

超新星爆発とガンマ線バースト

岩本 弘一, 梅田 秀之, 中村 敬喜, 野本 憲一

〈東京大学大学院・理学系研究科・天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

天球のある一点からガンマ線のパルスが飛来する現象、ガンマ線バーストの起源は、その発見から 30 年もの長いあいだ現代天文学における最大の謎の一つであった。ところが、1997 年 2 月 28 日イタリア、オランダの X 線天文衛星 BeppoSAX がバーストの残光現象を初めて観測して以来¹⁾、ガンマ線バーストの理解はかつてない速度で飛躍的に進んでいる。X 線、可視光、電波での残光現象の振舞いが、早くから提唱されていた‘火の玉’モデルの予測と一致し、このモデルの描像が大筋において正しいことが示された。また、いくつかのバーストに対してバースト天体の属すると思われる銀河 (= 母銀河) が発見され、その母銀河の可視光スペクトルの情報あるいはバーストの残光自身の可視光スペクトルの情報から距離の推測が可能となった^{2), 3)}。その結果、少なくともいくつかのバーストは cosmological (宇宙論的遠方の距離の) 起源であることが明らかになった。1998 年 4 月、ガンマ線バースト (GRB 980425) とほぼ同じ時刻にほぼ同じ方向でおきた超新星 (SN 1998bw) が発見された⁴⁾。可視光における光度曲線およびスペクトルの解析から、この超新星の爆発の運動エネルギーは通常の約 30 倍、 3×10^{52} erg であり、この超新星を‘ハイパーノバ’ (hypernova: 極超新星) と呼んでもよいくらい大きいことが明らかになった⁵⁾。またこの超新星は電波においても非常に明るく、その輝度から相対論的な速度で膨張する衝撃波の存在が示唆されている⁶⁾。本稿では、このユニークな超新星 SN 1998bw に対して我々が提唱した「ハイパーノバ・モデル」を紹介し、その起源とこのモデルにおけるガンマ線バースト生成のメカニズムについて議論する。

1. ハイパーノバの発見, SN 1998bw

1998 年 4 月 25 日イタリア、オランダの X 線天文衛星 BeppoSAX はガンマ線バースト GRB 980425 からの X 線を捉えその天球上での位置を精度よく決定した⁷⁾。バーストとほぼ同じ位置に約 1 日後に可視光で⁴⁾ 3 日後には電波において⁶⁾ 明るく輝く天体が見つかった。ガンマ線バーストの残光現象の発見である (残光現象とはガンマ線バーストの後で、X 線、可視光、電波などガンマ線よりも長い波長の光が次第に暗くなっていく現象で、1997 年 2 月 28 日のバーストで初めて発見された)。GRB 980425 は南半球からしか見えないため、ESO (European Southern Observatory, ヨーロッパ南天文台) などの南半球の天文台がその後の詳しい可視光観

測を続けた。これまでに見つかった残光現象は明るさがバースト発生後の経過時間にはほぼ反比例して暗くなっていくものでパワーロー型のスペクトルをもっていたが、この可視光の残光天体はだんだんと明るくなっていった。さらに残光天体の可視光スペクトルをとったところ、この天体が熱的放射をする超新星であることが分かったのである。超新星とガンマ線バーストの関連が観測的に示唆された事例はこれが初めてで、この衝撃的なニュースは関係者を驚かせた。

超新星 SN 1998bw の位置は BeppoSAX が決定したガンマ線バースト GRB 980425 の半径約 8 分の誤差領域の中にあつた。これらがほぼ同時刻にこのような狭い領域内に偶然発見される確率は 10^{-4} 以下と非常に小さい。このことは、両者が同じ起源

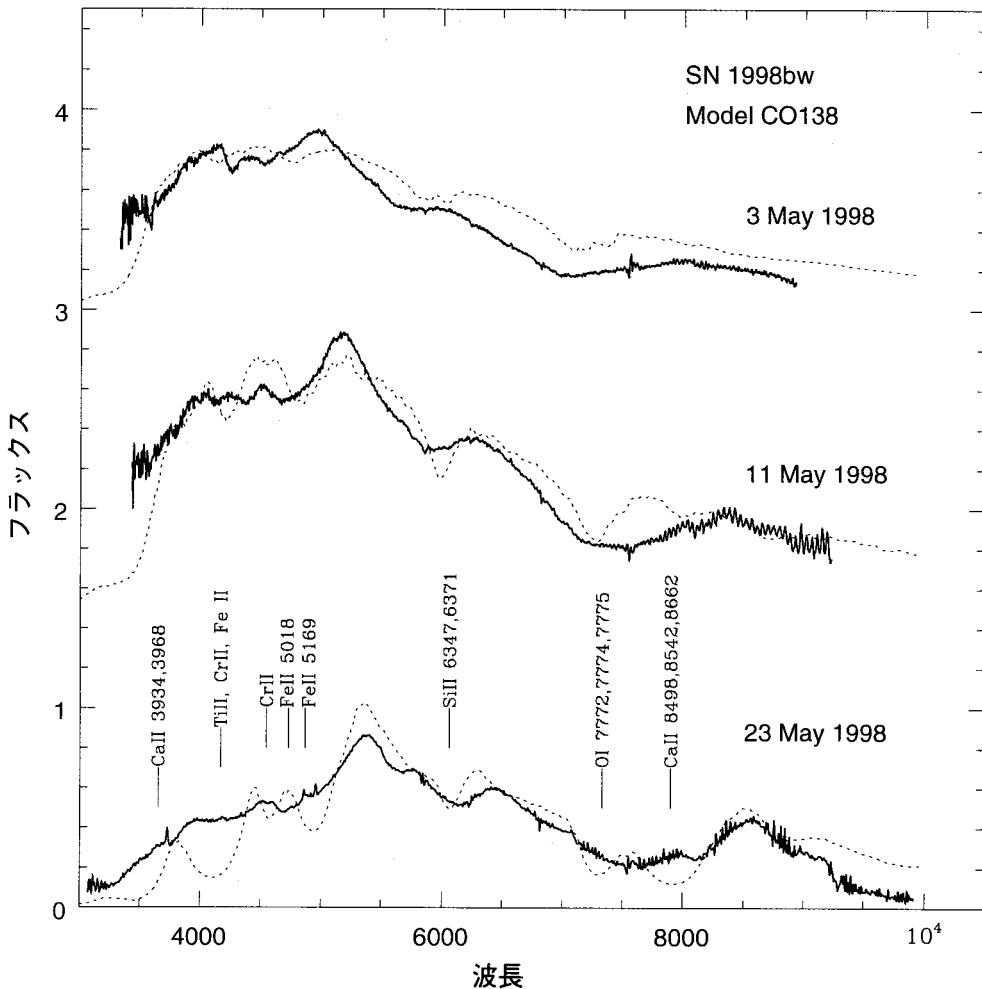


図1 超新星 SN 1998bw の可視光スペクトル。観測 (実線) および理論 (点線, C + O 星モデル) を 3 つのエポックについて比較⁵⁾。

である可能性が高いことを示している⁴⁾。SN 1998bw の可視光のスペクトルには水素、ヘリウムの吸収線 (や輝線) が見えないことから Ic 型と呼ばれるタイプの超新星に分類された。このタイプの超新星は、大質量星が水素の外層を失ったのちヘリウムの外層もほとんど失った状態の星 “C + O 星” が爆発したものと考えられている⁸⁾。しかし、SN 1998bw はさまざまな点において普通の Ic 型超新星とは異なっていた。第一にスペクトルに現れ

る吸収線の幅はドップラー効果によって異常に広がっていた (図 1)。スペクトル解析から見積もった膨張速度はもっとも外層で光の速度の 10 分の 1 である $30,000 \text{ km s}^{-1}$ 以上にも達していた⁵⁾。これは爆発エネルギーが非常に大きかったことを示している。第二にこの超新星は非常に明るく、ピーク時と比較すると今までに知られている同種の超新星に比べて 10 倍も明るかった⁵⁾ (図 2)。また SN 1998bw は電波においても非常に明るく、超新星と

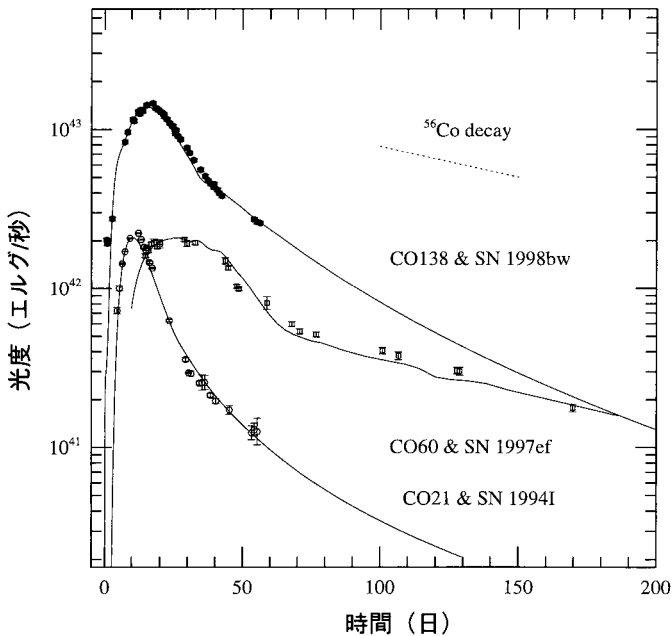


図2 超新星 SN 1998bw の可視光光度曲線。横軸はバースト (GRB980425) 発生からの時間 (日), 縦軸は可視領域での全放射光度。その他の最近の Ic 型超新星 SN 1994I, SN 1997ef および, それらをよく再現する理論モデルの光度曲線 (横軸は適当にシフトしてある) を比較のために示した⁵⁾。

しては観測史上最も強い電波が観測された⁶⁾。

我々は、上で述べた C + O 星の中心部に大きなエネルギーを与えて流体力学計算を行なって超新星爆発をシミュレートし、さらに詳しい輻射輸送計算を行なうことで可視光領域での光度曲線とスペクトルを計算した⁵⁾。その結果を観測と詳しく比較し、この超新星を特徴づける基本的な物理量を導いた。まず、放出された超新星物質の質量は $10 M_{\odot}$ 程度で $13 M_{\odot}$ 程度の C + O 星が爆発したと推測される。これは主系列時の質量でいうと $40 M_{\odot}$ 程度の星に対応する*。次に爆発の運動エネルギーは約 3×10^{52} erg と普通の超新星よりも 30 倍も大きかった。このような大きなエネルギーの爆発を普通の超新星 (Supernova) と区別するために我々は

* M_{\odot} は太陽の質量で (1.989×10^{33}) g.

“ハイパーノバ (Hypernova: 極超新星)” と呼ぶことを提唱した⁵⁾。さらに超新星の光の熱源となる放射性元素 ^{56}Ni の質量も、普通の大質量の超新星より 10 倍程度大きく $0.7 M_{\odot}$ であった。もし爆発が非球対称であったとすると、ある特定の方向の光の量が増えるため、爆発エネルギーや ^{56}Ni の質量はこれより幾分小さくてもよいことになる。しかし可視光での偏光の大きさは 1% 程度とこれまで普通の超新星で観測されていた値と同程度であるため、あまり大きくゆがんだ非球対称爆発は考えにくい。

このようなハイパーノバの存在は重力崩壊型超新星の爆発メカニズムの根本的な見直しをせまることになる。大質量星の重力崩壊で解放されるエネルギーは「 $E \sim GM^2/R \sim 10^{53} \text{ erg} \cdot (M/M_{\odot})^2 \cdot (R/10 \text{ km})^{-1}$ 」程度であるが (M, R はそれぞれ後に残されるコンパクト・オブジェクトの質量と半径)、このうちほとんどはニュートリノ

の形で放出される。ニュートリノと物質の相互作用は“弱い相互作用”によるため非常に弱く、ニュートリノとして持ち去られるエネルギーの 1% 程度しか物質に吸収されない。回転の影響による非球対称爆発により爆発エネルギーがある程度大きくなる可能性はあるが、30 倍も大きなエネルギーをニュートリノ吸収により得ることは難しく、何か他の異なるメカニズムによってエネルギーが引き出されているのかもしれない。例えば、大質量星の重力崩壊の後に質量 M_{BH} のブラックホールと降着円盤からなる系が残されたとする。ブラックホールが 10^{15} G (ガウス) 程度の強い磁場をもって回転していると「 $(10^{51} \text{ erg s}^{-1} (B/10^{15} \text{ G}^2) (M_{\text{BH}}/10 M_{\odot})^2)$ erg の割合でのエネルギー解放が原理的には可能である⁹⁾。

このエンジンが 10 秒程度働けば 10^{52} erg のエネ

ルギーを取り出すことができる。これは Blandford-Znajek メカニズムとよばれ、はじめ超巨大質量ブラックホールへの質量降着による活動銀河核のモデルとして提唱されたものである¹⁰⁾。これへのアナロジーとして上のガンマ線バースト・エンジンのモデルはしばしば ‘micro-quasar’ モデルと呼ばれている。あるいはブラックホールではなく中性子星が形成されて、超強磁場のパルサーがその回転を急速に減速してエネルギーを供給しているのかもしれない¹¹⁾。最近 $8 \times 10^{14} \text{G}$ にも及ぶ超強磁場をもつ X線パルサーが実際に見つかっている¹²⁾。これらの興味深いシナリオはまだ憶測の域を出ていないが、今後の詳しい研究が期待される。

2. ガンマ線バーストの起源, GRB 980425

ガンマ線バーストの残光現象は X線、可視光、電波などで観測されているが、それらの多くは“相対論的速度で膨張する火の玉”モデル¹³⁾でよく説明されている。このモデルは、ほとんど輻射から成りバリオンを少しだけ含む“火の玉”が光速の 99.99% 以上という猛烈な速度で膨張するというもので、観測されたガンマ線バーストの残光現象を自然に説明する。ガンマ線自体の放射メカニズムはまだ十分解明されていないが、このような“火の玉”自身あるいは“火の玉”の原因となる高エネルギー現象に関連していることは確からしい。

ここでオーソドックスな“火の玉”モデルに基づいて、今回のバースト GRB 980425 の起源を考えてみたい。観測されるガンマ線バーストの継続時間は数ミリ秒から数百秒と広い範囲に分布しているが、比較的短いバースト ($\Delta t \sim 10 \text{ms}$) を考えると、 γ 線放射領域とサイズは $c \Delta t \sim 10^8 \text{cm}$ となる。このような狭い領域に典型的なバーストのエネルギーとして仮に 10^{51}erg のエネルギーの輻射が閉じ込められると、対生成 $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ がおこり γ 線は“火の玉”から外へ出られなくな

る。しかし物質が光速に近い相対論的な速度 ($\Gamma = (1-v^2/c^2)^{-1/2} > 100$) で膨張していれば、相対論的ビーミングの効果に加えて、実際のガンマ線放射領域の大きさが相対論的效果によりみかけ上のそれより大きくなる。すると放射領域での γ 線フラックスが小さくなり γ 線が外に出られるようになる。また火の玉のあるシェルのエネルギーを E とすると、そこに含まれるバリオンの質量は $\sim 10^{-7} M_{\odot} (E/10^{52} \text{erg}) \cdot (\Gamma/100)^{-2}$ と小さくしなければならぬ*。

これらの条件を満たす“火の玉”を作る可能性をもつ最もポピュラーであったシナリオは中性子星の合体であろう。二つの大質量星が連星系を作り、これらがともに超新星爆発を起こして後に中性子星が残される場合を考えるのである。連星中性子星は重力波放出によって角運動量を失うので、その軌道間隔が次第に狭まっていく。そして非常に接近したところで潮汐相互作用により合体がおきる。このモデルの利点は、合体の起こる時間が数ミリ秒のオーダーと短いため比較的短いバーストを説明しやすいことと、周りの空間が空なのでバリオン汚染の少ないきれいな火の玉を作るのに適していることである。合体した星の物質は $kT \sim 10 \text{MeV}$ という高温になり熱的ニュートリノを放射する。ここで弱い相互作用を介して $\nu + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + e^-$ の反応で電子・陽電子対ができ、これらが対消滅して光子になる。これらが少量のバリオンをまきこんで火の玉ができるというのである。しかし中性子星合体の 3次元数値シミュレー

*密度 n_{ex} の星周物質の中を断熱的に膨張する火の玉のエネルギー E は、 $E \sim (4\pi R^3/3) \cdot \Gamma n_{\text{ex}} \cdot \Gamma m_p c^2$ と書けることによる。ここで R は火の玉の半径、 m_p は陽子の質量。したがって、ここでのバリオン質量は衝撃波によって掃かれた星周物質の質量であり、 E は残光現象の観測から得られる火の玉のエネルギーである。一方火の玉がはじめから含んでいるバリオン質量が掃かれた星周物質の質量よりまだ大きいときは火の玉のエネルギーを E として $E > \Gamma M c^2$ より $M < E/\Gamma c^2 \sim 10^6 M_{\odot} \cdot (E/10^{51} \text{erg}) \cdot (\Gamma/100)^{-1}$ となる。ただしこの場合の E はバーストの γ 線でのエネルギーよりは大きいであろうが、観測から推測することは難しい。

シオンによると、このメカニズムで得られるガンマ線のエネルギーはせいぜい 10^{51} erg 程度であると考えられている^{9), 14)}。ガンマ線バーストの中には GRB971214 のように (球対称な放射を仮定した場合) 10^{53} erg ものエネルギーを γ 線で放射したものが、このような大きなエネルギーのバーストは極端なビーミングを考えない限り中性子星合体では説明することができない。

今回のバースト GRB 980425 が超新星 SN 1998bw に付随しておこったとすると、その距離 (約 38 Mpc) から γ 線として放出されたエネルギーは 10^{48} erg 以下となる。この γ 線のエネルギーは中性子星合体で十分間に合うが、 $10 M_{\odot}$ もの質量を 3×10^{52} erg の運動エネルギーで放出するハイパーノバの起源を説明するのは不可能である。今回のガンマ線バーストとハイパーノバを同時に説明するには、大質量星が重力崩壊する過程が関わっているモデルが必要である。例えば次のようなシナリオが考えられている。まず回転している大質量星が重力崩壊し、中心のコアは $3 M_{\odot}$ 程度のブラックホールとなり、そのまわりのまだ落下しきれない重元素層が降着円盤をつくる¹⁵⁾。降着円盤として残った物質は前節で述べたように Blandford Znajek メカニズムなどにより次第にエネルギーを受け取り、大質量の外層を吹き飛ばし、最終的にハイパーノバとなって放出される。

火の玉ができた後の力学的進化とそこから放射される輻射の強度については、比較的簡単なモデルで実際のガンマ線バーストの残光現象の性質をよく説明できている¹⁶⁾。衝撃波の下流では陽子や電子が磁場によるピッチ角散乱により上流に散乱されてエネルギーを得た後、再び下流へやってくる。このような加速過程によって粒子はパワーロー型の非熱的なエネルギー分布をもつようになる。磁場の中に高エネルギー粒子が存在するのでシンクロトロン放射により高エネルギー光子が放射される。断熱的な火の玉を考え磁場と粒子の間のエネルギー等分配を仮定すると、簡単な解析的評価に

より求められるシンクロトロン光のエネルギーは、 $h\nu \sim 1.6 \text{ keV} (\Gamma/100)^3 \cdot (n_{\text{ex}}/1\text{cm}^{-3})^{1/2}$ となる。さらにドップラー効果による青方偏移を考慮すると観測される光子のエネルギーは $h\nu_{\text{obs}} \sim 160 \text{ keV} \cdot (\Gamma/100)^4 \cdot (n_{\text{ex}}/1\text{cm}^{-3})^{1/2}$ となる¹⁷⁾。したがって $\Gamma \sim 100$ 程度であれば γ 線が放射される。火の玉は膨張するにつれ星周物質を掃きながら減速されていく。一様密度の星周物質の中を断熱的に膨張する火の玉の Γ の値は $\Gamma \propto t^{-3/8}$ に従って小さくなる。したがって、特徴的なシンクロトロン光のエネルギーは時間とともに小さくなり、放射強度のピークは順に X 線、可視光、電波の領域へと移っていく。図 4 は SN 1998bw と GRB 980425 の観測と理論を比較したものである¹⁸⁾。爆発の数日後に観測された SN 1998bw からの強い電波は、はじめ $\Gamma \sim 100$ で γ 線を出していた相対論的な火の玉が $\Gamma \sim 2$ 程度まで減速され電波を放射していたと考えるとつじつまが合う。このことは、超新星 SN 1998bw と γ 線バースト GRB 980425 が同じ起源であったことを間接的に支持している。もちろんここで述べた事実は状況証拠でしかない。今後火の玉を作る具体的なモデルについて数値シミュレーションを行ないながら、理論的にハイパーノバとガンマ線バーストを同時に作ることができるかを調べるのが重要である^{19), 20)}。

3. 今後の課題と展望

SN 1998bw の出現後、過去の超新星を詳しく解析した結果 SN 1997ef という Ic 型超新星も $\sim 10^{52}$ erg の爆発エネルギーをもつハイパーノバであったことが明らかになっている²¹⁾。水素の外層を保持している大質量星も、コアがブラックホールを形成すればハイパーノバになり得る。そのような例に SN 1998bw よりもさらに 3 倍明るかった II 型超新星 SN 1997cy がある。II 型や Ic 型超新星など重力崩壊によって引き起こされる超新星の発生頻度は我々の銀河で 100 年に一つ程度と考えられており、そのうちどのくらいの割合がハイパーノバに

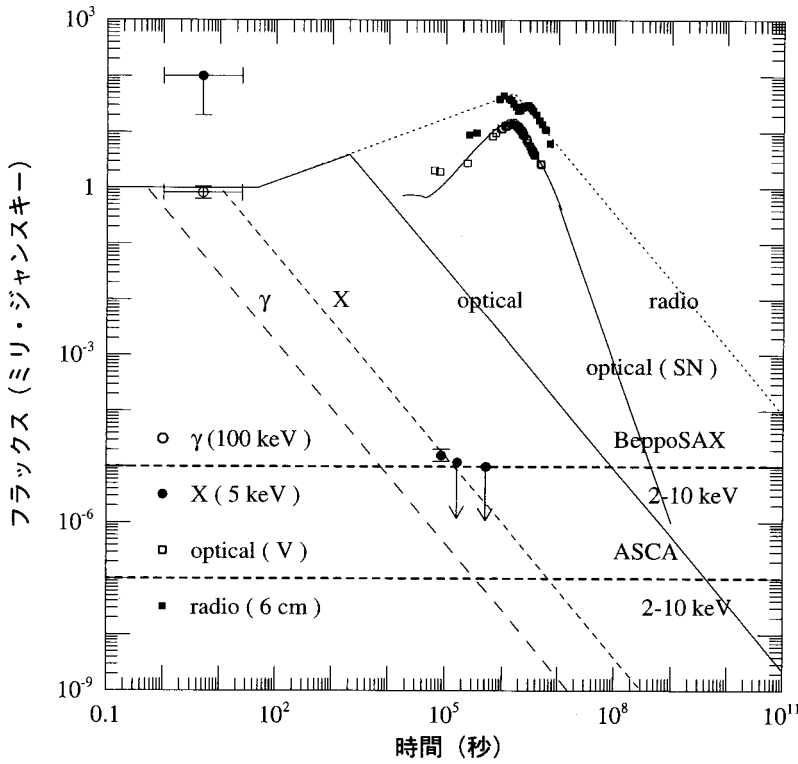


図3 観測と理論の比較 (GRB 980425 と SN 1998bw) 観測された GRB 980425 の γ 線, X線, SN 1998bw の可視光 (Vバンド), 電波 (波長 6 cm) (各シンボルによる点) と, 火の玉モデルの予測する各波長域での残光とハイパーノバ・モデルの予測する可視光 (Vバンド) の光度曲線¹⁸⁾.

なっているのかは非常に興味深い。過去の超新星とガンマ線バーストの位置と時間の一致の事例を調べた結果、ガンマ線バーストの1%程度は超新星が起源となっているという報告もある²²⁾。これからも注意深く、とくにIc型超新星のサーベイをしていくことが極めて重要であろう。GRB 980425のエネルギーが他の距離が知られているバーストに比べて3桁から4桁ほど暗かったのは、ピーミングが原因なのかあるいはそもそも暗いバーストであったのか不明である。現在距離がわかっているバーストはまだ3個しかないので、今後距離が決定されたバーストの数が増えるまで結論を出す事は難しい。ピーミングの程度を調べるには、 γ 線バースト自身の頻度とX線での残光の頻度を比べる

ことが重要である。今後も BeppoSAX を始めロッシ X 線 探 査 衛 星 (RXTE) と ‘あすか’ などの活躍により 数多くのガンマ線バースト 残光天体の発見が期待される。現在、日本の理化学研究所が中心となってX線観測で BeppoSAX と同じ役割を果たす HETE2 衛星の計画が推進されており、1999 年度の打ち上げが予定されている²³⁾。可視・赤外域での残光天体の精密観測に威力を発揮するであろうすばる望遠鏡は間もなく稼働を開始する。今後もさらにガンマ線バーストの残光現象が発見され、ガンマ線バーストの起源を解明する手がかりが得られることを期待したい。残光現象に比べると γ 線自体の放射メカニズムは放射が起こる場所や放射

過程などまだよく分かっていない。これについては特に理論的に詳しい研究が必要である。

謝 辞

本稿の内容は、以下の諸氏との共同研究による成果にその多くを依っている。ここに厚く感謝の意を表し結びとしたい。Paolo Mazzali, J. Danziger (Trieste, Italy), F. Patat, T. Augusteijn (ESO, Casilla, Chile), Elena Pian, E. Palazzi, F.Frontera (Bologna, Italy, BeppoSAX team), Titus Galama, J. van Paradijs, P. M. Vreeswijk (Amsterdam, The Netherlands), 鈴木知治, 茂山俊和 (東大), T. R. Young (Univ. of Arizona, USA) (敬称略)

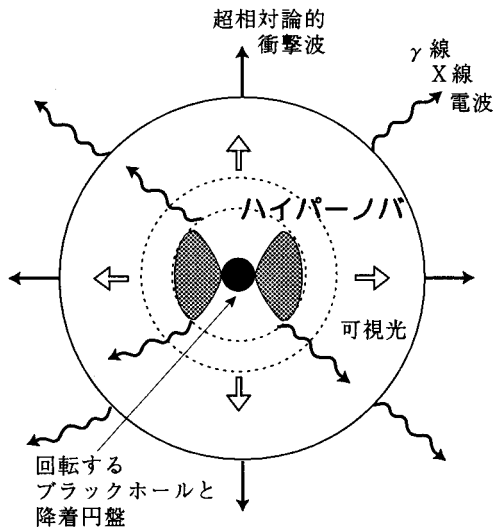


図4 ハイパーノバとガンマ線バーストが同時におきる状況の模式図²⁴⁾.

参考文献

- 1) Costa E., et al., 1997, *Nature*, 387, 783
- 2) Frail D. A., et al., 1997, *Nature*, 389, 261
- 3) Kulkarni S. R., et al., 1998, *Nature*, 393, 35
- 4) Galama T. J., et al., 1998, *Nature*, 395, 670
- 5) Iwamoto K., et al., 1998, *Nature*, 395, 672
- 6) Kulkarni S. R., et al., 1998, *Nature*, 395, 663
- 7) Pian E., et al., 1998, *GCN Circular*, No.61, 69
- 8) Nomoto K., et al., 1994, *Nature*, 371, 227
- 9) Paczyński B., 1998, *ApJ*, 494, L45
- 10) Blandford R. D., & Znajek R. L., 1977, *MNRAS*, 179, 433
- 11) Nakamura T., 1998, *Prog. Theor. Phys.*, submitted
- 12) Kouveliotou C., et al., 1998, *Nature*, 393, 235
- 13) Rees M. J., & Mészáros, P. 1992, *MNRAS*, 258, 41
- 14) H-Th Janka & M Ruffert., 1996, *A & A*, 307, L33
- 15) Woosley S. E., Eastman R. G., & Schmidt B. P., 1998, *ApJ* submitted, astro-ph/9806299
- 16) Mészáros P., & Rees M. J., 1997, *ApJ*, 476, 232
- 17) Piran T., 1997, in *Some Unsolved Problems in Astrophysics* (eds. Bahcall, J. N. & Ostriker, J.P.), 343
- 18) Iwamoto K., 1999, *ApJ*, in press
- 19) McFadyen A., & Woosley S., 1998, *ApJ* submitted
- 20) Nakamura T., Iwamoto K., & Nomoto K., 1999, in preparation
- 21) Iwamoto K., Nakamura T., Nomoto K., Mazzali P. A., Garnavich P., Kirshner R., JHA, S., & Balam, D., 1998, *ApJ* submitted
- 22) Bloom J. S., et al., 1998, *ApJ*, 506, 105
- 23) 吉田篤正, 河合誠之 1997, *科学*, 67, 891
- 24) Baron E., 1998, *Nature*, 395, 635

Supernovae and Gamma-ray Bursts

Koichi IWAMOTO, Hideyuki UMEDA, Takayoshi NAKAMURA, Ken'ichi NOMOTO

Department of Astronomy, School of Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: The origin of gamma-ray bursts (GRBs), short pulses of gamma-rays coming from the sky, has been a major conundrum in modern astronomy for nearly three decades since their discovery. A breakthrough was achieved on 28 February 1997, when the Italian-Dutch X-ray satellite BeppoSAX first discovered an afterglow of a gamma-ray burst. Since then progress has been made rapidly in understanding the mystery of the GRBs. Now we know that we are basically in the right direction with the 'fireball' model, which was theoretically proposed earlier, when we see its success in reproducing the observed behaviours of the X-ray, optical, and radio afterglows. Furthermore, the identification of the host galaxies, for some of the bursts, enabled us to determine the distances to the bursts. Thus, we also know that at least some of the GRBs are located at cosmological distances. Subsequently it happened in April 1998, very bright supernova, SN 1998bw, was discovered in the error box of the gamma-ray burst GRB 980425 with a very short time lag, suggesting their physical association. Optical spectra and light curves of SN 1998bw indicate that it was the explosion of a massive star with a kinetic energy of $\sim 3 \times 10^{52}$ erg. The extremely large explosion energy, thirty times larger than the previously observed supernovae, tempted one to call it a 'hypernova'. The peculiarity of SN 1998bw is evident in its radio properties as well. The rapid rise and the large brightness in radio strongly suggests the existence of a relativistic shock wave around the SN ejecta. In this letter, we describe a 'hypernova' model we proposed for SN 1998bw and discuss its progenitor and the mechanism to generate a burst of gamma-rays in this scenario.