



# B02: 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

研究代表者 風間慎吾 (名古屋大学)  
研究分担者 Kai Martens (IPMU)  
安部 航 (ICRR)  
中村正吾 (名古屋大学)  
小林雅俊 (名古屋大学)  
森山茂栄 (ICRR)

2025年6月25日  
学術変革「地下稀事象」領域研究会@東京大学駒場キャンパス

# 液体キセノンTPCを用いた暗黒物質の検出原理

2

## 検出原理

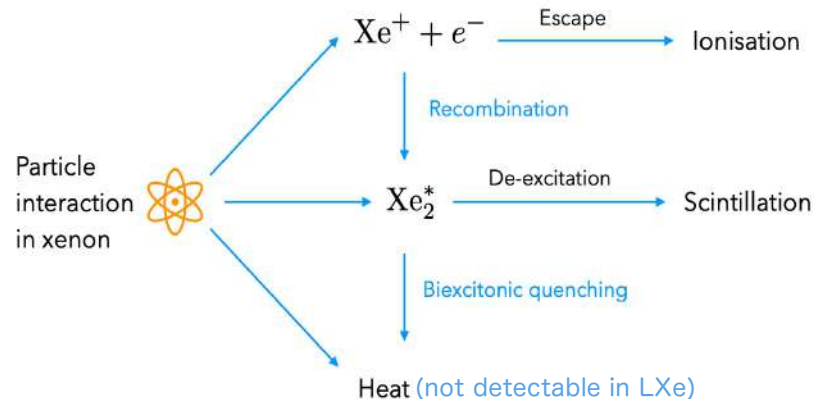
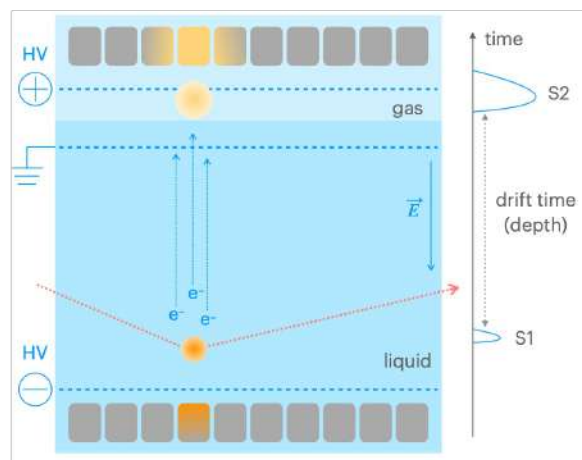
- ・暗黒物質がキセノン原子核と相互作用し、シンチ光と電子が生成
  - ・シンチ光(S1)は直ちに光センサー(PMT)で検出
- ・電子は印加された電場によりガス相にドリフト
  - ・一部はキセノンイオンと再結合しシンチ光(S1)に寄与
- ・他の電子は液体からガス相に抽出され、ガス中で比例蛍光(S2)を生成

## 粒子識別

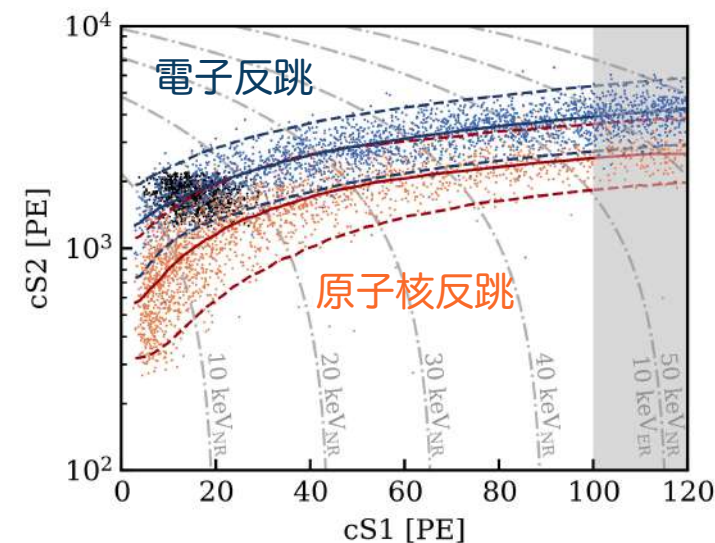
- ・電離・励起・熱の割合は電子・原子核反跳で異なる
- ・再結合の割合は電離密度に依存し、両者で異なる

$r, e$  (ER)の(S2/S1) > WIMPや中性子 (NR)の(S2/S1)

- ・この識別能力は印加電場の値に強く依存

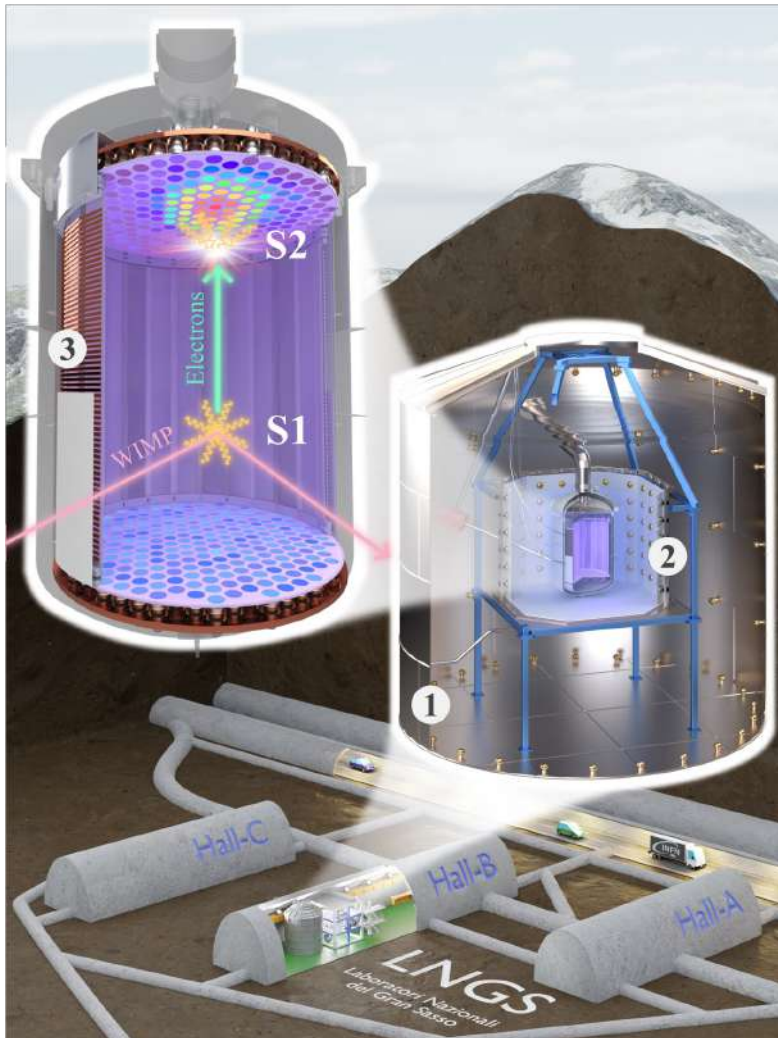


[2311.05320](#)



# XENONnT検出器

3



**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**

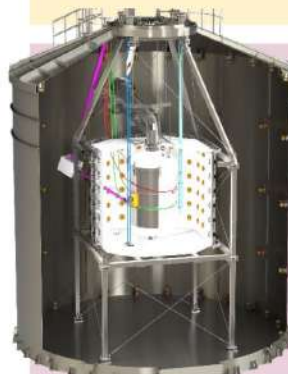
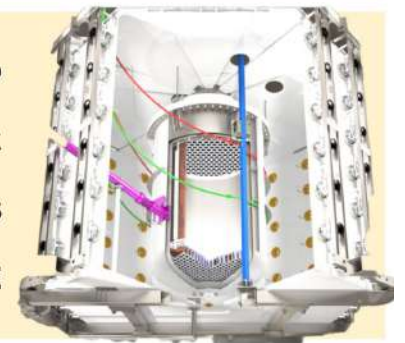
**nVeto**

**(Gd-)Water Cherenkov Neutron Veto**

**33 m<sup>3</sup>** 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**

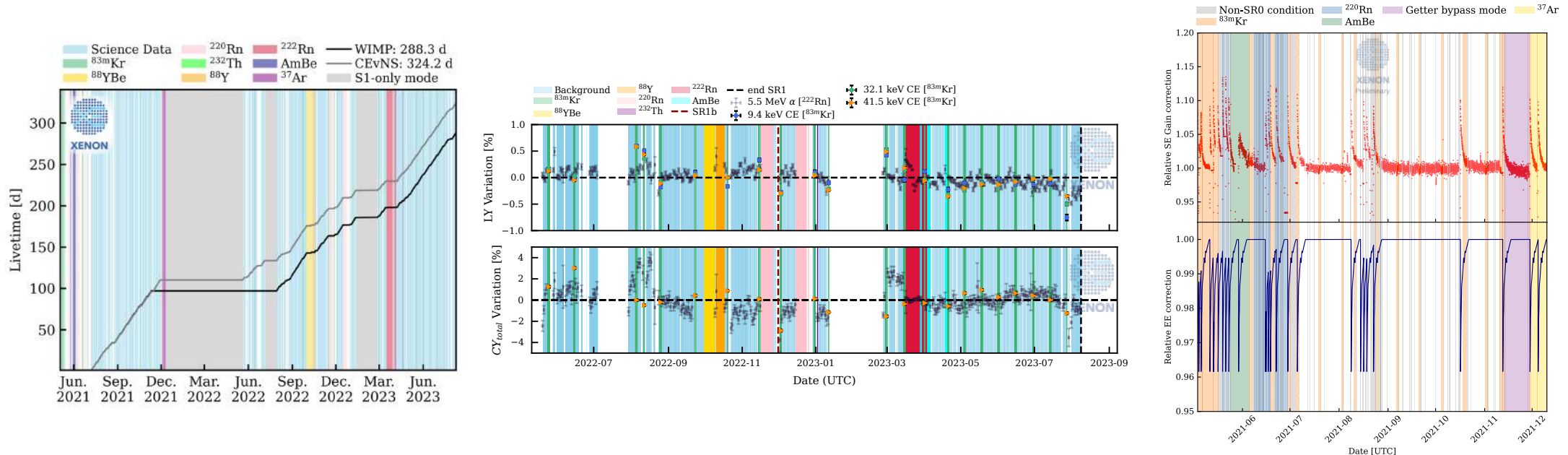
**mVeto**



# XENONnT実験のこれまでの成果

# これまでの観測: Science Run 0 / Run 1 (SR0 + SR1)

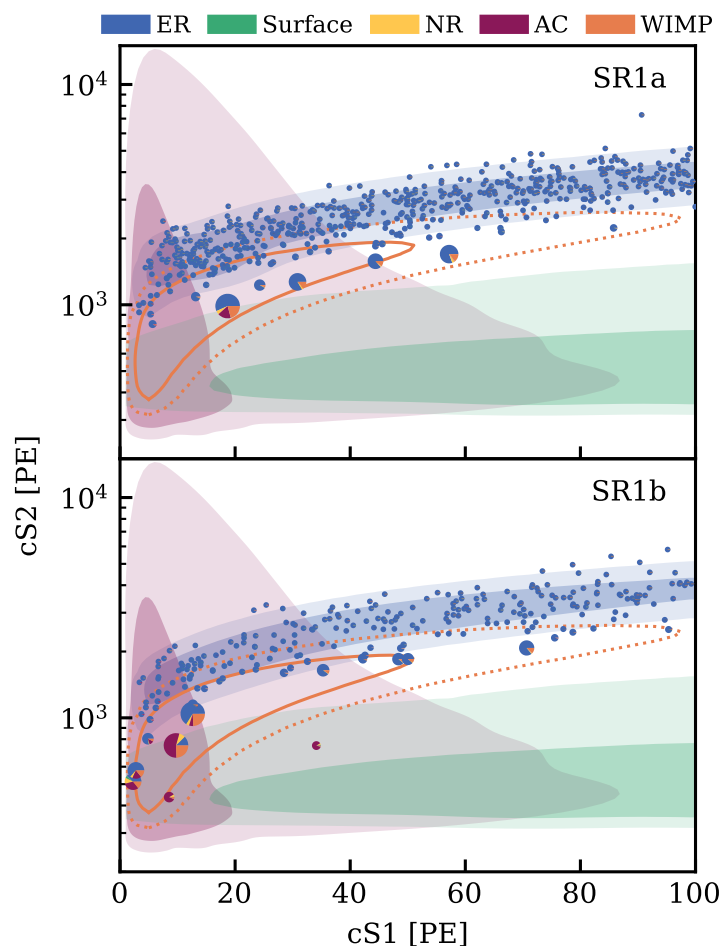
5



- Livetime: 288日 (WIMP探索), 324日 (CEvNS)
- Rn-level:  $1.8 \mu\text{Bq/kg}$  (SR0),  $0.8 \mu\text{Bq/kg}$  (SR1)
- Fiducial Volume:  $\sim 4$ トン
- Drift E-field: 23 V/cm
- Extraction Field: 2.9 kV/cm
- 検出器は安定: light and charge yieldの変動は1-3 %程度
- 局所的な放電に伴って行ったアノード電極のオン・オフにより、single-electron gain・extraction efficiencyなどは時間依存
- SR1後も2025年前半まで観測を行った。  
その後、電極アップグレードのためキセノン回収・Gd水を排水(後述)

# WIMP探索結果

6

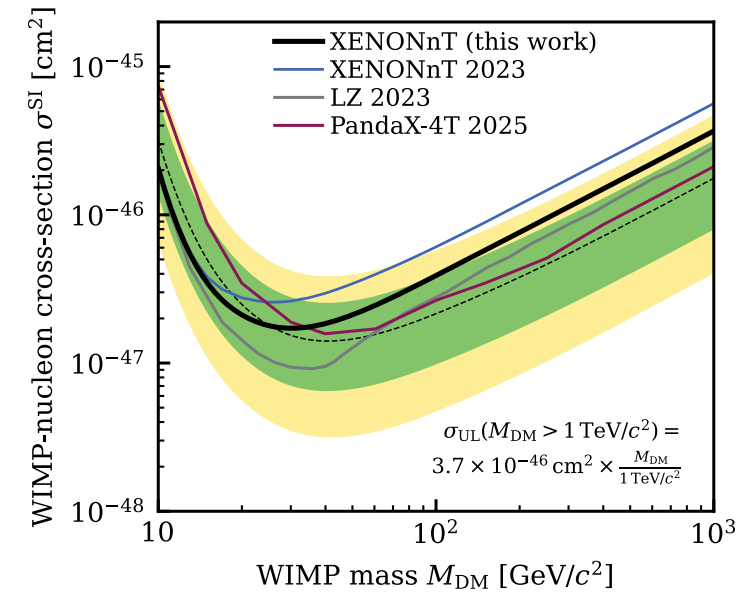
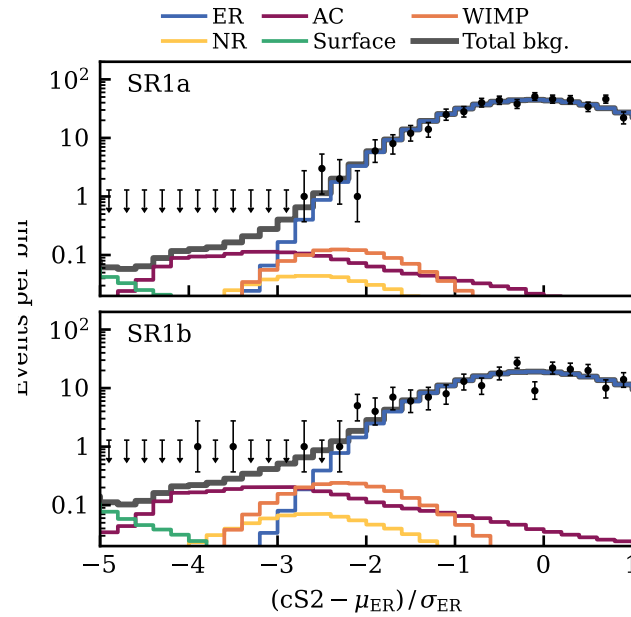
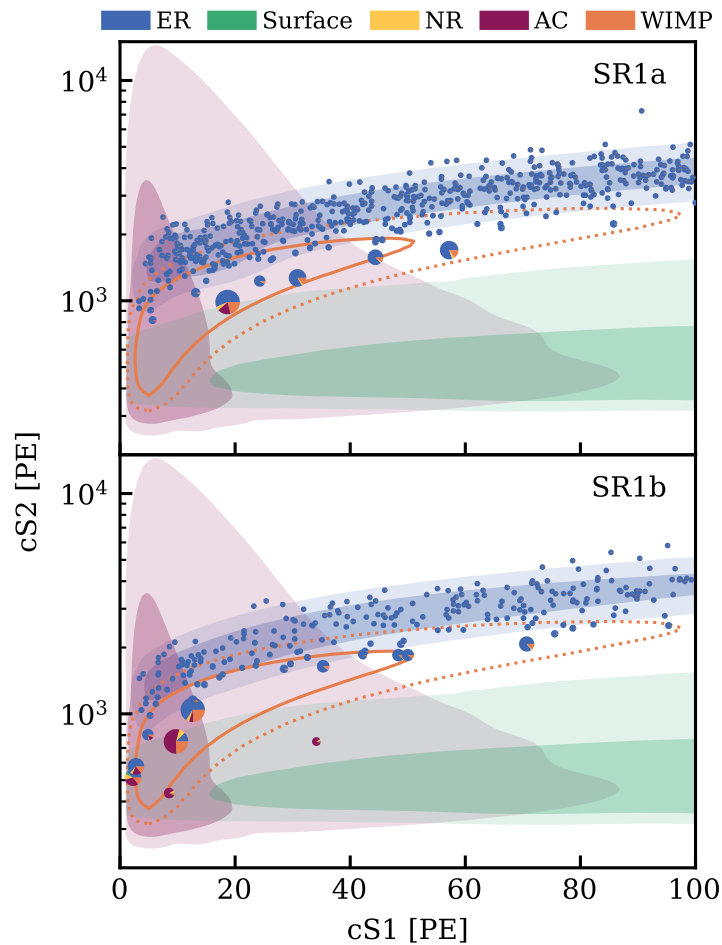


|                          | SR0             |                     | SR1a              |                   | SR1b              |                   |
|--------------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                          | Nominal         | Best fit            | Nominal           | Best fit          | Nominal           | Best fit          |
| ER (flat)                | 134             | $136 \pm 12$        | $430 \pm 30$      | $450 \pm 20$      | $151 \pm 11$      | $154 \pm 10$      |
| ER ( $^3\text{H}$ -like) | –               | –                   | 62                | $40 \pm 30$       | 101               | $80^{+18}_{-17}$  |
| ER ( $^{37}\text{Ar}$ )  | –               | –                   | $58 \pm 6$        | $55 \pm 5$        | –                 | –                 |
| Neutron                  | $0.7 \pm 0.3$   | $0.6 \pm 0.3$       | $0.47 \pm 0.19$   | $0.45 \pm 0.19$   | $0.7 \pm 0.3$     | $0.7 \pm 0.3$     |
| CE $\nu$ NS (solar)      | $0.16 \pm 0.05$ | $0.16 \pm 0.05$     | $0.010 \pm 0.003$ | $0.010 \pm 0.003$ | $0.019 \pm 0.006$ | $0.019 \pm 0.006$ |
| CE $\nu$ NS (atm.+DSNB)  | $0.04 \pm 0.02$ | $0.04 \pm 0.02$     | $0.024 \pm 0.012$ | $0.024 \pm 0.012$ | $0.05 \pm 0.02$   | $0.05 \pm 0.02$   |
| AC                       | $4.3 \pm 0.9$   | $4.4^{+0.9}_{-0.8}$ | $2.12 \pm 0.18$   | $2.10 \pm 0.18$   | $3.8 \pm 0.3$     | $3.8 \pm 0.3$     |
| Surface                  | $13 \pm 3$      | $11 \pm 2$          | $0.43 \pm 0.05$   | $0.42 \pm 0.05$   | $0.77 \pm 0.09$   | $0.76 \pm 0.09$   |
| Total background         | 152             | $152 \pm 12$        | 553               | $550 \pm 20$      | 257               | $239 \pm 15$      |
| WIMP (200 GeV/ $c^2$ )   | –               | 1.8                 | –                 | 1.1               | –                 | 2.1               |
| Observed                 | 152             |                     | 560               |                   | 245               |                   |

- 3.1 トン・年の統計
- SR1a: SR0の後、蒸留前のキセノンガスを誤って導入
  - $^{85}\text{Kr}$ ・ $^{37}\text{Ar}$ ・トリチウムなどの電子反跳BGが増加
- SR1b: SR1a後に蒸留によりKr/Arを除去
  - トリチウムらしきBGは除去できていない  
→ 解析ではトリチウムの $\beta$ 崩壊の分布を用い、Normalization freeでFit

# WIMP探索結果

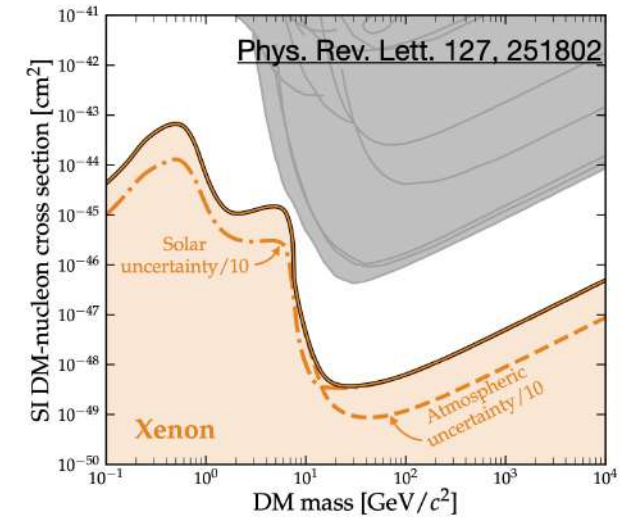
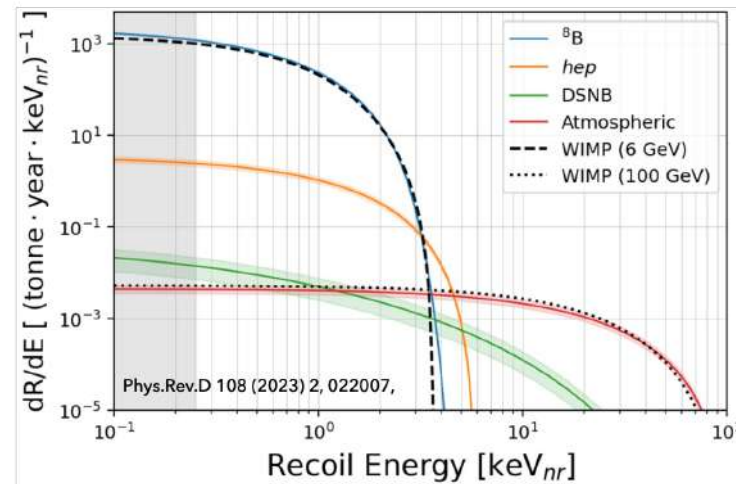
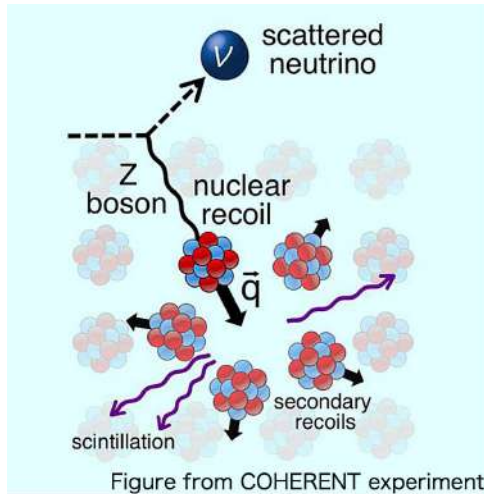
7



- No excess observed in a blind analysis.
- Limit improved from SR0 by a factor of 1.8.
- Best limit:  $1.7 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$  for WIMP mass of 30 GeV

# $^8\text{B}$ ニュートリノのコヒーレント散乱の探索結果

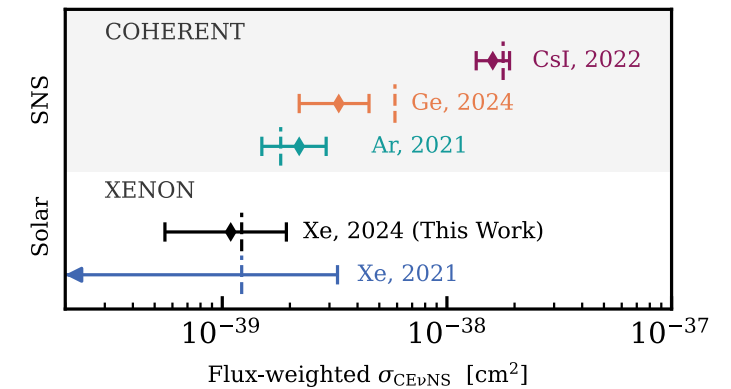
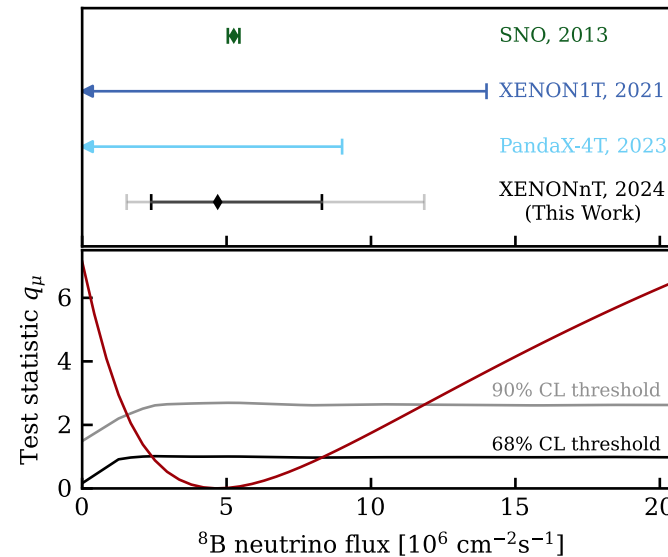
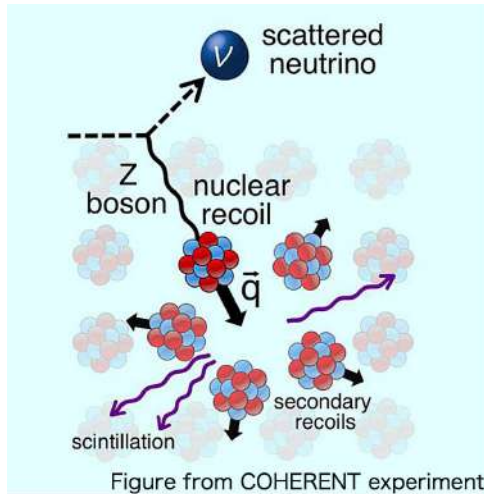
8



- 太陽中心部の核融合に由来したニュートリノ( $^8\text{B}$ ): WIMPと同様に原子核中の核子とコヒーレントに散乱(CEvNS)
- 質量6 GeV, 散乱断面積 $4 \times 10^{-45} \text{cm}^2$ のWIMP信号に類似したスペクトル
  - 「太陽ニュートリノのCEvNSを期待通り検出できた」という事実は暗黒物質直接探索において重要な意味を持つ
- 重い暗黒物質探索では大気ニュートリノが効くがまだこれは見えていない: 発見感度はフラックスの精度に強く依存
  - 統計を得ることでニュートリノと暗黒物質の信号をスペクトル情報を基に分離し詳細に決定することが可能となる

# $^8\text{B}$ ニュートリノのコヒーレント散乱の探索結果

9



- ついに  $^8\text{B}$ 太陽ニュートリノによるcoherent elastic scatteringが XENONとPandaX-4T実験で測定
- 有意度:  $2.73 \sigma$  @ XENONnT
- CEvNSを通じた初の天体物理学的測定となった

# 日本グループの貢献が大きなNeutron Veto Detector

10

- ・SR0 + SR1: 純水で運転
- ・SR2: 0.02%のGd濃度で運転

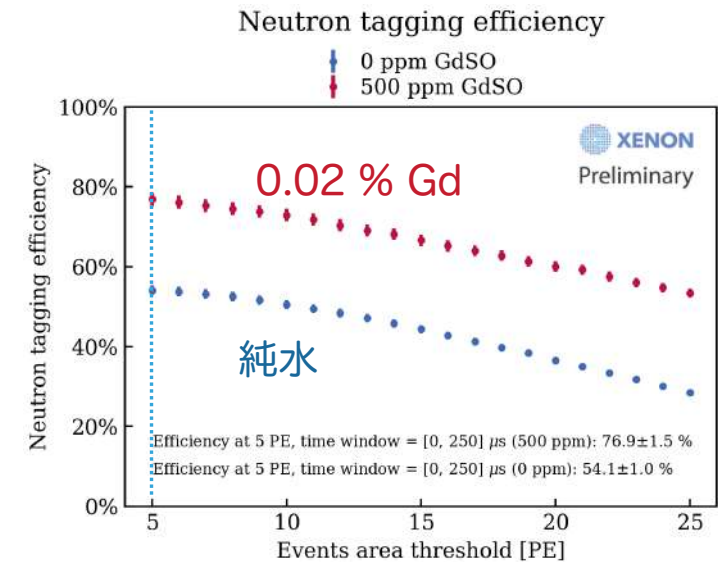
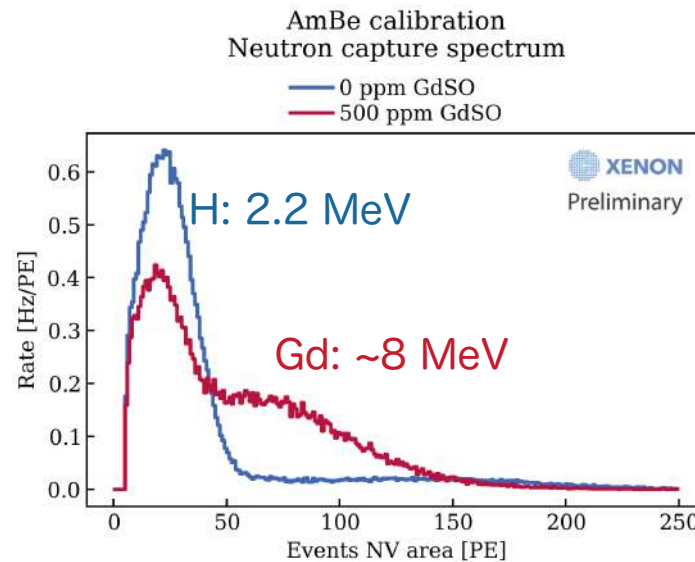
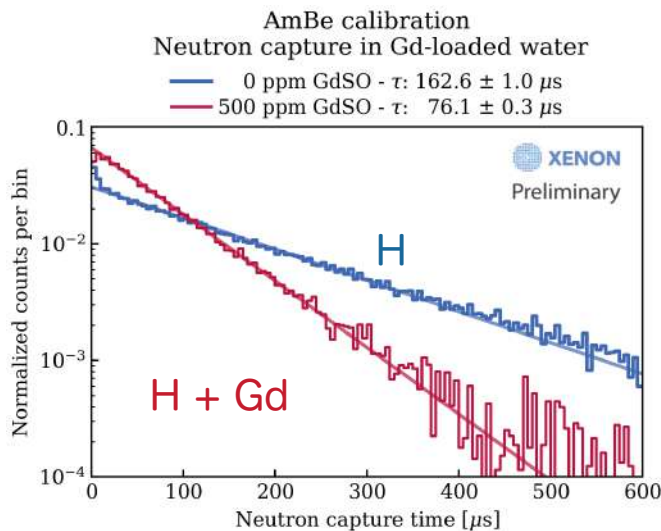
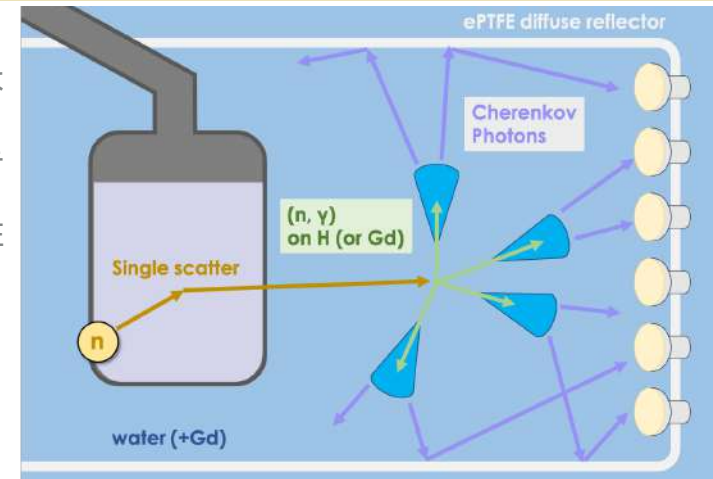
- 中性子捕獲時間:  $163 \rightarrow 76 \mu\text{sec}$ へ
- 中性子捕獲由来のガンマ線信号量増加

→中性子タグ効率:  $53 \rightarrow 77\%$  (中性子BG数を1/2へ低減)

超高純度Gdは

SK-Gdの協力により入手

反射材は日本提案ePTFE

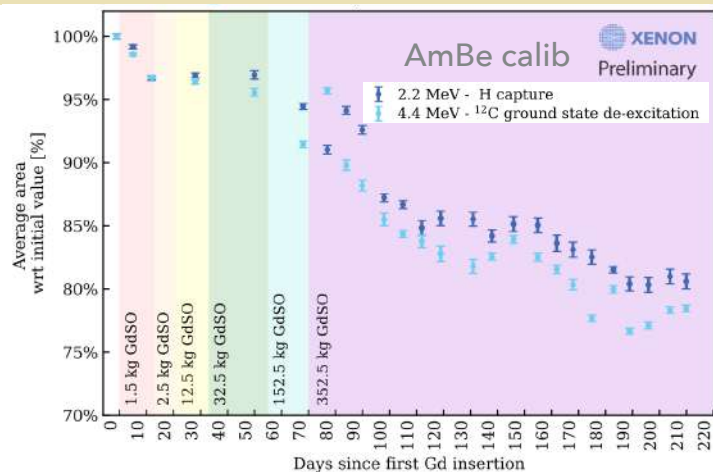




# XENONnT実験のこれから

# Neutron Veto Detectorの理解と性能向上

12



SR2でGd 0.02%導入後、チェレンコフ光の収量が徐々に減少

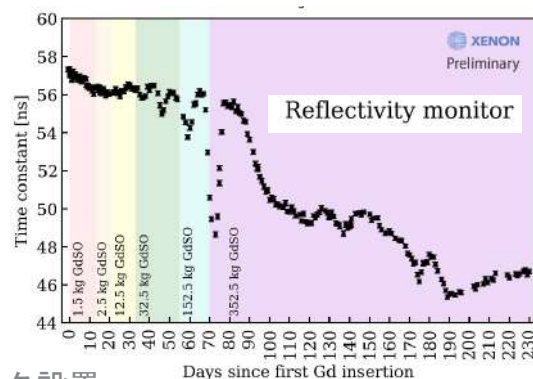
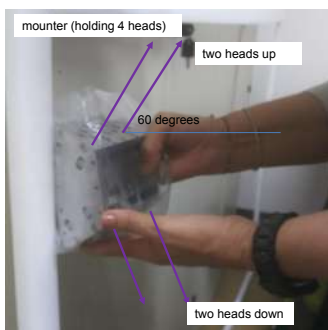
→ 光学特性の変化だと考えられる

(中性子タギング効率の減少は数%程度)

日本グループが導入した2つの光学特性変化分析ツールを活用

レーザーによる時定数測定：

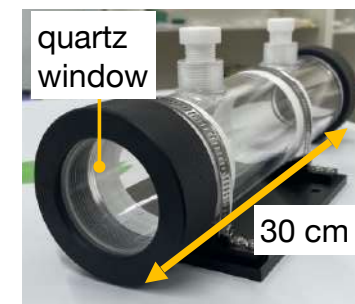
水の光透過率 + 反射材の反射率



nVeto内に光インジェクタ設置

分光光度計による水の光透過率の測定：

サンプル水の光透過率

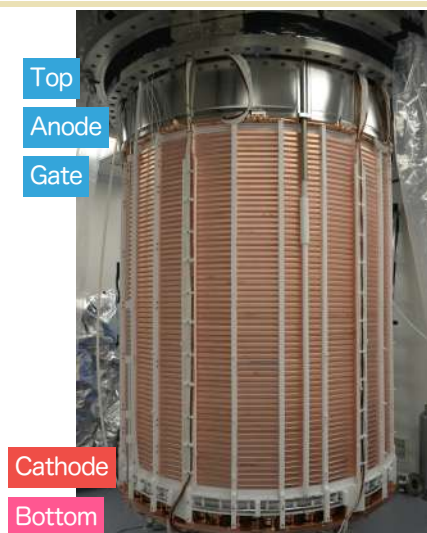


サンプル水の光透過率の減少はレーザーによる時定数の変化を

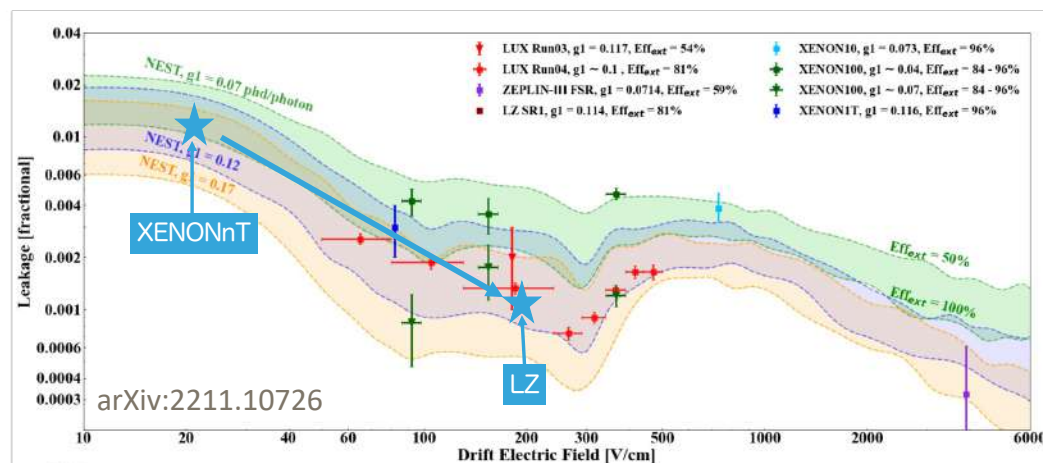
説明できないため、日本グループは反射率が下がったと結論

# 電極と電子・原子核反跳の分離能力

13



- ・電極: 直径200 - 300  $\mu\text{m}$ のSUSワイヤー
  - ・(何らかの理由で)カソードワイヤーが断線して、下部にあるPMT保護ワイヤーとショート
  - ・放電が起きず安定して動作可能な電圧が2.7 kV
- ドリフト電場 = 23 V/cm (目標: 100 - 200 V/cm)

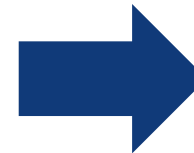


- ・電子・原子核反跳の分離能力は電場強度に強く依存
  - ・XENONnTは蒸留によりLZと比べラドンの総量は少ないが、LZの分離能力が10倍ほど高く、WIMP探索のBGとの観点でXENONnTは遅れを取っている。
- 電極のアップグレードが不可欠！
- 現在までにGd水の排水とキセノンの回収を終了

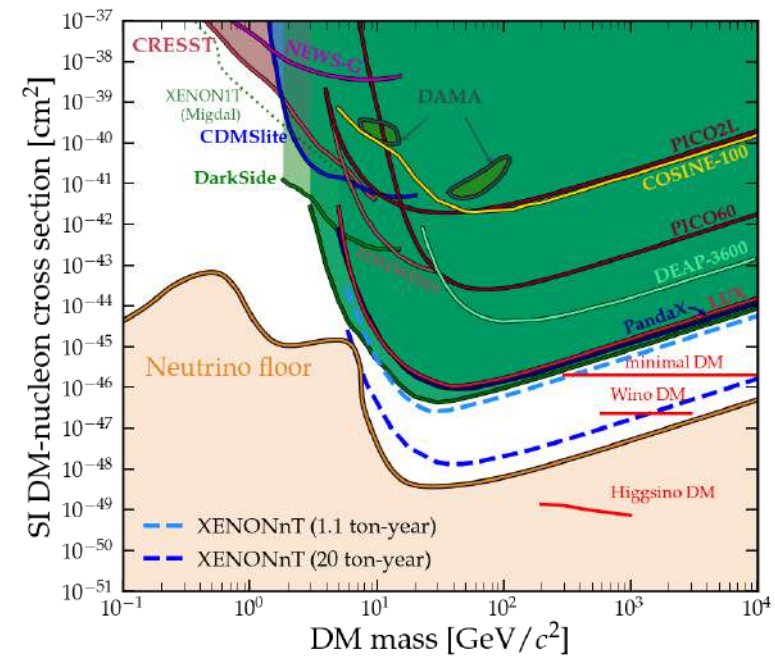
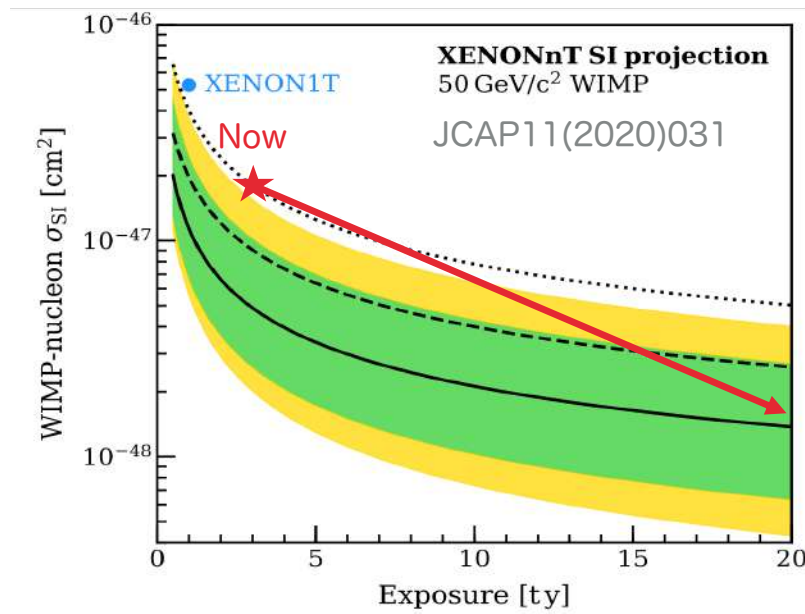
# WIMPの発見感度向上に向けて

14

- 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SR0 + SR1に比べてもさらに1/4へ削減
- 電極をアップグレードし、電子反跳・原子核反跳分離能力を10倍近く改善  
→電子反跳BG数を1/10へ削減



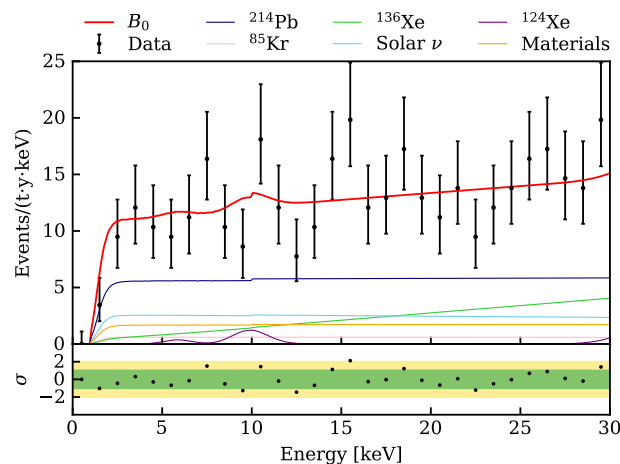
- 統計を10倍近く貯め、感度を10倍程度向上
- Minimal DMモデルは十分に探索可能
- ウィーノDMは1 TeVまで探索可能



# 液体キセノン検出器で開拓するニュートリノの物理

15

## pp solar neutrino (ER)

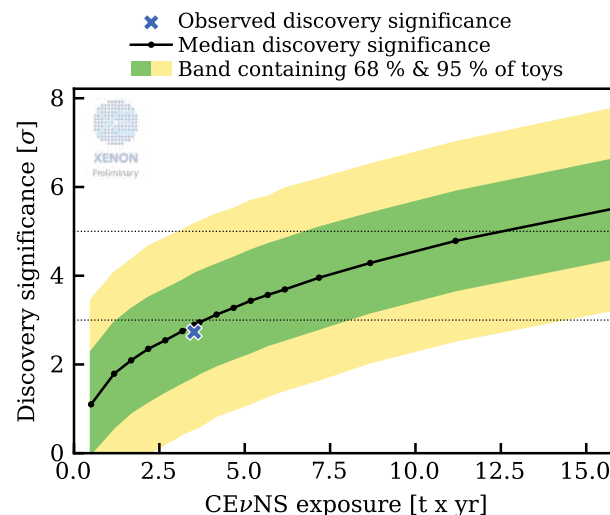


keV散乱エネルギー領域での初観測

小林が解析チームのリーダー

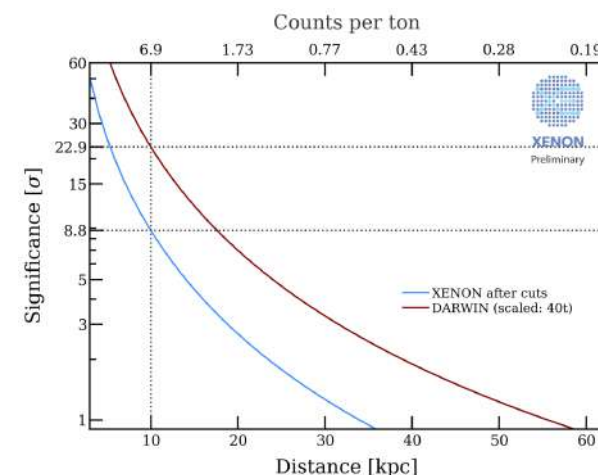
ラドン・クリプトンBGの精密評価が鍵

## $^8\text{B}$ solar neutrino (CEvNS)



現在までに取得したSR2のデータと合わせて、より高い感度での解析が進行中

## 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・カムランドと矛盾ないか検証