

A night sky with a sunset glow on the horizon. The sky is dark blue with scattered clouds. The horizon is a bright orange and yellow line. In the foreground, a hot air balloon is being inflated, with its basket and ropes visible. To the right, there is a structure with lights, possibly a launch pad or observation tower.

SMILE

高田 淳史 (京大理)

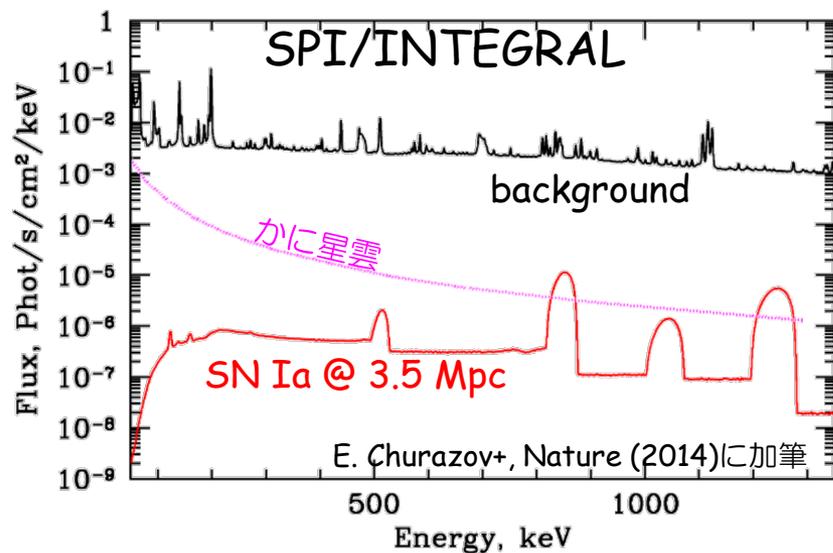
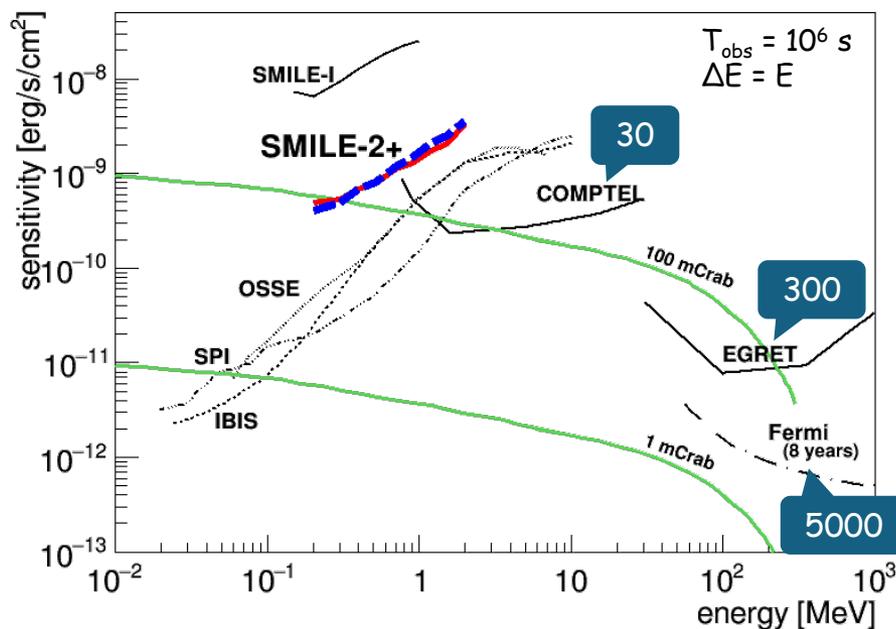
MeVガンマ線天文学とその現状

▶ ラインガンマ線

- 短寿命な放射性同位体
 $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$, ^{44}Ti
⇒ 元素合成の現場
- $\sim 10^6$ 年な放射性同位体
 ^{26}Al , ^{60}Fe
⇒ 元素の拡散の様子
- 電子陽電子対消滅線
- $^{12}\text{C}^*$, $^{16}\text{O}^*$ の脱励起線
⇒ 低エネルギー宇宙線

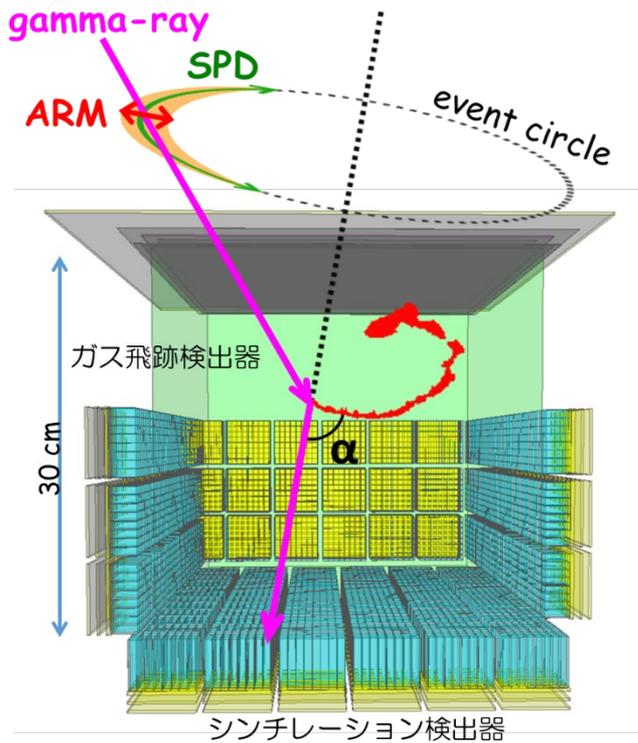
▶ 連続成分

- シンクロトロン + 逆コンプトン
- π^0 -decay
⇒ 粒子加速
- Hawking放射 ($\sim 10^{16-17}$ g)
- 暗黒物質の対消滅
⇒ 新物理の探索



感度向上には大幅なS/N改善が必須

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)

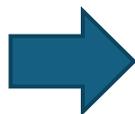


▶ ガス飛跡検出器

反跳電子の飛跡とエネルギー

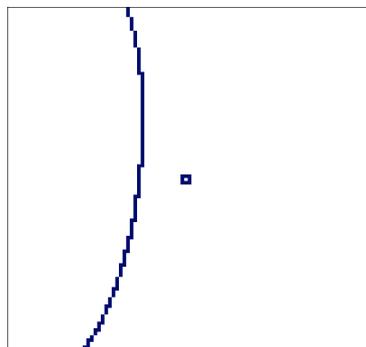
▶ ピクセルシンチレータアレイ

散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー

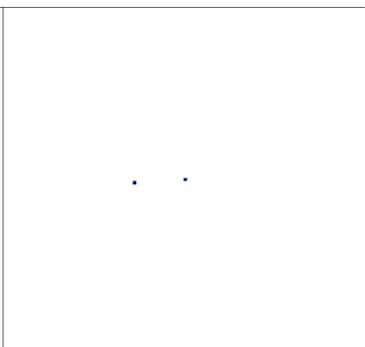


運動量保存則により検出事象毎に入射ガンマ線を完全に再構成

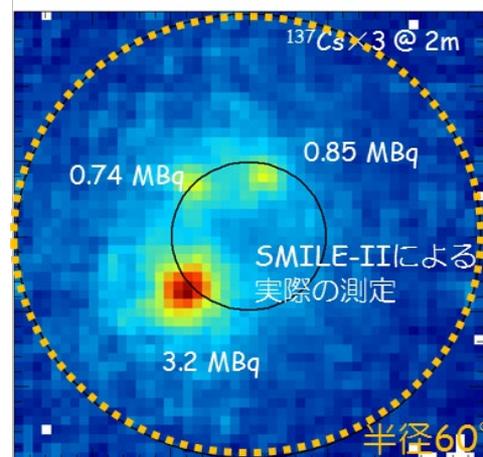
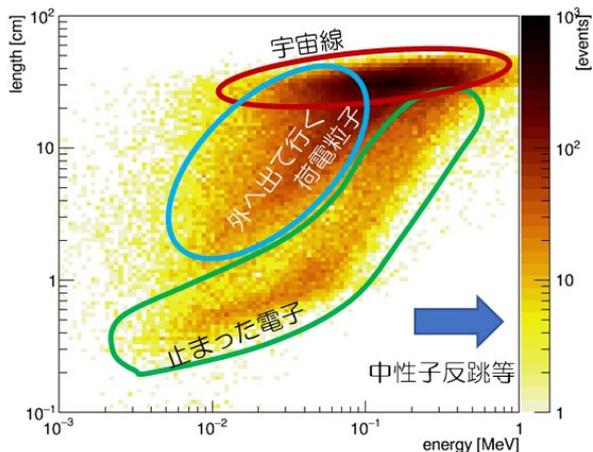
- 到来方向は天球上の一点に
⇒ 観測領域外のガンマ線は排除
ON-OFF観測が可能に
- α 角による運動学テスト + dE/dx による粒子識別
⇒ ガンマ線以外の雑音除去



従来Compton
ARM 5度



ETCC
ARM 5度, SPD 120度





Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

2000

- SMILE-I:** (2006, 三陸, 4時間)
- ETCCの初フライト
 - MeVガンマ線背景放射と大気ガンマ線を検出 [Takada+, 2011, ApJ]

2010

- SMILE-2+:** (2018, Alice Springs, 26時間)
- 2回目の気球実験
 - **天体初検出** [Takada+, 2022, ApJ]
 - 気球高度における雑音事象の詳細調査 [Ikeda+, 2023, PRD]
 - **背景放射観測**

2020



Now

- SMILE-3:**
- 科学観測
 - 複数回の気球実験を予定

2030

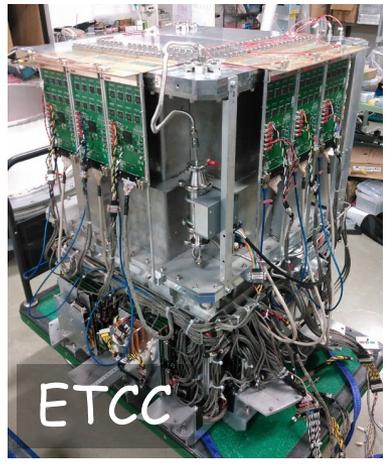
ETCC衛星へ

SMILE Collaboration



SMILE-2+

Apr. 7th, 2018 @ Alice Springs (Launched at 6:24 AM)



ETCC

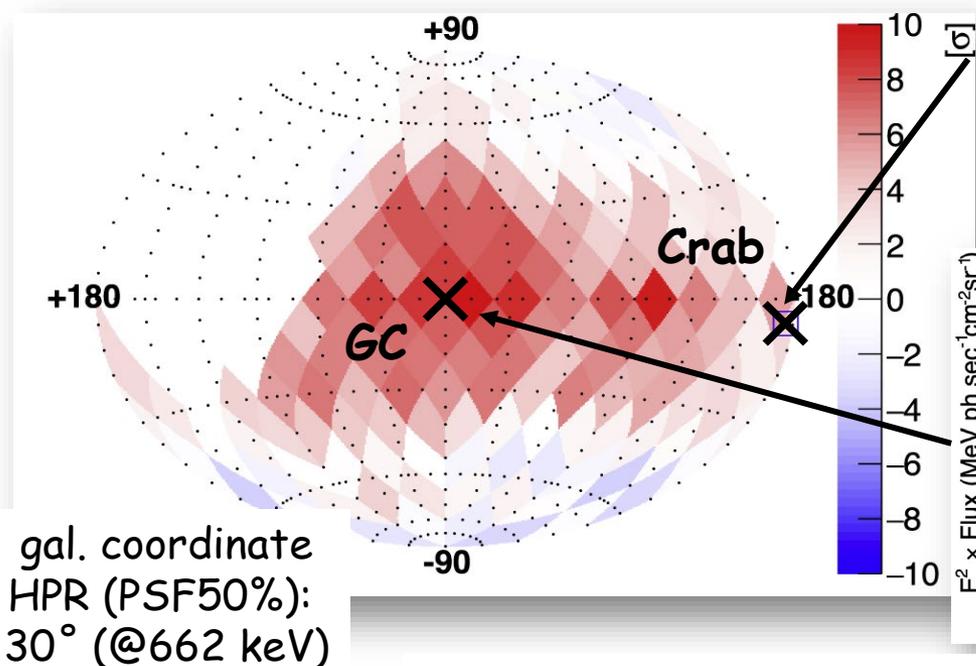
SMILE-2+ Highlights

First detection of celestial objects using ETCC

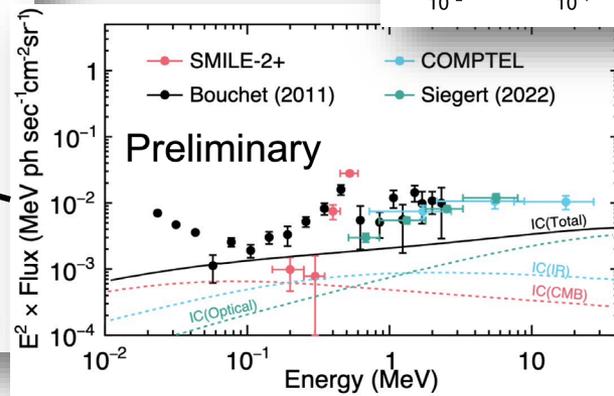
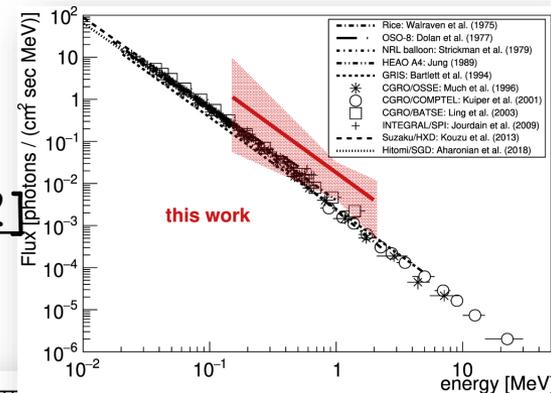
Crab Nebula [4.0σ ; Takada+2022, ApJ],
Galactic Center (Total $\sim 10\sigma$ [Tanimori+2020]; Diffuse 4.3σ [Ikeda+2023])

→ **Achieved sensitivity is consistent with the expectation.**
(Successful detector demonstration)

Gamma-ray skymap (0.2-2.1 MeV)



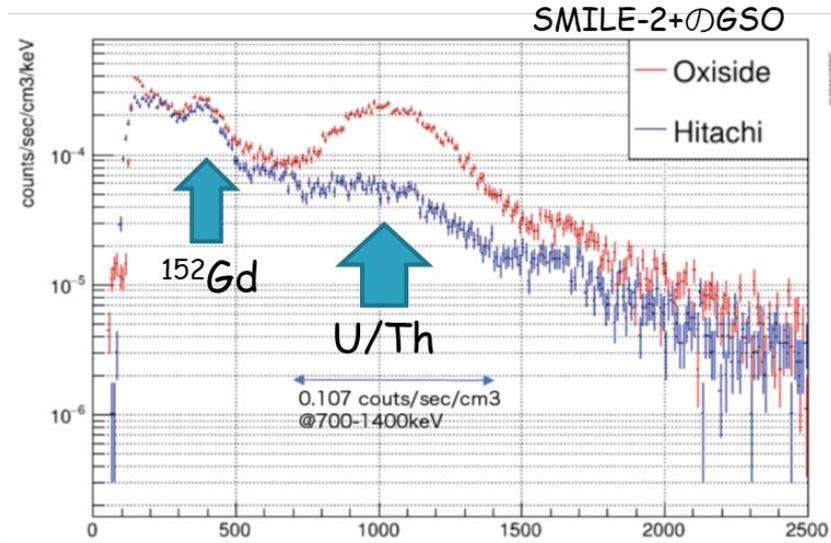
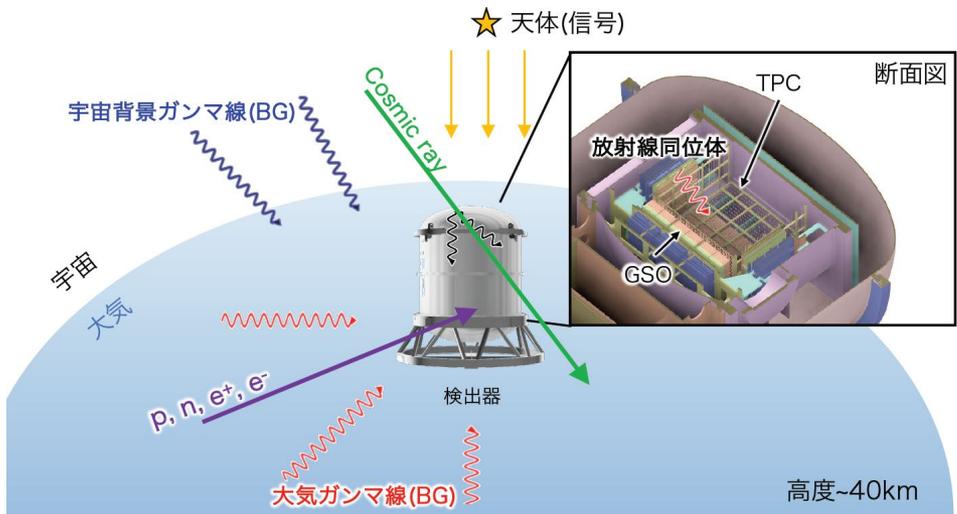
Crab Nebula
[Takada+2022]



Gal. Diffuse
[Ikeda+2023]

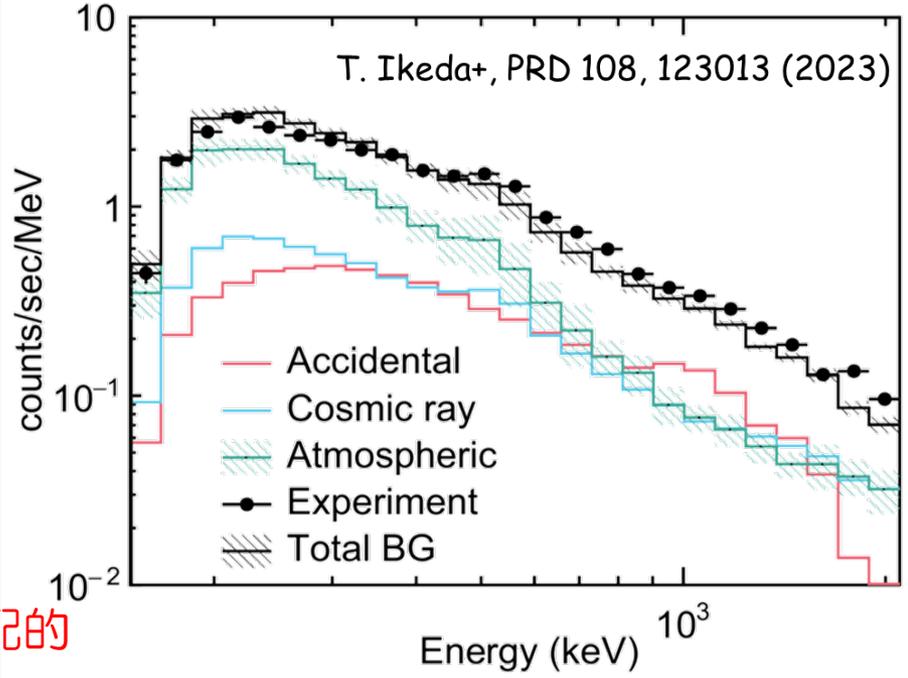
The energy spectra are consistent with previous studies.

SMILE-2+の背景事象



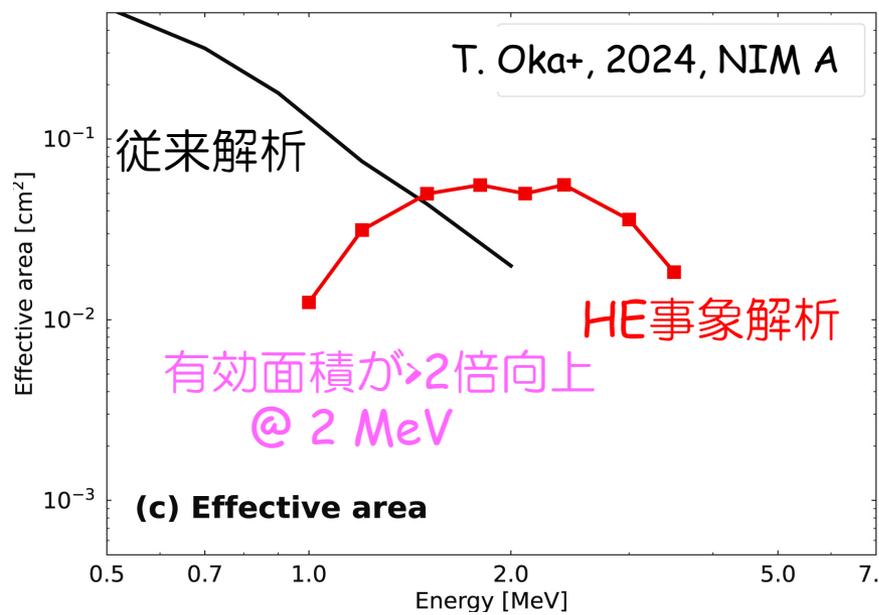
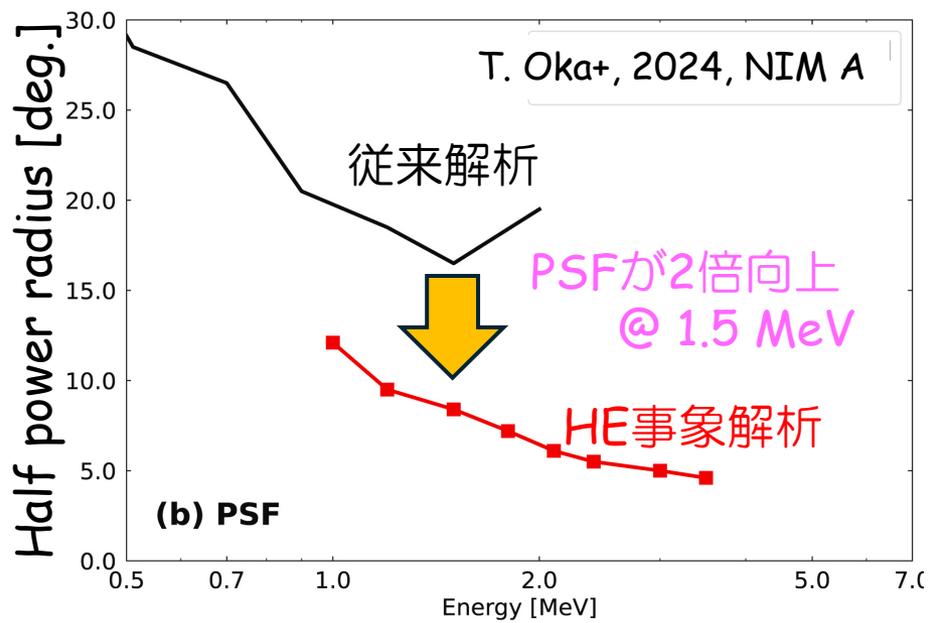
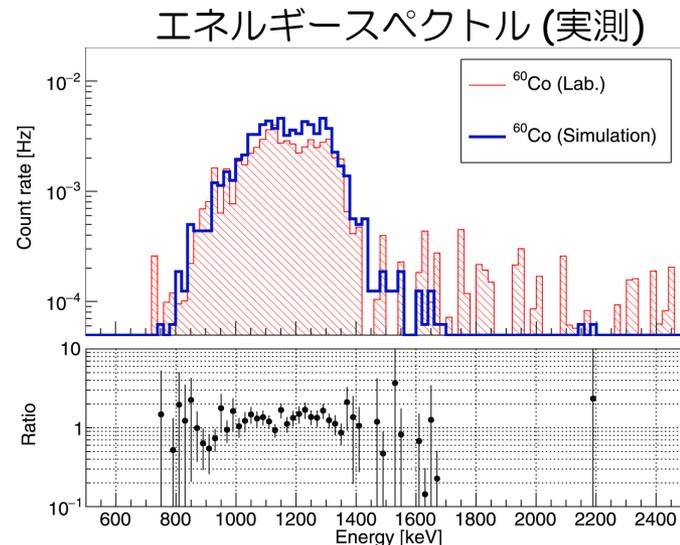
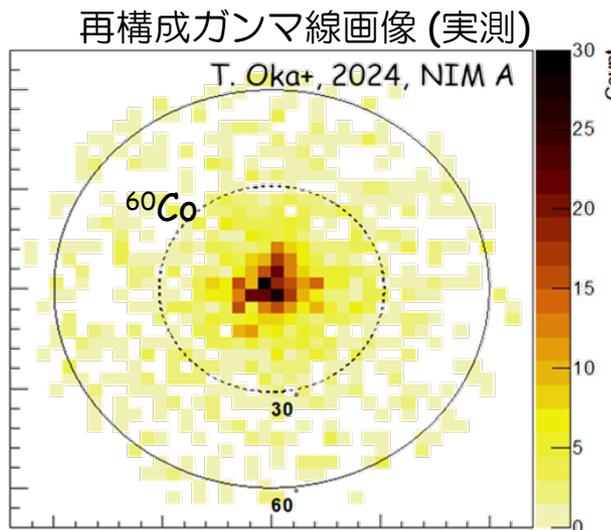
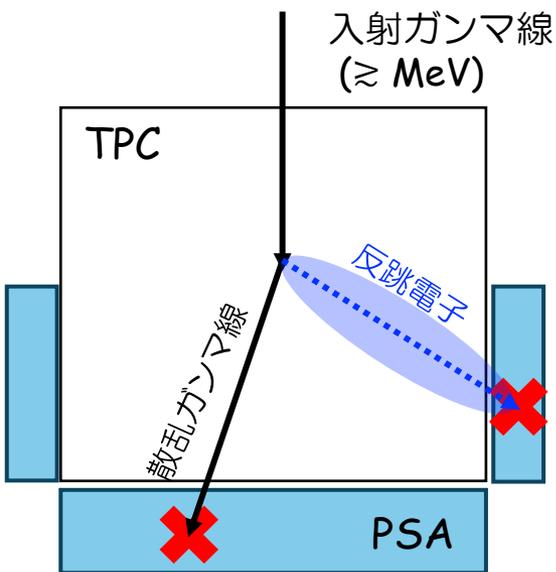
気球高度における背景事象

- 大気ガンマ線
 - ⇒ 宇宙線と地球大気の相互作用
- 装置由来の雑音
 - ⇒ 宇宙線と装置の相互作用
- 内在放射性同位体
 - ⇒ GSO内部のU/Th系からの α 線と大気ガンマ線が偶発同時計数

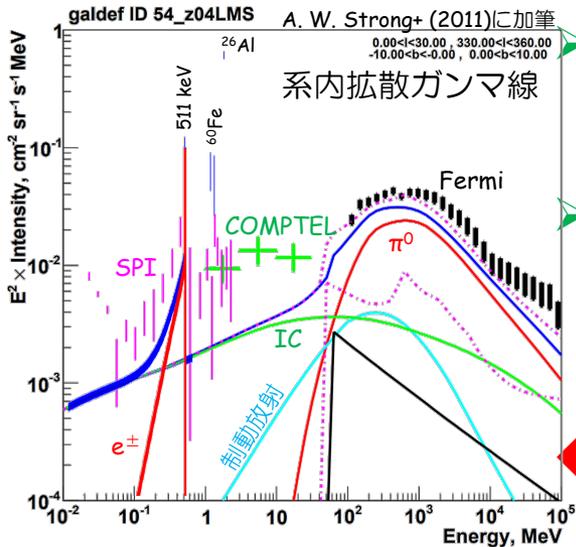


低エネルギー側では大気ガンマ線が支配的
 ~1 MeV付近では内在RI由来の偶発事象が支配的

高エネルギー事象の再構成手法の開発



銀河系内拡散ガンマ線とその起源



MeV帯域での連続成分

- ICで期待されるよりも強い
- MeVに特徴的な放射の存在

電子陽電子対消滅線

- 陽電子の起源は不明
- 空間分布モデルは他波長と異なる



暗黒物質

軽いWIMPの対消滅・崩壊
⇒ 電子・陽電子・ガンマ線

原始ブラックホール

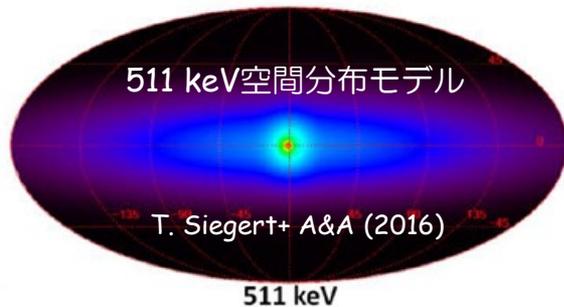
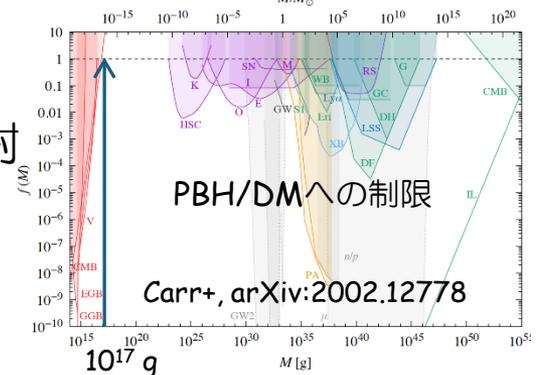
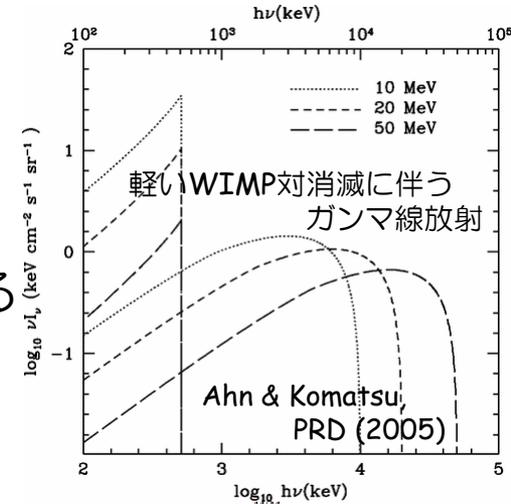
$\sim 10^{17}g \Rightarrow \sim \text{MeV}$ でHawking放射

天体の集合

MeV放射を持つ天体種族は不明

宇宙線と星間物質との相互作用

計算ではICよりも暗いはず



MeVガンマ線の空間分布は？

DMの対消滅
PBH, DMの崩壊
天体, CR-ISM

\propto 密度の二乗
 \propto 密度
銀河面に集中

他の銀河でも
同様はず

系外拡散ガンマ線の起源は？

AGN (Seyfert or FSRQ)
遠方のIa型SNe
DM, PBH (近傍, 重い銀河)

SMILE-2+からSMILE-3へ

SMILE-2+からの改良

Method

有効面積

×5

TPCガス (2気圧 Ar → 3気圧 CF₄)
& TPC容器の曝露

エネルギー
分解能

×1.5

光読み出し回路の改良
PMT ($\Delta E/E \sim 12\%$) → SiPM (<8%),
機械学習に基づく飛跡解析

角度分解能

×3

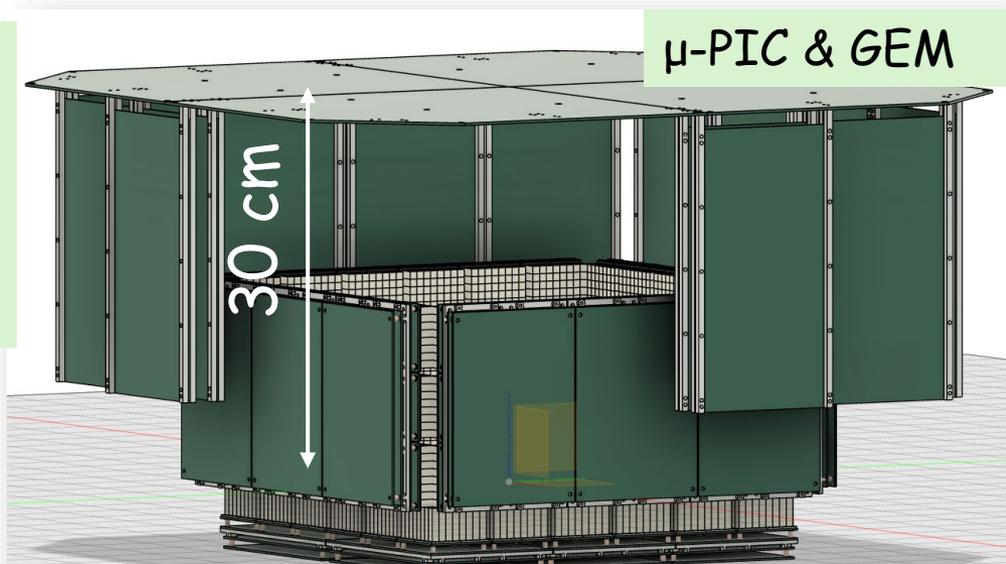
T. Ikeda+, 2021, PTEP

エネルギー
帯域

0.2 - 10 MeV
(SMILE-2+: 0.2 - 2 MeV)

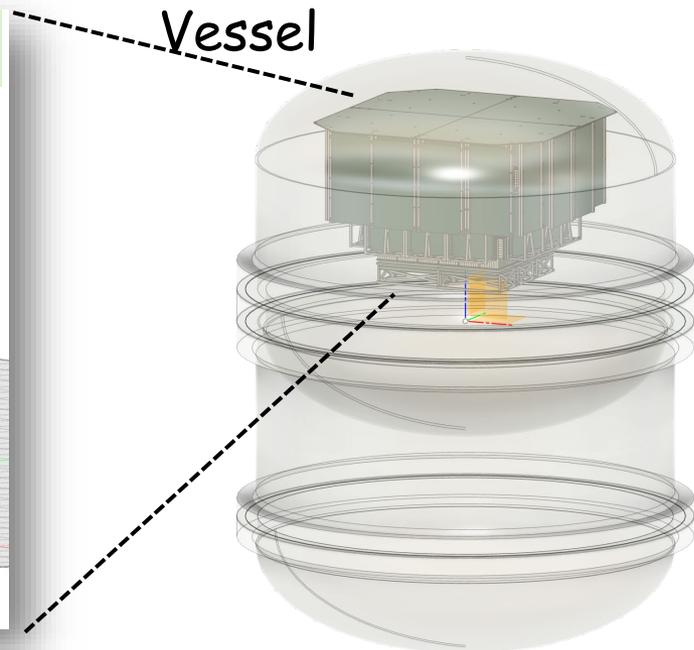
光読み出し回路のダイナミックレンジ拡大
& 高エネルギー事象解析

TPC readout



Pixel Scintillator Array

Vessel



FY2023

要素開発

FY2024

ETCC設計

FY2025

ゴンドラ
準備

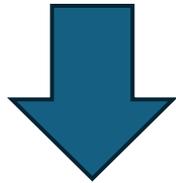
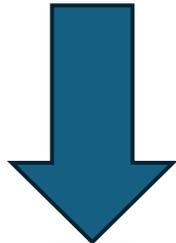
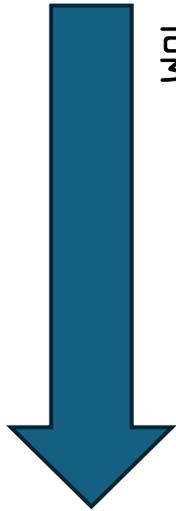
組立
+ 性能評価

FY2026

環境試験
かみ合わせ

FY2027

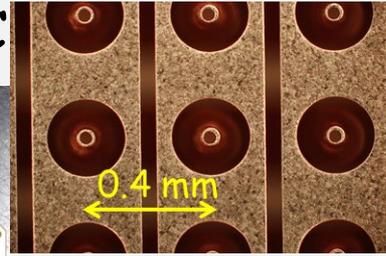
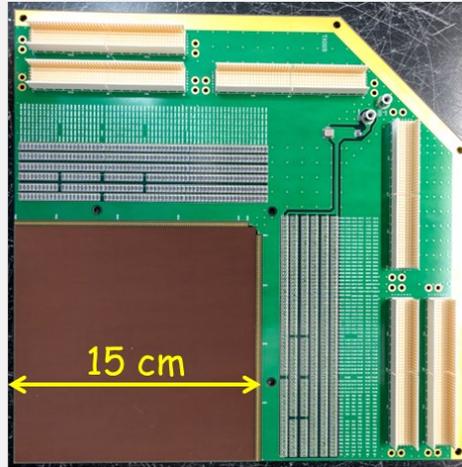
気球実験 @ オーストラリア



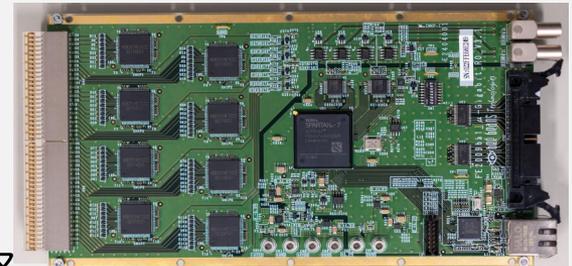
FY2023

要素開発

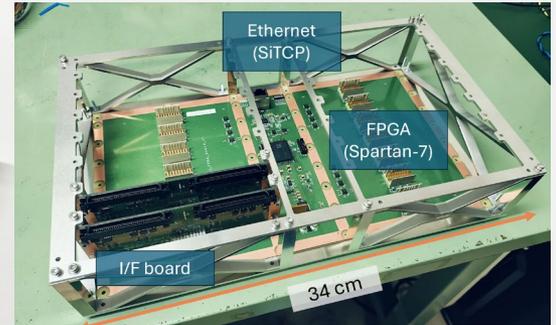
15 cm角TGV μ -PIC



飛跡検出器encoder



MPPC光読み出し回路



トリガー制御回路

FY2024

ETCC

FY2025

ゴンドラ
準備

組
+

FY2026

環境試験
かみ合わせ

FY2027

気球実験 @ オーストラリア

FY2023

要素開発

FY2024

ETCC

FY2025

ゴンドラ
準備

組
+

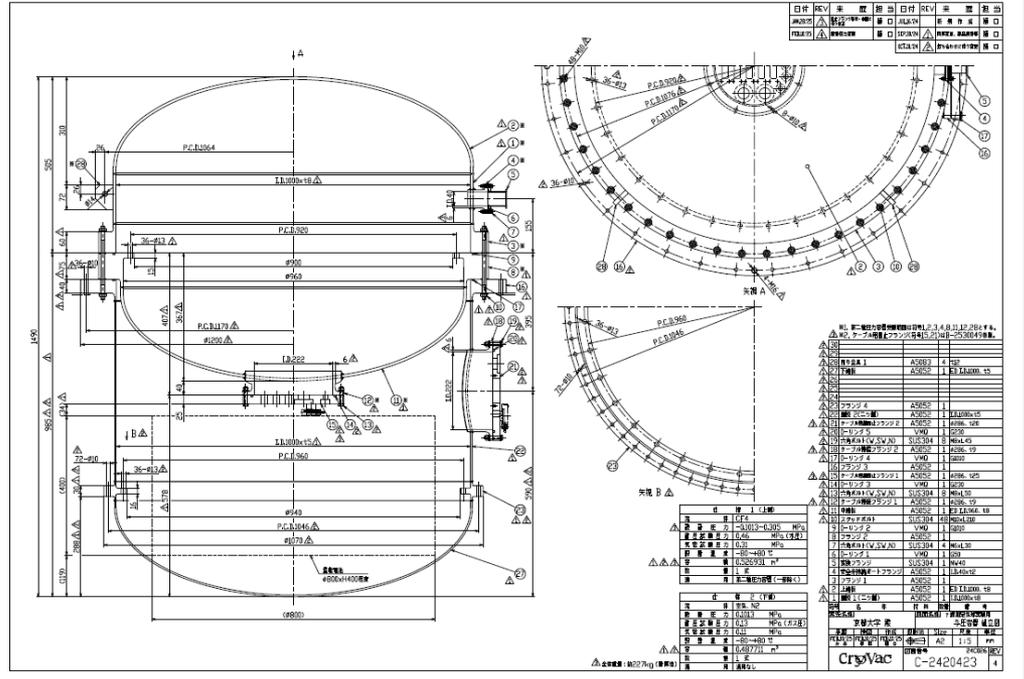
FY2026

環境試験
かみ合わせ

FY2027

気球実験 @ オーストラリア

圧力容器 (3/18 納品予定)



FY2023

要素開発

FY2024

ETCC設計

FY2025

ゴンドラ
準備

組立
+ 性能評価

スターカメラ
ピギーバック試験@大樹

FY2026

環境試験
かみ合わせ

FY2027

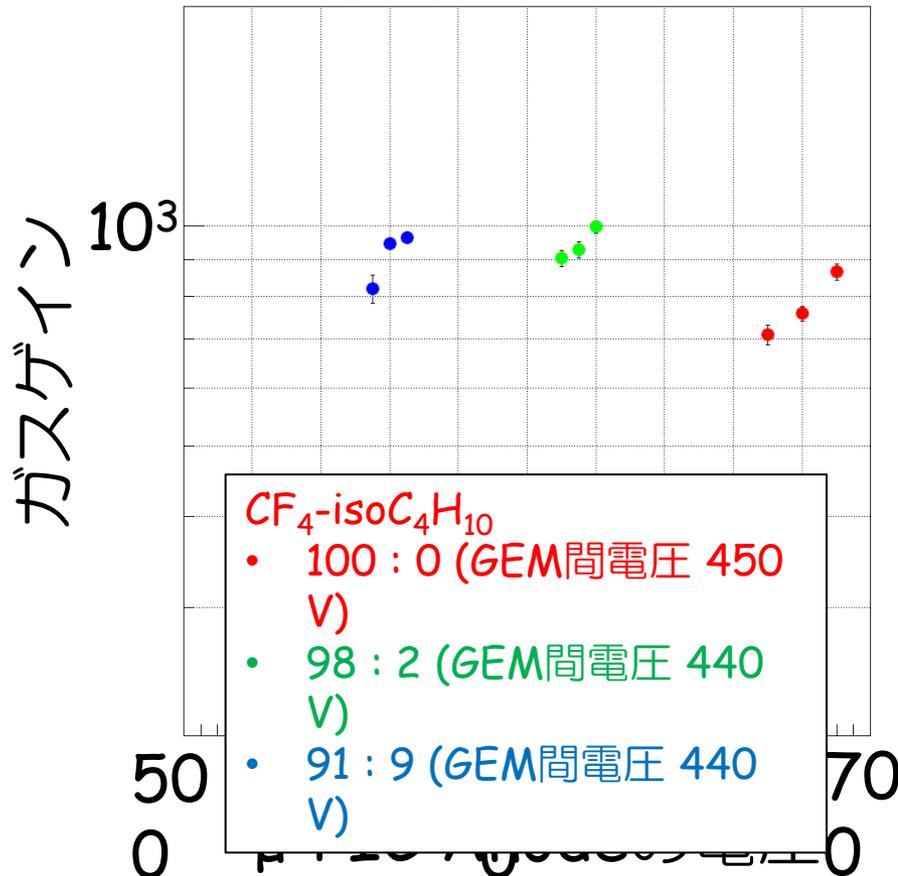
気球実験 @ オーストラリア

ガス飛跡検出器内部のガス探索

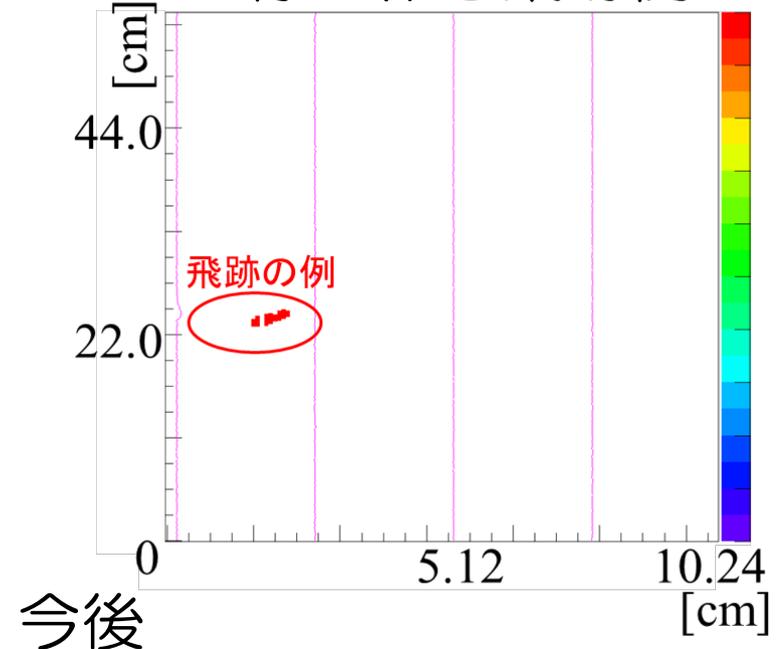
ガス探索の現状

- α 線源を使用 $\Rightarrow dE/dx$ 大=低ゲインで測定 (検出器を壊さないように)
- $CF_4 + iso-C_4H_{10}$ を混合 \Rightarrow ペニング効果によるゲイン増加を期待
- CF_4 に数%の $iso-C_4H_{10}$ を添加 \Rightarrow ゲインの増加を確認

ゲインカーブ



α 線の作る飛跡例



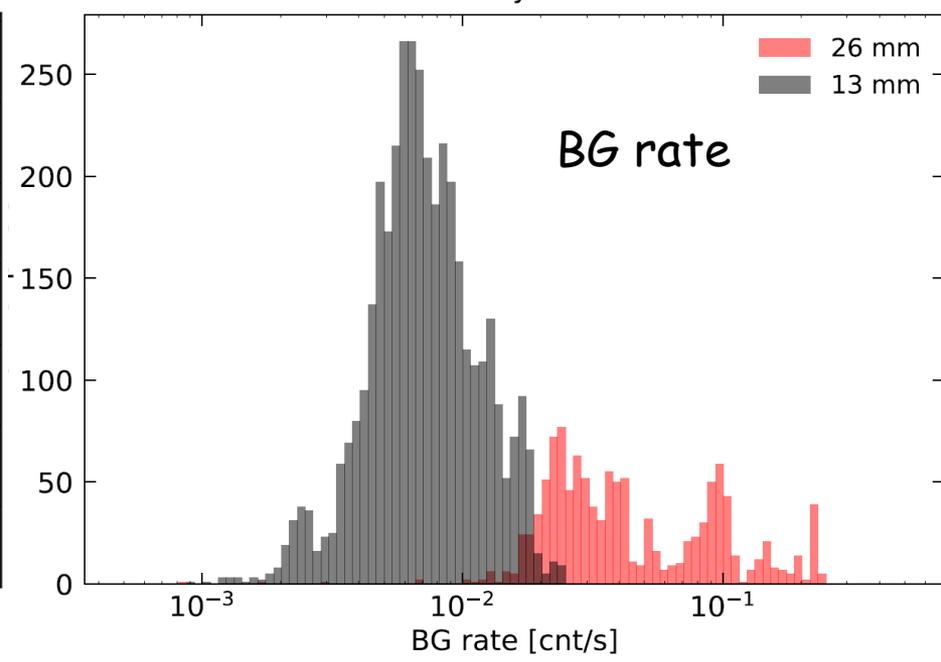
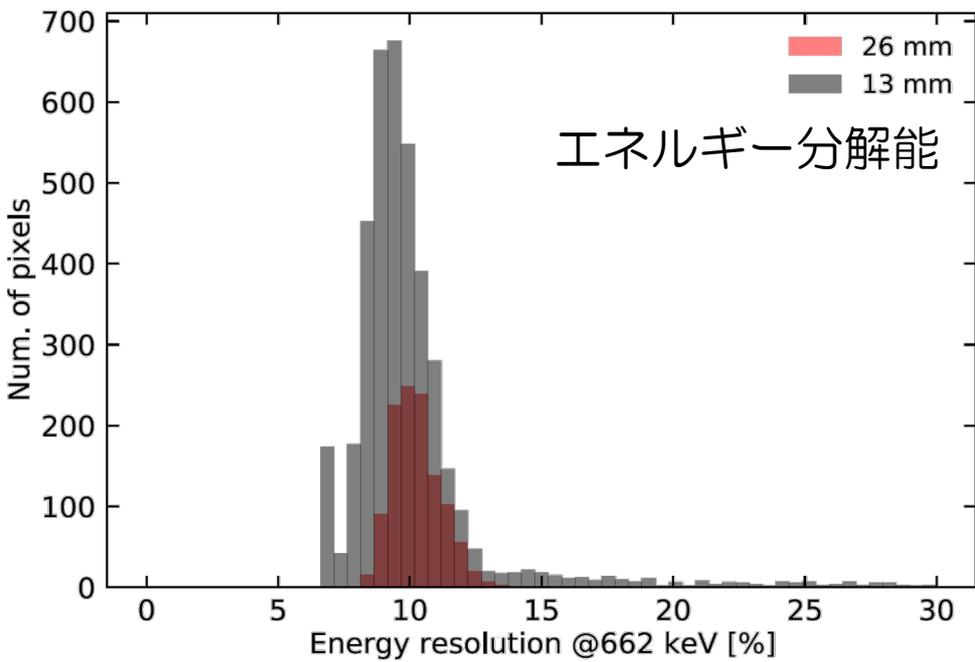
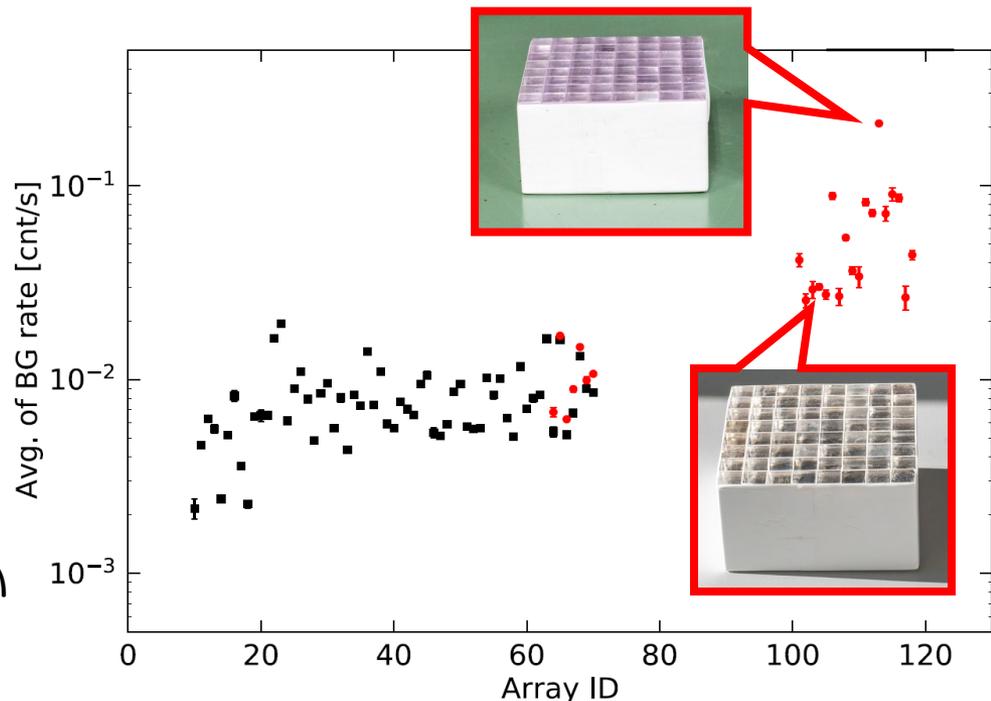
- Xe添加の試験
- MIPを用いてゲイン測定
- \Rightarrow 使用ガスを決定

GSO BG測定

98%のGSOアレイは再処理済

13 mm厚 70アレイ (97%) を測定済
26 mm厚 18アレイ (50%)

- ◆ エネルギー分解能
大きく外れているものは少ない
13 mmと26 mmで違いは無い
- ◆ BG rate
体積比以上に26 mm厚がうるさい
赤みのあるピクセル？



まとめ

- MeVガンマ線天文学の発展には
雑音事象をいかに減らすかが重要
⇒ 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡は最適
- SMILE-2+の結果：
 - かに星雲を 4σ 、銀河中心領域を $\sim 8\sigma$ で検出 [A. Takada+, ApJ \(2022\)](#)
[T. Ikeda+, ICRC2023](#)
 - 雑音事象のより深い理解 [T. Ikeda+, PRD \(2023\)](#)
 - >1 MeVでの新しい検出方法の確立 [T. Oka+, NIM A \(2024\)](#)
- 次期フライトSMILE-3：
 - 2023-2024年度にかけて要素開発を進行してきた
 - 2025年度からETCCの構築・試験に
 - STTは2025年度にピギーバック試験を予定
 - 2027年度春の豪州気球実験を目指す

Thank you for your attention!
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>

