

宇宙最大の爆発：ガンマ線バースト

Keyword: ガンマ線バースト

1. 宇宙で最も激しい爆発現象

太陽が解放できるエネルギーの最大値は、理論上 $E = Mc^2$ より 10^{54} erg 程度である。実際には、その寿命 100 億年をかけて、この内の 1% 程度を光やニュートリノとして解放しているにすぎない。一方ガンマ線バーストとは、 $10^{52} - 10^{54}$ erg のエネルギー*1 をわずか数十秒の間に、ガンマ線（典型的には 0.1-1 MeV の光子）として放つ天体現象である。遠方銀河の巨星が一生の最後に起こす爆発で、その中心核がブラックホールへと崩壊し、そこから相対論的ジェットを噴き出していると標準的には考えられている。

観測的には 1 日に数回、突発的に宇宙のある方向からガンマ線が降り注ぐ事象である。1967 年の核実験監視衛星 Vela による発見当時は、これが何を意味しているのか全くわからなかった。しかし 1997 年の BeppoSAX 衛星による X 線残光の発見を契機に、上記の描像が確立していくこととなった。観測と理論の両面からこの現象の理解が進んでいく歴史的経緯には、推理小説を読みとくような面白さがあり、科学史においても教訓的な実例となっている。

とはいえ、ガンマ線バーストには未だ多くの謎が残されており、観測的にも数年おきに新たな進展が得られ続けている。本稿では上記の歴史的経緯は省略し、現在の標準的な描像と理論的な課題について述べたい。

2. 天文学的課題：親星

ガンマ線バーストはその継続時間分布から、数十秒の長さを持つ長い種族と、0.1 秒程度の短い種族とに分けられる。長い種族のバーストが起きた数日後に、同じ位置からの超新星を確認した例がこれまでに数回ある。しかし全てのバーストに超新星が付随しているかどうかはわからない。遠方で暗すぎる場合や、残光の可視光放射が強すぎて、超新星が確認できないこともあるだろう。いずれにせよ、巨星の重力崩壊が長いバーストの起源の第一候補に挙げられる。バーストに付随する超新星は、通常のものよりも速い膨張速度を持ち、その放出エネルギーも一桁大きい値を持っていることから、極超新星と呼ばれている。極超新星の親星の候補は、数十太陽質量の星がその強い星風によって水素やヘリウムの外層を失った天体で、重力崩壊直前には 10^{10} cm 程度の比較的小さな半径を持つ。

後で述べるように、中心のブラックホールはローレンツ因子で 100 を超えるような相対論的ジェットを駆動しなければならない（図 1 参照）。ジェット駆動の物理機構は全く解明されていないが、ブラックホールの周りに降り積も

ったガスからなる、降着円盤の形成が必須であろう。この円盤から放射されるニュートリノのエネルギーの一部を輻射に転換して、その圧力でジェットを加速するモデルや、回転によって増幅された磁場がジェットを駆動するモデルなどが提案されている。バーストの継続時間はブラックホールへの自由落下時間程度だとすれば、外層を失った星の半径は観測と合致している。降着円盤を形成するためには角運動量が必要で、爆発直前まで星の回転を保つ必要がある。ところが、星風による外層の放出は角運動量の損失を伴うことが問題となる。金属量が低い親星では輻射と原子の相互作用が弱いため、星風が抑えられ、星の回転を保つことができる。しかし、この場合、大きな星の外層が残ってしまい、ジェットが星を突き破れなくなってしまう。

観測されているガンマ線バーストの発生頻度は、通常の超新星の 20 万分の 1 以下、極超新星の千分の 1 以下である。ジェットが地球を向いていないバーストを考慮すれば、実際の発生率は直接観測による値の 100 倍程になるかもしれないが、いずれにせよ、かなり稀な現象である。大部分の星の進化とは異なった特殊な進化を辿った星、例えば星内部の対流が星全体をかき混ぜていたり、連星における質量輸送やコアの合体を経ていたりする星が、ガンマ線バーストを起こすのかもしれない。

最近の新しい話題としては、継続時間が 1 万秒を超えるような、Ultra Long ガンマ線バーストの観測的な確立が挙げられる。このような長い継続時間は、半径の大きな星の外層の存在を示唆している。これまで、外層が残った星ではガンマ線バーストは実現しないと予想されていたが、これを覆す観測結果となっている。ガス降着率の変化に敏感な、輻射の圧力が主役のジェットモデルでは、後半の降着

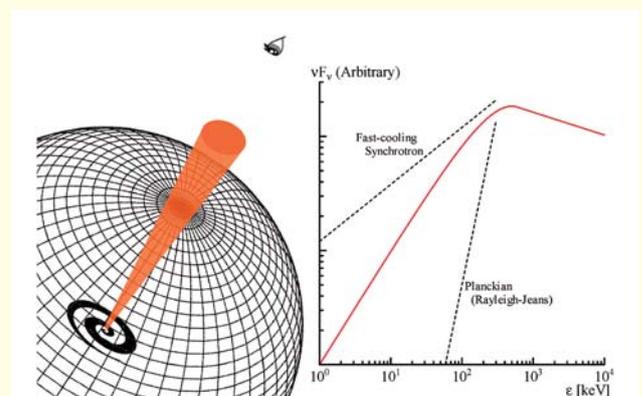


図 1 (左) 巨星中心ブラックホールから相対論的ジェットが噴き出す概念図、(右) 典型的なガンマ線放射のスペクトル。

率が低い時期には活動を止めてしまうため、磁場によるジェット加速モデルの方が有力とされている。

一方、短い種族のガンマ線バーストは、中性子星連星の合体が、その源として有力視されている。将来KAGRAなどの重力波望遠鏡によって連星中性子星合体の重力波が検出されれば、その後に放出されるはずの電磁波の追観測によって、対応天体の同定を目指すことになる。その際にバーストの兆候が確認できるのではと大いに期待されている。ただし多くの場合、ジェットを横から見ることとなり、直接にガンマ線が観測されるのは難しいかもしれない。

3. 宇宙物理学的課題：放射過程

高エネルギーのガンマ線が、電子・陽電子対生成を起さずに光源から抜け出るためには、光源が我々の方に向かってローレンツ因子で100以上（Fermi衛星の観測例では1,000にまで達する）の相対論的速度で運動していなければならない。相対論的ビーミングによって光子の運動方向が揃うことで、ガンマ線の衝突を回避できる。この相対論的なジェットの運動エネルギーの一部をガンマ線へと変換していると期待されるが、そのメカニズムは全く分かっていない。

図1にあるようにガンマ線スペクトルは、0.1-1 MeVのピークを境に、低エネルギー側と高エネルギー側の2つの冪乗スペクトルで表される。最近のFermi衛星の観測により、高エネルギー側はGeV領域までスペクトルが伸びているのが確認されている。こうした非熱的なエネルギー分布は、衝撃波などで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射で説明するのが、宇宙物理学では標準的である。しかし、図1にあるように、低エネルギー側のスペクトルは単純なシンクロトロン放射モデルの予言よりも急なスペクトルとなる。また、ジェット内部に発生する衝撃波では、運動エネルギーをガンマ線に変える効率が非常に悪くなると予想される。

代替モデルとして、光球モデルが提案されており、ここでは熱的な光子がジェットの密度が薄くなった時点で解放されると考えている。このモデルではガンマ線のエネルギー解放効率が高く、光子の典型的エネルギーがMeV程度になるのも自然に説明できる。しかし、図1にあるように、典型的な低エネルギースペクトルは熱的なプランク分布よりも緩やかな分布となっている。また、GeVにまで達する高エネルギー光子を生成するのも難しい。もう一点、興味深いことに、日本のIKAROS衛星の偏光検出器GAPが、ガンマ線バーストから数十%もの偏光検出を最近報告した。こうした高い偏光度は、光球モデルでは実現が難しく、

シンクロトロン放射を示唆しているのかもしれない。

ガンマ線のエネルギー解放機構として、衝撃波に替わり、磁場や乱流の役割などが議論されているが、決め手を欠いているのが現状である。

数十秒のガンマ線放射に続き、X線や可視光で緩やかに減光していく残光が観測されている。星を飛び出したガスは、周囲の星間物質に相対論的衝撃波を作る。これを外部衝撃波と呼ぶが、時間と共に徐々に減速していく。この衝撃波で加速された電子からのシンクロトロン放射が、残光の標準モデルである。残光の発見以降、この標準モデルは、観測をよく説明できるとされてきた。しかし、2004年に打ち上げられたSwift衛星は、残光初期の複雑な振る舞いを明らかにした。初期残光は予想よりも暗く、エネルギー解放の時間スケールも数千秒と、長いものであった。また、X線と可視光では、減光の振る舞いが異なることが多く、単純なモデルでは現象を説明できなくなってしまった。これ以降、逆行衝撃波の寄与や、二重の層構造を持つジェットなど、モデルを複雑化する理論的試みが続いたが、統一の描像を得るには至っていない。

Fermi衛星の大きな成果は、GeV領域で残光を確認したことである。最新の結果によると、ジェットが充分減速していると思われる後期残光から、数十GeVもの高エネルギー光子を検出している。これはシンクロトロン放射の理論的境界を超えたエネルギーとなっている。それにも関わらず、X線からGeVガンマ線まで、スムーズな冪乗のスペクトルを示しており、外部衝撃波の時間発展、あるいは放射過程の再検討を強めている。

紙面の関係で割愛したが、ガンマ線バーストは先ほども挙げた将来の重力波観測に加え、最高エネルギー宇宙線の加速や、ニュートリノ放射の可能性など、他にも話題が豊富な天体である。圧倒的な明るさを用いて遠方宇宙の電離度を探り、星形成史に制限を加えたり、ローレンツ不変性の検証などにも使われたりしている。今後も多波長・多粒子での観測が大いに期待されている天体現象である。

参考文献

- 1) P. Mészáros: Rep. Prog. Phys. **69** (2006) 2259.
- 2) 河合誠之, 浅野勝晃:『ガンマ線バースト』(日本評論社) 出版準備中.

浅野勝晃(東京大学宇宙線研究所)

(2013年10月19日原稿受付)

*1 ただしこれは等方放射を仮定して求めた値なので、実際の解放エネルギーはジェット状の幾何構造を考慮すると、この1%程度かもしれない。