

# 広視野・低雑音 MeV ガンマ線望遠鏡 ETCC の 天体撮像能力実証を目指した オーストラリア気球実験 SMILE-2+

阿部光,

谷森達, 高田淳史, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 小野坂健, 斎藤要,  
水本哲矢, 窪秀利, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 中増勇真, 谷口幹幸 (京都大学),  
黒澤俊介 (東北大学), 身内賢太郎 (神戸大学), 澤野達哉 (金沢大学),  
小財正義 (ISAS/JAXA), 荘司泰弘 (大阪大学)

2019年10月16日 名古屋大学 ISEE

## 目次

- イントロ
- ETCC と SMILE 計画の概要
- SMILE-2+ 観測データの解析
- 将来計画

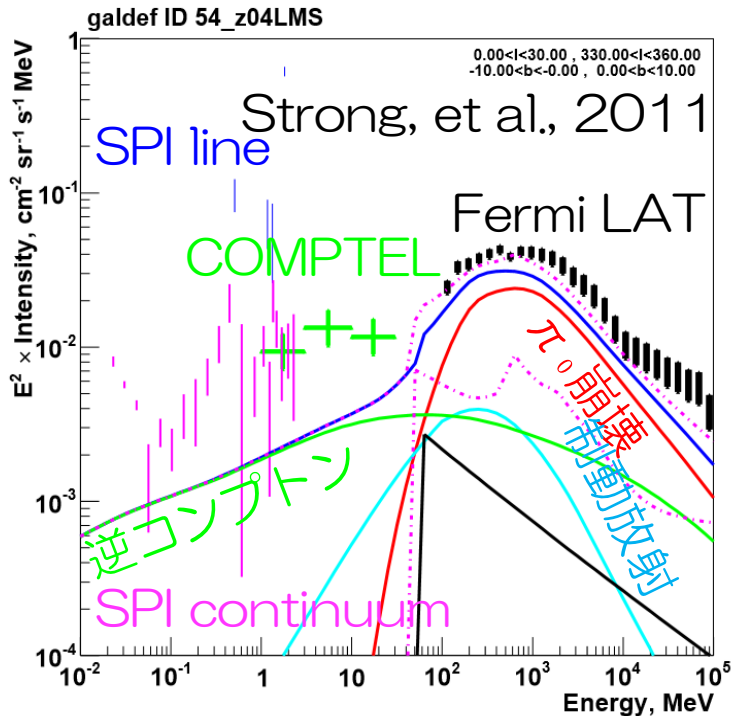






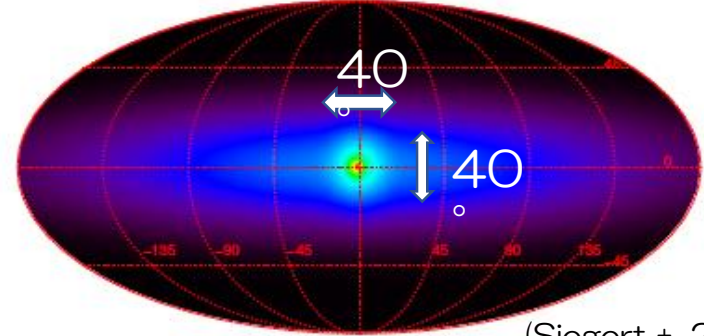
# 銀河系内拡散ガンマ線 & $e^-e^+ \rightarrow \gamma_s$

銀河系内拡散ガンマ線スペクトル



- COMPTEL、INTEGRAL等が観測
- GeV付近は $\pi^0$ 放射で観測を説明。
- MeV付近は、 $\sim 1$ 桁観測が高い。

INTEGRAL/SPI 観測を説明する  $e^-e^+$ 対消滅放射分布モデル



(Siegert +, 2016)

- 対消滅レート $\sim O(10^{43}) e^+ / s$
- 銀河中心に集中した特徴的な分布
- 一部は $\beta^+$ 崩壊核( $^{26}Al, ^{44}Ti$ , etc)の寄与だが、それだけでは足りない

軽いDM?

MeVで明るい未分解天体?

MeV付近を議論できない原因

- 信号雑音比が100倍以上
- 明るい天体による漏れ込みを制限できていない

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

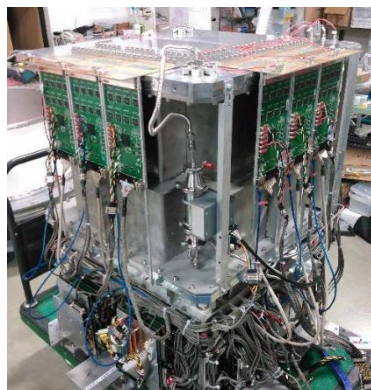
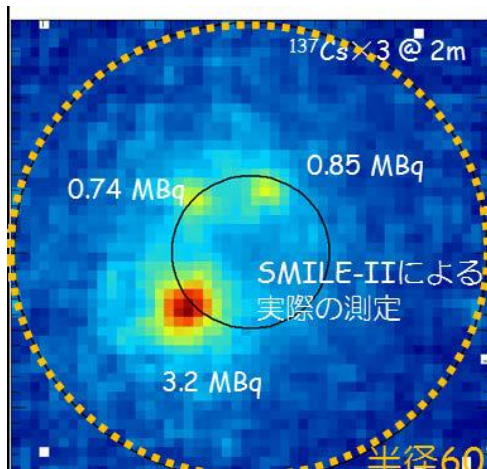
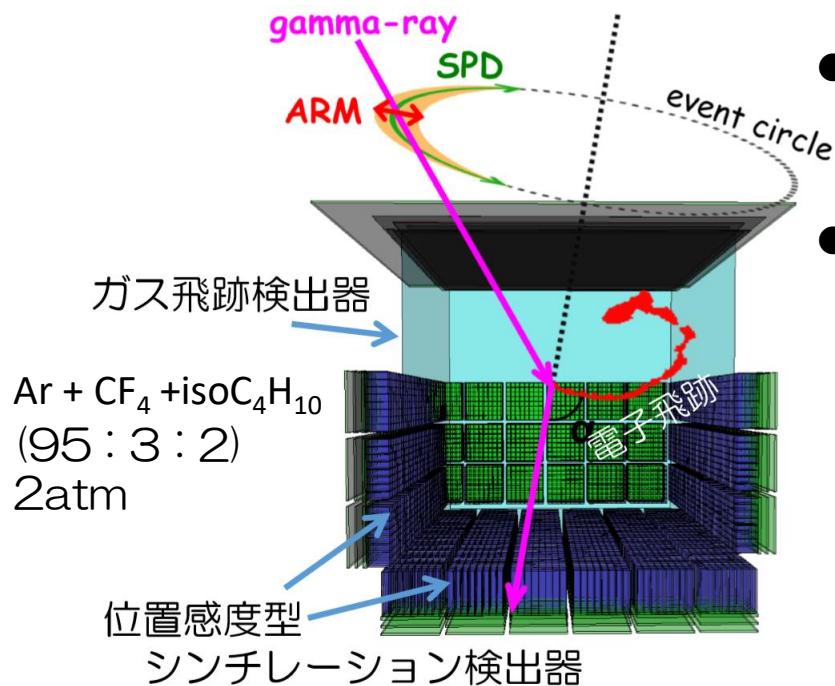
高S/Nのために強力な雑音除去能力, 高角度分解能

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC

- ガス飛跡検出器 (TPC)  
反跳電子の飛跡とエネルギー
- 位置有感シンチレーション検出器 (GSO + PMT)  
散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー



検出事象ごとに  
コンプトン散乱における全物理量を取得



SMILE-2+ ETCC

- 到来方向を一意に決定
- 天空上の像の拡がり関数PSFを厳密定義
- 大きな視野  $\sim 3 \text{ str}$
- $\alpha$ 角によるコンプトン散乱運動学テストとエネルギー損失率による粒子識別で冗長な雑音除去能力

SMILE

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1<sup>st</sup> 2006)

➤ 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1 MeV)

➤  $dE/dX$ 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. 7<sup>th</sup> 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<sup>2</sup>  
(detect 5 $\sigma$ ) PSF (50% contained) ~ 10 deg @ 662 keV  
radius

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



# 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

ペイロード重量: ~500 kg

## ➤ 検出器

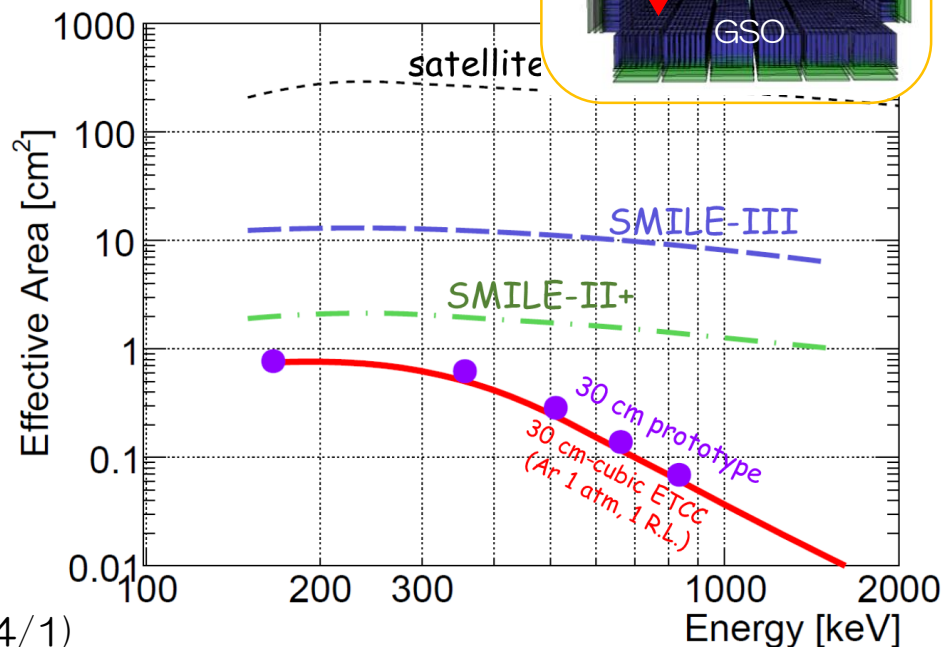
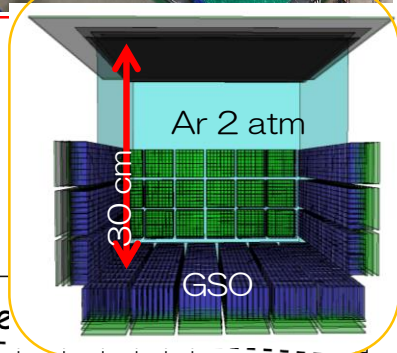
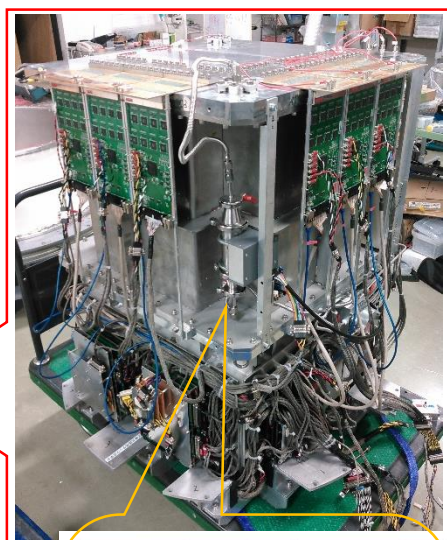
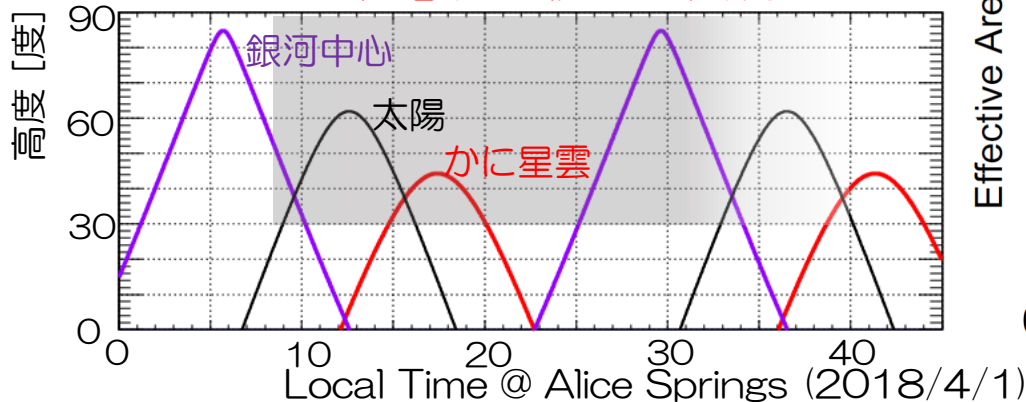
Geant4 シミュレーション →

- ◆ 有効面積: ~2 cm<sup>2</sup> @ 300 keV
- ◆ PSF: ~10° (half power radius)
- ◆ エネルギー帯域: 0.3~1.5 MeV

## ➤ 観測対象

- ◆ 電子陽電子対消滅線 @ 銀河中心領域
- ◆ かに星雲

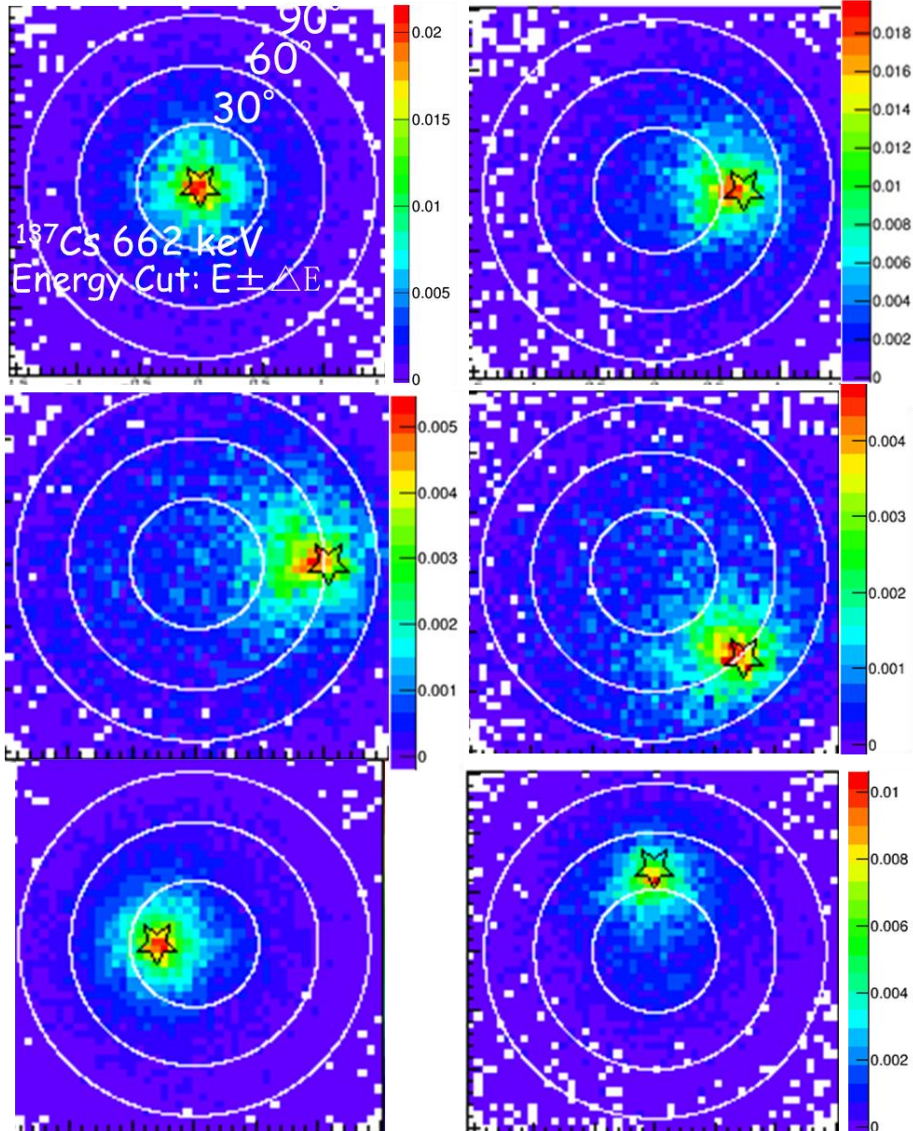
~5σの有意度で検出が期待される



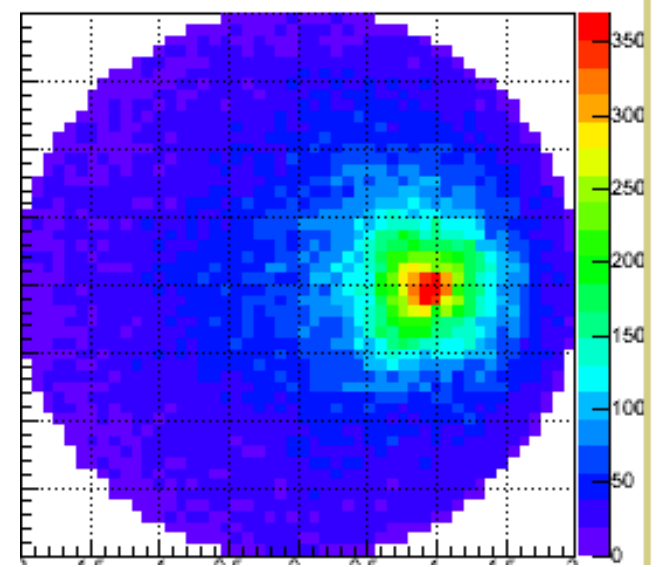
# Check of gamma-ray imaging

Calibration at Kyoto, Japan

counts/sec



Calibration at Alice Springs





# フライト & 回収

April 7 (local time)

- 2:47-3:09 システム電源ON
- 3:09 DAQ Start
- 6:24 放球
- 8:44 レベルフライト開始

April 8

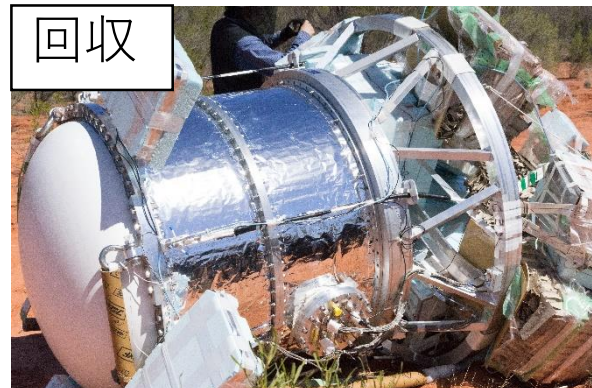
- 10:45 DAQ OFF
- 10:45-10:53 システム電源OFF
- 11:07 気球切り離し
- 11:40 着地

April 9

回収

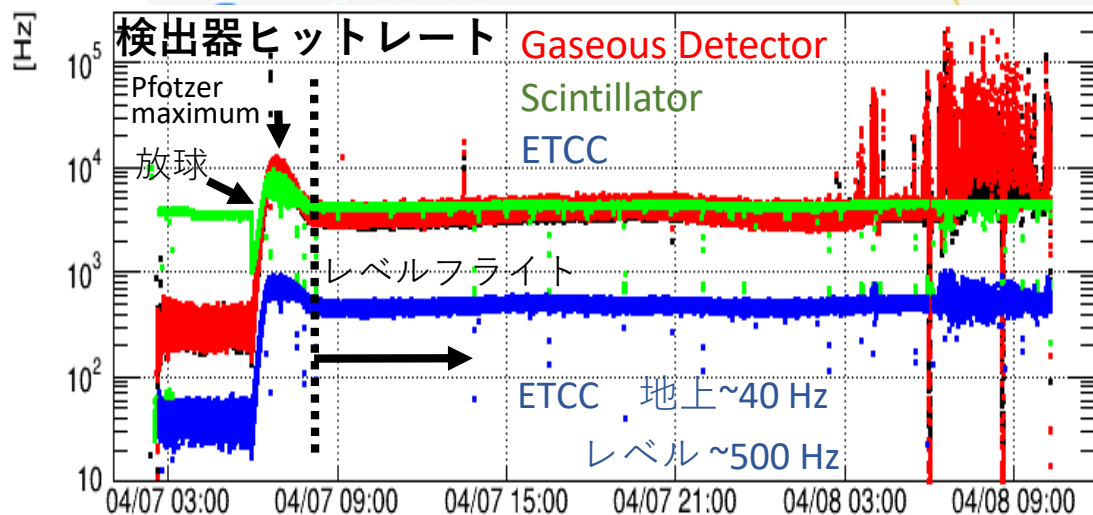
July 19

SMILE-2+  
京都大学に帰還



回収

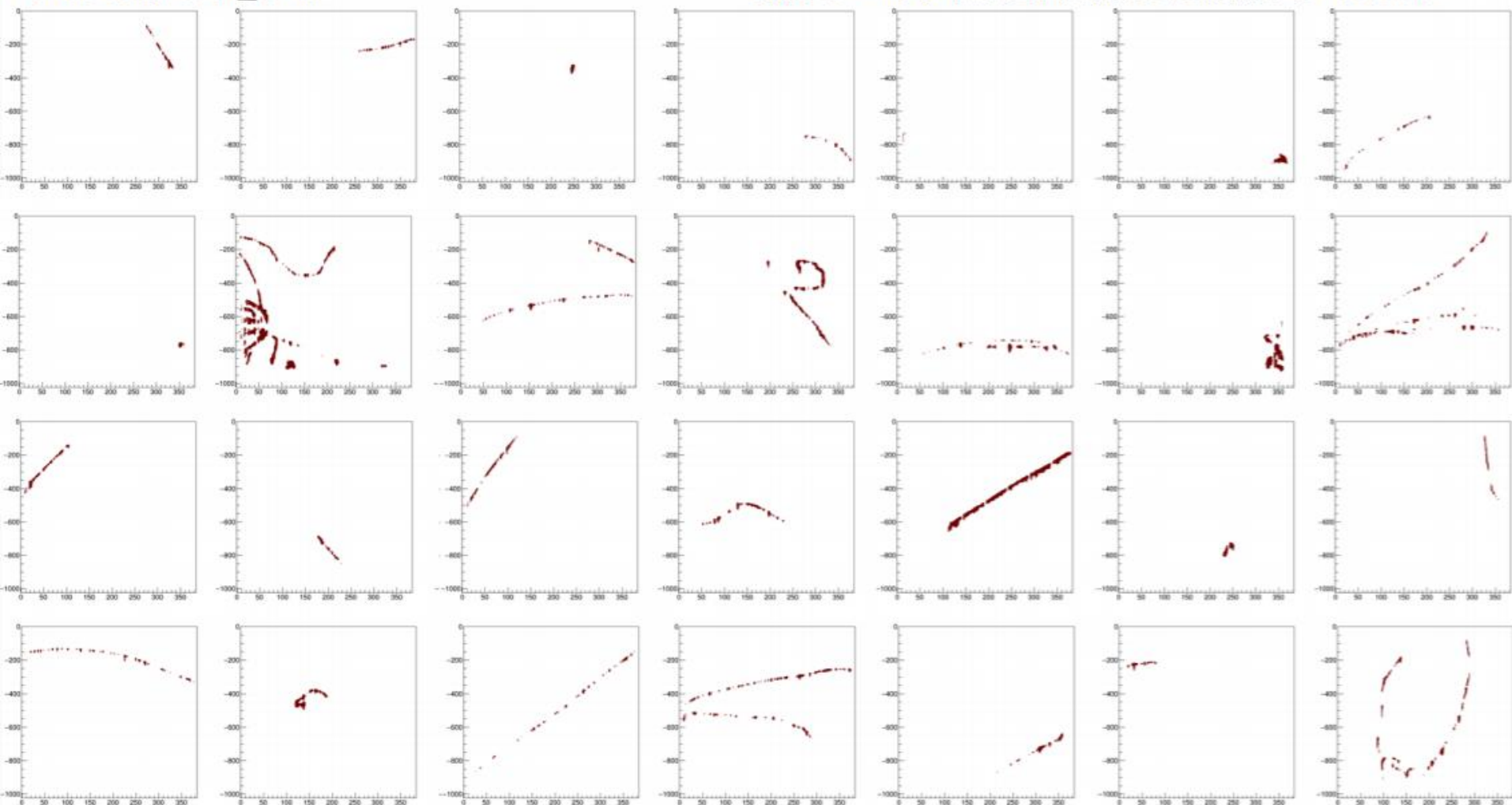
日本に帰還





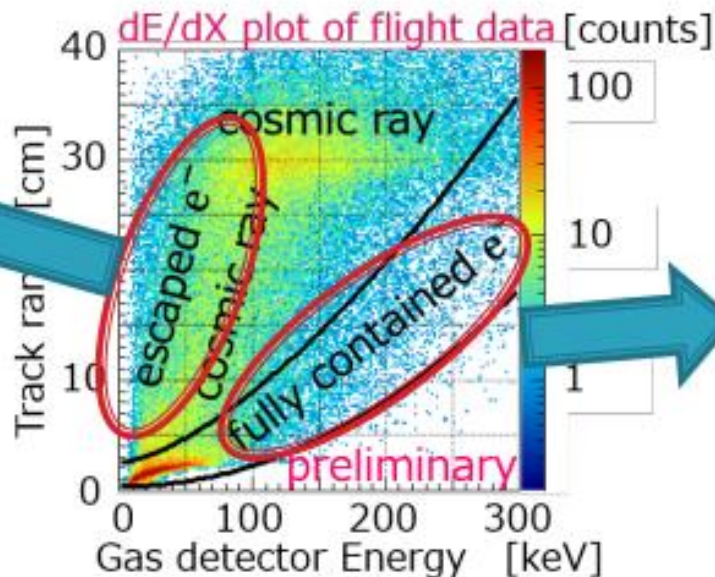
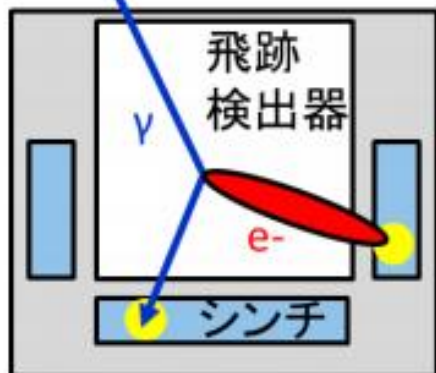
20180408/Per01\_ETCC

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 MeV)



低エネルギー事象  
(for < 1 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.  $\alpha$ 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

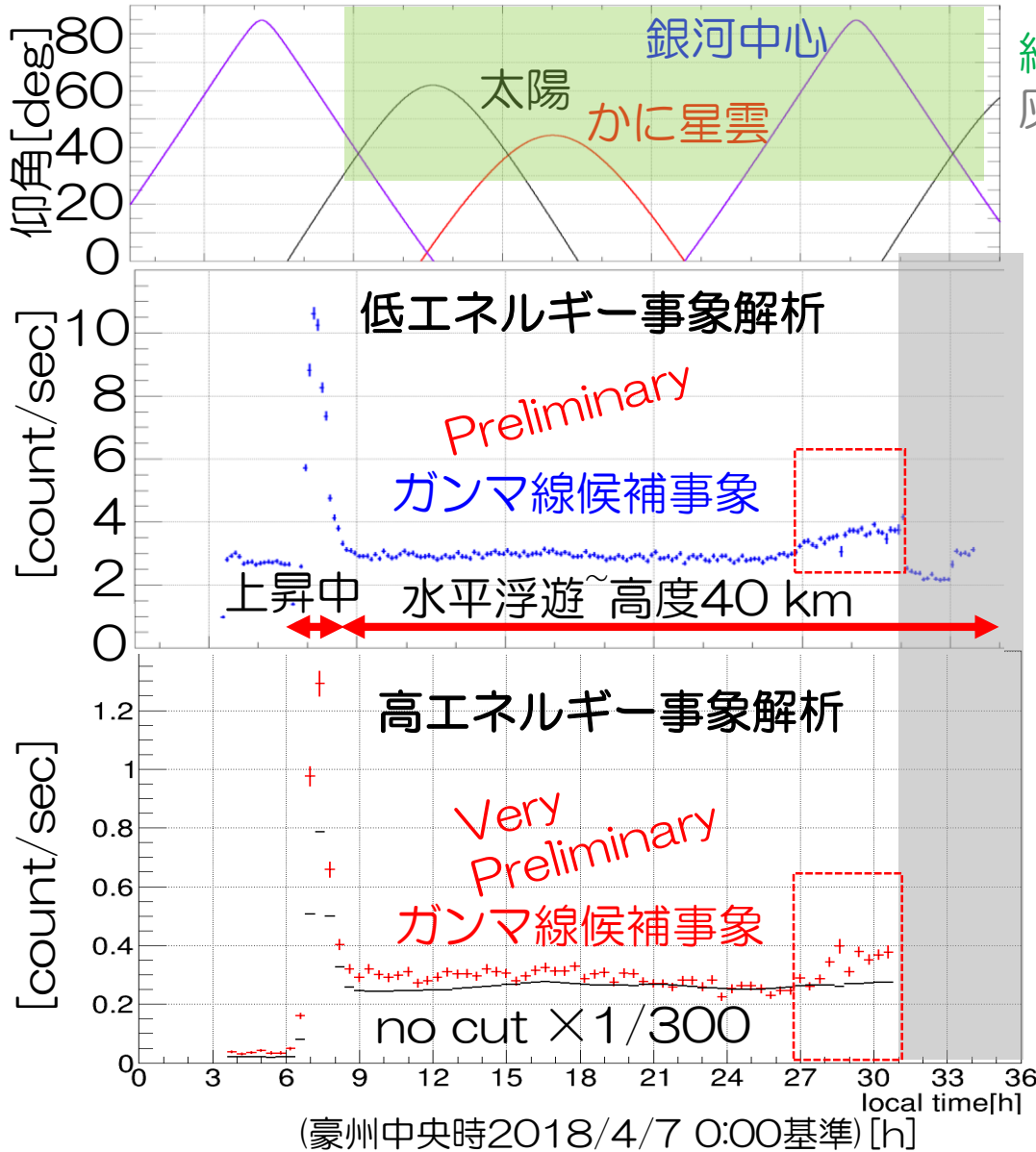
3. fully contained electron

4.  $\alpha$ 角でのCompton散乱の保証

観測データのうち、  
2つの独立したデータ群に対し、異なる解析手法を適応



# 銀河中心南中とイベントトレートの変化



緑：ETCC視野内

灰：飛跡検出器で雑音発生

低・高エネルギー事象ともに、  
銀河中心領域の南中に同期した  
計数率の増加

(視野銀中OFF : ON  $\approx 3:1$ )

$\Rightarrow$  信号のファクター倍程度まで  
雑音除去に成功

※no cut: ほぼ宇宙線由来なので  
天体の有無に関係なくフラット

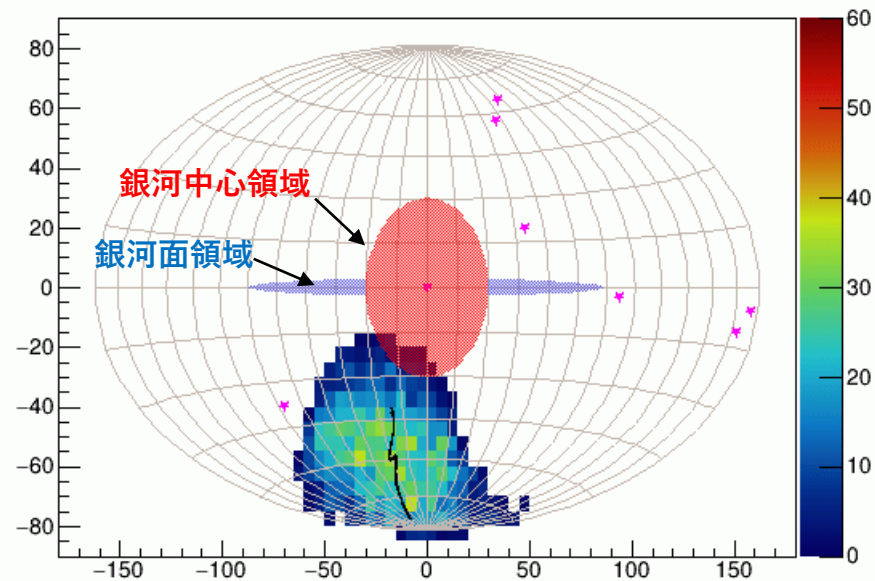
# 低エネルギー事象解析

OFF領域：視野中心高銀緯方向

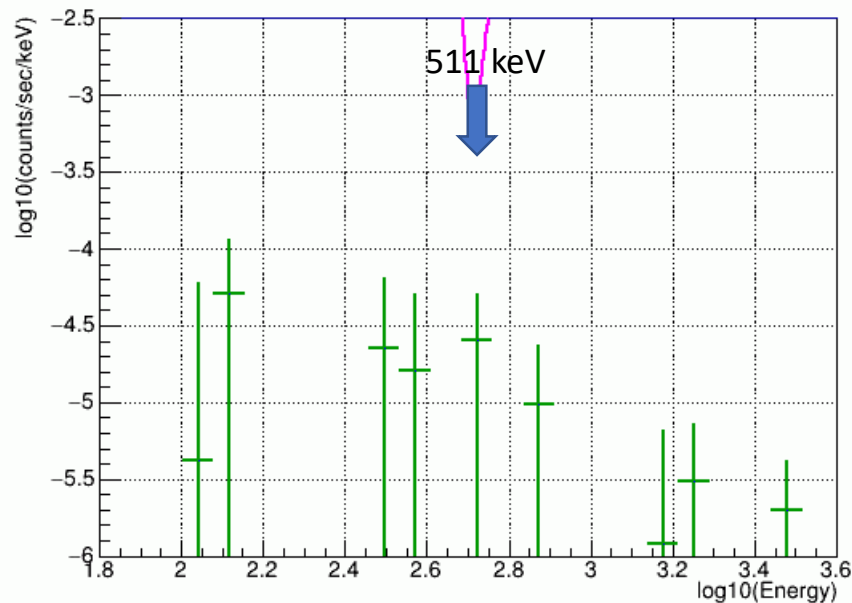
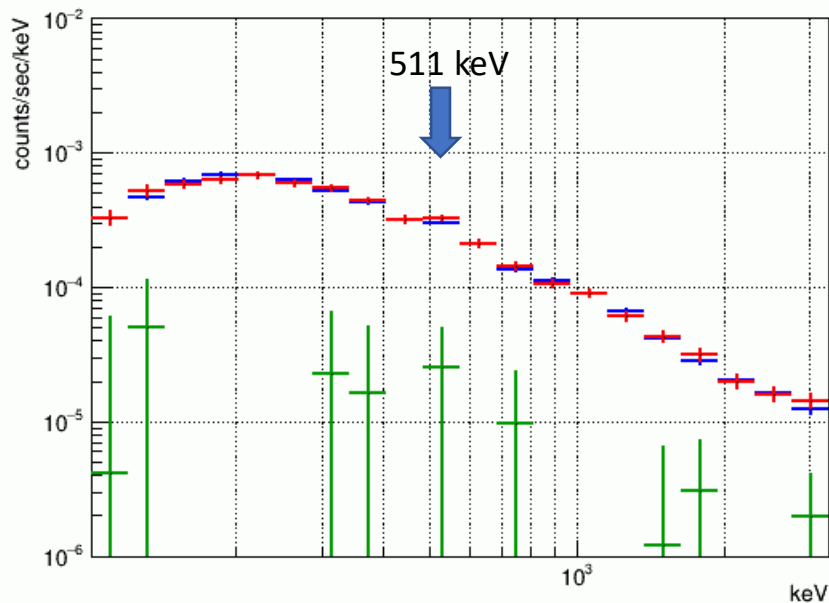
4/7 9:00-13:00 (ACST)

4/7 21:00-23:00 (ACST)

Source region 9.000000-11.500000

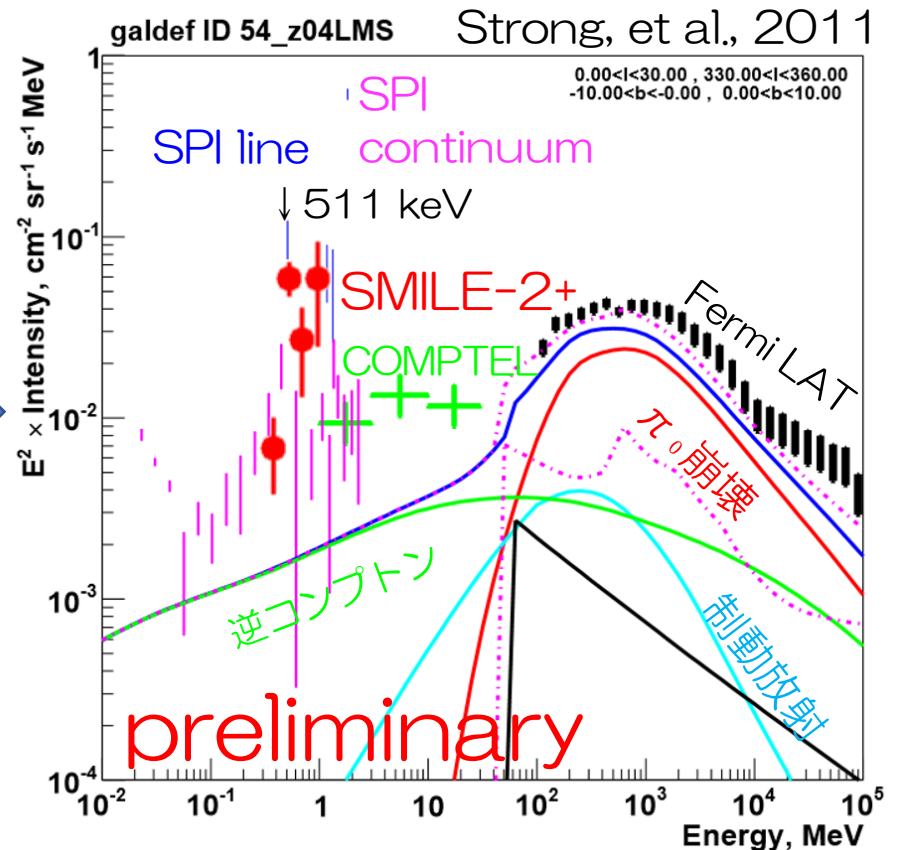
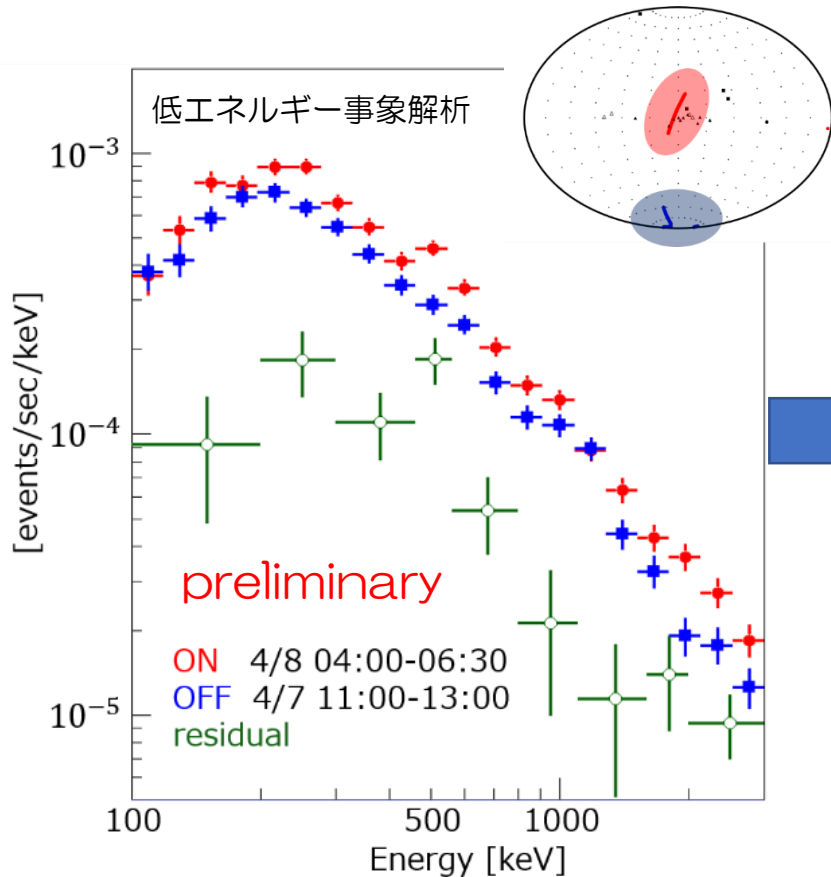


gamma ray spectrum





# 銀河中心領域での強度算出



$5\sigma$  ( $511 \pm 50$  keVにおけるON-OFF)  
 $3.5\sigma$  (連続成分に対する511 keVの有意度)  
 $10\sigma$  (連続成分、ON-OFF)

他の観測と近い値を算出。  
 解析や、特に誤差の評価はこれから詰めていく。  
 高エネルギー事象についてもレスポンスを作成、  
 強度スペクトルを $\sim 5$  MeVまで伸ばす。

この延長線上の将来の衛星観測で、sub-mCrabの感度が実現できる。

# 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

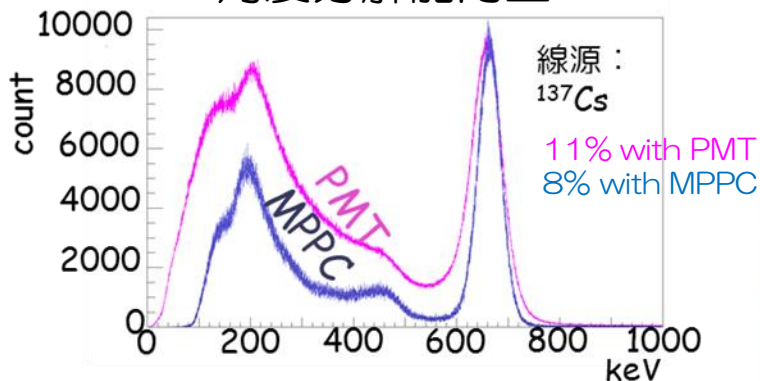
@ Fort Sumner : Cyg X-1 / Crabの偏光観測

有効面積を >10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

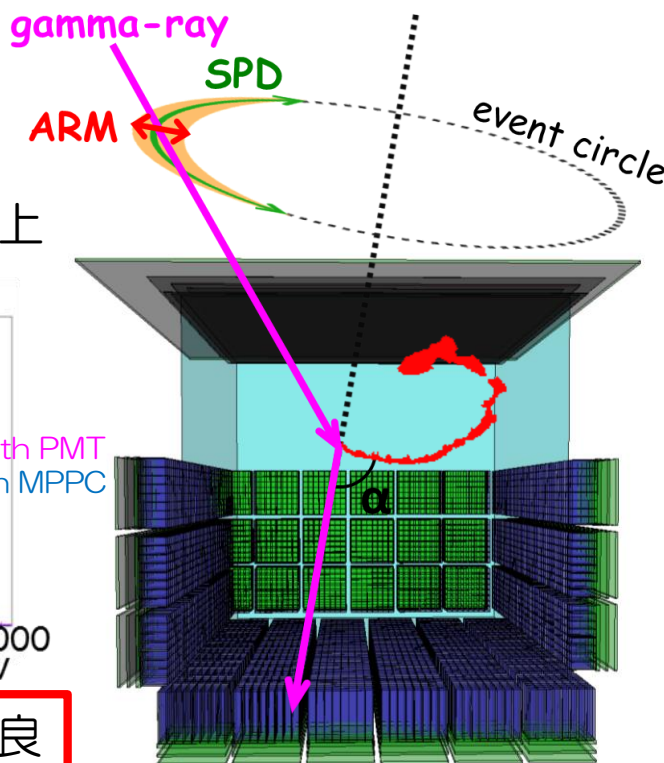
光読み出しをMPPCへ

⇒ エネルギー分解能向上  
角度分解能向上



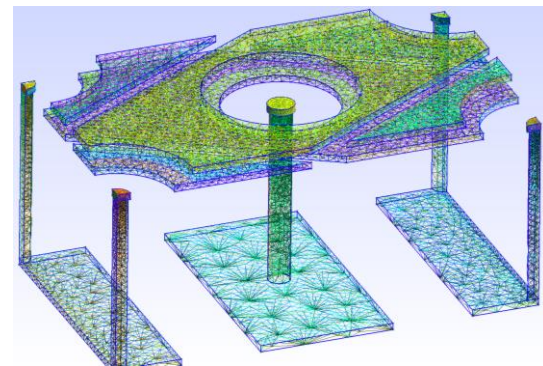
## 全体システムの改良

ガス圧力容器を露出  
構造体の見直し (軽量化)



## ガス飛跡検出器の改良

$\text{CF}_4$  baseのガスで3気圧  
ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ  
ガス圧力容器の軽量化  
3軸読み出し $\mu$ -PIC

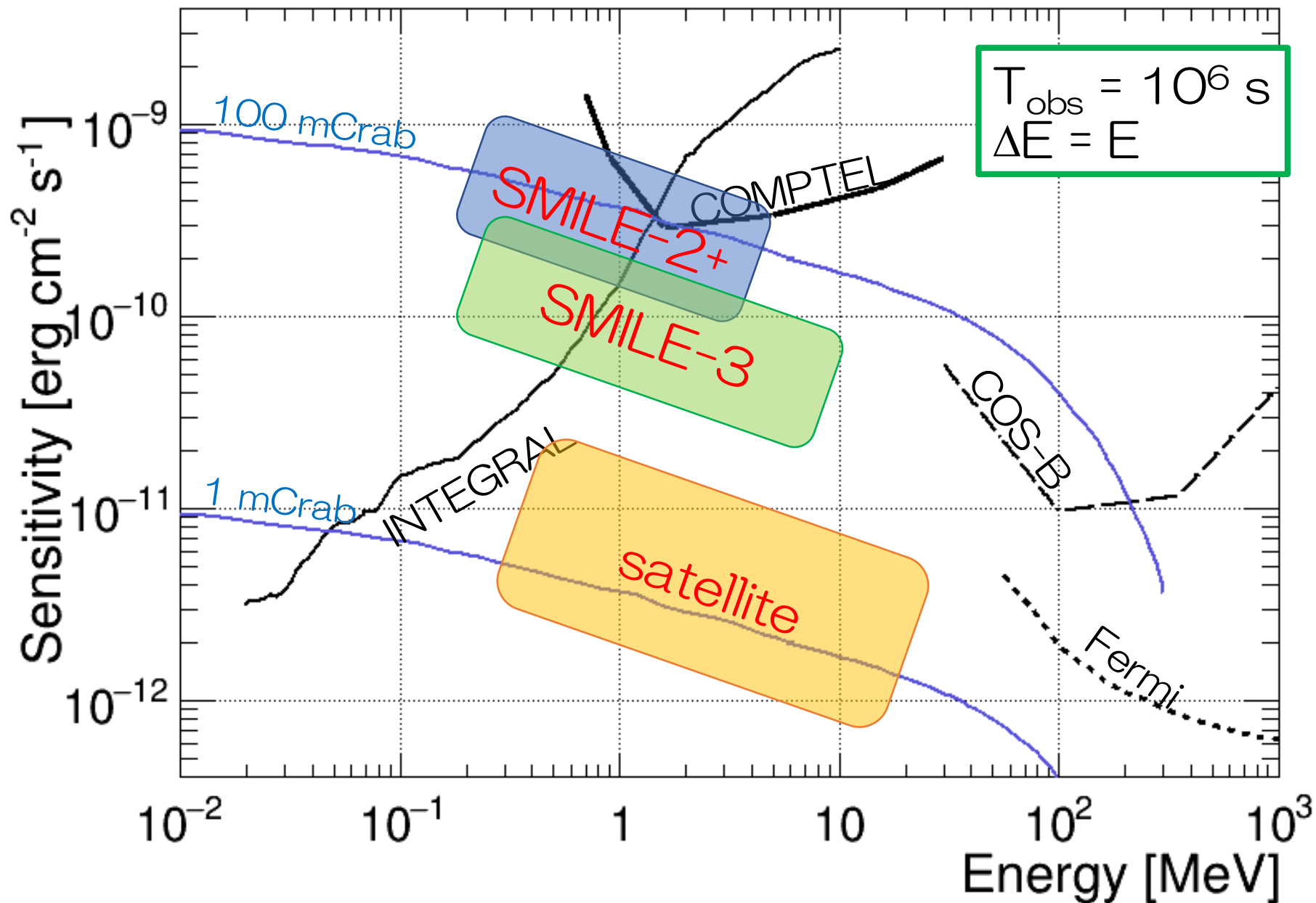


## 今回からの修正点

姿勢センサの見直し

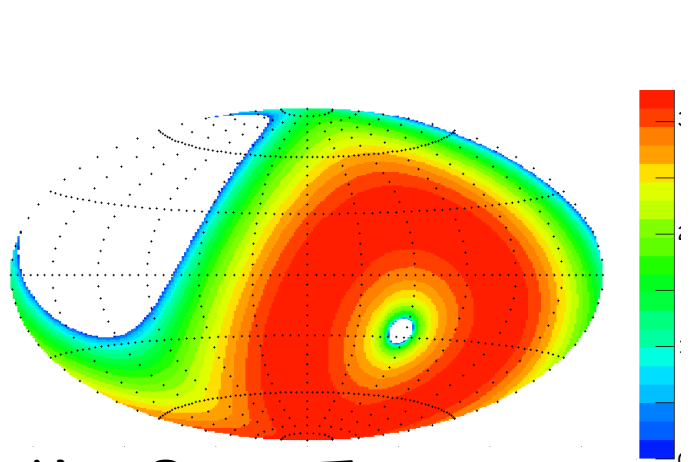


# 将来計画の予想検出感度

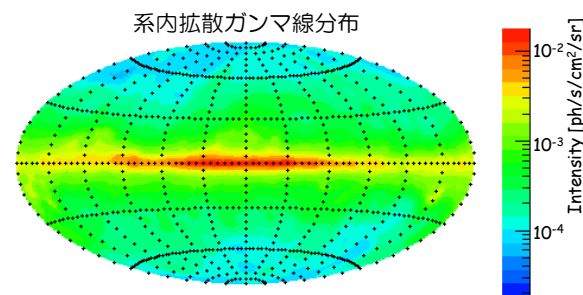
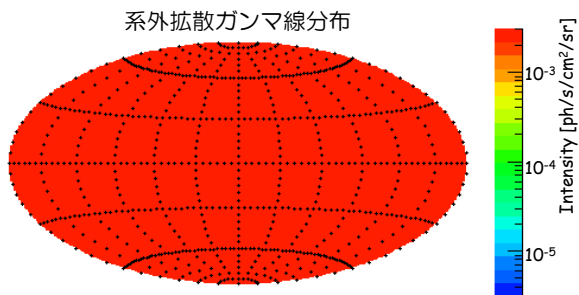
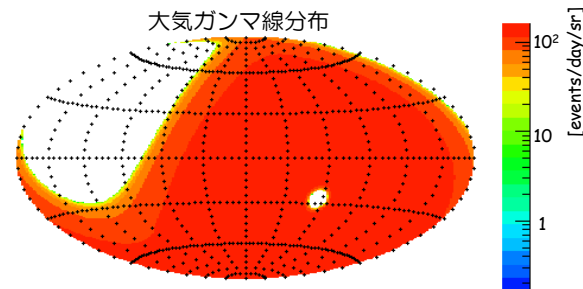
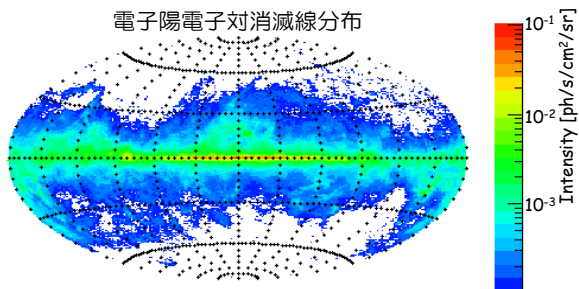


SMILE-2+での

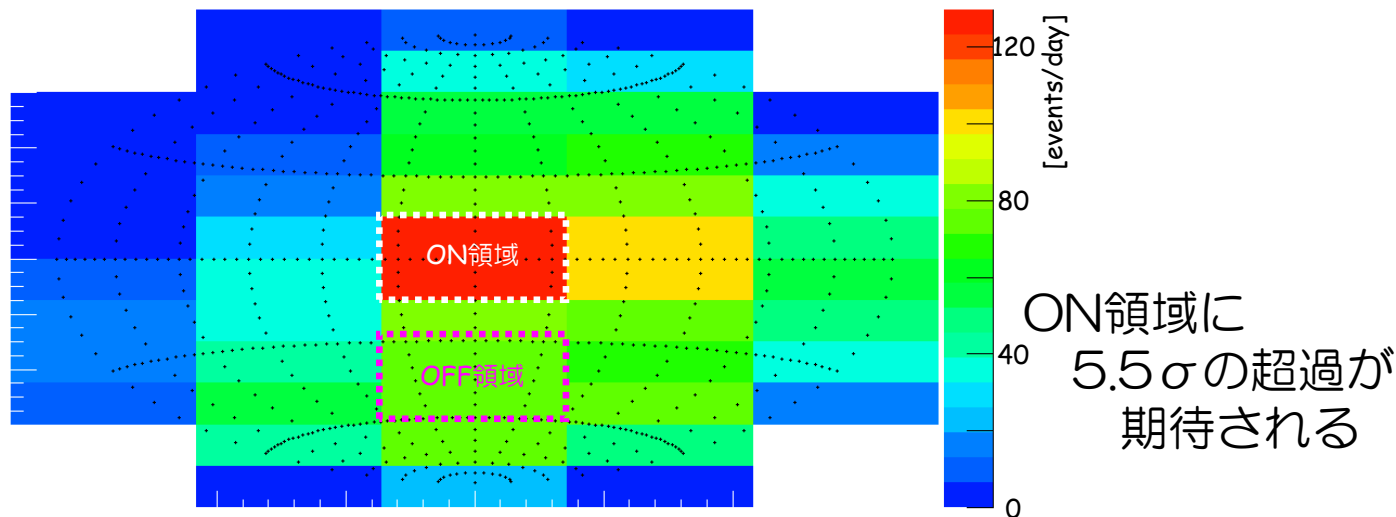
# 511 keVガンマ線の観測予測



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

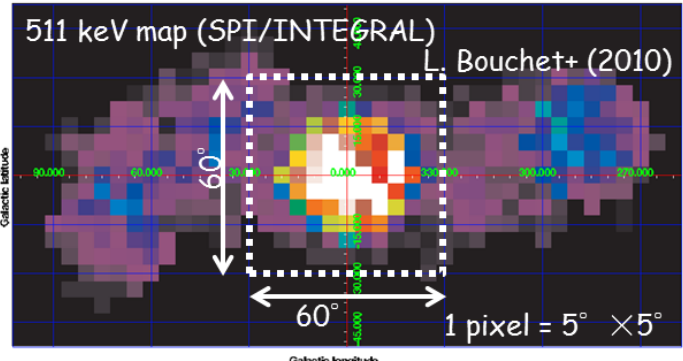
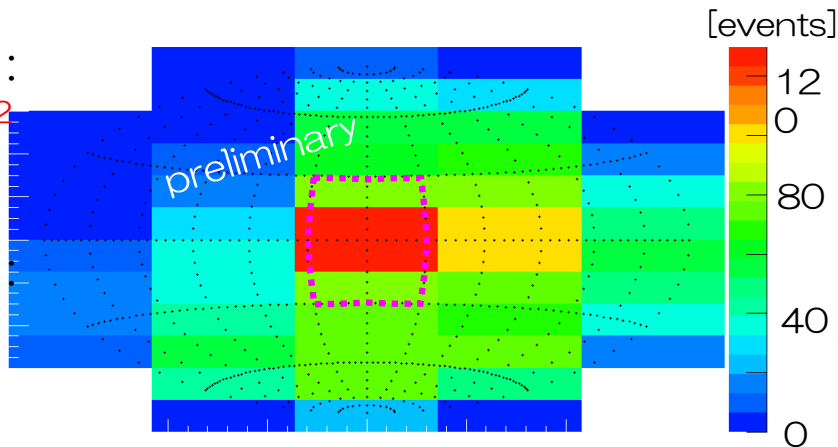




# 電子・陽電子対消滅線

## SMILE-2+

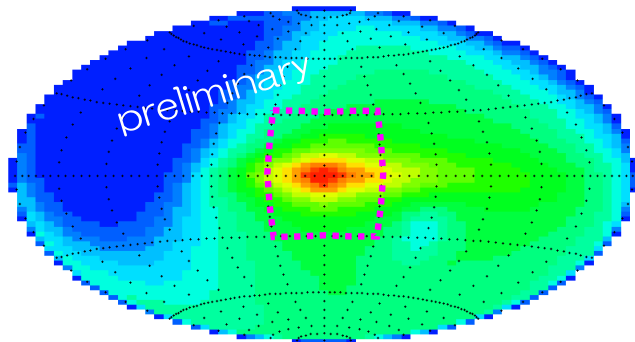
有効面積：  
 $\sim 3 \text{ cm}^2$   
 PSF：  
 $\sim 10^\circ$   
 観測時間  
 1 day



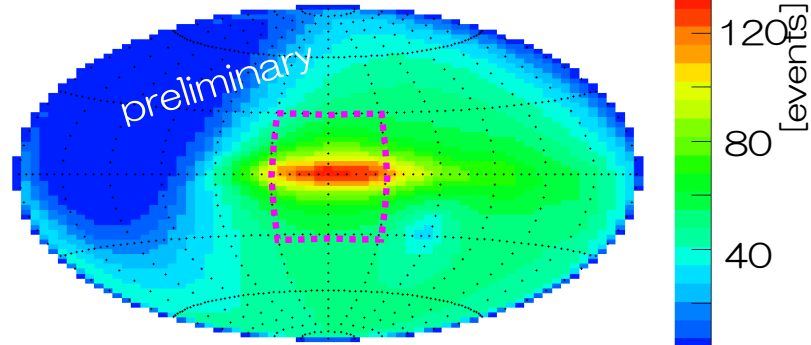
## SMILE-3

有効面積：  
 $\sim 10 \text{ cm}^2$   
 PSF：  
 $\sim 7^\circ$   
 観測時間：  
 30 days

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



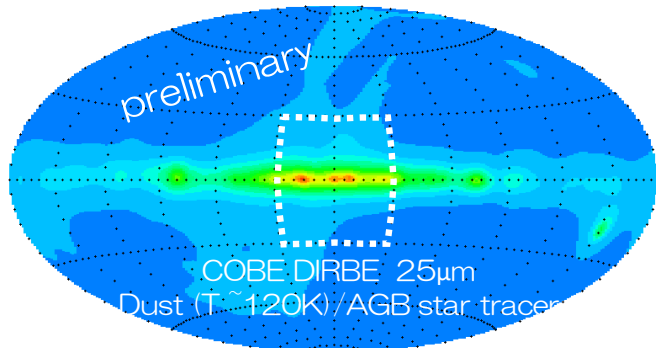
COBE DIRBE  $240\mu\text{m}$   
 Dust ( $T \sim 12\text{K}$ ) tracer



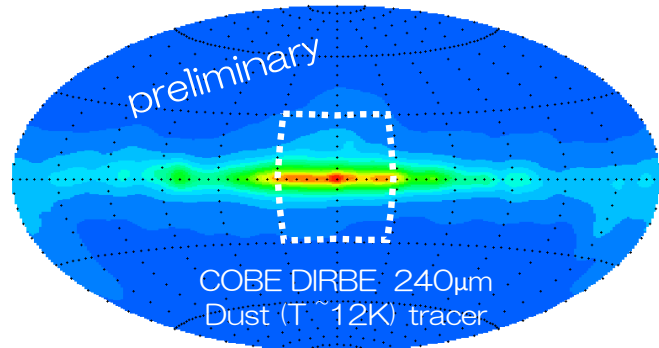
1 pixel  $\sim 14.8^\circ \times b 2.4^\circ$

## Satellite

有効面積：  
 $\sim 200 \text{ cm}^2$   
 PSF：  
 $4.5^\circ$   
 観測時間：  
 1 year



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

# まとめ

- SMILE-2+の目的は天体観測によるイメージングの実証
- 2018年4月にオーストラリアで気球実験を実施。
- 1日のフライトで銀河中心領域を8時間、かに星雲を6時間の観測に成功した。
- 観測対象

銀河中心領域 想定： $5\sigma$  ( $511 \pm 50$  keVにおけるON-OFF)

観測： $5\sigma$  ( $511 \pm 50$  keVにおけるON-OFF)

$3.5\sigma$  (連続成分に対する511 keVの有意度)

$10\sigma$  (連続成分、ON-OFF)

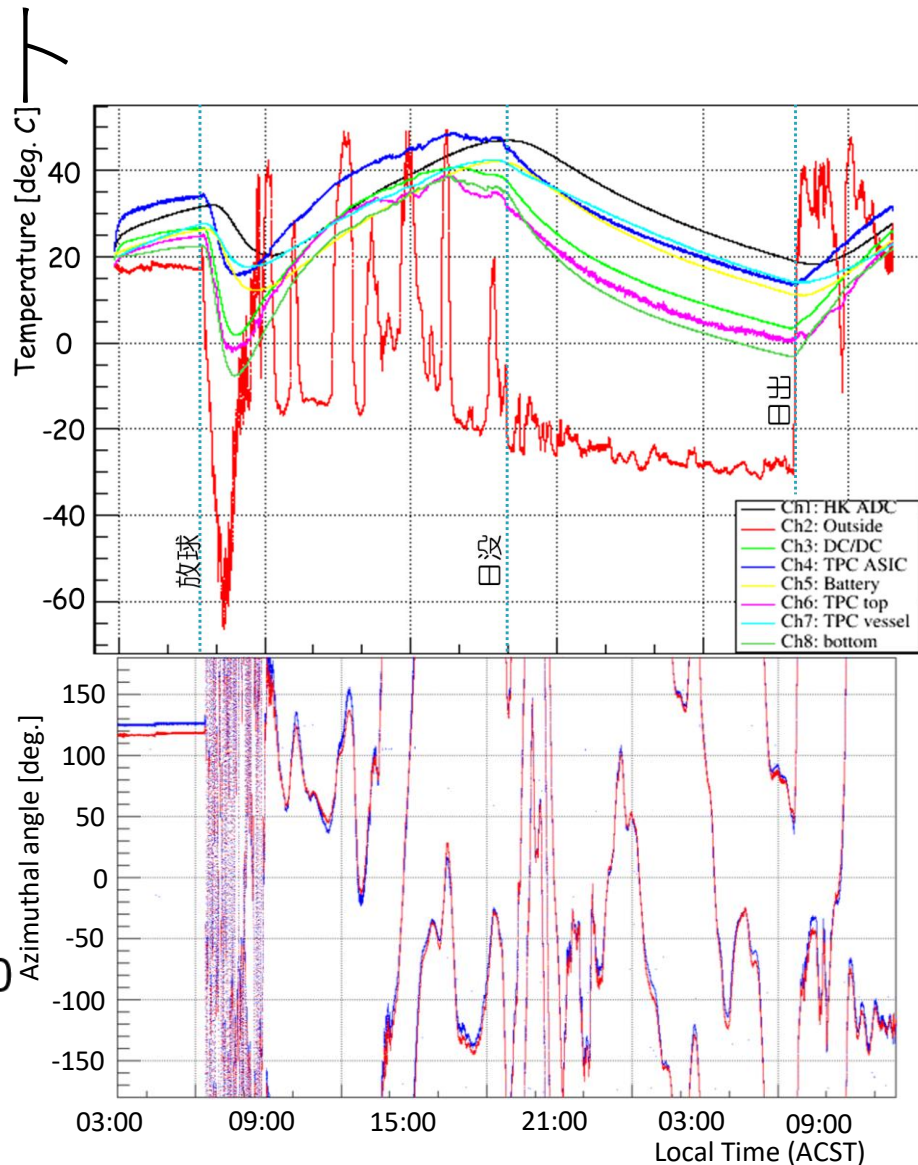
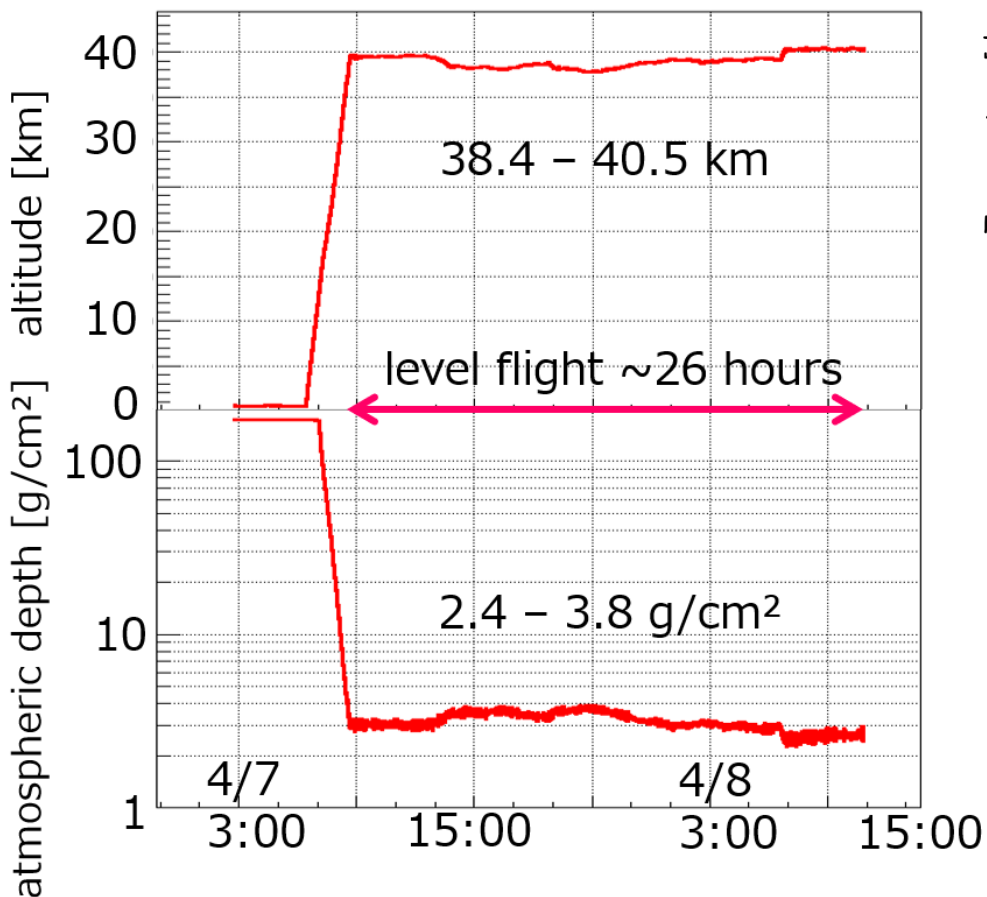
かに星雲 想定： $5\sigma$

観測： $\sim 3\sigma$  (若干高度が低い)

- 低・高エネルギー事象ともに、銀河中心領域の南中に同期した計数率の増加を確認。
- 低エネルギー事象に関して、銀河中心領域からのスペクトルを算出。これまでの観測と近い値。
- 今後、検出器のシミュレーションの改善・バックグラウンド事象の評価、レスポンス引き戻し法の確立し、系内・系外・大気拡散ガンマ線の算出、銀河座標マップを作成する。
- SMILE-3 有効面積  $\sim 10$  cm<sup>2</sup>, 角度分解能  $5\sim 10$ 度  
⇒ 系内拡散ガンマ線/511 keVの銀河面分布・Cen A・26Al…etc
- SMILEのロードマップ実現を担保する結果が得られた。MeVガンマ線の夜明けは近い



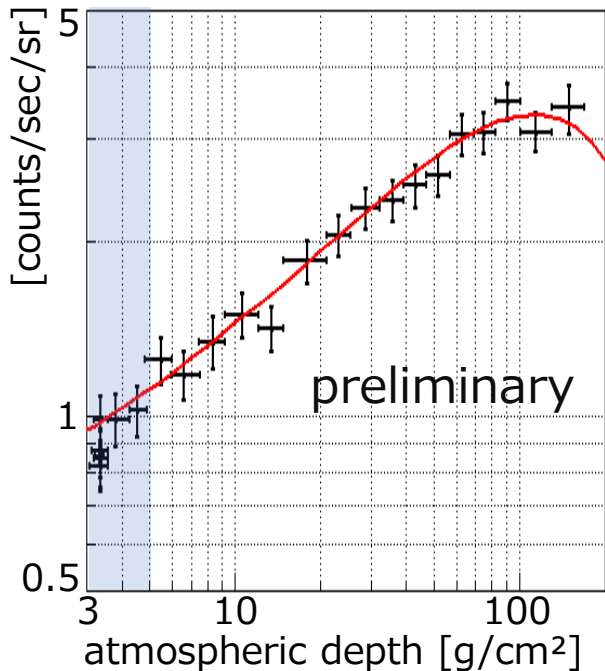
# SMILE-2+フライト



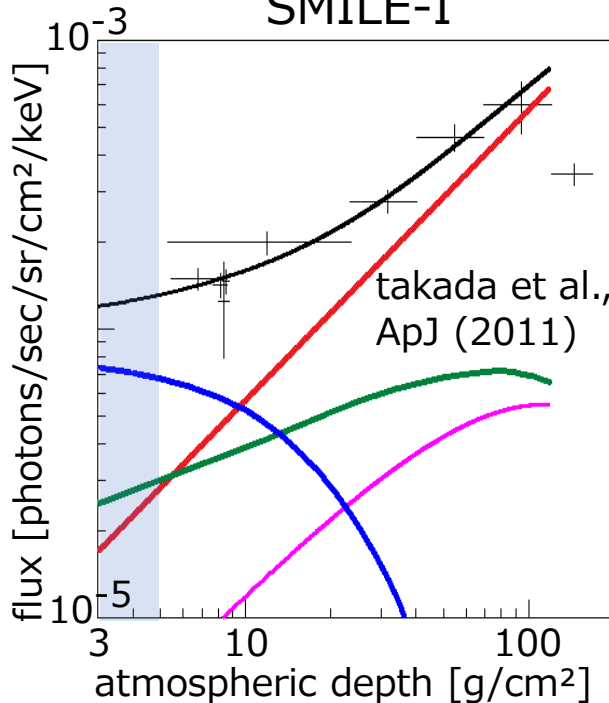
予定通りの高度を26時間に渡って維持  
 一部センサに動作不良があったものの、姿勢・環境はモニタできた

# ガンマ線強度の残留大気圧依存性

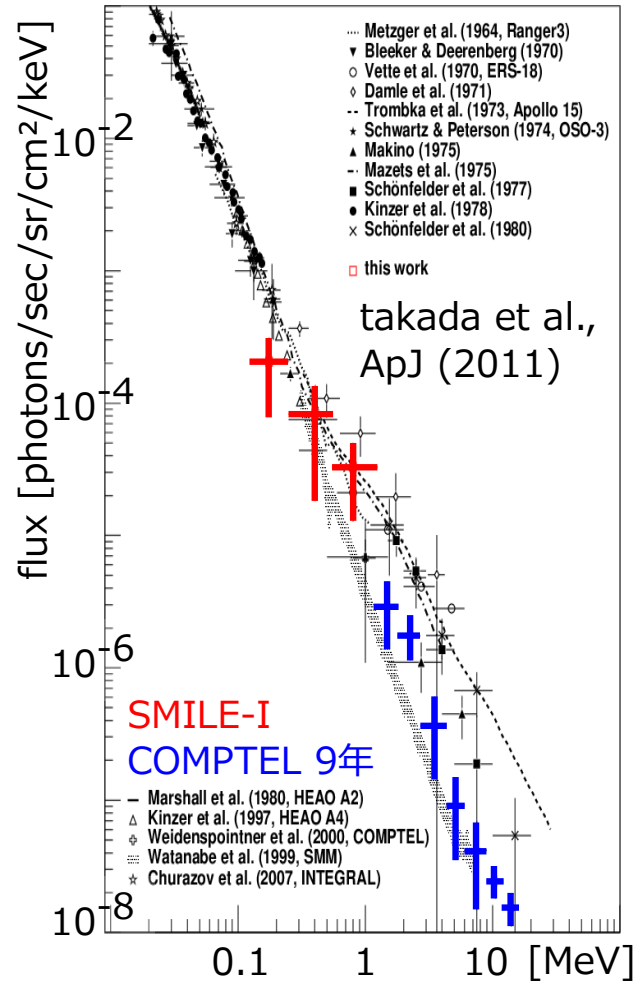
SMILE-2+



SMILE-I



宇宙拡散ガンマ線フラックス



## SMILE-Iとの比較

- 有効面積 100倍
- 事象数 500倍 (水平飛翔)
- 低大気圧  $\sim 3 \text{ g/cm}^2$

## Total

Cosmic

Atmospheric

$e^+ e^-$  annihilation

Background

今後の解析で、宇宙拡散ガンマ線を精度よく決める。



# 陽電子生成源候補

N. Prantzos, et al, 2011

Source	Process	$E(e^+)^a$ (MeV)	$e^+$ rate <sup>b</sup> $\dot{N}_{e^+}(10^{43} \text{ s}^{-1})$	Bulge/Disk $B/D$	Comments
Massive stars: $^{26}\text{Al}$	$\beta^+$ -decay	$\sim 1$	0.4	$< 0.2$	$\dot{N}, B/D$ : Observationally inferred $\dot{N}$ : Robust estimate Assuming $f_{e^+,esc}=0.04$
Supernovae: $^{24}\text{Ti}$	$\beta^+$ -decay	$\sim 1$	0.3	$< 0.2$	
SNIa: $^{56}\text{Ni}$	$\beta^+$ -decay	$\sim 1$	2	$< 0.5$	
Novae	$\beta^+$ -decay	$\sim 1$	0.02	$< 0.5$	
Hypernovae/GRB: $^{56}\text{Ni}$	$\beta^+$ decay	$\sim 1$	?	$< 0.2$	Improbable in inner MW
Cosmic rays	p-p	$\sim 30$	0.1	$< 0.2$	Robust estimate
LMXRBs	$\gamma-\gamma$	$\sim 1$	2	$< 0.5$	Assuming $L_{e^+} \sim 0.01 L_{obs,X}$
Microquasars	$\gamma-\gamma$	$\sim 1$	1	$< 0.5$	
Pulsars	$\gamma-\gamma / \gamma-\gamma_B$	$> 30$	0.5	$< 0.2$	
ms pulsars	$\gamma-\gamma / \gamma-\gamma_B$	$> 30$	0.15	$< 0.5$	
Magnetars	$\gamma-\gamma / \gamma-\gamma_B$	$> 30$	10 (?)	$< 0.2$	$e^+$ yield overestimated (?)
Central black hole	p-p	High	?		
	$\gamma-\gamma$	1	?		Requires $e^+$ diffusion to $\sim 1$ kpc
Dark matter	Annihilation	1 (?)	?		Light scalar required, only NFW profile allowed
	Deexcitation	1	?		Only NFW profile allowed
	Decay	1	?		Ruled out by obs. and theor. DM profiles
Observational constraints		$< 7$	2	1.4	

# 系内 & 系外拡散ガンマ線

