

SMILE-2+における MeVガンマ線天体検出感度

吉川慶 (京都大学)

谷森達, 高田淳史, 水村好貴^A, 池田智法,
竹村泰斗, 中村優太, 小野坂健, 齋藤要, 阿部光,
荻尾真吾, 津田雅弥, 吉田有良, 窪秀利,
黒澤俊介^B, 身内賢太郎^C, 澤野達哉^D, 濱口健二^E
京大理 ^AISAS/JAXA ^B東北大NICHe ^C神戸大理 ^D金沢大
^Eメリーランド大

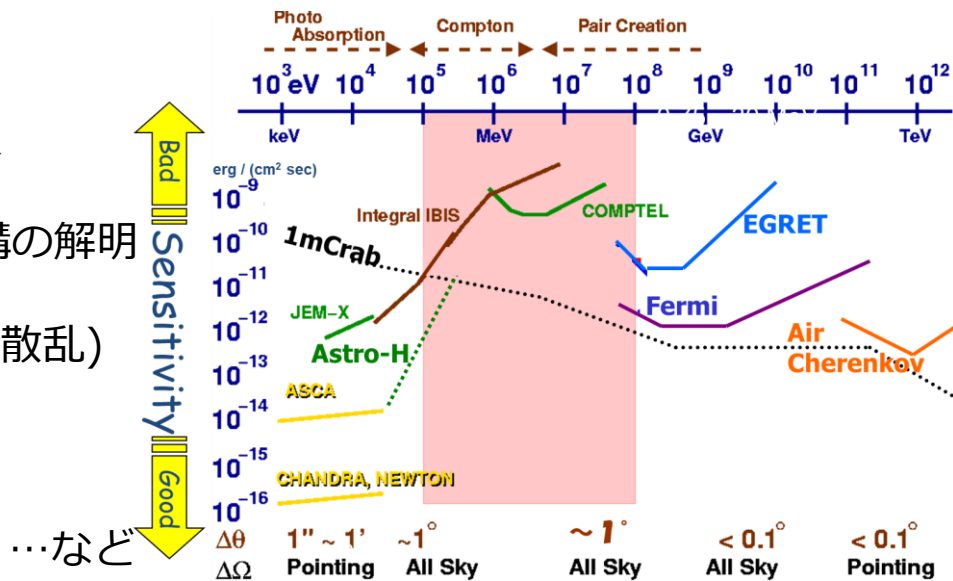
写真：放球直前 @ オーストラリア, アリススプリングス, 2018/4/7

目次

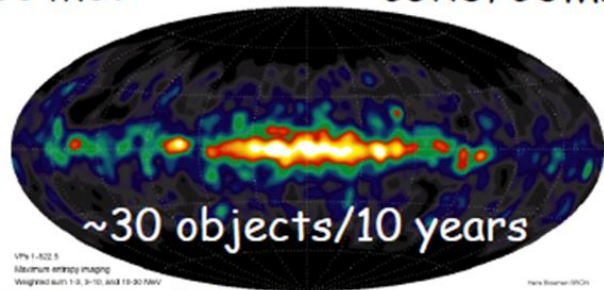
- MeVガンマ線天文学
- 観測での問題点
- SMILE-2+実験
 - データのクロスチェック
 - 系外・大気拡散ガンマ線
 - 銀河中心領域
 - かに星雲・検出感度
- まとめ

MeVガンマ線天文学

- 元素合成
超新星爆発：元素合成のプロセスの解明
銀河面(^{26}Al , ^{60}Fe)：元素拡散のトレース
- 粒子加速
活動銀河核, ガンマ線バースト：放射機構の解明
超新星残骸：宇宙線加速源の探査
(π_0 -decay or 逆コンプトン散乱)
- 遠方宇宙
活動銀河核：銀河の進化への制限
ガンマ線バースト：宇宙初期の星生成



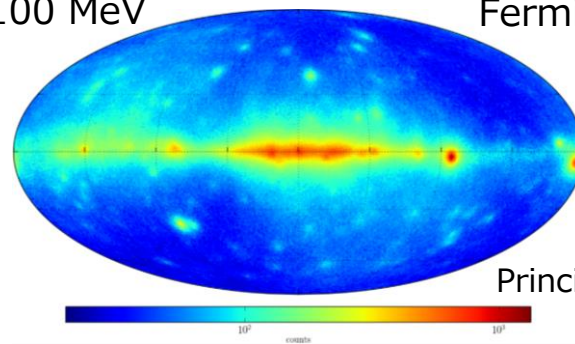
1-30 MeV



V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

CGRO/COMPTEL

30-100 MeV



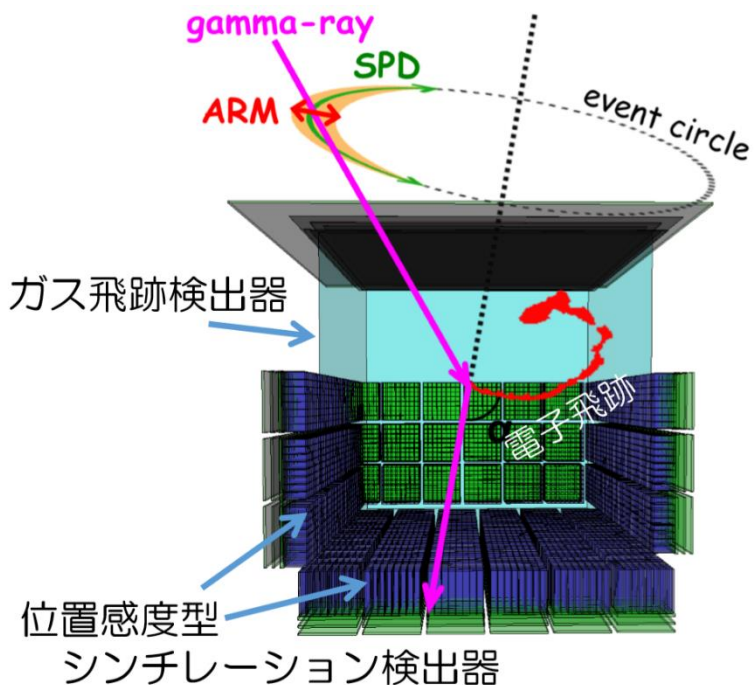
Fermi/LAT

Principe et al. 2018

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

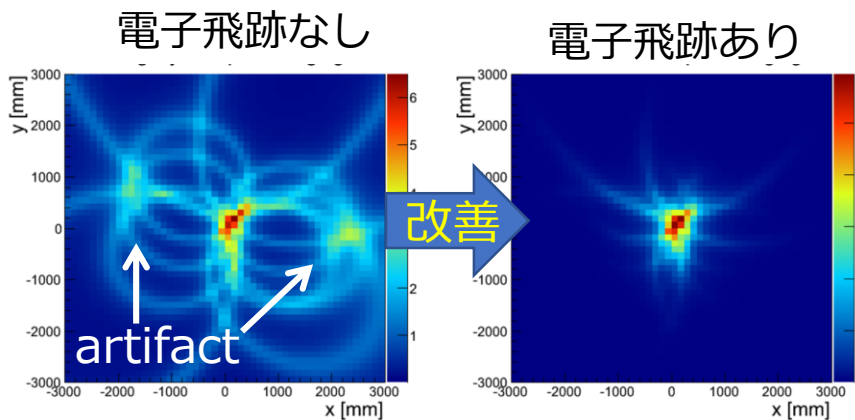


- ガス飛跡検出器(TPC + GEM + μ PIC)
反跳電子の飛跡とエネルギー
- 位置有感シンチレーション検出器(GSO + PMT)
散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー



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

到来方向とエネルギーを一意に決定。
角度分解能を1次元のARMではなく、
2次元のHalf Power Radiusで評価



Mizumura et al. 2014

- 広視野 ~ 3 str
 - S/N ~ 1 の冗長な雑音除去能力
- α 角によるコンプトン散乱運動学テスト
エネルギー損失率による粒子識別

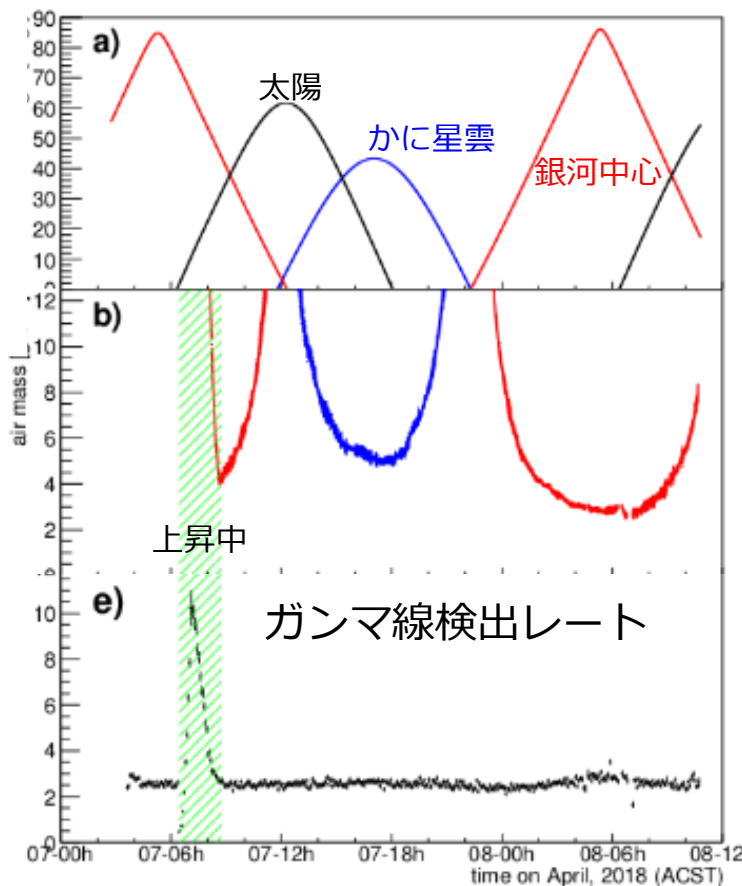
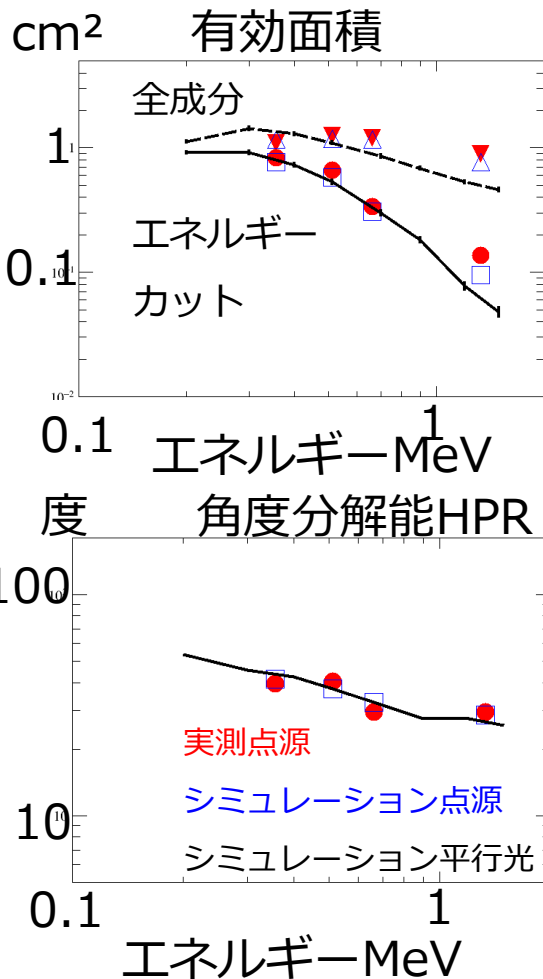
MeVガンマ線全天観測に最適

SMILE-2+での目的と現在の状態

目的: 明るい天体による撮像分光能力の実証

気球飛翔: 2018/4/7-8@豪州, 水平飛翔26時間, 高度39 km

現在の状態



論文化の前の
データのクロスチェック
→済み

かに星雲の観測結果と
検出感度の値のフィックス
→近日論文投稿予定

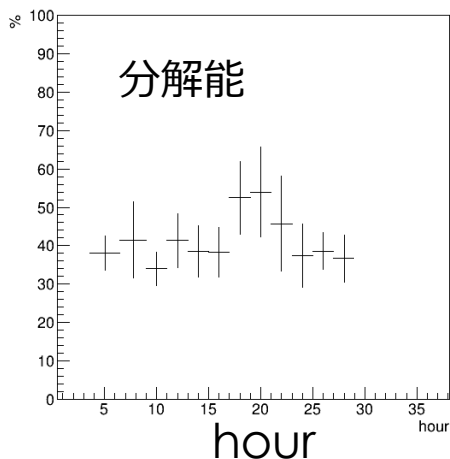
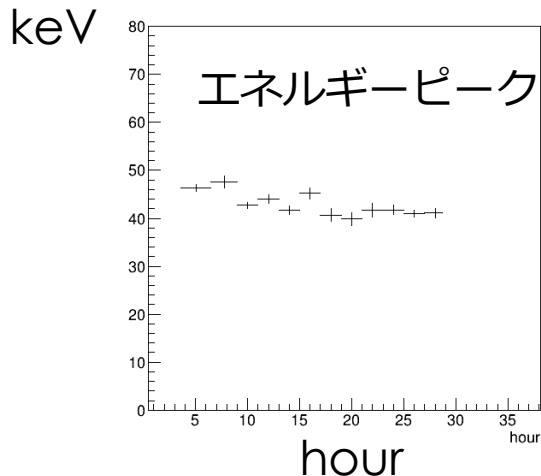
銀河中心領域の解析
スペクトルや空間分布を
解析中
→論文化の準備中

系外拡散ガンマ線
大気拡散ガンマ線の解析
→論文化の準備中

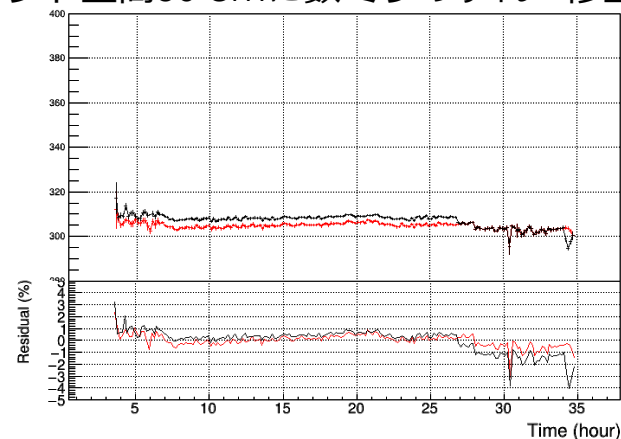
データのクロスチェック

今まで一人で解析していたものを、複数人で各パラメータをチェック
(ガス飛跡検出器エネルギーピーク・ドリフト空間・シンチエネルギーピーク・ジオメトリなど)

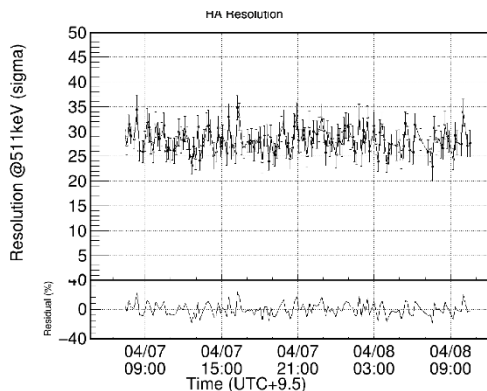
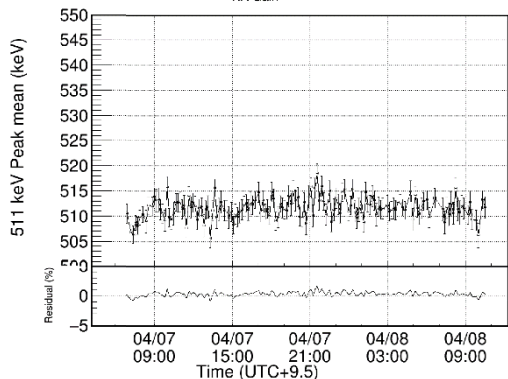
ガス飛跡検出器



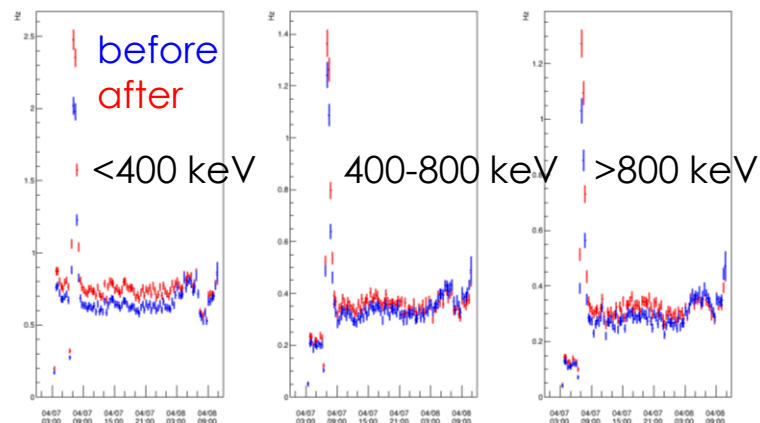
ドリフト空間30 cmに数ミリのずれ→修正



シンチ検出器



エネルギーごとのライトカーブ



銀河中心領域の時間帯で超過はあるが、低エネルギーで超過が減少→クロスチェック後のデータですべて再解析

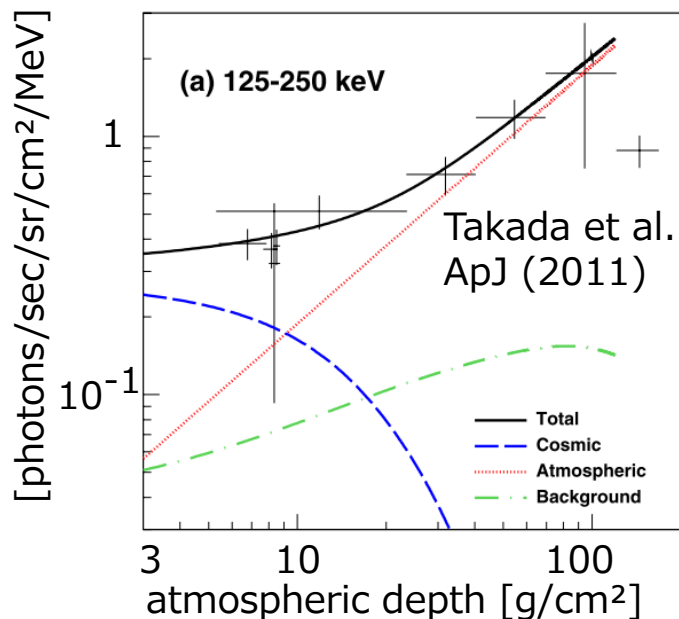
バックグラウンド成分の解析

MeVで観測されるバックグラウンド成分(観測データの主成分)

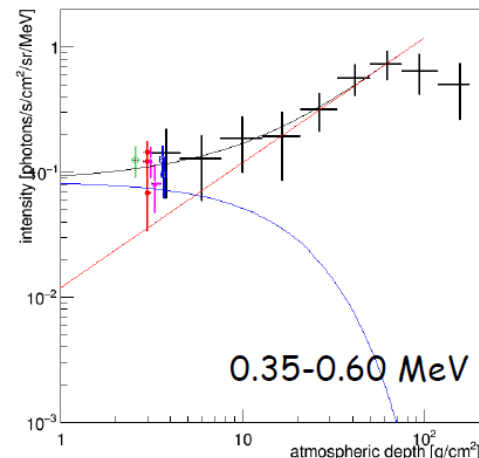
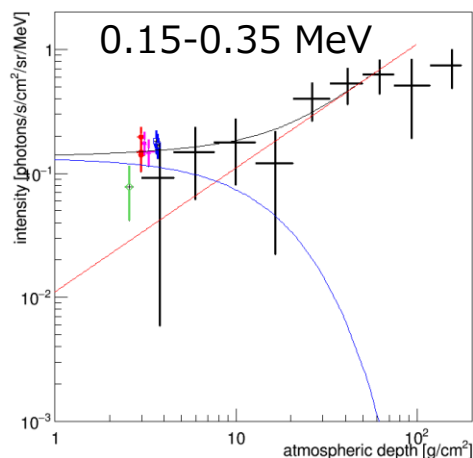
- 系外拡散ガンマ線 \propto 散乱項 $(1+p)$ \times 減衰項 $\exp(-\mu d)$
- 大気拡散ガンマ線 \propto 残留大気圧 d
- 宇宙線由来(検出器との相互作用によるガンマ線・ガンマ線以外の雑音の誤検出)
シミュレーションで計算が必要

Schönfelder et al. 1977

SMILE-I



SMILE-2+

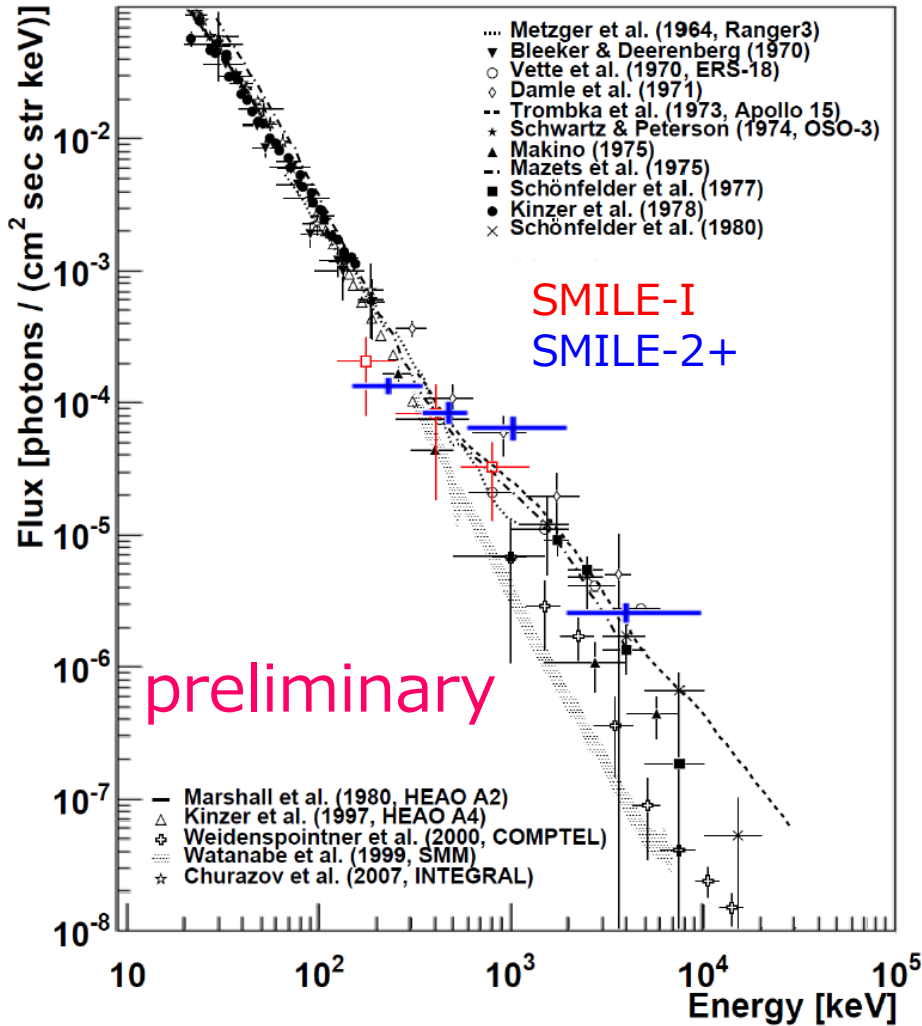


SMILE-Iでは、ほぼ系外・大気
宇宙線由来は10-20%程度
(他の実験では全体の90-99%)

宇宙線由来はSMILE-2+では算出中。
SMILE-Iと同等程度の~20%と予想
今回は系外・大気のみで強度算出

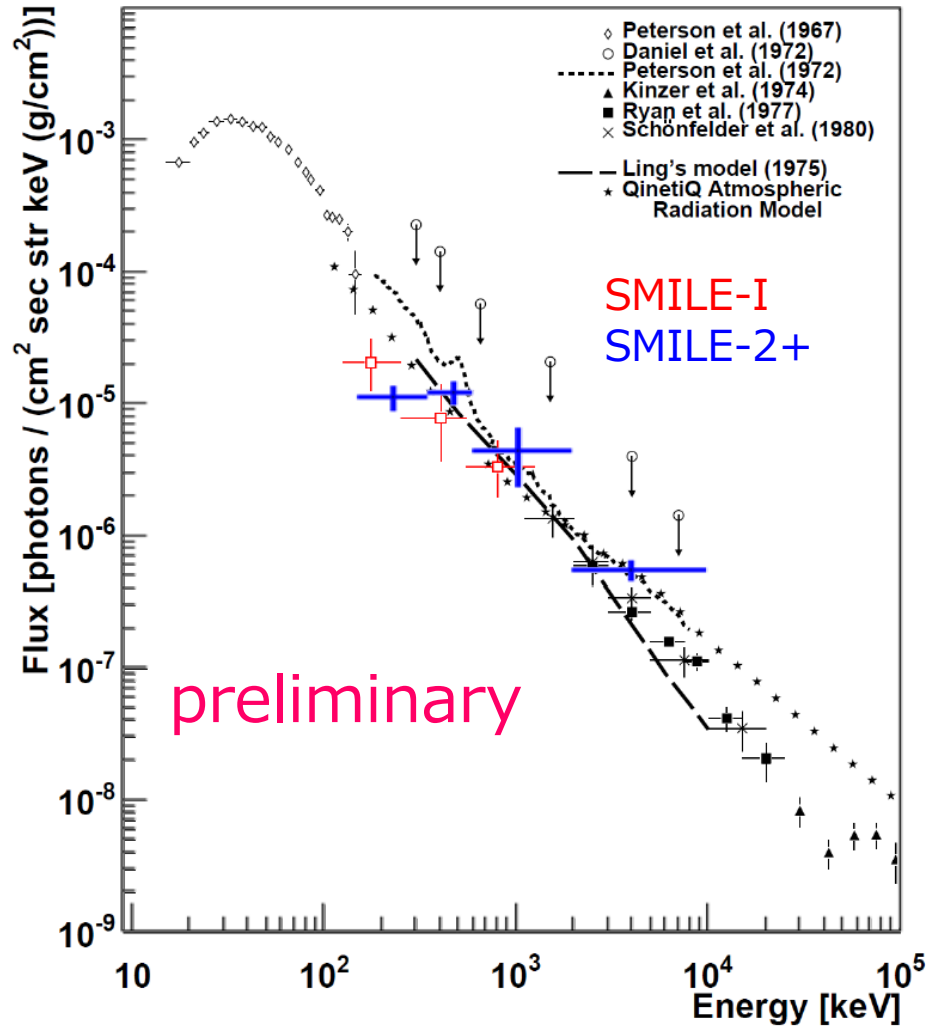
系外・大気拡散ガンマ線スペクトル

系外拡散ガンマ線



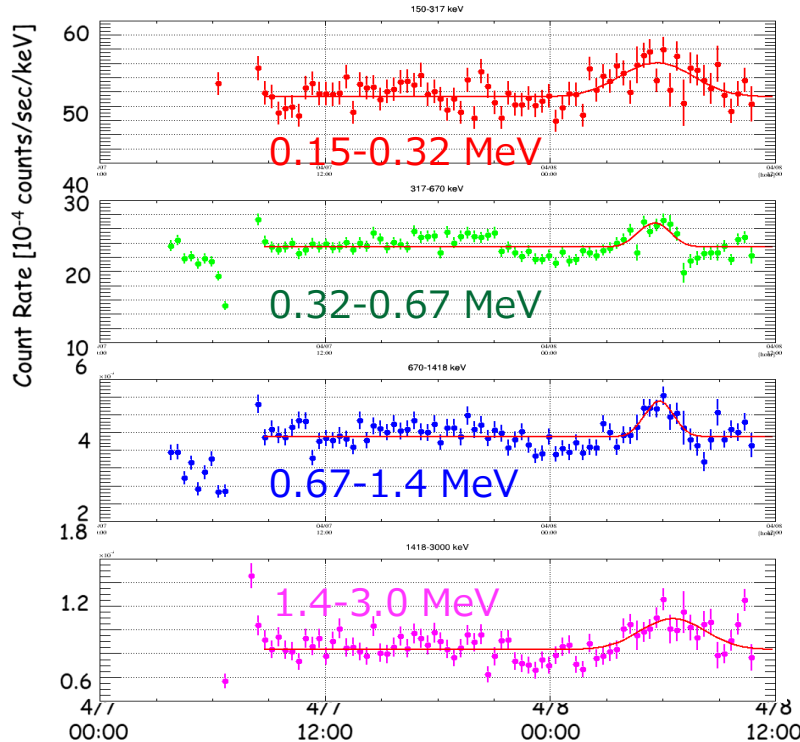
apolloや他の気球実験を裏付ける結果

大気拡散ガンマ線

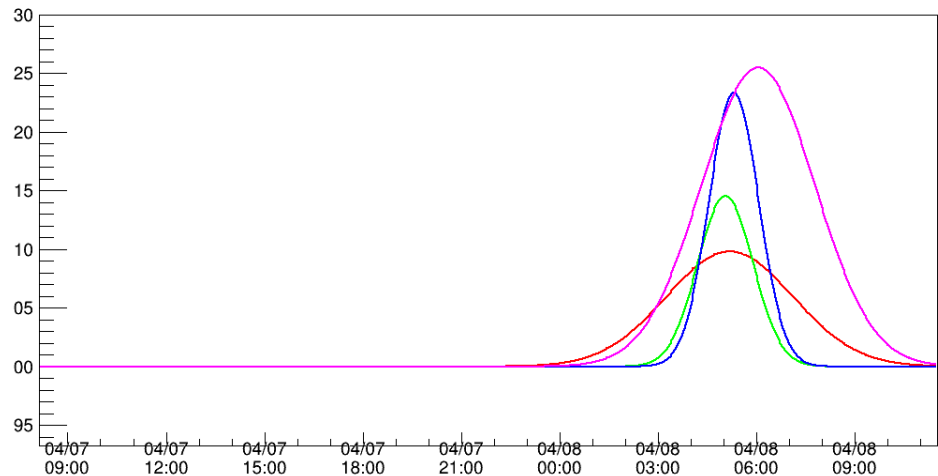


他の気球実験とコンシステント

銀河中心領域とライトカーブ



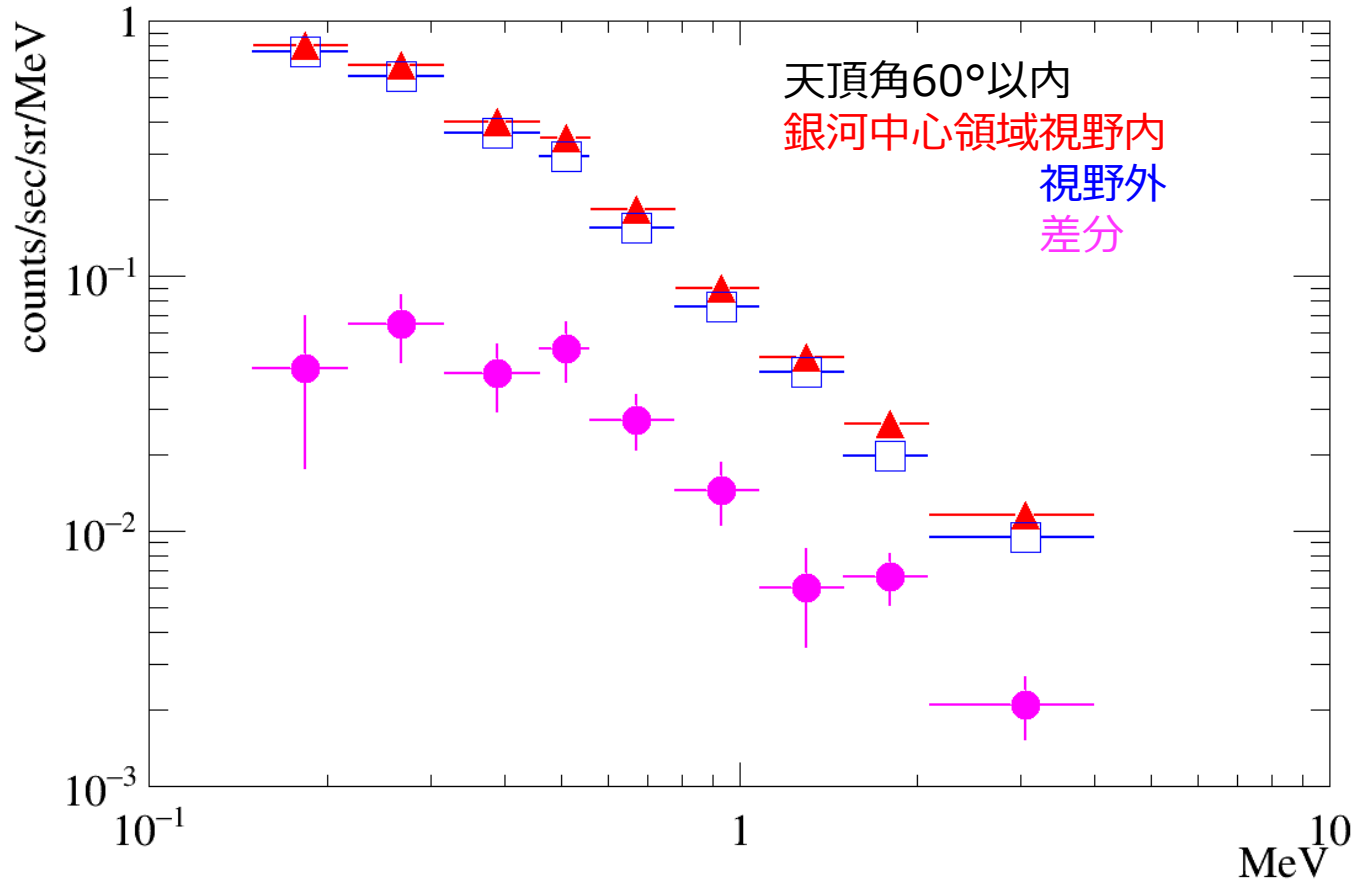
エネルギーごとに
gaussian + 定数でfit



Energy [MeV]	中心時刻 [ACST]	中心時刻誤差 [min]	Gauss 1σ [min]	Gauss Norm [A.U.]
0.15-0.32	5:10:32	22.3	116.6	0.10
0.32-0.67	5:02:40	11.1	50.7	0.15
0.67-1.4	5:18:08	9.8	45.6	0.23
1.4-3.0	6:02:42	12.7	103.8	0.26
G.C.北中	5:12:24	—	—	—

ライトカーブのピークと銀河中心の北中時刻とよく一致している。

銀河中心領域のスペクトル



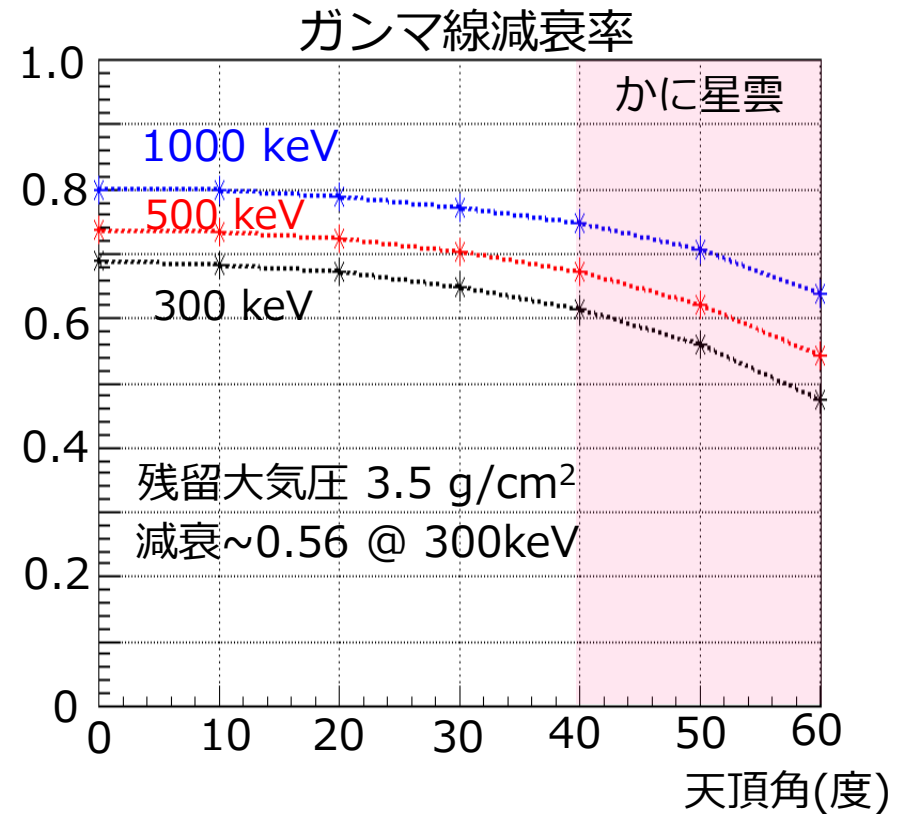
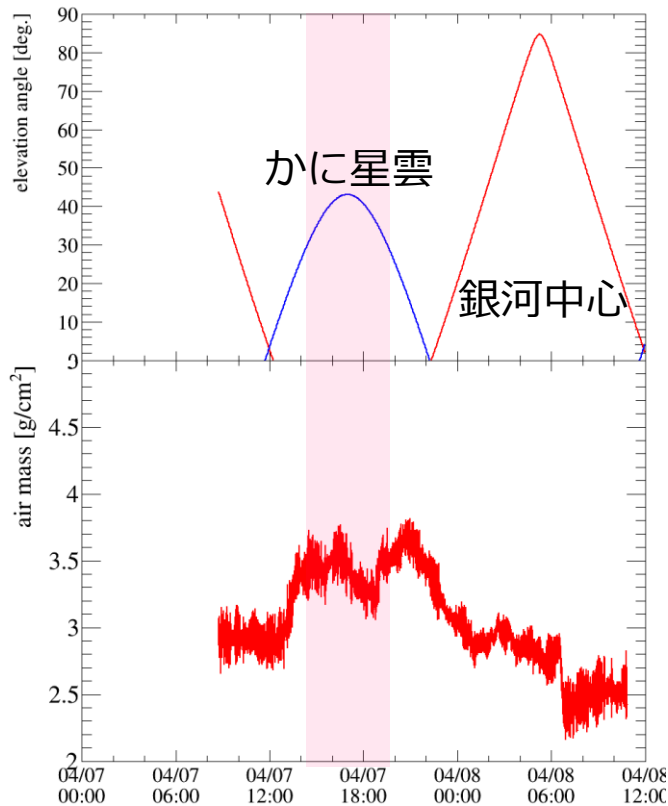
差し引き前は、系外拡散ガンマ線や大気拡散ガンマ線が主成分。
銀河中心領域は非常に硬い。空間分布も含めて、解析中。

COMPTELやSPIの観測を理論的(宇宙線電子の逆コンプトン)に説明できていない。
天体由来かAstroparticle由来か特定を期待されてる。 Strong et al. 2011

かに星雲の観測条件

■ 厳しい観測条件

- ✓ 南半球からの大天頂角観測：天頂角 $\sim 50^\circ$
(大気減衰大、有効面積小、大気BGガンマ線大)
- ✓ 1日の気球実験：有効観測時間 5.1 h



事前予想： $\sim 10^2$ photons、3-5 σ での検出。

かに星雲の観測結果

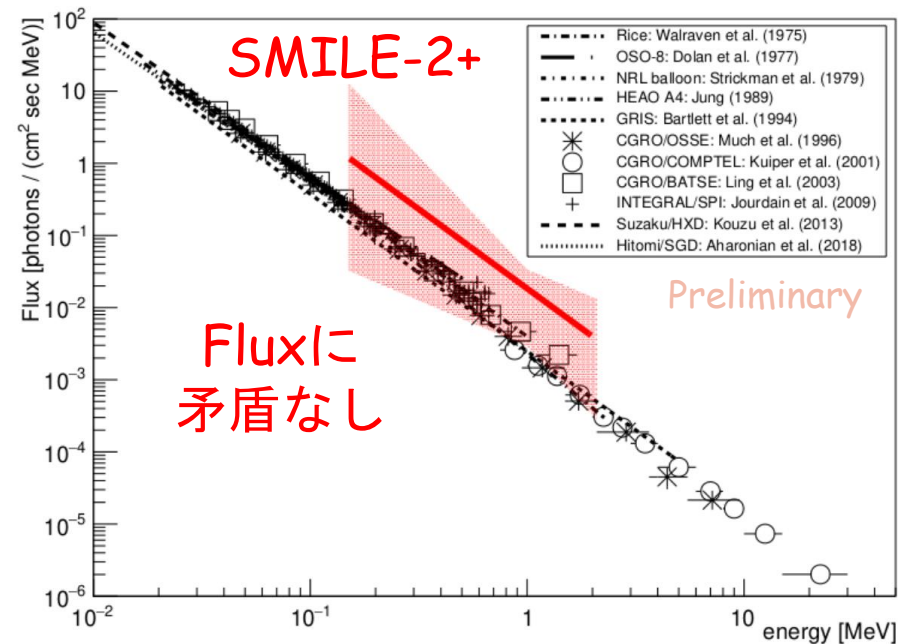
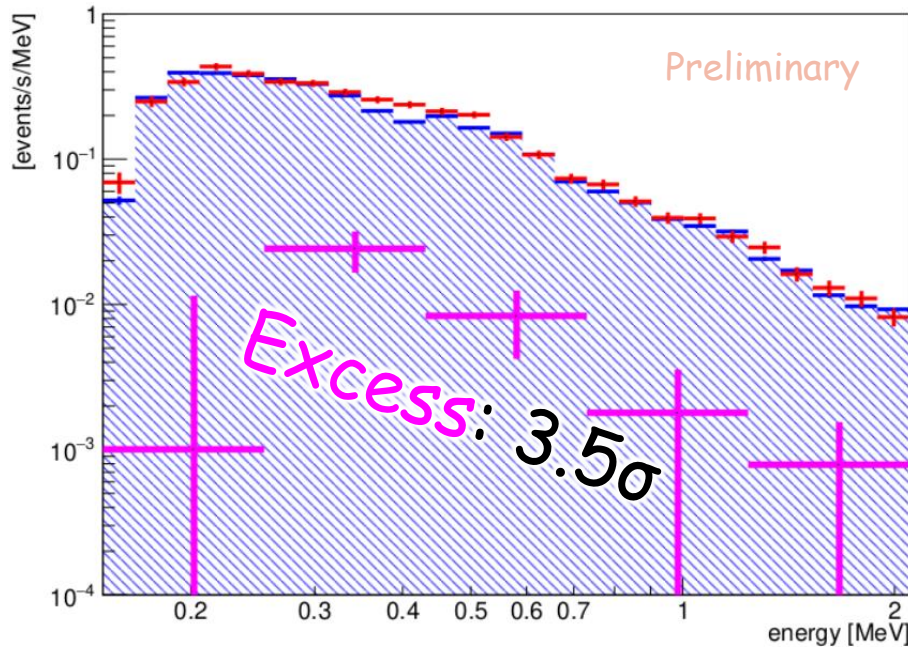
ON領域: Crabから40°以内

OFF領域: 同等の飛行高度で
高光度天体がない時間帯

$$N = 1.84 \pm 1.55$$

$$\Gamma = 2.20 \pm 0.93$$

$$N \times \left(\frac{E}{\text{MeV}} \right)^{-\Gamma} \quad [10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ MeV}^{-1}]$$



- ✓ 事前予想通りの検出、Fluxも他の観測装置と一致
- ✓ 点源天体でも、予測感度と実測感度が一致することを実証
- ✓ 2D-PSFによるBGガンマ線の抑制が効いている

予測感度と実測感度の不一致

かに星雲気球観測

NCT 2009年、Ft. Sumner、観測~8時間、高度35-40 km Bandstra et al. 2011

3800光子予測→667光子実測

J. Tomsick TeV2017スライド

COSI 2016年、Wanaka、飛行~46日、~34 km Sleater PhD thesis (2019)

かに星雲観測フラックスが標準フラックスの2倍→検出できず

LXeGRIT 2000年、Ft. Sumner、飛行~27時間、~40 km 検出できず

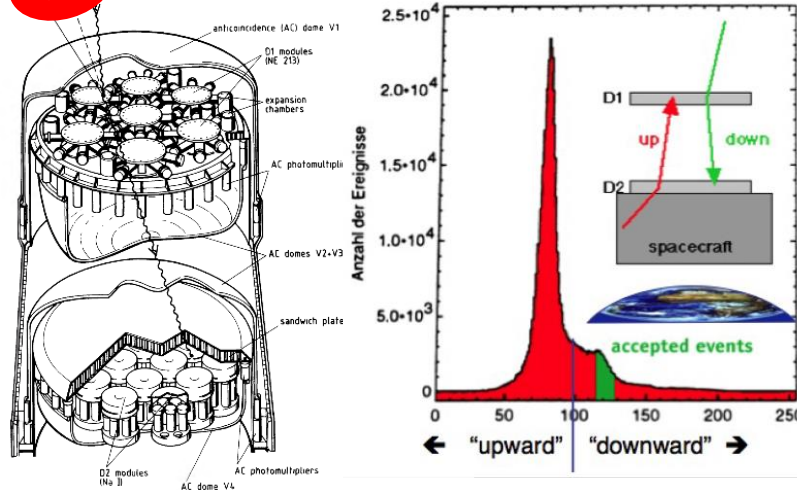
A. Curioni
PhD Thesis (2004)

TIGRE 2007年、Ft. Sumner、観測 ~5時間、~40 km 検出できず

K. Kamiya
PhD Thesis (2011)



Schönfelder et al. 1993 Balmoos et al. 2014



S: シグナル

B: バックグラウンド

θ : 角度分解能

A: 有効面積

F_{min}: 3 σ 検出するための
最小フラックス

T: 観測時間

$$F_{min} = 3 \frac{\theta \sqrt{B}}{AT} = 3\theta \sqrt{\frac{I_B}{AT}}$$

計算方法 ① B = 実測値

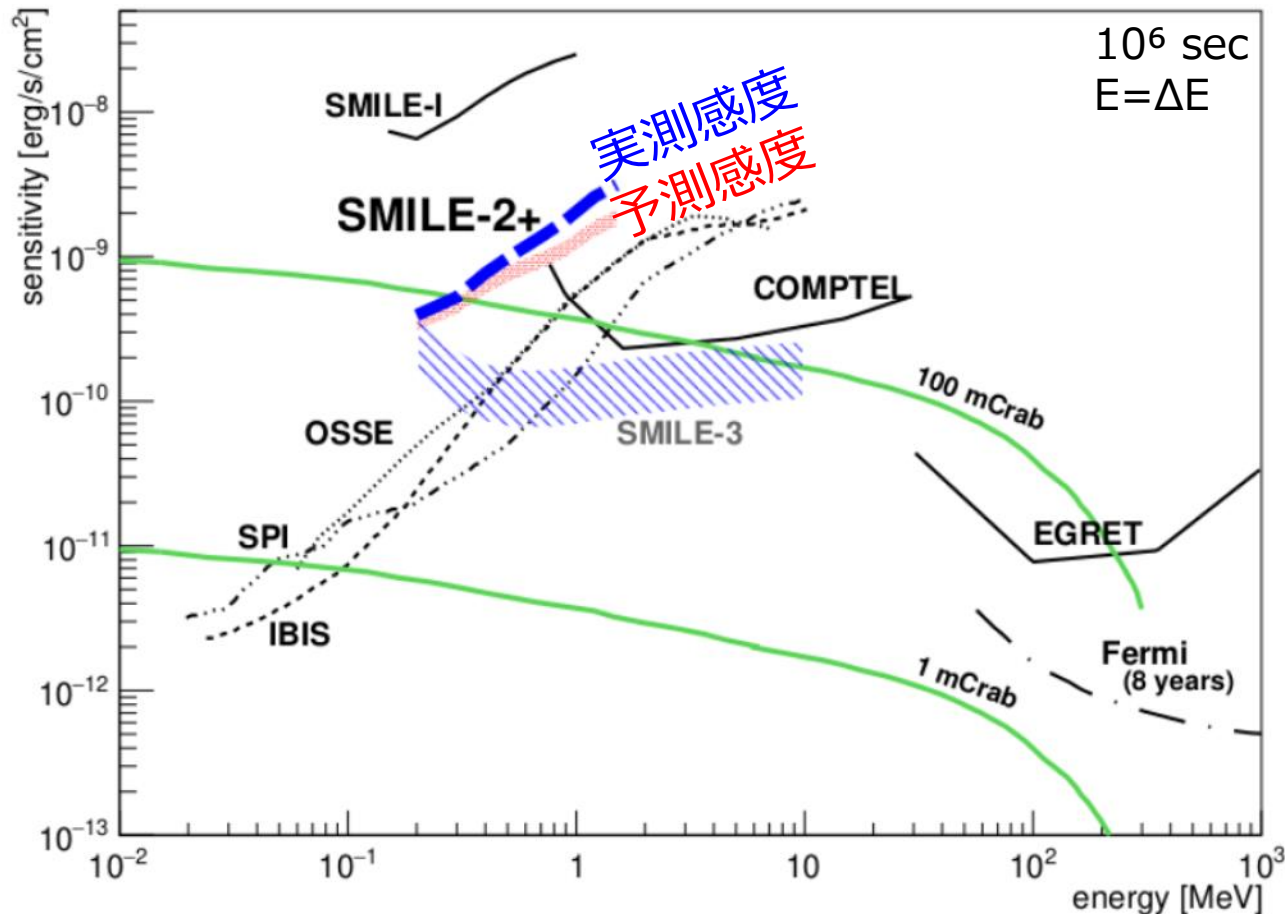
② B = 予測値

COMPTEL 1-30 MeV 10⁶ sec Schönfelder 2004

実測15.4x10⁻⁵, 予測6.04x10⁻⁵ photons/sec/cm² 2.6倍の差

これまでのMeVガンマ線観測では、予測と実測が一致していない。

機上における観測感度



実測感度と予測感度がほぼ一致
近年のMeV業界で成し得ていない大成功！

2次元PSFこそが、正しい感度計算には不可欠！

MeV領域を開拓する方法論として、バックグラウンド低減・正しい見積もりを実証。

まとめ

- MeVガンマ線天文学が進まない原因は、高雑音環境と撮像技術の難しさである。
- ETCCは2次元のPSF、高い雑音除去能力の検出器で高感度観測手法の候補。
- MeVガンマ線観測気球実験SMILE-2+を2018年オーストラリアで実施。

明るい天体による撮像能力の検証

- 複数人でクロスチェックを行い、データの信頼性を高め、再解析
- 系外・大気拡散ガンマ線を算出。
- 銀河中心領域からの硬いスペクトルを検出。
- かに星雲を 3.5σ で検出し、他検出器のフラックスと無矛盾。
- 実測感度と予測感度がほぼ一致。近年のMeV業界で成し得ていない大成功！

SMILE-2+実験は大成功！

かに星雲と検出感度の論文を近日投稿予定

銀河中心領域・系外・大気ガンマ線の論文準備中。