

## ガンマ線バースト：ブラックホールの誕生

井岡 邦仁 (天体核) 記録係：武藤 恭之、棚橋 典大 座長：野村 正

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙で最も明るく激しい現象である。近年 GRB の研究は急激に発展しており、さまざまな領域にまたがる巨大な新分野を形成しつつある。これらの研究により、どうやら GRB はブラックホールの誕生と関係することも明らかになってきた。ここでは GRB の研究のこれまでの発展と今後の展望を簡単に紹介する。

### 1 GRB とは？

ガンマ線バースト（以後 GRB）とは宇宙のどこかで 1 日に 2、3 回ほどおこる、水素爆弾を 10 の 30 乗個ほど集めたぐらいの爆発である [1,2,3]。ガンマ線が数秒ほどやってくるので GRB と呼ばれる。その明るさは宇宙で最も明るく、宇宙に存在する全ての星を足してやっとその明るさになるぐらいである。別の言い方をすれば、GRB は太陽が一生かけて出すエネルギーを数秒で放出する。GRB は宇宙で最も激しく明るい現象なのである。

GRB は 1967 年に偶然発見された。時は米国とソ連（現ロシア）の冷戦時代。両国間で結ばれた大気圏外核実験禁止条約をソ連が守っているかどうかを監視するために、Vela 衛星が打ち上げられた。核実験で発生するガンマ線をとらえる衛星である。ガンマ線は検出されたが、それは地球からではなく宇宙からやってきていた。ちなみに、この GRB の発見は 1973 年まで発表されなかった。米国がソ連に軍事力を悟られるのを恐れたのだ。

図 1 左に示すように、観測される GRB は実にいろいろな光度曲線を見せる。変動の激しいものから、かなり滑らかなもの、途中休息するものなど多種多様である。GRB の継続時間も、図 1 右上に示すように、ミリ秒から千秒までいろいろな値をとる。その分布は約 2 秒あたりを境に二極分布を示す。継続時間の長い GRB は long GRB、短い GRB は short GRB と呼ばれる。やってくるガンマ線のエネルギースペクトルは、図 1 右下に示すように、約 200keVあたりをピークに 2 つの power law をつなげた形でよく近似でき、非熱的スペクトルである。また、ガンマ線がやってくる方向の天空分布を銀河座標上に表したものを見ると、あらゆる方向から等方的にやってくることが分かる。

### 2 GRB までの距離

発見後 30 年ほど GRB までの距離すらわからないという状況が続いた。ガンマ線はそのやってくる方向を正確に決めることが難しい。そのため、エラーサークル内にはまさに星の数ほどの天体が存在し、どの天体が GRB に関係するのか（つまり対応天体）を決めることができなかった。単にガンマ線がやってくるだけで、手がかりが乏しかったのである。

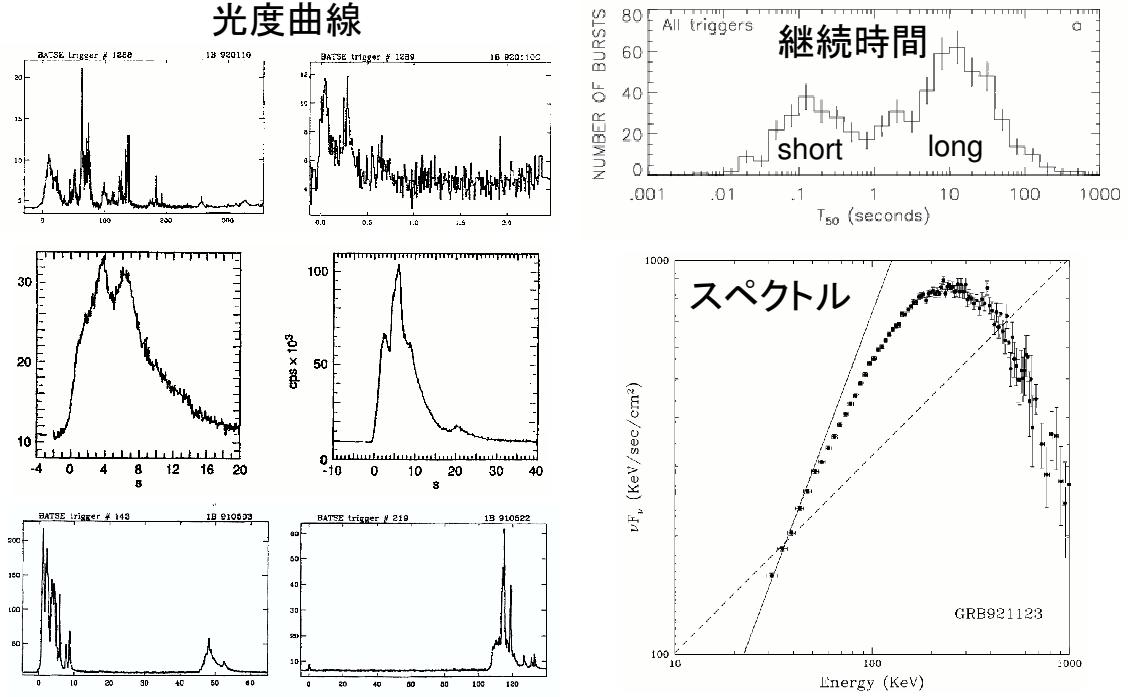


図 1: (左) GRB の光度曲線 [3]。(右上) GRB の継続時間のヒストグラム [4]。(右下) GRB のエネルギースペクトル [5]。

距離が分からなければ見かけの明るさから本当の明るさを出せない。発見された GRB の数を上回るほどの論文 (2 0 0 0 本以上) が書かれたが、主な焦点は GRB までの距離であった。当時、最も有力だったのが銀河ディスクに存在する太陽近傍 (約  $10^{21}$  cm) の中性子星説である。一方、GRB が宇宙論的な距離 (約  $10^{28}$  cm) にあるという説は、ガンマ線が電子陽電子対を生成して放射領域から出られないという、いわゆるコンパクトネス問題 (次節参照) があるとして重要視されなかった。

1 9 9 0 年にコンプトン衛星と呼ばれる巨大なガンマ線衛星が打ち上げられた。多くの人は、この衛星によって遠くの GRB まで観測され、GRB が銀河ディスクに分布することが確認されるだろうと思っていた。ところが、得られた結果は相変わらず等方分布であった (図 2 左上)。しかも遠くの暗い GRB がより少ないとわかった。つまり銀河ディスクの端が見えたにもかかわらず等方分布のままという矛盾が生じてしまった。最有力であった銀河ディスクの中性子星説は否定され、事態は大混乱に陥った。それまでの多数派は、中性子星が誕生時に大きな速度を得て遠く (銀河ハロー) まで分布するという説に乗りかえた。これにより宇宙論的距離説と同様にコンパクトネス問題が生じるにもかかわらず、まだ多くの人はこの説を信じた。

決着は 1 9 9 7 年について。BeppoSAX 卫星がエックス線の残光 (GRB の方向に残る、時間とともに幕的に暗くなる光) を発見し、その方向を精度良く決めたのだ (図 2 右)。それにより光学望遠鏡で対応天体を探すことが可能になり、光学残光も発見された。そのスペクトルがとられ、吸収線が赤方偏移していることが分かった (図 2 左下)。つま

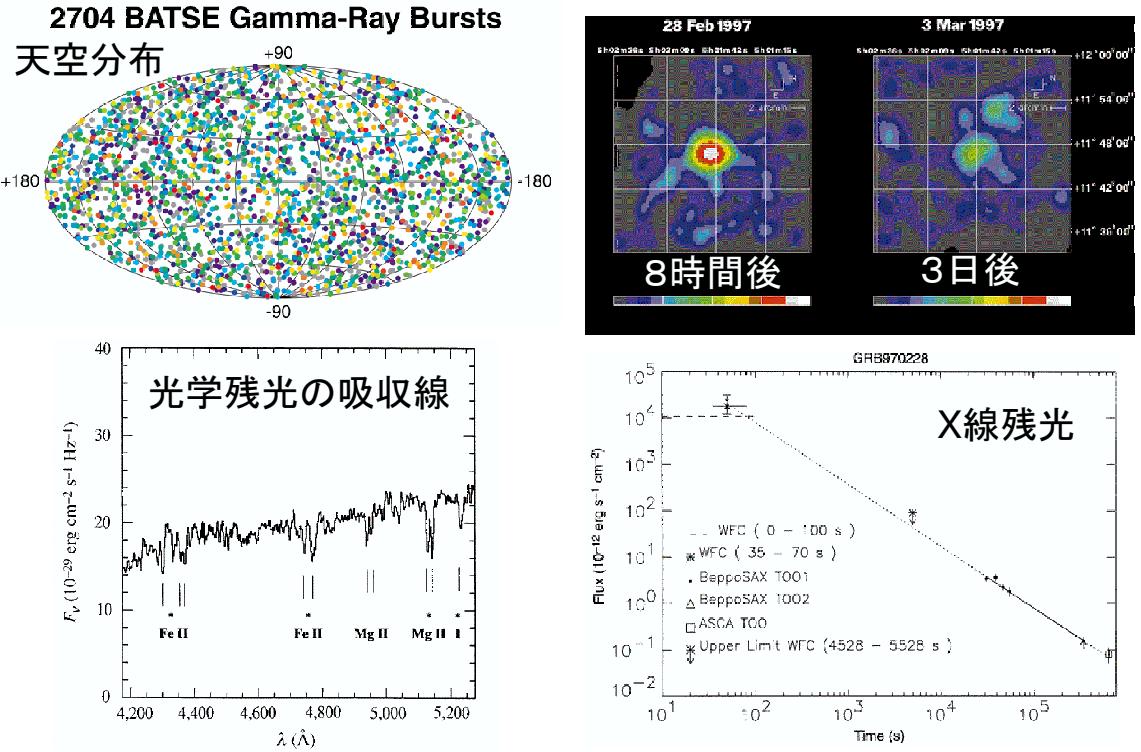


図 2: (左上) GRB の天空分布 [6]。(左下) 光学残光のスペクトル [7]。吸収線が見える。(右上) エックス線残光の天空上での像 [8]。8 時間後と 3 日後のもの。減光しているのがわかる。(右下) エックス線残光の光度曲線 [8]。幕的に減光している。

り GRB は宇宙論的距離に存在したのである！距離が決定したことによって放出される本当のエネルギーが見積もることができる。観測される典型的なガンマ線のフラックスは  $F \sim 10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  なので、宇宙論的な距離  $d \sim 10^{28} \text{ cm}$  で等方的に放射しているとすると、本当の光度は  $L \sim 4\pi d^2 F \sim 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$  となる。継続時間は約 10 秒なので、放出される本当のエネルギーは  $\sim 10^{52} \text{ erg}$ 。 $c^2$  で割って質量にすると太陽質量ぐらいになる。これで GRB が宇宙最大の爆発であることが確定した。

### 3 相対論的運動

宇宙論的距離で GRB がおこるとすると、次のように一見奇妙な矛盾が生じる。観測されるガンマ線フラックスの変動時間はだいたい  $\Delta t \sim 10 \text{ msec}$  なので、単純には放射領域のサイズは  $R \sim c\Delta t \sim 3 \times 10^8 (\Delta t / 10 \text{ msec}) \text{ cm}$  と見積もることができる。その間に放射されるガンマ線のエネルギーは  $\sim L_\gamma \Delta t \sim 10^{49} \text{ erg}$  である。このうちある割合  $f_p$  はガンマ線のエネルギーが十分高く電子陽電子対を生成する ( $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ ) ことができる。（観測的に  $f_p$  はそれほど小さくない。）対生成の断面積はトムソン断面積  $\sigma_T = 6.25 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$  ぐらいなので、対生成の光学的厚みは

$$\tau_{\gamma\gamma} \sim \frac{\sigma_T f_p L_\gamma \Delta t}{R^2 m_e c^2} \sim 10^{14} f_p \left( \frac{L_\gamma}{10^{51} \text{ erg/s}} \right) \left( \frac{\Delta t}{10 \text{ msec}} \right)^{-1} \quad (1)$$

となり大変大きいことがわかる。つまり単純に考えると、ガンマ線は対生成をおこして中から出てこれないという、いわゆるコンパクトネス問題が生じる。

現在ではこの問題はGRBやその残光が光速に近い（相対論的な）運動をする物体から放射していることを示す証拠であると考えられている（これは電波観測によっても確認されている）。相対論的運動はコンパクトネス問題を次の二つの効果で解決する。一つ目は、放射体が観測者に向かうと、光子のエネルギーがローレンツ因子  $\Gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$  倍だけ青方偏移する効果である。つまり、観測されるガンマ線は放射体の共動系ではエックス線であり、電子陽電子対を生成できるガンマ線の割合  $f_p$  は実際もっと少ないのである。どれくらい減るかというと  $\Gamma^{2(\beta_B+1)}$  倍程度になる。ここで  $\beta_B \sim -2$  は、観測されるガンマ線の数スペクトル  $N(E)dE \propto E^{\beta_B}dE$  の幕である。 $\Gamma$ への依存性は、共動系での対生成の条件  $E'_1 E'_2 > (m_e c^2)^2$  が実験室系では  $E_1 > \Gamma^2 (m_e c^2)^2 / E_2 \propto \Gamma^2$  なので、対生成できるガンマ線の割合が  $f_p \propto \int_{E_1} N(E)dE \propto E_1^{\beta_B+1} \propto \Gamma^{2(\beta_B+1)}$  となることから求まる。

二つ目の効果は放射領域のサイズ  $R$  が  $\Gamma^2$  倍ほど大きくてもよいことである。つまり正しくは  $R \sim c\Delta t$  ではなく  $R \sim c\Gamma^2\Delta t$  なのだ。図3のように中心からローレンツ因子  $\Gamma$  で放射体が放出され、距離  $R$  から  $2R$  まで光ったとしよう。観測者は右端にいる。相対論的ビーミングの効果によって、放射は放射体の進む方向に  $\sim \Gamma^{-1}$  ぐらいの角度で絞られるので、観測者は放射体の前面  $\sim \Gamma^{-1}$  の領域しか見えない。すると、距離  $R$  に出た光でも到着時間の散らばりは  $\Delta t \sim R/c$  ではなく、図3の点Aと点Bの行路差による  $\Delta t \sim R/c\Gamma^2$  ぐらいにしかならない。これは角度分散時間と呼ばれており、表面の曲率によるものである。また、点Aから出た光と点Cから出た光の到着時間の差も  $\Delta t \sim R/c\Gamma^2$  ぐらいにしかならない。これは放射体がほぼ光速  $v = c(1 - \Gamma^{-2})^{1/2} \sim c(1 - \Gamma^{-2}/2)$  で動くので、放射体が点Aから点Cまで動く間に、点Aから出た光と放射体との距離が  $cR/v - R \sim R/\Gamma^2$  にしかならないからである。これらの理由により  $R \sim c\Gamma^2\Delta t$  が得られる。ただし、中心エンジンの変動時間  $\delta t$  が  $\Delta t$  以下で短いという結論は変わらない。なぜなら、放射体が  $\sim \delta t$  の間放出されるとその厚みが  $\Delta \sim c\delta t$  になるので、図3の点Aから出た光と点Dから出た光の到着時間の差  $\sim \Delta/c \sim \delta t$  が生じるからである。

上記の二つの相対論的な効果によって電子陽電子対生成の光学的厚み  $\tau_{\gamma\gamma}$  は  $\Gamma^{2(\beta_B+1)} \times \Gamma^{-4} \sim \Gamma^{-6}$  倍になる。(1) 式よりだいたい  $\Gamma > 100$  であれば  $\tau_{\gamma\gamma} < 1$  となる。つまり GRB は光速の 99.9999% 以上の速度を持つ相対論的な爆発現象なのである。

相対論的に運動している物質の質量は、その運動エネルギーが GRB の全エネルギー  $E \sim 10^{51} \text{ erg}$  ぐらいあったとしても、 $M \sim E/c^2\Gamma \sim 10^{-5} M_\odot (E/10^{51} \text{ erg})(\Gamma/100)^{-1}$  ぐらい少なくないといけない。どうやって太陽質量の  $\sim 10^{-5}$  という少ない質量に  $\sim 10^{51} \text{ erg}$  もの大きなエネルギーを与えるのかはわかっておらず、バリオンロード問題と呼ばれている。

## 4 標準モデル

前節の考察から一般的に GRB は (1) 物質を  $\Gamma > 100$  まで加速して (2) それを外まで運んで  $\tau_{\gamma\gamma} < 1$  にしてから (3) エネルギーを解放してガンマ線などを出すことがわかった。現在の GRB の観測を説明するだけなら (1) の過程はなんでもよい。つまり  $\Gamma > 100$  の物質が放出されたと仮定すればよい。

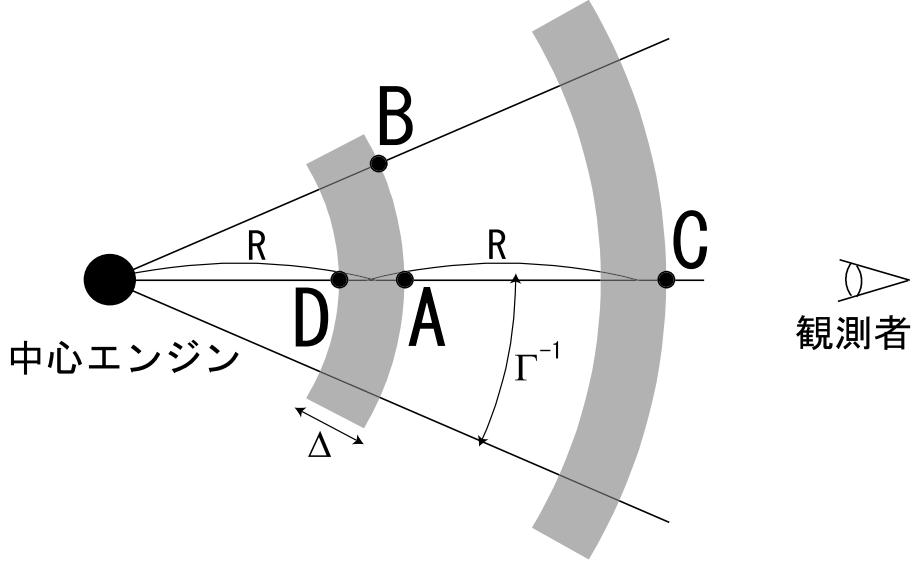


図 3: 観測者と相対論的な放射体と中心エンジンの幾何学的な関係。放射体が相対論的な場合、変動時間は  $\Delta t \sim R/c\Gamma^2 \ll R/c$  となる。

現在の標準モデルでは (3) の過程で解放されるエネルギーは物質が最初に持っている運動エネルギーであると考えられている。衝撃波によって運動エネルギーが内部エネルギーに変わり、それが観測される放射になる。放出される物質同士の衝突でおこる衝撃波を内部衝撃波とよび、放出物とまわりの星間物質との間でおこる衝撃波を外部衝撃波とよぶ。GRB は内部衝撃波、残光は外部衝撃波でつくられるというのが現在の主流である。主な理由は、GRB の激しい光度変動は内部衝撃波でしかつくれないからである。多数の放出物は衝突をいくつもおこして一つになったあと星間物質と外部衝撃波をおこして残光をつくると考えられる。

衝撃波によって生まれた内部エネルギーは主にシンクロトロン放射によって観測される輻射に変えられる。内部エネルギーの一部が電子の加速に使われ、一部が磁場の增幅に使われる。高エネルギーの電子が磁場の中を動きまわるのでシンクロトロン放射するわけである。このシンクロトロン衝撃波モデルは、特に残光を説明するモデルとして大成功を納めた [9,10]。約 1 日以降の残光の観測を驚くほど説明する。モデルのパラメータは全エネルギーやまわりの星間物質の個数密度など数個だけである。残光の観測を理論とフィットすることで、これらのパラメータの値が得られている。

## 5 中心エンジン

距離が確定して GRB の 2 大候補は連星中性子星の合体 [11,12,13] と重い星の崩壊 [14,15,16] になった (図 4 参照)。双方とも GRB のエネルギーを供給できる。連星合体の頻度が GRB とほぼ同じなので、最初は合体説の方が優勢であった。ところが 1998 年、GRB と Ic 型超新星が同時期、同じ方向から検出された。Ic 型超新星は重い星の崩壊で作られるの

で、この観測は重い星説を支持する。しかし、このイベントは非常に特異であった。通常より GRB はかなり弱く、超新星はかなり明るかった。偶然一緒におこった可能性もあり、大論争になった。特に、残光が増光するものは超新星で説明できるという主張が出た。しかし星間ガスに高密度なところがあっても残光は増光する。議論は膠着状態に陥った。

決定打となったのが 2003 年に HETE2 衛星が発見した GRB であった。残光の増光時のスペクトルがとられ、これが Ic 型超新星のスペクトルと一致したのである [17,18]。今度の GRB は普通に近かったので、GRB が超新星と同時に起こることが確定した。つまり GRB は重い星の崩壊で作られるのだ！GRB の母銀河の研究からも GRB は星形成の活発な環境で生まれることが示唆されているので、重い星の崩壊説でよさそうである。Ic 型超新星は一つの銀河で 1000 年に一回程度おこるので、GRB がジェットであることを考慮しても、Ic 型超新星のうち 100 から 1000 のうち一つが GRB になればよい。ただし、すべての GRB で超新星が確認されたわけではない。残光から得られる星間ガスの分布が重い星周辺のガス分布と異なるという指摘もある。GRB の歴史は間違いの連続であった。慎重になるべきかもしれない。

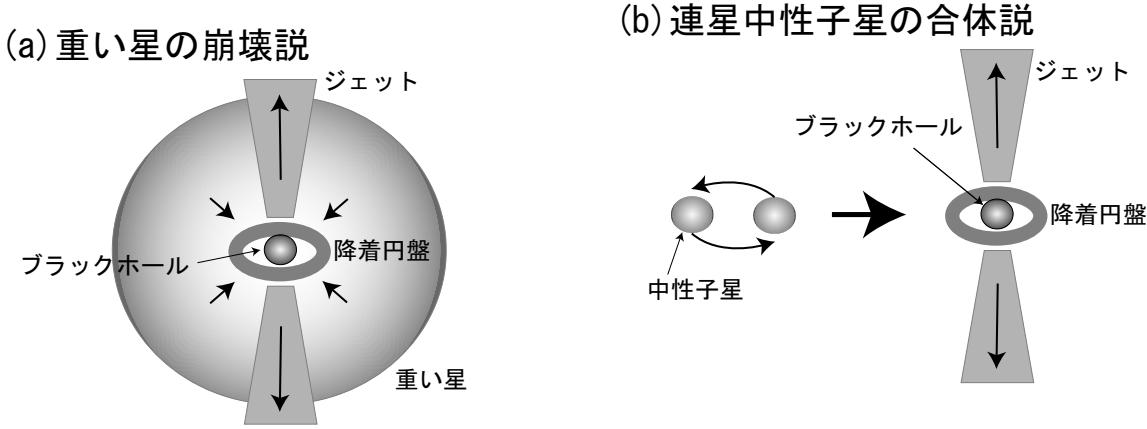


図 4: GRB の中心エンジンの想像図。

では中心では何が起こっているのであろうか？中心エンジンのサイズは GRB の変動時間にミリ秒のものがあるので  $\sim 10^7$  cm 以下である。全エネルギーは、ガンマ線だけでも  $\sim 10^{51}$  erg なので効率を 10% 程度とすると  $\sim 10^{52}$  erg となる。これらを満たす既知の天体は中性子星かブラックホールぐらいである。つまり重い星の崩壊によって中心に中性子星かブラックホールが形成されていると考えられる。

中性子星の回転エネルギーは  $\sim 10^{52}$  erg  $(P/1\text{msec})^{-2}$  なので自転周期  $P$  がミリ秒ならエネルギーはまかなえる。磁場が  $\sim 10^{15}$  G だと磁気双極放射によって 10 秒ほど (GRB の継続時間ぐらい) でエネルギーを放出できる。ブラックホールの場合、質量が  $\sim 10M_\odot$  なら回転エネルギーは最大  $\sim 10^{54}$  erg である。これは原理的に磁場を通して取り出せる。またブラックホール形成時、まわりに  $0.1M_\odot$  程度の降着円盤ができた場合も、その重力エネルギーは  $\sim 10^{52}$  erg となる。この場合、円盤の降着時間が GRB の継続時間になる。

中心領域ではサイズがシュバルツシルト半径ぐらいになるので一般相対論が重要になる。また中心天体や降着円盤が回転しているので、回転によって磁場が増幅されると期待される。回転エネルギーと同程度の磁場が作られるとすると容易に  $\sim 10^{15}$  G もの強磁場

になりうる。もし事実ならこれは我々が知る限り宇宙で最も強い磁場である。またこれは量子臨界磁場  $m_e^2 c^3 / e\hbar \sim 10^{13}$  G を越えるため QED の非線型性が効くことを意味する。このような強磁場、強重力のもとでどのようにして相対論的ジェットが形成されるのかは全くわかっていない。そもそもブラックホールはものを吸い込むにもかかわらず、中心から物質が放出されるというのはまことに不思議である。

## 6 GRB はジェットか？

現在主流の描像では、大質量星のうち特異なもの、例えば回転が早いものが重力崩壊して中心にブラックホールと重い降着円盤をつくり、降着円盤の一部を相対論的なジェットにして円盤と垂直方向に放出すると考える（図4左参照）。

大質量星の外層は大きな柱密度  $> 10^{41} \text{ cm}^{-2}$  をもつので、中心でガンマ線が放射されてもこのままではでてこれない。この問題を解決する一つの方法は、相対論的ジェットによって星に穴を開けることである（図4 参照）。実際、中心で相対論的ジェットができるすれば星を貫けることが数値シミュレーションによって示されている。注意したいのは、ジェットの前方にある質量は  $\sim 0.1 M_\odot (\theta/0.1)^2$  にもなるので、すべてを掃き集めるとジェットが非相対論的になってしまう点である。外層はジェットに衝突されて加熱されることで横に広がる必要がある。加熱された外層は活動銀河核ジェットにおけるコクーンに類似したものになる。

残光の観測からも GRB がジェット状であることが示唆されている [19]。GRB がジェット状だと  $T \sim 1 \text{ day} (\theta/0.1)^{8/3}$  あたりで残光は急に暗くなる。これは衝撃波がまわりの星間物質をはき集めて減速すると相対論的ビーミング角  $\Gamma^{-1}$  がジェットの開き角  $\theta$  より大きくなるので、ジェットの外側の暗い部分まで見えるうえにジェットの膨張則も変わるからである。ジェット状だと GRB の全エネルギーは球状としたときより  $\sim \theta^2 \sim 0.01$  倍ほど小さく、だいたい  $10^{51} \text{ erg}$  ぐらいになる。一方、本当の GRB の頻度は  $\sim \theta^{-2} \sim 100$  倍になる。

GRB がジェット状だと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ある。特にジェットを横から見ると青方変移が弱まるので、ガンマ線ではなくエックス線で主に光るようになる [20,21]。実際観測的にも、HETE 2衛星の活躍によって、エックス線フラッシュと呼ばれる GRB によく似たエックス線で主に光るバースト現象が多数見つかりつつある。GRB のジェットの構造によってエックス線フラッシュの頻度や性質などが変わってくるので、逆にエックス線フラッシュの観測からまだ良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、その解明はブラックホール形成の重要な手がかりとなるかもしれない。

## 7 Short GRB と重力波

さて今までの話は継続時間が 2 秒以上の long GRB の話である。継続時間が 2 秒以下の short GRB に関しては残光が見つからず、距離が分からない状況がさらに続いた。

2004年11月に打ち上げられたGRB専用衛星Swiftが、2005年ついにshort GRBの残光を発見し、研究が急速に進みはじめている。特にshort GRBの一部が楕円銀河でおこることが明らかになった[22,23]。これまで楕円銀河でおこったlong GRBはひとつもない。また多くのshort GRBのエネルギーはlong GRBより100倍ほど小さく、short GRBの少なくとも一部はlong GRBと異なることが確定した。その結果、連星中性子星の合体説が復活することになった。

連星中性子星は重力波を放出することで軌道を縮めて合体する。合体時にはGRBを説明するのに十分な重力エネルギー $\sim 10^{53}$  ergを解放する。また、銀河系内の観測から推定される合体頻度はGRBと同じぐらい（一つの銀河で10万年から100万年に一回程度）なので、short GRBの候補となりうる。連星中性子星が合体するまで時間がかかるので、楕円銀河のような古い銀河で起こっても不思議ではない。

もし連星中性子星がshort GRBの起源であれば、GRBと同時に強力な重力波が放出される。重力波はLIGO（アメリカ）やTAMA（東京三鷹）といった現在稼働中のレーザー干渉計で観測できる。GRBが近くでおこれば十分観測可能であり、その確率もそれほど小さくない。実際に重力波が観測されれば、GRBの起源が確定するだけでなく、重力波の初の直接観測になるためノーベル賞はまず間違いない。さらに重力波の波形から、QCDからまだ得られていない、中性子星の状態方程式（質量と半径の関係）を得るといったことができるようになる。つまり重力波天文学という新たな分野が生まれる可能性がある。

ところが話は簡単ではなく、残光の観測から継続時間が100秒以上もあるshort GRBがあることがわかりつつある[23]。単純な中性子星連星の合体説では長い継続時間に出せないので何らかの変更が必要である。中性子星とブラックホールの合体という説も出た。ブラックホールが中性子星を合体前に破壊するので長い継続時間を出せるかもしれない。また、超強磁場中性子星の表面の巨大フレアが遠くでおこってもShort GRBのように見えることが分かっており[24]、单一起源ではないかもしれない。我々の研究室でも中性子星と白色矮星の合体なら継続時間を100秒程度にできることに注目し研究を進めている。この場合Hz程度の重力波が出た後、約kHzの重力波が期待される。電磁波による天文学がさまざまな波長に発展したように、重力波天文学も多波長観測が重要になるのかもしれない。

## 8 GRBと宇宙論

GRBは宇宙一明るい。それゆえかなり遠く（赤方偏移 $z=100$ ）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の大きな構造より昔にできる（階層的構造形成）。ということはlong 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のですぐ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、我々は既に観測しているかもしれない。距離が測定されていないGRBの中に、遠くのGRBが混じっている可能性があるので。残光を使わないでGRBまでの距離を導く経験則がいくつかあるが、すべての方法が $z > 10$ のGRBの存在を導き出す[25]。実際、最近 $z=6.3$ のGRBが発見された[26]。これは確認されている最遠方の銀河やクエーサーに匹敵する。 $z > 10$ のGRBが発見されるのも時間の問題な

のである。

GRB は宇宙の果ての研究にかなり使えそうである。 $z = 6.3$  の GRB は Ly $\alpha$  の吸収線を用いて宇宙の電離度に制限を与えた [27]。電波分散なども宇宙の再電離の歴史を探るのに有用な手段である [28]。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。GRB からの光が途中の星の重力レンズをどれくらい受けるかを調べれば、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。GRB を使った研究の重要性は認識されはじめたばかりで、大いなる可能性を秘めていると思われる。

## 9 超高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、ガンマ線

GRB は  $\sim 10^{20}$  eVあたりの超高エネルギー宇宙線の源として有力視されている [29,30]。 $\sim 10^{20}$  eV の宇宙線の起源は宇宙物理学最大の謎の一つであり、その同定は重要である。また  $> 10^{20}$  eV の宇宙線は、その起源が GRB のように一様分布している場合、宇宙背景放射と相互作用して地球に届く量が減ると考えられている（いわゆる GZK カットオフ）。このカットオフがないという観測的示唆もあり、GRB が  $\sim 10^{20}$  eV の超高エネルギー宇宙線の源かどうかを明らかにすることは重要である。

GRB が宇宙線の源だとすると、この宇宙線が GRB の出す光子や宇宙背景放射と相互作用してパイオンを作り、それが崩壊して TeV を越える高エネルギーニュートリノが生成される [31]。この高エネルギーニュートリノは現在南極に建設中の IceCube などで検出可能かもしれない。もし検出されれば初の高エネルギーニュートリノ点源天体の発見となる。つまり高エネルギーニュートリノ天文学の幕開けになる。また、GRB では生成されないタウニュートリノの出現実験などニュートリノ振動の研究も可能である。

GRB は MeV 以上の高エネルギーガンマ線の源の候補でもある。高エネルギーガンマ線は逆コンプトン散乱、パイオンの崩壊、陽子シンクロトロン放射などで作られる [32,33]。このエネルギー領域での研究はあまり進んでいないので、CANGAROO や GLAST の活躍が期待される。これらの観測によって、GRB の相対論的ジェットのローレンツ因子に制限を加えたりすることができる。

## 10 まとめと展望

GRB にはまだまだ話題があるが、時間的に多くの話に触れることができなかった。例えば、GRB 最初の三時間 [34,35]、光学閃光、相対論的な無衝突衝撃波における粒子加速と磁場生成 [36]、偏光と磁場 [37]、母銀河の性質、アマチュア天文家の活躍、GRB と生命的絶滅などである。

今回の話で、GRB が単なる奇妙なガンマ線放射ではなく、ブラックホールまたは中性子星の誕生の瞬間という大変興味深い現象であることが分かっていただけたと思う。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？超高エネルギー宇宙線は加速されているのか？といった根本的問題は全く解決しておらず、今後も GRB は相対性理論、

宇宙論、素粒子論、原子核理論、構造形成理論、粒子加速理論、プラズマ物理、数値物理学にまたがる巨大な分野を形成していくものと思われる。今後が楽しみである。

## 参考文献

- [1] Zhang, B., & Mészáros, P. 2004, IJMPA, 19, 2385
- [2] Piran, T. 1999, Phys. Rep., 314, 575
- [3] Fishman, G. J., & Meegan, C. A. 1995, ARA&A, 33, 415
- [4] Preece, R. D., et al. 2000, ApJS, 126, 19
- [5] Cohen, E., et al. 1997, ApJ, 488, 330
- [6] <http://gamma-ray.msfc.nasa.gov/batse/grb/skymap/>
- [7] Metzger, M. R., et al. 1997, Nature, 287, 878
- [8] Costa, E., et al. 1997, Nature, 387, 783
- [9] Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, ApJ, 497, L17
- [10] Panaitescu, A., & Kumar, P. 2002, ApJ, 571, 779
- [11] Paczyński, B. 1986, ApJ, 308, L43
- [12] Goodman, J. 1986, ApJ, 308, L47
- [13] Eichler, D., et al. 1989, Nature, 340, 126
- [14] Woosley, S. E. 1993, ApJ, 405, 273
- [15] Paczyński, B. 1998, ApJ, 494, L45
- [16] MacFadyen, A. I., & Woosley, S. E. 1999, ApJ, 524, 262
- [17] Stanek, K. Z., et al. 2003, ApJ, 591, L17
- [18] Hjorth, J., et al. 2003, Nature, 423, 847
- [19] Harrison, F. A., et al. 1999, ApJ, 523, L121
- [20] Ioka, K., & Nakamura, T. 2001, ApJ, 554, L163
- [21] Yamazaki, R., Ioka, K., & Nakamura, T. 2002, ApJ, 571, L31
- [22] Berger, E., et al. 2005, Nature, 438, 988
- [23] Barthelmy, S. D., et al. 2005, Nature, 438, 994
- [24] Hurley, K., et al. 2005, Nature, 434, 1098
- [25] Yonetoku, D., et al. 2004, ApJ, 609, 935
- [26] Kawai, N., et al. 2006, Nature, 440, 184
- [27] Totani, T., et al. 2006, PASJ, in press
- [28] Ioka, K. 2003, ApJ, 598, L79
- [29] Waxman, E. 1995, Phys. Rev. Lett., 75, 386
- [30] Vietri, M. 1995, ApJ, 453, 883
- [31] Waxman, E., & Bahcall, J. 1997, Phys. Rev. Lett., 78, 2292
- [32] Zhang, B., & Mészáros, P. 2001, ApJ, 559, 110
- [33] Ioka, K., Kobayashi, S., & Mészáros, P. 2004, ApJ, 613, L17
- [34] Toma, K., et al. 2006, ApJ, 640, L139
- [35] Ioka, K., Kobayashi, S., & Zhang, B. 2005, ApJ, 631, 429
- [36] Ioka, K. 2005, PTP, 114, 1317
- [37] Matsumiya, M., & Ioka, K. 2003, ApJ, 595, L25