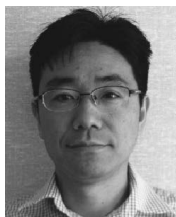


時間領域天文学の革命児： Swiftの10年



坂本



田代



佐藤

坂本 貴紀

〈青山学院大学理工学部物理・数理学科 〒252-5258 相模原市中央区淵野辺5-10-1〉
e-mail: tsakamoto@phys.aoyama.ac.jp

田代 信

〈埼玉大学理工学研究科物質科学部門 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255〉
e-mail: tashiro@phy.saitama-u.ac.jp

佐藤 悟朗

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉
e-mail: gsato@astro.isas.jaxa.jp

NASAのガンマ線バースト探査衛星Swiftが打ち上げから10年を迎えました。Swift衛星はガンマ線バーストの研究においてだけでなく、突発天体研究全般において、その優れた観測機器、衛星のもつ機動力で革新的な発見を次々としています。また、あまり知られていないかもしれませんが、Swift衛星の開発の裏には日本人大学院生の活躍がありました。さまざまなエピソードを交えながら、Swiftが起こした時間領域天文学の革命の歴史を振り返りたいと思います。

1. はじめに

NASAのガンマ線バースト探査衛星Swift（スウィフト）が、2004年11月20日の打ち上げから10年という節目を迎えました。アメリカ、フロリダ州のケープカナベラルから打ち上げられたのが10年前とは思えないほど、多くの新鮮な驚きと発見をSwiftはわれわれ研究者に提供し続けています。Swiftの10周年を記念して、2014年12月2日から5日までイタリア、ローマで国際会議が開かれました。その会議の冒頭で講演を行ったSwiftのリーダー Neil Gehrels博士が述べたSwift 10年の発見を列挙すると、

- 2005年 ショートガンマ線バーストの中性子星連星起源の示唆
- 2005年 予想外のガンマ線バースト残光の振る舞い
- 2008年 超新星のショックブレイクアウト現象の発見
- 2008年 肉眼で観測可能なガンマ線バーストの発見
- 2009年 赤方偏移8を超えるガンマ線バーストの発見
- 2010年 硬X線サーベイによる無バイアスなAGNのサンプルの母銀河に合体銀河を多く発見

- 2011年 潮汐破壊に伴う突発天体現象の発見
- 2012年 赤方偏移5を超える銀河の星生成率と金属含有量の進化
- 2012年 年齢が2,500年という非常に若い超新星残骸の発見
- 2012年 非常に継続時間の長いガンマ線バースト (ultra-long GRB) の発見
- 2013年 SwiftとFermi衛星による近傍の明るいガンマ線バーストGRB 130427の観測
- 2013年 マグネター1E 2259+586からのanti-glitchの発見
- 2013年 ショートガンマ線バーストからのkilonova/macronova放射の証拠

となり、打ち上げ当初だけでなく打ち上げから10年経った今でもブレイクスルーとなる観測結果を残していることがわかります。

Swift衛星について簡単におさらいしておきたいと思います。Swift¹⁾はガンマ線バースト観測専用衛星です。ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) の残光の探査が主目的として設計されています。多くのGRBから残光を検出するためには、多くのバーストを検出する必要がありますが、それを可能にしているのが、Burst Alert Telescope (BAT)²⁾です。BATは硬X線領域 (15–150 keV) でGRBを探査しており、全天の約6分の1の空を常に監視しています。また、BATで検出したGRBを追観測するための望遠鏡が2台搭載されています。一つはX線望遠鏡 (X-Ray Telescope; XRT)³⁾で0.3–10 keVというエネルギー帯域でX線残光の検出やその光度曲線などのデータを取得します。もう1台は紫外/可視光望遠鏡 (UV-Optical Telescope; UVOT)⁴⁾で、170–600 nmという波長帯を観測できる、口径30 cmの望遠鏡です。七つのフィルター、そしてグリズムを搭載しています。これら三つの観測装置が連動してGRBの検出、残光同定、そして残光の追

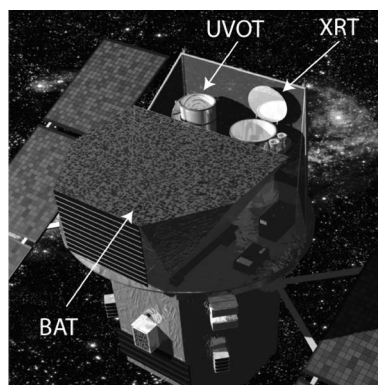


図1 Swift衛星の概要図。中央で一番大きな検出器がGRBを検出し、その到来方向を決定する機能をもつBAT、図の上部分に位置するのが、狭視野X線望遠鏡のXRTと紫外/可視光望遠鏡のUVOT。

観測をすべて自動で行う事のできる完全自律型の科学衛星です (図1参照)。

Swift衛星はアメリカ、イギリス、イタリアの3カ国で主に開発された衛星ですが、本記事では、あまり知られていない(?) Swift衛星と日本との関係を交えながら、Swiftがこの10年間でもたらした時間領域天文学 (time-domain astronomy) の革命を振り返りたいと思います。

2. スウィフトと日本のかかわり

スウィフトチームのエンブレムをご覧ください (図2)。急降下するあまつばめ (Swift) の姿を「W」に見立てたSwiftの文字を真ん中に下に衛星の姿、上にイタリア・アメリカ・イギリスの国旗を並べた形をしています。前章でも挙げた、この3カ国が、Swift計画を提案し、搭載する三つの検出器を開発・供給する機関がある国々です。BATは、アメリカのNASAゴダード宇宙飛行センター (GSFC) とロシアアラモス国立研究所、XRTは、アメリカのパennシルベニア州立大学と、イタリア・ブレラ天文台、イギリス・レスター大学が、そしてUVOTは、ペンシルベニア州立大とイギリス・ムラード宇宙科学研究所が担当しまし



図2 Swiftチーム公式ステッカー © NASA E/PO, Sonoma State University, Aurore Simonnet.

た。日本は、フランス、ドイツ、デンマークとともに、後から加わった協力国という位置づけです。

日本からは、2000年に、JAXA宇宙科学研究所の高橋忠幸研究室と埼玉大学の田代信研究室が、BAT開発に参加しました。その後、BAT開発に東京大学の牧島一夫研究室が、地上からの追観測チームに東京工業大の河合誠之研究室が加わっています。

Swiftと日本のかかわりは、高橋忠幸教授からNeil Gehrels博士への一通の電子メールで始まりました。「Swiftに参加したい」と連絡をとったところ、すぐに「Swiftチームは大歓迎だ」と返事がありました。高橋さんは、気球実験やコンプトンガンマ線天文台の開発でGehrelsさんと旧知の仲であったのですが、なにより高橋グループは、テルル化カドミウム (CdTe) 半導体検出器の開発において、世界最高の実績をもつグループであったことが「大歓迎」の大きな理由でした。BATは、Swiftの搭載機器のなかで唯一の新規開発で、CdTeに少量の亜鉛を加えたテルル化亜鉛カドミウム (CdZnTe) を宇宙利用の硬X線素子としては初めて、かつ、大規模に採用することに

なっていました。そこへのCdTeのプロの参加は、なにより心強い援軍として歓迎されたのです。Swift打ち上げまで4年余り。この時点ではまだBAT検出器の影も形もないときでした。

Swiftから少し話がそれますが、2000年というのは、2月にASTRO-Eの打ち上げが失敗した年です。後にBAT開発に参加するわれわれ宇宙研・埼玉大・東京大のグループは、ASTRO-Eに搭載していた硬X線検出器 (HXD) を、広島大や金沢大のグループとともに開発しました。5年にわたる開発の後に、目前で衛星を失い、大きく方向転換を迫られていたのです。そこで、HXDの次を担う検出器として高橋グループが、ずっと開発を進めていたCdTeの開発実績をひっさげ、海外の衛星計画に打って出ることにしたのです。

打って出るといっても、装置開発の主体は3カ国で固められており、われわれにも大きな開発製造のための財源があるわけでもありません。しかし、われわれにはCdTe検出器の開発経験があります。そこで、われわれ自身が組織的に開発の現場となるGSFCに乗り込んで開発に貢献することにしたのです。まずは、半導体素子を製造するメーカーの工場を訪問し、製造工程や品質保証の方法の説明を受けました。CdZnTeは、CdTeと同様、次章で詳しく紹介するように、素子ごとに複雑なエネルギー応答をする素子です。多数の素子をまとめて、一つの観測装置とするためには、ある程度その特性をそろえることが大切です。そこで、半導体出荷時の特性評価方法に注文をつけ、品質保証に組み込んでもらうことにしました。さらに検出器から出てくるデータにも、そのようなCdZnTeの特性を織り込んだ処理ができるように、あらかじめ測定したデータを参照しながら、出力値を入射光子のエネルギーに変換していく必要があります。われわれは、GSFCの検出器開発グループと綿密に議論しながら、そのための仕組みを作りました。

そして極めつけが、大学院生の長期滞在です。

足かけ4年にわたって、GSFCに滞在し、NASAのメンバーと同じ実験室で、日曜日も含む毎日顔を合わせながら、開発を進めたのです。全くの新設計で、なおかつ、3万を超える半導体素子をすべて較正する必要があったBATの開発は、たいへんに難航しました。しかし、振り返ってみると、Swift衛星の開発でも最も苦勞したこのとき、この場所に、日本チームの若いメンバーが常にいてともに戦い抜いてくれたことが、いまにつながるSwift/BATチームと日本チームの揺るがない信頼関係につながったと感じています。

ところで、2000年に軌道にたどりつけなかったHXDですが、その後、ASTRO-E2「すざく」衛星⁵⁾に搭載され、Swiftに遅れること8カ月、2005年に打ち上げられ、観測を開始しました。HXD⁶⁾には、GRB検知機能もあり、Swift/BATと共同の観測⁷⁾⁻⁹⁾も多数なされています。また、ほぼ20年にわたって開発されてきたCdTeは、今年度中に打ち上げられるASTRO-H衛星¹⁰⁾に搭載される硬X線撮像検出器HXIと軟ガンマ線検出器SGDの検出部に採用されています。その開発には、Swift/BATの開発を、大学院時代のほぼすべてを捧げて、アメリカの地で支えた筆者の一人（佐藤）も参加しています。ヒトと技術の交流を通じた切磋琢磨の中で、両国の天文学が進展しているのです。

3. BAT検出器開発における、日本人大学院生の活躍

BATは、2.4 m×1.2 mの範囲に約52,000個の鉛のタイルを並べた符号化マスクとその1 m下に置かれた検出器部で構成される巨大な検出器で、その開発は非常に挑戦的なものでした。検出器面には、32,768個ものCdZnTe半導体素子が整然と配置されます。CdZnTe素子は256個ごとにモジュール化され、センサー信号の読み出しには、XA-1と呼ばれる、低雑音アナログ信号処理回路を128チャンネル内蔵した専用のASICを用いて

います（計256チップ）。多チャンネルアナログASICを、これだけの規模で宇宙に展開したのも前例のないものでした。

BATの開発は2002年4月頃に製造フェーズに入り、最初のプロトタイプモジュールができあがった頃には、われわれ日本チームはGSFCに入って、以降2名ないし3名の大学院生が常駐する態勢をとりました。そして、上述した256個のXA-1チップの特性評価、3万を超えるCdZnTe素子、そしてデジタルデータ処理装置に対して広範囲な試験を行いました。特にXA-1は、500 keV程度までの広いダイナミックレンジをもつ反面、非線形性をもつため、その補正が必須でした。最初の1カ月はプロトタイプモジュールから出てくるデータの全容把握に努め、次の1カ月では、日本の研究室メンバーを含めた総力を結集して、全読み出しチャンネル、CdZnTe素子を系統的に解析、評価するためのソフトウェアを一気に書き上げました。

CdZnTe素子の応答が複雑であると上に書きましたが、それは、電荷の移動度が低く、寿命が短いために、素子内で発生した電子・正孔対を集めきることが難しく、得られた波高スペクトルにはどうしてもテイルと呼ばれる構造が現れてしまうからです。光子が電子・正孔対を作る深さはエネルギーに依存するため、テイル構造もエネルギー依存性ももちます。

電荷の移動度や寿命は、半導体の基礎的な特性であるため、一般にアルファ線を用いて調べることが広く行われていました。アルファ線を陽極、あるいは陰極に当て、正孔・電子が移動するときの信号の立ち上がり時間などを測定する方法です。しかし、この手法では表面の電極などの影響を受けやすく、光子によるスペクトルと直接結びつけることができません。そこでわれわれが発案し開発を行ったのが、アルファ線でなく光子を使った新しい特性評価の手法です¹¹⁾。この手法では、光子が検出器と相互作用する位置の分布を

解析的に求め、電子・正孔の移動度と寿命の積 ($\mu\tau$) をパラメーターとしてスペクトルモデル関数 ($\mu\tau$ モデル) を構築し、放射性同位元素の既知のエネルギーをもつラインガンマ線を照射して得たスペクトルと合わせることで、電荷輸送特性を決定します。いったん移動度と寿命を特定のエネルギーのラインガンマ線で決めてしまえば、ほかのエネルギーに対する応答も $\mu\tau$ モデルを用いて構築できることになります。また、光子なので、たくさんの素子を並べて一度に照射することも可能で、多数の素子を用いる BAT 検出器に適していました。

2002年の6月から半年の間にBATの製造は一気に進められました。256素子ごとのCdZnTeモジュールは、さらに大きな、2,048個の素子を含むブロック単位に組み上げられ、動作試験および較正用のキャリブレーションデータの取得が行われました。半年の間にこのブロックが16個製造されたので、およそ2週間に1個はこのブロックができあがり、それを矢継ぎ早に測定、評価していく必要がありました。そして、 $\mu\tau$ モデルによる手法を用い、電荷輸送特性を測定した結果、 $\mu\tau$ 積の値として1桁以上という予想を上回るばらつきが確認され、これは検出器を切り出す元になる結晶インゴットの違いによるものであると判明しました¹²⁾。年が明けた頃には、符号化マスクと組み合わせた試験も行い、24時間態勢での地上較正試験が行われ、復号による画像合成の実証試験、角度応答の測定などが行われました。これらの評価結果を元に、GRBのスペクトルを正確に決め、フラックスを得るために必要な応答関数の構築を行い、その結果はデータ解析ソフトウェアに取り込まれ、いまでも全世界のBATユーザに使われています。

その後、BAT検出器は衛星本体に搭載され、他の観測機器とともに、さまざまな衛星環境試験を経たのちに、2004年11月20日についてフロリダ州ケープカナベラル空軍基地から、デルタIIロ

ケットにより打ち上げられました。最初の半年間は、主に既知の天体を観測することで観測機器の較正を行う試験期間として割り当てられていたのですが、検出器を立ち上げるやいなや、早くも12月19日には初めてのGRBを検出し、12月27日にはマグネターSGR 1806-20からの巨大ガンマ線フレアを検出するなど、Swift衛星による新しい観測の時代が幕を切って落とされたのです^{13), 14)}。

4. Swift 10年の発見

それではSwift 10年の主な成果を振り返ってみましょう。

4.1 GRB

—高赤方偏移GRB—

GRB観測のもたらす天文学への可能性を飛躍的に拡大したのが、Swift衛星の登場による数々の高赤方偏移GRBの発見です。Swift衛星と地上望遠鏡との連携により、これまで、赤方偏移6を超えるGRBが8個発見されています¹⁵⁾。高赤方偏移GRB検出に特化した新たな衛星提案や計画がアメリカ^{16), 17)}、ヨーロッパ¹⁸⁾、そして日本¹⁹⁾などから数々出ていることから、このSwiftの発見がどれだけインパクトがあったことだったかがよくわかります。初期宇宙の研究には遠くに位置する明るい光源が必要です。歴史的には遠方のクエーサーや銀河などからの光を用いて行われてきましたが、SwiftによりGRBを遠方での明るい光源として利用した初期宇宙の研究が本格的に始動しました。この領域のフロンティアの一つとして、宇宙再電離の時期を知ることがあります。宇宙誕生の瞬間、水素原子は原子核と電子がばらばらな電離状態にありました。その後、宇宙の温度の低下とともに、水素は中性的な状態になりますが、最初に作られた星の光により再び電離され、現在の宇宙で見られているような電離状態にある水素が作られたと考えられています。再び水素が電離された時期、つまり宇宙再電離の時期を観測

的に知ることは宇宙論の最重要テーマの一つです。この幕開けのGRBが、日本のすばる望遠鏡での分光観測に成功した赤方偏移6.3のGRB 050904です²⁰⁾。このバーストのすばる望遠鏡での分光観測はバースト発生後3日という比較的遅く行われたにもかかわらず、すばる望遠鏡の分光データは赤方偏移6を超えるGRBの中で今でも最も信号雑音比が良いものです。このデータを用いて日本の研究者グループが赤方偏移6.3では宇宙はすでに電離していたという大きな発見をしました²¹⁾。現在、分光観測により赤方偏移が測られたGRBで最遠方なのはGRB 090423の赤方偏移8.2です²²⁾。このバーストは南米チリにある口径8.2 mの望遠鏡VLTにより、近赤外線領域での分光観測がバースト発生17.5時間後に行われましたが、その分光データは赤方偏移の決定には十分でしたが、残念ながら赤方偏移8.2での水素の電離状態を調べるには信号雑音比が小さすぎました。しかし、このGRB 090423は分光観測で赤方偏移が決定された天体としては現在もワールド(スペース?)レコードを保持しています。

では、Swiftで観測された8個の赤方偏移6を超えるGRBは宇宙で最初に作られた初代星(population III star)が親星、つまり爆発したものだったのででしょうか。比較的近傍で起こったバーストとこれらのバースト本体や残光の特徴を比較した研究からは近傍で起こったバーストと大きな特徴の違いは見られないという結果がでています¹⁵⁾。つまり、残念ながら、まだ、初代星が爆発したGRBの証拠は見えていないという見方が優勢です。

赤方偏移6を超えるバーストは年間約1個、Swiftで検出している計算になります。Swiftは年間約100個のGRBを検出していますので、高赤方偏移GRBの割合はわずかに全体の1%にすぎません。しかし、これらSwiftが検出している高赤方偏移GRBは口径25 cmから2 m程度の比較的小口径の地上望遠鏡で残光検出に成功しており

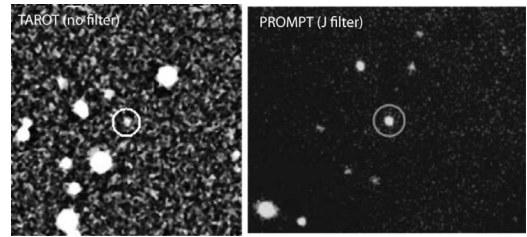


図3 赤方偏移6.3のGRB 050904の残光検出に成功した口径25 cmのTAROT望遠鏡(左)²³⁾と口径41 cmのPROMPT望遠鏡(右)²⁴⁾。口径1 mにも満たない小型望遠鏡で高赤方偏移GRBの残光観測に成功している。

(図3)、バースト発生3日後でも分光観測に成功していることから十分明るいことがわかっています。数は少ないですが、ビッグサイエンスに結びつく高赤方偏移GRB検出のチャンスを逃さないようSwiftのバースト速報に連動して多くの地上望遠鏡での追観測が求められています。

—ショートGRBの残光発見—

Swiftでその理解が大きく前進したものに継続時間の短いGRB、通称ショートGRB(継続時間が“短い”,つまり“ショート”なのでそう呼ばれます)があります。Swiftにより、ショートGRBの残光が初めて検出され、ショートGRBの発生場所が高い精度でわかるようになりました。それでは、なぜSwift以前ではショートGRBの発生場所を高い精度で決めることが難しかったのでしょうか。これは、ショートGRBに限らずGRB全般に言えることですが、GRBはどこで発生するかわからず、X線やガンマ線という波長で最初に位置を決定しなくてはなりません。さらにその残光は時間とともにどんどん暗くなってしまいうため、早く観測する必要があります。ショートGRBというカテゴリーのGRBがあるということも最初に指摘したコンプトンガンマ線天文台のBATSE検出器によるGRBの位置決定精度は数度でした。典型的な小型の可視光望遠鏡の視野は20分角程度(SwiftのXRTやUVOTの視野もこの程度です)ですので、数度という領域を望遠鏡で

カバーしようとする10回以上のポインティングをする必要があります。その観測をしている間にもGRBはどんどん減光していくため、検出がますます難しくなります。次に登場した、BeppoSAX衛星、そしてHETE-2衛星はBATと同様の符号化マスクという光学系を用いることで、広視野をもちながらもGRBの位置決定精度を数十分角から数分角まで飛躍的に向上させました。その結果、BeppoSAXではGRBに付随した残光を発見することになりましたし、HETE-2ではSwiftの発見から数カ月遅れでショートGRBからの残光検出に成功しました。Swiftはその上をいきます。SwiftのBATは、BeppoSAXやHETE-2に搭載されていた検出器より約10倍の面積を有し（つまり、より暗いGRBまで検出できる）、一度に監視できる空も約3倍に増えました。さらにBATの非常に賢い機上のソフトウェアでGRBの検出、および、その位置決定を自動で行います。BATの機上ソフトウェアで決定される位置精度は約3分角です。そのBATの位置に衛星を向けられるかの判断が機上で行われ、向けられると判断した場合は即座に衛星の姿勢変更が自動的に行われ、Swiftに搭載されているXRTとUVOTでの観測がこれまた自動で開始されます。この間、数分以内で行われます。XRTやUVOTの初期観測データはデータリレー衛星TDRSSで即座に地上に降り、地上でデータを待ち構えている解析ソフトで自動的にプロセスされます。XRTでX線対応天体が見つかった場合は数秒角、UVOTで可視光対応天体が見つかった場合は秒角以下の精度でGRBの発生位置がわかることとなります。Swift以前では考えられなかった精度の位置情報がバースト発生後、十分程度の時間で手に入れることができる時代になりました。ショートGRBはその継続時間が短いため、そもそもの到来する光子の数が少なく、そのガンマ線放射を用いて位置を決定するのが難しいのですが、SwiftではBATの巨大な面積でそれを可能にしています。Swiftでは年間

約10個のショートGRBの検出に成功しています。Swiftの高い位置決定精度からショートGRBが発生した銀河（母銀河）の特徴やその母銀河中での発生場所などを初めて系統的に研究することが可能となりました。

バーストの継続時間の長いロングGRBの起源についてはSwift以前からBeppoSAXやHETE-2の活躍により、すでに詳細な残光や母銀河の観測が行われており、その起源としては大質量星の崩壊という描像がかなりはっきりとしていました。一方、ショートGRBの残光発見はSwift登場後の2005年ですので、それ以前はその起源については、何もわからないという状況でした。しかし、Swiftの提供するショートGRBの高精度の位置速報と多波長による連携観測により、その起源が見えてきました。

仮にショートGRBの起源がロングGRBと同じ大質量星の崩壊でしたら、近傍のロングGRBで観測されているような超新星成分がショートGRBの残光からも観測されることが期待されま。七つのショートGRBの追観測でショートGRBの残光における超新星成分に対して非常に深い上限値がついています²⁵⁾。超新星SN 1998bwが付随していたロングGRB 980425で観測された超新星成分の等級よりも2-5等級、ショートGRB 050709では7等級も暗い上限値となっています。ロングGRBに反して、ショートGRBに超新星は付随してなさそうであることをこれらの観測結果が示しています。

次に気になるのが、バーストが発生した銀河、つまり母銀河の特徴です。ロングGRBの母銀河は星生成が活発な銀河で、その発生場所は若い星が多く作られている場所であるということがわかっています²⁶⁾。ショートGRBはどうでしょうか。その母銀河はさまざまな種類の銀河が混在していることがわかってきました。可視光や電波領域で残光が発見されたショートGRBでその発生位置が高精度で決まっているGRB 050724A²⁷⁾や

GRB 100117A²⁸⁾の母銀河は古い星が多く集まった楕円銀河です。一方、GRB 051221A²⁹⁾やGRB 130603B³⁰⁾は若い星が多い星生成銀河 (star-forming galaxy) が母銀河です。つまり、ショートGRBは古いシステムである早期型銀河から比較的新しいシステムである星生成銀河まで多様な銀河で発生していることになり、その御本尊は幅の広い年齢をもつことを意味します。最近の結果³¹⁾によると、36個のショートGRBの母銀河は47%が晩期型銀河、17%が早期型銀河、17%が母銀河未検出、そして19%は母銀河の型がはっきりしないものとなっています。

それでは次にショートGRBの母銀河内での発生場所の特徴はどうでしょうか。このことを調べるためにはショートGRBの位置が秒角を切る精度で決定されている必要がありますが、Swiftにより、初めてこのような研究が可能となりました。文献30, 31によると半分のショートGRBの位置での星生成の活動性を示す指標となる紫外線や可視光の量は母銀河のどの領域よりも弱いという結果を出しています。発生場所の紫外線や可視光の量が弱いという事は星生成があまり活発でない比較的古い星が多く存在する場所で起こっていることを示唆します。

以上、ショートGRBの残光や母銀河の系統的な観測からわかってきたことをまとめますと、1) 残光に超新星成分が見られない、2) 母銀河は早期型銀河から晩期型銀河までさまざま、3) GRBの発生場所は星生成が活発でない領域であるということになります。これらの特徴はロングGRBで見られる特徴とは大きく異なっており、そのため、ロングGRBの起源として考えられている大質量星の崩壊はショートGRBの起源ではないだろうという見方が一般的です。ただし、これらの系統的な研究ができるようになったのは、つい最近のことで、今まで述べた結果もサンプル数としては数十個程度での議論ですので、十分なサンプル数とは言えない状況であるということに注意し

ておく必要があります。

そして、ショートGRBの発生場所や母銀河の系統的な特徴が少しずつですが、わかってきた矢先に起こったブレイクスルーがGRB 130603Bでした³²⁾。このバーストはSwift BATおよびWind衛星に搭載されているガンマ線バースト検出器Konusが検出したバーストで、その継続時間はBATのデータによると180ミリ秒で、瞬間的な明るさは、かに星雲の100倍以上という非常に明るいショートGRBでした。X線や可視光で残光が検出され、バースト発生約7時間後には0.356という赤方偏移も測られました。ここで、画期的な結果をもたらしたハッブル宇宙望遠鏡が登場します。ハッブル宇宙望遠鏡がバースト発生約9日後と約30日後にそれぞれ可視光と近赤外線での観測を行いました。その結果、バースト発生約9日後の観測で近赤外線でのみ対応天体を検出しました。この観測がなぜブレイクスルーなのでしょう。ショートGRBの起源としてロングGRBのような大質量星の崩壊の可能性は低いということは述べましたが、その具体的な起源としてささやかれていたものとして中性子星と中性子星、あるいは中性子星とブラックホールの合体というものがあります。中性子星-中性子星の合体が起こると一部の放出される物質はrプロセスにより中性子過剰な放射性元素が作られると予想されています。詳しい話は文献33をご覧ください。これらの放射性元素が崩壊する過程で出る放射は合体後1-2日に光度のピークをもち、近赤外線でも明るいことが予想されています（この放射のことを“kilonova”とか“macronova”など呼びます）。そして今回ハッブル宇宙望遠鏡で可視光では検出できず、近赤外線でのみ検出した放射こそがkilonova放射であるということです。図4に発見論文に掲載されている光度曲線を示しますが、そこまで近赤外線や可視光での観測が密に行われたわけではないので、本当に近赤外線領域でkilonova起源の増光を観測したのかなという印象は

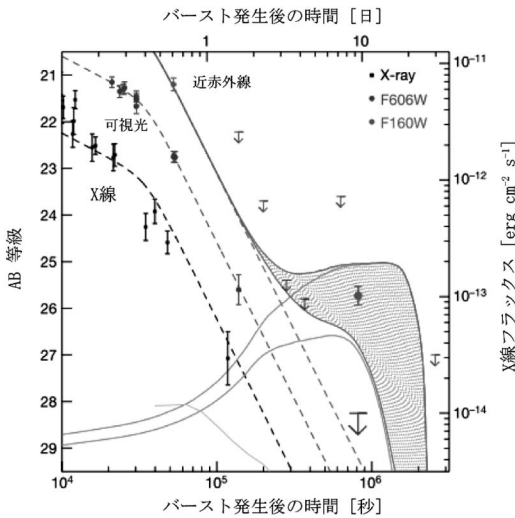


図4 GRB 130603Bの可視光、近赤外線、そしてX線での光度曲線³²⁾。ハッチの領域が予想されるkilonova放射でハッブル宇宙望遠鏡によるデータ(バースト発生後10日前後のデータ)は、その領域内にある。

否めませんが、本当ならば大発見です。当然、rプロセスによる元素合成が行われている現場を発見したという意味でも十分重要的発見なのですが、ショートGRBの起源としてコンパクト天体の連星系の合体という説が有力になったことがさらに画期的です。そして、コンパクト天体連星の合体からは地球で観測可能な重力波が発生していると考えられています。つまりショートGRBから重力波が出ているかもしれないのです。アップグレードを完了したアメリカの重力波干渉計Advanced LIGOがアップグレード後最初の稼働を今(2015年9月)まさに開始しようとしています。2016年にアップグレードを完了し稼働を開始するAdvanced Virgo、そして現在建設中の日本のKAGRAと最高スペックの重力波干渉計が次々と観測を開始します。重力波が天体現象と結びついて重力波天文学となれるか、打ち上げから10年を迎えたSwiftですが、休んでいる暇はありません。

それ以外にもGRBについてさまざまな成果を

Swiftは上げてきました。いくつか列挙すると、BATのバーストの約90%以上でXRTが検出しているX線残光、特にSwiftが上がる前は観測例のなかった初期X線残光の振る舞いについて明らかにしました³⁴⁾。可視光でGRBの対応天体が検出できる割合が約50%程度ですので、X線で探すほうがはるかに効率的であることがわかります。GRB 080319Bではバースト本体のガンマ線放射中にガンマ線で見られる時間変動とほぼ同期した可視光放射が観測されました。さらにその可視光での明るさのピークは5.3等級にも達しています³⁵⁾。この明るさは空のいい場所でしたら、肉眼でも観測できる明るさであったことから、このバーストは別名“Naked eye burst (肉眼が見えるバースト)”と呼ばれています。また、さらなる超新星が付随したロングGRBがGRB 060218³⁶⁾やGRB 100316D³⁷⁾など数例Swiftによって観測されています。最近の成果になりますが、初期可視光残光からの偏光検出^{38), 39)}も大きな話題を集めています。

Swiftは現在でもコンスタントに年間約100個のGRBを検出し、それらの正確な位置速報、そしてX線や紫外/可視光での追観測データを収集し続けています。本稿で紹介した、高赤方偏移GRBやショートGRBをBATで検出する割合は決して多くありませんが、その機会を逃さないように今後もSwiftチームと追観測を行うグループとの連携は強めていく必要があります。今後数年以内にSwiftと同じ質のGRBデータを提供できる新たな衛星ミッションが現れる見込みはありません。SwiftからのGRBアラート一発、一発を大切に、そしてGRB研究者としてはSwiftが1年でも長く運用できるよう最大限のサポートしていく必要があるように思います。

4.2 超新星

Swiftがなぜ突発天体の追観測をXRTやUVOTで即座に行うことが可能かご存知でしょうか。それは、前項のショートGRBのところで述べまし

たがGRBの追観測を完全自動で行えるように設計されているからです。一般的な観測衛星の場合は、その日観測するターゲットのスケジュールを地上で作成して、そのスケジュールを衛星に送るということを行います。つまり、突発的な割り込み (Target of Opportunity; ToO) 観測を行いたい場合は地上で観測スケジュールを組み直し、衛星に観測スケジュールを上げ直すという作業が必要のため、時間と労力がかかります。Swiftでは衛星上のソフトウェアでToOを自動的に現行の観測スケジュールに組み込むことができます。このことを可能にしているのは、観測ターゲットに優先順位 (メリット値と呼びます) をつけるという工夫です。観測ターゲットに優先順位がついていますので、機上のソフトウェアはこの優先順位を頼りに観測スケジュールを組み直すということが自動で行えます。ToOの要求がきたけれども、いま観測中のGRBの観測は続けたいという場合は、ToOの優先順位をGRBの観測の次としておいて挙げると、現在行われているGRB観測を維持したまま、適切な時期にToO観測に移るという運用も簡単にできます。GRB観測に特化した衛星を作ったら、ToO観測も非常に簡単に行えたという意味で、Swiftはwin-winな衛星です。

この容易にToO観測ができるというSwiftの特徴を打ち上げ当初から利用してSwiftチームのメンバーがリードして行われている観測の一つが超新星の観測です。特にSwiftのUVOTは地上では観測の難しい紫外線領域での観測を得意としていることから、地上のサーベイで発見された多くの超新星を主に紫外線領域で観測してきました。Swiftの打ち上げ当初は年間20個程度の新しく発見された超新星を観測していましたが、現在では年間約50個観測しており、全体では約350個の超新星の膨大な観測データを提供しています。ノーベル賞を受賞した大発見として、Ia型超新星は可視光域では標準光源として使用できることは広く認知されていますが、果たして紫外線域では

どうか⁴⁰⁾、また、一般のIbc型超新星とGRBの付随するIbc型超新星との違いなど興味深い問題にチャレンジしています。Swiftの超新星サーベイの結果はウェブページ^{41), 42)}に随時公開されています。

4.3 マグネター

Swiftの発見の幕開けは非常にレアなマグネターの巨大フレアの観測からでした。マグネターは数秒という周期と $\sim 10^{-10}$ s/sという周期変化率で主にX線領域で周期的に光っている天体で、磁気双極子放射を仮定すると、これらの典型的な周期と周期変化率から見積もられる磁場は $\sim 10^{14}$ - 10^{16} Gと巨大なものとなります。X線光度も 10^{34} - 10^{36} ergs/sと高く、エネルギー源としては、この巨大な磁場のエネルギーと考えられていることからマグネター (強磁場星) と呼ばれています。マグネターは数ミリ秒から数十ミリ秒というショートバーストを繰り返し起こすこと、また、数十年に1回程度、巨大フレアを起こすことが知られています。2004年12月27日、Swiftはまだ打ち上げ後1カ月を少し過ぎたばかりの初期運用フェーズでBATは機上較正のためのデータ取得、既知の天体を用いての位置決定精度の確認や機上トリガーの調整などを行っている最中に、そのイベントは起こりました。マグネター SGR 1806-20がマグネターとしては3例目となる巨大フレアを起こし、BATで幸運にもそのフレアの検出に成功したのです⁴³⁾。当時、筆者の坂本はSwift BATチームに加わりSwiftの仕事を始めただけでしたが、Swiftの神がかった運の良さに、本当に革命が起こりそうな予感がしたイベントだったのを覚えています。

Swiftが登場する前までの約25年間に知られていたマグネターの数は10個程度でしたが、Swiftが上がってからその数は倍以上の28個 (2015年5月現在) となっています。その中でもSwiftで新たに発見されたマグネターは4個もあります。Swiftでの新しいマグネターの発見は非常に美し

い形で行われるケースが多いです。上でも述べましたようにマグネターは硬X線（数十keVから数百keV）領域で数ミリ秒から数十ミリ秒の短いバーストを繰り返し起こすものが多くあります。新マグネターはSwiftでは、最初、“ショートGRB”と同定され、地上に速報されます。その天体が新マグネターでショートバーストを繰り返し起こせば、しばらくするとBATで全く同じ方向から、さらなるショートバーストを検出し、「あっ、これは新マグネターだ！」と即座にわかります。非常に美しい新マグネターの発見方法だと思いませんか？ Swift J1834.9-0846はこのようにSwift BATによって発見されたマグネターです。

最近の話題としては、われわれの銀河中心方向で発見された新マグネター SGR J1745-29 でしょう。当時2013年はGillessenらの報告⁴⁴⁾から“G2”と呼んでいたガス雲がわれわれの銀河中心にあるブラックホールSgr A*に接近し、潮汐破壊現象（後述）を伴う“天文ショー”が起ると予言されていました。この報告を受けて、Swiftは2013年の間、定期的にSgr A*の領域を観測していました。そして、2013年4月24日にSwift XRTの観測からSgr A*の近傍でX線強度が1桁以上も増加していることがわかりました。“G2”がSgr A*に突っ込んだかという気運が高まった矢先の4月25日19時15分Swift BATが30ミリ秒のショートバーストをSgr A*近傍の方向から検出しました⁴⁵⁾。残念ながらBATで検出したショートバーストはこの一発のみで、XRTのデータからマグネターで言われている数秒という周期を検出することは2.5秒おきにデータを読み出すモードでの観測では無理でした。こんな状況のなか、登場したのが、2012年6月に打ち上げられたNASAの硬X線望遠鏡NuSTARです。NuSTARは4月26日にこの領域を追観測し、~3.76秒で周期変動する硬X線放射を発見し、Sgr A*付近でのX線増光、そしてショートバーストの正

体が新マグネター SGR J1745-29であることが確定しました⁴⁶⁾。SwiftとNuSTARとの連携プレーでなされた発見でした。ところで、2013年の“G2”ガス雲のフィーバーのその後については、筆者らはフォローしていません。

4.4 潮汐破壊現象

それは、2011年3月28日12時57分のことでした。われわれの銀河面から離れた領域で約20分のデータを積分して見つかった未同定天体の速報がBATからきました。約30分後にGRBコミュニティーに通常どおり“GRB 110328A: Swiftバースト発見”のサーキュラーを流した10分後の13時40分に同じ天体からのトリガーアラートをBATが自動配信しました。継続時間が1時間以上も続く超長いGRBか、あるいは特殊な天体か、その起源は非常にミステリアスでした。その1日後、そして、さらに2日後にBATがトリガーし、結局、BATはこの天体で合計4回トリガーしました（図5）。Swift運用10年の中で、後にも先にも、こんな変な突発天体はこの一つだけです。また、そのX線の光度曲線が奇妙で、典型的なGRBのように数日で急激に減光していきながら、数百秒程度の細かな強度変動を繰り返しながら、非常にゆっくりと減光していきました

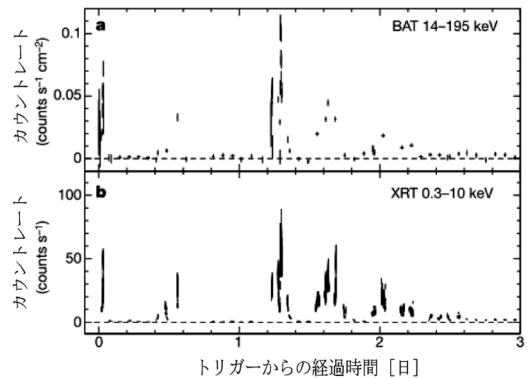


図5 Sw 1644+57のBATとXRTでの光度曲線⁴⁷⁾。BATでもXRTでも激しい時間変動をしており、BATで最も明るい放射はトリガーから約1.3日後である。

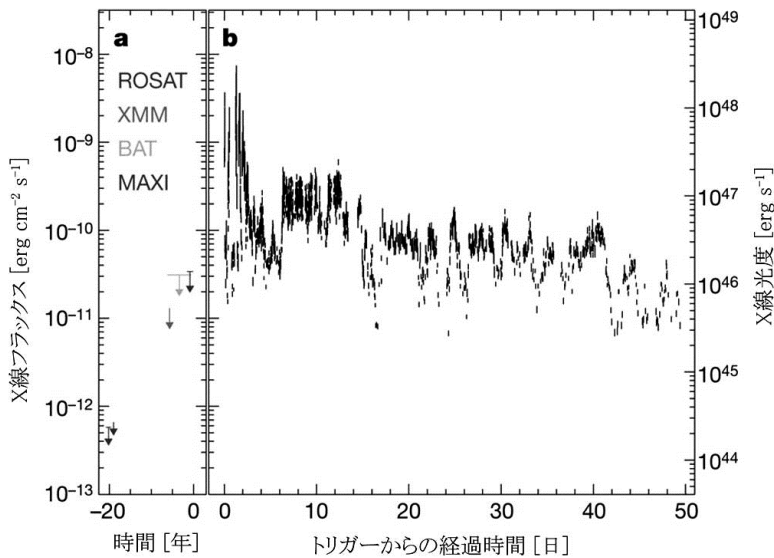


図6 Sw 1644+57のXRTの長期間での光度曲線⁴⁷⁾。細かな時間変動を繰り返しながら、ゆっくりと減光している様子がわかる。

(図6)。そのため、Swift XRTの追観測も1年以上続けられました。この天体Swift J164449.3+573451 (以降Sw 1644+57)は多波長で精力的に地上からの観測が行われ、この突発天体は赤方偏移0.3534の星生成銀河の中心で起こったということが明らかになってきました。観測を整理しますと、1) 数日にわたる硬X線での活動、2) X線での数百秒という細かな時間変動に伴う、ゆっくりとした減光、そして3) その発生場所は星生成銀河のコアということになります。これらの観測を総合的に解釈し、Swiftチームはこの突発現象は巨大ブラックホールに星が接近し、その星がばらばらに壊され、吸い込まれていく過程で起こるフレア現象である「潮汐破壊現象」の現場を観測したと結論づけました⁴⁷⁾ (地上の望遠鏡を用いた多波長観測結果を報告したほかのグループ⁴⁸⁾も同じ結論に到達しています)。さらにSw 1644+57で観測された非常に明るいX線光度を説明するためには放射は等方的とは考えにくく、おそらく、ジェット状に放射されたと解釈するほうが自然でした。つまり、われわれは潮汐破壊現象を伴った巨大ブラックホールからのジェット放射の

まさに始まりをSw 1644+57として観測した可能性がります。巨大ブラックホールからのジェット放射は活動銀河核 (AGN) としてよく知られていますが、そのジェット放射の始まりの観測に成功したのは、これもSwiftの成し遂げた奇跡的な快挙でした。

4.5 活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN)

可視光で見ると宇宙からやってくる放射の大部分は、恒星に由来します。これがマイクロ波になると、宇宙マイクロ波背景放射というビッグバンの名残が大部分を占めます。X線ではどうでしょう？ 正解は、GRB—ではなく、X線背景放射です。X線背景放射は、その大部分がAGNからの放射であることがわかっています。実際、Swift/BATの70カ月カタログを見ると、全1,210天体のうちの6割弱にあたる711天体がAGNに分類されています。

特に硬X線帯域に強いBATは、ブラックホール周辺の物質によって強く吸収されたAGNも見通すことができます。BATによる多数のAGN観測結果は、ほかのX線衛星や他波長の観測結果と総合することで、これまで見過ごされてきた「隠

された」AGNを含めた、真のAGNの光度分布やその宇宙史の中での変遷を明らかにするのに役立ちました⁴⁹⁾。

またSwift衛星は、UVOT-XRT-BATと合わせると両端で4桁を超える帯域の観測ができますから、広帯域にわたる継続観測にも適しています。活動銀河核にあてはめるとこの帯域は、超巨大質量ブラックホール周りの降着円盤からの放射と再放射から、高速で吹き出すジェットからの放射の両方をカバーすることにあたります。Swiftの観測結果を含むAGNに関する査読論文は、すでに200を優に超えています。なかでも紫外やX線帯域での変動を用いて降着円盤の構造やジェットとのかかわりなど、活動銀河核の内部構造にかかわる研究が目立ちます⁵⁰⁾。

さらにXMM-Newtonなどの高感度のX線天文衛星や、硬X線からガンマ線が観測できるNuSTAR衛星やFermi衛星との共同観測によって、波長領域でも時間領域でも断片的だった活動銀河核の高エネルギー帯域での観測が、「切れ目なく」できるようになりました。これは、降着円盤やジェットの詳細な構造を含めた数値計算結果と比較するうえでたいへん重要なことであり、AGNの仕組みや構造についての理解が、さらに進展することが期待されています。

5. Swift 20周年に向けて

Swiftはブレイクスルーとなるような観測や発見を、われわれ研究者に提供し続けていることがおわりいただけたと思います。このようなエキサイティングな衛星に深く携わっている、筆者らは本当に幸せ者だと思います。10年というのは一般的な科学衛星にとっては“老年期”に近いですが、Swiftは観測装置や衛星システムに大きなトラブルがなく、元気に観測を続けています。今の衛星の状況を見ていると20周年も夢ではないかもしれません。NASAの衛星運用を決定づけるものとして2年に一度行われるSenior Reviewとい

うものがあります。Swiftの元々の運用期間は2年間でしたので、最初の2年以降はこのSenior Reviewの審査を受けて、運用の延長申請を行っています。幸いにもSwiftは今でも非常に高い評価をSenior Reviewで受けており（2014年のSenior ReviewでのSwiftの評価は1位でした）、運用の延長は現在2016年まで認められており、さらなる延長を2016年のSenior Reviewで申請する予定です。Senior Reviewで高い評価を得るためには、多くのユーザからのミッションに対するサポートが必要です。Swiftでは年に1回、Guest Investigator (GI) Programの観測公募（例年9月末が提案書の締め切り）がありますが、ここで、提出される提案書の数というのは一般ユーザーからのサポートの指標の一つとして重要なものです。Swiftは簡単にToO観測の要求を行うことができますが、Swift衛星を用いたユニークなサイエンスのアイデアのある方には、Swiftの運用延長へ1票入れるつもりで、是非、このGI programに観測提案をしていただきたいと思います。それでは、Swift 20周年の「SKYLIGHT」でまた、お会いしましょう。

謝辞

本稿は、国際共同ミッションとして進められているSwiftチームの多くのメンバーの成果を踏まえて書かれたものです。特に、日本チームの活動部分の執筆にあたっては、ここに紹介した方々のほか、NASAゴダード宇宙飛行センターでの活動の中心を担い、筆者の佐藤とハンバーグおばさんの下宿で苦楽を共にした、当時大学院生の鈴木雅也氏（埼玉大田代研）、岡田祐氏、高橋充弘氏（東大牧島研）、さらには、渡辺伸氏、三谷烈史氏、研究員の小澤秀樹氏、助手の中澤知洋氏（宇宙研高橋研）、杉保昌彦氏（東大牧島研）に感謝いたします（所属等は当時）。

参考文献

- 1) Gehrels N., et al., 2004, ApJ 611, 2
- 2) Barthelmy S. D., et al., 2005, Space Sci. Rev. 120, 143
- 3) Burrows S. D., et al., 2005, Space Sci. Rev. 120, 165
- 4) Roming P. W., et al., 2005, Space Sci. Rev. 120, 95
- 5) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, 1
- 6) Takahashi T., et al., 2007, PASJ 59, 35
- 7) Starling R. L. C., et al., 2008, MNRAS 384, 504
- 8) Sakamoto T., et al., 2011, PASJ 63, 215
- 9) Krimm H. A., et al., 2009, ApJ 704, 1405
- 10) Takahashi T., et al. 2014, Proc. SPIE 9144, id 914425 (24 pp)
- 11) Sato G., et al., 2002, IEEE Trans. Nucl. Sci. 49, 1258
- 12) Sato G., et al., 2005, NIMA 541, 372
- 13) 田代信, 2005, 日本物理学会誌 60, 373
- 14) 坂本貴紀, 2006, 日本物理学会誌 61, 346
- 15) Salvaterra R., 2015, Journal of High Energy Astrophysics special issue: "Swift: Ten Years of Discovery" (arXiv: 1504.02096)
- 16) Grindlay J. E., 2010, SPIE 7732, id 77321X (19 pp)
- 17) Gehrels N., Barthelmy S. D., Cannizzo J. K., 2012, IAU Symp. 285, 41
- 18) Jacques P., Jianyan W., Stephane B., Shuang-Nan, Z., 2011, Special Issue of Comptes Rendus Physique "GRB studies in the SVOM era" (arXiv: 1104.0606)
- 19) Yonetoku D., et al., 2014, SPIE 9144, 91442S (12 pp)
- 20) Kawai N., et al., 2006, Nature 440, 184
- 21) Totani T., et al., 2006, PASJ 58, 485
- 22) Salvaterra R., et al., 2009, Nature 451, 1258
- 23) Boër M., et al., 2006, ApJ 638, L71
- 24) Haislip J. B., et al., 2006, Nature 440, 181
- 25) Berger E., 2014, Annual Review of Astronomy and Astrophysics 52, 43
- 26) Fruchter A. S., et al., 2006, Nature 441, 463
- 27) Barthelmy S. D., et al., 2005, Nature 438, 994
- 28) Fong W., et al., 2011, ApJ 730, 1
- 29) Soderberg A. M., et al., 2006, ApJ 650, 261
- 30) Fong W., et al., 2013, ApJ 769, 1
- 31) Fong W., Berger E., Fox D. B., 2010, ApJ 708, 9
- 32) Tanvir N. R., et al., 2013, Nature 500, 547
- 33) 田中雅臣, 2014, 天文月報 107, 19
- 34) Nousek J. A., et al., 2006, ApJ 642, 389
- 35) Racusin J. L., et al., 2008, Nature 455, 183
- 36) Campana S., et al., 2006, Nature 442, 1008
- 37) Starling R. L. C., et al., 2011, MNRAS 411, 2792
- 38) Mundell C. C., et al., 2013, Nature 504, 119
- 39) Wiersema K., et al., 2014, Nature 509, 201
- 40) Brown P. J., et al., 2010, ApJ 721, 1608
- 41) http://swift.gsfc.nasa.gov/docs/swift/sne/swift_sn.html
- 42) Brown P. J., et al., 2014, Astrophysics and Space Science 354, 89
- 43) Palmer D., et al., 2005, Nature 434, 1107
- 44) Gillessen S., et al., 2011, Nature 481, 51
- 45) Kennea J. A., et al., 2013, ApJ 770, L24
- 46) Mori K., et al., 2013, ApJ 770, L23
- 47) Burrows D. N., et al., 2011, Nature 476, 421
- 48) Levan A. J., et al., 2011, Science 333, 199
- 49) Ueda Y., et al., 2014, ApJ 786, 104
- 50) たとえば McHardy I. M., et al., 2014, MNRAS 444, 1469

Revolutionize Our Understanding of Time-Domain Astronomy: 10 Years of Swift

Takanori SAKAMOTO¹, Makoto S. TASHIRO² and Goro SATO³

¹Aoyama Gakuin University, ²Saitama University, ³JAXA ISAS

Abstract: NASA Swift gamma-ray burst explorer marked 10 years of its successful operation. Swift revolutionized our understanding of not only gamma-ray bursts but also transient phenomenon in general thanks to its excellent science instruments and autonomous slewing capability of the spacecraft. Probably it is not well known, but there were Japanese graduate students who devoted themselves for the development of Swift. We review the history of Swift who revolutionized our understanding of time-domain astronomy.