



SMILE 31:

次世代型MeVガンマ線望遠鏡による 天体観測気球実験計画

京都大学 高田淳史

谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, 古村翔太郎
岸本哲朗, 竹村泰斗, 中増勇真, 吉川慶, 谷口幹幸, 中村優太
園田真也, 中村輝石, 松岡佳大, Parker Joseph, 宮本奨平
友野大, 黒澤俊介, 身内賢太郎, 澤野達哉

- MeVガンマ線天文学
- 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡
- SMILE-2+/3の設計と期待される観測
- まとめ

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) :

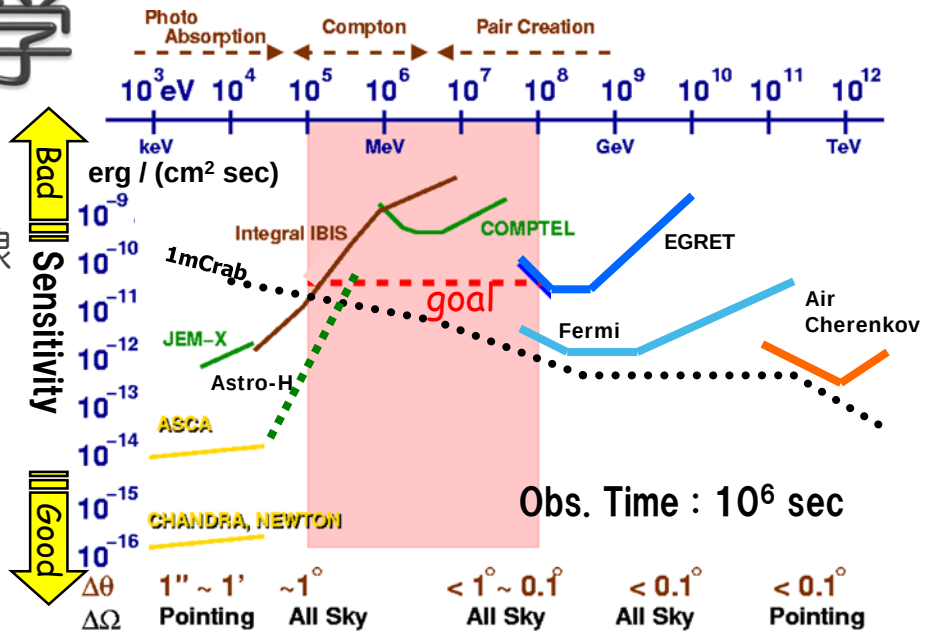
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

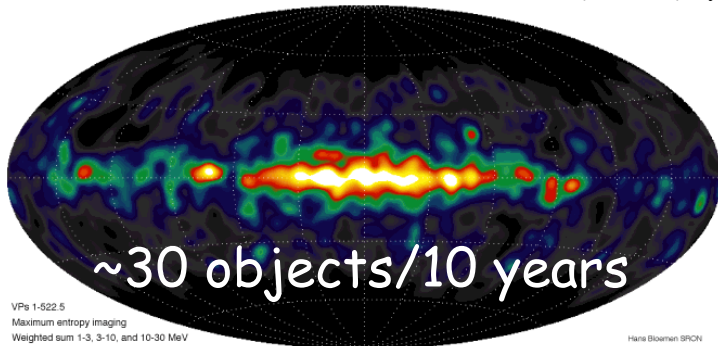
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



MeV sky map

1-30 MeV

CGRO/COMPTEL



VPe 1-522.5
Maximum entropy imaging
Weighted sum 1-3, 3-10, and 10-30 MeV

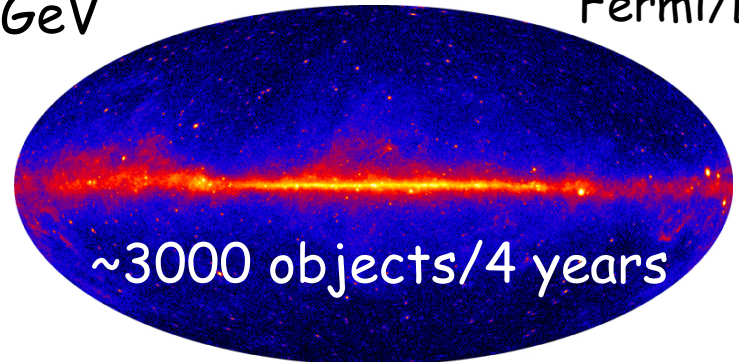
Hans Bloemen SRON

V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

GeV sky map

> 1 GeV

Fermi/LAT

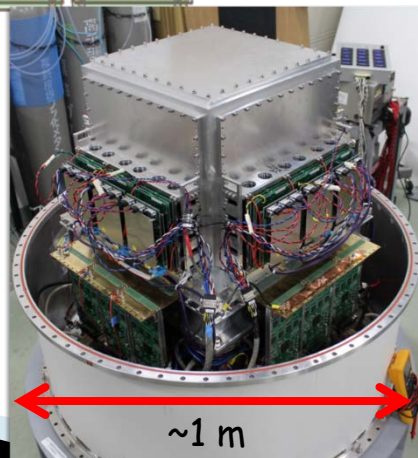
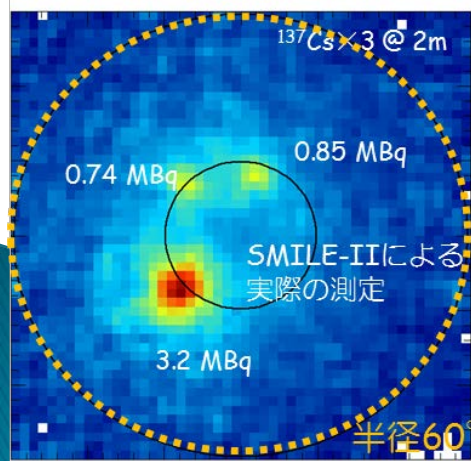
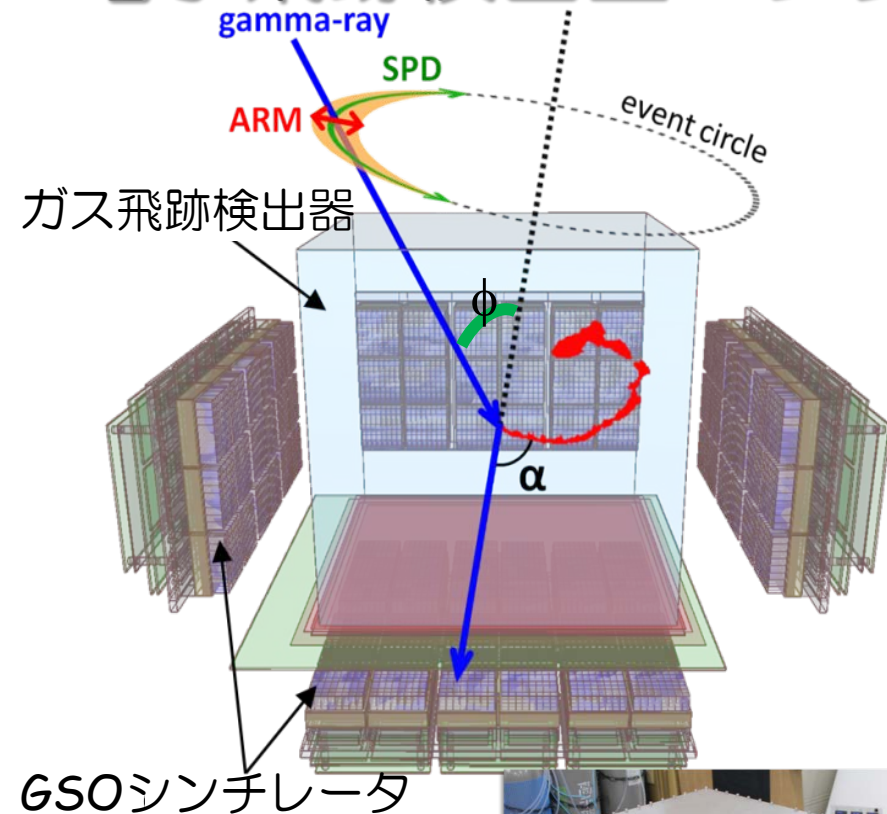


F. Acero+ (ApJS, 2015)

次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

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

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



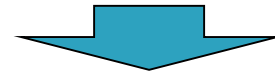
SMILE-II ETCC

➤ 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

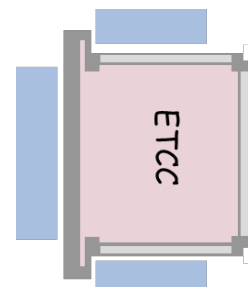
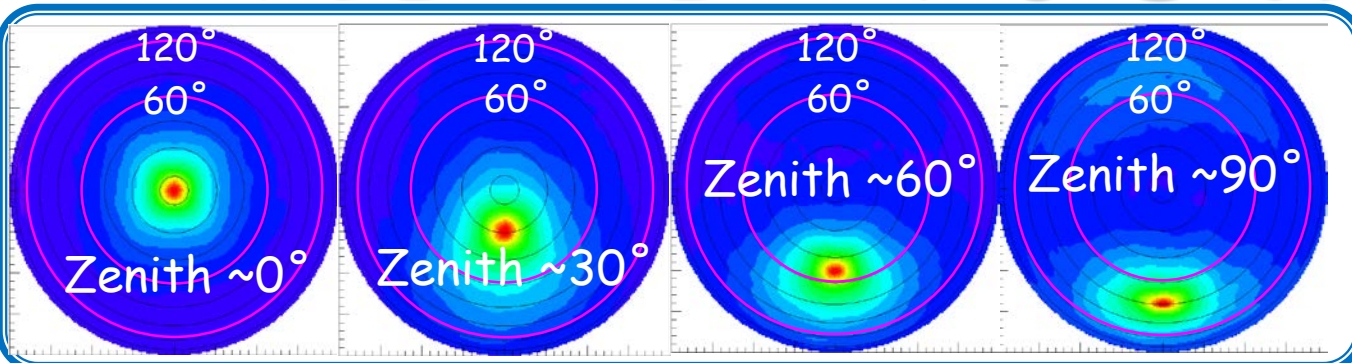
コンプトン散乱ガンマ線の
吸収点とエネルギー



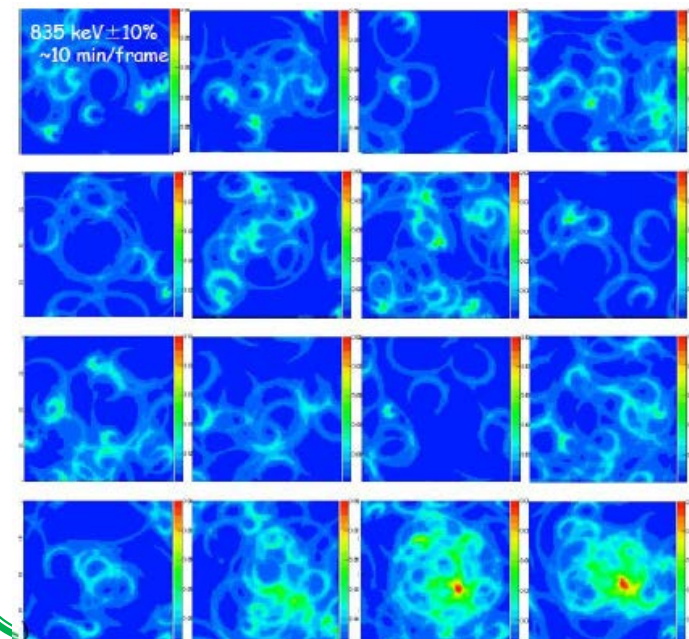
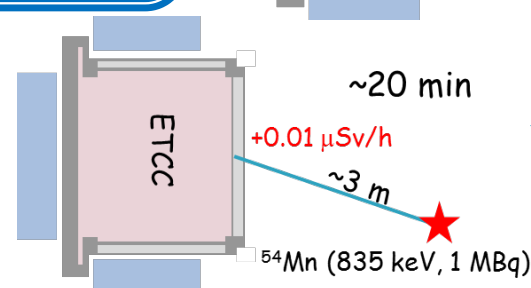
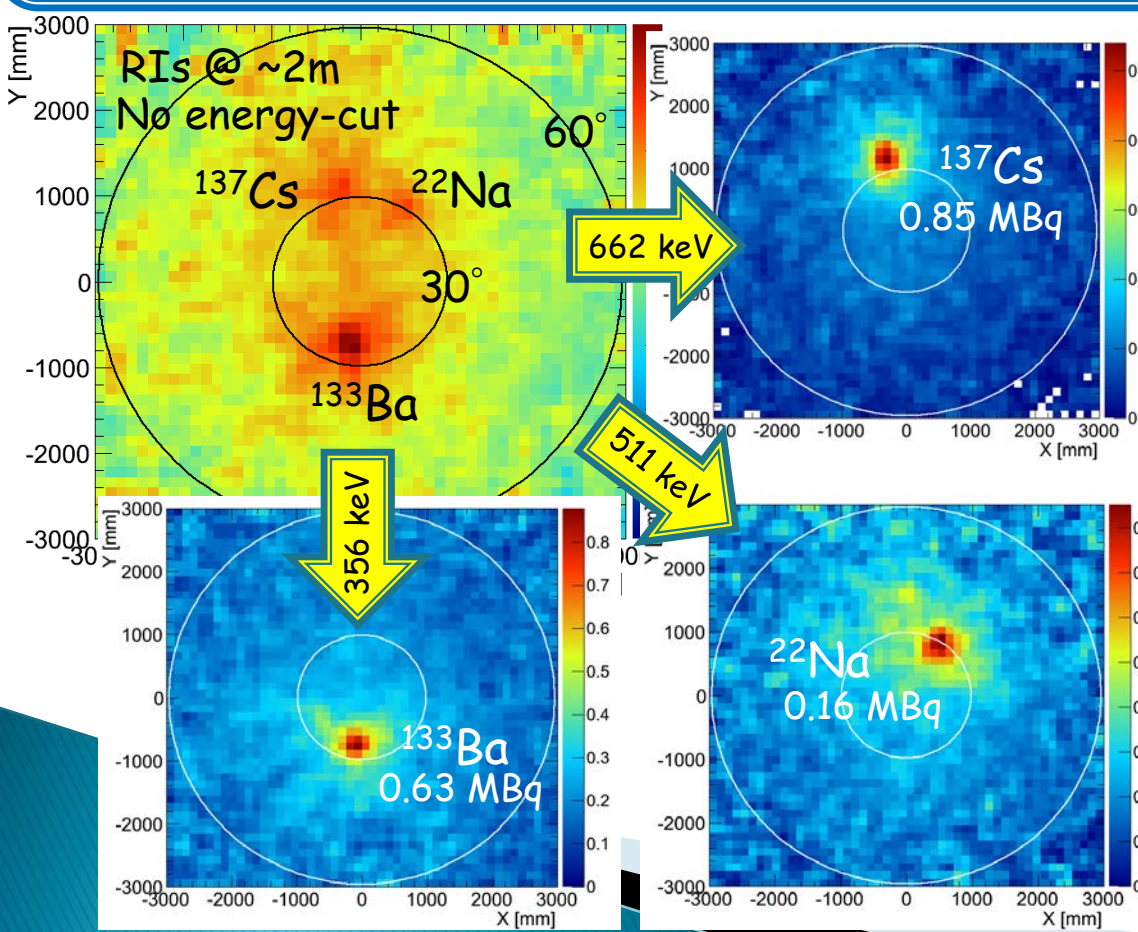
検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再現

- 到来方向とエネルギーを一意に特定
- 大きな視野 ($\sim 3 \text{ sr}$)
- 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

SMILE-II ETCCによるガンマ線検出



~3 hours
No source



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 未放球

30 cm角, Ar 1気圧

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

SMILE-II+

30 cm角, Ar > 1 気圧

- 明るい天体のイメージングが目標
- 目標 有効面積 : $\sim \text{数 cm}^2$ @ $< 300 \text{ keV}$
PSF : ~ 5 度 @ 662 keV

511 keV from G.C. @ Alice Spring
Crab nebula/Cyg X-1 @ Fort Sumner

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 : $\sim 10 \text{ cm}^2$ @ $< 300 \text{ keV}$
PSF : < 5 度 @ 662 keV

衛星による全天観測

50 cm角, CF₄ 3気圧

SMILE-IIからSMILE-II+へ

➤ 広帯域化

GSO 13 mm

⇒ 500 keVで40%は素通り
光電吸収は~25%

Ar 1気圧, 30 cm角 ⇒ 測定できる反跳電子は
せいぜい150 keV以下

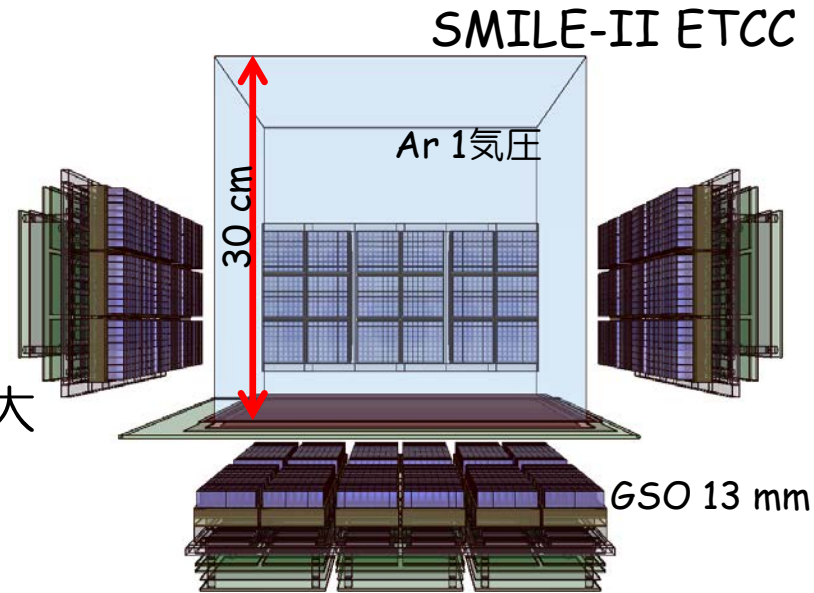


◆ GSOの厚みを増大

⇒ 散乱ガンマ線の検出確率大

◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ >150 keVの電子も測定



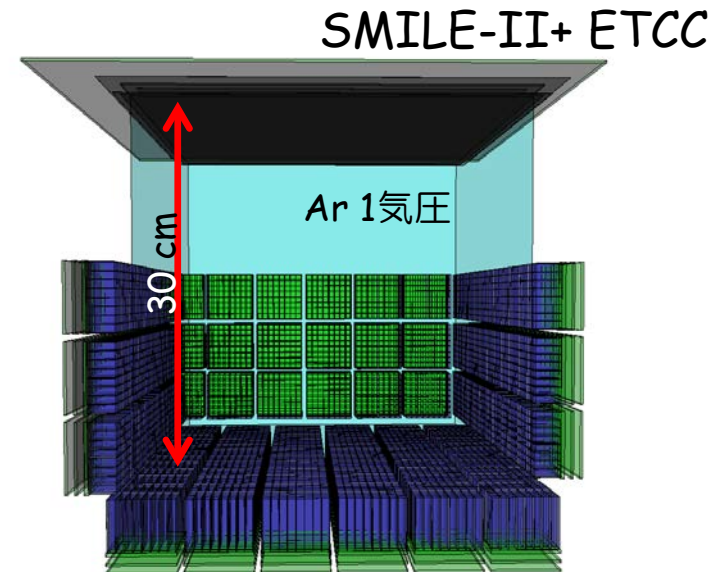
➤ PSFの向上

Ar 1気圧, 30 cm角 ⇒ ~50 keVの電子が受ける
多重散乱は~100度



◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ ~150 keVの電子の
多重散乱は~20度



➤ 有効面積の拡大

GSOシンチの位置 ⇒ 飛跡検出器を覆えていない



◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ シンチ間の隙間が激減

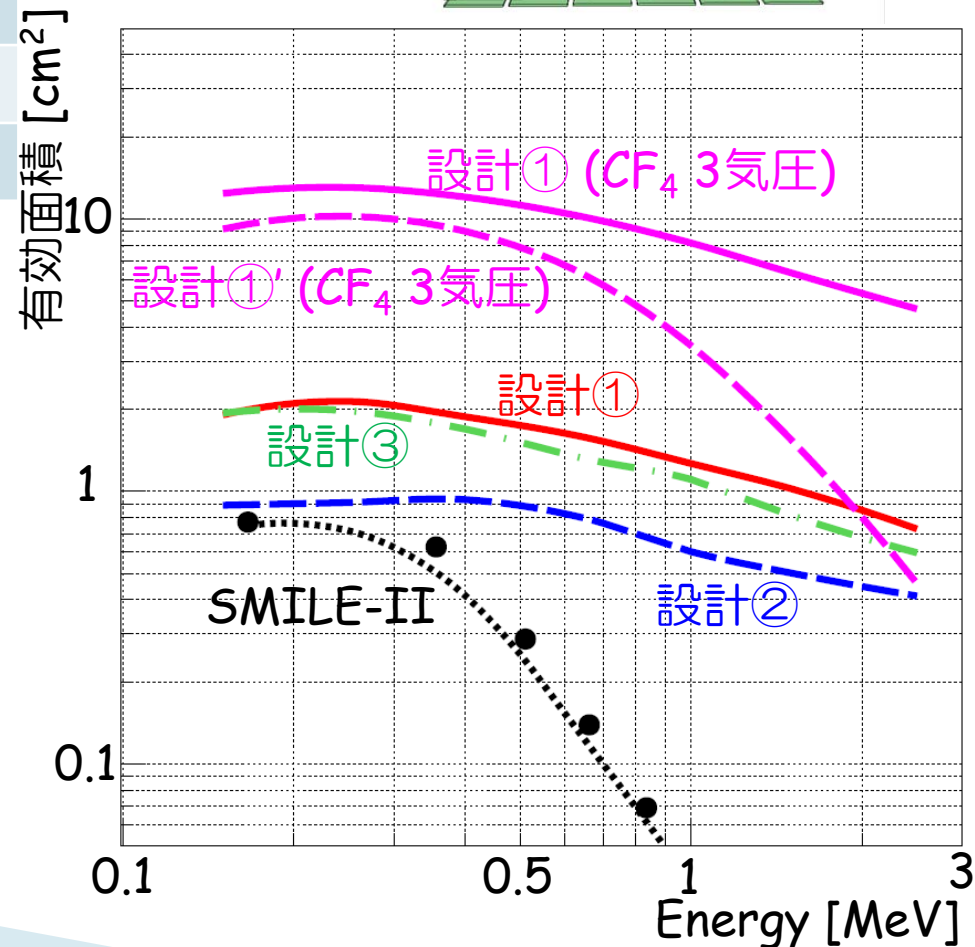
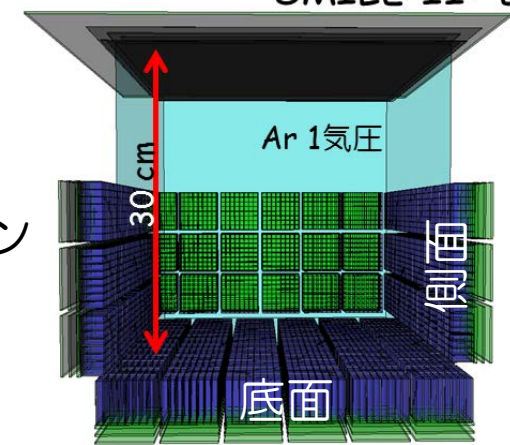
SMILE-II+検出器設計

1. GSOの適切な厚みは？
2. 側面は必要か？

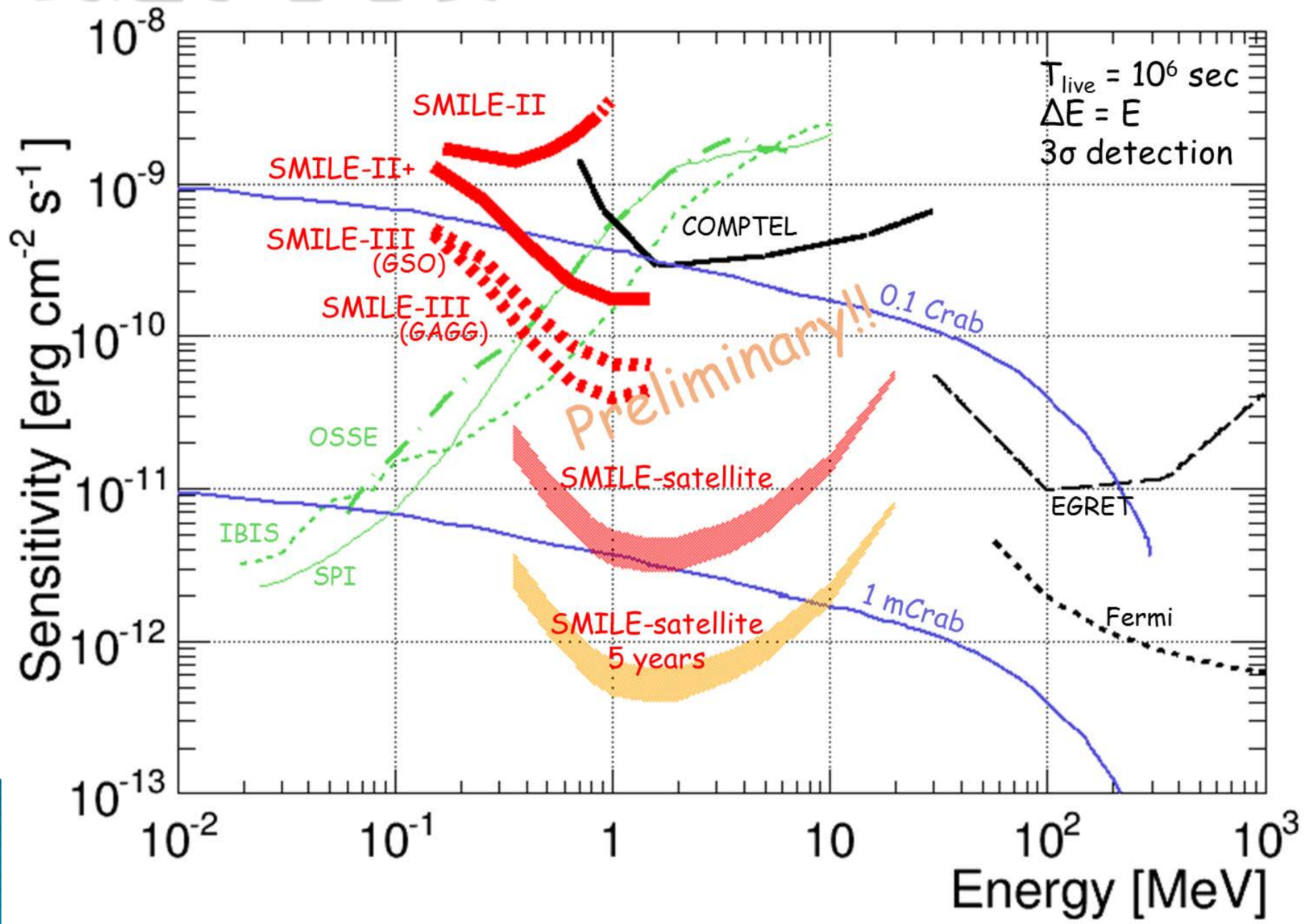
Geant4でシミュレーション

	底面	側面
①	3 R.L.	1.5 R.L.
②	3 R.L.	—
③	2 R.L.	1 R.L.

- 底面の厚みを増大 +
電子の測定にGSOも使用
⇒ 400 keV以上で大幅な改善
- 側面の効果
有効面積はおおよそ2倍
- 適切な厚み
150 keV~1.5 MeVの範囲では
2放射長以上に大きな差はない
視野の点では①の方が少し有利



到達予想感度



銀河面拡散核ガンマ線観測の現状

◆ ^{26}Al (1.809 MeV)

- AGB星
- Wolf-Rayet星
- 重力崩壊型超新星爆発
- 新星のアウトフロー

等で生成

N. Prantzos & R. Diehl, Physics Reports (1996)



半減期 7×10^5 年

HEAO-Cで発見後, SMMでも確認

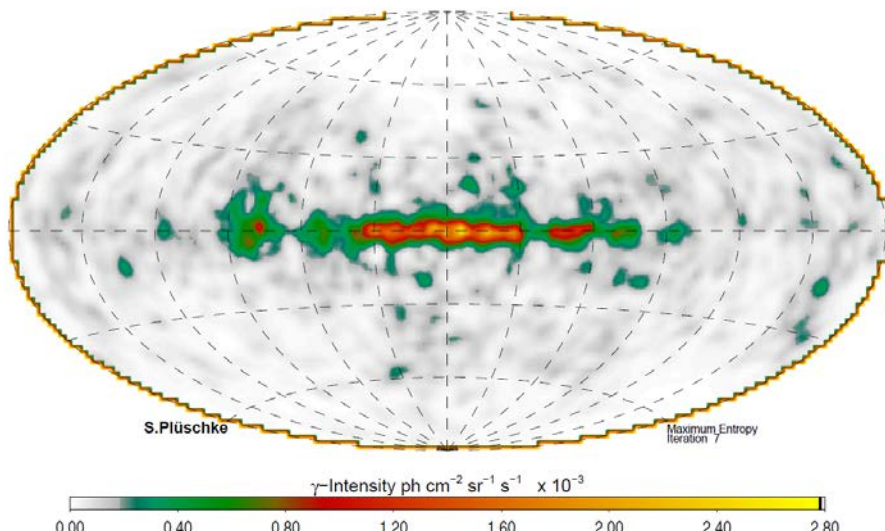
W. A. Mahoney+, ApJ (1982),

G. H. Share+, ApJ (1985)

COMPTEL

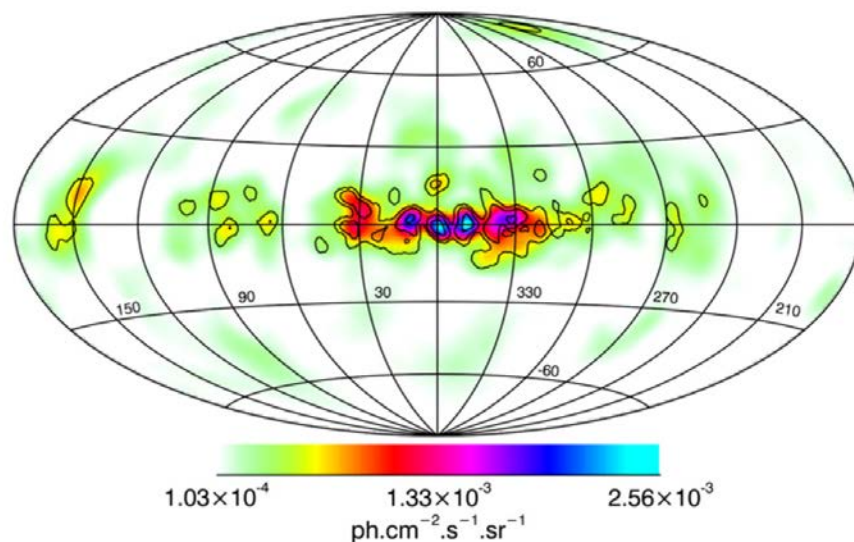
S. Plüschke+, ESASP (2001)

J. Knödseder+, A&A (1999)



SPI/INTEGRAL

L. Bouchet+, ApJ (2015)



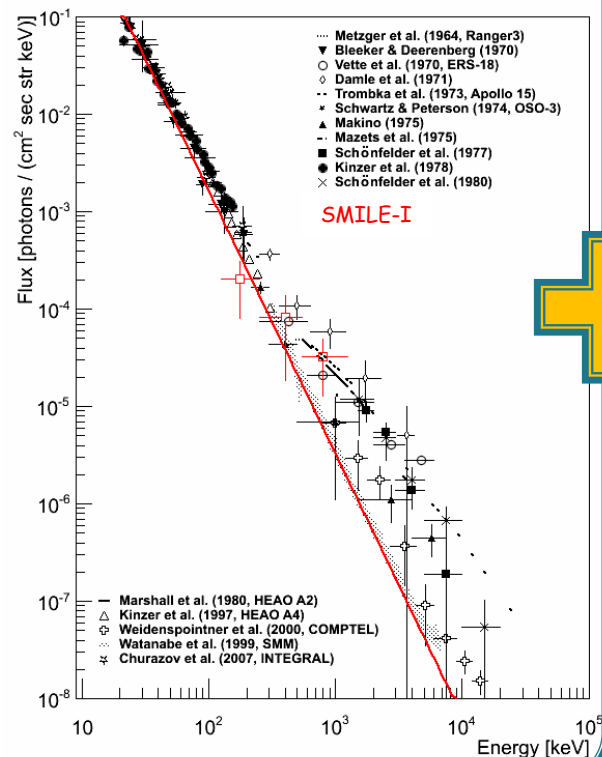
- 銀河面に広く分布
- X線やNIRとは良い一致は見られない
- マイクロ波やFIR (DIRBE 240 μm)とは粗い一致が見られる

- マイクロ波やFIRとは粗い一致
- 他にもMIRとも矛盾しない

気球実験SMILE-3での1.8 MeV観測

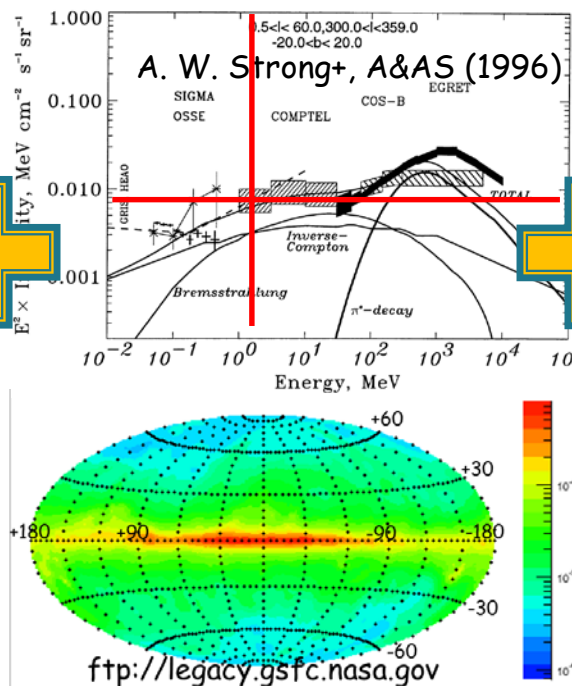
系外拡散ガンマ線

強度：SMMの観測結果を
べき関数で近似
分布：一様・等方を仮定



系内拡散ガンマ線

強度：COMPTELの
観測結果で仮定
分布：EGRETの
galactic diffuse model

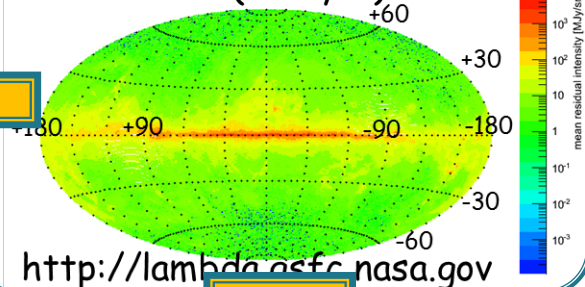


²⁶Al 1.8 MeV

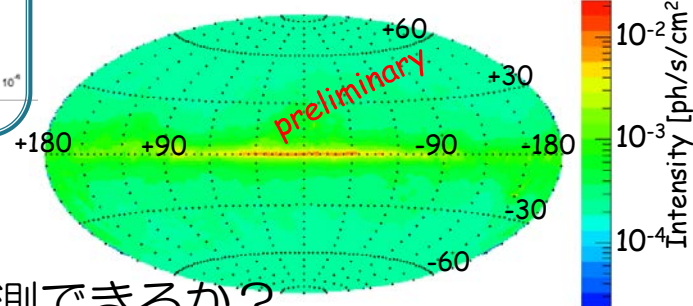
強度：SPI/INTEGRAL
 3.5×10^{-4} ph/cm²/s
 $|l| \leq 30^\circ$ $|b| \leq 10^\circ$
L. Bouchet+, ApJ (2015)

分布：他波長の全天観測を
templateとして使用

COBE (240 μm)



想定される全天マップ @ 1.8 MeV



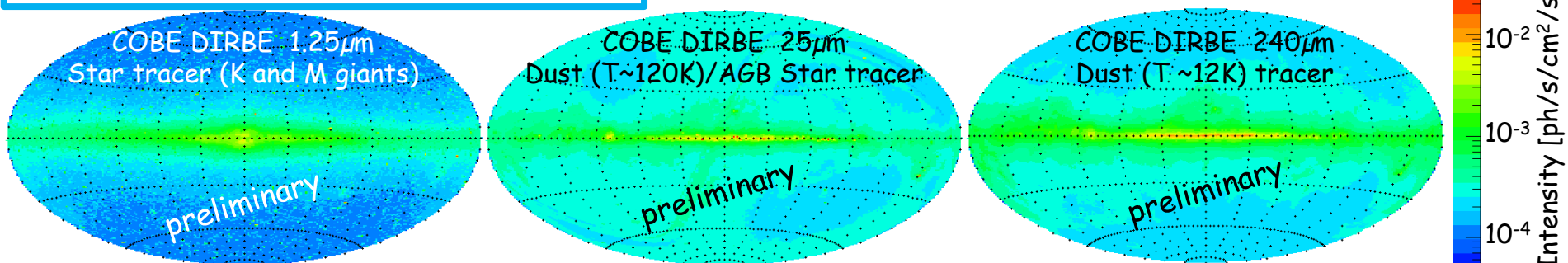
視線方向のBG：系内・系外拡散ガンマ線を考慮

²⁶Alの分布をtemplateで仮定

⇒ 想定されるPSFと有効面積でどのように観測できるか？

気球実験SMILE-3での1.8 MeV観測

想定される全天マップ @ 1.8 MeV



@ Alice Springs (Australia)

有効面積 5.8 cm², FoV $\sim \pi$ sr,

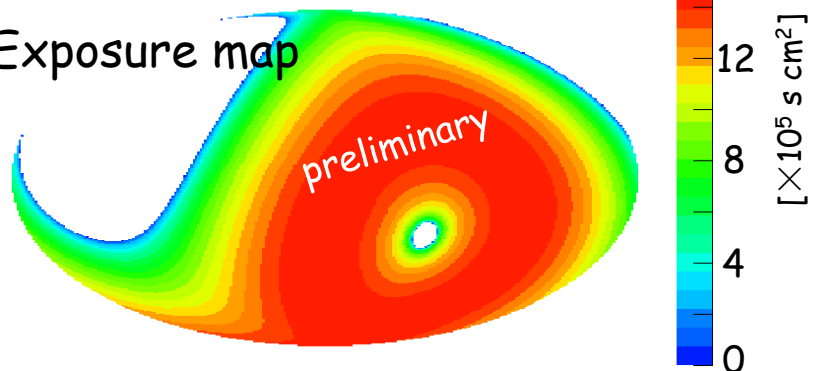
観測時間 **10 days**

エネルギー分解能 6% @ 1.8 MeV (FWHM)

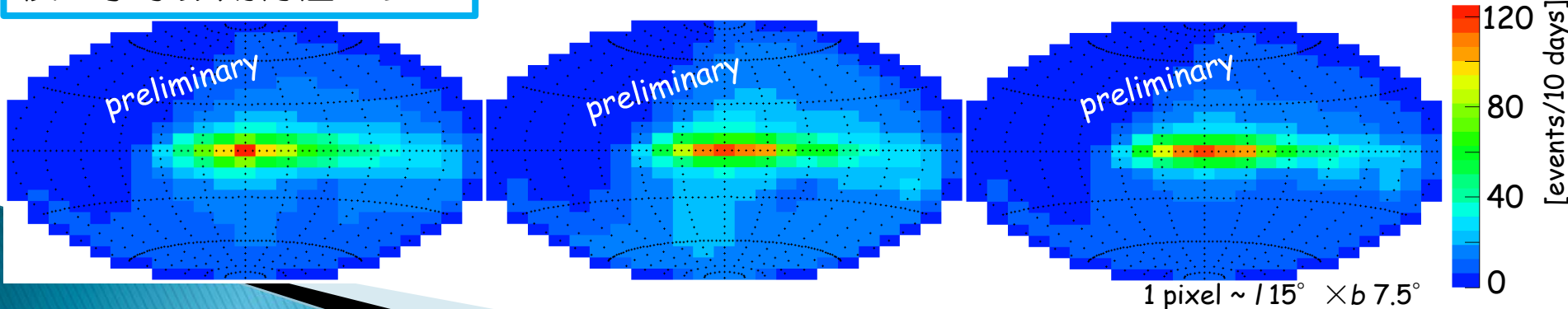
大気減衰 $\sim 85\%$ (@ ~ 40 km)

ARM分解能 5度, SPD分解能 25度

Exposure map



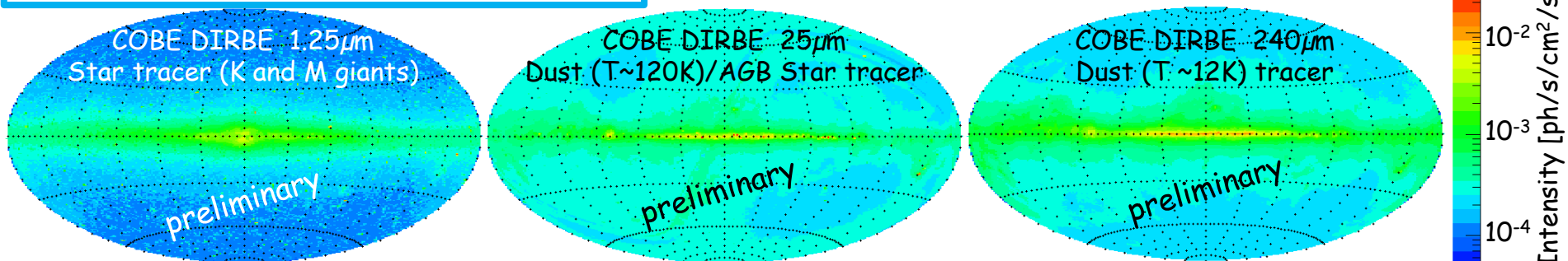
検出事象数期待値マップ



銀河中心領域に有意な超過が期待できる

気球実験SMILE-3での1.8 MeV観測

想定される全天マップ @ 1.8 MeV



@ Alice Springs (Australia)

有効面積 5.8 cm², FoV $\sim \pi$ sr,

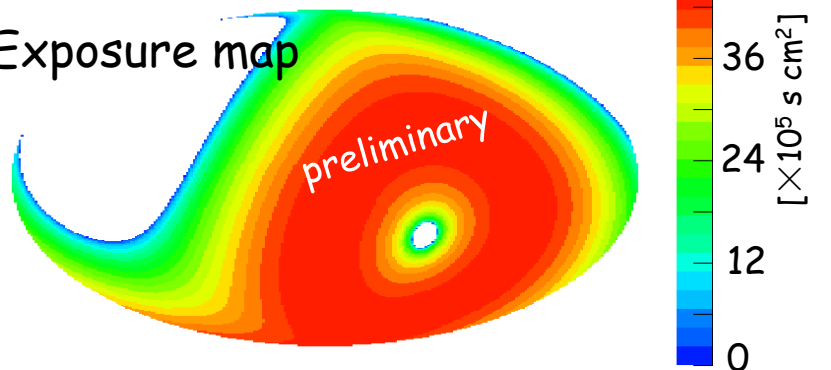
観測時間 **30 days**

エネルギー分解能 6% @ 1.8 MeV (FWHM)

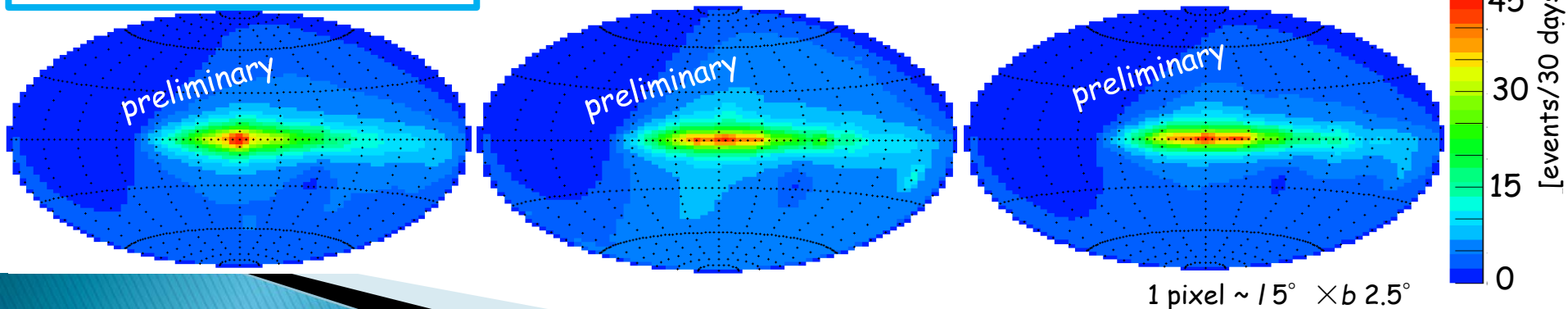
大気減衰 $\sim 85\%$ (@ ~ 40 km)

ARM分解能 5度, SPD分解能 25度

Exposure map

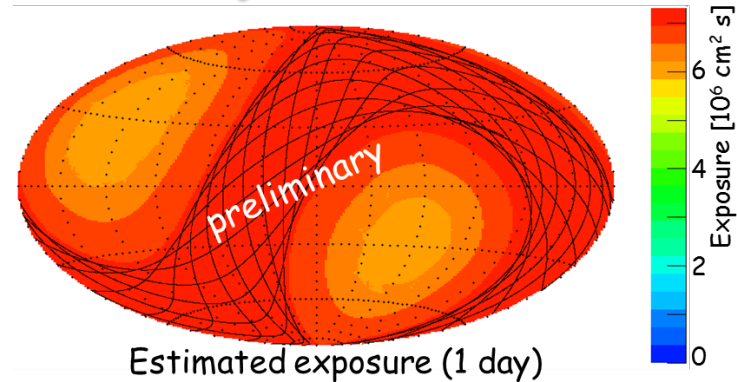


検出事象数期待値マップ

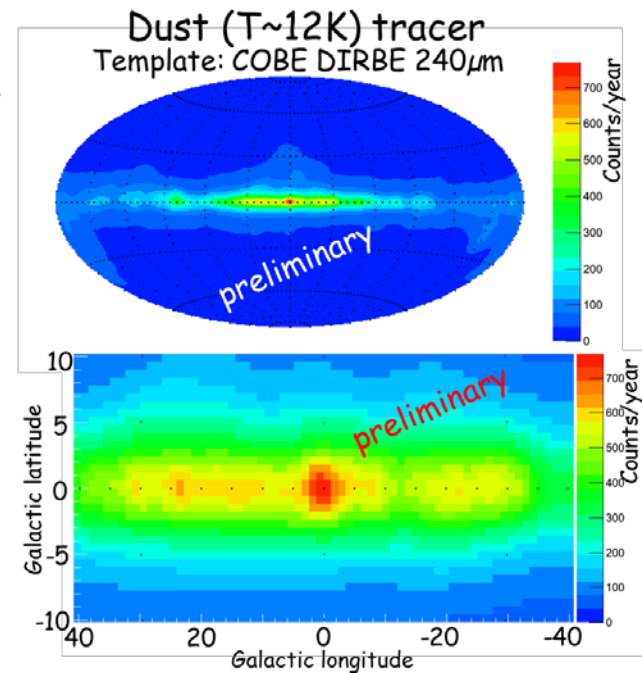
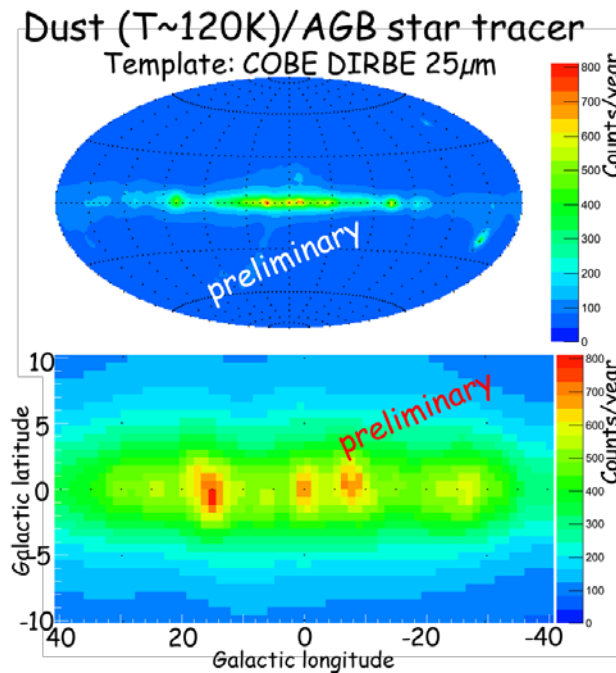
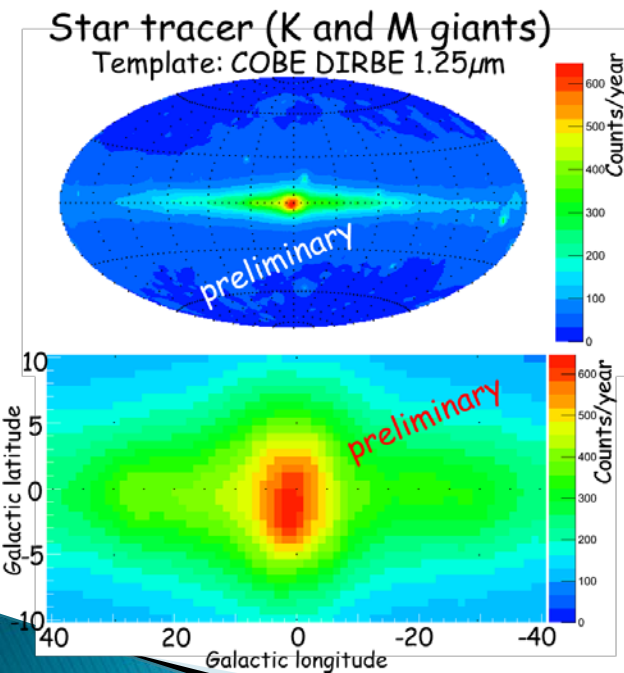


銀河中心領域に有意な超過が期待できる

Expected observation with satellite



Eff. area : 200 cm^2 (zenith direction)
FoV : $2\pi \text{ sr}$
PSF : $\sim 2.3^\circ$ (ARM: 2° & SPD: 10°)
Energy res.: 2.4% @ 1.8 MeV (FWHM)
energy cut: $\pm 3\sigma$ @ 1.8 MeV
orbit: same orbit as Fermi



We can discuss the detail of 1.8 MeV distribution with the PSF of 2 degrees.

電子・陽電子対消滅線

SMILE-2+

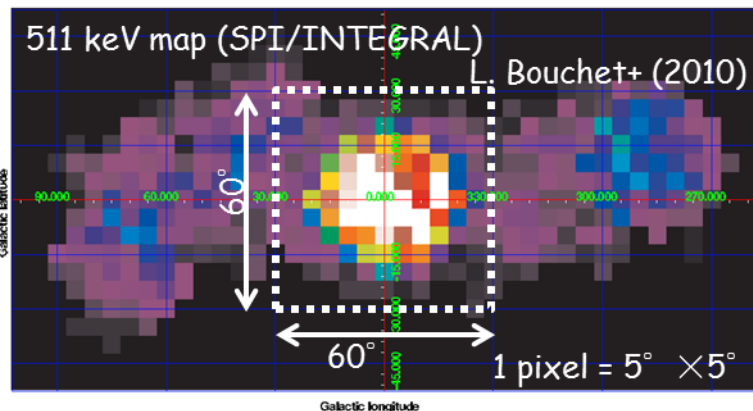
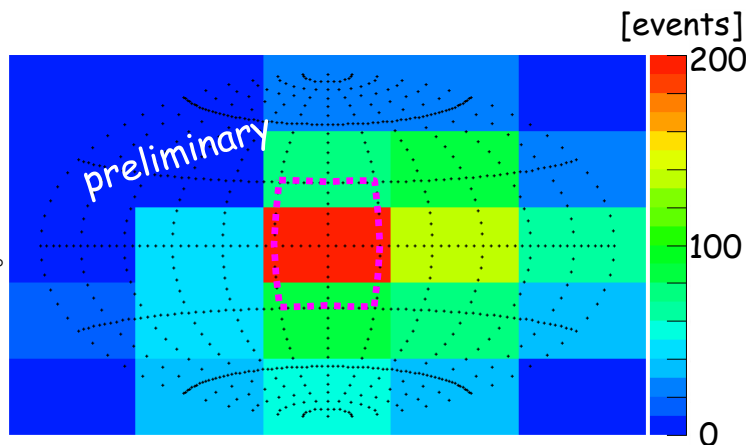
有効面積：
~1.5 cm²

PSF：
6.7°

ARM: 5° SPD: 30°

大気減衰：
3 g/cm²

観測時間：
1 day



SMILE-3

有効面積：
~10 cm²

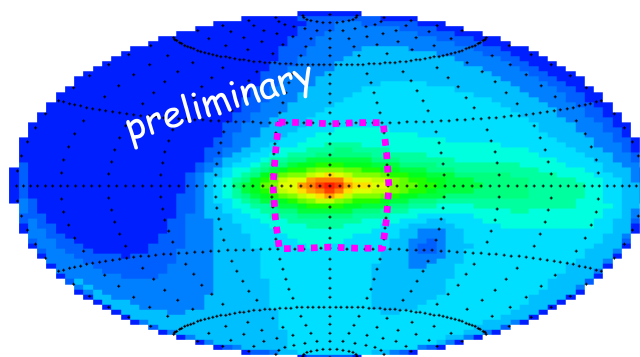
PSF：
6.7°

ARM: 5° SPD: 30°

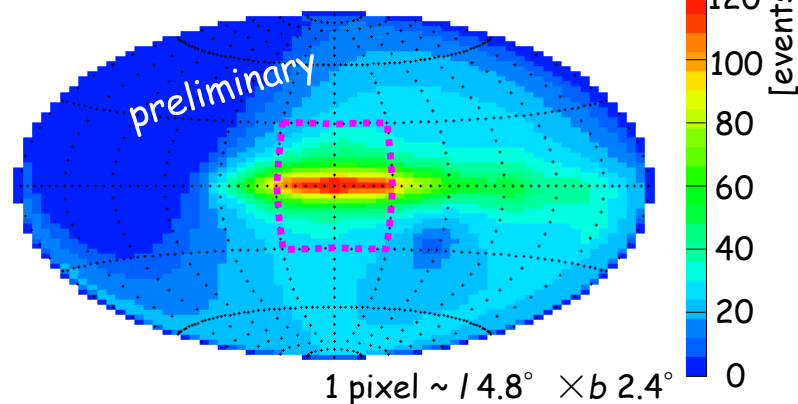
大気減衰：
3 g/cm²

観測時間：
10 days

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



COBE DIRBE 240μm
Dust (T ~12K) tracer



SMILE-2+：銀河中心領域に有意な超過が期待できる
SMILE-3：詳細な分布についての議論が期待できる

まとめ

▶ SMILE-2+/3へupgradeを計画中

- シンチレータをガス容器内部に設置
- シンチレータの厚みを増大

⇒ **PSF・有効面積の向上、広帯域化**

▶ SMILE-2+

有効面積：~2 cm² (<400 keV) PSF：~5度 (662 keV)

観測対象：銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線 @ Alice Springs
かに星雲/Cyg X-1 @ Fort Sumner

▶ SMILE-3

有効面積：~10 cm² (<500 keV) PSF：~5度 (662 keV)

観測対象：銀河面に広がる²⁶Al

電子陽電子対消滅線の銀河面分布 など

▶ 改良に向けて

- ガス検出器の改良： MEMS技術による高ゲイン・高位置分解能 μ -PICの開発 (21aSG-9)
- DAQの改良： ETCCにおけるTPCトリガーでの読み出し回路の開発 (23aSP-4)
- シンチレータの改良： TPCトリガーでの読み出しに向けたMPPCシンチカメラの開発 (23aSP-5)





Thank you for your attention!

<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/wiki>