

大型液体シンチレータ検出器で 探る物質粒子の起源

石徹白晃治 (東北大学 RCNS)

「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化」領域研究会, 2024年7月5-6日, 大阪大学

宇宙における物質-反物質の非対称性

初期宇宙:物質と反物質が等量生成

今の宇宙:物質だけから構成 (物質優勢宇宙)

物質宇宙の鍵は ν のマヨラナ性

A01: $0 \nu \beta \beta$ 崩壊探索

A01班の研究計画

高感度 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

機械学習を導入したKamLAND-Zen 800の解析

次期 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の準備

KamLAND2-Zenの準備

関係する低放射能技術開発

千葉くんのポスター「KamLAND2-Zenのための有機物材料の不純物量評価」

天体および地球 ν 研究の高度化

KamLAND-Zen

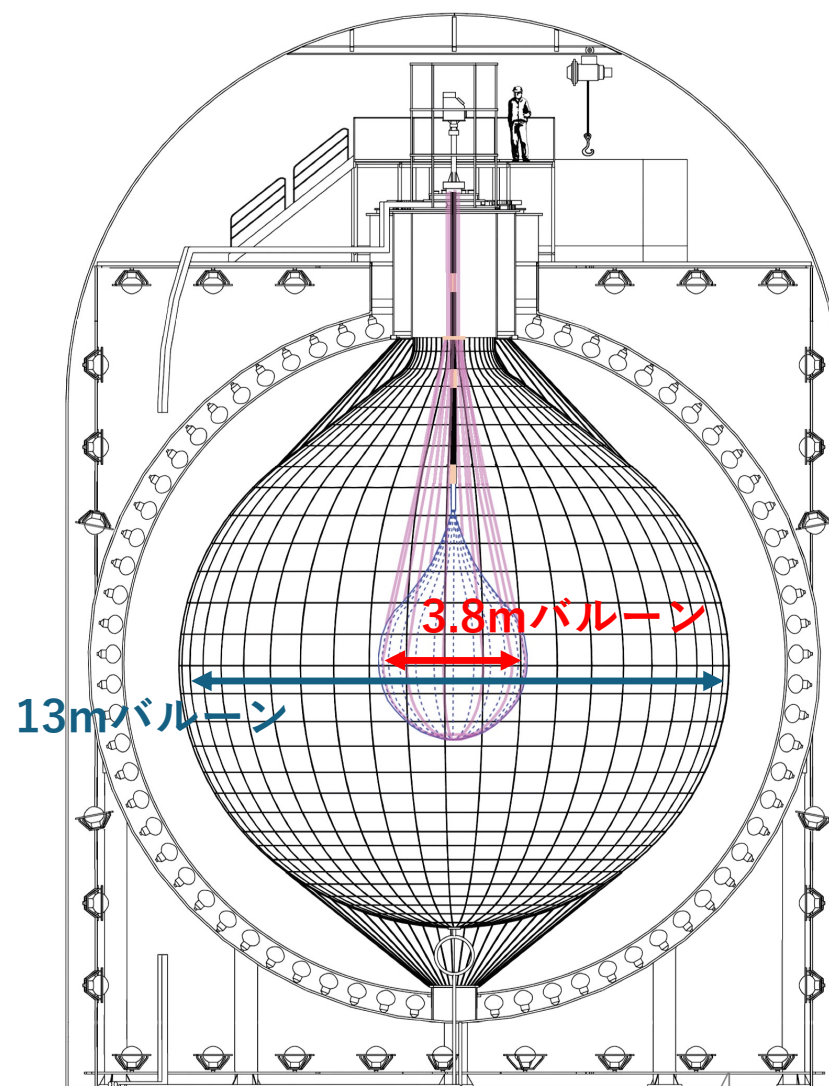
^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

特徴

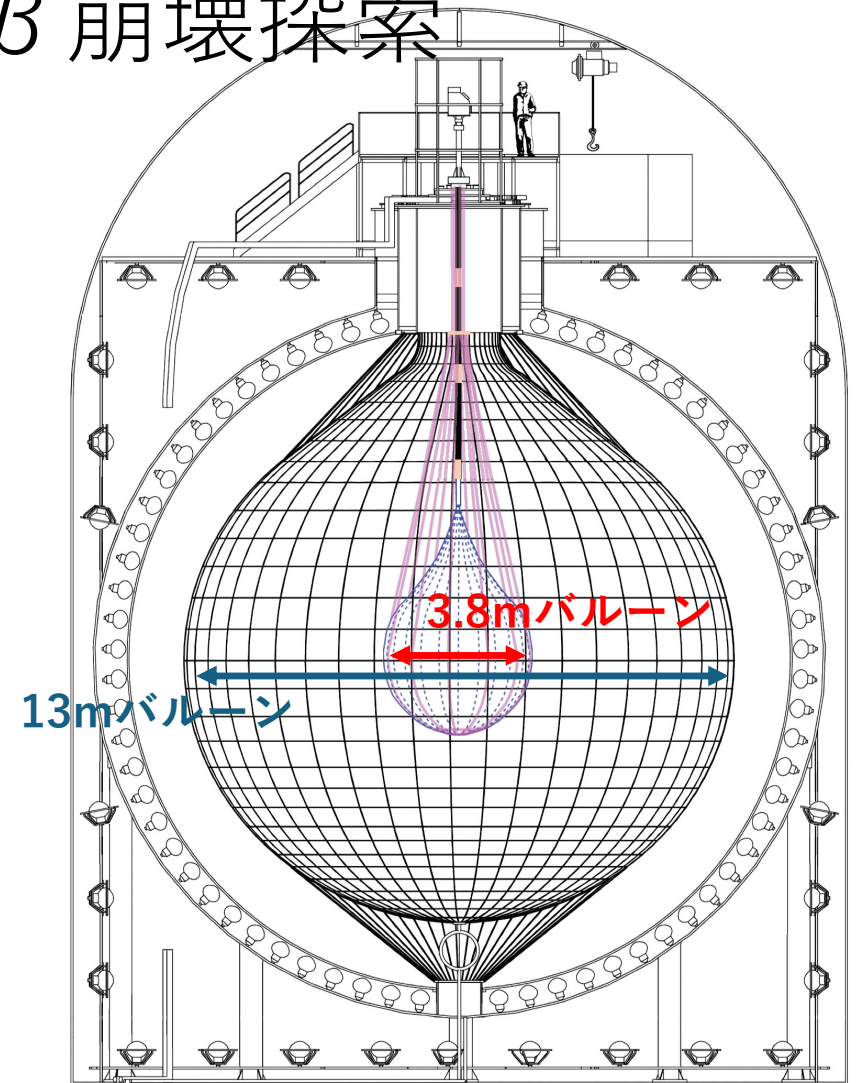
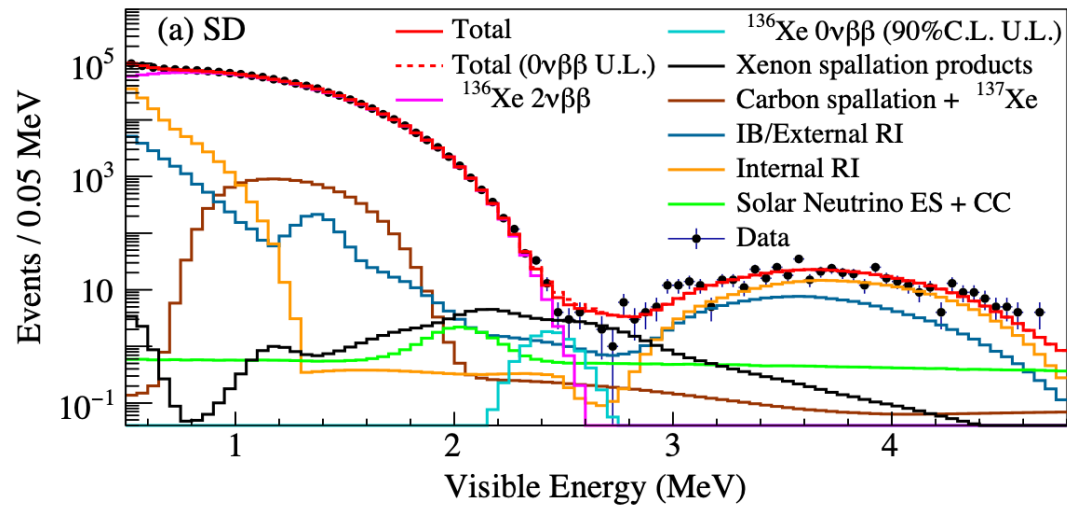
- 保証された低放射能環境
- 高い拡張性
- Xeの純化
- On/off測定

Zen 400: 2011年11月 – 2015年5月
濃縮Xe 320 – 383 kg

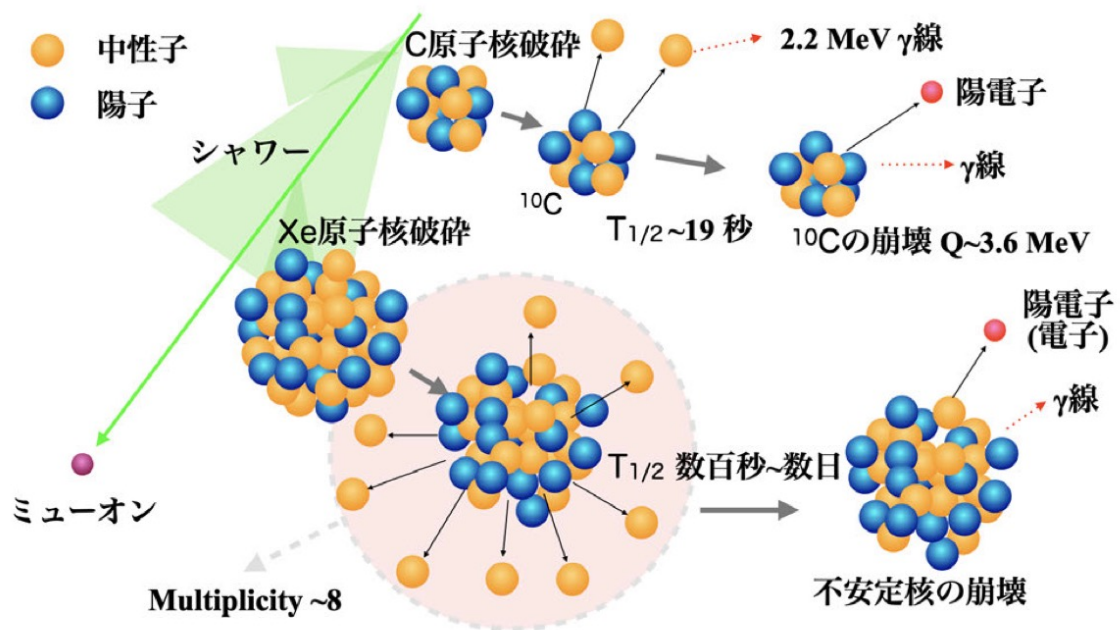
Zen 800: 2019年1月 – 2024年1月
濃縮Xe 745kg



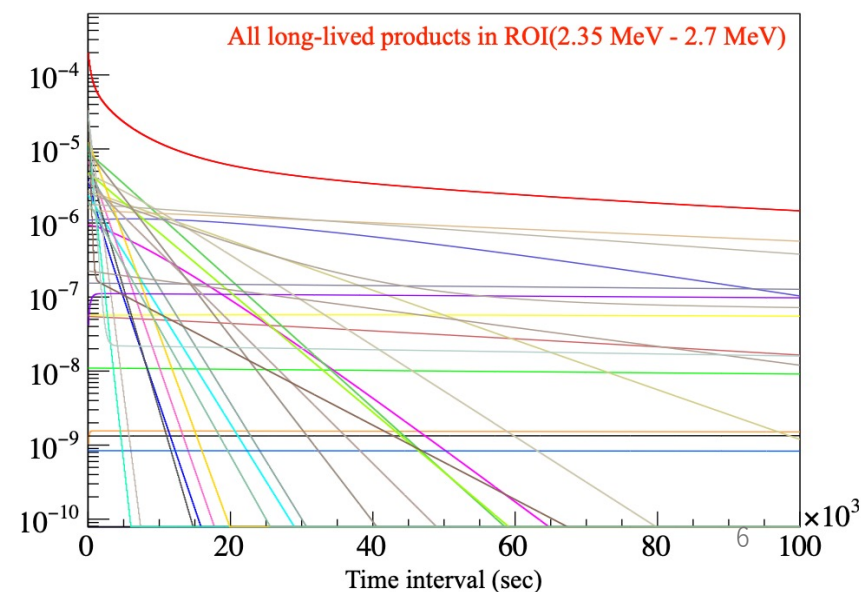
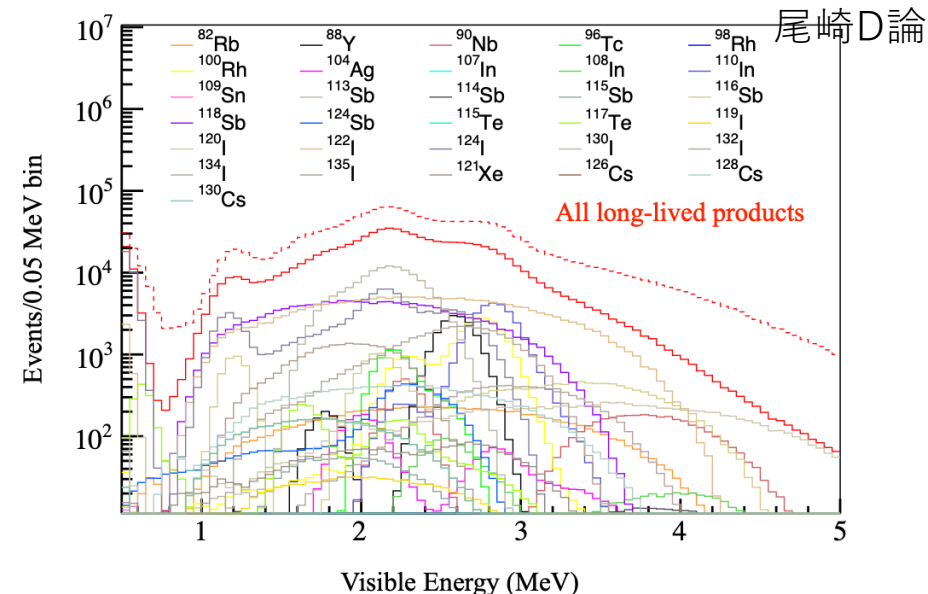
KamLAND-Zenによる $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索



長寿命の ^{136}Xe 破砕生成物

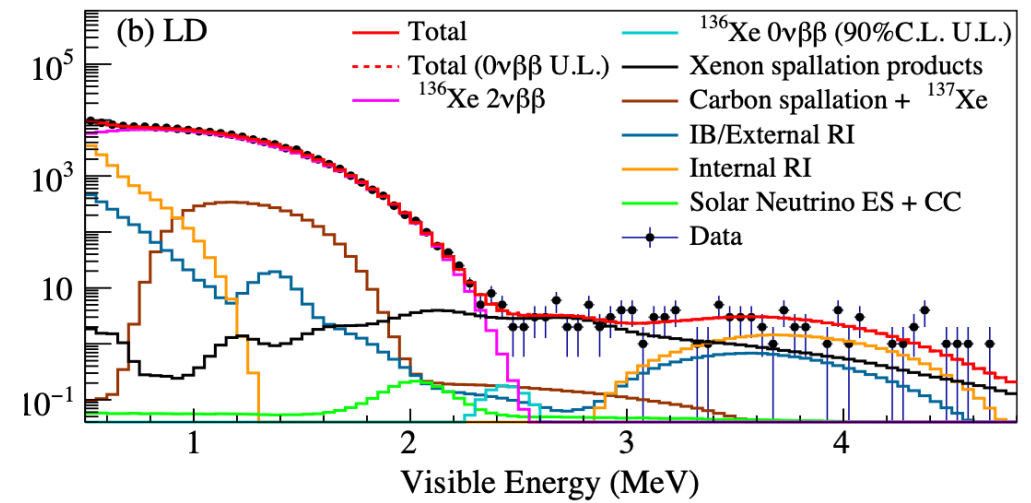
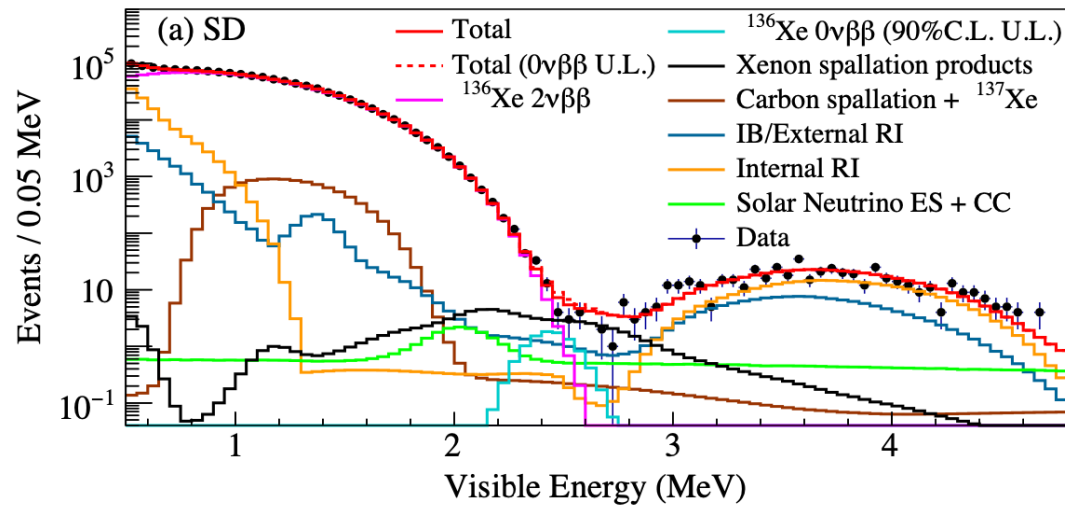


中性子数, 距離, 時間を用いたlikelihood解析

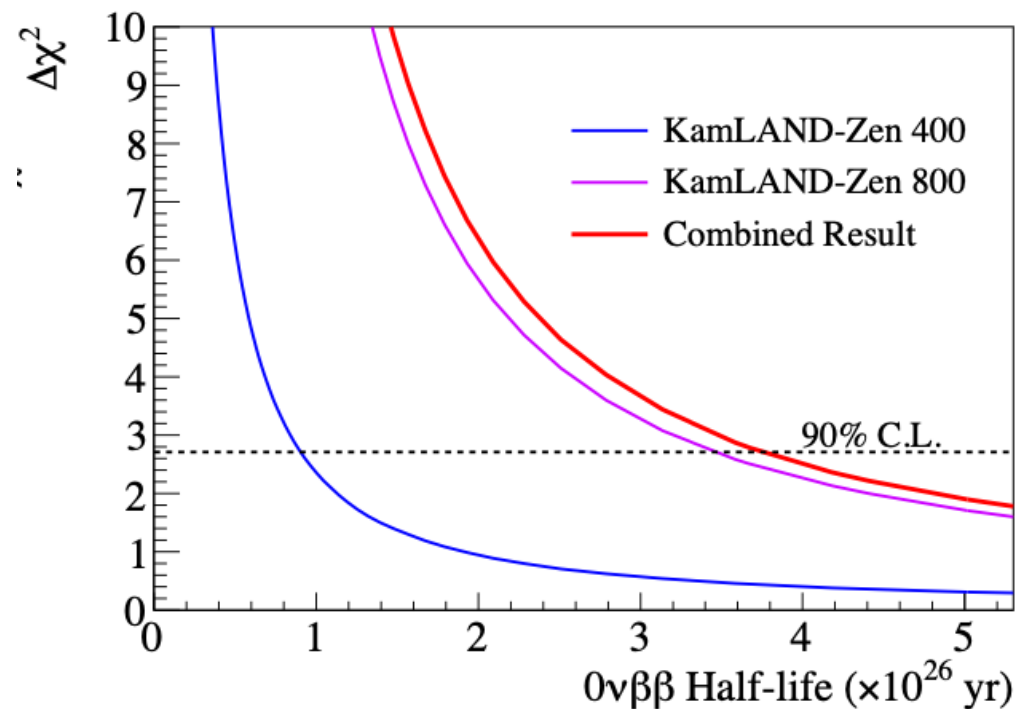
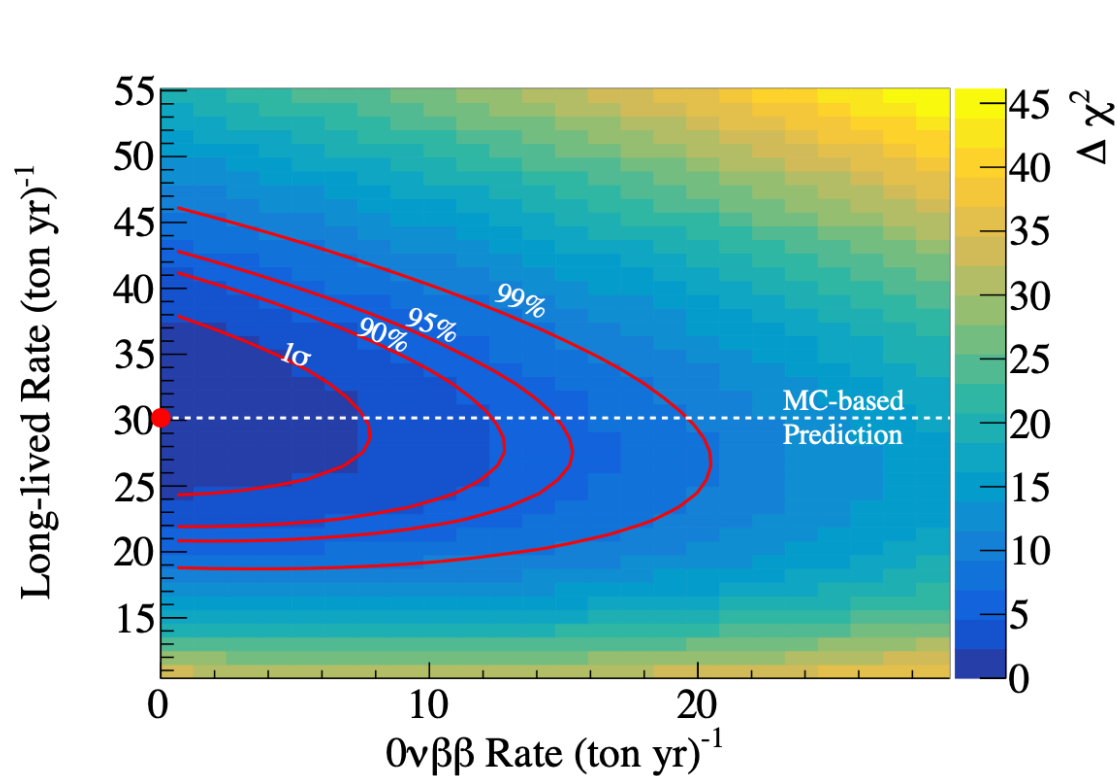


尾崎D論

KamLAND-Zenによる $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索



KamLAND-Zenによる $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索



長寿命の ^{136}Xe 破砕生成物はMCと良く一致

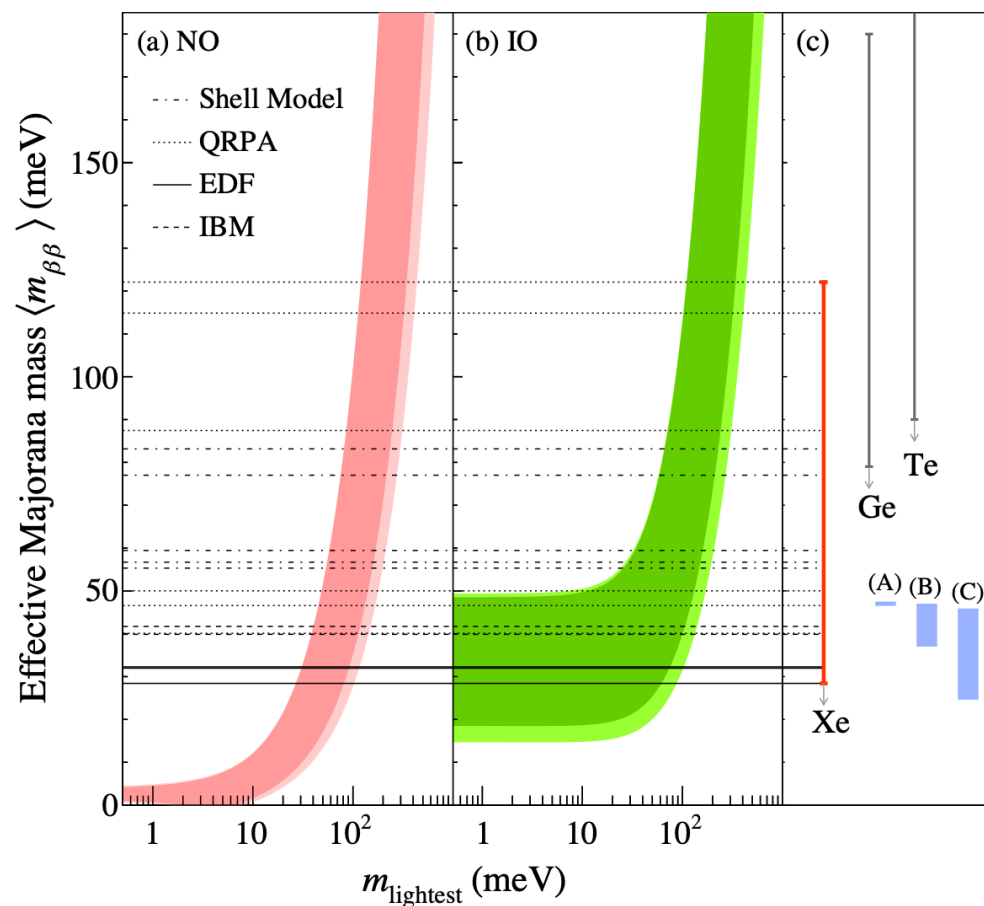
$0\nu\beta\beta$ のbest fit: 0イベント

Zen 400 $T^{0\nu}_{1/2} > 0.9 \times 10^{26} \text{ yr}$

Zen 800 $T^{0\nu}_{1/2} > 3.4 \times 10^{26} \text{ yr}$

Combined $T^{0\nu}_{1/2} > 3.8 \times 10^{26} \text{ yr}$

KamLAND-Zenによる $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

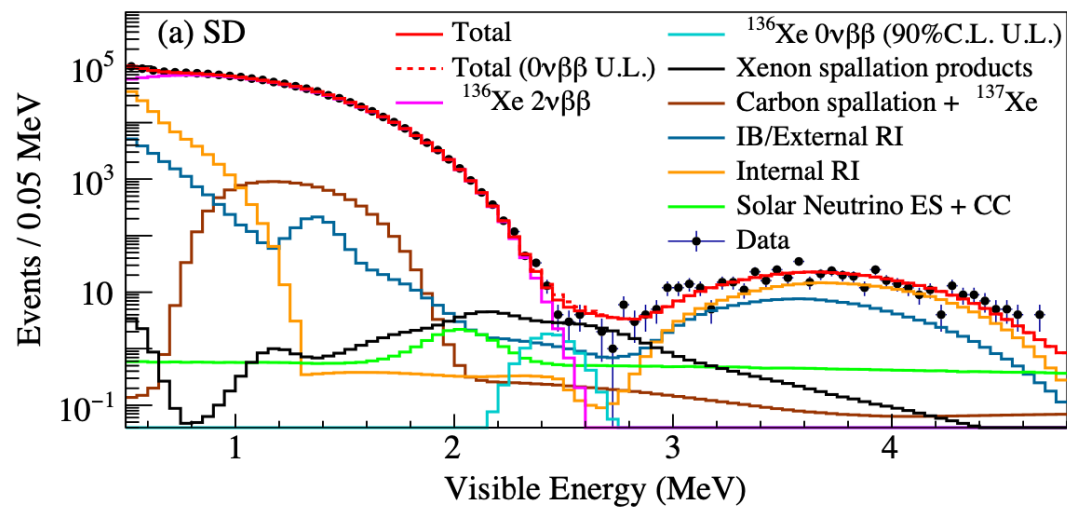


	Ref.	$M^{0\nu}$	$\langle m_{\beta\beta} \rangle$ (meV)
Shell model	[34]	2.28, 2.45	59.4, 55.3
	[35]	1.63, 1.76	83.1, 77.0
	[36, 37]	2.39	56.7
QRPA	[38]	1.55	87.4
	[39]	2.91	46.6
	[40]	2.71	50.0
	[41]	1.11, 1.18	122, 115
	[42]	3.38	40.1
EDF theory	[43]	4.20	32.3
	[44]	4.77	28.4
	[45]	4.24	32.0
IBM	[46]	3.25	41.7
	[47]	3.40	39.9

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (28 - 122) \text{ meV} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

世界をリードする結果

KamLAND-Zenのバックグラウンド



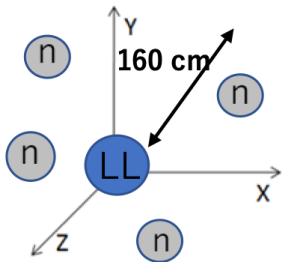
Background	Estimated	Best-fit
¹³⁶ Xe 2νββ	-	27.60
Residual radioactivity in Xe-LS		
²³⁸ U series	0.08 ± 0.01	0.08
²³² Th series	-	1.35
External (Radioactivity in IB)		
²³⁸ U series	-	6.61
²³² Th series	-	0.04
Neutrino interactions		
⁸ B solar ν e ⁻ ES	3.57 ± 0.09	3.57
Spallation products		
Long-lived	17.82 ± 1.30 [†]	19.39
¹⁰ C	0.00 ± 0.05	0.00
⁶ He	0.54 ± 0.27	0.56
¹³⁷ Xe	0.72 ± 0.60	0.72

機械学習による高度化

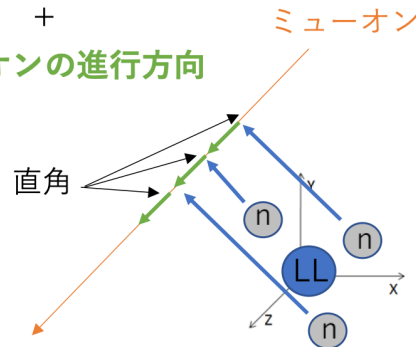
• PointNet <https://arxiv.org/pdf/1612.00593.pdf>

使用例：センサー等で得られた3次元の点群で物体検出

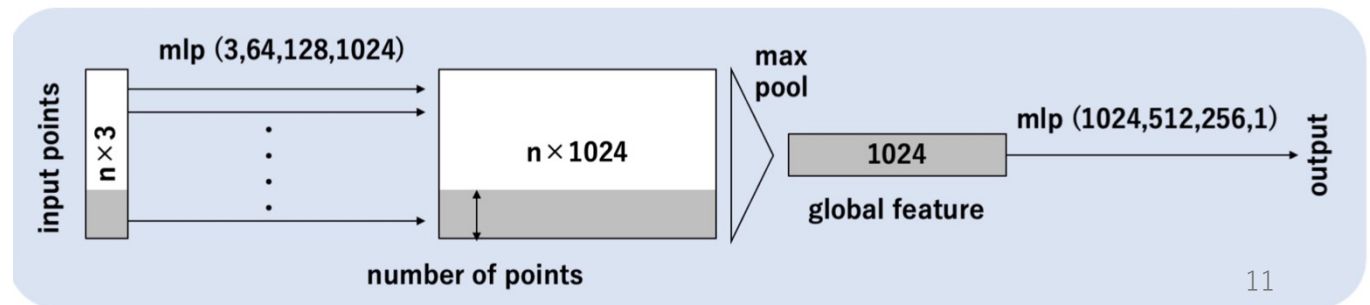
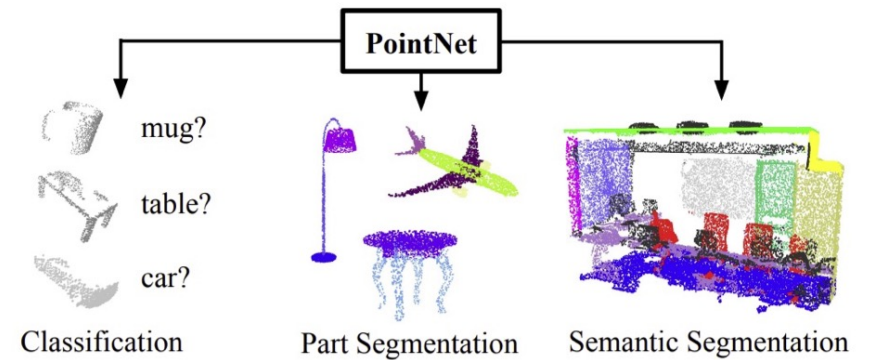
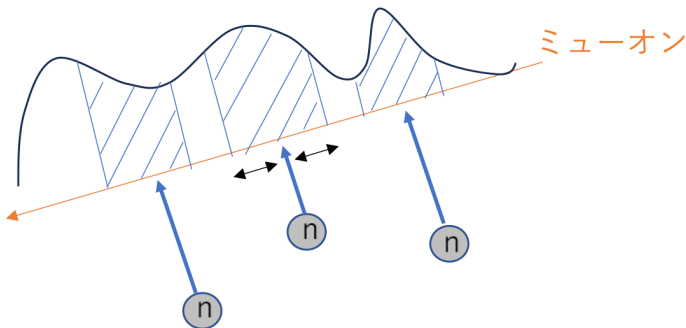
- ① 160cm以内の
中性子座標 + dT



- ② 各中性子からミュオン
までの3次元方向
+
ミュオンの進行方向



- ③ 各中性子の垂線の足から一定
の幅 dE/dx を積分したもの



機械学習による高度化

Phys. Rev. Lett. 130, 051801

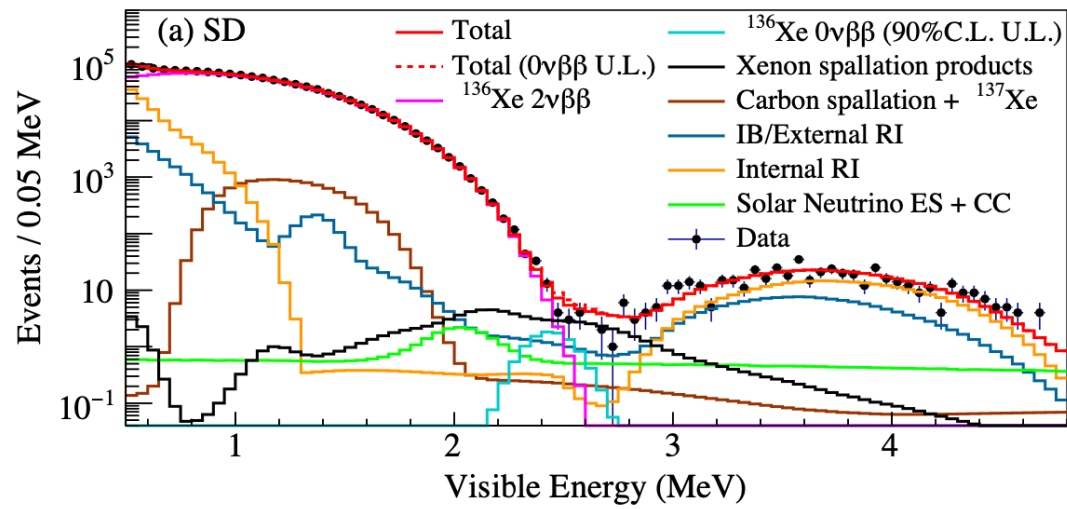
- Zen実験の解析結果のバックグラウンド推定値からポアソン分布で生成したMCをスペクトルフィット
- 15000回繰り返して感度を計算

モデル	PointNet	最尤法
タグ効率	47.6%	41.0%
不定性	$\pm 6.1\%$	$\pm 6.0\%$
信号の犠牲率	10.7%	9.9%
$0\nu\beta\beta$ レート $[(\text{day kton})^{-1}]$	1.90	2.00
$0\nu\beta\beta$ 半減期 $[\times 10^{26} \text{年}]$	1.26	1.20

90% C.L.

機械学習により5%程度得られる結果が向上することを期待

KamLAND-Zenのバックグラウンド

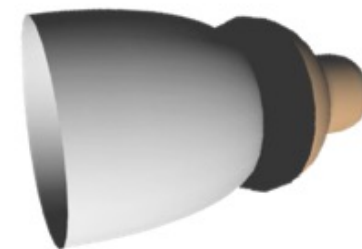


Background	Estimated	Best-fit
$^{136}\text{Xe } 2\nu\beta\beta$	-	27.60
Residual radioactivity in Xe-LS		
^{238}U series	0.08 ± 0.01	0.08
^{232}Th series	-	1.35
External (Radioactivity in IB)		
^{238}U series	-	6.61
^{232}Th series	-	0.04
Neutrino interactions		
^8B solar νe^- ES	3.57 ± 0.09	3.57
Spallation products		
Long-lived	$17.82 \pm 1.30^{\dagger}$	19.39
^{10}C	0.00 ± 0.05	0.00
^6He	0.54 ± 0.27	0.56
^{137}Xe	0.72 ± 0.60	0.72

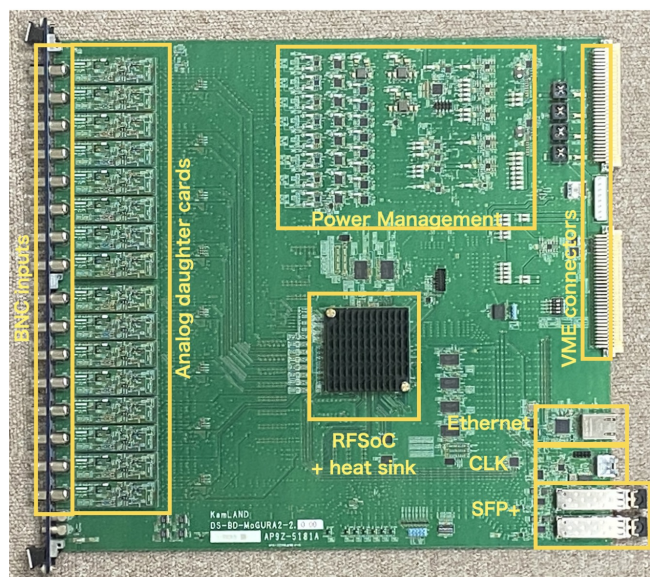
KamLAND2-Zen

光量 5倍: $2 \nu \beta \beta$ を 2 桁低減

- Bis-MSB LS, 高量子効率20inch PMT, 集光ミラー



中性子検出効率 99%: 長寿命の ^{136}Xe 破砕生成物の除去効率65%



大容量オンボードメモリー
高速データ転送

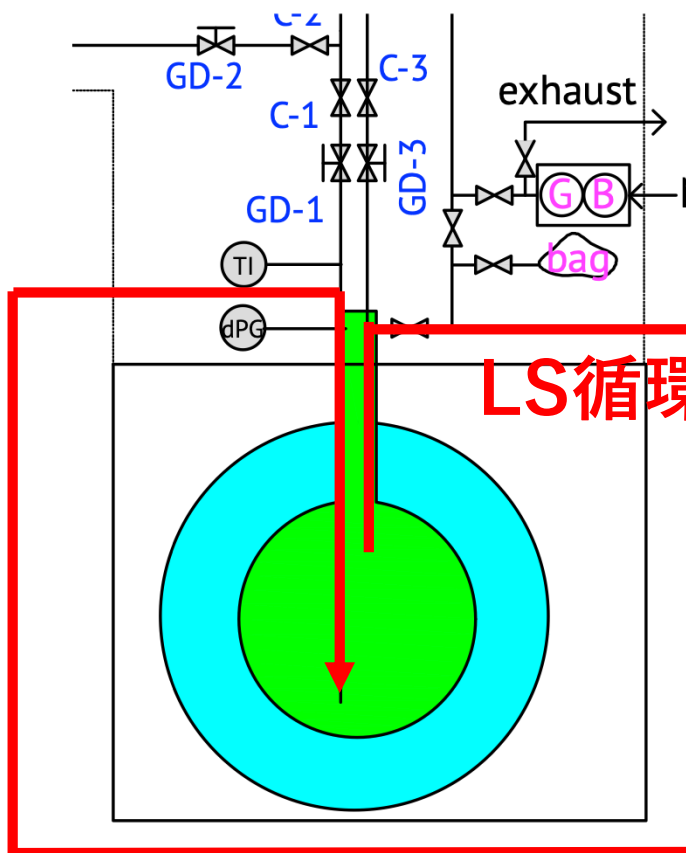
データ取得開始時

目標: ハードウェアトリガーにより90%

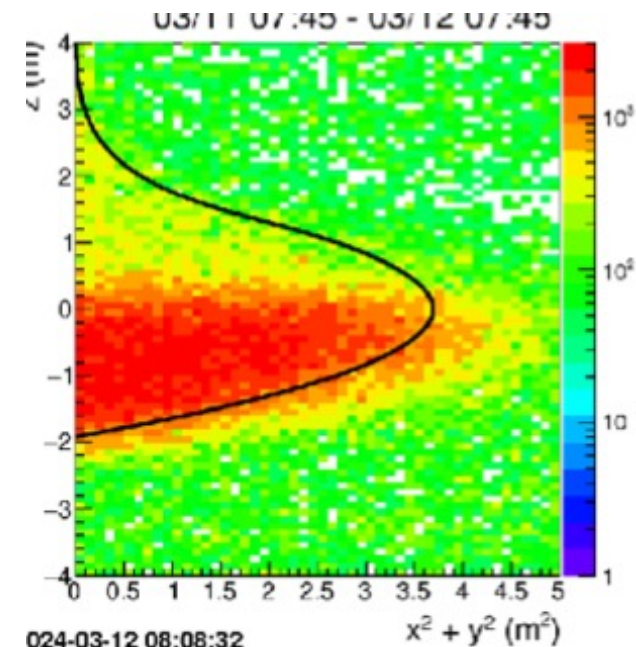
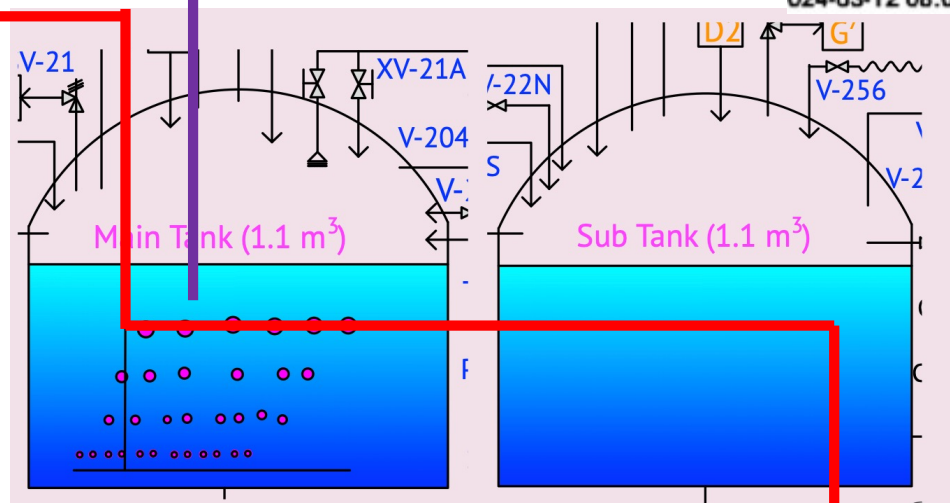
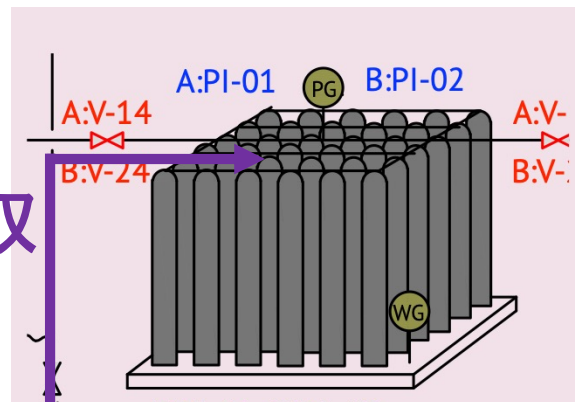
最終的にはソフトウェアトリガーにより>99%

Xe回収

2024年2月開始



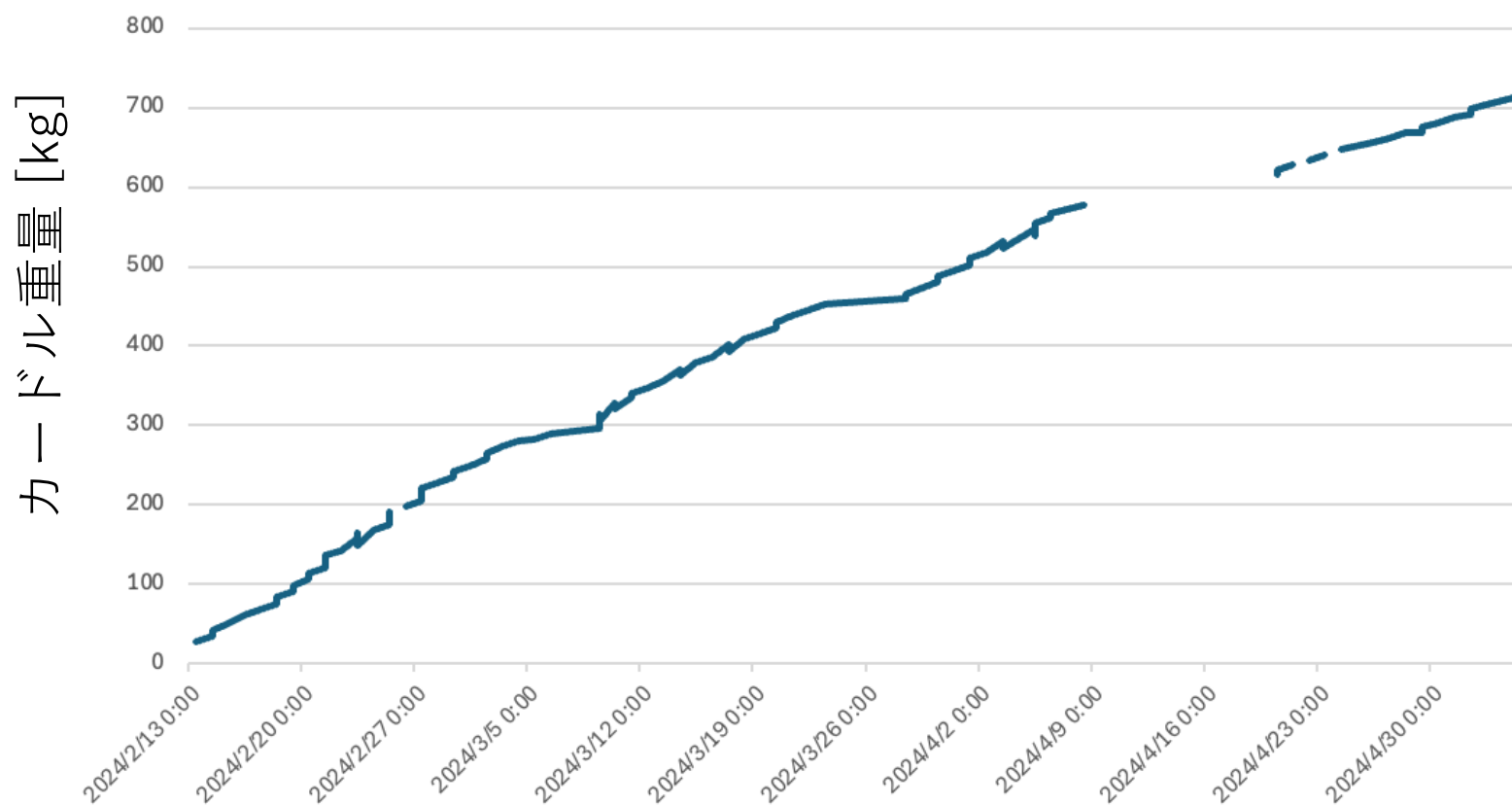
Xe回収



Xe回収

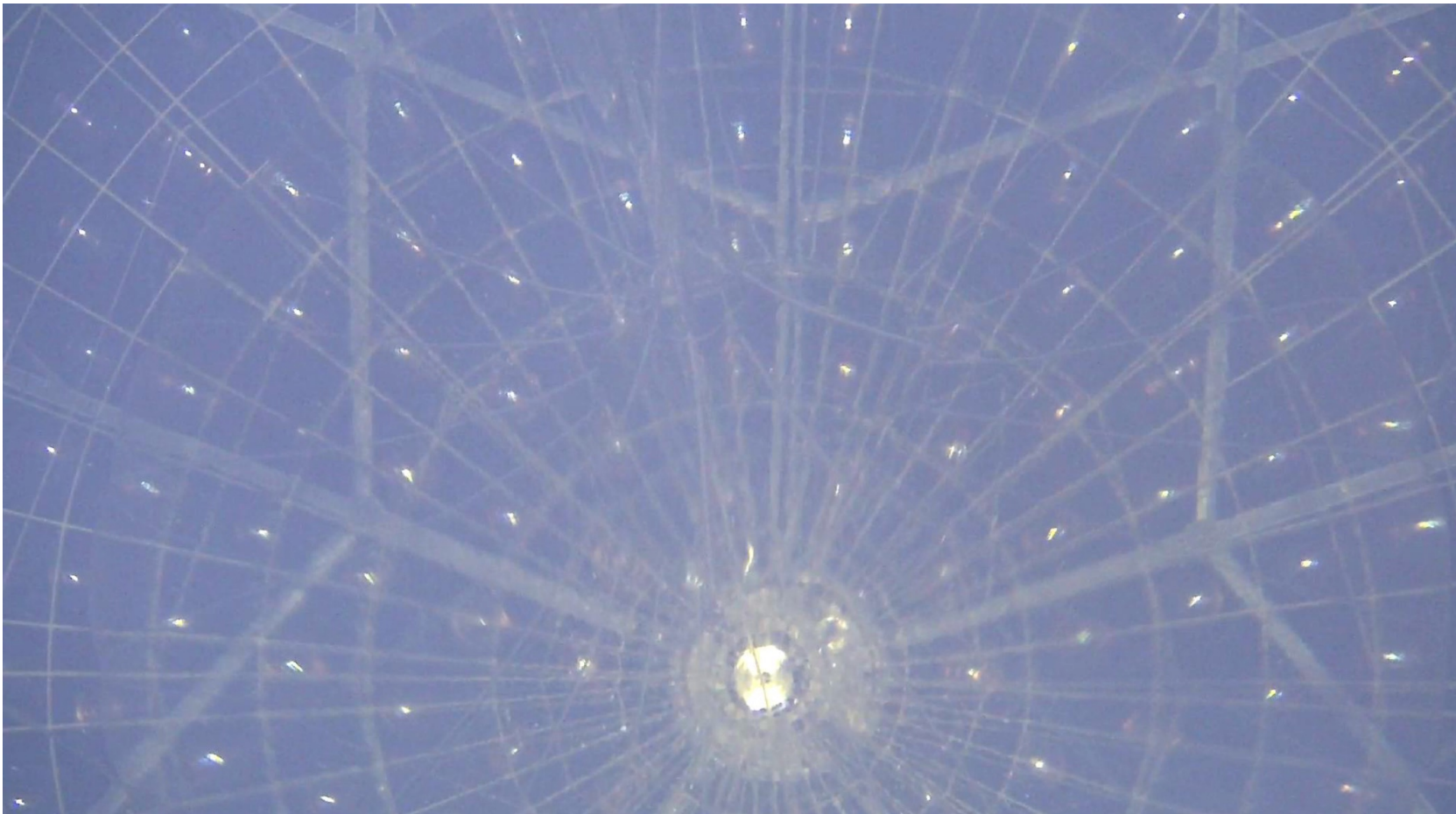
2024年2月開始

2体積分の処理 → カードルに~700 kg



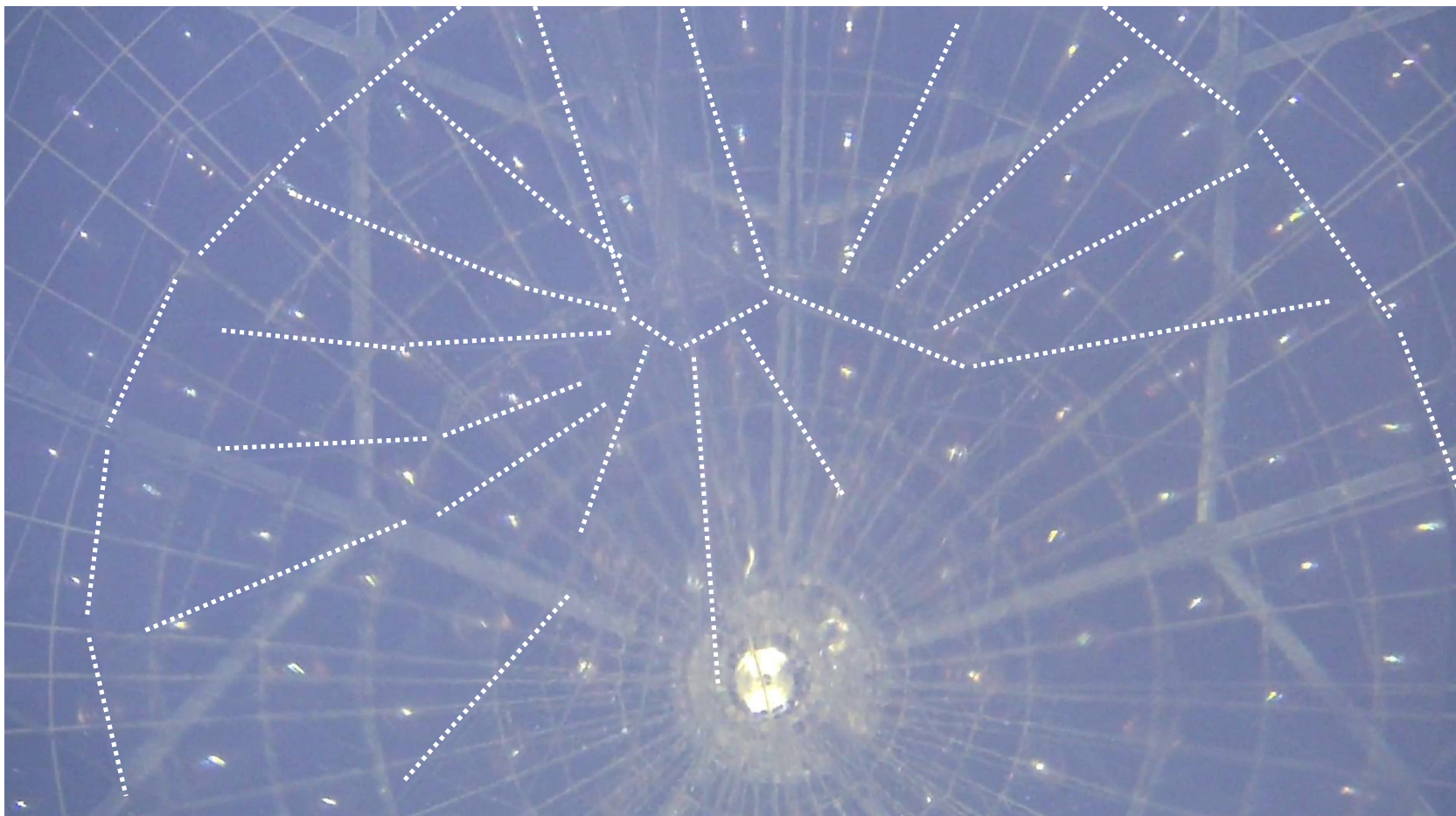
ミニバルーンの萎ませ

2024年5月開始



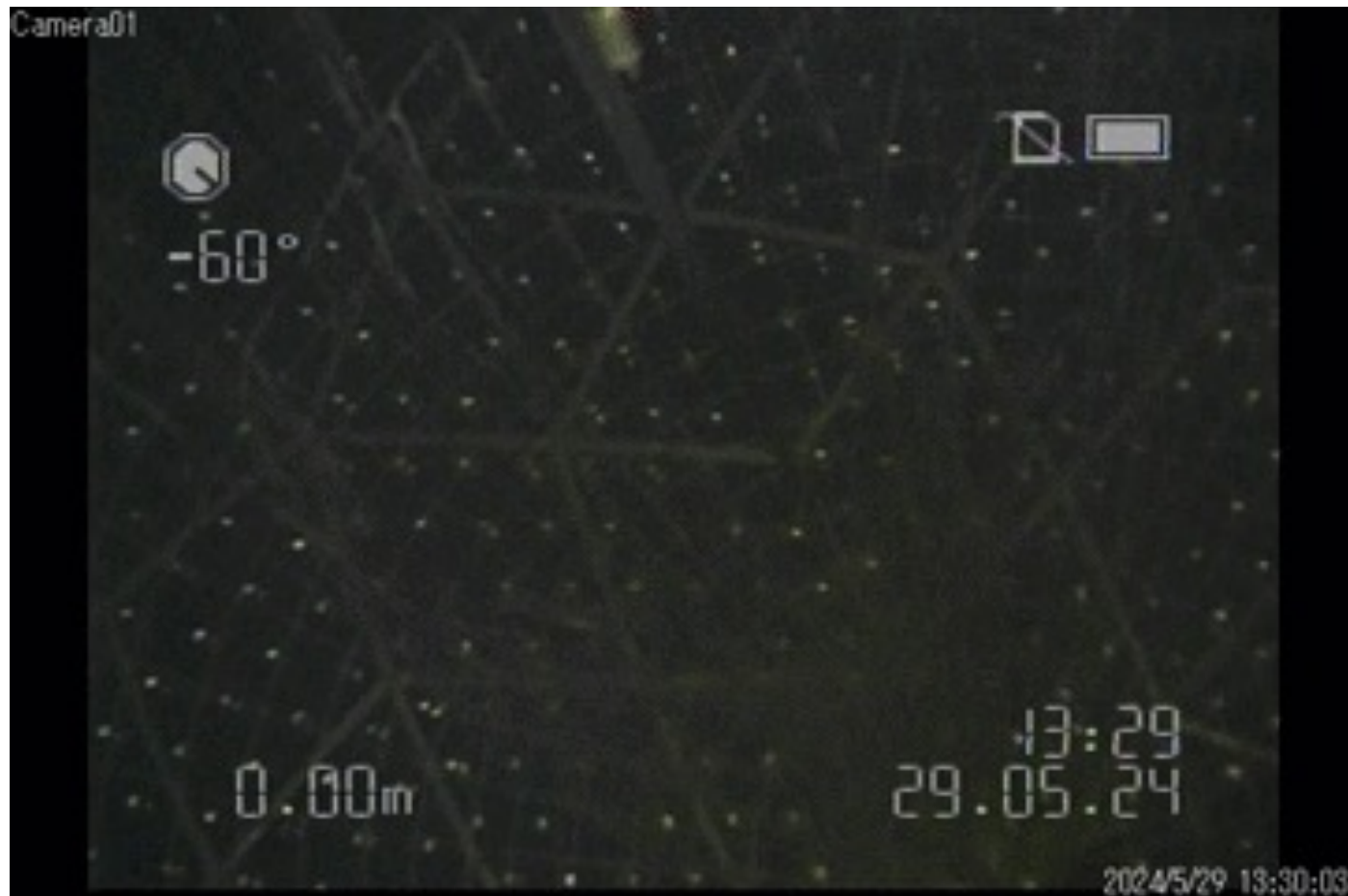
ミニバルーンの萎ませ

2024年5月開始

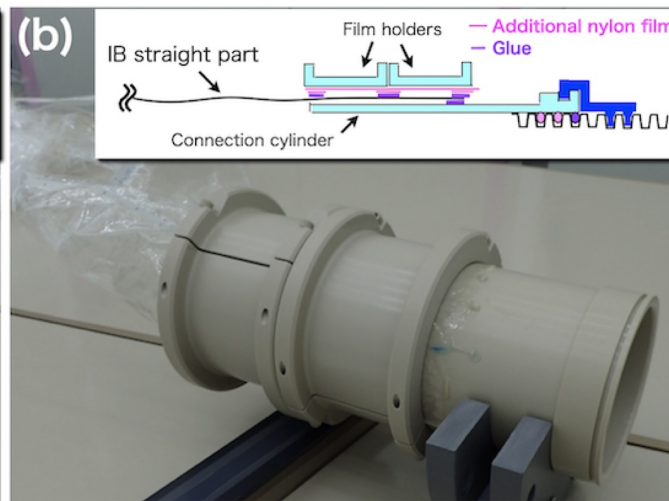
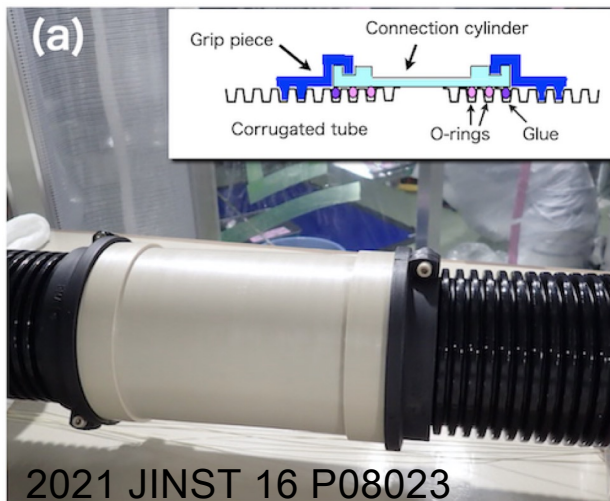
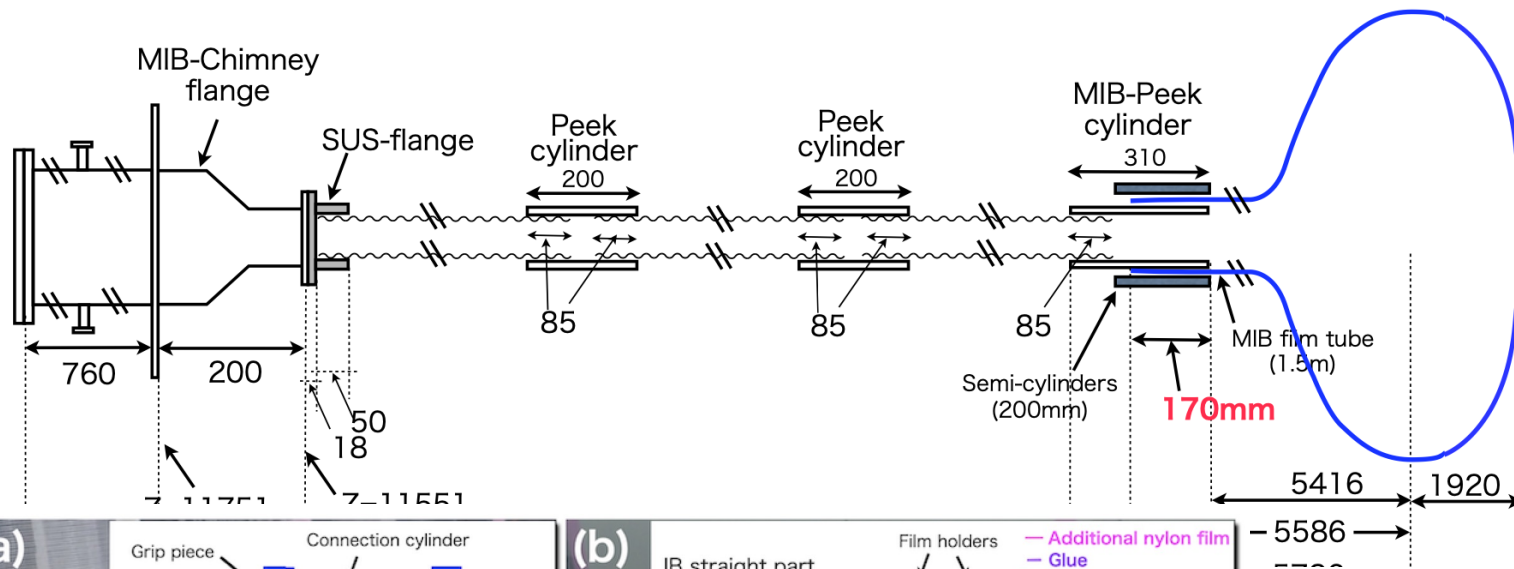


ミニバルーンの萎ませ

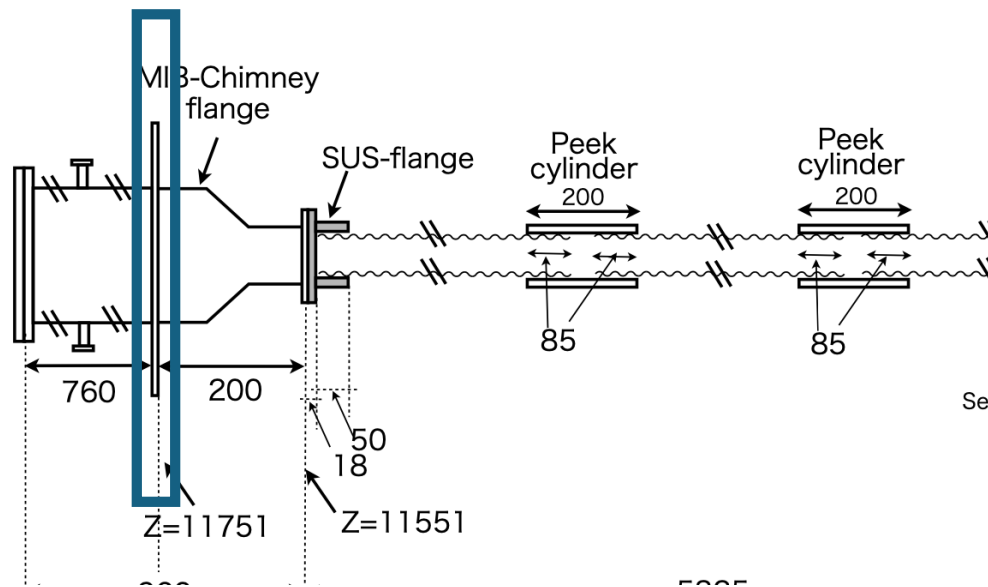
2024年5月開始



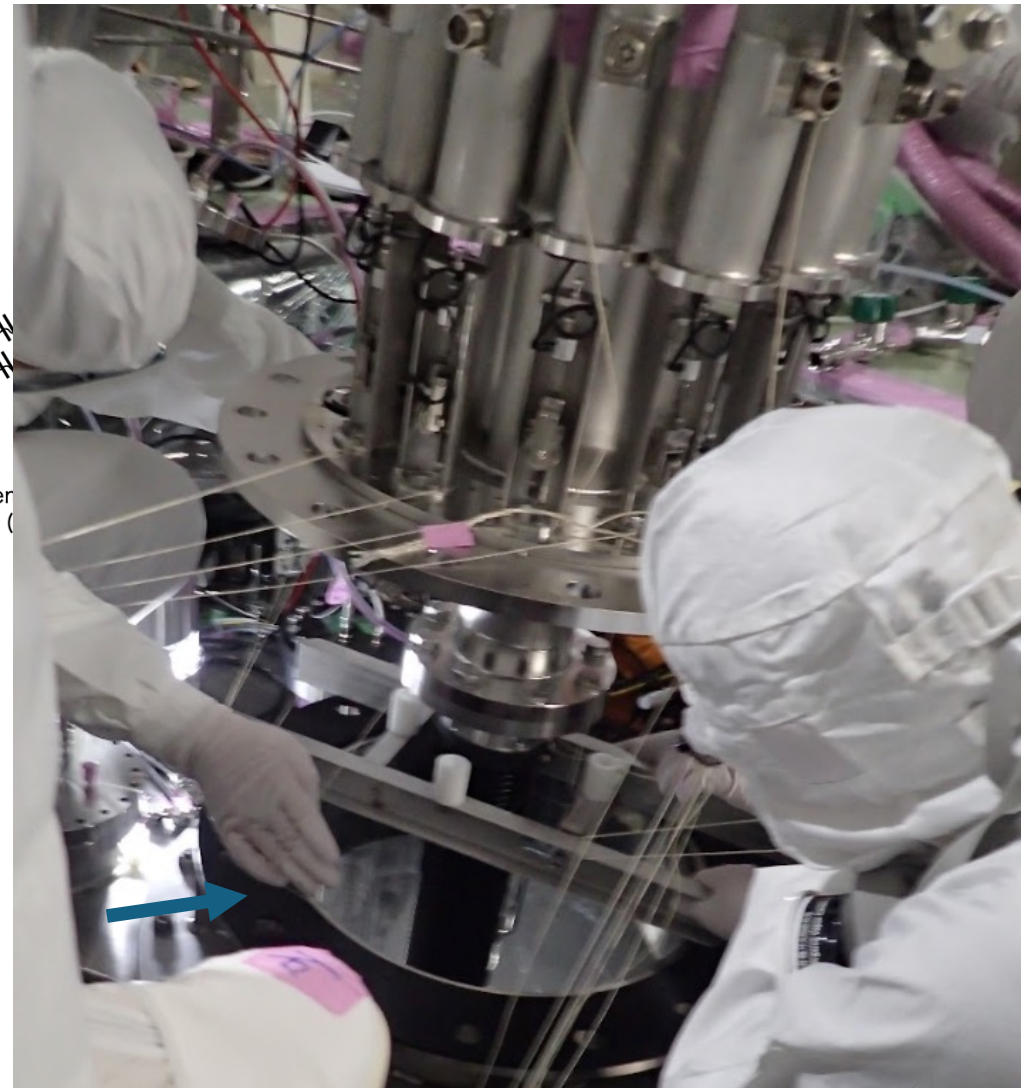
ミニバルーン取り出し



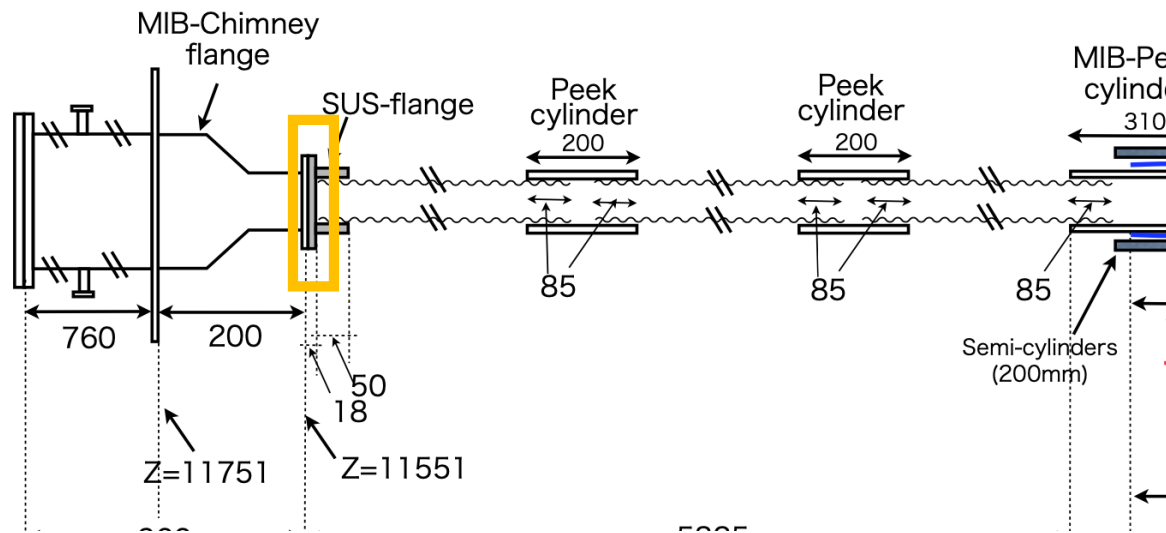
ミニバルーン取り出し



バイトンのガスケットが固化（取れない）



ミニバルーン取り出し

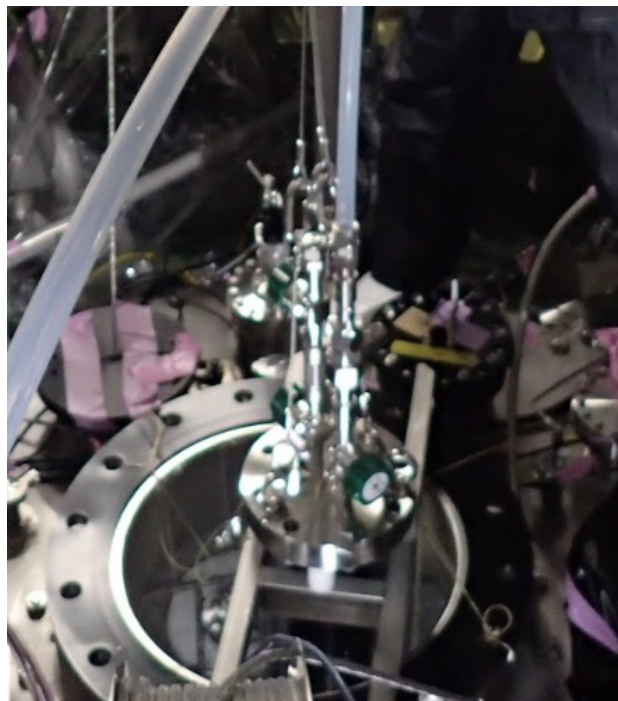


ネジが噛んだ

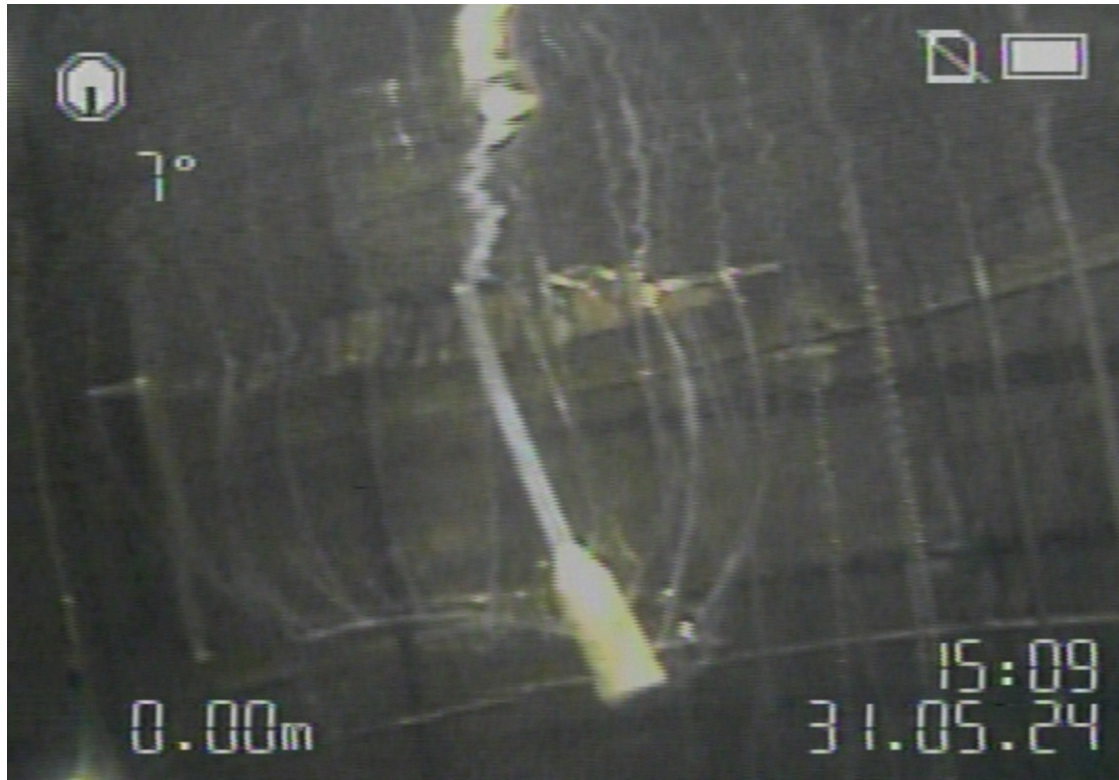
ミニバルーン取り出し



ミニバルーン取り出し



ミニバルーン取り出し



配管ミスで最後の30Lを廃液できずに引き上げた

≡ ニバルーン取り出し

and ^{232}Th mentioned here assume secular equilibrium for comparison with the previously reported values. In the earlier period of the dataset, we found an increase in the background rate at the IB bottom, possibly due to the settling of dust particles containing radioactive impurities. To avoid this possible background, we tag and remove this high-background period from the dataset using machine learning algorithms, as discussed in Ref. [3, 18].

ミニバルーン取り出し

and ^{232}Th mentioned here assume secular equilibrium for comparison with the previously reported values. In the earlier period of the dataset, we found an increase in the background rate at the IB bottom, possibly due to the settling of dust particles containing radioactive impurities. To avoid this possible background, we tag and remove this high-background period from the dataset using machine learning algorithms, as discussed in Ref. [3, 18].



本当にダストがあった

現在と今後の予定

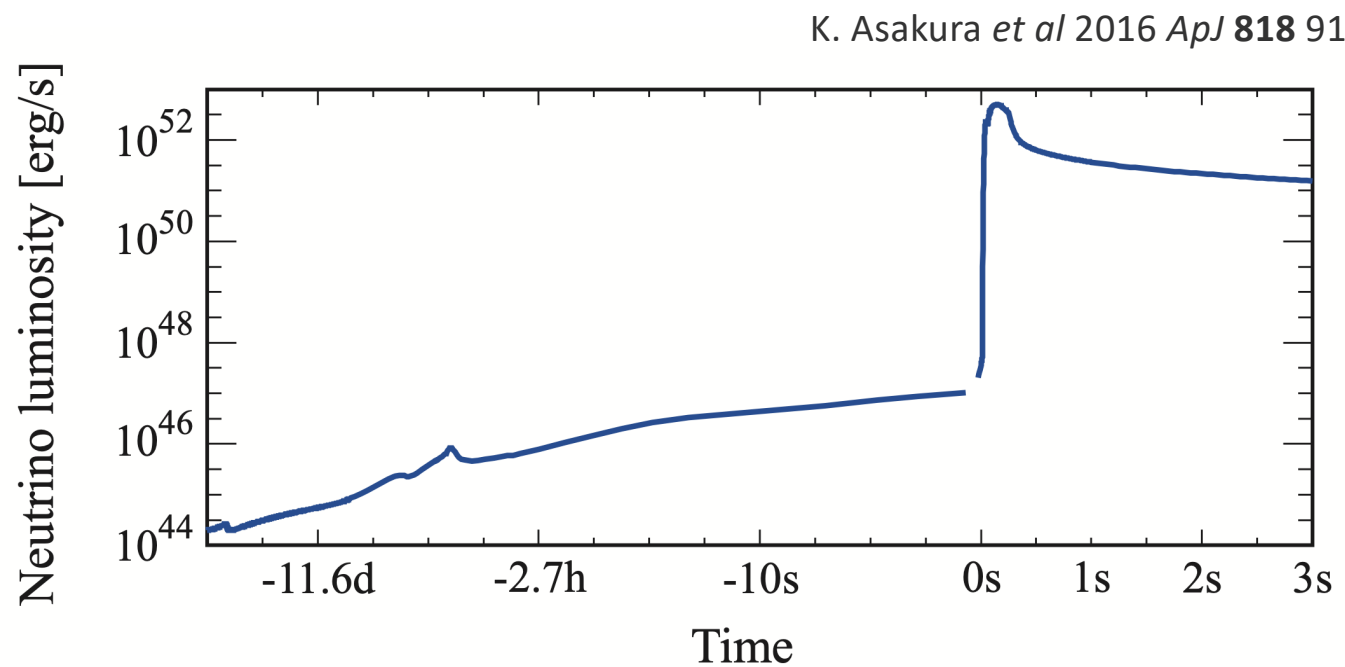
KamLAND-Zen 1月に終了
回収したXeの蒸留中 (6/28スタート)
LSの抜き出し (10月~2025年1月)



fiscal year	2023	2024	2025	2026	2027	
Preparation of work						
LS extraction						
Dismantling detector						
Chimney / OD work						
Installation of electronics						
PMT / mirror installation						
Balloon installation						
LS installation						
DAQ start						

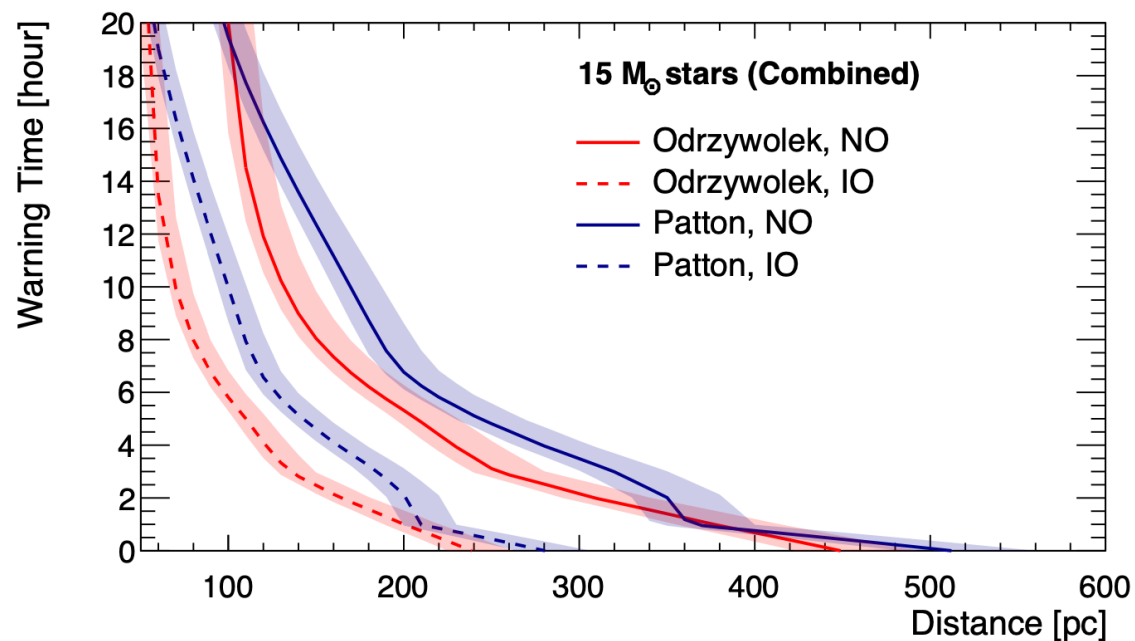
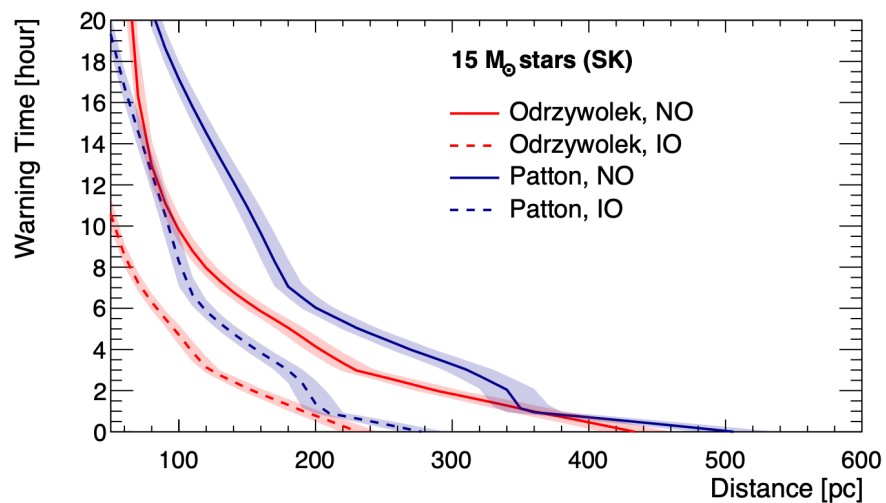
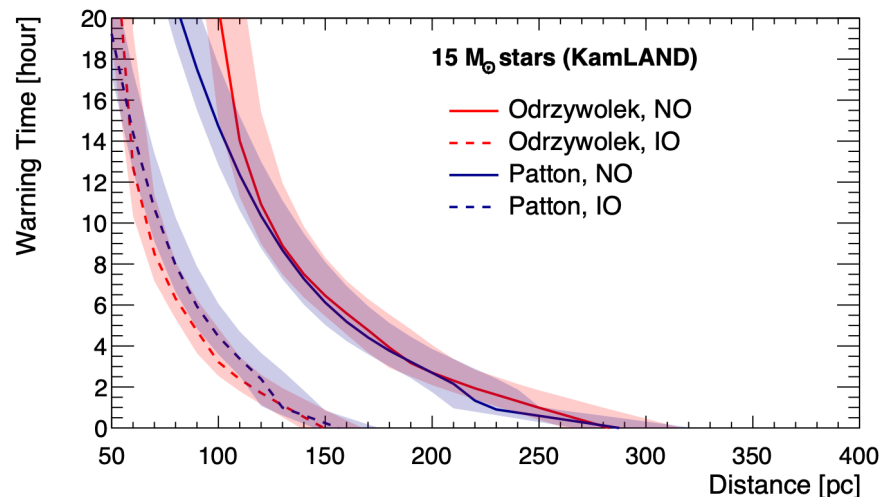
暫定版

天体 ν 研究 (前兆 ν アラーム)



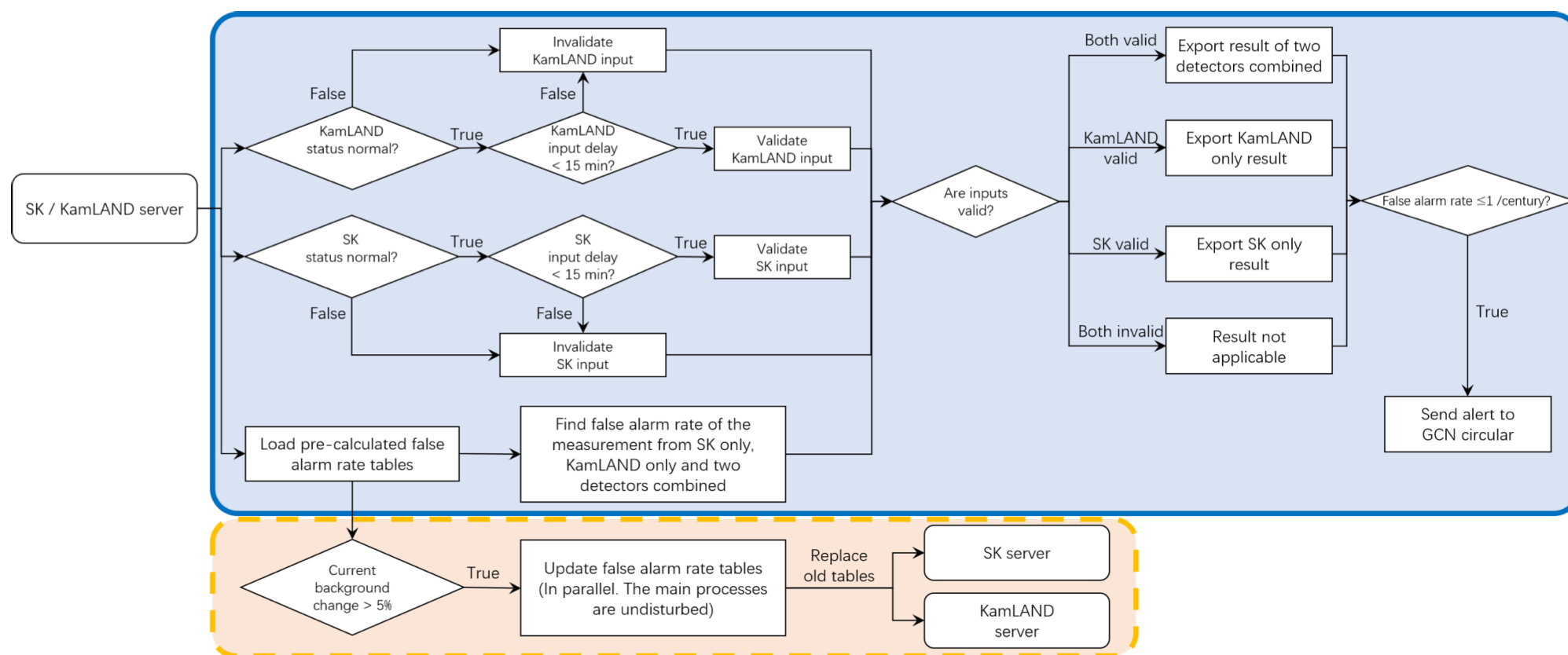
天体 ν 研究 (前兆 ν アラーム)

arXiv:2404.09920



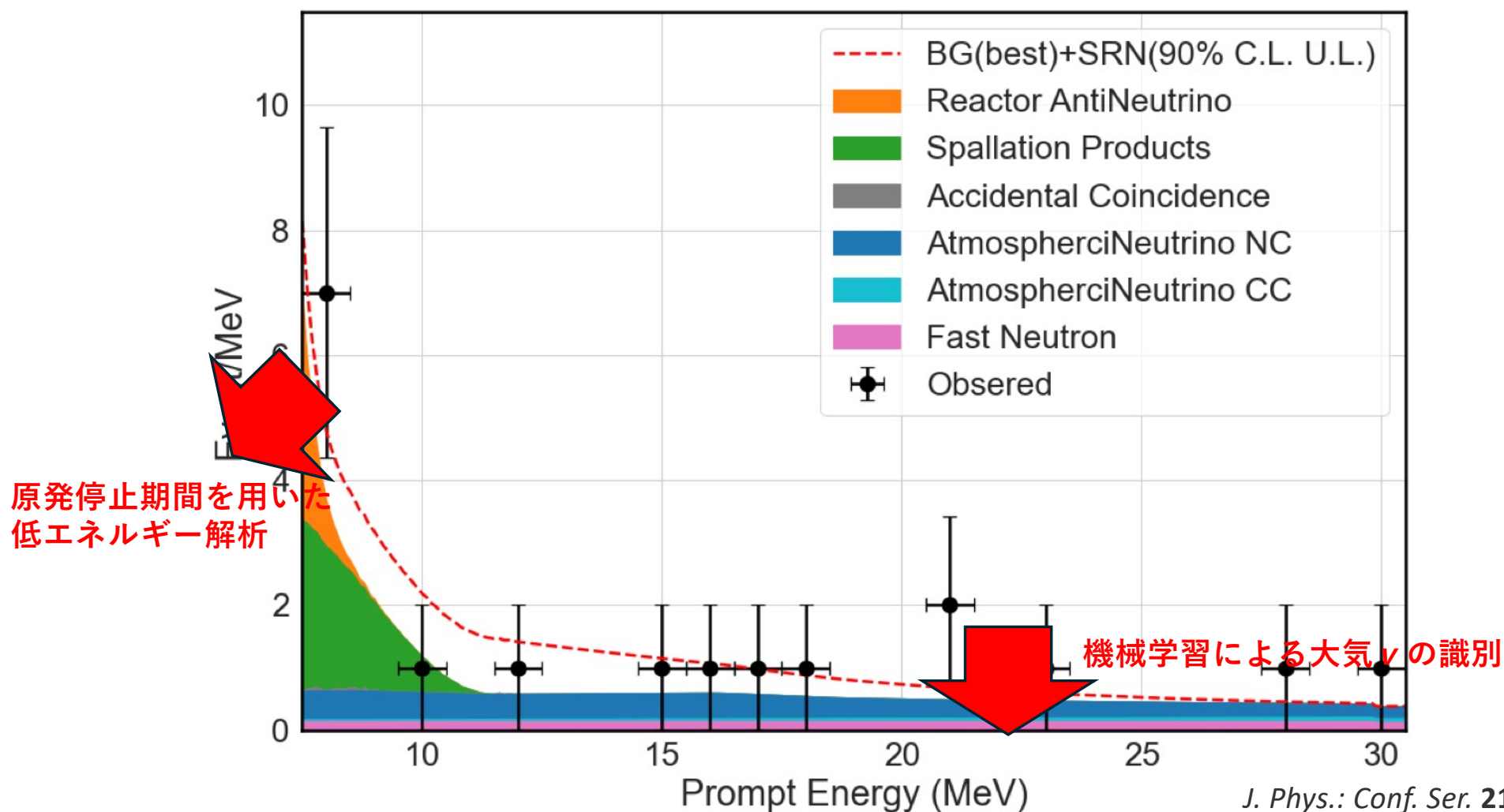
KLとSKの良いところり

天体 ν 研究 (前兆 ν アラーム)

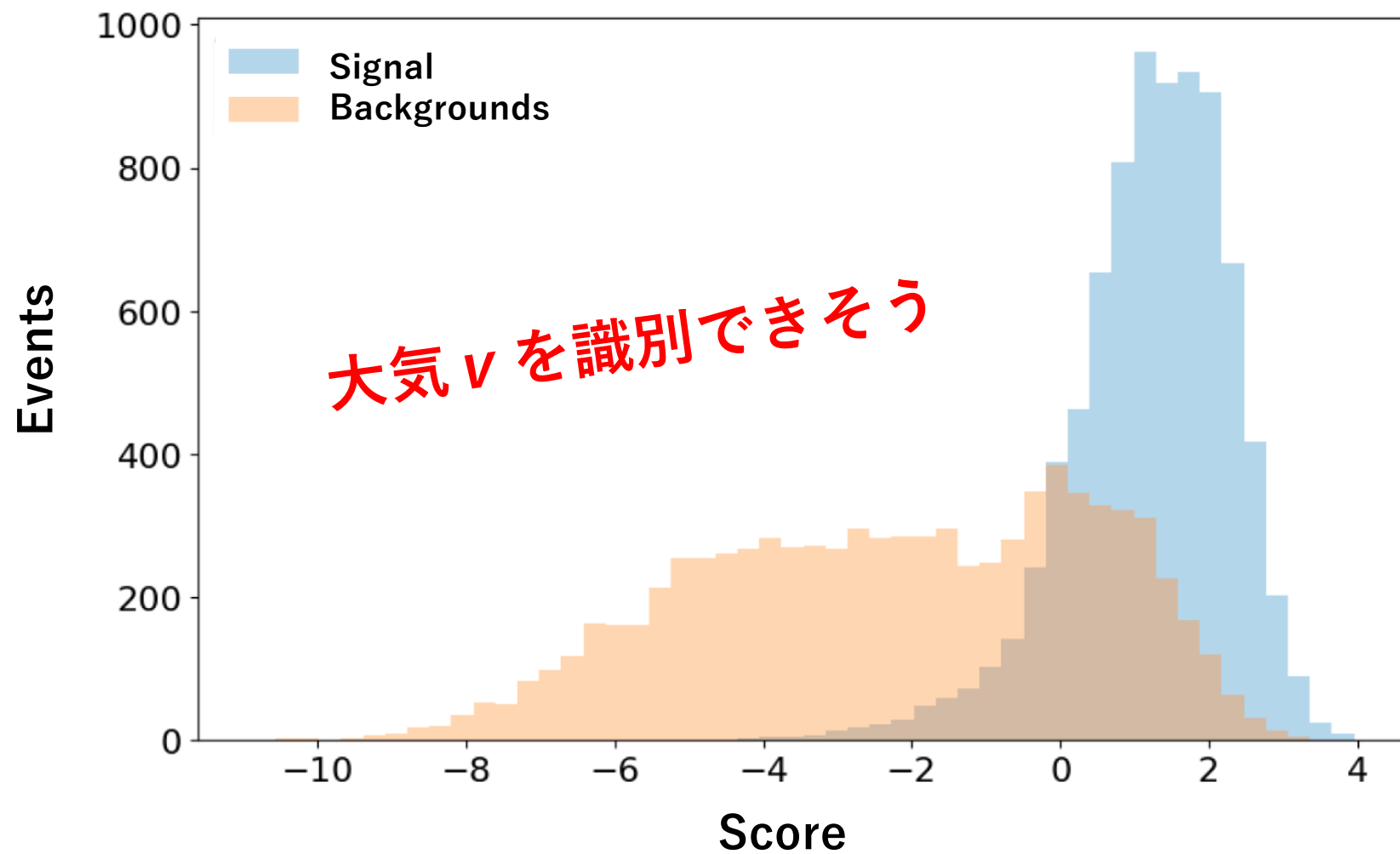


2023年5月からシステムは安定稼働 (7/2 論文アクセプト)

天体 ν 研究 (超新星背景 ν)



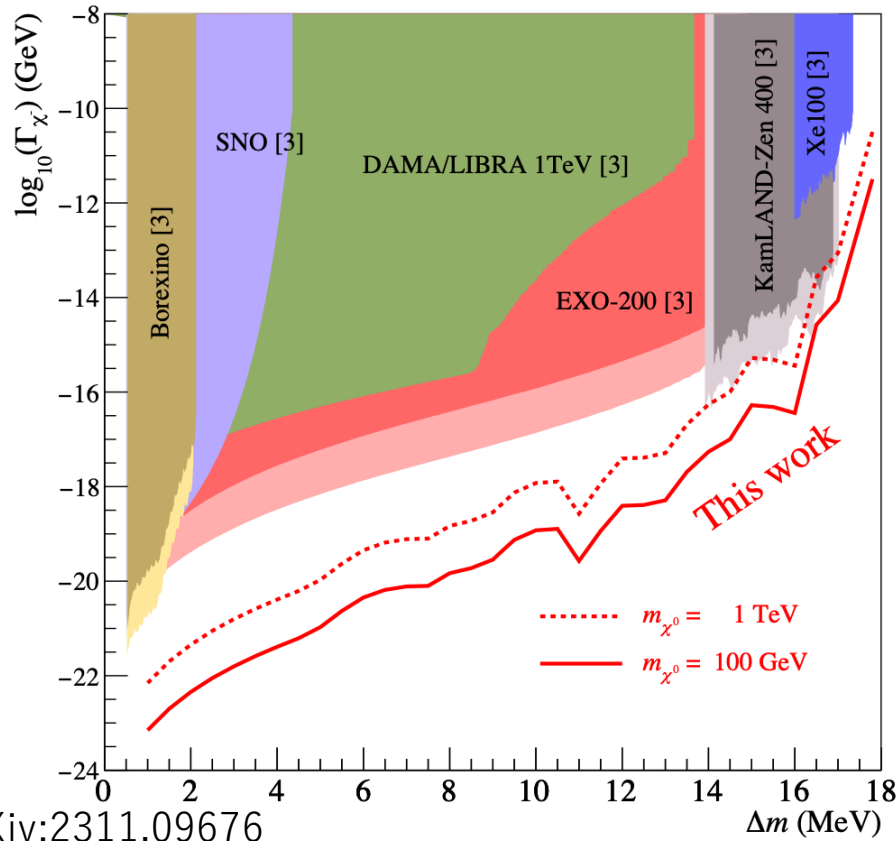
天体 ν 研究 (超新星背景 ν)



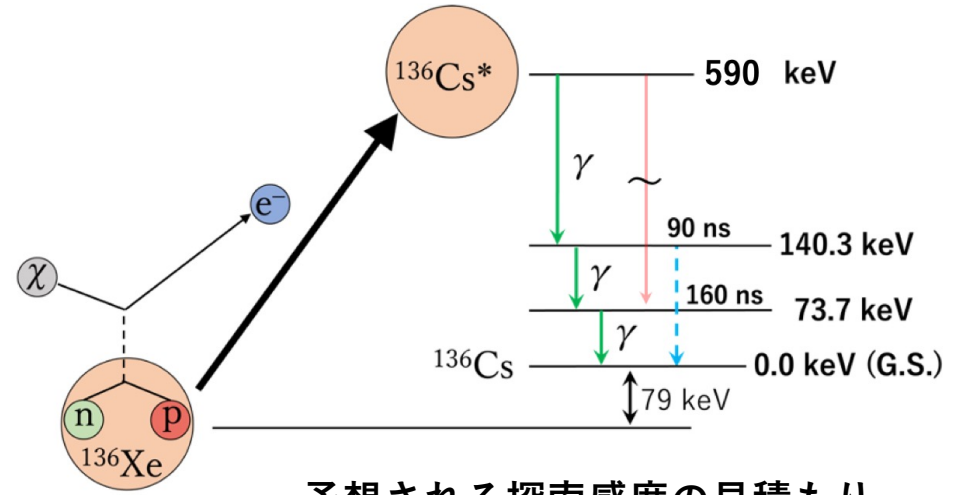
DM研究

Case A : $N_Z + \chi^0 \rightarrow (N_Z \chi^-) + e^+$,

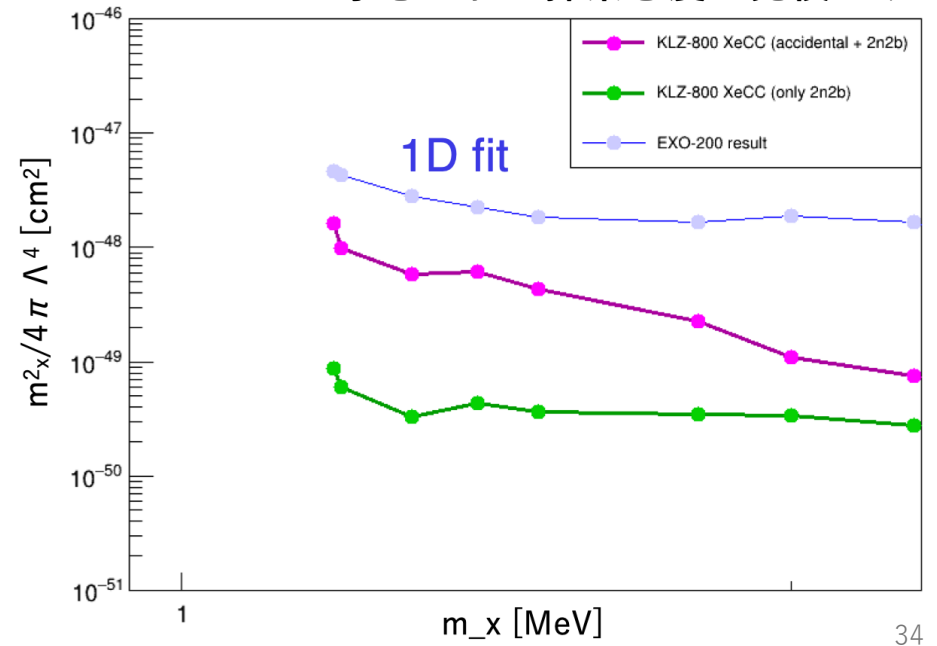
Case B : $N_Z + \chi^0 \rightarrow (N_{Z+1} \chi^-),$



arXiv:2311.09676



予想される探索感度の見積もり



まとめ

高感度 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

機械学習を長寿命の ^{136}Xe 破碎生成物の除去へ組み込む

次期 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の準備

KamLAND-Zenの解体, (光量増加), 中性子検出率向上, 低放射能技術開発

天体および地球 ν の高度化

機械学習を ν 解析へ組み込む

DMの研究

KamLAND/KamLAND-Zenの特徴を活かした独自のDM探索