

「すざく」衛星ガンマ線バースト残光観測の顛末



田代 信

〈埼玉大学理工学研究科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255〉

e-mail: tashiro@phy.saitama-u.ac.jp

「すざく」GRB TOO チーム

2006年1月5日、ガンマ線バースト観測衛星 Swift の検出から5時間後、X線天文衛星「すざく」は、初のガンマ線バースト早期 X線残光の観測を行った。近年、早期 X線残光は複雑な減光パターンをもつことが明らかになり、これまでの自己相似的な膨張を行うジェットモデルを離れることが要求され、ガンマ線バーストの起源を探るうえで注目を集めている。われわれは、Swift の即時応答性と「すざく」の高感度広帯域観測を合わせることで、早期残光の詳細な観測をめざして、即応体制を構築した。最初の観測となったこのケースでは、これまでになかった早期の急激な減光「ジェットブレイク」を検出した。ガンマ線バーストとその残光は、いままで隠されていた多様な真の姿を現しつつある。

2006/01/05 23:20:

速報

村上君ほか解析してくれました。

暗いですが、なにか受かっています。

うーむ。うーうーむ。

暗くなっちゃったのでしょうかね……。

中澤@ 考え中

1. ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) は、X線、ガンマ線を中心とした電磁放射を数ミリ秒から数分の間に行う、宇宙最大の爆発的天体現象だ。その総エネルギーは、木星の静止質量エネルギーに匹敵する 10^{51} erg を超えると推定されている。1967年の発見以来、すでに3,000を超える観測例があり、数のうえでも天文学のメジャーなカテゴリーである。近年の研究の爆発的な進展

については、天文月報でも繰り返し取り上げられてきたので、おなじみの方も多いただろう。

1997年に残光と呼ばれる数日にわたって減光する天体を残すことが発見された。これによって、電波、赤外、可視光、X線の望遠鏡群による追観測が可能になり、GRBが系外銀河に属することが明らかになった。同定された最も遠い赤方偏移値は $z=6.3$ である¹⁾。また、光度分布からの推定では、すでに $z=10$ も遠方のものが観測されている可能性が高く²⁾銀河形成時にさかのぼることができる、まさに宇宙論的天体である。

GRBの正体についての探求の歴史は、すでに優れた記事³⁾があるので、そちらをご覧ください。また、やはり歴史的なポイントは、2003年の超新星の特徴が発見されたGRB残光だろう⁴⁾。超新星との関連の指摘はすでに1998年になされていたが、残光の現場から得られたこれは動かぬ証拠となった。さらに、可視光残光が、ほぼ時間に

反比例して減光することから、GRB 残光は膨張していき衝撃波面から放射されていることが示唆された。さらに、その放射面の急激な減速に伴って明るさも急激に変化しているとする解釈が成功をおさめつつあり、これが残光についても指導的モデルとなった⁶⁾。こうして、GRB 残光についての研究は、理論と観測は両輪となってゴールに向けて驀進中とされていた。

あとは例数を増やして系統的に検証すれば、詳細な GRB の物理について議論できるだろうと期待された。そこで系統的観測を進めるために登場したのが、GRB 観測を目的とした衛星 HETE-2 と、Swift 衛星である。そして両衛星は、2005 年 7 月にあいついで 1 秒以下の継続時間しかもたない短時間 GRB の位置決定にも成功した。同定に成功したこれらの母銀河の性質は、これらが中性子を含む連星の合体を起源とすることを示唆しており、起源天体について有力視されていたもう一つのモデルにも支持を与えた⁷⁻⁹⁾。

ところが肝心の残光については、観測が進むにつれ、しだいにこれまでのシナリオにない現象が目につくようになった。特に Swift が初めて可能にした、X 線早期残光の観測から、これまで知られていなかった振舞いが見えてきたのである。

2. Swift と早期 X 線残光

Swift 衛星は、全天の 1/6 を覆う広視野で GRB を待ち受ける硬 X 線望遠鏡 BAT と、衛星機動後に狭視野で詳細な残光観測を行う、X 線望遠鏡 XRT・可視光紫外線望遠鏡 UVOT の 3 種類の検出器を同架する新しいタイプの GRB 観測衛星である。BAT はカウントレートと画像を使って GRB を検出し、方向を定める。衛星は即座に姿勢を制御し、1 分ほどで残光観測を開始する。これによって、観測される GRB の数が飛躍的に増加するとともに、いままで観測されなかった早期残光の観測が可能になった^{10), 11)} (図 1)。すなわち、それまで X 線残光の観測は、早くも 8 時間後か

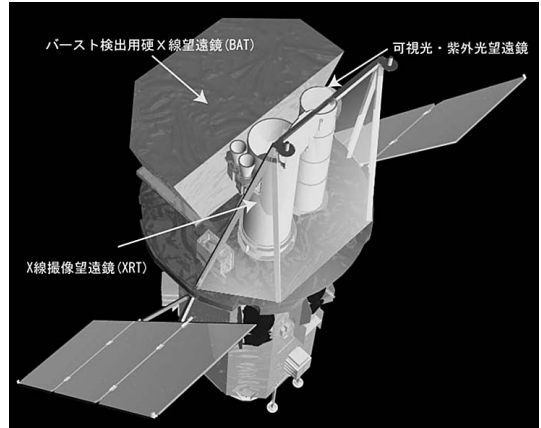


図 1 ガンマ線バースト観測衛星 Swift の外観。矢印で示した BAT, UVOT, XRT の 3 種類の観測装置が搭載されている。

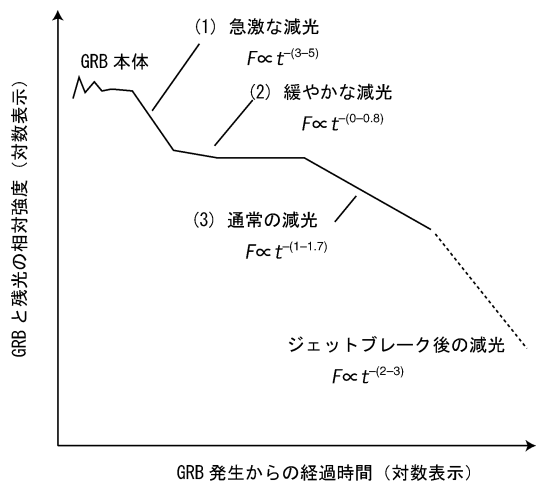


図 2 ガンマ線バースト X 線残光の典型的な減光の様子 (文献 11 などより)。

らの観測であったのだが、Swift は、GRB の位置決定から姿勢制御まで自律的に行うので、GRB 検知後およそ 100 秒後には撮像分光観測を始められるのである。継続時間の長い GRB であれば、残光フェーズに移る前に狭視野望遠鏡の観測が始まり、GRB 本体の観測ができてしまうほどだ。

これによって、GRB 本体から従来の残光観測までの間にあった 8 時間のギャップに隠されていた出来事があらわになってきた。そこは、時間に

反比例した減光といった単純な世界では、なかったのである。それどころか、

- (1) GRB 本体が収束した直後の「急激な減光」
 - (2) その後の数千秒は「緩やかな減光」
- を経て、それからようやく
- (3) 時間の逆数に比例した「通常の減光」
- へと複雑な遷移が隠されていたのである^{12), 13)} (図 2)。

特に (2) のなだらかな減光フェーズは、エネルギー供給が発光領域の追加を示唆している。もしエネルギー供給が 1,000 秒以上続いているのだとすると、それは GRB のエンジンが、バーストの終了と思われている時点から、実は数十分から数時間も動き続けていることを意味しているのかもしれないのだ。

3. 「すざく」登場

Swift 衛星に遅れること 8 カ月、日本の X 線天文衛星「すざく」が誕生した^{14), 15)}。折しも、Swift がもたらした観測結果の解釈に、人々が頭を悩まし始めた 2005 年の夏であった。「すざく」は、高い効率を誇る X 線反射鏡と組み合わされた、高いエネルギー分解能の X 線 CCD カメラ (XIS) 4 台をもち、0.2–12 キロ電子ボルトという X 線天文学の標準的な帯域を撮像分光観測する。また、10–700 キロ電子ボルトという広い帯域を、史上最高感度の硬 X 線検出器 (HXD) がカバーする。画期的な分光性能をもつ X 線マイクロカロリメーターこそ、残念ながら、実力を成果に結びつけることなく冷媒を失ってしまったが、それでも高感度かつ広帯域の分光という「すざく」のコンセプトは、Swift 衛星の X 線望遠鏡をフォローする強力な武器である。そう確信したわれわれは、GRB 追観測のために、二つの目標をたてた。

- (A) 異なる減光フェーズの遷移に伴うスペクトル変化の探査
 - (B) 輝線スペクトルの探査
- このうち、(A) については上に述べた。もう一方

の (B) は、BeppoSAX、「あすか」、Chandra, Newton など歴代の X 線天文衛星で X 線残光から輝線スペクトルが報告されてきたものだ。しかし検出された例数は GRB 全体にくらべて少なく、また有意度もさまざま、統計学的な批判もあった。また最近では Swift の X 線残光観測の系統的解析結果から、いくつかの例外的なものを除きかなり厳しい上限値もつけられている¹⁶⁾。特に Swift/XRT が追うことのできない、後期残光について、鉄輝線に関しては世界で最良の検出器である XIS のテーマとした。

4. 衛星運用の日常

通常の「すざく」は、一年ごとに採択された観測プログラムを、順に実行している。軌道上では雲の心配はないが、衛星の電源はすべて太陽電池パネルからとるので、望遠鏡とほぼ直角方向に太陽をもってくる必要がある。太陽からの離角が 65 度から 110 度の範囲で決まる天球上の帯の中にある天体であれば、どんどん観測できる。

日ごとの衛星の運用計画は、相模原の JAXA 宇宙科学研究本部で作られる。毎日二人の「当番」が、観測予定を見て、衛星に送信する観測計画を策定する。衛星の観測姿勢制御、観測装置の設定、軌道上の放射線帯が予測される時刻では装置を守るためのモード変更も欠かせない。「すざく」チームの大学院生やスタッフが二重にチェックをしながら策定する。そして相模原で作られたコマンドプランは、鹿児島宇宙空間観測所に送信される。ここにも大学院生やスタッフが二人、「当番」として詰めており、送られてきたコマンドプランをチェックする。これで 4 人のチェックを経ることになる。

ほぼ一日がかりで、入念なコマンド計画の準備とチェックを済ませ、衛星を待ち受けるわけである。そしていざ衛星が現れるや、上空を秒速 8 キロメートルで駆け抜ける衛星に、34 メートル直径の巨大なパラボラアンテナをロックオンし、ドッ

プレー効果による変調を補正しながら通信を確保し、データを取り込み、並行してコマンドを送信する。この間、メーカーから派遣された専門のスタッフ3名と、当番2名が、手順書に従っててきぱきと交信し、用意した運用計画を送信しながら、衛星がとりためたデータを入手するのである。衛星に異常が起きていないかどうか、この時間内に、何十項目ものチェックを行って確認する。1日に5回、緊張の10分間と準備の80分あまりを衛星の軌道周期に合わせて繰り返す。他の衛星とアンテナ設備を共有しているので、軌道が干渉するときは3-4回に減ることもある。ミスは観測の失敗のみならず、世界にたった一つの、精魂込めて作り上げた「すざく」衛星の故障につながる。それだけに、冗長に見える運用手順も、苦い失敗の経験に基づいて作り上げられたもので、あだやおろそかにできないのである。

しかし、この手順をすべて踏んで、一日かかってようやく望遠鏡を向けたのでは、GRB残光はもう暗くなってしまっており、興味深い遷移がすべて終わってしまっている。いつどこで起きるか予測のつかないGRBに対応し、いかに安全に、かつ、すばやく観測を行うか。GRB残光観測は、かつてないチャレンジになった。

5. GCNと監視体制

SwiftやHETE-2などのガンマ線バースト観測衛星がGRBを検知すると、その座標は即座に地上のネットワークに通報される。このときSwift衛星は、アメリカの中継衛星(リレー衛星)網を利用し、即時に地上と交信ができるようになっている。また赤道軌道上を飛ぶHETE-2衛星は、赤道沿いに展開している受信局網が衛星からのデータをとらえることになっている。通報は即座にインターネット上の連絡網であるGRB座標ネットワーク(GCN)に転送される。世界のGRB観測者は、このGCNに計算機のソケットや自分の電子メールアドレスを登録し、GRB発生からほぼ1

分ほどで、GRBの発生時刻・座標などを入手することができる。現在では多くの可視光望遠鏡が、このGCN情報をもとに自動的にGRB天体を望遠鏡に導入するロボット望遠鏡化されている。

しかし、普段は別の観測をしている汎用望遠鏡ではそうはいかない。軌道上汎用天文台である「すざく」はなおさらである。自動化できないので、人間が動くしかない。

そこでわれわれはチームワークによる監視と衛星運用の体制をつくった。日本の「すざく」チームから、GRB残光観測に興味をもつ人々でGRB ToO (Target of Opportunity: 即時観測) チームを組織した。宮崎大学、理化学研究所、金沢大学、東京工業大学、京都大学、埼玉大学の六つの研究室の大学院生とスタッフが交代でGCNをモニターし続ける。いざGRBの検知通報があったならば、それが「すざく」で観測可能であるか判断し、チームに呼びかけるのが役割である。衛星と交信できる時間帯は限られる。残光観測にふさわしい時間帯に間に合うのか、衛星の太陽角制限は満たしているのか、などの基準をもとに判断し、運用責任者に了解をとる。同時に、お膝元のJAXA宇宙科学研究本部(宇宙研)や青山学院大のチームメンバーに連絡をとり、コマンド計画の策定を依頼する。観測計画ができたならこれをチェックし、内之浦に電送し、衛星に送信してようやく観測が始まるのである。このコマンドを準備する時間を考え、われわれは、バースト発生を監視する時間を受信時間帯の8時間前から、受信時間帯の終了の5時間前までとした。その日の受信回数によって異なるが、おおよそ毎日10時間の監視態勢をとることになる。図3にSwiftのGRB検知からGCNを通じての通報、そして「すざく」の観測開始までを模式的に示した。

観測を行うかどうかはSwift衛星のXRTが観測した最初期のX線残光の明るさを見て決定する。「すざく」が観測を始めるまでに十分な明るさ

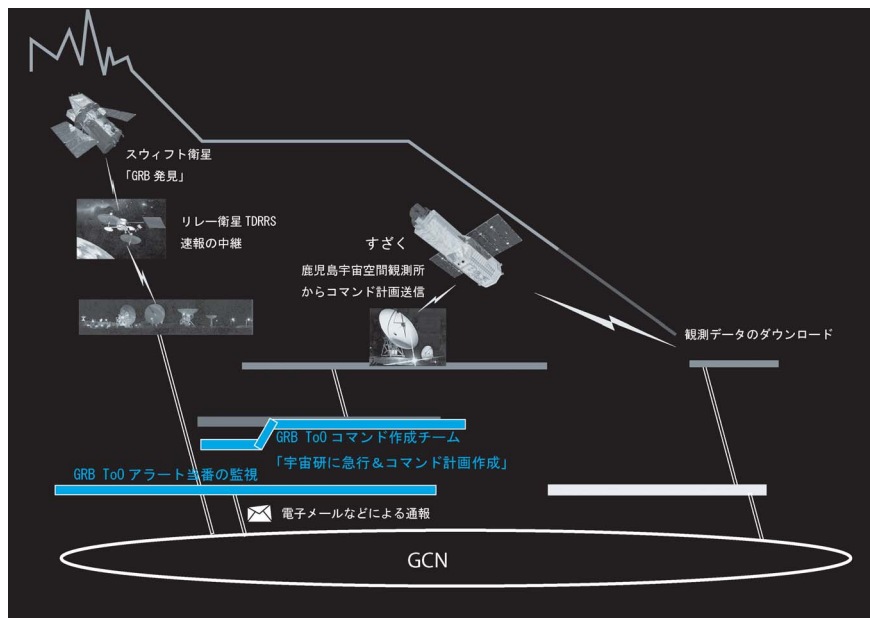


図3 SwiftのGRB検知から「すざく」観測開始までの模式図。

を保っていることが条件になる。GRBはバーストごとにさまざまなペースで減光するので、実際に予測するのはたいへんに難しいが、ほぼ7割の確率でいい観測になると予想される閾値として、バースト発生後100秒でのX線フラックスが 10^{-10} erg/cm²/sを設定した。実際には、Swiftチームから時々刻々送られてくる続報を見ながら判断することになる。もう一つの要件は、太陽角である。「すざく」はSwiftより太陽角制限が厳しい。先に述べたようにGRBと太陽の離角が65-110度でなければ望遠鏡を向けることができない。そして、最後の要件が、観測スケジュールである。ToO観測では、予定されている観測をキャンセルしてGRBを見に行くことになる。キャンセルされる観測が、再観測可能であれば問題ないが、たとえば多波長同時観測としてスケジュールされたものであれば、勝手にキャンセルすることできない。よって、この場合はGRB観測を発動できないことになる。X線残光の速報値、太陽角、観測スケジュール、そして、実際にコマンドプランを

策定する人の手配、これら「天=GRBの明るさ」「地=受信時間帯」「人=運用の都合・人手」すべて調和したとき、ToO発動できるのである。

6. 「すざく」機動

その日は思いのほか早くおとずれた¹⁷⁾。

2006年1月5日15:50(JST):最初にSwift、ついでHETE-2からGRB発生の報告がGCNに流された。Swiftからは自動的にXRT/UVOTで取得された情報が、次々とGCNに送り込まれてくる。ただし、XRTでのX線残光は宇宙線を誤認している可能性もあると注意書きが付いていた。このとき「すざく」との交信可能時間帯まであと1時間17分。絶好の機会である。

16:07(JST)X線残光は宇宙線による偽物かもしれないという注意書き付きながら、その日の当番であった宮崎大学から「警戒態勢」の電子メールが流れる。同時に埼玉大学と金沢大学、理研のグループも情報収集にはいる。メーリングリスト上で意見交換しながら、次々とGCNに流れてく

る情報、Swiftの公式webページに自動的に掲載されたデータを見る。どうやら宇宙線などではなく本物のGRB残光である可能性が高いと判断した。

実はこの日、宇宙研ではシンポジウムが開かれており、「すざく」首脳部はこの会議に出席していた。このためなかなか携帯電話が通じず、最初に連絡がとれた宇宙研のGRB観測チームメンバーに、直接、首脳陣をつかまえてGRBの観測の判断を下してもらうように依頼した。

16:21 (JST): コマンド作成のために青山学院大からコマンド作成担当が自転車で淵野辺駅の反対側にある宇宙研に駆けつける。

16:56 (JST): GCN サーキュラーで、宇宙線ではないとの情報が流れる。当初の強度が 7×10^{-9} erg/cm²/sの明るいGRB残光が確定した。かに星雲のX線強度の1/3ほどだ。

17:00 (JST): この時点で、すでに「すざく」との交信時間帯にはいっている。予定の運用計画を実行しながら、裏で、GRB観測用の観測計画に差し替えるべく宇宙研と近くにある青山学院大のToOチームメンバーがコマンド作成を開始する。本来の「すざく」運用当番である相模原と鹿児島当番も巻き込んだ大作戦となる。

17:56 (JST): コマンド作成のめども立ち、正式にToOを行うことを提案する。18:35にプロジェクトマネージャが正式に承認したとの連絡が入る。第三受信時間帯までに差し替えコマンドを用意し、3時間後の20:50 (JST)に「すざく」をGRBに向けることにする。

19:01 (JST): 日米の「すざく」チームメンバーにGRB ToO観測を行うことを告知。指示や励ましの連絡をいただく。

19:21 (JST): 第一受信時間帯にダウンロードしたデータから、HXDに装備されている広帯域全天モニター (Wide-band All-sky Monitor: WAM) でも、このGRBを検出していることが判明。こちらもヒットだ。

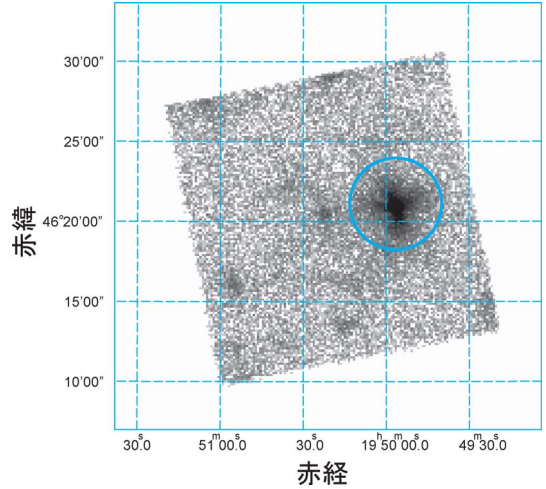


図4 「すざく」XISのとらえたGRB 060105のX線残光。

20:27 (JST): この日の第三受信時間帯開始。「すざく」にGRB観測の指示が送り込まれる。20:50 (JST) 観測姿勢へ。21:10 (JST) 姿勢が安定し観測開始。観測はほぼ一日続けられる。

22:09 (JST): 観測の最初のデータがダウンロードされる。即座にデータのチェック。今回の観測の主力となるXISのエキスパートにデータの処理と解析をお願いする。

23:30 (JST): 最初の解析結果がでる。みごと残光の観測に成功(図4)。しかし予想よりかなり暗い。なぜだ。

24:02 (JST): とにかく「すざく」が残光の観測に成功し、観測を継続していることをGCNで告知する。うーむ。しかしなぜ暗いのか。

7. 新記録二つ

GRB 060105と名付けられたこのバーストは、Swift, HETE-2のほか、Wind衛星搭載Konus検出器、「すざく」HXD-WAM検出器でも観測されていた。KonusやWAMは、高エネルギー帯域に高い感度をもつので、GRBのスペクトルのピーク(E_{peak})を決めるのに適している。決められた E_{peak} は、 424_{-22}^{+25} キロ電子ボルトであった。(WAM

の詳細については、また稿を改めて報告したい。)

そもそも GRB は、光速の 99.99% 以上の相対論的速度でこちらに向かっているジェット状のプラズマ内部で起きる衝撃波面で作られていると考えられている。すなわち、もともとジェットの力学的エネルギーだったものの一部が、衝撃波によって、プラズマ中の電子と磁場のエネルギーに転換され、ガンマ線や X 線のシンクロトン放射になっている。もとのジェットの速度が速いほど、電子や磁場に渡されるエネルギーも大きく、全体の放射も大きくなると考えると、 E_{peak} と総放射エネルギーが相関しているのも自然だろう。観測的には、これは Amati 相関として知られているものにあたる¹⁸⁾。

この Amati 相関と E_{peak} と光度についての米徳相関¹⁹⁾に基づけば、赤方偏移値は 4 ± 1.3 と推定され、少し遠目で光度の大きな GRB と考えられ

る²⁰⁾。「すざく」はこの ToO 観測で、バーストが検知されてから 5.3 時間で観測を開始した。これは汎用 X 線天文台としては、世界新記録だ*1。

図 5 にこの日のガンマ線バースト GRB 060105 から Swift と「すざく」が観測した光度曲線を時間、光度とも対数グラフの上に示した。最初の部分はバースト本体で SwiftBAT がとらえたものである。対数グラフ上で直線、すなわちべき型の減光みせている部分が、X 線残光であり、SwiftXRT (黒) と「すざく」XIS (青) で観測したものをそれぞれ示してある。ただし、BAT の観測帯域は 15–150 キロ電子ボルトであるので、スペクトルを考慮して XRT や XIS の帯域 0.7–10 キロ電子ボルトでの X 線強度に換算して表示してある。

残光は、GRB 発生後、100 秒から 1 時間は時間の -0.7 乗に比例した緩やかな減光を示している。これは図 2 の「(2) 緩やかな減光」フェーズに

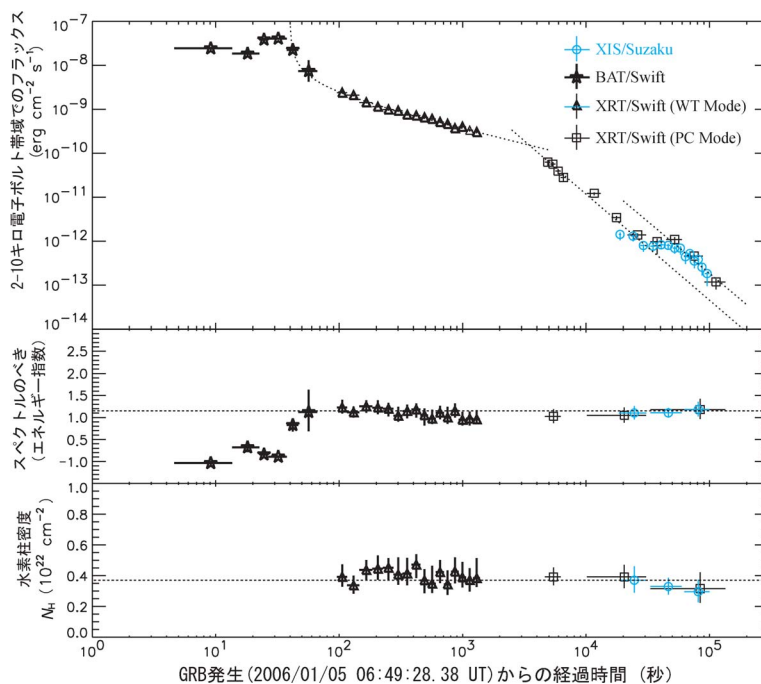


図 5 GRB 060105 の X 線残光の光度曲線。

*1 その後われわれは、今年の 3 月に 3.5 時間と記録を更新した。

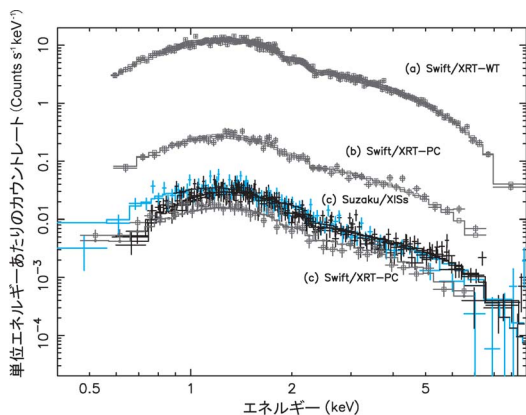


図6 SwiftXRTと「すざく」XISで得られたスペクトル。

(a) 緩やかな減光時 (SwiftXRT/WT mode), (b) ジェットブレイク後の前半 (SwiftXRT/PC mode), (c) ジェットブレイク後の後半 (SwiftXRT/PC mode と4台の「すざく」XIS) のもの。見やすいようにXIS-1のデータのみ青で示した。

あたる。ところが、衛星が軌道運動によって観測がとぎれた後はもう、指数 -2.3 の急激な減光に遷移している。これは「(3) 通常の減光」よりはるかに激しい減光である。この急激な減光によって、予想より1桁暗かったのである。

「すざく」にコマンドを送信し、観測を開始した直後にダウンロードされた最初のデータを解析したときの困惑が、冒頭に載せたメールに表れている。

スペクトルを調べてみると、この急激な減光は、いわゆる「ジェットブレイク」として知られる減光に近いことがわかった(8節)。通常、ジェットブレイクは通常1日後くらいに起こるものとして知られていたが、これがたった1時間で始まってしまっていたのである。このように早いジェットブレイクもまた「世界新記録」である。あまりうれしくないが。

また、SwiftXRTと「すざく」の連携によって、ほぼ1日間のX線残光について、現在望みうる最高の精度での詳細なスペクトルが得られた(図6)。いずれも、エネルギーに対してべき型で光子

数が減少するスペクトルに、われわれの銀河の星間ガスによる吸収をいくらか超える光電吸収がかかったものであった。単純なべき関数からの有意なずれは見られなかったが、図3に示した「べき」と「吸収柱密度」の時間変化を見ると減光フェーズによって、わずかなスペクトルの変化の兆候が見られた。さらに最も検出可能性が高いと考えられる鉄の輝線についても、さまざまな赤方偏移を想定して調べたが、等価幅にして20-50電子ボルトと後期残光に対しても、これまでにない非常に厳しい上限値が得られた。

8. 早すぎるジェットブレイク

GRBで想定されているジェット中では、衝撃波面が時間が経つにつれ横向きに広がっていく。衝撃波が相対論的速度で進んでいる間は、衝撃波の系での時計の進みがゆっくりなので、この横向きの広がりを目立たない。しかし、衝撃波の進行速度が星間物質などによって減速されると、時間の進み方はしだいに速まる。すなわち、減速すると横方向の膨張が早まり輝度が低下する。これはジェットの開口角(θ)が、衝撃波面のローレンツ因子(Γ)の逆数程度になったときに顕著になる効果であり、急激な減光になるので、これがジェットブレイクと呼ばれる急激な減光を引き起こすのだと考えられている。

実際に、急激な減光「ジェットブレイク」からジェットの開口角を推定し、これからGRBの総放出エネルギーを逆算すると、多くのGRBが 10^{51-52} erg程度に集中するなど、この考え方はGRBの物理の本質に迫る重要な鍵と考えられていた²¹⁾。

GRBから放出されたジェットが星間空間のある数密度(n)のガスによって減速されるとする。ガスを押しよけるのはジェットの力学的な仕事であるが、観測されるのはそのある割合(η)の放射に振り向けられている部分である。このように組み立てると、早くジェットブレイクを起こす

ジェットは、もともと力学的エネルギーが小さく、すなわち光度も小さいはずである。それにもかかわらず明るく見えたとするなら、速度（ローレンツ因子）だけは大きい細いジェットだったと推定される。ジェットの開口角と、ジェットブレイクを起こした時間 (t) とは、以下のように定式化される²¹⁾。

$$\theta = 1.5(t/1 \text{ 時間})^{3/8} \times \{5/(1+z)\}^{3/8} (n\eta/E_{\text{iso}, \gamma, 52})^{1/8} \text{ 度}$$

ここで $E_{\text{iso}, \gamma, 52}$ は、GRB の総放出エネルギーを観測フラックスとジェットのローレンツ因子から求め、 10^{52} erg で割ったものである。7 節で示した赤方偏移値を受け入れるならば、 $E_{\text{iso}, \gamma, 52} = 2.5 \times 10^{54}$ erg となる。試みに先行研究に従って、 $n=3$, $\eta=0.2$, とすると、 $\theta = 0.69_{-0.10}^{+0.34}$ 度となる。すると、相対論的ビーミングで強調される前の、もともとのガンマ線放射のエネルギーを求め直すと、 $(1.8_{-0.4}^{+0.3}) \times 10^{50}$ erg と暗い GRB であったことになる。

ところが Amati 相関は、 E_{peak} の値から、むしろ光度の大きい GRB であることを示唆している。GRB の総放射エネルギーとジェットの速度、あるいは開口角の関係は、これまで考えられてきたより多種多様であり、強い相関はないということなのか。あるいは、実は X 線で見ているのは、ジェットのごく一部であって、ジェットブレイクがこれまで検証されてきた、可視光などの放射を行っている部分とは、また別の部分なのかもしれない。

この例に限らず、佐藤悟朗らは、Swift で X 線残光観測が成功し、赤方偏移がわかっている三つの GRB を調べると、Ghirlanda 相関²¹⁾の予想する位置には減光ブレイクがないか、あってもジェットブレイクが予想するような、スペクトルと減光のべきの関係が成り立っていないことを報告している²²⁾。また、そもそもジェットブレイクが全く見られなかったり、可視光での観測とずれてし

まっている例がたくさん挙がってきている。これらを考え合わせると、今回の GRB が特異なのではなく、Swift 時代の他の多くの発見とともに、これまでのシナリオの見直しが迫る結果のひとつになったようである。

9. 宿 題

多くの人の尽力によって「すざく」は Swift と連携し、みごとな残光観測をなしとげた。とくに打ち上げから間もなく、観測装置の較正が続いている段階で、先輩衛星の SwiftXRT とみごとに一致した光度、スペクトルを計測できたことは、較正を進めていた「すざく」チームを勇気づける結果でもあった。また「すざく」XIS の感度とエネルギー分解能を活かして、元素輝線の検出を試みたが、等価幅にして 30 電子ボルトと非常に小さな上限値をつけることもできた。SwiftXRT が残光の初期の明るい段階でつけた上限値と並べてみると、元素輝線探査に対する厳しい見通しを示す結果となった。

しかし、GRB ジェットについては、大きな宿題が残された。またわれわれの当初の目的であった HXD での「緩やかな残光」観測は、その後にもう一度トライした GRB 060904A の残光観測でも達成できておらず、まだ宿題として残っている。これは「すざく」にしかできない観測で、われわれも大きな期待をもっているが、実現するには、バースト発生から観測開始までの時間をさらに縮めることが、なにより有効である。GRB 観測チームでは、どうやったらさらに観測までの時間を短縮できるか検討を進めている。

謝辞と共同研究者リスト

この観測は、GRB ToO チームだけでなく、「すざく」チームの全面的な協力なくしては実現できなかった。最後に、この日の運用チームメンバーの名前を掲げて特に感謝したい（敬称を略することをお許しください）。

相模原衛星運用センターにて：

〔すざく運用チーム〕 山崎典子（宇宙研），寺島
雄一（宇宙研（現 愛媛大））

〔運用当番〕 鳥居研一（大阪大），市川嘉徳，村澤
哲（宇宙研）

〔XIS QL 解析〕 村上弘志（宇宙研）

鹿児島宇宙空間観測所にて：

〔追跡当番〕 藤本龍一，乾 達也ほか「すざく」
追跡チーム

この観測の結果は、先に出版された PASJ の特
集号の最後に掲載されているので、詳しく知りた
い諸氏はお覧いただきたい²³⁾。

この研究は田代のほか以下の方々によってな
されたものである。

阿部圭一，浦田裕次，恩田香織（埼玉大），村上
敏夫，米徳大輔，小平裕宣，奥野晋也，吉成 覚
（金沢大），中澤知洋，前田良知，村上弘志，高橋
忠幸（宇宙研），山岡和貴，中川友進，吉田篤正
（青山学院大），山内 誠，園田絵里，前野将太（宮
崎大），河合誠之，（東工大），鈴木素子，玉川 徹
（理研），J. Nousek（ペンシルバニア州立大），佐藤
悟朗，J. Reeves，L. Angelini，S. Barthelmy，N.
Gehrels，L. J. Kaluzienski，R. Kelly（GSFC/
NASA），鳥居研一（大阪大），上田佳宏，久保田
香織（京都大），衣笠健三，（ぐんま天文台），幸村
孝由（工学院大），G. Ricker（マサチューセッツ工
科大）

しかしながら，もし，不正確な記述があるとす
れば，すべての責任は筆者（田代）にある。

参考文献

（本稿ではなるべく日本語のレビュー的な文献を挙げた）

- 1) 河合，青木，戸谷，2007，天文月報 100，17
- 2) 村上，米徳，中村，2004，天文月報 97，516
- 3) 井岡，2006，天文月報 99，220
- 4) 植村，2004，天文月報 97，169
- 5) 川端，2004，天文月報 97，176
- 6) 小林，2002，天文月報 95，84
- 7) Gehrels N., et al., 2005, Nature 437, 851
- 8) Barthelmy S., et al., 2005, Nature 438, 994
- 9) Fox D. B., et al., 2005, Nature 437, 845
- 10) Gehrels N., et al., 2004, ApJ 611, 1005
- 11) 田代，2005，日本物理学会誌 60，373
- 12) Nousek J. A., et al. 2006, ApJ 642, 389
- 13) Zhang B., et al., 2006, ApJ 642, 354
- 14) Mitsuda K. et al., 2007, PASJ 59S, 1
- 15) 井上ほか，2005，天文月報 98，599
- 16) たとえば Bulter N. R. 2007, ApJ 656, 1001
- 17) 田代ほか，2006，天文月報 99，283
- 18) Amati L., et al., 2002, A&A 390, 81
- 19) Yonetoku D., et al., 2004, ApJ 609, 935
- 20) Pelangeon A., Atteia J-L., 2006, GRB Coord. Netw.
Circ., 4442
- 21) たとえば Ghirlanda G., et al., 2004, ApJ 616, 331
- 22) Sato G., et al., 2007, ApJ 657, 359
- 23) Tashiro M. S., et al. 2007, PASJ 59S, 361

The First Report on the Suzaku Early X-Ray Afterglow Observation

Makoto S. TASHIRO

Department of Physics, Saitama University, Shimo-
Okubo 255, Sakura, Saitama 338-8570, Japan

Abstract: Suzaku target of opportunity observa-
tion results are presented of early X-ray afterglow
observations of GRB 060105 with the Swift XRT
early afterglow observation results. The bright,
long gamma-ray burst GRB 060105 triggered the
Swift Burst Alert Telescope (BAT) on 5 January
2006. The Suzaku team commenced a pre-
planned target of opportunity observation at 5.3
hour after the Swift trigger. Following the prompt
emission and successive very steep decay, a shal-
low decay was observed. After an observation gap,
an extremely early steep decay was observed in
4–30 ks after the trigger. The steep decay
exhibited decay indices of 2.3–2.4. This very
early break, if it is a jet break, is the earliest case
among X-ray afterglow observations, suggesting
a very narrow jet whose opening angle is well
below 1° . The unique Suzaku/XIS data allow us
to set very tight upper limits on line emission or
absorption in this GRB. For the reported
pseudo-redshift of $z=4.0\pm 1.3$ the upper limit on
the iron line equivalent width is 50 eV.