



SMILE-II+実験概要

高田 淳史 (京都大学)

谷森 達, 水村 好貴, 古村 翔太郎, 岸本 哲朗, 竹村 泰斗, 吉川 慶,
谷口 幹幸, 中村 優太, 小野坂 健, 斎藤 要, 窪 秀利, 黒澤 俊介 (東北大),
身内 賢太郎 (神戸大), 澤野 達也 (金沢大), 濱口 健二 (GSFC)

MeVガンマ線天文学

◆ 元素合成

SNR : 放射性同位体

銀河面 : ^{26}Al ・電子陽電子対消滅線

◆ 粒子加速

ジェット (AGN) :

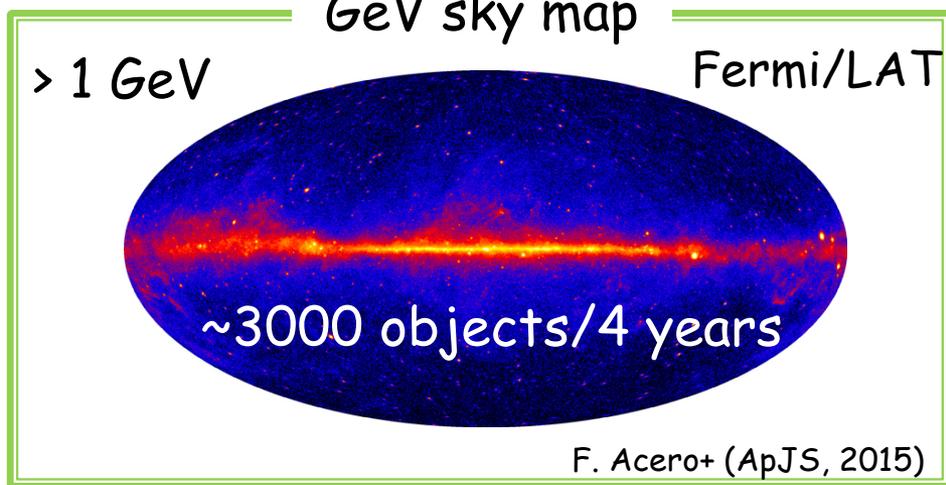
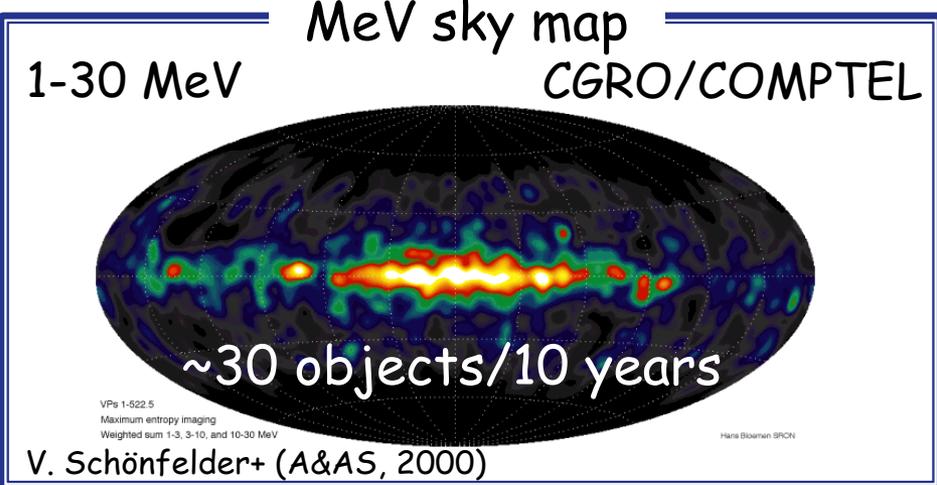
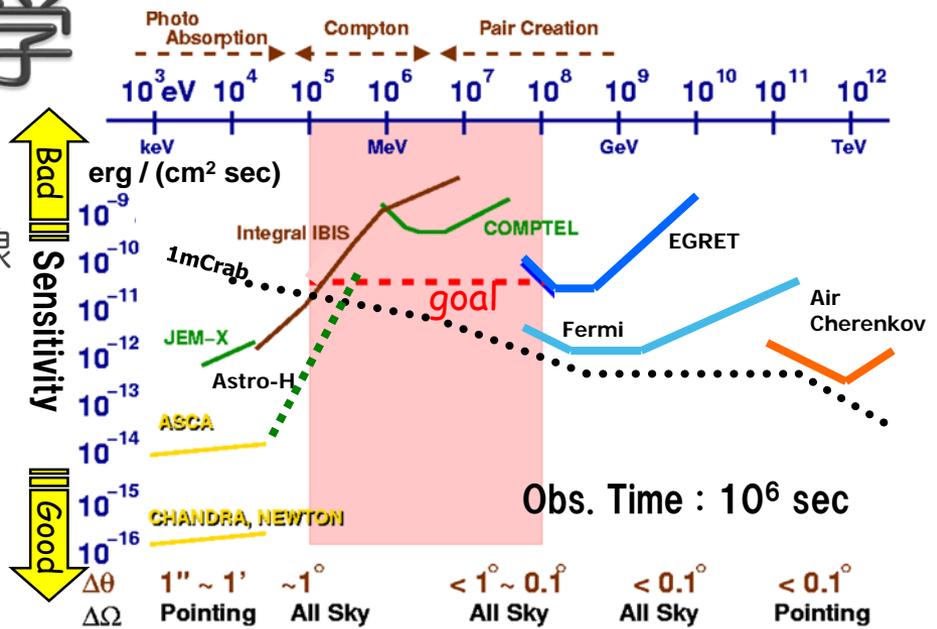
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

ガンマ線パルサー, 太陽フレア



次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

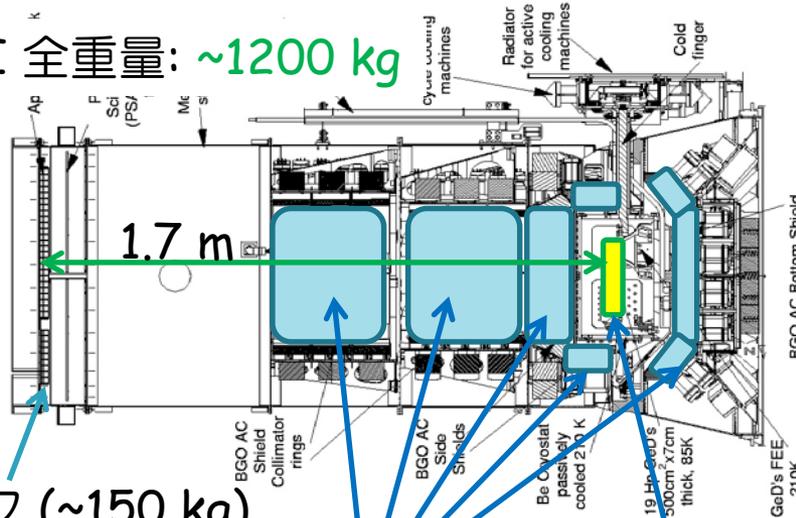
- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為の広い視野
- 高S/Nの鮮明な画像

符号化マスク法の現状

40年ぶりの非常に明るいIa型SNで
30年ぶりの⁵⁶Coの核ガンマ線の検出

SPI (INTEGRAL) G. Vedrenne+, A&A (2003)

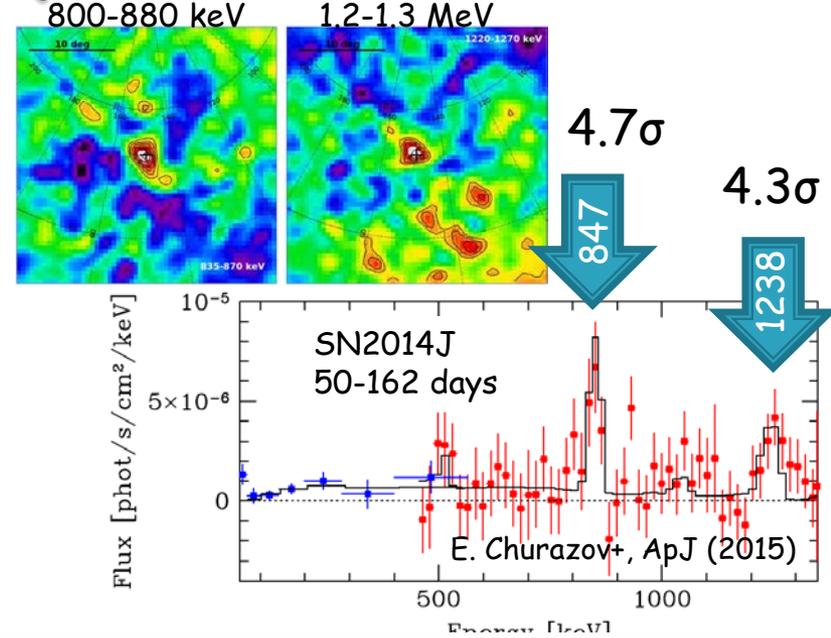
SPI 全重量: ~1200 kg



マスク (~150 kg)
タングステン 3cm厚

Anti用BGO (~500 kg)

Ge (~20 kg)



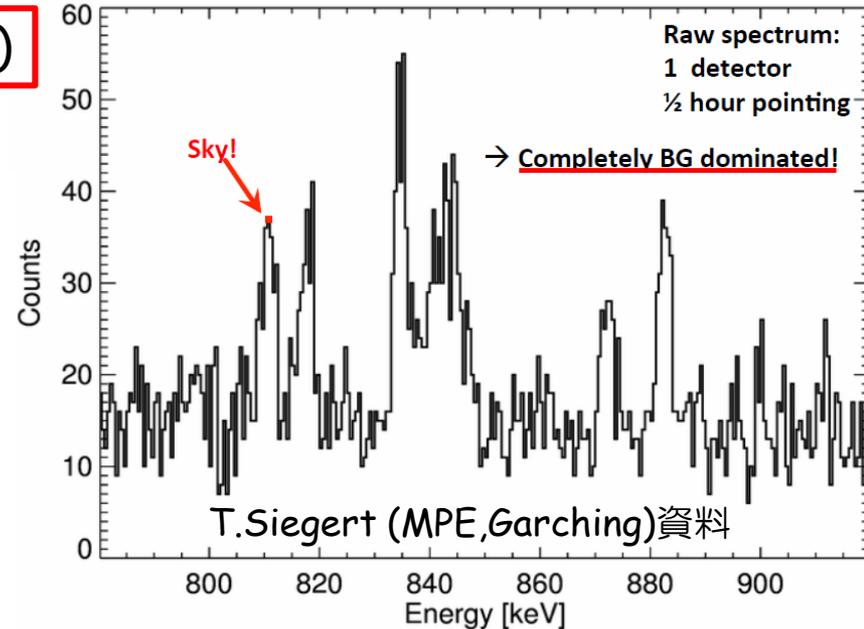
- 検出器質量 ≪ VETO質量
- 検出スペクトルはほぼinstrumental BG
- 多量のNoiseを含む統計数から方向導出

$$\text{Detect} = \text{Response} \times S + B$$

⇒ Sに対して大きな不定性

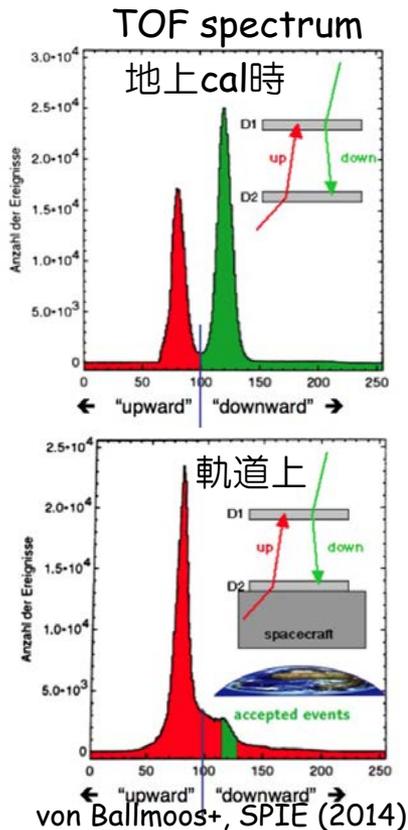
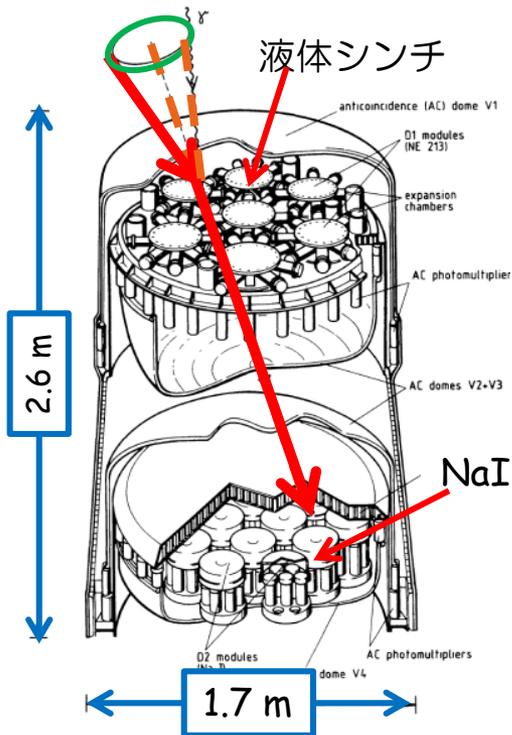
- >600 keVでは4定常天体のみの検出

L. Bouchet+, ApJ (2008)



コンプトンイメージング法の現状

COMPTEL (CGRO)



COMPTEL 有効面積：13~20 cm²

BGの除去努力をするも

予想より~3倍悪い感度に留まる

- 前後の検出器間のTOF
 ↳ 下方からの事象の除去
- 散乱角の制限
 ↳ 中性子事象の除去
- 液体シンチのPSD
 ↳ 荷電粒子事象の除去
- Anti用プラシン
 ↳ 荷電粒子事象の除去

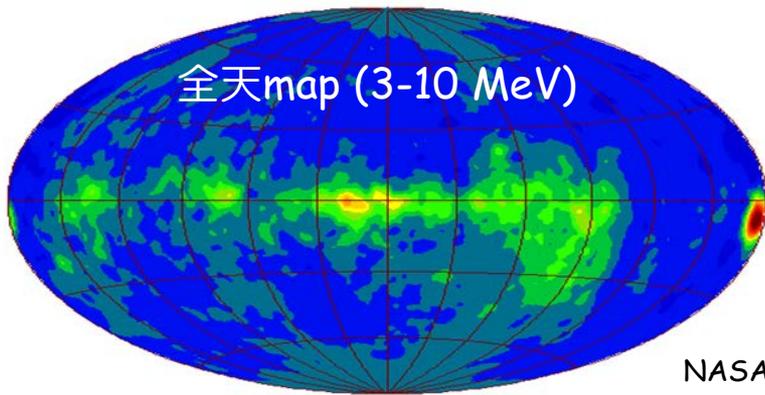
V. Schönfelder, ApJSS (1993)

COMPTELからの7つの提言

V. Schönfelder, New Astron. Rev. (2004)

1. 角度分解能の向上
2. 雑音除去能力が必要
3. 反跳電子の方向を取得
4. 周辺物質の削減
5. 大気ガンマ線を視野外に
6. 低雑音の軌道の選択
7. 散乱体と吸収体の同時

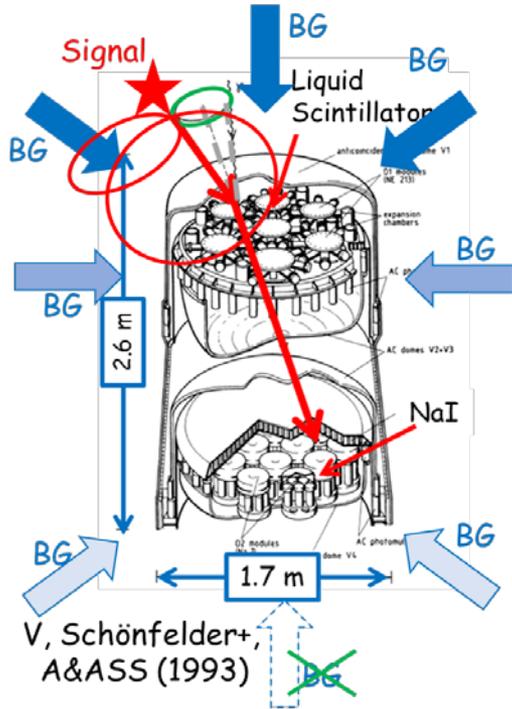
⇒ 『観測領域のノイズを下げる』が重要



NASA

MeVガンマ線観測の現状打開へ

COMPTEL

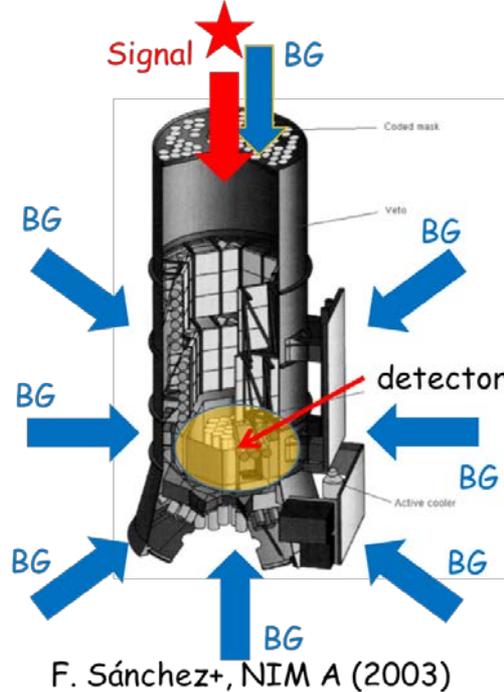


PSF ~ 平均的な散乱角

3σの有意度で検出できる最小flux

$$\text{検出感度} = 3 \times \sqrt{\frac{f_B \Delta\Omega \Delta E}{AT}}$$

SPI/INTEGRAL



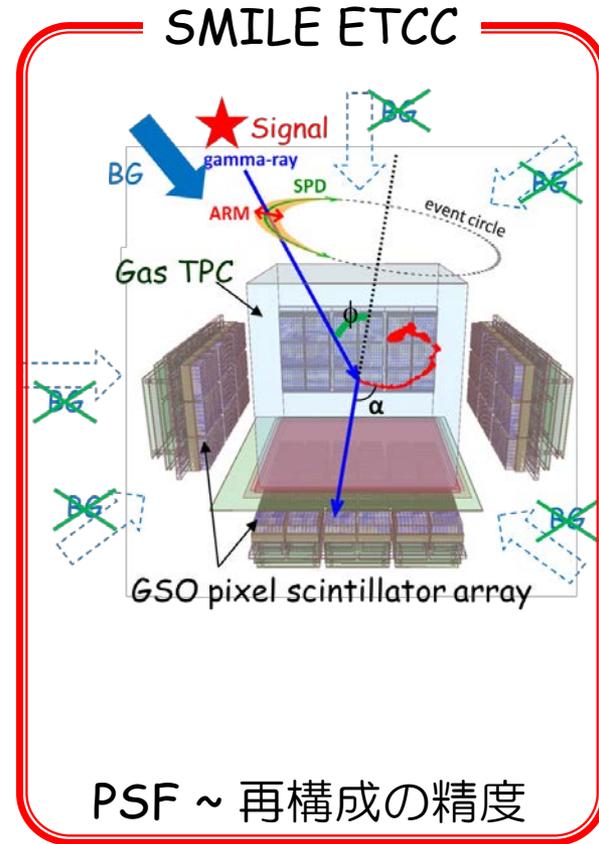
BGを含む統計量で方向検出

f_B : 雑音量 A : 有効面積 $\Delta\Omega$: PSF

シミュレーション・計算で算出可能

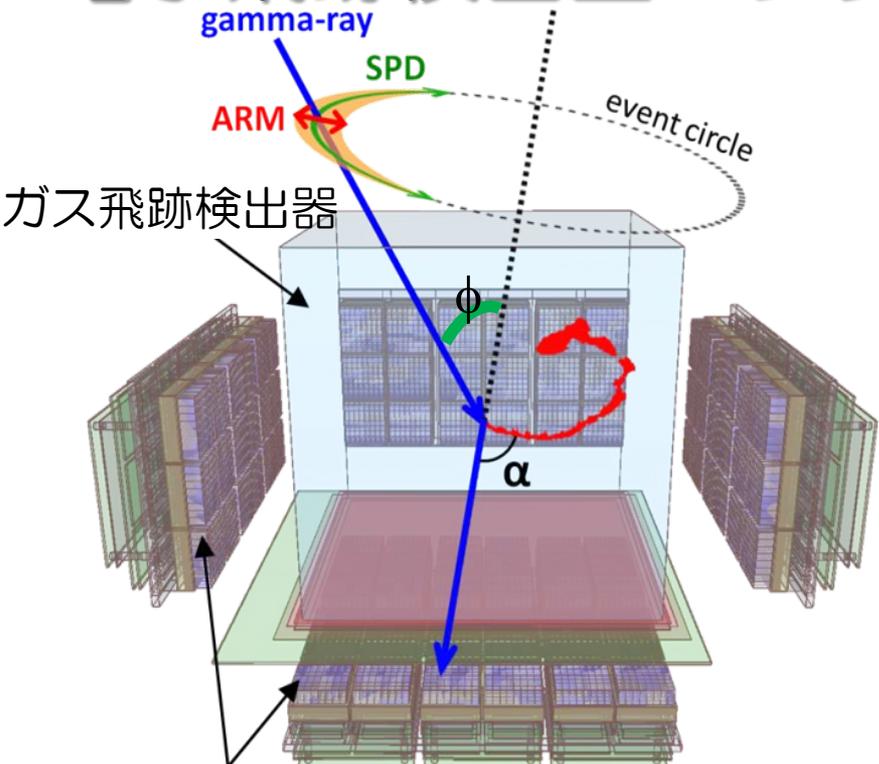
PSFの広がり小さければ、視線方向のBGが主

SMILE ETCC



PSF ~ 再構成の精度

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



➤ ガス飛跡検出器

コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

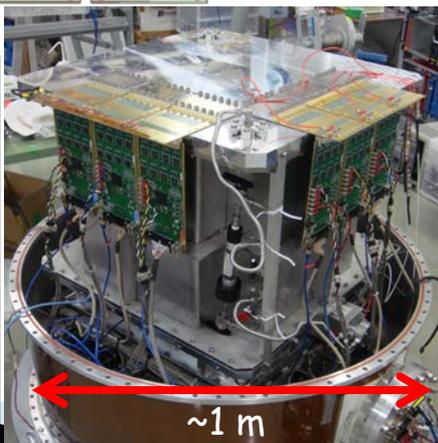
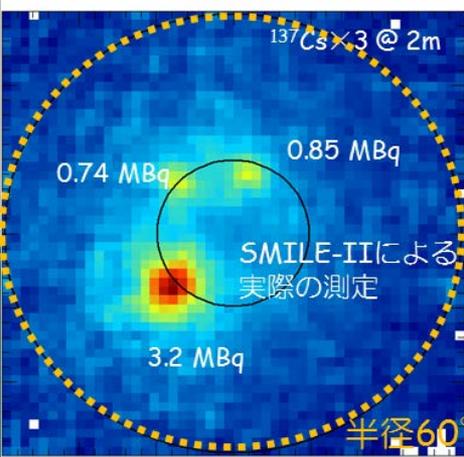
➤ ピクセルシンチレータアレイ

コンプトン散乱ガンマ線の
吸収点とエネルギー



検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再現

GSOシンチレータ



SMILE-2+ ETCC

- ▶ 到来方向とエネルギーを一意に特定
- ▶ 大きな視野 (~3 sr)
- ▶ **電子飛跡による鋭いPSF**
⇒ 範囲外の雑音をイメージングで除去
- ▶ **α角によるコンプトン散乱運動学テストと dE/dxによる粒子識別による雑音除去能力**
⇒ 重いVETO検出器が不要

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

10 cm角, Xe+Ar 1気圧

- 気球高度におけるETCCの動作試験
- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (100 keV ~ 1 MeV)
 - ⇒ 気球高度において安定に動作
 - 他の観測と矛盾のないスペクトル A. Takada+, ApJ, 2011

SMILE-II

30 cm角, Ar 1気圧

- 地上試験 ⇒ 有効面積 : $\sim 1 \text{ cm}^2$ @ <300 keV
ARM : 5.3度 SPD : ~ 100 度 @ 662 keV
⇒ PSF : ~ 15 度 @ 662 keV

SMILE-II+

30 cm角, Ar 2気圧

- 明るい天体のイメージングが目標 511 keV from G.C. & Crab nebula @ Alice Spring
- 目標 有効面積 : \sim 数 cm^2 @ <300 keV
PSF : <10度 @ 662 keV

SMILE-III

30 cm角, CF₄ 3気圧

- 長時間気球を用いた科学観測
- 目標 有効面積 : $\sim 10 \text{ cm}^2$ @ <300 keV
PSF : <5度 @ 662 keV

衛星による全天観測

50 cm角, CF₄ 3気圧

SMILE-2+

➤ 気球

アリススプリング (2018年4月)

水平浮遊高度 : 38.9 km

パイロード重量 : ~500 kg

➤ 検出器

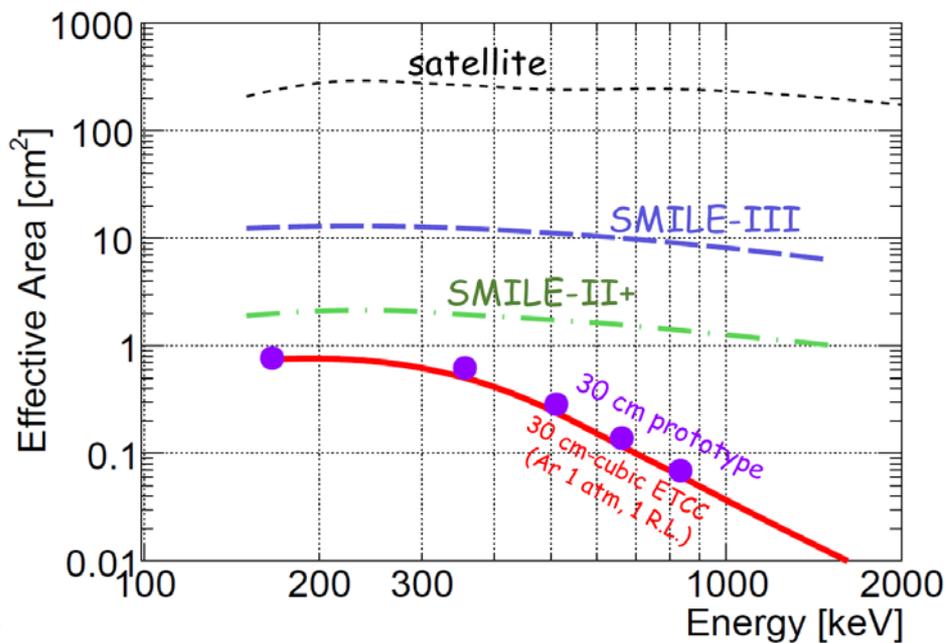
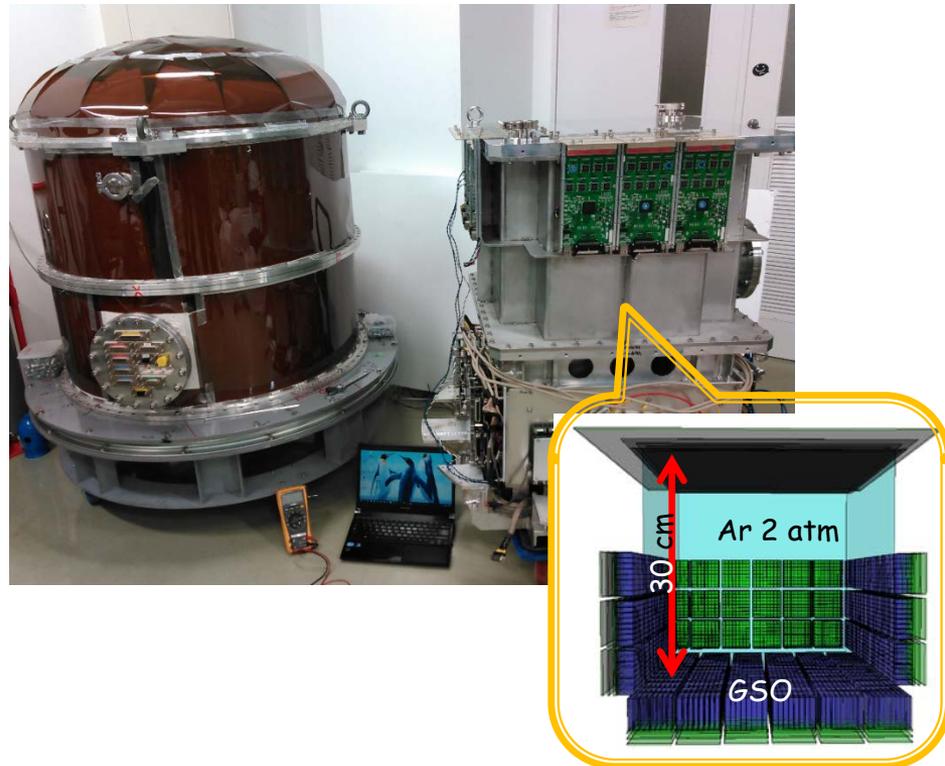
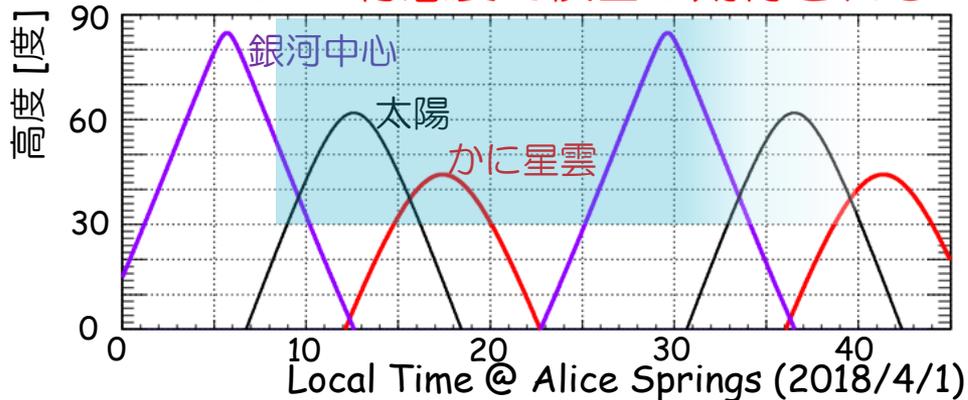
Geant4 シミュレーション →

- ◆ 有効面積 : 2~3 cm² @ 300 keV
- ◆ PSF : ~10° (half power radius)
- ◆ エネルギー帯域 : 300~1.5 MeV

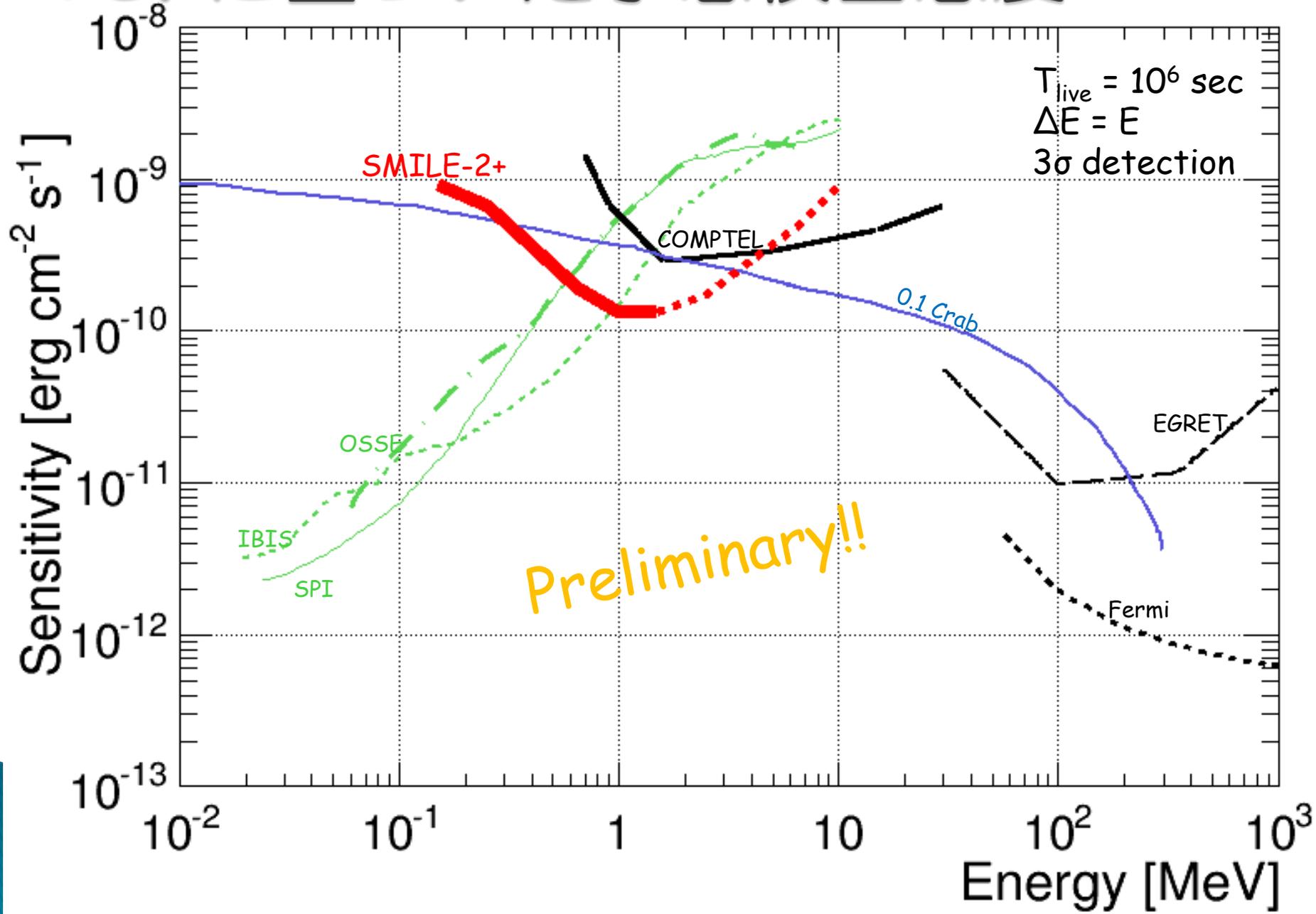
➤ 観測対象

- ◆ 電子陽電子対消滅線 @ 銀河中心領域
- ◆ かに星雲

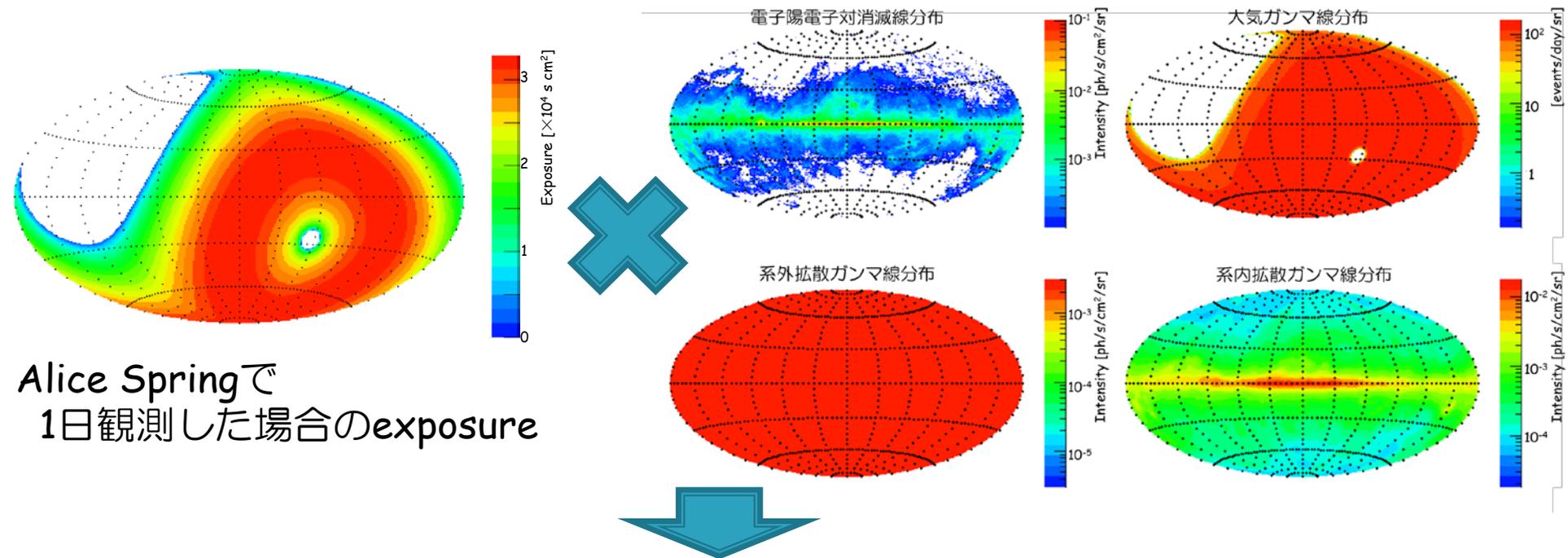
~5σの有意度で検出が期待される



PSFに基づいた予想検出感度

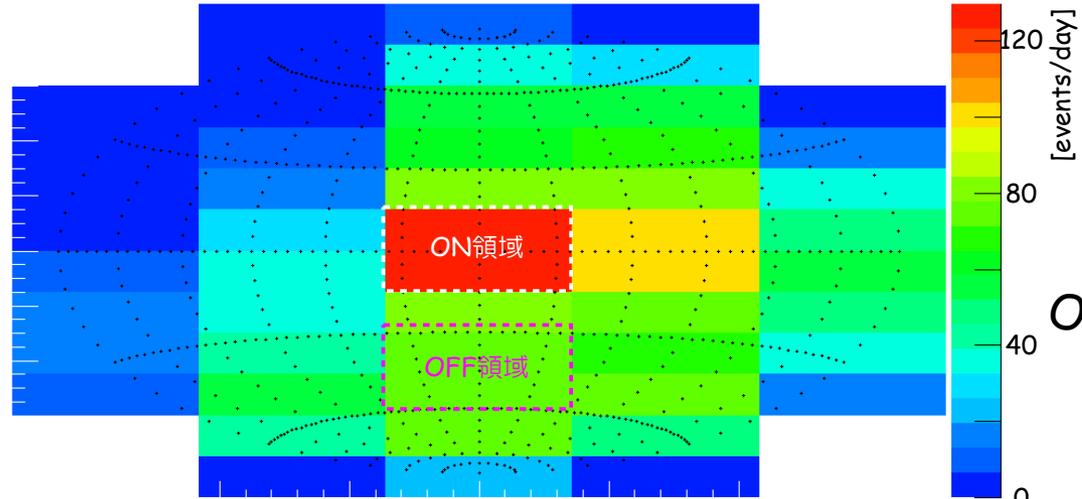


SMILE-2+による511 keVガンマ線の観測



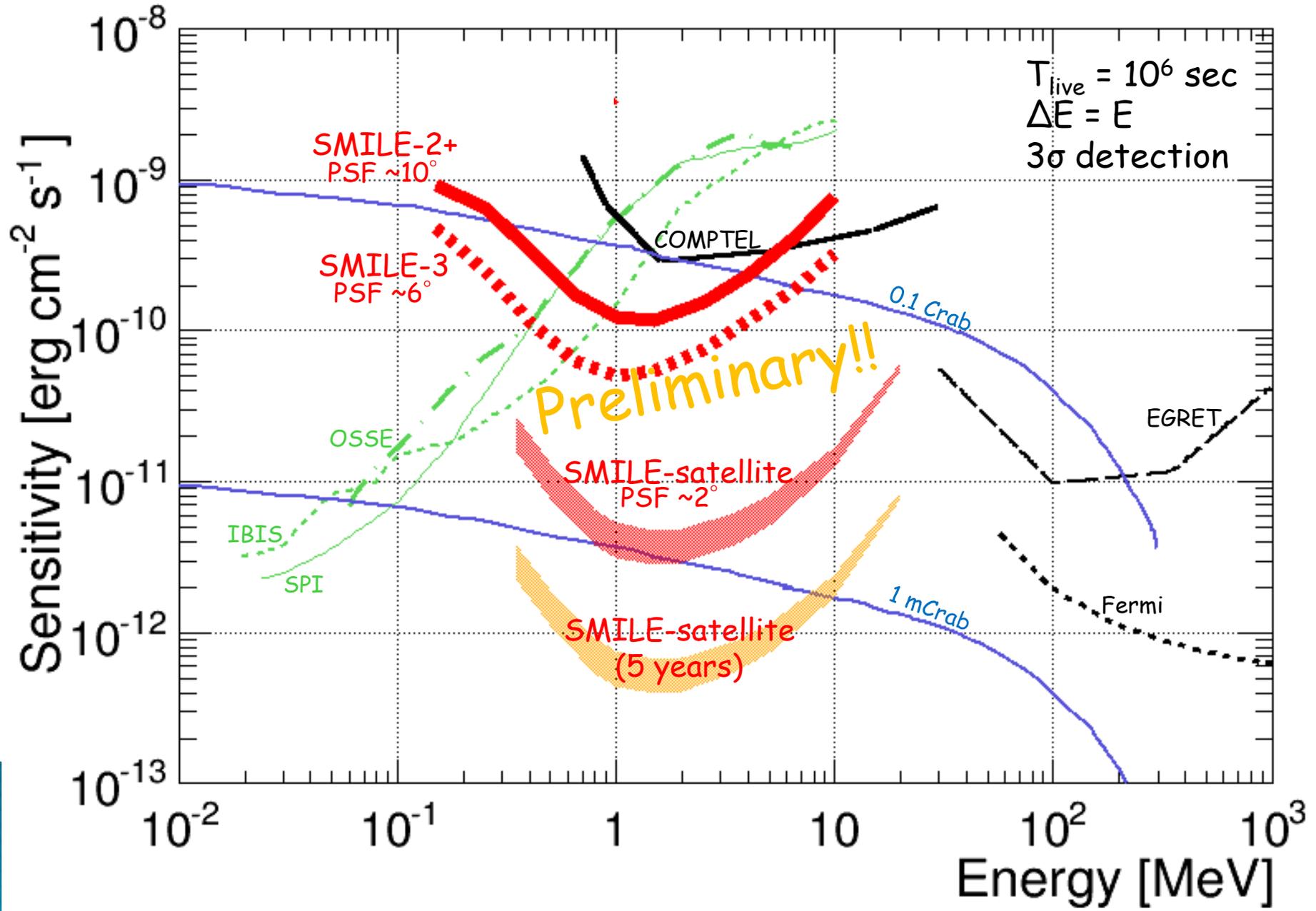
Alice Springで
1日観測した場合のexposure

1日観測での検出事象数の期待値



ON領域に
5.5 σ の超過が
期待される

将来計画の予想検出感度



電子・陽電子対消滅線

SMILE-2+

有効面積:

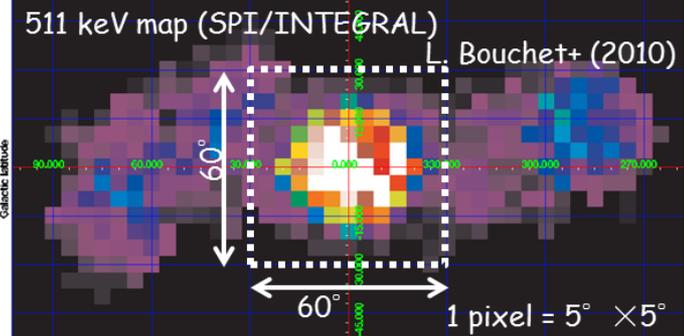
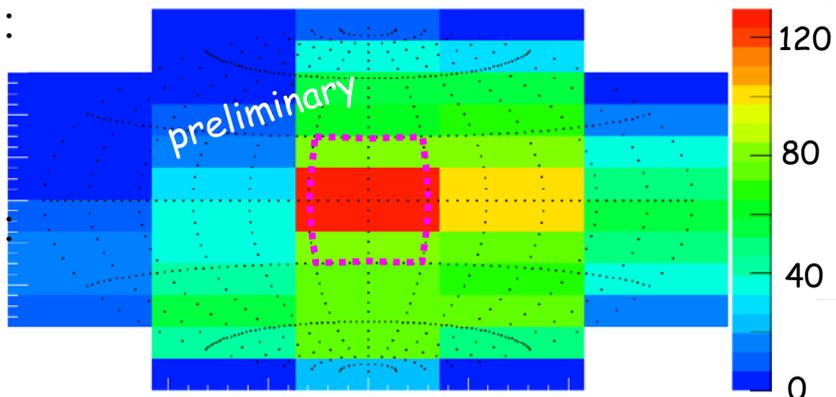
~3 cm²

PSF:

~10°

観測時間:

1 day



SMILE-3

有効面積:

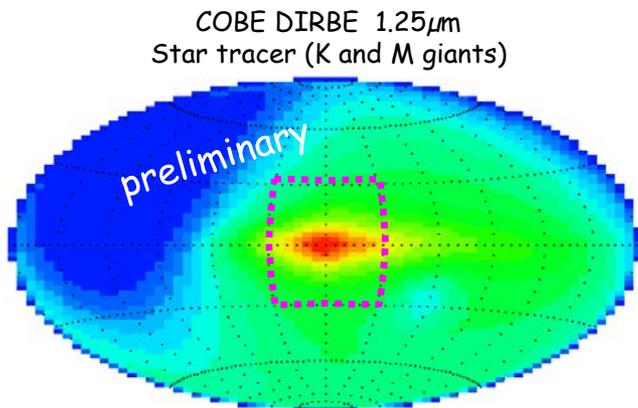
~10 cm²

PSF:

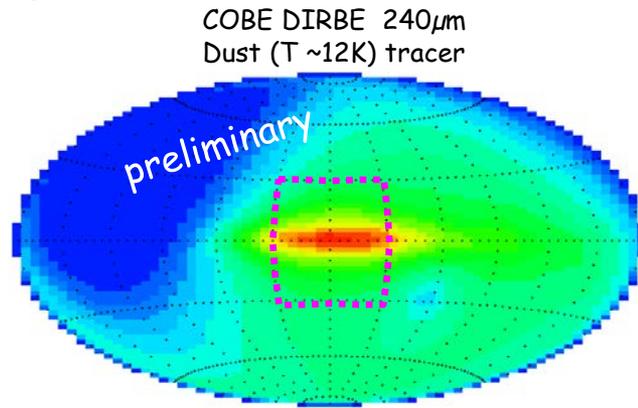
~7°

観測時間:

30 days



COBE DIRBE 1.25 μm
Star tracer (K and M giants)



COBE DIRBE 240 μm
Dust (T ~12K) tracer

1 pixel ~ l 4.8° × b 2.4°

Satellite

有効面積:

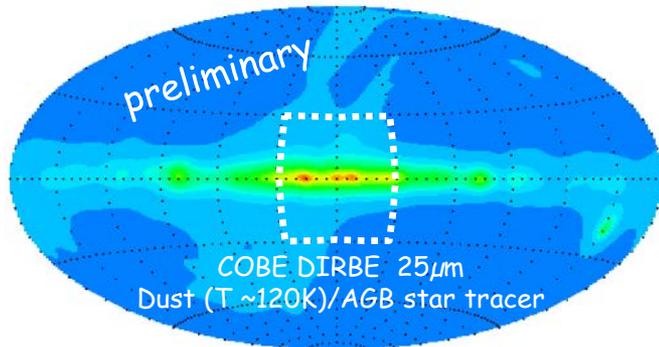
~200 cm²

PSF:

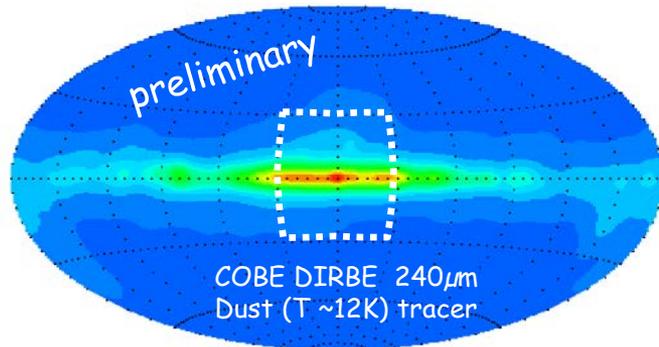
4.5°

観測時間:

1 year



COBE DIRBE 25 μm
Dust (T ~120K)/AGB star tracer



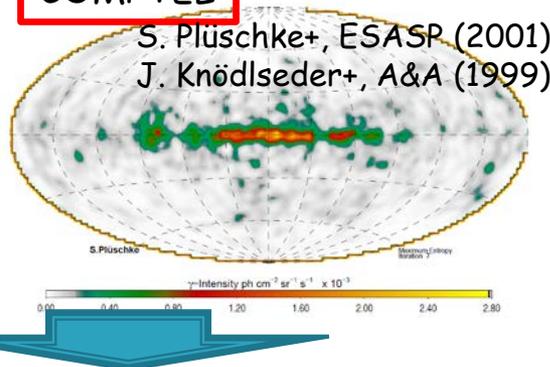
COBE DIRBE 240 μm
Dust (T ~12K) tracer

SMILE衛星での ^{26}Al (1.8 MeV)観測予測

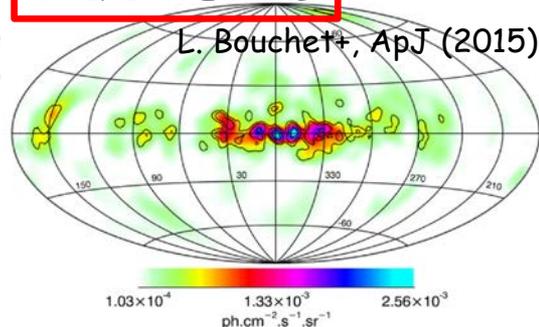
- AGB星
- Wolf-Rayet星
- II型超新星爆発
- 新星のアウトフロー

主要な
生成源は？

COMPTTEL



SPI/INTEGRAL

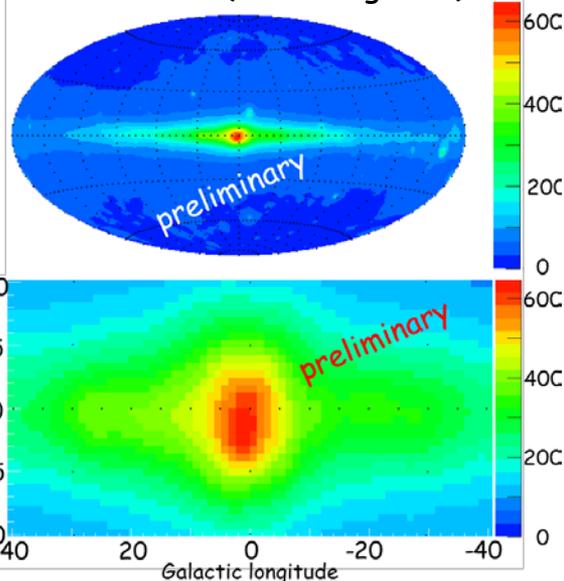


$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \gamma$ (1.809 MeV)
lifetime 7×10^5 years

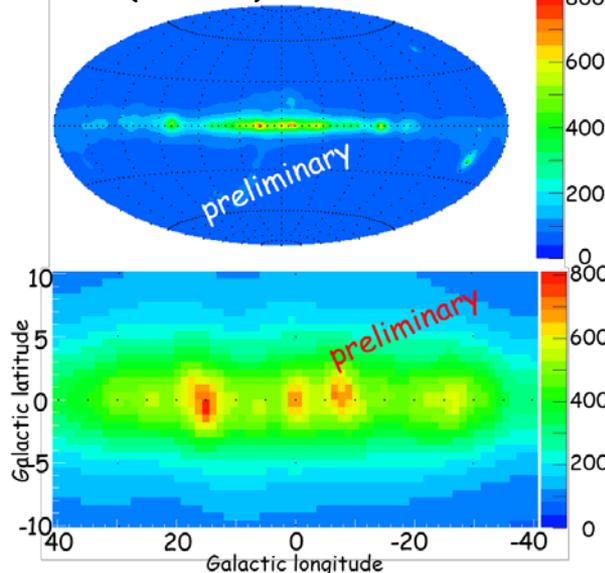
SMILE-satelliteによる観測事象数期待値マップ

有効面積 : $\sim 200 \text{ cm}^2$ @ 1.8 MeV
PSF : $\sim 2.3^\circ$ E res. : 2.4%

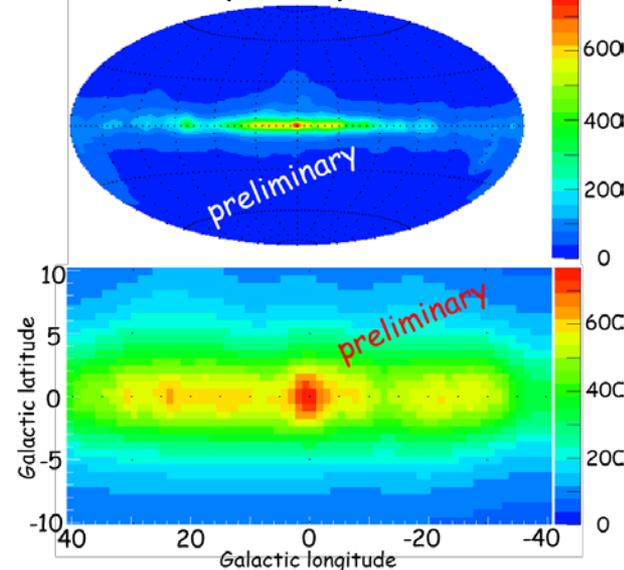
COBE DIRBE $1.25 \mu\text{m}$
Star tracer (K and M giants)



COBE DIRBE $25 \mu\text{m}$
Dust (T $\sim 120\text{K}$)/AGB Star tracer



COBE DIRBE $240 \mu\text{m}$
Dust (T $\sim 12\text{K}$) tracer

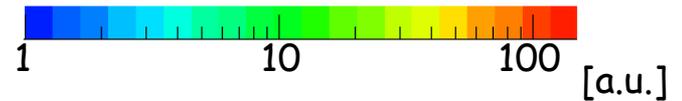
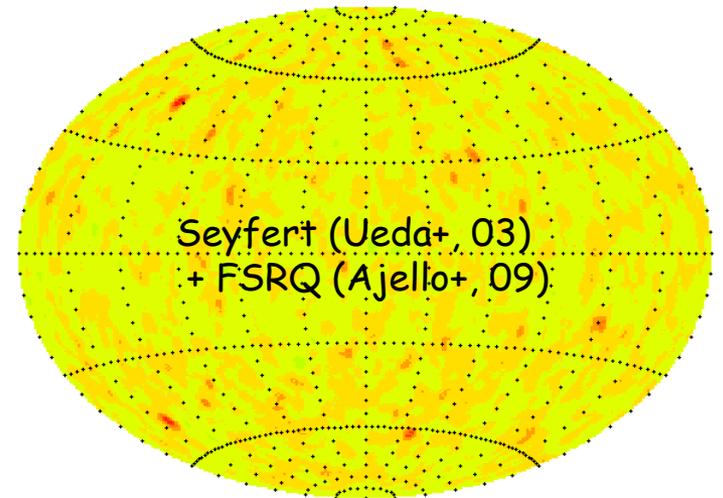
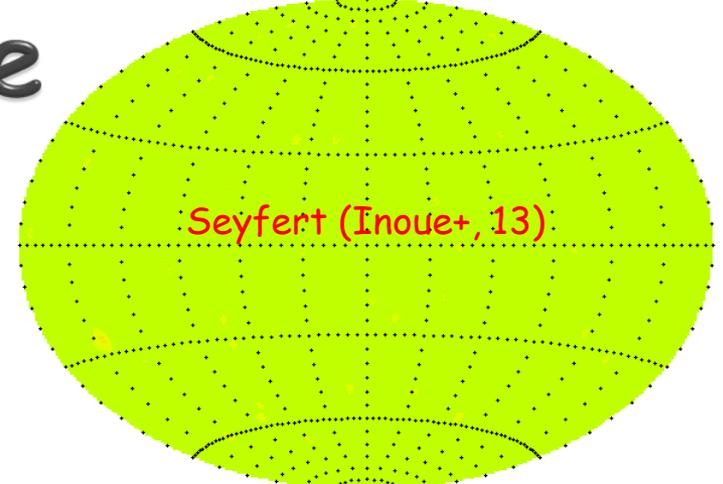
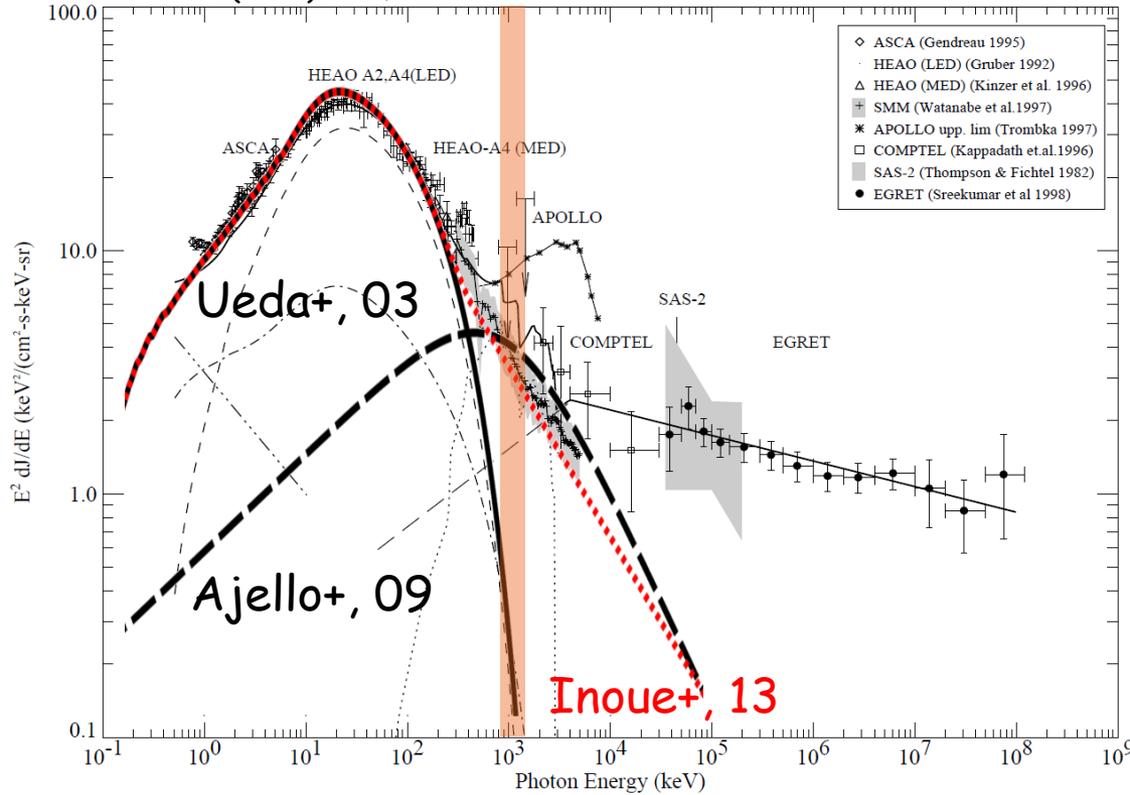


- $\sim 2^\circ$ のPSFが実現できれば ^{26}Al の分布について詳細な議論が可能に
- ^{60}Fe や電子陽電子対消滅線など他のラインガンマ線の分布も大幅な改善が期待できる

Extragalactic diffuse

0.8~1.2 MeV
PSF ~3° (ARM 2° SPD 10°)

M. Pohl (1998)に加筆



背景放射の詳細なスペクトル + 非一様性

⇒ MeV領域の背景放射の起源を特定可能

5°以下のPSFがあれば非一様性が見える

Exploring GRB astronomy by Balloon-SMILE

1. SMILE-II one-day flight(s) for Crab and Cyg X-1 (Anytime, OK)
2. Next plan, SMILE-III Long-duration flight with larger ETCCs

Polar region 14-50 days ($T_{\text{obs}} > 10^6$ sec)

40 cm-cubic ETCC x2 modules (Eff. Area ~ 80 cm²)

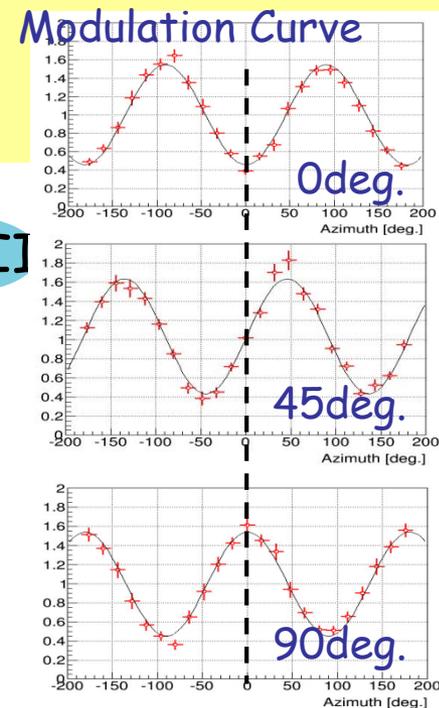
GRB Search in Long duration flight

10^6 s $\rightarrow \sim 3 \times 10^{-11}$ erg cm⁻² s⁻¹ (+ FoV of 4 str) $\rightarrow \sim 1$ GRBs/day

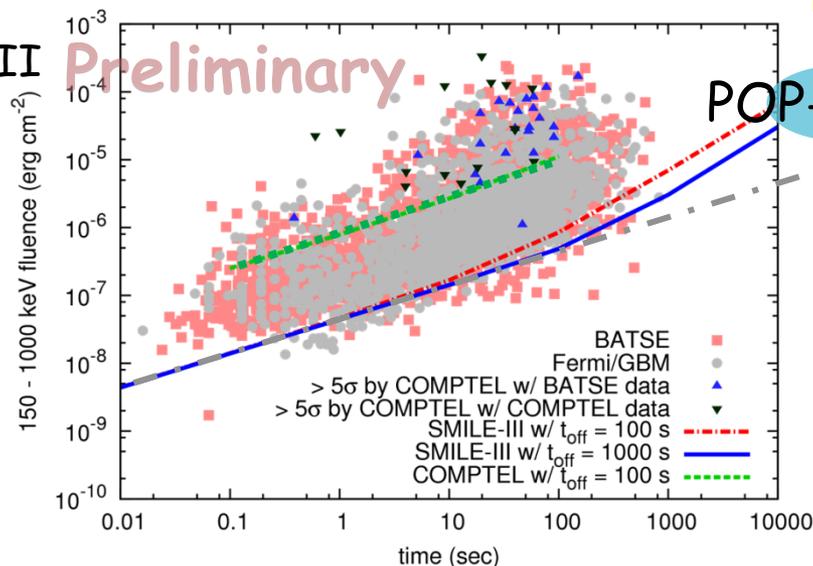
In addition, Polarization Modulation factor 0.6 at 130 keV in SPring-8

MDP $\sim 6\%$ for 10^{-6} erg cm⁻² s⁻¹ (2-3 GRBs/month)

$\sim 20\%$ for 10^{-7} erg cm⁻² s⁻¹ (~ 10 GRBs/month)

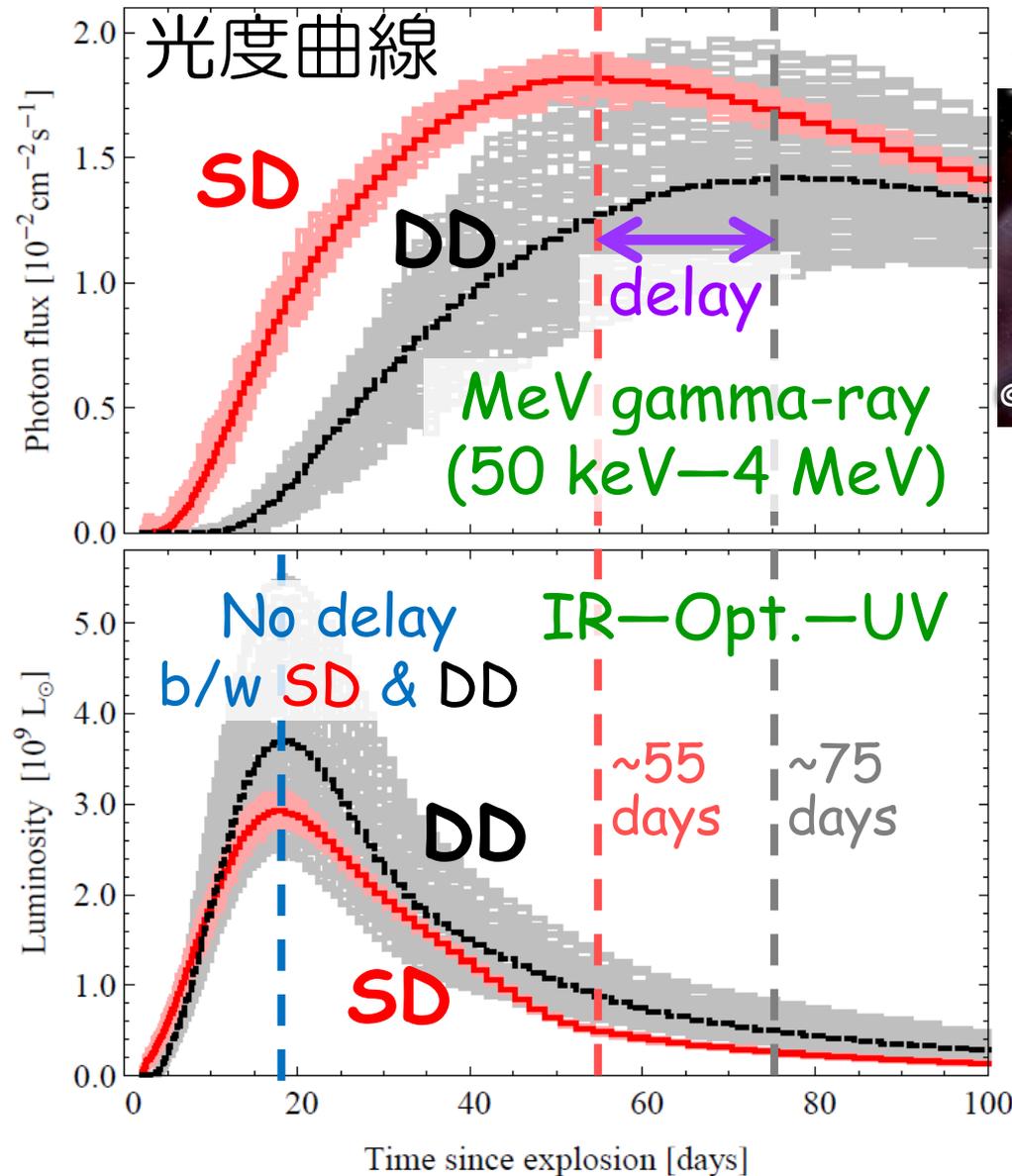


GRB detection in SMILE-III
Simulated by T. Sawano



Ia型超新星の爆発過程診断方法

A. Summa, ..., K. Maeda, et al., A&A 554, A67 (2013)



伴星からの質量降着 白色矮星同士の合



**MeVガンマ線観測は
Ia型超新星爆発の
重大なヒントをもたらす**

観測機器に要求される項目

- 良い点源角度分解能 (PSF)
- 効率的な雑音事象の抑制
- 広い視野 (FoV)

まとめ

- ▶ MeVガンマ線天文学の発展には『正しいPSF』が必要
 - 反復計算を用いた統計的推定法ではPSFはあやふや
 - コンプトン望遠鏡では反跳電子の方向を測定することでPSFが大きく改善する
- ▶ SMILE-2+
 - 2018年4月にアリススプリングから放球予定
 - 有効面積：2~3 cm² (< 300 keV)
 - PSF：~10° (662 keV)
 - > 検出器についての詳細：竹村
 - システム概要：吉川
- ▶ 将来計画で期待される観測
 - 核ガンマ線の銀河面分布 -> 物質拡散, 宇宙線起源
 - 系外拡散ガンマ線 -> 系外ガンマ線の起源, 銀河進化
 - ガンマ線バースト -> 起源, 放射機構
 - Ia型超新星爆発 -> 元素合成, 爆発起源

等々

Thank you
for your attention!

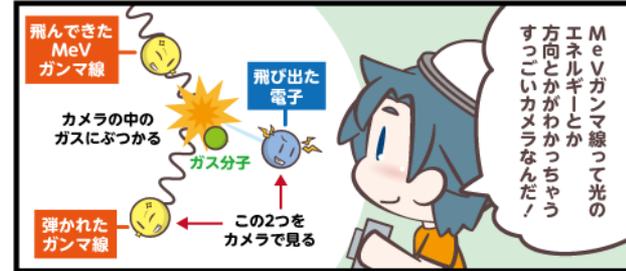


<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>

自慢のカメラでスマイル



SMILE(スマイル)さん
自慢のカメラで宇宙からのMeVガンマ線を
捕まえて宇宙のミシジを解明しようとしています。

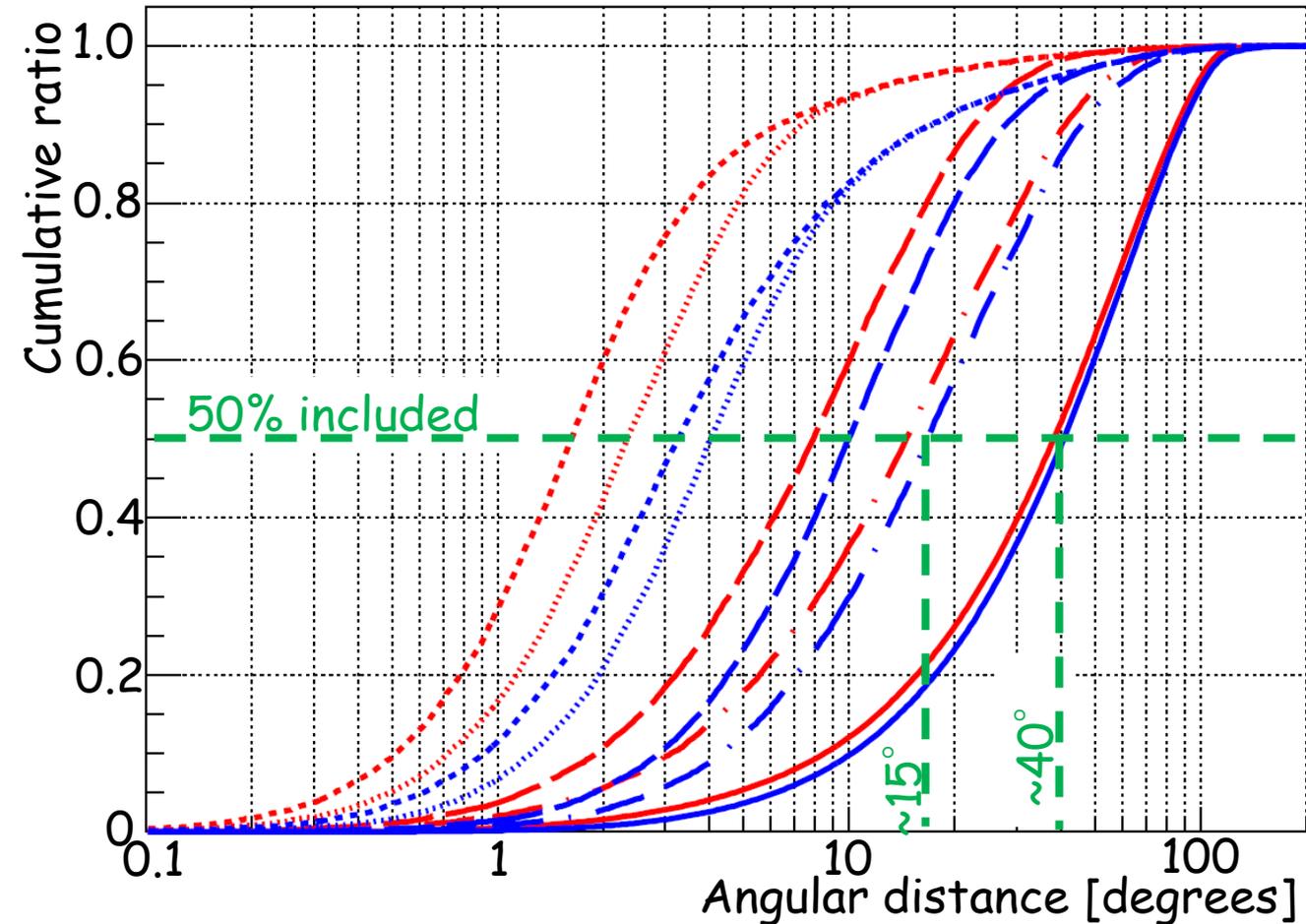


自慢のカメラ
正式名称は「電子飛跡検出型コンプトンカメラ」。
医療や環境モニタリングにも応用する予定です。



©Higgstan

Point spread function



ARM 2° ARM 5°
 — Conventional
 - - SPD 100°
 - - SPD 50°
 ... SPD 10°
 - - SPD 5°

➤ SMILE-II ETCC
 ARM 6° SPD 100°
 → half power radius
 ~15°

This emulation is
 consistent with
 experiment.

- ARM
 ≠ half power radius
- PSF strongly depends
 on SPD
- If ARM ≈ SPD,
 HPR ≈ ARM

If we want to get a sharp PSF,
 we need to improve both ARM and SPD.