

液体キセノンを用いた暗黒物質探索

東京大学宇宙線研究所 森山 茂栄 令和5年2月21日
東京大学宇宙線研究所 令和4年度共同利用 研究成果発表会

令和4年共同利用経費

B08 配分額 200,000円 使用額:0円

2021年度からの繰越額 200,000円 使用額:0円

コロナ禍のため

- データ解析のための打ち合わせやコラボレーション会議はオンラインで行われた。
- 昨年12月9日のコラボレーション会議は参加者の行き来の利便性のため富山市で開催し共同利用経費を使用できなかった。
ありがたく返却させていただきます。



XMASSを振り返る: 2000年での提案

- XMASSは、スーパーカミオカンデの物理を補完するために、低エネルギーpp, ${}^7\text{Be}$ ニュートリノの観測、暗黒物質探索等を標榜し研究を開始。
- 当時のWIMPに対する制限は弱く、WIMPを発見し、そのバックグラウンドの下にpp太陽ニュートリノの観測をすることを目指した。 $0\nu\beta\beta$, 同位体分離によるスピン依存・非依存の区別。

Low Energy Solar Neutrino Detection by using Liquid Xenon

(September 26, 2021)

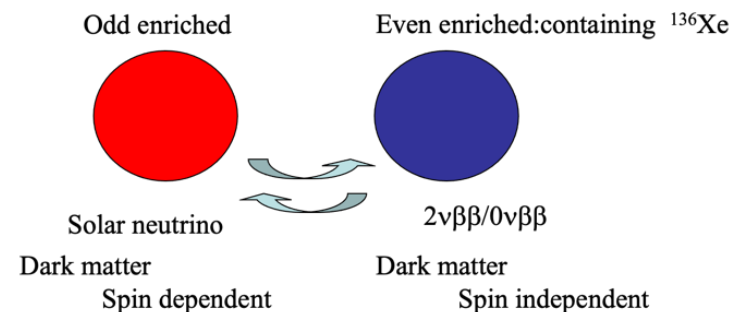
Y.Suzuki

(for the Xenon Collaboration [1])

Kamioka Observatory, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Higashi-Mozumi,
Kamioka, Gifu 506-1205, Japan

arXiv:hep-ph/0008296v1 29 Aug 2000

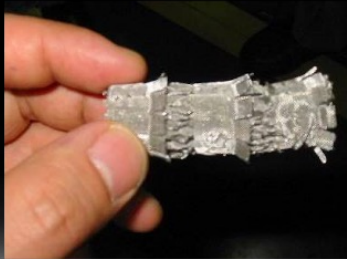
IV. ISOTOPE SEPARATION AND DETECTION OF SOLAR NEUTRINOS, DOUBLE BETA DECAY AND DARK MATTER.





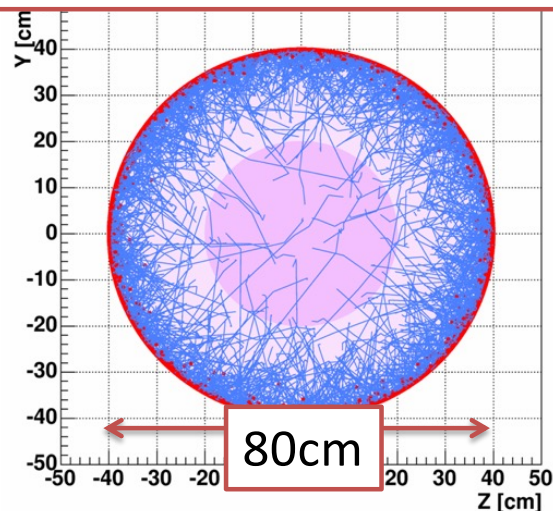
XMASS: 技術的ブレークスルー

- 当時液体キセノンは魅力的な標的ではなかった。
 - 市販のキセノンには放射性 ^{85}Kr が含まれていた。
 - $\sim 1 \text{ Bq/kg}$ \rightarrow 2004年にはXMASSが蒸留法で $< 10 \mu\text{Bq/kg}$ を実現
- 水チェレンコフ検出器によるアクティブシールド
 - Super-Kの経験により、鉛や銅のパッシブシールドを卒業し、水チェレンコフシールドを確立。これは高速中性子の低減にも有利であった。
- 低BGPMTなど、稀事象探索へ向けた大型低バックグラウンド液体キセノン検出を確立: グローバルスタンダードの確立を果たした

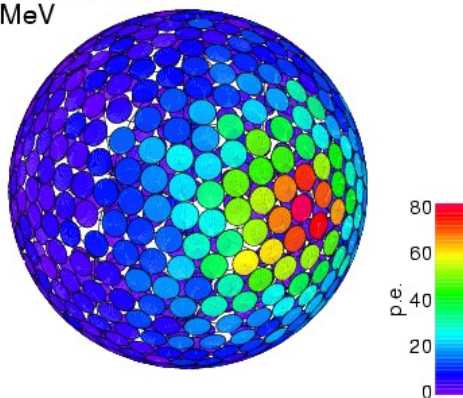


XMASS-Iの特徴

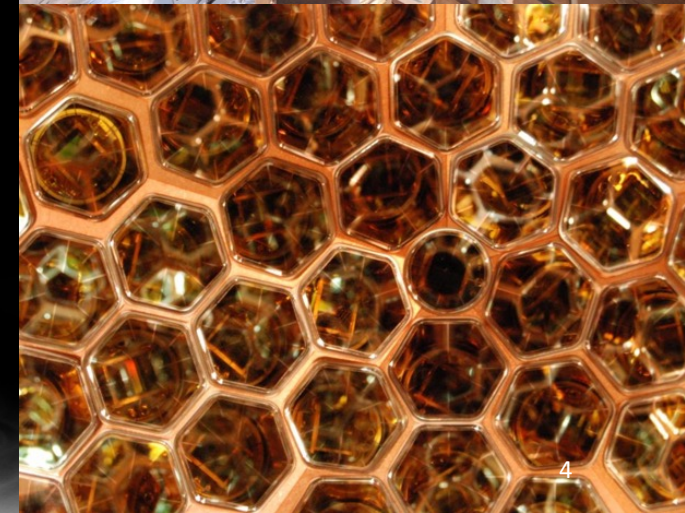
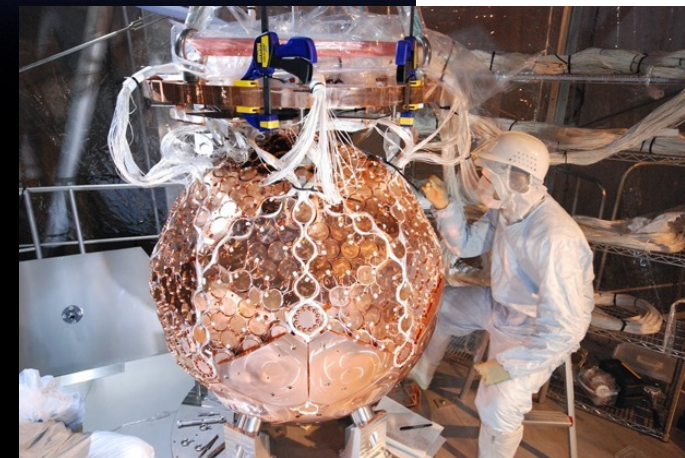
Self shielding for γ injection (XMASS-I)



Pos: (20.0, -10.0, 10.0)
E: 1.00 MeV

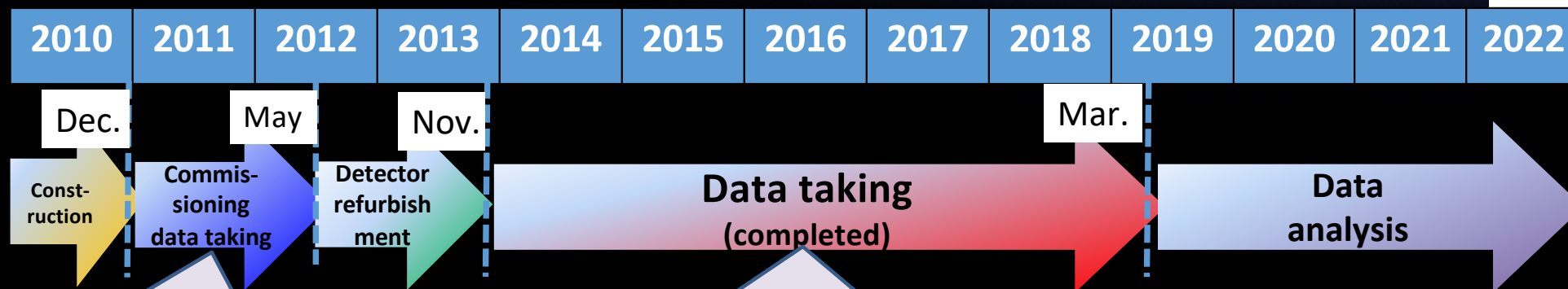


- 1相型検出器
- 有効体積カットによる低BG化
 - 大きな光電子数収量
 - ~ 14.7 p.e./keV \leftrightarrow Super-K ~6 hits/MeV
 - 観測された光電子パターンによる事象位置再構成
 - 全質量832 kg, 20cm有効体積内97 kg
 - WIMP探索の目標 $\sim 2 \times 10^{-45} \text{cm}^2$.
- e/ γ 事象探索も可能
 - eと γ も弁別可能
- 大型化による有利さ
 - 有効体積の効率高い
 - 光透過率は10m以上: 大型化可能
 - 時間情報の活用





XMASS-Iの歴史と物理



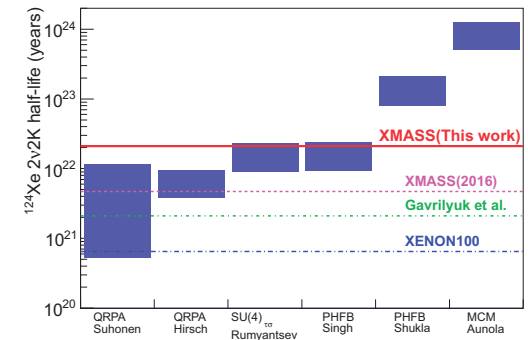
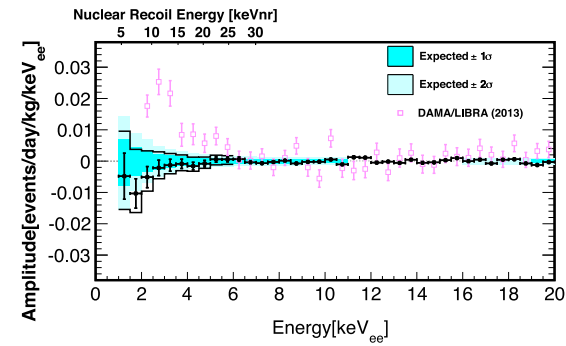
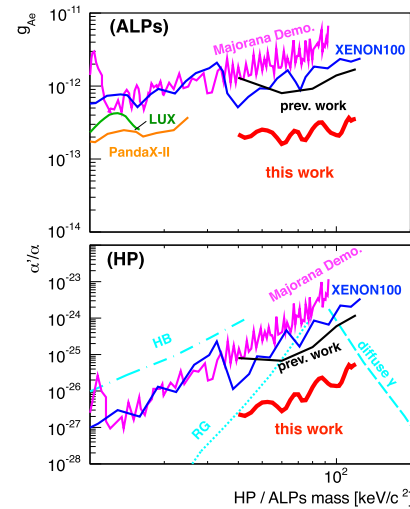
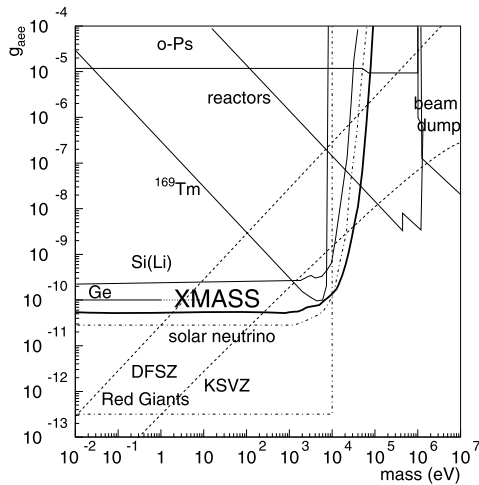
- 軽いWIMPs
- 太陽アクシオン
- WIMP- ^{129}Xe 非弾性散乱
- ボゾンの super-WIMPs
- ^{124}Xe 2ν 二重電子捕獲

暗黒物質
天体素粒子
原子核物理

- 季節変動1年 & 2.7年データ
- 太陽カルツァクラインアクシオン
- ^{124}Xe 2ν 二重電子捕獲 II
- 有効体積内でのWIMPs探索
- 暗黒光子・アクシオン類暗黒物質
- WIMP- ^{129}Xe 非弾性散乱 II
- 季節変動によるSub-GeV WIMP探索
- 太陽 ν による非標準相互作用の探索
- 重力波事象に相関するバースト探索
- ^{136}Xe の $0\nu 4\beta$ 崩壊

30本の論文
1 提案
11 技術論文
17 物理成果
+1 最終結果を投稿

XMASSの物理ハイライト



Solar axions in 2013

Bosonic super WIMPS in 2014/18

Annual modulation 2016/18/19

Double electron capture 2016/18

XMASSは大型暗黒物質探索用検出器を用いて
多数の物理目標を開拓した実績を持つ



XMASS-I全データセットによる最新(最終)結果

- XMASSは1相型検出器としてユニーク。1590.9日もの暴露データ。
 1. 有効質量97kgによるWIMP探索 **大質量WIMPS**
 2. 全質量832kg内の季節変動による探索、特にミグダル効果、制動輻射効果を活用 **低質量WIMPS**

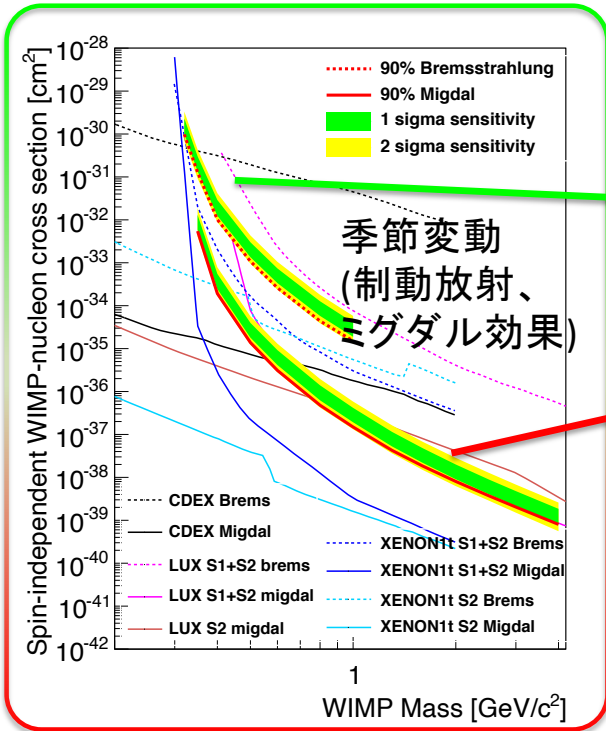
Direct dark matter searches with the full data set of XMASS-I

K. Abe,^{1,5} K. Hiraide,^{1,5} N. Kato,¹ S. Moriyama,^{1,5} M. Nakahata,^{1,5} K. Sato,¹ H. Sekiya,^{1,5} T. Suzuki,¹ Y. Suzuki,¹ A. Takeda,^{1,5} B. S. Yang,² N. Y. Kim,³ Y. D. Kim,³ Y. H. Kim,^{3,8} Y. Itow,^{4,6} K. Martens,⁵ A. Mason,⁵ M. Yamashita,⁵ K. Miuchi,⁷ Y. Takeuchi,^{7,5} K. B. Lee,⁸ M. K. Lee,⁸ Y. Fukuda,⁹ H. Ogawa,¹⁰ K. Ichimura,¹⁶ Y. Kishimoto,^{16,5} K. Nishijima,¹¹ K. Fushimi,¹² B. D. Xu,^{13,5} K. Kobayashi,¹⁴ and S. Nakamura¹⁵
(XMASS Collaboration)*

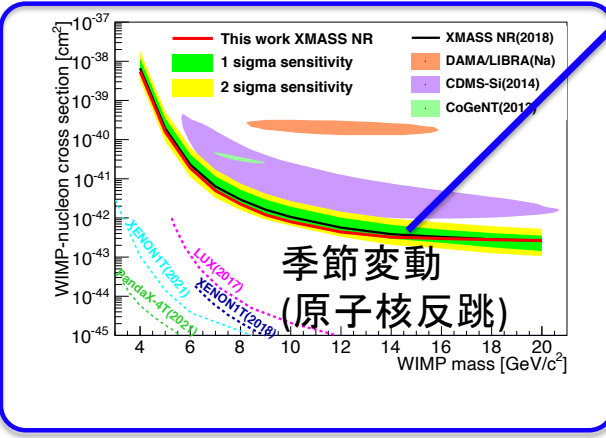
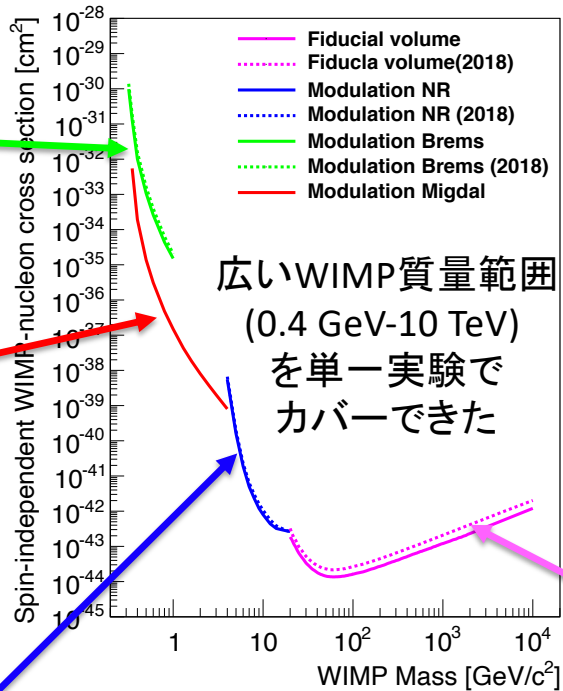
arxiv: 2211.0620
PRDに投稿

31名の共同研究者

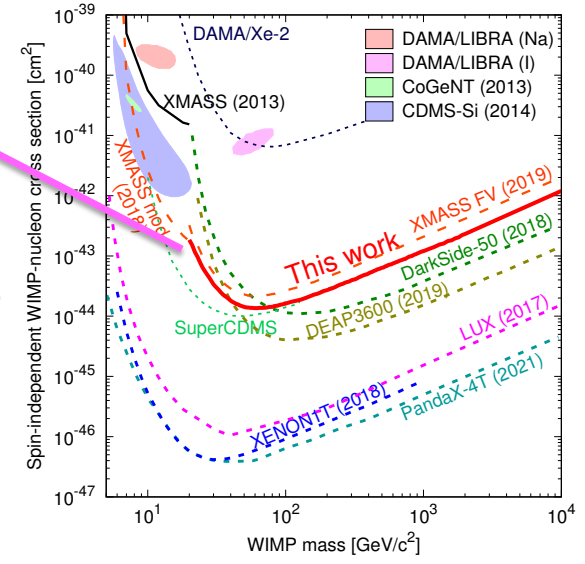
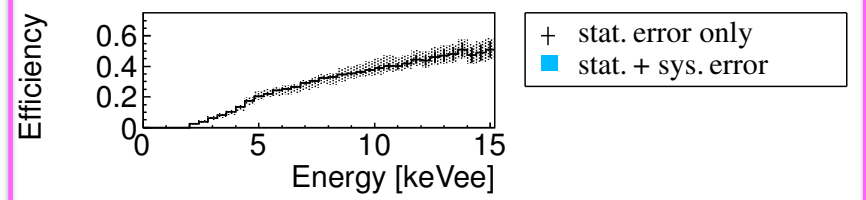
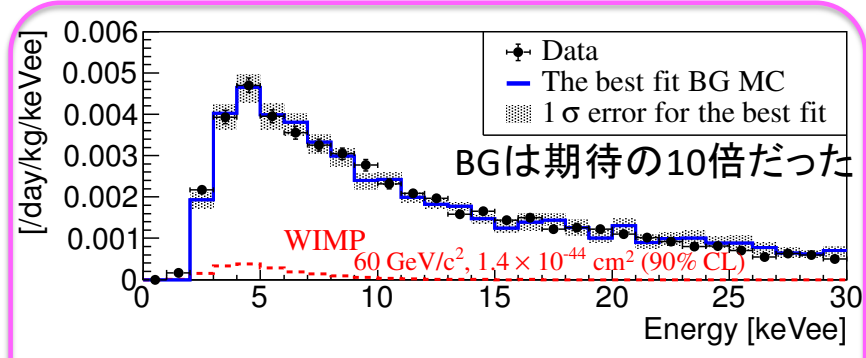
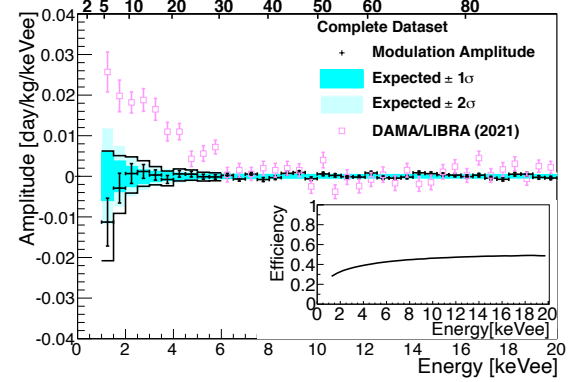
XMASSコラボレーションとしては、本論文が
acceptされ次第、活動を終了することを決定



XMSS-1からの制限のまとめ

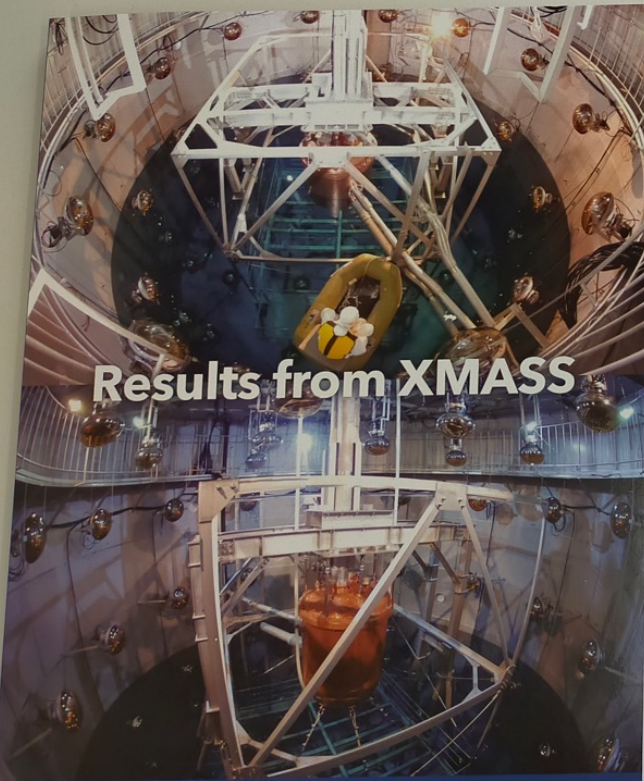


モデル非依存解析



97kg有効質量でのWIMP探索

XMASSの論文集



Results from XMASS

XMASS Collaboration Dec. 9, 2022

Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas
Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics

論文リスト Paper List

Proposal

[1] Low Energy Solar Neutrino Detection by using Liquid Xenon, Talk presented at LowNu workshop, June-15-20, Suzubury, Canada. arXiv:hep-ph/0008296v1.

Technical paper

- [2] Scintillation yield of liquid xenon at room temperature, NIM A 594 (2008) 148-154.
- [3] Distillation of liquid xenon to remove krypton, *Astroparticle Physics* 31 (2009) 290-296, 161-168.
- [4] Scintillation-only based pulse shape discrimination for nuclear and electron recoils in liquid xenon, NIM A 659 (2012) 609-614.
- [5] Radon removal from gaseous xenon with activated charcoal, NIM A 661 (2012) 50-57.
- [6] Self-shielding effect of a single phase liquid xenon detector for direct dark matter search, *Astroparticle Physics* 77 (2012) 78-85, paper committee: Takeda, K. Kobayashi, Fukuda.
- [7] XMASS detector, NIM A 716 (2013) 192-196, paper committee: Takiya, Hiraide, Ito, Yamashita, Nakamura.
- [8] A measurement of the time profile of scintillation induced by low energy gamma-rays in liquid xenon with the XMASS detector, NIM A 834 (2016) 157-161, paper committee: K. Kobayashi, Kishimoto, Takeuchi.
- [9] Identification of ^{210}Pb and ^{210}Po in the bulk of copper samples with a low-background alpha particle counter, NIM A 834 (2016) 157-161, paper committee: K. Kobayashi, Kishimoto, Takeuchi.
- [10] A measurement of the scintillation decay time constant of nuclear recoils in liquid xenon with the XMASS-I detector, 2018 JINST 13 PT2032, paper committee: Ichimura, Yamashita, Nakamura.
- [11] Development of low radioactivity photomultiplier tubes for the XMASS-I detector, NIM A 922 (2019) 171-176, paper committee: Abe, Kishimoto, Nishijima.
- [12] Development of low-background photomultiplier tubes for liquid xenon detectors, 2020 JINST 15 P09027, paper committee: Abe, Ichimura, Kishimoto.
- [13] Light WIMP search in XMASS, *Physics Letters B* 719 (2013) 78-82, paper committee: Sekiya, Yamashita, Y. D. Kim, paper committee: Moriyama, Kishimoto, Muchi.
- [14] Search for solar axions in XMASS, a large liquid-xenon detector, *Physics Letters B* 724 (2013) 46-50, paper committee: Uchida, Ito, Moriyama.
- [15] Search for inelastic WIMP nucleus scattering on ^{136}Xe in data from the XMASS-I experiment, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014, 063C01, paper committee: Uchida, Ito, Moriyama.
- [16] Search for Bosonic Superweakly Interacting Massive Dark Matter Particles with the XMASS-I Detector, PRL 113, 121301 (2014), paper committee: Moriyama, Abe, Takeuchi.
- [17] Search for two-neutrino double electron capture on ^{136}Xe with the XMASS-I detector, *Physics Letters B* 759 (2016) 64-68, paper committee: Hiraide, Martens, Fukuda.
- [18] Direct dark matter search by annual modulation in XMASS-I detector, *Physics Letters B* 759 (2016) 64-68, paper committee: Hiraide, Martens, Fukuda.
- [19] Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS, *Astroparticle Physics* 89 (2017) 51-56, paper committee: Liu, Kishimoto, Ito.
- [20] Search for solar Kaluza-Klein axion by annual modulation with the XMASS-I detector, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2017, 103C01, paper committee: Oka, Muchi, Ichimura, Yamashita.
- [21] Improved search for two-neutrino double electron capture on ^{136}Xe and ^{136}Ba using particle identification in XMASS-I, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2018, 053D03, paper committee: Hiraide, Fukuda, Fushimi.
- [22] Direct dark matter search by annual modulation with 2.7 years of XMASS-I data, *PHYSICAL REVIEW D* 97, 102006 (2018), paper committee: Yamashita, Martens, Takeuchi.
- [23] A direct dark matter search in XMASS-I, *Physics Letters B* 789 (2019) 45-53, paper committee: Ogawa, Takeda, Muchi.
- [24] Search for dark matter in the form of hidden photons and axion-like particles in the XMASS detector, *Physics Letters B* 787 (2018) 153-158, paper committee: Sato, Kishimoto, Ito.
- [25] Search for WIMP- ^{136}Xe inelastic scattering with particle identification in XMASS-I, *Astroparticle Physics* 110 (2019) 1-7, paper committee: T. Suzuki, Moriyama, Abe, Muchi.
- [26] Search for sub-GeV dark matter by annual modulation using XMASS-I, *Astroparticle Physics* 110 (2019) 308-313, paper committee: M. Kobayashi, Yang, Y. H. Kim, Moriyama.
- [27] Search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I, *Physics Letters B* 795 (2019) 135741, paper committee: Ogawa, K. Kobayashi, Yamashita, Fukuda.
- [28] Search for event bursts in XMASS-I associated with gravitational-wave events, *Astroparticle Physics* 129 (2021) 102568, paper committee: Hiraide, Y. Suzuki, Takeuchi.
- [29] Search for neutrinoless quadruple decay of ^{136}Xe with XMASS-I, *Physics Letters B* 809 (2020) 102568, paper committee: Hiraide, Y. Suzuki, Takeuchi.
- [30] Direct dark matter searches with full data set of XMASS-I, *Physics Letters B* 833 (2022) 137355, paper committee: Ogawa, Nishijima.

30本の論文
1 提案
11 技術論文
17 物理成果
+1 最終結果

2017年における 将来計画委員会に於ける議論



粒子識別能力の高い 2 相式が大型化の問題を解決するにつれて 2 相式の優位性が明確になり、XMASS 実験の次世代の方向性を再検討する時期に来た。

ら妥当な判断である。今後、海外の G2 実験に参加することは最先端の物理を引き出す有力な方針と認められる。一方では G2 に続く G3 も計画中であることから、G2 での経験と神岡でのアクティビティを G3 へ繋げる配慮が望まれる。

4. 神岡での共同利用実験として

XMASS 実験は、神岡宇宙素粒子実験施設の実験室 C で推進される共同研究と位置付けられてきた。提案では実験室 C は G3 実験に向けた R&D を進める場所とされるが、海外の G2 実験に参加しても、分担部分の研究を進めるための実質的な研究の場所として使用されることが望ましい。

委員会は、上記の問題を解きながら、コミュニティでの議論を継続しつつ将来の G3 実験に繋がる計画に仕上げることを要望する。



お礼と今後

- XMASS実験発足の2000年以來、共同利用を通じて長いサポートを頂いて来ました。
- 宇宙線コミュニティーには、暗黒物質直接探索の意義を認めていただき、XMASS及び将来へ向けた活動への理解を頂いたことにも感謝いたします。
- 今後暗黒物質の正体の解明へ向けて研究を進めてまいります。