



MeVガンマ線天体探査気球実験計画SMILE-3

高田淳史, 谷森達, 水村好貴¹, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 阿部光, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 谷口幹幸, 小野坂健, 斎藤要, 窪秀利, 黒澤俊介^{2,3}, 身内賢太郎⁴, 澤野達哉⁵, 濱口健二⁶
(京都大, ¹JAXA, ²東北大, ³山形大, ⁴神戸大, ⁵金沢大, ⁶メリーランド大)



1. SMILE計画

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006) 10 cm角, Xe+Ar 1気圧 ⇒ 気球高度において安定に動作
 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 (0.1~1 MeV) A. Takada+, ApJ, 2011

30 cm立方体ETCC試験機 30 cm角, Ar 1気圧 T. Tanimori+, ApJ, 2015
 地上試験 ⇒ 有効面積: ~1 cm² @ <300 keV ARM: 5.3度 SPD: ~100度 @ 662 keV
 ⇒ PSF: ~15度 @ 662 keV

SMILE-2+ @ Australia (Apr. 2018) 30 cm角, Ar 2気圧
 明るい天体の観測によるイメージングの実証 (target: 銀河中心領域の511 keV, かに星雲)
 目標 有効面積: ~数cm² @ <300 keV PSF: ~15度 @ 662 keV

現在
 ETCCの天体観測能力実証実験は無事終了 ⇒ ETCCによる科学観測のフェーズへ

SMILE-3 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: ~10 cm² @ <300 keV PSF: ~8度 @ 662 keV

衛星による全天観測 50 cm角, CF₄ 3気圧
 目標 有効面積: ~数百cm² @ <300 keV PSF: <2度 @ 662 keV

2. 気球実験でねらうサイエンス

系内拡散ガンマ線
 観測値は理解されていない超過成分がMeV帯域に存在
 空間未分解な天体の集合?
 ⇒ MeV帯域で特徴的に明るい天体種族は未知
 脱励起線の集合?
 ⇒ sub-GeVの低エネルギー宇宙線が主に励起すると期待
 直接観測が困難な低エネルギー宇宙線のプローブに系内加速源の周囲かも?
 暗黒物質や原始ブラックホール?
 ⇒ 10¹³⁻¹⁵ gの原始ブラックホールはMeV帯域でHawking放射をするという理論予測
 暗黒物質の対消滅による連続的な放射はMeVにも続く
 SMILE-2+の観測も同様に明るい
 ⇒ 詳細なスペクトル・空間分布を得て起源の解明へ

電子陽電子対消滅線
 OSSEやSPIの観測では大きな空間的広がりを持つ
 銀河中心領域に半径20度程度の丸い広がり
 銀河面方向にも大きな広がり
 電子陽電子対消滅線の強度
 ⇒ 観測された²⁶Alの強度から予想される放射性同位体由来の陽電子はせいぜい数割
 ほぼ全てがポジトロニウムの形成からの対消滅
 観測を基にした空間分布モデルは他のどの波長の空間分布とも似ない
 詳細な空間分布を得て陽電子起源の解明を

系外拡散ガンマ線
 宇宙から一様に到来する放射
 X線領域はSeyfert銀河でGeV領域はBlazarで説明されるがMeV領域の起源理解はまだ
 数少ない明るいFSRQ?
 沢山ある暗いSeyfert銀河?
 遠方のIa型超新星爆発?
 原始ブラックホール?
 詳細なスペクトルから起源の特定へ

電波銀河 Cen A
 MeV帯域に折れ曲がり
 INTEGRAL, Beckmann+, A&A (2011)

3. 観測への要求

要求される検出感度
 Cen Aの詳細なスペクトル, 電子陽電子対消滅線の空間分布, 系内拡散ガンマ線の空間分布, ²⁶Alの検出 ⇒ ~10 cm² × ~10 days
 系外拡散ガンマ線の非一様性, 未同定天体の観測, 新天体天体の探索 ⇒ ≲ 5°
 大気によるガンマ線の減衰
 300 keV: 35 kmで45%が散乱
 38.5 kmで30%が散乱
 1 MeV: 35 kmで30%が散乱
 38.5 kmで20%が散乱
 ⇒ できれば38 km以上

世界の気球事情
 NASA
 北半球: 中緯度で~半日
 南半球: 高緯度で~30日
 中緯度で~30日
 南半球中緯度はSPB

2012年12月 Super-Tiger 55日2時間32分
 2016年4月 COSI 46日20時間19分
 2018年9月 FIREBALL ~15時間 高度38.7 km
 2018年4月 SMILE-2+ 1日4時間43分
 2018年7月 PMC Turbo 5日22時間8分
 2018年4月 SMILE-2+ 1日4時間43分
 2018年7月 PMC Turbo 5日22時間8分

ガンマ線の大気減衰を抑える ⇒ 高度35 km以上
 深い天体観測には長時間飛行が必須
 南半球では~1カ月のフライト
 北半球では半日~1週間のフライト
 1日以下では観測可能な天体は季節に依存する
 人口密集地では長時間飛行は難しい
 複数回の気球実験を行えば全天探査も可能に!

4. SMILE-3 ETCCへ向けた要素開発

有効面積の向上
 Compton散乱断面積は電子の個数に比例 ⇒ 軽元素の分子が有利
 散乱体検出器で光電吸収はさせたくない

ガス	電子数 [個/分子]	密度 [mg/cm ³ /atm]	放射長 [m atm]	w値 [eV]	エネルギー損失率 [keV/cm/atm]
Ar	18	1.784	109.6	26	2.44
CF ₄	42	3.884	87.52	54	7
Ar-CF ₄ -iC ₄ H ₁₀	19.04	1.865	109.5	26.34	2.65
Ne(Ar)-CF ₄	22.824	2.096	154.9	41.72	3.74

※Ar: CF₄: iC₄H₁₀ = 95:3:2, Ne: Ar: CF₄ = 59.7:0.3:40 (分圧比)

SMILE-2+ : Ar-CF₄-iC₄H₁₀, (30 cm)³, 2気圧
SMILE3+ : CF₄, (30 cm)³, 3気圧 散乱断面積 3.5倍
 SMILE-2+と同サイズの検出器で最大~10 cm²の有効面積に

電子飛跡の高精細化
 SMILE-2+のガス飛跡検出器: 2軸直交ストリップ型電極
 ⇒ 電子飛跡に不定性が生じ反跳方向の決定精度を劣化

新型ガス飛跡検出器: 3軸120度ストリップ型電極
 飛跡の不定性を大きく削減し反跳方向の決定精度を向上

直交ストリップ型電極は回路数を減らせるが2か所で同時に信号があると判別できなくなり左の赤と黒の2つの飛跡の見分けがつかない
 SMILE-2+は飛跡情報の不定性により反跳方向を大きく劣化させてしまい散乱平面の決定精度を損している3方向から読み出すとより不定性の少ない飛跡が得られより正確な反跳方向が得られる
 ⇒ 散乱平面決定精度 3~4倍向上

吸収体検出器の高エネルギー分解能化・広帯域化
 SMILE-2+: GSO:Ce + PMT (浜松H8500)
 エネルギー分解能 11~12% @ 662 keV
 エネルギー帯域 0.2~3 MeV
 HV ONから数時間はgainに大きな不定性

光読み出しをMPPCに
 GSOの発光波長 (430 nm)
 ≈ MPPCの最大感度波長 (450 nm)
 低倍率・高倍率の2つのアンプで広帯域化

PMT読み出し ⇒ MPPC読み出し
 量子効率2倍 ⇒ エネルギー分解能 8% @ 662 keV
 散乱角決定精度 1.2倍向上
 2種類の増幅率 ⇒ エネルギー測定帯域 0.1~5 MeV

データ収集システムの高効率化
 SMILE-2+データ収集システム
 1. シンチレータで検出 ⇒ ガス飛跡検出器の信号を待つ
 2. 規定時間(10 μs)に飛跡検出器の信号があれば全てのデータを保存
 なければシンチレータのデータを破棄
 3. データの保存/破棄の処理が終わったら次のシンチレータの信号を待つ

新データ収集システム
 1. 規定時間幅にシンチレータと飛跡検出器の両方の信号が発生するまでデータをバッファに貯めつつ待つ
 2. データ取得要件を満たしていればバッファから必要分だけ取り出し保存
 3. 保存処理が終了次第、次のデータを待つ

不感時間 ~20%
 不感時間 <1%

SMILE-2+とSMILE-3の構造比較
 SMILE-2+ Gondola: 与圧容器内部にガス飛跡検出器容器を設置 ⇒ ガンマ線の散乱・吸収を招く
 重い検出器を棚の上に載せる構造 ⇒ 構造体が大きく重くなる
 SMILE-3 Gondola: ガス飛跡検出器を暴露 ⇒ 不必要な散乱・吸収を減らす
 検出器とその他を別構造に分離 ⇒ 軽量化及びガンマ線雑音源の削減

5. SMILE-3

期待される観測例
 電子陽電子対消滅線の空間分布
 銀河面に広く分布? or 銀河中心領域 +ハロー的?
 1日観測 [events] 0-40
 30日観測 [events] 0-100
 14.4° × 7.2° /pixel
 3.6° × 1.8° /pixel
 ⇒ 空間分布の違いは明確に切り分け可能

スケジュール
 SMILE-2+のETCCを基礎に上記の改良を加えたSMILE-3 ETCCを開発。このSMILE-3により~1日の気球実験を行う。一方2台目のETCCを米国気球実験用に製作し、米国気球実験や南半球気球実験を行っていく。

- ~2022 SMILE-3 ETCC開発
- 2022~2025 ISAS/JAXA 豪州気球実験 銀河面観測
- 2025~2029 米国半日気球実験 Cyg X-1観測
- 2030~ 南半球周回気球実験 南天観測
- 2030~ 衛星化へ