

B07 第3世代の暗黒物質直接探索実験
B08 液体キセノンを用いた暗黒物質探索
B09 次世代暗黒物質探索実験の検出器構造研究

森山茂栄

東京大学宇宙線研究所

令和3年2月8日

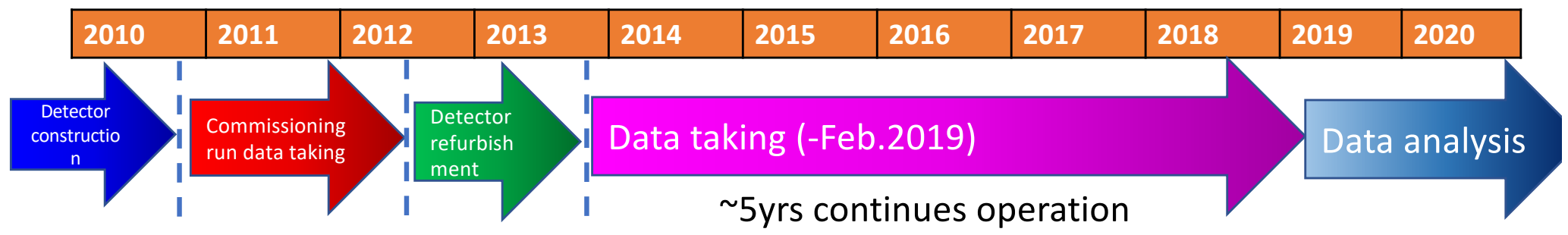
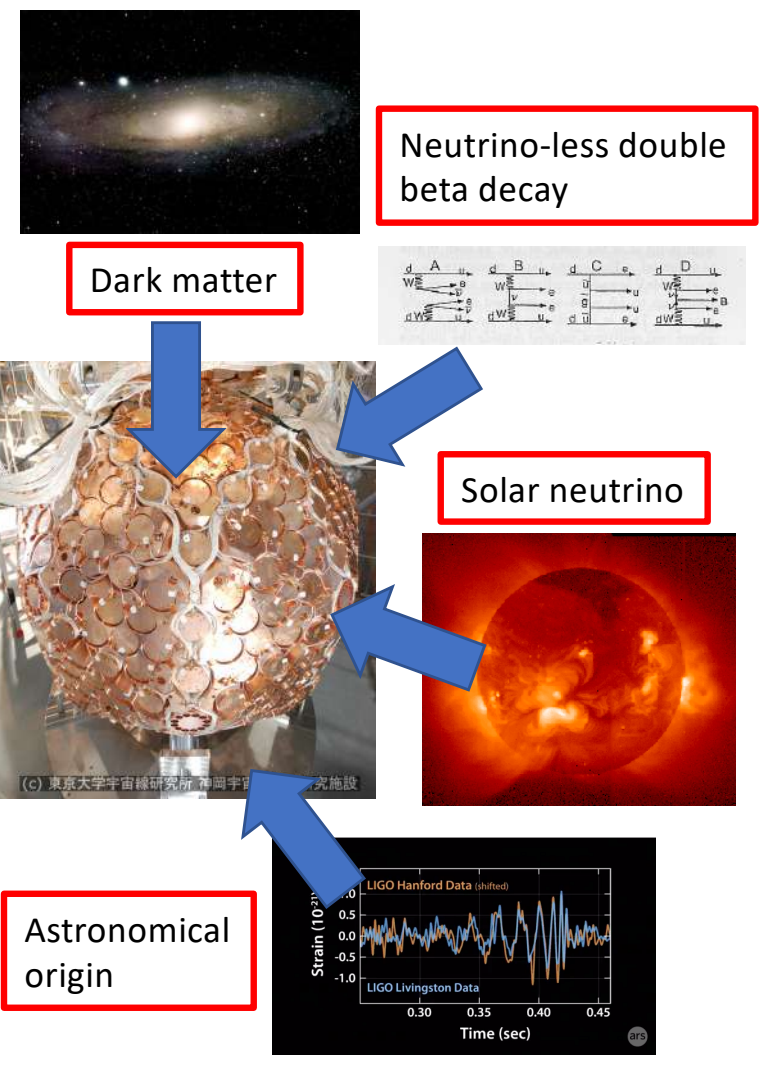
令和2年度宇宙線研究所
共同利用研究成果発表会

B08 液体キセノンを用いた暗黒物質探索(XMASS)

- 研究代表者：森山茂栄
- 研究目的：液体キセノンを用いた検出器で得られたデータを解析し、暗黒物質の候補であるWIMPsやaxionの検出を目指す。
- 合計人数：30名
- 査定額：400千円（研究打合せ、コラボレーションミーティング等で使用予定）
 - 繰越額：400千円（コロナ感染対策のため全てオンラインで開催）

XMASS実験

- 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 (~2700m.w.e.) に設置
- 世界初のton class暗黒物質探索実験
- 大光量~15pe/keV → 低閾値 (~1keV)
- 暗黒物質探索 (有効体積、季節変動etc)、Hidden photon dark matter探索、 $2\nu 2e$ 重電子捕獲の探索等の成果を出してきた。
 - →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月にデータ収集完了し、現在はデータ解析の推進のため共同利用研究を行っている。



2020年度の成果

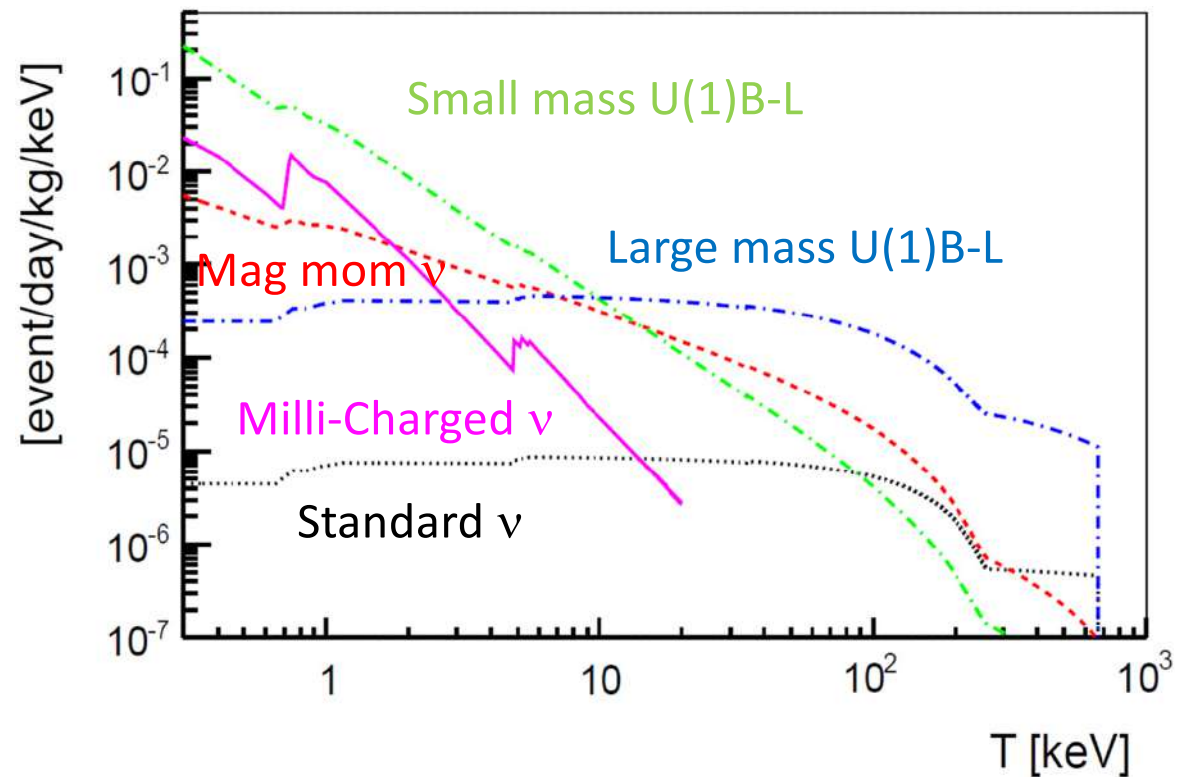
- 発表論文

- Search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I, [Phys. Lett. B 809 \(2020\) 135741](#).
- Development of low-background photomultiplier tubes for liquid xenon detectors, [JINST 15 \(2020\) 09, P09027 \(B09で再掲\)](#)
- Search for event bursts in XMASS-I associated with gravitational-wave events, [arXiv: 2007.16046](#)

Search for exotic neutrino-electron interactions using solar neutrinos in XMASS-I

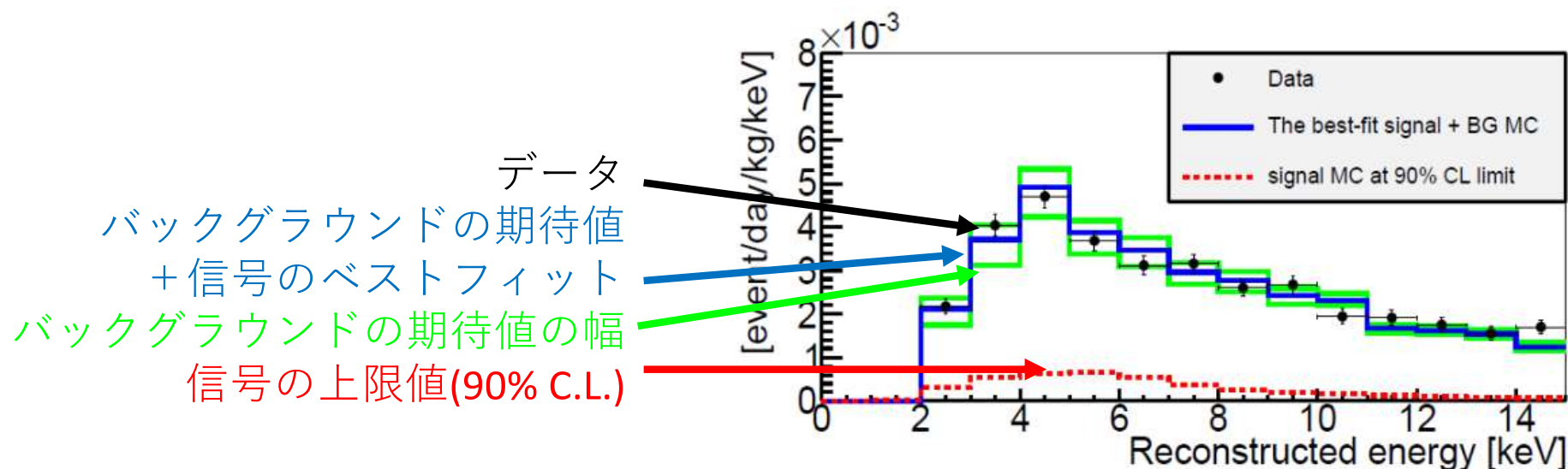
- ニュートリノがexoticな性質を持つことを太陽 ν を用いて探索
 - millicharge
 - 磁気双極子
 - $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾン
- これらはいずれも、低エネルギーに標準理論の予言を超える事象率を与える
- XMASSの低エネルギー敷居値(\sim keV)が活用できる

太陽ニュートリノがexoticな性質を持つと低エネルギーにexcessを与える



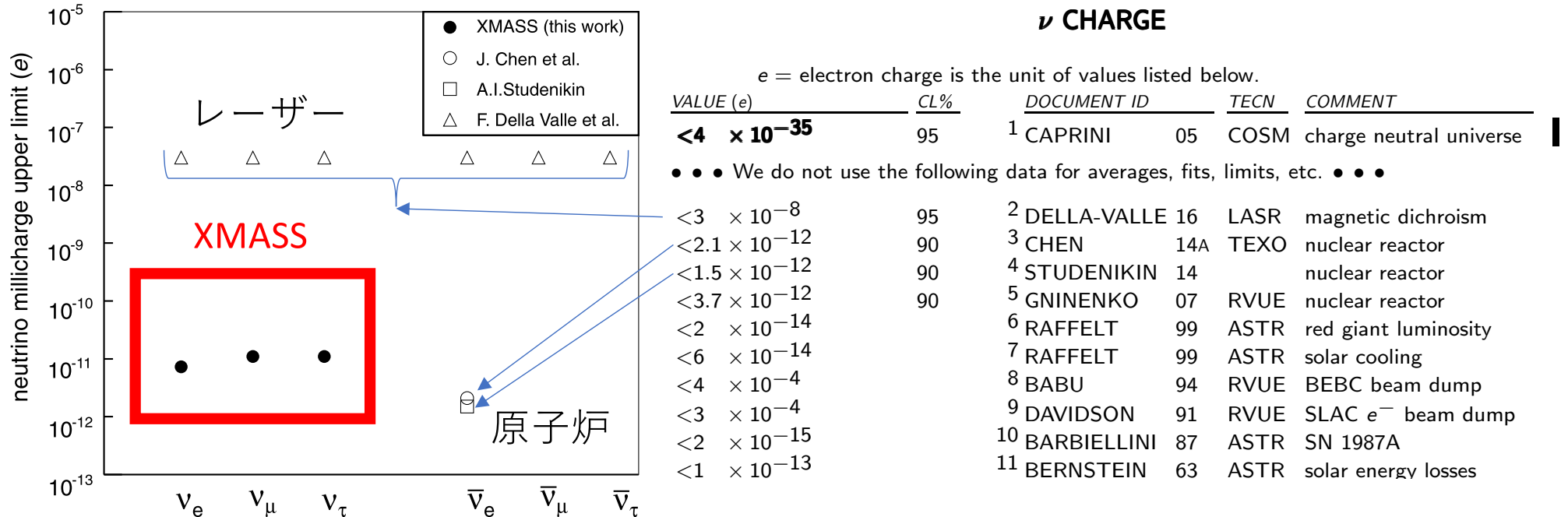
XMASSの低エネルギー事象の理解

- 有効体積カット(中心から半径20 cm, 100 kg)を用いた暗黒物質探索を行った際に、バックグラウンド事象の理解を徹底的に行った。
- 今回期待される物理現象の寄与の探索が可能。
 - Millichargeを持つ場合、以下のような上な限值を得た。



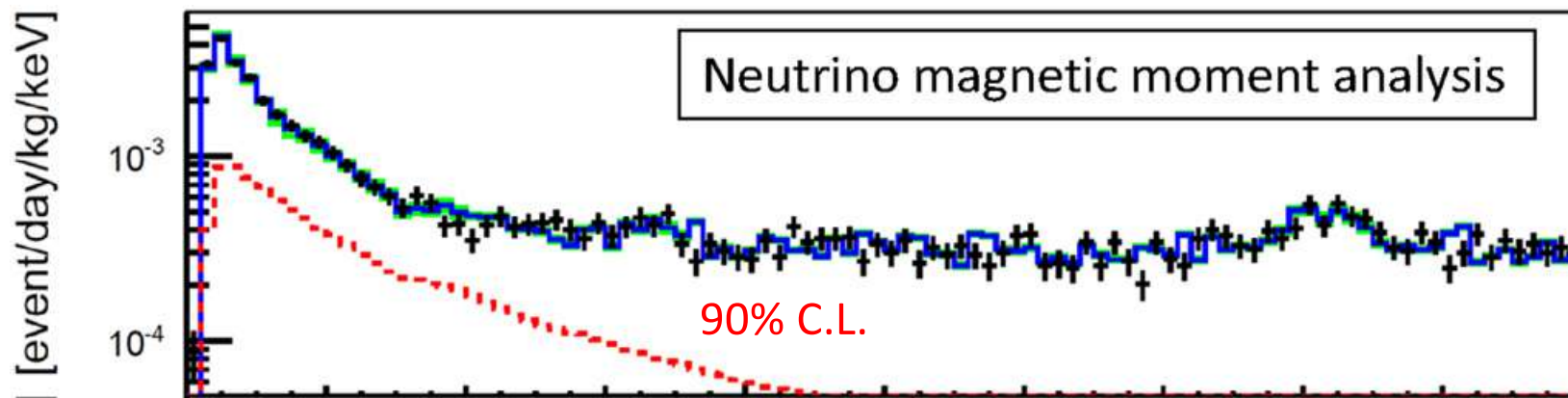
Neutrinoのmilli chargeへの制限

- 電荷に対する直接的制限は、原子炉からの反ニュートリノを用いた探索が最も強い。
- CPT不変性や、ゲージ対称性を考えると正ニュートリノの電荷への制限はフレーバーによらず同様に厳しいと考えられる。
- しかし実験的に検証することの重要性を考え、正ニュートリノの各フレーバーのみの寄与があると考えて制限を付与。直接的な結果としては3桁程度の改善を行った。



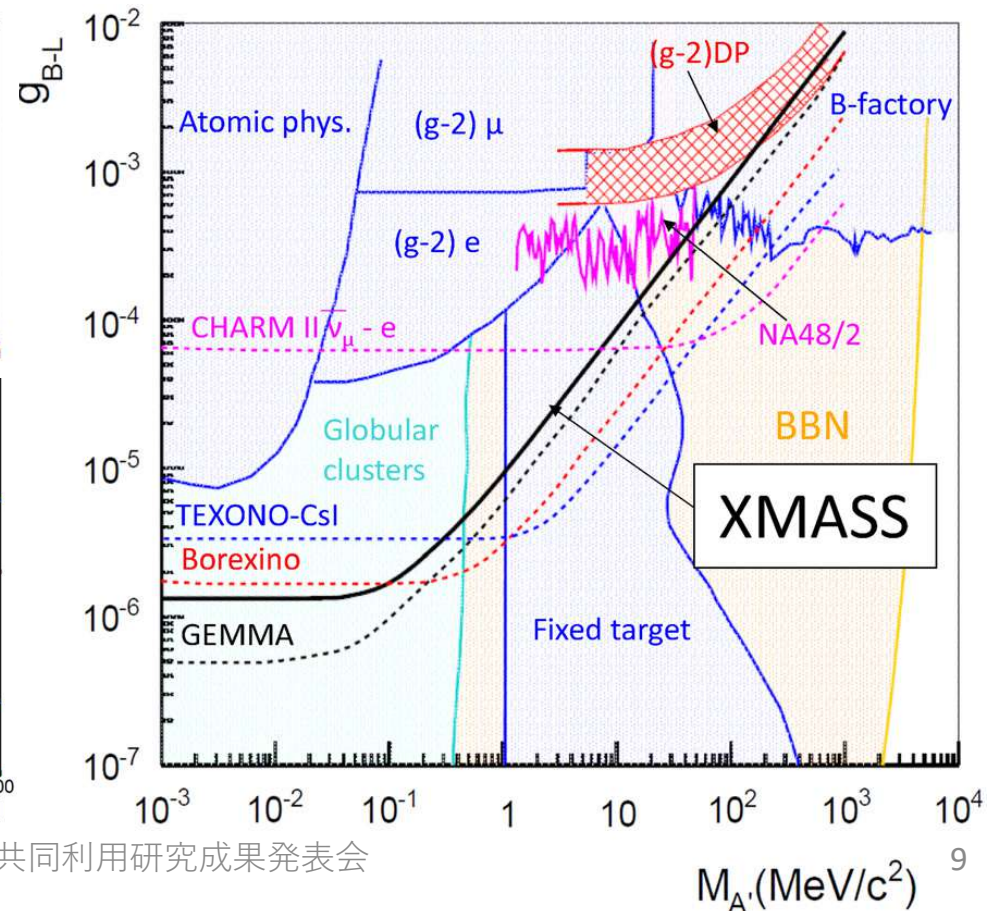
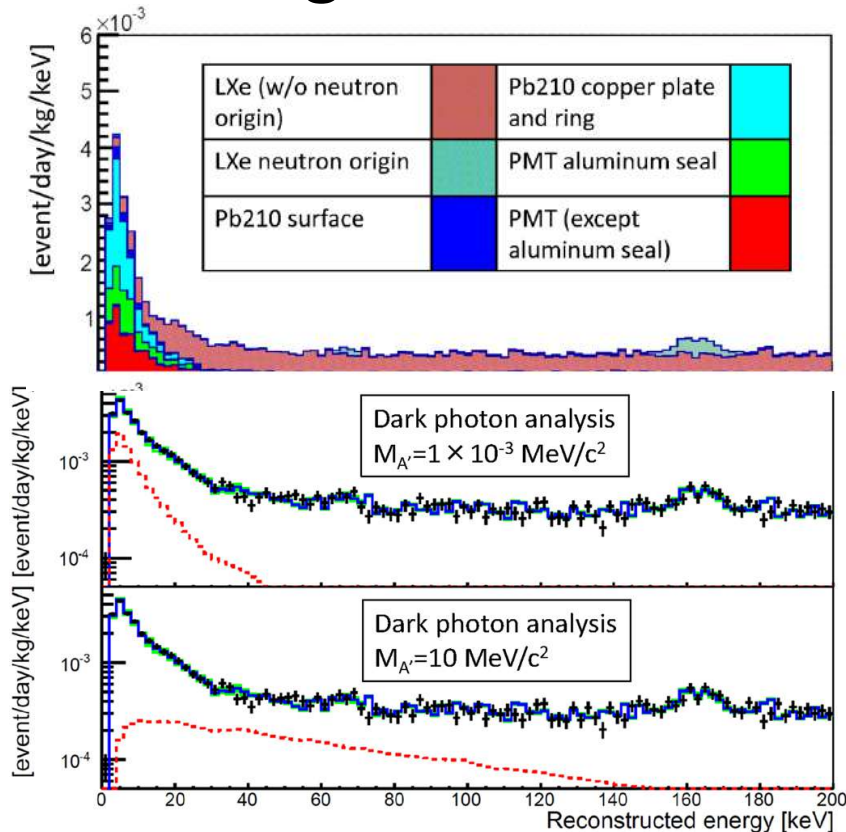
磁気双極子モーメント

- 磁気モーメントへの本研究の上限値 $1.8 \times 10^{-10} \mu_B$
 - Majorana ν だと $10^{-10} \sim 10^{-12} \mu_B$ があっても良い
 - GEMMA, BOREXINOは $2.8-2.9 \times 10^{-11} \mu_B$
 - XENON1Tから昨年報告のあった電子反跳の超過現象を磁気双極子モーメントとして解釈すると $1.4-2.9 \times 10^{-11} \mu_B$



U(1)_{B-L} ゲージボゾンとの結合

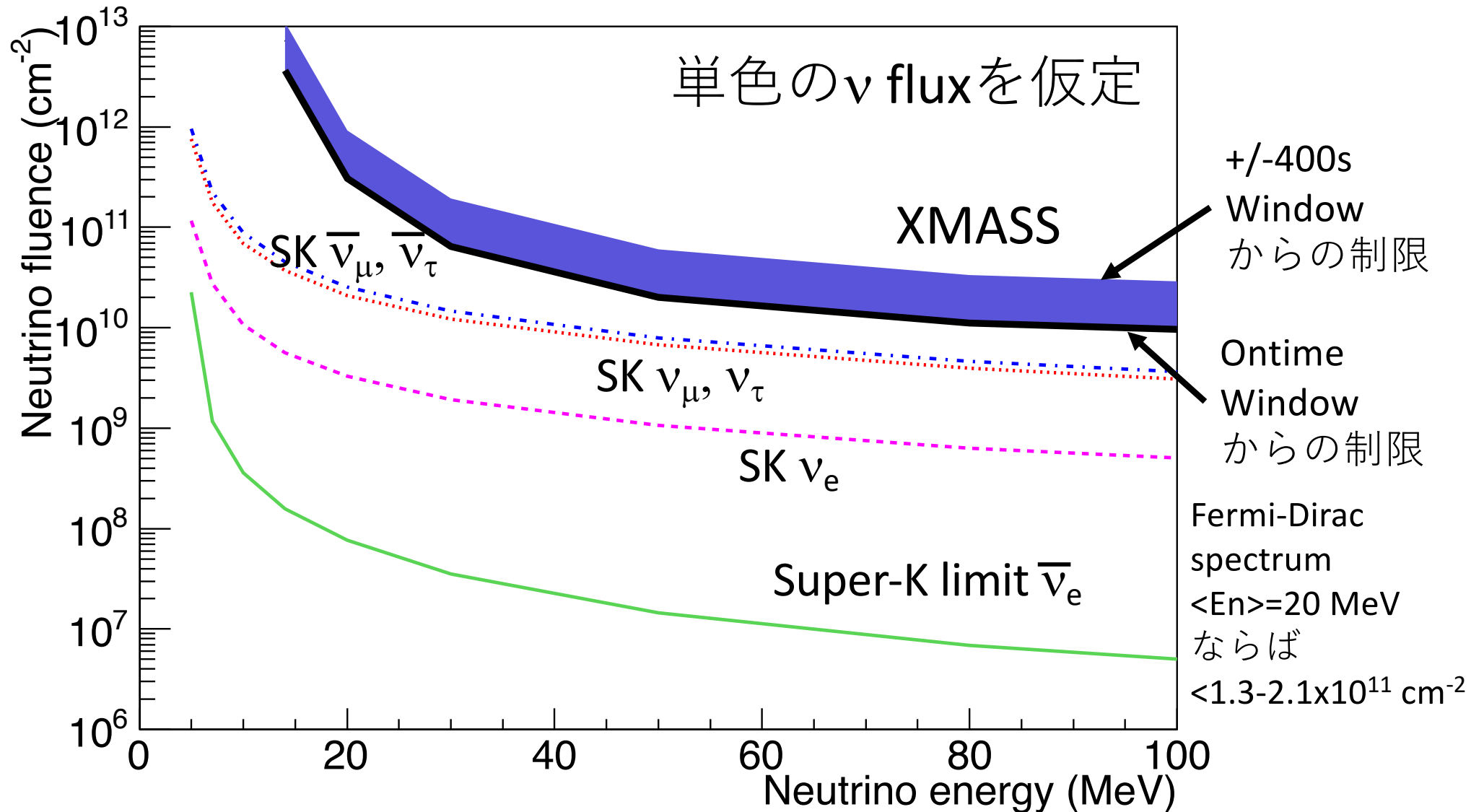
- ν_R があるとB-L対称性がゲージ化できる。(Dirac ν)
- ゲージボゾンとの結合がある場合、スペクトルが高エネルギー側までextendする。BG見積りに工夫。
- Muon g-2の異常を説明する可能性をほぼ排除した。



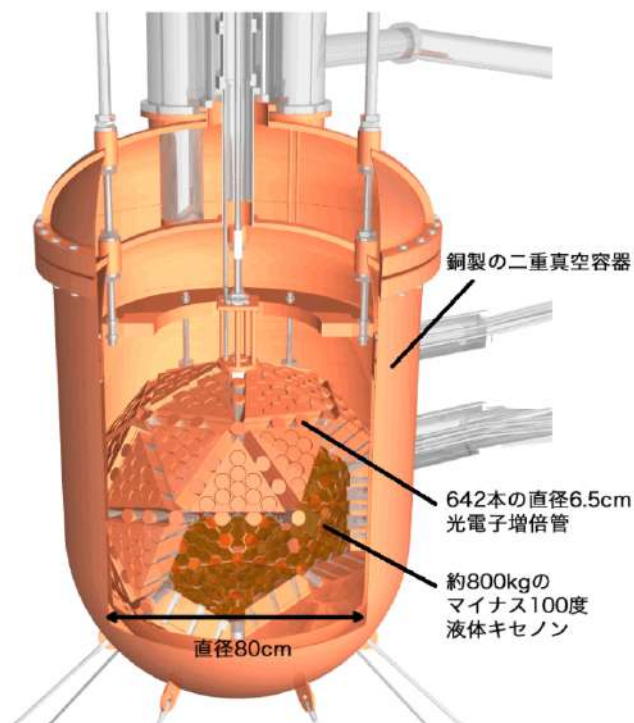
Search for event bursts in XMASS-I associated with gravitational-wave events, [aiXiv: 2007.16046](#)

- LIGO/Virgo O1/O2で観測された10個のbinary BH merger, 1個のbinary n mergerにcorrelateした現象。
- -400秒から10,000秒の時間範囲に対して、全体積に於ける現象のBGからのエクセスを探索。
- 4つのエネルギーレンジで探索
 - <30 keV, 30-300 keV, 300-3500 keV, >3500 keV
- コインシデンス時間幅は以下 0.01s刻みでスライド
 - 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1, 2 sec
- 事象前のBGから予想される事象数に統計的excessがあるかをテストした結果、look elsewhere effectを考えると 3σ 以上のエクセスはなかった。

GW170817 (neutron star merger)からの ν flux limitを原子核反跳の事象数から算出



B09 次世代暗黒物質探索実験の検出器構造研究



低RI PMT R10789

- 研究代表者 宇宙線研 安部 航
- XMASS実験で蓄積してきた技術、知識をもとに次世代の暗黒物質探索実験のための低バックグラウンドの検出器構造の設計を行う
 - 検出器構造
 - 低RI PMT R10789等の低RI要素
- さらなる検出器要素の低RI化と、低RI測定のためのHPGe検出器の高効率高感度化を進めている
 - PMT R13111の開発
 - HPGe検出器の低BG化
- 採択額 50千円
 - Ge測定で使用する手袋の購入に使用させていただきました

2020年度の成果

• HPGe検出器の環境整備

- 故障で稼働していなかった1台のGe検出器を修理すると共に他2台の検出器と同じ場所に移設、3台まとめて効率よく運用できる体制を整えた
- BG低減のため、まとめて設置した検出器エリアをクリーンルーム化しようとしている。フレームは設置した。

• 昨年度までに開発を終えた低RI PMT R13111についての結果を論文にまとめて提出

- Development of low-background photomultiplier tubes for liquid xenon detectors **JINST 15 (2020) 09, P09027**
- ベースとなった R10789 からRIを5分の1~30分の1と大幅に低減
- **フィードスルー用の少量のガラスを高純度試薬から合成**
- **フォトカソードのKを40Kを低減した³⁹Kエンリッチ品を使用**



R13111



B07 第3世代の暗黒物質直接探索実験 (generation three consortium, G3C)

- 研究代表者：森山茂栄
- 研究目的：第3世代の暗黒物質直接探索実験を標榜し、そのための計画と準備を行う共同研究
- 合計人数：20名
 - 東大：関谷、竹田、安部、Martens他
 - 名古屋：伊藤、山下、風間、他
 - 横浜国立大学：中村他
 - 神戸：身内他
 - 東北：岸本、市村他
 - 日大：小川
- 査定額：50千円（研究打合せ等で使用予定）
 - 繰越額：50千円（コロナ感染対策のため全てオンラインで開催）

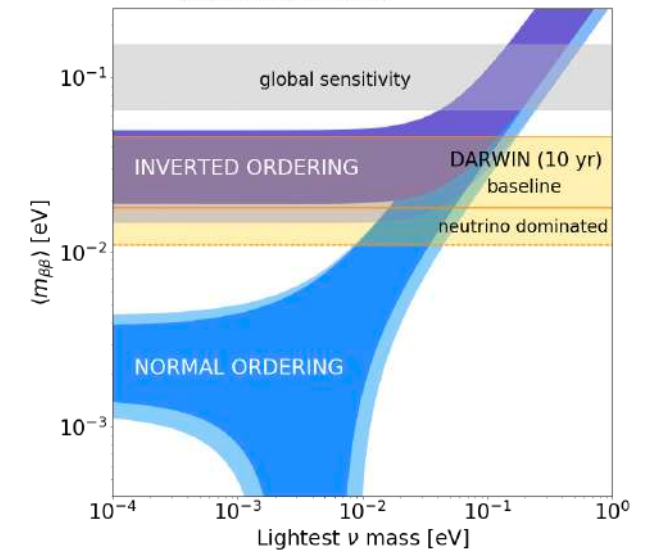
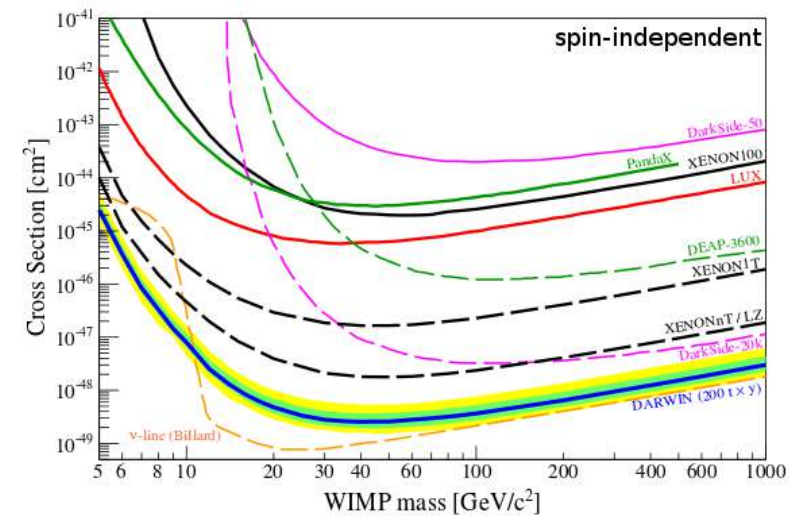
G3Cの目的とカバー内容

次世代の暗黒物質探索実験での発見と研究へ向け、**独立したグループが神岡施設にある液体キセノンに関する議論・連携**を共用、調整して研究に活用し、**内容についても議論**できる部分があれば研究推進に寄与する。

- XMASS時代からの装置開発
 - 石英容器入りの液体キセノンTPC：後述
 - 1相型液体キセノンTPC：UK, University of Birminghamとの国際共同研究の申請を行っている
- 名古屋グループ
 - MPPCの低ノイズ化：後述
 - ハイブリッド光検出器の開発
 - 高抵抗薄膜を用いた電場形成：後述
- 横浜国立大学グループ
 - 液体キセノンからの赤外線発光：B14での発表を御覧ください。
- 日本大学グループ
 - モレキュラーシーブの開発：B10での発表を御覧ください。

DARWIN実験

- DARWIN実験: 液体キセノン約50トンを用いた実験で、2020年代後半に開始予定。
- 2020年9月より、以下のメンバーがDARWIN実験に参加
 - 東京大学: Kai Martens
 - 名古屋大学: 伊藤好孝、山下雅樹、風間慎吾 (+学生4名)
 - 神戸大学: 身内賢太郎
- Snowmass2021にLOIを提出し、2021年中にCDRを策定予定
- 現在、TPCのデザインや光センサーの開発に貢献している



1. 低ダークカウントSiPMの開発
2. ハイブリッド(PMT/SiPM)光センサーの開発
3. XMASS 低BG PMT(R13111)の情報提供
4. 密閉型石英容器を用いた液体キセノンTPCの開発(ラドン低減の実現)
5. 高抵抗薄膜・シートを用いた電場形成

2020年度の成果

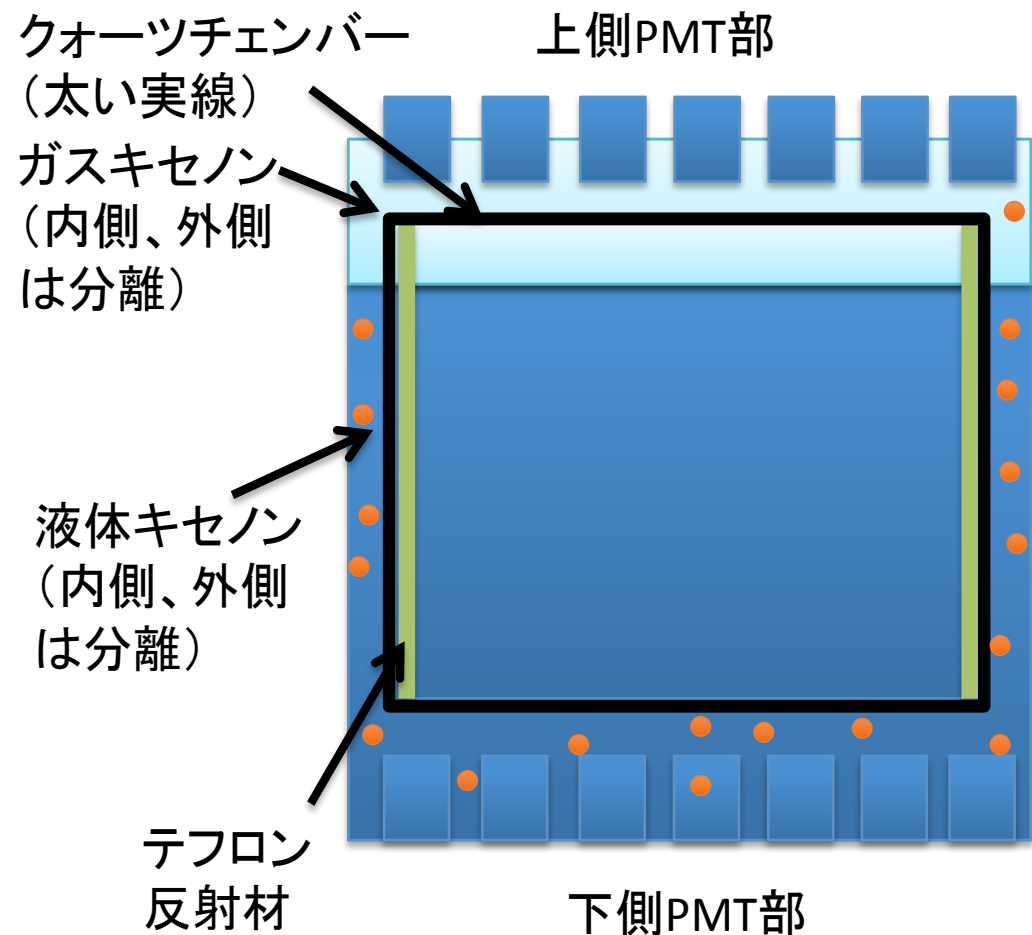
- 発表論文

- Development of a dual-phase xenon TPC with a quartz chamber for direct dark matter searches, Kazufumi Sato, Masaki Yamashita, Koichi Ichimura, Yoshitaka Itow, Shingo Kazama, Shigetaka Moriyama, Kosuke Ozaki, Takumi Suzuki, and Rina Yamazaki, [PTEP 2020, 113H02](#).
- Characterization of New Silicon Photomultipliers with Low Dark Noise at Low Temperature, K. Ozaki, S. Kazama, M. Yamashita, Y. Itow, S. Moriyama, [arXiv: 2007.13537](#)

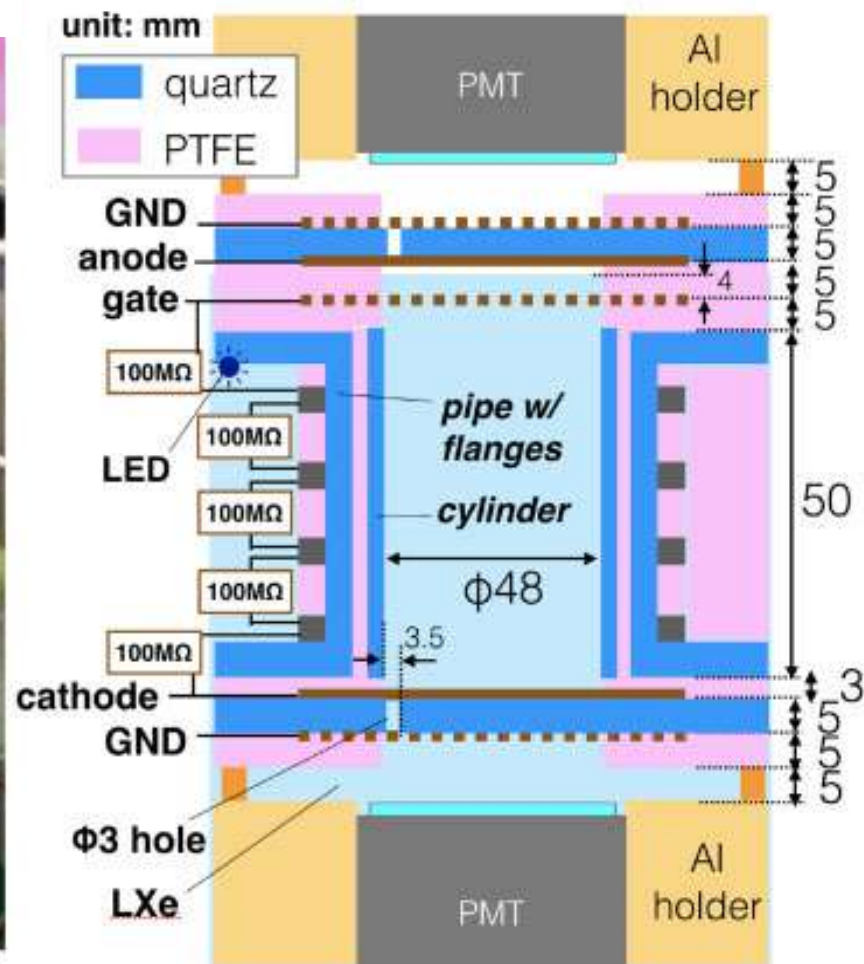
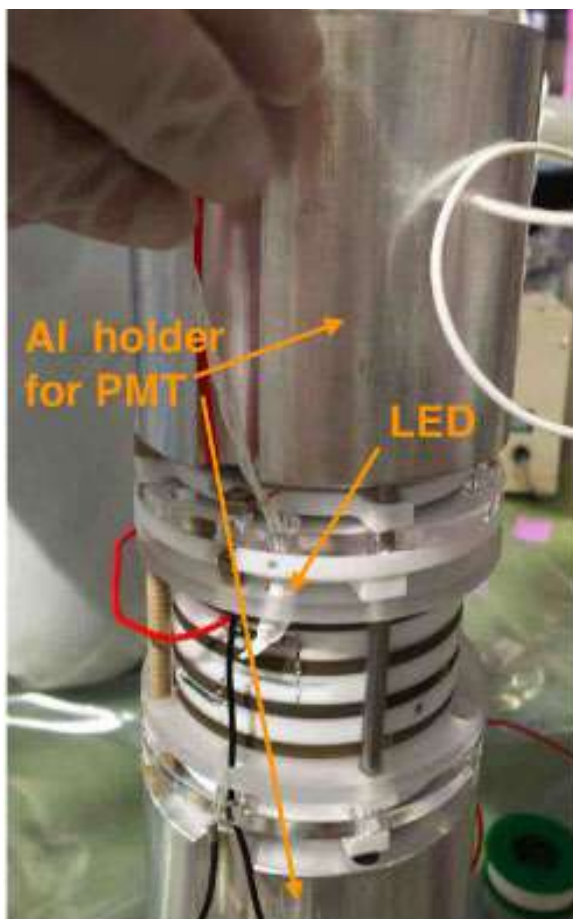
Development of a dual-phase xenon TPC with a quartz chamber for direct dark matter searches

- 将来の液体キセノンを用いた暗黒物質探索において、問題となるラドンの混入を抑える。
- 同時に内部にノイズ源の自由電子を作る要因の低減にも有効。
- その基礎として石英容器入りでTPCとしての動作を確認。ラドン低減は次ステップ。

次世代検出器のイメージ

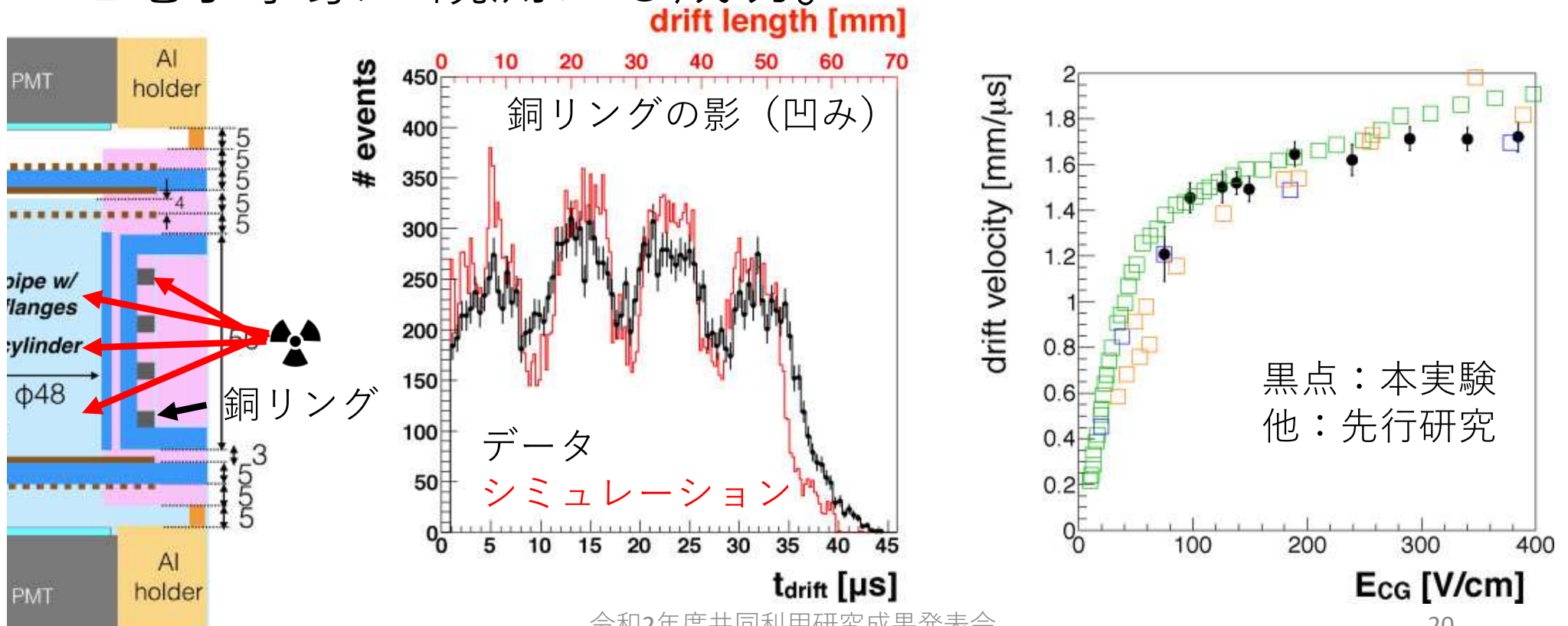


試作した石英容器入り LXe TPC



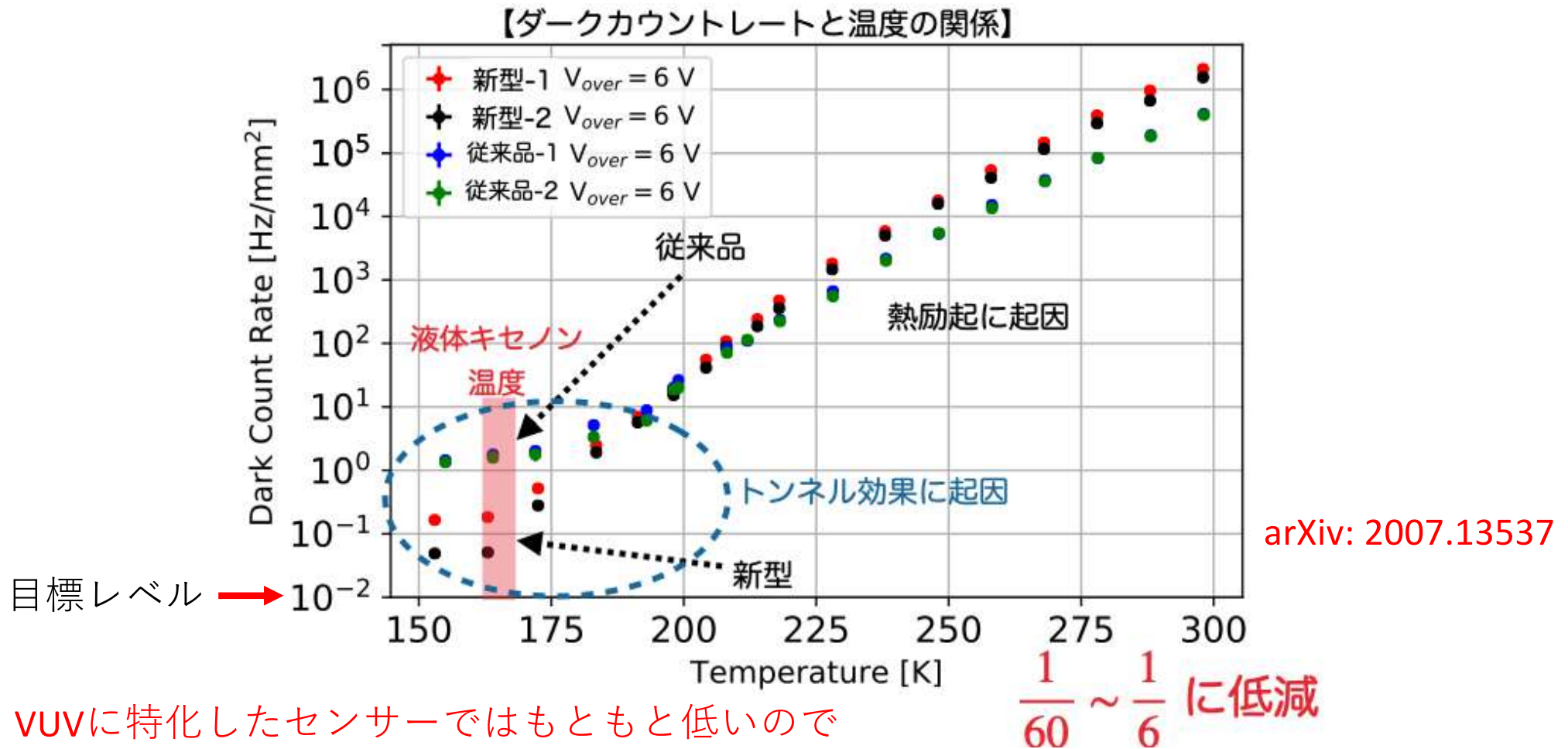
LXe TPCとしての動作を確認

- チャージアップ等を心配したが>200hr安定動作を確認
- 側面から入射したガンマ線による現象に、電場形成用銅リングによる影のパターンが観測。
- 印加電場とドリフト速度の関係が先行研究と無矛盾。
- 1電子事象の観測にも成功。



低ダークカレントのSiPMの開発

- PMTに代わるSiPMのダークを低温で最適化
- 内部電場を減らし低温でのトンネル効果を抑制



VUVに特化したセンサーではもともと低いので
同様の対策を行えば目標を達成できると考えている

高抵抗薄膜を用いた電場形成

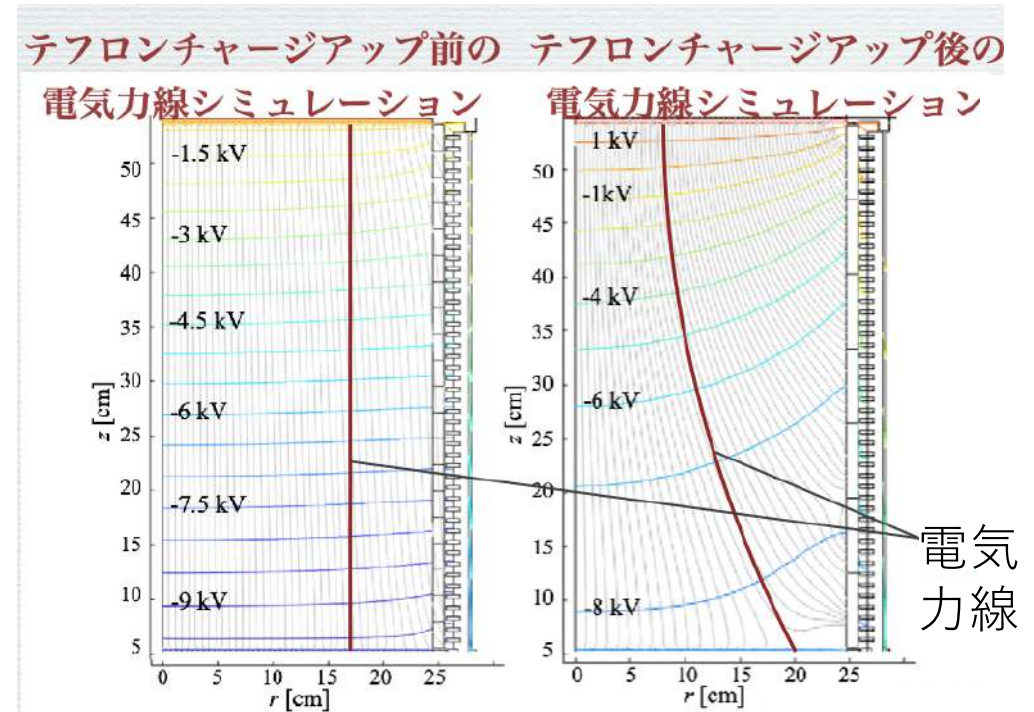
- LXe TPC内部のテフロンは改良の余地あり：

- チャージアップ
- ラドン放出
- 中性子放出

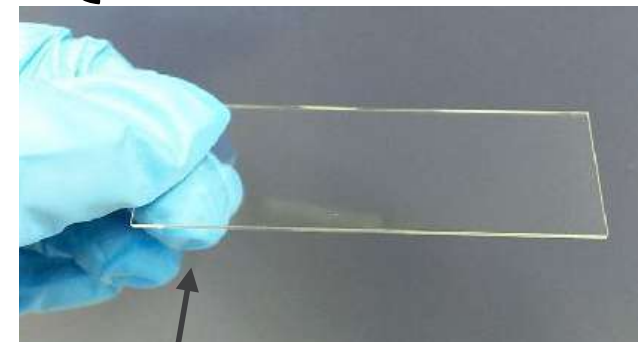
- 石英容器+透明電極
側面読み出しも可能。

- ITO+SiO₂の薄膜を利用
- 真空中での電場形成成功

- 液体キノン中ではアウトガスのせいでドリフトできる電子が少なかった。
今後循環しながら純度を保つ予定。



JINST12 P11022



まとめ

- B08: XMASSからは新たな物理成果の発信
- B09, B07: 暗黒物質の発見と研究へ向けた開発と連携を順調に進めている。