

XENONnT実験の現状および 将来計画XLZDに向けた極低放射能技術の開発

MASATOSHI KOBAYASHI (KMI), 2026/03/07 第11回極低放射能技術研究会

Dark matter search with LXeTPC

XENON10



XENON100



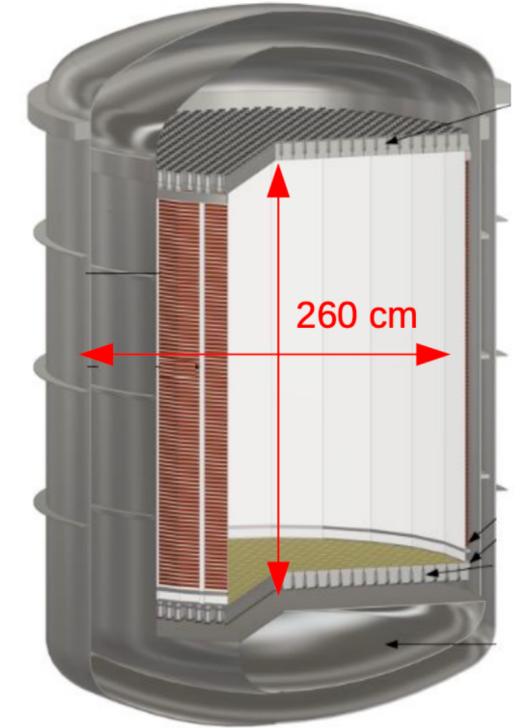
XENON1T



XENONnT



XLZD



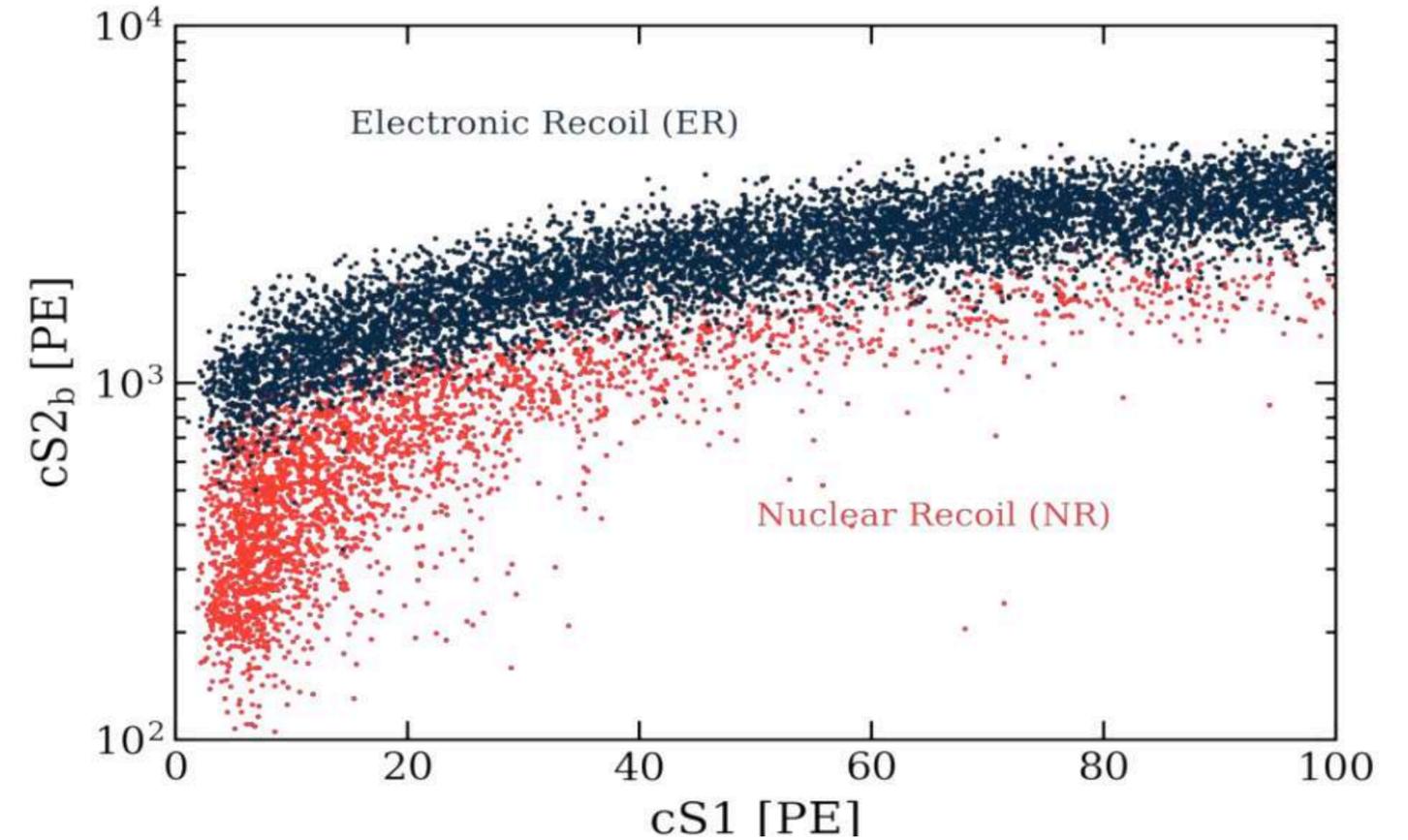
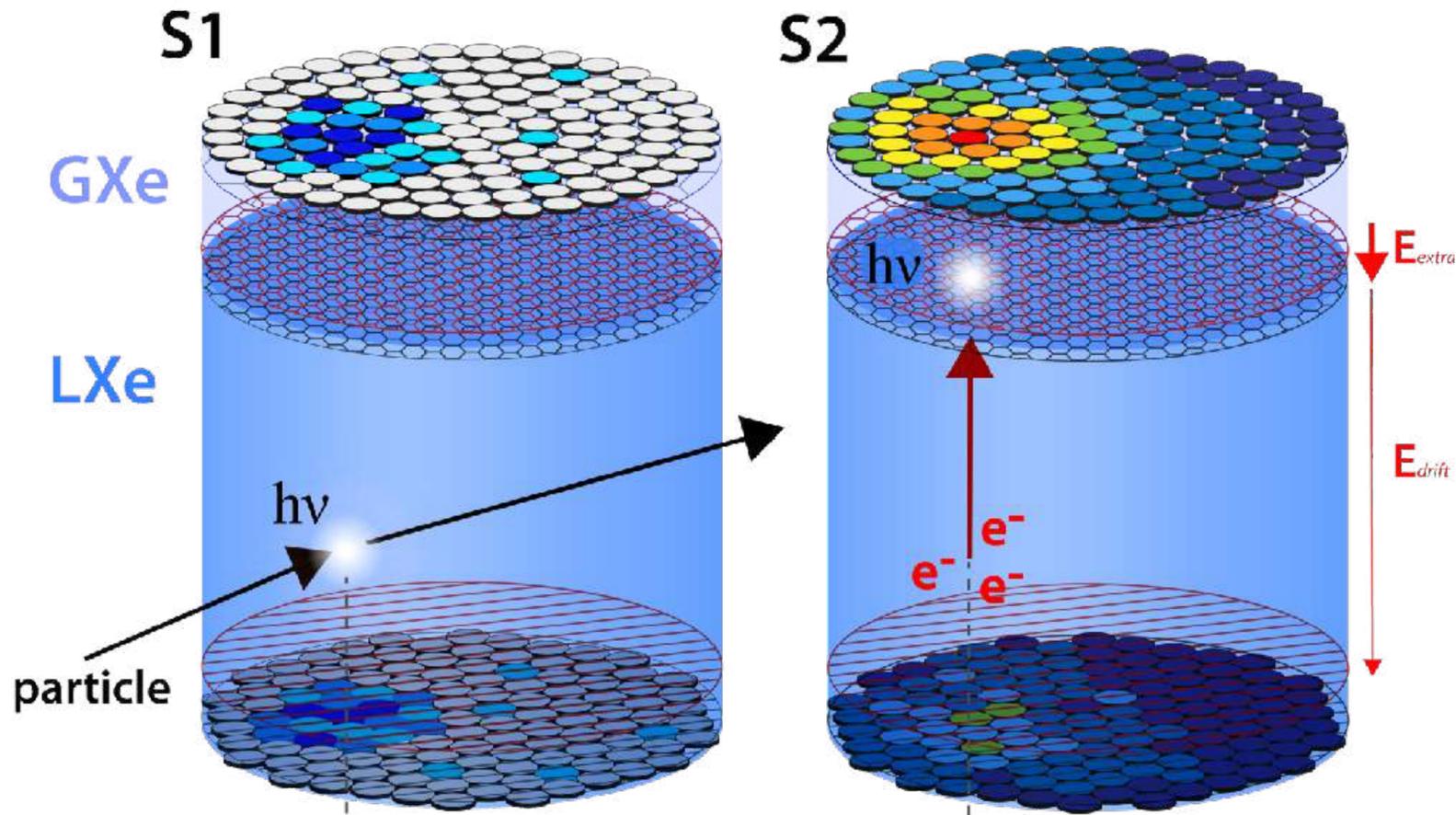
| | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Years | 2005 - 2007 | 2008 - 2016 | 2012 - 2018 | 2019 - NOW | 2030s - |
| Total Xe mass | 25 kg | 161 kg | 3200 kg | 8500 kg | 60-80 t |
| WIMPs sensitivity | $\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-48} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-49} \text{ cm}^2$ |

• XENONnT/XLZD実験：液体キセノンTPCを用いた暗黒物質直接探索実験

• XENONnT(現行): 8.6トン検出器

• XLZD(将来実験): 60-80トン検出器

Dual phase liquid xenon detector



- 二相式検出器: LXe + GXe
- 暗黒物質や放射線が入射するとシンチレーション光 (S1)と電離電子を生成
 - 電離電子は電場でドリフトされ、液面付近の強電場で比例シンチレーション光を生成(S2)
- S1, S2をそれぞれPMTで観測する

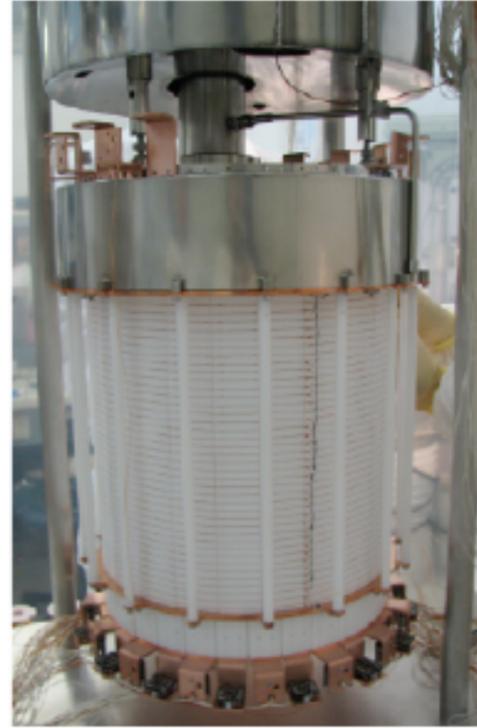
- S1/S2観測の強み：粒子識別能力
 - 電子反跳(ER) : β , γ , Axion,...
 - 原子核反跳(NR): Neutron, WIMPs,...
- ERとNRでS1-S2分布が異なるため、特にWIMPs探索において強力にBGを排除できる

Dark matter search with LXeTPC

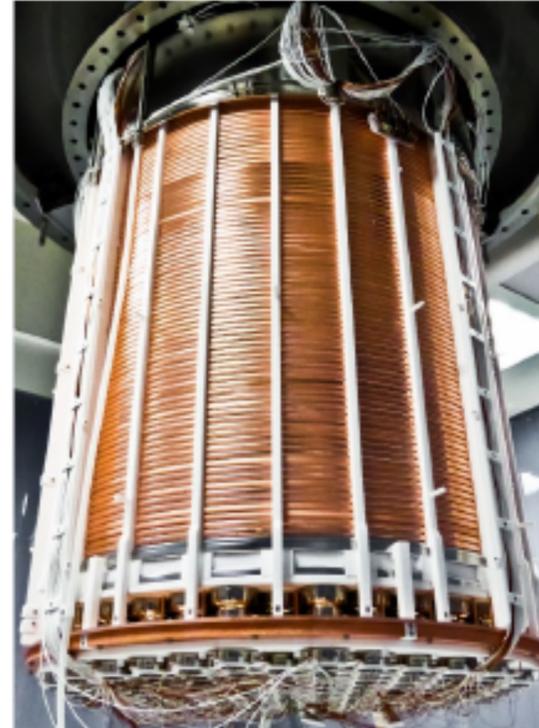
XENON10



XENON100



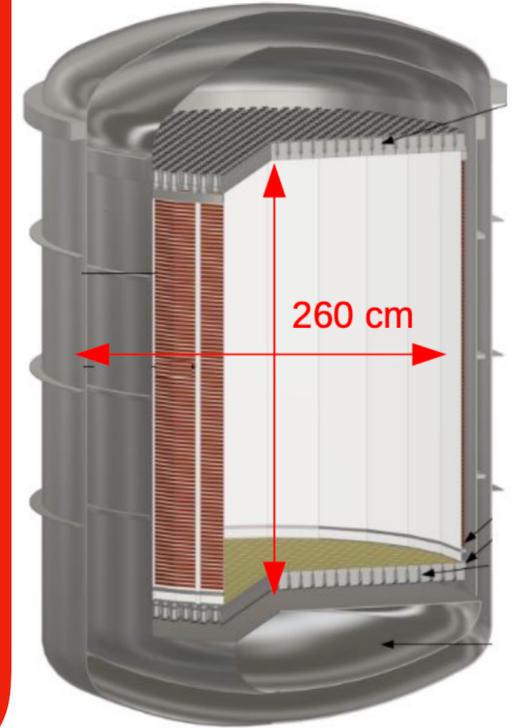
XENON1T



XENONnT



XLZD



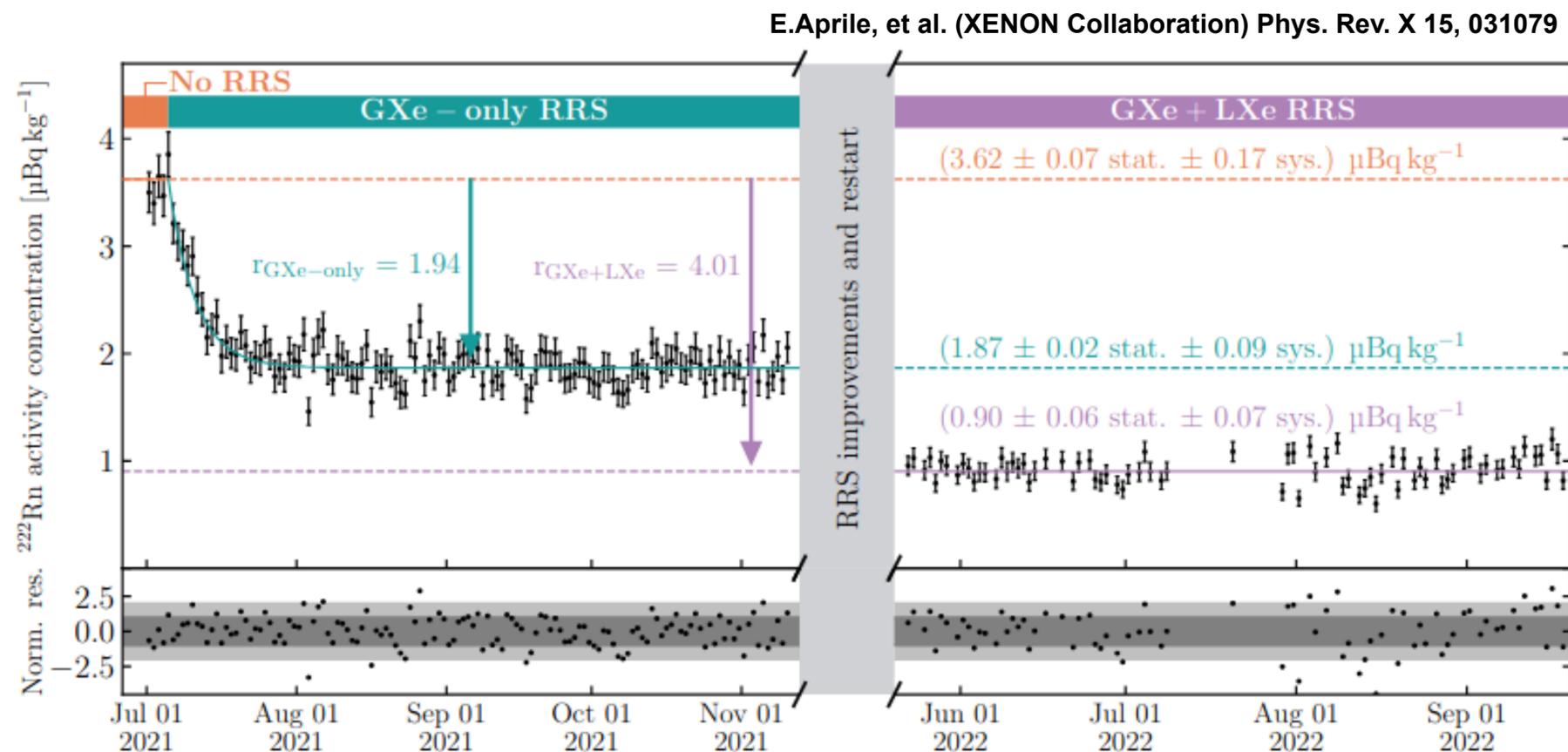
| | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Years | 2005 - 2007 | 2008 - 2016 | 2012 - 2018 | 2019 - NOW | 2030s - |
| Total Xe mass | 25 kg | 161 kg | 3200 kg | 8500 kg | 60-80 t |
| WIMPs sensitivity | $\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-48} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-49} \text{ cm}^2$ |

- XENONnT/XLZD実験：液体キセノンTPCを用いた暗黒物質直接探索実験
 - XENONnT(現行): 8.6トン検出器
 - XLZD(将来実験): 60-80トン検出器

Status of XENONnT

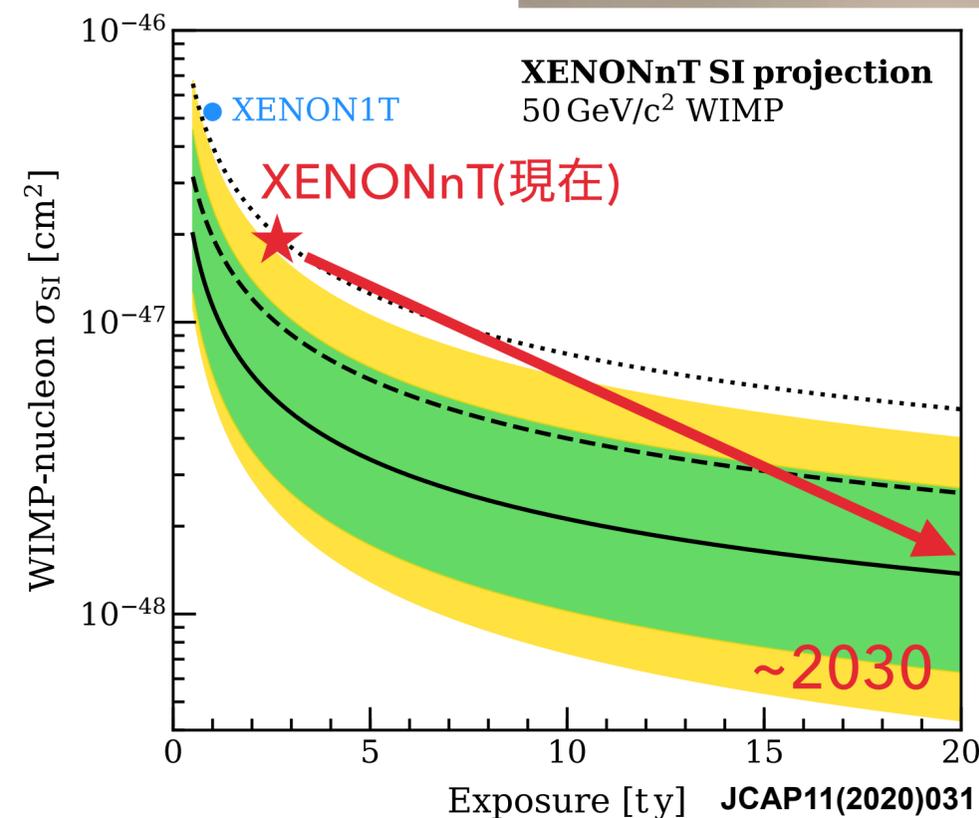
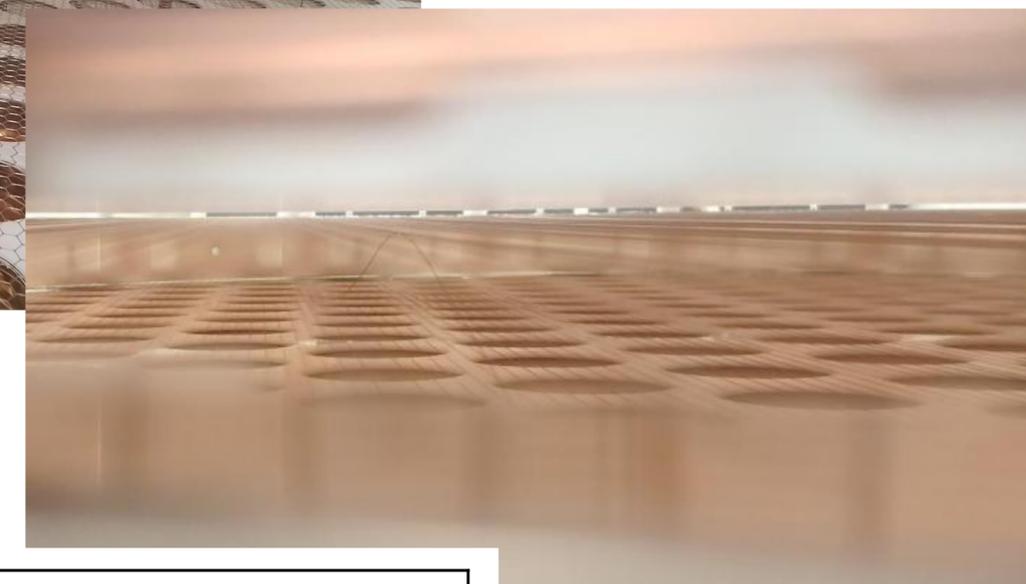
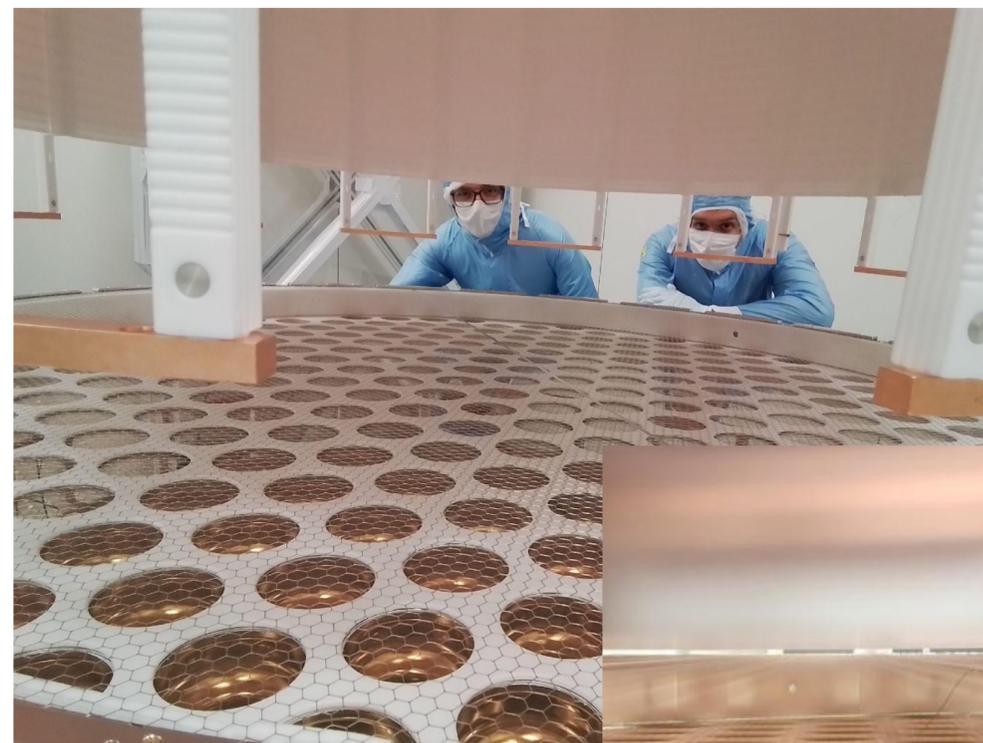
- XENONnT実験: 2021年にデータ取得開始
 - これまでにおよそ~8 ton · yearのデータを取得済
 - 部材のスクリーニング、蒸留によるラドン除去などの徹底した低BG化で、低エネルギー電子反跳事象を世界最低まで削減 (~16 evt/t/yr/keV)

- しかしながら電極に問題があり、電場が想定のおよそ1/4までしかかけられなかった
- ER/NR 分離性能が悪化、WIMPs探索で想定したほどの感度が出ず



Detector upgrade

- 2025年3月に検出器にデータ取得を一時休止、検出器のアップグレードを実施
- 電極の問題：Cathode電極とPMTの保護電極がショートしていた
 - アップグレード作業時、実際に1本のワイヤーが切れていることを確認
- 電極や一部問題があったPMTの交換を行い、運転再開に向け準備中
- アップグレードで電子反跳BG $\sim 1/10$ が期待
 - 最終的には現在より1桁低い感度を目指す



Analysis

- アップグレードと並行して取得済データの解析も進行中
 - 特に低質量暗黒物質で高感度：8B ニュートリノが主なBGに
- 最近の論文：
 - S2信号のみを用いた低質量暗黒物質探索 (arxiv: 2601.11296)
 - Solar reflected 暗黒物質探索 (arxiv.org: 2512.19592)
 - ^{214}Bi のベータ線スペクトル測定 (arxiv: 2510.04846)
 - ...
- 全データを用いたstandard WIMPs解析や低エネルギー太陽ニュートリノの解析も進行中

Dark matter search with LXeTPC

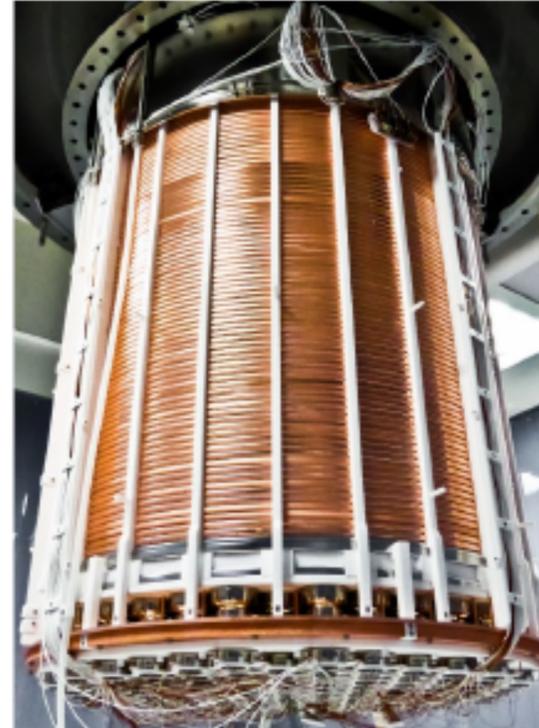
XENON10



XENON100



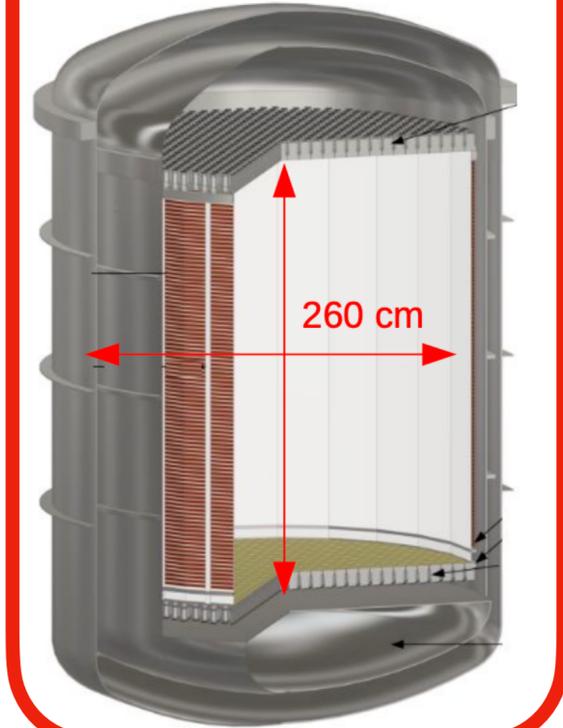
XENON1T



XENONnT



XLZD



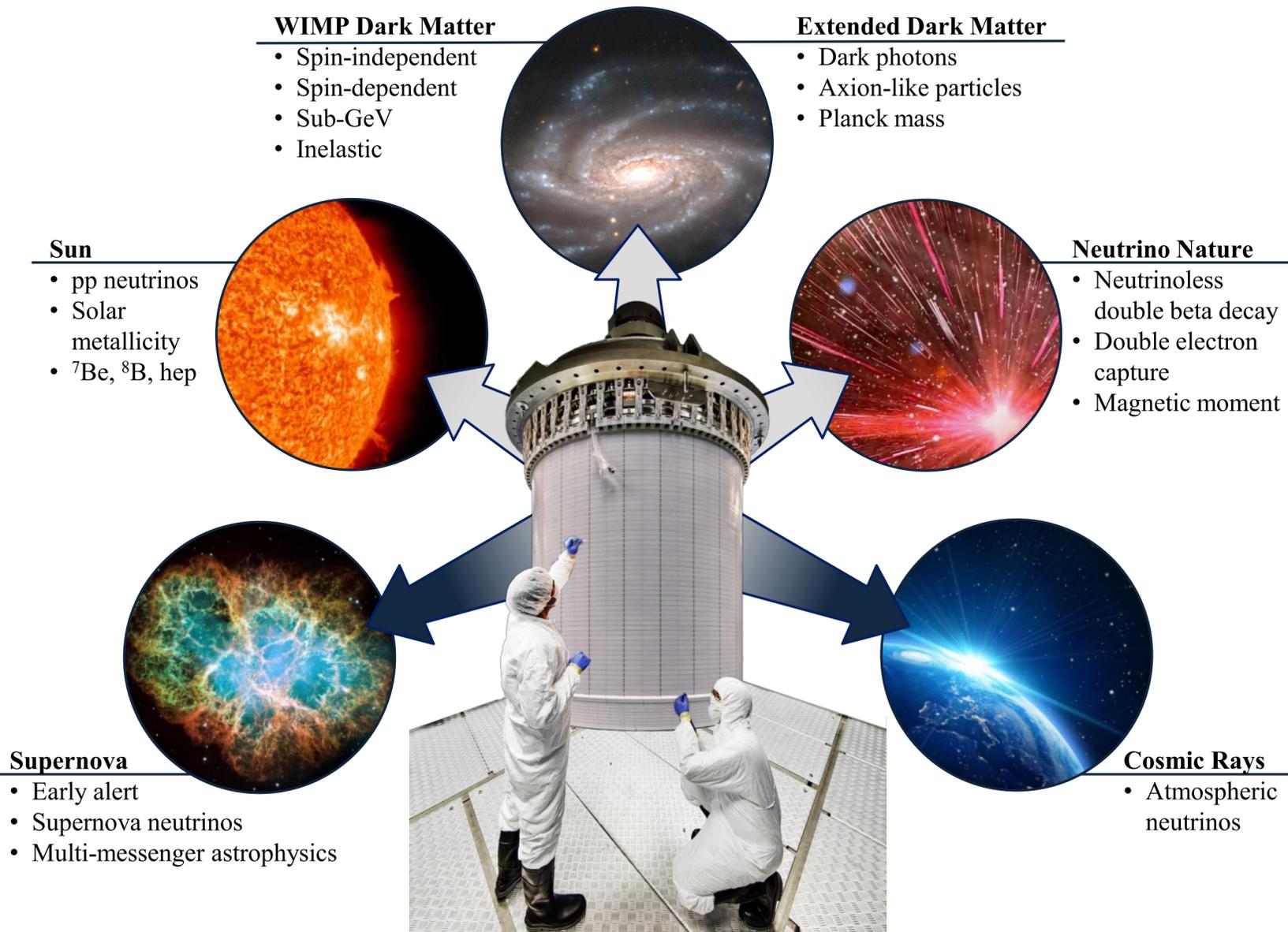
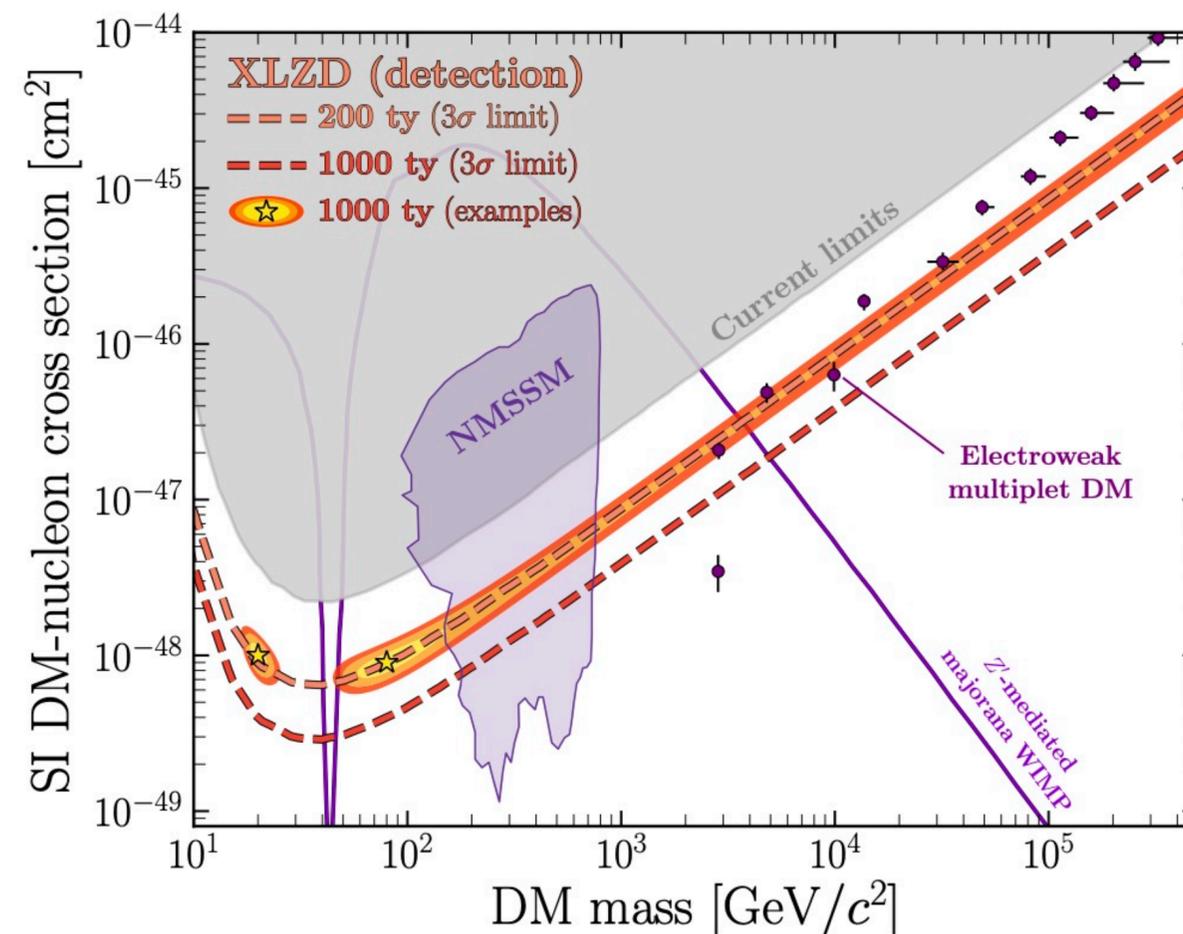
| | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Years | 2005 - 2007 | 2008 - 2016 | 2012 - 2018 | 2019 - NOW | 2030s - |
| Total Xe mass | 25 kg | 161 kg | 3200 kg | 8500 kg | 60-80 t |
| WIMPs sensitivity | $\sim 10^{-43} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-45} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-47} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-48} \text{ cm}^2$ | $\sim 10^{-49} \text{ cm}^2$ |

- XENONnT/XLZD実験：液体キセノンTPCを用いた暗黒物質直接探索実験
 - XENONnT(現行): 8.6トン検出器
 - XLZD(将来実験): 60-80トン検出器

XLZD: Physics targets

- WIMPs探索：
 - 1000トン・年の統計を貯め、ウィーノやヒグシーノなど電弱相互作用する暗黒物質の兆候を捉える
 - 大気/太陽ニュートリノが主なBG
 - 非弾性衝突を通じた観測など新たなチャンネルも
- 暗黒物質だけでなく、 $0\nu\beta\beta$ や低エネルギー太陽ニュートリノなどにも高い感度

Eur. Phys. J. C 85, 1192 (2025)



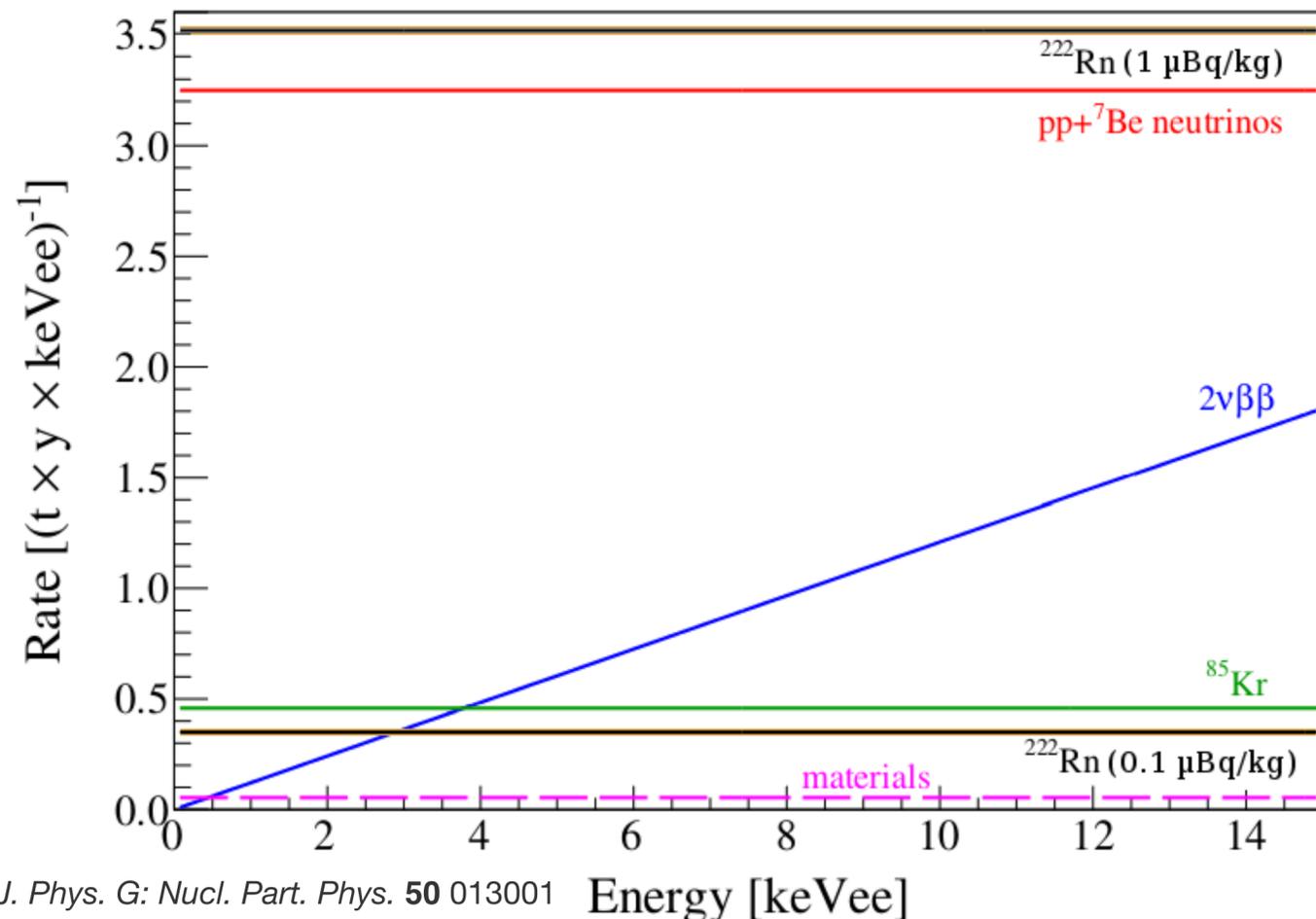
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 50 013001

XLZD: Backgrounds

- 2種類のBG源：電子反跳事象(**ER BG**)・原子核反跳事象(**NR BG**)
- どちらのBGでも、太陽・大気ニュートリノが支配的なBGとなる領域を目指す

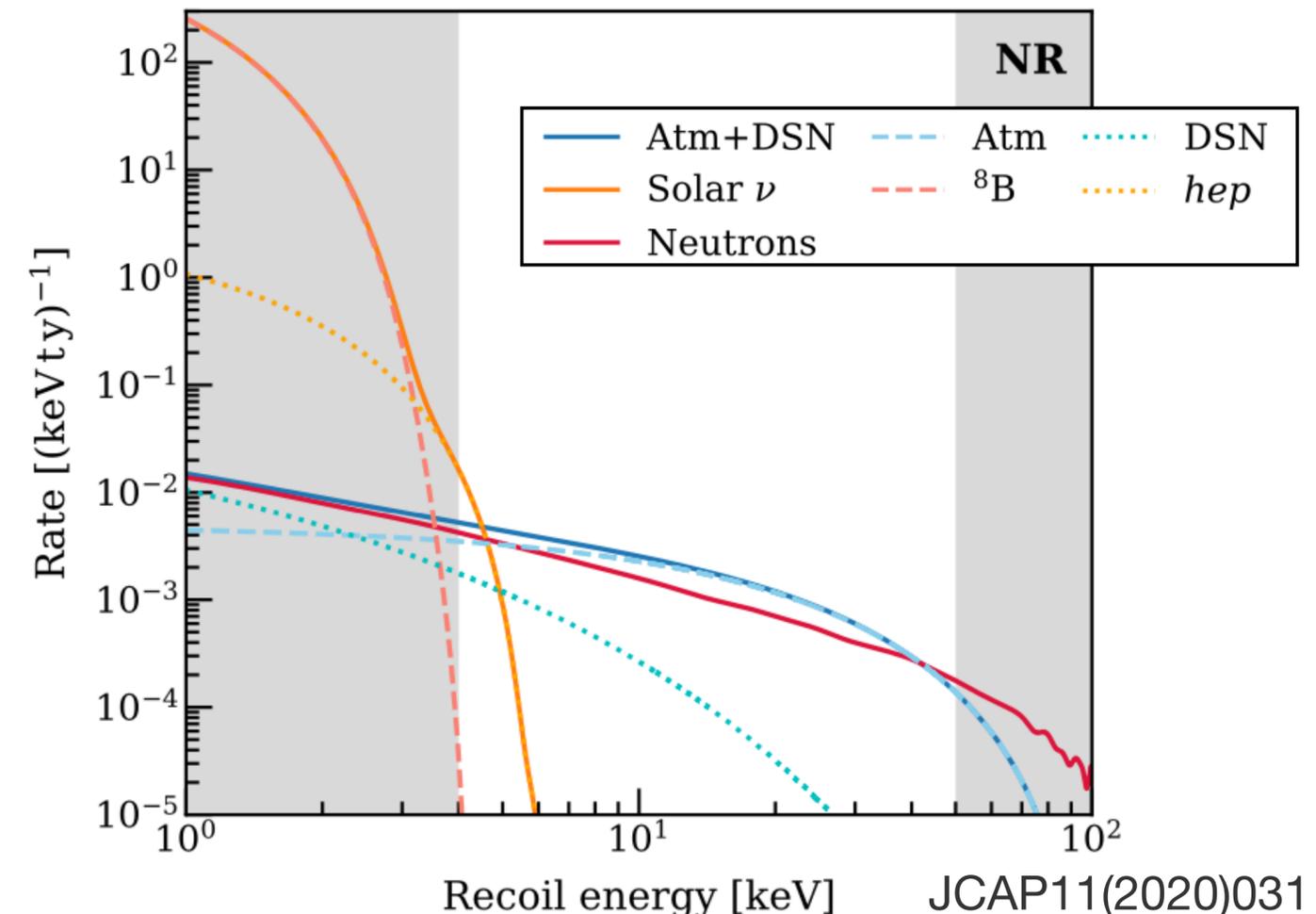
現状の主なER BG：Rnの娘核

- SUSやケーブル等からRnが湧き出す



現状の主なNR BG源：U / Th

- PMT, 圧力容器のU / Thからの中性子

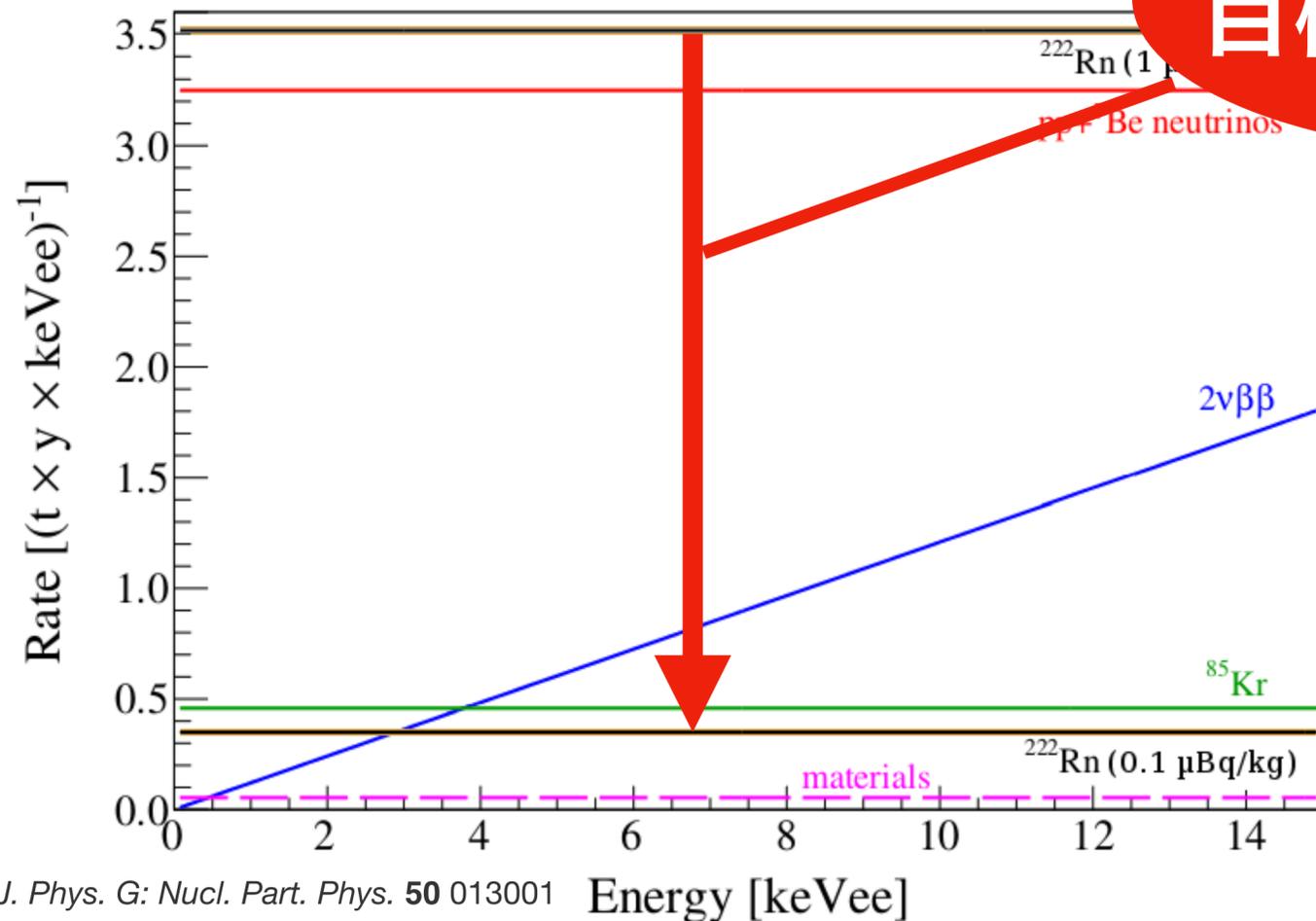


XLZD: Backgrounds

- 2種類のBG源：電子反跳事象(**ER BG**)・原子核反跳事象(**NR BG**)
- どちらのBGでも、太陽・大気ニュートリノが支配的なBGとなる領域を目指す

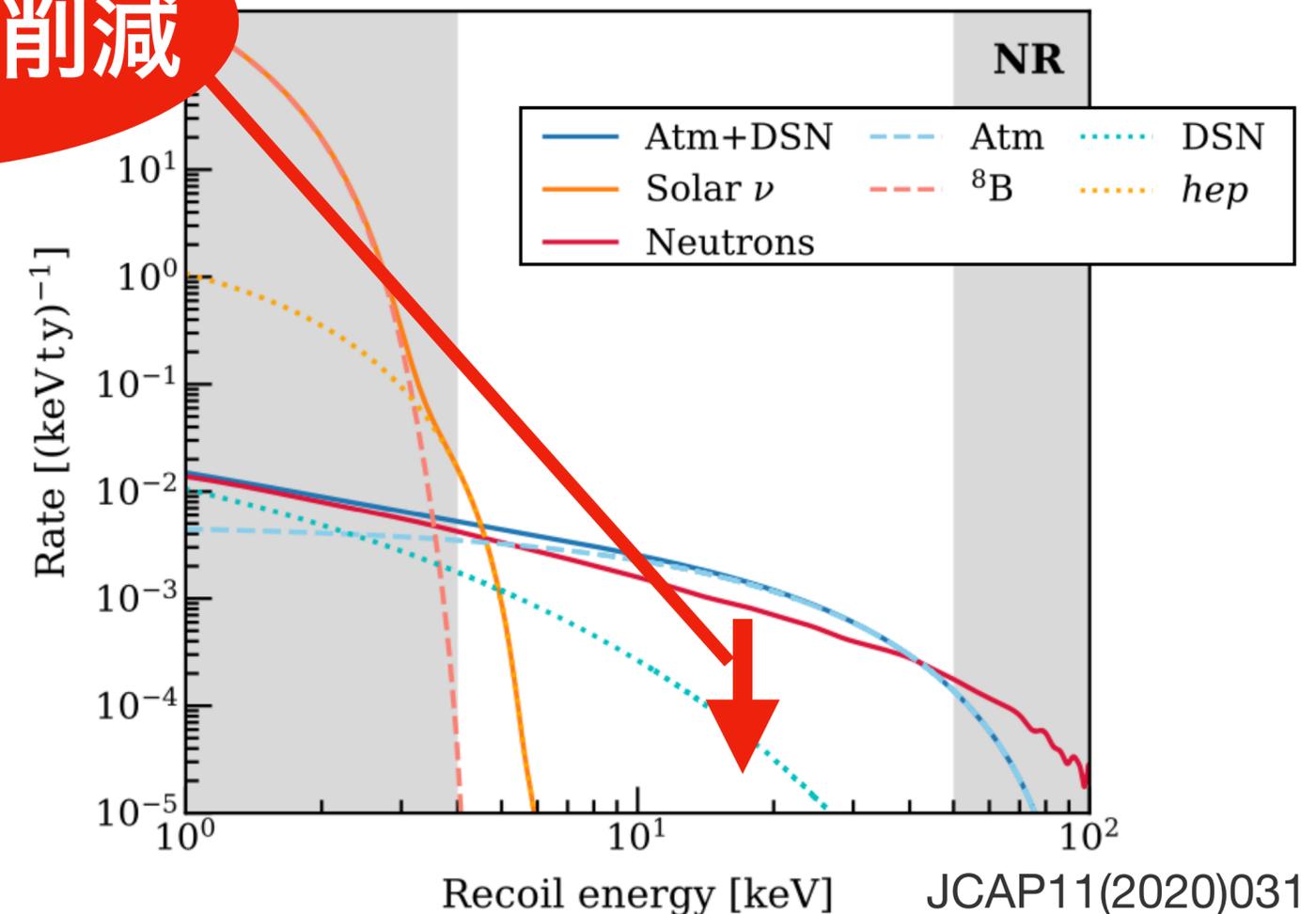
現状の主なER BG：Rnの娘核

- SUSやケーブル等からRnが湧き出



現状の主なNR BG源：U / Th

- 圧力容器のU / Thからの中性子



目標：1桁削減

Hermetic detector (PTEP: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptag028>)

- 石英ガラスとPTFEを用いた密閉型検出器

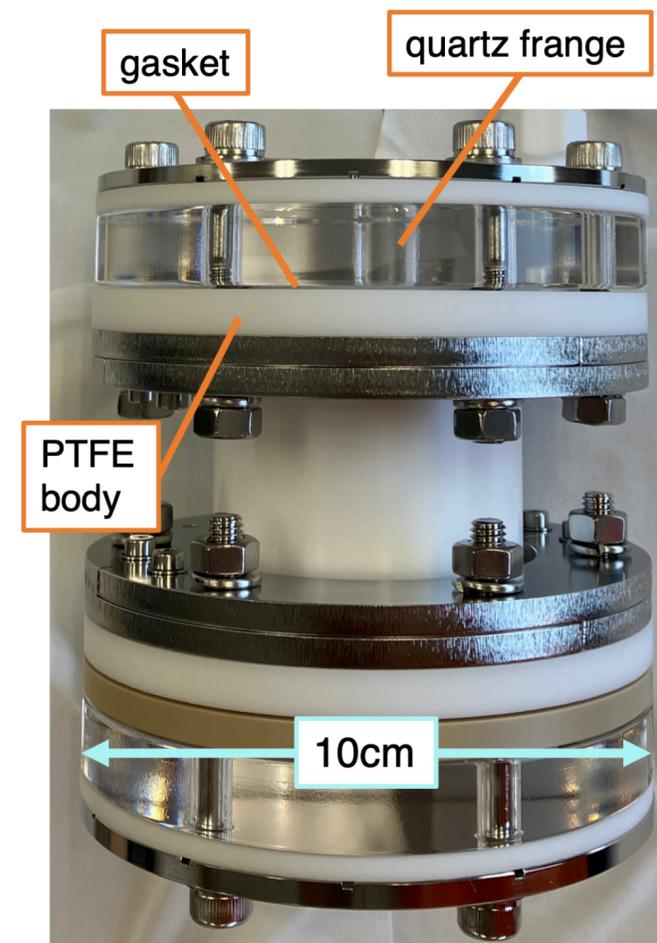
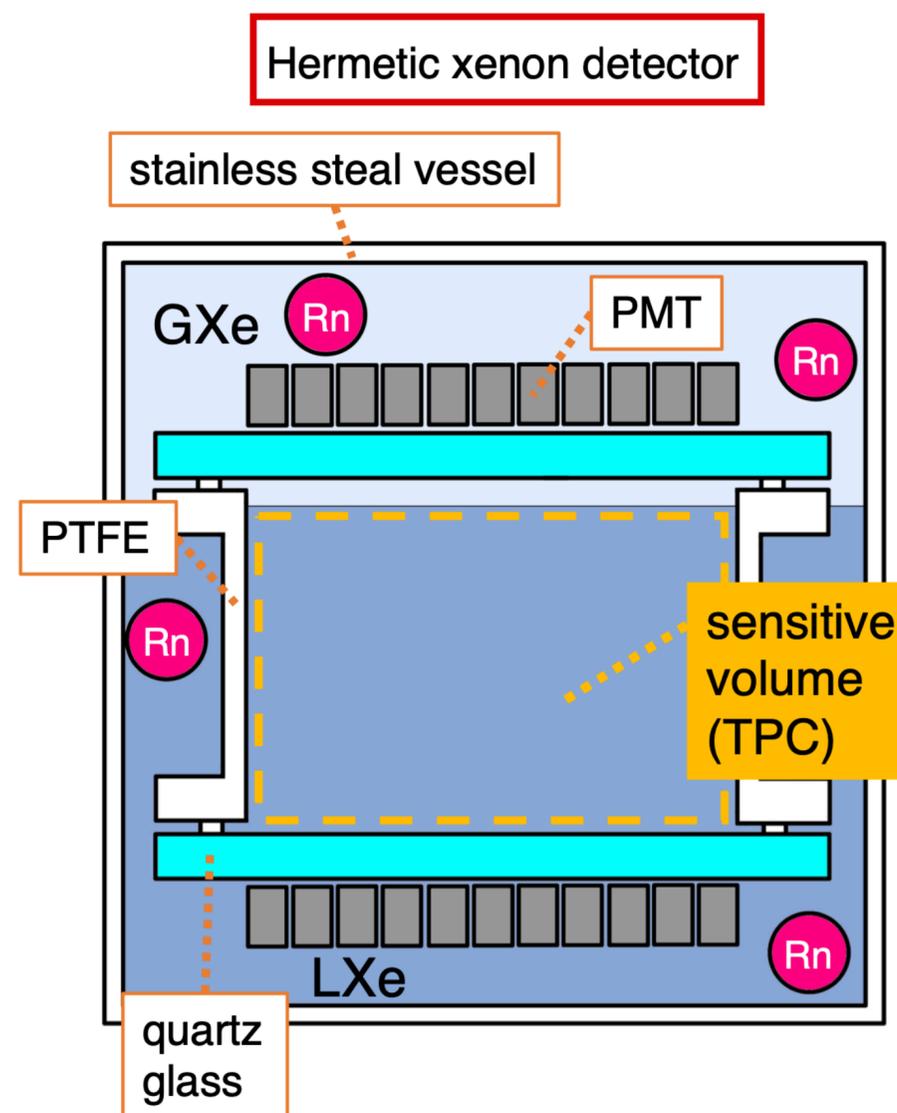
- クライオスタット、PMTケーブルなどからのラドンを遮蔽したい

- ラドン線源と循環装置を用いたGXe内でのテストでは、定常状態で

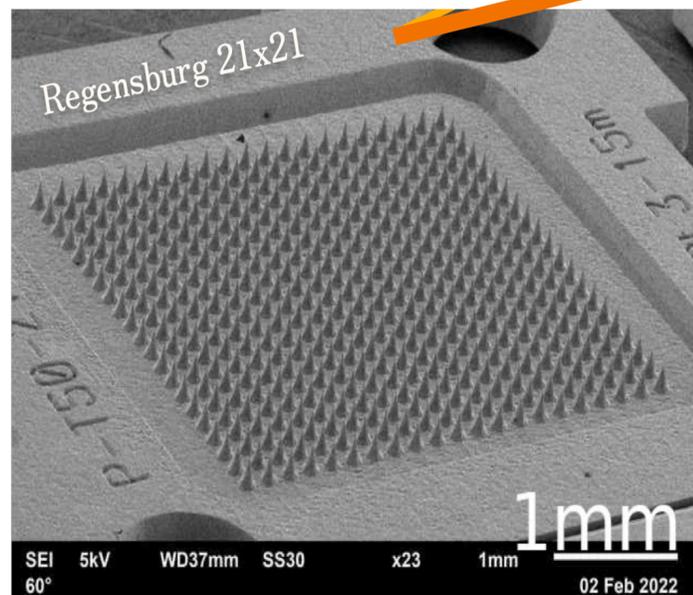
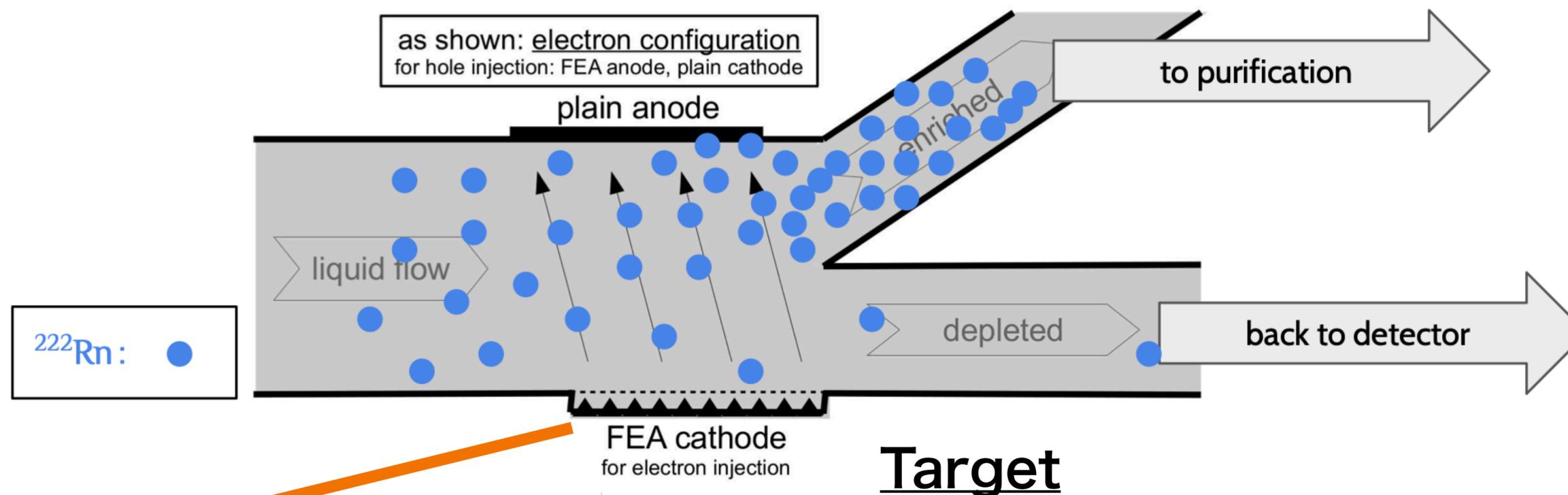
(内側ラドン濃度)/(外側ラドン濃度) < 1% 達成

- Accepted by PTEP

- 現在LXe中での遮蔽能力試験測定の前準備中



Radon removal with FEA

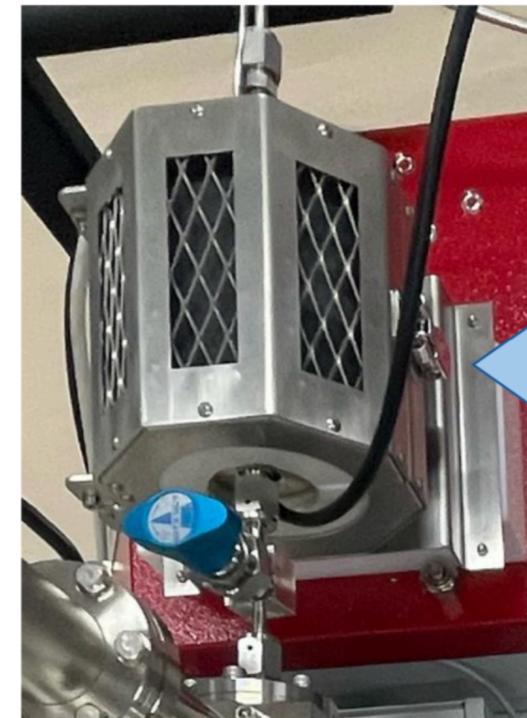
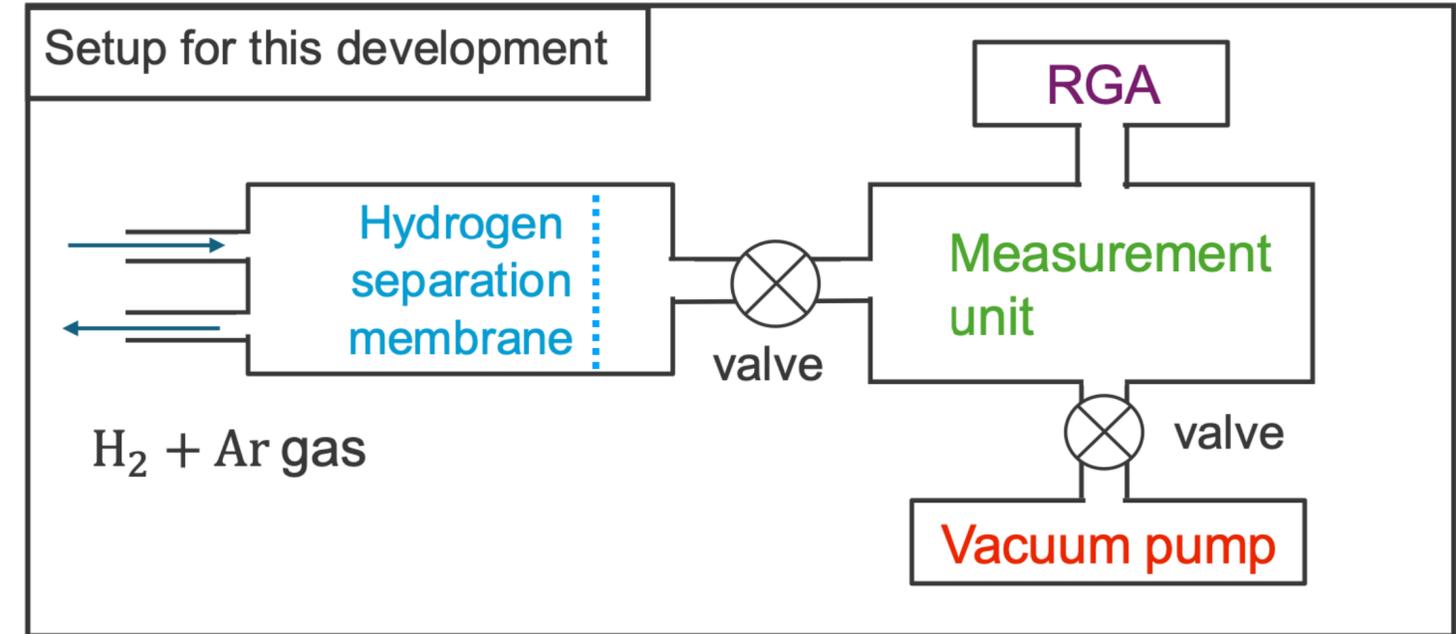


• FEAを用いたラドン除去

- Field Emission Arrayを用いて液体キセノン中に電流を流し、ラドンをドリフト
- ラドンを凝集することで、効率的にラドン蒸留塔に送り込む
- 液体キセノン中でFEAの試験を実施し、安定的な電流の印加に成功
 - ホールカレントの印加にも成功した

Trace Hydrogen measurement

- トリチウム：ラドンと同様に低エネルギーBG源
 - XENON1T excess (2020)
 - Q-value = 18 keVで β 崩壊
 - 環境中の水素に $\sim 10^{-13}$ 程度の割合で含まれている
- キセノン中の微量水素を測り、そこからトリチウム量を間接的に測りたい
 - $HT/Xe = HT/H_2 * H_2/Xe$
 - XENON1T excessの説明にはpptオーダーの測定が必要
- 神岡でのアルゴンを用いたR&D実験
 - パラジウム製水素分離膜を用いて水素を選択的に分離、RGAで測定
 - ~ 50 ppt感度での測定に成功



Hydrogen separation membrane module



Hydrogen separation membrane

Measurement for U/Th in PTFE

• PTFE中の微量ウラン・トリウム測定

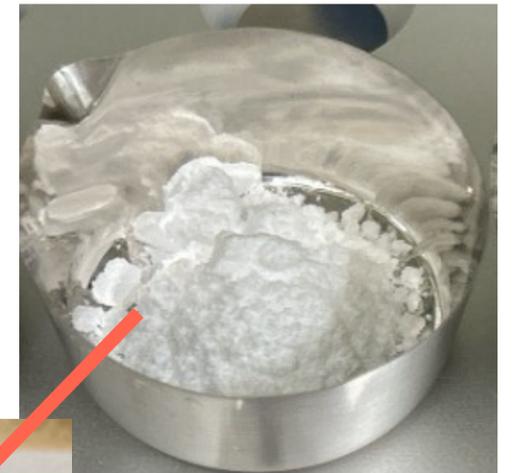
- ウラン・トリウムの核分裂や(α, n)が中性子BG源
- 筑波大の坂口先生と協力し、ICP-MSを用いた測定
- 最終的な目標：0.1 pptレベルの測定

• まずPTFEパウダー中のU/Th測定法を確立したい

- PTFEは耐薬品性が高く、溶液化の前に高温で分解する必要がある(灰化)
- 現在灰化に伴うコンタミの評価・低減中

• 最終的には複数メーカーのパウダーを比較し、より低いRIの物を探索していく

PTFEパウダー

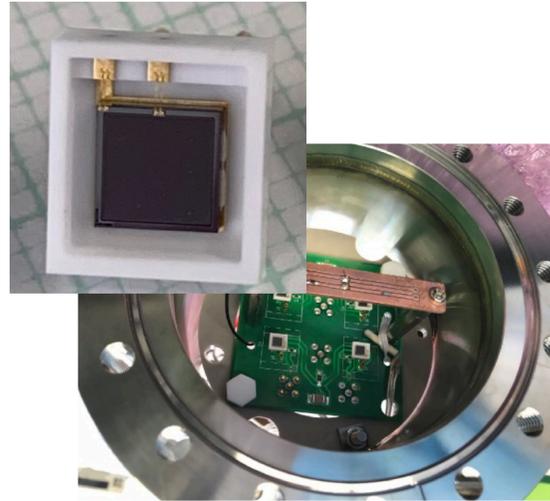


灰化炉



Photosensor development

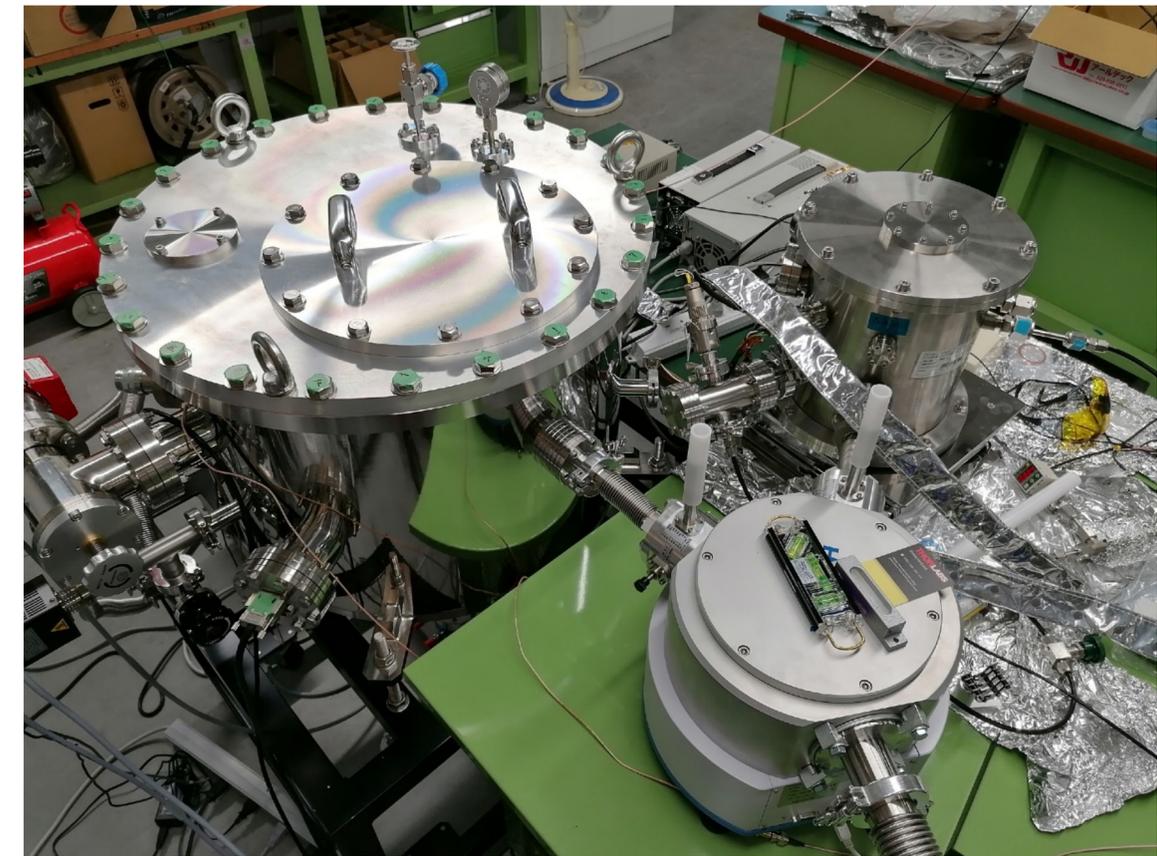
Low Dark Count SiPM



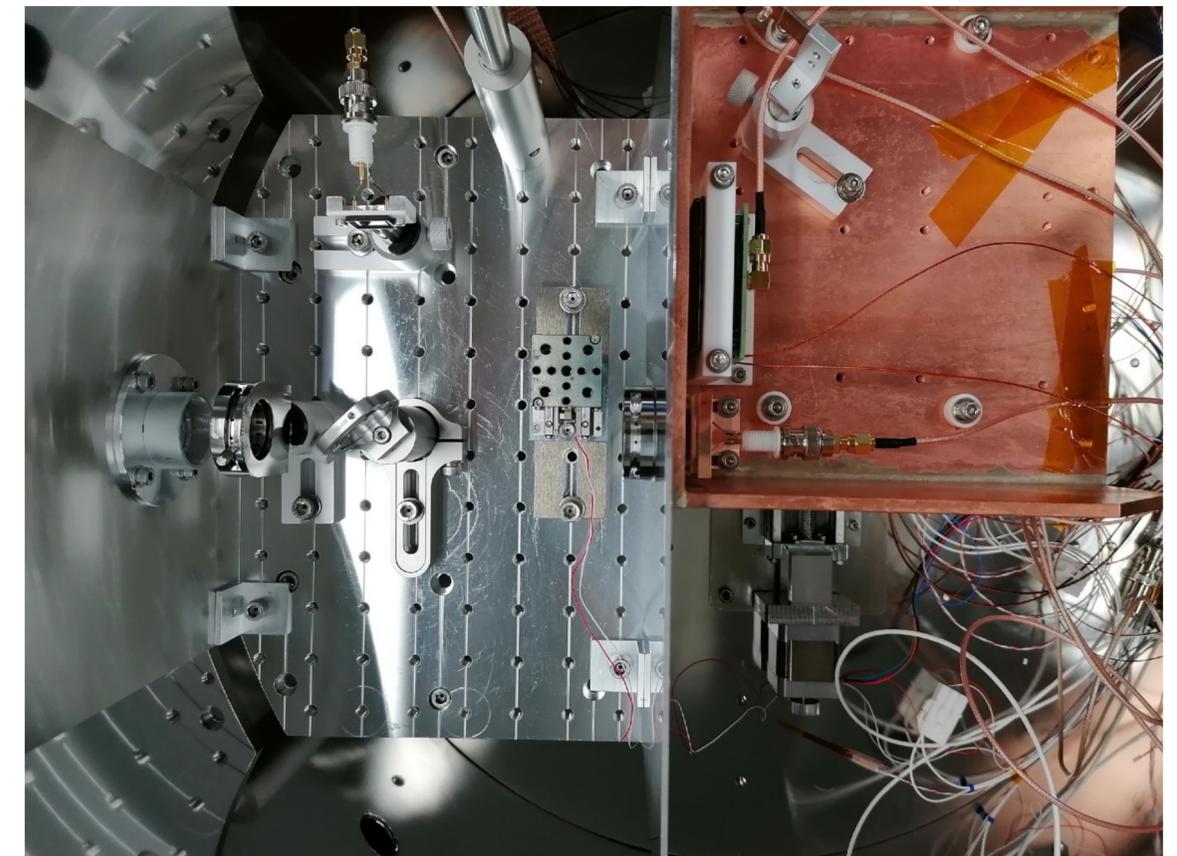
Hybrid photosensor



PMT



- 光センサーのウラン・トリウムも主要な中性子源
 - 現行PMTの更なる低RI化 / SiPMベースのセンサー開発
- 冷却装置＋真空紫外分光計セットアップ@名古屋
 - -100度で175nmの光を分光・照射
- 浜松ホトニクスと協力して試作品の性能評価を実施中

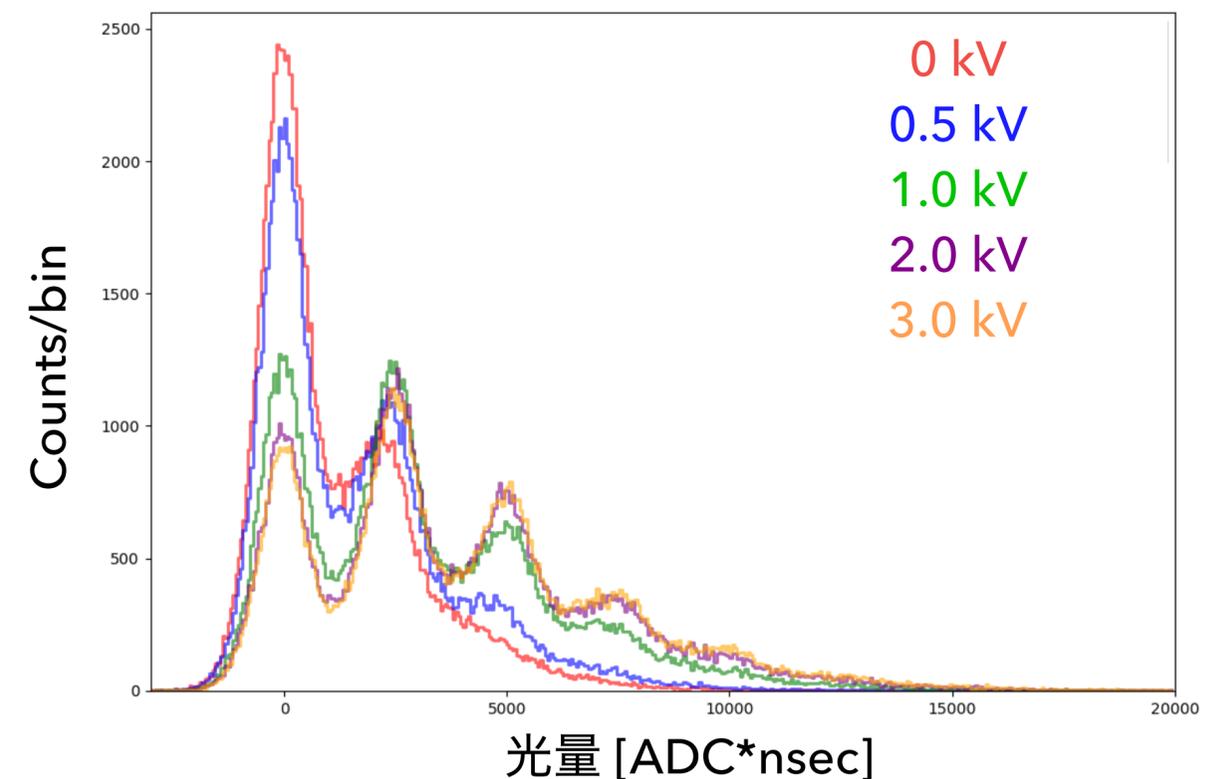
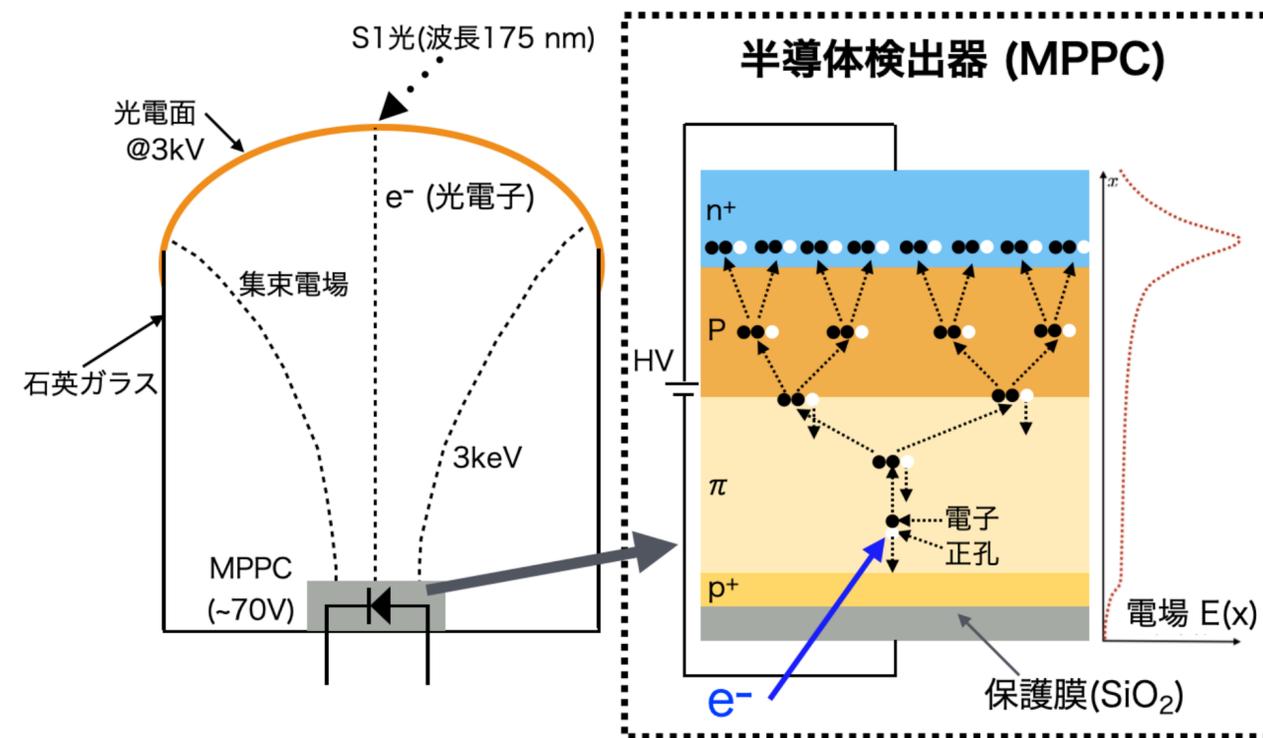


Photosensor development

• 最近の進展：Hybrid detector

- PMTの光電面とSiPMによる増幅の組み合わせ
- ステムなど部品数が少なく、低RI化が期待される
- 光電子収束効率を改善した試作品を試験中
 - 電圧印加試験
 - 3kVでの安定動作確認
 - LEDを用いた1光子に対する性能評価
 - PMTに比べて良い1光子分解能
 - UV光を用いた(相対)光検出効率測定
 - 2.5kVでプラトーに到達を確認
- 今後キセノン発光波長(175nm), 低温での試験を進めていく

ハイブリッド光検出器

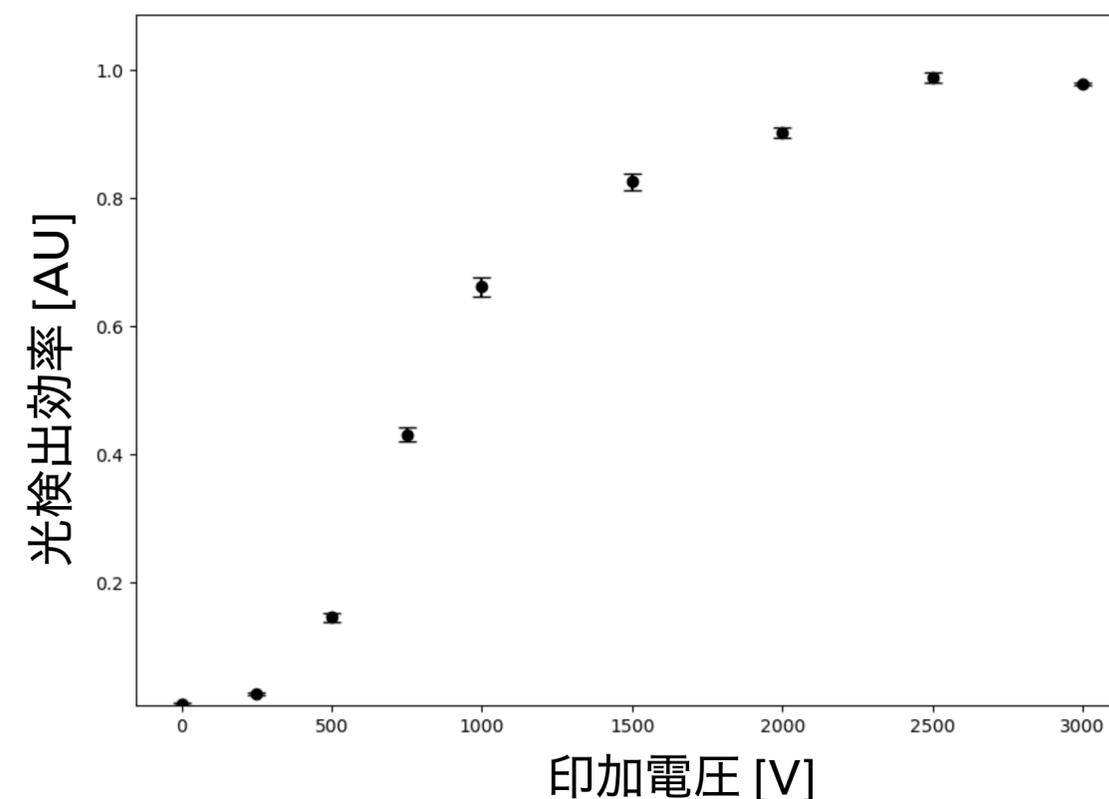
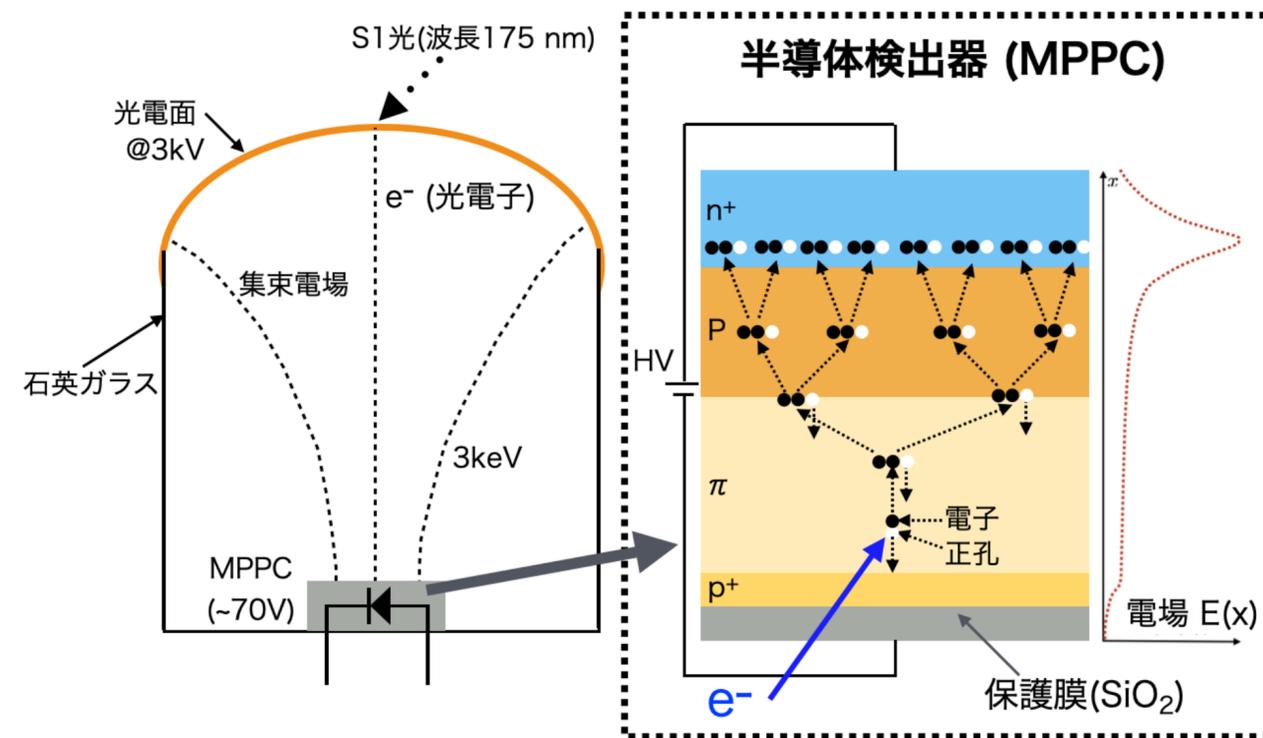


Photosensor development

• 最近の進展：Hybrid detector

- PMTの光電面とSiPMによる増幅の組み合わせ
- ステムなど部品数が少なく、低RI化が期待される
- 光電子収束効率を改善した試作品を試験中
 - 電圧印加試験
 - 3kVでの安定動作確認
 - LEDを用いた1光子に対する性能評価
 - PMTに比べて良い1光子分解能
 - UV光を用いた(相対)光検出効率測定
 - 2.5kVでプラトーに到達を確認
- 今後キセノン発光波長(175nm), 低温での試験を進めていく

ハイブリッド光検出器



Summary

- XENONnT/XLZD: 液体キセノンを用いた暗黒物質探索実験
- XENONnT実験では現在電極の補修を中心としたアップグレードが進行中
 - 並行して、取得済データも鋭意解析中
- XLZDでは現状から放射性BG(ラドン・トリチウム・中性子)を1/10に削減するためのR&Dが進行中
 - 中性子BG：PTFEの低RI化、低RI光検出器開発 (PMTの低RI化・SiPMベースの新型検出器)
 - トリチウムBG：微量水素測定技術開発
 - ラドンBG：密閉型検出器、FEAを用いたラドン除去などの削減技術の開発
 - Accepted by PTEP: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptag028>

BACKUP