

# 始原星と星の断末魔： ガンマ線バーストによる新しい宇宙論

井 岡 邦 仁

〈104 Davey Laboratory, PMB 027, Physics Department, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802〉

e-mail: kunihiro@gravity.psu.edu

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最も明るい現象である。その明るさゆえに宇宙の果てにあっても観測することができる。最近の観測によって GRB は重い星の崩壊に伴って起こると考えられている。それゆえ GRB は宇宙の初期の頃でも起こりうる。このような遠くで起こる GRB を使って、宇宙の最初の星々 (始原星) ができた頃の宇宙を研究できる可能性を議論する。特に GRB を用いて宇宙の再電離の歴史を明らかにできることを示す。

## 1. 重い星の断末魔：ブラックホール ができる瞬間か？

宇宙では1日に1回ほど水素爆弾を100・・・00個 (0を約30個) 集めたぐらいの爆発がどこかで起こっている。その明るさは宇宙で最も明るい。宇宙に存在するすべての星を足してやっとその明るさになるぐらいだ。(幸い宇宙は十分広いのでわれわれが危険になるほど近くで爆発が起こることはほとんどない。) この爆発はガンマ線バースト (以後 GRB) と呼ばれている。GRB は、それがどのようにして起こるのかが、研究者の間でもいまもって解明されていない謎の天体である。今回はこの謎の天体を使って宇宙の謎を解くという、ちょっと不思議な話をしてみたい。この号の村上敏夫氏の記事も関連しているので参照されたい<sup>1)</sup>。

ここ7, 8年前まで、GRBの謎に迫る手がかりは全くといっていいほどなかった。1997年に残光と呼ばれる現象 (GRBが観測された後、その方向に残る、時間とともにベキ乗的に暗くなる光) が発見され、研究はまさに爆発的に進み<sup>2)</sup>、去年ついに決定的なことが明らかになった<sup>3), 4)</sup>。どうや

ら GRB は、太陽の10倍ぐらい重い星が「死ぬ」ときに起こるようなのだ。重い星は自分の重力 (内側につぶれようとする力) に耐えられなくなったときに「死」を迎える。重い星が死んで重力でつぶれると、おそらく中心にブラックホールができるのだが、なぜかこのときものすごく高速なジェット (それが GRB になる) を噴き出すようなのである。なぜ、どのようにしてジェットの噴き出すのかはいまだ謎のままであるが、いずれにせよ、GRB は重い星の断末魔であるようなのだ (以後 GRB といった場合、残光も含める)。

## 2. 宇宙で最初にできた星

では、GRBを使って何を解こうとしているのか？ 大雑把に言えば、宇宙で一番最初の星々 (以後、始原星と呼ぶ) がいつどのようにして生まれたのかという問題である。なぜ GRB が始原星に関係するのかという点は後で考えることにして、まず始原星とはどのようなものを簡単に説明しよう。

現在の大まかな理解はこうだ。宇宙はビッグバンと呼ばれる大爆発から生まれた。最初は高温高密度でそれが膨張して冷えていき、現在のように

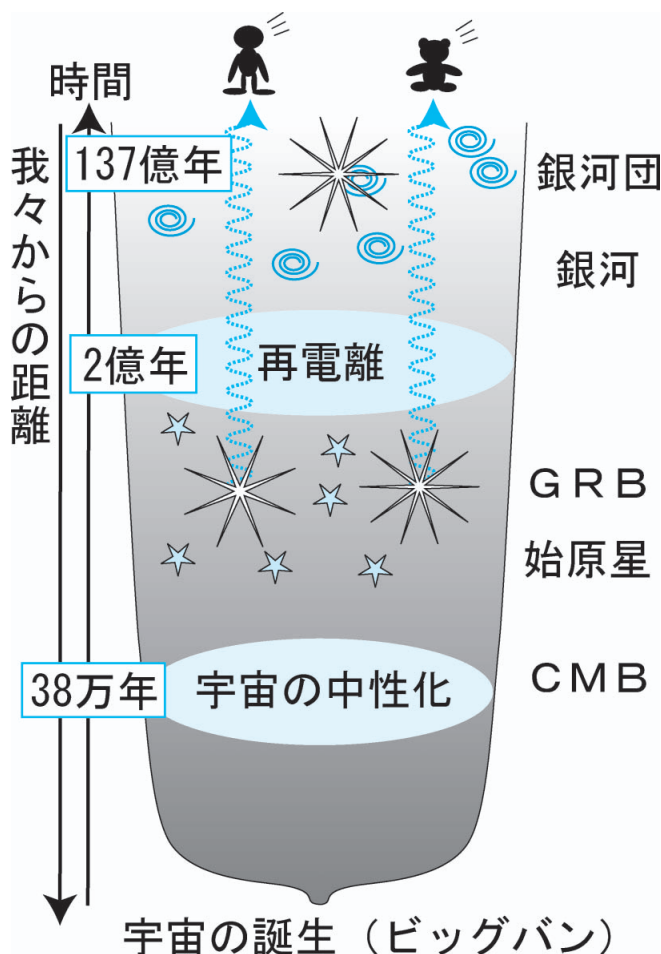


図 1 宇宙の歴史. 宇宙はビッグバンから生まれた. 中性化した(電子と陽子がくっついた)頃の宇宙が CMB (宇宙マイクロ波背景放射) として観測されている (38 万年後). 宇宙の構造は小さなものからできる. 最初は星が生まれたと考えられているが, まだその性質は定かではない. GRB (ガンマ線バースト) は重い星の崩壊で生まれるようなので, かなり昔から存在すると思われる. GRB は明るいのでかなり遠くても十分観測可能である. 宇宙の再電離が起こったのは暫定 2 億年後ぐらいだが, まだ分からない点が多い. 銀河や銀河団ができたのはもっと後. 現在われわれは 137 億歳の宇宙に住んでいる.

なった. はじめは星や銀河は一切なく, 密度の濃淡がほとんどないのっぺりとした状態にあったと考えられている. 時間が経つにつれ, 密度が少し高いところに重力でものが集まり, 星などの小さなものが先にでき, その後銀河のような大きなものができていったと考えられている. つまり, 始原星が生まれたのはかなり昔で, まだ銀河などほかの構造がない頃であったというわけである (図 1 参照).

宇宙では遠くであればあるほど, 光がわれわれに届くのには時間がかかる. つまり遠くを見れば見るほど昔の宇宙を見ることになる. 始原星が生まれたかなり昔を見ようと思うと, かなり遠くの宇宙を見る必要がある. 残念ながら最新の望遠鏡をもってしても直接始原星を観測することは遠すぎて (暗すぎて) 不可能である. 始原星が生まれた頃はまだよく分かっていないのである.

ところが最近, 始原星に関するいくつかの進展

があった。特に観測的には去年の **WMAP** 衛星と呼ばれる人工衛星が出した結果である<sup>5)</sup>。これについては次章で述べる。理論的進展は始原星はかなり重く(太陽の 10 倍以上)なければならないことが分かったことである。宇宙のはじめは重い星ばかりというわけである。**WMAP** 衛星の結果もこれとつじつまが合い、始原星が生まれた頃の研究がにわかに活気づいている。始原星の性質はその後の宇宙の進化に影響を及ぼすため、さらなる研究が求められている。また、始原星がどれくらいの数できたかは、宇宙が誕生したころの密度の濃淡の情報を含む。つまり始原星で宇宙誕生の情報が分かるかもしれないという点でも重要である。

### 3. いつ宇宙の中身はばらばらに？

次に始原星が放出する光が周囲の宇宙空間に与える影響を考えてみよう。始原星ができるころの宇宙空間は中性水素がほとんどである。中性水素に **UV** (お肌に大敵の紫外線) があたると、中性水素は陽子と電子に分解する(電離する)。始原星が出す **UV** が周囲の中性水素をどんどんばらばらにしていくのである。そしてついには宇宙全体を電離してしまうと考えられている(クエーサーや未知の粒子が電離するという説もあるがここでは省略)。宇宙全体が電離される時期は、始原星の性質や量に依存する。例えば始原星が重いほど、より早い時期に宇宙は電離される。なぜなら重い星ほど **UV** を多く出し、より短時間に電離を行うからだ。逆に言えば、宇宙の電離の歴史から始原星の性質や量に関する情報を得ることができるというわけだ。

しかし宇宙の電離の歴史がこれまたよく分かっていない。われわれの近く(つまり最近)の宇宙は、いろいろな観測からほぼすべて電離されていることが分かっている(もちろんわれわれ人間は電離されていないが、ここで言うのは宇宙全体で平均した意味)。宇宙がビッグバンで始まった頃

も非常に高温(**UV** だらけと思えばよい)なのでほぼ電離されている。一方、始原星が生まれるより前に宇宙が一度中性化(陽子と電子がくっつくこと)したことも分かっている。もし中性化が起こらなければ、電離した電子が光を遮るため、後述する宇宙マイクロ波背景放射(**CMB**)と呼ばれる宇宙の果て(宇宙誕生から 38 万年後の宇宙に相当)からの光が観測されないからだ。つまり、宇宙は少なくとも 2 回は電離している。2 度目の電離(再電離)がいつ起こったのか、それが始原星の性質を知るためにも問題なのだ。

これまで再電離の時期は、主にクエーサーと呼ばれる遠くの明るい天体からの光で調べられてきた(巨大なブラックホールに吸い込まれる周囲の物質が明るく輝いているのがクエーサー)。宇宙が中性化していると、クエーサーからの光が中性水素に吸収される。吸収された光の量から中性水素が消えた時期、つまり電離の時期が推定できるというわけである。その結果、宇宙誕生後 10 億年ぐらいで再電離が起きたと議論されてきた(ちなみに現在の宇宙の年齢は 137 億年)。

ところが、**WMAP** 衛星が去年出した結論はそれよりももっと昔、宇宙誕生から約 2 億年後であった。宇宙は思った以上に早く再電離したのである。これは始原星が重いという理論的予想とつじつまが合う。というのも、始原星は銀河やクエーサーよりも先に出現したと考えられ、さらにもし十分重ければ、先ほど述べたように **UV** をたくさん出すので、再電離の時期が早まるからである。もっともクエーサーの結果と **WMAP** 衛星の結果は完全に矛盾するわけではなく、再電離が 2 度起こった、つまり電離した時代が 3 度あった可能性も残っている。

**WMAP** 衛星はこの結論を **CMB** の観測から導いた。**CMB** は宇宙がまだ熱かった頃の宇宙を満たしていた光(つまりビッグバンの残光)で、始原星が生まれるより前(遠く)からやってきている(図 1 参照)。電離した電子があると **CMB** の一

部が散乱されるため、CMBにある特徴を残す。再電離の時期によって散乱する電子の量が異なるため、この特徴は再電離の時期に依存する。よってCMBから再電離の時期が推測できるわけである。しかし残念ながら、CMBの観測では詳しい再電離史、例えば再電離が1度起こったのか2度起こったのか、を調べることは難しい。なぜなら異なる再電離史が似たような特徴をCMBに与えるからである。再電離史を調べる何かほかのよい方法が必要なのだ。

#### 4. 宇宙の果ての研究の幕開け

ここで重い星の断末魔GRBの出番である。GRBは宇宙一明るい。それゆえかなり遠くでも観測できる。しかも宇宙では星などの小さな構造が銀河やクエーサーなどより昔にできる。ということはGRBの起源である重い星もかなり昔から存在するはずである。重い星は寿命が短いですがGRBになる。それゆえGRBは遠くの宇宙を照らし出す自然の灯台となりえるのである。

実はこのような遠くのGRBを、われわれはすでに観測しているというのが村上敏夫氏の話だ<sup>1)</sup>。距離が測定されていないGRBの中に、遠くのGRBが混じっているというのである。いろいろな間接的な方法<sup>6)</sup>で距離を推定してみると、すべての方法がすべからず遠くのGRBの存在を導き出す<sup>7), 8)</sup>。遠くのGRBはあるに違いないのだ！

もしこのような遠いGRBがあれば、今年打ち上げ予定のSwift衛星によって、その詳しい性質が明らかになるであろう。GRBまでの距離も赤外線観測などで直接的に求めることができるはずである<sup>1)</sup>。現在活躍しているHETE衛星<sup>9)</sup>がいち早く、直接的に距離を決めることのできる、遠くのGRBを見つけ出すかもしれない。宇宙の果てにある天体の観測がすぐそこまで迫っているのである。

GRBは宇宙の果ての研究にかなり使えるそう

ある。例えば今までの応用で、クエーサーを用いて行われていたことがそっくりGRBを使ってできるかもしれない。GRBの起源が重い星なら、GRBの起こる頻度から遠い宇宙でどれだけ重い星ができるのかを調べられるかもしれない<sup>10)</sup>。GRBからの光が途中の星の重力に曲げられてレンズのように明るくなる現象<sup>11)</sup>から、宇宙に星がどれだけ存在するかが分かるかもしれない。GRBまでの距離と本当の明るさが推定できれば、宇宙のほとんどを満たす暗黒エネルギーの性質まで求められるかもしれない<sup>12)</sup>。GRBを使った研究の重要性は認識され始めたばかりで、大いなる可能性を秘めていると思われる。

以下ではGRBを使って再電離の歴史を明らかにする方法を紹介する<sup>13)</sup>。上で述べたように、始原星も重い星と考えられているので、始原星がGRBの起源になっても不思議ではない。たとえそうでなくても、再電離の頃すでにGRBが存在することは大いにありうる。したがって、始原星を直接観測できなくとも、GRBの観測データを使って、始原星とそれが引き起こす宇宙の再電離について調べることのできるのである。

#### 5. 光の競争

では宇宙の再電離の歴史を直接的に決めるにはどうすればよいのであろうか？単純には、電離した物質の柱密度（密度×距離）がわれわれからの距離の関数として求まればよい。図2を見てほしい。横軸にわれわれからの距離、縦軸に柱密度を取ると、われわれの近くでは宇宙は電離しているので距離が遠くなればなるほど柱密度は上がっていく。ところがある時期に再電離が起こったとすると、それより遠くでは物質は中性化している。それゆえ電離物質の柱密度は上がらない。つまり図2が求まれば、柱密度が一定になった時期から再電離の時期が分かるというわけである。この方法だと再電離が2回起こった場合でも分かる。この場合の図がどうなるかは一度考えてみて

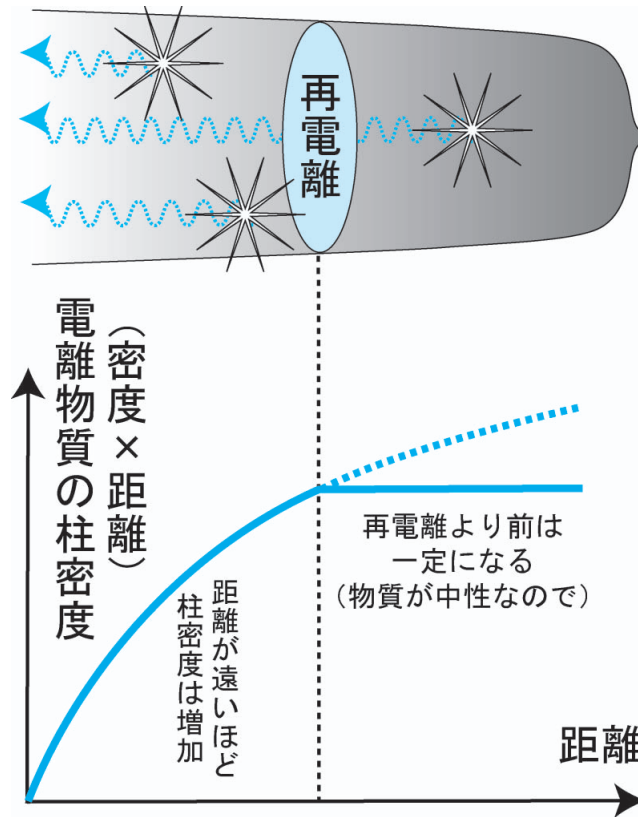


図 2 電離物質の柱密度 (密度×距離) をわれわれからの距離の関数として表した。われわれの近くでは宇宙は電離しているので距離が遠くなればなるほど柱密度は上がる。再電離の時期より昔では物質は中性化している (電離していない) ので、電離物質の柱密度は上がらない。柱密度が一定になった時期が再電離の時期。この方法だと再電離が 2 回起こった場合でも分かる。GRB (ガンマ線バースト) を用いていろいろな距離での柱密度を求めることができれば、この図が描ける。

ほしい。

では電離物質の柱密度をどう測るのか？ ここで電離物質中では周波数の低い光が周波数の高い光に比べてわれわれに到着する時間が遅れるという事実を用いる。(赤い光の方が青い光より遅れる。) この光の時間遅れがちょうど電離物質の柱密度に比例する。それゆえ時間遅れを測定できれば柱密度が測れるのである。時間遅れが生じるのは、周波数の低い光が途中で余分なことをしているためである。光は伝播中に電離された電子をゆさゆさとゆさぶる。周波数の低い光の方が電子を余分にゆさぶるため、ゴールが遅れるのである。実際パルサーと呼ばれる天体からの光でこの効果

は測定されている。

幸い GRB はあらゆる周波数の光を放出する。いろいろな距離の GRB に対して時間遅れを測定できれば図 2 が求まり、再電離の歴史が求まる。問題は時間遅れが測れるかどうかである。一つは十分測定できるほど時間遅れが長いかという問題。もう一つは GRB からの光が観測できるほど十分明るいかという問題である。周波数が低ければ低いほど時間遅れが長くなり測りやすい。ところがあまりに低い周波数では、GRB といえども暗くて見えなくなる。観測するためにどのくらいの時間遅れが最低限必要かという点、GRB の方向に望遠鏡を向けることができる時間ぐらいで



ある。時間遅れのうちに望遠鏡を向けないと時間遅れを測ることが困難になるからである。ここでは時間遅れが1,000秒(20分ほど)あれば十分と考えよう。大体100~200MHzの光(つまり電波)で1,000秒ほど遅れる。つまりGRBが起こって1,000秒以内に電波で観測できれば時間遅れを測定できるのだ(正確に言うと残光を観測する。残光のベキ的な振舞が時間遅れによってひずむことから時間遅れを求めることができる)。残念ながら現存する望遠鏡では1,000秒後のGRBからの電波は暗すぎて測定できないが、現在計画されている望遠鏡なら可能である。

この話で重要な点は、GRBの明るさが短い時間で変動することである。もしCMBのように定常に光る天体だと時間遅れがあってもなくても同じように見えるので時間遅れを測定することはできない。遠くの宇宙に存在して、しかも変動する明るい天体でなければGRBと同様のことはできない。宇宙初期に激しく変動する明るい天体としてほかに考えられるのはクエーサーであるが、GRBがこの手の観測には最も適していると思われる。

## 6. 研究の競争

本稿のGRBを使って再電離の歴史を明らかにする方法については、同時期にほぼ同じ論文が書かれている<sup>13), 14)</sup>。あまりに似ているためどちらかが真似たのではないかと疑念さえ生まれたが、幸いそのようなことはない。論文作成段階でお互いが同様の論文を書いていると分かったときはあまり健全な精神状態ではいられなくなったが、同時に論文を出すという約束を交わしたことで落ち着くことができた。

GRBの理論業界はアイデア勝負の側面が強く、個々の論文は独創的なのだが、それでもいくつか同様の論文が同時期に出されている。最たるものは、GRBの理論の中で最も有名な火の玉モデルの論文が、2本同じ日に出されていることであ

る<sup>15), 16)</sup>。皆似たようなことを考えているということか。

## 7. ガンマ線バーストの今後

本稿の話をもとめると(1)GRBによる宇宙の果て、つまり初期宇宙の研究は数年のうちに新たな分野となりうる、(2)GRBを用いて宇宙の再電離の歴史が分かる、である。(1)に関してはまだまだこれからなので非常に楽しみである。

GRBはこれだけでも面白いのだが、肝心のGRB自体がよく分かっていない点も面白い。なぜブラックホールができるところからジェットが出るのか? そもそもブラックホールはできているのか? このような基本的な問題が解決しておらず今後の課題である。

最近の発展を簡単に紹介しておこう。一つは、ジェットを見込む角度によって同じGRBでも異なった現象に見える可能性が指摘され始めたことである<sup>17), 18)</sup>。実際観測的にも、HETE2衛星の活躍によって、X線フラッシュと呼ばれるGRBによく似たバースト現象が多数見つかりつつある。異なる点はガンマ線ではなくX線で明るいという点だ。この新しいバースト天体は少し斜めから見たGRBと解釈すると全く自然に説明できる。GRBのジェットの構造によってX線フラッシュの頻度や性質などが変わってくるので、逆にX線フラッシュの観測からまだよく分かっていないジェットの構造が決まる可能性がある。ジェットの構造はジェットの生成機構と結びついているため、その解明はジェットの起源の重要な手がかりとなるかもしれない。

ジェットが生まれる中心付近で超強力な磁場があるかもしれないという示唆も興味深い<sup>19)</sup>。もし事実なら、これはわれわれが知る限り宇宙の中で最も強い磁場である。これまでの歴史が示すように、このような極限状態に新たな発見があるものだ。ただしこの示唆に対しては反対意見も多い。ある方向に偏った光(偏光)の観測が今後の鍵に

なると思われる<sup>20)</sup>。その他、いくつかのクエーサーから出ているジェットと GRB のジェットとの関連性や、超高エネルギー粒子を放射する天体としての GRB の研究も面白い。

GRB はこれまでさまざまな驚きとともに理解されてきた。今後も驚きは続くだろうが、これからは本稿で紹介したような、始原星による再電離といったような、GRB と一見無関係な分野にも驚きを与えていくのかもしれない。

**謝 辞** 本稿をまとめるにあたり貴重なコメントを頂いた小林史歩氏、藤田 裕氏、大向一行氏に深く感謝いたします。また共同研究者である中村卓史氏、山崎 了氏、松宮 慎氏には特にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 村上敏夫, 米徳大輔, 中村卓史, 2004, 天文月報 97, 516
- 2) 小林史歩, 2002, 天文月報 95, 84
- 3) 植村 誠ほか, 2004, 天文月報 97, 169
- 4) 川端弘治ほか, 2004, 天文月報 97, 176
- 5) 小松英一郎, 2003, 天文月報 96, 482
- 6) Ioka K., Nakamura T., 2001, ApJ 554, L163
- 7) Yonetoku D., et al., 2004, ApJ, 609, 935
- 8) Murakami T., Yonetoku D., Izawa H., Ioka K., 2003, PASJ 55, L65
- 9) 河合誠之, 2001, 天文月報 94, 287
- 10) Totani T., 1997, ApJ 486, L71
- 11) Ioka K., Nakamura T., 2001, ApJ 561, 703

- 12) Takahashi K., et al., 2003, astro-ph/0305260
- 13) Ioka K., 2003, ApJ 598, L79
- 14) Inoue S., 2004, MNRAS 348, 999
- 15) Paczyński B., 1986, ApJ 308, L43
- 16) Goodman J., 1986, ApJ 308, L47
- 17) Yamazaki R., Ioka K., Nakamura T., 2004, ApJ 607, L103
- 18) Yamazaki R., Ioka K., Nakamura T., 2002, ApJ 571, L31
- 19) Coburn W., Boggs S. E., 2003, Nature 423, 415
- 20) Matsumiya M., Ioka K., 2003, ApJ 595, L25

## First Stars and Death Cry of Stars: Novel Cosmology with Gamma-Ray Bursts

Kunihito IOKA

104 Davey Laboratory, PMB 027, Physics Department, Pennsylvania State University, University Park, PA 16802

**Abstract:** Gamma-Ray Bursts (GRBs) are the most luminous events in the universe. Their high luminosities make them detectable even at the edge of the visible universe. Recent observations suggest that GRBs are associated with massive stellar collapses. Thus GRBs probably occurred at the beginning of the universe. We discuss some possibilities to study the era of the first generation of stars (first stars) by using such GRBs in the distant universe. In particular, we show that GRBs can reveal the reionization history of the universe.