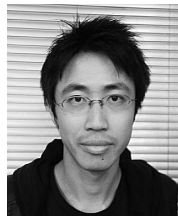


大質量星の終焉時に発生するガンマ線バーストの相対論的ジェット計算



長 倉 洋 樹

〈京都大学基礎物理学研究所 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

〈早稲田大学理工学術院 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1〉

e-mail: hiroki@heap.phys.waseda.ac.jp

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象である。しかしその全貌は不明であり、観測および理論的な研究が現在でも活発に行われている。本稿では、これまでの GRB の観測および理論研究の現状について概観し、筆者が最近行った大質量星の終焉から発生する GRB の数値シミュレーションによって得られた結果について紹介する。

1. はじめに

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; 通称 GRB) は非常に強烈なガンマ線が数ミリ秒から数百秒にかけて地球上に降り注いでくる突発天体現象である。1990年代の BATSE および BeppoSAX 衛星の活躍により GRB の観測数が劇的に増え、さらに母銀河の同定が成功したことによって GRB の多くは宇宙論的距離 (赤方偏移 $z \sim 1$) で起こっていることが明らかとなった^{1), 2)}。また、発生源までの距離が測れたことで、GRB そのものがどのぐらいのエネルギーを放出しているかを見積もることができ、これが約 10^{51-52} erg 程度にもなることがわかった*1。これは太陽が一生涯かけて放出するエネルギーと同じか、もしくはそれ以上であり、とてつもない高エネルギー現象であることを意味している。そのため、GRB は天文学としての興味だけではなく、高エネルギー物理学の発展に大きく貢献すると期待されており、さ

まざまな分野からも注目を集めている。また後に述べるように、GRB は大質量星の爆発的終焉や、ブラックホールや中性子星といった非常に強重力でかつコンパクトな天体と密接に関連していると考えられているため、次世代の重力波・ニュートリノ天文学のパイオニア的な存在になるかもしれない。このように、GRB の研究は天文学・物理学の進展において非常に重要な研究対象となっている。しかしながら GRB の研究は観測、理論ともに発展してはいるものの、未解決問題も数多く残されている。どのような天体が GRB を引き起こしているのか？ さらにはガンマ線の生成機構はいったい何なのか？ このような根本的な問題すらも未解決のままであり、現在も活発な研究が行われている。

本稿では、GRB の観測や理論モデルを概観するとともに、最近筆者が行った崩壊中の大質量星を伝播する相対論的なジェットの流体計算および輻射計算の結果を紹介する。最近の GRB の理論

*1 GRB をわれわれが観測するときのエネルギーフラックスは大体 10^{-6} erg/cm²/s 程度。これに距離が宇宙論適距離 (大体 100 億光年ぐらい) のところで起こっていると考えると、光度は $L = 4\pi d^2 F \sim 10^{51}$ erg/s 程度となる (ここでは大ざっぱな見積りのため等方的な放射であることを仮定)。これが数秒~100 秒ぐらい継続するので全体の放射されたエネルギーは $E \sim 10^{51-53}$ erg となる。

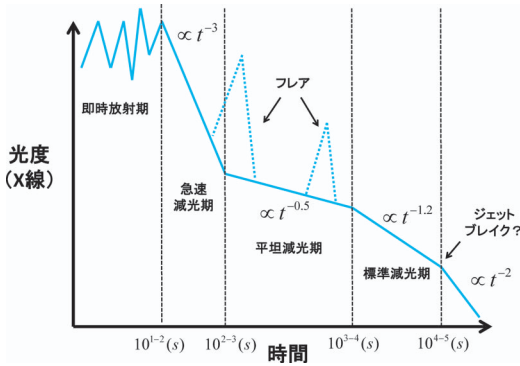


図1 GRBの典型的なX線の光度曲線.

的な研究の現状については³⁾も参照されたい。まずは重要となるGRBの観測的特徴や理論モデルについて次項で解説する。

2. GRBの観測的特徴

GRBはその名のとおりガンマ線がバースト的に降り注いでくる現象である。典型的には数十～数百 keV (keV=10³ eV) 程度のガンマ線が多く検出される。GRBは各々のバーストで多種多様の振舞いをみせる複雑な現象であるが、観測数が増えたことで徐々に共通の特徴や傾向が見え、さまざまな分類法が確立している。中でも重要な分類の一つに、即時放射中の(図1と以下の解説参照)継続時間とスペクトルの性質から分類する方法がある⁴⁾。BATSEの観測によると、GRBは継続時間が長いもの(2秒以上のもの)と短いものの二極性の分布をしていて、それぞれLong GRB(以後LGRB)、Short GRB(以後SGRB)と呼び、スペクトルもSGRBのほうがLGRBよりもハードの傾向がある⁵⁾。*2。またSwift衛星以降、GRBの母銀河の同定の数が著しく増え、SGRB

とLGRBの母銀河は違ったタイプのものであることもわかってきた。具体的にはLGRBは星形成が活発な銀河で起こりSGRBは比較的さまざまな銀河で起こっている。特に楕円銀河のような古い銀河でもSGRBは観測されており、LGRBとは明らかに違った環境のもとで形成されているようである(これまでLGRBが楕円銀河で起こったという観測はない)。そのため、これら二つの種族は違った起源の現象であるという解釈をしているのが主流である。現在のところ、LGRBは大質量星の終焉から、SGRBはコンパクト星(例えば中性子星やブラックホール)連星の合体から形成されているという説が最も有力な理論的描写である。このように考える根拠は後述する。

GRBは大量のガンマ線が一定期間放射された後に、X線やその他の低エネルギーの電磁波が残光として輝き続ける特徴をもっている。図1にGRBの典型的なX線の光度曲線を載せた。縦軸が光度の大きさと横軸が観測時間であり共に対数スケールで表記した。即時放射期ではGRB自身が最も明るく輝き、また大きな時間変動が伴う*3。これが終わると急激な減光を示すが、その後ゆっくりと減光する平坦減光期に移る。また、これらのフェイズに頻繁にフレアと呼ばれる急激な光度の上昇が見えることもある。GRB初期残光期に関してはSwift衛星が上がった後に著しく観測が進んだ。Swiftによって得られた初期残光の振舞いは、当時の理論的な予想と大きく外れたもので研究者に衝撃と混乱を与えた。この平坦減光領域の後には標準減光領域に移行し、その後再び減光する様子も時折見られる(よくこの折れ曲がりの部分をジェットブレイクと呼ぶ。なぜ

*2 BATSEの観測によるとSGRBとLGRBの観測比は、SGRB:LGRB=1:3。一方Swiftの観測ではSGRB:LGRB=1:10ぐらいである。SwiftはBATSEに比べて低エネルギー側に検出器の感度が強く、また低エネルギー成分は高エネルギー成分よりも継続時間が長くなる傾向にあるため、統計的にBATSEよりもLGRBの数が増える傾向にあるようである。

*3 図1はX線の光度曲線であり、ガンマ線の光度曲線ではないことに注意。ただ大抵の場合、即時放射期はガンマ線とともにX線でも明るく輝いているので、大ざっぱにX線の光度曲線を見ても即時放射期はわかる。

ジェットブレイクと呼ぶかは後述する)。約半分程度の LGRB は上記のような残光を示す。ただし SGRB は LGRB に比べて残光が暗く、減光し始めるのも早いため観測が難しいこともあり、観測数が少ない。そのため SGRB の残光が図 1 に示したような発展となっているかは現在ではわからない。ただ最近の観測では、SGRB の中でも Extended X-ray Emission と呼ばれる、比較的 X 線の光度が高い状態が続くものも見つかっており、SGRB も残光もまたかなり複雑な振舞いをしてると予想されている⁶⁾。

さて、ここで本稿でも重要となる LGRB と大質量星の終焉と関連している可能性を示唆する観測結果について紹介する。それは一部の GRB が超新星爆発と関連しているという観測証拠である(以後この二つの現象の関連を“GRB-SN connection”と表記する)。おおよそ GRB の残光は、時間のべき乗で減光していくことが経験的に知られており、X 線だけでなくそのほかの低エネルギーの電磁波でも同様である。非常に興味深いことに、GRB 発生から数日もしくは数十日後に、可視光成分が緩やかに明るくなるケースが観測されている。このような可視光領域での増光は超新星爆発による寄与と広く解釈されている。というのも、超新星爆発が起こると衝撃波が星内部を伝わっていく最中に、衝撃波加熱によって元素合成が起こってニッケル (^{56}Ni) を作る。 ^{56}Ni は放射性元素であり大体数日程度でコバルト (^{56}Co) に崩壊を起こす (^{56}Co もまた約 100 日程度で ^{56}Fe に崩

壊する)。崩壊時に、ガンマ線と陽電子を放出するが、陽電子は周囲の電子と対消滅し、これもまたすぐに MeV ($\text{MeV}=10^6$ 電子ボルト) のガンマ線となる。このとき、爆発によって噴出された物質(エジェクターという)が光学的に厚い場合には、ガンマ線のエネルギーをもっている光子がコンプトン散乱され可視光までエネルギーが落ち込み、これがやがてエジェクターを抜けてわれわれに観測されるというのである。われわれの業界では、このような残光中の可視光の増光を「red bump」もしくは「optical bump」と呼んでいる。ただし上記の解釈にも注意が必要で、単純な可視光の増光だけで GRB-SN connection の確実な証拠と断定することに懐疑的な意見をもつ研究者も多い。

ところが、red bump の観測のほかに、実は「確実な！」GRB-SN connection の証拠が見ついている。それはスペクトルから超新星成分を同定したという観測結果である。歴史的に、超新星爆発の観測は数多くなされておられ、それらのスペクトルはよく解析されている。GRB の残光中に red bump が見え、さらにそこを詳しくスペクトルを取ってみると Type Ic の超新星爆発と非常によく似たスペクトルをもつものがあることがわかった⁴⁾。この事実は、少なくとも一部の LGRB は大質量星の終焉から生じているという動かぬ証拠となった⁵⁾。

では、GRB-SN connection を示す超新星爆発には何か特別な性質をもっているのだろうか？ というのもわれわれは GRB を伴わない超新星爆

*4 超新星のタイプはスペクトルの特徴から分類される。水素がないものを Type I とし、あるものを Type II とする。また Type I の中でもケイ素の吸収線が見えるものを Type Ia、ケイ素の吸収線はないがヘリウムの吸収線が見えるものを Type Ib、そしてケイ素もヘリウムの両方の吸収線がないものを Type Ic と分類している。理論的には、Type Ia は炭素爆燃型超新星爆発、その他は重力崩壊型超新星爆発と考えられている。そのため、本稿で関係する超新星爆発は重力崩壊型であることを示唆している。

*5 現在までのところ、スペクトルから GRB と超新星爆発の関連が確認されているものは 6 個程度である。GRB の観測頻度は一日に数発と考えると、この数は非常に少ない。というのもスペクトルがとれるものは GRB までの距離が近いものでなくては難しく(現在のところスペクトルで同定できたもののうちで最も遠いのは赤方偏移で 0.5 程度)、そのために数が少ないのである。red bump のみの観測であれば、赤方偏移が 1 程度のものまで見えるので現在までに約 20 個弱ほど見つまっている⁷⁾。

発を数多く知っており、何か特異なタイプの超新星爆発が GRB を伴うと考えられるためである。結論は、やはり「特異な」超新星爆発であった。

スペクトルの同定のところで述べたが、現在までに見つかっている GRB と関連している超新星爆発のタイプは Type Ic である。ただし普通の Type Ic ではなく、輝線や吸収線が非常にのっぺりとした broad-lined Type Ic と呼ばれるグループに属する*6。輝線や吸収線が広がるのは、エジェクターが高速で膨張していることを意味しているため（大ざっぱに普通の Type Ic 超新星爆発よりも 3 倍程度速い）、これらの超新星爆発は通常の爆発よりも大きな運動エネルギーをもっていることを示唆する。このように爆発エネルギーが大きい（速度が 3 倍程度速いのでエネルギーは 1 桁ぐらい大きい）、よく「極超新星爆発」とも呼ばれる。また興味深いことに、GRB-SN の超新星爆発は金属量の低い環境で起こる傾向があることが観測的に知られている⁸⁾。これらの観測事実から GRB-SN を発生させる親星は、「①金属量が少ない環境で形成され、②水素やヘリウム層はすでに何らかの理由で超新星爆発を起こす直前では親星からなくなっていて、③通常の超新星爆発よりも大きな爆発を引き起こす」といった特徴があるようである。

この章の最後に、一つだけ注意点を述べておきたい。というのは GRB-SN connection をもつ GRB の多くは、他の GRB に比べて非常に“暗い”のである。典型的には、通常の GRB の光度に比べて、10-100 倍程度ガンマ線で暗く、もしかしたら特異な GRB が超新星爆発と関連している可能性がある。文献 3) に述べられているように、多くの場合 GRB というよりも X 線フラッシュ (XRF) が超新星爆発と関連している。そのため

現状では、本稿で紹介する大質量星の崩壊から形成される GRB の理論モデルはあくまでも、GRB の一部の集団に関する研究だと思っていただきたい。次項では、以上で述べた観測結果を基に現在までに最も標準的と思われる GRB の理論モデルについて解説する。

3. GRB の理論的描像

GRB の理論モデルを理解するうえでまず重要となるキーワードは“相対性理論”である。相対性理論は特殊相対性理論と一般相対性理論*7に大別されるが、これら二つとも GRB を理解するうえで必要となる。まずは特殊相対論的な効果の重要性を以下に述べる。

結果から先に述べておくと、GRB は光速の 99.99% 以上の速度で動いているような特殊相対論的ジェットからの放射と考えられている。その理由は以下のとおりである。まず GRB の放射体が止まっていた場合（もしくは光速に比べて十分に遅かった場合）について考えてみる。GRB の即時放射期（図 1 参照）の時間変動のタイムスケールから放射源の典型的なサイズを見積もることができる。しかしその放射体の空間スケールから GRB が発生すると、ガンマ線から電子・陽電子対を形成してしまい、これらが大量に作られすぎることによってガンマ線が外に出られなくなるという問題が生じる（コンパクトネス問題という）。また、GRB の即時放射時のスペクトルは多くの場合、非熱的であることが観測的に知られており、仮に上記のガンマ線が一部できてきても熱的なスペクトルになってしまうため、これらの結果は観測と矛盾する。では、放射源が特殊相対論的な速度でわれわれに向かって動いていた場合にはどうなるであろうか？ まず光子は青方偏移してわれわれに

*6 厳密にいうと、輝線や吸収線が広くのっぺりしているため、それらの同定が観測的に難しく、Type Ic と完全に同定できていないものもある（例：SN 1998bw）。

*7 特殊相対性理論は主に光速に近い速度で動いている現象を扱う理論。一般相対性理論は重力場の理論であり、ブラックホールや中性子星といったコンパクトな天体を考えるときには一般相対論的效果を考えなくてはならない。

届くことになるので、放射源の止まった系では光子のエネルギーは低くて済む。そのため電子・陽電子対を作るような高エネルギー光子の数は少なくなる。もちろんわれわれの系でみると、多くの光子はガンマ線に見えるが、相対論的ビーミングの効果でほとんどの光子が放射源の動いている方向に向くことにより光子同士が正面衝突する確率が下がり、そういった意味でも電子・陽電子対を形成しづらくなる。また、先ほど即時放射の時間変動から放射サイズを見積もったが、これも放射体の相対論的な伝播の効果で実際の空間スケールよりも小さく見えていることになるため、本来の放射源のサイズは大きくてもよくなる。これらの特殊相対論の効果からガンマ線に対して光学的に薄くなり、非熱的なガンマ線がわれわれに届くことができるようになるのである。

では次に、なぜ放射源はジェット構造をもつと思われているのであろうか^{*8}？ 実はGRB以外にも宇宙にはジェットを伴った天体現象は数多く存在する。その中でも、活動銀河核 (AGN) は相対論的なジェットが噴出していることが観測からもわかっており、さらにこれらはAGN中心に存在すると考えられているブラックホールから何らかの機構でジェットが形成されていると考えられている。GRBもまたブラックホールがかかわっていると考えられているため(後述)、そのアナロジーからGRBもまた相対論的なジェットからの放射であるとみなされている。また、前項のX線の光度曲線のところで、標準減光領域の後に光度曲線が折れ曲がる件について紹介したが、実はこの折れ曲がりこそがGRB放射源がジェットの構造をしていることの間接的証拠ともなっている。というのも光速近くで動いている物体からの放射

は、ほとんどすべての光子が動いている方向に向くせいで、われわれはGRBの放射体のほんの一部の領域からの放射しか見ていないことになる。しかし、徐々に放射体が減速していき、やがて放射体の全体が見えてくると、見える領域がジェットの縁を超えた後に減光が急激になる。これが光度曲線の折れ曲がりをジェットブレイクと名づけている理由である^{*9}。

以上の考察から、相対論的なジェットからGRBを発生させているというモデルは広く受け入れられている。では、そもそもどのようにして高速のジェットを形成することができるのであろうか。このようにジェットを形成するプロセスのことを、われわれはGRBの“中心エンジン”と呼ぶことが多い。中心エンジンが、実は一般相対論的效果が重要となる領域でもあるのである。

宇宙で最も効率的にエネルギーを変換できるプロセスは重力エネルギーの解放である。そのため、GRBの中心エンジンも重力エネルギーがそもそものエネルギーの源で、これを何らかのプロセスで解放し、ジェットを形成しているという考え方が最も自然である。また、GRBほどの巨大なエネルギーを短いタイムスケールで解放するには大きな重力エネルギーを必要とするため、ブラックホールや中性子星といったコンパクトな天体でないと説明がつかない。これが最初の章で述べたGRBがコンパクト星と関連しているという理由である。中心エンジンの物理機構の詳細はいまだに謎であるが、今のところブラックホールと降着円盤の系からニュートリノの対消滅、もしくは磁場の効果でジェットを形成するというモデルと、マグネターと呼ばれる超強磁場中性子星^{*10}からのポインティングフラックスからジェットを形成

^{*8} われわれの業界でのジェットの定義は、「狭く収束した状態で高速で噴出するプラズマの流れ」のことをいう。

^{*9} ただし細かいことをいうと、本当にこの減光度合が急激に変わるところをジェットブレイクと解釈してもいいかは、微妙かもしれない。というのも、この光度曲線の折れ曲がりがジェットブレイクによるものである場合、他の波長の光度曲線でも同様に減光しなくてはならない。しかし、この減光がX線と可視光で一致しないイベントも報告されている⁹⁾。

するという二つのモデルが提案されている。今のところ両者のモデルには一長一短があり、どちらのモデルが正しいかは決着がついていない（もしくは両方のケースがあり、これがGRBの多様性を作り出しているかもしれない）。SGRBもLGRBも起源は違ったものと考えられているが（前項参照）、中心エンジンに関してはブラックホールかマグネターが関連している点では共通である。

現在のところLGRBは大質量星の崩壊、SGRBはコンパクト星の合体という考え方が主流となっている。LGRBが大質量星の崩壊から形成されると考えられている理由は主に三つあって、①GRB-SN connection、②LGRBが星形成の活発な銀河で起こっている、③中心エンジンの継続時間が長い、といった点が挙げられている。①、②に関してはすでに解説したが、③に関して以下に解説しよう。LGRBを形成するモデルに「クラプサーモデル」^{11), 12)}と呼ばれるシナリオがあるのだが（次項で詳しく解説）、これによると大質量星が重力崩壊してブラックホールを形成し、その周りにできる降着円盤とブラックホールの相互作用で中心エンジンを駆動する。GRBの継続時間は中心エンジンの継続時間とリンクすると予想できるため、降着流のタイムスケールが継続時間を決めていると考えられている。このシナリオではブラックホール周りに多くの星の物質が取り巻いているため、降着流の継続時間が長いと期待できる。

これに反してSGRBの場合には、降着時間が短いと考えられるためコンパクト星の合体が都合がよい。というのは、これらのプロセスでもブラックホールと降着流の系が実現されると考えられる

が、ブラックホールの外にある物質の量は大質量星の崩壊の場合に比べて圧倒的に少なくなる¹³⁾。また、楕円銀河でもSGRBは起こることを考えると、大質量星の終焉から形成するとも考えづらいし（銀河が古いため）、これらの観測結果もSGRBがコンパクト星の合体から形成されるという考えを支持するものとなっている。

以上がGRBのおおざっぱな理論的描像である。では次に、筆者がこれまでに行った大質量星の崩壊中を伝播する相対論的なジェットの流れ計算および輻射計算の研究結果について紹介する。

4. 大質量星の終焉からの相対論的ジェットの伝播と熱的放射

筆者の行った研究は主に、先ほど述べたクラプサーモデルに基づいたものとなっている。まずこのモデルについて図2を用いて詳しく説明しよう^{*11)}。太陽よりも10倍以上重たい星は、核融合反応で星の中心に鉄コアを形成するまで進化し、やがて鉄コアが重力崩壊を起こす(Stage 1)。重力崩壊が始まると中心密度が核密度程度まで急激に高くなり、“バウンス”と呼ばれる現象が起きて

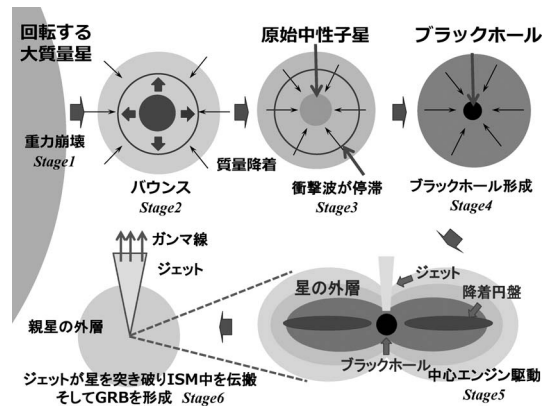


図2 クラプサーモデルの概観図。

*10 マグネターの磁場は大体 10^{15} G 程度で、パルサーとして見つかった中性子星の磁場の 10^3 倍もの強い磁場をもっている（最近のマグネターの観測のレビューとして¹⁰⁾）。

*11 クラプサーモデルは、実はそのほとんどの部分が重力崩壊型超新星爆発と同じような振舞いを見せる。違っているのは、最終的にブラックホールができるころだといっても良いであろう。最近、諏訪氏が重力崩壊型の超新星爆発の理論メカニズムについての解説をしているのでこちらも併せて参照されたい¹⁴⁾。

衝撃波を形成する (Stage 2). バウンスとは核密度付近で核力による反発力のために、落ちてきた物質を急激に減速させ衝撃波を形成することをいう。また、このときに中心にできたコアを原始中性子星と呼ぶ。さて、この衝撃波は降着する物質中を外側に伝播することになるが、ニュートリノの冷却や鉄の光分解などで衝撃波の力が弱まりやがて停滞してしまう (Stage 3). ここで、超新星爆発の標準理論と呼ばれている遅延爆発モデルによれば、原子中性子星付近から放出されるニュートリノが衝撃波後方を加熱させ、また数々の多次元流体的な流体不安定性の寄与 (対流や Standing Accretion Shock Instability) により衝撃波の勢いを復活させて爆発させる事が提案されているのであるが¹⁴⁾、クラプサーモデルではこのフェイズが大きく異なる。というのは、クラプサーモデルでは降着率が高すぎて衝撃波が伝播できないケースを考えているのである。すると、降着が止まらずに原始中性子星に物質がたまり続け、やがて自分自身の重力に耐えられなくなってブラックホールに崩壊 (コラプス [collapse]) してしまう (これがクラプサーといわれる由縁である) (Stage 4). もし星がある程度高速に回転していれば¹²⁾、その後降着円盤を形成し、中心エンジンが駆動し始めると考えられる (Stage 5). その後ジェットが親星の中を伝播し、星の表面を突き破り、やがて星間中に飛び出て GRB を形成するというシナリオがクラプサーモデルである¹³⁾ (Stage 6).

筆者はこれまで、上記の最後のステージ (Stage

6) に関する研究を行ってきた¹⁶⁾. 本研究を行った動機は、中心エンジンの駆動開始時期がジェットの伝播や放射にどのように影響するのか、またジェットからの熱的な放射が GRB を形成できるかについて調べるためである。これまで Stage 6 の研究は数多くされていたが、ジェットはブラックホール形成後すぐに放出されると仮定して計算を行っていたため、星の外層の重力崩壊による影響は全く考慮されていなかった。しかし、一般的に鉄のコアが重力崩壊をした結果、膨張波が星の外層を伝わって密度分布を変化させるため、中心エンジンの開始時期が遅ればその後のジェット伝播への影響が無視できなくなる。また回転星は、外層のほうが単位質量あたりの角運動量が多いため、これらの物質は角運動量を捨てなければブラックホールに落ちることができない。すなわちどこかで遠心力による反発力でバウンスが再び起こり、衝撃波が発生して外層の密度構造を変化させる可能性がある。本研究では、星の外層の崩壊の流体計算を行い、さらに中心エンジン駆動開始時期が違う二つのモデルのジェット伝播の数値流体実験を行った¹⁴⁾。また、流体計算を行った後に、ジェットの熱的な放射から GRB を形成できるかどうかを議論し、中心エンジンの開始時期の違いがどのように光度曲線に現れるかも調べた。GRB は一般的に非熱的であるが、ここで熱的放射を考えた理由は次のとおりである。①近年 GRB で熱的な成分が観測されている点¹⁷⁾、②ジェットが星を突き破ったすぐ後のフェイズは、

*12) どの程度速く親星のコアが回転しているのが中心エンジンの駆動に適しているかは今のところわからない。しかし、ブラックホールも高速に回っていたほうがジェット形成によいとも思われており、一般的にクラプサーモデルにおける親星は大質量で回転が速いものだと考えられている。このような親星を作る星の進化計算は近年精力的に行われていて、金属量が低いほうがこういったタイプの星を作りやすい傾向にある¹⁵⁾。これは観測とも一致している (2章参照)。

*13) クラプサーモデルは GRB を形成するモデルであって、超新星爆発を説明するモデルでないことに注意。クラプサーモデルに従って GRB を形成した場合に、どのように超新星成分を作るかはいまだに理論的によくわかっていない。

*14) ここではジェット形成は何らかのメカニズムで形成されたと仮定し、計算領域の内側の境界面からエネルギーを注入する。本研究で用いる二つのモデルでは、エネルギーを注入する量は同じにして、注入を開始するタイミングだけを変えた。

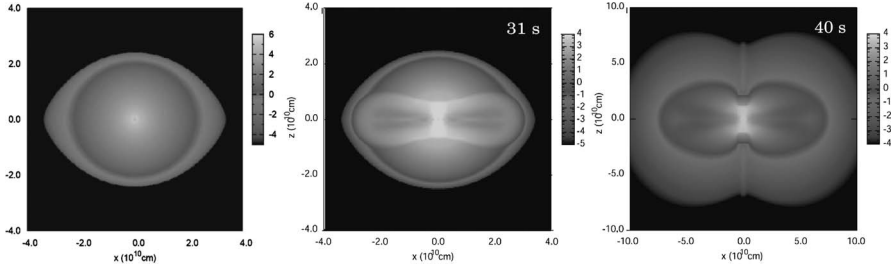


図3 大質量の回転星の崩壊計算. 縦軸が回転軸で横軸が赤道面. 左: 初期の星の構造 中央: 崩壊開始から 31 秒後 (遠心力衝撃波が赤道面上に届いた時間) 右: 崩壊開始から 40 秒後 (遠心力衝撃波が星を突き破り, 星間中を伝播している. 空間スケールが左の二つの図と違うことに注意).

光学的に厚いので熱的な放射を出していることは自然であること, ③流体素片としては熱的放射でも, さまざまな場所から放出された光子をみるのでスペクトルは完全な熱的とはならない可能性がある, の点である.

では, 以下に本研究で得られた主な結果を紹介する. 図3は星の外層の崩壊計算で得られた密度分布を表している. 注意として, この崩壊計算はまだジェットを中心から注入をしていない. ジェットはこの崩壊計算を行った後に適当なタイミングで注入を開始する (後述). 左図は初期の親星モデルの密度分布を表している^{16), 18)}. GRBを起こす親星は高速に回転していると思われるので, 初期から速く回転している星のモデルを用意した. その結果, 外層が遠心力のために扁平形に歪んでいることがわかる. 外層の崩壊が始まると, 中心部から物質は崩壊を始め, 膨張波によって外層も引きずられて落ちてくる. しかし, 外層は角運動量を保存したまま内側に落ちてくるので, やがて遠心力バウンスを起こしてしまい, 衝撃波が星中を伝播して星の表面にまで到達した. ちょうど衝撃波が星の表面に到達した時間のスナップショットを中央の図に載せた. この図にあるように, 主に衝撃波は赤道面から爆発を起こすようである. 赤道面から爆発をすると, 星間中に衝撃波が伝播することになるが, 星の回転軸方向にも放出された物質が流れ出す (右図). このように, 高速回転星の場合ジェットが注入されないで

崩壊し続ける場合, 遠心力バウンスが生じて, 星の外層の密度分布を変えるだけでなく, 爆発も起こしてしまうことが本研究から明らかとなった.

では, 崩壊の結果, もとの星の構造が大きく変わってしまった場合には, ジェットの伝播はどうなるであろうか. 本研究では, 星の崩壊が開始してから 20 秒後にジェットを注入したモデル (Early model), 50 秒後にジェットを注入したモデル (Late model) の二つのケースについて調べた. Early model では, 遠心力バウンスによって衝撃波は形成されているものの, まだその衝撃波が星の外層に達していない時期にジェットを注入するモデルで, Late model は衝撃波がすでに外層に達して 20 秒ほどたった後にジェットを注入するモデルである. 図4は星中, 星間中をジェットが伝播している様子を示したものである (密度分布). 上の図が Early model (左から右にかけて時間が進む), 下の図が Late model に対応する. まず Early model の結果について説明する. 左の図はジェットが星の中を伝播している時期のスナップショットである. ジェットが星の外層と相互作用することによって, 非常に複雑な内部構造を作っていることがわかる (このような内部構造が, GRB を形成するときの複雑な時間変動の原因となっている可能性がある). 中央の図は, ちょうどジェットが星を突き破った時期のスナップショットを載せている. ジェットは星の中では非常に狭い領域に閉じ込められているが (外層には

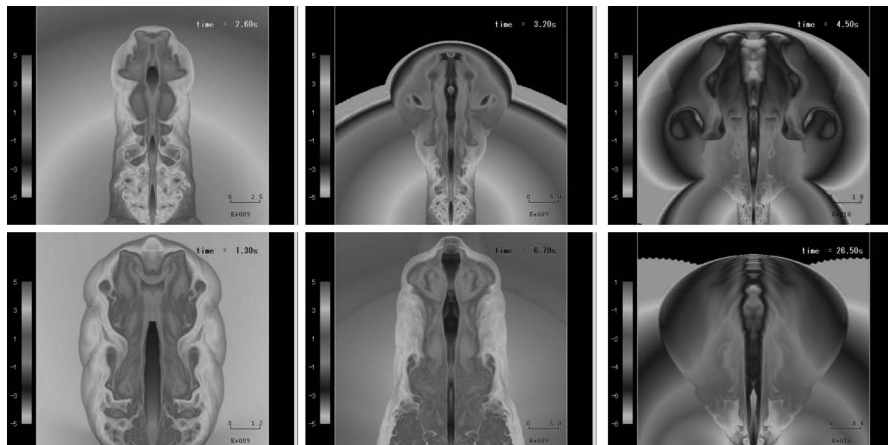


図4 ジェットが大質量星を突き破り、星間中を伝播する様子. 縦軸が回転軸で横軸が赤道方向. それぞれのスナップショットで空間スケールが違うので注意. 上図: Early model 下図: Late model.

たくさん物質があるので、ジェットは簡単には横に広がれない、星を突き破った後は一気に膨れ上がる^{*15}。そして右図のように、ジェットは星間中を伝播し、ガンマ線を放射し始める（光度曲線に関しては後述）。このモデルに関しては、膨張波や遠心力衝撃波のために多少密度分布の変化があったものの、ジェット伝播の様子は先行研究（星の外層の変化を考慮しない計算）と、それほど変わらない結果を得た。そのため、少なくとも遠心力衝撃波が星の表面に達する前に中心エンジンが駆動すれば、ジェットの伝播という観点から見て、GRBに何も影響がないということがわかった。

ところがLate modelの場合にはジェット伝播の様子が、Early modelの場合に比べて大きく変わる。というのも、遠心力バウンスによって形成された衝撃波によって星が爆発し、赤道面上の物質が星の回転軸方向に回り込んだことでジェットの伝播を遮ってしまうからである。図4の下図を見ると、まずジェットは注入された直後はEarly modelに比べて比較的広い幅のジェットになるこ

とがわかる（上の左図と比較）。これは、星の中心付近の密度や圧力がEarly modelの場合に比べて低くなっているために、ジェットを閉じ込める力が弱まったからである。その後ジェットは伝播を続け、やがてもともと星の表面があったところまで到達する。しかし先ほど述べたように、この場所を過ぎても遠心力バウンスによって放出された物質をさらにかき分けていく必要があり、Early modelのときのように一気にジェットが膨れ上がるようなことにはならない。中央の図に関して、上図と下図を比較していただきたい（空間スケールは同じ）。上図は星の表面を超えジェットが膨れ、まさに加速しようとしているところに対して、下図のジェットはたくさんの物質に囲まれていることがわかるであろう。これらの大量の物質が邪魔して、ジェットの伝播速度も遅くなってしまふ。ただこのジェットもエネルギーをたくさんもっているため外側に伝播し、やがてさらに外側を走っていた遠心力衝撃波に追いつくことになる（右図）。このフェイズを超えると初めて観測者は

*15 正確に言うと、ここで膨れ上がっているのはジェット成分というよりもコクーン成分である。コクーンとは、軽いジェットが高密度中に注入されると形成される成分で、ジェット物質が逆行衝撃波 (Reverse shock) にぶつかり熱化されることで形成される。本稿では、より広い意味で前進衝撃波 (Forward shock) が通過した後の物質も含めてコクーンと呼んでいる。

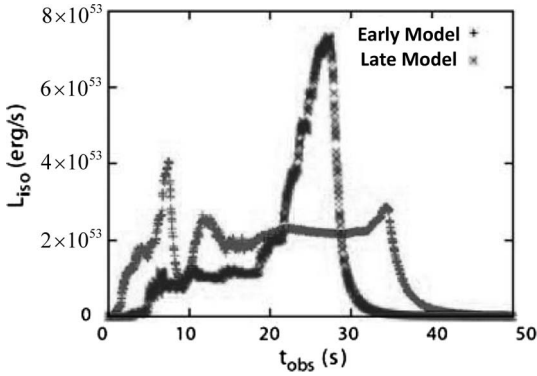


図5 ジェットからの熱的放射による光度曲線.

ジェットからの放射を観測できるようになる（遠心力衝撃波の内側は物質がたくさんあるために光学的に厚い）。

上記で述べたように、遠心力衝撃波が星を突き破った後に中心エンジンが駆動された場合には、初期にジェットが形成された場合と全く違う振舞いをみせることがわかった。では、これは観測的にはどのような違いとして見えるのであろうか。本研究では、熱的放射を仮定して光度曲線を求めた^{*16} (図5)。まずは、二つのモデルの違いを議論する前に熱的放射の全体的な傾向について述べておこう。われわれのモデルでは、ジェットの注入継続時間を30秒にしているため、図5の観測時間 (t_{obs}) が30秒程度のところで急激に減光している。重要な結果の一つが、双方のモデルとも典型的なGRBと同程度かもしくはそれ以上の十分な効率の放射をしていることがわかったことである。しかし、光子のエネルギーはGRBの光度から予想される値より1桁程度小さくなり、GRBの特性を説明するには不十分のようである^{*17}。このような傾向が表れる原因は、光球面の決め方が

よくないためであると考えている。というのも、本来は物質と光が十分にカップルしているところを光球面としてみなすべきであり、本研究で求めた場所よりも、より内側にあると考えられるためである。ただし、正確に光球面を決めるためには、厳密な多次元の輻射輸送計算が必要となる。このような計算は今後の課題である。

上記で述べたような光球面の不定性の問題はあがるが、二つのモデルの光度曲線の違いについて解説しよう（以下に述べる解釈は、光球面の不定性に影響されず定性的な性質となるので、この二つの結果の違いを議論することには意味がある）。図5を見ると、まずEarly modelは比較的初期に明るくなり始めて、その後しばらく高い光度が続き、やがてジェットの終わりが見え始めると減光するという振舞いを見せる。それに対して、Late modelは、初期から途中まではなだらかに暗い状態が続き、最後のフェイズで急激に明るくなった後に減光する。このように初期になだらかに光度が低い状態が続く理由は、遠心力バウンスの衝撃波で星の外層が星間中に飛ばされたことによる影響である。というのも、図4を用いて説明したように、Late modelのジェットは遠心力バウンスによって吹き飛ばされた物質を掃き集めながら進化していく。そのため、衝撃波のすぐ後方にはその掃き集められた物質がためられて光学的に厚い状態が続き、光球面がジェットの中にまで入り込みづらくなる。ジェットの中は、温度が高くて高速に動いているため、ここに入ったら光度が上がると思ってよい。このような理由から、光度が高くなるまでに長い時間がかかったのである。また、非常に強い逆行衝撃波の影響やジェットが狭い領

^{*16} 流体の計算データを基にポスト・プロセスとして輻射を考えている。熱的放射を計算する場合には光球面を求める必要があるが、これは光子を流体の時間発展とともに飛ばして、無限遠からみて光学的厚みが1になったところとして定義している。この光度曲線はすべての波長のエネルギーを足したものであるが、大体数十keVのX線が支配的である。

^{*17} GRBは経験的に、光度のピーク値と光子のピークのエネルギーとの間に関係があることが知られている（Yonetoku関係という¹⁹⁾）。

域に押し込められたため（大量の物質によってジェットが膨張できなかった）、エネルギー密度が上がり、光度のピークが **Late model** のほうが大きくなったと考えられる。

以上が本研究で得られた主な結果である。このように中心エンジン駆動開始時期によって光度曲線に大きな影響を与え **GRB** に多様性を生み出している可能性があることが本研究で明らかとなった。ただし、本研究ではジェットの注入の仕方や放射メカニズムなどにもたくさんの不定性が残っているのも事実である。今後これらを改善していくことで **GRB** の観測から中心エンジンの駆動開始時期に制限をつけられる可能性がある。もちろん駆動開始時期は、中心エンジンの機構そのものとも強くリンクするため、これらにも制限をかけられると期待できる。今後筆者は、**GRB** の中心エンジン機構に関するより詳細な数値実験を行うのと同時に、本研究をより精密化して両方のアプローチから **GRB** の理論的研究に貢献していきたいと考えている。

5. ま と め

本稿では **GRB** の観測および理論の現状について概観し、最後に大質量星の終焉からの相対論的ジェットの伝播計算および熱的放射についての筆者の研究結果について紹介した。本稿で紹介したように **GRB** は、発見から現在まで観測とともに理論も大きく進歩し、特に大質量星の終焉と **GRB** の関連は、**GRB** の謎を解き明かす大きなカギとなる。ただそれと同時に多くの課題が残されているのも事実であり、これらを解決していくにはさらなる研究が必要である。

謝 辞

本稿は、筆者の博士論文の一部をもとに作成したものです。指導教官である山田章一教授、共同研究者である伊藤裕貴氏、木内建太氏にはたいへんお世話になりました。この場を借りて深く感謝

の意を表したいと思います。また、本稿を執筆する機会を与えてくださった山崎 了氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Costa E., et al., 1997, *Nature* 387, 783
- 2) van Paradijs, J., et al., 1997, *Nature* 386, 686
- 3) 山崎 了, 天文月報 103, 744
- 4) Kouveliotou C., et al., 1993, *ApJ* 413, L101
- 5) Qin et al., 2000, *PASJ*, v52, 759
- 6) Minaev P., et al., 2010, *AstL* 36, 707
- 7) Starling R. L. C., et al., 0000, *MNRAS* 411, 2792
- 8) Modjaz M., et al., 0000, *ApJ* 135, 1136
- 9) Gomboc A., et al., 0000, *ApJ* 687, 443
- 10) Nandra R., Paolo E., arXiv: 1101.4472v1
- 11) Woosley S. E., 1993, *ApJ* 405, 273
- 12) MacFadyen A. I., Woosley S. E., 1999, *ApJ* 524, 262
- 13) 柴田 大, 2011, “一般相対論の世界を探る ～重力波と数値相対論～” 東京大学出版会
- 14) 諏訪雄大, 天文月報 104, 276
- 15) Woosley S. E., Heger A., 2006, *ApJ* 637, 914
- 16) Nagakura H., et al., 2011, *ApJ* 731, 2, article id. 80
- 17) Ryde F., et al., 2010, *ApJL* 709, L172
- 18) Kiuchi K., et al., 2011, *ApJ* 717, 666
- 19) Yonetoku D., et al., 2004, *ApJ* 609, 935

Relativistic Jet Simulations for Gamma-Ray Bursts from Death of Massive Stars

Hiroki NAGAKURA

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Oiwake-cho, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Science & Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Abstract: Gamma-Ray Bursts (GRBs) are the most violent phenomena in the universe. The entire picture of GRBs is, however, steeped in mystery. In order to unveil the nature of GRBs, intense investigations have been done by both observations and theoretical studies. In this article, I first review the current status for the study of GRBs, then describe our recent work on numerical simulations for relativistic jets from the death of massive star.