

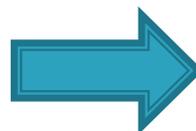


SMILE実験

高田淳史 (京都大学)

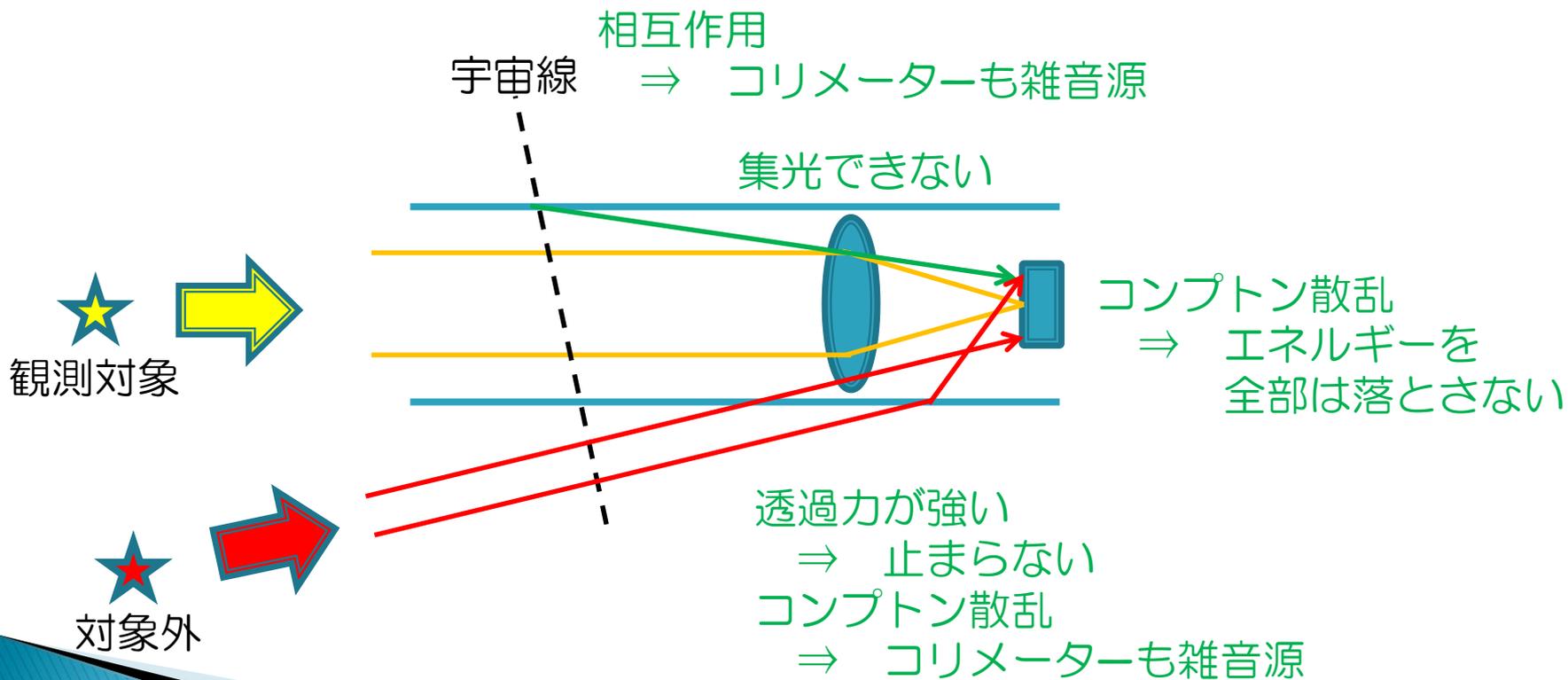
ガンマ線を見る

放射性同位体・原子核の脱励起・粒子の崩壊
対消滅・制動放射・シンクロトロン放射
逆コンプトン散乱 ...etc

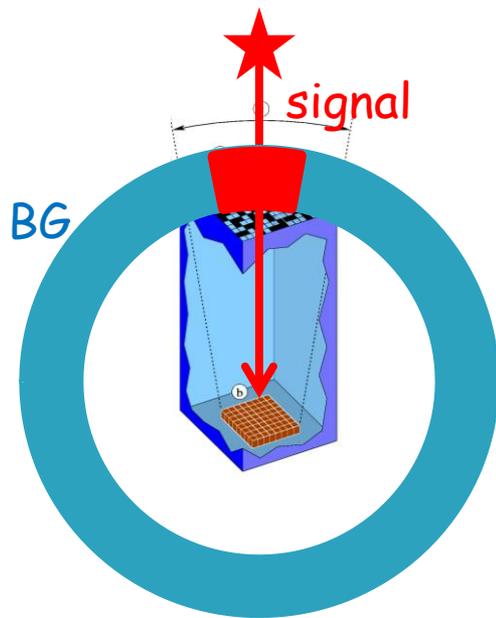


観測対象の
スペクトルだけが見たい

軟ガンマ線にあったイメージング方法が必要



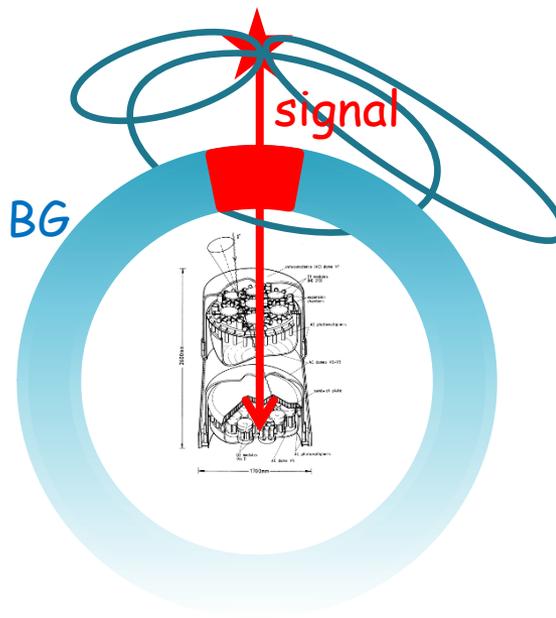
ガンマ線イメージングの問題点



Coded mask

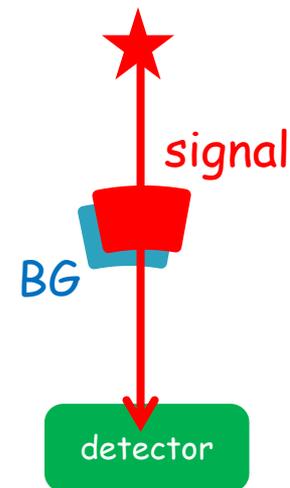
Event毎には
方向の情報がない

到来方向を得るには情報が足りない
⇒ 統計的手法で方向分布を推測



Compton imaging

Event毎には
1角のみ方向情報がある

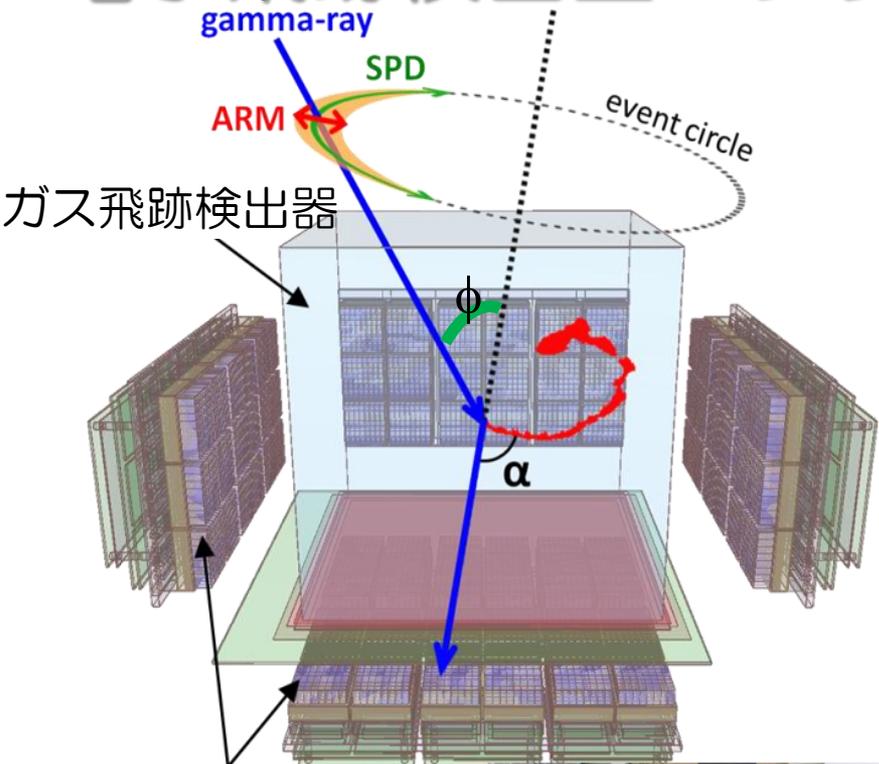


New imaging

Event毎に
2角の方向情報を得る

観測領域に被る
BGだけ考えれば良い
⇒ 大幅にSN比を改善

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



➤ ガス飛跡検出器

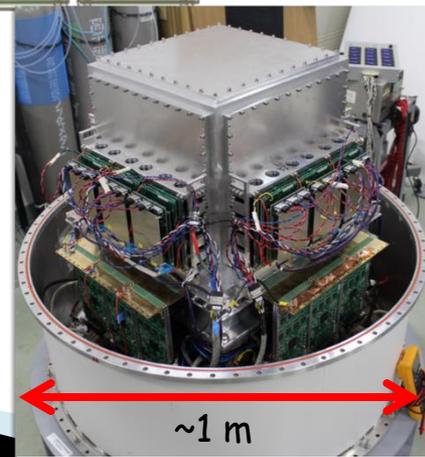
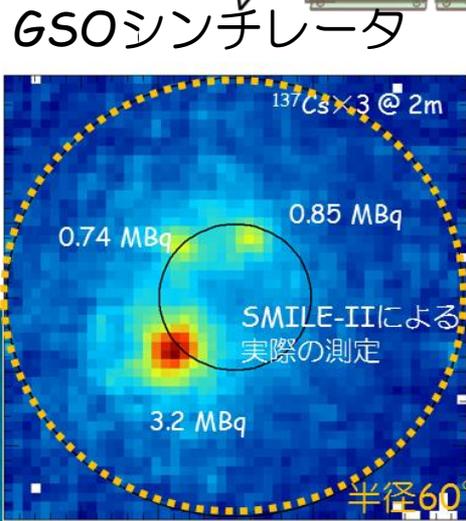
コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

➤ 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



SMILE-II 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

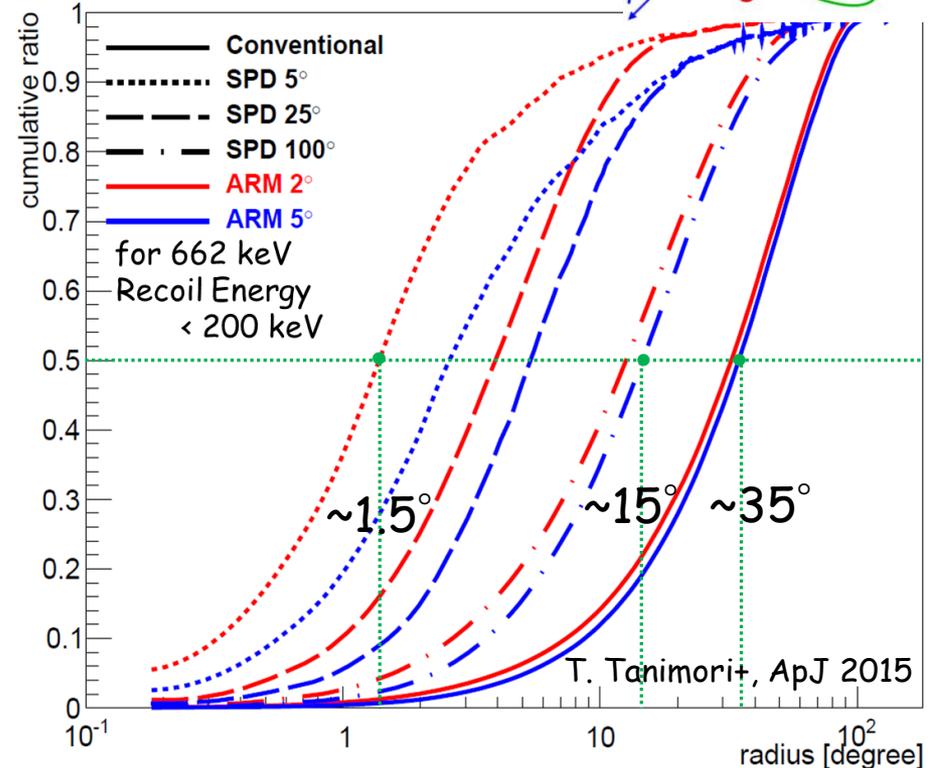
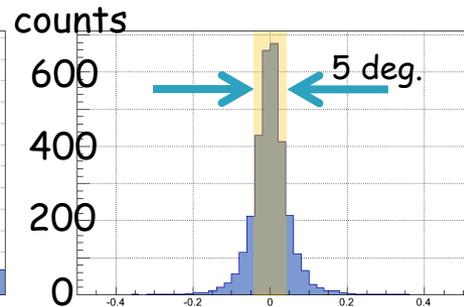
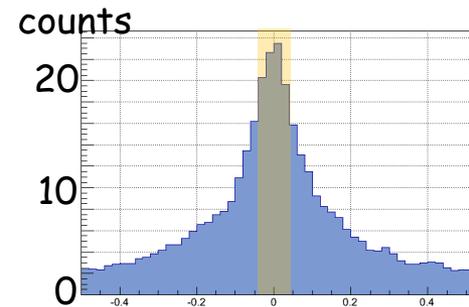
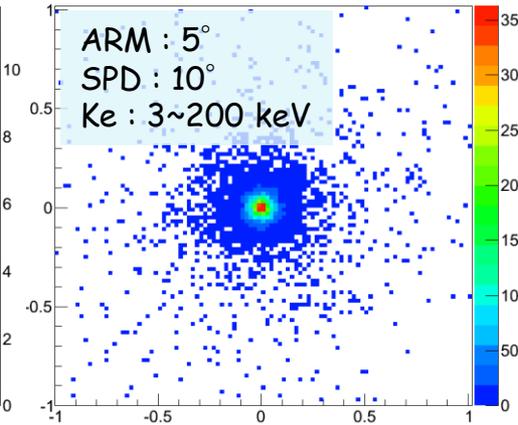
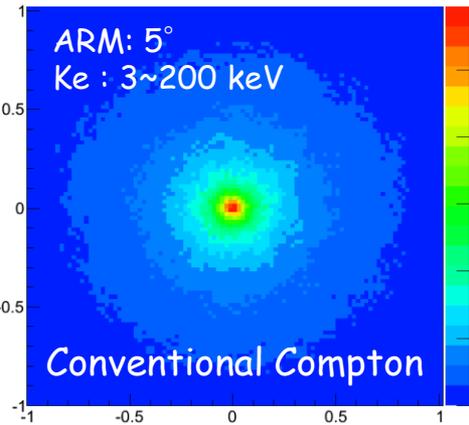
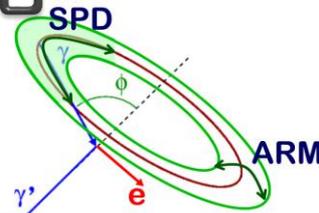
コンプトン望遠鏡の角度分解能

Angular Resolution Measure : コンプトン散乱角の決定精度

Scatter Plane Deviation :

散乱方向を軸とする散乱平面の決定精度

$$\cos \phi = 1 - \frac{m_e c^2 K_e}{E_\gamma (E_\gamma + K_e)}$$



- 散乱角の精度が同じでも反跳方向の精度の違いによってPSFに大きな差
- 反跳方向の精度が悪い ⇒ 測定領域に周囲からの大量のもれこみ
- 高角度分解能 ⇒ ARM ≈ SPD が必須
- 反跳方向の精度 ← 多重散乱でlimit ← 方向決定距離/放射長を小さく
10⁻⁵ 放射長 = Ar: ~1mm, Si: ~1μm

電子の反跳方向を精度良くとらえるにはTPC with MPGDが有利

T. Tanimori+, ApJ 2015

「ガス」検出器であることについて

	ガスTPC		半導体
	Ar 1 atm	CF ₄ 3 atm	Si
電子の数	18	42	14
密度	1.78 mg/cm ³	10.9 mg/cm ³	2.33 g/cm ³
厚み	300 mm		0.5 mm×32層
散乱確率 300 keV	0.507 %	3.26 %	32.5% (1層 : 1.22 %)
散乱確率 600 keV	0.386 %	2.48 %	25.8 % (1層 : 0.930 %)
幾何面積	30×30 cm ²		5×5 cm ²
散乱有効面積 300 keV	4.56 cm ²	29.3 cm ²	8.13 cm ²
散乱有効面積 600 keV	3.47 cm ²	22.3 cm ²	6.46 cm ²

「ガスだから有効面積が小さい」は間違い！！

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 放球せず

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+ 2018年春 Alice Springsから放球

30 cm角, Ar 2気圧

- 明るい天体のイメージングが目標
- 目標 有効面積 : \sim 数 cm^2 @ $< 300 \text{ keV}$
PSF : ~ 10 度 @ 662 keV

511 keV from G.C.

Crab nebula @ Alice Springs

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

1st balloon experiment (SMILE-I)

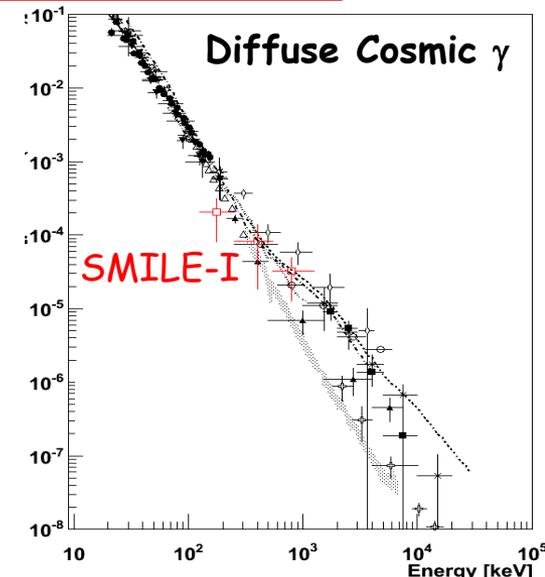
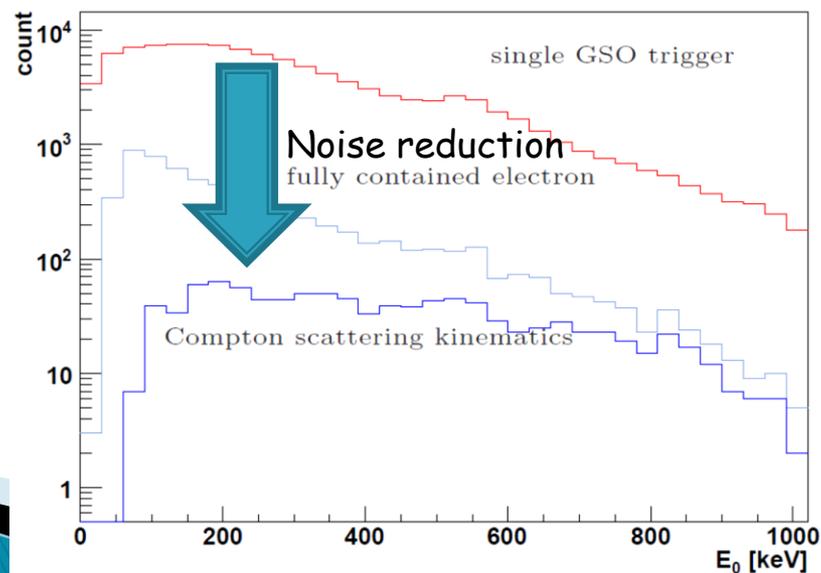
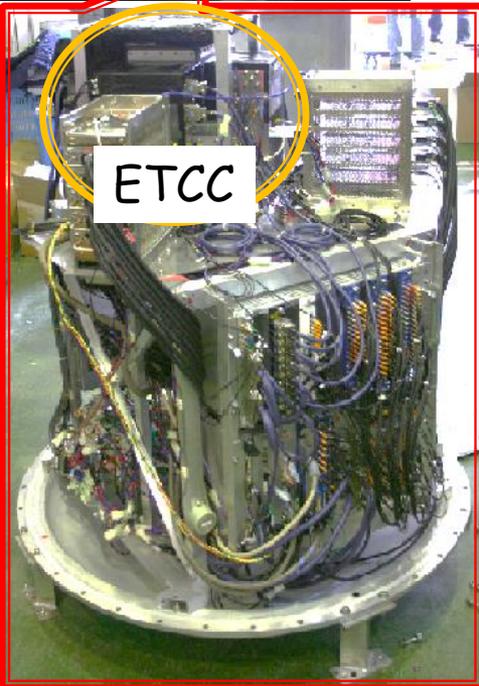
Sub-MeV gamma-ray imaging Loaded-on-balloon Experiment

Launched on Sep. 1, 2006 @ Sanriku (ISAS/JAXA)

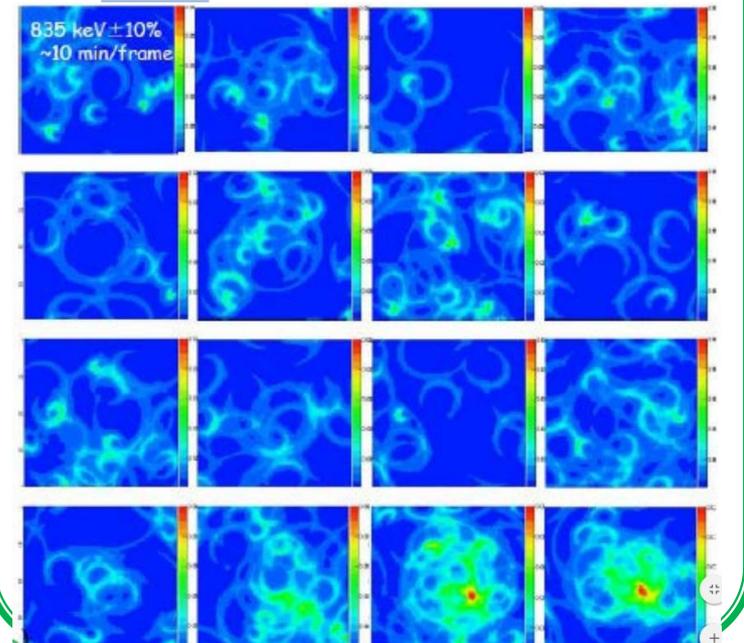
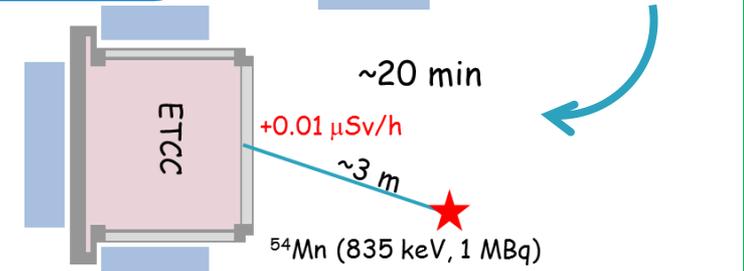
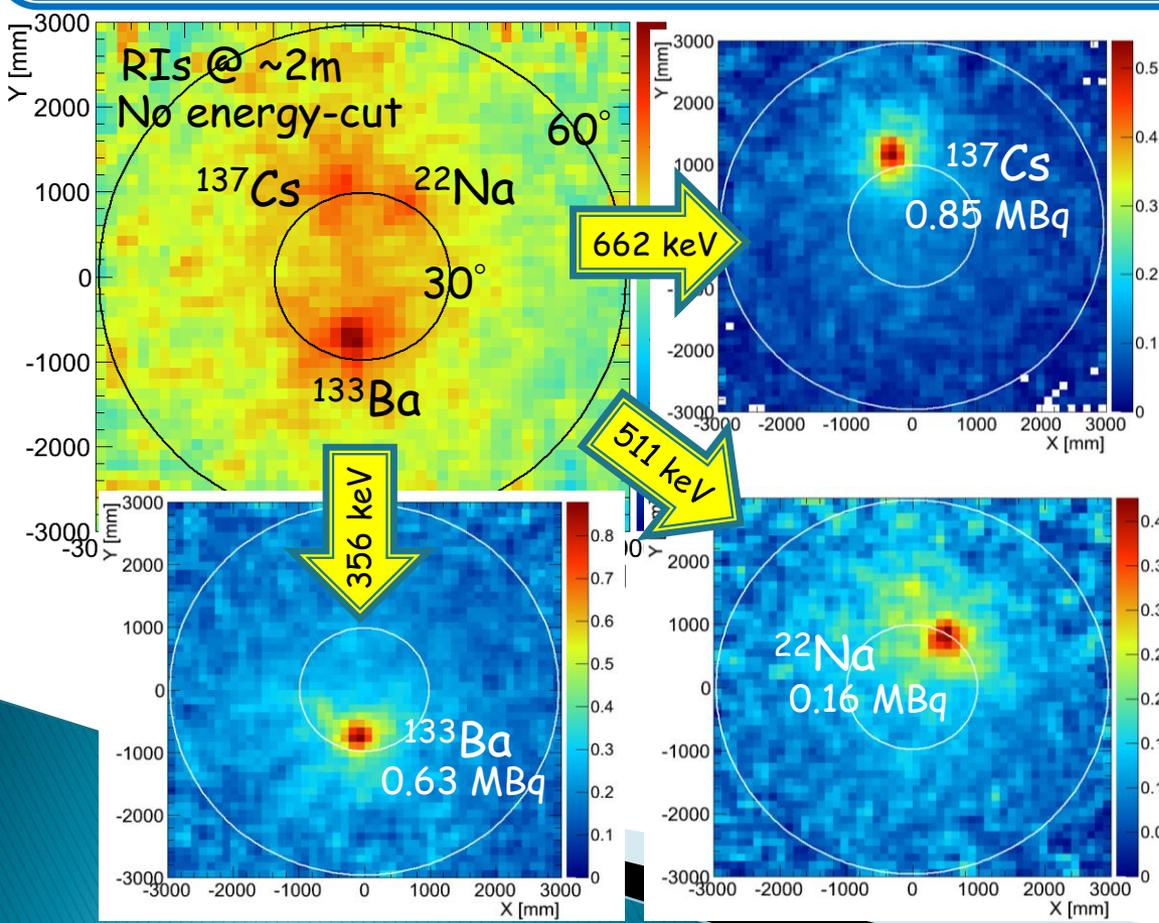
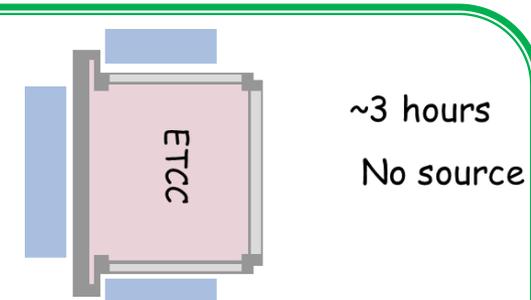
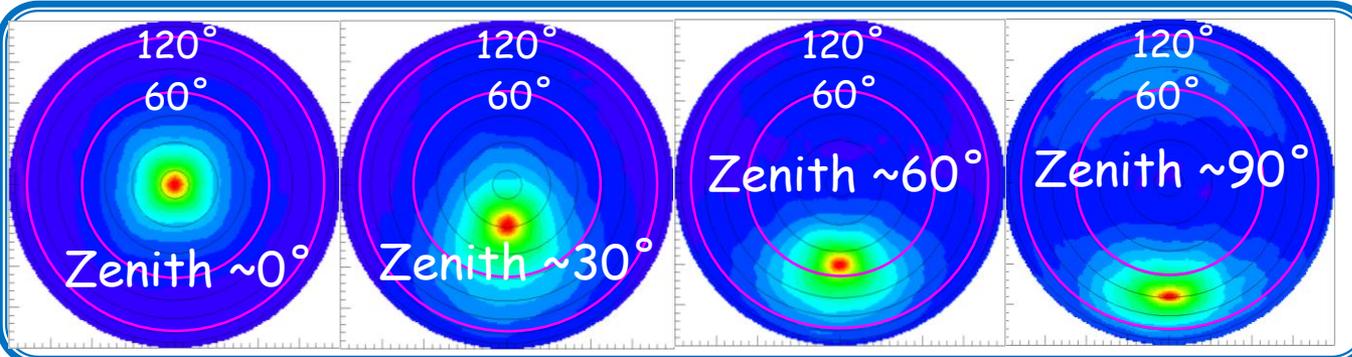
- Test flight using (10 cm)³ ETCC
- Measure diffuse cosmic and atmospheric gamma ray
0.1 - 1 MeV, @ 35 km, 3 hours

➔ Measured : 420 events
Simulation : ~400 events (cosmic + atmospheric)
Non-gamma events : < 2%

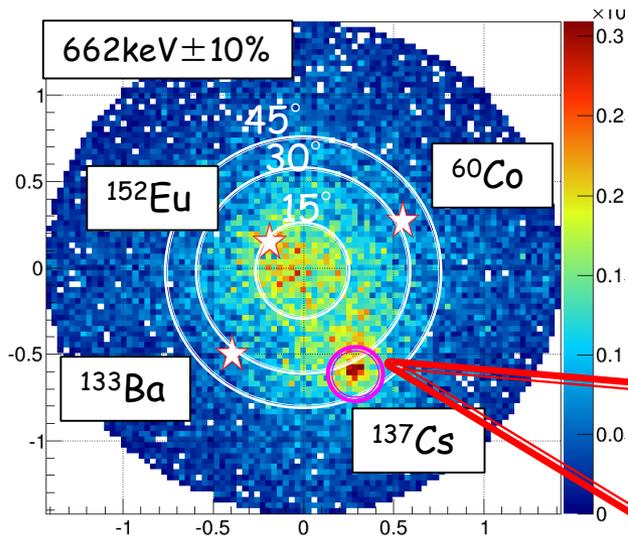
Compton kinematic test and Particle identify
provided low-background observation.



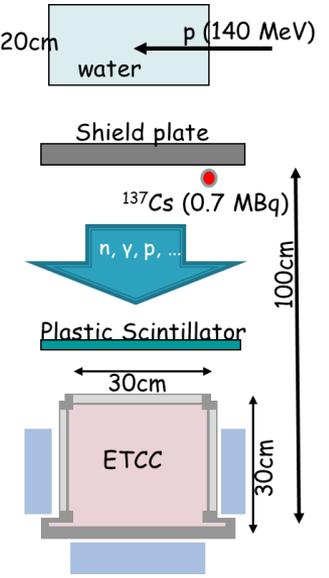
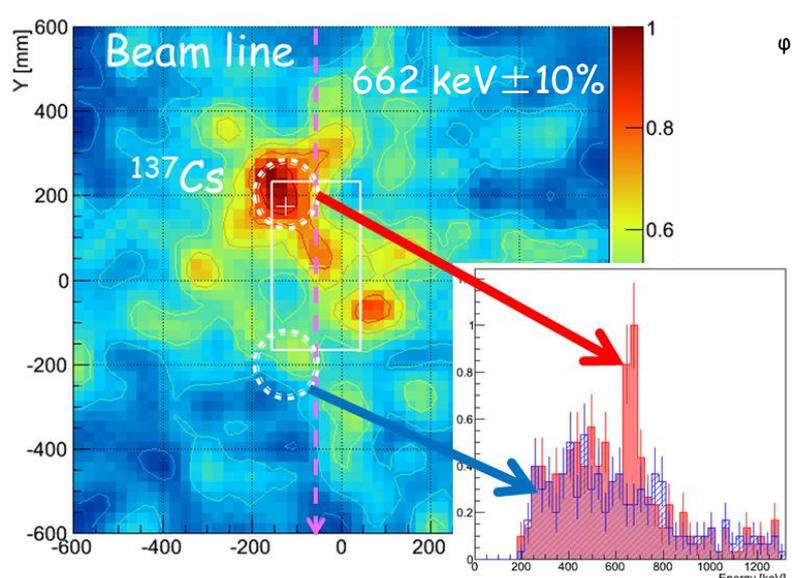
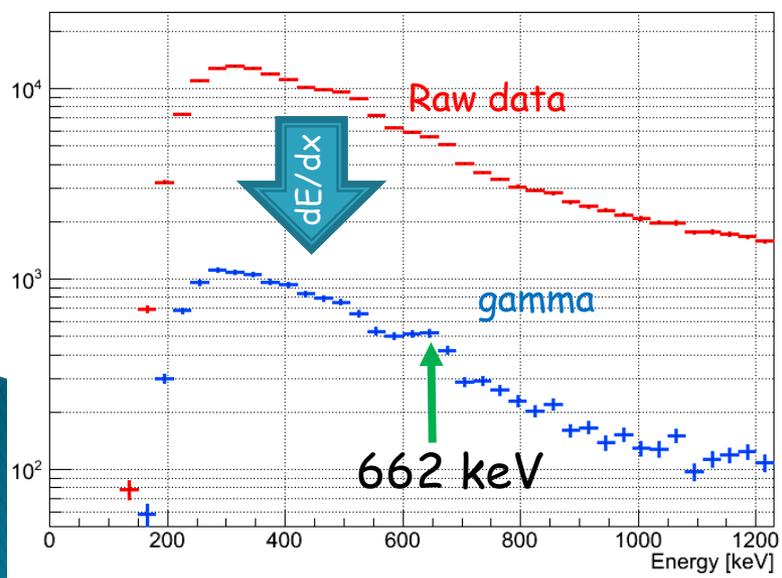
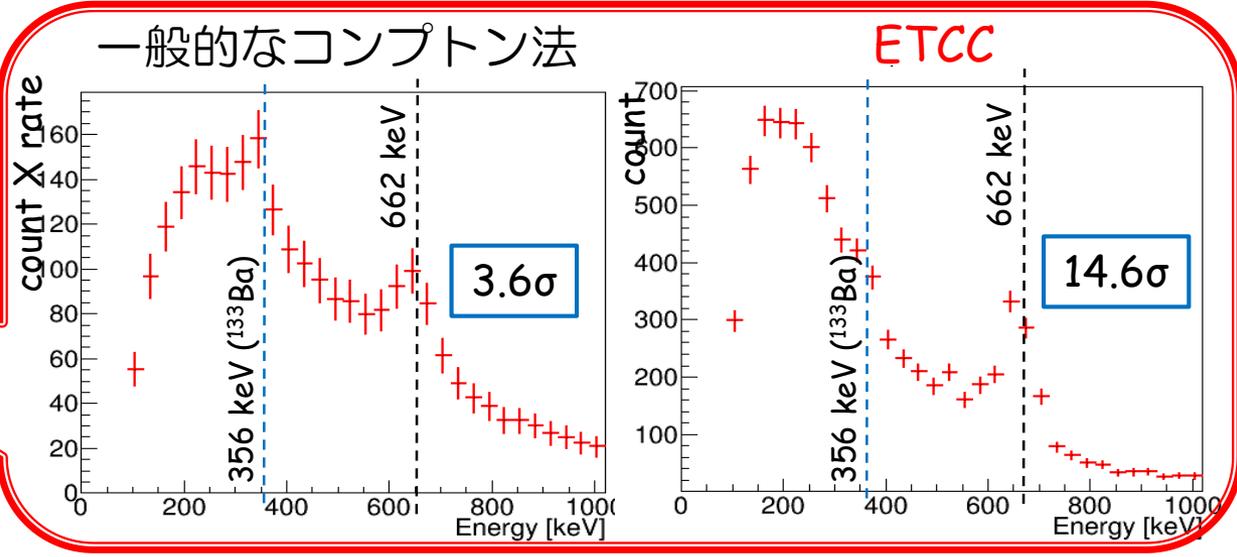
SMILE-II ETCCによるガンマ線検出



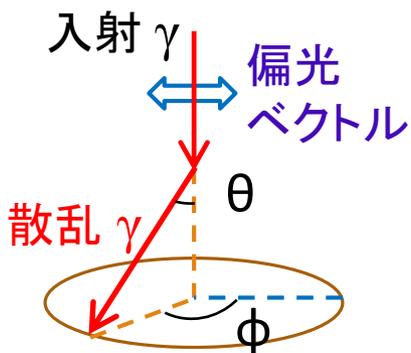
Imaging spectroscopy



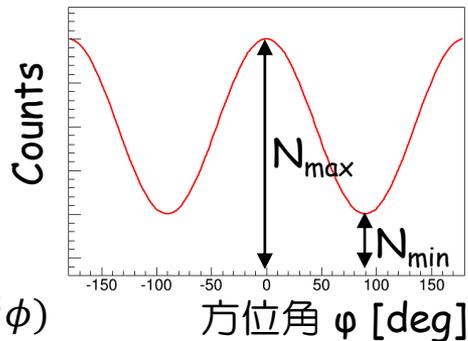
$$^{137}\text{Cs} : ^{152}\text{Eu} : ^{133}\text{Ba} : ^{60}\text{Co} = 1 : 1.4 : 0.73 : 0.56$$



ETCCの偏光検出能力



散乱方向分布の異方性
(Modulation Curve)



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \left(\frac{E_0}{E} + \frac{E}{E_0} - 2\sin^2\theta \cos^2\phi \right)$$

◆ Modulation Factor

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

◆ Minimum Detectable Polarization

$$MDP = \frac{429}{ASM} \sqrt{\frac{AS + B}{T}}$$

雑音除去重要

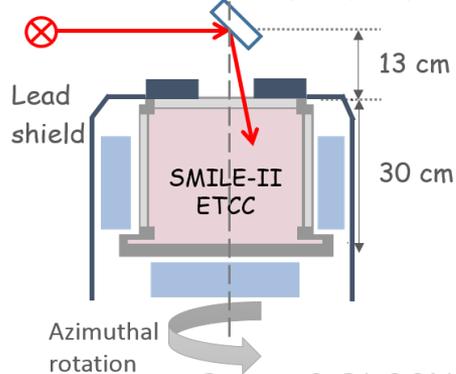
A 有効面積 [cm²]

S 信号レート [cm⁻² sec⁻¹]

T 観測時間 [sec]

B 雑音レート [sec⁻¹]

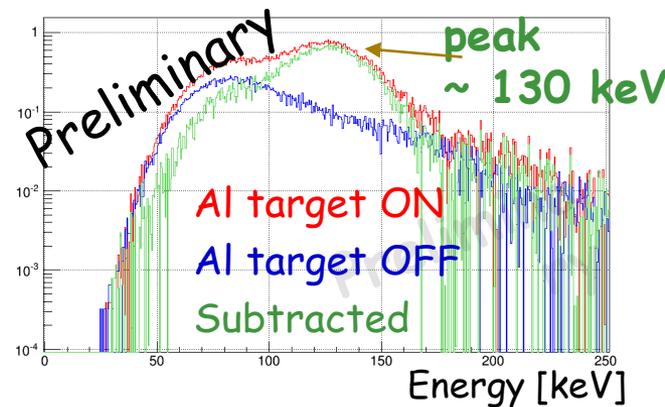
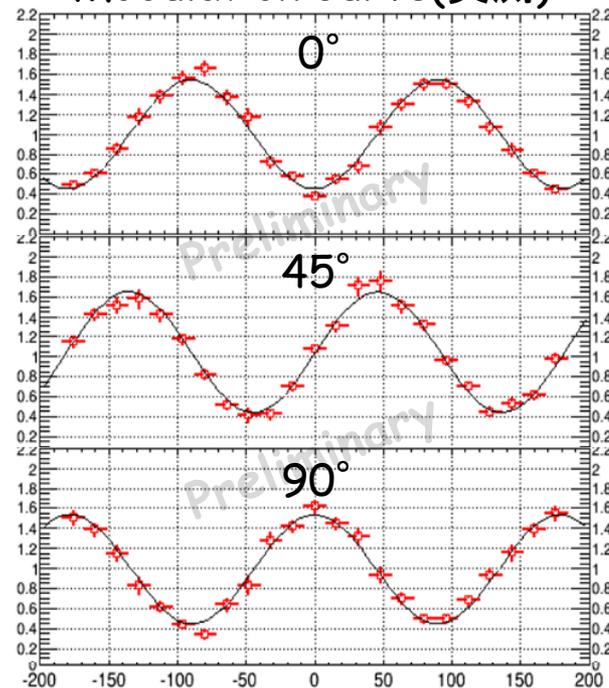
~100% polarized beam 182 keV
Al target 10 x 10 x 1 cm³



SPring-8 BL08W

最大入射角	±21°
エネルギー	123–148 keV (134 keV at 90°)
偏光度	~ 96 %
SN比	1 : 1 (trigger rate)

Modulation Curve(実測)



設定角度 [deg.]	Modulation Factor	測定角度 [deg.]
0	0.57	0.3 ± 1.3
22.5	0.59	-22 ± 1.0
45	0.60	-44 ± 0.7
90	0.57	-90 ± 1.1
180	0.60	-2.3 ± 1.1

SMILE-IIからSMILE-II+へ

▶ 広帯域化・PSFの向上

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
~50 keVの電子が受ける
多重散乱は~100度

◆ 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
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

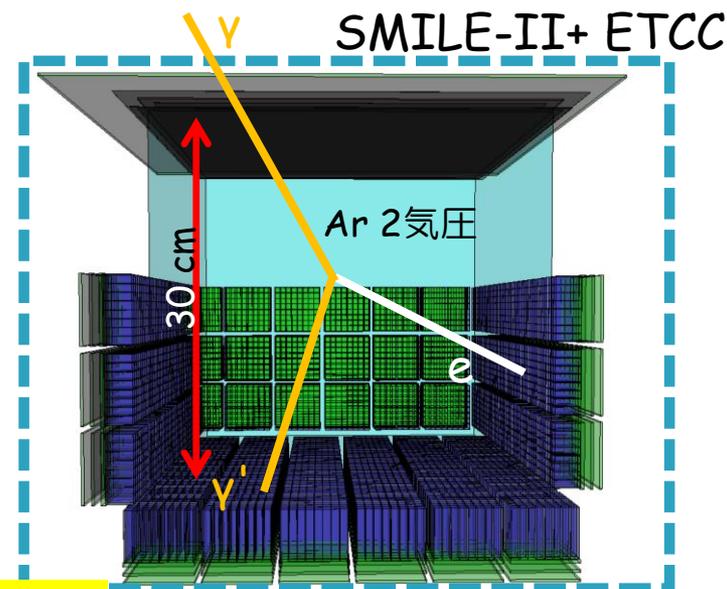
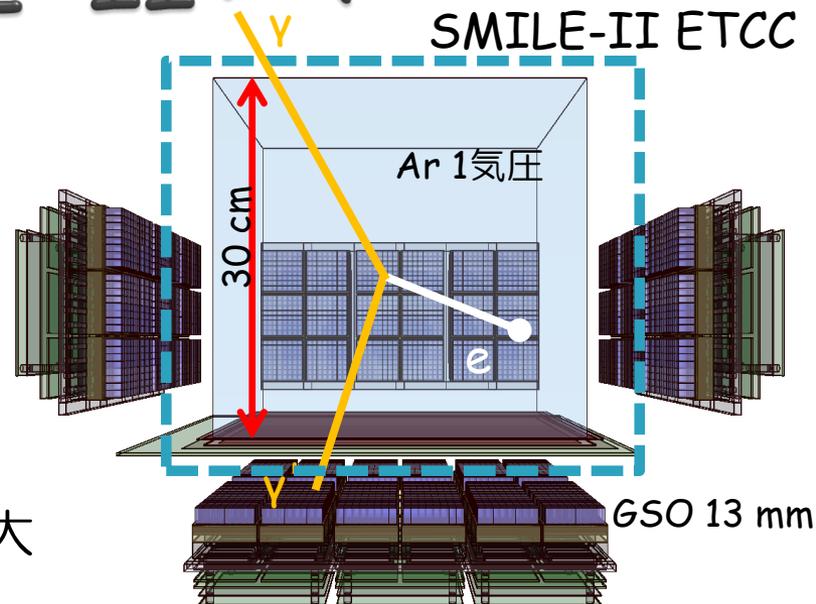
◆ ガス容器内にGSOを設置

⇒ シンチ間の隙間が激減

▶ 安定性・不感時間

◆ ガス純化の純化システム

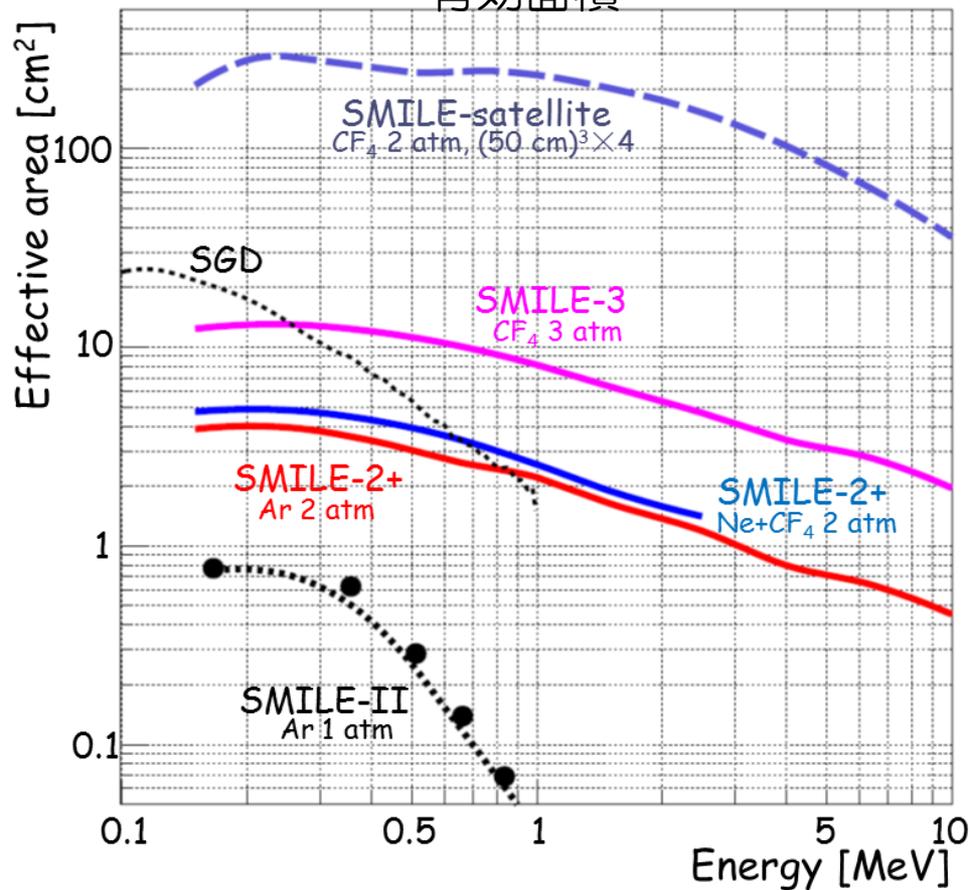
◆ Ethernetによる高速DAQ



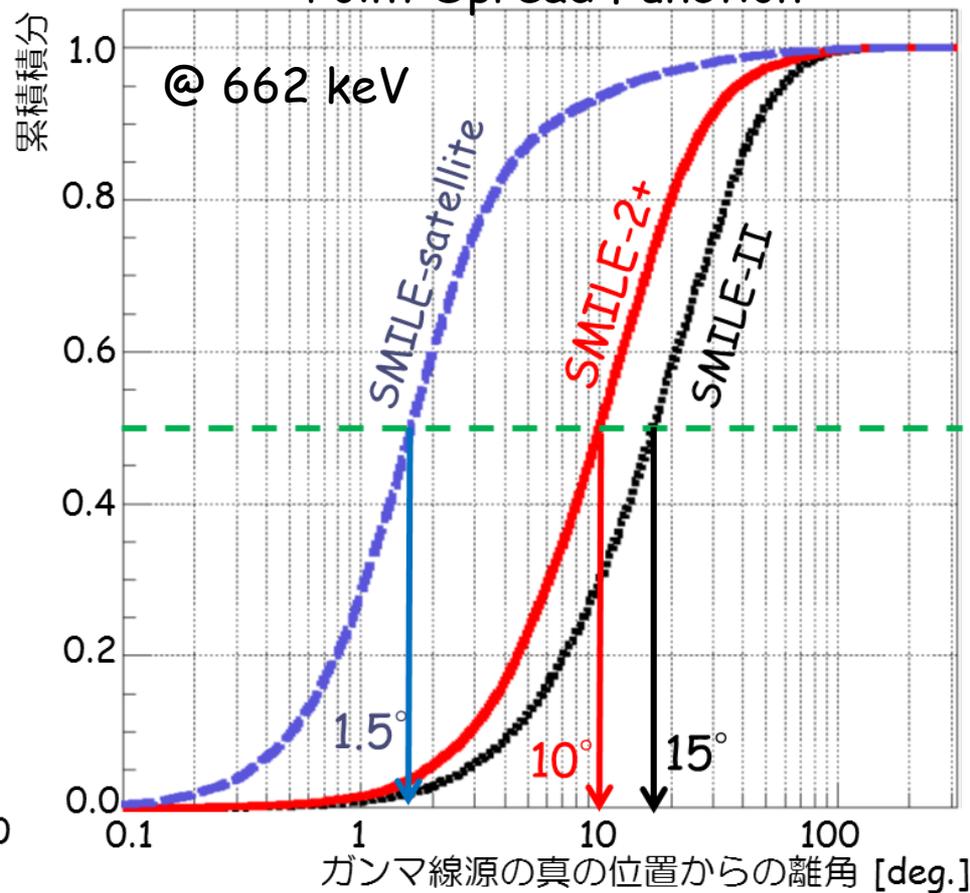
SMILE-2+はISASの2018年蒙州気球に採択されました

有効面積とPSF

有効面積

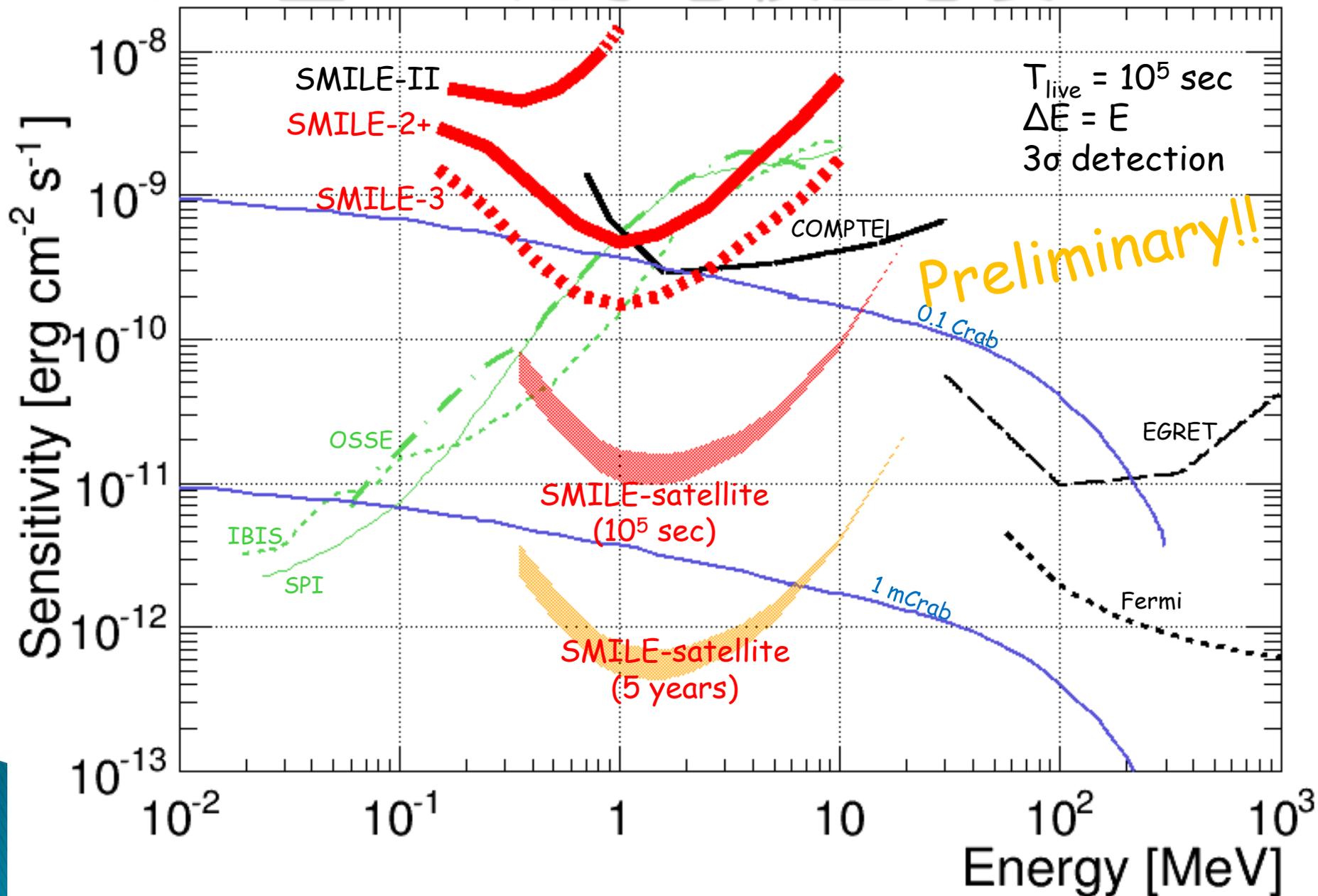


Point Spread Function



Satellite : ARM 2° SPD 5°
 SMILE-2+ : ARM 6° SPD 50°
 SMILE-II : ARM 6° SPD 100°

PSFに基づいた予想検出感度



電子・陽電子対消滅線

SMILE-2+

有効面積:

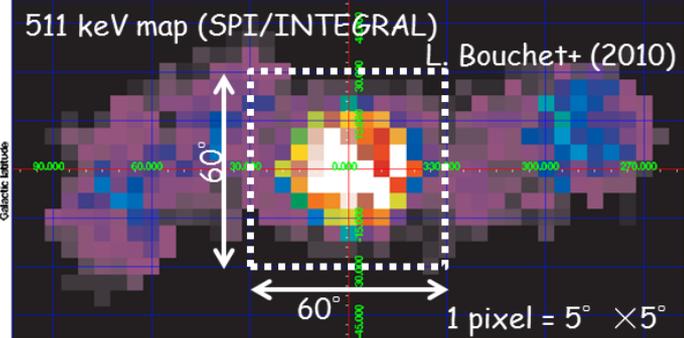
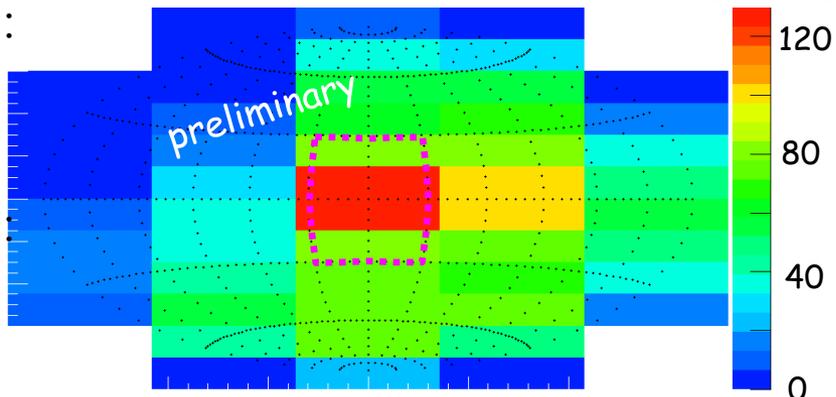
$\sim 3 \text{ cm}^2$

PSF:

$\sim 10^\circ$

観測時間:

1 day



SMILE-3

有効面積:

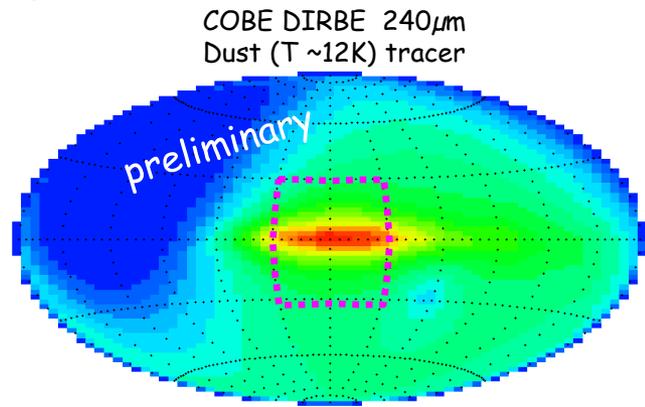
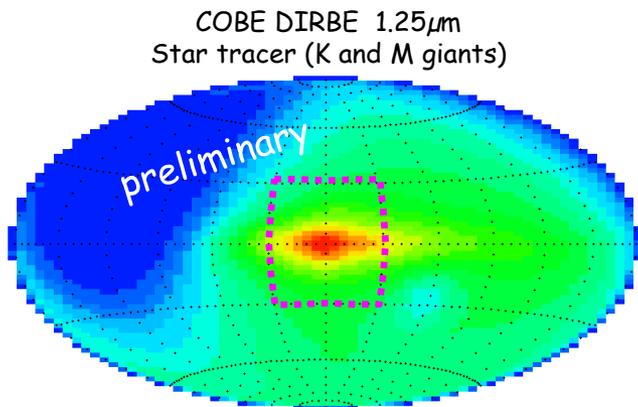
$\sim 10 \text{ cm}^2$

PSF:

$\sim 7^\circ$

観測時間:

30 days



Satellite

有効面積:

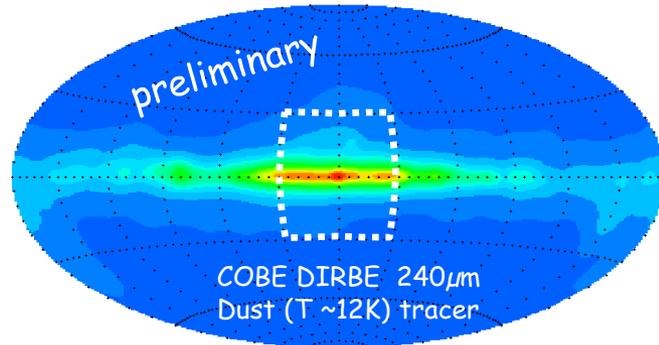
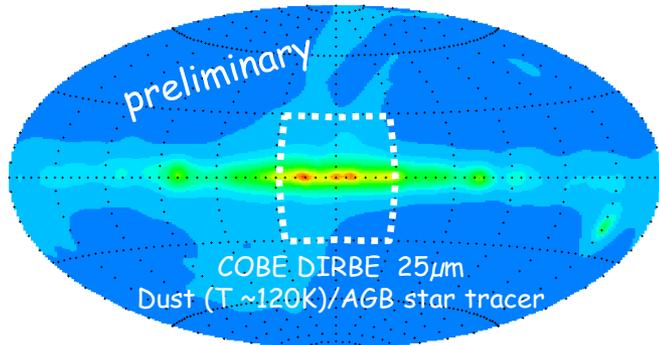
$\sim 200 \text{ cm}^2$

PSF:

4.5°

観測時間:

1 year

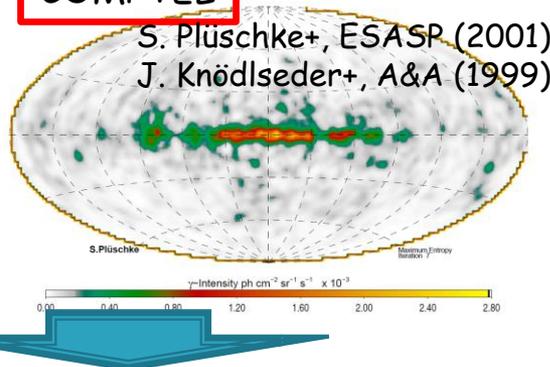


SMILE衛星での ^{26}Al (1.8 MeV)観測予測

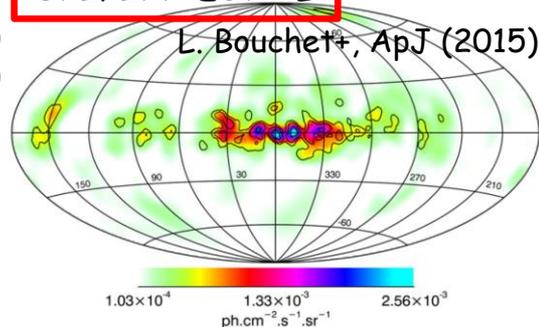
- AGB星
- Wolf-Rayet星
- II型超新星爆発
- 新星のアウトフロー

主要な
生成源は？

COMPTTEL



SPI/INTEGRAL

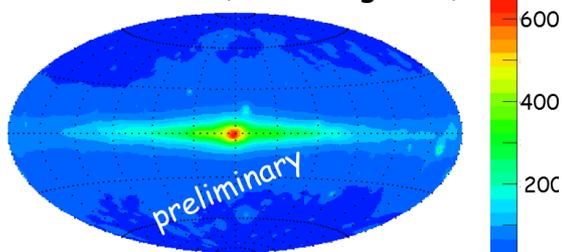


$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + \gamma$ (1.809 MeV)
lifetime 7×10^5 years

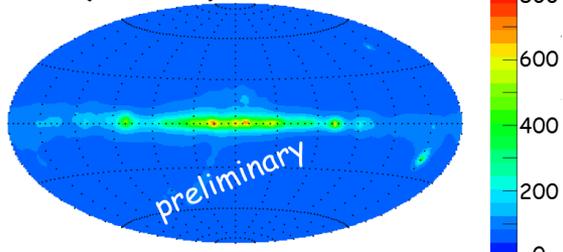
SMILE-satelliteによる観測事象数期待値マップ

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

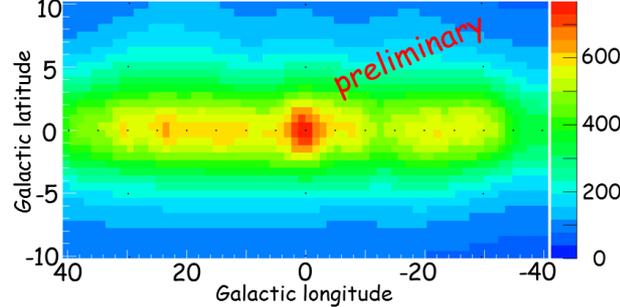
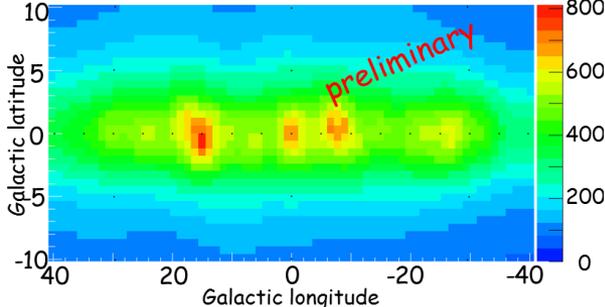
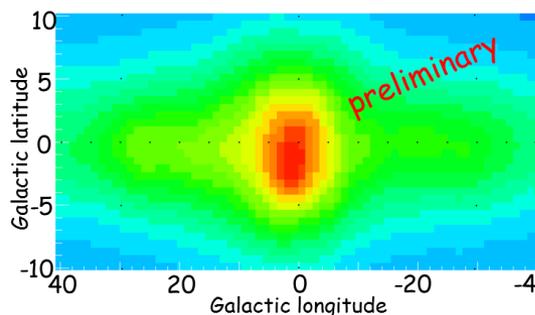
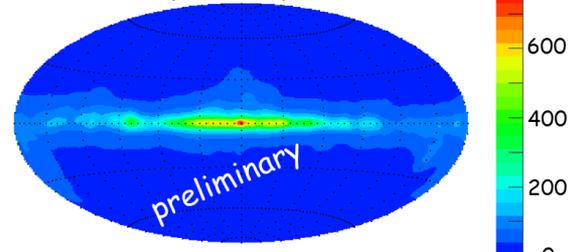
COBE DIRBE $1.25 \mu\text{m}$
Star tracer (K and M giants)



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

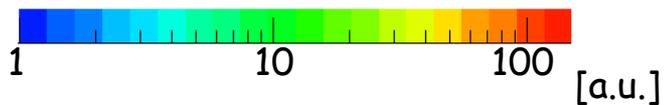
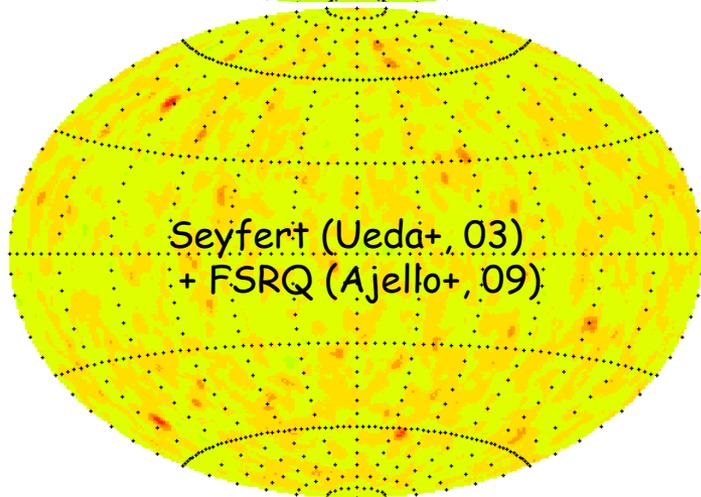
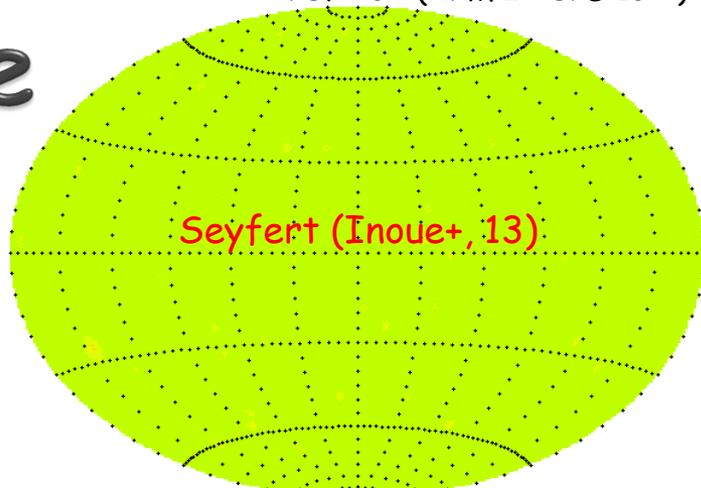
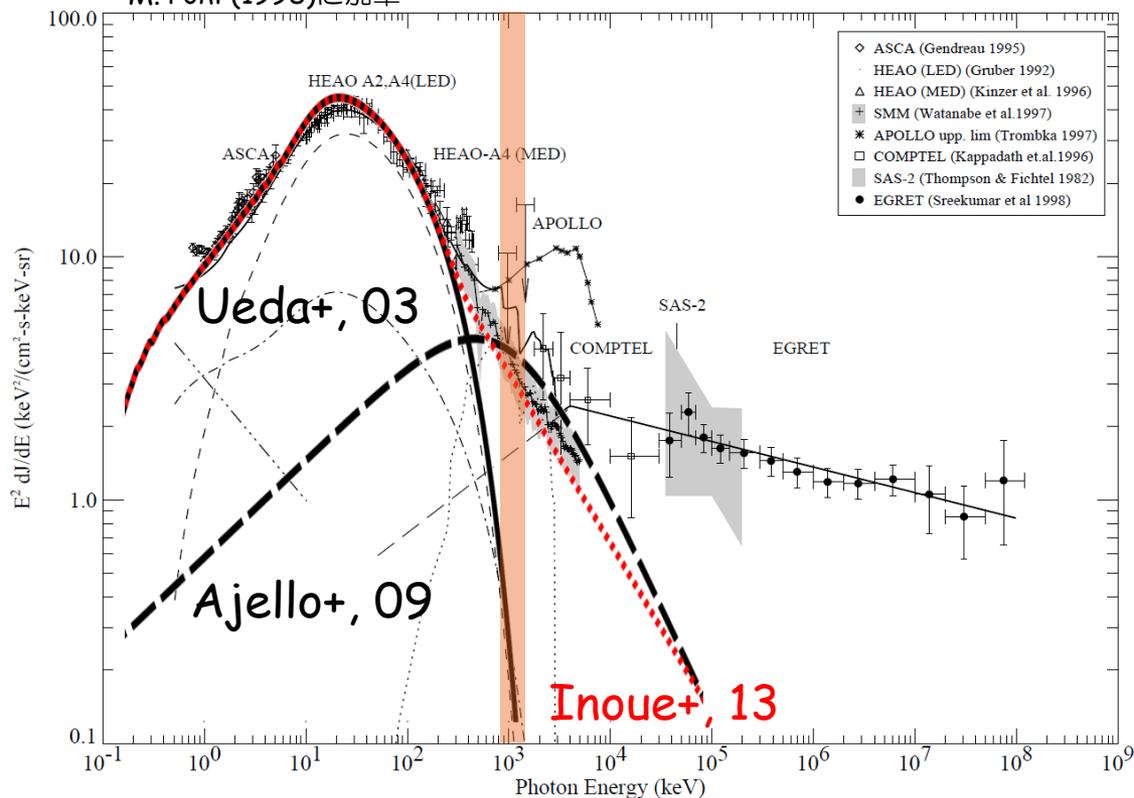


- $\sim 2^\circ$ のPSFが実現できれば ^{26}Al の分布について詳細な議論が可能に
- ^{60}Fe や電子陽電子対消滅線など他のラインガンマ線の分布も大幅な改善が期待できる

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

まとめ

- ▶ MeVガンマ線天文学を進めるには
PSFの正確な見積もりに基づくイメージング分光が必須
⇒ コンプトン反跳電子の方向測定は必須

- ▶ SMILE-2+/3へのupgradeを進行中
 - 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： $\sim 5 \text{ cm}^2$ ($< 400 \text{ keV}$) PSF： ~ 10 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, かに星雲

2018年春 Alice Springs から放球

- ▶ SMILE-3

有効面積： $\sim 10 \text{ cm}^2$ ($< 500 \text{ keV}$) PSF：5~10度 (662 keV)

観測対象：銀河面に広がる ^{26}Al

電子陽電子対消滅線の銀河面分布 など

- ▶ Satellite

気球実験の結果を踏まえて衛星へ

有効面積： $\sim 200 \text{ cm}^2$ PSF：数度





Thank you for your attention!

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