

ガンマ線バースト

—現代宇宙物理学での最大の謎—

中村 卓史^{a)}, 山崎 了^{b)}

^{a)} 京都大学 大学院理学研究科

^{b)} 広島大学 大学院理学研究科 (執筆時は、大阪大学 大学院理学研究科)

この記事は、日本物理学会誌第 60 巻第 4 号 (2005 年 4 月号) に掲載されたものに加筆・訂正したものです。

ガンマ線バーストとは、一日におよそ一回の頻度で典型的には 250 keV 程度のガンマ線が約 0.01–300 秒間観測される天体現象である。ガンマ線バーストの正体は、その発見以来ながら未解明であったが、最近になって、理論と観測双方の発展により徐々に明らかになりつつある。現在の標準的理解では、ガンマ線バーストは宇宙論的距離 (100 億光年以上の彼方) で発生し、エネルギー放出率は宇宙の全ての銀河の明るさを合わせたものと同じかそれ以上にのぼり、中心天体から何らかのプロセスで放出された相対論的ジェットがガンマ線放射を行うと考えられている。本稿では、ガンマ線バーストの研究の歴史に沿いながら、どのようにして現在の標準的な描像が得られたか解説し、さらに宇宙論への応用などの、ガンマ線バーストに関する話題をいくつか紹介する。

1 発見は思わぬところから

「serendipity」という英語の単語がある。英語の辞書によると「The Three Princes of Serendip」というおとぎ話で主人公が探してもいない宝を偶然発見することから思わぬものを偶然発見する才能という意味と書いてある。科学の発展においても、全く別の目的の研究からとんでもない大発見がされることがしばしばある。中性子星の発見や宇宙背景放射の発見などがその典型である。ガンマ線バーストの発見は、まさに米国の軍事衛星 Vela の「serendipity」によるものであった。1967 年に大気圏外核実験禁止条約が米国とソ連 (現ロシア) との間で締結された。米国はソ連が条約を守っているかどうかを監視するために地球から 12 万 km の高度に 4 つの核実験探知衛星 Vela を打ち上げた。GPS と基本的には同じ原理で核実験によって発生したガンマ線が 4 つの衛星に到着する時間の差から核爆発の場所を決定するものである。Vela 衛星は打ち上げ後に奇妙な短時間のガンマ線を頻繁に検出した

した。それらは地球からではなく、宇宙からやってきていた。しばらくの間は軍事機密であったようだが、1973 年に宇宙での現象だと言うことで軍事機密ではなくなり、Astrophysical Journal 誌に発表された¹⁾。

2 ガンマ線バースト (GRB) とは？

図 1 は典型的なガンマ線バースト (以降 GRB と略記) の光度曲線である²⁾。継続時間は 0.1–30 秒であるが、主なガンマ線光子のエネルギーは 250 keV 程度である。スペクトルは図 2 に示すようなバンド・スペクトル¹ と呼ばれる折れ曲がりのあるベキ乗則でおおよそ合う非熱的放射である。しかし、当初はガンマ線以外での観測データは何もなかったため、距離は全く不明であった。1973 年に中村は修士の大学院生であったが、先輩と GRB は地球外文明の核戦争だと冗談を言い合ったのを覚えている。しかし、その後、年間 1000 イベント程度もあることがわかり、多すぎるということで核戦争説は消滅した。また、空間分布は一様等方であることもわかった²。継続時間の分布は図 3 に示すように二極性分布 (bi-modal 分布) を示し、継続時間の短いほうは Short GRB と呼ばれ長いほうは Long GRB と呼ばれる。

3 「GRB までの距離は、宇宙論的ではあり得ない！」と信じられていた

1973 年から 1997 年までに GRB について 2000 編以上の論文が書かれたが主なテーマは GRB までの距

¹ 「バンド」というのは人の名 (D. Band) で物理学での「エネルギーバンド」とは無縁である。

² 当時は、暗いバーストは検出できなかったために GRB の空間分布は一様であると思われたが、より暗いバーストも検出できるようになった現在では、非一様であることがわかっている。

距離をどう考えるかであった。距離が決まらない根本的な理由はガンマ線のみでは方向の決定精度が角度にして1度から数度で、その精度の範囲内には天体はまさに「星の数ほど」あるので GRB の対応天体を探すのは「藁の塊の中に針を1本入れて、その針を探せ」と言うのに近くて、不可能であった。1990年代初頭の諸説とその評価は以下ようになっていた。

説	距離	評価
太陽系のすぐ外	～3光年	△
銀河円盤の太陽近傍説	～1000光年	◎
我々の銀河の周辺(ハロー)	～30万光年	○
局所銀河団	～3000万光年	△
宇宙論的距離	～100億光年	×

この中のどの説を採用した論文も距離を根拠にして返却されることはなかった。

当時の多数派の議論は以下のようなものであった。GRBの光度曲線で立ち上がりの短いのはミリ秒のものがあるのでGRBの本体(セントラル・エンジンと呼ばれる)のサイズは因果律から(ミリ秒)×(光速) = 300 km 以下である。こんなに小さくて、とんでもない天体としては中性子星やブラックホールが候補である。我々の銀河では100年に1回程度超新星爆発が起きて中性子星ができるので今までに銀河全体で約1億個の中性子星ができたはずである。したがって我々の太陽近傍の1000光年内には約10万個程度の古い中性子星が存在しているのは確実である。これらの中性子星が100年に1回くらいGRBを起こせば、年に1000イベントになるし、GRBは近くなので様等分布と矛盾しない。しかし、具体的にガンマ線がどうして古い中性子星から放出されるのかは全く不明だった。

当時、GRBが宇宙論的な距離だと主張する人は物理を知らない人だとして排除された。まず、GRB中には電子の静止エネルギー以上のエネルギーをもつ光子が1%以上はある。GRBまでの距離が100億年程度とすると、みかけの明るさは観測から既知なので、GRBのエネルギーが計算できて 10^{51} erg程度になる。一方GRBのサイズは300 km程度だから電子の静止エネルギー以上のエネルギーの光子の数密度は 10^{31} cm⁻³程度になる。電子の静止エネルギー以上のエネルギーの光子2個が衝突すると電子対生成が起こる。電子対生成に対する平均自由行程は数密度が高いため短くて 10^{-6} cmとなり、ガンマ線は放射領域から出てこれない。であるにもかかわらず、現実には電子の静止エネルギー以上のエネルギーをもつ光子が観測されているので、矛盾する。この矛盾を回避するには、距離を1000光年程度と小さくしてGRBのエネルギーが小さくなればよい。この場合電子対生成に対する平均自

由行程は300 km以上となる。すなわち、宇宙論的な距離を否定する論理が、銀河円盤の太陽近傍説という本命を支持する論理となっていたのである。

4 「ぎんが」衛星(1987)とBATSE(1990)の打ち上げ —銀河disk説の発展と突然死—

我が国のX線衛星「ぎんが」は1987年に打ち上げられた。この衛星にはガンマ線検出器が搭載され、始めてGRBをガンマ線とX線とで同時に観測することが可能になった。図4が観測例の1つでGRBはX線でも輝いていることがわかった³⁾。特に1-4 keVと45-370 keV(ガンマ線)の光度曲線を較べるとガンマ線が出る前にX線が出ているのが見える。実はX線バーストというものがある。X線バーストは伴星のガスが中性子星に降り積もって定期的に積もったガスが爆発的に核燃焼して熱放射のX線を放射するものとしてよく知られていた。そこで、「GRBはX線バーストの1種ではないか?」という考えが急速に支持を集めた。GRBとX線バーストの違いは磁場の強さではないか?磁場が弱いとX線バーストとなり、磁場が強いとガンマ線バーストになってしまうという差ではないか!太陽近傍の古い中性子星と考えてよいのではないか!もう、GRBはわかってしまったとほとんどの人が錯覚した。中性子星は大質量星から作られる。大質量星はガスが多い銀河面に主に作られるので古い中性子星は銀河円盤に集中するはずである。したがって、もっと感度の良い検出器を作って銀河ディスクにGRBが分布していることを確認するのみで、GRBはもうお終いでそろそろ別のテーマを考えたほうが良いとまで思った。

1990年にNASAはCGRO(Compton Gamma Ray Observatory)と言う大きなガンマ線衛星を打ち上げた。この衛星の中のBATSE(Burst And Transient Source Experiment)というGRB専用の検出器に期待が集まった。この検出器は今までの100倍程度の有効面積があったのでGRBが銀河面に集まっているのを確認するであろうと予想された。しかし、出てきた結果は図5で相変わらず分布は等方的であった³⁸⁾。銀河面を含めてどこかに偏っているとか、等方からずれているという可能性等、いろいろ議論されたが、結局何も出てこなかった。厳密に言えば、GRBまでの距離はわかっていないのだからBATSEをもってしても銀河円盤の中しか見えていないと考えることもできるが、ある見かけの明るさより明るいGRBの数を検討

することによって、実はGRBの個数密度は空間的に一様ではなく、遠くの暗いものの数がより少ないということも判った。太陽近傍の中性子星説では個数密度は一定の筈であるので、本命の太陽近傍の中性子星説が突然死してしまった。世界中の学者が頭を抱える事態となった。ある著名な学者はこのときの当惑を「1990年に我々のGRBへの理解は負に転じた」と表現している。

5 混乱の時代 1990–1997年

本命が不在になったが、大穴の宇宙論的距離説はあり得ないという議論も間違っていそうにないので、大混乱の時代に入った。1995年のFishmanとMeeganによるGRBのレビュー²⁾には、「In the past 25 years over 2,000 observation and theoretical papers have been written about γ -ray bursts, and yet they remain perhaps the least understood of all observed objects in the universe.」と書いてある。今まで太陽近傍の中性子星説を信じていた多数派は、今度は我々の銀河のハローにある古い中性子星説を持ち出してきた。この頃電波パルサー（中性子星）は誕生時に大きな速度（ 300 km s^{-1} 程度）を得ていることが判ってきた。その結果古い中性子星のかなりの部分が、我々の銀河の重力ポテンシャルを振り切って銀河のハローに広範囲に分布するというシュミレーション結果が出てきた。それならばGRBの等方分布という観測事実を説明できる。

1995年ワシントンでD. Q. Lamb（ハロー説）とB. Paczyński（宇宙論的な距離説）が公開論争を行った³⁾。この論争に参加した人の多くはLambが勝ったと思った。論争は学術雑誌に掲載されたが⁴⁾、それを読んだとき中村もLambに説得力があるように感じた。Lambは当時知られていたGRBが満たすべき多くの性質を彼のハロー説では説明できるが、宇宙論説では、等方性と赤方偏移のため遠くの暗いものがより少ないというのが説明できるだけであとほだめであると主張した。一方、Paczyńskiは基本的には1つのことを言うだけであった。いろいろな天体の方向分布を描いてみる。太陽近傍の星の分布は等方的である。質量の大きな星の分布は銀河面に集中している。近くの銀河の分布はおとめ座銀河団があるためにおとめ座の方向に偏っている。電波銀河は宇宙論的な距離にあるので等方的である。つまり、等方に分布しているものは極めて近くのものか、極めて遠くの宇宙論的なもの

³⁾ 奇しくも同じ場所で75年前の1920年4月26日にH. ShapleyとH. D. Curtisがアンドロメダ銀河は我々の銀河の外か内かを論争した。

かのどちらかである。中途半端なものが等方的になっている例は今までない。極めて近くの可能性が否定された以上、極めて遠くの可能性しか残っていないと主張した。Paczyńskiは、当時は、後に完成したGRBの残光の標準理論を説明できなかったから確かにこれだけでは説得力に欠けた。しかし、結果的にはこの物理的直感が正しかった。1920年と1995年の2つの「遠いか近いか」の論争はどちらも遠いと主張したほうが結果的に正しかった。しかし、その場にいたものとしては、下手な野球の解説者のようにはなれない。ホームランを見た後で、「今のは、うまく打ちましたね。」とか凡打した打者を評して「何で、今みたいな球に手を出すのですかね。」のように、結果を知ってから言うのは簡単だがその場にいた当事者には未来はよく見えなかった。

6 1997年の革命—ガンマ線バーストは宇宙論的な距離である！—

1997年にイタリアとオランダ共同のBeppoSAX衛星が大発見をした⁵⁾。GRBはX線も放射していることに目をつけてBeppoSAX衛星はガンマ線でGRBを受けた後、X線望遠鏡を使ってその方向を角度で4分程度の精度で決めることに成功した。この精度だと、対応天体を光学望遠鏡で探せる。つまり始めて天文学が使えるようになった。光学望遠鏡を向けると可視光変動天体が発見された。つまり、GRBはX線のみでなく、光学でも残光があることが判り、そのスペクトルも取られた。その結果図6に示すように赤方偏移⁴⁾が0.835の吸収線が見つかった。「GRBの宇宙論的距離説」の決定的な証拠となった。現在では約40個くらいのGRBの赤方偏移が決定されている⁶⁾。平均の赤方偏移は1.3で最高は4.5である。

図6は2000以上の論文の大半を「もう読むはいけなない。」か、「もう読まなくて良い。」論文にしてしまった。光学残光の同定されているほとんどのGRBに対してそれに付随する銀河（母銀河）が見つかった。GRBの母銀河での位置は中心に偏ることも、ハローに偏ることもなく、母銀河の中にあることがわかった⁷⁾。

⁴⁾ 宇宙膨張に伴い電磁波の波長は引き延ばされる。遠方の天体ほど速く地球から遠ざかり、観測される波長の伸びが大きくなる。もともとの波長を λ 、地球で観測される波長を λ_{obs} とすると、赤方偏移 z は $1+z = \lambda_{obs}/\lambda$ で定義される。

7 GRBは何なのか考え直そう

宇宙論的な距離ということは、典型的には距離は $d \sim (100 \text{ 億年}) \times (\text{光速}) \sim 10^{28} \text{ cm}$ 。

GRB の典型的なガンマ線のフラックスは $f \sim 10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ なので等方的に放射しているとすると

$$L_\gamma = 4\pi d^2 f \sim 10^{51} \text{ erg s}^{-1}.$$

銀河の光度は $L_g \sim 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ なので

$$L_\gamma \sim 10^8 L_g \sim [\text{見える範囲の宇宙の全銀河の光度}].$$

つまり、GRBは宇宙でもっとも激しい爆発現象であるということが確立した。典型的なGRBの継続時間は10秒程度だから等方的に放射しているとするとガンマ線の全エネルギーは

$$E_\gamma \sim 10^{52} \text{ erg} \sim 0.01 \times [\text{太陽の静止エネルギー}]$$

となる。それではGRBの放射体の大きさ R はどの位になるのだろうか？ 電子対生成に対して透明であるためには $R > 10^{15} \text{ cm}$ となる。そんなに大きなところから放射されたものの継続時間 Δt は因果律から $\Delta t > R/c \sim 10^5 \text{ s}$ となるように思える。しかし観測からは $\Delta t \sim 10 \text{ s}$ なのでこれは一見矛盾である。この矛盾を解くおそらく唯一の手は光速に近く運動しているものからガンマ線が放射されることである⁸⁾。

図7のようにセントラル・エンジンから速度 $v = c\beta$ のガンマ線の放射体が $t = 0$ に放出され距離 $R_e \sim 10^{15} \text{ cm}$ のところから放射をはじめ距離 $2R_e$ のところで放射を停止したとしよう。これを、距離 D で観測するとしよう。 v が光速に較べて小さいと継続時間は $R_e/c \sim 10^5 \text{ s}$ より大きい。しかし、 v が光速に近いと事情は異なる。放射体がまず、 R_e に到着する時間は $t = R_e/c\beta$ 、このとき放射されたガンマ線が観測者に到着するのは

$$t_1 = R_e/c\beta + (D - R_e)/c$$

である。同様にして放射体が $2R_e$ に到着したときに放射されたガンマ線が観測者に到着するのは

$$t_2 = 2R_e/c\beta + (D - 2R_e)/c$$

である。したがって、ガンマ線の継続時間は

$$\Delta t = t_2 - t_1 = R_e(1 - \beta)/c\beta$$

となる。 β が1に近くローレンツ因子 γ が1よりはるかに大きいときには、 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ を逆に解いて $\beta \sim 1 - 1/2\gamma^2$

を得る。これを使うと、

$$\Delta t \sim R_e/2c\gamma^2 \sim 10 \text{ s} (R_e/10^{15} \text{ cm})(\gamma/100)^{-2}$$

となって $\gamma \sim 100$ なら放射されるサイズが大きいても継続時間は短くできる。モデルの詳細に依らずに確かなことはこの点である。つまり、GRBは $\gamma > 100$ の相対論的な爆発現象であることが明らかになった。GRBは宇宙論的ではあり得ないという議論にどこに

穴があったかと言うと一番最初のGRBのサイズを議論するところであった。光速近くで運動していればサイズは大きくても良かったのである。

8 ガンマ線バーストの標準理論

—シンクロトロン衝撃波理論—

それでは何が $\gamma > 100$ で運動している放射体なのか？それは相対論的な衝撃波であるとするのがGRBの標準理論である⁸⁾。シナリオは以下のようになっている。まず、セントラル・エンジンが $\gamma > 100$ の陽子流を放出すると仮定する。その起源はいまだに不明であるが、とにかくそのように仮定する。宇宙空間が完全な真空なら何も起こらないが、GRBは銀河中にあるから水素ガスが存在している。したがって、陽子流は星間ガスと相互作用して相対論的な衝撃波が形成される。衝撃波でランダムな磁場ができるとともに、非熱的な高エネルギー電子が加速される。その結果、衝撃波とともに動く系でみて $h\nu' \sim 3 \text{ keV}$ のシンクロトロン放射が起きる。しかし、衝撃波は $\gamma > 100$ で運動しているから実験室系では振動数が γ 倍大きくなって $h\nu \sim \gamma h\nu' \sim 300 \text{ keV}$ となり(青方偏移)、ちょうどGRBの典型的なエネルギーとなる。ガンマ線を放射した後も陽子流は星間ガス中を進むので減速され、 $\gamma \sim 10 (t/2d)^{-3/8}$

に従って γ は減少する。この間、シンクロトロン放射の特徴的な振動数は

$$\nu_{\text{peak}} \propto \gamma^4 \propto t^{-3/2}$$

となるので、「ガンマ線→X線→光学→電波」という順番で残光が発生する。これは定性的に見事に観測と合っている。定量的には高エネルギー電子のエネルギー $\gamma_e m_e c^2$ の分布をベキ乗則:

$$N(\gamma_e) d\gamma_e \propto \gamma_e^{-p} d\gamma_e \quad (p = 2 \sim 2.5)$$

とすると、残光のスペクトル、光度の時間変化等が観測と大まかに合う(図8)。衝撃波の位置は時間の関数として

$$R = 7 \times 10^{17} \text{ cm} \times \left(\frac{E}{10^{52} \text{ erg}} \right)^{0.25} \left(\frac{n}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-0.25} \left(\frac{t}{10 \text{ days}} \right)^{0.25}$$

となるが、宇宙論的な距離としてもGRBから10日後で火の玉の見かけの大きさは0.0001秒角程度であり、電波干渉計で予想どおり測定されている⁹⁾。この意味でGRBの標準理論はしばしば「火の玉モデル」とも呼ばれる。

GRBは図1で示したように激しく変化するのに対して、GRBの残光は図8に示したように滑らかであ

る。したがって GRB 自身と残光では衝撃波が異なるものだとするのが現在では多数派である。セントラル・エンジン⁹は γ の大きさの違う陽子流をいくつも出すと考える。これの起源も不明だが、例えば太陽のフレアのように頻繁に起こる爆発現象や、活動銀河核の電波イメージに見られるようなノット構造を持つジェット等に類するものと想像される。そうすると、 γ の大きな陽子流は先に出た γ の小さな陽子流に衝突して衝撃波を作る。このようなことが頻繁に起こると激しく変化する GRB の光度曲線を再現可能である。図 9 にシミュレーション例をあげる。このような衝突がいくつも起こると陽子流の合体によって 1 つの大きな陽子流が最後には形成され、これが星間ガスと衝突するとなめらかな光度曲線の残光が発生すると考えられる。前者を内部衝撃波、後者を外部衝撃波と呼び、このシナリオは「内部・外部衝撃波モデル」と呼ばれる。

9 GRB はジェットか？

相対論的ビーミング効果により、ローレンツ因子 γ で運動する物体からの放射は前方の γ^{-1} の方向に絞られる。したがって我々が見ているのは我々の視線方向の衝撃波のみである。つまり、衝撃波が丸いのか、ジェット状なのかは原理的に判らない。であるにもかかわらず GRB の衝撃波はジェット状であるということがほぼ確かになっている。GRB の陽子流がジェット状だと仮定しよう。ジェットに直角な方向で何が起こるか考えてみよう。相対論的衝撃波では内部エネルギーも相対論的で非常に大きく音速は光速のオーダーである。したがって形状がジェットだと実は直角な方向にもほぼ光速で膨張する。その結果、ジェットの開き角は一定ではなく時間的に変化して

$$\theta_j \sim \theta_j^0 + \gamma^{-1}$$

となる。そして、もともとの開き角 θ_j^0 と γ^{-1} が同じになった以降ジェットの開き角は γ^{-1} で決まるので急速に大きくなって球対称に近くなるのがわかる。これを「ジェット・ブレイク」と呼んでいるが、ジェット・ブレイクまでは残光はほぼ t^{-1} に比例してで暗くなるのに対して、ジェット・ブレイク以降は、 $t^{-p} \sim t^{-2 \sim -2.5}$ に比例して急速に暗くなるのが導ける。つまり、残光の光度曲線が光子のエネルギーとは無関係に一齐に折れ曲がる。折れ曲がりの時間がわかるとそのときの γ は $\gamma \sim 10 (t/2d)^{-3/8}$ でほぼ決まる⁵。そうすると、ジェット・ブレイクの時の γ^{-1} がもともとの開き角だということになる。図 10 に典型的な例を示す。このようにして 20 あまりの GRB のジェットの開き角が決

⁵ エネルギーとか密度への依存性は 8 分の 1 乗で極めて低い。

定された。それらのうち、開き角の大きいのは 30° 程度、小さいのは 3° 程度である¹⁰。さて、ジェットであるとすると GRB の全エネルギーは球状とした時とは異なる。しかも、面白いことに開き角の大きい GRB ほど暗く開き角の小さい GRB ほど明るい傾向があり、ガンマ線の全エネルギーはほぼ一定の 10^{51} erg であると考えられているが¹⁰その起源は不明であり、統計精度の向上を含めた今後のさらなる研究の進展が待たれる。

10 1998 年 4 月 25 日：超新星と GRB：そんなバカなことが！

GRB 980425 と Type Ic 超新星⁶である SN 1998bw が 1 日以内に同じ方向から検出されたという報告が飛び込んできた¹¹。超新星爆発では大量のガスが秒速 1 万 km 以上で放出されるがそれでも 1 日後には 1 cm^2 に 10^6 g 以上の物質があって、ガンマ線は出てこれない。出てこれないはずのものが、出てきたのだから中村の第 1 印象は「そんなバカなことが！」であった。しかし、GRB がジェットだとすると星に穴を開けて出てくることが可能だから無矛盾となる。大論争が起きた。まず、観測的に GRB 980425 は普通ではなかった^{11),12),13}。距離が 1.3 億光年で今までで一番近い GRB であった。また、等方的な放射だとしてもガンマ線のエネルギーは $\sim 10^{48}$ erg となって典型的な GRB のエネルギーに較べて 3 桁以上低い。また、300 keV 以上のガンマ線が少ない。X 線残光は普通 $\sim t^{-1}$ なのに $\sim t^{-0.2}$ であるし、光学の残光は見えない。さらに、スペクトル・ラグ⁷は普通 1 秒以下なのに約 10 秒と異常に長い。このように GRB 980425 は異常な GRB であった。一方、超新星 SN 1998bw も普通より 10 倍以上明るい Type Ic 超新星であった。たまたま偶然に位置が一致する確率は 10^{-4} なのであるが、1 例でしかない。多くの観測屋は懐疑的であったが、理論屋は興奮して多くの論文を書いた。GRB は特異な超新星かもしれないとして、過去のデータの見直しが始まった。そしていくつかの GRB に対して発生から 30 日後くらいに光学残光の増光(バンプ)が見つかり、これが超新星の証拠だという主張が出てきた。GRB の残光は t^{-1} で減光する。一方超新星の方はゼロから明るくなって 15 日頃に最も明るくなってその後減光する。赤方偏移を 1 とすると最も明るくなるのは 30 日頃とな

⁶ スペクトル中に水素もヘリウムも存在しない超新星。中性子星やブラックホールが残ると考えられている。SN 1998bw のように明るいものを極超新星と呼ぶ人もいる。

⁷ ある GRB のガンマ線の光度曲線のピークと X 線の光度曲線のピークの時間差のこと。

る。この時の明るさが GRB の残光より明るいとはバンプとして見えるわけである。多くの場合 GRB の残光の方が明るくて超新星は見えない⁸。たまたま、GRB の残光の方が暗い場合に超新星が見える。そう考えても今までのデータと矛盾しないという議論もある。しかし、距離が遠いのでスペクトルがはっきりせず、超新星とは言い切れない。今度は、理論屋が文句をつけた。バンプは例えば星間ガスに高密度なところがあって、GRB の陽子流がそこにぶつかったときにも発生しうる。他にもいろいろな説が乱立し議論は泥沼状態になってしまった。GRB が特異な超新星としても超新星は必ずしも GRB ではない。Type Ic 超新星は 1 つの銀河で 1000 年に 1 回程度である。一方 GRB はジェットであることを考慮するとイベントの割合は増えるが、それでも 1 つの銀河で 10 万年から 100 万年に 1 回程度のまれな現象である。そうすると、Type Ic 超新星のうち、わずか 100 から 1000 に 1 つの異常なものが GRB になれば良い。どう異常なのかは今も未解明である。

この頃、衛星の交代があった。BATSE を搭載した CGRO は 2000 年に安全のため太平洋に落下させられて使命を終えた。2000 年 10 月には日米仏共同の HETE-2 衛星が打ち上げられた。BeppoSAX 衛星も 2002 年に大気圏に再突入して使命を終えた。HETE-2 衛星は 2 例目の超新星を伴った GRB 030329 を発見した¹⁴⁾。GRB 030329 は距離が 26 億光年と近く、等方的にエネルギーを放出しているとするとおよそ 1×10^{52} erg。爆発 4 日後から光学残光にバンプが見え出して、そのスペクトルを見ると SN 1998bw にそっくりだったのである¹⁵⁾。GRB 980425 は GRB としては異常尽づくめだったが GRB 030329 は普通の GRB に近いので、今度は観測屋が信じた。現時点では、GRB 021211 と GRB 031203 もこのような例であることが示唆されており、全部で 4 つの GRB に超新星の証拠があるようだ。ただ、GRB 021211 では明るい Type Ic ではなく、普通の Type Ic が付随している。少なくとも一部の GRB は特異な超新星であると言えるが、全てがそうであるかどうかは慎重に今後の観測を待つべきであろう。ただ、GRB の母銀河の性質の研究から、GRB はガスの多い星形成をしている重元素の少ない環境で生まれているのではないかという証拠が増えてきているので、特異な大質量星と関係していると考えて良さそうである。

⁸ つまり、普通の GRB の残光は超新星より明るい。このことから、Paczynski は GRB の残光を極超新星と名付けた³⁹⁾。

11 ガンマ線を放射しない GRB がある !!

2000 年にローマで行われた GRB の国際会議で BeppoSAX チームの J. Heise が、ガンマ線を出さない点を除いては GRB とそっくりな X 線フラッシュ(以降 XRF と略称)があるという驚くべき報告をした¹⁶⁾。図 11 がその典型的な例で左が XRF、右が GRB で、継続時間は似たようなものであるが、XRF ではガンマ線での放射がほとんどない。XRF のスペクトルは peak エネルギーの小さいバンドスペクトルでよく近似できる。HETE-2 も多くの XRF を発見した。さらに、XRF と GRB の中間的な X 線過剰 GRB (X-ray Rich GRB、以降 XRR と略称)も存在することがわかった。XRF, XRR, GRB の諸性質を調べると図 12 に示すように連続的に分布しており、これらは異なる起源ではなく、同族であることを強く示唆する¹⁷⁾。

現在 XRF を理論的に説明しようとするモデルは 7 つ程ある。それぞれを説明して、比較する紙数はないので、やや身勝手ではあるが我々のモデルを説明したい¹⁸⁾。ガンマ線バーストはジェットであることがほぼ確立しているが、もしガンマ線バーストをジェットの軸からすこし外れて見たらどうなるであろうか? 図 13 の右のように、軸方向からみると GRB になるのを角度 θ_0 で見ると、まず青方偏移が弱くなるのでスペクトルのピークの光子のエネルギーは小さくなる。また、ビーミング効果が弱くなるのでエネルギーは小さくなる。図 13 の左側に θ_0 の違いでどのようにスペクトルが変化するかを示した。定性的に相対論的ジェットをななめ方向から見ると XRF となることが判ってもらえると思う。我々のモデルの予言として XRF は GRB より暗いので XRF は近くのものが多いはずである。実際、距離の判明した XRF は赤方偏移が 0.17 と 0.25 であって従来の GRB の赤方偏移の典型値 $z \sim 1$ に比べて小さい。また、シミュレーションをしてみるとモデルパラメーターにもよるが HETE-2 はほぼ同数の GRB, XRR, XRF を観測するはずであるとわかったが¹⁹⁾、これは実際の観測と合っている。我々のモデルは XRF の「off-axis model」と呼ばれているが他のモデルとの大きな違いは観測されたイベント数との定量的な比較が可能な点である。しかし、もちろんまだ確立したわけではない。ひとつの予言は XRF も超新星を伴うべきであるし、GRB とは異なる残光も見える可能性がある。今のところそのような例となりうるイベントとして XRF 030723 が挙げられる²⁰⁾。また、GRB 980425 は現在の分類では XRR である。すると、GRB 980425 の奇妙さはジェットをななめ方向

から見たことによるのかもわからないが決着はついていない。

12 GRB と宇宙論

現在、確認された GRB の最大の z は 4.5 であり、銀河の最大の z は 6.6 である。GRB が (特異な超新星 = 大質量星) の最後だとすると、原理的には宇宙が始まって 1000 万年程度、赤方偏移にして $z = 100$ 位のときに GRB があっても因果律とは矛盾しない。一方、WMAP 衛星 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) による宇宙背景放射の観測から、 $z = 20$ くらいで星が大量に形成された可能性が指摘されている。さて、そんなに遠い GRB が観測可能であろうか?、2004 年 11 月 20 日にデルタロケットで打ち上げられた GRB 専用の Swift 衛星なら $z = 100$ でも観測可能なのである。GRB は宇宙で最も明るい爆発現象であるから GRB は最も遠く、したがって宇宙の最も初期の状態を知る手段となるのである。銀河や超新星なんかよりもっと明るい。だから、Paczynski が極超新星と名づけたのである。さらに、具合がいいことに GRB の残光はほぼ t^{-1} で暗くなるので、例えば $z = 9$ の GRB を爆発 1 日後に地球で観測したとすると、GRB 自身の時間では 0.1 日後のことだから、10 倍明るい。したがって、遠いにも拘らずそんなに暗くならない。GRB を発した光子は、地球にまで達する間に途中の物質と相互作用してその情報を持ってくる。もし、 $z = 20$ の GRB があればまず、宇宙の 1 番星を見つけたことになる。このためには赤外分光観測が不可欠である。また、 $z = 20$ までの物質の進化がわかる可能性が開ける。たとえば、銀河間ガスの電離の時間変化、電子の密度の変化、重元素の量と成分の時間変化がわかる可能性が議論されている。また、GRB がみつければ、その近辺は間違いなく星形成領域であるのでその近辺を詳しく観測すれば、銀河形成と進化の様子が見えてくる。Swift 衛星は年間 150 個程度の GRB の赤方偏移を決定すると予想されている。すると、赤方偏移の関数として GRB の発生数がわかる。これは、直接、大質量星したがって星形成の宇宙史を教えてくれる。

13 GRB と宇宙のダークエネルギー

宇宙のダークエネルギーは 21 世紀の物理学の最大難問の 1 つである。その存在は、1999 年に Type Ia 超

新星⁹の絶対光度が正確に測れるようになって判り始めた²¹⁾。ダークマターとダークエネルギーは根本的に違う。ダークマターは光を出さないが質量のある物質で圧力はゼロである。一方ダークエネルギーの「ダーク」は「わからない」という意味で、静止エネルギー密度と同じ大きさくらいの負の圧力がある未知のエネルギーである。アインシュタインが静的宇宙モデルが解として存在するようにアインシュタイン方程式に導入した宇宙項がその例である。しかし、その大きさの理論的説明が現状では不可能である。基本的な物理定数と考えられる光速、プランク定数、重力定数から作られるプランク単位より 120 桁も小さな値が Type Ia 型超新星の解析から示唆されているからである。この難問の解決のためにはまずダークエネルギーの性質を詳しく調べる必要がある。宇宙項のように時間的に変化しないのかそれとも変化するのか? その正確な大きさは? 等である。

Type Ia 超新星とは別の距離指標を持つ天体が存在すれば、全く独立な観測として重要な意味を持つことになるが、2004 年に入って GRB に大きな可能性が出てきた。まず 2000 年頃からスペクトラル・ラグと絶対光度に関係があると指摘された。次に、変化の激しい GRB ほど絶対光度が明るいという関係が言われた。絶対光度がなんらかの手段で推定できるとそれを観測されたエネルギー流束と較べることで GRB までの距離がわかる。距離を赤方偏移の関数として書くとそれは、宇宙モデルに依存するのでダークエネルギーの性質を決められるというわけである。さらに相関の強いものとして、GRB のピークエネルギー (E_p) と全放射エネルギー (E_{iso}) ないしは最高絶対光度 (L) の間に $E_p \propto E_{iso}^{1/2}$ または $E_p \propto L^{1/2}$ という関係が見つけられた^{22),23)}。HETE-2 はこの関係式が XRF を含めても成立していることを示した¹⁷⁾。しかし、理論的にはその起源はいくつかの議論はあるものの謎である。この関係式の改良版を用いると図 14 に示すように Type Ia 超新星や WMAP の結果とは独立なダークエネルギーの情報を得られる²⁴⁾。GRB からの情報の精度はまだ悪いが Swift 衛星によって飛躍的にデータの数が増えるので精度が向上すると考えられる。GRB は超新星に較べて赤方偏移が大きいので独立な情報が得られるのが重要な点である。ダークエネルギーの問題に GRB が関係するとは GRB の研究が始まった 1973 年には考えもできなかった発展といえる。

⁹ スペクトル中に水素はなく硅素が存在する超新星。白色矮星に伴星から降り積もった物質が暴走的な爆発現象を引き起こし星全体が吹きとぶ。明るさがほぼ一定なので距離指標として使える。

14 GRB と生命の絶滅

GRB は開き角が 6 度くらいのジェットであるので我々の銀河の中で発生する GRB の大半は地球に向けてこないが 1 億年に 1 回程度ジェットの軸が地球に向かってくる。すると、地球に照射されるガンマ線のエネルギー流束は太陽光のものと同じくらいになる。つまり、10 秒程度太陽光が全てガンマ線、X 線になると何が起こるかを考えなくてはならない。詳しい計算によると²⁵⁾、最も深刻な被害は窒素が分解されて、大量の窒素酸化物が出来てオゾンが半分になってしまうことである。その結果、地上に太陽光の紫外線が降り注ぐことになる。この影響は 5 年続き、生物の DNA に与えるダメージは通常の 10 倍にも達する。さらに、生成される二酸化窒素が太陽光を遮って地球が急速に寒冷化し、大量の生物の絶滅が予想されるとのことである。地球の防衛のためには将来 GRB が起こりそうかどうかを予想する必要があるかもしれない。

15 謎だらけの Short GRB

本稿では、GRB の性質を議論してきたが、それらは全て図 3 の Long GRB のことであった。Short GRB については、たった一つから残光が見つかっただけなので、ガンマ線以外の情報はなく、Long GRB の 1997 年以前の状況である。Long GRB は年間 1000 イベント位で、Short GRB は年間 300 イベント位であるが天文学的にはこれは同じと見なせる。現在の多数派は Long GRB は特異な超新星起源で Short GRB は連星中性子星の合体起源だとするものであるが²⁶⁾、決定的な証拠はない。もし、そうだとすると、イベント数が似ているのは偶然ということになる。距離は不明だが継続時間と単位面積にやってきたエネルギー（フリューエンスという）をグラフにすると図 15 となる。大雑把に言って継続時間とフリューエンスが比例するから、Short GRB も Long GRB もエネルギー放出率は似ている。しかし、図 16 に見るように Short GRB はスペクトルがハードである。Yonetoku et al の関係式²³⁾が Short GRB に対しても成立するとすると、実は明るい Short GRB の赤方偏移を決めることができる。その結果は図 17 で Long GRB と同じように宇宙論的な距離である²⁷⁾。筆者たちは、Short GRB も Long GRB と同じく特異な超新星爆発起源で、ジェットの周辺を見ると Short GRB になるという、多数派とは異なる考えを提案している²⁸⁾。ジェットの真ん中を見ると Long GRB として見え、ジェットをななめ方向から見ると XRR, XRF として見える。これは Short GRB,

Long GRB, XRR, XRF 全ての統一理論で、その大きな予言はどの場合にも超新星が伴うはずである。この理論ではイベント数が Short GRB, Long GRB, XRR, XRF で同じ位になるのは当たり前である。どちらにしても、Swift 衛星が白黒をつけてくれるはずである。

16 鉄の輝線、High Energy γ , ν 超高エネルギー宇宙線

もし、GRB が特異な大質量星起源なら、何らかの元素のスペクトルが見えても良い。そのひとつとして、鉄の吸収線とか輝線が ASCA, Chandra, XMM-Newton 衛星によっていくつか報告されたが、数も少なく統計的な精度もあまりよくない。したがって、データを説明する理論がいくつか出されたものの、現在は様子見というところである。エネルギー分解能が良い Astro-E2 の活躍に期待したい。

GRB の内部衝撃波では磁場の強さは 10^5 G にも達するので衝撃波粒子加速で 10^{20} eV までの超高エネルギー宇宙線の加速が起こっても良い。しかし、銀河間に磁場があると、陽子の到着時間は 100 年くらいガンマ線とは簡単に差がつくので、GRB と宇宙線を同時に観測することはない。GRB 中にはガンマ線、また残光中にも keV くらいのエネルギーの光子が存在する。すると $p + \gamma \rightarrow n + \pi^+$, $p + \pi^0, \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 等の反応によって様々な高エネルギーガンマ線、ニュートリノが発生するのでこれらの検出はこれからの興味深い課題であろう。また、GeV–TeV にいたる様々なガンマ線放出の理論計算がある²⁹⁾。これらも、GRB の火の玉の理解には将来重要になるであろう。

17 それでは Long GRB のセントラル・エンジンは何だろうか？

Short GRB についてはさておいて Long GRB は何なのか？ ガンマ線として 10^{51} erg だから、GRB 全体のエネルギーは効率を 10% として 1 桁上の 10^{52} erg となる。GRB が特異な超新星だとすると考えられるものは中性子星、ブラックホール、またはあるとすればクォーク星（クォークでできた星）である。

1) 中性子星の最小の自転周期はミリ秒程度で、そのときの回転エネルギーはちょうど 10^{52} erg でさらに磁場の大きさをエネルギー等分配に近い 10^{16} G とすると、磁気双極放射によるスピン減衰時間が 10 秒程度となって、ちょうど Long GRB の継続時間となる。

この場合、放出されるエネルギーは磁場や電子陽電子対の形なので、いかにしてGRBの標準理論で必要とされる陽子流に変えるのかは不明である。あるいは、標準理論の変更が必要である。

2) ブラックホールができるときに星全てがブラックホールになるのではなく、一部がブラックホールの周りに降着円盤を作ると考える。降着円盤の質量が太陽質量の5%程度でその重力エネルギーが 10^{52} ergとなる。この場合、降着円盤の寿命がGRBの継続時間となる。Short GRBとLong GRBの違いはこの円盤の寿命の差と考えるのが多数派である。陽子流がどのようにしてできるのかは判らない。

3) 太陽質量の10倍の質量の回転しているブラックホールの回転エネルギーは最大 10^{54} erg程度で、原理的には磁場を通してそれを取り出すことが可能である。その1%程度を陽子流のエネルギーに変えることができれば良いが、具体的にどのようにするのかは不明である。

GRBのセントラル・エンジンは如何にして確定できるか考えてみよう。ある人またはあるグループが確信するのではダメであって、万人が納得する、論理と事実が必要である。GRBまでの距離はその典型であった。多数派が間違っただけである。そこで、歴史に学ぼう。「電波パルサーのセントラル・エンジンは回転している中性子星である。」というのは多くの教科書に書いてあるしそれに文句を言う人は今やいない。これは何故だろうか？電波パルサーのことが全て分かったからだろうか？とんでもない！いまだに電波の放射機構、高密度の状態方程式は良く分かっていない。であるにも拘らず電波パルサーのセントラル・エンジンは判っている。まず電波パルサーの周期は最小1.56msで最大は10秒程度である。この周期を未知の天体の自転周期としよう。すると遠心力は重力より小さくなくてはならないからこの未知の天体の平均密度は核物質の密度以上ということが簡単に出てくる。普通の物質を核密度まで濃縮すると陽子は電子を捕獲して中性子となる。従って、この天体は中性子を主とした中性子星になる。このような高密度では一般相対論が重要になるが、状態方程式が判らなくても音速が光速を超えないという因果律の制限から中性子星の最大質量は3倍の太陽質量以下というのが出てくる。平均密度と質量から半径は10 km程度とわかる。こういう意味で電波パルサーのセントラル・エンジンはわかっているので、放射機構が不明でもそんなに心配する人はいないのである。

1) の説の場合、GRBの後に、周期が数秒のパルスを放射する強磁場中性子星(ふつうの電波パルサー

の磁場の1000倍程度。マグネターと呼ばれる)が残っている。マグネターは観測的には軟ガンマ線リピータとして時々フレアを起こすので、フレアが見つかって周期と磁場の強さが決まれば、理論はどうあろうと、高速回転中性子星説が確定する。

2)、3)の場合、確かにブラックホールができたということを確認めなくてはならない。1つの方法はブラックホールが形成されるとき重力波を観測して、その質量と角運動量を決定する。もし、放射の中に鉄の輝線がみつければ、その構造からブラックホールの質量と角運動量を決定する。しかし、後者はGRBのように定常的ではない場合には難しいだろう。クォーク星の場合、まだ同定された例がないので、なんとも言えない。あるいは、今あげたものは全部間違っていて我々がまだ全く想像すらできていないものかもしれない。

18 終わりに

GRBにはまだまだ話題があるが、紙数の関係で全く触れられなかった。それらを列挙すると: Type Ic 超新星の光度曲線とその起源、相対論的な無衝突衝撃波における高エネルギー粒子の加速と磁場の生成、ジェット放射、偏光と磁場の形状、ジェットの数値シミュレーション、プリカーサーとその起源、種々の観測量の対数正規分布分布とその起源、GRBのジェットと重力波の記録効果、非線形量子電磁気学、母銀河の性質、GRBまわりの環境、光学閃光とその起源、残光の初期観測とその理論的解釈、アマチュア天文家の活躍等である。いずれにしても、1967年に軍事衛星が見つけた奇妙なガンマ線放射が、相対性理論、宇宙論、素粒子論、星と銀河の形成論、粒子の加速理論、プラズマ物理学、数値物理学にまたがる巨大な分野を形成して今後も興味深いテーマであり続けることはわかっていただけたと思う。2004年11月20日にSwift衛星が打ち上げられたが、打ち上げ後ひと月もしないうちにGRBを検出しはじめ、2005年1月末現在で13個のGRBが検出されている。また、INTEGRALやHETE-2も順調に数多くのGRBを検出している。今後、新たなデータ、観測事実が増えて、GRB研究の進展は大いに期待できるであろう。分野、年齢を問わず、研究に参加してくれる人はいつでも歓迎したい。

謝辞

本稿に関して貴重なコメントをいただいた、井岡邦仁氏に感謝する。なお、文献の選択は、全く著者の偏

見の塊である。正確に挙げると膨大な数になるし、物語が切れ切れになってしまう。知人の文献が入っていないから、それは重要ではないという意味は全くないことを断っておきたい。

参考文献

- 1) R. W. Klebesadel et al.: *Astrophys. J. Lett.* 182 (1973) L85.
- 2) G. J. Fishman & C. A. Meegan: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 33 (1995) 415.
- 3) T. Murakami et al.: *Nature* 350 (1991) 592.
- 4) R. J. Nemiroff: *Publ. Astronomical Soc. Pac.* 107 (1995) 1131. B. Paczyński: *Publ. Astronomical Soc. Pac.* 107 (1995) 1167. D. Q. Lamb: *Publ. Astronomical Soc. Pac.* 107 (1995) 1152.
- 5) M. R. Metzger et al.: *Nature* 387 (1997) 878.
- 6) <http://www.mpe.mpg.de/jcg/grbgen.html>
- 7) J. S. Bloom et al.: *Astron. J.* 123 (2002) 1111.
- 8) T. Piran: *Phys. Rep.* 314 (1999) 575.
- 9) G. B. Taylor et al.: *Astrophys. J. Lett.* 609 (2004) L1.
- 10) G. Ghirlanda et al.: *Astrophys. J.* 616 (2004) 331. D. A. Frail et al.: *Astrophys. J. Lett.* 562 (2001) L55.
- 11) S. R. Kulkarni et al.: *Nature* 395 (1998) 663. T. J. Galama et al.: *Nature* 395 (1998) 670.
- 12) F. Frontera et al.: *Astrophys. J. Suppl.* 127 (2000) 59, E. Pian et al.: *Astrophys. J.* 536 (2000) 778.
- 13) J. P. Norris et al.: *Astrophys. J.* 534 (2000) 248.
- 14) R. Vanderspek et al.: *Astrophys. J.* 617 (2004) 1251.
- 15) K. Z. Stanek et al.: *Astrophys. J. Lett.* 591 (2003) L17.
- 16) J. Heise et al.: *Proc. 2nd Rome Workshop: Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era, Rome, 2001, p.16.*
- 17) D. Q. Lamb et al.: *New Astron. Rev.* 48 (2004) 423.
- 18) R. Yamazaki, K. Ioka and T. Nakamura: *Astrophys. J. Lett.* 571 (2002) L31. ; *Astrophys. J.* 593 (2003) 941.
- 19) R. Yamazaki, K. Ioka and T. Nakamura: *Astrophys. J. Lett.* 606 (2004) L33.
- 20) J. P. U. Fynbo et al.: *Astrophys. J.* 609 (2004) 962.
- 21) S. Perlmutter et al.: *Astrophys. J.* 517 (1999) 565.
- 22) L. Amati et al.: *Astron. & Astrophys.* 390 (2002) 81.
- 23) D. Yonetoku et al.: *Astrophys. J.* 609 (2004) 935.
- 24) G. Ghirlanda et al.: *Astrophys. J. Lett.* 613 (2004) L13.
- 25) B.C. Thomas et al.: astro-ph/0411284.
- 26) P. Mészáros: *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 40 (2002) 137.
- 27) G. Ghirlanda et al.: *Astronomy & Astrophys. Lett.* 422 (2004) L55.
- 28) R. Yamazaki, K. Ioka and T. Nakamura: *Astrophys. J. Lett.* 607 (2004) L103.
- 29) B. Zhang & P. Mészáros: *Astrophys. J.* 559 (2001) 110.
- 30) <http://gammaray.msfc.nasa.gov/batse/>
- 31) R. Sari et al.: *Astrophys. J. Lett.* 497 (1998) L17.
- 32) T. J. Galama et al.: *Astrophys. J. Lett.* 500 (1998) L97.
- 33) A. Panaitescu & P. Kumar: *Astrophys. J. Lett.* 560 (2001) L49.
- 34) S. Kobayashi et al.: *Astrophys. J.* 490 (1997) 92.
- 35) K. Z. Stanek et al.: *Astrophys. J. Lett.* 522 (1999) L39.

- 36)** J. J. M. in't Zand et al.: *Astrophys. J. Lett.* 516 (1999) L57.
- 37)** R. Yamazaki: Ph.D. Thesis (2004), Kyoto University.
- 38)** C. A. Meegan et al.: *Nature* 355 (1992) 143.
- 39)** B. Paczyński: *Astrophys. J. Lett.* 494 (1998) L45.
- 40)** K. Z. Stanek et al.: astro-ph/0411361.

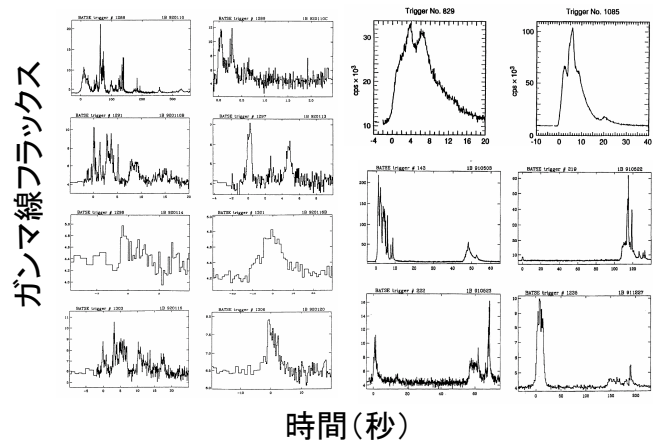


図1 いろいろなガンマ線バーストの時間変動曲線²⁾。

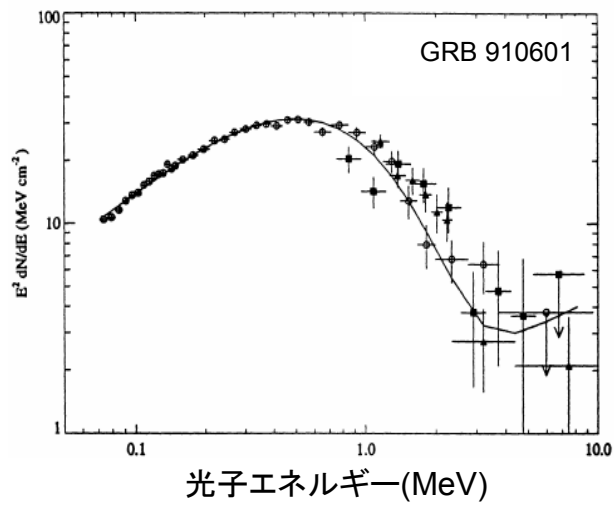


図2 GRB 910601 (1991年6月1日のGRB という意味) の光子エネルギースペクトル²⁾。

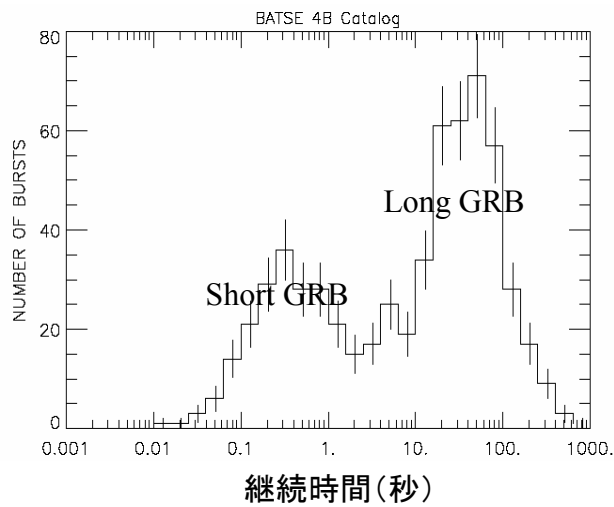


図3 BATSEで検出されたGRBの継続時間の分布²⁸⁾。

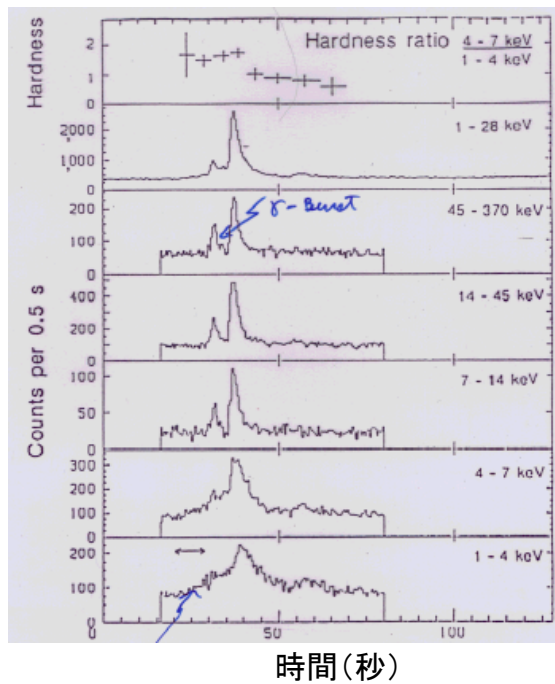


図4 日本のX線天文衛星「ぎんが」で検出されたGRB 900126の時間変動曲線³⁾。

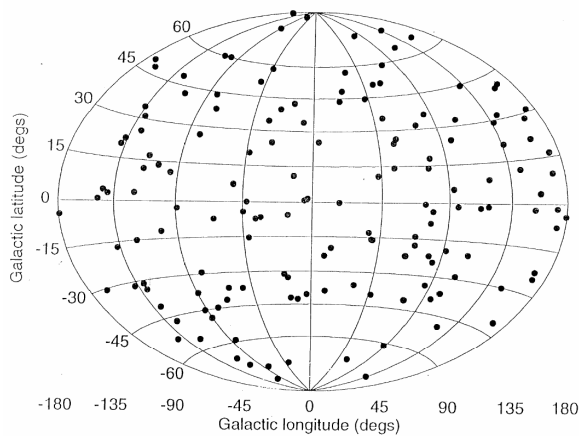


図5 BATSEで初期に検出されたGRBの到来方向³⁶⁾。

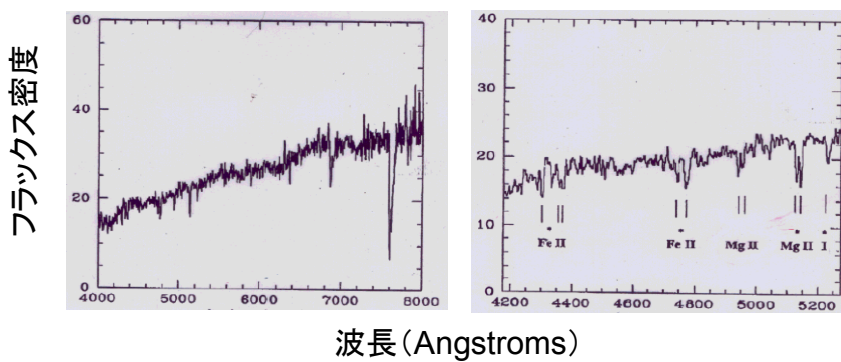


図6 BeppoSAX衛星でとらえられたGRB970508の光学残光のスペクトル⁵⁾。
宇宙膨張の影響で赤方偏移した吸収線がみられる。

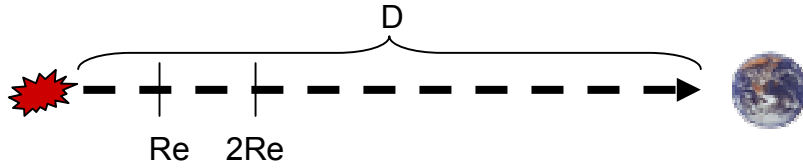


図7 GRBの放射体の運動学の模式図。放射物体は中心天体の爆発によって相対論的速度で観測者方向へ運動し、中心天体から距離 Re から $2Re$ の間で放射を行うとする。

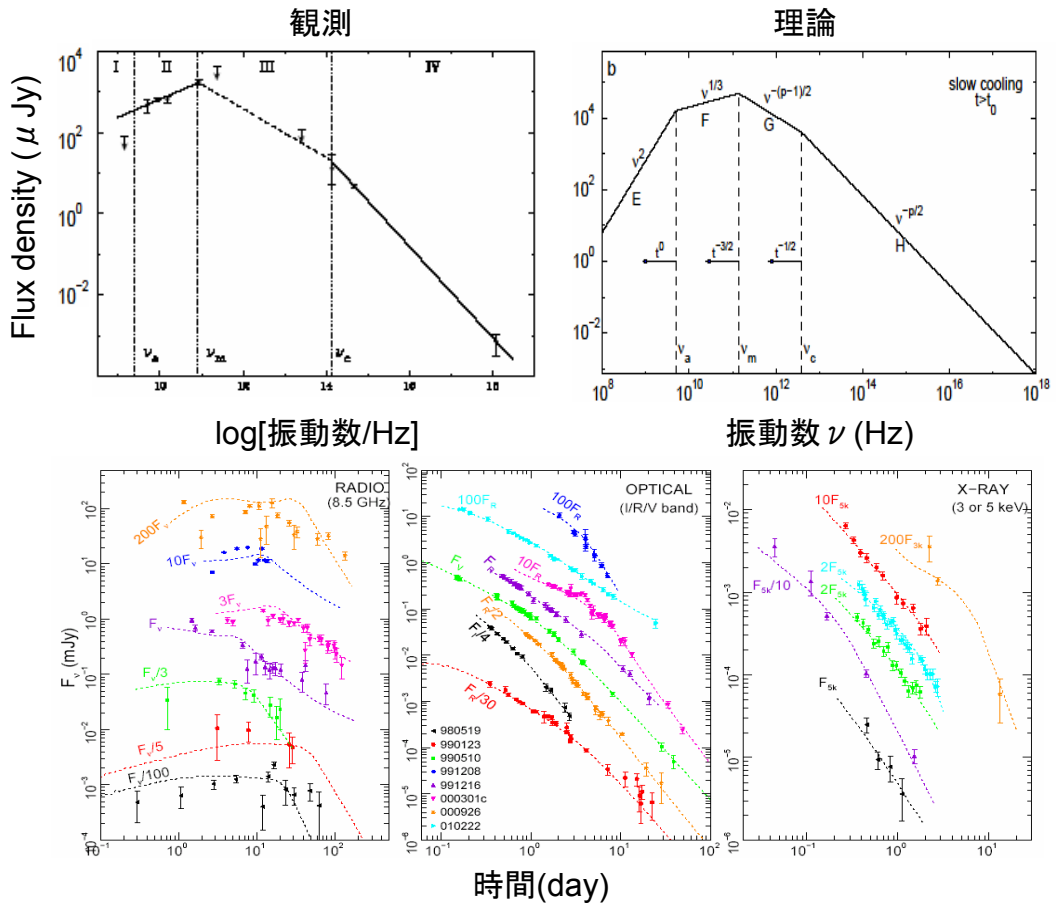


図8 シンクロトン衝撃波モデルで理論的に予言される残光のスペクトル(上右)³¹⁾と、実際に観測されたGRB 970508の残光のスペクトル(左)³²⁾。シンクロトン衝撃波モデルは観測結果を見事に説明できる。実際に観測されたいろいろなGRB残光の異なる波長域(下左:電波、下中:可視光、下右:X線)における時間変動曲線と理論モデルの比較³³⁾。時間変動の様子もシンクロトン衝撃波モデルできれいに再現できている様子がみえてくれる。

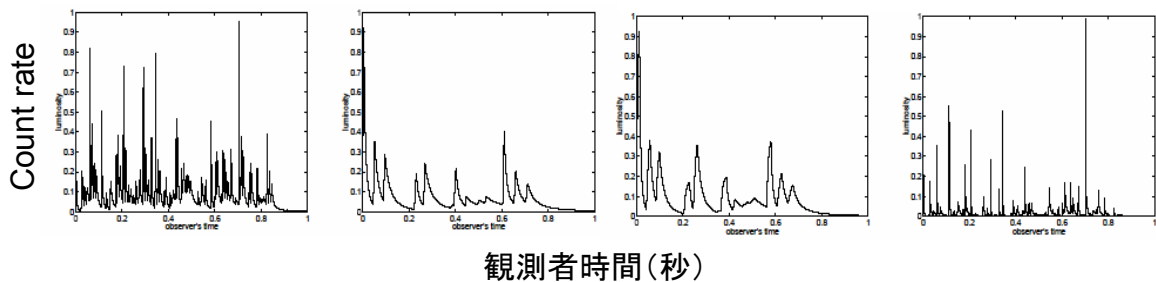


図9 シミュレーションによって得られたGRBの時間変動曲線³⁴⁾。

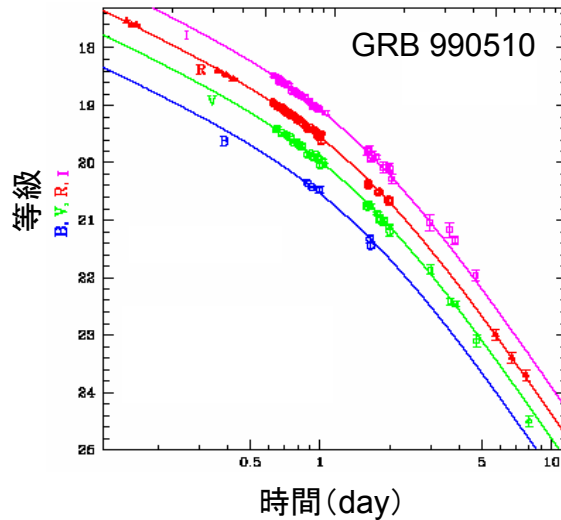


図10 GRB 990510の光学残光の時間変動曲線³⁵⁾。バースト発生から1.6日後から波長によらずに減衰が急になっていることがわかる。

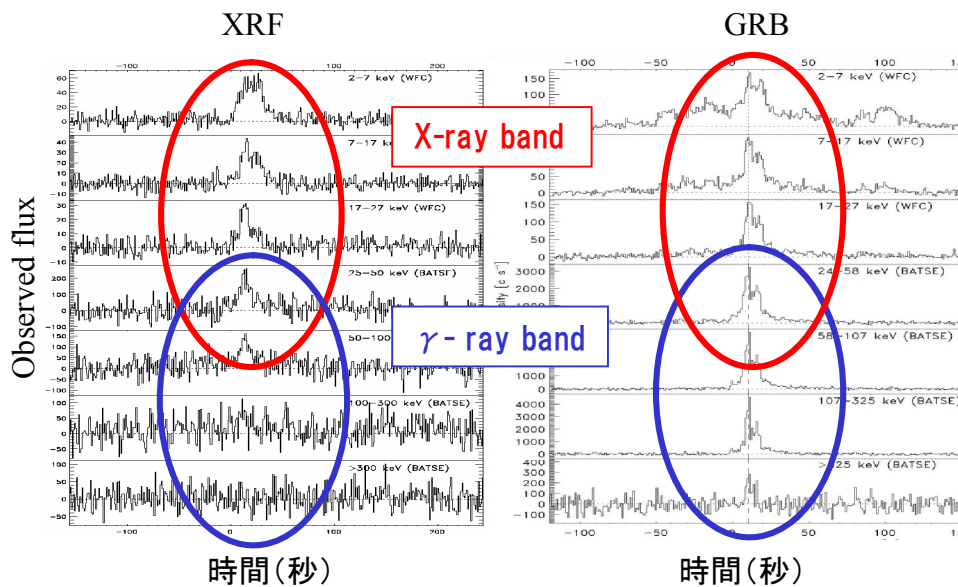


図11 X線フラッシュ(XRF) 000206 (左)¹⁶⁾とGRB 980519 (右)³⁶⁾の、X線からガンマ線にわたる各バンドにおける時間変動曲線の比較。

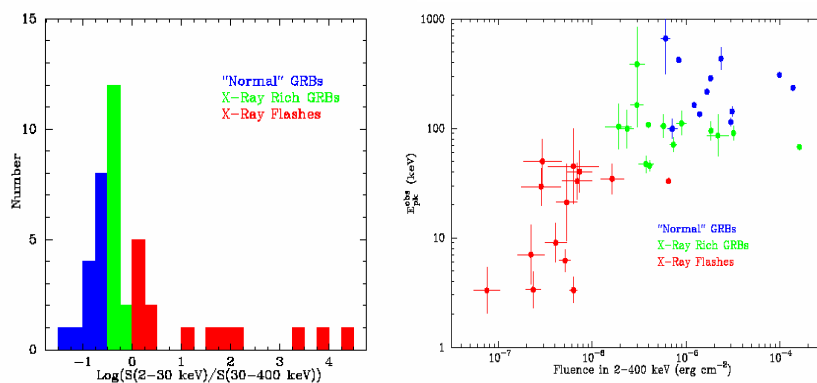


図12 HETE-2衛星によって受けられたGRB, XRR, XRFの X線ーガンマ線強度比(ハードネス)の分布(左)と E_p -フリューエンス関係¹⁷⁾。

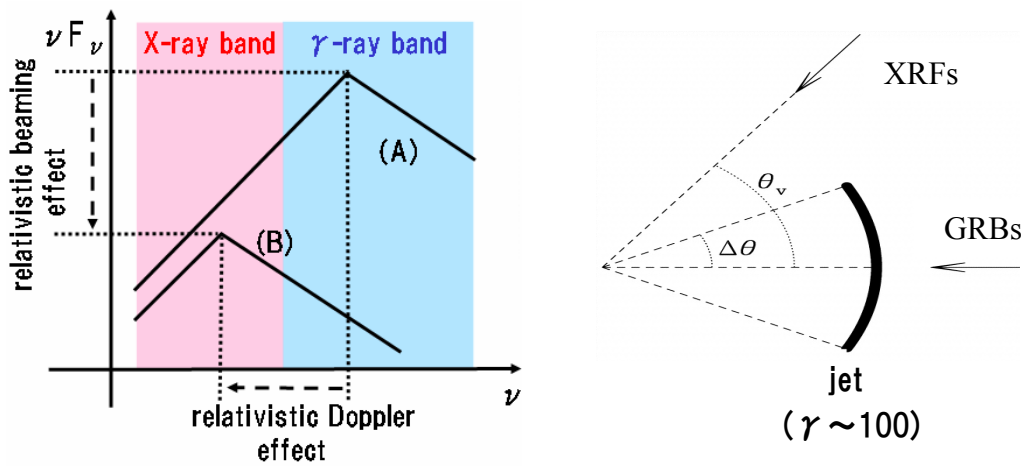


図13 我々のXRFのモデルの模式図¹⁸⁾。

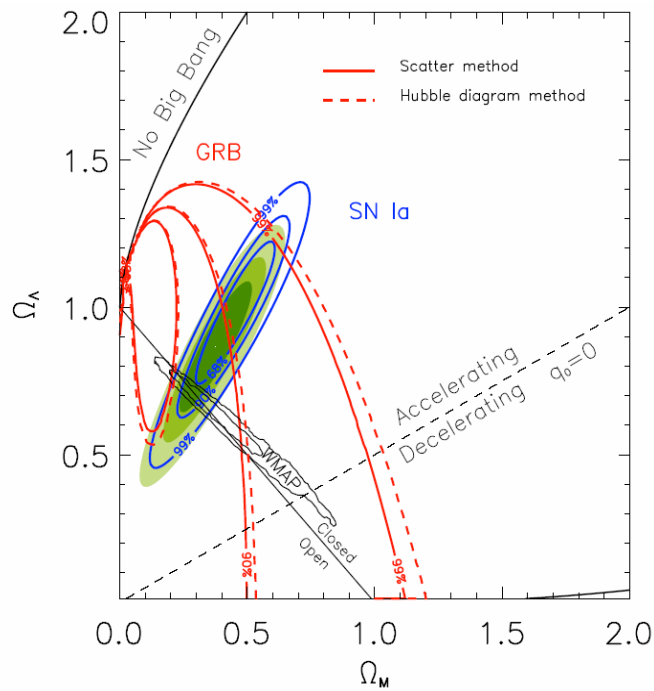


図14 ガンマ線バーストの $E_p - E_{iso}$ 関係を用いた、宇宙論パラメータへの制限²⁴⁾。

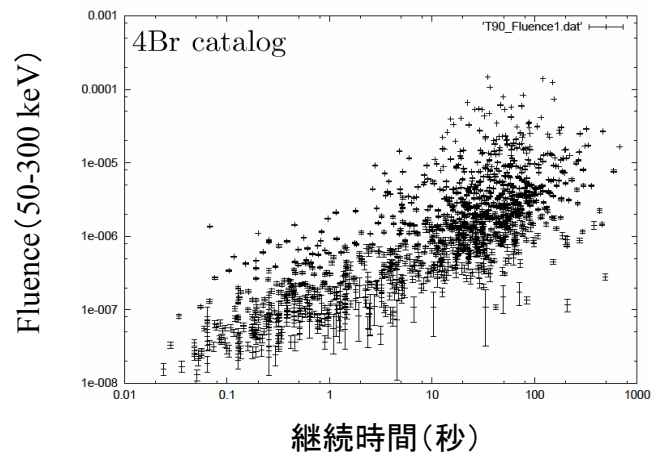


図15 BATSEで受けられたGRBのフリューエンスと継続時間の関係³⁷⁾。

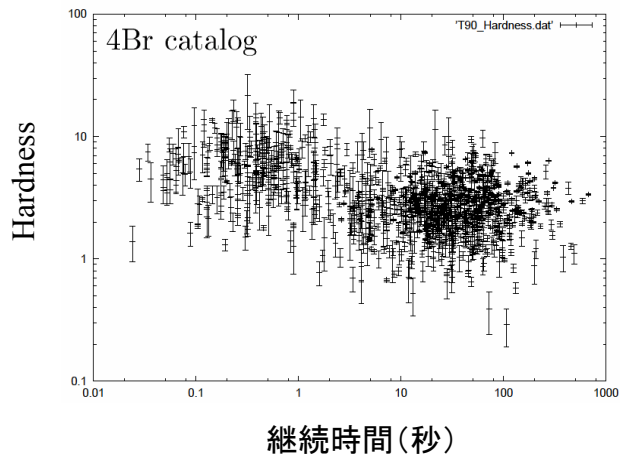


図16 BATSEで受けられたGRBのスペクトルの硬さと継続時間の関係³⁷⁾。

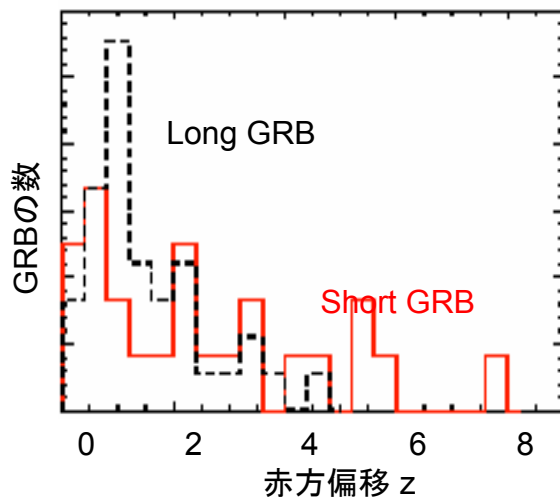


図17 E_p-L 関係を適用して見積もられたShort GRBの赤方偏移(赤)と、直接的に測られたLong GRBの赤方偏移(黒)の比較²⁷⁾。