

複数小型衛星を用いたガンマ線即応高精度位置決定による 重力波対応天体の同定

大野 雅功, 深沢 泰司 (広島大学大学院 理学研究科), 水野 恒史(広島大学 宇宙科学センター), 高橋 弘充, 田中 晃司, 内田 和海, 鳥越 健斗 (広島大学大学院 理学研究科), 中澤 知洋 (名古屋大学大学院 理学研究科), 榎戸 輝揚 (京都大学大学院 理学研究科), 小高 裕和 (東京大学 理学部), 一戸 悠人 (立教大学 理学部), Norbert Werner (MTA-Eotvos Lorand University/Masaryk University/Hiroshima University), Andras Pal (Kokoly Observatory), Zsolt Frei, Galgoczi Garbor (Eotvos Lorand University), Jakub Ripa (Charles University/Eotvos Lorand University), Laszlo Kiss (Konkoly Observatory), Norbert Tarcai, Zsolt Varhegyi (Complex Systems and Small Satellite)

Gamma-ray follow-up observations of the gravitational wave source with the fleet of nanosatellite

Masanori Ohno, Yasushi Fukazawa, Tsunefumi Mizuno, Hiromitsu Takahashi, Koji Tanaka, Nagomi Uchida, Kento Torigoe (Hiroshima University), Kazuhiro Nakazawa (Nagoya University), Teruaki Enoto (Kyoto University), Hirokazu Odaka (Univerisyt of Tokyo), Yuto Ichinohe (Rikkyo University), Norbert Werner (MTA-Eotvos Lorand University/Masaryk University/Hiroshima University), Andras Pal (Kokoly Observatory), Zsolt Frei, Galgoczi Garbor (Eotvos Lorand University), Jakub Ripa (Charles University/Eotvos Lorand University), Laszlo Kiss (Konkoly Observatory), Norbert Tarcai, Zsolt Varhegyi (Complex Systems and Small Satellite)

【重力波対応天体のガンマ線観測】

2017 年 8 月に検出された重力波イベント「GW170817」は、中性子連星合体イベントからの重力波放出であり、世界で初めてガンマ線から電波に渡り様々な電磁波波長帯で追観測がなされた。このことは、電磁波観測と重力波といった電磁波以外の観測手段を組み合わせる「マルチメッセンジャー天文学」が今後の重力波観測の発展に伴い、天文観測において極めて重要な役割を担うことを意味しており、まさに 2017 年はマルチメッセンジャー天文学の幕開けとなった。様々な波長帯で重力波対応天体の観測において大きな成果を上げた GW170817 において、唯一ガンマ線のみ、その起源について明らかにできていない。重力波発生に同期したガンマ線放射は観測されたが、ガンマ線放射源として最も有力なガンマ線バーストとしてはとても暗く、GW170817 がガンマ線バーストを伴っていたかどうかについては未だ議論が続いている。重力波対応天体とガンマ線放射の起源について決着をつけるために、今後の重力波観測時代において、さらに多くのイベントからガンマ線放射を捉

えることが必須である。このためには、全天をカバーするほどの広い視野かつ他波長帯と比較できる分角スケール以上の高い位置決定精度が必要となる。しかし、従来のガンマ線観測衛星では、広視野と高精度を同時に実現することは難しい状況であった。そこで我々は、近年発展が目覚ましい超小型衛星(Cubesat)技術をいち早く取り入れ、複数の Cubesat を用いる新しい観測手法により、全天をカバーしつつ分角スケールの位置決定精度を実現する“Cubesat Applied for MEasuring and LOcalizing Transients (CAMELOT)”計画を提案している(Werner et al. 2018)。

【複数超小型衛星と精密時刻合わせで実現する広視野高精度位置決定システム】

我々のグループは 10 を越える小型衛星を低軌道に打ち上げることで、常に全天をカバーしつつ、相対時刻を GPS により精緻に合わせ、重力波源からのガンマ線信号の到来時間差を 0.1 ミリ秒精度で計測することで分角スケールの位置決定精度を達成する CAMELOT 計画を提案している。図 1 に示す通り、異なる衛星で検出したガンマ線の到来時間差を精緻に計測することで、三角法によりガンマ線到来方向を制限する手法であり、近年発達した超小型衛星技術により、従来では考えられなかった数の衛星を用い、それぞれの相対時刻を精度よく測定することで、分角スケールの位置決定精度を実現する。本計画はハンガリーの大学、企業と共同で推進しており、すでに ESA に加盟したハンガリー側企業が開発した 3U サイズの Cubesat プラットホームを利用する。また、最新の衛星間通信技術(Iridium NEXT)も導入することで、高速データ通信を実現し、ガンマ線で決定した位置情報を数分程度の時間でいち早く地上に通知することで他波長による重力波対応天体追観測を推進する。

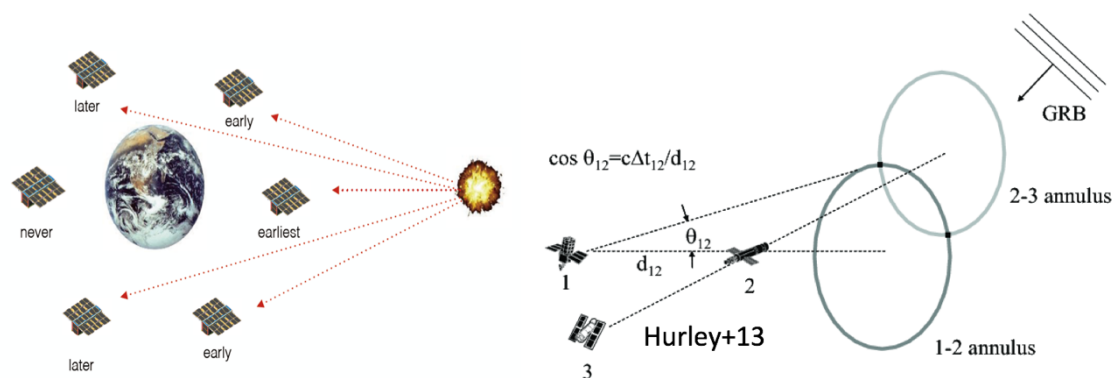


図 1 複数超小型衛星による時間差を利用したガンマ線到来方向決定概念図(左)。ガンマ線到来時間差と三角法を用いて円弧状にガンマ線到来方向を制限。複数の円弧の組み合わせにより一意に決定する(右) (Hurley et al. 2013)。

【検出器デザイン検討状況】

各小型衛星におけるガンマ線の検出時間差を利用する本計画では、検出ガンマ線光子統計が時間差決定精度を決める重要な鍵である。このために、できるだけ大きな面積で、できるだけ広いエネルギー範囲でガンマ線を検出でき、かつ Cubesat プラットホームに課せられ

る実装面積や電力などの厳しい制約をクリアする検出器を検討する必要がある。そこで我々は図2のようにガンマ線検出感度の良いCsI(Tl)シンチレーターを4枚搭載し、コンパクトながら、低消費電力で動作するシリコン光検出器(MPPC)で読み出すデザインを検討している(Torigoe et al. 2018)。独自の複数読み出しシステムを開発することで、10 keV 程度の低エネルギーガンマ線まで検出可能であり、ガンマ線に対する有効な集光面積は最大でおよそ 300cm² という性能を達成することができることを確認した。これは現行のガンマ線観測検出器である Fermi-GBM と同等の性能であり、我々はそのような性能を Cubesat という超小型衛星 1 台で実現可能であることを示した。

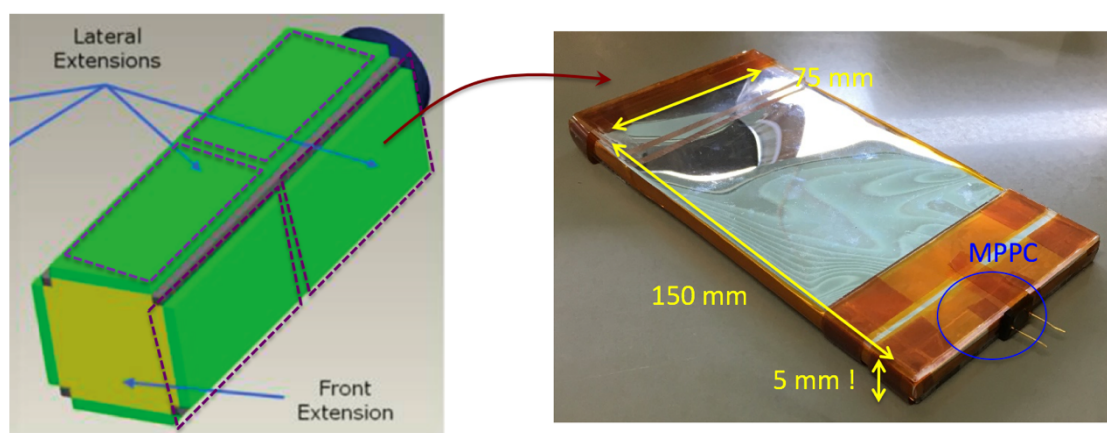


図 2 本計画における検出器配置検討案（左）。搭載検討中の CsI シンチレーターと読み出し素子 MPPC(右)。

【ガンマ線到来方向決定性能の検証】

我々の計画において最も重要な観測性能の一つが時刻差を利用したガンマ線到来方向決定である。この到来方向決定性能は、検出されたガンマ線光子統計や、ガンマ線到来時間の時間プロファイル（光度曲線）、位置決定に参加できる衛星の数、位置決定アルゴリズムなどに大きく依存すると考えられる。そこで我々は、ある衛星軌道を仮定し、そこに上記の検出器デザインを取り入れ、ある方向から到来したガンマ線の到来時間差をシミュレーションすることで我々のコンセプトによるガンマ線到来方向決定性能を見積もった。ここでは、およそ 500 km の低軌道において 53 度の傾斜角に 9 つの衛星を投入した場合を想定し、ガンマ線源として最もらしいガンマ線バーストがある方向から到来した場合を想定した。ガンマ線バーストの明るさ、光度曲線モデルは実際に Fermi-GBM により観測されたものを入力し、シミュレーションした結果得られた各衛星間の時刻差を元に、図 2 に示す三角法の位置推定式を用いて単純な最小自乗法により到来方向を誤差を含めて評価した。図 3 にある明るいガンマ線バーストを 9 つ全ての衛星で検出できた場合に対する位置決定シミュレーション結果の誤差円を示す。ここに示すように、明るいガンマ線バーストを多数の衛星で

検出できた場合は、0.1 度以下、すなわち分角スケールで位置決定できることを示した。さらに、この解析を Fermi-GRB で検出した全てのガンマ線バースト (Bhat et al. 2016) に適応することで、年間 10 個程度のガンマ線バーストで 20 分角以内の精度でガンマ線到来方向を決定することができることがわかり、我々のコンセプトが有効であることを実証することができた (Ohno et al. 2018)。

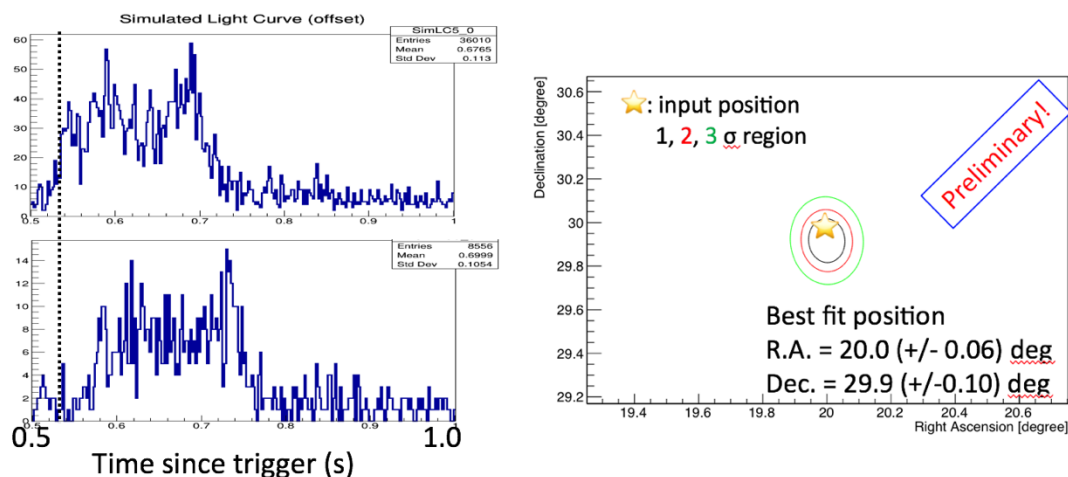


図 3 ガンマ線到来方向シミュレーション結果の一例。左図はシミュレーションしたガンマ線バーストの光度曲線。ある衛星で検出した光度曲線に対して、別の衛星では到来時間が遅れている様子がわかる。右図はある明るいガンマ線バーストに対して9つ全ての検出時間差を利用して位置決定した結果。

【まとめ】

2017 年より創生された「マルチメッセンジャー天文学」において重要な課題の一つである、重力波天体とガンマ線放射の同時観測に向けて、我々は超小型衛星を複数打ち上げ、全天をカバーしつつも分角スケールでガンマ線位置を決定できる画期的な計画“CAMELOT”を提案している。すでにハンガリーの大学や企業と共同で検討を進めており、Cubesat の制限を考慮した上で最大限ガンマ線検出能力を発揮できる検出器デザインを検討し、ガンマ線到来方向を決定するシミュレーターを開発することで、年間 10 個程度のイベントでガンマ線到来方向を 20 分角以内という分角スケールで決定できることを示した。今後本計画を ESA に提案することで、ミッション実現を目指す。