

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05402

研究課題名（和文）重力波源のX線対応天体の検出と位置決定を目指したMAXI-NICER連携の構築

研究課題名（英文）Onorbit Hookup of MAXI And NICER for exploring and localizing X-ray counterparts of gravitational wave sources

研究代表者

芹野 素子 (Serino, Motoko)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：70415199

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、重力波天体や未知の天体からのX線をとらえ、その位置を詳細に決定することで、天体現象の解明につなげることを目指した。X線未知の天体を発見する全天X線監視装置MAXIと、天体の位置を精度良く決めるNICERとを国際宇宙ステーションの上でつなぐため、宇宙ステーション上のコンピュータで動作するプログラムを開発し、テストを行った。その結果、実際に運用するためにどのような改良が必要かがわかった。実際に運用するに至らなかったため、現状で行える研究として、地上軽油での連携や、MAXI単体での重力波対応天体の探査を行い、未知天体の位置決定、重力波対応天体の明るさの上限などの成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究期間中に中性子星合体による重力波が初めて観測され、同時にその対応天体が発見された。MAXIは全天の85%の領域を90分毎に観測できるという強みを生かし、他のX線望遠鏡に先駆けて対応天体の位置を観測し、X線では明るい天体が現れなかったことを確認した。重力波研究は、この年ノーベル賞を受賞しており、学術的・社会的に最も話題になっているテーマである。重力波に伴う電磁波の観測は再度のノーベル賞の価値があるとも言われており、X線での同時観測の結果を提供した意味は大きい。

研究成果の概要（英文）：We aimed to detect X-ray from gravitational wave sources or unknown astronomical objects and localize them precisely by follow-up observations to know the nature of the objects. We use Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) for catching signals from unknown objects and use Neutron Star Interior Composition Explorer (NICER) for following up them. Both of them are on the International Space Station (ISS). We developed the software to connect them in ISS and tested it to know how we can improve it for actual operation. We also carried out ground based cooperation, which worked well. Although the X-ray counterpart of the gravitational wave source was too weak to detect with MAXI, we obtained the upper limit of the flux of the counterpart in X-ray.

研究分野：X線天文学

キーワード：X線観測 重力波 国際宇宙ステーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年のブラックホール同士の合体による重力波の発見は、この研究分野における今世紀最大の発見と言える。13億光年の彼方からやってくる重力波信号を検出できること、重力波によって、ブラックホールの質量を決定できること、太陽質量の30倍以上もあるブラックホールが合体して成長すること、などはどれも新鮮な驚きであった。

一方で、“従来の天文学”に携わる我々を落胆させたのは、はじめの重力波観測により見つかった重力波イベントのどれについても、電磁波対応天体が特定されなかったことであった。重力波という新しい目による観測と、電磁波によって長年積み重ねてきた従来の観測による成果とを結びつけ、より深い理解に至るためには、重力波の電磁波対応天体を発見することが次のステップとなると考えられていた。

このような状況で我々が考えたのが、国際宇宙ステーション(ISS)に搭載された全天X線監視装置 MAXI と、同じ ISS 上に2017年に搭載予定であったX線望遠鏡 NICER とをISS上で結びつけ、即座に追跡観測を行うことによって、未知のX線源を発見し、さらに追跡観測を行うという戦略である。

MAXI は当時すでに2015年に観測された重力波イベントのX線対応天体の探査を行い、結果を報告していた。この論文には他の望遠鏡などの観測結果も併せて載せられているが、MAXI は、他の装置にくらべて極めて広い領域を短時間で探査できるということが確認されていた。

それまでの未知天体の発見の実績から、重力波放射に伴ってX線も放射され MAXI で検出した場合には、1度以内の精度の位置が自動で決定できることが示されていた。

しかし、1度の精度では、重力波源が所属する銀河内で、どのような位置にあるかを調査することどころか、銀河を特定することすら難しい。また、この位置をもとに大型の望遠鏡で追跡観測を行うことも難しい。そこで、X線の放射が明るいうちに、更に精度良く位置を決めることが不可欠であると考えた。これには、同じ波長で MAXI の誤差領域を覆う追跡観測を迅速に行うのが理想的である。これを可能にするのが NICER である。NICER にはイメージング能力はないが、スキャンすることによって PSF サイズである約5分角の精度で位置を決定することができる。

2. 研究の目的

本研究は重力波天体のX線での検出によって、重力波源の詳細な位置を特定し、重力波源の生成過程や分布の研究につなげることを目標とする。ただし、このような大目標を本研究の枠組の中で達成することは不可能なので、そのためのステップとなる下記を達成することとした。

一つめは、重力波天体に限らず MAXI が発見した未知の突発天体に対し、MAXI から NICER に位置情報を提供して、NICER で追跡観測を行い、発生源の詳細な位置とスペクトルを調べることで、どのような天体が起源にあるのか(ブラックホールか、中性子星かや、銀河系内か系外かなど)を明らかにする。この中には、MAXI で検出したガンマ線バースト(またはX線閃光)の正体解明を含んでいる。

二つめは、重力波への対応である。

本研究期間中では、昨年以上の頻度で重力波が検出されることが予想されるが、強い電磁波が観測されるような条件の重力波の検出は未だ難しいかもしれない。

電磁波が観測されない場合にも、高いカバー率を誇る MAXI の特徴を活かして、X線放射の上限値をもとめる。また、重力波の観測から分かる、質量・距離などの特徴と関連づけて、上限値を求めることとした。

3. 研究の方法

本研究では、X線突発天体の MAXI による探査をISS上で実行し、NICER による追跡観測が可能なたちで速報するために、下記の1-3.の方法をとった。

- (1) MAXI のデータから突発天体を検出するソフトウェアを、ISS 上で運用するのに適したものに修正する
- (2) ソフトウェアを機上で動かせるようにインストールと試験を依頼する
- (3) ISS 上で実際に速報運用を行う

ただし、本研究には、

- ・重力波の電磁波対応天体がX線では観測されない、
- ・MAXI-NICER の連携がうまくいかないもしくは時期的に遅くなる、

等のリスクがあったため、併せて下記を行うこととした。

- (4) 重力波対応天体以外の天体現象に対しても NICER に速報する
- (5) MAXI が地上解析によって発見した天体現象を NICER に知らせる追跡観測を行う

4. 研究成果

(1) MAXI-NICER 連携のためのソフトウェア開発

ISS 上のコンピュータで動作させるプログラムの開発と試験結果の解析を行った。

本研究を行う上での最大の課題は、これまで地上のコンピュータで行ってきた MAXI のデータ処理をすべて ISS 上のラップトップコンピュータ 1 台で担わなければならない点であった。ソフトウェアは、研究期間のうちに開発を行い、地上での試験を経て、実際に ISS 上のコンピュータで試験を行うことができた。

また、試験によって得られたデータを解析することで、プログラムのどの部分を改良すれば良いかがわかった。今後は更新したプログラムを再度テストし、実運用につなげる予定である。

MAXI から NICER への ISS 上での連携に関しては、NASA が各ミッションに対する評価を行う機会である “Senior Review” においても言及されており、推奨されているため、MAXI にとっても NICER にとっても今後必ず成功させなければならない課題となっている。

(2) 重力波対応天体の MAXI での探査

研究期間中に初めて電磁波対応天体を伴う重力波が観測され(図 1)、それまで予想されていた 2 秒未満の短いガンマ線放射(短いガンマ線バースト)や爆発的な元素合成に伴う放射等が実際にとらえられたことで、中性子星合体に関する物理や短いガンマ線バーストに対する理解が飛躍的に進んだ。一方で本研究の成果でもある X 線では暗いという特徴は、予想外であった。

さらに、電磁波対応天体が見つかったのは、2017 年の観測期間中の 1 度だけであり、2019-2020 年にかけて行われた重力波観測では、中性子星の合体とみられる重力波は複数回検出したにもかかわらず、一度も電磁波は確認されなかった。電磁波でもっと多くの重力波対応天体が観測できると期待していた我々にとっては、残念なことではあるが、何故このような多様性が生じるのかについては、今後さらに多くの観測を重ねることで明らかにできると考えている。

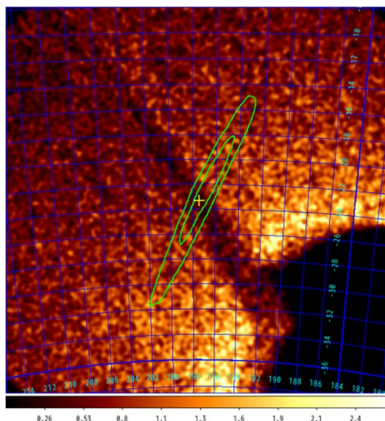


図 1 重力波天体 GW 170817 の方向を MAXI で観測した画像。重力波の発生から 1 日の間で取得したデータ。緑のコントアが重力波の到来方向を示す。中央の十字は電磁波対応天体の位置。

(3) 地上経由での MAXI-NICER 連携による新天体の位置決定

MAXI と NICER とを ISS 上でつなぐことは本研究期間中には達成できなかったが、地上を経由した(人間が介在した)連携は順調に行われている。

NICER での追跡観測対象は主に位置が良くわかっている既知天体であるが、未知の突発天体を NICER で追跡観測することによってより精度良く位置を決定するという、本研究の趣旨通りの成果も得られた。

2018 年 6 月に発見した、MAXI J1727-203 という新天体(図 2)では、MAXI での天体の検出からわずか 6 時間後には NICER での追跡観測を開始し、誤差半径を 10 分の 1 以下にすることに成功した。

この天体については、その後の追跡観測によって、ブラックホール連星らしいということがわかって

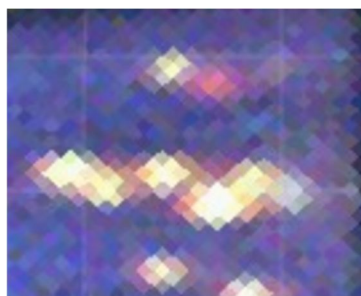


図 2 MAXI が 2018 年 6 月 12 日に観測した銀河中心方向の画像。上の方に赤く見えるのが MAXI J1727-203。赤: 2-4 keV、緑: 4-10 keV、青: 10-20 keV の 3 色を合成。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Sugita Satoshi, Kawai Nobuyuki, Nakahira Satoshi, Negoro Hitoshi, Serino Motoko, Mihara Tatehiro, Yamaoka Kazutaka, Nakajima Motoki	4. 巻 70
2. 論文標題 MAXI upper limits of the electromagnetic counterpart of GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 81-1, 81-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy076	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Serino Motoko, Kawai Nobuyuki, Negoro Hitoshi, Mihara Tatehiro, Masumitsu Takahiro, Nakahira Satoshi	4. 巻 69
2. 論文標題 X-ray upper limits of GW151226 with MAXI	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 85-1, 85-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx086	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kawai Nobuyuki, Negoro Hitoshi, Serino Motoko, Mihara Tatehiro, Tanaka Kazuki, Masumitsu Takahiro, Nakahira Satoshi	4. 巻 69
2. 論文標題 X-ray upper limits of GW150914 with MAXI	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 84-1, 84-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 芹野素子, 杉田聡司(青学大), 根来均(日大), 河合誠之(東工大), 三原建弘(理研), 杉崎睦(東工大・中国国家天文台), 他MAXIチーム
2. 発表標題 MAXIによる重力波源X線対応天体の探査(2019-2020年)
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----