地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化

Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics

暗黒物質直接探索XENONnT実験によ る最新結果と展望













Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo

共催シンポジウム講演

東京大学カブリIPMU山下雅樹

KAVLI









- ・1 相式 (scintillation only) 液体キセノン検出器
- ・神岡宇宙地下素粒子実験施設 Lab-Cに設置
- ·大光量~15pe/keV →低閾值 (~1keV)
- ・液体キセノンを使った"極低バックグラウンド多目的検出器"
- ・➡暗黒物質探索だけでなく、低エネルギーの色々な物理事象の研究が可能。
- ・2019年2月に観測完了
- ・New: ニュートリノを伴わない4重ベータ崩壊の探索
- ・全データを用いた総括の論文を執筆中











ニュートリノを伴わない4重ベータ崩壊探索(XMASS)

J. Heeck et al, EPL, 103 (2013) 32001

$$0v2\beta = ュ - トリノはマヨラナ$$

(A, Z) → (A, Z + 2) + 2 e⁻
$$0v4\beta = \neg - トリノはディラックでも良い$$

(A, Z) → (A, Z + 4) + 4 e⁻

- •XMASS: ¹³⁶Xe (8.9%) を用いた探索
 - ・波形を用いたγ/β粒子弁別を用いた解析

Best fit for null signal of $136Xe 0v4\beta$

 $T_{1/2} > 3.7 \times 10^{24} years (90\% CL)$ ²²⁰ acc

¹³⁶Xeを用いた初めての探索

(NEMO3実験150NdT0v4β1/2>(1.1~3.2) x 10²¹ year @ 90%の下限値

R.Arnold et al, PRL 119, 041801 (2017))













BO2 方向に感度を持った 暗黑物質直接探索 中(東邦大) 小川(日本大) (神戸大) 身内

ガス検出器 (NEWAGE/CYGNUS) • 低BG検出器開発

• 1 m³サイズをデザイン中

ガス中の不純物除去

低BGゼオライト





• 原子核乾板 (NEWS-dm) ・赤道儀に搭載した暗黒物質探索

NEWSdm:赤道儀:試作を超えて暗黒物質探索を実施









XENONnT実験

・宇宙は何でできているのか?

- ・宇宙の物質・エネルギー 95% unknown
 - ・暗黒エネルギー(68%), 暗黒物質(27%)
 - ・我々の身の回りにもあるはず。(0.3GeV/cm³)
 - ·=> 暗黒物質直接探索
- ・暗黒物質の候補
 - ・WIMP, アクシオン, 原始ブラックホール など
 - ・WIMP: 有力候補の一つ。
 - ·超対称性粒子
 - ・宇宙の初期に熱的に生成。WIMPミラクル
- ・その他
 - ・pp太陽ニュートリノ観測
 - ·⁸B ニュートリノとのコヒーレント散乱
 - ・超新星ニュートリノ
 - ・二重ベータ崩壊(T_{1/2}Oν)
 - •XENON1T ER Excess (Solar Axion? ...)

Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo



XENON Collaboration



Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo











Turkih





Singhua.









NYUAD





XENON検出器の歴史

XENON100







2005-2007 25 kg - 15cm drift ~10⁻⁴³ cm²

2008-2016 161 kg - 30 cm drift ~10⁻⁴⁵ cm²

Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo



XENON1T



XENONnT



2012-2018 ~10⁻⁴⁷ cm²

2019-202x 3.2 ton - 1 m drift 8.6 ton - 1.5 m drift ~10⁻⁴⁸ cm²



11

XENON検出器の歴史

XENON10



XENON100



2005-2007 25 kg - 15cm drift ~10⁻⁴³ cm²

2008-2016 161 kg - 30 cm drift ~10⁻⁴⁵ cm²

Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo

XENON1T

2012-2018 3.2 ton - 1 m drift

~10⁻⁴⁷ cm²

2019-202x

XENONnT

8 ton - 1.5 m drift

~10⁻⁴⁸ cm²

• XENON DARWIN 50-100トン

XLZD

·LZ







WIMPとXe原子核の弾性散乱 WIMP + Xe -> WIMP + Xe

- ·S1:シンチレーション光
- ·S2:電離信号 (-> 比例蛍光)





Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo

ガス・液体 2相型キセノンTime Projection Chamber

イベント事にシンチレーション光と電離信号を読み出す。

- · 3次元位置構成: x-y (S2) and z (ドリフト時間)
- Xe:Z(=54), 中心の有効体積を選ぶことにより、外来のア線や表面 の放射線を効率よく除去。 コンプトン散乱、中性子による多重散乱 も識別。(1/104 - 1/105)

WIMP(原子核反跳)と電子散乱を S2/S1信号比によって粒子弁別可 能 (1/200)

Luigi











Two-phase Xe Time Projection Chamber



NS

Ð

14

XENON1T 電子反跳事象の超過(2020) Phys.Rev.D 102 (2020) 7, 072004

- ・XENON1T: 電子反跳1-7 keVでExcessを観測
 - ·Expected (BG model) 232 ± 15 事象
 - ·Observation 285事象
- ・Excessは2.3keVにpeakを持つ~3 σ
 - ·Solar Axion, Axion Like Particle, Neutrino Magnetic

Moment and more

・³H (トリチウム, Q:18keV)の可能性もある

・結論は出ず

XENON1T -> XENONnTへアップグレードし検証





XENONnT検出器

- ・ドリフト長(高さ) 1m -> 1.5 m
- ·有効液体キセノン質量 2トン-> 5.9トン(全8.6トン)
- ・494 VUVに感度のある3インチPMT
- ・H2, H2Oのアウトガスを減らす作業
 - ・(HT, HTOとして存在すると考えられるため)
 - ・環境研・柿内氏の協力により大気中Tの測定
- ・新たに新しく2つの設備を追加
 - ・Online ラドン除去蒸留塔
 - ・液体キセノン純化装置
 - ・水チェレンコフ中性子カウンター







Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo

XENONnT検出器とその純化装置



·XENONnTでは8.6トンの液体キセノンを純化 する必要がある。

・酸素など(電離電子) -> 液相純化+ガス相純化

·放射性物質(Rn) -> 蒸留塔







Faster xenon cleaning 5 L/min LXe (2500 slpm) XENON1T ~ 60-100 slpm





XENONnTでの電離信号(S2)に対する電子寿命の影響

電離電子信号は純度に大きく依存する。 1ppb~300us 電子寿命









水チェレンコフ中性子カウンター

- Inside muon Veto water tank, surround TPC
- Octagonal structure 3x4 m
- 120 PMTs 8" Hamamatsu R5912-100 HQE (~40%)
- \Rightarrow Detect Cherenkov radiations
- Covered by ePTFE reflecting foils:
- \Rightarrow high PMT coverage & light collection efficiency
- Pure water: n-capture on ¹H
- \Rightarrow H(n, γ) 2.2 MeV peak; n-capture time ~200 μ s

Gd-loaded water : n-capture on ^{155,157}Gd

 \Rightarrow cascade of γ -rays, $\Sigma E_{\gamma} \approx 8$ MeV, n-capture time 20 μ s

current **68%**

Next step 87%



水チェレンコフ中性子カウンター

- Inside muon Veto water tank, surround TPC
- Octagonal structure 3x4 m
- 120 PMTs 8" Hamamatsu R5912-100 HQE (~40%)
- \Rightarrow Detect Cherenkov radiations
- Covered by ePTFE reflecting foils:
- \Rightarrow high PMT coverage & light collection efficiency
- Pure water: n-capture on ¹H
- \Rightarrow H(n, γ) 2.2 MeV peak; n-capture time ~200 μ s

Gd-loaded water : n-capture on ^{155,157}Gd

 \Rightarrow cascade of γ -rays, $\Sigma E_{\gamma} \approx 8$ MeV, n-capture time 20 μ s





current **68%**

Next step 87%



ラドン除去蒸留塔

- ²²²Rn の娘核 (214Pb)は一番大きなバッ クグラウンド
- ラドン(-70°C)とキセノン(-100°C)の沸 点の違いを利用して除去
- 今回はガス相のみ循環
 - XENON1T 11 μ Bq/kg -> 1.77 μ Bq/kg
- 液相を含めると < 1µBq/kgまで減らせる ことを確認している。SRO-> SR1





Calibration

- ・外から低エネルギー線源を照射しても届かない。
- ・放射性希ガス線源をガスラインから導入し、Xray, ベータ線、ガンマ線を用いたキャリブレー ションが可能。
- ·220Rn (212Pb), 83mKr, 37Ar…
- ・37Ar 2.8 keV, 半減期37日, 単色エネルギー。 energy scale/resolution
- ・220Rn 半減期 56秒 212Pb(10hrs) ベータ 線, cut efficiency, energy threshold validation

6





観測デー

·blind analysis

・最も低いバックグランドを達成

TABLE I. The background model B_0 with fit constraint and best-fit number of events for each component in (1, 140) keV.

Component	Constraint	Fit
²¹⁴ Pb	(584, 1273)	980 ± 120
⁸⁵ Kr	90 ± 59	91 ± 58
Materials	266 ± 51	267 ± 51
¹³⁶ Xe	1537 ± 56	1523 ± 54
Solar neutrino	297 ± 30	298 ± 29
¹²⁴ Xe	-	256 ± 28
AC	0.70 ± 0.04	0.71 ± 0.03
¹³³ Xe	-	163 ± 63
^{83m} Kr	-	80 ± 16







·blind analysis

・最も低いバックグランドを達成

			\sim 40
FABLE I. The backgr pest-fit number of eve	cound model B_0 with nts for each compon	n fit constraint and ent in (1, 140) keV.	ke
Component	Constraint	Fit	is 30 ⊨
²¹⁴ Pb	(584, 1273)	980 ± 120	نْبُ ا
⁸⁵ Kr	90 ± 59	91 ± 58	
Materials	266 ± 51	267 ± 51	
¹³⁶ Xe	1537 ± 56	1523 ± 54	
Solar neutrino	297 ± 30	298 ± 29	
¹²⁴ Xe	-	256 ± 28	
AC 133 yr	0.70 ± 0.04	0.71 ± 0.03	
83m L.		163 ± 63	
Kr	く 米白 チ	く、第日、下	
	く 第日 / .	い住兄に	
r	-21/FCFC	(1 1	
		= (] .]	$() \pm () + 3$
	- 1/2		

50

40







XENON1Tとの比較



Masaki Yamasına, Navırır IVIO



XENONnT:電子反跳による結果









展望と世界の動き (XENON-LZ-DARWIN)

液体キセノンを用いて20年以上に渡り最も良い感度でDM探索を行った実績 50-100トンを用いた次世代の実験に向けて世界で一つの究極のキセノン検出器を XENON-LZ-DARWIN -> XLZD コンソーシアム

2021/4/26,27 XENON/DARWIN, LUX-ZEPLIN meeting https://indico.cern.ch/event/1028794/

2021/7/6 : 16カ国 104名が署名

MOU締結: XENON, DARWIN, LUX-ZEPLIN(米国)

2022/6/27-29 1st Summer Meeting at KIT in Germarny

参加日本グループ:神戸大学、東京大学、名古屋大学

•White Paper:

•A Next-Generation Liquid Xenon Observatory for Dark Matter and Neutrino Physics https://arxiv.org/abs/2203.02309



Masaki Yamashita, IPMU, UTokyo









まとめ

Exposure: 1.16 tonne – years

Background rate: (16.1 ± 0.3) events/ $(t \times yr \times keV)$ in 1-30 keV range

Exclusion of XENON1T excess (2.3 keV) peak.

·XENONnTでは水、水素のアウトガスを減らすために最新の注意を払い建設を行った。グランサッソで の大気中のトリチウム測定も行っている。 ・XENON1Tの電子反跳事象超過はトリチウムの可能性が高い。 ・WIMP Searchのunblindは近々予定 ·XLZD:究極の検出器を目指したコンソーシアムが立ち上がった。 Masaki Yamashita, Kavli IPMU

~ × 2 XENON1T ER search (0.65 tonne-vears)

$\sim \times 0.2$ XENON1T Measurements

incompatible at $\sim 4\sigma$

