

重力波源のX線観測による ブラックホール時空の研究

米徳 大輔 澤野 達哉 八木谷 聡 笠原 禎也 井町 智彦
Yonetoku Daisuke Sawano Tatsuya Yagitani Satoshi Kasahara Yoshiya Imachi Tomohiko

1. はじめに

2015年9月14日、米国の重力波観測施設LIGO(ライゴ)が、太陽の約30倍もの質量を持つ2つのブラックホールが衝突・合体した際に生じた重力波GW150914を検出した¹⁾。アインシュタインが重力波の存在を予言してから100年目の偉業であり、2017年にノーベル物理学賞が授与された。

更に、2017年8月17日には中性子星連星の合体からも重力波GW170817が検出され²⁾、 γ 線から電波にわたるあらゆる波長帯で電磁波対応天体が観測された。重力波の検出から約1.7秒後に、NASAのフェルミ衛星や欧州のインテグラル衛星が2秒ほど継続する突発的な γ 線バーストを検出した^{3,4)}。 γ 線の観測では詳細な発生方向を決定できなかったが、重力波観測から得られた到来方向の誤差領域を多数の地上望遠鏡がくまなく観測し、約半日後には可視光・近赤外線対応天体(マクロノヴァ又はキロノヴァ)が検出されている⁵⁾。これは、中性子星の衝突によって撒き散らされた中性子過剰物質の中で、r-process元素合成により金・プラチナ・ランタノイド等の超重元素の放射性同位体が生成され、そこからの放射線をエネルギー源として輝いていると解釈されている⁶⁾。

人類は重力波という宇宙を観測する新たな手段を手に入れたことから、今後は重力波と電磁波の協奏による「重力波天文学」が大きく進展するはずである。更に、重力波だけでなく、ニュートリノや宇宙線、暗黒物質のような電磁波ではない粒子からの情報を含めた「マルチメッセンジャー天文学」が重要な役割を担うことになるだろう。

重力波天文学には様々な意義があるが、例えば、

(1) ブラックホール時空の誕生を理解すること

中性子星連星が合体してブラックホールという極限時空環境を形成する瞬間の物理現象を探求する。

(2) 超重元素の起源を理解すること

宇宙の超重元素組成比は、中性子星連星を起源とするマクロノヴァで説明できるのかを探求する。

(3) ブラックホールの進化を理解すること

宇宙に存在する大小様々なブラックホールの進化の過程を解明し、宇宙の多様性を理解する。等が代表的なものとして挙げられる。

重力波天文学における最大の問題は、重力波観測の到来方向の決定精度が悪い点である。最初の検出であるGW150914では約600平方度、GW170817では欧州の重力波観測施設Virgoの情報を加えても31平方度程度である。狭い視野の光学望遠鏡でこのように大きな誤差領域を観測しつくすのは大変で、対応天体を発見するだけでも時間を要してしまう。一方で、X線・ γ 線観測は1ステラジアン以上の視野を持つ広視野観測が可能である。したがって、視野内に重力波源を捉える確率が高く、重力波と同期した突発天体を同定することが可能となる。そのため、重力波天文学の発展において、X線・ γ 線観測は大きく期待されているのである。

2. 金沢大学超小型衛星

金沢大学では人工衛星を用いた宇宙観測を行っている理学・工学のグループが共同で、超小型衛星プロジェクトを推進している⁷⁾。超小型衛星は比較的短期間での開発が可能であることから、タイムリーにミッションを遂行できる利点がある。筆者らは、重力波と同期して発生するX線突発天体を検出し、いち早く発生時刻・発生方向等の情報を世界中の観

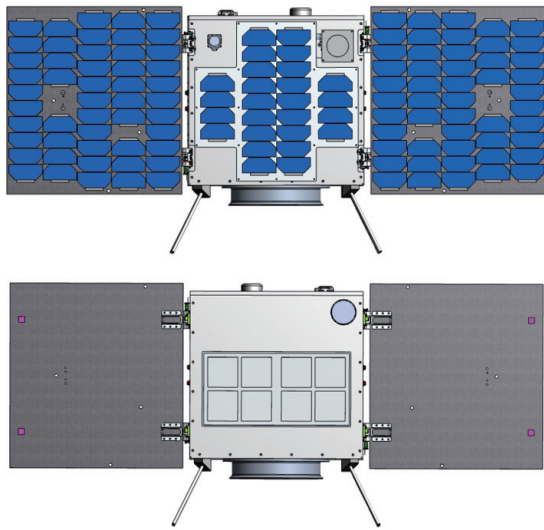


図1 金沢大学超小型衛星の外観図(上段:太陽面,下段:反太陽面)

測施設へ展開することをミッションとする超小型衛星 Kanazawa-SAT³ (カナザワ・キューブサット) を開発している。SAT³ は Science and Technology, Study and Training, そして Satellite の3つの意味を込めて名付けている。

図1に衛星の外観を示す。一辺50cm, 重量50kg級の衛星で, 太陽電池パドルを閉じた状態で打ち上げ, 宇宙空間で展開する。太陽電池面は常に太陽を指向した状態で, 反対側に搭載した観測装置は真夜中方向を観測する。これは, 真夜中方向で突発天体を発見した方が, 地上の望遠鏡による追観測を行いやすく, 衛星の運用も極力単純なものとなるためである。LIGO/Virgoが同時観測を行う2019年頃に打ち上げることを目標としている。

3. 広視野X線撮像検出器

Kanazawa-SAT³には, 広視野X線撮像検出器(Transient Localization EXperiment: T-LEX)を搭載する。図2(左)のように, ランダムに符号化されたスリットを持つマスクの直下に, 撮像検出器を配置することで, 天体からのX線の陰を観測するものである。検出器上のX線強度パターンと, マスクのパターンの相互相関関数を計算することにより, 影絵合わせを定量化し, X線の到来方向を求めることが可能となる。

超小型衛星という限られたリソース環境におい

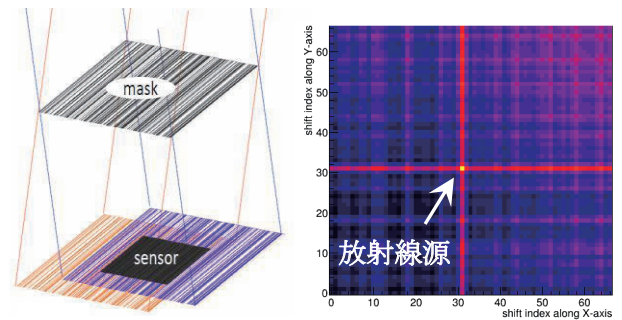


図2 (左)符号化マスク方式の概念図。(右)1次元符号化マスク検出器で取得するX線撮像の例

て, 検出器の読み出し回路の規模を小さく, かつ有効面積をできるだけ大きく確保するために, 筆者らは1次元符号化マスク検出器を用いることにした。T-LEXは1次元撮像検出器を直交して配置し, 1次元像の交点としてX線の到来方向を決定することが可能である。図2(右)に実験で取得したX線像の例を示す。

図3に検出器の回路基板の写真を示す。検出器基板には, 約25cm²の有感領域を持つ1次元のシリコンストリップ検出器が搭載されており, 256本の信号電極を持っている。センサーの微弱な電荷信号を, 64系統の独立な信号処理を行える高利得アナログ集積回路(ASIC)を4つ使用して読み出す。1次元に2つのセンサーを配置し, 合計100cm²の検出器となる。ここで使用しているASICは, 宇宙科学研究所の池田博一教授・カブリIPMUの高橋忠幸教授が開発したγ線計測用のASICを, 軟X線観測用に高利得・低ノイズ化したものである^{8,9)}。

デジタル回路基板は150mm×150mmの大きさで, 同じ基板を直交配置して使用する(図3下段)。各基板にASICを制御するためのFPGAを搭載し, 同時に信号をヒストグラム化することでデータ量を削減している。とりわけ, 撮像イメージの相互相関関数を計算する「イメージプロセッサ機能」により, CPUと比較して圧倒的に高速な撮像データ解析が可能なシステムとなっている。これにより, 重力波と同期した短時間のγ線バースト現象に対しても, いち早くオンボードで方向を決定することが可能となる。

T-LEXは小型の検出器とはいえ, 数キロ電子ボルト帯の軟X線広視野観測装置としては, 史上最高レベルの感度に匹敵するものである。もちろん, 一

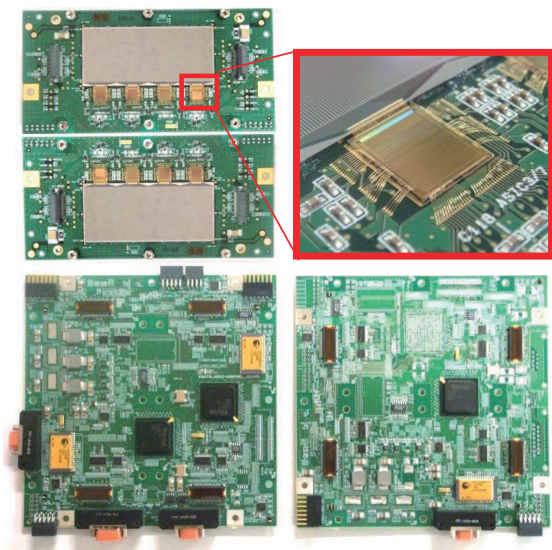


図3 (左上) T-LEXの検出器基板の写真, (右上) 信号読み出し集積回路部の拡大写真, (下段) T-LEXのデジタル回路基板の写真

一般的な γ 線バーストの検出感度は大型衛星に劣るが、重力波と同期した短時間 γ 線バーストに付随する軟X線超過成分や、観測例の少ないX線フラッシュ等の現象に対しては効果的な観測ができるはずである。このように超小型衛星では、科学目的を明確に絞り、タイムリーに観測を行うことで、世界の大規模プロジェクトにも負けない科学成果を創出できると考えている。

4. アラート伝達用パケット通信装置

機上で検出した γ 線バーストの発生方向や発生時刻の情報を、できる限り早く地上観測者へ伝達することで、大型望遠鏡による追観測を迅速に行えるようになる。NASAのスウィフト衛星は、リレー中継衛星を利用することで大量のデータをリアルタイムに送信しているが、その運用コストは膨大であり、筆者らのような超小型衛星には不向きである。そこで、Kanazawa-SAT³では、イリジウム衛星が提供するリアルタイムパケット通信装置（ショートバーストデータ：SBD）の利用を考えている。

イリジウムSBDは、図4に示すような30mm角程度の小型のパケット通信装置で、マイコン又はFPGAでコントロールし、送信340byte・受信300byteのパケット通信を行うことができる。イリジウム衛星は約70機の人工衛星で全地表面を網羅



図4 イリジウムSBDを用いたパケット通信装置と専用アンテナ。白いものが30mm角程度のSBDデバイスで、コントロール基板に実装されている

しており、世界中のどこからでも少ない遅延で通信が行えるサービスである。2016年12月に国際宇宙ステーションから放出されたEGGプロジェクトで利用された実績があり、本ミッションでは本格的な理学応用として利用することになる。

限られたデータ量とは言え、発生時刻・発生方向・衛星の状態データ・科学観測データの一部を送信することが可能で、かつ、1パケット100円程度の通信料で実現できることは、小規模なプロジェクトにとっては大変魅力的である。T-LEXとパケット通信装置を組み合わせたKanazawa-SAT³の研究の全体像を図5に示す。

5. 放射線耐性

宇宙空間は過酷な放射線環境であることは周知の事実である。例えば、高度600km程度の近地球軌道を周回する衛星ならば、約10krad/年程度の放射線を受けることになる。衛星が南大西洋異常帯を通過する際には、静穏時よりも4~5桁も高い陽子線を浴びることになり、巨大な太陽フレアを受けた場合は、衛星や観測装置の機能が停止した例も報告されている。

T-LEXのASICや周辺回路には、多数の民生用部品を利用している。また、イリジウムSBD端末本体も地上用として販売されているため、放射線耐性



図5 Kanazawa-SAT3 プロジェクトで展開する研究の全体像を示した図

試験が必要となる。筆者らは、若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロン加速器や、東京工業大学のコバルト照射室を利用させていただき、様々な回路部品に対する放射線耐性試験を行ってきた。

放射線試験では、同一ロットで製造された回路部品を多めに購入し、その中からランダムに選出した複数の回路部品に対する放射線耐性を評価することで、利用可能であるかを判断している。ミッション期間として3年を目標としているため、トータルドーズとして30 kradに耐えられることを利用可能の判定条件としている。また、ASICやマイコン等に対しては、陽子・ α 線・炭素イオンの各粒子線に対するシングルイベント効果を評価し、3年間は運用できることを判断基準としている。

図6に民生用A/D変換器に対するプロトン照射試験の例を示す。同一ロットで製造された部品から3つを選出して試験したところ、150 kradまでは無視できる程度の性能変化しか見られないが、それを過ぎると3つの素子すべてで機能の損失が見受けられた。これは、製品として特性が良く揃っており、他の素子も同様の振る舞いであることが期待できる。また、イリジウムSBD端末に対しても、ガンマ線照射を実施し、30 kradまでは機能の損失無く利用できることを確認している。

6. 最後に

重力波を始めとしたマルチメッセンジャー天文学は、これからの天文学を牽引するテーマの1つであ

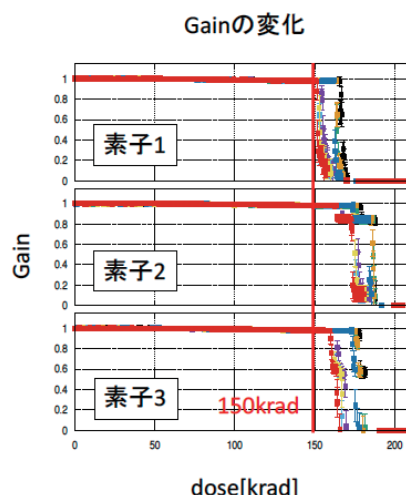


図6 民生用A/D変換器の放射線耐性試験の例。同一の部品3つに対して類似の振る舞いが測定された

ることは間違いない。これまでには得られなかった情報を元に、より深く宇宙を理解できるようになるため、地上・スペースの様々なプロジェクトで、発展させていくべき学問分野と言える。現在、Kanazawa-SAT³の衛星本体は熱構造モデルに対する振動・衝撃・熱真空の評価が完了し、フライトモデルの製造を始める段階である。是非とも、超小型衛星を用いて、マルチメッセンジャー天文学に大きく貢献できるようなプロジェクトを実現していきたいと考えている。

謝辞

本研究は以下の研究費・委託費によりサポートされている。科学研究費補助金基盤(S)(16H06342, 代表:米徳大輔), 文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費(代表:米徳大輔)

参考文献

- 1) B. P. Abbott, *et al.*, *PRL*, **116**, 061102 (2016)
- 2) B. P. Abbott, *et al.*, *PRL*, **119**, 161101 (2017)
- 3) B. P. Abbott, *et al.*, *ApJL*, **848**, L13 (2017)
- 4) V. Savchenko, *et al.*, *ApJL*, **848**, 2, L15 (2017)
- 5) I. Arcavi, *et al.*, *Nature*, **551**, 64 (2017)
- 6) N. R. Tanvir, *et al.*, *ApJL*, **848**, 2, L27 (2017)
- 7) D. Yonetoku, *et al.*, *UNISEC Takumi Journal*, **5**, 2, 19 (2014)
- 8) D. Yonetoku, *et al.*, *SPIE*, **9144**, 91442S (2014)
- 9) K. Yoshida, *et al.*, *SPIE*, **9905**, 99050M (2016)

(金沢大学 理工研究域 数物科学系)