

SMILE-II+実験概要

高田淳史, 谷森達, 水村好貴, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 谷口幹幸, 小野坂健, 齊藤要, 窪秀利 (京大), 黒澤俊介 (東北大), 身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大), 濱口健二 (GSFC)

1 MeV ガンマ線天文学の現状と電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡

数百 keV から百 MeV の MeV ガンマ線領域の観測からは、活動銀河核 (AGN) などでの粒子加速やブラックホールまわりの強重力場からの放射、宇宙初期からのガンマ線バースト (GRB)、ガンマ線パルサー、さらには太陽フレアなど様々な天体の観測が期待されている。特に核ガンマ線と呼ばれる励起された原子核の脱励起に伴うガンマ線放射は、原子核のエネルギースケールが MeV 程度であるために、この領域でのみ観測が可能であり、元素合成のプロセスや合成された元素の拡散の様子が解明できると期待されている。一方 MeV ガンマ線領域の観測は、ほとんど進んでいない。1990 年代 CGRO に搭載された COMPTEL により観測が始まり約 30 個の MeV 定常天体を発見したが [1]、2003 年以降コーデッドマスクを用いた INTEGRAL による観測でも、600 keV 以上で 4 つの定常天体の観測に留まっている [2]。近年、超新星爆発 SN2014J に伴う $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ の核ガンマ線の観測 [3] や重力波天体 GW170818 に対応した sGRB の観測 [4] など重要な報告がされて来ているものの、その観測例は非常に限定されている。

この観測が進んでいない現状は、MeV ガンマ線の観測手法が確立していないことが原因である。INTEGRAL で採用されている符号化マスク法は、光子個々には到来方向が判明せず、統計的手法によりガンマ線源を推定する方法であるが、宇宙における MeV ガンマ線観測では、検出器周りの不感領域と宇宙線との相互作用から生じる大量のガンマ線が雑音となるため、視野外からの雑音に観測対象の信号が埋もれ、検出感度を上げることが出来ていない。事実、SPI/INTEGRAL の観測においても、雑音強度が天体からの信号よりもはるかに強いということが報告されている [3]。また、COMPTEL で用いられた従来型コンプトンガンマ線検出器は、コンプトン散乱の運動学を利用し、入射ガンマ線の到来方向を光子毎にあるていど制限する検出器であるが、測定物理量の不足から到来方向を示す 2 角度の内、一方しか検出できない。このため、ガンマ線源の位置を特定するには統計的手法を用いるほかなく、視野外からの雑音ガンマ線の影響は少なくない。

MeV ガンマ線領域の天文学を拓くには、可視光や X 線・GeV ガンマ線で行われるのと同様に光子毎に到来方向を決定し、その広がりを point spread function (PSF) として定義し、これを用いて検出感度を推定することが不可欠である。これまでの符号化マスク法や従来コンプトン法では、ガンマ線イメージの取得に ML-EM 法などの反復計算を用いた統計的手法に頼らざるを得なかった為に、PSF の定義があいまいになり、検出感度を良く見積もりすぎる原因となってきた。この現状を打開するため、我々はガス飛跡検出器を用いてコンプトン散乱の反跳電子飛跡を測定可能にし、この飛跡検出器を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC, 図 1) を 2000 年から開発してきた [5]。ETCC に入射したガンマ線が、飛跡検出器のガス中でコンプトン散乱を起こすと、飛跡検出器でコンプトン散乱点と反跳電子の運動量を、取り囲むシンチレータで散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点を得ることで、コンプトン散乱後の運動情報を全て取得できるために、ガンマ線光子 1 個毎に到来方向とエネルギーを運動量ベクトルの足し算という簡単な方法で一意に特定可能となる。また、散乱方向と反跳方向の間の角を利用したコンプトン運動学テストや飛跡検出器内のエネルギー損失率を用いた粒子識別によって、ガンマ線以外の雑音粒子やコンプトン散乱事象以外の雑音事象を高効率で除去できる。光子毎にガンマ線の入射方向が決まっているため、不感領域と宇宙線との相互作用から生じる大量のガンマ線など視野外からの雑音ガンマ線は PSF 程度の広がりの影響に

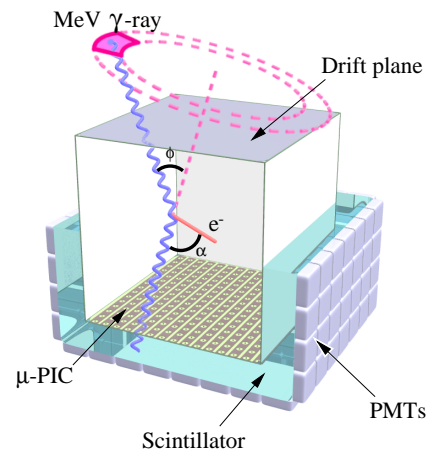


図 1: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ

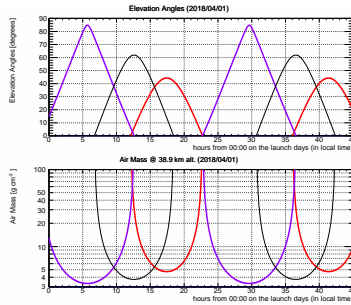


図 2: 2018 年 4 月のアリススプリングにおける天体の高度変化と大気柱密度の時間変化 (紫: 銀河中心, 赤: かに星雲, 黒: 太陽)。

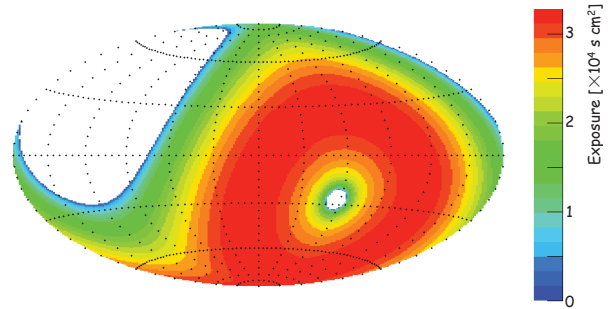


図 3: 豪州気球実験で 1 日間の飛翔により期待される SMILE-II ETCC の 511 keV に対する露出 (銀河座標)。

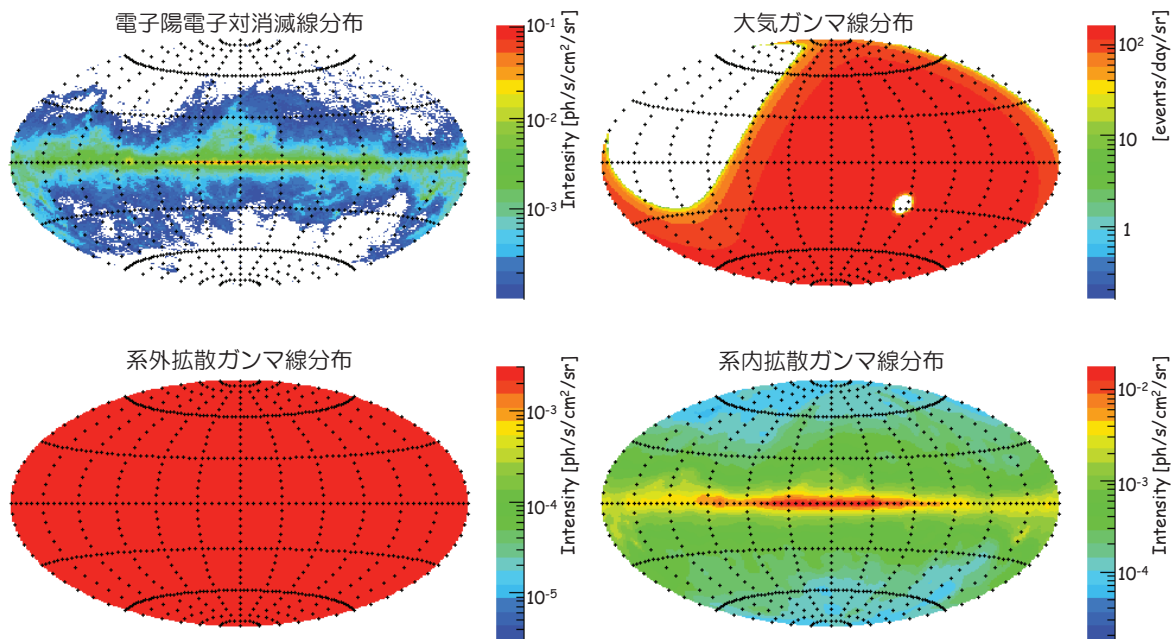


図 4: 計算で仮定したガンマ線分布 (左上: 511 keV, 右上: 大気ガンマ線, 左下: 系外拡散ガンマ線, 右下: 系内拡散ガンマ線)。

まで抑えられることになる。我々は ETCC が持つ雑音低減能力に関して、2006 年の気球実験 (SMILE-I 実験) [6] や陽子ビームを用いて作成した放射場下でのガンマ線源観測 [7]、福島放射線環境測定 [8] などで証明し報告してきた。

2 SMILE-II+実験計画

我々は、この ETCC による高感度な MeV ガンマ線観測の実証と実現を目的に気球実験を行う計画、Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments: SMILE を段階的に進めている。最初のステップとして、2006 年に 10 cm 角の小さな飛跡検出器を用いた ETCC を気球に搭載し、気球高度における動作確認と宇宙拡散・大気ガンマ線の観測を行った (SMILE-I) [6]。この実験では、高度 32-35 km において 3 時間の水平浮遊が実現され、視野全体から 420 個のガンマ線事象が得られた。これは、Geant4 シミュレーションによる宇宙拡散・大気ガンマ線の観測期待事象数 400 個とほぼ一致する一方、陽子や電子・中性子といった雑音粒子の直接入射では 1.9%程度、検出器由来のガンマ線では 19%しか説明できない。こ

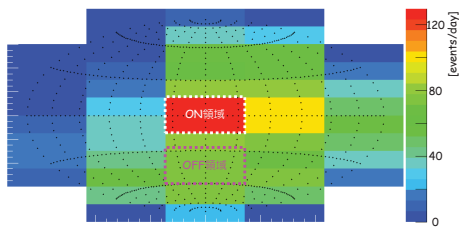


図 5: SMILE-II+で1日観測した際の511 keVガンマ線期待値マップ。ON領域とOFF領域の比較から 5.5σ の有意度の超過が期待される。

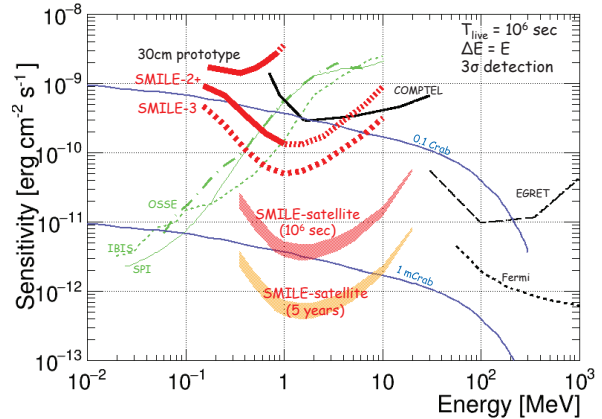


図 6: SMILE-II+および将来観測で期待される検出感度。

のSMILE-I実験により、気球高度においてもガンマ線測定が安定に可能であること、ガンマ線以外の粒子に対して、ガス飛跡検出器による粒子識別が非常に有効であることが示された [6]。

第二のステップとして、天体観測に必要なイメージング能力の実証と、明るい天体の観測を行って正しく天体のスペクトルを得てガンマ線撮像分光試験を行う計画である。SMILE-Iではガンマ線イメージングの確認までは行っていないため、既知の明るさの天体を観測し、地上校正試験で予想される検出感度が達成できるかを実証することが目的となる。MeV領域で明るい天体はかに星雲やCyg X-1・銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線等限られるが、現在日本国内での長期飛翔ができないことから、日本国内でかに星雲やCyg X-1が観測可能な高度にある時間帯に観測する事ができない。この為、オーストラリアのアリススプリングから放球を行い、上空39km付近にて約1日の観測をおこなう(SMILE-II+)。図2に、2018年4月におけるかに星雲と銀河中心の高度と残留大気柱密度の時間変化を示す。天頂角60度以内がSMILE-II+ ETCCの視野となるが、かに星雲は日没頃に数時間程度、銀河中心は深夜頃から8時間程度、観測可能な領域に存在する。この観測条件下で有意な観測を行うには、511 keVにおける有効面積は 2 cm^2 程度、半径10度程度のPSFの広がり、ETCCが必須となる。この有効面積が実現できると、残留大気圧3.5 hPaの下で511 keVにおいて図3に示すような露出が期待される。銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線の観測においては、系外拡散ガンマ線・系内拡散ガンマ線が背景放射として存在する上、気球観測では大気ガンマ線が前景放射として存在する。また、大気ガンマ線以外は大気による減衰を受けることになる。これらを考慮し、図4に示すような分布・強度でETCCへ降り注ぐことを仮定すると、SMILE-II+で期待される511 keVの観測結果は図5のようになり、銀河中心領域に有意な超過を観測できると期待できることになる。このSMILE-II+による観測ができれば、様々な波長における通常天体観測で用いられる手法と同じ方法で、目標とする観測天体のスペクトルを得る事ができることを証明でき、後は有効面積の拡大とPSFの向上を行えば、これまでの検出器では実現できなかった高精度のガンマ線分光観測を可能となることになる。

3 長時間気球実験で拓く MeV ガンマ線天文学

現在豪州気球実験 SMILE-II+は、2018年4月の放球を目指して準備を進めており、ETCC 検出器システムの構築・校正実験を進める一方、熱真空試験や電波感度試験を並行して行っている。このSMILE-II+により実現できる検出感度は図6に示すように、観測条件が同一であればCOMPTELに匹敵するような感度を達成できる性能をもっていることになる。SMILE-II+終了後、飛跡検出器のガス種・ガス圧の最適化やシンチレータの改良を行い、有効面積を 10 cm^2 、5度のPSFを目指す予定である(SMILE-3)。このSMILE-3を圧力气球を用いた南半球中緯度長時間気球に搭載できれば、 ^{26}Al などの核ガンマ線銀河面分布観測やガンマ線バーストの偏光観測、相対論的電子振り込み現象の観測が実現できる。最終的には、50

cm 角の CF_4 3 気圧の飛跡検出器による ETCC 4 台を搭載した衛星実験により、数百 cm^2 の有効面積で 1 mCrab の検出感度を実現し、MeV ガンマ線天文学を切り拓く計画である。

参考文献

- [1] V. Schönfelder+, A&ASS, Vol. 143 (2000), 145-179.
- [2] L. Bouchet+, ApJ, 679 (2008), 1315.
- [3] E. Churazov+, Nature, 512 (2014), 406.
- [4] V. Savchenko+, ApJL., 848 (2017), L15.
- [5] T. Tanimori+, New Astron. Rev., 48 (2004), 263.
- [6] A. Takada+, ApJ., 733 (2011), 13.
- [7] T. Tanimori+, ApJ., 810 (2015), 28.
- [8] D. Tomono+, Scientific Reports, 7 (2017), 41972.