



# 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<sup>1</sup>, 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<sup>2,3</sup>, 身内賢太郎<sup>4</sup>, 澤野達哉<sup>5</sup>, 濱口健二<sup>6</sup>  
(京都大, <sup>1</sup>JAXA, <sup>2</sup>東北大, <sup>3</sup>山形大, <sup>4</sup>神戸大, <sup>5</sup>金沢大, <sup>6</sup>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. 1<sup>st</sup> 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 cm<sup>2</sup> @ <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cm<sup>2</sup> @ <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**

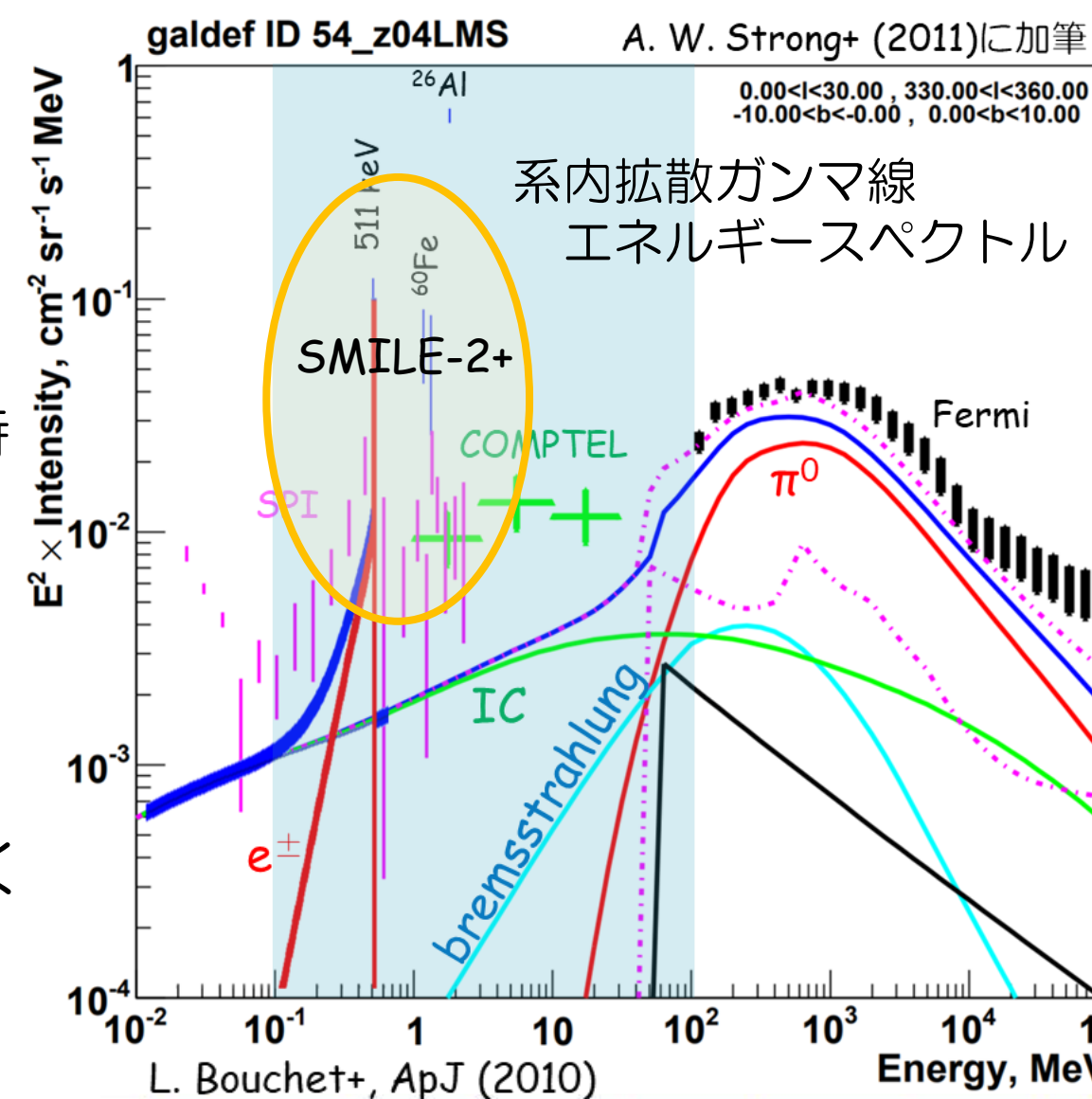
**SMILE-3** 30 cm角, CF<sub>4</sub> 3気圧  
➢ 長時間気球を用いた**科学観測**  
➢ 目標 有効面積: ~10 cm<sup>2</sup> @ <300 keV PSF: ~8度 @ 662 keV

**衛星による全天観測** 50 cm角, CF<sub>4</sub> 3気圧  
➢ 目標 有効面積: ~数百cm<sup>2</sup> @ <300 keV PSF: <2度 @ 662 keV

## 2. 気球実験でねらうサイエンス

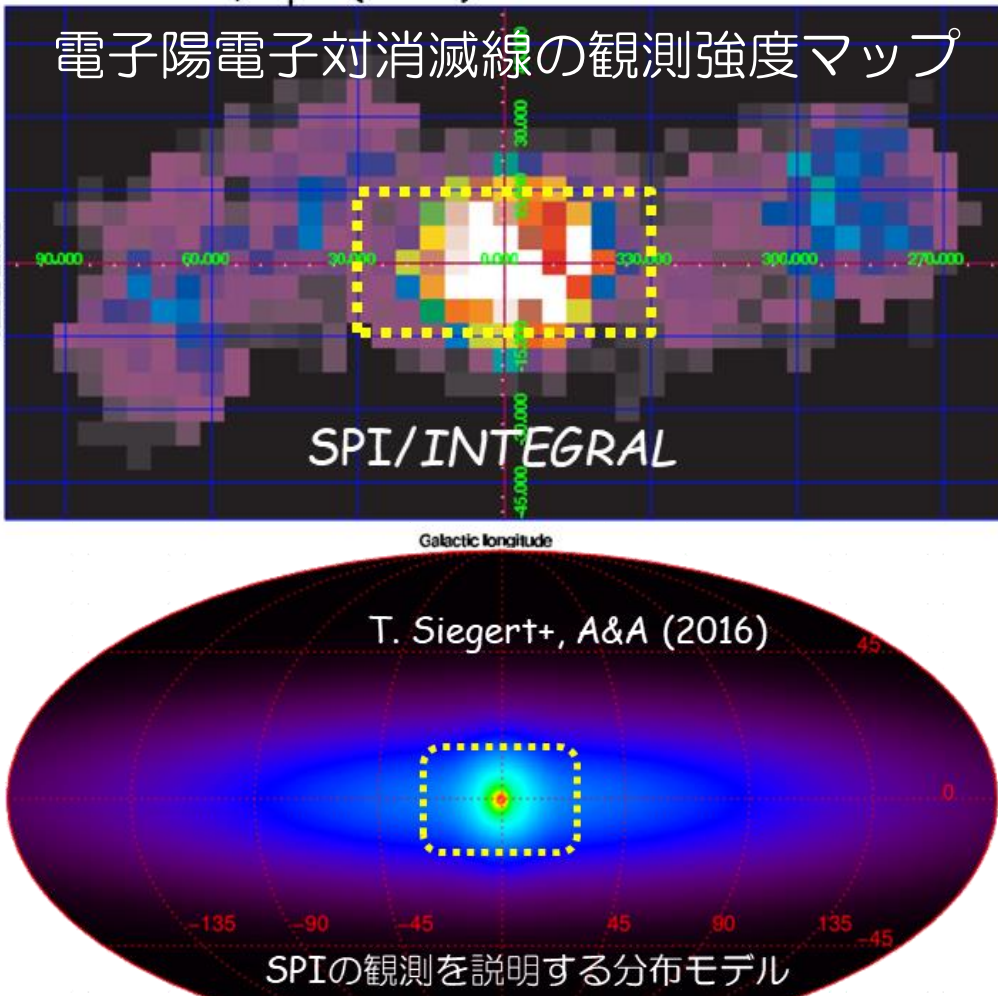
### ◆ 系内拡散ガンマ線

- 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  
系内加速線の周囲かも?
  - ・暗黒物質や原始ブラックホール?
    - ⇒ 10<sup>13-15</sup> gの原始ブラックホールはMeV帯域で  
Hawking輻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



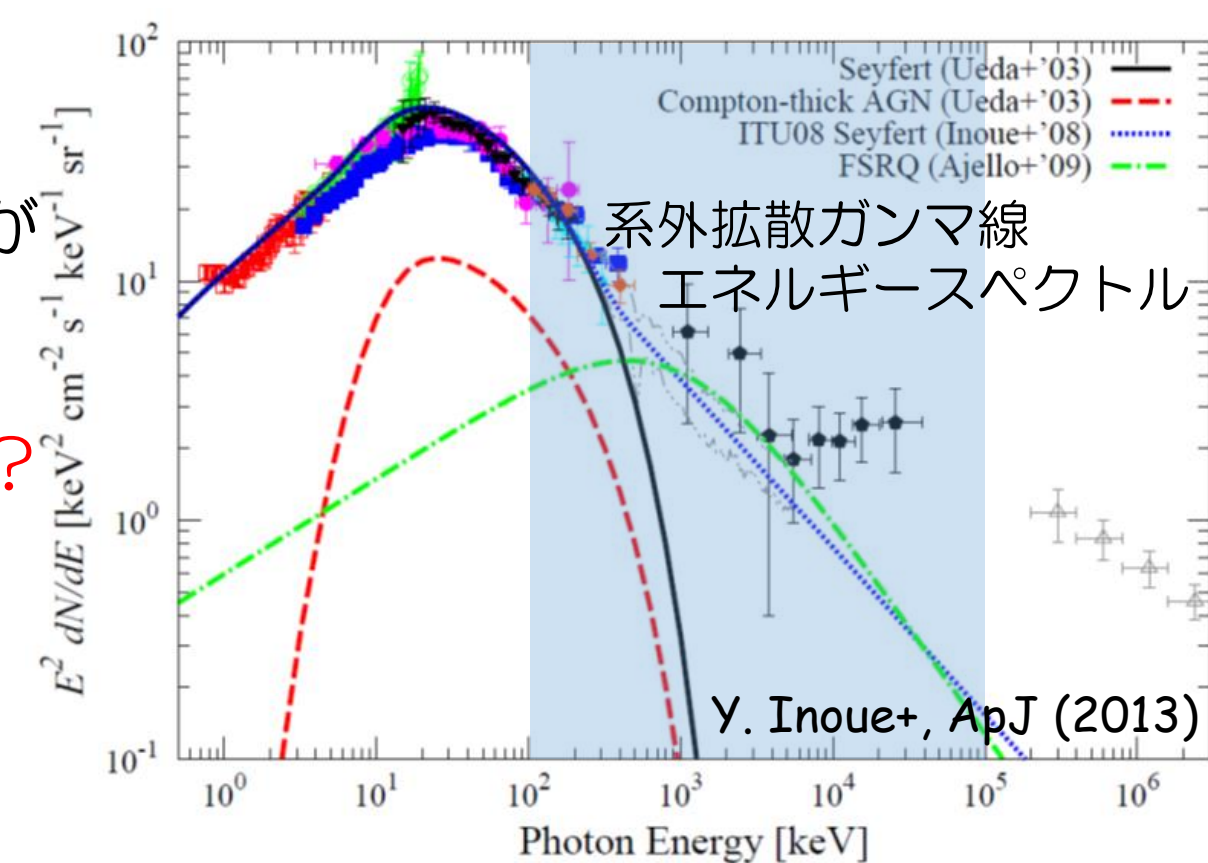
### ◆ 電子陽電子対消滅線

- 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<sup>26</sup>Al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



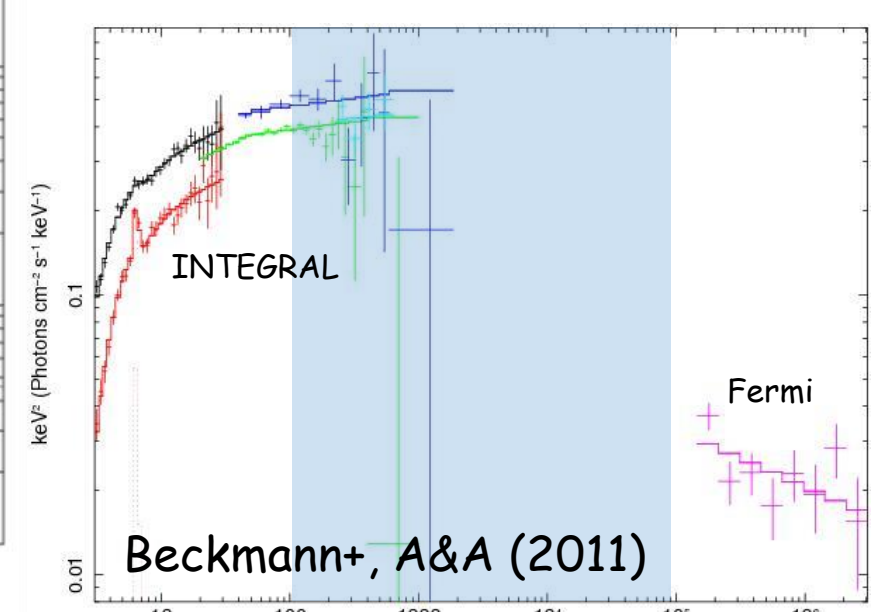
### ◆ 系外拡散ガンマ線

- 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Blazer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



## 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  
<sup>26</sup>Alの検出 ⇒ ~10 cm<sup>2</sup> × ~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



➢ ISAS/JAXA  
南半球: 中緯度で~1日  
高度~39 km

➢ SSC  
北半球: 高緯度で~5日  
※最長は~2週間

南半球中緯度はSPB

2016年4月 COSI  
46日20時間19分  
高度~34 km

2018年4月 SMILE-2+  
1日4時間43分  
高度~38.7 km

2018年7月 PMC Turbo  
5日22時間8分  
高度~38.7 km

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  
高度~34 km

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翔が必須  
➡ 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翔は難しい

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 <sup>3</sup> /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 <sub>4</sub>	42	3.884	87.52	54	7
Ar-CF <sub>4</sub> -iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	19.04	1.865	109.5	26.34	2.65
Ne(Ar)-CF <sub>4</sub>	22.824	2.096	154.9	41.72	3.74

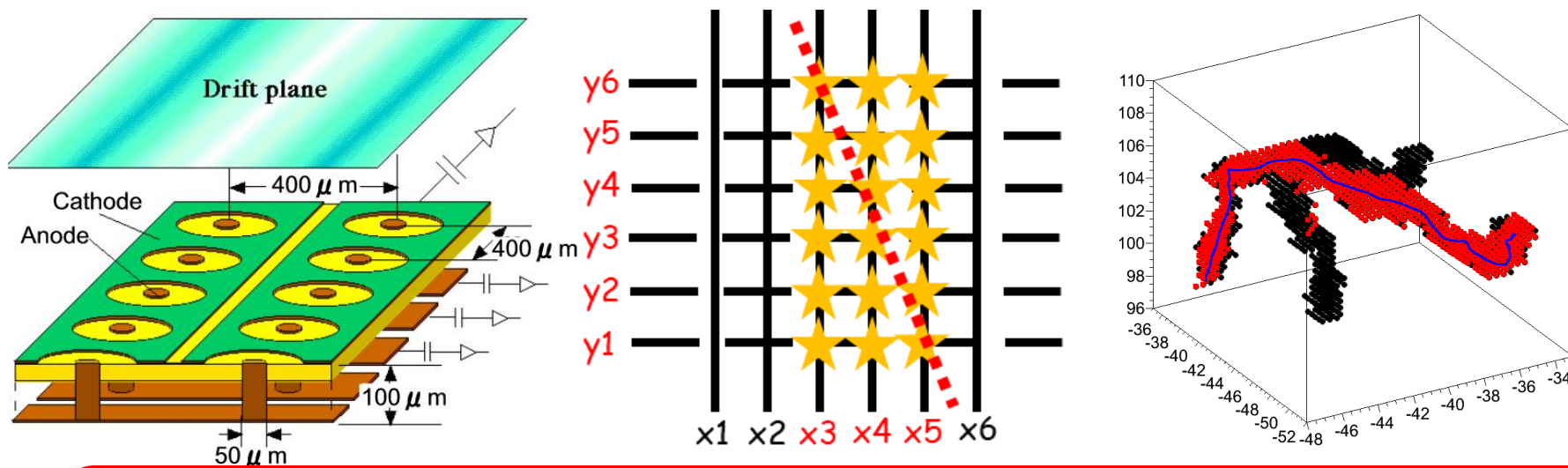
※ Ar: CF<sub>4</sub>: iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> = 95:3:2, Ne: Ar: CF<sub>4</sub> = 59.7:0.3:40 (分圧比)

**SMILE-2+: Ar-CF<sub>4</sub>-iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, (30 cm)<sup>3</sup>, 2気圧**  
➡ **SMILE3+: CF<sub>4</sub>, (30 cm)<sup>3</sup>, 3気圧 散乱断面積 3.5倍**

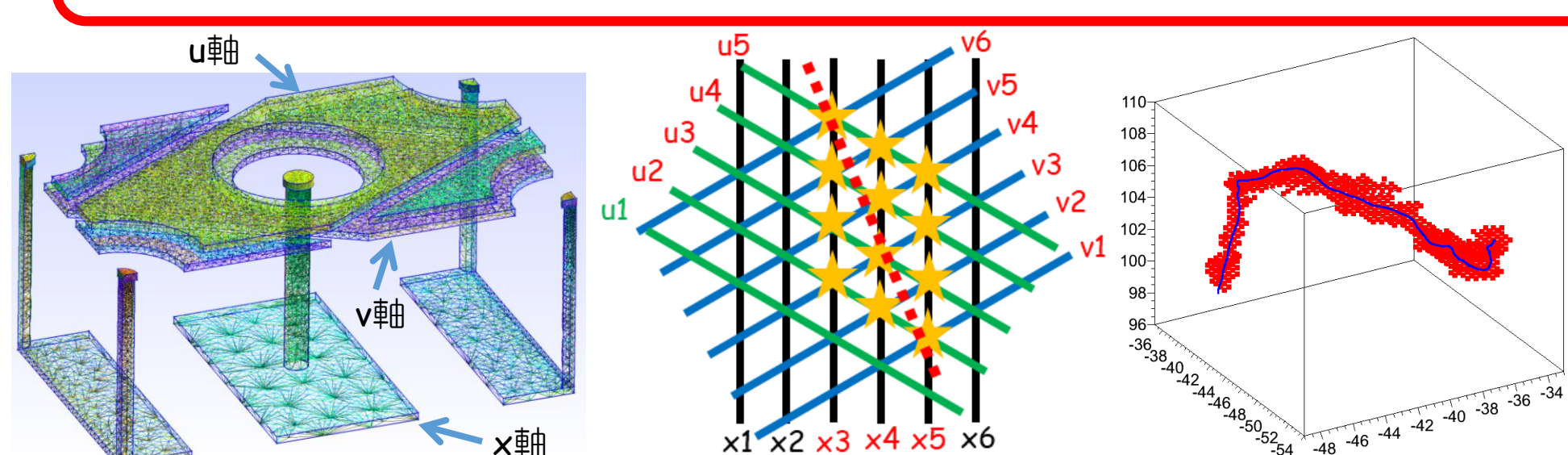
SMILE-2+と同サイズの検出器で最大~10 cm<sup>2</sup>の有効面積に

### ◆ 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



### ◆ 吸収体検出器の高エネルギー分解能化・広帯域化

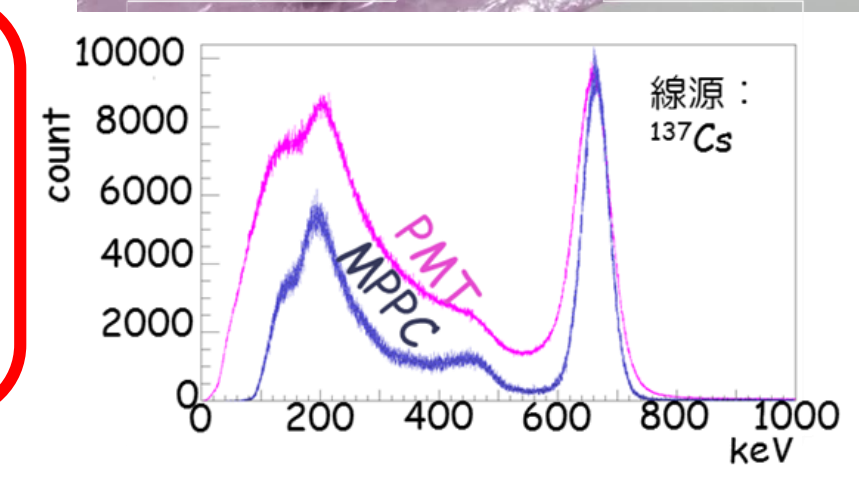
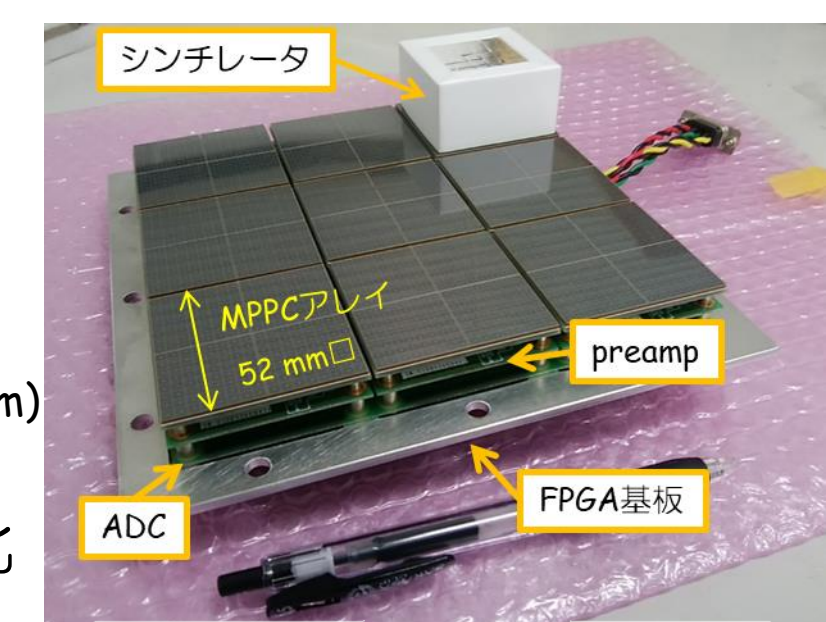
SMILE-2+: GSO:Ce + PMT (浜松H8500)

- ・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/破棄の処理が終了し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

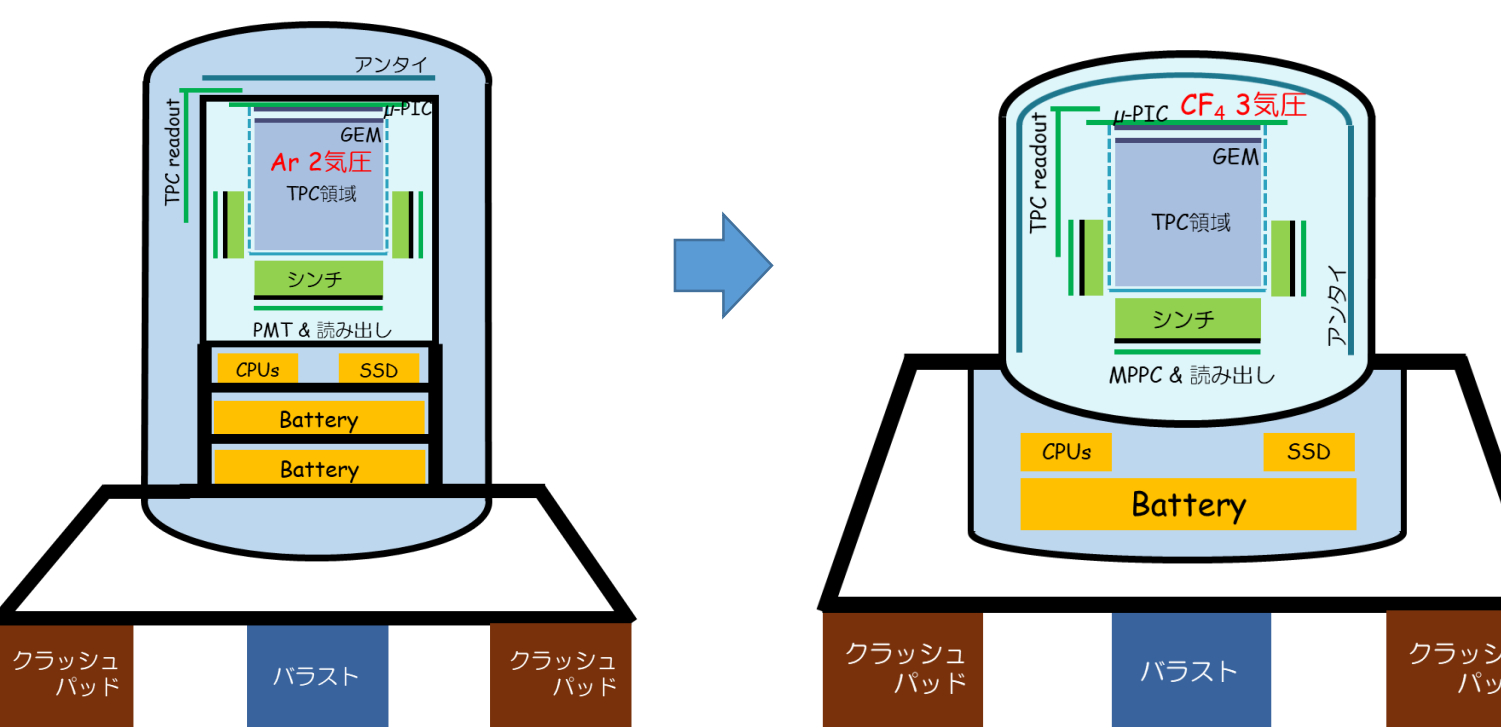
不感時間 ~20%

不感時間 <1%

### ◆ 建造物の単純化による不感物質の削減

SMILE-2+ Gondola

SMILE-3 Gondola (案)



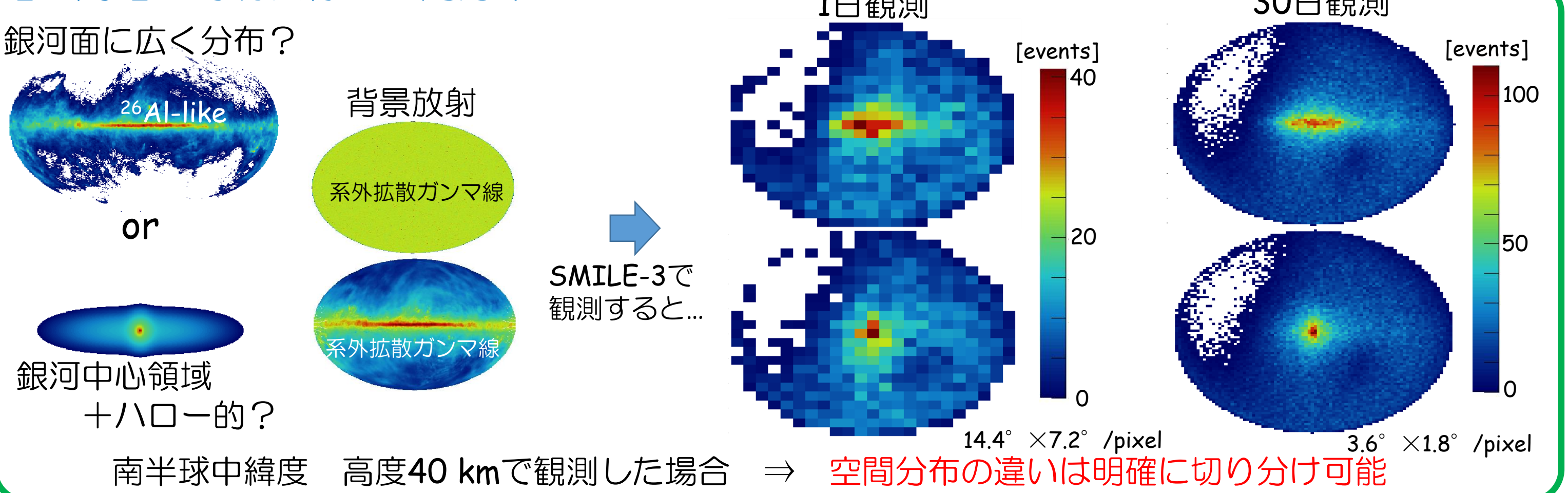
SMILE-2+ Gondola:  
与圧容器内部にガス飛跡検出器容器を設置  
⇒ ガンマ線の散乱・吸収を招く  
重い検出器を棚の上に載せる構造  
⇒ 構造体が大きく重くなる

SMILE-3 Gondola:  
ガス飛跡検出器容器を暴露  
⇒ **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



### ◆ 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。一方で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  
米国半日気球実験 Cyg X-1観測
- 2025~2029 南半球周回気球実験 南天観測
- 2030~ 衛星化へ

