



第3世代の暗黒物質直接探索実験

風間慎吾

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所

令和7年度東京大学宇宙線研共同利用研究成果発表会

第3世代の暗黒物質直接探索実験(G3C)

G3C

- ・研究代表者: 森山茂栄 (東大ICRR)
- ・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
- ・東大: Martens, 伊藤, 関谷, 竹田, 安部, 吉田, Zhu, 他
- ・名古屋: 山下(XENON CB & XLZD EB),
風間(XENON EB, 2026年4月から東京科学大へ転出),
小林(XENON データ解析責任者),
Huang & Ismerio (今年度新たに加わったポスドク2名), 他
+ 横浜国立大学の中村が退官後、名古屋大の客員研究員へ
- ・神戸: 身内 (XENON PR), 竹内, 他
- ・東北: 岸本, 市村, 他

査定額・使途

- ・査定額: 50 千円 (旅費)
- ・使途: 研究費50 千円

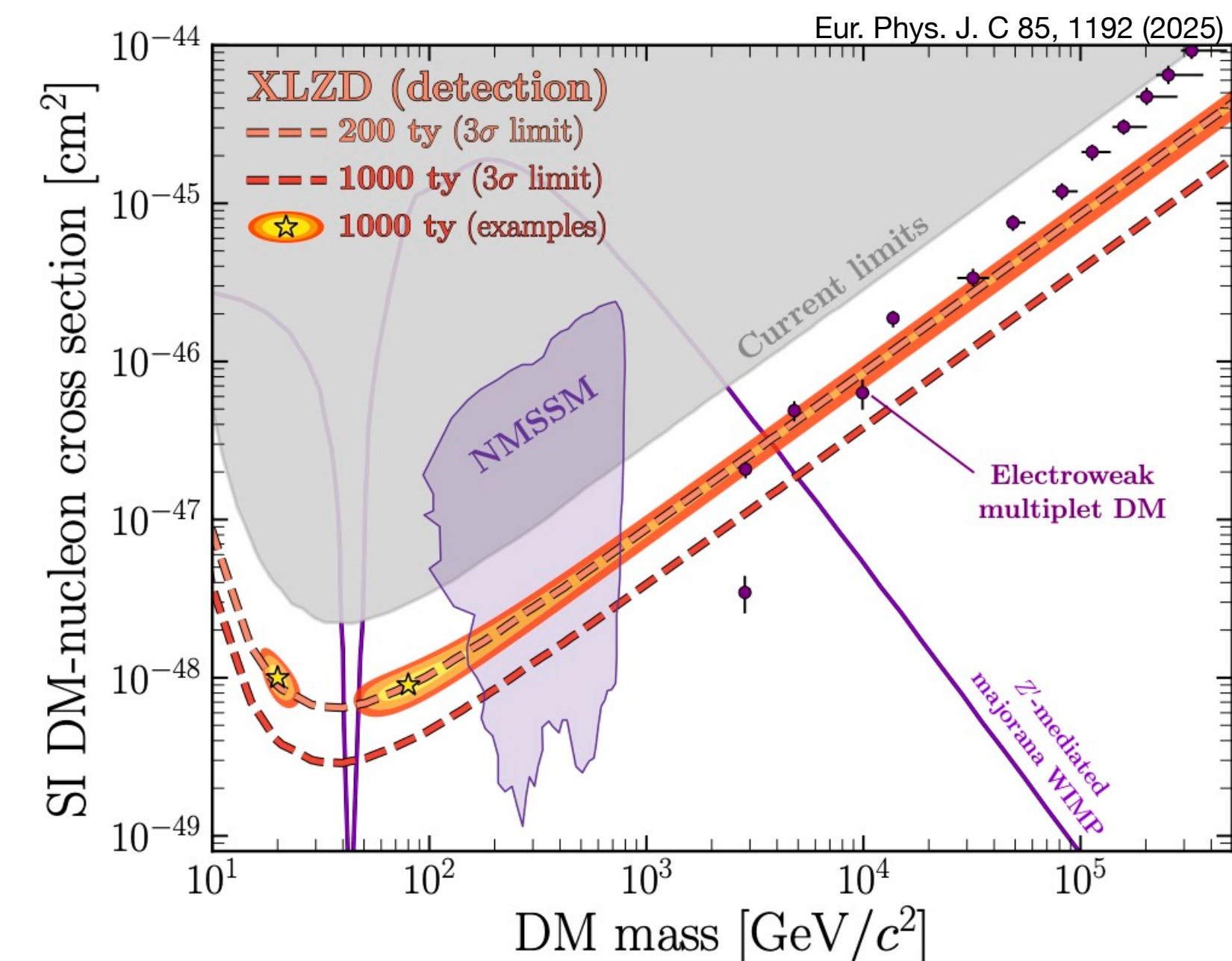
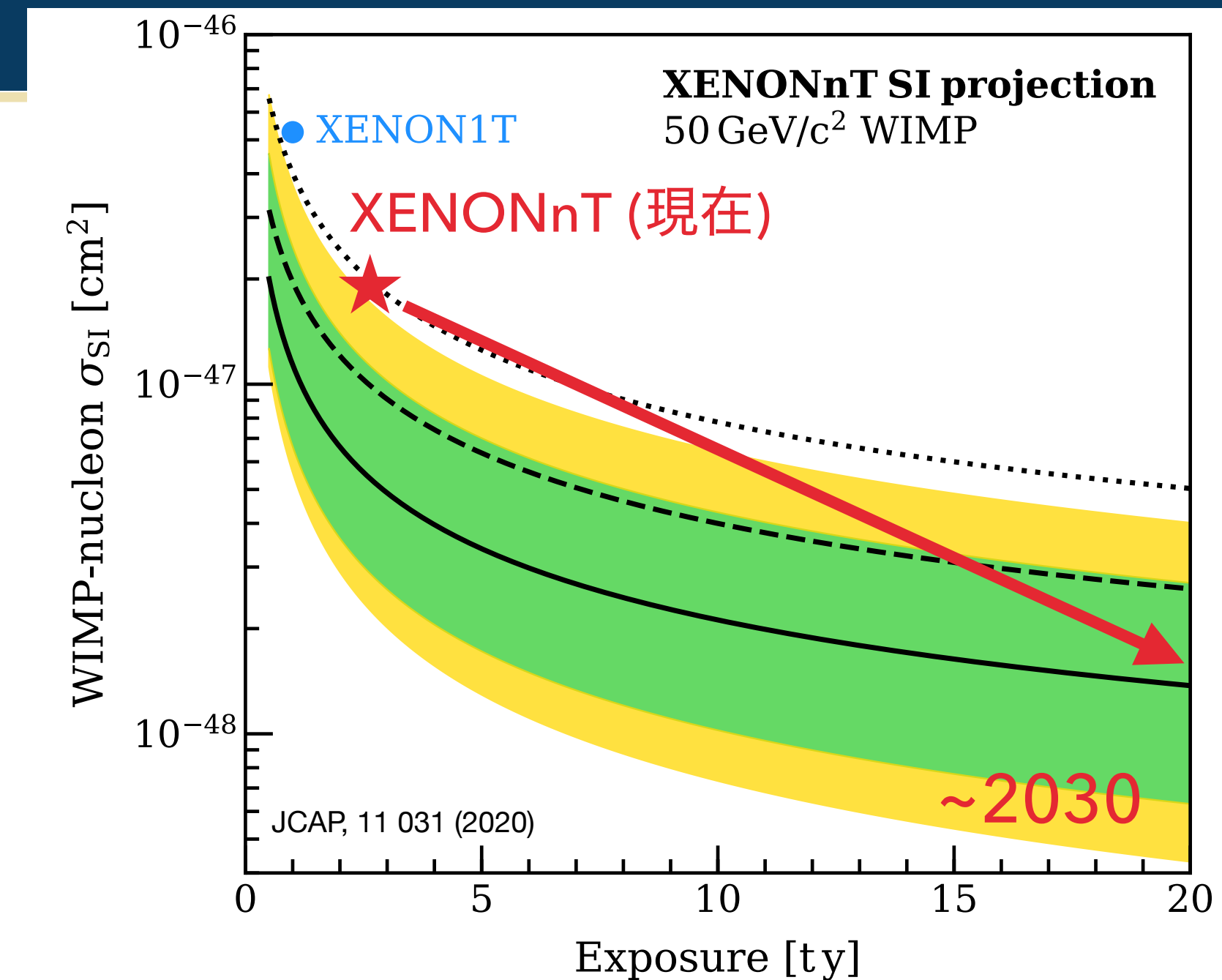
暗黒物質直接探索の現状と将来

現状

- ・ 10トン級の液体キセノンを用いた実験(XENONnT/LZ/PandaX)が2021年より稼働
- ・ 約O(1)トン・年の統計を用いた探索結果: 10^{-48} cm^2 の感度に到達
- ・ XENONnTは今年度電極アップグレードを実施(電子反跳背景事象を1/10へ)
 - ・ 中性子Veto検出器中の硫酸Gd濃度も10倍へ(0.05 $\rightarrow$ 0.5 %)
- ・ 2020年代末までに感度を約10倍改善
 - $\rightarrow$ Minimal DMモデルなど、有力なモデルを棄却

将来

- ・ 60~80トンの液体キセノンを用いたXLZD実験が2030年代中頃開始を目標に推進中
- ・ 最大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
- ・ 実現にはラドン・中性子など放射性物質由来の背景事象をXENONnTの1/10への低減が必要
 - $\rightarrow$ 暗黒物質のみならず、世界最高感度でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊や太陽ニュートリノ・超新星ニュートリノの低エネルギー領域で測定を目指す



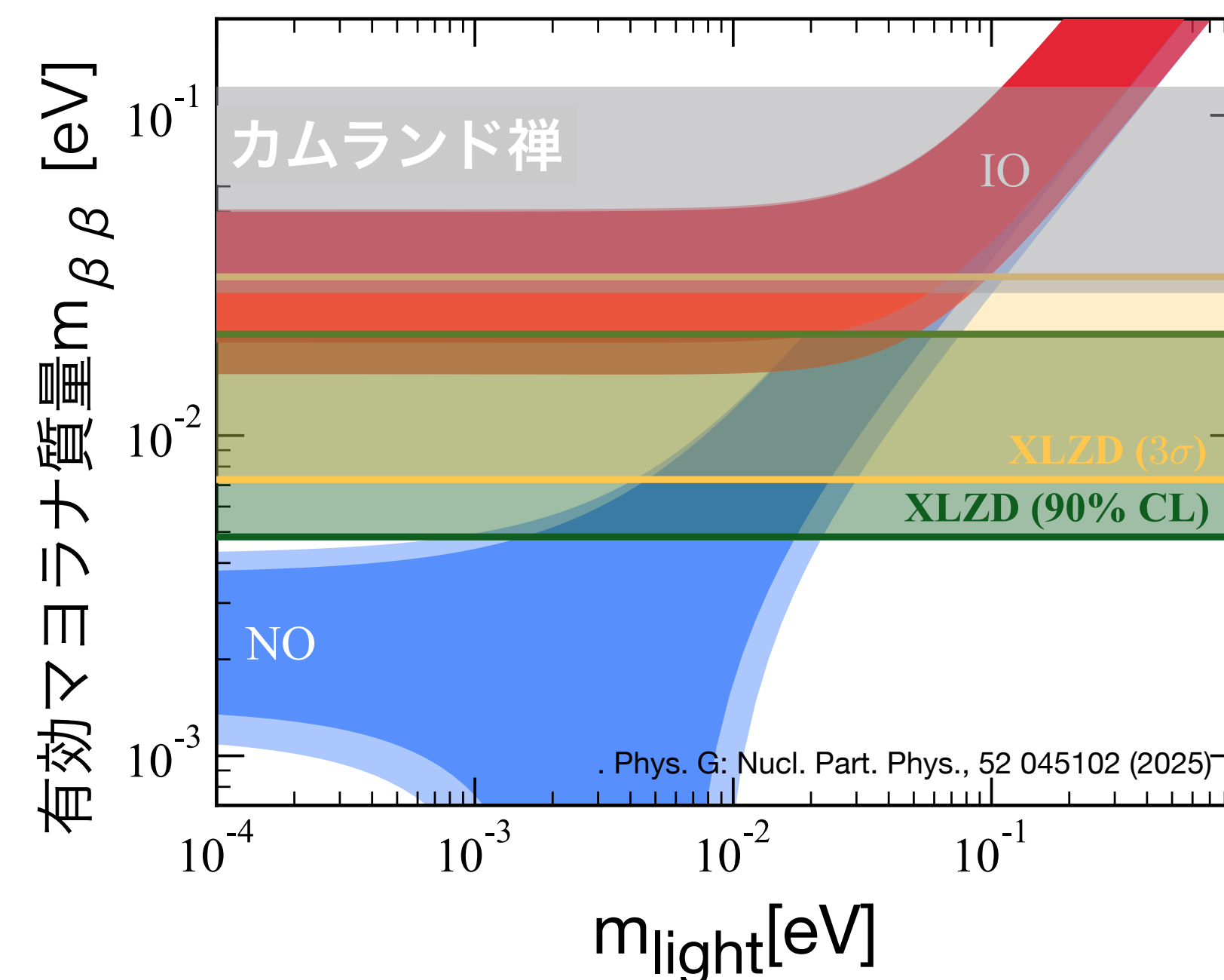
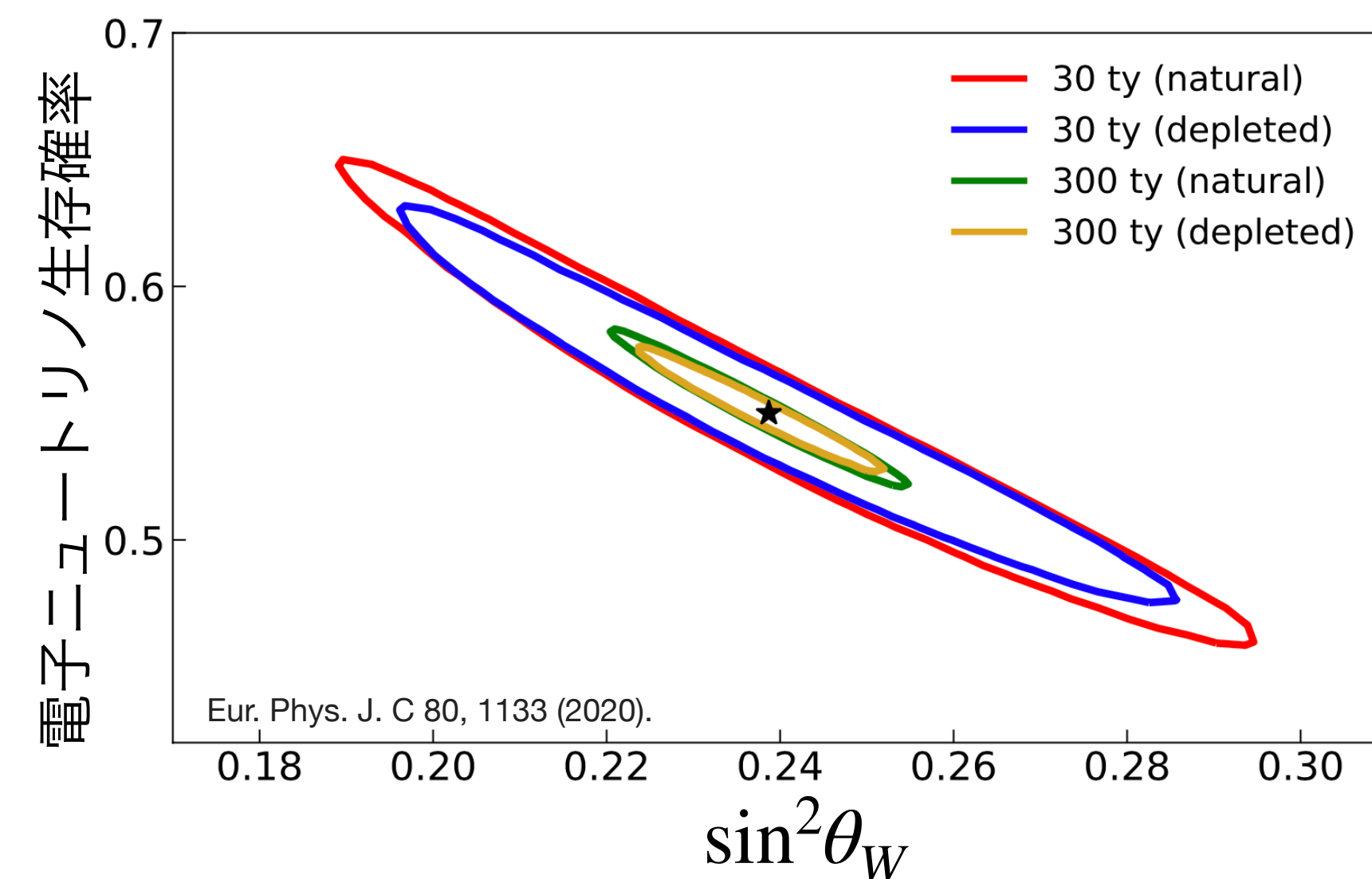
暗黒物質直接探索の現状と将来

現状

- ・ 10トン級の液体キセノンを用いた実験(XENONnT/LZ/PandaX)が2021年より稼働
- ・ 約O(1)トン・年の統計を用いた探索結果: 10^{-48} cm^2 の感度に到達
- ・ XENONnTは今年度電極アップグレードを実施(電子反跳背景事象を1/10へ)
 - ・ 中性子Veto検出器中の硫酸Gd濃度も10倍へ(0.05 $\rightarrow$ 0.5 %)
 - ・ 2020年代末までに感度を約10倍改善
→ Minimal DMモデルなど、有力なモデルを棄却

将来

- ・ 60~80トンの液体キセノンを用いたXLZD実験が2030年代中頃開始を目標に推進中
- ・ 最大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
- ・ 実現にはラドン・中性子など放射性物質由来の背景事象をXENONnTの1/10への低減が必要
→ 暗黒物質のみならず、世界最高感度でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊や
太陽ニュートリノ・超新星ニュートリノの低エネルギー領域で測定を目指す

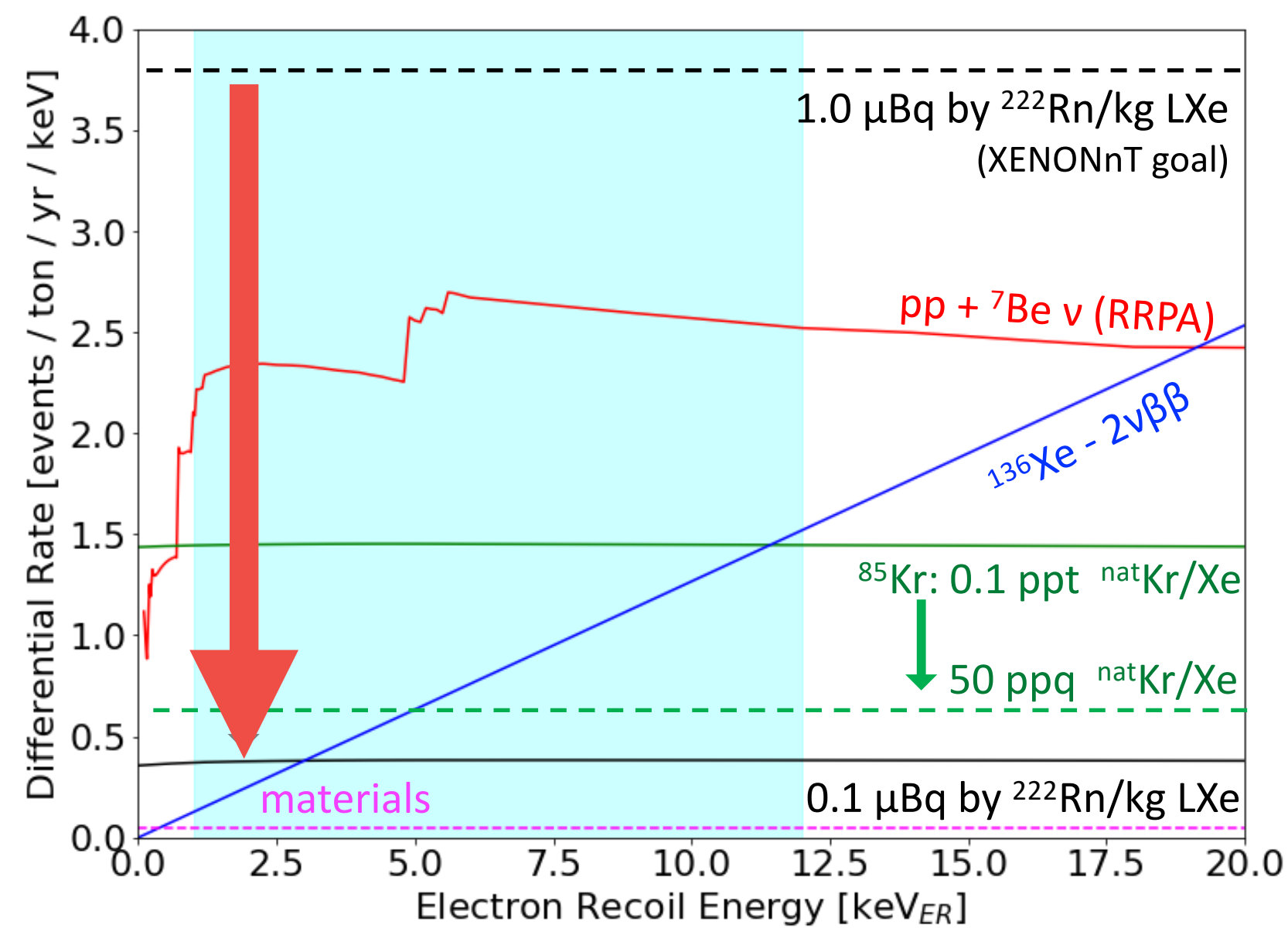


XLZD実験実現に向けた背景事象の低減

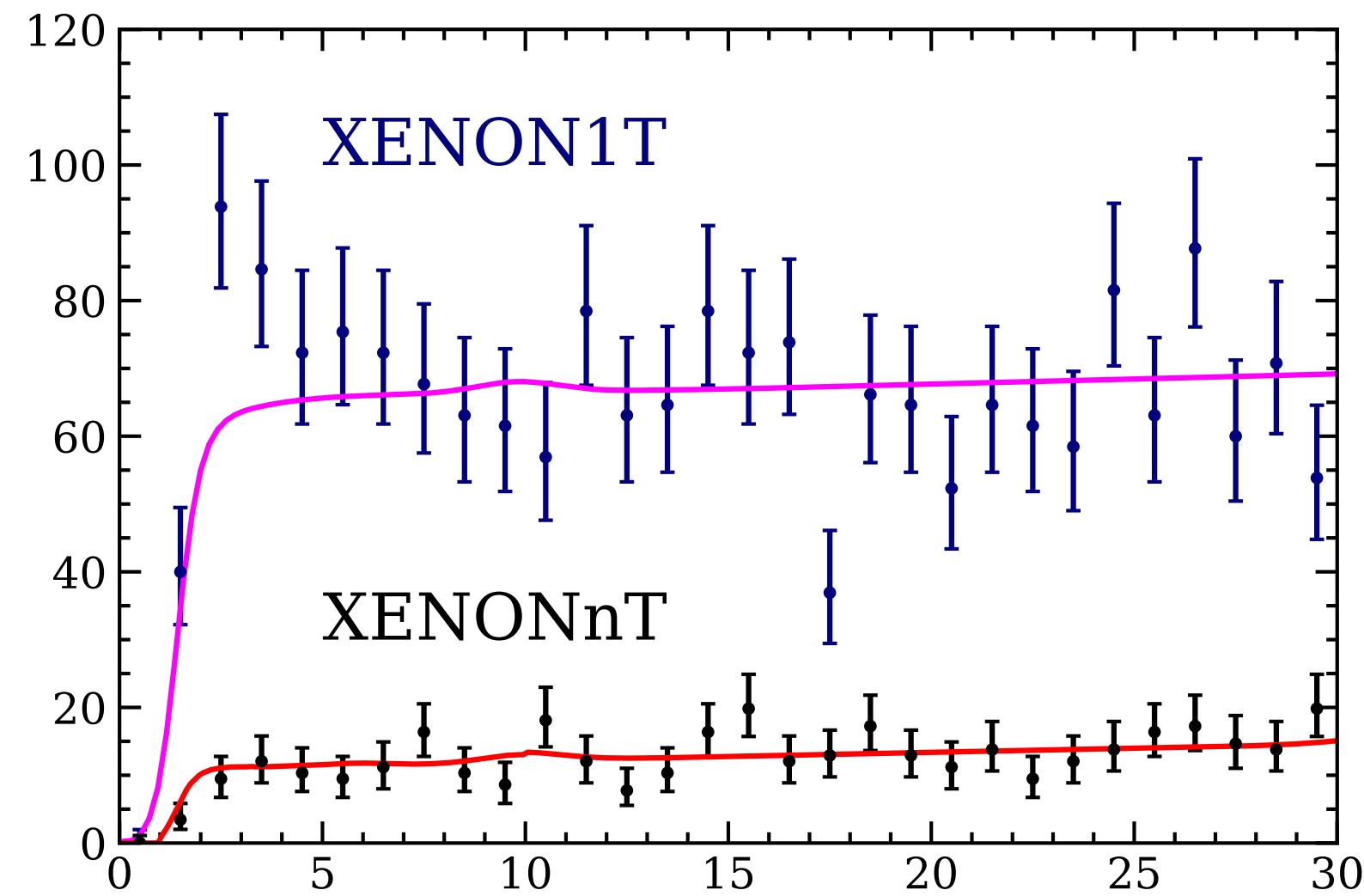
5

XLZD実験では、放射性物質由来の背景事象を天体起源のニュートリノ以下へ低減することを目標

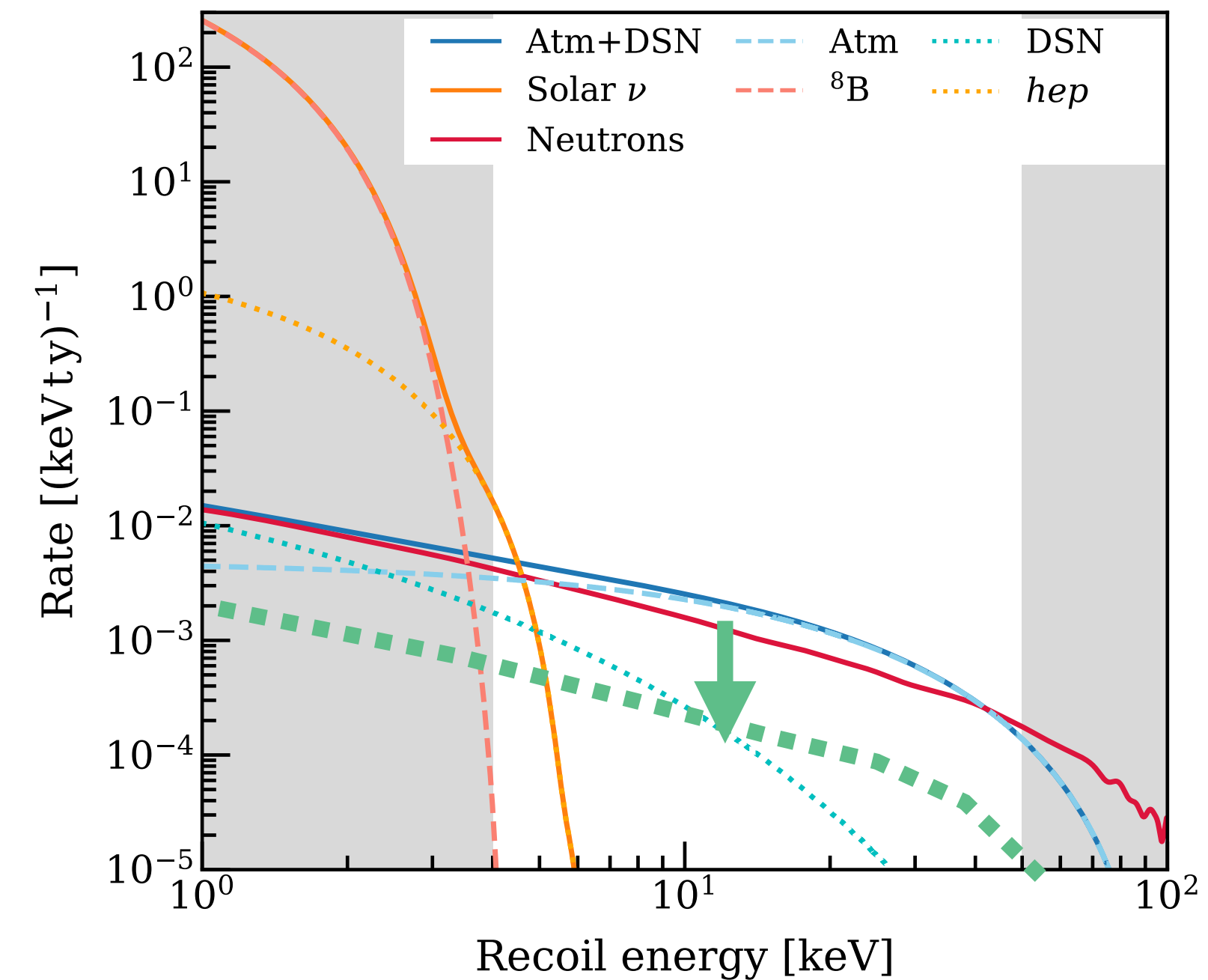
ラドン



トリチウム



中性子

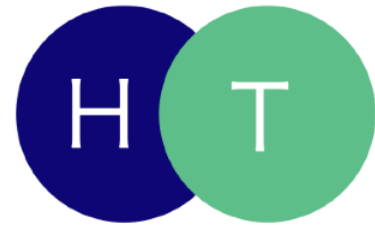


名古屋大を中心にこれら背景事象を低減する極低放射能検出器の開発を進めてきた

極低放射能技術開発@名大

6

トリチウム除去・定量



- 水素透過膜を用いたキセノン中極微量水素・トリチウム定量法を確立

ラドン・トリチウム除去

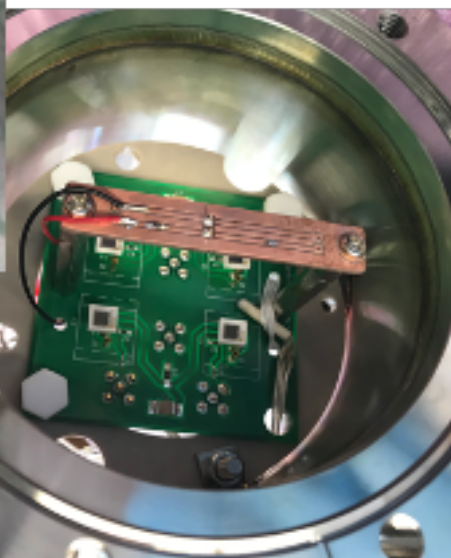
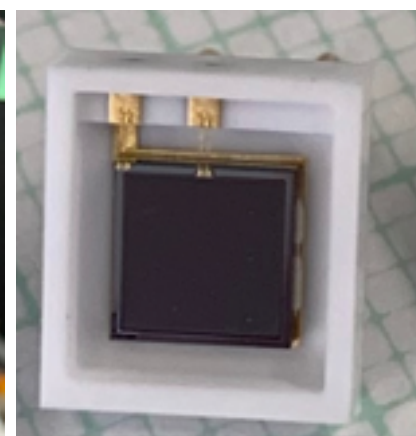
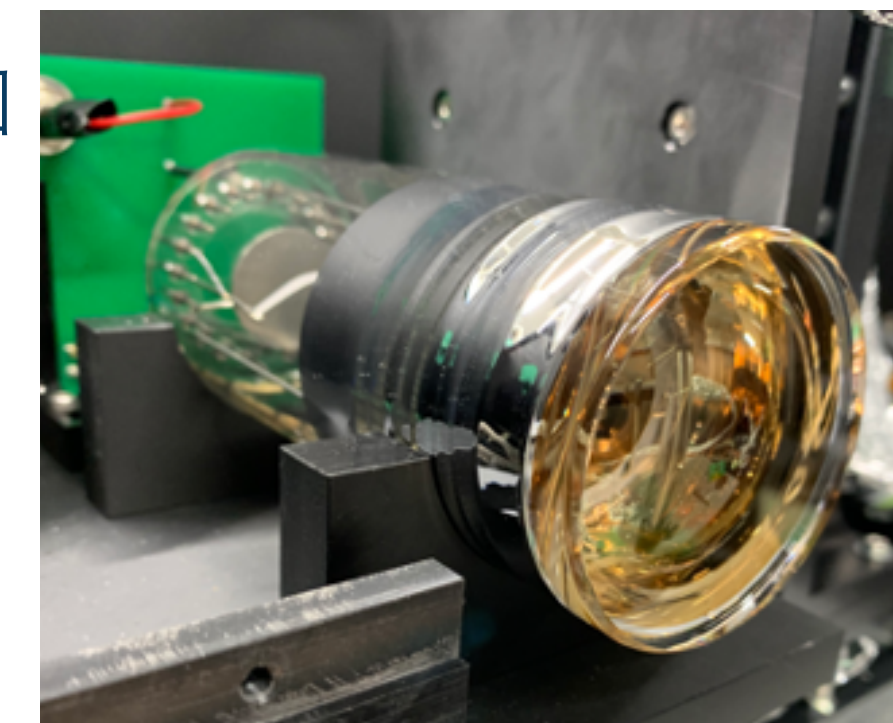
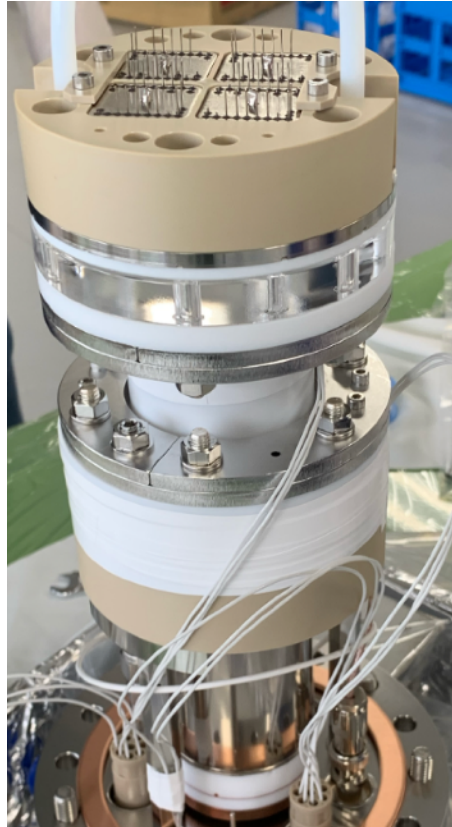
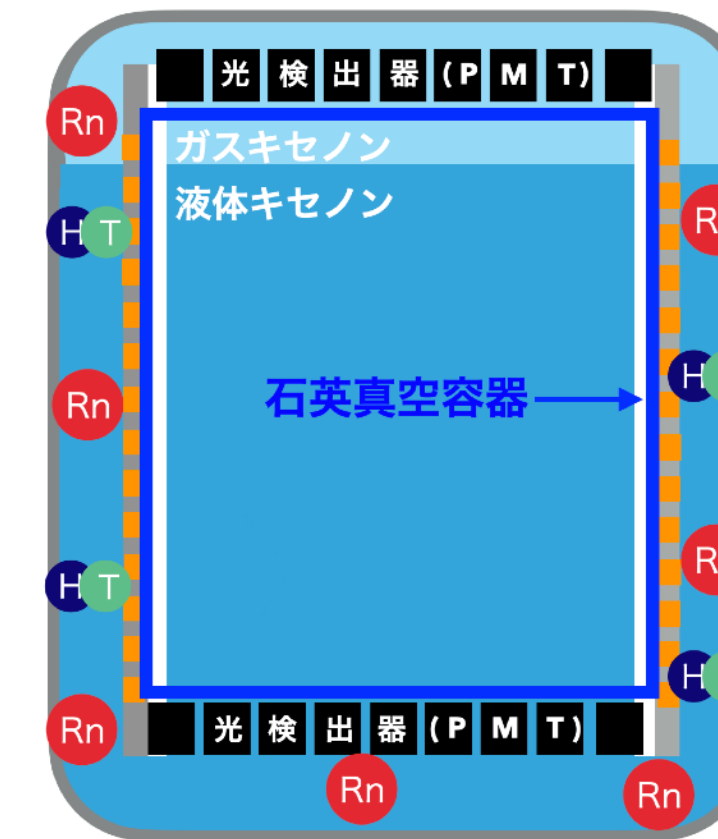
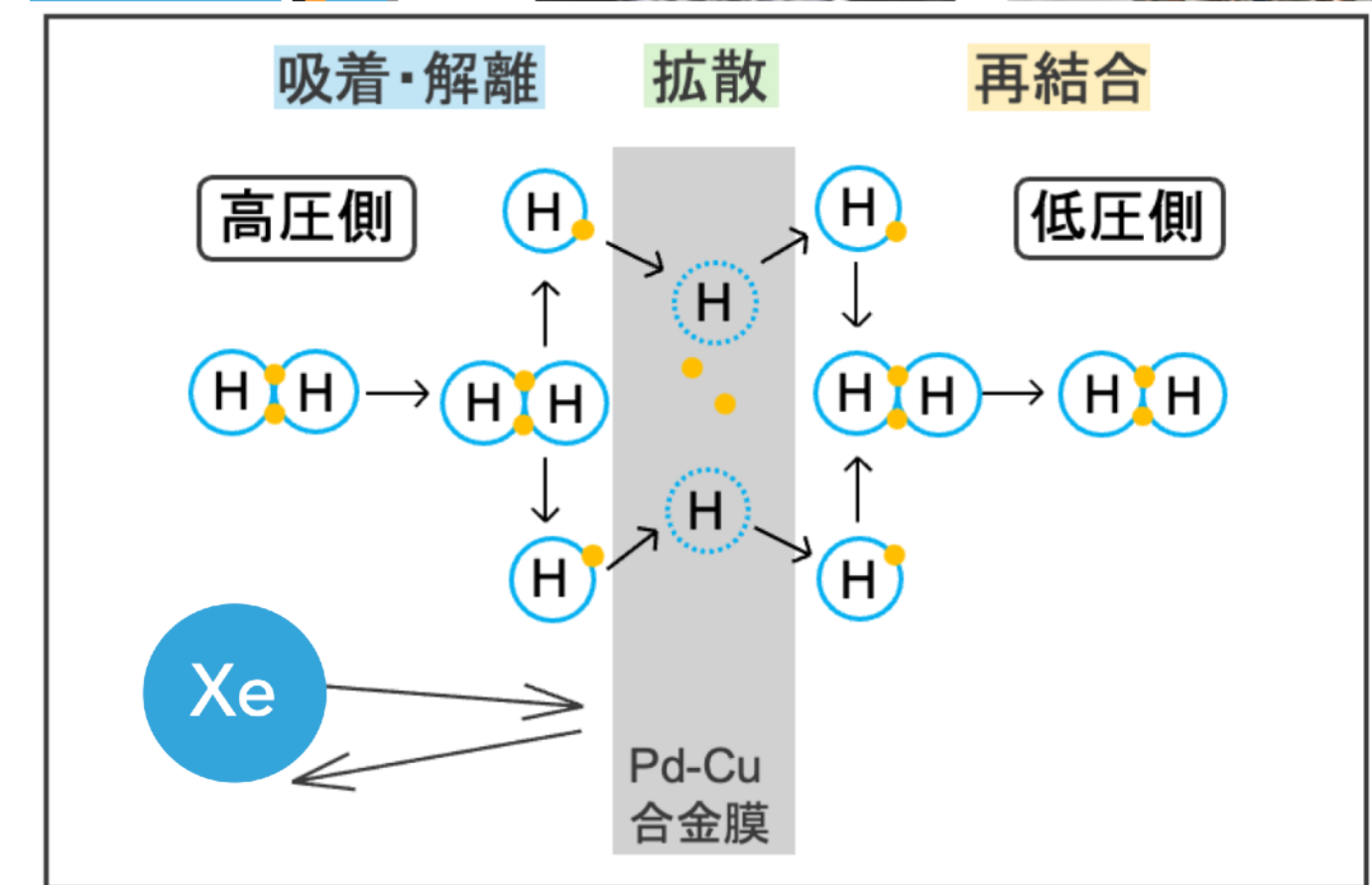


- キセノンを格納する真空チャンバーなど、検出器表面からの湧き出しが原因
- 石英製真空容器で検出器中心部を密閉し混入を防ぐ方法(密閉型液体キセノン検出器)を提案し、ガスキセノン中でのラドン排除を実証

中性子除去

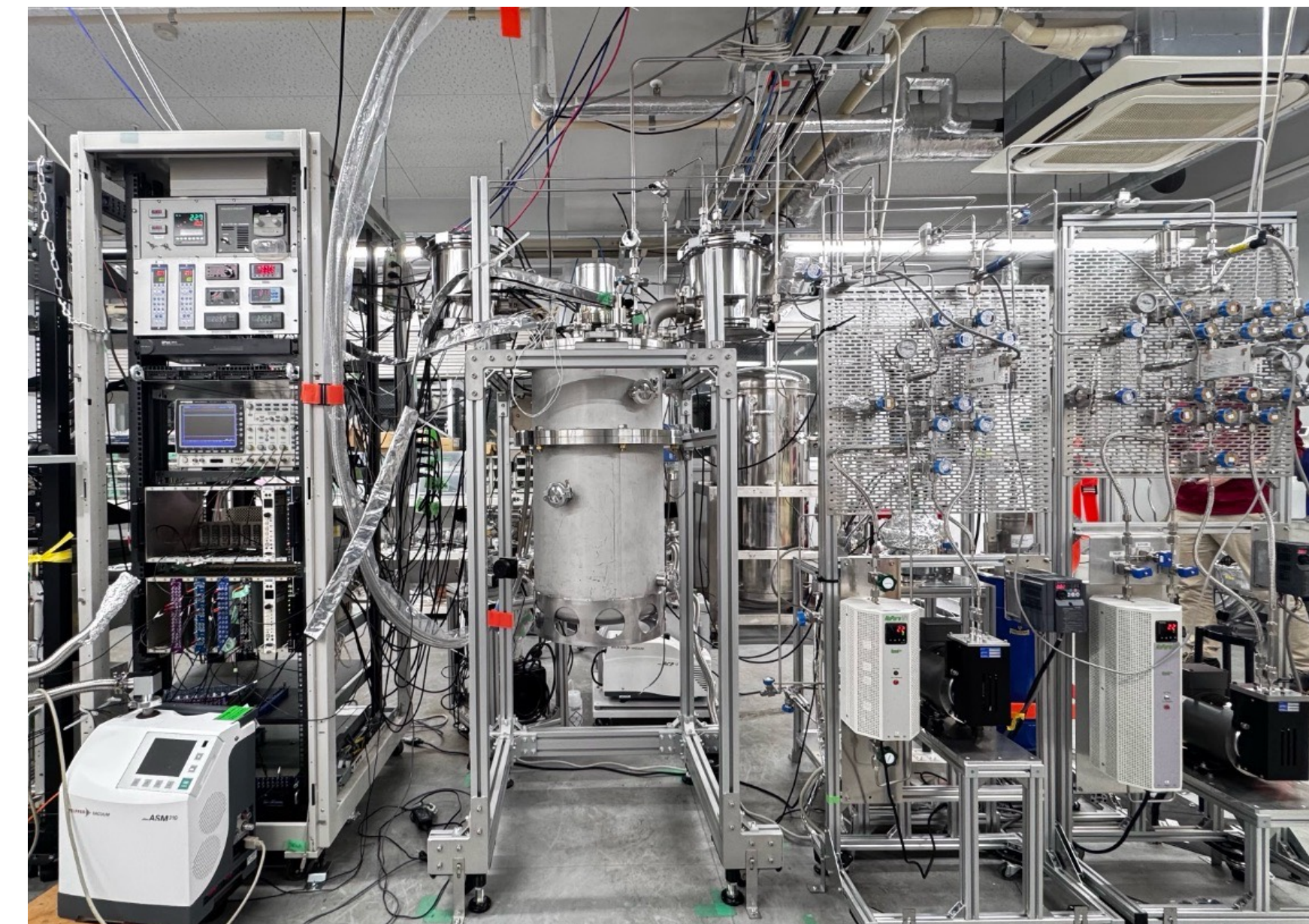
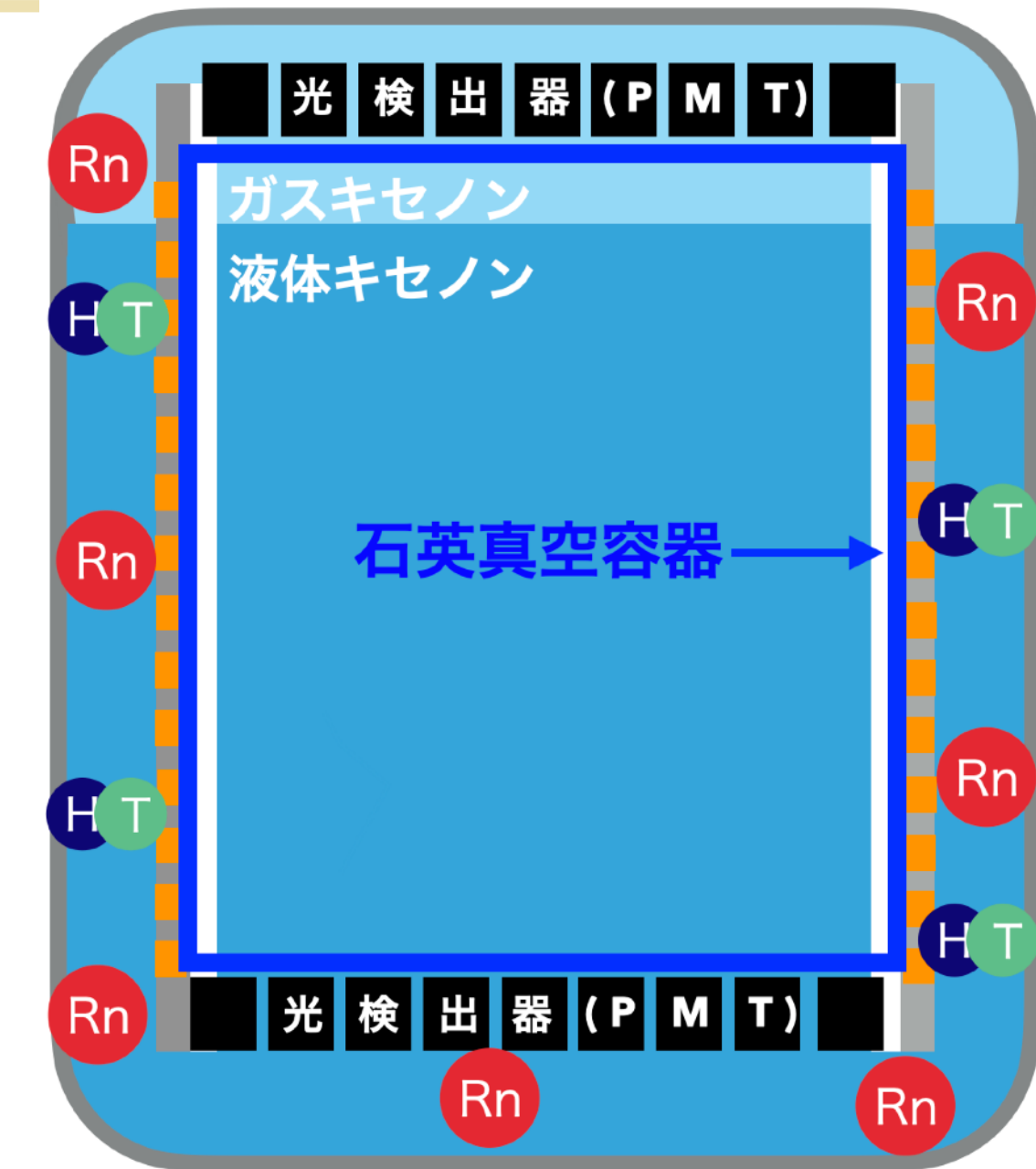
n

- 光電子増倍管(PMT)や光反射材(PTFE)に含まれるウラン・トリウム核の核分裂や(α , n)反応が原因
- 新たな低放射能光検出器(“ハイブリッド光センサー”)を提案し、浜松ホトニクス社と共同開発で開発。現在、性能評価を推進中
- 筑波大学の坂口先生と共同で、フッ素樹脂(PTFE)光反射材中の極微量ウラン・トリウム測定法を開拓中



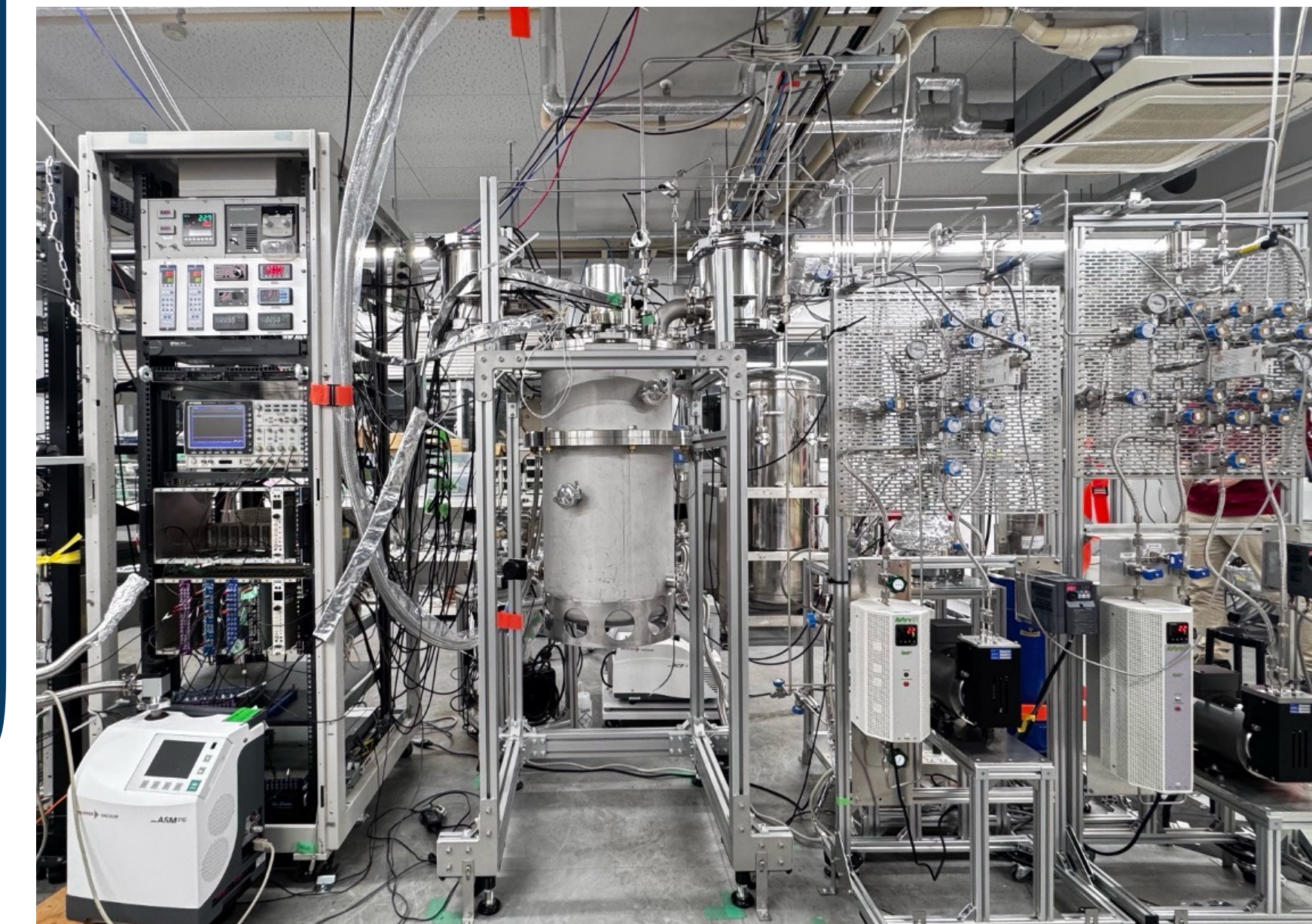
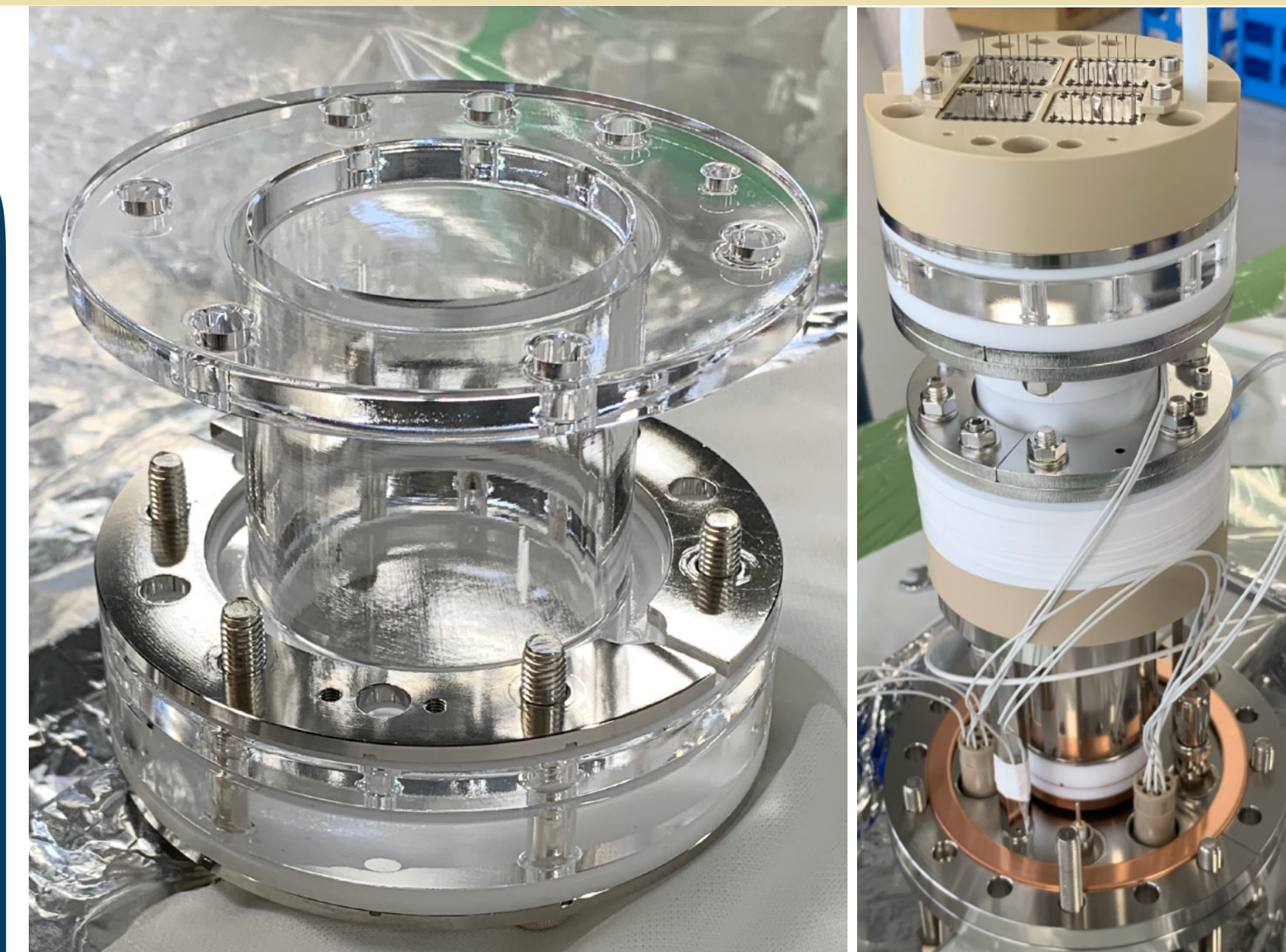
密閉型液体キセノン検出器: ラドン・トリチウム排除

- ・キセノンを格納する真空チャンバーなど、検出器表面からのアウトガスが原因
- ・放射性不純物が極めて少ない合成石英で検出器中心部を密閉し、混入を防ぐ
「密閉型液体キセノン検出器」を提案 PTEP 113H02 (2020)
- ・石英製の真空容器 & -100°C の低温での使用は世界初の試み
 - ・構造設計・シール材・トルク管理など石英加工を専門とする会社と共同研究
- ・名大内に専用の評価システム(冷凍機・真空・ガス純化・制御・安全装置)を確立
 - ・ガスキセノン中でのラドン排除を実証($<1/100$ 以下) arXiv:2511.03250)
- ・今後
 - ・液体キセノン中でラドン排除 ($<1/100$)を実証(現在進行中)

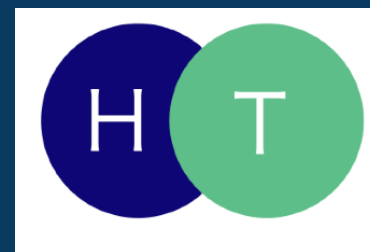


密閉型液体キセノン検出器: ラドン・トリチウム排除

- ・キセノンを格納する真空チャンバーなど、検出器表面からのアウトガスが原因
- ・放射性不純物が極めて少ない合成石英で検出器中心部を密閉し、混入を防ぐ
「密閉型液体キセノン検出器」を提案 PTEP 113H02 (2020)
- ・石英製の真空容器 & -100°C の低温での使用は世界初の試み
 - ・構造設計・シール材・トルク管理など石英加工を専門とする会社と共同研究
- ・名大内に専用の評価システム(冷凍機・真空・ガス純化・制御・安全装置)を確立
 - ・ガスキセノン中でのラドン排除を実証($<1/100$ 以下) arXiv:2511.03250
- ・今後
 - ・液体キセノン中でラドン排除 ($<1/100$)を実証(現在進行中)



極微量水素定量法の開発



9

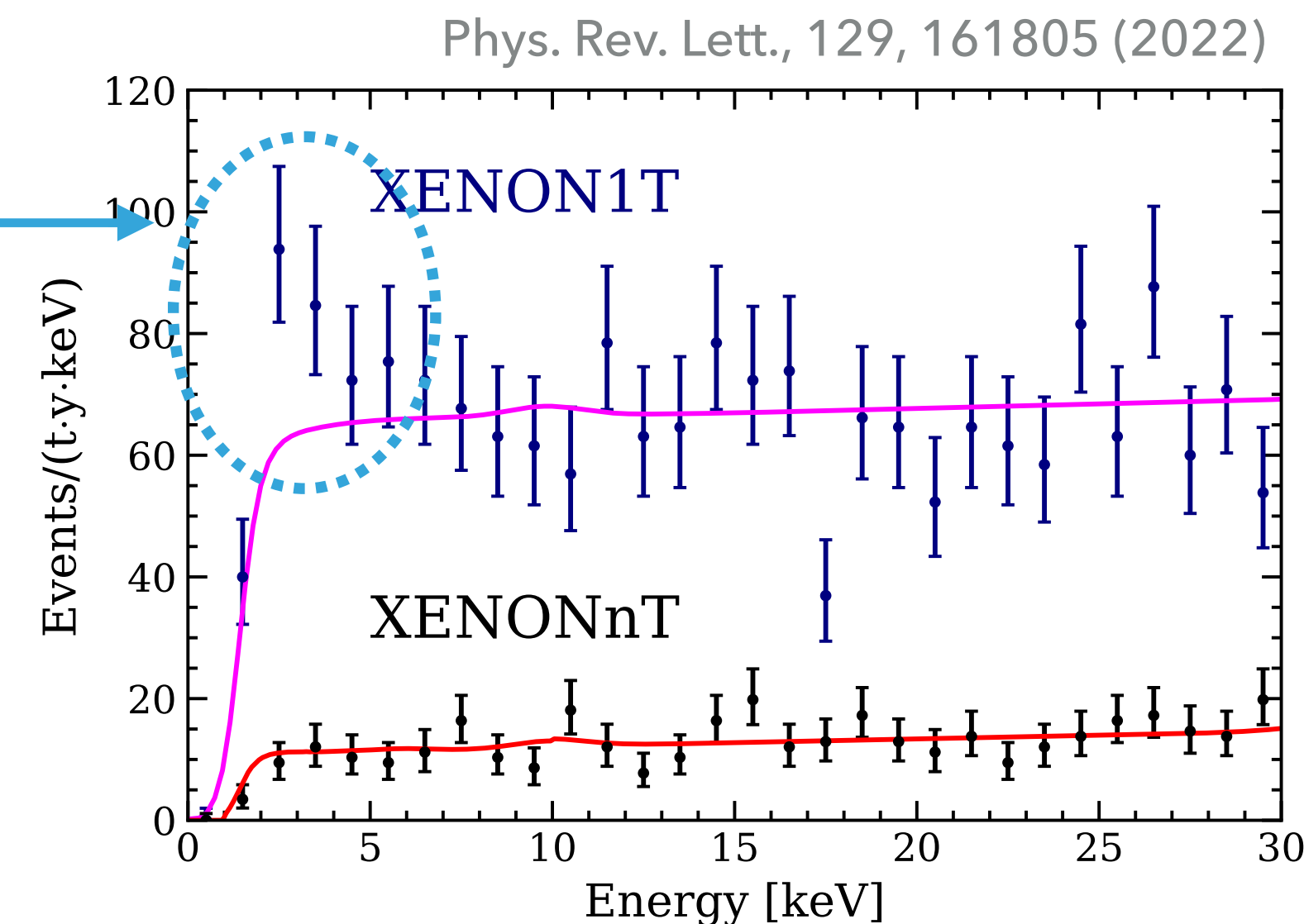
トリチウム事象の定量評価のための極微量水素定量法の開発

- ・ XENONnTでは、XENON1Tで見たトリチウムと思われる事象の削減に成功
 - ・ しかし、トリチウム事象の定量評価が未だ不能
 - ・ 密閉型Xe検出器によりラドンを低減した場合、XLZD実験ではトリチウムが主要な背景事象になる可能性も

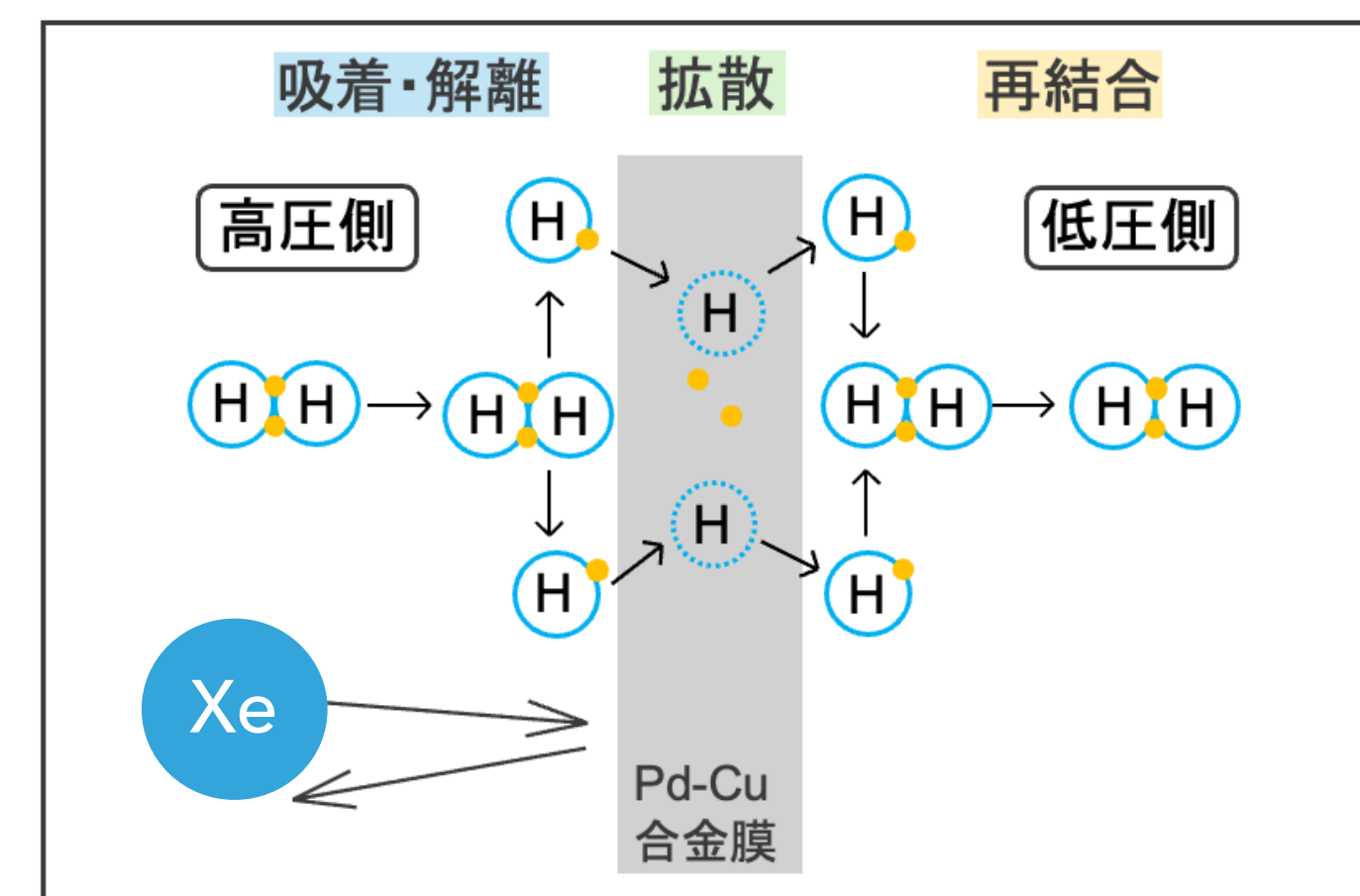
→ 暗黒物質の確かな発見にはトリチウム事象の定量評価が不可欠

$$\text{キセノン中のトリチウム濃度} : \frac{HT}{Xe} = \underbrace{\frac{HT}{H_2}}_{\text{既に測定済み}} \times \underbrace{\frac{H_2}{Xe}}_{\text{現在測定法を開拓中}}$$

- ・ キセノンガス中の極微量水素濃度を測定する手法を開発: 目標精度 O(1-10) ppt
 - ・ パラジウム合金を用いた水素分離膜を使用
 - キセノンガス中から選択的に極微量水素のみを取り出し、残留ガス質量分析計(RGA)を用いて水素分圧を測定
 - ・ ~50 pptの極微量水素の測定に成功。今後、水素アウトガスを低減し、より低濃度の測定を目指す



水素分離膜



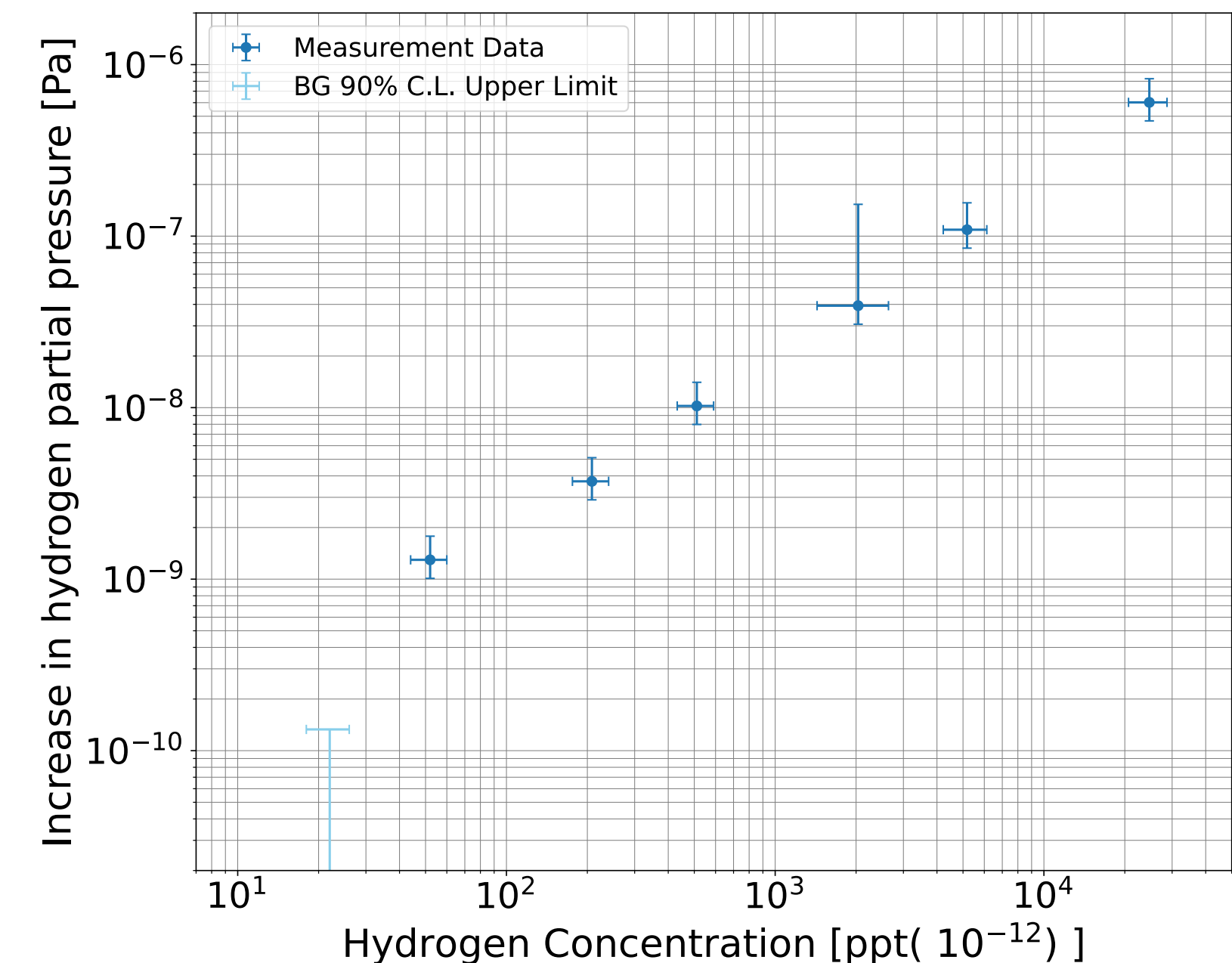
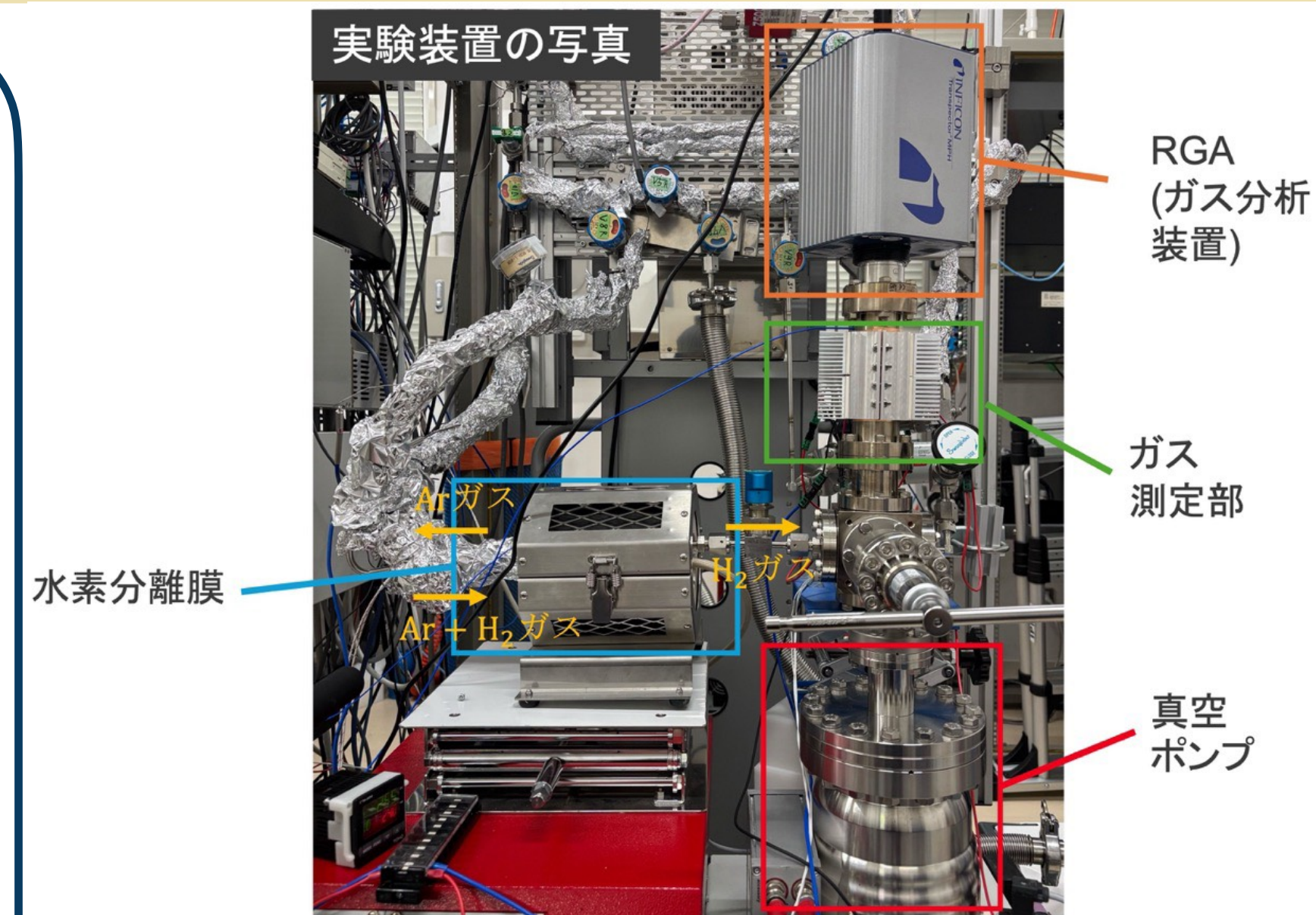
トリチウム事象の定量評価のための極微量水素定量法の開発

- ・XENONnTでは、XENON1Tで見たトリチウムと思われる事象の削減に成功
 - ・しかし、トリチウム事象の定量評価が未だ不能
 - ・密閉型Xe検出器によりラドンを低減した場合、XLZD実験ではトリチウムが主要な背景事象になる可能性も
- 暗黒物質の確かな発見にはトリチウム事象の定量評価が不可欠

キセノン中のトリチウム濃度 : $\frac{HT}{Xe} = \frac{HT}{H_2} \times \frac{H_2}{Xe}$

↑ 既に測定済み ↑ 現在測定法を開拓中

- ・キセノンガス中の極微量水素濃度を測定する手法を開発: 目標精度 O(1-10) ppt
 - ・パラジウム合金を用いた水素分離膜を使用
 - キセノンガス中から選択的に極微量水素のみを取り出し、残留ガス質量分析計 (RGA) を用いて水素分圧を測定
 - ・~50 pptの極微量水素の測定に成功。今後、水素アウトガスを低減し、より低濃度の測定を目指す



極低放射能光センサーの開発: 中性子の排除 n

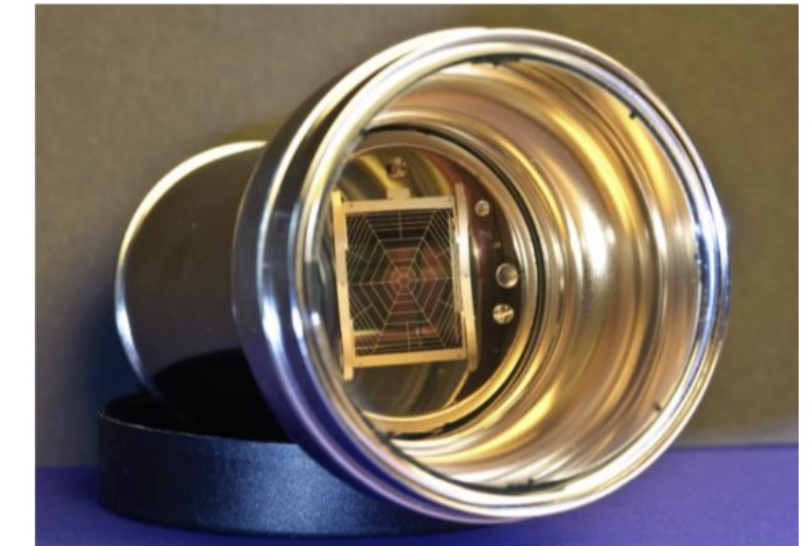
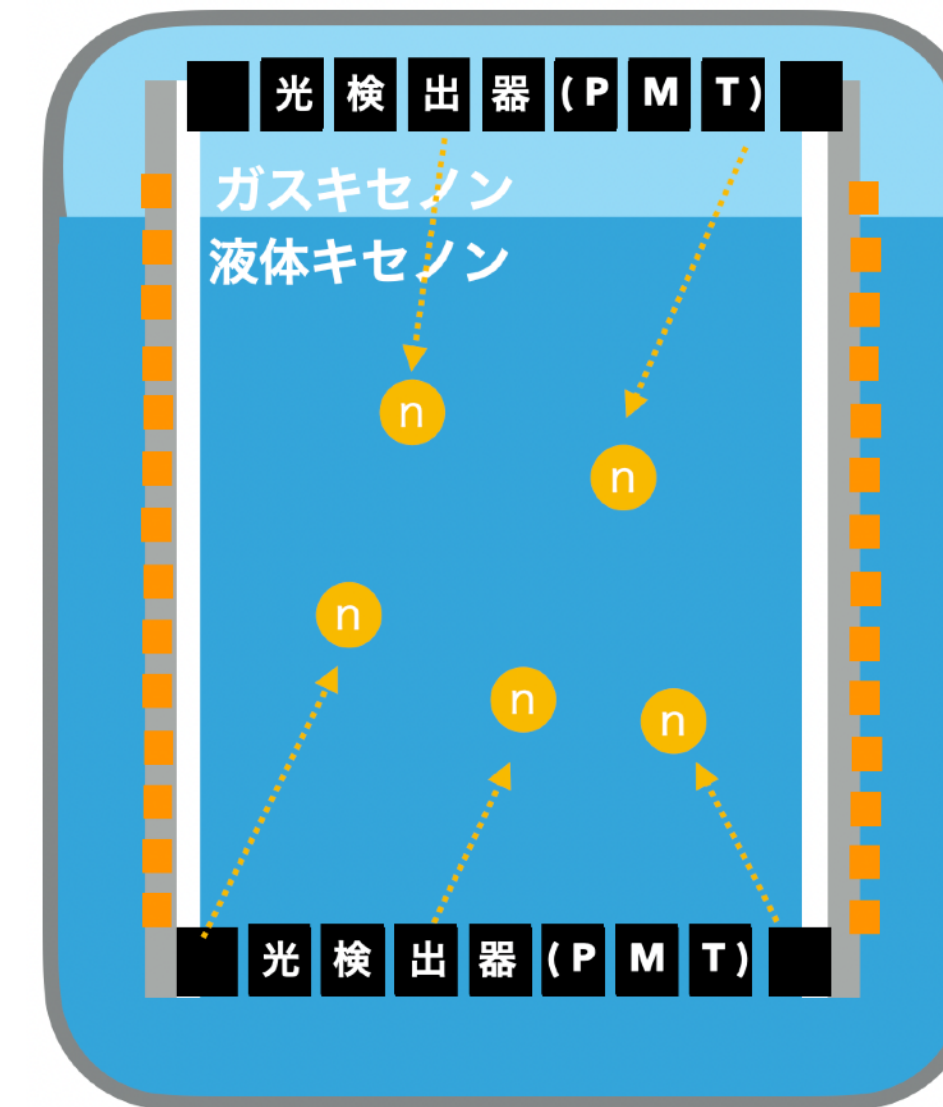
11

中性子の削減

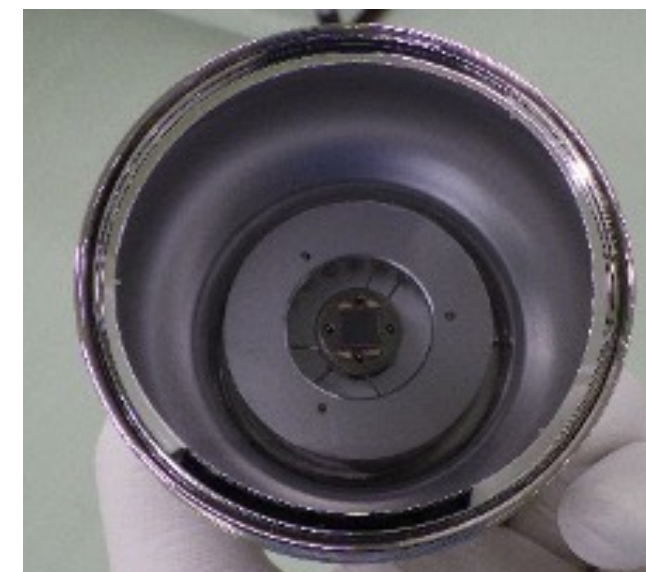
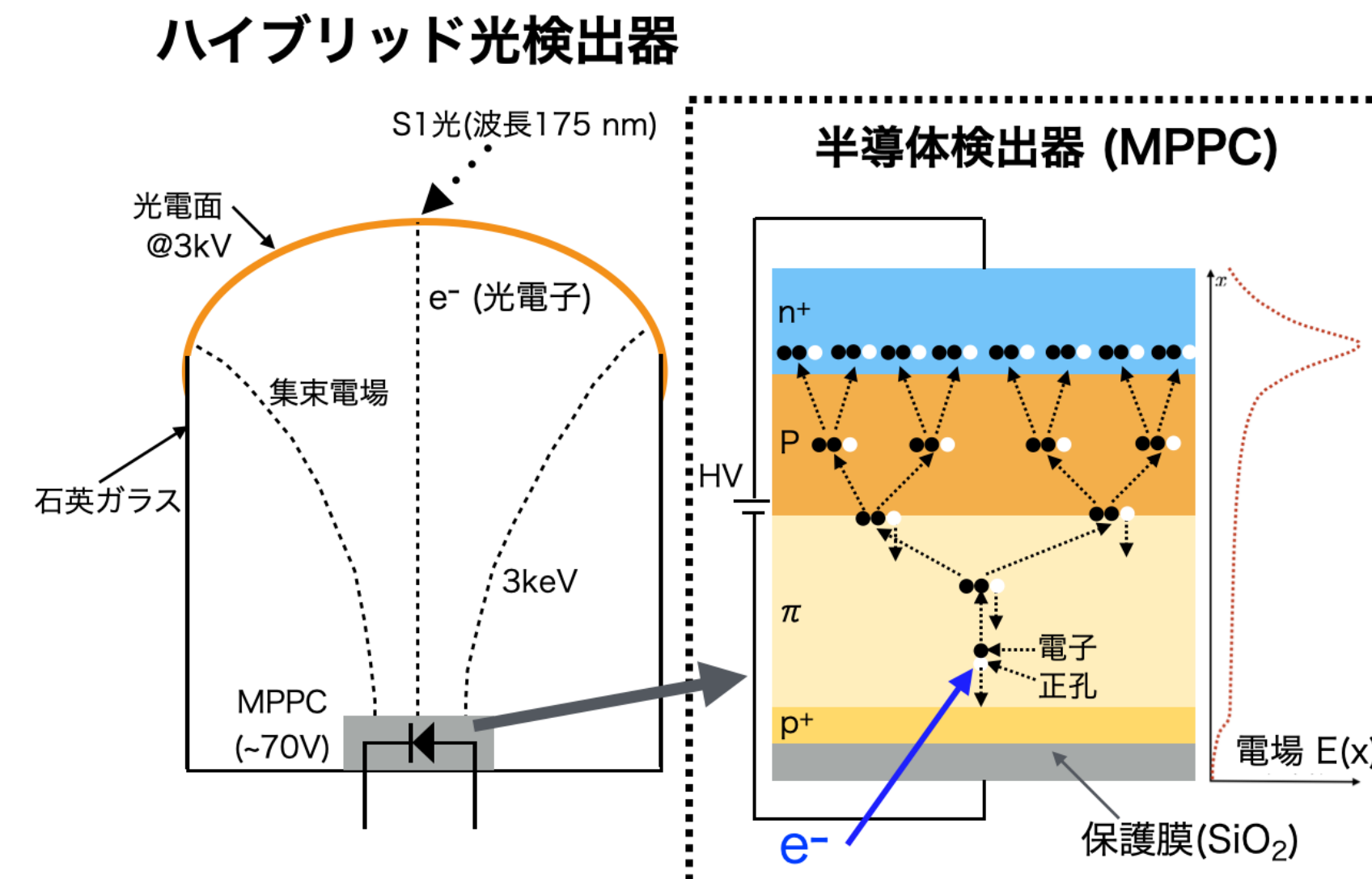
- ・光検出器(光電子増倍管PMT)に含まれるウラン・トリウム核の核分裂や(α, n)反応により生成

ハイブリッド光検出器

- ・光電管・半導体光検出器をハイブリッドに用いた真空紫外光検出器
 - 光を光電子に変換する光電面
 - 光電子の集束電極
 - 半導体光検出器: 光電子の検出・増幅
- ・ダイノードや陽極がなく、わずかな部品で実現
 - PMTより優れたエネルギー分解能と時間分解能(~ 1 ナノ秒)
 - 安価かつ極低放射能な検出器
 - 既存のPMTに取って代わる将来の光検出器となる可能性
- ・浜松ホトニクスと共同で世界初の検出器を開発中



開発したプロトタイプ





ハイブリッド光検出器

・光電子検出方法の最適化

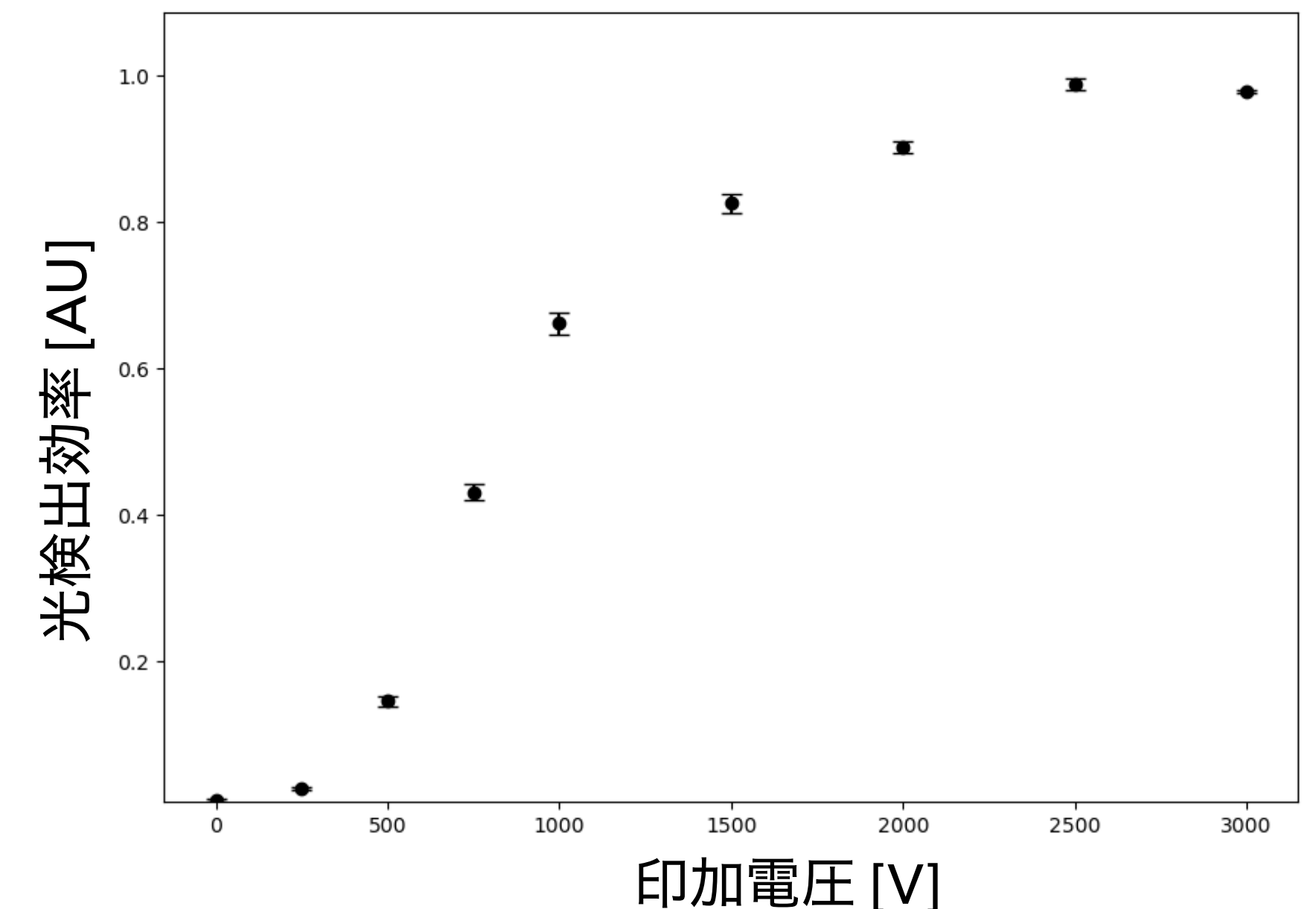
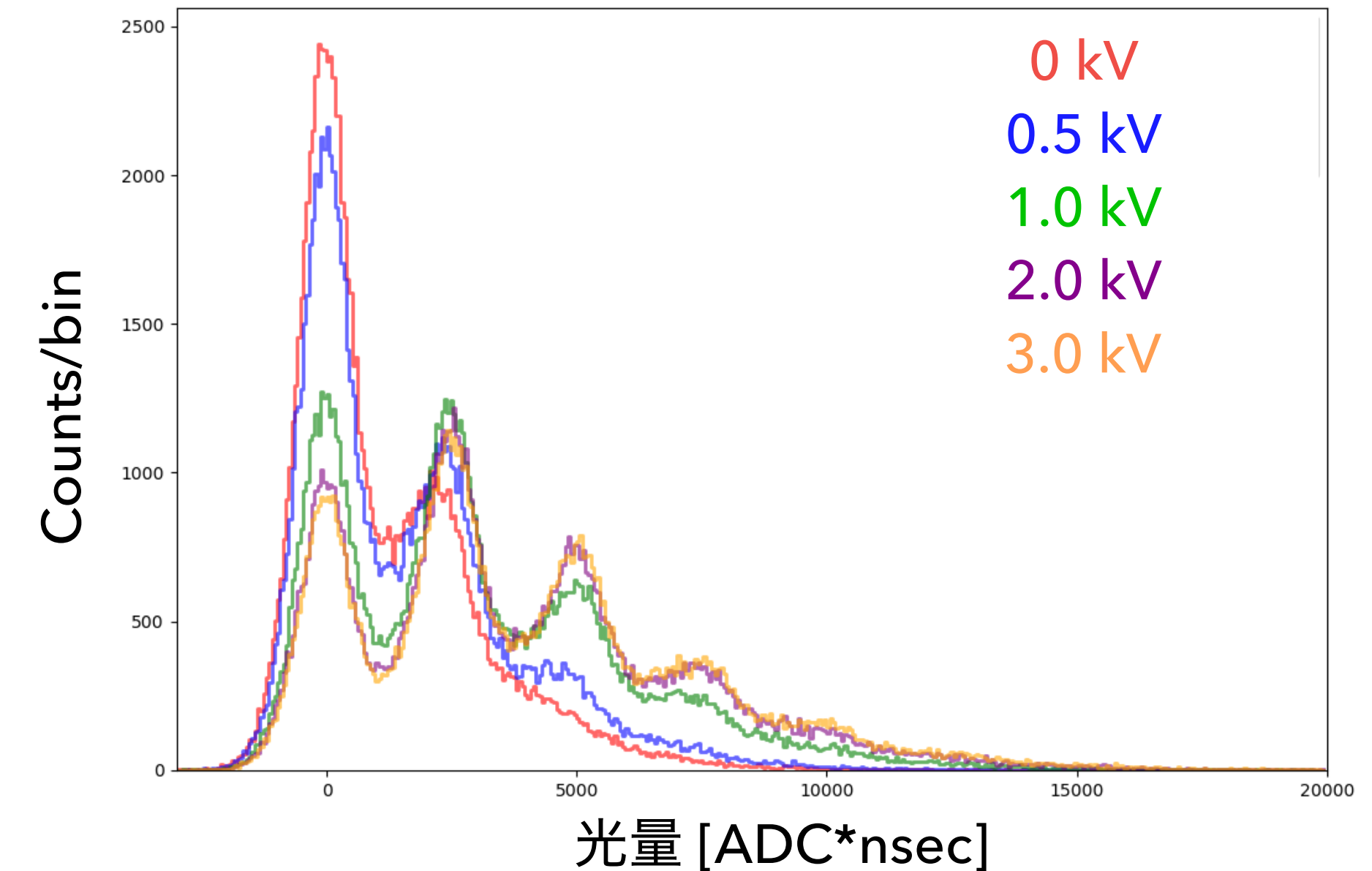
- 光電子集束電極を最適化し、3 kV以上の電圧印加が可能に
- 3 kVでの長時間運転で大きなリーク電流・ノイズなども無し

・LEDを用いた1光子に対する性能評価

- 印加電圧の上昇に伴い、観測光量が増加
→ 光電子集束効率が印加電圧に強く依存
- PMTと比べて良い1光子分解能

・光検出効率の測定

- UV光(LED)に対する相対光検出効率を評価
- 2.5 kVでプラトーへ到達
- ただし、暗黒物質との反応で生成される光の波長は約 175 nm
- 低温(-100°C)・真空中で検出効率の測定システムを構築
- 検出面の位置依存性の性能評価も可能



ハイブリッド光検出器

・光電子検出方法の最適化

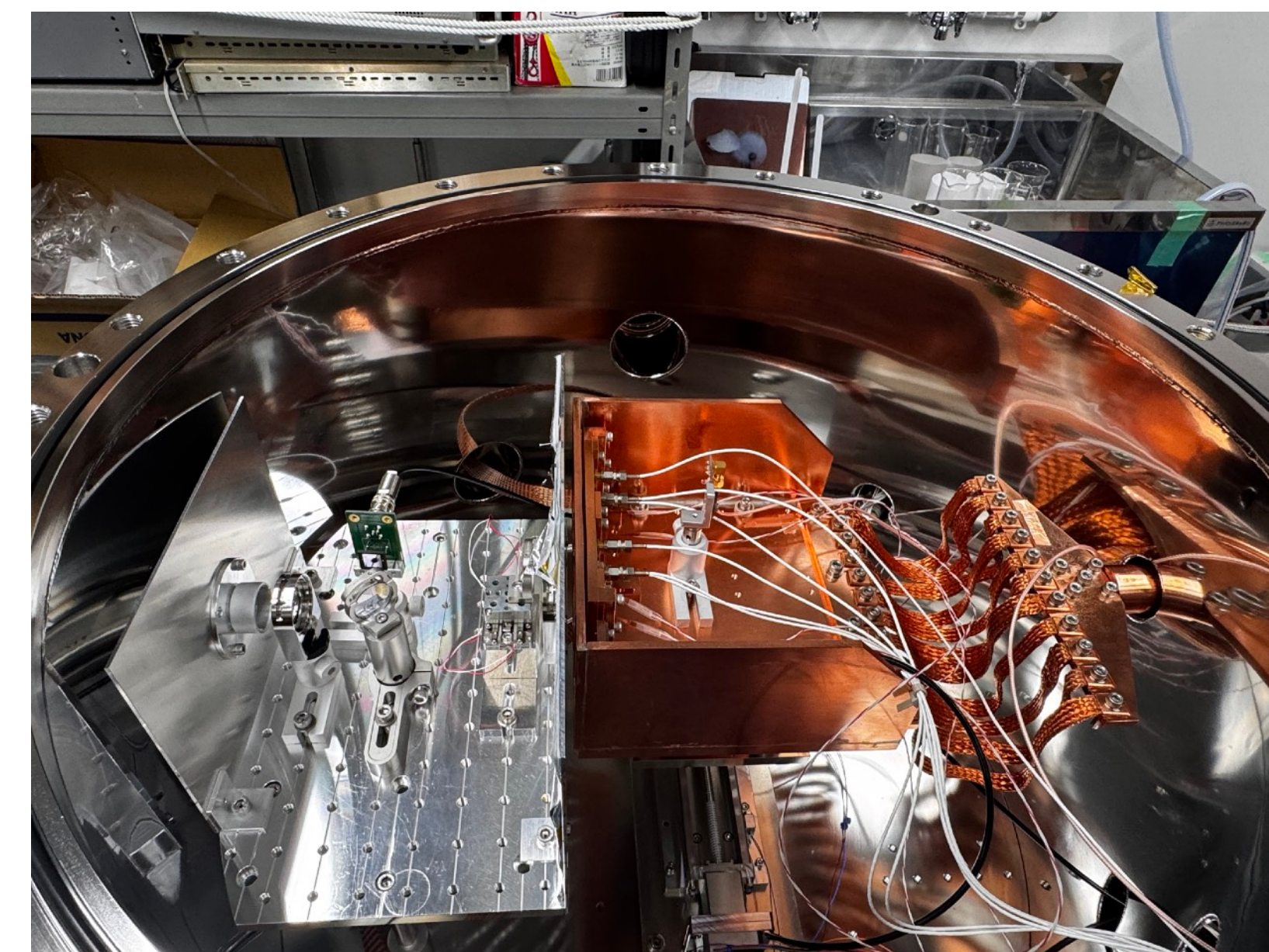
- 光電子集束電極を最適化し、3 kV以上の電圧印加が可能に
 - 3 kVでの長時間運転で大きなリーク電流・ノイズなども無し

・LEDを用いた1光子に対する性能評価

- 印加電圧の上昇に伴い、観測光量が増加
 - 光電子集束効率が印加電圧に強く依存
- PMTと比べて良い1光子分解能

・光検出効率の測定

- UV光(LED)に対する相対光検出効率を評価
 - 2.5 kVでプラトーへ到達
- ただし、暗黒物質との反応で生成される光の波長は約 175 nm
 - 低温(-100°C)・真空中で検出効率の測定システムを構築
 - 検出面の位置依存性の性能評価も可能



- ・XLZD実験: XENONnT, LZ & DARWIN実験からなる新たなコラボレーション (~500人)で2030年台中頃に開始予定
- ・キセノンガスの入手状況に応じて段階的にスケールアップ(例: 40→60 or 80トン)
- ・G3Cメンバーのうち、XENONnT関係者はXLZD実験に加わり計画を推進中
 - ・名古屋グループは、新型光検出器・密閉型検出器を用いたラドン排除・トリチウムBG定量法のR&Dを進めている
 - ・特に、心臓部である光センサーの開発・調達・性能評価は日本が責任を担う
- ・ウィーノ・ヒグシーノなど、電弱相互作用する暗黒物質に対して決定的な一打を与える
 - ・ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊や低エネルギーニュートリノ探索においても世界最高感度を狙う

日本グループは、これまで培った技術(キセノン純化・光検出器・密閉容器など)を持ち込み、中心的役割を担う



Back Up

暗黒光子・アクシオン

- アクシオン・暗黒光子の発見
→強いCP問題解決の有力証拠

暗黒物質(WIMP)

- ウィーノなど電弱相互作用するWIMPの発見
→超対称性理論など背後に潜む物理の検証

太陽ニュートリノ

- 太陽中の核融合に由来した低エネルギーニュートリノの測定

原子核稀崩壊

- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
→消えた反物質の謎の解明
- キセノン原子核の二重電子捕獲
→人類が観測した崩壊事象の中で最も半減期が長い崩壊

超新星爆発

- ニュートリノのフレーバーに依らない観測
(原子核コヒーレント散乱)

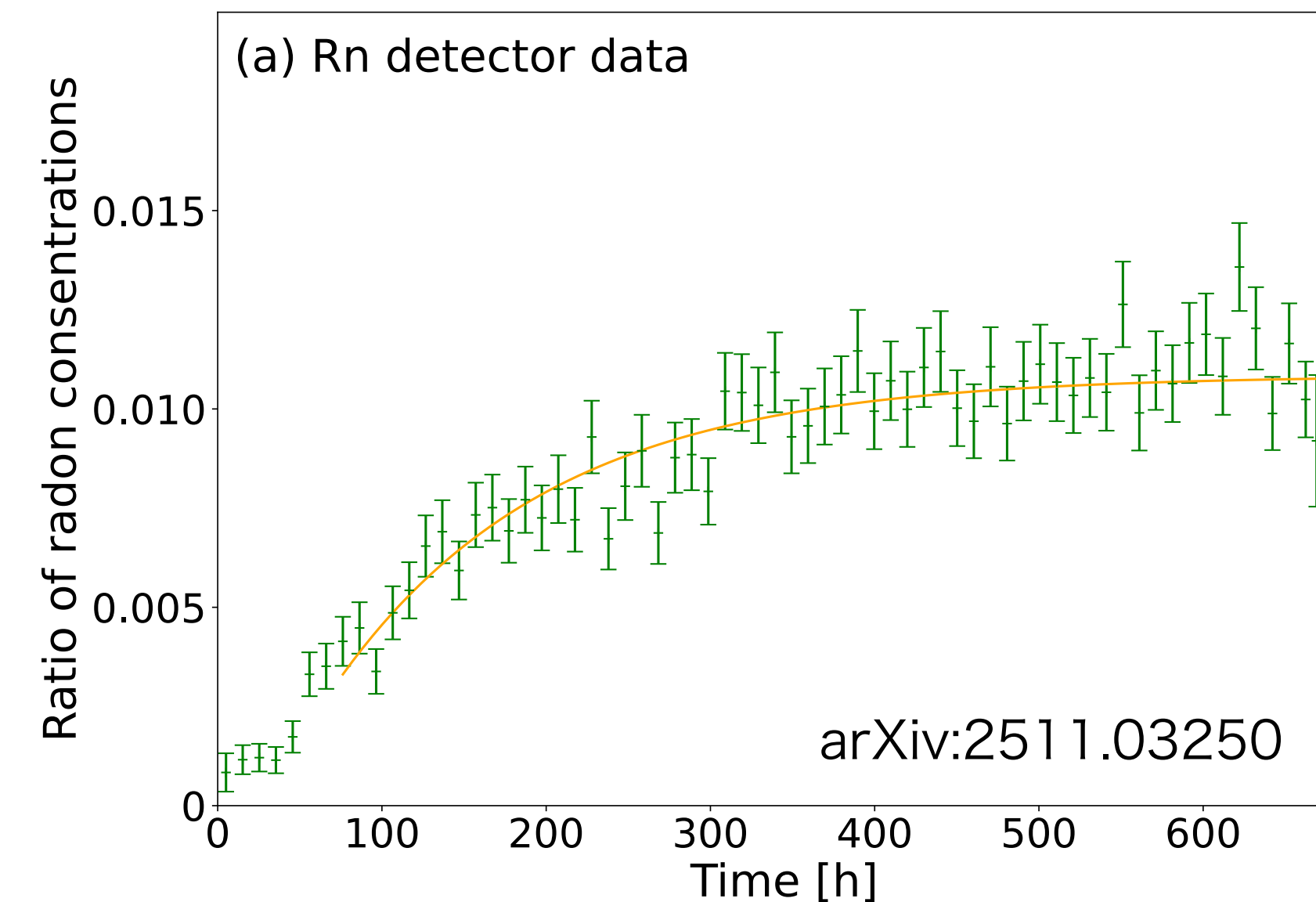
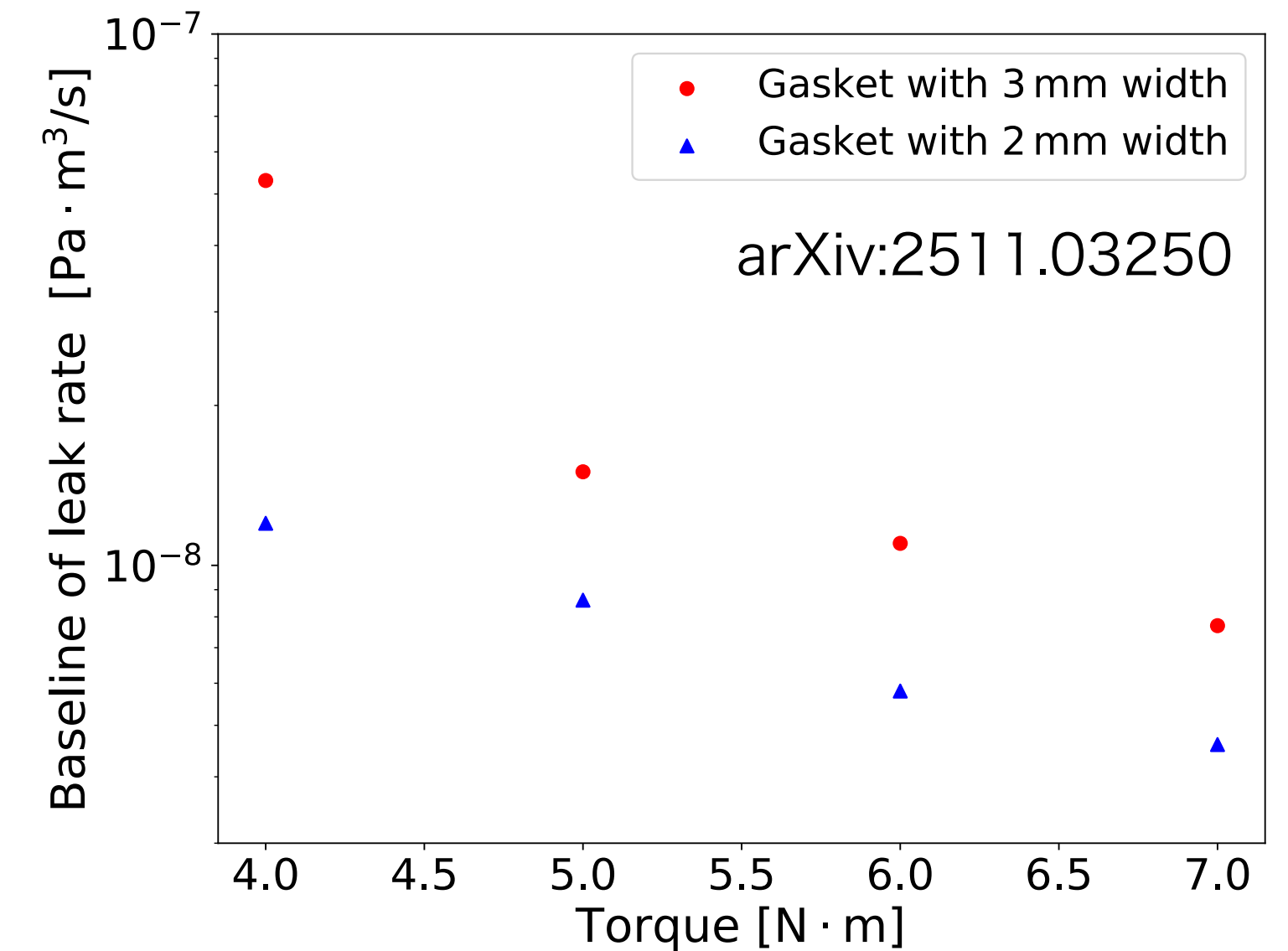
宇宙線

- 大気ニュートリノのコヒーレント散乱の低エネルギー検出
($< 100 \text{ MeV}$)

液体キセノン検出器

密閉型液体キセノン検出器: ラドン・トリチウム排除

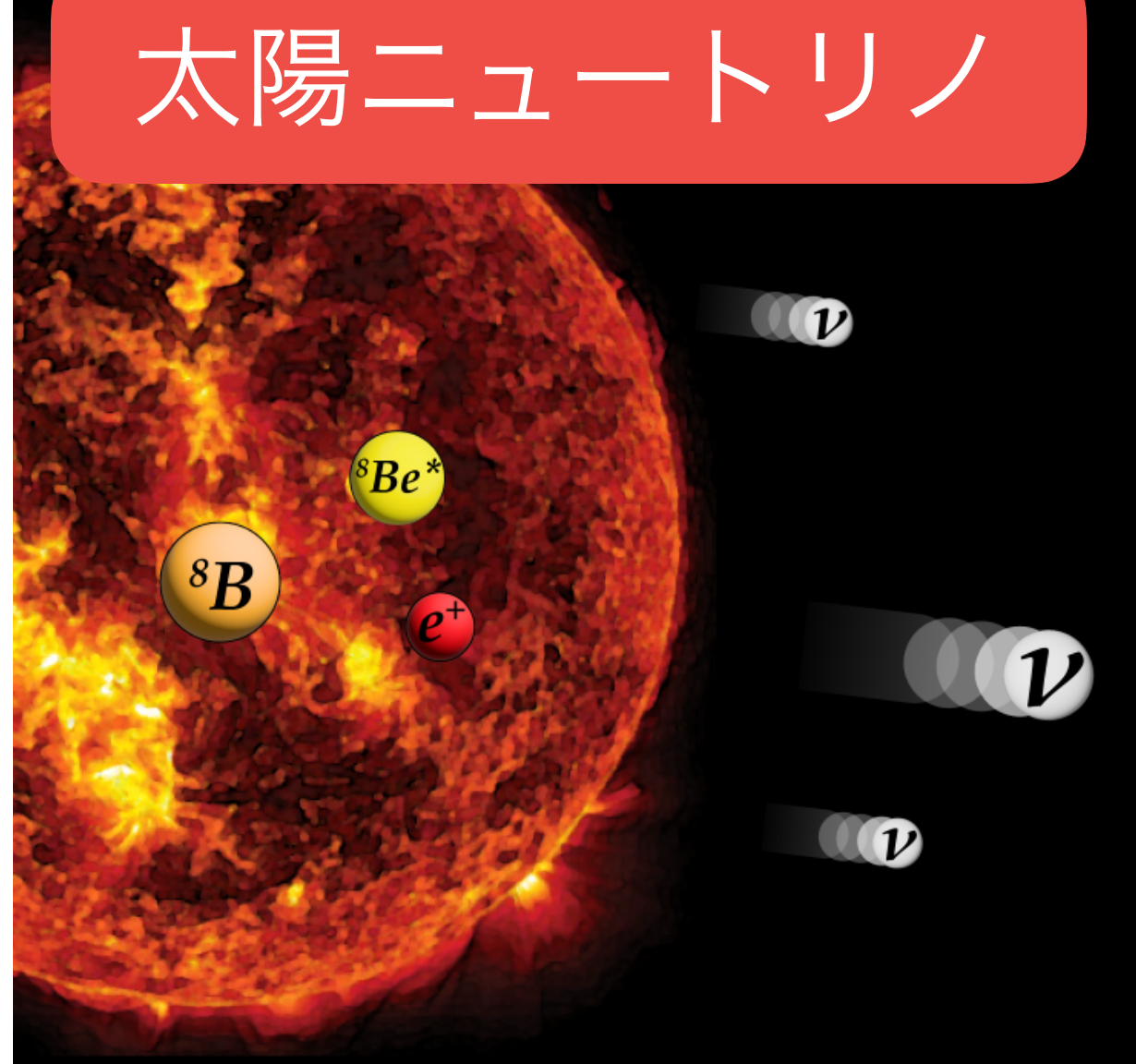
- ・キセノンを格納する真空チャンバーなど、検出器表面からのアウトガスが原因
- ・放射性不純物が極めて少ない合成石英で検出器中心部を密閉し、混入を防ぐ
「密閉型液体キセノン検出器」を提案 PTEP 113H02 (2020)
- ・石英製の真空容器 & -100°C の低温での使用は世界初の試み
 - ・構造設計・シール材・トルク管理など石英加工を専門とする会社と共同研究
- ・名大内に専用の評価システム(冷凍機・真空・ガス純化・制御・安全装置)を確立
 - ・ガスキセノン中でのラドン排除を実証(<1/100以下) arXiv:2511.03250
- ・今後
 - ・液体キセノン中でラドン排除 (< 1/100)を実証(現在進行中)



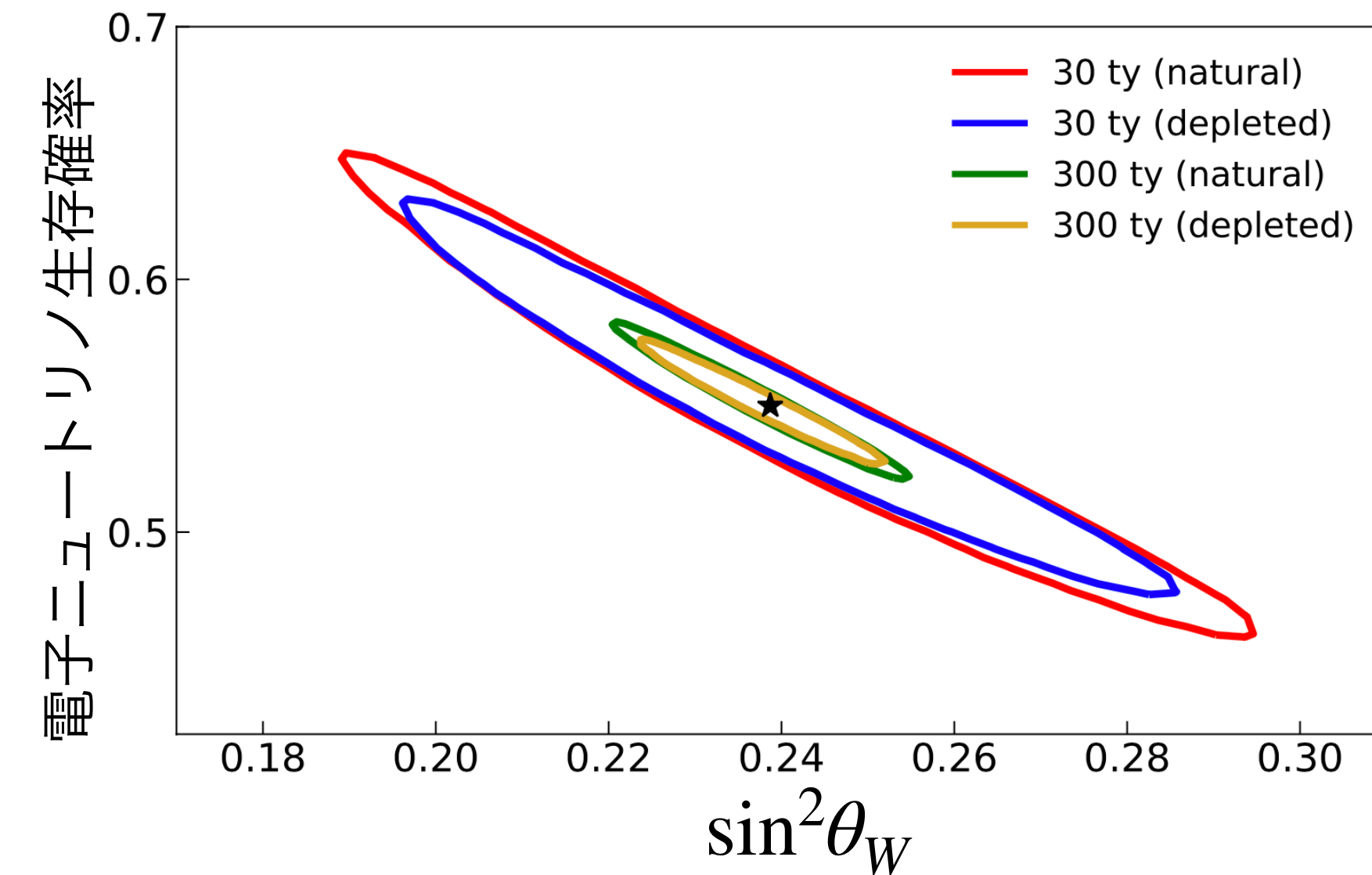
低エネルギーニュートリノ天文学の開拓

18

太陽ニュートリノ



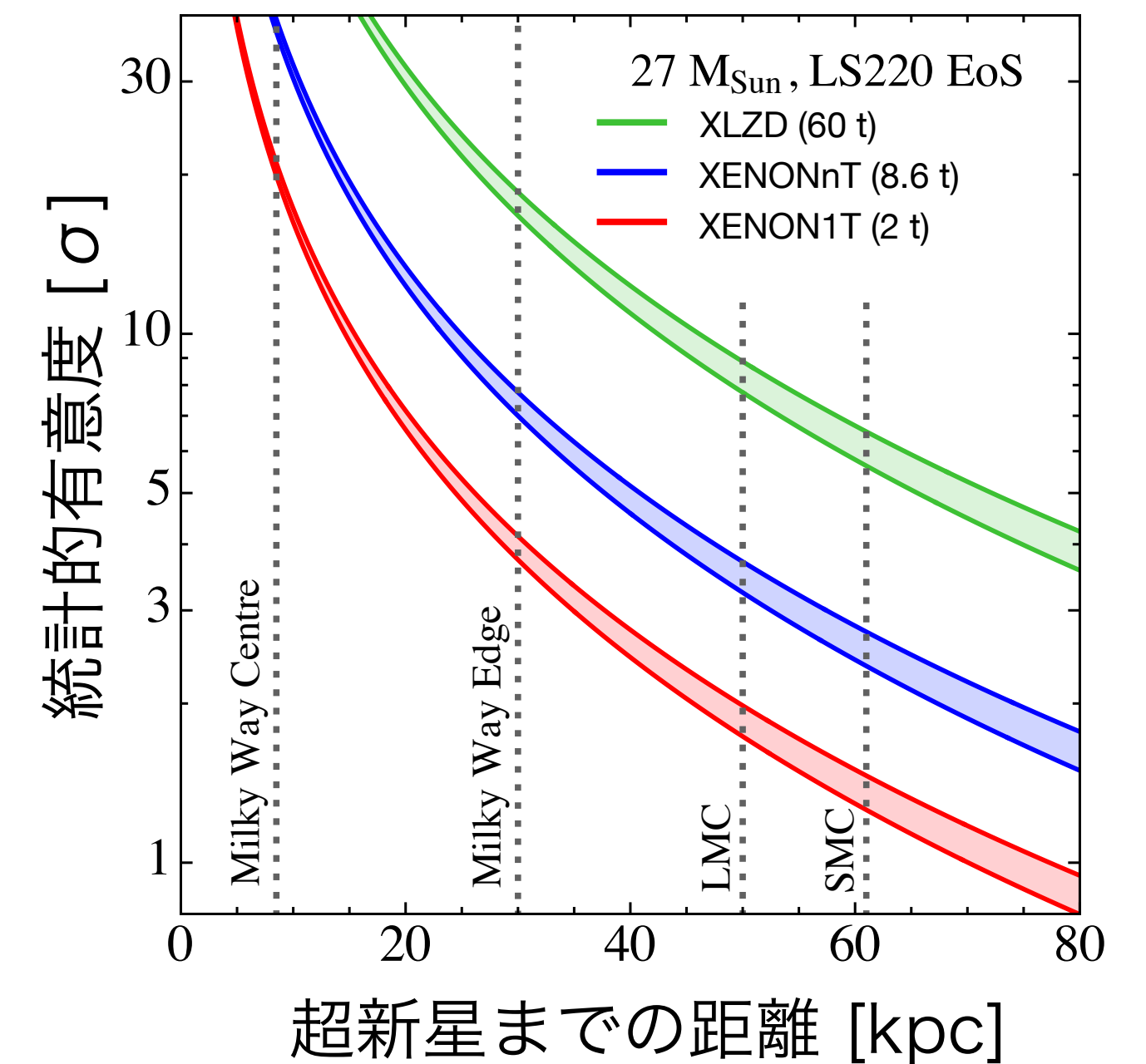
- ・陽子・陽子(pp)反応ニュートリノ: 核融合の主過程
- ・keVエネルギーでのニュートリノ・電子散乱の検出はXLZDのみ可能
- ・標準太陽モデルや標準理論の低エネルギーでの検証
- ・名古屋グループが中心となり、現在この解析をXENONnTで推進中



超新星ニュートリノ



- ・原子核コヒーレント散乱によるフレーバーに依らない観測
- ・XENONnTで、 ^8B 太陽ニュートリノの原子核コヒーレント散乱をすでに観測 Phys. Rev. Lett., 133 191002 (2024)
- ・重力崩壊型超新星からのニュートリノバースト
- ・イベント数: 1000 - 10000事象@10 kpc (3.3 万光年)
- ・全フレーバーの総エネルギーと冷却タイムスケールの時間発展を直接測定
- 超新星爆発のメカニズムの解明にも貢献



ニュートリノBGにどのように立ち向かうか？

19

大気ニュートリノのフラックスの精度向上

- ・重い暗黒物質の発見感度は最終的には大気ニュートリノのフラックスの精度で決まる: 現在20%
- ・**20 → 2 %**に低減できれば、ニュートリノfogは感度は10倍向上: SK/HKでの測定が鍵
- ・感度は打ち止めではなく、統計が貯まればまた緩やかに改善していく (壁ではなく霧である理由)

