



SMILE

高田 淳史 (京大理)

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) :

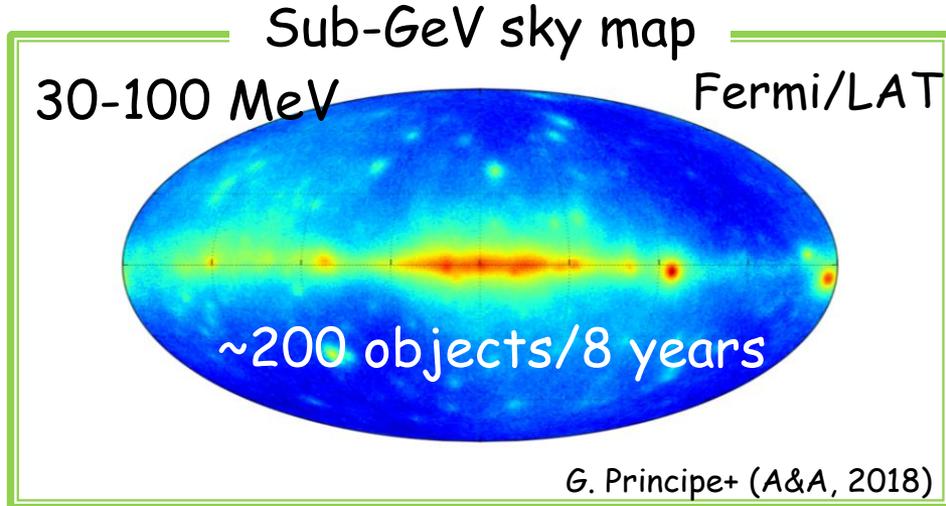
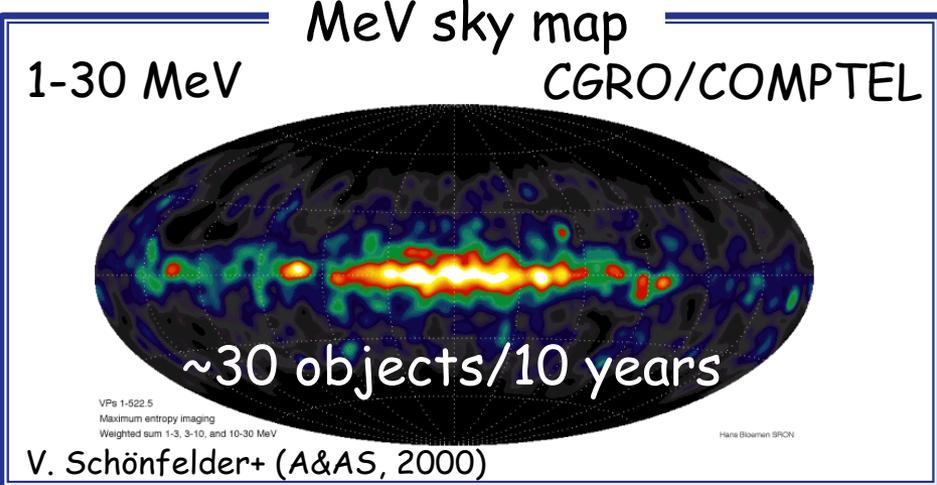
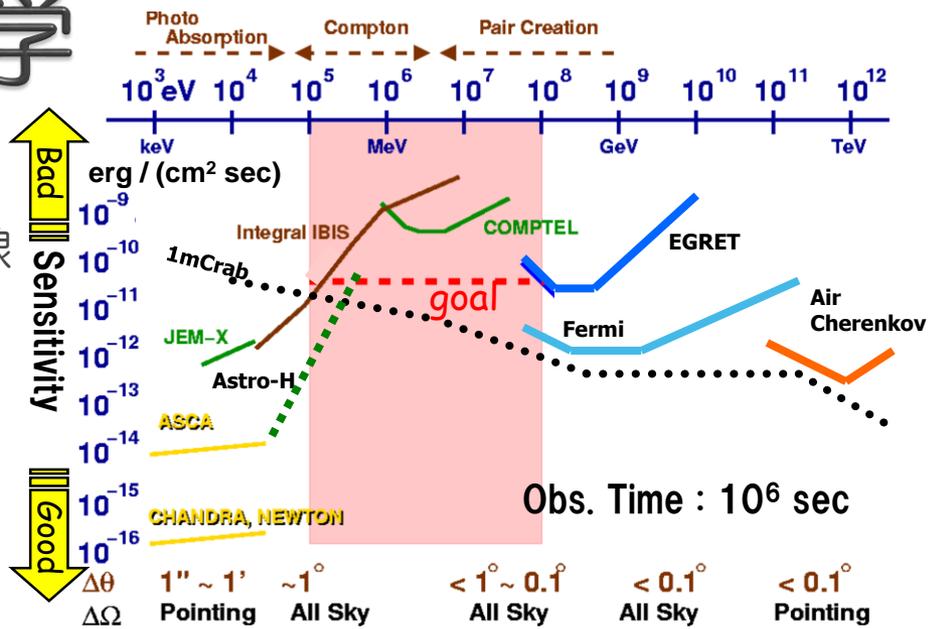
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 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

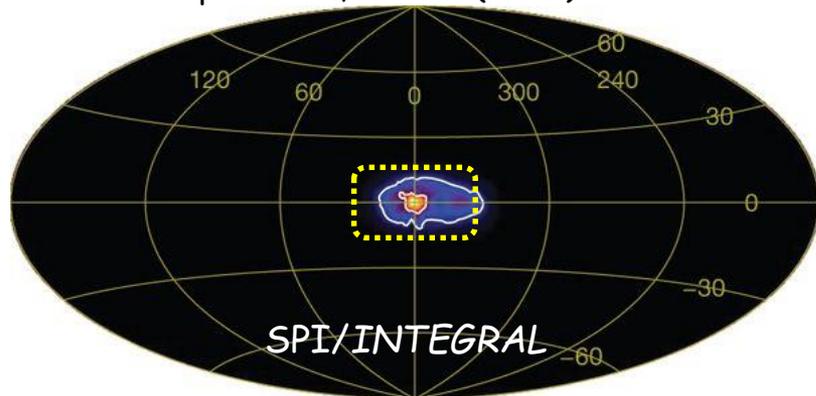


次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

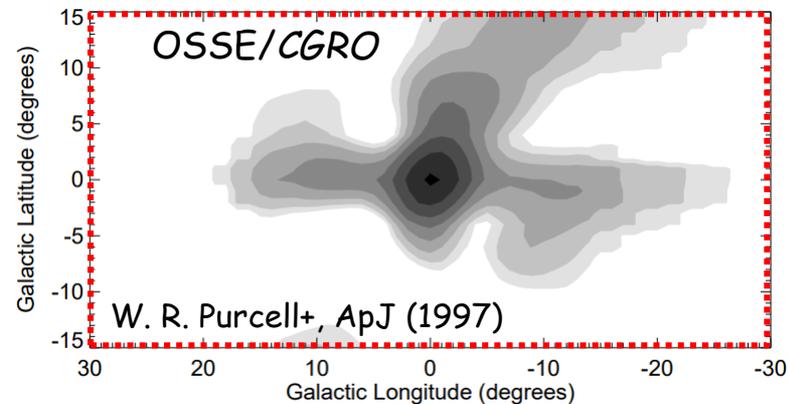
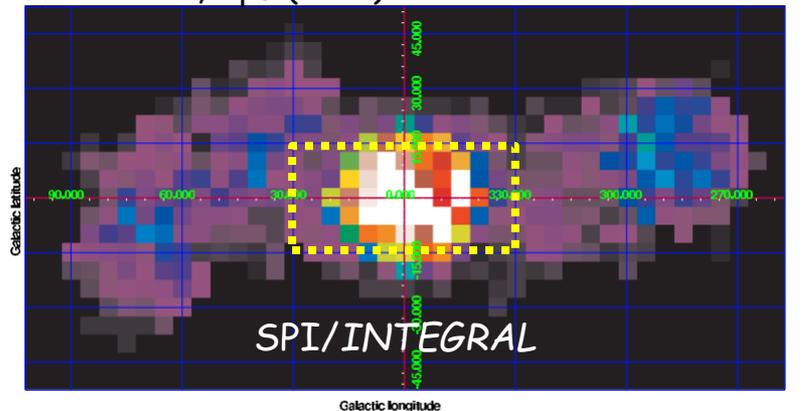
- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為の広い視野
- 高S/Nの鮮明な画像

電子陽電子対消滅線

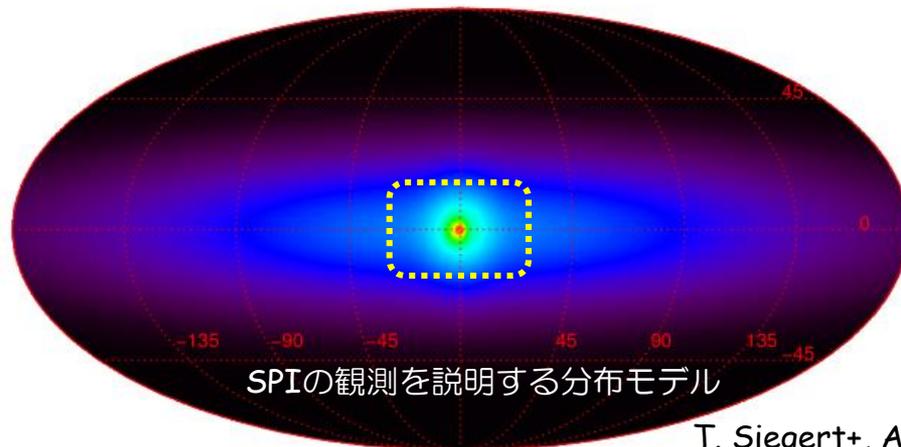
G. Weidenspointner+, Nature (2008)



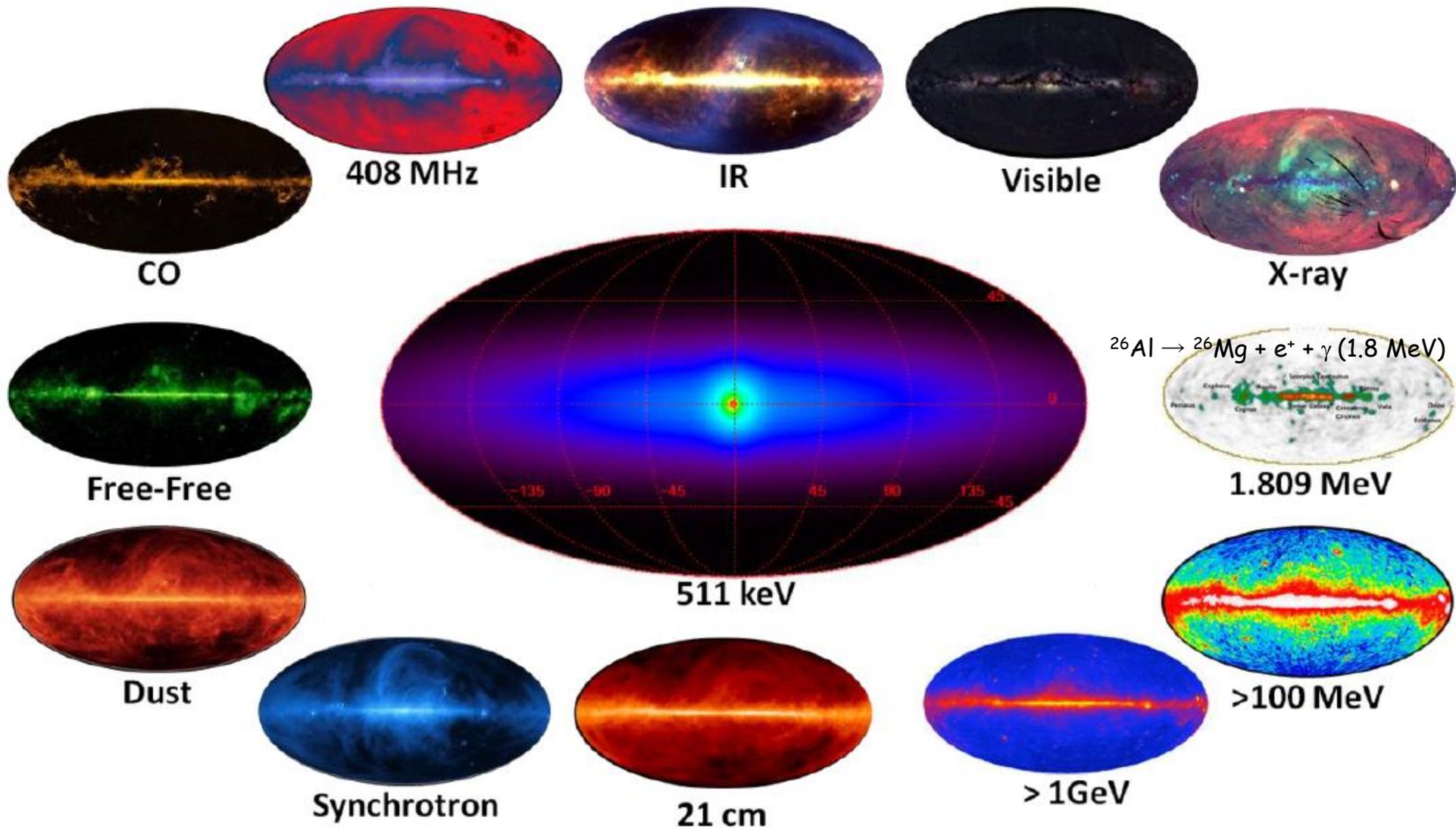
L. Bouchet+, ApJ (2010)



- 銀河面に垂直に伸びるような分布はない
- 銀河面方向には一時非対称性が噂された
⇒ その後否定
- これまでの観測を尤もらしく説明する分布モデルが提案された
- 対消滅線を生成する陽電子の>90%は **positronium**による対消滅
- 陽電子の生成から対消滅までに動いている?
- ^{26}Al は明らかに生成に寄与、だが足りない



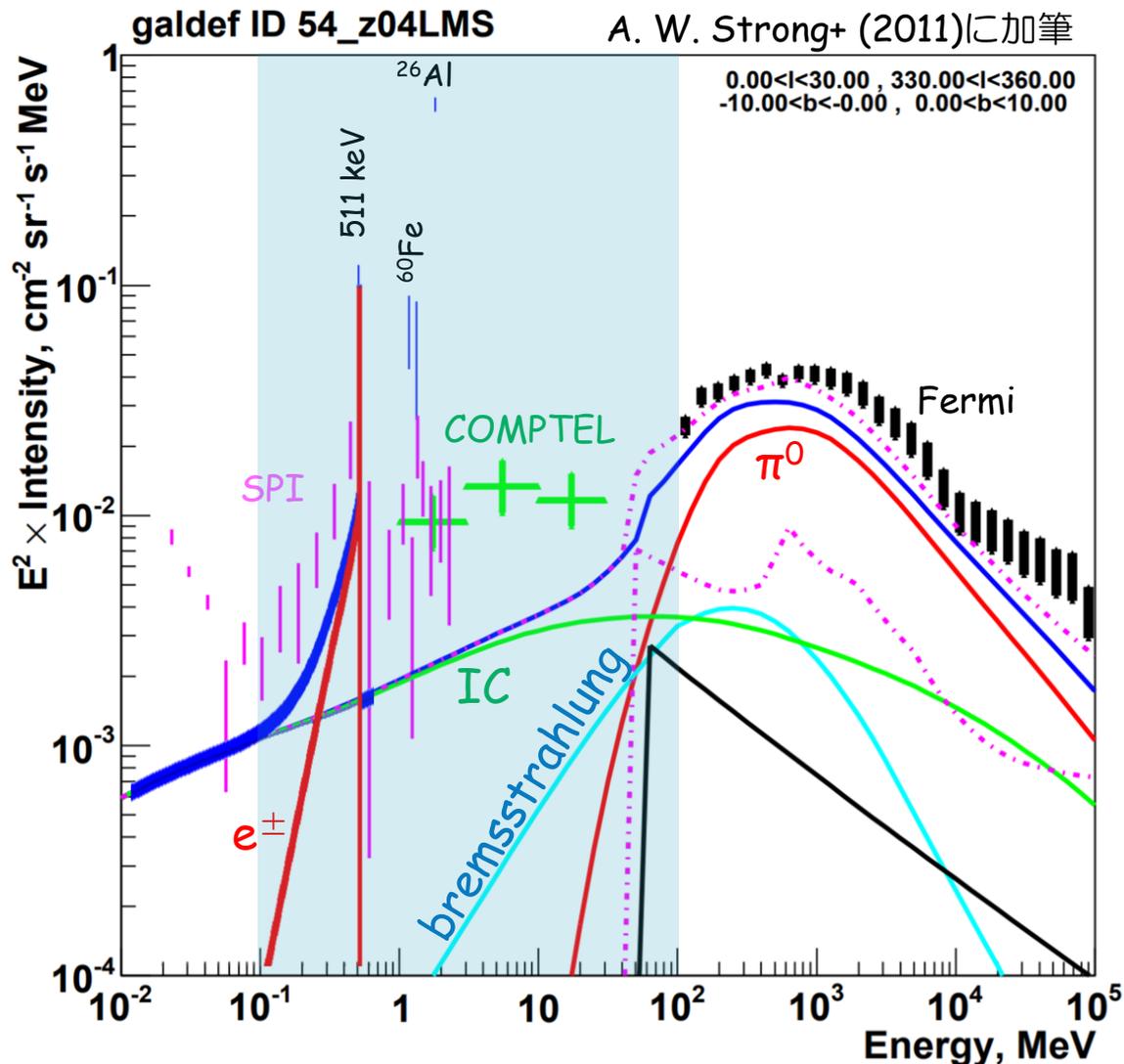
T. Siegert+, A&A (2016)



T. Siegent氏スライドより

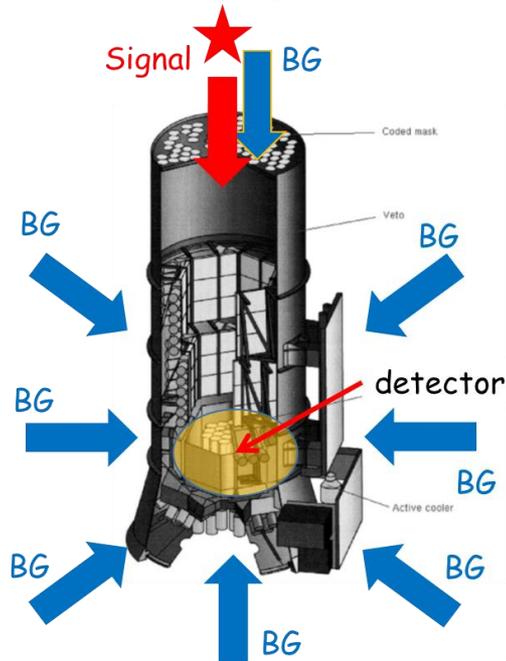
系内拡散ガンマ線

- 銀河面に広がる放射は MeV領域にも存在
- MeV領域の放射起源について深い議論はされていない
 - ← 観測の信頼度不足
- 宇宙線電子による逆コンプトンと観測値には乖離がある
 - 空間分解されていない天体の集合体？
 - 宇宙線で励起された原子核からの脱励起線？
 - 他の何か？



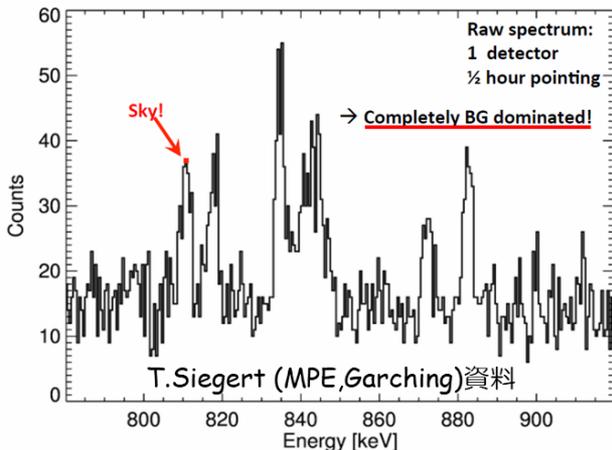
MeVガンマ線観測の問題点と解決方法

SPI/INTEGRAL

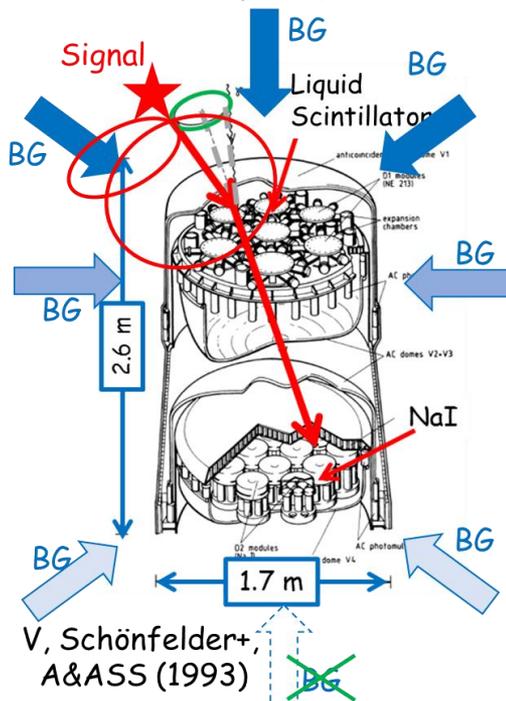


F. Sánchez+, NIM A (2003)

BGを含む統計量で方向検出

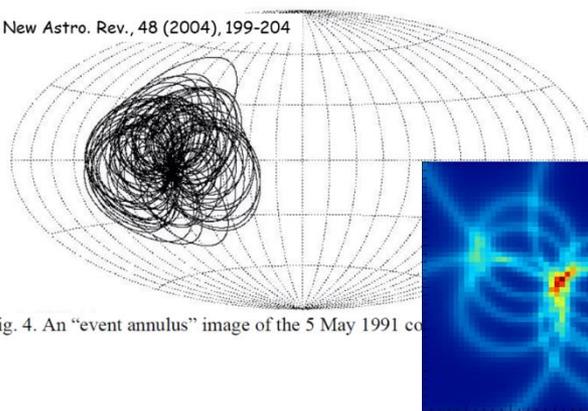


COMPTEL

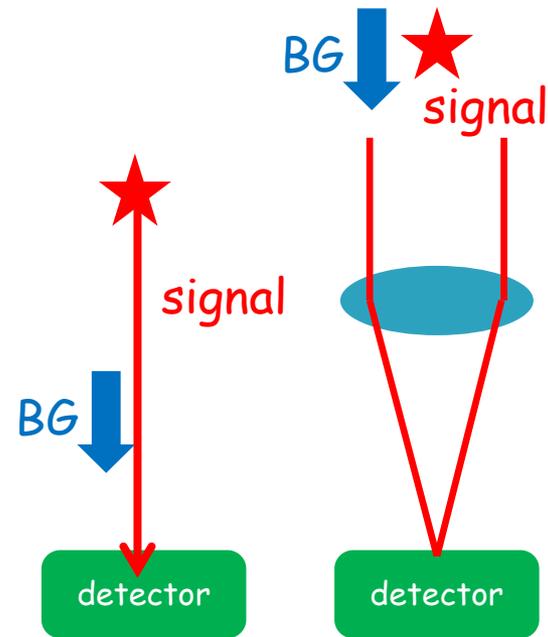


PSF ~ 平均的な散乱角

Ryan, New Astro. Rev., 48 (2004), 199-204



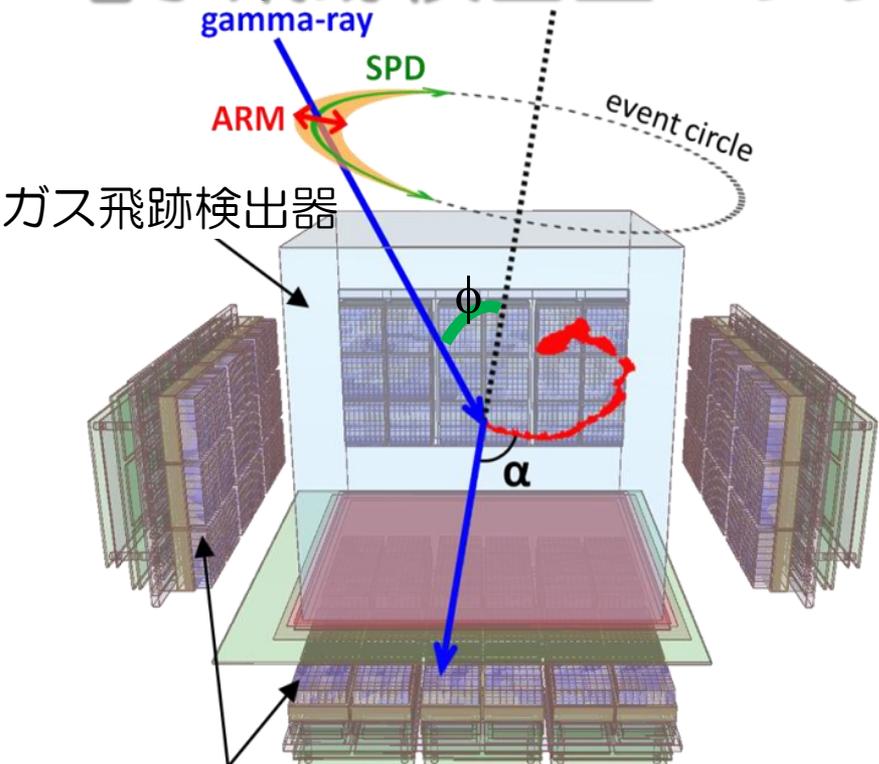
event毎に方向検出



PSF ~ 方向の決定精度

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

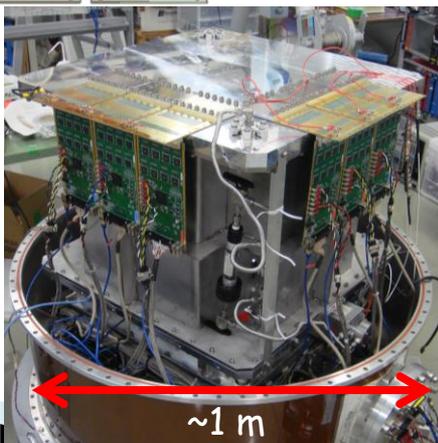
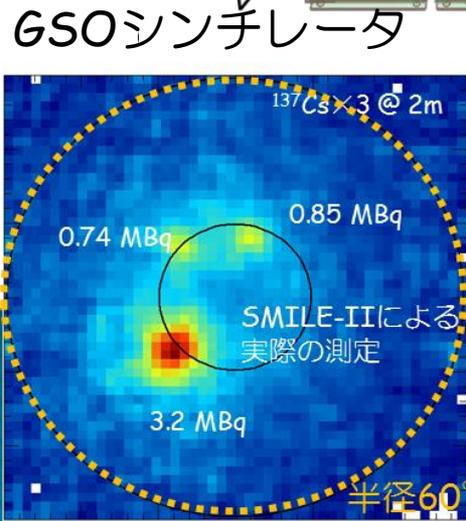
コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

➤ 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-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

SMILE

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- ▶ 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)
- ▶ dE/dX によるバックグラウンド除去の成功

A. Takada+. ApJ,2011

SMILE-II: 地上試験のみ T. Tanimori+. ApJ,2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

- ▶ MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立
- ▶ 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

a few cm^2

(detect 5σ) PSF (50% included) ^{radius} ~ 10 deg @ 662 keV

SMILE-3

- ▶ 長時間気球を用いた科学観測
- ▶ COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測

~ sub-mCrab sensitivity

SMILE-2+

➤ 搭載機器

帯域：0.3~5 MeV

有効面積：~2 cm² (0.3 MeV)

PSF：~15° (0.6 MeV)

重量：511 kg 消費電力：~250W

➤ 観測対象：

銀河中心領域の511 keV

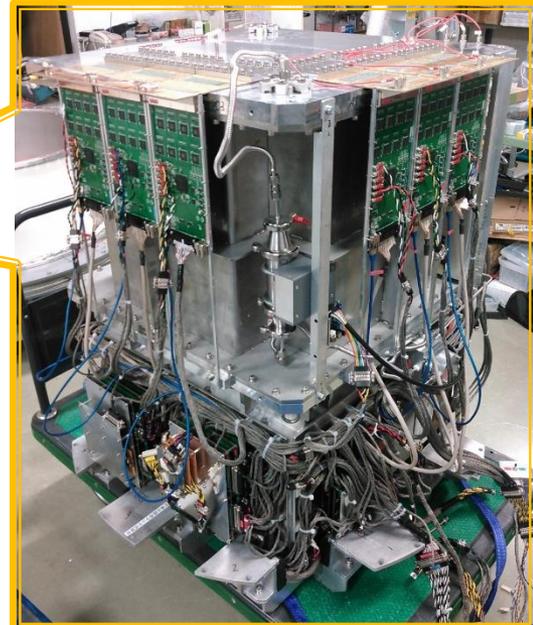
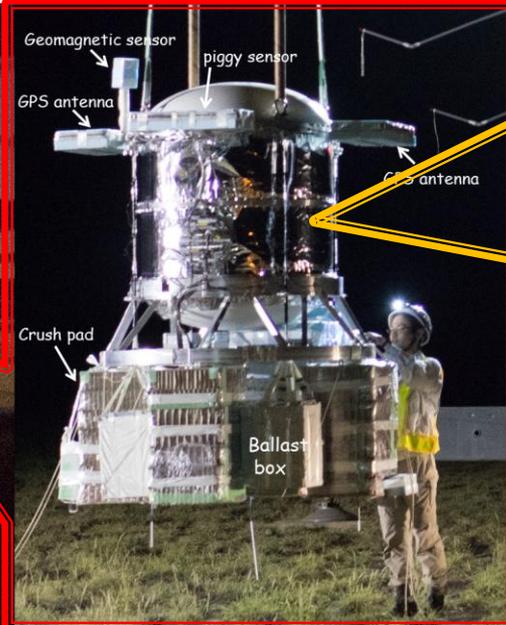
かに星雲

➤ 2018年4月7日 6:24 (ACST)放球

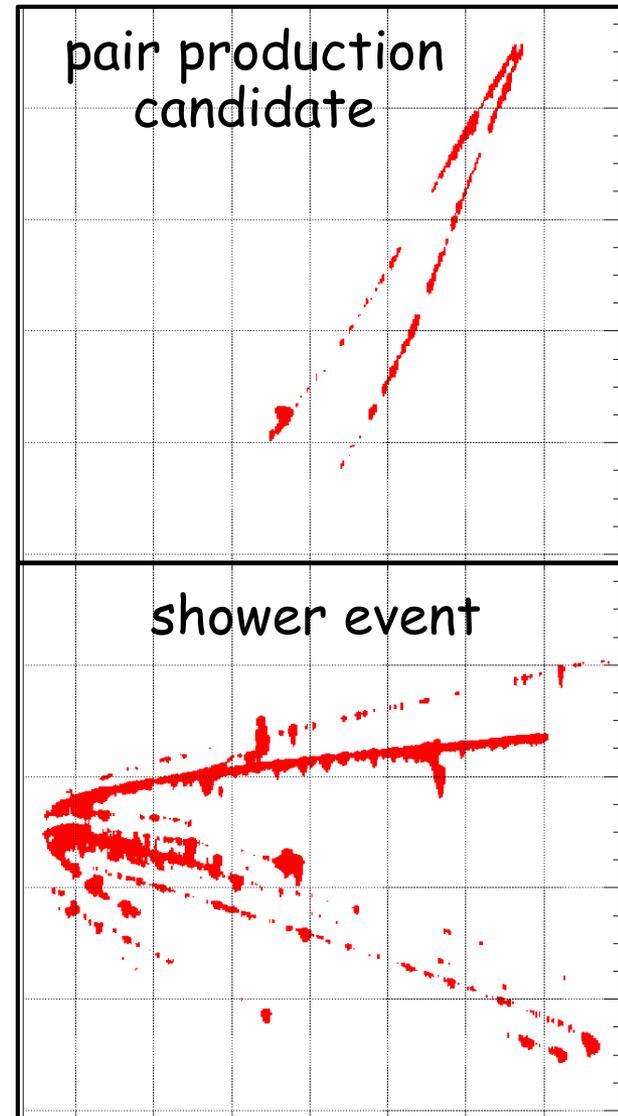
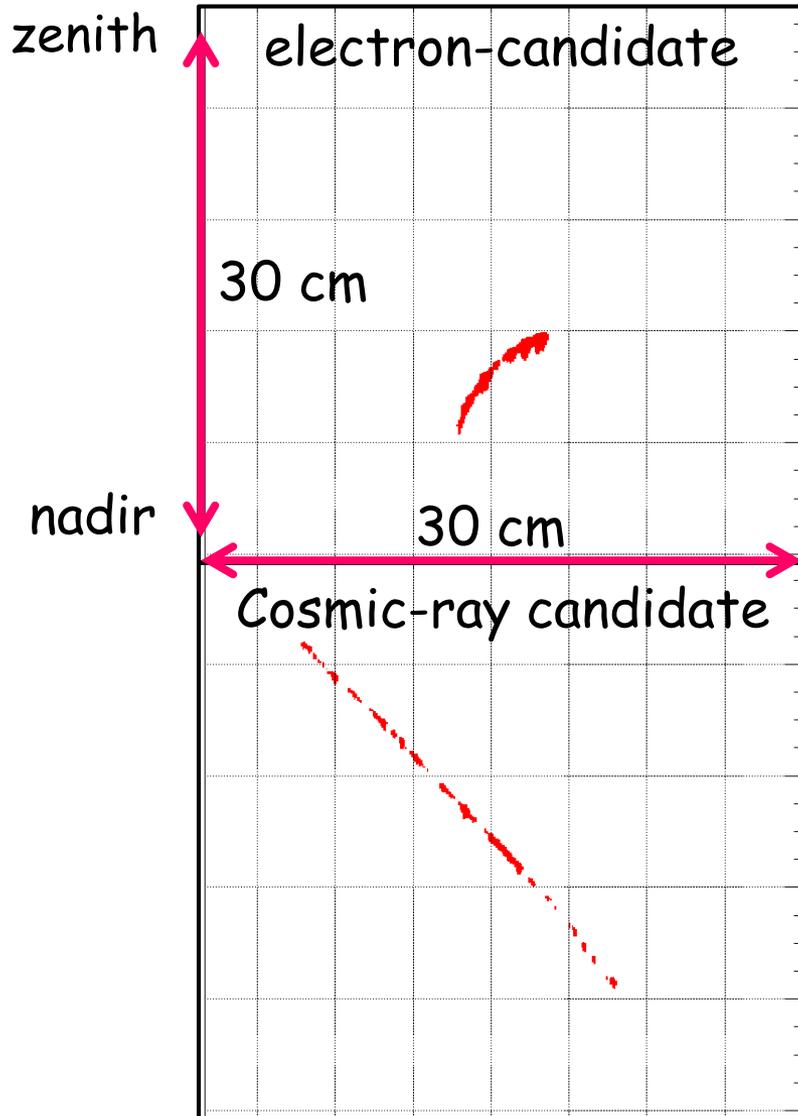
➤ 高度 >38 kmで~26時間の水平浮遊

➤ ETCCは飛翔中おおよそ安定に動作

➤ 機器は2018年4月9日に無事回収 ⇒ 現在も京大で動作中

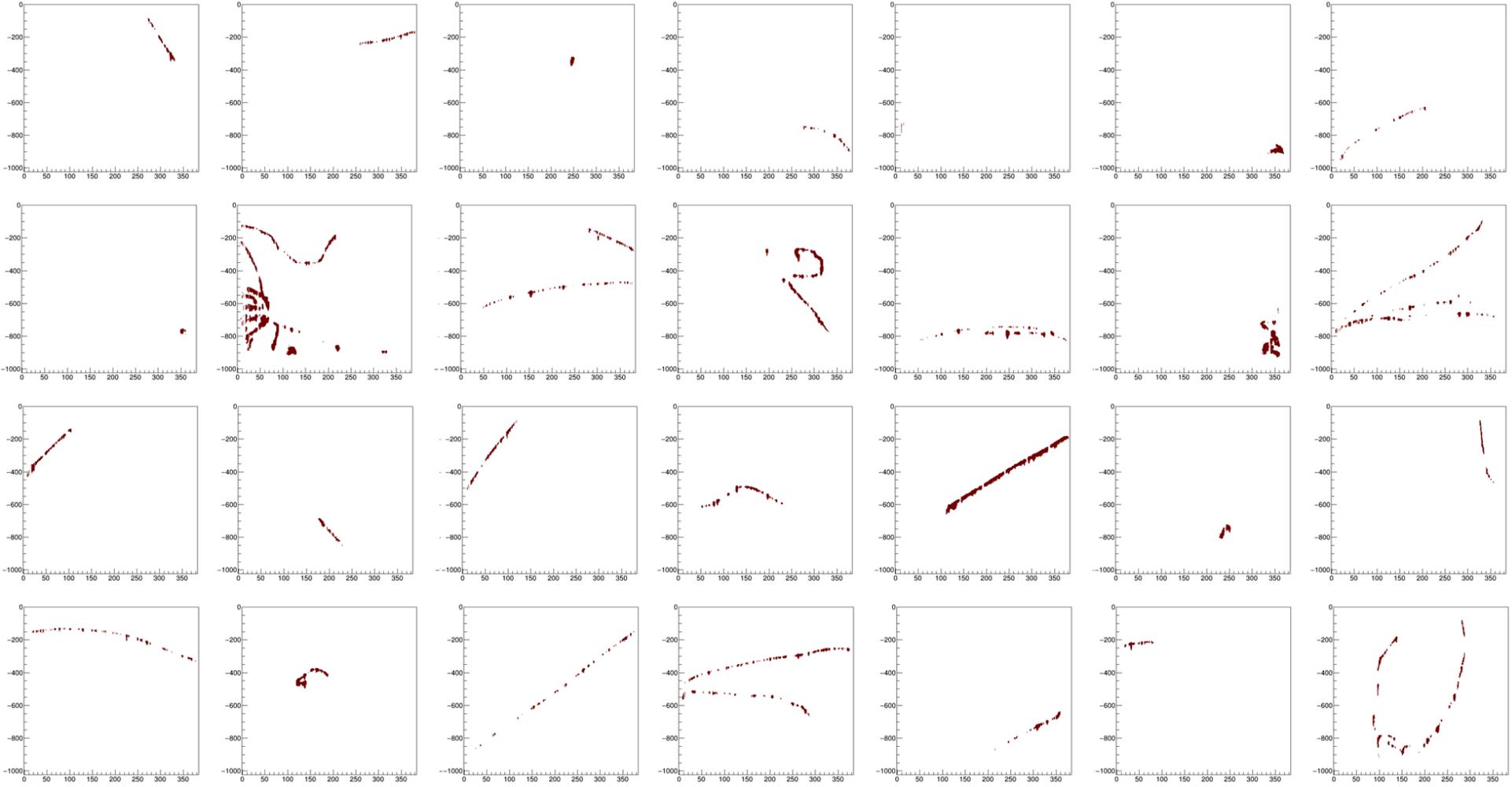


上空で取得した荷電粒子の飛跡



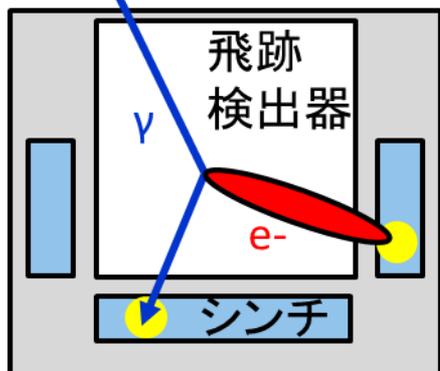
20180408/Per01_ETCC

SMILE-2+の水平浮遊中に取得した連続する28events

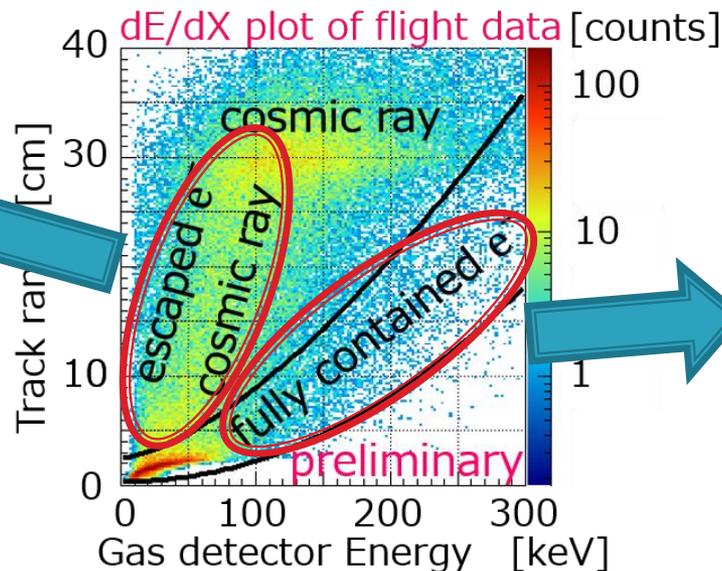
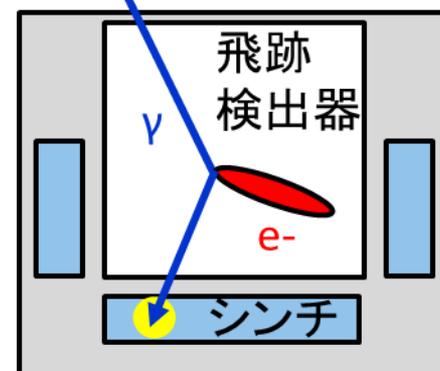


ETCCのガンマ線解析

高エネルギー事象
(for $> 1 \text{ MeV}$)



低エネルギー事象
(for $< 1 \text{ MeV}$)



1. double scintillator hit
2. escaped electron
3. 飛跡-シンチ間の接続状況
4. 有効体積内に散乱点がある
5. α 角でのCompton散乱の保証

1. single scintillator hit
2. 有効体積内に散乱点がある
3. fully contained electron
4. α 角でのCompton散乱の保証

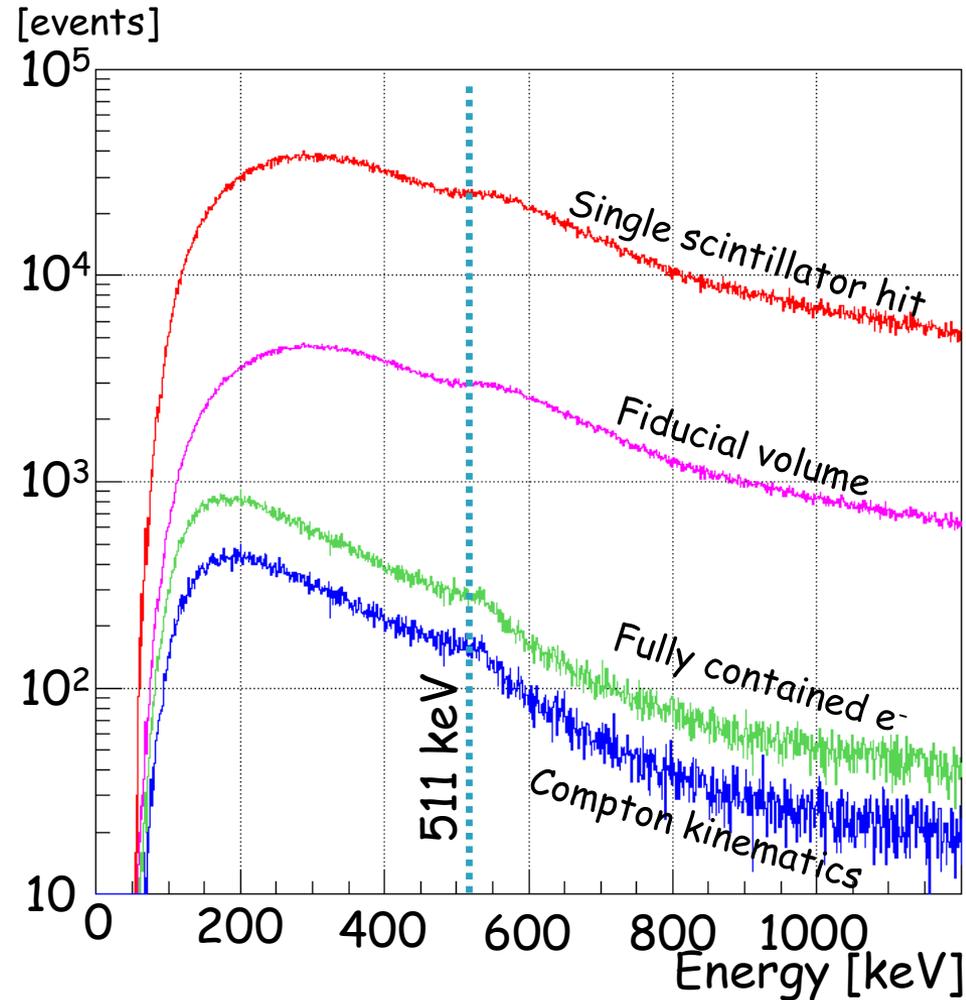
低エネルギー事象解析

- 水平浮遊時のデータを解析
4/7 8:45 - 4/8 4:05 (ACST)
live time 5.8×10^4 sec
データ数 3.3×10^7 events

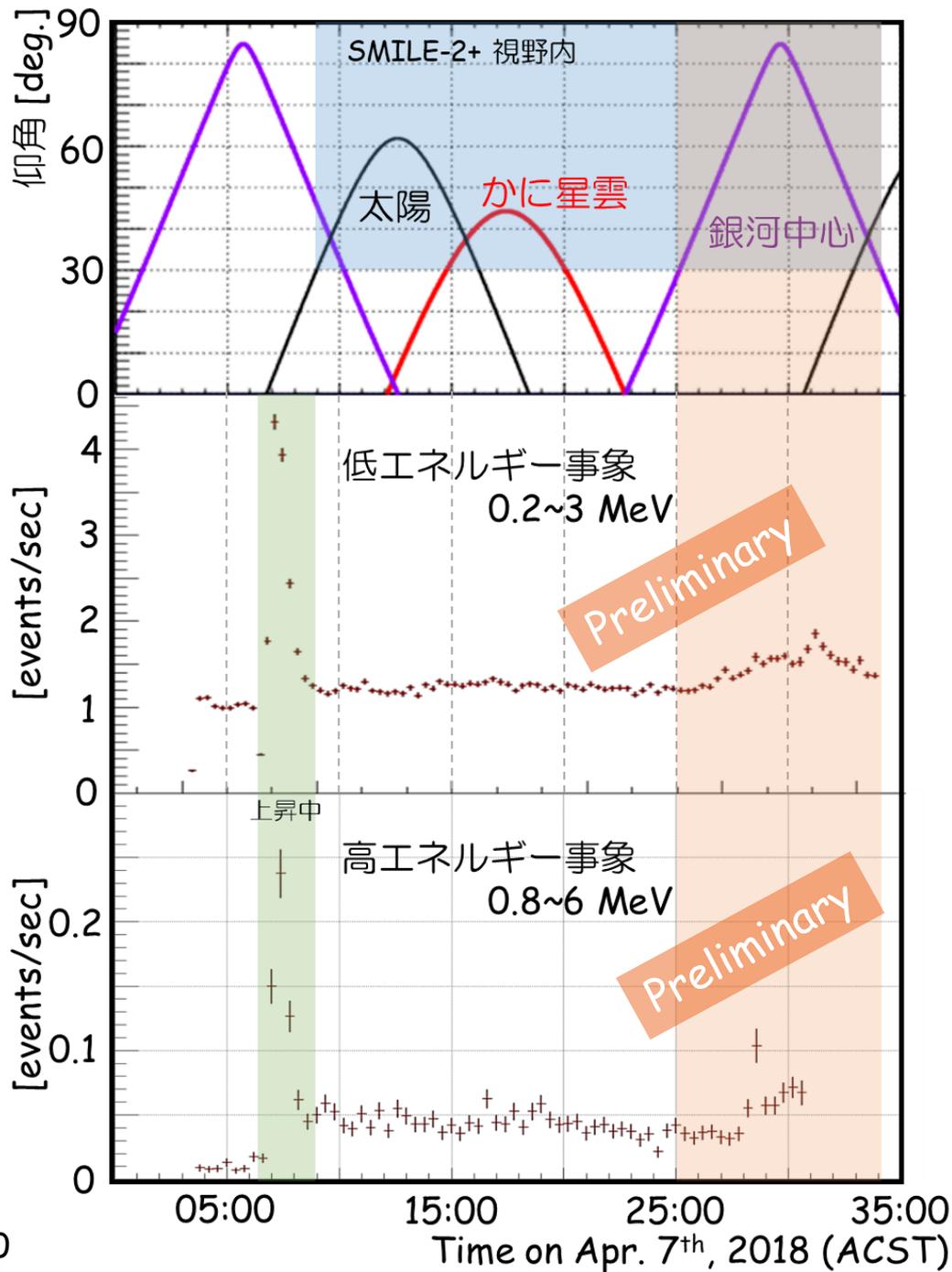
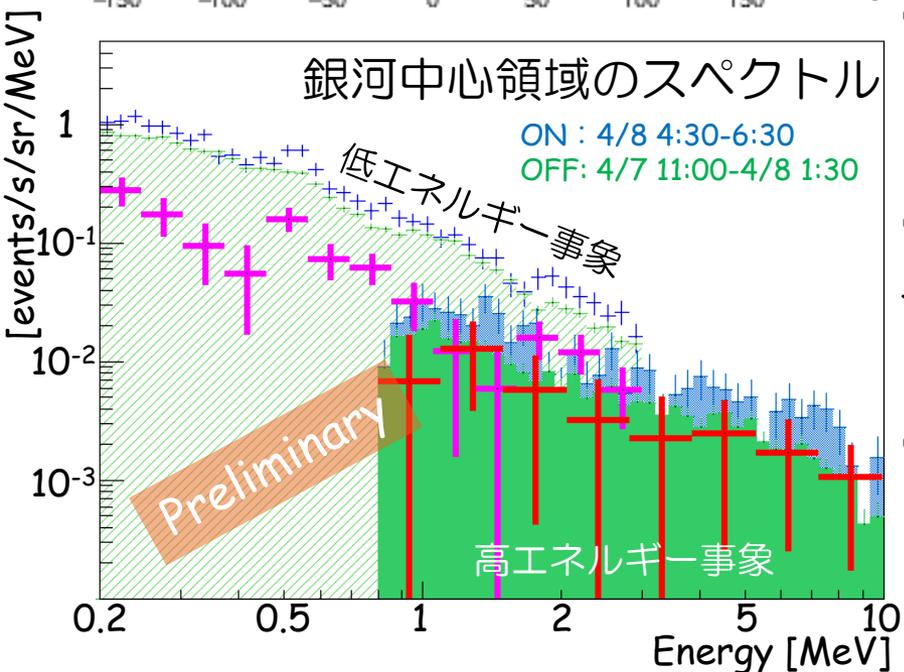
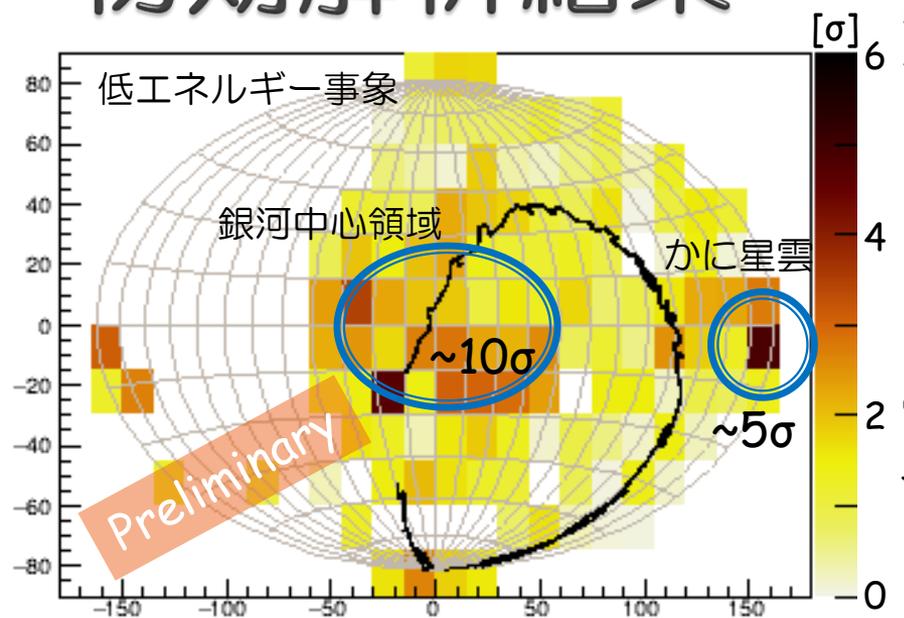
- Event selection

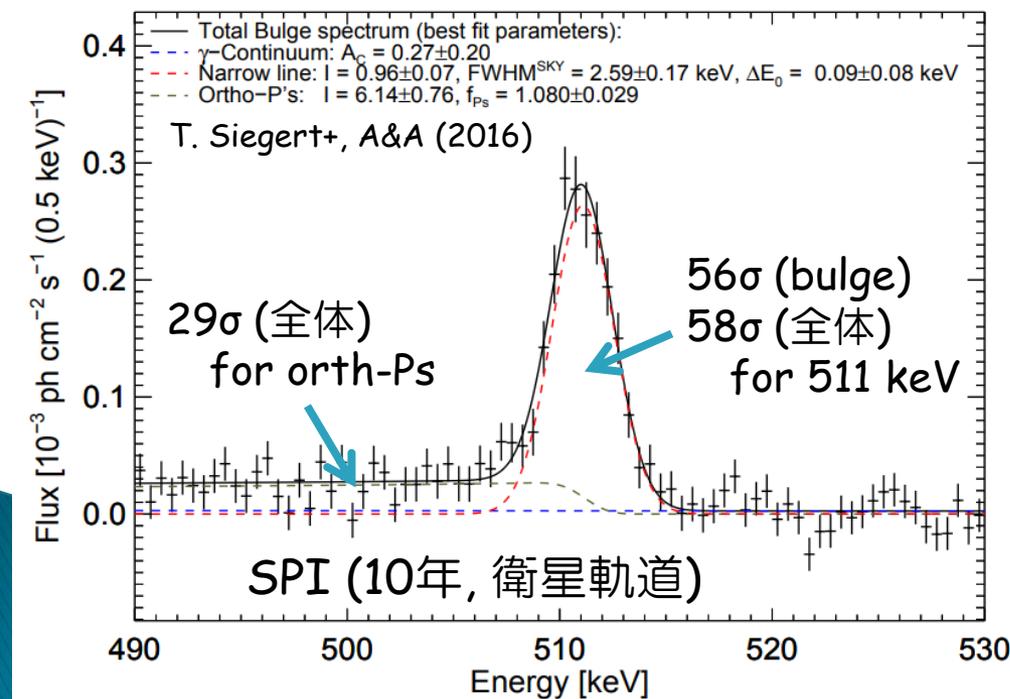
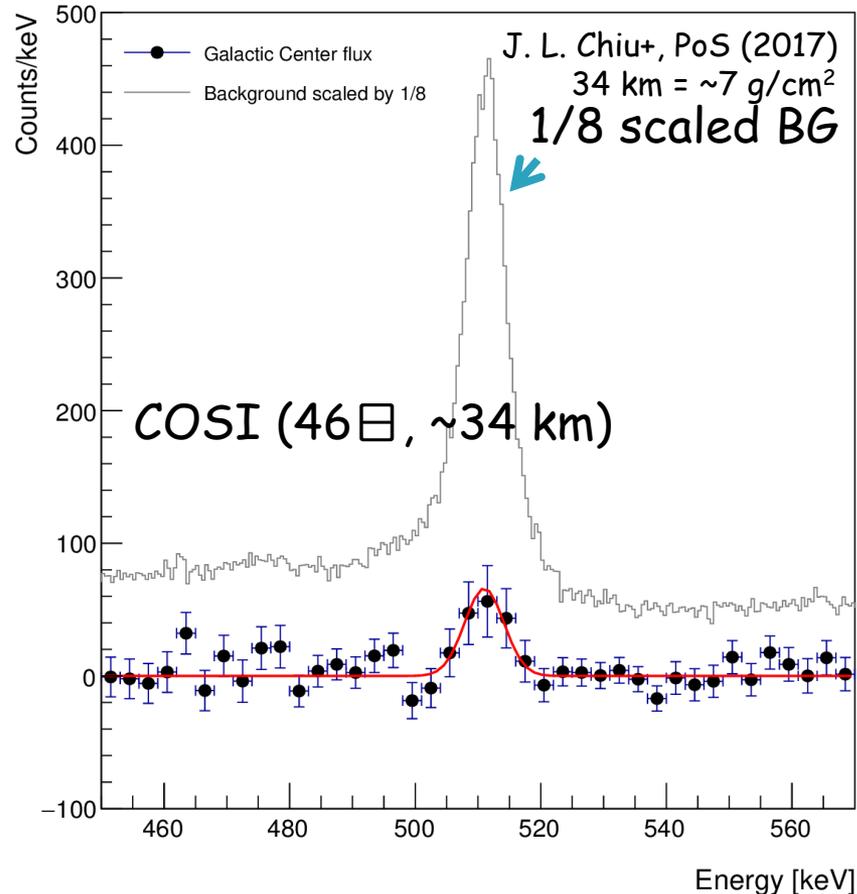
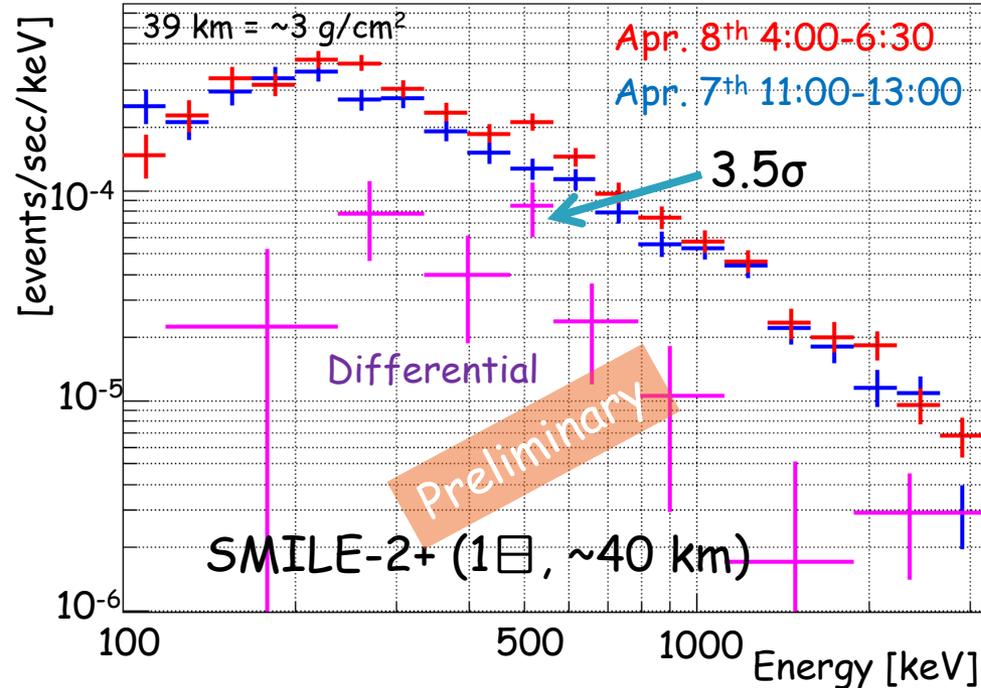
single scintillator hit	12.0%
有効体積内に散乱点	5.3%
fully contained e^-	1.1%
Compton運動学	0.5%

⇒ 2桁の雑音を除去
SMILE-Iとも無矛盾



初期解析結果





1日 \rightarrow 46日

$$3.5\sigma \times \sqrt{46} \approx 24\sigma$$

1日 \rightarrow 10年

$$1.6e9 \text{ (cm}^2 \text{ s)} / 75 \text{ cm}^2$$

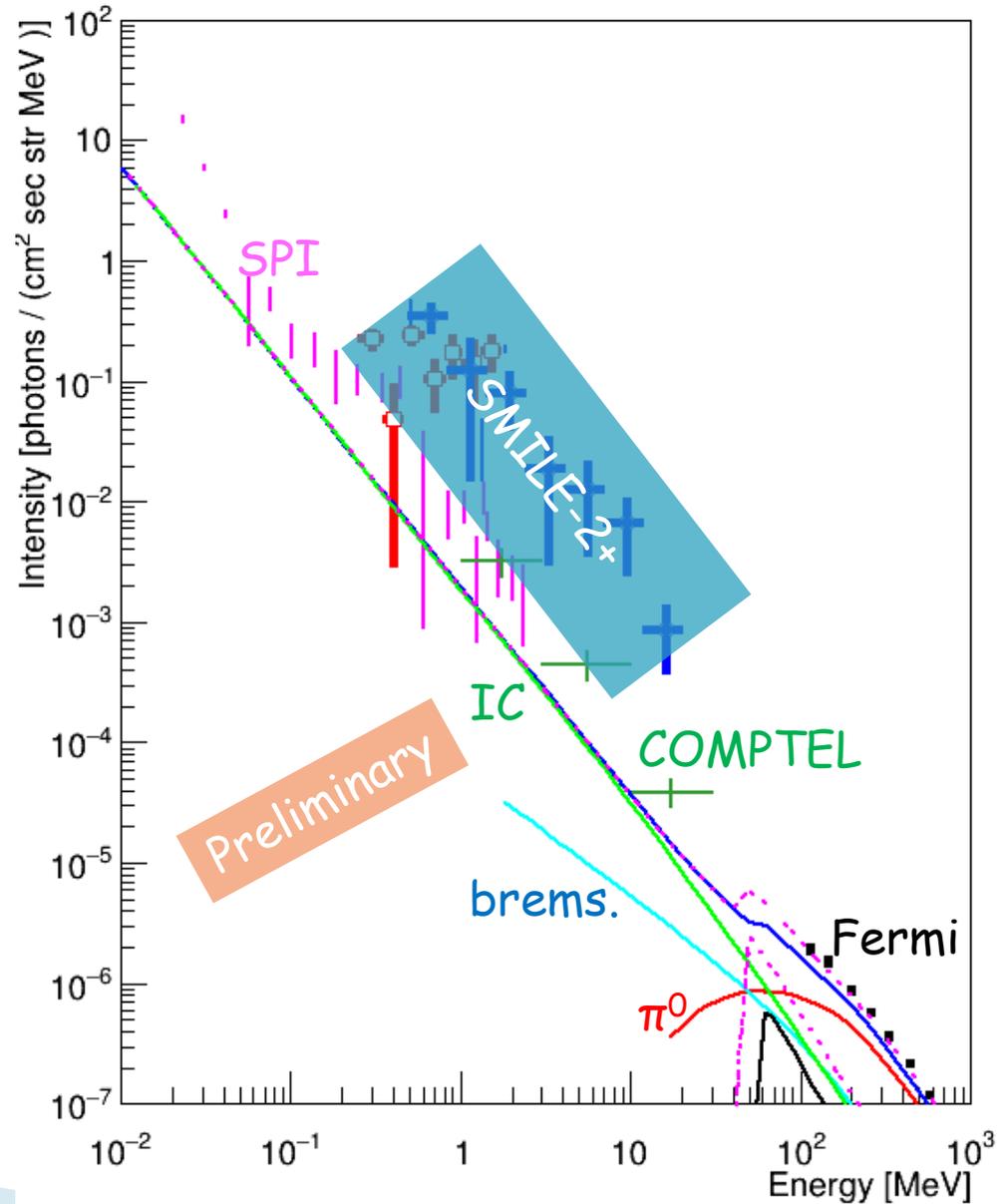
$$3.5\sigma \times \sqrt{(2.1e7/1e4)} \approx 162\sigma$$

従来観測を凌駕するSN比を
実現したことは間違いない

Photon flux

- SMILE-2+の観測点は宇宙線電子の逆コンプトンより多そう
- SPI・COMPTEL・SMILE-2+と異なる検出器が全てICより多い
⇒ 何かは在る
- SMILE-2+のデータは詳細を詰めている所
 - 応答関数
 - 大気での散乱効果

...など



SMILE

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)
- dE/dXによるバックグラウンド除去の成功

A. Takada+. ApJ,2011

SMILE-II: 地上試験のみ T. Tanimori+. ApJ,2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

- MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立
- 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

a few cm²

(detect 5σ)

PSF (50% included)

radius

~ 10 deg @ 662 keV

Now!!

SMILE-3

- 長時間気球を用いた科学観測
- COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測

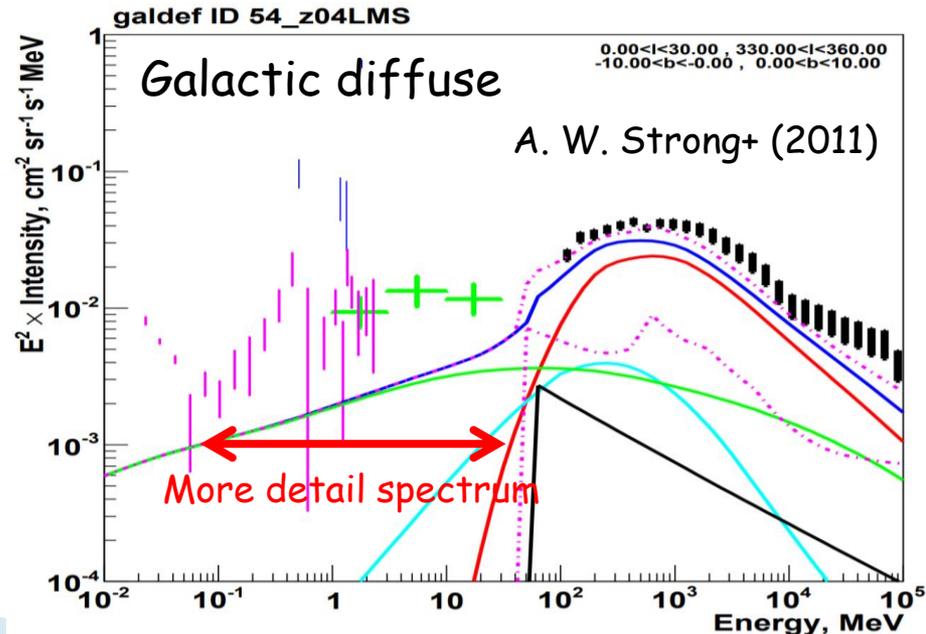
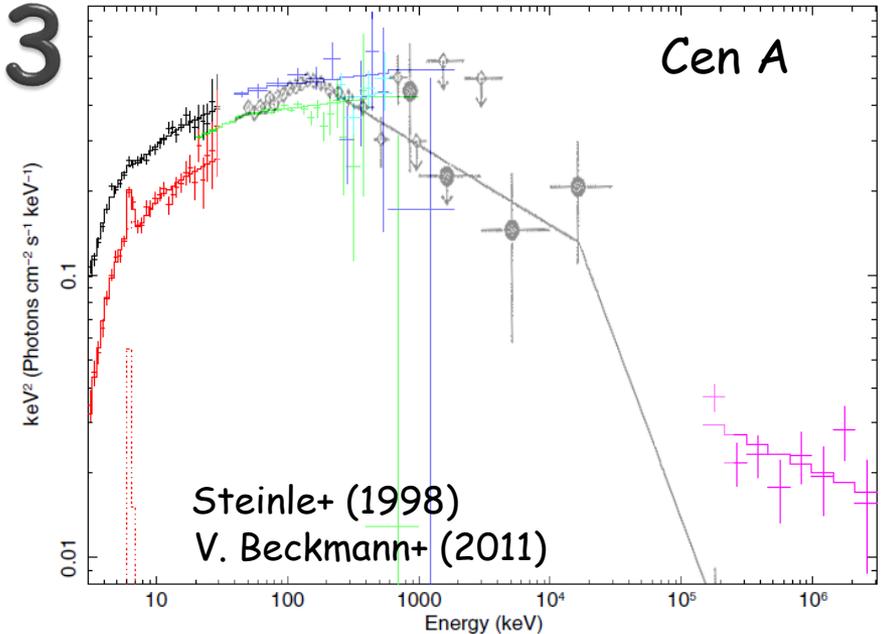
~ sub-mCrab sensitivity

科学観測 SMILE-3

- ▶ Cen Aの詳細スペクトル,
511 keV分布, ^{26}Al 検出,
galactic diffuseの空間分布
⇒ $\sim 10 \text{ cm}^2 \times \sim 10 \text{ days}$
- ▶ 系外拡散ガンマ線の非一様性
⇒ $\lesssim 5 \text{ deg.}$



長時間気球に搭載して掃天観測



次期計画へ

検出感度を向上させて科学観測へ

⇒ @ Alice Springs : e^\pm の銀河面分布・Cen A・NGC4945他

@ Fort Sumner : Cyg X-1 / Crabの偏光観測

有効面積を >5倍、角度分解能2~3倍改善していく為に...

シンチレータの改良

光読み出しをMPPCへ

⇒ エネルギー分解能向上

角度分解能向上

- CF_4 ガス 3気圧 ⇒ 有効面積 3.5倍
- 3軸 μ -PIC ⇒ SPD 3~4倍
- MPPC読み出し ⇒ ARM 1.2倍
- 容器軽量化 ⇒ 減衰量 ~20%低下

PSF ~3倍

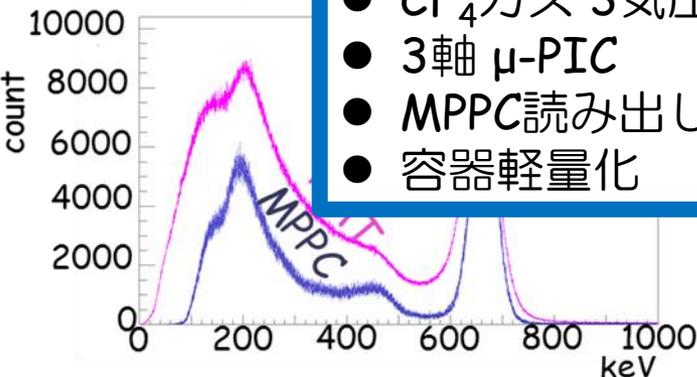
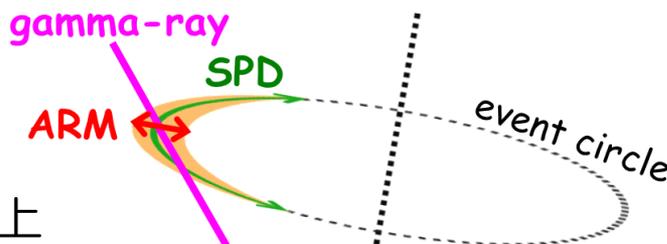
ガス飛跡検出器の改良

CF_4 baseのガスで3気圧

ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ

力容器の軽量化

読み出し μ -PIC

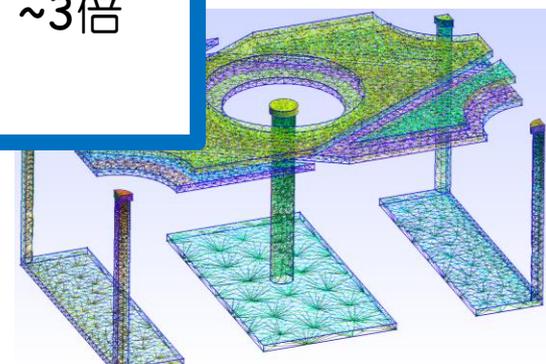
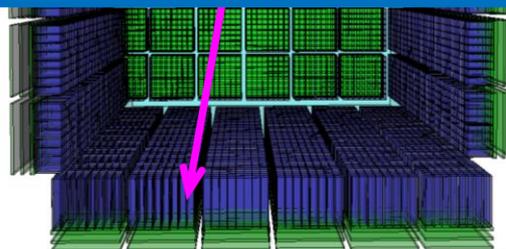


全体システムの改良

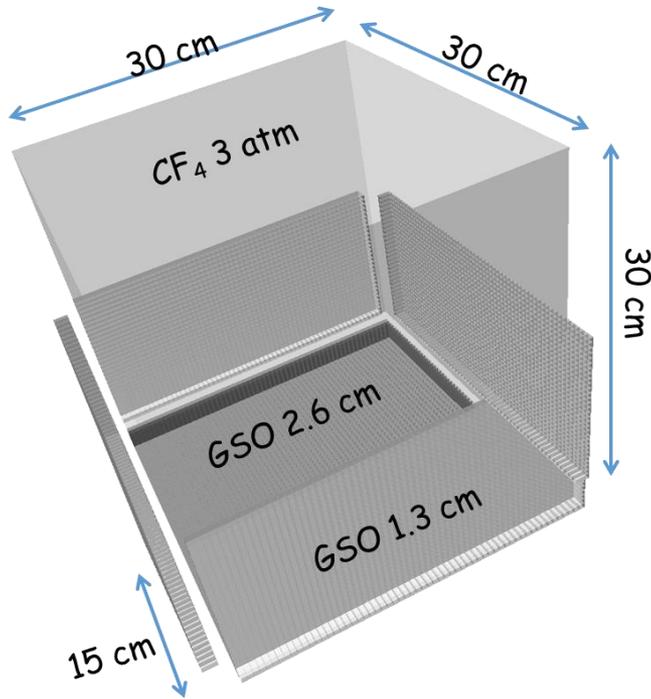
ガス圧力容器を露出
構造体の見直し (軽量化)

今回からの修正点

姿勢センサの見直し



SMILE-3 ETCC設計(案)

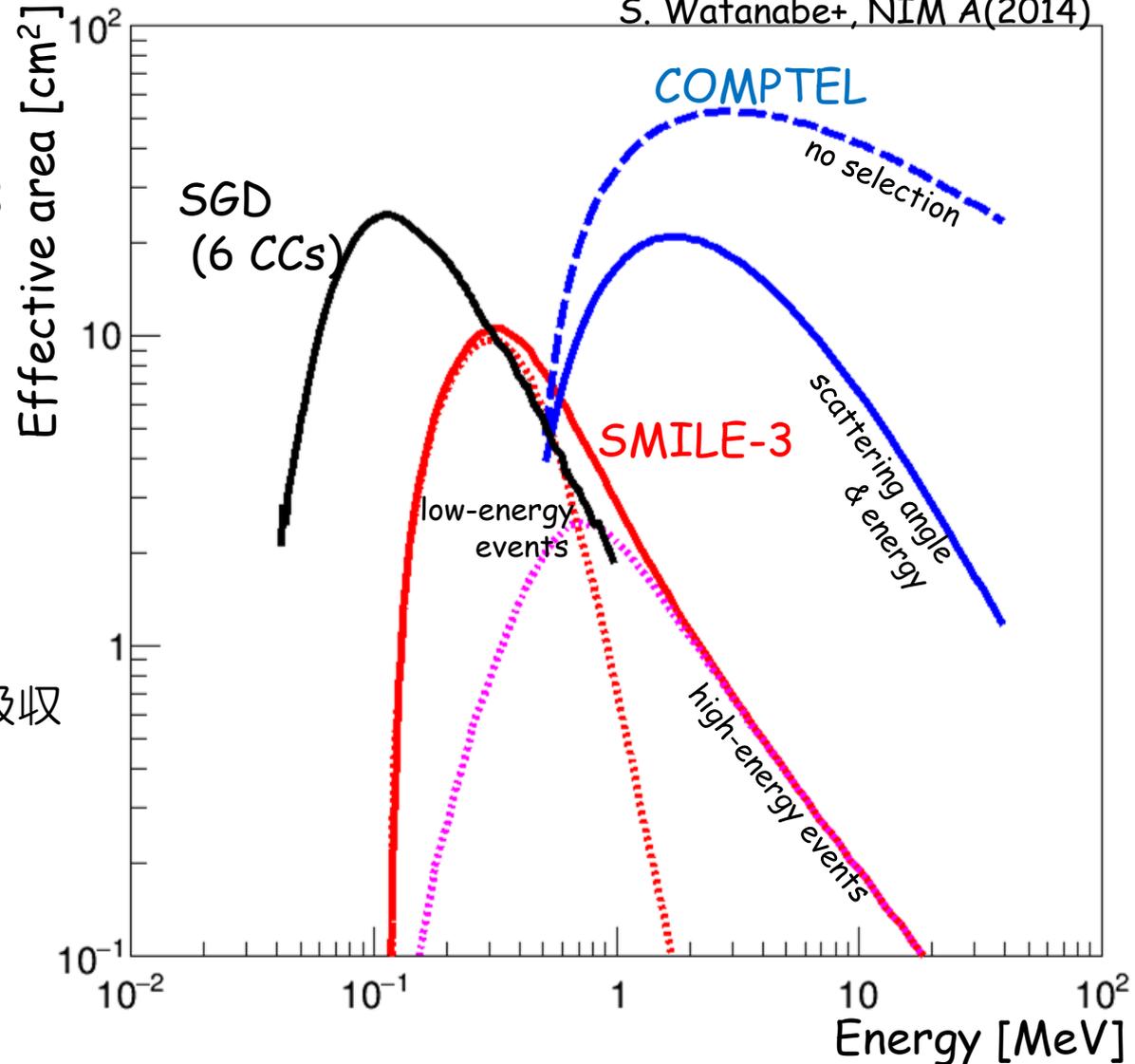


- (30 cm)³内でCompton
- 散乱ガンマ線がGSOで光電吸収
- 反跳電子がTPC内で止まる
or GSOで止まる
- 反跳電子が2 mm以上飛び

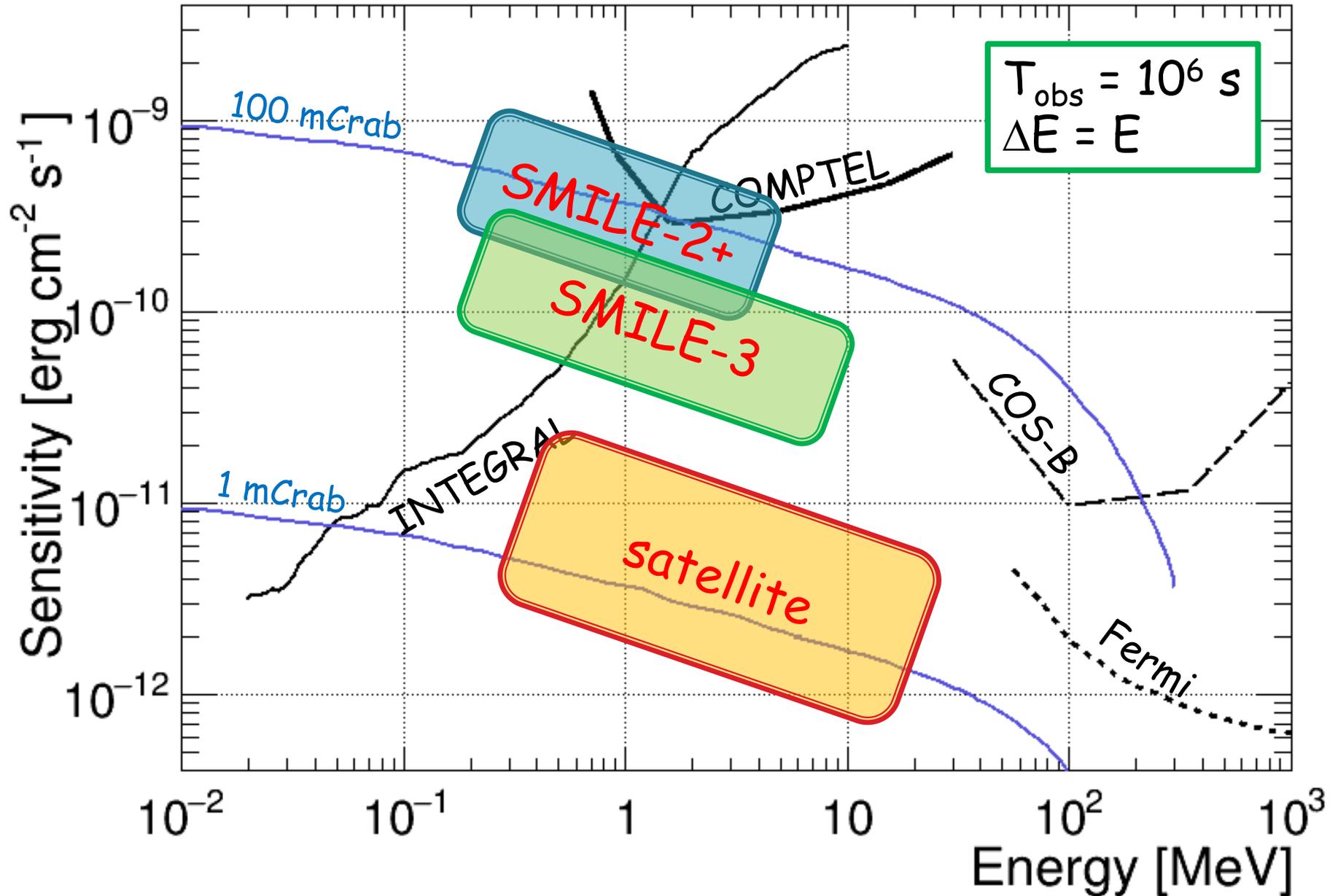


10 cm² @ 0.3 MeV
6° @ 1 MeV

V. Schönfelder+, ApJS (1993)
S. Watanabe+, NIM A(2014)



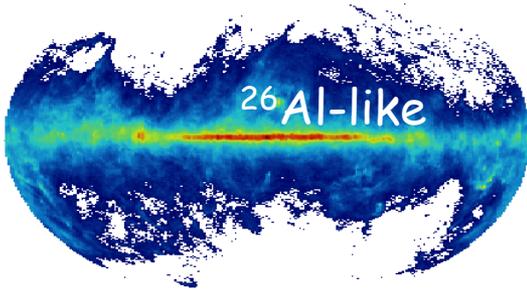
将来計画の予想検出感度



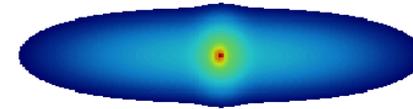
SMILE-3で期待される観測例

電子陽電子対消滅線

銀河面に広く分布？

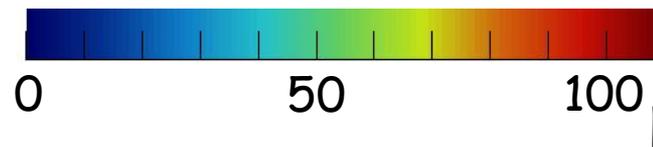
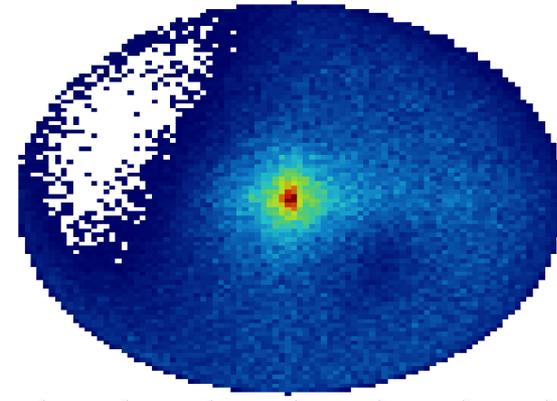
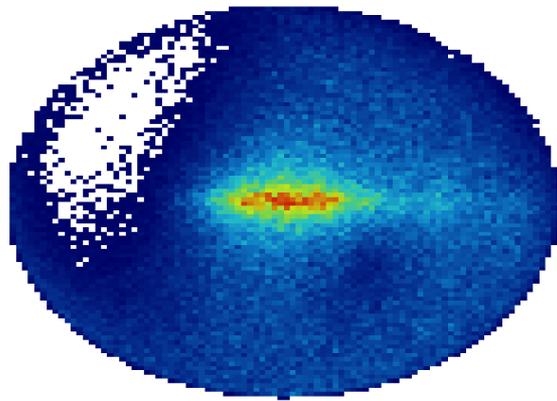


銀河中心領域十ハロ一的？



SPI/INTEGRAL
T. Siegert+, 2016

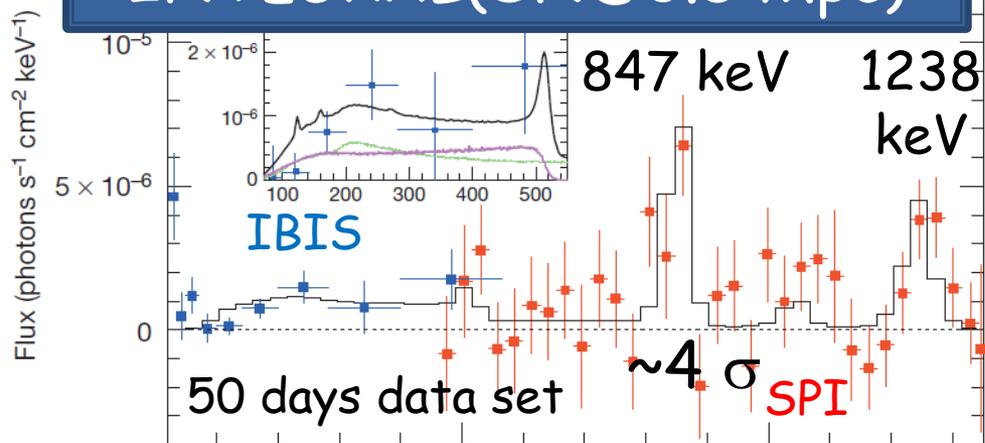
有効面積 $\sim 5 \text{ cm}^2 @ 0.5 \text{ MeV}$
空間分解能 $\sim 10 \text{ 度} @ 0.5 \text{ MeV}$
南半球の高度40 kmで30日間観測



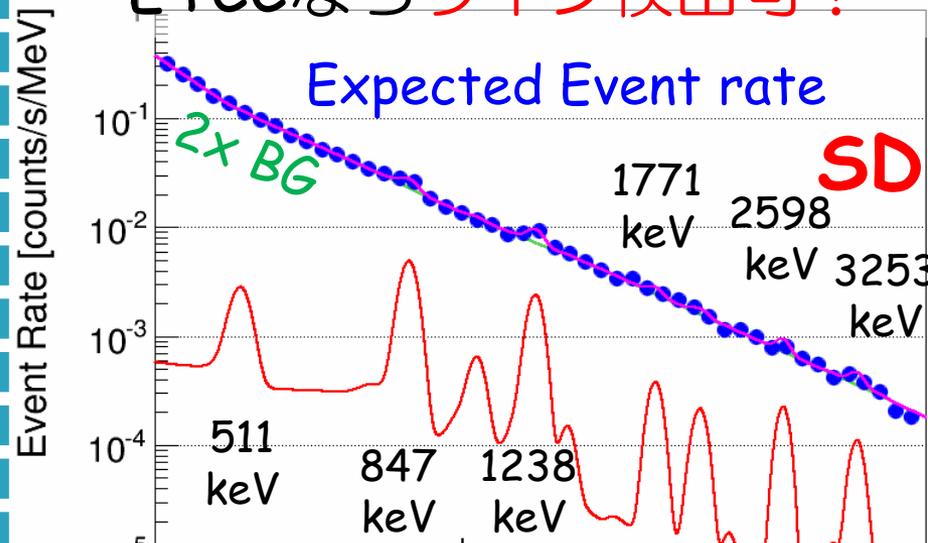
$3.6^\circ \times 1.8^\circ$ /pixel

$(50 \text{ cm})^2 \times 30 \text{ cm} \times 4 \text{ ETCCs} = \sim 100 \text{ cm}^2$

INTEGRAL(SN@3.5 Mpc)

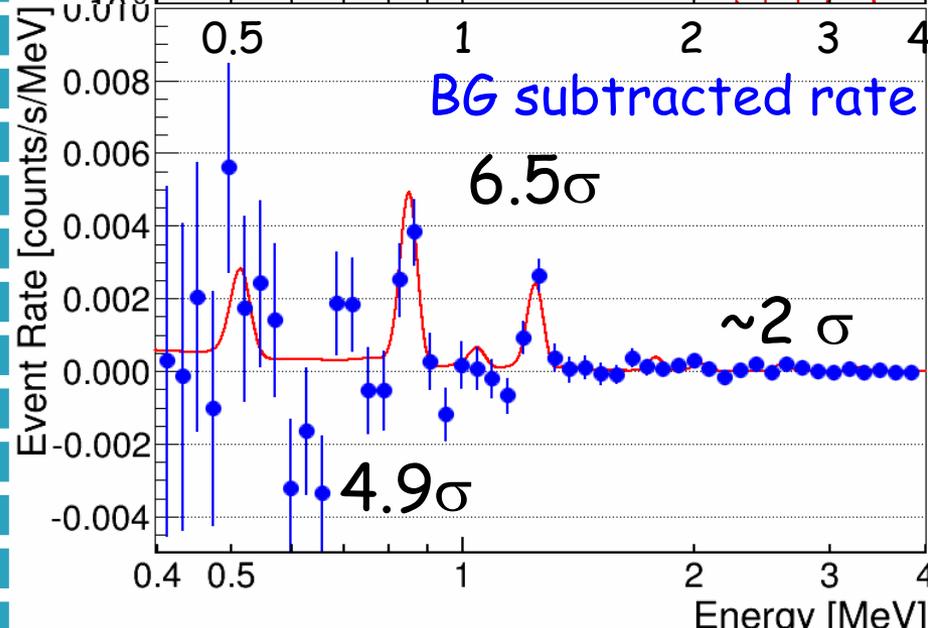
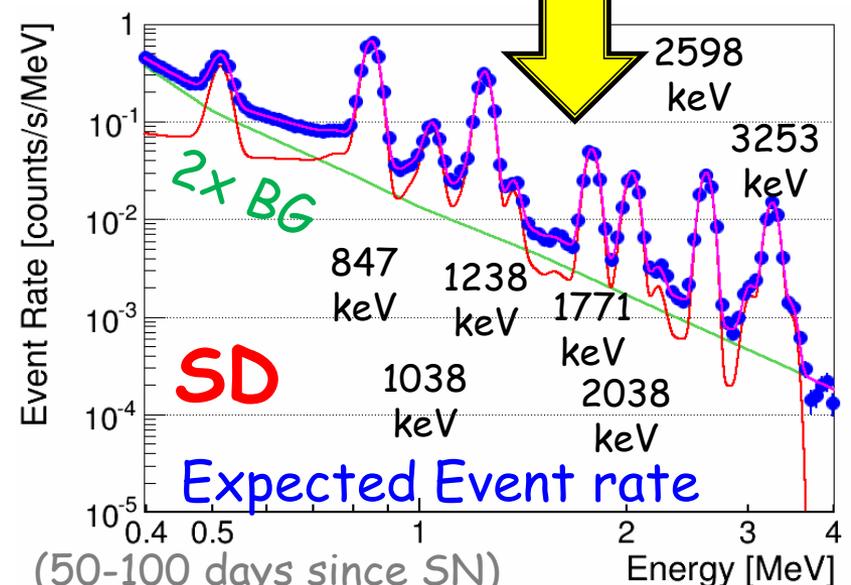


40 Mpc ($\sim 5.4 \text{ SNe/yr}$) できさえ
ETCCならライン検出可!



E. Churazov+ (2014) 500 Energy (keV) 1,000

ETCC衛星(SN@3.5 Mpc)



Timeline

2020

SMILE-3 ETCC開発

有効面積 $\sim 10 \text{ cm}^2$
空間分解能 $\sim 5^\circ$

豪州気球実験

2025

3台目開発

1台目をベースに
長期化向け改良

米国気球実験 (北半球)

米国気球用
通信系開発

2台目開発

1台目の結果を
feedback

長期化開発

onboard解析
電源等

南半球周回気球実験

2030

北半球長期気球実験

衛星提案

まとめ

▶ ETCCによるMeVガンマ線天文学の開拓

- 天球上での空間分解能が重要 ← 画像処理の前にSN比は決まる
- 雑音事象を極限まで落とす事も重要

▶ SMILE-2+

- 2018年4月7日に豪州Alice Springsから放球
- 高度38.4 km以上での水平浮遊を26時間
- 観測対象
 - 銀河中心領域 $>10\sigma$ で連続成分, $\sim 3\sigma$ で511 keVを検出
 - かに星雲 $\sim 5\sigma$ で検出

▶ 将来計画

- **SMILE-3** (2020年代)
有効面積 $\sim 10 \text{ cm}^2$, 角度分解能 5~10度
⇒ 系内拡散ガンマ線/511 keVの銀河面分布・Cen A・ ^{26}Al
Cyg X-1/Crab偏光, GRS 1915+105, COMPTEL undefined ...etc
- **SMILE衛星** (2030年代)
有効面積 $\sim 100 \text{ cm}^2$, 角度分解能 < 5 度
⇒ 新天体探査

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

