

特集**ガンマ線バースト探査衛星計画 HiZ-GUNDAM**

津村耕司（東京都市大学）

1. はじめに

私たちは、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト（Gamma-Ray Burst, GRB）を探査するための天文衛星 HiZ-GUNDAM (High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission) の開発を進めています。本稿では、観測対象である GRB を紹介したのち、HiZ-GUNDAM 衛星の構成や GRB 探査を通して目指すサイエンスについて紹介します。

2. ガンマ線バースト (GRB)**2.1 GRB とは**

GRB とは宇宙最大の爆発現象です。ガンマ線で数秒から 100 秒程度明るく輝く「即時放射」の後、X 線から赤外線の数日明るくなる「残光」を伴います。この GRB の 1 天体による明るさは、恒星を 1000 億個も含んだ銀河全体よりも明るくなります。

GRB には 2 種類あることが知られています。即時放射が 2 秒以上の「長時間 GRB」と、2 秒以下の「短時間 GRB」です。前者は大質量星の重力崩壊に伴う爆発で、後者は中性子星連星の合体に伴う爆発だと考えられています。

2.2 GRB の発見

GRB は 1960 年代の米ソ冷戦の中で偶然に発見されました。地球上で核実験を行うとガンマ線をはじめとする放射線が放出されますが、それを宇宙から監視する事が目的の人工衛星ヴェラが米国によって複数機打ち上げられました。そのヴェラが、1967 年に地球外からのガンマ線を検出したことが最初の GRB の発見でした。地球の表側にいた衛星と裏側にいた衛星がほぼ同時にガンマ線を検出したことから、地球表面からのガンマ線ではない

ことがわかります。同様に、昼側にいた衛星と地球の影となっている夜側にいた衛星がほぼ同時にガンマ線を検出したことから、太陽からのガンマ線ではないこともわかります。この GRB の発見は、発見後 5 年間は軍事機密扱いで、1973 年になって初めて公開されました[1]。

2.3 GRB の位置・距離の推定**(1) GRB の位置決定の困難さ**

新たに発見されたこの GRB という天文現象の正体を探るためには、まず GRB という爆発現象の規模を推定する必要があります。観測されるのはガンマ線の「見かけの明るさ」なので、そこから爆発の規模を推定するためには、GRB までの距離情報が必要です。しかし、GRB までの距離どころか、ガンマ線の到来方向、すなわち GRB の天球面上での位置さえも決定することが困難でした。ここでは GRB の天球面上での位置や距離の推定について、特に重要な幾つかの成果について紹介します。

(2) 惑星間空間時間差法

ガンマ線は宇宙空間を光速で伝播するので、地球を周回する複数の人工衛星で GRB を検出すると、その検出時刻がわずかに (0.1 秒以下) ずれます。そこで、GRB を検出した複数の人工衛星の位置と、検出した GRB の時間差から、おおまかなガンマ線の到来方向、すなわち GRB の天球面上での位置が求まります (図 1)。ただし、複数の人工衛星での検出時間差を求めるためには、それらの衛星に搭載された時計が精度良く同期されている必要がありますが、GPS もない 1960-70 年代当時

ではそれが非常に困難でした。また、各衛星のデータを地上に下ろしてから解析となるため、GRB の位置が決定されるのは、GRB 発生からだいぶ時間が経ってから（およそ 1 ヶ月後など）となっていました。

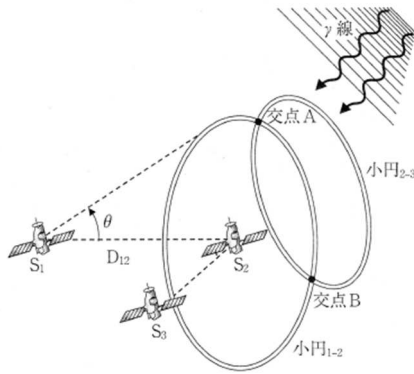


図 1 惑星間空間時間差法による GRB 位置決定法[2]。2 機の衛星の検出時間差から、GRB の方向は天球面上のある円上に制限される。同様の解析を他の衛星ペアで実施することで、円の交点として GRB の位置を決定できる。

(3) コンプトン衛星

GRB の位置が決定できないこともあり、しばらくは GRB の研究に目立った進展がないまま時間が過ぎていた中、NASA が 1991 年にコンプトン衛星を打ち上げました。コンプトン衛星は、総重量が 17 トンもある世界最重量の科学衛星で、8 台もの巨大なガンマ線検出機を衛星上で色々な向きに配置することで、どの検出器でどれほどの強度でガンマ線を検出できたかという情報から、ガンマ線の到来方向を 1 度程度の精度で決定しました。コンプトン衛星は毎日 2-3 個の GRB を検出し、合計で 2704 個の GRB を検出しました。その GRB の天球面上の分布を表したのが図 2 です。全天にほぼ一様に GRB が分布している[3]ことから、GRB は銀河系内の円盤内に存在する天体ではなく、銀河系を取り巻くハローに存在するか、あるいはもっと遠方の宇宙に存在するか、ということになります。

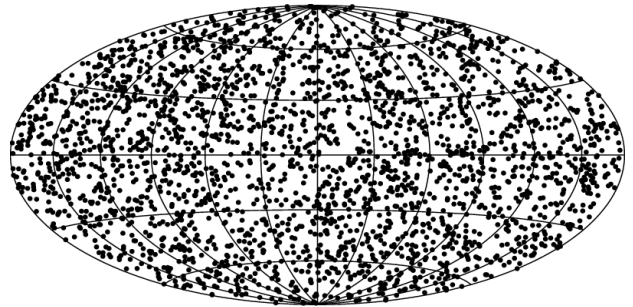


図 2 コンプトン衛星が検出した 2704 個の GRB の天球面上分布[4]。天球面上に一様に分布している。

(4) ベッポサックス衛星と GRB970228

GRB までの距離推定に決定的な役割を果たしたのが、イタリアとオランダが開発したベッポサックス衛星と、1997 年 2 月 28 日に発生した GRB970228 でした。ベッポサックス衛星は GRB からの（ガンマ線ではなく）X 線を観測することで、この GRB の位置を 0.1 度以下の精度で決定しました。さらに地上からの指令で衛星を即座に GRB 発生方向に向けてより詳細に観測することで、GRB 発生から数時間以内に 3 分角以下の精度で位置を決定しました[5]。GRB 発生からこんなに短時間にこれだけの精度で GRB の位置が決定できたら、地上の望遠鏡で追観測が可能です。カナリア諸島のラ・パルマにあるウィリアム・ハーシェル望遠鏡（口径 4.1m）等で GRB 発生から数時間後に観測した結果、GRB の発生位置に可視光で明るくなった天体が発見されました（図 3）[6]。これが GRB 残光の初発見でした。後にこの銀河は赤方偏移が 0.695、すなわち約 81 億光年彼方の銀河であるとわかりました[7]。この観測の意義は、GRB の発生源は遠方の銀河であること、そしてその銀河は GRB 発生直後なら明るい残光によって可視光の地上望遠鏡でも追観測可能であると分かったことです。

GRB までの距離がはっきりしたので、GRB の爆発の規模が推定できるようになりました。

数 10 億光年という遠方で発生しながらも明るく観測されるということから、GRB は宇宙最大規模の爆発現象であると認識されたのです。

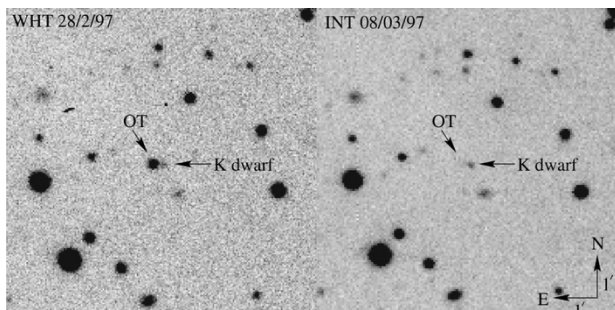


図3 初めて検出されたGRB970228の残光[6]。左がGRB発生直後の2/28の画像で、右が3/8の画像。残光はOTと表記されている。

2.4 現在のGRB観測の状況

ガンマ線バーストを監視する衛星として現在は、2004年に打ち上げられたニール・ゲーレルス・スウィフト衛星が活躍しています。スウィフト衛星はGRBを検出したら90秒程度でその方向に衛星を向け、詳細観測してGRBの位置を決定し、地上にその情報を送るまでを、GRBの検出から1時間程度で、全て自動で行います。また地上側でも、スウィフト衛星からのアラートを受けたら即座にそちらの方向に向けて観測を開始するロボット望遠鏡が運用されており、成果をあげています。

3. HiZ-GUNDAM衛星計画について

3.1 HiZ-GUNDAM衛星の科学目標

(1) 初期宇宙探査

HiZ-GUNDAM衛星は2つの科学目標を掲げています。そのうちのひとつが「初期宇宙探査」です。天文観測は1種のタイムマシンであり、遠方を観測すれば昔の宇宙の姿が見えます。すなわち、誕生直後の宇宙の様子を知りたければ、遠くの宇宙を観測すれば良いのです。最近ではJWSTによって赤方偏移16.4(136億光年かなた)の銀河も発見されてい

ます[8]。ただし、JWSTがいくら高感度だからといっても、これほど遠方であっても観測される銀河は、その時代においては例外的に重く明るい銀河に限定されてしまいます。これを「観測バイアス」と言います。具体例を挙げると、例えば日本にいる人々を観測する際、「体重150kg以上」の人しか観測できないという観測バイアスがあると、観測される人間の多くは相撲取りとなってしまう、そのような観測バイアスのもとに研究を進めると、「日本人の多くは髷を結っている」という誤った結論を導くことになってしまいます。したがって日本に住む人の性質を正しく理解するためには、大人から子供まで体重によらず無バイアスに観測することが重要なのです。

長時間GRBは大質量星の最期の爆発です。大質量星は重く明るい銀河だけでなく、暗く小さな矮小銀河にも含まれています。このような暗く小さな銀河が遠方であってもJWSTでの単体での検出は困難ですが、その銀河でGRBが発生すると、それを検出することが可能です。すなわち、GRBを通して遠方の初期宇宙を銀河の質量によらず無バイアスに探査することができるのです。

(2) 極限時空探査

HiZ-GUNDAM衛星のもう1つの科学目標である「極限時空探査」は、中性子星連星が衝突合体することによって生じる短時間GRBに関するものです。実はこのような現象が2017年8月17日に実際に観測されました。2つの中性子星が合体すると重力波が放出され、ブラックホールが生成されます。この時に放出された重力波が、アメリカのAdvanced-LIGOと欧州のVirgoという重力波観測装置で検出されたのとほぼ同時に、フェルミ衛星が同じ場所から短時間GRBを検出しました[9]。これにより、短時間GRBは中性子星連星の合体で生じることが確定しま

した。そして地上の望遠鏡が一斉にその方向を追観測したところ、可視光から赤外線にかけて明るく輝く「キロノヴァ」という現象が観測され、金や白金などの重元素が生成され宇宙空間に撒き散らされていることが確認されました[9]。この観測から、重力波の検出がきっかけとなり、ガンマ線からX線、可視光、赤外線、電波に至る電磁波の全波長で協調して観測を行う「マルチメッセンジャー天文学」の幕が開けたと言われています。

このように、短時間 GRB を観測することで、中性子星が衝突合体してブラックホールができる瞬間という極限時空の環境下でどのようなことが起こっているのかを調べることができるのです。

3.2 HiZ-GUNDAM 衛星の観測戦略

現在の GRB 観測では、スウィフト衛星などが検出した GRB の位置を即座に地上にアラートし、それを受けた地上望遠鏡が追観測を行う、という戦略で観測が進められています。しかしこの観測戦略には一つ大きな問題があります。追観測の成功率の低さです。例えば地上のある望遠鏡での追観測の成功率を概算してみます。(1) 発生した GRB の位置が地球の夜側である確率が 1/3、(2) その望遠鏡からみてその GRB が観測可能な高さにある確率が 1/3、(3) その望遠鏡のある場所がその時に観測可能な天候状態にある確率が 4/5、とすると、追観測可能な確率はこれらの掛け合わせで約 8.9%となりますが、現実の成功率はこの半分程度となっています[10]。

また、GRB を検出した時点ではその GRB までの距離は不明で、その GRB の残光を地上の望遠鏡で追観測して赤方偏移を測定して初めて距離が求まります。この最初の追観測は小型や中型の望遠鏡が行い、それで「この GRB は遠方の初期宇宙で発生した貴重な GRB だ」と分かって初めて、すばる望遠鏡な

どの大型望遠鏡が観測をすることになります[11]。しかしその頃には GRB 発生からだいぶ時間が経ってしまっているため、GRB 残光はだいぶ暗くなってしまっています。すなわち、発見した GRB について全てが追観測できているわけではないため、初期宇宙で発生した貴重な GRB の多くが見逃されている可能性があることに加え、追観測の結果、初期宇宙で発生した貴重な GRB だとわかっても、すばる望遠鏡などの大型望遠鏡が追観測に乗り出す頃には、GRB 発生から時間が経過してしまっているため暗くなってしまっている、というのが現状の問題点です。

これを解決しようとするのがHiZ-GUNDAM衛星です。HiZ-GUNDAM衛星は、GRBを探査する「広視野X線モニター」に加えて、発見したGRBを追観測して赤方偏移を決定する「可視光・近赤外線望遠鏡」も搭載されているというのが、今までの衛星にはない新しい特徴です[12]。広視野X線モニターでGRBを発見すると、衛星は自律的に姿勢を変更し、可視光・近赤外線望遠鏡で赤方偏移を測定します。これにより、発見したGRBに対してほぼ100%の追観測が実現できます。そして、GRB検出から1時間以内に、赤方偏移(GRBまでの距離)付きで地上にアラートを発出します。これにより、そのGRBが初期宇宙で発生した貴重なGRBかどうかアラート時点でわかるので、初期宇宙で発生した貴重なGRBに対して、アラート受信直後にすばる望遠鏡などの大型望遠鏡で追観測を行うことが可能となります。これにより、今まで見逃されていた貴重なGRBの多くを取りこぼさずに観測できるようになると期待されます。

3.3 HiZ-GUNDAM 衛星の構成と開発状況

(1) 衛星システムと軌道

HiZ-GUNDAM衛星は、JAXA宇宙科学研究所の公募型小型衛星5号機の候補として、

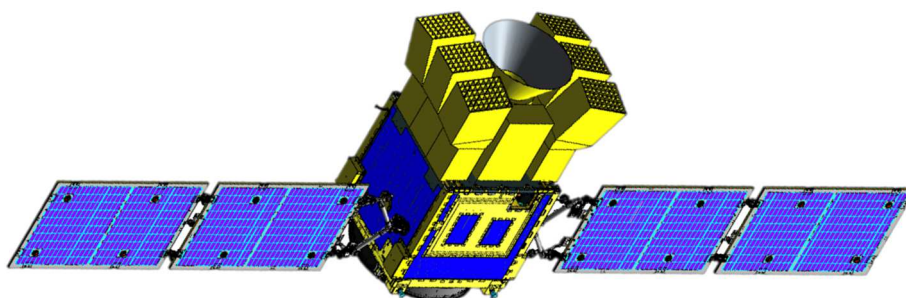


図4 HiZ-GUNDAM 衛星のイメージ図

2030年頃の打上げを目指して開発中です(図4)。衛星の質量はおよそ440kgで、イプシロンロケットでの打上げを想定しています。軌道は昼夜境界線上の太陽同期極軌道(ドーナダスク軌道)です。この軌道にすることで、常に夜側のGRBを探査できることと、望遠鏡の冷却にとって有利であるという利点があります。衛星の設計寿命は3年です。

(2) 広視野 X 線モニター

広視野 X 線モニターは、ロブスターアイ光学系というものを用います(図5)。これは、小さな筒状の構造が並んだもので、その内壁で X 線を反射させることで、X 線を集光する光学系です。HiZ-GUNDAM では、このロブスターアイ光学系を 16 台搭載し、それぞれが別方向を監視するように配置することで、広視野の GRB 探査を行います。

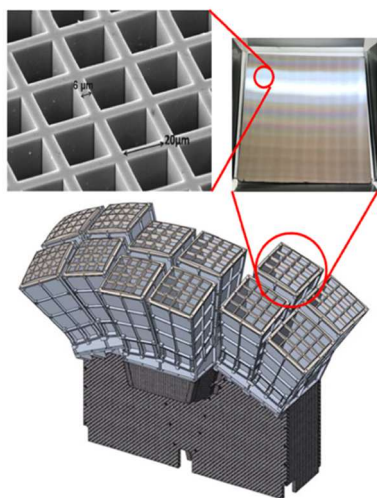


図5 広視野 X 線モニター

(3) 可視光・近赤外線望遠鏡

可視光・近赤外線望遠鏡は、発見した GRB の赤方偏移(距離)を測定するために、可視光から近赤外線の 5 バンドで同時測光観測を行います[10]。そのため、まずはダイクロイックミラーで可視光と近赤外線に分割し、近赤外線についてはさらにダブルケスタープリズム[13]にて 4 バンドに分割することで、可視光検出器と近赤外線検出器の 2 つの検出器で 5 バンドの同時測光観測を実現させます。

また、近赤外線で高い感度を達成するために、望遠鏡は 200K 以下、近赤外線検出器は 120K 以下に冷却する必要があります。このような冷却望遠鏡を他の装置と一緒に共存させることは熱構造設計的に装置開発の一つの大きな課題となっています。

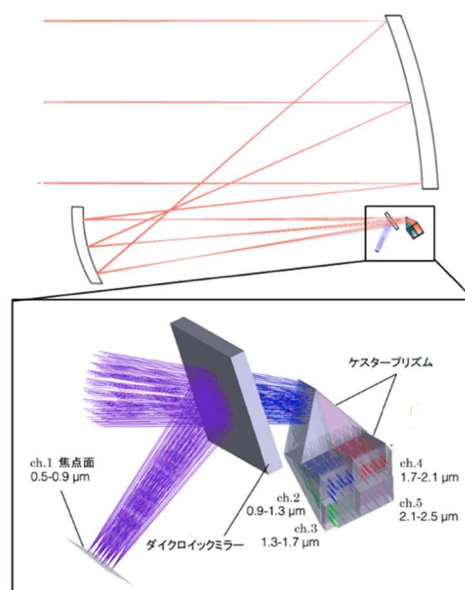


図6 可視光・近赤外線望遠鏡

(4) 開発状況

HiZ-GUNDAM 計画は 2012 年に JAXA 宇宙科学研究所内にワーキンググループを設立して以降、検討を進めてきています。2018 年 1 月に JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画としてミッションコンセプト案を提案し、採択されました。その後、国際審査などを経て、2021 年末に JAXA 宇宙科学研究所内のプリプロジェクト候補となり、衛星メーカーを交えての概念検討を開始しました。現在は、公募型小型衛星計画 5 号機として選定されることを目指して審査を受けている段階です。これに選定されれば、2030 年頃の打ち上げに向けて開発が進められることとなります。

4. まとめ

GRB は宇宙最大の爆発現象であり、その発生メカニズムを観測的に探ることは、ブラックホール誕生の瞬間といった極限時空における物理を理解するためのツールとなります。また、GRB の際立った明るさから、遠方（初期宇宙）で発生した GRB でも観測できる可能性があり、GRB は初期宇宙を照らすキャンダルにもなります。このような GRB の特性を活かして、GRB 観測を通した「初期宇宙探査」と「極限時空探査」を目標とする衛星計画が HiZ-GUNDAM です。広視野 X 線モニターで発見した GRB に対して、衛星姿勢を自律的に変更し、可視光・近赤外線望遠鏡で追観測することで、発見したほぼ全ての GRB に対して赤方偏移（距離）情報を付加して 1 時間以内に地上にアラートを発出します。これにより、「初期宇宙で発生した貴重な GRB」に対して、地上もしくはスペースの大型望遠鏡での詳細観測を、GRB 発生直後の残光がまだ明るいうちから観測を開始することができるようになり、GRB を通した初期宇宙と極限時空の研究を大きく発展させることを目指しています。私たちは 2030 年ごろの打ち上げ

を目指して HiZ-GUNDAM 衛星の開発を進めています。

本稿は 2023 年 6 月 21 日に実施された日本天文教育普及研究会関東支部茶話会での講演に基づくものです。

文 献

- [1] Klebesadel, Strong & Olson (1973), *ApJ*, **182**: L85
- [2] 村上敏夫 (2014) 『宇宙最大の爆発天体ガンマ線バースト』, 講談社ブルーバックス
- [3] Meegan et al. (1992), *Nature*, **355**: 143
- [4] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/>
- [5] Costa et al. (1997), *Nature*, **387**: 783
- [6] van Paradijs et al. (1997), *Nature*, **386**: 686
- [7] Bloom, Djorgovski & Kulkarni (2001), *ApJ*, **554**: 678
- [8] Donnan et al. (2023), *MNRAS*, **518**: 6011
- [9] Abbott et al. (2017), *ApJL*, **848**: L12
- [10] Tsumura et al. (2020), *Proc.SPIE*, **11443**: 114430R
- [11] 河合誠之, 青木賢太郎 & 戸谷友則 (2007), *天文月報*, **100**: 17
- [12] Yonetoku et al. (2020), *Proc.SPIE*, **11444**: 114442Z
- [13] Greiner & Laux (2022), *CEAS Space Journal*, **14**: 253



津村 耕司