

極めて継続時間の長いガンマ線バースト

仲 内 大 翼

〈東北大学理学研究科天文学専攻／学際科学フロンティア研究所

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3〉

e-mail: nakauchi@astr.tohoku.ac.jp



ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最も激しい爆発現象の一つである。近年 γ 線やX線放射が10,000秒と極めて長く続く特異なバーストが発見された。通常のGRBよりも10-100倍以上長く続くため、これらはultra-long GRBと呼ばれる。通常のGRBで提案されたWolf-Rayet星の重力崩壊モデルでは、ultra-long GRBの極めて長い継続時間を説明するのが困難である。そこで半径の大きな超巨星の重力崩壊モデルが、筆者らを含めたいくつかのグループで提案された。筆者らはさらに、このモデルに従えばultra-long GRBに明るい超新星が付随しうることを示し、明るい超新星の付随がモデルの傍証となることを示した。本稿では筆者らがこの特異なバーストに関して行った研究の結果を紹介する。

1. はじめに

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; 以下GRBと略記) は γ 線やX線帯域で輝く、宇宙で最も激しい爆発現象の一つである。発生直後の激しい時間変動を示す γ 線やX線放射は即時放射と呼ばれる (図1)。放射が等方的だと仮定した場合、即時放射で放出される光度は 10^{51} - 10^{53} erg s⁻¹ (銀河系光度の1-100億倍) に、総エネルギー量は 10^{52} - 10^{54} erg (太陽が一生涯かけて放出するエネルギーの10-1,000倍) にもなる。

GRBは即時放射の継続時間の長さにより長い種族と短い種族の2種族に大別される。いずれの種族においても、即時放射に引き続いた残光放射が、X線から電波に及ぶ多波長帯域で観測される (図1)。即時放射や残光放射の観測の特徴から、GRBは両種族ともに、光速の99.99%以上もの速さをもつ細く絞られたプラズマの噴出流 (相対論的ジェット) が起こす爆発現象であると考えられている。

即時放射の継続時間が長い種族のGRB (以下long GRBと記す) は典型的に数十-数百秒という継続時間をもつ。Long GRBは次に述べるような特徴をもつ。まず、これらのうち少なくとも一部は大質量星の死に伴って起こる爆発と考えられている。なぜなら、10例以上のlong GRBにおいて、可視残光の光度曲線中に超新星からの放射を想起させる増光が見つかるためである¹⁾ (図1)。これらの超新星成分は分光観測の結果、Ic型の超新星に分類されている。Ic型であることは、爆発前の星 (親星) の外層中に水素やヘリウムがほとんど含まれていなかったことを示す。つまり、Wolf-Rayet星のような、進化の途上における質量損失により水素やヘリウムの外層を失った大質量星が起源であると考えられる。次に、long GRBは宇宙再電離が完了したと考えられる赤方偏移6以遠においても数例観測されており、最遠方天体の一つである²⁾。GRBは著しく大きな光度をもつ爆発現象であるため、背景光源として遠方宇宙を照らし出し、宇宙初期における星形

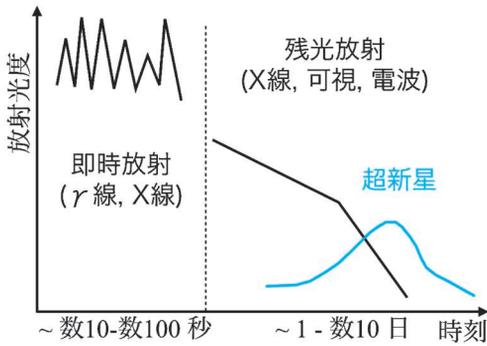


図1 Long GRB光度曲線の模式図。

表1 Ultra-long GRBの観測的性質。

	111209A	101225A	121027A	130925A
即時放射の 継続時間 (秒)	15,000 ³⁾	≥2,000 ⁴⁾	10,000 ⁶⁾	20,000 ⁷⁾
等方放射 エネルギー (10 ⁵³ erg)	5.8 ³⁾	≥0.12 ³⁾	2.0 ⁶⁾	1.0 ⁷⁾
赤方偏移	0.677 ³⁾	0.847 ⁴⁾	1.773 ⁴⁾	0.35 ⁷⁾

測されたGRBに比して例外的に長い継続時間をもつ。明確な定義はなされていないが、GRB 101225A, 111209A, 121027A, 130925Aがこの種族に分類されている^{3), 4), 6)-8)}。いずれもγ線やX線の放射継続時間が観測者系において10,000秒を超えている(表1)。通常のlong GRBの典型的な継続時間が数十-数百秒であることを考えると、それらの特異さが鮮明となるだろう^{*1}。

継続時間の特異性を除いては、ultra-long GRBは目立った特徴をもたない。例えば即時放射のエネルギー量は、放射が等方的と仮定した場合10⁵³ erg程度と膨大な値になっているが、GRBの中では平均より僅かに大きい程度である。総エネルギー量がそれほど変わらないにもかかわらず継続時間が長いこと、放射光度はむしろ通常より低くなっている。

残光放射に関しても、図1にあるような通常のGRBとほぼ同じ性質をもつ。ただ注目すべきなのは、GRB 101225A, 111209Aの2例において、可視・赤外残光の光度曲線中に超新星成分の存在を示唆する増光が見受けられたことである^{4), *2}。超新星成分の存在はこれらのバーストの起源を議論するうえで大きな手がかりとなるので、後に改めて触れることにする。

成の歴史や化学進化の様子を探る有力な手段として期待されている。

近年、極めて長い継続時間をもつGRBが4例発見された^{3), 4)}。その継続時間は10,000秒にも至り、通常のlong GRBよりも100倍以上長いので、ultra-long GRBと呼ばれている。現在、この特異なバーストの起源あるいは親星が何であるか、ということが大きな問題となっている。

筆者の学生時代はちょうどultra-long GRBが発見されてその性質が系統的に調べられた時期である。筆者は当初、宇宙初期の大質量星が起こすGRBに関する研究を行っていた⁵⁾。そして、それらが通常のlong GRBに比して極めて長い継続時間を示す可能性を議論していた。偶然にもこれと時期を同じくしてultra-long GRBの観測結果が発表されたため、この特異なバーストの起源に取り組む機会を得た。本稿ではこれらの研究を通して得られた結果を述べることにしたい。

2. Ultra-long Gamma-Ray Burst

2.1 観測的特徴

前章で述べたように、ultra-long GRBは従来観

*1 Ultra-long GRBの議論が活発となるより以前、通常のlong GRBにおいて長期間活動する中心エンジンの存在が示唆されていた⁷⁾。Long GRBの初期残光放射段階(バースト後1,000-10,000秒)では、X線帯域における突発的な増光(フレア)が観測されることがある。X線フレアは長期間駆動されたジェットからの放射を起源とすると考えられている。

*2 GRB 121027A, 130925Aに関しては可視・赤外残光の観測データがほとんどないので、増光があるかどうかは不明である。

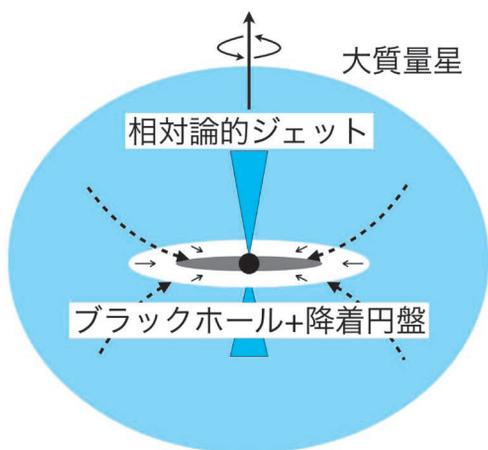


図2 Long GRBの重力崩壊モデルの模式図.

2.2 Ultra-long GRBの親星モデル

Ultra-long GRBは極めて長い継続時間をもつので、その起源あるいは親星が何であるのかが大きな問題となっている。なぜなら、通常のlong GRBと同様にWolf-Rayet星が親星であると仮定した場合、ultra-long GRBの継続時間を説明するのが困難なためである。

Long GRBの放射機構や相対論的ジェットの駆動機構ははまだ解明されておらず、宇宙物理学における大問題の一つに数えられる。それでもlong GRBの標準的なモデルとして、Wolf-Rayet星の重力崩壊モデルが提唱されている^{9), 10)} (図2)。そこではまず、寿命を迎えて重力崩壊を始めた大質量星の中心部において、ブラックホールと降着円盤の系が形成されると考える。そしてこの系を中心エンジンとして、降着物質の重力エネルギーやブラックホールの回転エネルギーの一部が相対論的ジェットとして取り出される。こうして駆動された相対論的ジェットが親星の外層を貫通した後、即時放射に寄与する、というモデルで

ある。

重力崩壊モデルにおいてGRBの継続時間は、星の物質がブラックホールと降着円盤の系に落下する時間スケールでおおよそ見積もられる^{*3}。ここでそれを星全体の自由落下時間で見積もれば次のようになる：

$$t_{\gamma} \approx 77 \left(\frac{R_*}{R_{WR}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{M_{WR}} \right)^{-1/2} \text{ 秒} \quad (1)$$

ここで、理論的に典型的と考えられているWolf-Rayet星の半径 $R_{WR} \sim 2 \times 10^{10} \text{ cm}$ や質量 $M_{WR} \sim 10 M_{\odot}$ を用いた。この値は通常のlong GRBの継続時間と同程度であり、Wolf-Rayet星がその親星候補に挙げられる一つの理由である。しかし、本稿の主役であるultra-long GRBの極めて長い継続時間を説明するうえでは甚だ都合が悪いことがわかる。

そこで提案されたのが、より半径の大きな大質量星を親星とするモデルである^{3), 11)}。例えば半径 $R_* \sim 10^{12} \text{ cm}$ 、質量 $M_* \sim 50 M_{\odot}$ をもつ超巨星モデルを仮定すると、GRBの継続時間は式(1)の R_{ast} 、 M_{ast} に上記値を代入することにより

$$t_{\gamma} \approx 12,000 \left(\frac{R_*}{10^{12} \text{ cm}} \right)^{3/2} \left(\frac{M_*}{50 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \text{ 秒} \quad (2)$$

と評価され、ultra-long GRBの継続時間を説明するうえで都合が良いことがわかる。こうしてultra-long GRBの親星は、Wolf-Rayet星よりも大きな半径をもつ超巨星であるとするモデルが提唱された。

2.3 宇宙初期の大質量星が起こすGRB

Ultra-long GRBが発見される以前から、非常に長い継続時間をもつGRBの存在は理論的に議

*3 星の物質が外層から降着円盤に落下する時間スケールと、円盤からブラックホールへと物質が降着する時間スケールの和、とするのがより正しいと考えられる。本文の見積もりは、前者が大きい場合に妥当と言える。また、GRBのもつ大きな光度 ($\sim 10^{52} \text{ erg s}^{-1}$) を達成するには、 $0.1\text{-}1 M_{\odot} \text{ s}^{-1}$ という非常に大きな質量降着率が必要と考えられている。したがって、GRBの継続時間は大きな質量降着率が実現される時間スケールに対応するべきで、本文における見積もりはその上限値を与えていることになるだろう。

論されていた。それは主に宇宙初期の大質量星（初代星）を含めた種族III星が起こすGRBの文脈においてである^{5), 12)-19)}。

最近の詳細な理論研究によれば、初代星を代表とする種族III星は典型的に大質量（10-1,000 M_{\odot} ）であったことが示唆されている²⁰⁾⁻²³⁾。そのため、種族III星もGRBを起こす可能性がある。しかし、現在の大質量星が起こすlong GRBとは全く異なった観測的特徴を示す可能性も考えられる。例えば種族III星はその外層にリチウムより重い元素を含まず外層の不透明度が小さいため、輻射圧を起源とした質量損失が抑制される²⁴⁾。そのため、外層を失ってWolf-Rayet星へと進化する事なく、水素外層を保持したまま超巨星へと進化する可能性がある。実際に恒星進化の理論計算によれば、種族III星は半径 10^{12} - 10^{13} cmをもち、表面温度が10,000 K以上と高温な青色超巨星として一生を終える可能性が示唆されている^{*4, 25), 26)}。したがって2.2節での考察から、種族III星が起こすGRBは極めて長い継続時間をもつ可能性が提案された。

2.4 極めて継続時間が長い突発天体

前節の議論と時期を同じくして、表1に掲げたultra-long GRBが発見され、それらの性質が系統的に調べられた。そしてultra-long GRBは、青

色超巨星を起源とした特異なバーストの初めての観測例として注目された。しかし以上の考察は即時放射の継続時間の特徴にしか基づいておらず、必ずしも他の可能性を排除するものではない。

近年Swift衛星のバースト・トリガー法が、低光度でも長く続く突発天体の検出にも対応するようになった¹⁶⁾。それに伴ってultra-long GRB以外にも極めて長い継続時間をもつ突発天体が発見されている^{*5)}。そこで筆者らは、青色超巨星の重力崩壊モデルに特有な観測的特徴がないかを考え、観測との比較を通してこのモデルの優位性を検討してみることにした。

3. Ultra-long GRBと明るい超新星

2.1節で述べたように、GRB 101225A, 111209Aの二例において、可視・赤外残光の光度曲線中に超新星成分の存在を示唆する増光が確認されている。超新星成分の存在は、これらのバーストの起源を議論するうえで大きな手がかりとなる可能性がある。実際、通常のlong GRBの親星がWolf-Rayet星であると考えられているのも、可視・赤外残光中にIc型超新星が埋もれている場合があるからである。そこで筆者らは、ultra-long GRBに付随した超新星成分に注目することにした。

GRB 111209Aに付随した超新星成分はとりわ

4 大質量星はEddington限界に近い光度で輝く： $L_ \sim L_{\text{Edd}} \sim 6.5 \times 10^{39} (M/50 M_{\odot}) \text{ erg s}^{-1}$ 。本文中で例にあげた半径 10^{12} - 10^{13} cmの星の場合、表面温度は $T_{\text{eff}} = (L_*/4\pi R_*^2 \sigma_{\text{SB}})^{1/4} \sim 50,000 (R_*/10^{12} \text{ cm})^{-1/2} (M/50 M_{\odot})^{1/4} \text{ K}$ と見積もられ、高温である。本稿ではこのような星を“青色”超巨星と呼ぶ。一方、表面温度が $\sim 5,000 \text{ K}$ の“赤色”超巨星の場合半径は $\sim 10^{14} \text{ cm}$ となり、青色超巨星より10倍以上大きい。

最近では、磁場や自転の効果を実効的に取り入れた上で恒星進化の理論計算が行われている²⁷⁾。それによれば、核融合反応により星中心部で合成された重元素の一部が星の外層へと取り込まれた場合、種族III星でも赤色超巨星へと進化したリ、質量損失によりWolf-Rayet星へと進化したリする可能性が示唆されている。

*5 具体例としては、潮汐破壊現象と呼ばれるSwift J1644+57, Swift J2058+05や、低光度GRBが挙げられる。前者は光度こそultra-long GRBより1桁以上小さいが、激しい時間変動を示すX線フレアが10日程度続く現象である²⁸⁾。X線光度はその後1年程度かけて $L_x \propto t^{-5/3}$ のようにべき的に減衰する。銀河中心にある巨大ブラックホールの潮汐場により恒星や巨星が破壊された際、星を構成していた物質の一部がブラックホールへと降着していく過程で発生するというモデルが提唱されている。ほかにも、赤色超巨星の重力崩壊に伴って発生するというモデルがある²⁹⁾。一方、低光度GRBは通常のlong GRBより1,000倍以上光度が暗いにもかかわらず、継続時間は1,000秒程度と長い現象である³⁰⁾。超新星爆発に伴って星内部で生じた衝撃波が星表面に達した瞬間に発生する放射により輝くというモデルや³¹⁾、マグネター（高速回転する強磁場中性子星）から放出されたジェットによる爆発であるとするモデルが提唱されている³²⁾。

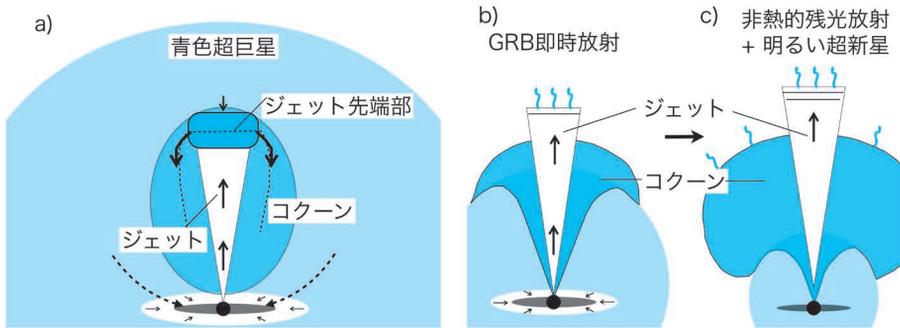


図3 Ultra-long GRBの青色超巨星・重力崩壊モデルの模式図。a) ジェットが親星の外層中を伝播する段階。b) 即時放射の段階。ジェットが親星を貫通して間もないころである。時期を同じくしてコクーン内の物質も星の外側へと飛び出し膨張を開始する。c) 残光放射の段階。相対論的ジェットは星間媒質との衝突により非熱的な放射を起こす。コクーンからの放射は明るい超新星成分として観測される。視線方向がジェット軸からはずれた観測者にはGRBは観測されず、コクーンからの明るい超新星成分のみが観測される。

け特異であると言える。通常の超新星よりも10倍程度光度が大きく、いわゆる超光度超新星*6に匹敵するくらい明るいのである。そこで筆者らは、ultra-long GRBに付随した明るい超新星成分が、青色超巨星モデルの枠組みで説明できるかどうかを検討することにした。もし説明可能ならば、明るい超新星の付随が青色超巨星モデルに特有の観測的特徴となるかもしれない。そのとき問題となるのが、明るい超新星成分のエネルギー源は何か、ということである。筆者らは、GRBジェットが星の中を伝播するときに、ジェットを取り巻くように形成されるコクーンという構造に注目した。

3.1 相対論的ジェットの星外層中における伝播

GRBの重力崩壊モデルにおいて、ブラックホールと降着円盤の系から駆動された相対論的ジェットは、親星の外層を突き破り親星の外に飛び出す必要がある。なぜならGRBは非熱的な放射であり、放射は星内部のような光学的にとっても厚い領域ではなく、光学的に薄い領域で発生すべきだからである。こうして、ジェットが親星外層を貫通できるかどうかの問題となる。またこの問題に取り組むためには、ジェットと星の物質と

の相互作用を基にジェットのダイナミクスを考える必要がある。本節での議論は、かつて活動銀河ジェットの文脈でなされていた議論がGRBジェットに応用されたものである³³⁾⁻³⁵⁾。

中心エンジンから発射されたジェットはまず超音速で星の物質中に突入するため、ジェット先端部に衝撃波領域が形成される(図3a)。ジェット先端部では、前進衝撃波と後退衝撃波をそれぞれ通過して加熱された星の物質とジェットの物質が、接触不連続面を介して接する。またジェット先端部では、ジェットのエネルギーが熱エネルギーへと転化されて輻射優勢な状況となる。そのため、ジェット先端部に取り込まれた物質は自身の熱的な圧力により、ジェット軸に対して垂直な方向へとほぼ光速で膨張することができる。そしてジェットを取り巻くような格好でコクーンという構造を形成する(図3a)。ジェット先端部が星表面付近に到達するまでは、中心エンジンからジェットに注入されたエネルギーはジェット先端部の衝撃波領域を経てコクーンに蓄えられる。

中心エンジンの活動時間が十分長ければ、ジェット先端部はやがて星表面に到達し、ジェットは親星を貫通することができる(図3b)。さら

*6 近年、通常の超新星よりも10-100倍程度大きなピーク光度をもつ超新星が発見され、超光度超新星と呼ばれている⁴¹⁾。観測された超光度超新星の起源に関してはさまざまなモデルが提唱されている。

に、この時までにはコクーンに蓄えられたエネルギー量が親星外層の重力束縛エネルギーを凌駕した場合、コクーン内の物質も星の外側に飛び出すことができるだろう (図3b)。このように考えれば、コクーンに蓄えられたエネルギーを源とした放射成分が期待される。

筆者らはこの点に着目し、ジェット貫通と同時に星の外側へと飛び出したコクーン放出物質からの放射により、ultra-long GRBに付随した明るい超新星成分を説明する可能性を検討した。このモデルには青色超巨星に有利な点の一つがある^{*7}。それは、半径の大きな星ほどジェット貫通に時間がかかるのでコクーンに蓄えられるエネルギー量が大きくなり、より明るい放射が期待できることである。

3.2 コクーンからの放射

星の外側へと飛び出したコクーン内の物質は、自身の熱的圧力により膨張を始める (図3b)。コクーンは星の内部において星の物質を一部取り込むので、はじめは光学的に非常に厚く、膨張はほぼ断熱的と見なせる。コクーンがはじめもっていた内部エネルギーの大部分は、自由膨張によりその運動エネルギーへと転化されるが、一部は放射として抜け出してくる (図3c)。その時間スケールは、コクーン内部で生成された光子が、光学的に厚い物質中を多数回散乱されることによりランダムウォークして抜け出す時間スケールである。自由膨張とともにコクーン内の密度や光学的厚みが小さくなると、光子がコクーン内部から抜け出

すのに要する時間スケールも小さくなる。この時間スケールが、系の発展の時間スケール (膨張の時間スケール) を下回るようになる時刻くらいまで放射が続く。ここで述べた状況は、通常の超新星放出物質の進化の様子と全く同じである^{36), 37)}。

3.3 GRB 111209Aのモデル化とその結果

青色超巨星の重力崩壊モデルを基にして、ultra-long GRBの極めて長い継続時間とそれに付随した明るい超新星成分を無矛盾に説明するため、以下のような簡単なモデルを考えた³⁸⁾。

まず、ジェットの星外層中におけるダイナミクスを計算するためには、ジェットに注入されるエネルギー量を評価する必要がある。相対論的ジェットの駆動機構は不明であるので、ここでは降着物質のもつ質量エネルギーのうちある一定の割合 η_j がジェットのエネルギーに変換されると仮定する。また、ジェットの開き角 θ_j もダイナミクスを決める重要なパラメーターとなる。

即時放射の観測から得られる制限として、その継続時間と放射エネルギー量がある。放射エネルギー量を評価するために、親星を貫通したジェットがもつエネルギーのうち γ 線やX線に変換される効率パラメーター ε_γ を導入した。これも、即時放射の放射機構が不明なためである。

次に、上で導入したパラメーター値の選び方について述べる。まずジェットの開き角に関しては、X線残光の観測からその下限値が見積もられているので、その下限値 $\theta_j = 12^\circ$ を取ることにした (表2)。また他のパラメーターに関しては、

^{*7} しかしながら半径の大きなことが逆に不利に働く可能性もある。ジェットが星表面まで達するのに時間がかかり過ぎてしまうと、ジェットが星を貫通するよりも前に中心エンジンへの質量降着が止まり、同時にジェットへのエネルギー供給も止まってしまう可能性がある。その場合はGRBを起こせない。しかし、青色超巨星の重力崩壊モデルに関しては解析的・数値的なジェット伝播の計算から、この条件をクリアできることが確認されている^{5), 16), 17)}。一方、青色超巨星よりも半径が10倍以上大きな赤色超巨星の場合は、この条件がクリアされない可能性がある。赤色超巨星の外層は、青色超巨星よりも緩やかに減衰する密度構造をもつのが特徴である。このように緩やかに減衰する密度構造をもつ媒質中においては、ジェット先端部の伝播速度は減速される¹⁹⁾。その結果ジェットが星の中を伝播するのに非常に長時間を要し、ジェットが星を貫通するよりも前に中心エンジンの活動が止まってしまう可能性がある。この場合は通常の超新星のような、ほぼ球状の爆発となるかもしれない。Ultra-long GRBに対して青色超巨星の親星モデルを考えたのは、以上の理由からである。

表2 GRB 111209Aの主要なパラメーター.

モデルパラメーター	
ジェット開き角 θ_j	12°
中心エンジンのエネルギー変換効率 η_j	10^{-3}
即時放射の放射効率 ε_γ	0.4
計算結果	
即時放射の継続時間 (秒)	9,000
等方放射エネルギー (10^{53} erg)	5.9
コクーンエネルギー (10^{53} erg)	1.0
コクーンの質量 (M_\odot)	5.8

即時放射の継続時間と放射エネルギー量を再現するように、 $\eta_j=10^{-3}$, $\varepsilon_\gamma=0.4$ と選んだ(表2).

この簡単なモデルにおいては、ジェットの性質を決めるパラメーター η_j , θ_j に加えて親星の密度構造が与えられれば、ジェットの星外層中におけるダイナミクスを計算することができる. 恒星進化の理論計算から、金属量が太陽組成の10,000分の1という超低金属の大質量星が、青色超巨星として寿命を迎えることが示唆されている²⁶⁾. そこで計算された質量 $75 M_\odot$, 半径 8.6×10^{12} cmの青色超巨星モデルを、重力崩壊直前にある親星の構造の一例として用いることにした.

以上のモデルを用いて、親星の外層中を伝播するジェットのダイナミクスを計算した. その結果、ジェット先端部が星表面に達するまでに $\sim 4,000$ 秒かかることがわかった. また即時放射の継続時間も $t_\gamma \sim 9,000$ 秒と評価され^{*8}, GRB 111209Aの観測をほぼ再現するものになる(表1, 2). ジェット伝播の計算からは同時に、コクーンに蓄えられたエネルギー量やコクーンが取り込んだ星の物質の質量が計算される. それぞれ $\sim 10^{53}$ erg, $\sim 5.8 M_\odot$ となることがわかった(表2).

次に、ここで得られたコクーンのエネルギー量

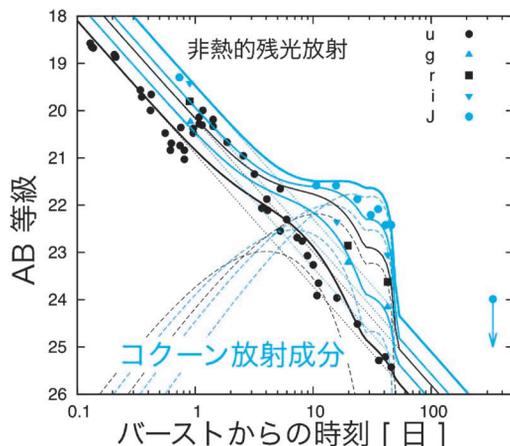


図4 Ultra-long GRB 111209Aの可視・赤外残光の光度曲線のフィッティング結果. 各点は各バンドにおける観測データに、破線はコクーンからの放射成分に、点線は非熱的残光放射に、実線は両者の和に、それぞれ対応する.

や質量の値を用いて、コクーンからの放射を計算した. コクーンの質量 $\sim 5.8 M_\odot$ は通常の超新星と同程度である. しかし、エネルギー量 $\sim 10^{53}$ ergは通常の100倍程度であり、明るい超新星になることが期待できる. GRBの残光放射はコクーンからの放射成分と、相対論的ジェットが星間物質との間に作る外部衝撃波からの非熱的放射成分の和である^{*9}. 両者を足し合わせたうえで、GRB 111209Aの可視・赤外残光の光度曲線を再現できるかどうかを調べた.

GRB 111209Aの可視・赤外残光の光度曲線に対するフィッティング結果を図4に示した. 図4において、各点は各バンドにおける観測データに、破線はコクーンからの放射成分に、点線は外部衝撃波モデルに依拠して計算した非熱的放射成分に、実線は両者の和に、それぞれ対応する. 簡

*8 ここではGRBの継続時間は、ジェットが星を貫通した時刻ののち、中心エンジンへの非常に大きな質量降着率($10^{-3} M_\odot s^{-1}$ 以上)が維持されうる時間と定義した.

*9 GRBの残光放射は、超新星成分が観測されない場合、べき的に時間減衰する非熱的な放射であることが多い. 即時放射を終えた相対論的ジェットが星間物質と衝突すると、両者の間に衝撃波が形成される. 衝撃波で加速されて、非熱的なエネルギー分布をもつ相対論的電子からのシンクロトロン放射でよく説明される. このモデルを外部衝撃波モデルと呼ぶ^{39), 40)}.

単なモデルではあるが、残光の光度曲線、特に明るい超新星成分の特徴を見事に再現するものであった*¹⁰。本研究の結果、青色超巨星の重力崩壊モデルにより、ultra-long GRBの極めて長い継続時間だけでなく、それに付随した明るい超新星成分も同時に説明できることがわかった。Ultra-long GRBの青色超巨星モデルに対する新たな傍証が得られた。そのほかにも以下に挙げるような示唆が得られる。

3.4 超光度超新星の起源に関する示唆

本研究の結果、青色超巨星を起源としたultra-long GRBには、コクーンからの放射を起源とした明るい超新星成分が付随しうることがわかった。GRBは細く絞られたジェットが起こす現象であるので、視線方向がジェット軸からはずれた観測者にはGRBは観測されず、ほぼ球状に放射するコクーン成分のみが明るい超新星として観測されるだろう(図3c)。したがってコクーン放射を起源とした超光度超新星が存在する可能性がある。図4からわかるように、このような超新星が輝く時間スケールは数十日程度と比較的短い。これまで観測された超光度超新星は通常100日程度輝き、今回のように数十日程度しか輝かないものは発見されていない。超新星の輝く期間が短いことや発生率が低いことから、現在の観測機器での発見を免れているのかもしれない。現在計画されている、可視光における大規模広視野サーベイの発展が待たれる。

観測された超光度超新星が、ultra-long GRBに付随したコクーンからの放射を起源とするかどうかは、後期電波観測により判別できるだろう。相対論的ジェットが星間物質との衝突により減速されると、同時に開き角も大きくなり最終的に球形に近づく⁴²⁾。そうすると、最初は視線方向がジェット軸からそれていたためにジェットからの非熱的残光放射を捉えられなかった観測者でも、

ジェットが球形に近づいた後にはそれを捉えることができる。非熱的残光放射は後期段階では電波で明るくなるので、これを受ければGRBであったことの傍証となる。コクーン自体も星間物質との衝突により、同様の非熱的残光放射を起こすかもしれない。そのような放射はコクーンのエネルギーや質量を知るうえで重要となるだろう⁴³⁾。

3.5 種族III GRBへの示唆

初代星を代表とした種族III星は、理論的な側面からの研究が飛躍的に進展している。一方で、観測的にその特徴を捉えるには現状至っていない。典型的に大質量である種族III星は主に、われわれから遠く離れた初期宇宙で誕生したと考えられる。そのため、主系列段階にある個別の星を直接観測するのは非常に困難である。種族III星を大量に含んだ原始銀河の観測を通して集団的な性質に迫る方法や、爆発現象をもとに個々の性質に迫る方法が目下現実的である。特にGRBは非常に明るいので、後者に都合がよい天体である。

2.3節で述べたように、恒星進化の理論計算からは、種族III星が青色超巨星として一生を終える可能性が示唆されている。本研究の結果に沿えば、種族III GRBも明るい超新星成分を伴ったultra-long GRBとして観測される可能性がある。両者の特徴をもつGRBが赤方偏移10程度で見つかれば、それが種族III星起源である可能性が高い、ということになる。赤方偏移10程度で発生するultra-long GRBや超光度超新星は、現行の観測機器で検出できる可能性は低い。しかし、現在計画されている観測機器が稼働する近い将来には、十分検出される可能性のあることが議論されている^{5), 11), 16), 44)}。

4. Ultra-long GRBの親星をめぐったその後の議論

以上で述べたように、青色超巨星の重力崩壊モ

*¹⁰ 筆者は普段感情表現に乏しいが、このときばかりは思わず「うおお！」と呻き声を上げてしまった。このことで今後に共著者の人々からかわれてしまう。

デルを考えれば, ultra-long GRBの極めて長い継続時間や, それに付随した明るい超新星成分を無矛盾に説明できる. このモデルは一見成功を収めたように思えた. しかし, 本稿執筆の直前になってこのモデルとは相容れない観測結果が提出されたので, 現在このモデルは苦境に立たされている.

GRB 111209Aに付随した明るい超新星成分のスペクトル解析が行われ, これが超新星からの放射であることが改めて確認された^{*11, 45)}. そしてこの明るい超新星成分はSN 2011klと名づけられた. この点はGRB 111209Aが大質量星の死に伴って発生した現象であることを確認するものであり, 青色超巨星モデルと何ら矛盾するものではない. 一方で潮汐破壊現象である可能性は低くなった.

ところが超新星のスペクトル中には水素やヘリウムの存在を示す特徴が見られなかった. これは単純には親星が水素外層をもった青色超巨星ではなく, 外層を失ったWolf-Rayet星である可能性を示唆する. 青色超巨星モデルは苦境に立たされることになった. この観測結果を発表した論文では, “Known supernovae from blue supergiants show hydrogen in their spectra…(中略)… inconsistent with our observations, thus ruling out a blue supergiant progenitor.”とあっさり結論づけている⁴⁵⁾. またこの結果を受けて, GRB 111209AとSN 2011klがマグネターモデルで説明できると主張する人々も現れた^{45), 46)}.

しかしながら観測で得られたスペクトルはノイズが大きいうえに, ある一日におけるデータしか得られておらず, 完全な決定打になったとは思えない. またマグネターモデルで実現されるエネルギー量は, 即時放射のエネルギー量 5.8×10^{53} erg (表1)に届かない可能性がある. 最後に, 水素やヘリウム外層を失った大質量星であっても,

10^{12} - 10^{13} cmほどの大きな半径をもつ星へと進化して最終的にultra-long GRBを起こす可能性は考えられないのだろうか. ささまざまな観点から観測結果の意味することを検討する必要があると考えられる. 苦境に立たされた青色超巨星モデルにもまだ挽回のチャンスはあるのかもしれない.

謝 辞

本稿の内容は筆者の博士論文の一部に基づいております. 学生時代を通じて筆者の指導にあたってくださった中村卓史氏, 諏訪雄大氏, 檜山和己氏には深く感謝しております. また, 関連論文の共著者である坂本貴紀氏, 矢島秀伸氏に感謝します. 筆者の在学当時, 京都大学理学研究科天体核研究室ならびに基礎物理学研究所宇宙分野に在籍されていた皆様にはたいへんお世話になりました. この場をお借りし改めて謝意を申し上げます. 最後に, 本稿の校正にご協力くださった當真賢二氏ならびに杉村和幸氏, 筆者に本稿執筆の機会を与えてくださった富永望氏に感謝します.

参考文献

- 1) Hjorth J., Bloom J. S., 2012, Chapter 9 in “Gamma-Ray Bursts,” Cambridge Astrophysics Series 51, eds. C. Kouveliotou, R. A. M. J. Wijers and S. Woosley, Cambridge University Press (Cambridge), pp. 169–190, 169
- 2) Salvaterra R., 2015, arXiv: 1503.03072
- 3) Gendre B., Stratta G., Atteia J. L., et al., 2013, ApJ 766, 30
- 4) Levan A. J., Tanvir N. R., Starling R. L. C., et al., 2014, ApJ 781, 13
- 5) Nakauchi D., Suwa Y., Sakamoto T., Kashiyama K., Nakamura T., 2012, ApJ 759, 128
- 6) Peng F.-k., Hu Y.-D., Xi S.-Q., et al., arXiv: 1302.4876
- 7) Zhang B.-B., Zhang B., Murase K., Connaughton V., Briggs M. S., 2014, ApJ 787, 66
- 8) Piro L., Troja E., Gendre B., et al., 2014, ApJ 790, L15
- 9) Woosley S. E., 1993, ApJ 405, 273
- 10) MacFadyen A. I., Woosley S. E., 1999, ApJ 524, 262
- 11) Kashiyama K., Nakauchi D., Suwa Y., Yajima H., Na-

*11 本稿ではこれまで“超新星”と表記してきたが, 正しくは“超新星候補”と表記するべきである. 通常のGRBに付随した超新星の場合も, 分光観測の結果超新星であることが確認されて初めて命名が行われる.

kamura T., 2013, ApJ 770, 8

12) Mészáros P., Rees M. J., 2001, ApJ 556, L37

13) Komissarov S. S., Barkov M. V., 2010, MNRAS 402, L25

14) Mészáros P., Rees M. J., 2010, ApJ 715, 967

15) Suwa Y., Ioka K., 2011, ApJ 726, 107

16) Toma K., Sakamoto T., Mészáros P., 2011, ApJ 731, 127

17) Nagakura H., Suwa Y., Ioka K., 2012, ApJ 754, 85

18) Woosley S. E., Heger A., 2012, ApJ 752, 32

19) Matsumoto T., Nakauchi D., Ioka K., Heger A., Nakamura T., 2015, ApJ 810, 64

20) Hosokawa T., Omukai K., Yoshida N., Yorke H. W., 2011, Science 334, 1250

21) Hirano S., Hosokawa T., Yoshida N., et al., 2014, ApJ 781, 60

22) Susa H., Hasegawa K., Tominaga N., 2014, ApJ 792, 32

23) Nakauchi D., Inayoshi K., Omukai K., 2014, MNRAS 442, 2667

24) Krtićka J., Kubát J., 2006, A&A 446, 1039

25) Castellani V., Chieffi A., Tornambe A., 1983, ApJ 272, 249

26) Woosley S. E., Heger A., Weaver T. A., 2002, Reviews of Modern Physics 74, 1015

27) Yoon S.-C., Dierks A., Langer N., 2012, A&A 542, A113

28) Burrows D. N., Kennea J. A., Ghisellini G., et al., 2011, Nature 476, 421

29) Quataert E., Kasen D., 2012, MNRAS 419, L1

30) Campana S., Mangano V., Blustin A. J., et al., 2006, Nature 442, 1008

31) Waxman E., Mészáros P., Campana S., 2007, ApJ 667, 351

32) Toma K., Ioka K., Sakamoto T., Nakamura T., 2007, ApJ 659, 1420

33) Blandford R. D., Rees M. J., 1974, MNRAS 169, 395

34) Begelman M. C., Cioffi D. F., 1989, ApJ 345, L21

35) Matzner C. D., 2003, MNRAS 345, 575

36) Arnett W. D., 1980, ApJ 237, 541

37) Popov D. V., 1993, ApJ 414, 712

38) Nakauchi D., Kashiyama K., Suwa Y., Nakamura T., 2013, ApJ 778, 67

39) Mészáros P., Rees M. J., 1997, ApJ 476, 232

40) Sari R., Piran T., Narayan R., 1998, ApJ 497, L17

41) Gal-Yam A., 2012, Science 337, 927

42) Sari R., Piran T., Halpern J. P., 1999, ApJ 519, L17

43) Nakauchi D., Kashiyama K., Nagakura H., Suwa Y., Nakamura T., 2015, ApJ 805, 164

44) de Souza R. S., Yoshida N., Ioka K., 2011, A&A 533, A32

45) Greiner J., Mazzali P. A., Kann D. A., et al., 2015, Nature 523, 189

46) Metzger B. D., Margalit B., Kasen D., Quataert E., 2015, arXiv: 1508.02712

Ultra-long Gamma-Ray Burst

Daisuke NAKAUCHI

*Institute of Astronomy, Tohoku University, 6-3
Aoba, Sendai 980-8578, Japan*

Abstract: GRBs are extremely violent explosions in the Universe. Some bursts show the ultra-long durations of the prompt γ - and X-ray emission. They have 10–100 times longer durations than normal GRBs, and are called ultra-long GRBs. While a Wolf-Rayet star is proposed as the progenitor of normal GRBs, this model may be inapplicable to ultra-long GRBs. Some authors, including us, propose a supergiant progenitor model for them. We also show that the association of ultra-long GRBs with luminous supernovae may be a supporting evidence of the model. Here, I review the results of our study.