

ガンマ線バーストで見えてきた $z \sim 15$ の宇宙

村上敏夫, 米徳大輔

〈金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町〉

e-mail: murakami@astro.s.kanazawa-u.ac.jp

中村卓史

〈京都大学大学院理学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: takashi@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp

赤方偏移で $z \sim 10$ を超えるような初期宇宙を定量的に扱うことができるようになってきた。その代表は WMAP 衛星の結果である。最近になって、ハッブル宇宙望遠鏡や地上の大型望遠鏡を使った観測も出てきたが、距離を同定する例はまだ少数である。ここで紹介するのはガンマ線バーストを使ったものであり、 $z \sim 15$ までの宇宙を定量的に議論できる特徴をもつ。ガンマ線バーストの生成率で見る限り、宇宙は $z \sim 15$ ですでに活動的であった。この結果は宇宙の再電離や金属の起源に影響を与えるだろう。

1. 最近の活況

最近、 $z \sim 5$ を超えるような初期宇宙を探る観測がとても活発である*1。とりわけ 2003 年春に WMAP 衛星の成果が公表されて以来、それに拍車がかかった。ここでは主に観測についてを話題とする。理論的な側面は、この号の井岡さんの記事に譲る。 $z \sim 5$ を超えるような初期宇宙の研究は大別して、 $z \sim 1,100$ での 3K マイクロ波背景放射を観測する研究¹⁾と、地上や衛星の大型望遠鏡を極限まで駆使して、遠い天体を探ることに分類される。つい最近まで、遠い天体といえば $z \sim 5$ 程度であった。すばる望遠鏡が観測を始めるや、 z を 6~7 程度に伸ばした。 $z \sim 6$ を超えるような天体のほとんどをすばる望遠鏡が独占的に発見していたが、この事情は 2004 年に入って、大幅に塗り

替えられることになった。2月にはハッブルの超長時間露光 (HUDF) と呼ばれるデータが公開され、ACS と NICMOS 検出器のデータをもとに、写っている 1 万個に近い天体の z は 7~12 がほとんどであると発表された²⁾。注意したいのは、個々の銀河の具体的な距離が決定できたわけではないことである。3月になると、ケックとハッブル望遠鏡チームが $z \sim 7$ の天体の距離を具体的に同定したと発表した³⁾。それに前後して、VLT が $z \sim 10$ の天体を赤外線のスเปクトルから同定したと発表して、皆を驚かせた^{4), 5)}。どちらも重力レンズによる増光効果を使ったもので、このような例はまれだろう。この記録はしばらく破られない。このように、 $z \sim 5$ を超える宇宙を研究することはいまや最先端である。とりわけ大型望遠鏡をもっている施設にとっては、遠い天体の発見

*1 「遠方天体からやってくる電磁波は、宇宙膨張の効果により長波長側にドップラー偏移している。ある天体からの波長 λ の電磁波が $\Delta\lambda$ だけ偏移している時、 $z = \Delta\lambda/\lambda$ を赤方偏移と呼ぶ。この値が大きいほど、この天体は遠方かつ過去のものであると考えられる。」

はステータスシンボルとなっている。これらの観測で分かってきたことは、写っている初期天体がどうも矮小銀河らしいこと、星の生成率は意外と下がっていないことである⁹⁾。しかし $z \sim 10$ の天体もまだ 1 個が見つかったにすぎず、星の生成率を定量的に扱えるのは $z \sim 6$ 程度までである。

深い宇宙を観測する目的の一つは、3K 背景放射から「暗黒の時代」を経て、星や銀河が生まれた最初の現場を知り、その後の生成率 (Star Formation Rate: SFR) を求めることだ。少し前までの一般的な理解は、 $z \sim 3$ 程度で SFR の最大時期があり、それ以前でも以降でも SFR は減少傾向にあるとするものである。クエーサーや活動銀河の数を数え上げる研究では $z \sim 3$ 程度に明白な最大値を示す。このような理解がガンマ線バースト観測の最近の急速な進展によってどのように変わったかを議論したい。

2. ガンマ線バーストと初期宇宙

ガンマ線バーストと呼ばれる現象についてはここでは立ち入らない。天文月報にもすでに何回かの記事が書かれている。それらの記事を参照されたい^{7)~10)}。ガンマ線バーストでは残光の位置から母銀河が同定され、その結果として距離が知られ

た例が約 30 例ある。一番遠い例は $z = 4.5$ で、平均でも $z \sim 1$ である。ガンマ線バーストは非常に遠くからきている。もちろんわれわれの銀河内でも発生するが、銀河内で発生する確率は数千万年に一度程度であり観測にかからない。距離が知られている少数のガンマ線バーストは、当然明るいガンマ線バーストであった。明るいバーストは近いので距離が決めやすかったのである。しかし現在までに知られているガンマ線バーストは 2,700 回を超える。これらはほとんどがコンプトン衛星に搭載された BATSE 検出器によるものだが、大半は暗い。この大多数を占める暗くて距離の分かっていないガンマ線バーストが、いったいどの程度の距離からきているのか、これがこの記事のテーマである。暗いから当然もっと遠くからきているに違いない。距離を合理的に推定することがこの記事の主題である。この方法から、筆者らは PASJ と ApJ に論文を書き大きな反響を得た^{11), 12)}。距離の知られているガンマ線バーストから距離と特徴の間に相関を見つけて、それを距離の指標にしようとする試みである。2,700 個の暗いガンマ線バーストについてできるだけ多くの距離を決めようというのである。距離や星の生成率を定量的に $z \sim 15$ 程度まで求めることができる

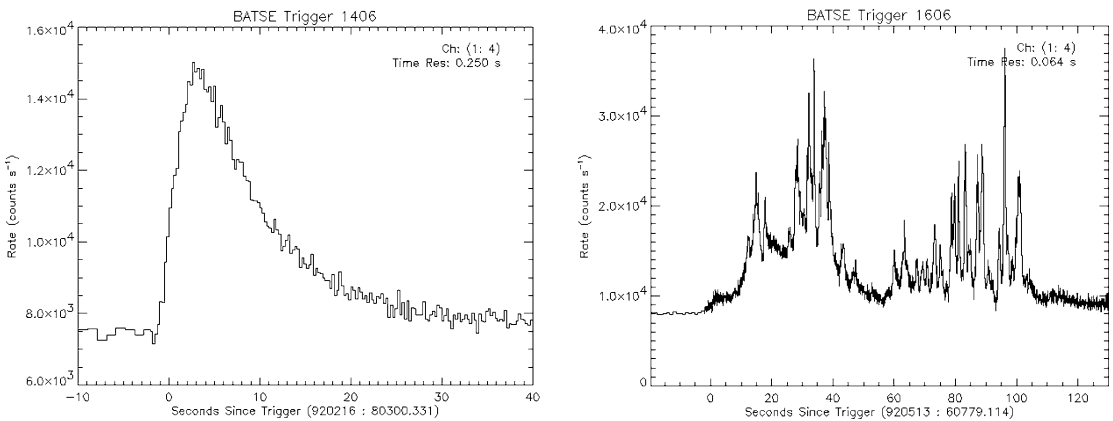


図 1 ガンマ線バーストの明るさの変動の様子。横軸はバースト発生からの経過時間。激しく変動する例 (右) と変動が少ない例 (左) があることが分かる。変動が激しいと源では明るい (BATSE ホームページ <http://www.batse.msfc.nasa.gov/> より)。

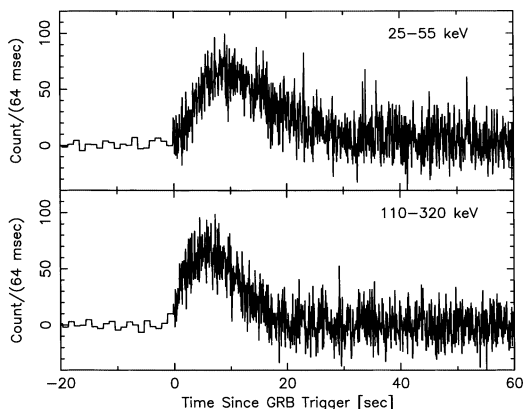


図 2 GRB980425 と呼ばれるガンマ線バーストの低いエネルギーバンド（上）と高いエネルギーバンド（下）での時間差. これは差が飛び抜けて大きい例ではあるが、エネルギーの低い方のピークが高い方に比べて数秒も遅れていることが分かる（BATSE ホームページ <http://www.batse.msfc.nasa.gov/> より）.

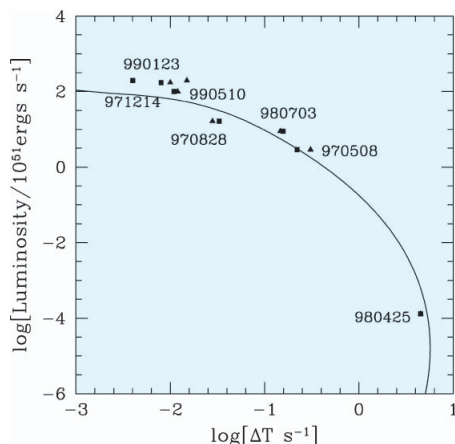


図 3 ガンマ線バーストの明るさと時間差の関係. 井岡, 中村が公表した関数をデータの時間差と比べたもの. 関数形は複雑だが、時間差をよく説明していることが分かる. 見込む角度の違いが原因と理解された^{11), 14)} (Murakami et al. 2003 より転載).

のはガンマ線バーストだけである.

3. 距離指標

いかに距離を推定するか？ 単純に考えると、ガンマ線バーストの源での明るさがそろっているだろうと仮定して、観測される明るさから距離を推定することができる。しかしガンマ線バーストの源での明るさがそろっているかどうか、見る方向で明るさが変わるかどうか分からない。そこで最初に考えられたのが、ガンマ線バーストの変動の様子と距離の関係である。2000年当時、距離が分かっていたガンマ線バーストは10個程度だったが、知られていた距離から計算される源での明るさとガンマ線バーストの変動の様子とが比べられた¹³⁾。ガンマ線バーストには明るさが激しく変動する例と滑らかな例が知られており（図1）、源で明るいガンマ線バーストでは、決まって変動が激しい。しかしこの相関は人を説得するにはちょっと弱かった。なぜ変動が大きいガンマ線バーストが、源で明るいかを解釈する理論が当時では十分ではなかったからだ。

その後、ガンマ線バーストの明るさの時間変化には、エネルギーの低いバンドと高いバンドでは、ピークを迎える時間に時間差があることが知られるようになった（図2）。2000年頃までには、ガンマ線バーストはそのローレンツ因子が数百もあるような超相対論的なジェットによるものとする考えが一般的になっていた^{8), 18)}。この場合、エネルギーバンドによる時間差を、低いバンドはより斜めの方向から見たと考えると説明でき、斜めから見た効果を補正することにより距離を求めることができる。問題はこの補正が直線ではなく曲線の複雑な関数となることだ。その関数形を把握するのが困難で、高い信頼を得ることができなかった。やっと2003年になって、この方法を信頼できる形で村上, 井沢, 米徳, 中村, 井岡が使い論文とした。井岡と中村が時間差を定量的に与える理論曲線を導き¹⁴⁾、その相関関数が正しいことを距離の知られているガンマ線バーストとその観測時間差データから確認した上で（図3）、約200個の距離の分からないガンマ線バーストの距離の推定が行われたのである¹¹⁾。相関関係が曲線でもあ

り、適用は $z \sim 5$ にとどめられて論文は PASJ に発表された。結論は、ガンマ線バーストは $z \sim 5$ を超えても単位時間、単位体積当たりの発生率が減少を示さなかったことである。SFR をもじてガンマ線バーストの発生率を GFR としておこう。GFR は初期宇宙でも減少しないのである。

4. 新しい距離指標

距離を推定する指標の信頼性を一変させたのが、ガンマ線バーストのスペクトルを使うアイデアである。村上は金沢大学に移ってから、ガンマ線バーストのスペクトルの硬さと距離には相関があることを学会で指摘してきた¹⁵⁾。ただ遠方のガ

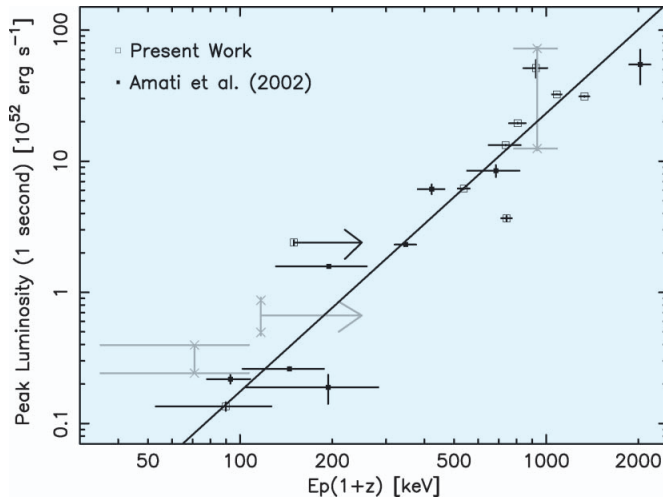


図 4 ガンマ線バーストのスペクトルのピーク (E_p) と明るさの関係。相関は見事である。ここでは BATSE と BeppoSAX によるすべての距離データが使われた¹²⁾ (Yonetoku et al. 2004 より転載)。

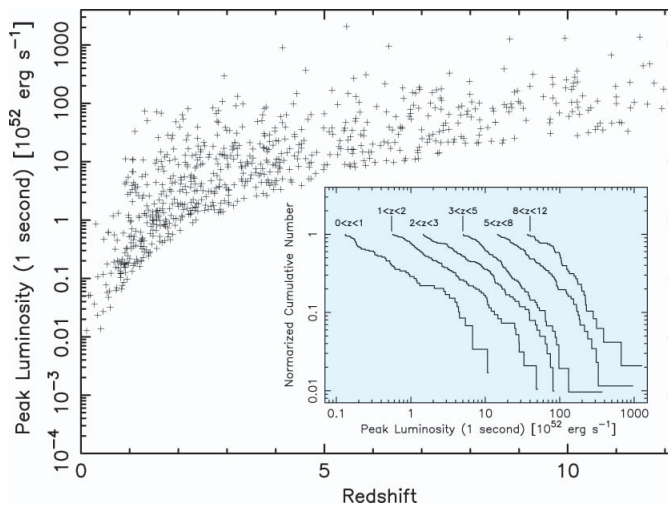


図 5 相関から求められた 689 個のバーストの距離分布 (距離は赤方偏移 z で表す)。 z ごとの明るさの分布 ($\log N - \log L$) も示されている。明るさの宇宙進化が読み取れる¹²⁾。

ンマ線バーストがより硬いとする結論は赤方偏移の傾向とは矛盾し、理解ができない。ところが BeppoSAX 衛星の活躍で距離の分かったガンマ線バーストの数が 2002 年頃には 30 個程度に増えると、この相関がイタリアのグループからも指摘されるようになった¹⁶⁾。2003 年になって、米徳は BeppoSAX と BATSE データを统一的に処理し、30 例の $\nu F(\nu)$ スペクトルでの最大エネルギー (E_p) と、源での明るさ (L) の間に従来にないきれいな相関を導いた¹²⁾。異なった衛星の知られているすべての距離を扱ったこと、相関が 1 次式で近似でき、しかも相関度が高いことで信頼を得た (図 4)。相関式は、ほぼ正確に E_p の 2 乗に比例する。

$$L \propto \{E_p(1+z)\}^2$$

これはガンマ線バーストにおける「ハッブルの法則」のような関係である。 E_p が得られれば、この関数に従って距離を求めることができる。2,700 個ある BATSE データベースを使って E_p を計算し、源での明るさを相関から導き、観測されたフラックスから距離を求める。あまり暗いガン

マ線バーストでは十分な精度で E_p が求められない。暗くて統計の悪いガンマ線バーストは処理から落とすが、この選別効果を後でどのように補正するかが問題となる。ともかくこのようにして 689 例のガンマ線バーストについて十分な精度で距離が得られたのである (図 5)。

5. 潜んでいた宇宙進化

得られた距離分布を使って、 z の範囲ごとに明るさの分布を作っていたときに奇妙なことに気づいた。遠くのガンマ線バーストであるほど、硬いだけではなく明るさが明るい傾向にある。図 5 内に示した距離ごとの明るさの分布関数の“折れ曲がり”を見てみると、形にほとんど違いはないが、明るさの軸の移動が必要だと気づく。形は等しいと仮定すると明るさには $(1+z)^{2.6}$ 程度の宇宙進化が認められる。この明るさの宇宙進化を考慮しながら、暗いバーストを切り捨てた効果を補正する。つまり E_p を計算するとき統計が不足することから切り捨てた暗いバーストの数を、この明るさの分布関数から補うのである。こうして、単位体積、単位時間 (comoving) 当たりの発生率:

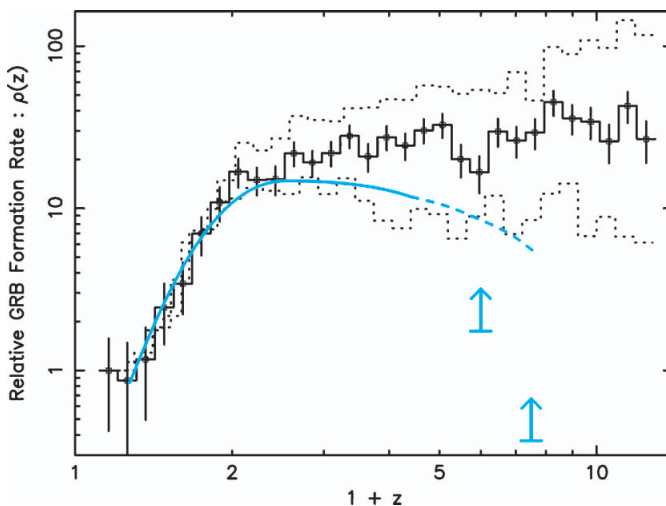


図 6 ガンマ線バーストの生成率 (黒の実線)。GFR は $z \sim 12$ でも生成率が全く減少しない¹²⁾。挿入した青線はすばるが論文で公表した SFR で減少傾向を示す¹⁷⁾。可視光では、遠方で下限しか与えられないから注意がいる。点線は推定の上下限を示す。

GFR が計算できることになる。ここで距離や体積を求めるときの宇宙モデルは、 $\Omega_m=0.3$, $\Omega_\lambda=0.7$, $H_0=72 \text{ km/s/Mpc}$ を用いている。

6. ガンマ線バースト生成率

詳細は ApJ 論文に譲るが、このようにして得られたガンマ線バーストの生成率: GFR を図 6 に示す。一見して、一昔前の星の SFR とは違うものであることが分かる。同じ図に、2003 年にすばる望遠鏡により推定された $z \sim 6$ までの SFR も示す¹⁷⁾。従来知られる SFR では、 $z \sim 3$ 程度を境により遠方では生成率は下がる。光学観測では吸収の補正が難しく、遠い距離では下限しか与えられないことが多いが、ともかく一般的には下がると理解されてきた。この食い違いは、光学観測が不十分と考えるのが妥当だろう。

ガンマ線バーストの起源を説明する最も有力な説は巨星の崩壊説である¹⁸⁾。重い星は終末にブラックホールを造り崩壊をする (collapsar)。ガンマ線バーストを起こす星はごく一部と考えられるが、その割合は分からないから SFR と GFR を直接比較することはできない。可能な限り GFR の絶対値を検討してみよう。ガンマ線バーストはビーミングをしていると理解されているから、正しい発生率を知るにはこの補正が必要でかつ難しい。ビーミングは角度で ~ 10 度程度と理解されている。また明るさに宇宙進化が認められる。これらの補正に限れば、図で $z \sim 10$ での GFR の絶対値は推定できるがこれは将来の仕事である。今回の推定の最大の弱点は、 $z \sim 4.5$ までで作成された相関から $z \sim 15$ までを導いていることである。ともかくガンマ線バーストを起こす星のタイプの知識と宇宙で最初に作られた星の質量分布関数が得られれば、この活動で宇宙の再電離が可能かどうかや金属の量を説明できるかなどの推定に大きな影響を与える。

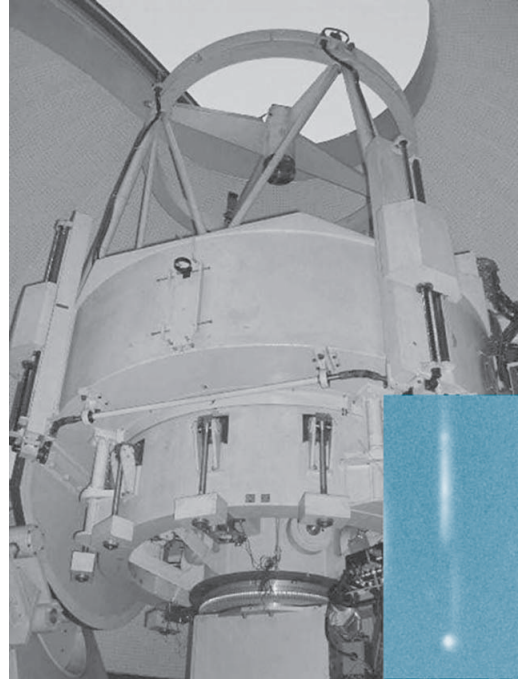


図 7 Swift 時代の観測装置。国立天文台の小林行泰氏と宇宙研の中川貴雄、村上浩両氏の協力を得て開発されている観測装置。宇宙研屋上の 1.3 m 望遠鏡と赤外線検出器を使う。すでに自動導入による観測は始まっている。まだ可視光に限られるが 3C273 (12.8 等級) のグリズムの分光の例を示す。挿入図の光の帯はスペクトルで、直接光と分散光が分かる。1,000 秒程度の積分で z は 0.01 の精度が実現できる。この程度の明るい残光がガンマ線バーストから出ることを期待している。

7. 今後の問題

使ったのはたった 689 個のガンマ線バーストである。もっと暗いガンマ線バーストはもっと遠いはずだが、距離を信頼性高く推定できない。ガンマ線バーストによる GFR の推定をより信頼度の高いものとするには、 $z \sim 10$ 程度のガンマ線バーストの距離を別の方法で決めて、相関関数の妥当性を確認することだろう。しかし遠方のガンマ線バーストは暗いから、ガンマ線バーストの残光では無理で、明るいバースト中のフラッシュを分光

して距離を決めねばならない。それは難しい作業だ。大きな赤方偏移で観測に赤外線を要求される。距離指標となる Ly- α 線や Ly-break が赤外線に偏移してしまう。距離を決めるには K-バンドでの観測が必要になる。幸いなことに、ガンマ線バーストの発生方向はガンマ線バースト専用の Swift 衛星が打ち上げられ、より早い時間に通報されるようになる。Swift では $z \sim 50$ も受かるのではないかと期待されている。この衛星は畳の面積もありそんな大きさの検出器を使い、遠いガンマ線バーストを高い頻度で受け、その方向を決めて地上に連絡してくるはずである。同時観測の準備を始めている地上望遠鏡は多い。筆者らも国立天文台の小林行泰氏らと協力して、JAXA/宇宙研の屋上の 1.3 m 望遠鏡と K-バンド赤外線検出器を使って観測の準備を行っている。位置が正確には決まっていない天体のすばやい赤外分光をするわけだから視野が広くとれるグリズムが必要で、それを制作した。検出器は HgCdTe 検出器を冷凍機で冷却する。まだシステムは完成していないが、可視光では 3C273 程度の明るさ (12.8 等級) があれば、1,000 秒くらいの積分で z は 0.01 程度の精度で決定ができる (図 7)。Swift の打ち上げが待ち遠しいが 10 月になるようだ。

追記 ハッブルデータを使った $z \sim 6$ までの SFR が論文となった⁶⁾。SFR は $z \sim 3$ を超えても減少しない。ガンマ線バーストの $z \sim 15$ までとは比較にならないが、光のデータもガンマ線バーストと同じような傾向を示すようになった。

参考文献

- 1) 小松英一郎, 2003, 天文月報 96, 482
- 2) STScI 記者発表, 2004, http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/hubble_UDF.html
- 3) Keck 記者発表, 2004, http://www2.keck.hawaii.edu/news/z_7.html
- 4) ESO 記者発表, 2004, <http://www.eso.org/outreach/>

- press-rel/pr-2004/pr-04-04.html
- 5) Pelló R., et al., 2004, A&A 416, L35
- 6) ApJ-HUDF 特集号, 2004, ApJL 600, No. 2
- 7) 河合誠之, 2001, 天文月報 94, 287
- 8) 小林史歩, 2002, 天文月報 95, 84
- 9) 植村 誠ほか, 2004, 天文月報 97, 169
- 10) 川端弘次ほか, 2004, 天文月報 97, 176
- 11) Murakami T., et al., 2003, PASJ 55, L65
- 12) Yonetoku D., et al., 2004, ApJ 609, 935
- 13) Fenimore E. E., Ramirez-Ruiz E., 2000, astro-ph/0004176
- 14) Ioka K., Nakamura T., 2001, ApJ 554, L163
- 15) 村上敏夫ほか, 2002, 日本物理学会第 57 回年次大会予稿集, 25aWH-8
- 15) Amati L., et al., 2002, A&A 390, 81
- 17) Kodaira K., et al., 2003, PASJ 55, L17
- 18) Woosley S. E., et al., 1999, ApJ 516, 788

Observation of the Early Universe at $z \sim 15$ Using GRBs

Toshio MURAKAMI and Daisuke YONETOKU

Faculty of Science, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

Takashi NAKAMURA

Department of Physics, Faculty of Science, University of Kyoto, Kita-Shirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Observations of the early universe beyond $z \sim 5$ are very active. Recently two observations beyond $z \sim 7$ were reported by the Keck-Hubble and also by the VLT telescopes independently. The VLT result has reached to $z = 10$ for the first time. In this report, a GRB formation rate beyond $z = 10$ is derived using the distances of the weak GRBs. These GRB distances were estimated based on the spectral E_p -Luminosity relation, which was discovered by us. Influences of our result to the re-ionization and the heavy-element abundances in the early universe are suggested.