

X線フラッシュ—HETE-2によって見えてきた X線の強いガンマ線バーストの正体—

坂本 貴紀

〈The Astroparticle Physics Laboratory, NASA/Goddard Space Flight Center,
Code 661, NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771, U.S.A.〉

e-mail: takanori@milkyway.gsfc.nasa.gov

X線領域で明るいガンマ線バースト、X線フラッシュはガンマ線バースト本体を理解するうえで鍵を握っていると考えられています。ここでは、HETE-2衛星の観測により明らかになってきたX線フラッシュ本体のスペクトルの特徴を中心に典型的なガンマ線バーストとの類似点や相違点、またX線フラッシュから典型的なガンマ線バーストまでを統一的に理解できる理論モデルを紹介します。

1. はじめに

みなさんは「ガンマ線バースト」と聞くとどのようなことを想像されますか。宇宙の果てで起こる大爆発、ガンマ線での非常に明るい爆発現象、激しい時間変動などが一般的な声でしょう。しかし、今回の主人公は、これらのガンマ線バーストのイメージとは異なり、「ガンマ線」バーストなのに「X線」で明るい「ガンマ線」バーストです。「X線」で明るいのに、何で「ガンマ線」バーストなんだという声が聞こえてきそうですが、この記事を読むことで、そのような声が少なくなれば本望だと思っています。本研究は、ガンマ線バースト探査衛星 HETE-2（ヘティ 2; 以後 HETE）の活躍により、この X線 で明るいガンマ線バーストが典型的なガンマ線バーストと同一起源の現象であることが観測的に明らかになってきたというものです。

また、典型的なガンマ線バーストのみの観測で

は難しかった、ガンマ線バーストのジェットの様状や構造に関する典型的な議論がこの X線 で明るいガンマ線バーストからガンマ線バーストまでを統一的に理解することで可能となってきました。HETE の活躍により明らかになってきた、この一見奇妙なガンマ線バーストに焦点を当てて紹介したいと思います。

2. ガンマ線バースト

はじめにガンマ線バーストについて簡単に紹介したいと思います。ガンマ線バーストは発見から約 30 年になりますが、いまだに謎に満ちた天体現象です。ガンマ線バーストは数十億光年離れたところで起きている大爆発現象で、数十秒程度の間銀河系のすべての星が 1 年間に放つエネルギーが放出されます*1。

図 1 は HETE によって観測された特徴の異なる三つのガンマ線バーストの例です。横軸に時間を秒を単位として、縦軸に観測されたガンマ線の

*1 太陽の光度は $L(\text{太陽}) = 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$ 。銀河系の恒星の数 2×10^{11} 個程度であるため、光度としては $L(\text{銀河}) = (4 \times 10^{33}) \times (2 \times 10^{11}) = 8 \times 10^{44} \text{ erg/s}$ 。1 年間にわれわれの銀河系が放射するエネルギーは $E^{10^6}(\text{1年間銀河}) = (8 \times 10^{44}) \times (3 \times 10^7) = 2 \times 10^{52} \text{ erg}$ 。典型的なガンマ線バーストの放射エネルギーは 10^{51-54} erg 。そのため、同程度の量となる。

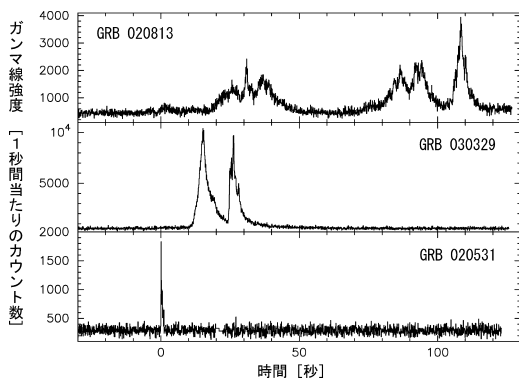


図1 HETE FREGATE 検出器によって観測された GRB 020813, GRB 030329, そして GRB 020531 の光度曲線。

強度を示したものです（このような図を光度曲線と呼びます）。GRB 020813（ガンマ線バーストは頭に GRB と付けて、次にバーストの起こった日にちを、年、月、日の順に付けるのが慣習となっています）のように継続時間が 100 秒以上あり、激しい時間変動をするものもあれば、GRB 030329 のように非常に明るいもの（縦軸を他のバーストと比較してください）、また、GRB 020531 のように継続時間が 2 秒にも満たないものまでさまざまです。

ガンマ線バーストの観測的研究にはこれまでに三つの大きな節目がありました。一つ目は多数のガンマ線バーストの観測により、ガンマ線バースト本体のスペクトルや時間変動の特徴、そして、バースト発生位置の全天分布などが明らかになったことです。1991 年から 2001 年まで運用されていたコンプトンガンマ線天文台 (Compton Gamma-Ray Observatory; CGRO) に搭載されていた BATSE (Burst And Transient Source Experiment) 検出器は、2,704 個にも及ぶガンマ線バーストを観測しました。最も注目された結果はその全天分布です。BATSE は数度という精度でバーストの発生位置を決定することができ、ガンマ線バーストは全天に等方的に分布していること

を明らかにしました (<http://coss.gsfc.nasa.gov/batse/>)¹⁾。

75 年前に、渦状星雲が天の川の中か遠方の銀河であるかを議論した Shapley と Curtis の “The Great Debate” にならって、ガンマ線バーストがわれわれの銀河系内で起こっている現象なのか、それとも宇宙論的な遠方で起こっている現象なのかという距離に関する大討論会が 1995 年に二人の理論物理学者によって行われました²⁾。しかし、ガンマ線バーストの距離に関する議論はこの BATSE の観測では決着が付きませんでした。

二つ目は 1997 年に BeppoSAX 衛星によってもたらされたバーストの残り火である残光（アフターグロー）の発見です。BeppoSAX 衛星にはガンマ線バーストを観測し、その発生位置を数分角で決定できる検出器のほかに、X 線の望遠鏡を搭載していました。1997 年 2 月 28 日に起こったガンマ線バーストの方向へ 8 時間後に X 線の望遠鏡を向けたところ、未知の X 線天体が受かり、2 日後にもう一度その方向を観測するとその天体が暗くなっていることが明らかになりました³⁾。また、この未知の X 線天体には地上の可視光望遠鏡でも対応天体が検出され、その減光の様子も観測されました⁴⁾。この現象のことを残光と呼びます。ガンマ線バースト本体の活動は数秒から数百秒で終わりますが、この残光の発見によりバースト発生後も数日間、さまざまな波長で観測を続けることが可能となりました。一つ目の BATSE の観測のところで触れた距離に関する議論についても、この残光の観測により決着がつけました。可視光の分光観測により、残光やバーストに付随していると考えられる銀河（母銀河といいます）の赤方偏移が測られ⁵⁾、ガンマ線バーストは数十億から数百億光年の遠方宇宙で起こった爆発現象であることが明らかになりました。

三つ目はガンマ線バーストを起こしている中心天体に関する発見です。この発見を可能にしたのは、この記事の主役である HETE による速く、正

確な位置速報と地上観測者との連携（とほんの少しの幸運？）です。HETEによって観測された2003年3月39日のガンマ線バースト⁶⁾はそれまでに距離が測られているバーストのうちで2番目に近いもの⁷⁾であったため、残光が明るく詳細に調べられました。残光の分光観測から得られたスペクトルは水素やヘリウムの外層を失ってしまった星が最後に起こす大爆発(Ic型超新星)のものと非常によく一致していました^{8), 9)}。30年以上も謎であったガンマ線バーストの正体について、初めて観測的に明らかにすることができました。このバーストの残光観測については、天文月報2004年3月号の植村 誠氏とVSNET collaborationチームの記事に詳しく述べてあります。

3. HETE (High Energy Transient Explorer)

それでは、HETEを紹介します。HETEの計画立案、打ち上げや運用の様子は、天文月報2001年7月号の河合誠之氏の記事に詳しく書かれていますので、ここでは簡単にHETEの特徴を述べることにします。

HETEの一番の特徴はガンマ線バーストの発生位置の速報です。HETEはガンマ線バーストを検出すると機上のコンピュータでバーストの位置を計算し、その情報をHETEの軌道である赤道上にまんべんなく配置された地上局に向けて送信します。地上局のデータはHETEのミッションセンターがあるマサチューセッツ工科大学へ集められ、NASAのゴダード宇宙センターが運用しているガンマ線バースト連絡網(GRB Coordinate Network; GCN)によって全世界に配信されます。GCN加入者はHETEのバースト座標をバースト発生から数十秒で受け取ることができます。HETEの速く正確な位置情報と地上観測者との連携により、ガンマ線バーストの残光観測が世界中の望遠鏡を駆使して行われています。

2番目の特徴は、2桁半にもわたる広い波長帯

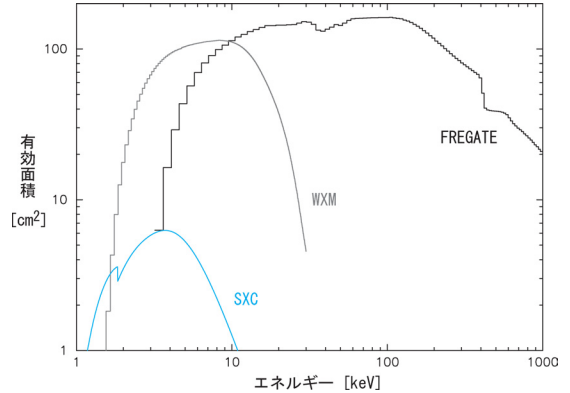


図2 HETE SXC, WXM, そして FREGATE の有効面積。HETE は 2-400 keV まで途切れることなく、バーストのスペクトルを調べることができる。

でバースト本体のスペクトルを調べることができる点です。HETEには三つの観測機器が搭載されています。ガンマ線バーストの検出と分光が主な目的のガンマ線検出器 FREGATE (FREnch GAMMA Telescope; 観測エネルギー帯は 6-400 keV)、位置決定に中心的な役割を果たす WXM (Wide-field X-ray Monitor; 観測エネルギー帯は 2-25 keV)、そして、さらに精度の良い位置を計算できる SXC (Soft X-ray Camera; 観測エネルギー帯は 2-10 keV)があります。WXMとSXCはバーストの到来方向を決定するだけでなく、バーストのスペクトルも調べることができます。図2に示すようにSXC, WXM, そしてFREGATEと組み合わせることにより、約2桁半にも及ぶスペクトルを途切れることなく調べることができます。ガンマ線バーストのスペクトルは数桁にも及ぶ広い範囲にわたって放射することが知られていますので、このHETEの特徴はバースト本体の研究にとって非常に重要で、この記事の研究を可能にしたのも、この特徴のおかげです。

4. “X線”が強い“ガンマ線”バースト？

それでは、本題にはいります。ガンマ線バースト本体のX線領域での様子が詳細に調べられたのは、日本の3番目のX線天文衛星である「ぎんが」衛星の観測によってです¹⁰⁾。「ぎんが」衛星にはガンマ線バーストを観測するためのX線とガンマ線の検出器が搭載されており、ガンマ線バーストの到来方向を決定する機能はありませんでしたが、それらの検出器のデータを組み合わせることで広い波長帯でのガンマ線バーストのスペクトルを調べることができました。「ぎんが」衛星が観測した明るいバーストにはX線領域(2-10 keV)で放射が卓越しているバーストがいくつかあることが報告されています¹¹⁾。

これらX線が強いガンマ線バーストが再び注目され始めたのは、BeppoSAX衛星による観測によってです。BeppoSAX衛星にはX線領域(2-30 keV)で突発天体の位置とスペクトルを調べることができる広視野X線カメラ(Wide Field Camera; WFC)という検出器と主ガンマ線検出器(Photoswitch Detector System; PDS)の周りを囲んでいるシールド検出器(Gamma-Ray Burst Monitor; GRBM; 観測エネルギー帯は40-700 keV)が搭載されており、これらの検出器がガンマ線バーストの観測に威力を発揮しました。BeppoSAXチームはX線検出器であるWFCでは検出されたが、ガンマ線検出器であるGRBMでは検出されなかったガンマ線バーストが5年間に17個あったと報告しました¹²⁾。彼らはこのバーストのことをX線フラッシュ(X-Ray Flash; XRF)と呼びました*2。以降、この記事でもX線が強いガンマ線バーストのことをX線フラッシュと呼ぶことにします。

Kippenらはコンプトンガンマ線天文台の

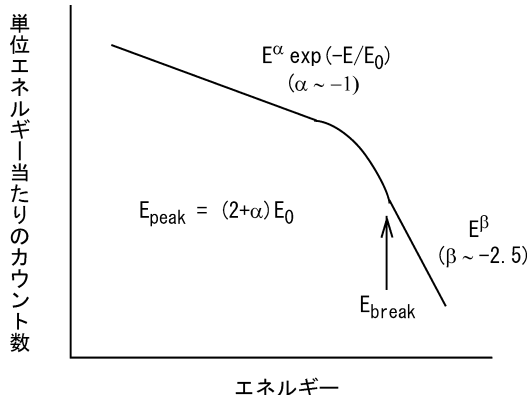


図3 ガンマ線バースト観測スペクトルの模式図。

E_{break} と呼ばれるエネルギーより低いところでは、べき型関数に指数関数が掛かった形をしており、一方 E_{break} エネルギーよりも高いところでは、べき指数の異なったべき型関数でよく表せられる。典型的なガンマ線バーストの低エネルギー側のべき指数は -1.0 で、高エネルギー側のべき指数は -2.5 程度であることが知られている。 E_{peak} は $(2+\alpha)E_0$ となる。

BATSE 検出器と BeppoSAX 衛星の WFC 検出器で同時に観測したX線フラッシュのスペクトルの様子を二つの検出器のデータを同時に解析して詳細に調べました¹³⁾。ガンマ線バーストのスペクトルは、べき型のスペクトルに指数関数的なカットオフがかかった形をしている部分と、べき指数の異なるべき型のスペクトル部分がスムーズに合わさる関数でよく表現できるということが経験的に知られています(図3)。典型的なガンマ線バーストのスペクトルを νF_{ν} でのスペクトルとして書くと“山”形になることから、この山に相当するエネルギーを E_{peak} と呼び、バーストの硬さを表す指標としてよく使われます。

BATSE 検出器と WFC 検出器で同時に観測したX線フラッシュの解析により明らかになったことはスペクトルの形と継続時間には、継続時間

*2 最初にX線フラッシュという呼び名を使用したのはGotthelfら*2.1のインシュタイン衛星によるガンマ線バーストのX線対応天体においてです。

*2.1 Gotthelf E. V., Hamilton T. T., Helfand D. J., 1996, ApJ 466, 779

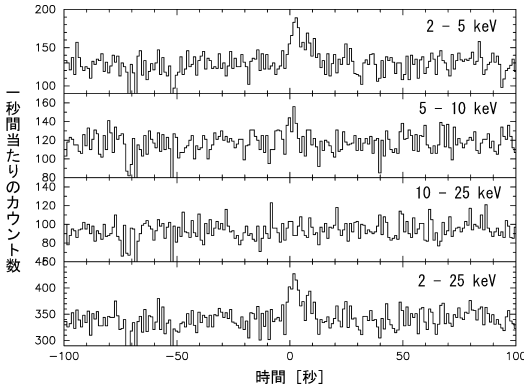


図4 XRF 020903: HETE WXM のエネルギー別の光度曲線. 10 keV 以上ではほとんど放射がないことが分かる.

が2秒以上の典型的なガンマ線バーストとの違いはなく、大きな特徴は E_{peak} のエネルギーがそれらに比べて低いということでした。それでは、HETE が観測した X 線フラッシュはどのような特徴をもっているのでしょうか。

5. X 線フラッシュ XRF 020903

HETE が2002年9月3日に捕らえた X 線フラッシュ (XRF 020903) は、バースト本体の特徴に加え、バーストの残光観測、そして母銀河の観測から距離が初めて測られた X 線フラッシュとして注目されています。

図4は HETE の WXM 検出器による XRF 020903 の四つのエネルギー帯での光度曲線の様子です。10 keV 以上では、ほとんどバーストの放射が見られず、継続時間は10秒程度、そして、二山の構造をしていることが分かります。二つ目のピークのほうが一つ目のピークよりも軟らかく、この特徴は典型的なガンマ線バーストでよく見られます。機上のコンピュータによる位置決めはできていましたが、残念なことに、この時期は銀河面が WXM 検出器の視野に入っており、既知の X 線変動天体によるトリガーを避けるため、X 線によるリアルタイムのトリガーは GCN に流してい

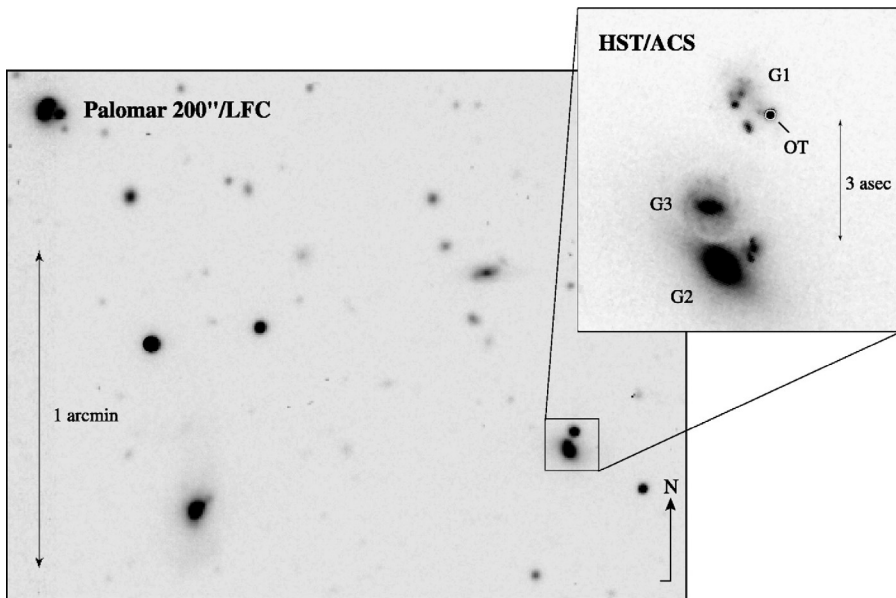


図5 XRF 020903: パロマー天文台 5 m 望遠鏡 (Palomar 200"/LFC) で取得した画像 (左図) と残光領域のハッブル宇宙望遠鏡 (HST/ACS) による画像 (右図). ハッブル宇宙望遠鏡の画像での G2 と G3 は近傍の銀河で、G1 が XRF 020903 の母銀河. 残光が確認されている位置が "OT" と書かれているところである¹⁷⁾.

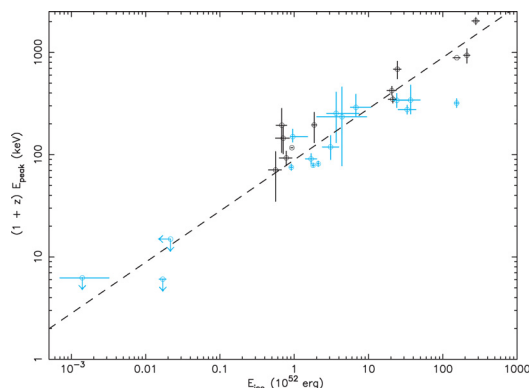


図6 ガンマ線バースト静止系での E_{peak} エネルギーと等方放射エネルギー E_{iso} の相関を示した図。黒のデータ点が BeppoSAX によって報告されているもので¹⁸⁾、青のデータ点が HETE により観測されたバースト¹⁹⁾。左下にある三つのデータ点が HETE により観測された X 線フラッシュ。 $E_{\text{iso}} \sim 10^{49}$ erg のものが XRF 020903。

ませんでした。リアルタイムでの位置速報には成功しませんでした。この XRF 020903 のバーストは SXC 検出器と WXM 検出器の両方で検出され、両検出器の位置情報から $4' \times 31'$ という非常に狭い範囲に誤差領域を絞りこむことができました¹⁴⁾。パロマー天文台の 5 m 望遠鏡で可視光残光が HETE の誤差領域内で発見され、マゼラン 6.5 m 望遠鏡による分光観測から赤方偏移 0.25 の母銀河から狭い輝線が検出されました¹⁵⁾。また、可視光残光の位置に減光する電波源も発見されています¹⁶⁾。ハッブル宇宙望遠鏡による母銀河観測も行われており、このハッブルの画像は、可視光残光とともに少なくとも四つの部分（銀河？）が複雑に相互作用しているように見えます（図 5¹⁷⁾。

WXM 検出器と FREGATE 検出器のスペクトル解析から、 E_{peak} のエネルギーに制限をつけることにも成功しました。XRF 020903 の E_{peak} エネルギーは 68% 信頼度で $1.1 \text{ keV} < E_{\text{peak}} < 3.6 \text{ keV}$ 、99.7% 上限値が 5.0 keV というものでした。BATSE 検出器の観測からは典型的なガンマ線

バーストの E_{peak} は 150–200 keV 付近にあると思われていましたので、XRF 020903 の E_{peak} は常識的な値に比べて 2 桁も低いものでした¹⁴⁾。

このバーストをさらに面白くしているのは、距離が母銀河の観測から測られている点です。筆者らはこの距離を用いて Amati ら¹⁸⁾が発見したガンマ線バーストの静止系での E_{peak} エネルギーと等方放射を仮定したときの全エネルギー (E_{iso}) との間の相関が、XRF 020903 に関しても成立しているかどうか調べました。驚くべきことに、XRF 020903 の観測点は Amati らが発見した相関を静止系での E_{peak} を約 1 桁、 E_{iso} を約 3 桁低くした直線上にきれいにのります（図 6¹⁹⁾）。このことは X 線フラッシュとガンマ線バーストの関連性を特徴づける重要な関係である可能性を秘めています。この相関のおもしろさについては第 7 章で詳しく述べます。

6. HETE が捕らえた X 線フラッシュの特徴

筆者らは HETE が 2001 年から 2003 年までに観測したガンマ線バーストの放射スペクトルの特徴を系統的に調べました²⁰⁾。BeppoSAX チームが使用していた X 線フラッシュの定義をもとに、HETE では、2–30 keV でのフルエンス（フラックスに継続時間を掛けた量で、単位面積当たりのエネルギーという次元をもちます）と 30–400 keV でのフルエンスの比の log をとって、0 より大きいものを X 線フラッシュ、−0.5 から 0 の間のもを X 線過剰ガンマ線バースト (X-ray-rich GRB)、そして、−0.5 よりも小さいものをガンマ線バーストと分類することにしました。この約 3 年間に HETE が観測し WXM 検出器によって位置が決められたガンマ線バーストの数は 45 個で、上で述べた分類を適用すると、そのうち 16 個が X 線フラッシュ、19 個が X 線過剰ガンマ線バースト、そして、10 個がガンマ線バーストでした。少ないサンプルではありますが、これら 3 種類の

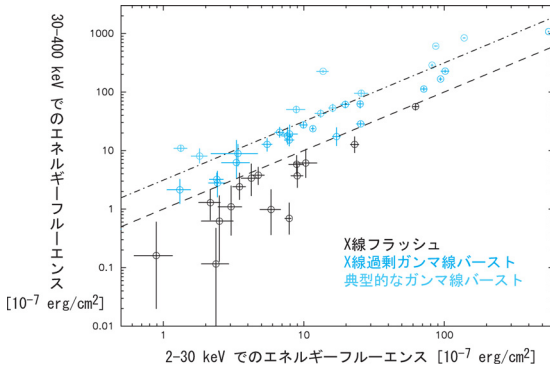


図7 2-30 keV と 30-400 keV でのフルエンスを HETE のバーストについてプロットした図。黒色で示したものが X 線フラッシュ、青色が X 線過剰ガンマ線バースト、そして、水色が典型的なガンマ線バーストに分類されたバースト。点線が X 線フラッシュと X 線過剰ガンマ線バーストの境界で、一点鎖線が X 線過剰ガンマ線バーストと典型的なガンマ線バーストとの境界を示している。

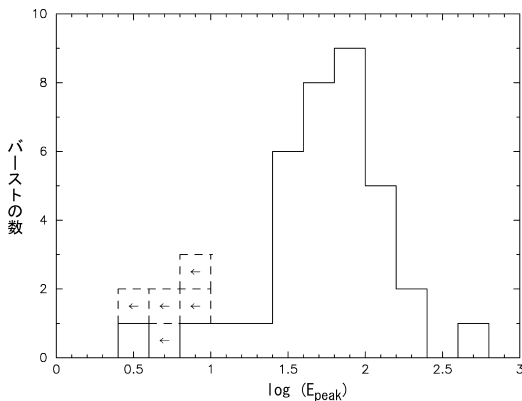


図8 HETE のバーストの E_{peak} エネルギーの分布を常用対数で示した図。左矢印は 99.7% 信頼度の上限値を決めることのできたバースト。数 keV から数百 keV まで連続的に分布していることが分かる。

バーストの数がほぼ同数であるということは注目しに値する結果です。図7は 2-30 keV でのフルエンスと 30-400 keV でのフルエンスで 45 個のバーストをプロットしたものです。非常に良い正の相関があることが分かります。また、X 線フラッシュ、X 線過剰ガンマ線バースト、そして典

型的なガンマ線バーストと連続的な分布をしており、この結果はこれら三つの種類のバーストが同じガンマ線バースト起源であるということを強く示唆します。

図8に HETE の 45 個バーストの時間平均スペクトルから求めた E_{peak} の分布を示します。 E_{peak} の分布は数 keV から数百 keV まで連続な分布をしていることが分かります。BATSE 検出器で検出された強いバーストの E_{peak} 分布は 150-250 keV 付近にピークをもち、その分布の拡がりは 50 keV 程度であるというものでした²¹⁾。HETE の結果は BATSE の結果に反し、ガンマ線バーストはもっと幅広い E_{peak} エネルギーで特徴づけられる個性をもっていると言えます。

7. $E_{\text{peak}}-E_{\text{iso}}$ 関係: X 線フラッシュから GRB までの統一描像

5章の XRF 020903 で触れましたが、現在、注目されている観測的な関係に $E_{\text{peak}}-E_{\text{iso}}$ 関係(別名 Amati relation)があります。図6がこの関係を示したもので、横軸に等方放射を仮定したときの全放射エネルギー (E_{iso}) をとり、縦軸にガンマ線バースト静止系での E_{peak} エネルギー(観測から求めた E_{peak} を $(1+z)$ 倍したもの; 以後ガンマ線バースト静止系での E_{peak} エネルギーという意味で $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ と書きます)をとります。この図には、Amati らが BeppoSAX のバーストで最初に発見したときのデータ点に加えて、HETE のバーストで赤方偏移が測られているものについてのものであります¹⁹⁾。データのばらつきはありますが、非常に良い相関があることがわかります。また、HETE のバーストには三つ赤方偏移(一つは上限値)が測られている X 線フラッシュがあり、これらもよくこの関係式にのっています。この関係は 3 桁にも及ぶ $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ エネルギーと 7 桁にも及ぶ等方放射エネルギーの違いを统一的に説明できる理論モデルがガンマ線バーストを理解するうえで必要であるということを示唆しています。

典型的なガンマ線バーストは球対称に物質が飛び出すのではなく、ジェットのように、非常に狭い角度に絞られて噴出しているという考え方が一般的です。そして、ジェット状に飛び出す物質が光速に近い速度で運動し、それらがガンマ線バーストの光源となっています。そのため相対論的な速度で運動する光源を運動方向から観測すると放射エネルギーが高く、見かけの明るさも明るくなるという相対論的ビーミング*3という効果が重要となってきます。

図6の点線で示した直線は $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ が $E_{\text{iso}}^{(1/2)}$ という関係です。ガンマ線バーストの標準理論モデルである fireball モデルによると、 E_{iso} はビーミング因子 δ の2乗の依存性があります。一方、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ エネルギーは相対論的な速度で運動する物質から放射されるものが観測されるため、相対論的ビーミングの効果により、ビーミング因子の1乗の依存性があると考えられます。これら二つのことを組み合わせると1/2乗という関係が説明できます。では、3桁にもわたる $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ の違いはどのように説明されるのでしょうか。ここでは、X線フラッシュからガンマ線バーストまでを統一的に理解できる理論モデルを二つ紹介します。

一つ目は山崎氏らによって提案されている、ジェットを斜めから見ているために、 E_{peak} が低く観測されるという「off-axis ジェットモデル」です²²⁾。この off-axis ジェットモデルによると、典型的なガンマ線バーストはジェットを真正面から観測したものであるのに対し、X線フラッシュは細いジェットをジェットの軸から外れた方向から観測しているため、相対論的ビーミングの効果により、真正面から観測した場合に比べて E_{peak} が低く観測されるというものです。このモデルでは $E_{\text{peak}}-E_{\text{iso}}$ 関係についても、ユニークな予言があります。相対論的ビーミングのために、ジェットを

斜めから観測した場合、 E_{iso} はドップラー因子の3乗の依存があります。一方、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ エネルギーはビーミング因子の1乗の依存ですので、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ は E_{iso} の1/3乗の依存をもつことになります。つまり、ジェットを正面から観測している時は1/2乗の依存ですが、ジェットを斜めから観測し始めると、依存性が1/3乗に変化します。現在のデータ数ではこのことを確認することはできませんが、近い将来、可能になるかもしれません。もう一つ、このモデルから予想されることとしては、X線フラッシュは典型的なガンマ線バーストに比べて距離が近くないといけないということです。ガンマ線バーストのイベント数はソースの占める体積（つまり距離の3乗）に観測できる方向の立体角を掛けた量で表せます。X線フラッシュの $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ エネルギーは数 keV ですので、その低い $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ エネルギーを相対論的ビーミングによる効果であると解釈し、典型的なガンマ線バーストの値を適当に用いると、X線フラッシュとして観測される立体角が計算できます。HETEの結果からX線フラッシュの数と典型的なガンマ線バーストの数はほぼ同数であると述べました。この結果を用いるとX線フラッシュと典型的なガンマ線バーストの距離の比が1対4程度になることが分かります。つまりHETEの結果が正しいとすると、off-axis ジェットモデルによるX線フラッシュの描像では典型的なガンマ線バーストよりも近くで起こったものしか、観測できないということになります。

二つ目のモデルはジェットの開き角が異なっているために $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ の違いが現れるという HETE のチームメンバーでもあるシカゴ大学の Lamb らによって提案されているモデルです²³⁾。このモデルは二つの観測事実を使います。一つは $E_{\text{peak}}-E_{\text{iso}}$ 関係で、もう一つは Frail らによって発見された

*3 ビーミング因子は $\delta=1/(\Gamma(1-\beta \cos \theta))$ (ここで $\beta=V/c$ (V は光源の速度, c は光速), Γ がローレンツ因子, θ が観測者と光源の運動方向との間の角度) で表される量で, $\cos \theta=\beta$, つまり θ が小さい場合は $\delta=\Gamma$ となるが, θ が90度のときは $\delta=1/\Gamma$ となる。詳しくは「天体高エネルギー現象」高原文郎著, 岩波書店。

観測結果²⁴⁾で、ジェットブレイクと呼ばれる残光の光度曲線のべきの急激な変化から求まるジェットの開き角を用いて、等方放射を仮定して計算している E_{iso} を補正すると、立体角を補正した全放射エネルギー E_{gamma} は 10^{51} erg によく一致するというものです。また、Ghirlanda らは E_{gamma} と $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ との間に非常に良い相関があるという報告をしています²⁵⁾。ジェットの開き角を θ とすると、Frail らの関係は $E_{\text{gamma}} \propto E_{\text{iso}} \theta^2$ と表せます。 $E_{\text{peak}}^{\text{src}} \propto E_{\text{iso}}^{(1/2)}$ を代入すると、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ は $E_{\text{gamma}}^{(1/2)} \theta^{-1}$ となります。 E_{gamma} は 10^{51} erg という定数ですので、結局 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ は θ^{-1} に比例するという関係が導けます。つまり、 $E_{\text{peak}}^{\text{src}}$ が低い X 線フラッシュは、細いジェットではなく、超新星爆発のような球対称に近い爆発現象であるというものです。

ほかにも、内部構造をもつジェットを少し外れた角度から観測した場合に X 線フラッシュとして観測されるというモデル (Structured jet モデル²⁶⁾) や、非常に遠方で起こった典型的なガンマ線バーストが赤方偏移して X 線フラッシュとして観測されるという高赤方偏移説¹²⁾などいろいろあります。一つ確かなことは、典型的なガンマ線バーストだけの観測では理解が進まなかったバースト本体のモデルが、X 線フラッシュ研究の進展によって、急速に進んでいるということです。

8. HETE と Swift の共同観測の重要性

2004 年 11 月 20 日、ガンマ線バースト探査衛星の後継機である Swift 衛星 (以降 Swift) が打ち上がりました。Swift の大きな特徴はガンマ線バーストの到来方向を決めるガンマ線検出器のほかに X 線 (X-Ray Telescope; XRT) と可視/紫外線 (UV/Optical Telescope; UVOT) の望遠鏡も搭載している点です。Swift はガンマ線バーストの検出、位置決定、そして衛星の姿勢制御を自動で行うため、搭載されている X 線と可視/紫外望遠鏡による残光観測がバースト発生から数十秒から数

百秒で開始できます。

こう書くと、Swift が軌道にある今、もう HETE は必要ないのではと考えられるかもしれませんが、そんなことは“全く”ありません。Swift のガンマ線検出器である Burst Alert Telescope (BAT) は $5,000 \text{ cm}^2$ という巨大な面積をもつ検出器ではありますが、弱点は 15–150 keV という狭い観測エネルギー範囲です。この記事で強調してきたように、ガンマ線バーストを理解するためには幅広いエネルギー範囲でガンマ線バーストを観測することが非常に重要です。また、BAT のエネルギー範囲では、HETE で面白い結果が次々と出てきている X 線フラッシュ本体の詳細な分光観測ができません。さらに Swift XRT の X 線 CCD を冷却するための装置が働かないというトラブルがあったために、現在、衛星の姿勢に対して大きな制限があります。地上の観測者が観測しやすい反太陽方向で BAT がバーストを検出することが少ないのはこのためです。一方 HETE の検出器はつねに反太陽方向を向いていますので、地上の観測者にとって好都合な位置でバーストを捕らえることができます。

そこで重要になってくるのが HETE と Swift の共同観測です。2005 年 2 月 15 日に Swift BAT 検出器が観測した X 線フラッシュ (XRT 050215b) は、幸運にも HETE の FREGATE 検出器でも同時に観測されました。BAT だけのデータでは E_{peak} エネルギーを決めることができなかったため、このバーストの分類ができませんでした。HETE FREGATE 検出器のデータを組み合わせることにより、 E_{peak} のエネルギーが決定でき、X 線フラッシュであることが明らかになりました²⁷⁾。また、このバーストは Swift の XRT と UVOT によって残光が観測されており、長期間にわたる残光のモニター観測も行われています。また、2005 年 4 月 8 日に HETE が観測し、バーストの位置速報にも成功したバーストではバースト発生後、約 43 分後に Swift XRT/UVOT をバー

スト位置に向けることができ、X線残光が検出されています。このX線天体はバースト発生後1週間経った現在もSwiftによる追観測が行われています。HETEのバーストであったために、非常に多くの追観測が地上観測者によって行われており、GCNサーキュラーには40もの観測結果が報告されています。Swiftチームもこの結果を受け、地上観測者にとって好都合な反太陽方向でバーストを検出することの重要性を再認識し、現在できる限りの時間、BATを反太陽方向に向けるよう努力しています。

これらの例が示すように今後ガンマ線バースト研究の進展にとって必要となってくるのは、HETEとSwiftの協調です。SwiftのBAT検出器ではカバーできないことがHETEでカバーされ、HETEではできない詳細な残光観測がSwiftによって行われるということが理想です。特にHETEが捕らえる非常に低い E_{peak} エネルギーをもつX線フラッシュに関しては、即座にSwiftが追観測を行うという体制を構築することが急務となっています。

HETEは打ち上げから5年目を迎えようとしています。まだまだ、ガンマ線バースト研究にとっては欠かせない衛星です。今後のHETE-Swiftの活躍にご期待ください。

謝 辞

私の大学院生活の5年間、研究指導をしてくださいました河合誠之先生には、このような最高の研究環境を私に与えてくださったこと、そしてさまざまな指導をしてくださったことを本当に感謝しております。HETEのWXM検出器の製作やHETEの運用に無限の時間をかけてくださり、また、私にさまざまな指導をしてくださいました、松岡 勝先生、吉田篤正先生、白崎裕治氏、玉川徹氏、そして、鳥居研一氏に感謝いたします。また、WXM検出器のエネルギー応答関数の構築のために1年間、たいへんお世話になりましたロス

アラモス国立研究所のEdward E. Fenimore氏、ガンマ線バーストの研究についていろいろとアドバイスをいただきました。シカゴ大学のDonald Q. Lamb氏に感謝いたします。

off-axis ジェットモデルに関してコメントをくださいました山崎 了氏に感謝いたします。

最後に、HETEの打ち上げ後からチームに加わったにもかかわらず、私のことを「家族の一員」のように迎えてくれた、暖かいHETEチームメンバー全員に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Paciasas W.S., et al., 1999, ApJS 122, 465
- 2) Schilling G., Greenberg-Slovin, N. (Translator), 2002, "Flash!: The Hunt for the Biggest Explosions in the Universe" (Cambridge University Press, UK)
- 3) Costa E., et al., 1997, Nature 387, 783
- 4) van Paradijs J., et al., 1997, Nature 386, 686
- 5) Bloom J. S., Djorgovski S. G., Kulkarni S. R., 2001, ApJ 554, 678
- 6) Vanderspek R., et al., 2004, ApJ 617, 1251
- 7) Greiner J., et al., 2003, GCN Circ. 2020
- 8) Stanek L. Z., et al., 2003, ApJL 591, 17
- 9) Hjorth J., et al., 2003, Nature 423, 847
- 10) Yoshida A., et al., 1989, PASJ 41, 509
- 11) Strohmayer T. E., et al., 1998, ApJ 500, 873
- 12) Heise J., et al., 2001, in proceeding of "Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era," eds. Costa, E., Frontera, F., Hjorth, J. (Berlin Heidelberg: Springer, 2001) p. 16 (astro-ph/0111246)
- 13) Kippen R. M., et al., 2001, in proceeding of "Gamma-Ray Burst and Afterglow Astronomy 2001," eds. Ricker, G. R., Vanderspek, R. K. (New York; AIP 662) p. 244 (astro-ph/0203114)
- 14) Sakamoto T., et al., 2004, ApJ 602, 875
- 15) Soderberg A. M., et al., 2003 GCN Circ. 1554
- 16) Berger E., et al., 2003 GCN Circ. 1555
- 17) Soderberg A. M., 2004, ApJ 606, 994
- 18) Amati L., et al., 2002, A&A 390, 81
- 19) Lam D. Q., et al., in preparation
- 20) Sakamoto T., et al., 2005, ApJ, in press
- 21) Preece R. D., et al., 1998, ApJ 496, 849
- 22) Yamazaki R., Ioka K., Nakamura T., 2002, ApJL 571, 31
- 23) Lamb D. Q., Donaghy T. Q., Graziani C., 2005, ApJ,

submitted (astro-ph/0312634)

- 24) Frail D. A., et al., 2001, ApJL 562, 55
 25) Ghirlanda G., Ghisellini G., Lazzati D., 2004, ApJ 616, 331
 26) Rossi E., Lazzati D., Rees M. J., 2002, MNRAS 332, 945
 27) Sakamoto et al., GCN Circ. 3062

The Origin of X-Ray Flash Observed by HETE-2

T. SAKAMOTO

*The Astroparticle Physics Laboratory, NASA/
 Goddard Space Flight Center, Code 661, NASA/
 GSFC, Greenbelt, MD 20771*

Abstract: We present the detailed and systematic study of the spectral characteristics of X-ray flashes (XRFs) observed by HETE-2. The XRFs show similar characteristics to the long GRBs except for their lower E_{peak} energies. One of the key observational relation, $E_{\text{peak}}-E_{\text{iso}}$ relation, is discussed as a frame work to understand the gamma-ray burst in an unified picture. We emphasis on the importance of the partnership between HETE and Swift for solving the nature of XRFs.

☆ 解説コラム ☆

宇宙から、とつぜん大量のガンマ線（エネルギーの高い電磁波）が降り注ぐ現象を、ガンマ線バーストと呼びます。ビッグバンを除くと、宇宙で最も大きな爆発現象です。発見から 35 年以上も経ちますが、その正体については、いまだに天文学者を悩ます大きな謎なのです。

最近の観測で、ある種のガンマ線バーストが、重い星の最後の大爆発（超新星爆発）と強く関連している証拠が得られました。しかし、どのようなメカニズムでガンマ線が発生するのか、われわれの理解は不十分と言わざるをえません。

坂本氏の記事では、典型的なガンマ線バーストを調べるだけでなく、その亜種である X 線フラッシュの性質を詳しく調べ比較することにより、ガンマ線バーストの発生メカニズムそのものに迫ることができる、という議論がなされています。

X 線フラッシュというのは、ガンマ線に比べエネルギーの低い X 線を大量に放射する現象です。エネルギーが低いこと以外は、ガンマ線バーストと同じに見えます。この現象をうまく説明するには、ガンマ線バーストを引き起こす、光速近くまで加速された粒子の流れ（ジェット）が、どのような原因で生成されているのかを考察することがカギのようです。今後、観測例を増やすことで、よりはっきりとした結論が出せるでしょう。

X 線やガンマ線は大気にさえぎられるので、残念ながら地球上での観測はできません。衛星を使って、大気圏の外に観測装置を持ち出す必要があります。運用中の HETE-2 衛星や Swift 衛星、今年の夏に打ち上がる日本の X 線天文衛星 Astro-E2 などの活躍に、ガンマ線バースト解明の期待がかけられています。

（理化学研究所研究員 玉川 徹）