

Shock breakout caught on camera

スウィフト衛星がとらえた衝撃の瞬間

Timothy R. Young

宇宙で起こるガンマ線バーストと超新星爆発は、正確にはどういう関係にあるのだろうか。両者はとても密接な関係にあるらしく、ともに強い磁場をもつ中性子星が原因かもしれない。

Nature Vol.442 (992-994)/31 August 2006

宇宙で注目すべき現象が起き、その初めての観測結果が *Nature* 8月31日号の4論文¹⁻⁴に報告されている。非常に活発なガンマ線バーストが、一人前の超新星爆発へと発展したのだ。ガンマ線バーストと超新星爆発が1つの観測機器で観測されたのは今回が初めてで、NASA（米航空宇宙局）のガンマ線バースト観測衛星「スウィフト」によってもたらされた。そして、この2現象が共通の原因で起こるらしいと示唆されたことは、非常に興味深い。

通常、成熟した星が自身の重力を支えるのに十分なエネルギーを熱核融合で作れなくなったときに超新星が起こる。続いて壊滅的で爆発的な崩壊が起こり、星の上層物質が内側に落下する。これが外側へ跳ね返る衝撃波を生み、その衝撃波はおそらく内部の磁場や回転からエネルギーを供給される。そして、「衝撃波の突破」つまり崩壊する星の表面から衝撃波が現れるときにそのエネルギーが解放され、数日間から数か月間にわたってあらゆる周波数の電磁波放射として宇宙空間に送り出される。これが超新星の典型的な特徴である。

比較的短くて急激なガンマ線バースト（GRB）は、ある種の超新星の早期警戒信号だという考えがかなり前からあり、ここ7年でGRBと超新星の組み合わせの候補が3つ見つかった⁵⁻⁸。しかし、GRBと超新星の関係について、決着をつける証拠

は得られていなかった。つまり、GRBから、超新星であることを示すあらゆる周波数の電磁波放射へと発展するようすはまだ目撃されていない。実際のところ、超新星の衝撃波の突破の瞬間を観測した例はこれまでなかった。

今回、2006年2月18日に突然現れた天体（超新星SN2006ajともガンマ線バーストGRB060218ともよばれている）がいくつかの波長で観測され¹⁻⁴、こうした状況が変化した。この爆発する天体が、超新星に典型的なわずかに球面からずれた衝撃波と、GRBの特徴であるジェットのような物質の流れの両方を出したことを、4編の論文すべてが述べている。

Campanaたち¹はX線データを使って、Pianたち²は可視光の光度曲線を使って、この星はコンパクトな状態で爆発した「ウォルフ・ライエ星」で、水素やヘリウムは含まれていなかったことを示した。この同定結果は、Mazzaliたち³が報告したコンピューターモデルによって支持された。X線データに基づき、200万度のガスの殻の広がり方を推定した結果、母天体の半径は1200万キロに絞り込まれた。これは、典型的な爆発する星の半径よりもかなり小さい¹。可視光の光度曲線とスペクトルは、炭素と酸素からなる裸の中心核の爆発に特有なものだった²。

Campanaたち¹によると、今回の現象のX線スペクトルには2つの異なる成分があった。1つはわ

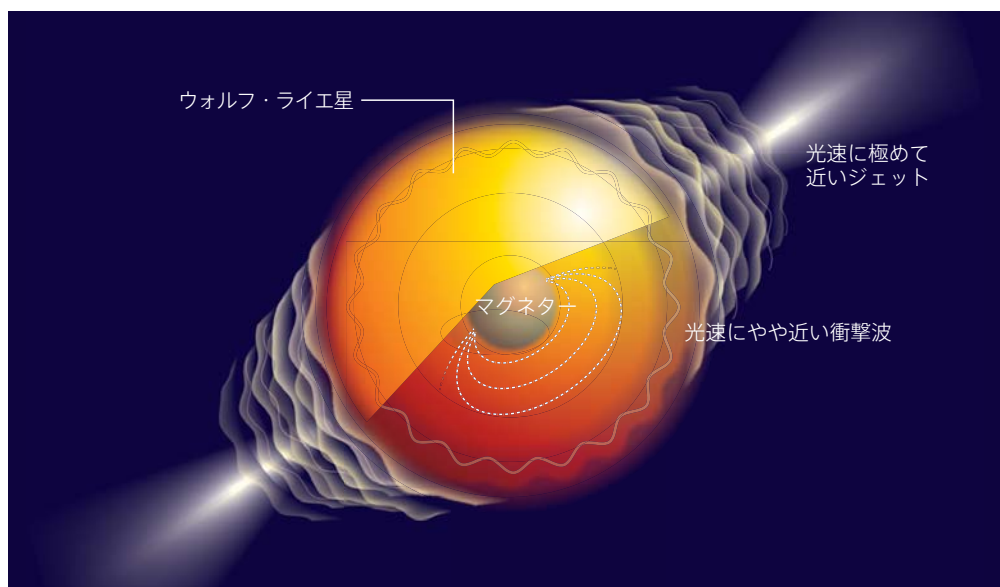


図1：ガンマ線バーストと超新星の関係。SN2006aj あるいは GRB060218 とよばれる天体を NASA のガンマ線バースト観測衛星「スウィフト」と地上から追跡観測した結果、ガンマ線バーストと超新星の原因は共通で、崩壊していくウォルフ・ライエ星と考えられる¹⁻⁴。この天体は、マグネターとよばれる強い磁場をもつコンパクトな天体がその中心部にあり、光速に極めて近いジェット（GRB）と光速にやや近い速度で広がる衝撃波の両方を作る磁気的エネルギーを供給しているのかもしれない。より速く進展するガンマ線バーストのわずかに後に、つぶれていく星の表面を衝撃波が突破するとき、超新星爆発の典型的な特徴である、あらゆる周波数の電磁波放射が生まれる。

ずかに球面からずれた熱的成分で、これは超新星の衝撃波が星の外部へ出るときの加熱効果によって説明できる可能性が高い。もう1つは、鋭い指向性をもつ非熱的X線ジェットだ。Campanaたちは、このジェットはGRBの標準的なメカニズムによるものとみなすことができると考えている。すなわち、GRBは、光速よりほんの1000分の1パーセント遅い速度で運動する極めて光速に近いガスが発する電磁波放射である、というものだ。この放射は、爆発する星の回転軸に沿って起こる可能性が高い。

一方、Pianたち²とSoderbergたち⁴の観測によると、GRB060218のX線フラックスのエネルギー・ピークは5キロ電子ボルト（keV）で、これはX線スペクトルの低エネルギー端であった。標準的で活発なGRBによる放射エネルギーのピークは、250keV付近である。だから、観測された事象は低エネルギーの「X線フラッシュ」と分類され、標準的なGRBモデルとは矛盾するかもしれない。

興味深いことにSoderbergたち⁴も、観測した無線周波数のデータの中に、光速に極めて近いジェットによるものではなく、光速の90%というやや相対論的

な速度で広がる残骸が原因とみられる特徴を見いだした。これもまた、おそらく超新星衝撃波の特徴である。X線データからわかるジェットのエネルギーは、GRB060218が通常よりも全体としては弱かったことを示した¹。しかし、衝撃波のエネルギー⁴は、超新星は通常よりも明るかったことを意味するようだ。もし、今回の現象が地球からもっと遠かったら気づかれないままだっただろう。実際、今回のGRBはこれまでに観測された中で2番目に地球に近いものだった。それゆえ、Soderbergたち⁴とPianたち²は両者とも、弱い超新星と関係している弱いGRBは、これまで考えられていたよりも頻繁に発生しているが、単に見落とされているだけなのだと推測している。

GRBと超新星は関連しているものの、今まで気づかれなかったという主張の別の証拠は、GRB060218の可視光の光度である。現れてから約2日後、バーストの可視光の残光がおさまったところ、全体の光度が再び目を見張るほど上昇し始めた。この追加の発光は超新星に特有のもので、最初の爆発で作られた放射線のニッケル56原子核がコバルト56原子核に崩壊して起こる。このプロセスは物質を再加熱し、可視

光の周波数で輝かせる。光度曲線におけるこうした一時的な増光は、GRBでも稀なことではない。距離がわかっている21個のGRBの可視光残光の研究では、うち9個が大きく増光したことがわかっている⁹。おそらく、これらはGRBに伴って起こる超新星が、GRBの残光をかるうじて上回った例なのだろう。

爆発で飛び散る星の残がいからは、残がいができるメカニズムについて豊富な情報が得られるが、3日後、地上にある光学望遠鏡も超新星爆発の残がいを検出した。光のスペクトルに水素とヘリウムが存在する形跡がなかったことから、この超新星はIc型と分類され、標準的な爆発よりも飛び散った質量は少ないと分析された^{2,4,10}。

このため今回の観測¹⁻⁴は、GRBを起こすことができる星のタイプを、より質量が少ない星へも広げることになりそうだ。そして、GRBジェットを作ることができる代わりにメカニズムも必要となるかもしれない。これまで、GRBジェットの原因は、ブラックホールへの降着とされてきた。しかし、初期質量がより小さな星はブラックホールを作らず、タイプの異なる極端に小さな天体、すなわち中性子星を作ると考えられている。

Soderbergたち⁴は、「マグネター」とよばれる磁場の強い中性子星が今回観測された爆発の原因ではないかと提案している(図1)。マグネターによる説明は、非熱的X線の観測結果がGRBの通常メカニズムでは説明できないという問題を解決するだろう²⁻⁴。しかし実際、このX線フラックスは典型的なGRB残光にみられるのと似た2成分のべき乗減衰に従うことが観測され^{1,10,11}、特別なメカニズムの必要性には疑問も残る。非熱的成分にエネルギーを与えているのはマグネターであるかもしれないが、それではいったいどんな方法なのだろうか。GRB060218の光度が小さいことから、ジェットが弱く細いものであることか、ジェットが相互作用する残がいほとんどないこと、あるいはその両方であることが示唆される。であれば、より低エネルギーに規模を縮小した従来のGRBのジェットモデルで完全にうまく説明できる。

爆発する星の中で作られる衝撃波の詳細な形状や力学については、疑問がまだ残っている。GRB060218の場合、ジェットが弱かったからこそ、隠れていた超新星が明らかになったようだ¹²。一

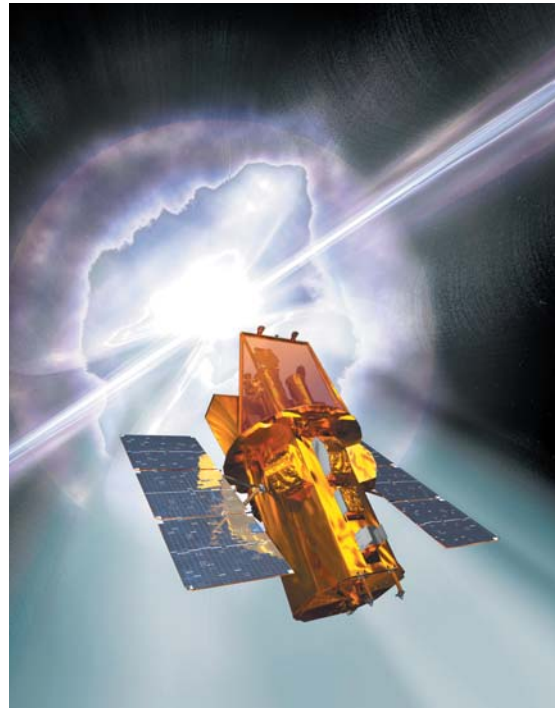


図2: ガンマ線バースト観測衛星「スウィフト」のイメージイラスト。

般的にいえば、光速に近いジェットが優勢なら、超新星はGRBの可視光残光の中に埋もれてしまうだろう。あるいは、この星の資源がジェットにエネルギーを与えるために使い果たされたら、超新星は起こらないのかもしれない。その場合、放出された物質のほとんどは、中心の動力源から2つの円すい形で噴き出すのが見られるだろう。これは標準的なGRBである。一方、(ほぼ)球形の衝撃波が優勢なら、超新星が見られる。

今はっきりしていることは、少なくともGRBの一部は、巨大な星の爆発が迫っていることを警告するために発せられた警報だということだ。それは、私たちが宇宙で最も大きな爆発についてさらに知るためには、望遠鏡をどちらに向ければよいかを教えてください。■

Timothy R. Young、ノースダコタ大学 (米)

1. Campana, S. et al. *Nature* **442**, 1008-1010 (2006).
2. Pian, E. et al. *Nature* **442**, 1011-1013 (2006).
3. Mazzali, P. A. et al. *Nature* **442**, 1018-1020 (2006).
4. Soderberg, A. M. et al. *Nature* **442**, 1014-1017 (2006).
5. Galama, T. J. et al. *Nature* **395**, 670-672 (1998).
6. Hjorth, J. et al. *Nature* **423**, 847-850 (2003).
7. Stanek, K. Z. et al. *Astrophys. J.* **591**, L17-L20 (2003).
8. Malesani, D. et al. *Astrophys. J.* **609**, L5-L8 (2004).
9. Zeh, A., Klose, S. & Hartman, D. H. *Astrophys. J.* **609**, 952-961 (2004).
10. Tagliaferri, G. et al. *Nature* **436**, 985-988 (2005).
11. O'Brien, P. T. et al. preprint available at www.arxiv.org/astro-ph/0603530 (2006).
12. Modjaz, M. et al. *Astrophys. J.* **645**, L21-L24 (2006).