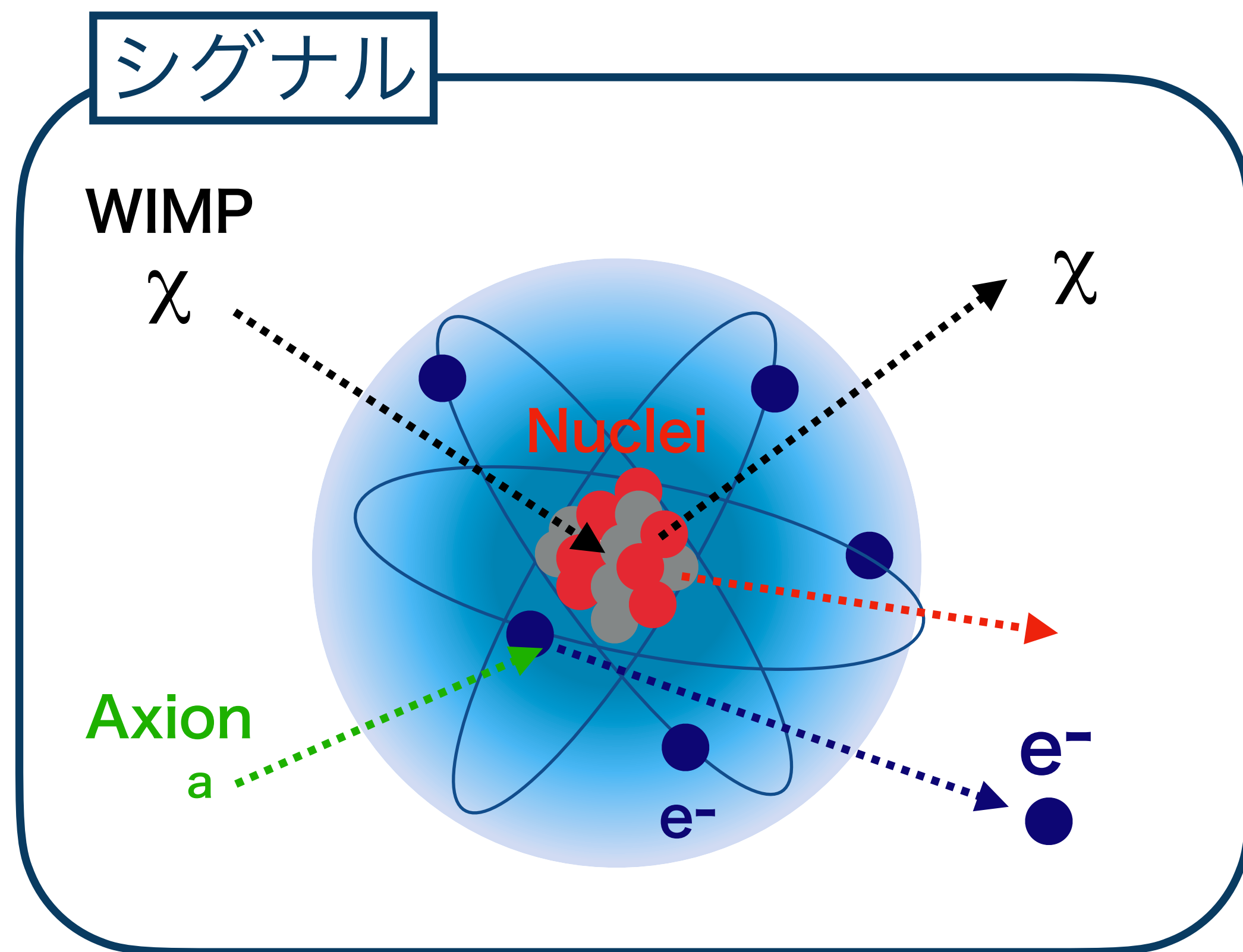
n

Nuclei

n

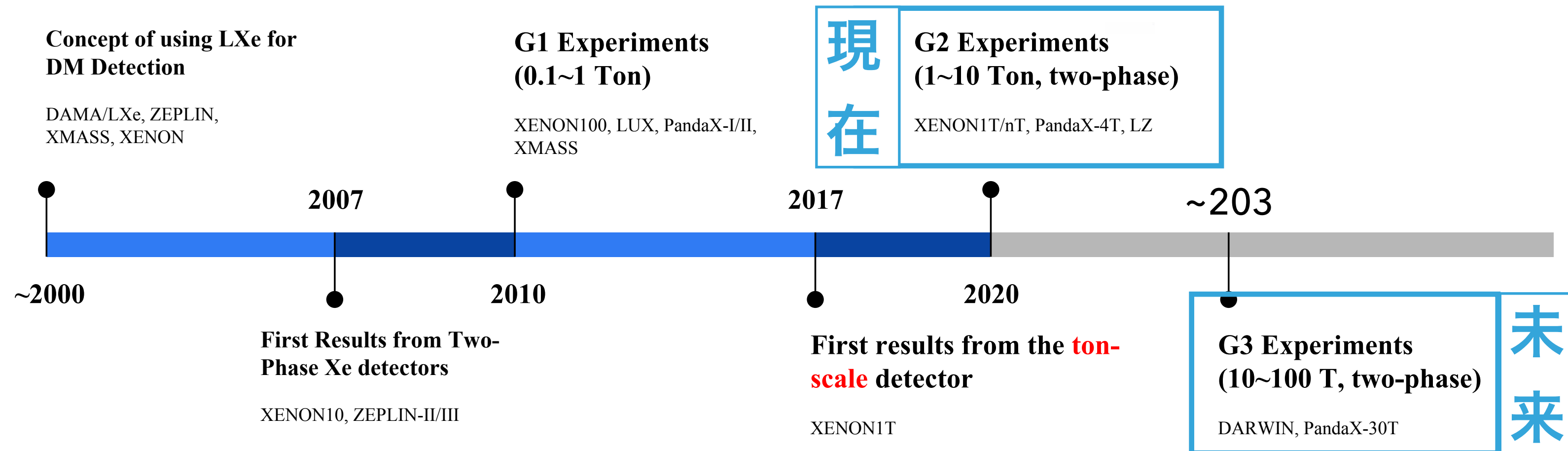
r/e^-

r/e^-

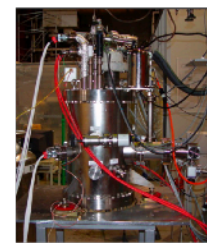


XENON/XLZD実験

4



XENON実験の歴史



XENON10

Total Xe: 25 kg
Target: 14 kg
Fiducial: 5.4 kg



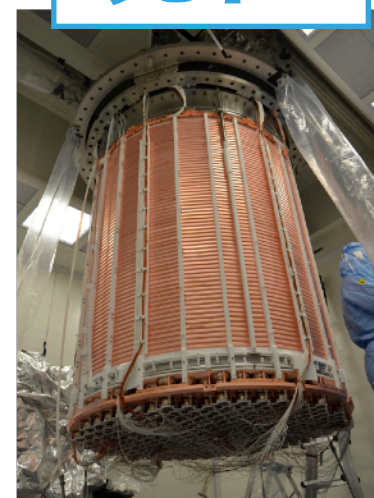
XENON100

Total Xe: 162 kg
Target: 62 kg
Fiducial: 48 kg



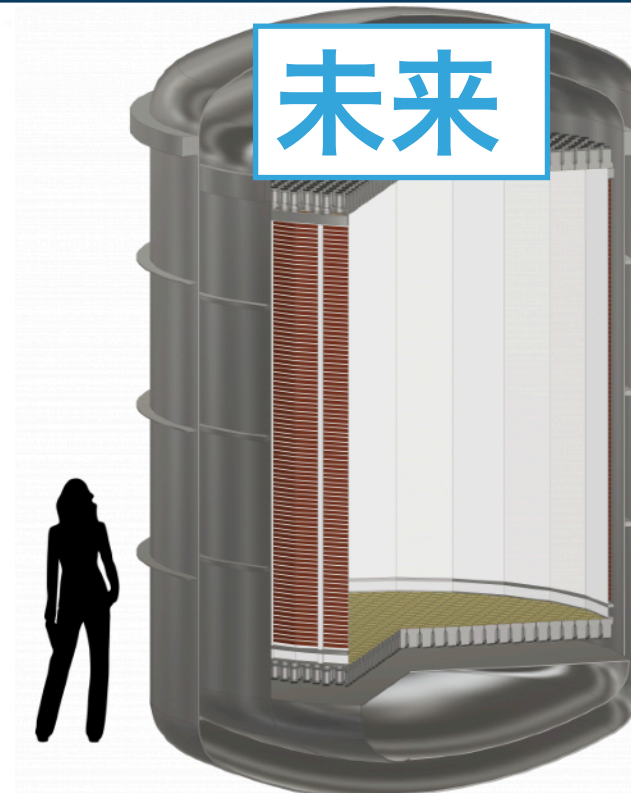
XENON1T

Total Xe: 3.2 ton
Target: 2.0 ton
Fiducial: 1.3 ton



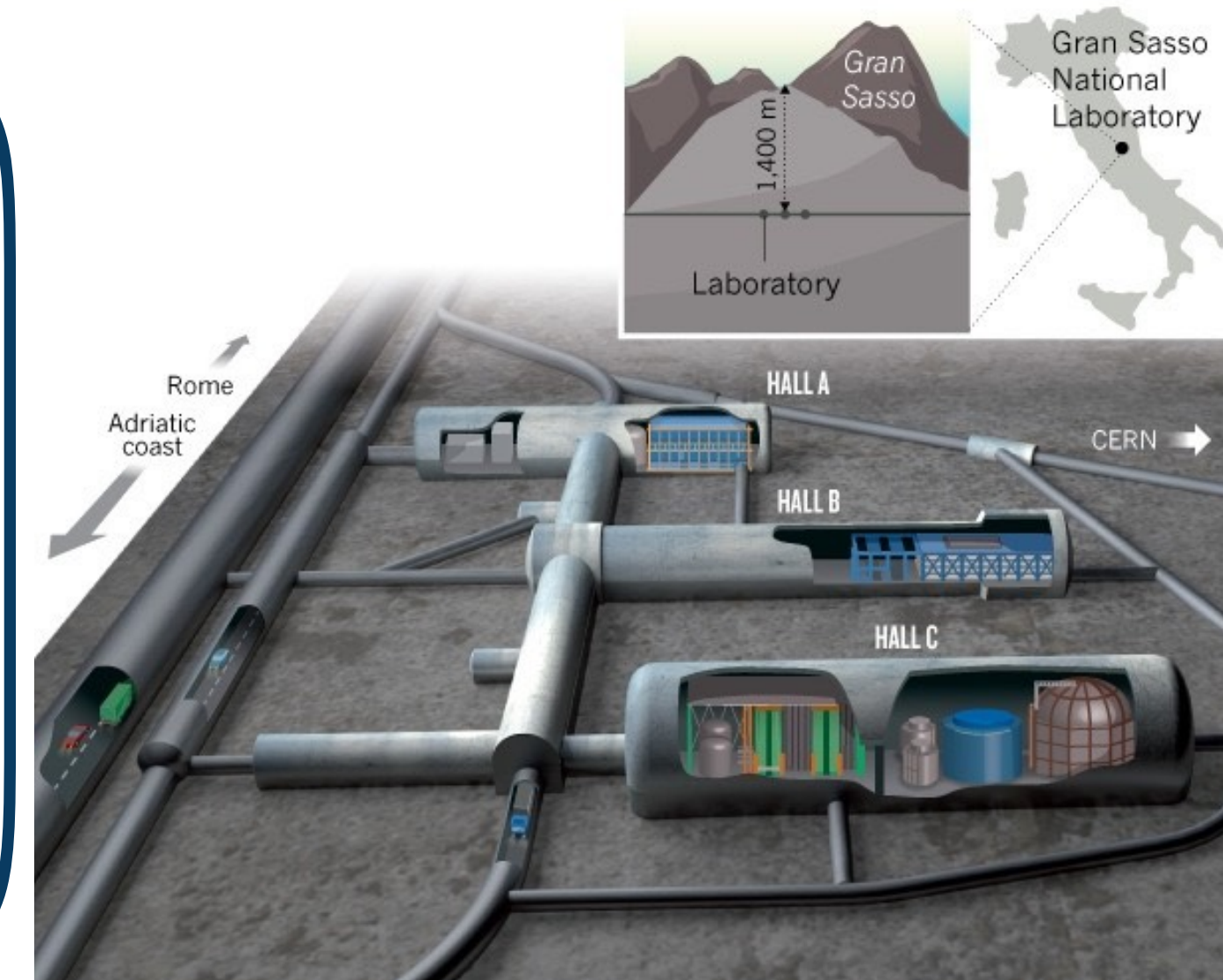
XENONnT

Total Xe: ~ 8.5 ton
Target: ~5.9 ton
Fiducial: ~4 ton



DARWIN (XLZD)

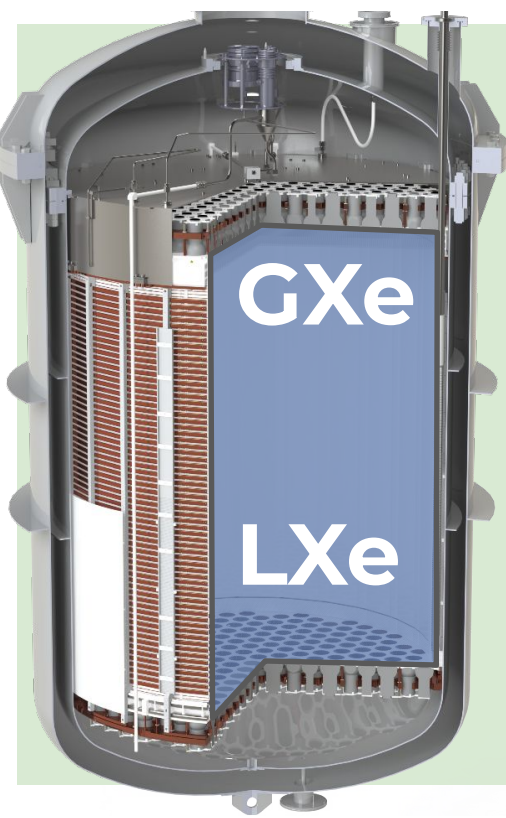
Total Xe: ~50 ton
Target: ~40 ton
Fiducial: >30 ton



- 液体キセノンを8.5トン用いたXENONnT実験が2021年より稼働開始: XENONnT実験の高感度化が本研究の焦点
- 40/60トン級の実験(XLZD)に向けたR&Dも焦点(次の小林のトーク)

XENONnT検出器

5



Dual phase Xe Time Projection Chamber

5.9 t active target mass, **8.5 t total** mass

1.5 m drift length, **1.3 m** diameter

494 Hamamatsu 3" **PMTs**

TPC

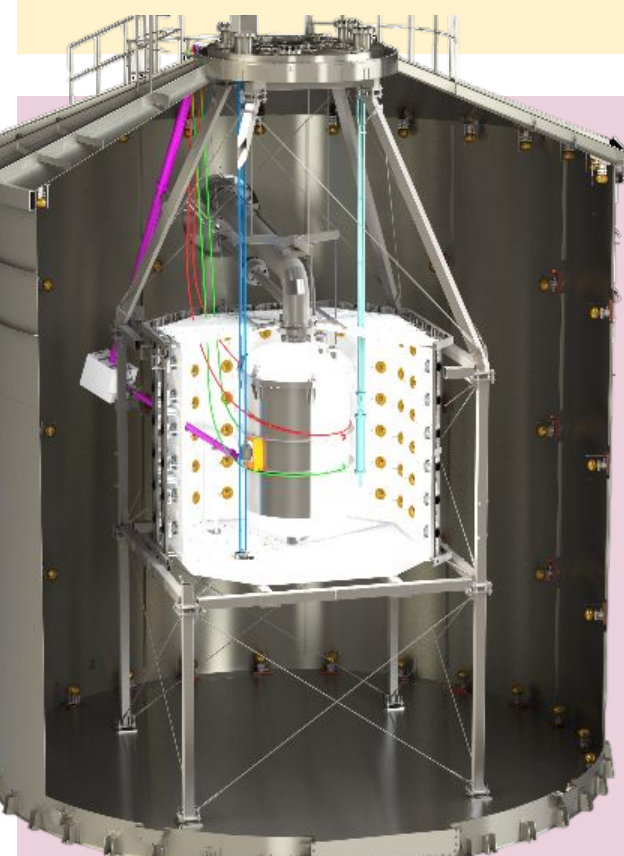
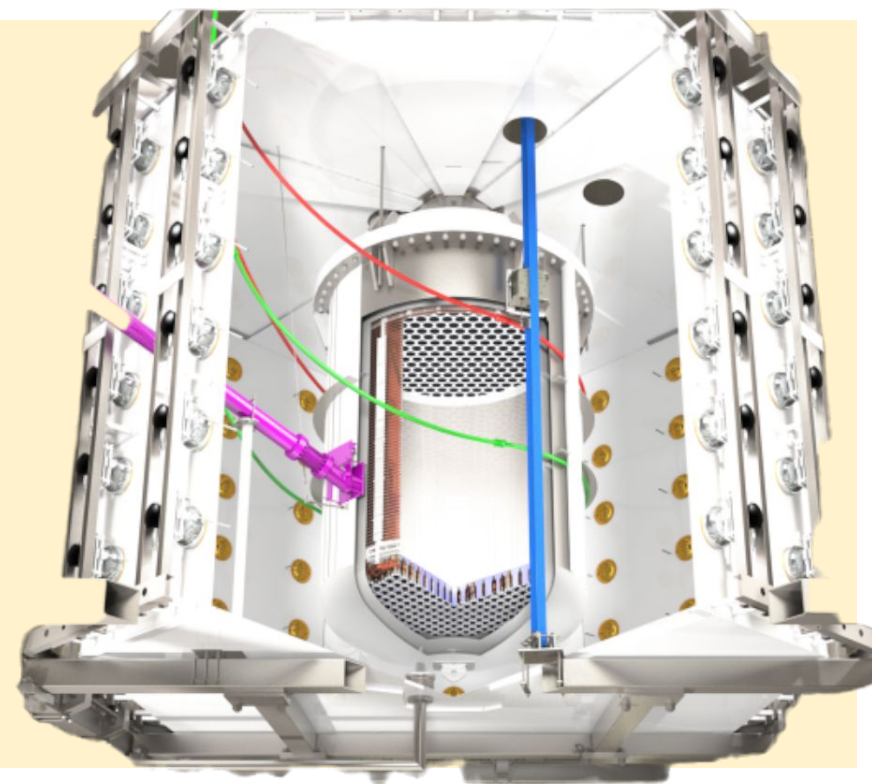
nVeto

(Gd-)Water Cherenkov Neutron Veto

33 m³ volume around cryostat

120 8" high QE **PMTs**

High reflectivity expanded **PTFE**



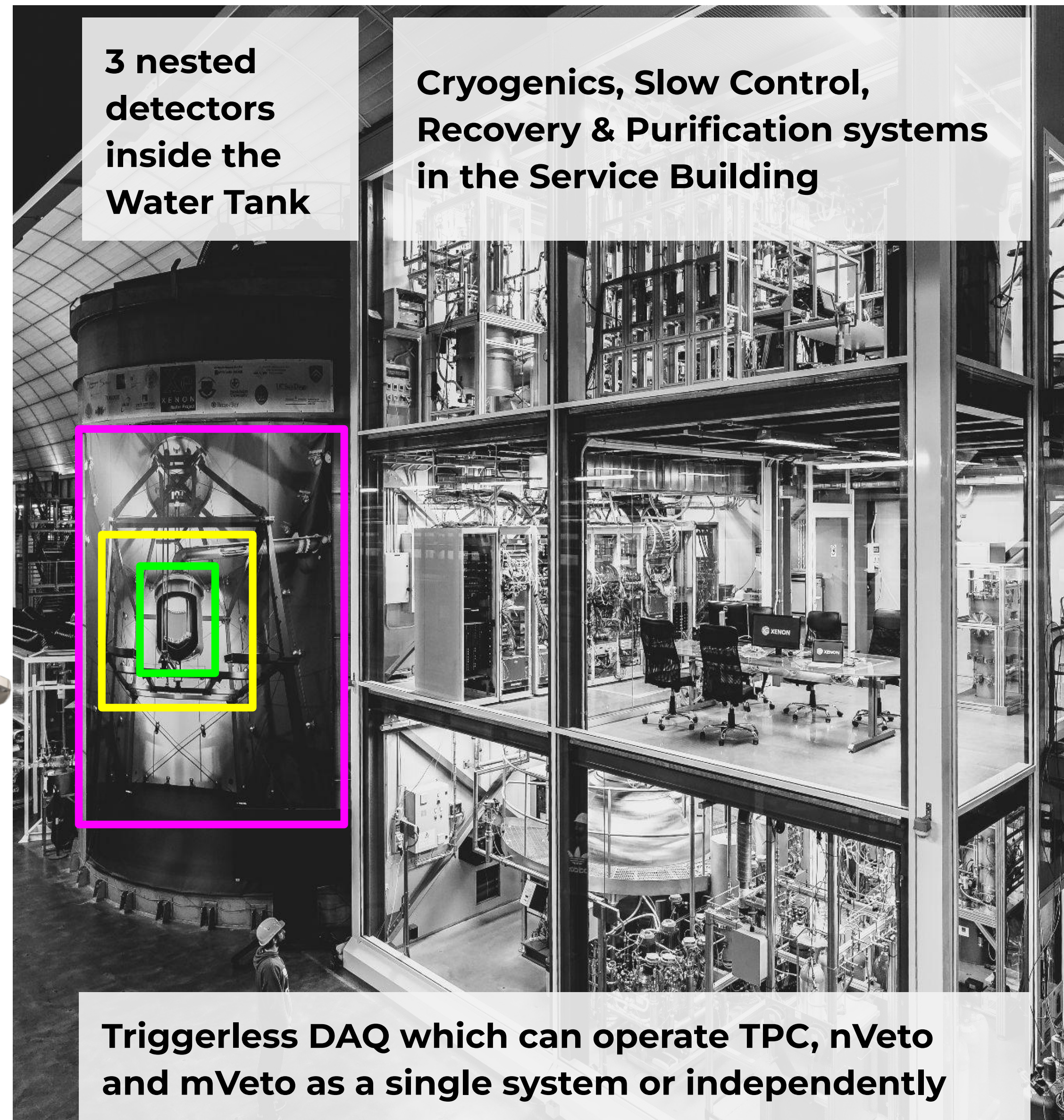
(Gd-)Water Cherenkov Muon Veto

700 t water, **120** 8" high QE **PMTs**

Active veto against **muon**-induced **neutrons** (n)

Passive veto against γ and **n** from **natural radioactivity**

mVeto



**3 nested
detectors
inside the
Water Tank**

**Cryogenics, Slow Control,
Recovery & Purification systems
in the Service Building**

**Triggerless DAQ which can operate TPC, nVeto
and mVeto as a single system or independently**

液体キセノンTPCを用いた暗黒物質の検出原理

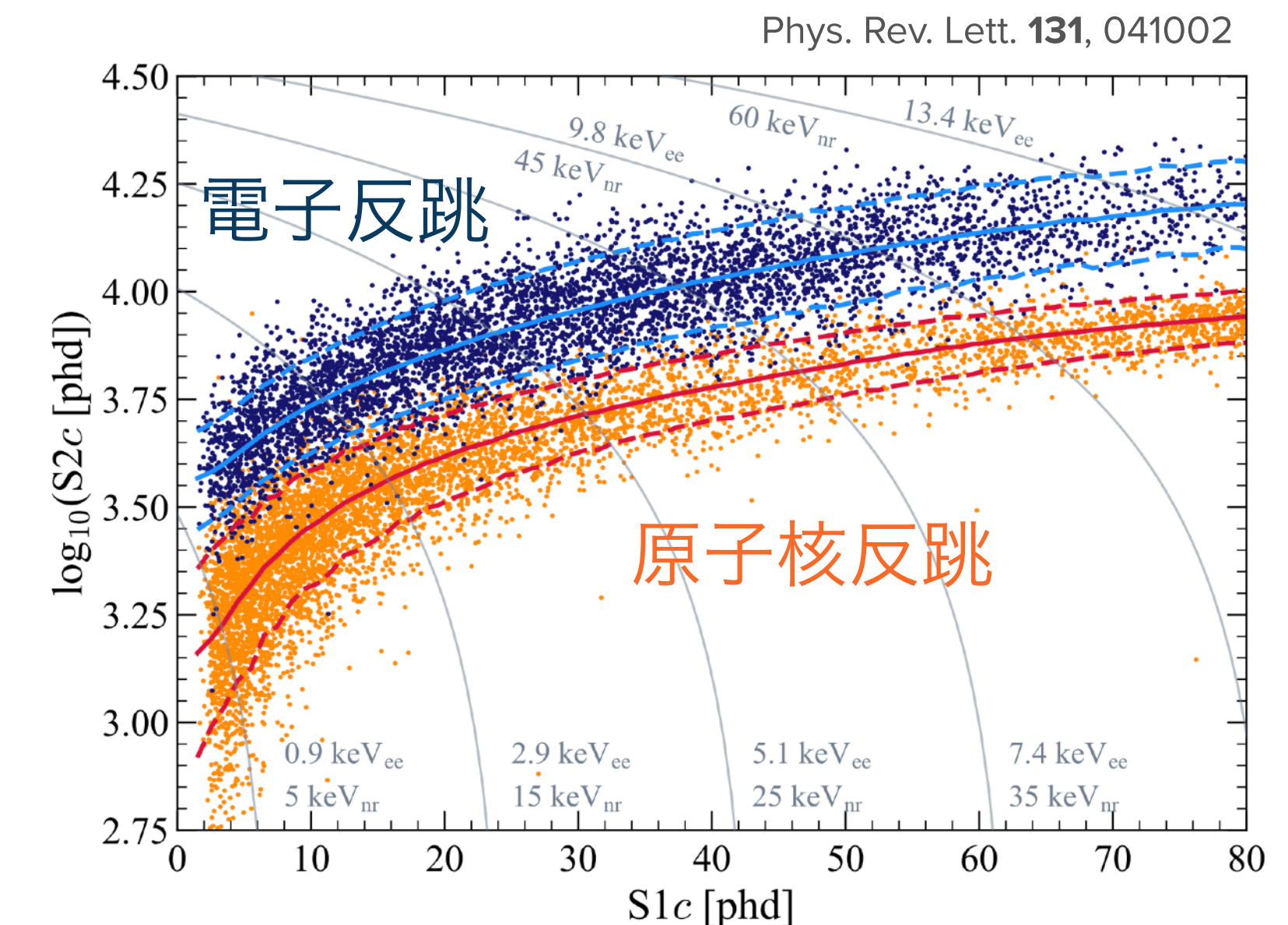
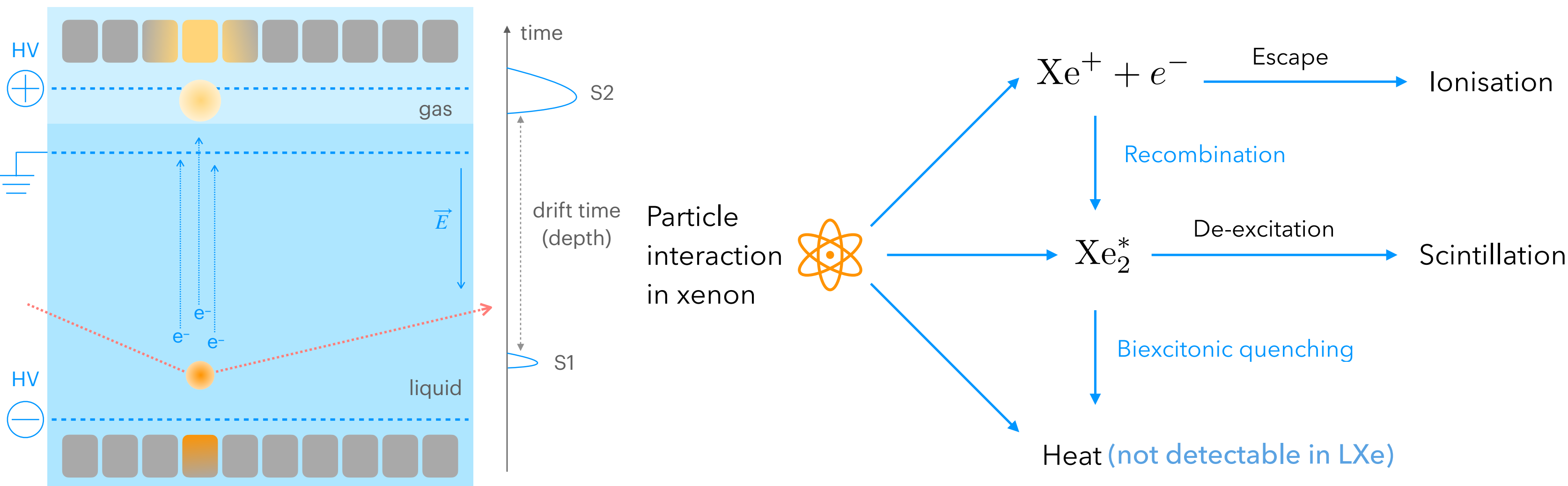
6

検出原理

- 放射線がキセノンと相互作用し、蛍光と電子が生成
 - 蛍光(S1)は直ちに光センサー(PMT)で検出
- 電子は印加された電場によりガス相にドリフト
 - 一部はキセノンイオンと再結合し蛍光(S1)を生成
- 他の電子は液体からガス相に抽出され、ガス中で比例蛍光(S2)を生成

粒子識別

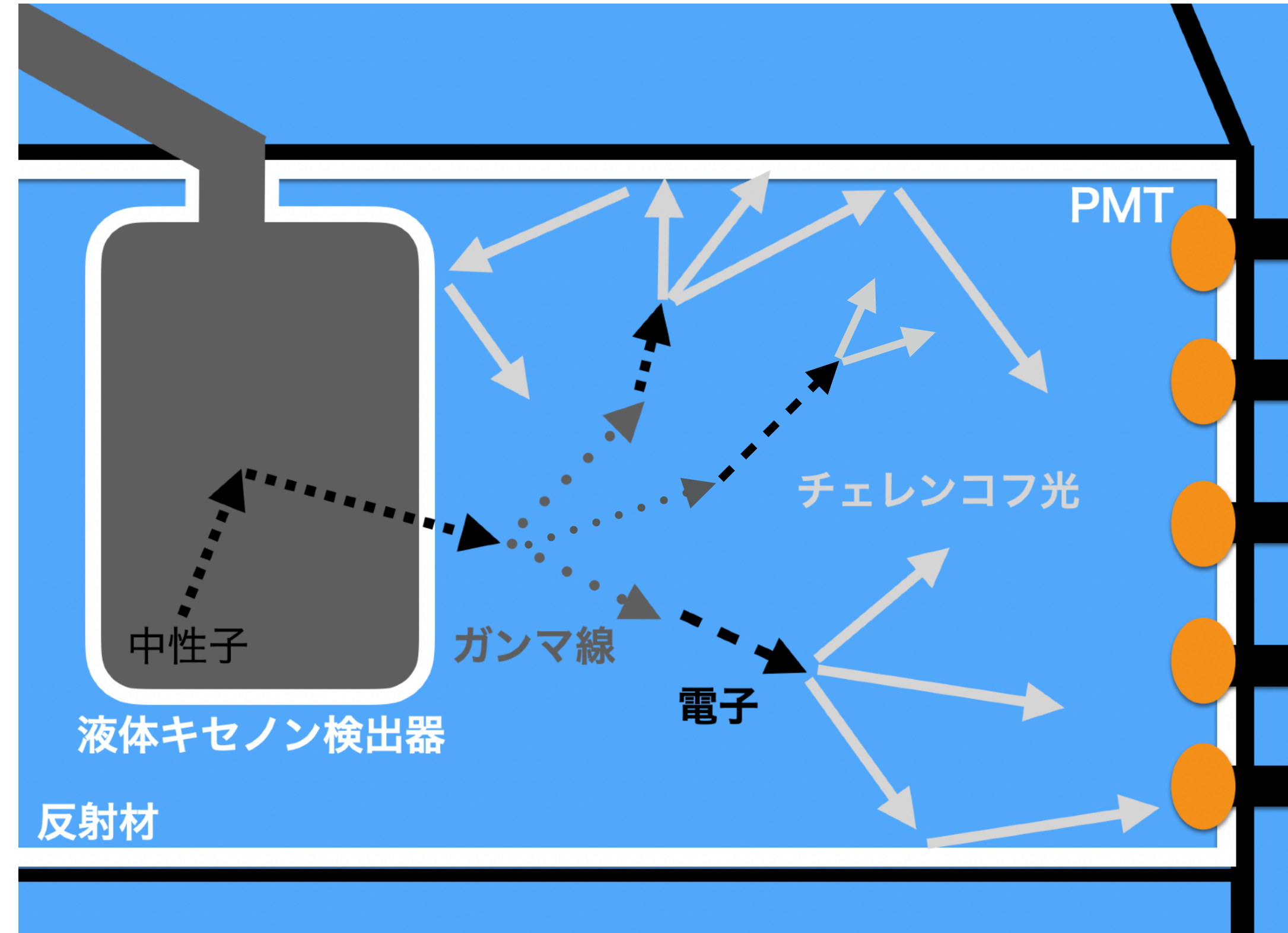
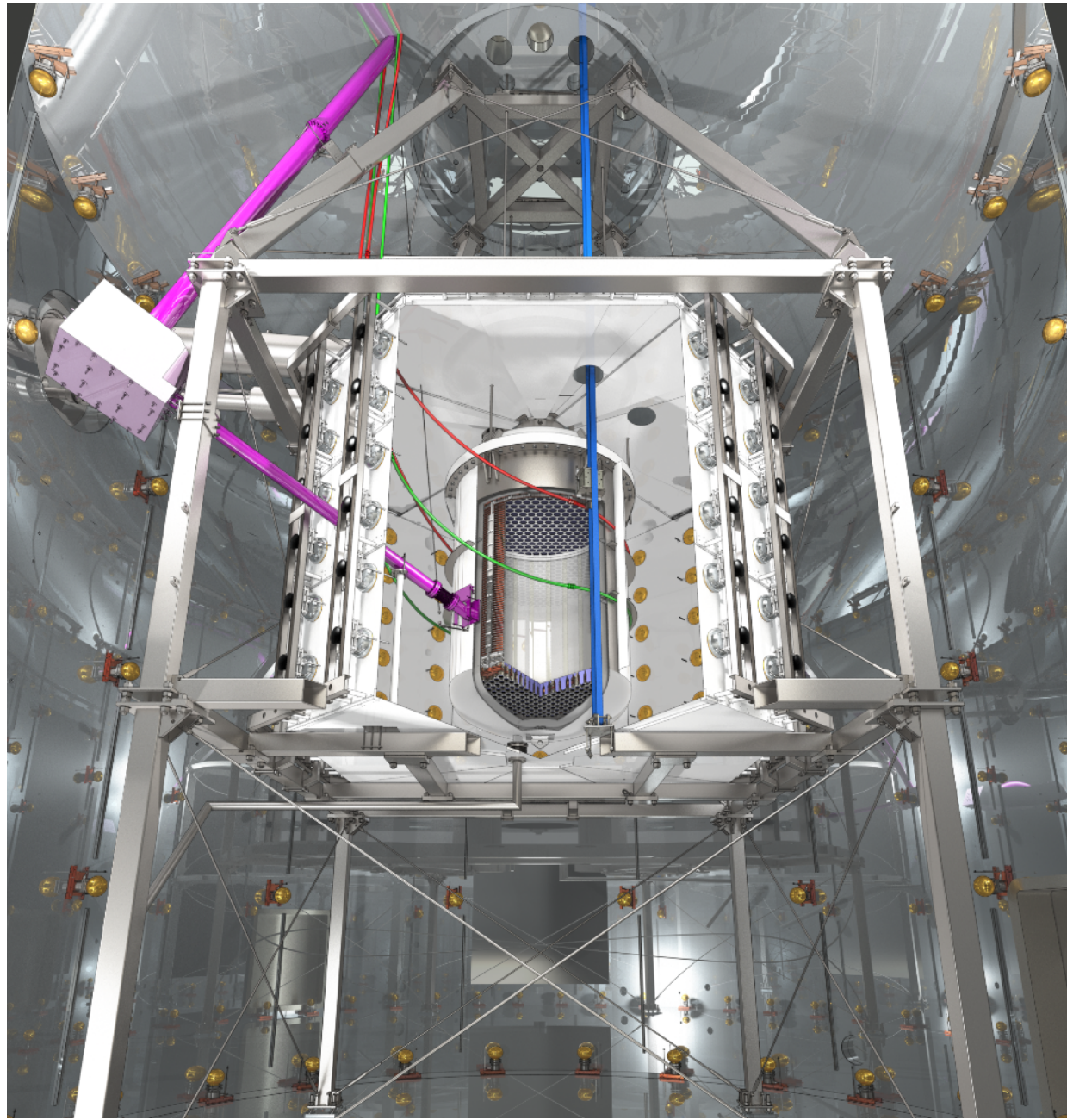
- 電離・励起・熱の割合は電子・原子核反跳で異なる
- 再結合の割合は電離密度に依存し、これも両者で異なる
- $(S2/S1)_{\gamma,e} (ER) > (S2/S1)_{WIMP、中性子} (NR)$**
- WIMPと中性子の区別はnVetoで行う(次ページ)



2311.05320

中性子検出器(nVeto)を用いた中性子の検出原理

7



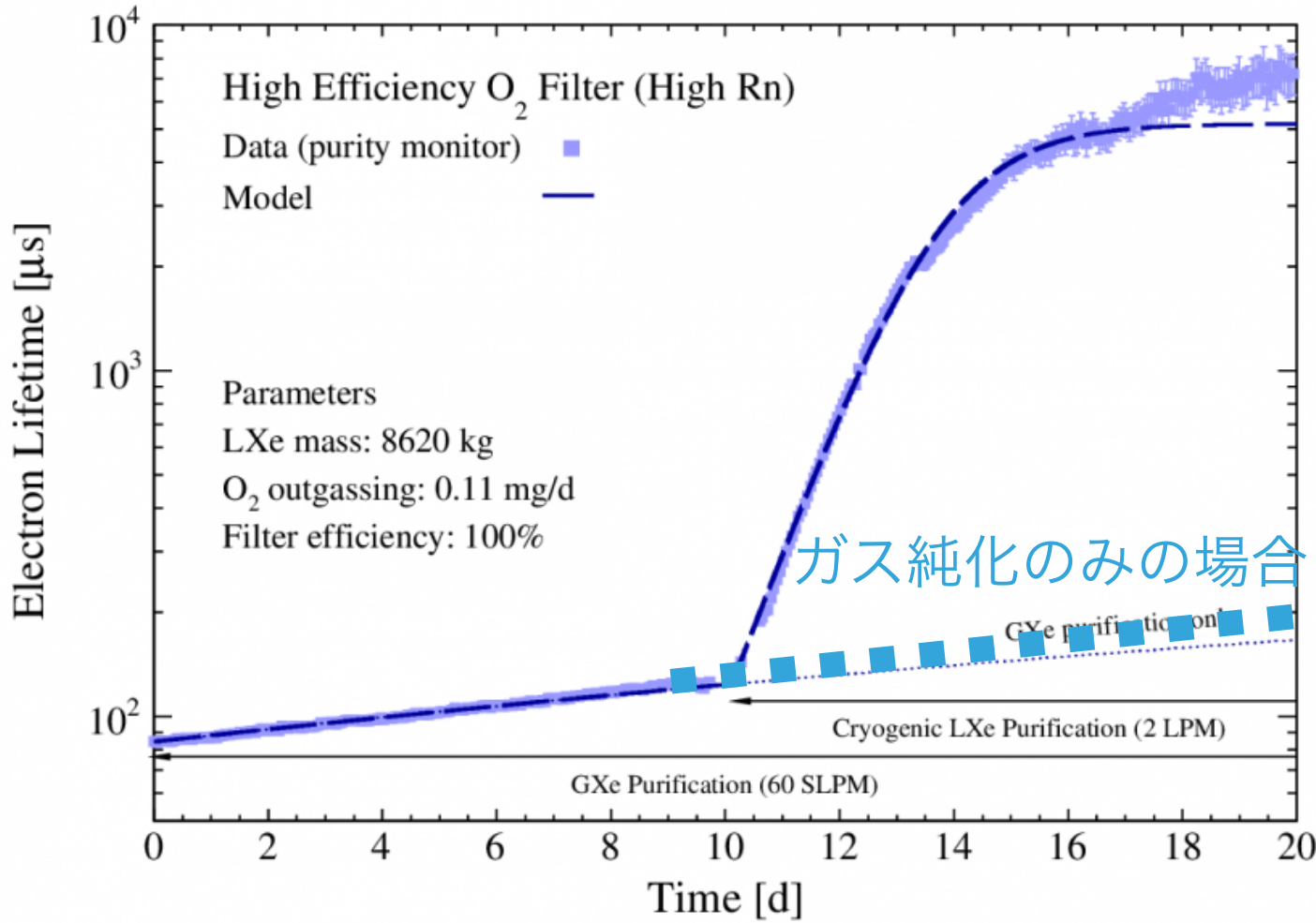
- Gd添加型水チェレンコフ検出器:
 - ・ EGADS-SKで確立された技術
 - ・ 目標: Gd質量比0.2% (3.4トンの 硫酸ガドリニウム八水和物 in 700トン純水)
- 反射率約99%のePTFEパネルで効率よくチェレンコフ光を検出
- 120本の8インチPMT (Hamamatsu R5912)でチェレンコフ光を測定
- LED calibrations (PMTゲイン), Laser calibrations (375 nmレーザーによる透過率の測定), 分光系(透過率の測定)
- これまで: 純水で運用



XENONnT実験のこれまでの成果

XENONnT実験のこれまでの成果: 日本の貢献

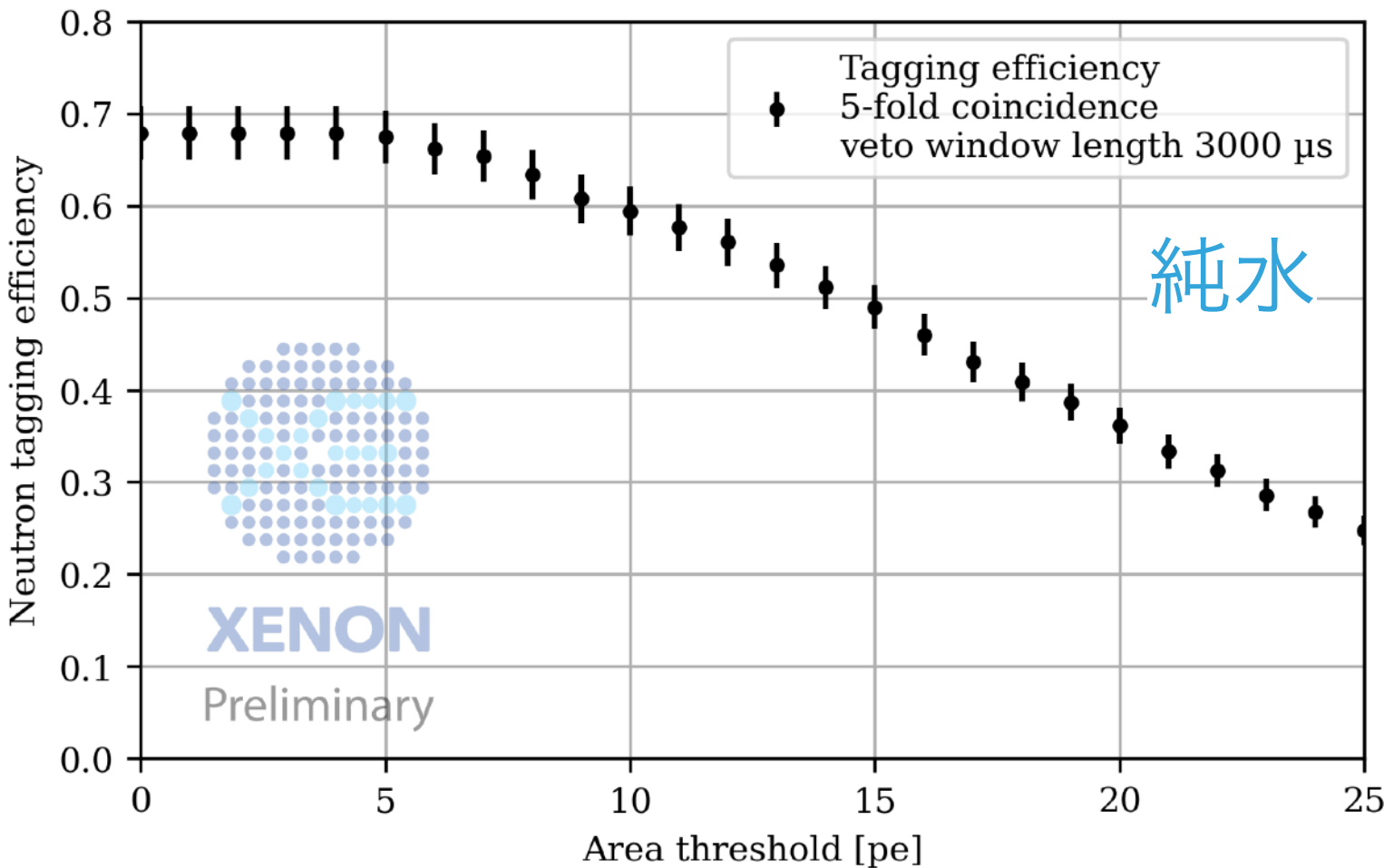
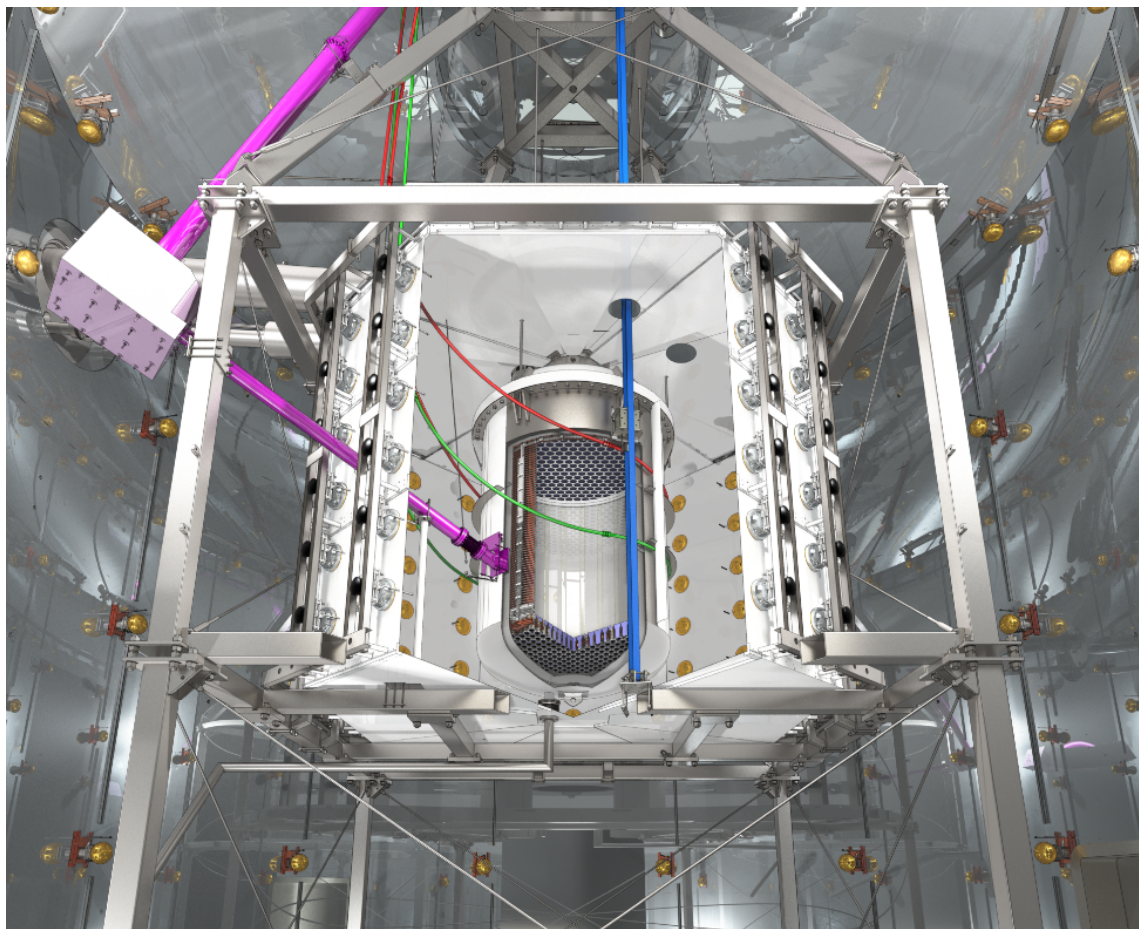
液体キセノン純化装置



• 約18時間で8.5トンのキセノンの純化が可能

	Full TPC drift time	electron lifetime	electrons surviving a full drift length	O ₂	Purification speed
1T	0.67 ms	0.65 ms	30%	~ 1 ppb	0.65 ms in ~3months
nT	2.2 ms	> 10 ms	> 90%	~ 0.02 ppb	5ms in ~5 days

中性子検出器nVeto



• 中性子タグ効率

• AmBeで評価: 4.4 MeVのガンマ線とのコインシデンスを活用

• 68%のタグ効率 @ 600 μs window

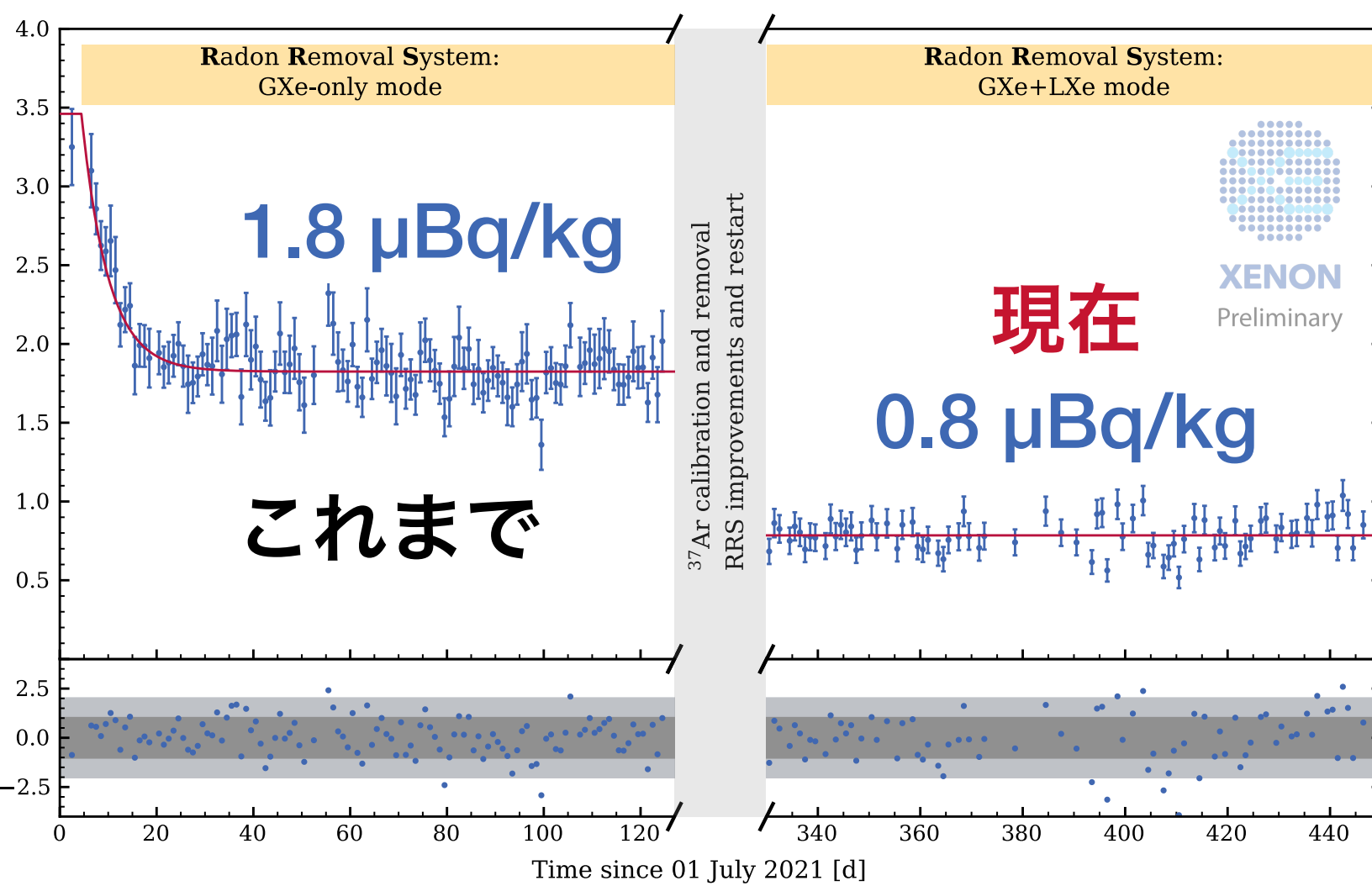
• 純水での中性子タグ効率として世界最高性能を達成

• WIMP解析

• デッドタイムの影響を考慮して250 μs veto window

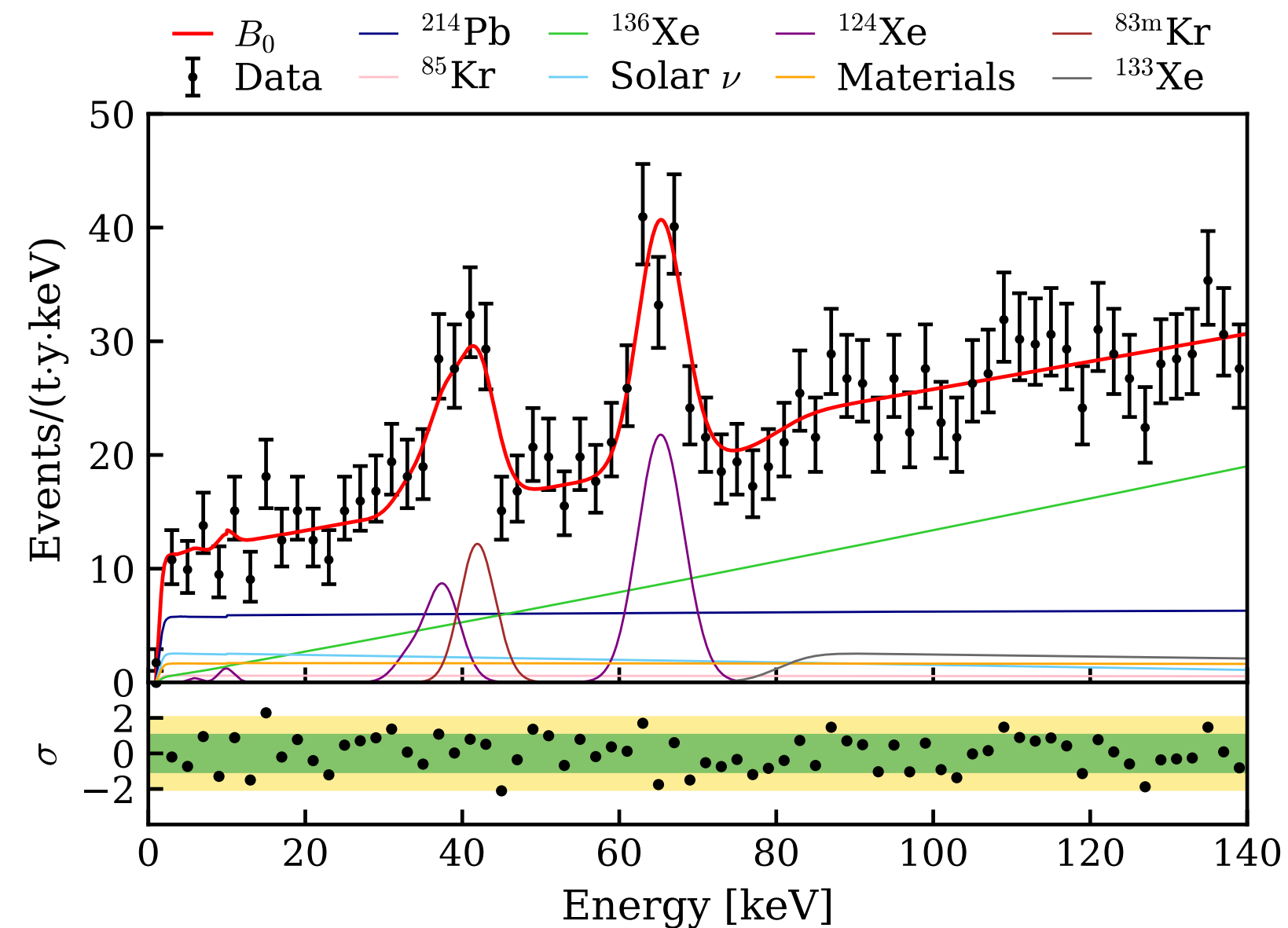
• 53 %のタグ効率

ラドンの削減



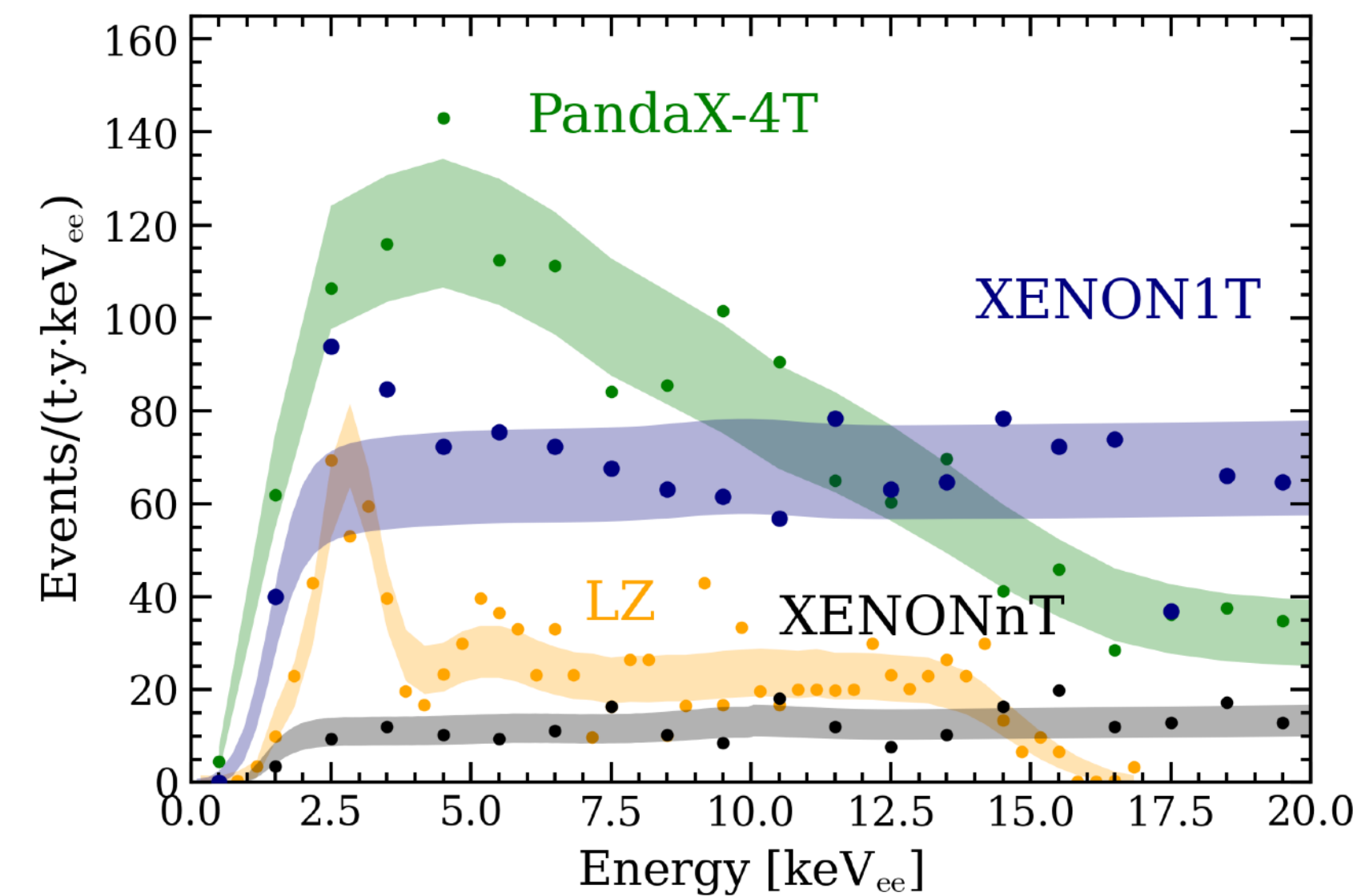
- ・ 蒸留塔を用いた削減
- ・ 初期成果ではGXe中のラドンを除去
 - ・ $1.8 \mu\text{Bq/kg}$ を達成(1Tの1/8)
- ・ 現在はLXe中のラドンを除去
 - ・ $0.8 \mu\text{Bq/kg}$ を達成 ($\text{Rn/Xe} \sim 10^{-25}$)
 - ・ LZ実験の1/4の濃度

電子反跳事象の散乱エネルギー分布



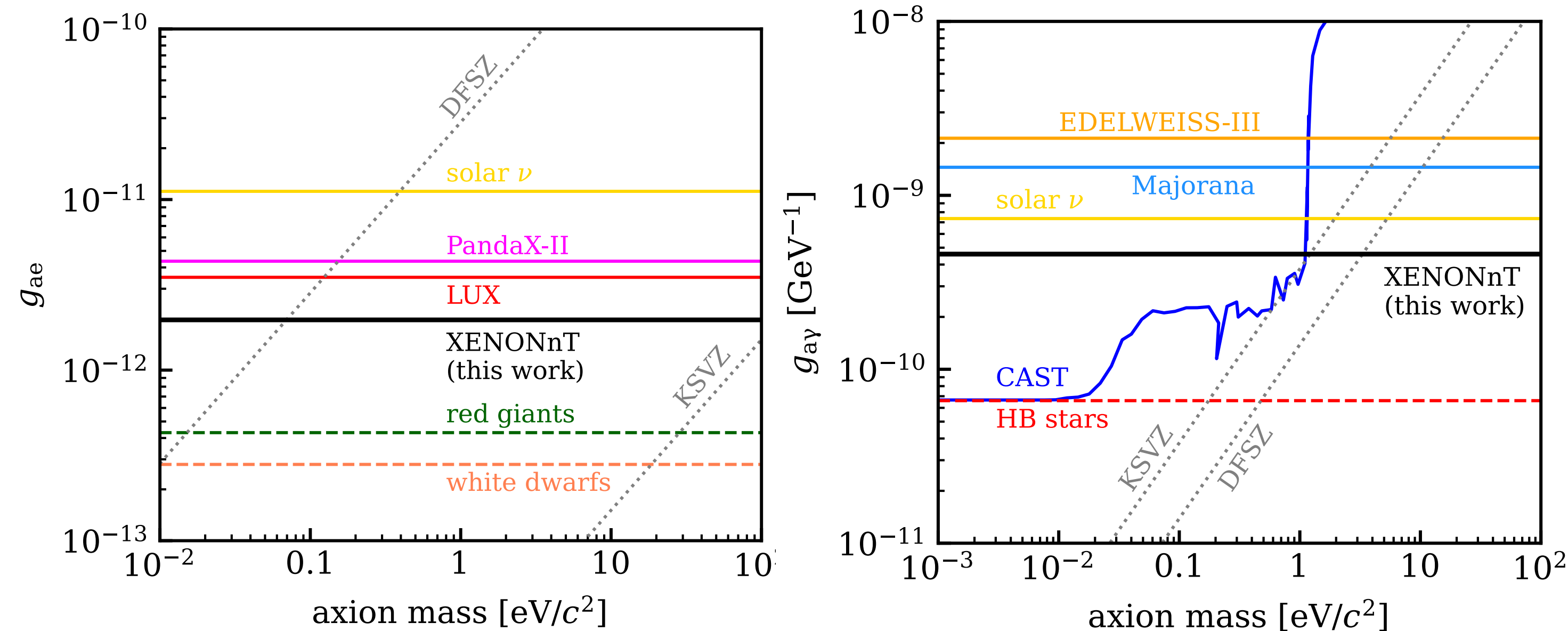
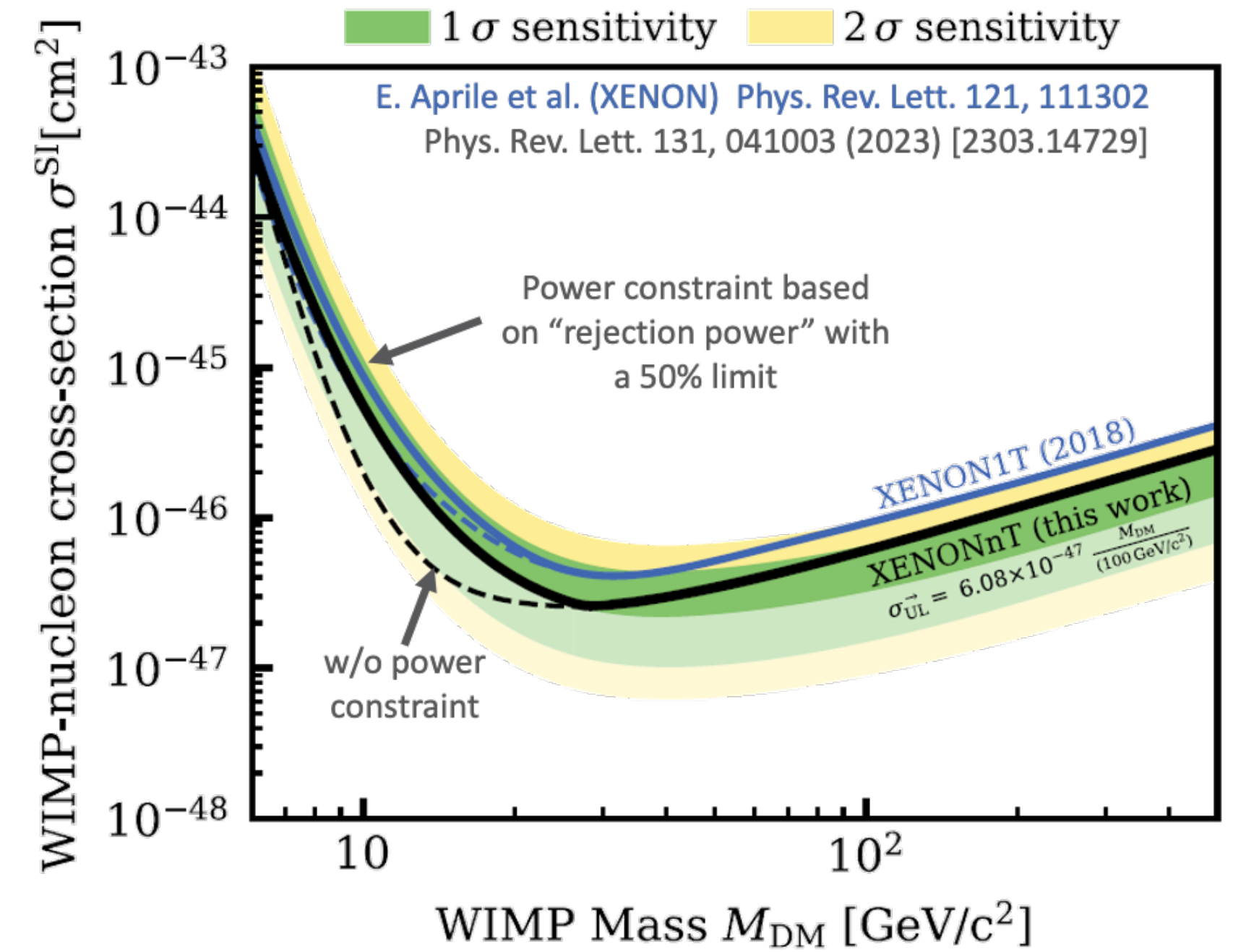
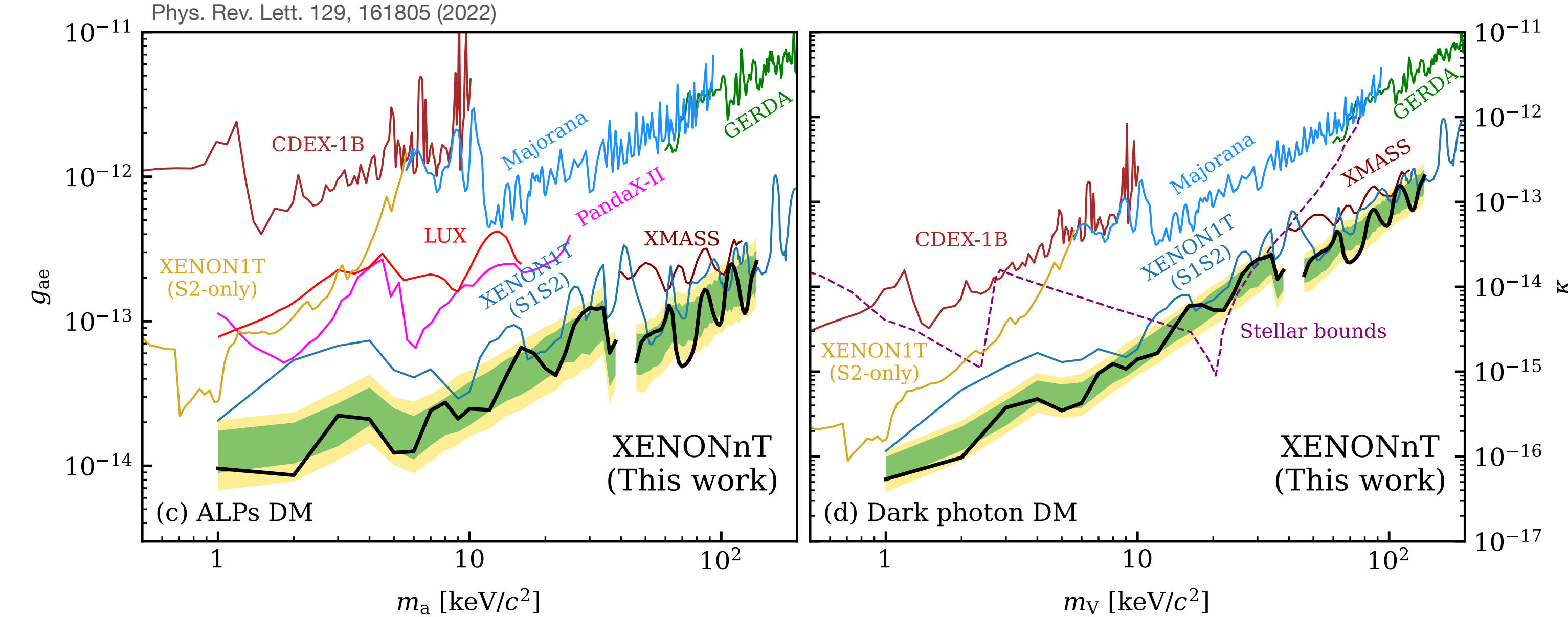
- ・ 主要なBG:
 - ・ 低エネルギー(30 keV以下): ^{214}Pb のベータ崩壊 (太陽ppニュートリノが二番目に大きなBG)
 - ・ 高エネルギー (30 keV以上): ^{136}Xe の二重ベータ崩壊
- ・ BGレート(30 keV以下): (15.8 ± 1.3) 事象/(トン・年・keV)
- ・ 暗黒物質検出器の中で最も電子反跳BGの少ない検出器

他実験との比較



XENONnT実験のこれまでの成果

11



- 97日間の観測で1トン・年の統計を達成
- WIMPの感度に関してはXENON1Tを1.6倍改善
- 電子散乱を起こす暗黒物質(ALP/暗黒光子)やアクシオンに対して世界最高感度の制限



本計画研究の今とこれから

中性子検出器(nVeto)の高感度化: モチベーション

初期成果での中性子BG数: スクリーニングの結果から予想される量よりも**5倍多い**

→ nVetoを用いた中性子BG削減がWIMP発見感度改善の鍵

初期探索ではnVetoは純水(700トン)で運転 (2.2 MeVのガンマ線1本)

→ Gd質量比で0.2%溶かすと、中性子の90%近くがGdに捕獲

→ 合計約8MeVのエネルギーを持ったガンマ線を3-4本放出

WIMP探索BGの内訳 (1トン・年)

BG	ROI
ER	0.87 ± 0.07
Neutron	0.42 ± 0.10
Accidental Coincidence	0.363 ± 0.013
Surface BG	$0.34^{+0.01}_{-0.11}$
Total BG	$1.95^{+0.12}_{-0.16}$
Observation	3

前新学術(地下宇宙)でのSK/EGADSとの連携により

- 3.4 トンの超高純度硫酸 Gd を既に調達済み
- Gdイオンや硫酸イオンは除去せずそれ以外の不純物を除去可能な水純化システムを確立

L. Marti et al., NIMA 959, 163549 (2020)

- Gd質量比で0.2%(350 kgの硫酸ガドリニウム)溶かしたランをスタート (詳細次ページ以降)



中性子検出器(nVeto)の高感度化: Gd水濃度

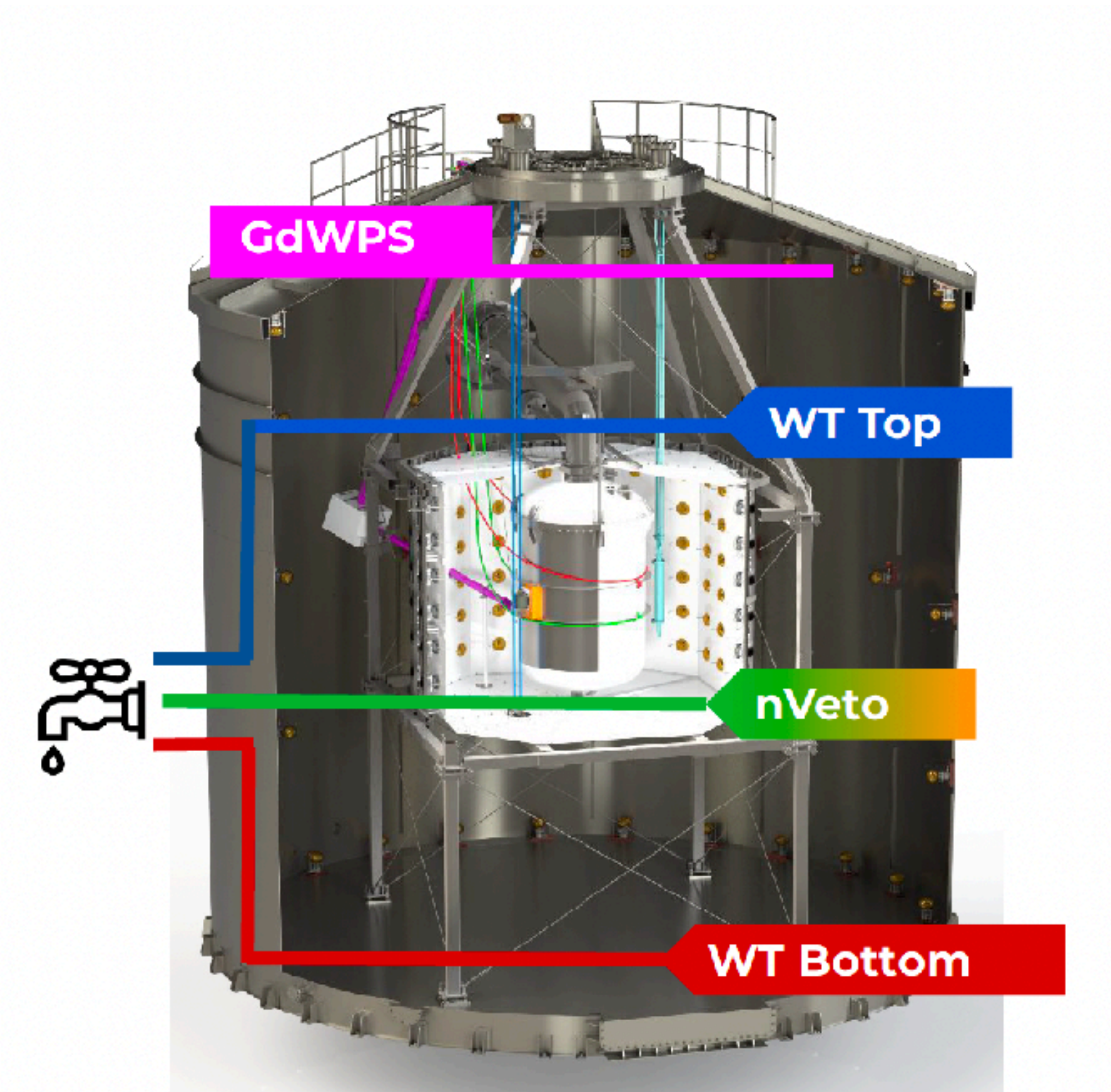
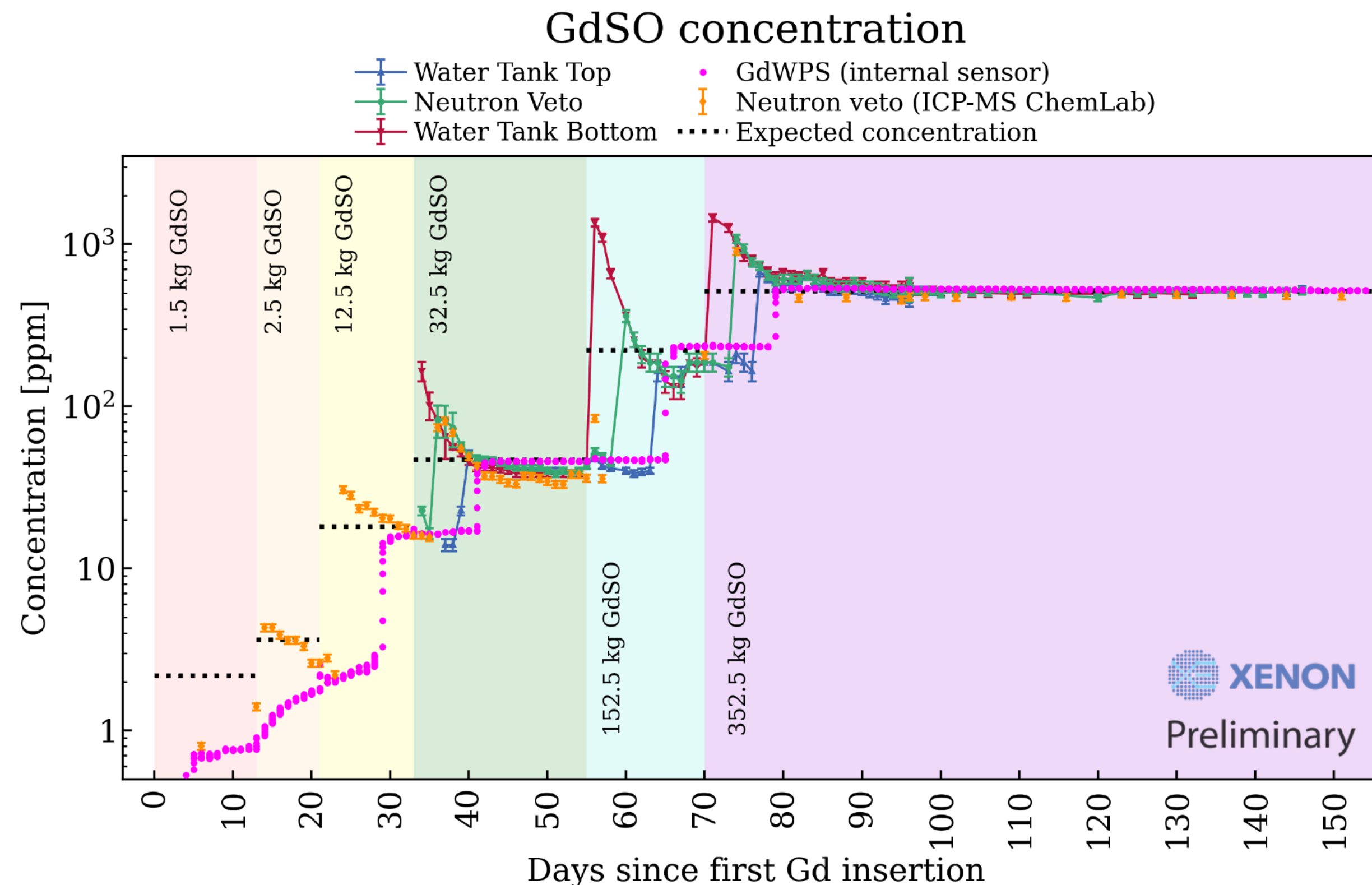
14

- Gd質量比で0.2%(350 kgの硫酸ガドリニウム, 500 ppm)溶かしたランをスタート

- Gd濃度モニタリング

- サンプルング水のICP-MS
- サンプルング水の導電率を測定 (水タンク上部・下部・nVeto)
- オンラインで水の導電率を測定

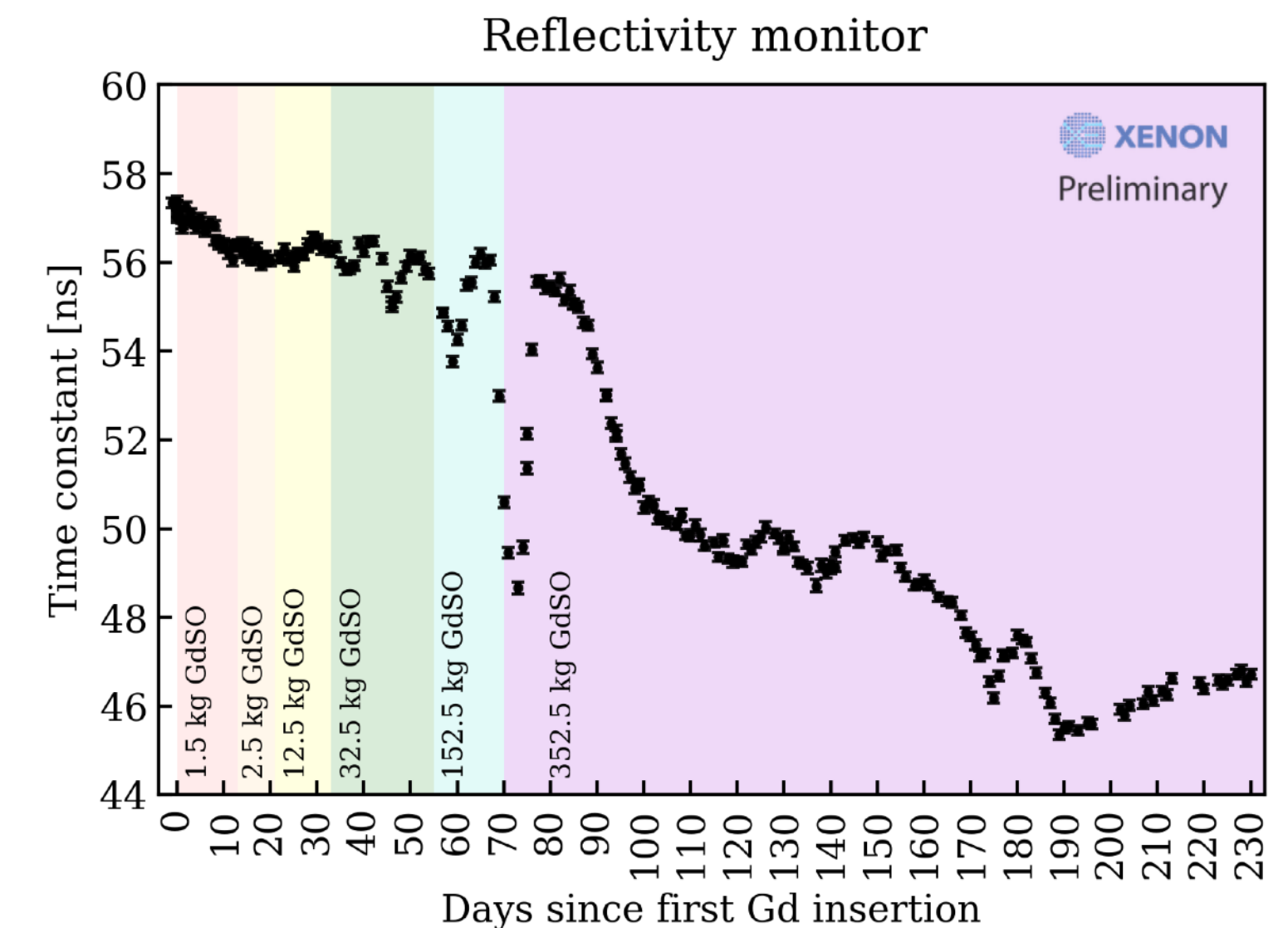
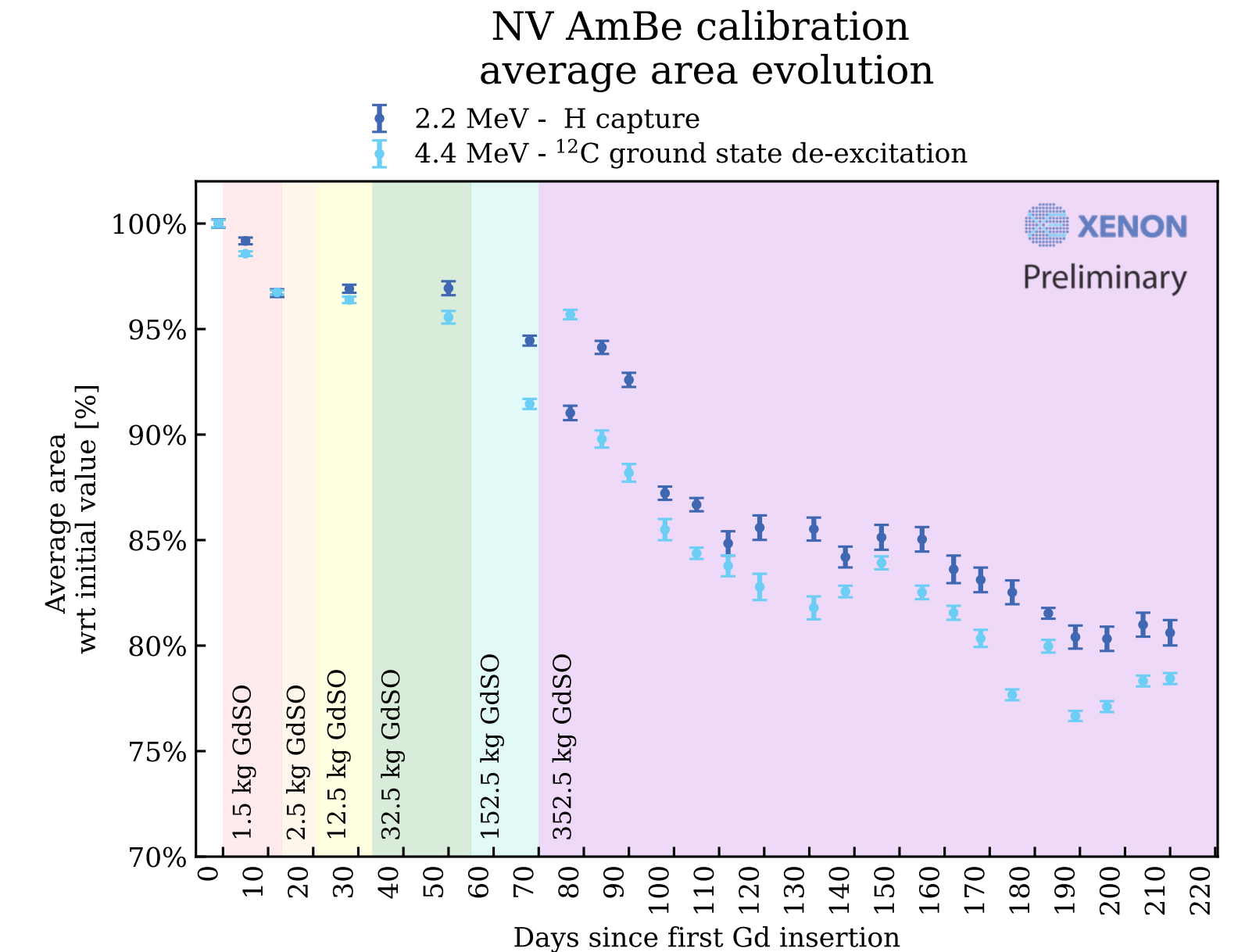
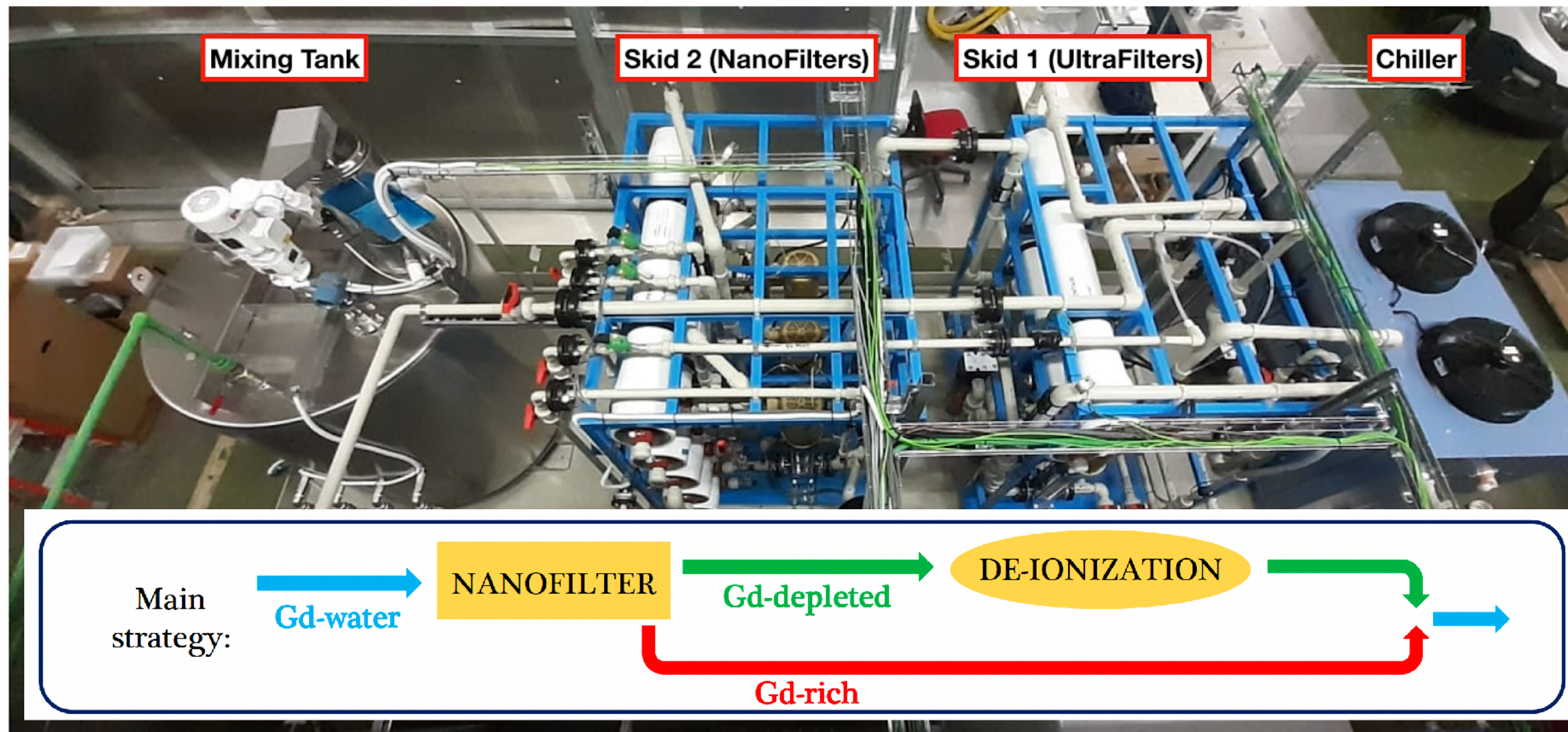
→ 予想の500 ppmで安定



中性子検出器(nVeto)の高感度化: 水純化システム

15

- Gd質量比で0.2%(350 kgの硫酸ガドリニウム)溶かしたランをスタート
- EGADSと同じ水純化システムを確立 L. Marti et al., NIMA 959, 163549 (2020)



• 水純度モニター

- AmBeキャリブレーションでの2.2/4.4 MeVのガンマ線ピークをモニター
→ 純水の場合の80%で安定
- レーザー光(375 nm)の光量 vs 時間分布の時定数をモニター
→ ガンマ線ピークのモニター結果と無矛盾

中性子検出器(nVeto)の高感度化: 中性子検出効率

16

- AmBe線源を用いたキャリブレーション(キセノン容器から1cm)

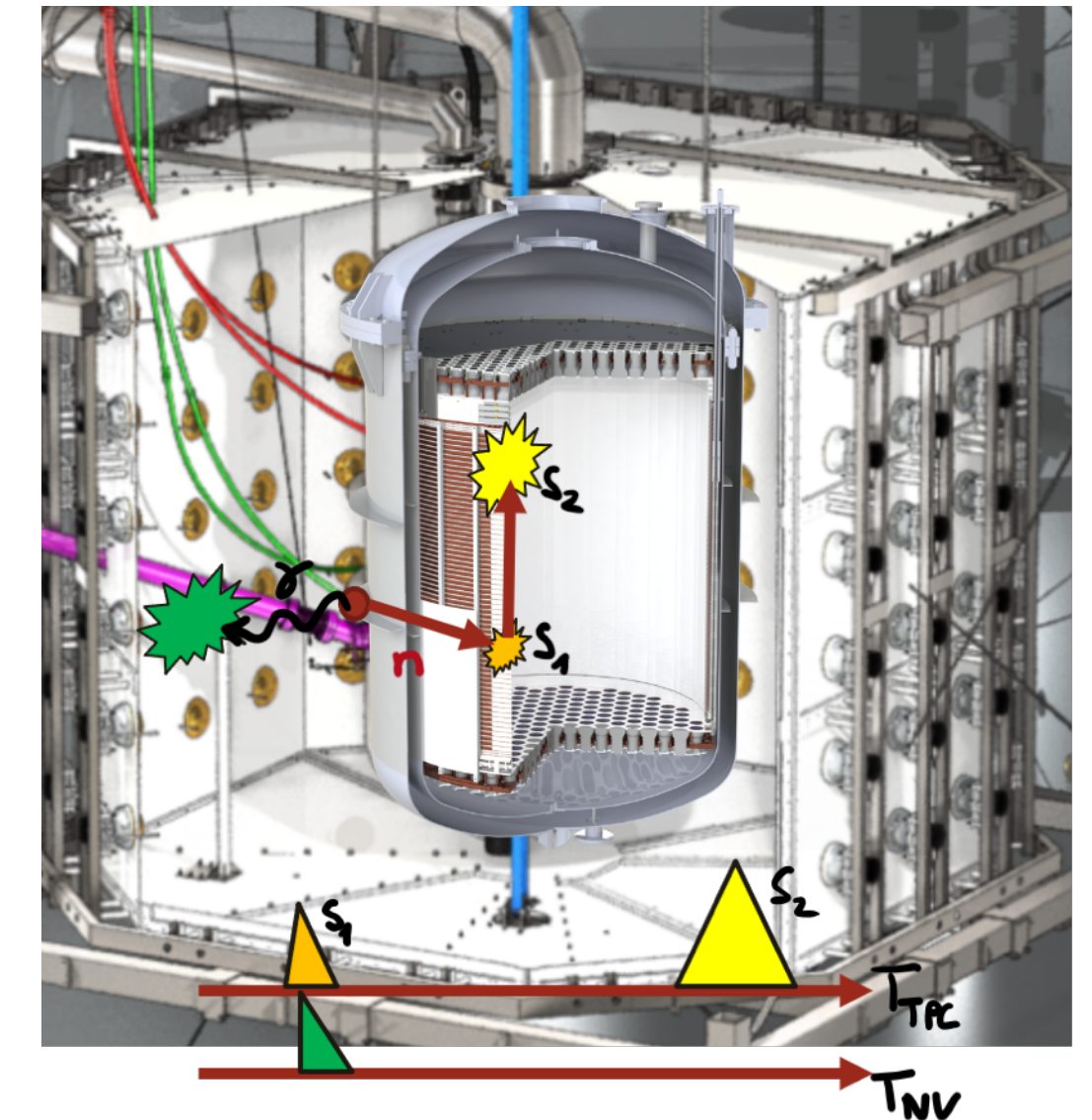
- 0.02%のGd濃度で得られた結果

- 中性子捕獲時間: 163 → 76 μsec へ短縮

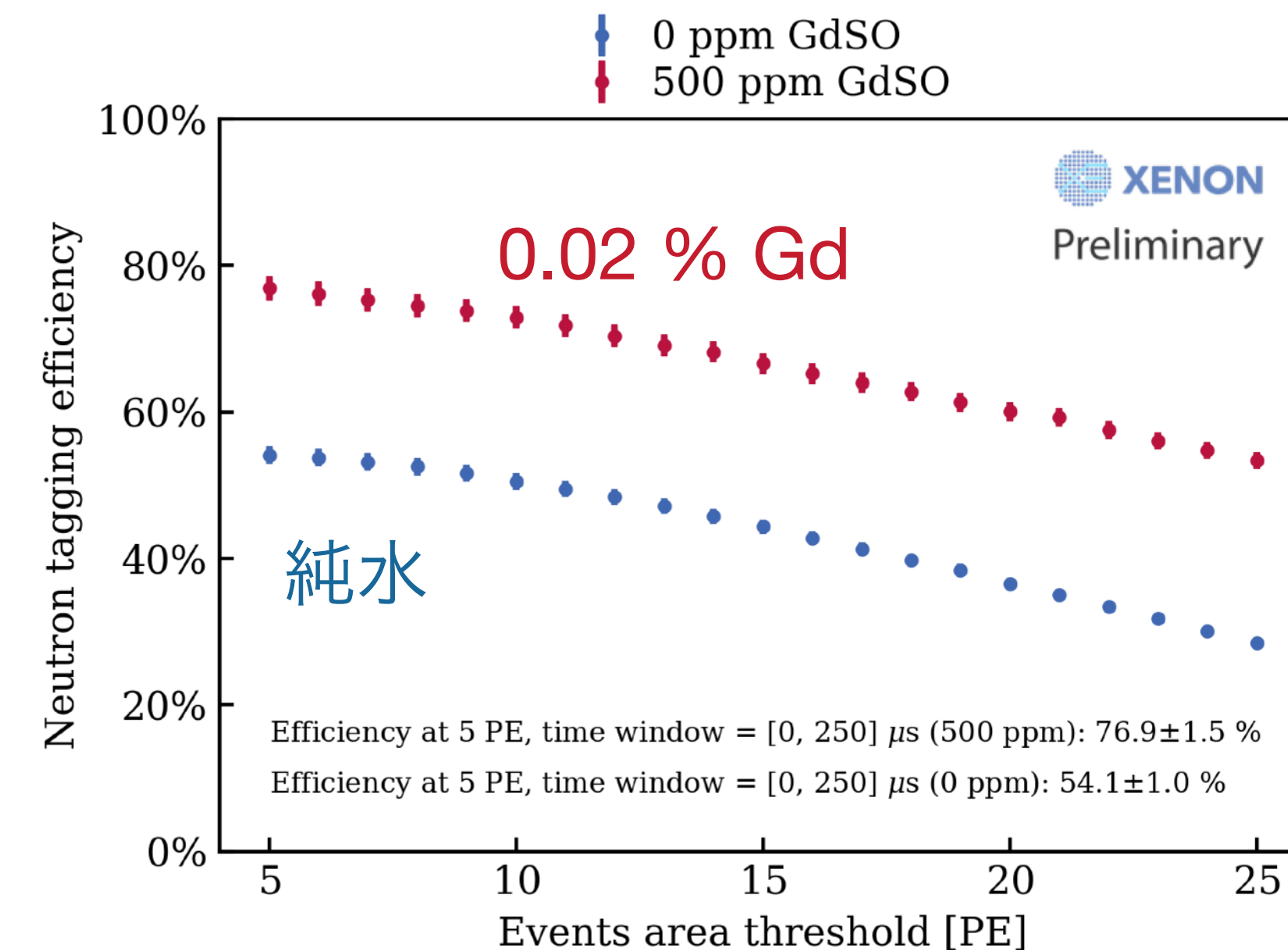
- 中性子捕獲由来のガンマ線信号量増加

→ 中性子タグ効率: 53 → 77% (中性子BG数を1/2へ低減)

現在もこの環境で観測中

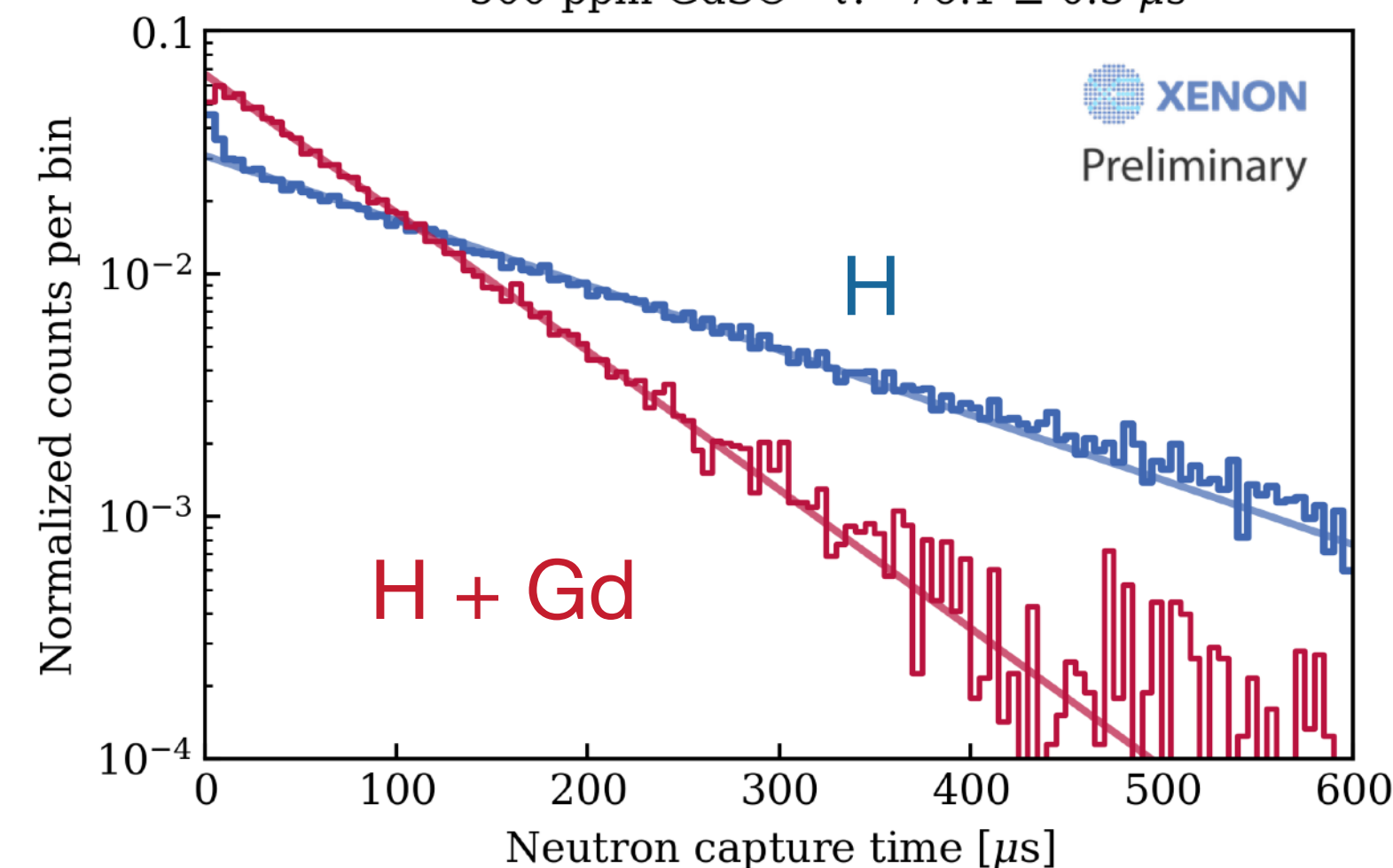


Neutron tagging efficiency



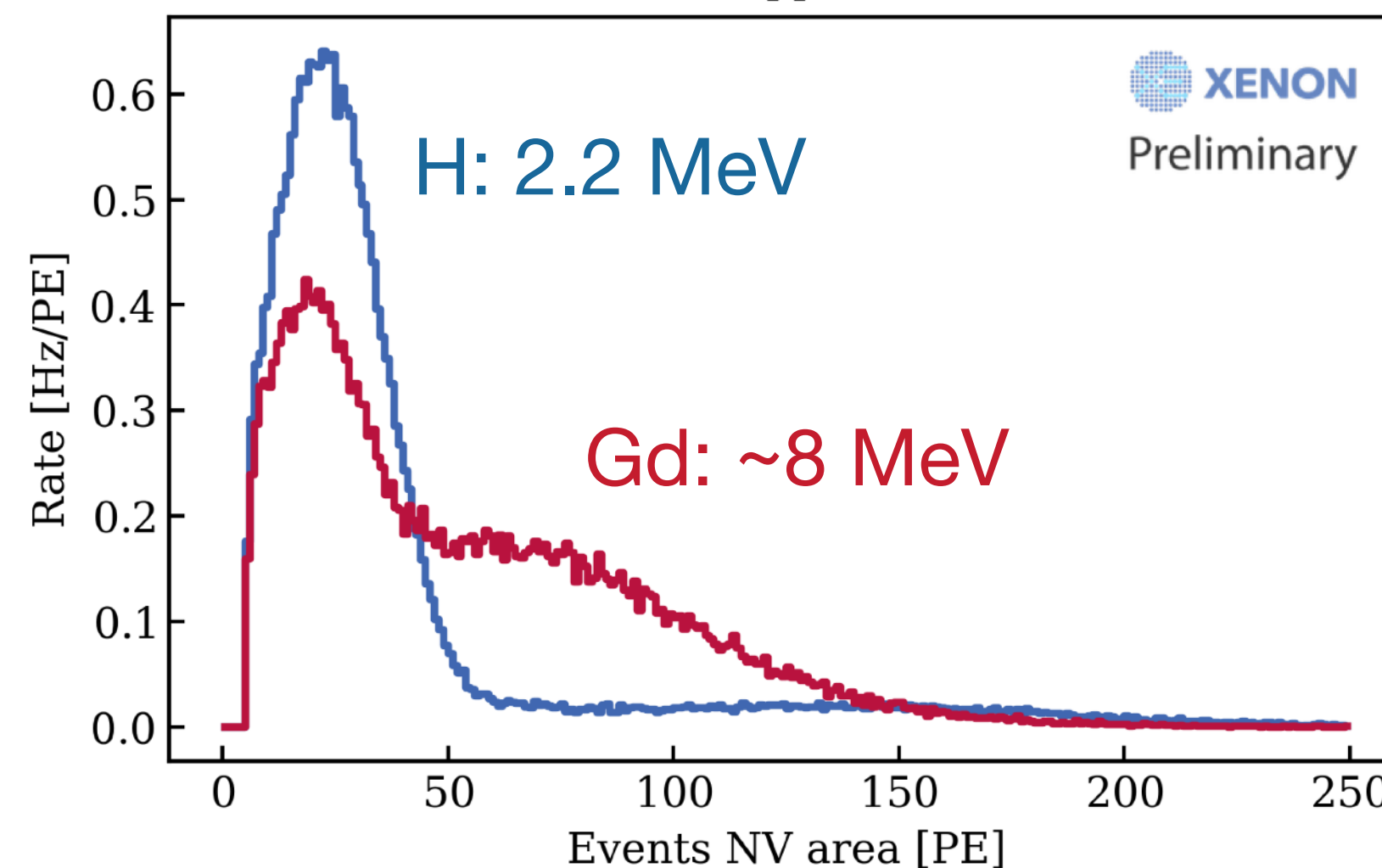
AmBe calibration
Neutron capture in Gd-loaded water

— 0 ppm GdSO - τ : $162.6 \pm 1.0 \mu\text{s}$
— 500 ppm GdSO - τ : $76.1 \pm 0.3 \mu\text{s}$



AmBe calibration
Neutron capture spectrum

— 0 ppm GdSO
— 500 ppm GdSO



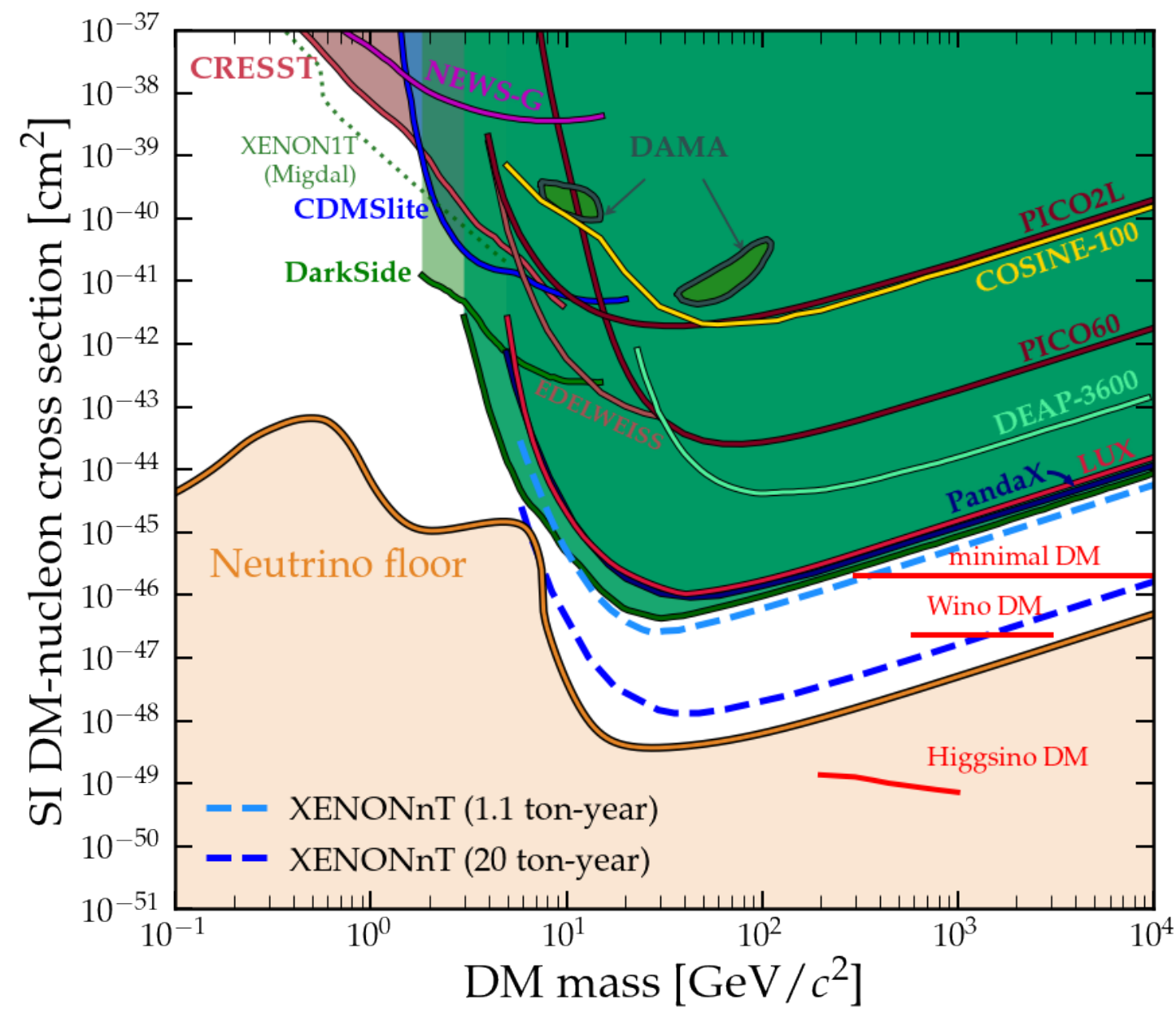
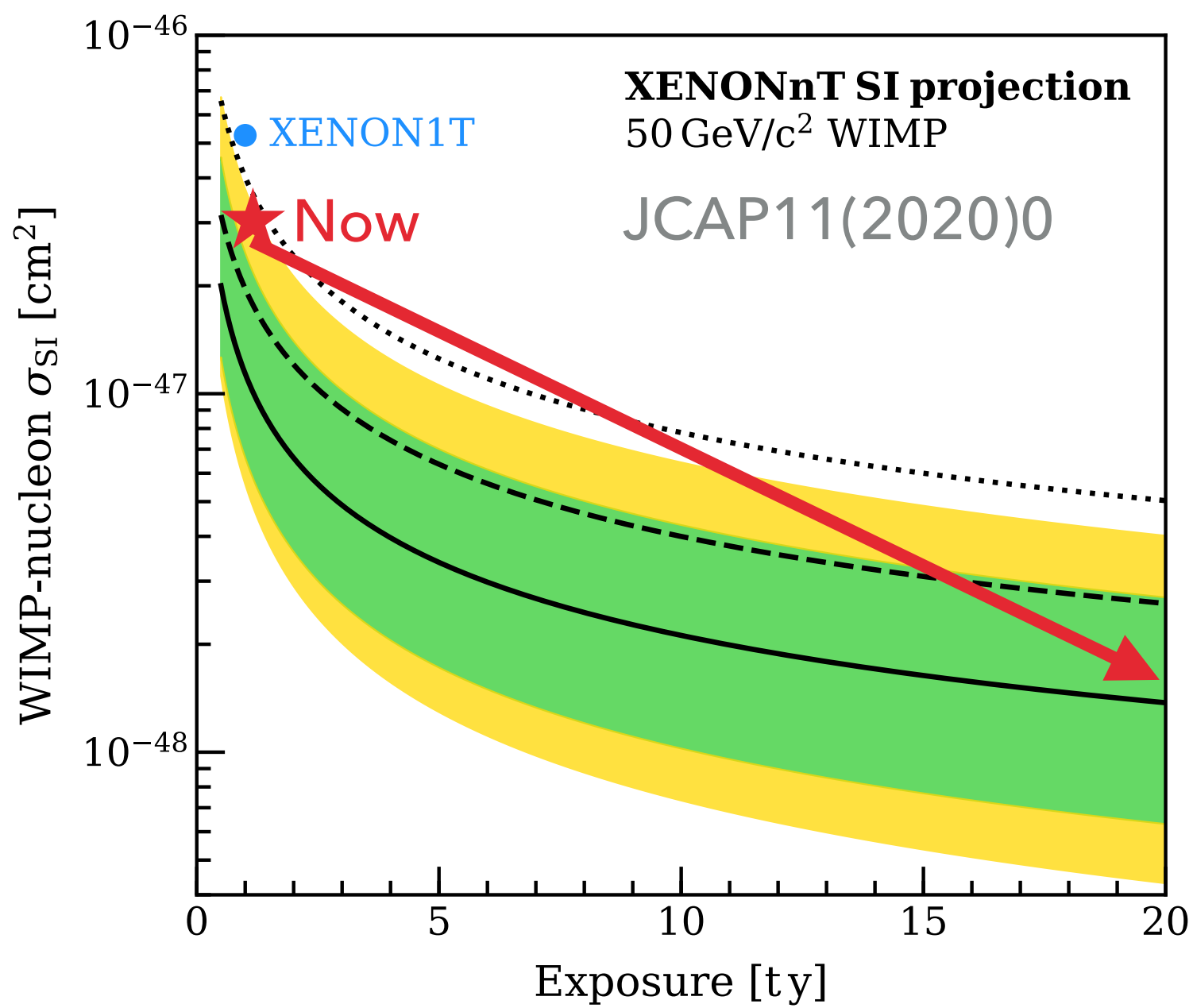
XENONnT実験の目指す成果: WIMP

- 今: Gd濃度0.02% (中性子タグ効率77%)
- **これから(時期未定): Gd濃度を0.2%へ増強し、中性子タグ効率を87%へ改善**
→ **中性子BG数を初期成果の1/4へ削減**
- ラドン(ER BG)のより効率的な排除には、電極の改修(=電場の向上)が必要
(行うかどうかも含めて未定)

- **統計20倍近く貯め、感度を10倍弱向上**
- **Minimal DMモデルは完全に棄却可能**
- **ウィーノDMは1 TeVまで棄却可能**

WIMP探索BGの内訳 (1トン・年)

BG	ROI
ER	0.87 ± 0.07
Neutron	0.42 ± 0.10
Accidental Coincidence	0.363 ± 0.013
Surface BG	$0.34^{+0.01}_{-0.11}$
Total BG	$1.95^{+0.12}_{-0.16}$
Observation	3





Neutrinoless Double β decay
($0\nu\beta\beta$) in ^{136}Xe

2 Neutrinos Double Electron Capture
($2\nu\text{DEC}$) in ^{124}Xe

Solar pp Neutrinos
with Enhanced Magnetic Moment

Solar pp Neutrinos
Elastic Scattering

Supernova (SN) Neutrinos

Solar ^8B Neutrinos CEvNS

ER	2458 keV	Beyond Standard Model
ER	64.3 keV	Standard Model
ER	O(1) keV - O(100) keV	Beyond Standard Model
ER	O(1) keV - O(100) keV	Standard Model
NR	< 10 keV	Standard Model
NR	< 3 keV	Standard Model

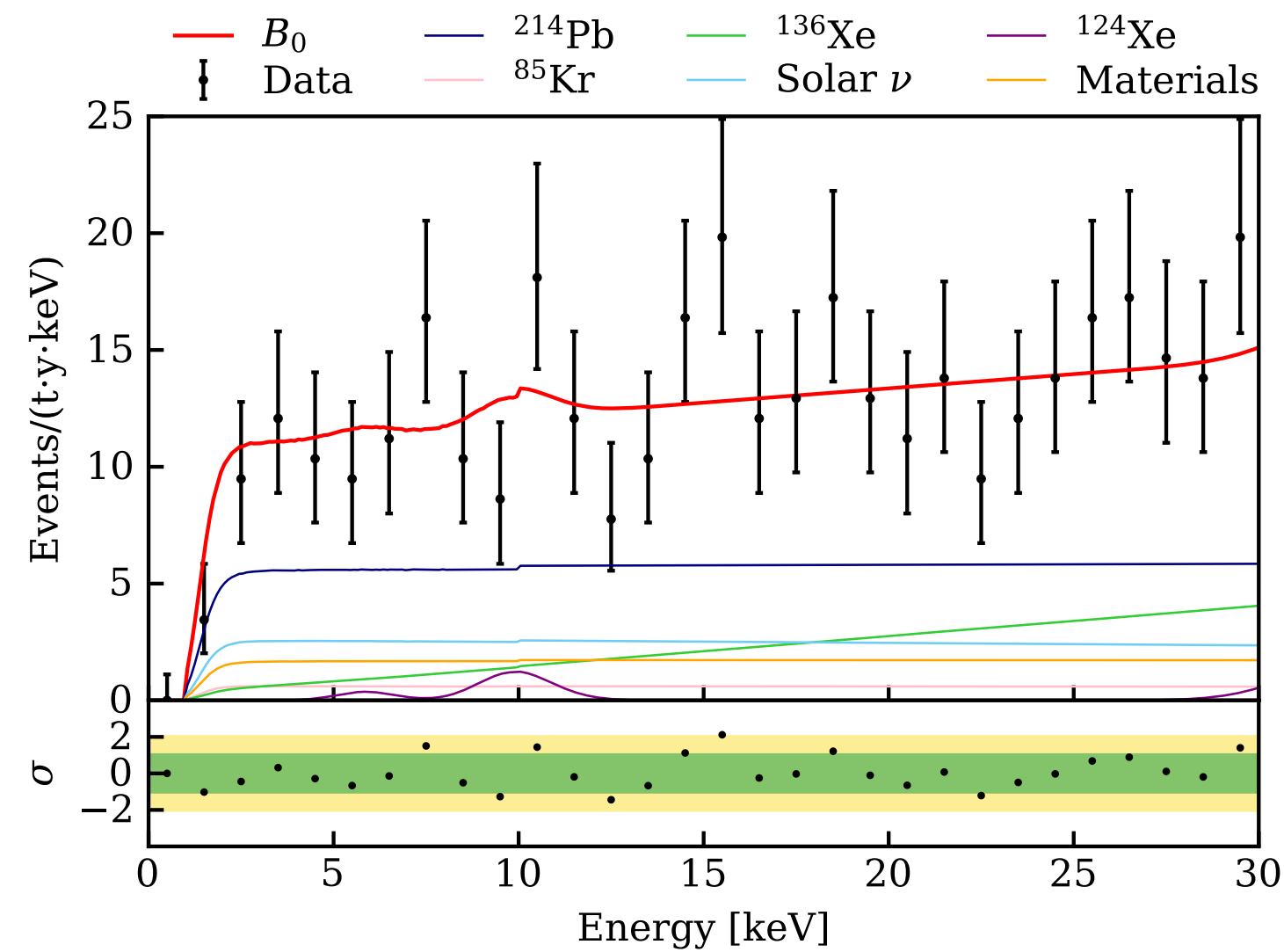
Nature 568, 532–535, 2019



**First
observed in
XENONIT**

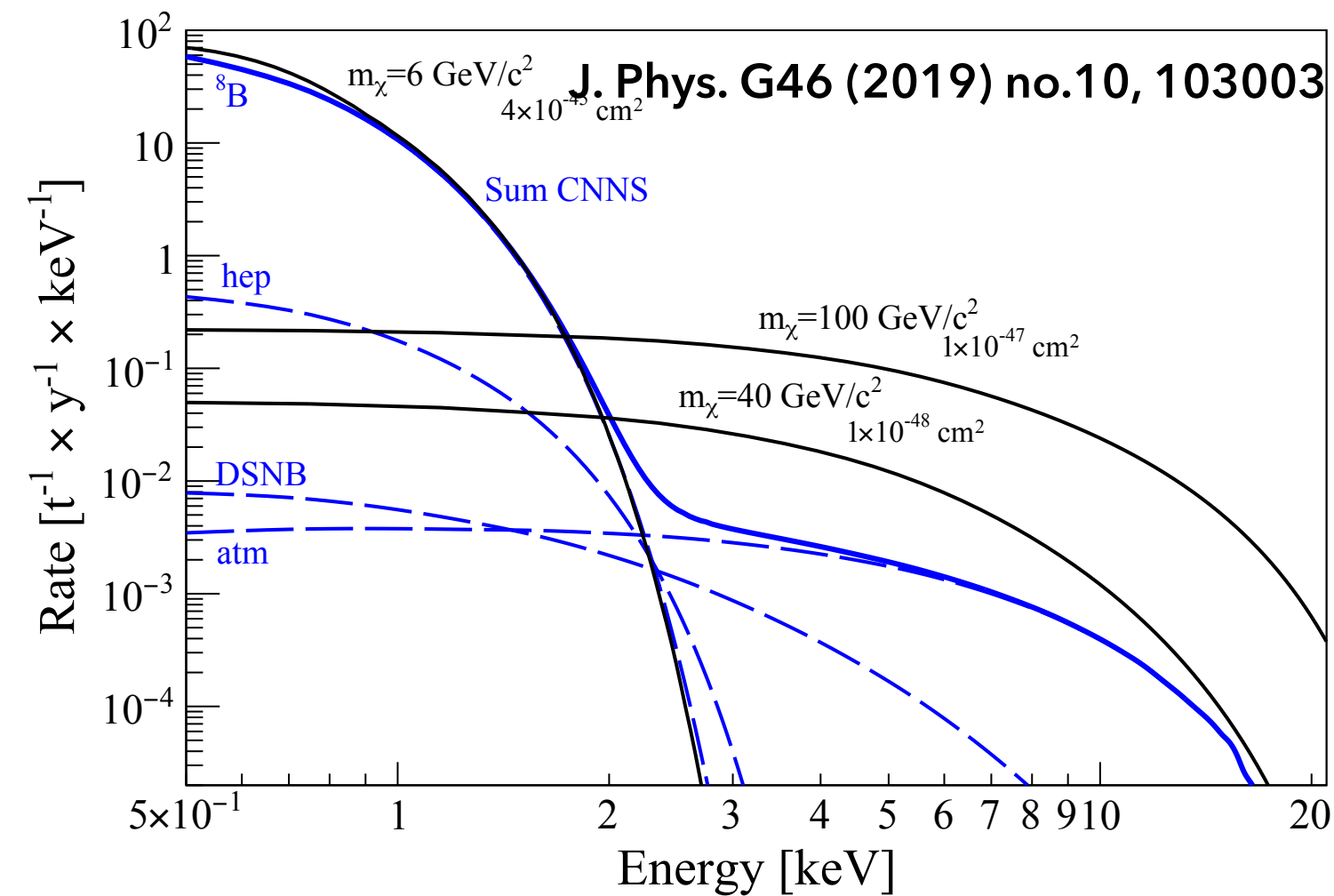
**Longest
half-life ever
measured!**

pp solar neutrino (ER)

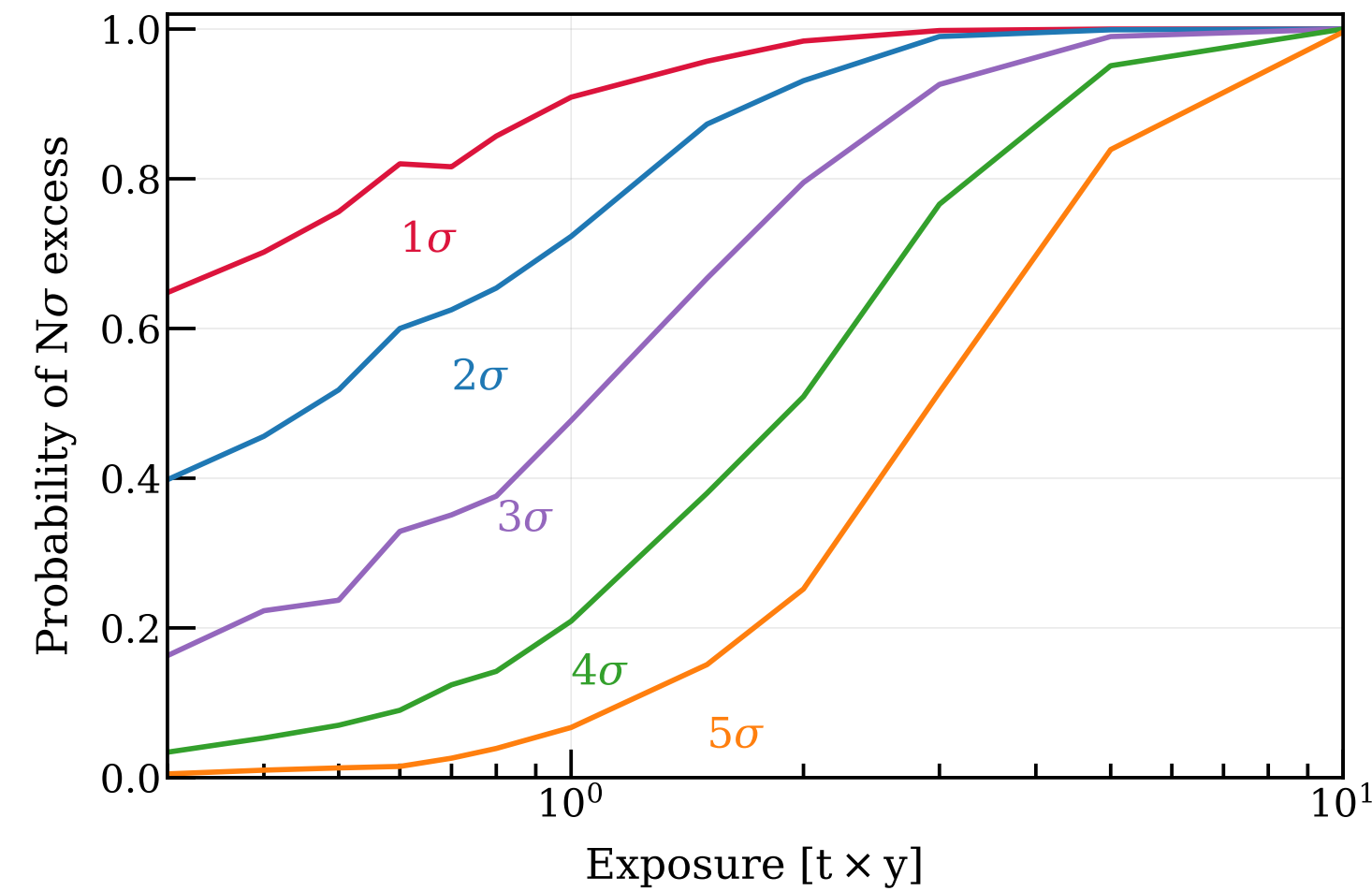


- keVエネルギー領域での初観測
- XENONnTで 3σ 観測を狙う
- 小林が解析チームのリーダー
- ラドン・クリプトンBGの精密評価が鍵

8B solar neutrino (CEvNS)

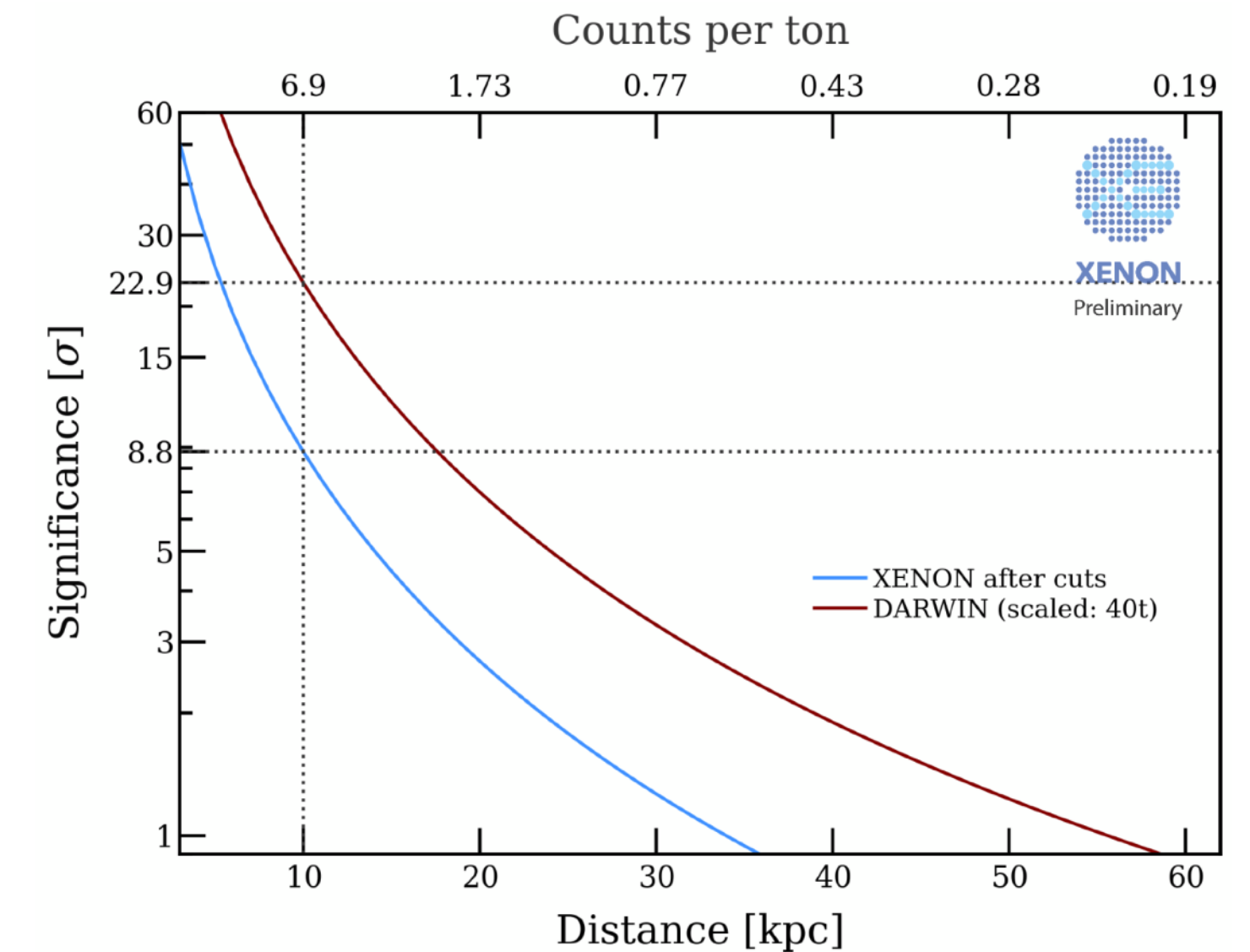


8B XENON1T discovery potential



- コヒーレント散乱での初観測
- XENONnTで 3σ 観測を狙う

Supernova neutrino (CEvNS)



- 10 kpc先の超新星爆発由来の信号:
~45 事象 in ~ 6 s (BG~18事象)
- SK・カムランドと協力

これまで

- XENONnT実験は電子反跳BG数として世界で最も少ない $(15.8 \pm 1.3) \text{ events / (keV} \times \text{t} \times \text{yr)}$ を達成
- 電子と結合する暗黒物質に対して世界最高感度を達成
- WIMPに対してもXENON1Tを1.6倍超える制限を達成
→ ただし、中性子BGが予想よりも5倍多い問題があることが判明

今・これから

- Gd水での運転に不可欠な水純化システム(EGADS/SKとの協力)や透過率モニタリングシステムを確立
- Gd質量比0.02 % (目標0.2 %)での観測を開始: 中性子BG数は1/2へ低減
- 統計を20倍程度貯め、WIMPの発券感度を10倍弱向上する
- 低エネルギー領域でのニュートリノ天文学へも貢献 (pp/8B 太陽ニュートリノ探索が現在最もホット)

