

# MAXIによる重力波X線対応天体の探査

芹野 素子

〈理化学研究所 MAXI チーム 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉  
e-mail: motoko@crab.riken.jp



全天X線監視装置MAXIは国際宇宙ステーションに設置されたX線の空を観測する装置である。重力波の対応天体探しでは、最も早い時間帯に、広く浅く観測し、その後の深い観測につなげるという役割を担う。2015年に行われたAdvanced LIGOによる初めての重力波の観測では、2台の観測装置でしか観測していなかったこともあり、重力波の到来方向は、数百平方度という広大な領域のどこか、としか特定されなかった。このようなときには、「いつでも全天を観測し続けている」というMAXIの威力が発揮される。しかしながら、このような探査は、MAXIにとっても初めての試みであり、手探りで奮闘を経験することとなった。本稿では、MAXIによる重力波対応天体のX線での探査の現状について2015年の観測結果を交えて解説する。

## 1. 全天監視の強み

近年、日本人宇宙飛行士も多く活躍し、テレビなどでたびたび取り上げられるようになったので、「国際宇宙ステーション」も身近に感じられるようになってきたのではないだろうか。全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) はそんな国際宇宙ステーションの一角に据えられており、92分ごとに地球を周回しながらX線 (2–20 keV) の空をスキャン観測している<sup>1)</sup>。実は「全天監視」と言っても、ある瞬間に見ているのは全天の2%にすぎない。また、スキャンすることとは、視野が常に動いているということであり、特定の方向を継続して見られる時間 (滞在時間) は92分のうち40–50秒程度と限られている。とはいえ、この「全天見える」というのは今回のような場合、素晴らしい威力を発揮する。どこに新天体が現れても、92分以上継続して明るければ発見できるということだ。

また、重力波が観測されようが観測されまいが、常に監視している。これもまた、優れた特徴

の一つだ。たとえば、重力波検出の報告が1日後であろうが、1カ月後になるうが、過去のデータにさかのぼって対応天体の有無を調べることができる。さらに言えば、電磁波が重力波より後に出るという保証は全くない。これまで重力波の対応天体が発見されたことはないが、さまざまな理論の予言があり、重力波に先立って電磁波が出るというモデルもある<sup>2)</sup>。MAXIを使えば、重力波の前の電磁波の放射があったかどうかを、後から調べることができるというわけだ。

GW150914の後、全世界の望遠鏡が勢力的にその誤差領域を観測した。このイベントの電磁波追跡観測の論文<sup>3)</sup>にはおびただしい数の視野を示す丸や四角が重力波の誤差領域を埋め尽くす図があり、涙ぐましいほどの熱意を感じる。しかし、MAXIはいつもどおりのスキャン観測を続けるだけで、何も特別なことはしない。したくても、そういうことができるように作られていない。MAXI自体は可動部をもたず、宇宙ステーションの回転を利用して全天を見る、という効率的な設計になっているのだが、こういうときは自

由に向きを変えられる“普通の”天文衛星が少しだけうらやましくなる。

## 2. 上限値の算出

2015年の二つの重力波イベントでは、電磁波対応天体の存在は確認されていない。もちろん、MAXIでもこれといったイベントは検出されていない。このような場合、検出限界感度を計算し、「上限値〇〇よりも明るい天体は現れませんでした」という報告を行うことになる。繰り返すが、どのような重力波天体も過去には観測されていなかったわけで、たとえ対応するX線天体が何も検出されなかったとしても、検出されなかったこと自体が意味をもつ。したがって、このような報告を行うことは重要なのである。

### 2.1 上限って、どこの？

—その天域は壊れたやつで見えています

そろそろ観測データをお見せしよう。図1はMAXIが観測したX線の全天図に重力波源の推定位置を重ねたものである。図の縦横のグリッドは赤経赤緯を、濃淡は検出したカウント数を表している。南北の緯度40度付近に白くぬけた穴があり、目のようにも見える\*1。小首をかしげてにやりと笑う、つぶれた顔のピエロのように見えなくてもない。その二つの目は宇宙ステーションの回転の軸である。そして、そこを中心に縞模様が現れている。濃淡があるということは、バックグラウンドの高低があるということである。つまり、観測条件が場所によって異なるということだ。当然、条件に応じて検出可能な明るさの上限も変わってくる。

図1の二つの絵で異なるのは、GW150914(上)では、重力波の到来方向が左下の目の周りに同心円状にあるのに対し、GW151226(下)では目に近いところから遠いところまで横切るようになっている点である。目から等しい離角にあると

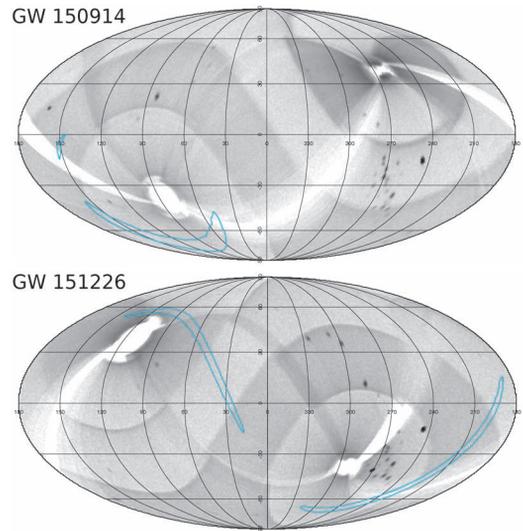


図1 MAXIが観測したGW150914(上)とGW151226(下)の全天図。重力波イベントの検出から24時間後までのデータを使用して作成した。推定された重力波源の方向は実線で囲まれた領域である。

ころは、検出器上の同じ位置で観測していることになるので、観測条件はほぼ同じになる。一方、GW151226の場合は場所によって異なるカメラで観測されているため観測条件がまちまちで、一口に上限値といっても、どの位置かで異なる値になってしまう。さらに、非常に悪いことに一部は壊れたカメラでしか観測されていない。ここで言う「壊れた」とは、「バックグラウンド除去能力を失った」という意味である。正常な検出器には、観測対象であるX線ではなく、荷電粒子などに反応して信号を出した場合に、それらを除去できるような仕組みがある。これが働かなくなると、バックグラウンドは約10倍にはねあがり、天体からのX線の信号はバックグラウンドに埋もれることになるのだ。図1下の絵で、左上にある目の左右に、特に色が濃くなっている扇型の領域があるのがおわかりになるだろうか？ ここが壊れたカメラで観測している領域だ。この部分の上

\*1 図1の上下を見比べるとわかるように、目の位置は時期によって経度方向には動くが、緯度は常に同じになる。

限値は、ほかの部分に比べ、2-4倍も高い値になる。この条件で観測されるのは全天のうち7%程度となっている。

## 2.2 広すぎる探査領域

### 一手探りの解析

MAXIの長所は、データ公開の早さと解析の手軽さにある。明るい既知天体ならば、MAXIホームページ<sup>\*2</sup>で天体名をクリックするだけで光度曲線やスペクトルを入手することができるし、任意の座標のデータもオンデマンド<sup>\*3</sup>で取得することができる。データの処理はすべて自動化されていて、世界中からのリクエストに応じてすばやくデータを提供することができる。しかし、この素晴らしいシステムにも弱点がある。それは、解析対象が天球状の特定の一点であることを暗黙に仮定していることだ。重力波源のように数百平方度もの領域を一度に解析するには設計されていない。また、もう一つには、現在のところ壊れたカメラで見ているデータは使用されていない、という問題もある。したがって、お手軽な自動処理に任せるわけにいかず、(打ち上げ前や直後のように)手探りで解析を進めることとなった。

突発天体の観測報告では早さも重要である。そこで、われわれは既存の手法を利用しつつ対応することにした。一つめに、MAXIの速報システム<sup>3), 4)</sup>の結果を利用して、有意な突発天体が検出されなかったことを示した。MAXIの速報システムは、宇宙ステーションから送られてくるデータをリアルタイムで解析し、自動的に変動天体を検出し、自動、もしくは当番の判断で速報するためのソフトウェアシステムである。速報システムで検出可能な天体の強度は経験的に知られており、例えば、4-10 keVのエネルギー帯で1日観測した場合には15 mCrab<sup>\*4</sup>程度の天体まで検出す

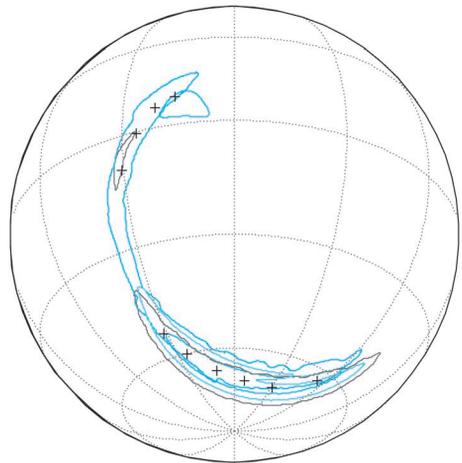


図2 GW150914に対して突発天体の検出限界を算出するために用いた点。重力波存在確率等高線内の10点(十字)を用いた。

ることができる。いずれの重力波イベントについても、速報システムは有意な変動を検出していないので、この値を一つの上限と考えることができる。ただし、この値は典型的なものであるので、前述のようにどのカメラを使うかでも変わりうる。そこで、二つめの方法として、重力波の到来方向の中で代表的な点を(目視で)何点か選び、それらの点について自動解析を利用することでより詳細な上限値を求めた。図2にはGW150914の場合の例を示した。このときは重力波存在確率90%の等高線内の10点を目視で選んだ。GCN(The Gamma-ray Coordinates Network)にはこのようにして求めた値を報告した<sup>6)-8)</sup>。

その後、解析方法には改良が加えられ、標準解析では使用されない壊れたカメラのデータを利用したり、重力波源の方向を代表する点を自動的に選択できるようになったりした。しかし、基本的には点源を解析する場合と同じ方法で検出限界を求めている。

\*2 <http://maxi.riken.jp/top/>

\*3 <http://maxi.riken.jp/mxondem/>

\*4 かに星雲の千分の一を単位としたフラックス。4-10 keVでは $1.2 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に相当する。

### 3. MAXIの速報

#### —昨日の突発天体は重力波源？

X線では突発天体がよく現れる。それどころか、変動しない天体を探すほうが難しいくらいである。MAXIでも当然たくさん突発天体が発見される。MAXI自身は、残念ながら突発天体の素性を詳しく知るのに適した観測装置とは言い難い。得られる光子数が限られているし、エネルギー分解能も良いとは言えない。何より連続観測できない。したがって、何か突発天体を見つけた場合、国内外の望遠鏡、衛星にお願いして、素性を調べてもらう。前述の速報システムは突発天体の発見から、通報、追跡観測までをスムーズに行うためのものだ。

重力波の発生と前後して、MAXIで検出できるほど強いX線が放射された場合どうなるだろうか？ おそらく、MAXIは重力波のアラートよりも早くX線の突発天体の情報を全世界に通報することになる。重力波の速報は今後洗練され、より迅速に情報が流れるようになって期待する。しかしながら、MAXIは最速12秒で速報した実績がある。また、位置も数十分角から、悪くても数度の精度で決まることは間違いない。重力波対応天体の速報よりは、圧倒的に追跡観測しやすいだろう。

2015年の観測では重力波検出の情報は重力波観測チームと合意を交わした人々にのみ公開され、一般には論文の出版後に公開になった。おそらく今後もしばらくの間はその状況が続く。一方、MAXIが発見した突発天体の情報は、メーリングリストやGCNを通じてすぐに一般に公開される。もちろん、重力波の対応天体として検出したことは秘密にしておかなければならない。そうすると、MAXIの突発天体を追跡観測した結果、それとは知らずに重力波天体の追跡観測をしてしまう、ということは起こりうる。むしろ、是非起こってほしい。重力波天体だったことは数カ月後になってようやく明らかになるかもしれないの

で、たとえ何も検出されなかったとしても、データは大切に保存しておくことをお勧めする。

余談であるが、筆者の仕事場の2部屋隣には、重力波イベントに興味津々な理論家のみなさまの居室がある。彼らはもちろん受かったばかりの重力波イベントの存在を知らない。廊下でうっかりと「昨日の重力波イベントの解析がまだ追いつかなくて…」などと口をすべらせてはいけない。

### 4. 重力波天体のもう一つの可能性

#### —速報システムにかからない変動

ここまで、重力波源から放射されるX線の性質に関して、暗黙のうちに、MAXIが通常観測するエネルギー帯である2-20 keVで放射しており、なおかつMAXIの視野内で光ることを前提としていた。実は、この範疇にない放射の場合でも検出できる可能性がある。つまり、2-20 keVでもなければ、視野内でもない現象が“見える”ということだ。そして、重力波対応天体ではないが、そのような放射を捉えた実績もある。スペクトルが硬いガンマ線バーストがそれである。

多くの研究者が期待するシナリオとして、中性子星同士、または中性子星とブラックホールが合体し、重力波が放射されるとともに数秒以下の短いガンマ線バーストが観測される、という説がある<sup>9)</sup>。また、観測的には、短いガンマ線バーストはスペクトルが硬い傾向があることが知られている。MAXIの観測する20 keVより高いエネルギーのX線、ガンマ線が大量に降り注ぐということだ。これがMAXIでどのように見えるだろうか？

まず、MAXIの観測がスキャン観測であるのは、特定の方向から来た光だけが検出器に入るように、スリット、およびコリメータと呼ばれるものを検出器の前に取り付けてあるからである。これによって、X線の入射方向は幅が約3度の領域に限られ、天体の位置を決定することが可能になる。コリメータは厚さ0.1 mmのリン青銅の薄板を約3 mmの間隔で並べたもので、2-20 keVの

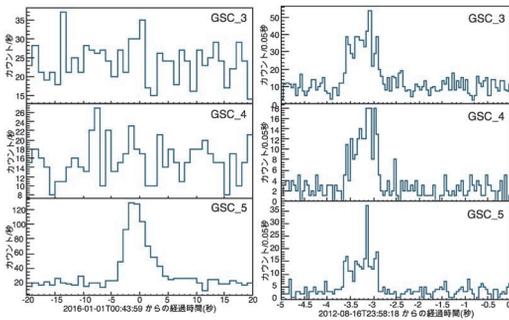


図3 ガンマ線バーストの光度曲線。縦に並べた三つは同時刻の三つの検出器のカウントレートをそれぞれ示している。左のGRB 160101Aは通常の検出の例で、1台（一番下）のみで検出されている。右のGRB 120816Bはエネルギーの高い光子が多い例。異なる方向を観ている全検出器で増光しているのがわかる。

X線は十分に遮ることができると、60 keVあたりになると透明になる。もっと高いエネルギーになれば、鉛板を張ったコリメータの外壁も素通りするようになり、検出器は全方向からの照射にさらされることになる。通常は入射方向に応じて1-4台の検出器の、しかも一定の位置に信号が出るはずであるが（図3左）、高エネルギーのX線（もしくはガンマ線）が降り注いだ場合は、全検出器の全面にわたって検出される（図3右）。こうなると、もはやどこから入射したX線・ガンマ線なのか特定することはできない。位置が決定できないのだ。速報もできない。位置だけでなく、入射した光子のエネルギーすらわからない。しかし、ともかく、信号は出るので、放射が到達した時刻や強度はわかる。重力波対応天体からの電磁波の放射という世紀の大イベントである。位置が決定できないくらいは大目に見ても良い、かもしれない。おそらく、ほかの衛星でも検出されるだろう。複数の衛星で検出できれば、MAXIのデータを含め、検出時刻の差を利用した方法で、後から位置を決めることも可能になる。“重力波対応天体をMAXIが発見”と言うのは気がひけるが“MAXIなどが発見”と報告はできそうだ。

## 5. 今後の展望

今後と言っても、この原稿が世に出る頃までには、2016年の観測による重力波の検出が2-3件はあって良いはずだ。MAXIが何かしらを検出して（ひそかに）大喜びしているかもしれないし、想定外の事態に遭って呪いの言葉を吐きながらプログラムを書き直しているかもしれない。だが、一番ありえそうなのは、相変わらず電磁波を伴わないブラックホールの合体ばかりが検出され、延々と上限値の報告を続けるという未来である。こんな予想は、是非はずれてほしい。

## 謝辞

執筆にご協力いただいた皆様をはじめ、日々MAXIの運用と解析を支えてくださっている、運用室の皆様、当番の学生さんたちにも感謝を述べたい。

## 参考文献

- 1) 三原建弘, 2010, 天文月報103, 387
- 2) Kimura S. S., et al., arXiv: 1607.01964
- 3) Abbott B. P., et al., 2016, ApJ 826, L13
- 4) Negoro H., et al., 2016, PASJ 68, S1
- 5) 鈴木素子, 根来均, 2010, 天文月報103, 465
- 6) Serino M., et al., 2015, GCN Circular 18557
- 7) Negoro H., et al., 2015, GCN Circular 18784
- 8) Serino M., et al., 2016, GCN Circular 19013
- 9) Nakar E., 2007, Phys. Rep. 442, 166

### Searching for X-Ray Counterparts of the Gravitational-Wave Sources with MAXI

Motoko SERINO

MAXI Team, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: MAXI observes the X-ray sky from the International Space Station. The locations of two gravitational-wave events had large error regions of several-hundreds square degrees. MAXI has an advantage in searching for X-ray counterparts of gravitational-wave sources, because MAXI can monitor the whole sky. We experienced treasure hunt in the large error regions for the first time.