



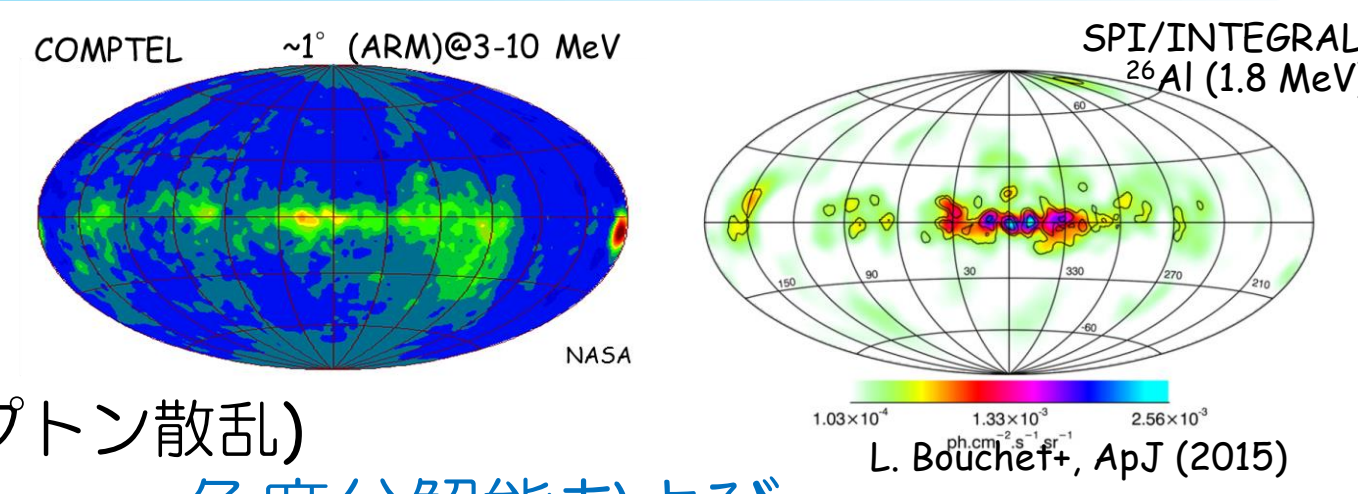
SMILE-2+実験実施報告と 電子飛跡検出型コンプトンカメラによる将来計画



高田淳史, 谷森達, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 小野坂健, 斎藤要, 阿部光, 古村翔太郎, 岸本哲朗,
谷口幹幸, 窪秀利, 小財正義¹, 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)

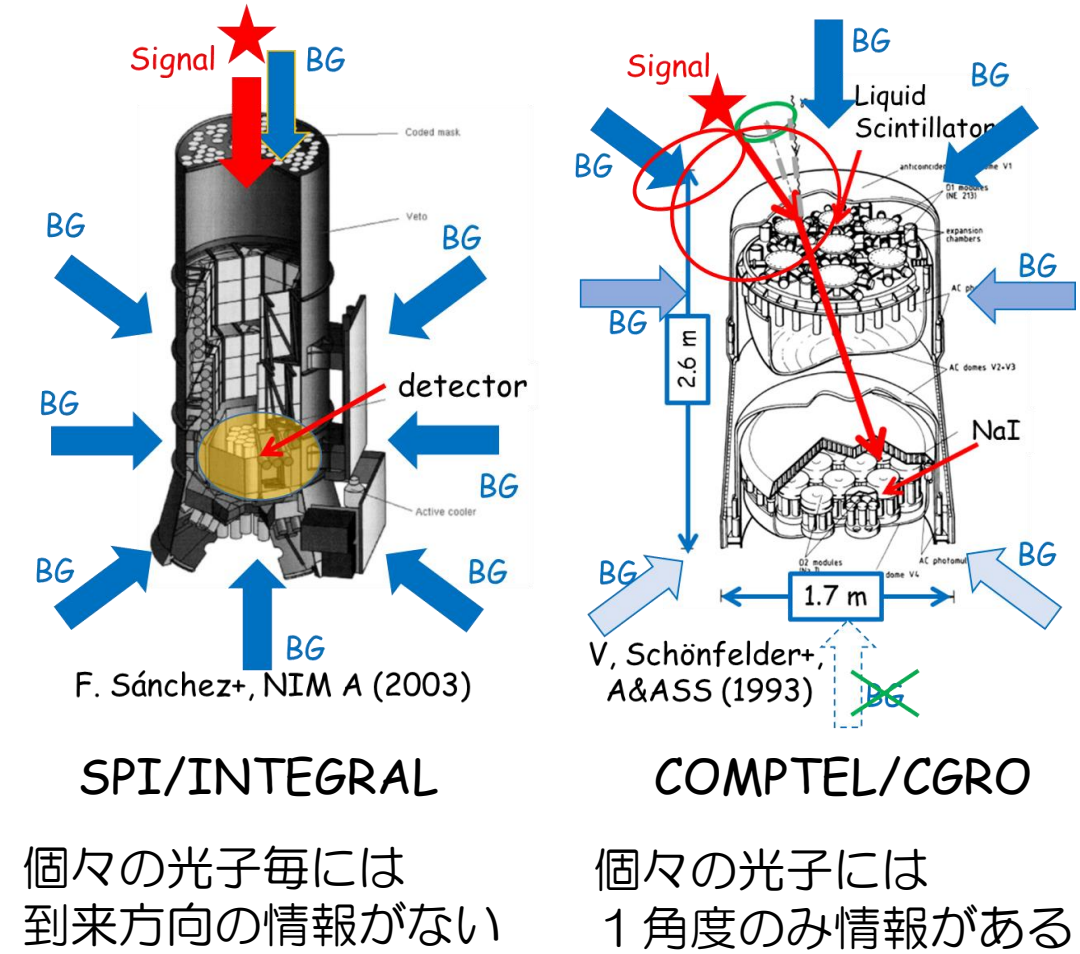
1. MeVガンマ線天文学の現状

- 元素合成
 - 超新星残骸：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 (anisotropy)
 - ガンマ線バースト：宇宙初期の星生成 ...など



角度分解能および
雑音除去に苦勞し
感度は悪いまま進展がない

MeVガンマ線天文学の開拓には将来的に1 mCrabの感度が必要



ガンマ線の到来方向：2つの角度情報で表現

符号化マスク法：光子毎には方向情報がない
従来コンプトン法：光子毎には角度情報は1つのみ

MeVガンマ線は、透過力が高く、相互作用は散乱が優位である。このため、情報が不足する従来の観測方法では、観測領域への多量に生成される雑音の漏れこみを防げない。従って、MeVガンマ線天文学を切り拓くには、光子毎に到来方向を測定できる、新しい手法が必須である。

到来方向の2角度を光子毎に測定する新しい観測手法が必須

2. 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡

電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

コンプトン散乱を利用したガンマ線望遠鏡。反跳電子のエネルギーと方向を取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を取得する位置感度型シンチレーション検出器から構成される。**COMPTEL**では取得できなかった反跳電子の方向を取得することにより、運動量の足し算という単純な方法で、入射したガンマ線のエネルギーと方向を光子毎に測定できる。これにより、従来のコンプトンイメージング法では不可能な鋭いPoint Spread Function (PSF)を実現できる。さらにガンマ線検出に使用しないパラメータにより、非常に強力な雑音除去を可能とする。

ガンマ線事象以外の雑音除去

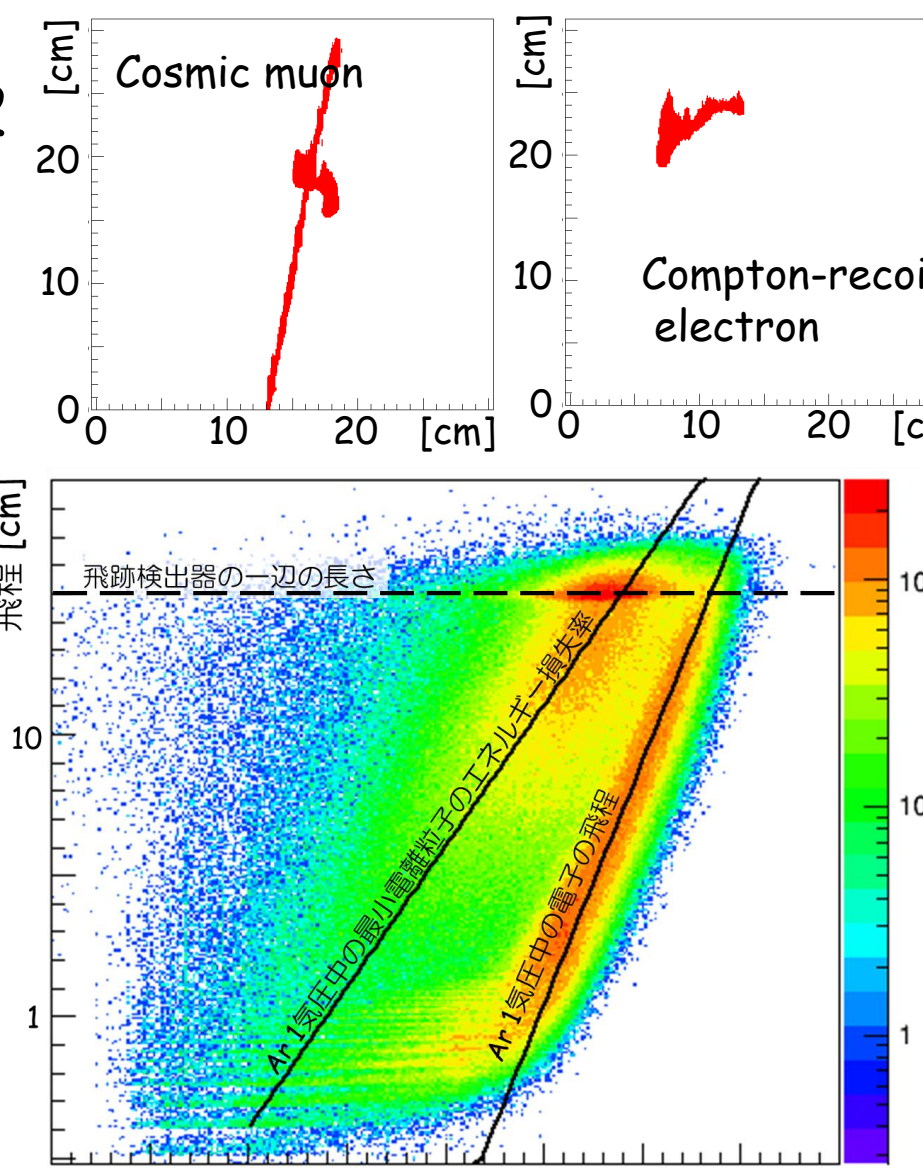
ガンマ線散乱方向と電子反跳方向の間の角 α は、以下に示す独立した2つの方法から得られる。

$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \vec{g} \cdot \vec{e}$$

$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

右式はコンプトン散乱であることが仮定されている。従って、上記2つの値が一致するものを選べば、**コンプトン散乱事象のみを選び出すことができる。**

加えて、荷電粒子のエネルギー損失率のエネルギー依存性は、質量電荷比によって異なる。このため、エネルギー損失率を用いれば飛跡検出器中の粒子を識別することが出来る。右図は実際にガス飛跡検出器で得られた、飛跡長と損失エネルギー量の相関である。この図から飛跡検出器内でエネルギーを落とし切った電子・検出器外部へ飛び去った電子・宇宙線ミュオン粒子がはっきりと区別できる。ガンマ線が起こすコンプトン散乱では、反跳粒子は電子のみであるため、**中性子事象**などは強力に排除可能である。



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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1 st 2006)	10 cm角, Xe+Ar 1気圧	⇒ 気球高度において安定に動作 他の観測と矛盾のないスペクトル 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 ² @ <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 ² @ <300 keV PSF : ~10度 @ 662 keV
SMILE-III	30 cm角, CF ₄ 3気圧	⇒ 長時間気球を用いた科学観測 ⇒ 目標 有効面積：~10 cm ² @ <300 keV PSF : <5度 @ 662 keV
衛星による全天観測	50 cm角, CF ₄ 3気圧	⇒ 目標 有効面積：~数百cm ² @ <300 keV PSF : <2度 @ 662 keV

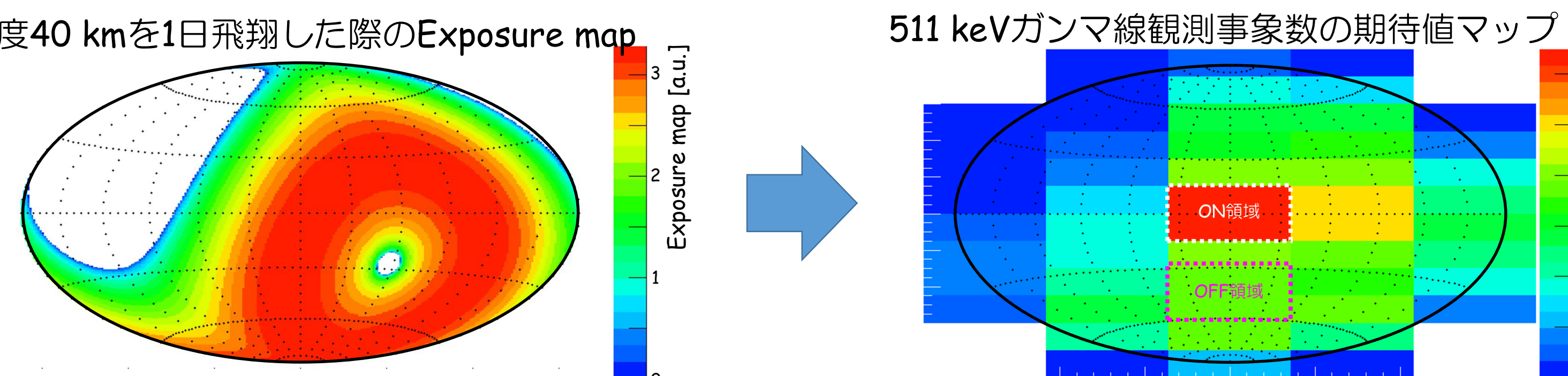
天体観測実証実験SMILE-2+

SMILE-Iの結果より、気球高度において強力な雑音除去により、ガンマ線を観測可能であることが実証された一方、天体観測に必須であるガンマ線撮像能力の実証には至らなかった。このため、既知の明るい天体を観測し、再構成ガンマ線画像からガンマ線フラックスを得る事で、ETCCでMeV領域のガンマ線天体観測が実現可能である事を実証する実験として、SMILE-2+実験を2018年度のISASA/JAXA豪州気球実験に申請し、採択された。



- 最低成功基準：大気ガンマ線を観測 ⇒ 雑音除去能力・有効面積の検証
- 高度成功基準： e^+ 対消滅線(銀河中心領域)及びかに星雲を観測 ⇒ ETCCによる天体観測の実証
- 最高度成功基準：MeVガンマ線背景放射のスペクトルを得る ⇒ 背景放射の起源解明へ

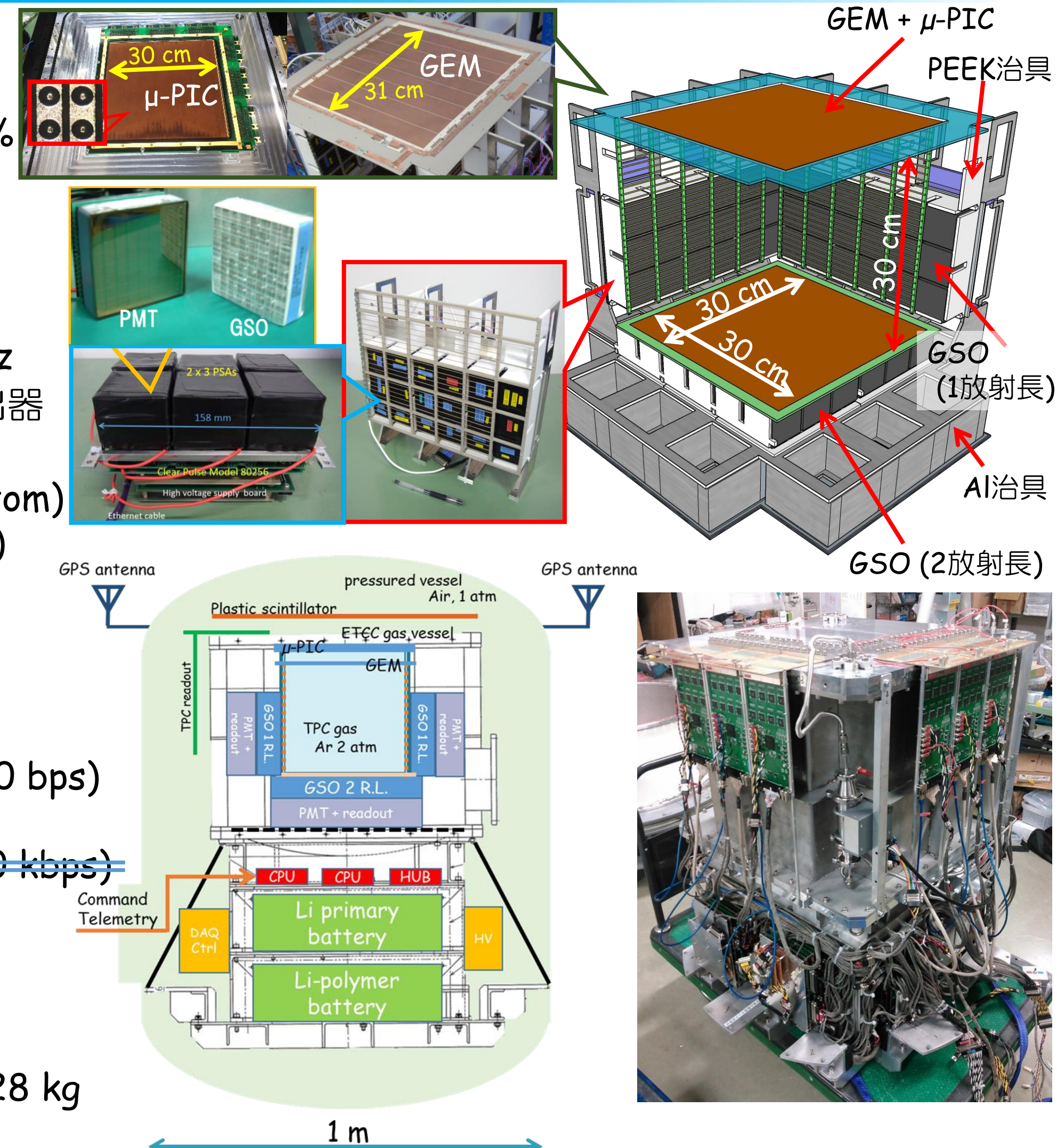
有効面積 数cm² (@300 keV)・PSF ~10度 (@662 keV)のETCCで 高度38.5 kmで銀河中心を6時間以上観測 高度40 kmを1日飛行した際のExposure map 511 keVガンマ線観測事象数の期待値マップ



3. 2018年豪州気球実験

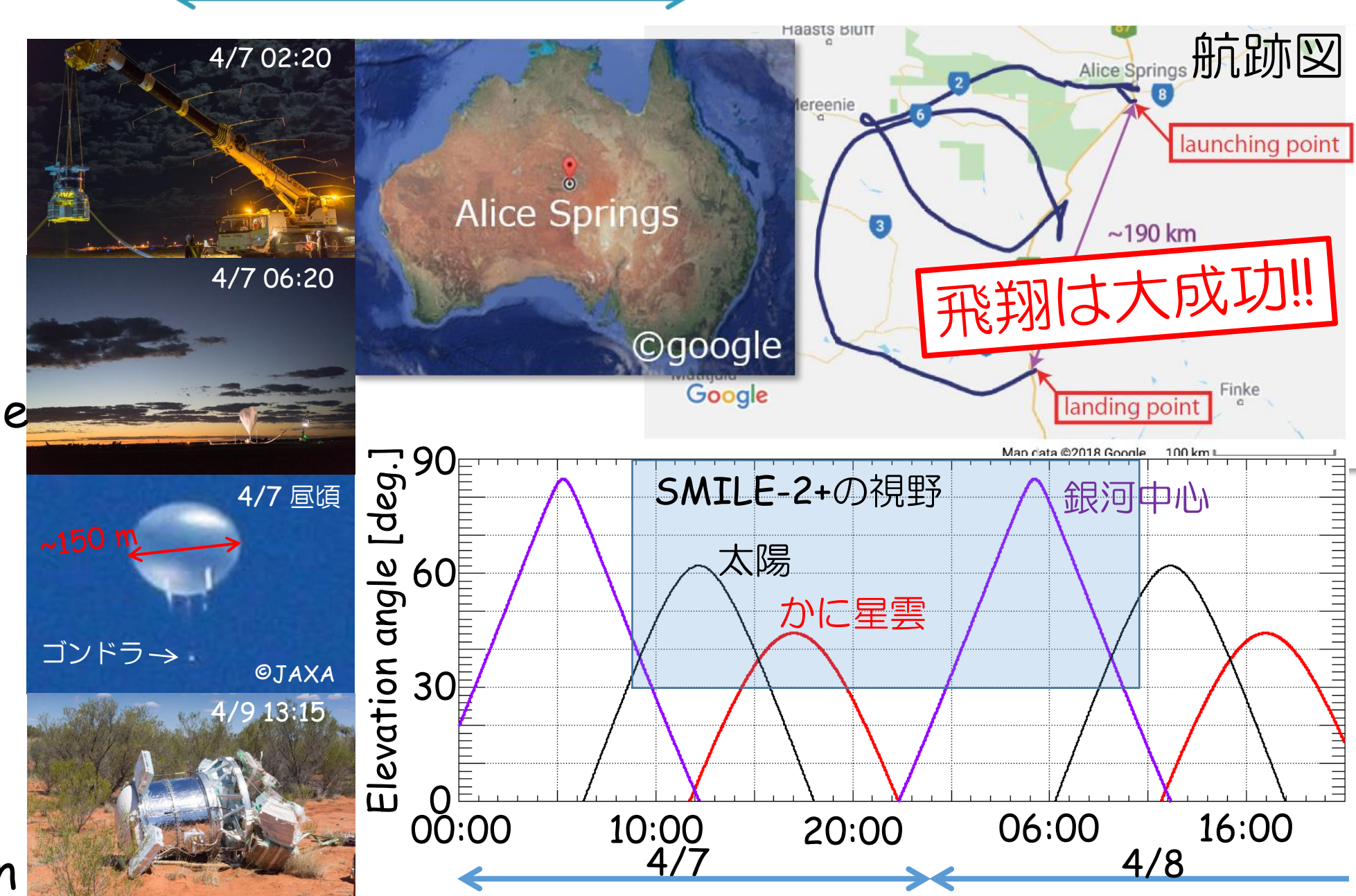
SMIE-2+フライトモデル

- ガス飛跡検出器
 - Gas : Ar 95% + CF₄ 3% + iC₄H₁₀ 2%
 - 2 atm
 - Volume : 30x30x30 cm³
 - Drift velocity : ~3.5 cm/ μ sec
 - Readout : μ -PIC + GEM
 - 0.08 cm pitch, 100 MHz
- 位置感度型シンチレーション検出器
 - Scintillator : GSO (Gd₂SiO₅)
 - Pixel size : 0.6x0.6x2.6 cm³ (bottom)
 - 0.6x0.6x1.3 cm³ (side)
 - PMT : H8500 (浜松ホトニクス)
- コントロールシステム
 - 電源 : Li電池 + Li-polymer電池
 - 使用電力 : 214 W
 - 通信 : シリアルコマンド (FSK, 300 bps)
 - テレメトリ (bi- ϕ , ~6 kbps)
 - 高速テレメトリ (QPSK, 800 kbps)
- 気球諸元
 - Balloon : B500 (500,000 m³)
 - 総重量 : 1825 kg
 - 気球 898 kg, 荷姿 88 kg
 - 観測器 511 kg, バラスト 328 kg
 - 総浮力 : 2016 kg

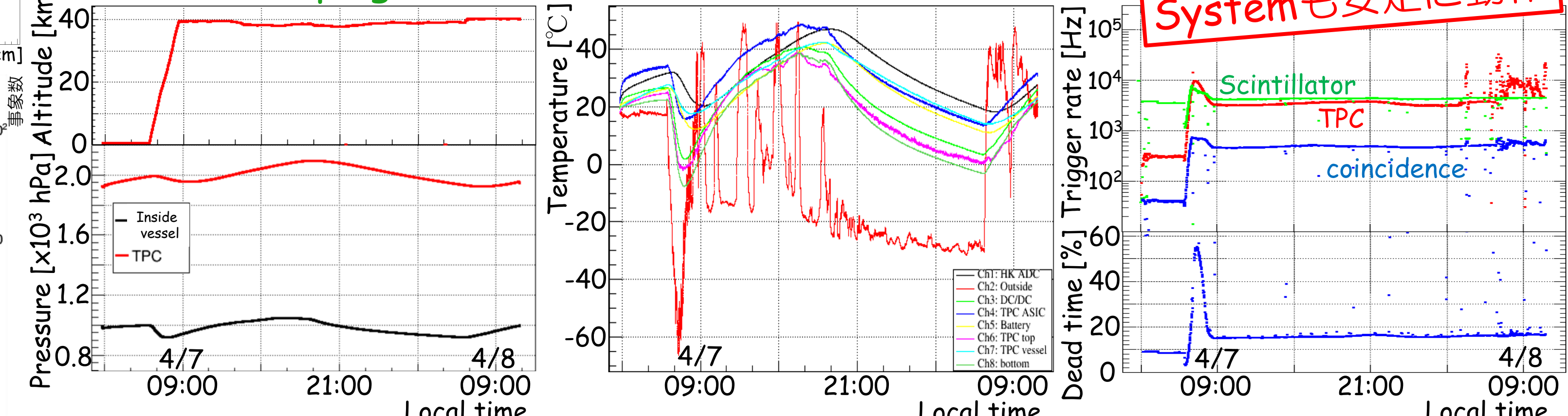


Time table

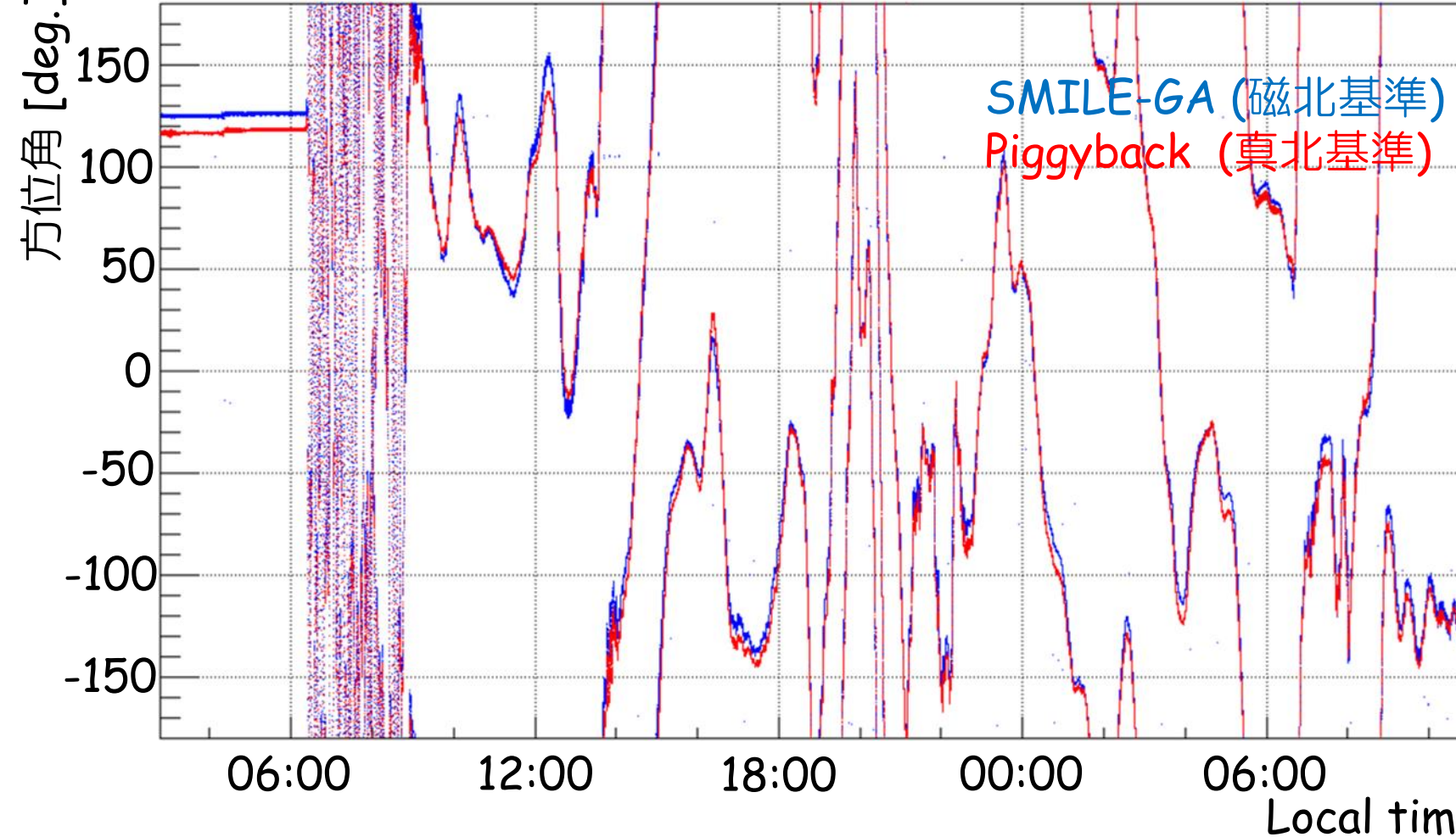
- 2018/4/7 オーストラリア中部標準時
- 00:10 gondola pick up
 - 02:47 turn on
 - 03:09 start data acquisition
 - 06:24 launch
 - 08:44 reach to floating altitude
- 2018/4/8
- 10:45 stop data acquisition
 - 10:53 turn off
 - 11:07 cut down
 - 11:40 landing
- 2018/4/9
- 13:10 touch to gondola
 - 21:30 back to launching station



House keeping data



姿勢データ



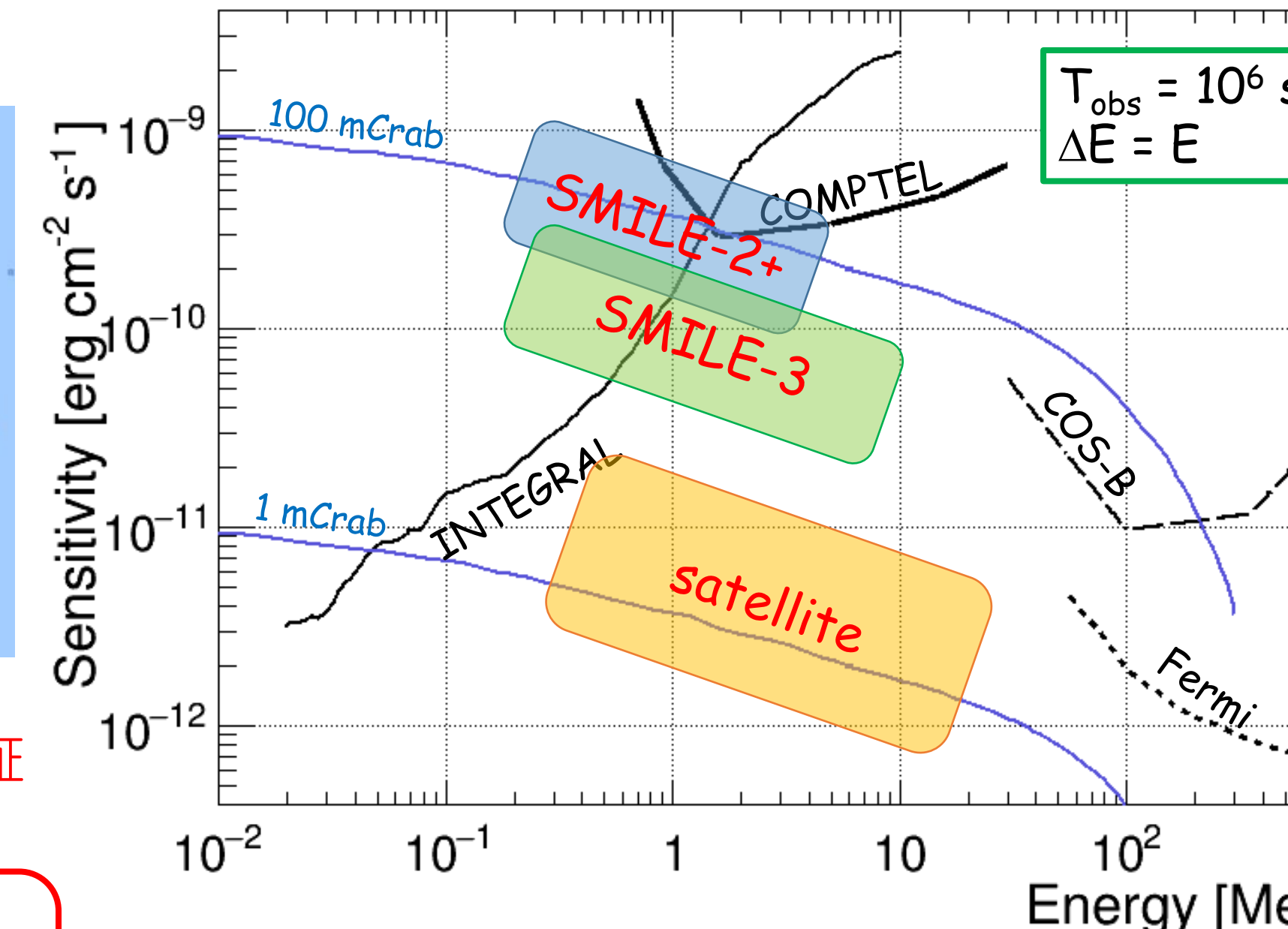
SMILE-2+の姿勢センサ：

- GPSコンパス GPSのみ動作
コンパスは上空で一瞬だけ
温度による大きな変動あり
温度変動を仮定すると補正可
放球直後から動作不良
- 磁場センサ
- 傾斜計

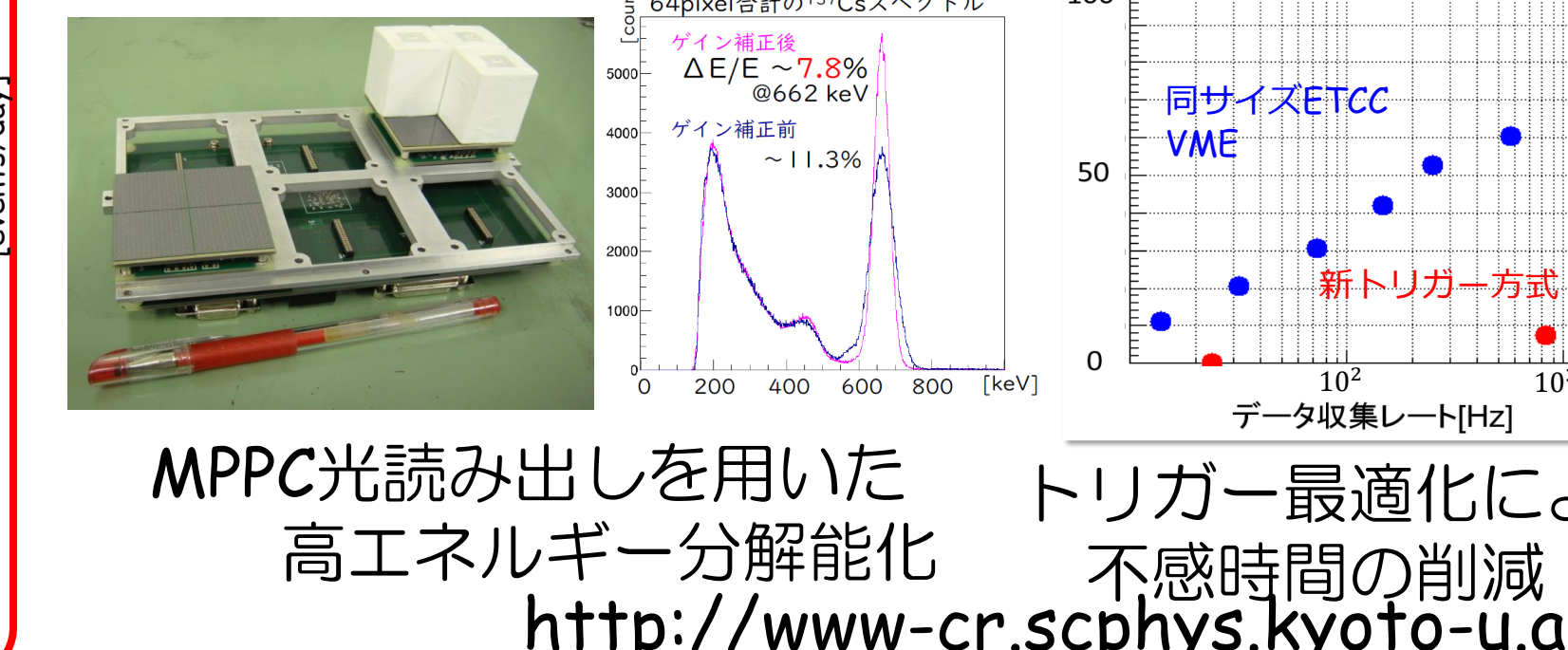
補正した磁場センサの情報から得た方位角と完全な独立系として動作していたpiggybackの情報とに良い相関が得られた為、ガンマ線の解析にはpiggybackから得た姿勢情報を用いて解析を行っていく

5. SMILE将来計画

次期計画



開発要素



SMILE-I：

- 気球高度でBG除去・ガンマ線観測を実証

SMILE-2+：

- ガンマ線到来方向を得て天体観測を実証

次回は科学観測！

SMILE-3：有効面積 ~10 cm², PSF 5~10°

- 2021年度豪州1日気球実験
 - 電波銀河Cen Aの観測, ^{26}Al の観測
 - 電子陽電子対消滅線の銀河面分布観測
- Fort. Sumner 1日実験
 - Cyg X-1/かに星雲の偏光観測
- 南半球周回圧力気球実験
 - GRB観測, ^{26}Al の銀河面分布観測
 - 背景放射の非一様性探査, 新天体探査



SMILE-2+の
10倍の検出感度を
実現し
長時間気球で
MeVガンマ線の
天文学を拓く!!

http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/index.html