# RIMOTS による GRB030329 可視光残光の観測

坂元 かほり<sup>1)</sup>,山内 誠<sup>2)</sup>,園田 絵里<sup>1)</sup> 河合 誠之<sup>3)4)</sup>,浦田 裕次<sup>3)4)</sup>,小浜 光洋<sup>3)</sup>

# **Observation on the GRB030329 by RIMOTS**

Kahori SAKAMOTO, Makoto YAMAUCHI, Eri SONODA Nobuyuki KAWAI, Yuji URATA, Mitsuhiro KOHAMA

# Abstract

Bright gamma-ray burst GRB030329 was detected by HETE-2 at 11:37:14.67(UT) on 29 March 2003. We got first image of its optical afterglow with RIMOTS at 164 minutes after the burst. The telescope of RIMOTS has 30cm aperture, and its field of view is  $43' \times 43'$ . Our data shows its magnitude decreases from  $13.0\pm0.2$  to  $14.2\pm0.1$ . This magnitude change can be described by a power-law function of time whose index is  $1.0\pm0.1$ . These observations are consistent with other observations within the error. This power-law change of magnitude is explained by the model where a jet having nearly light speed expand and collide with interstellar gas decreasing its speed.

Our non-filterd data shows that the fading of the afterglow becomes slower at 0.16 day after the burst. This change isn't seen in any data taken with R-band by other observatory. This phenomenon may be due to the flux change of U, B, or V band. The spectroscopic observations are needed for further analysis of this phenomenon.

## Key Words :

Gamma-ray burst, GRB, GRB030329, Afterglow, Optical observation

# 1. はじめに

「ガンマ線バースト(以下,GRB)」は、1967年に核実 験を監視する米国の軍事衛星によって偶然発見されたも のである。

GRB とは、宇宙のある一点から突然多量のガンマ線が 短時間で爆発的に放出される現象である。その爆発規模 はビッグバンに次ぐほどのものであり、太陽が 100 億年 かけて生み出すエネルギーをたった数秒で放出すると言

- 2) 材料物理工学科助教授
- 3) 理化学研究所
- 4) 東京工業大学

われている。ガンマ線の放出時間は数秒から数十秒とご く短いため、観測が難しくその正体は今でも完全には解 明されていない。しかし近年の研究により GRB は爆発 後それに付随した可視光の残光を放出することが分かっ たことで地上から GRB を観測することが可能となり、 現在多くの研究者により解明されつつある天体現象であ る。

GRB の可視光残光は GRB 発生後数時間から数日続く が,GRB 発生1日後にはほとんどのものが20等級より も暗くなってしまい,すばる望遠鏡や Keck 望遠鏡など の限界等級の暗い大型望遠鏡でしか観測することができ ない。しかし,そのような大型望遠鏡の使用には事前の 手続きが必要な上,観測スケジュールがつまっているた

<sup>1)</sup> 物質工学専攻大学院生

め,いつでも観測ができるわけではない。よって,GRB 可視光残光の観測には,使用の手続きの必要がない小型 望遠鏡で観測するのが効果的である。しかし,小型望遠 鏡では 20 等級ほどに暗くなると限界等級を超えてしま い観測することは不可能であるので,GRB 発生後即座に 観測を開始しなければならない。

. 我々は 2001 年 3 月に理化学研究所との共同研究によ り宮崎大学工学部 A 棟屋上に, GRB の残光を即座にと らえることを目的としたシステム RIMOTS (Riken-Miyazaki Optical Transient Seeker)を設置し, GRB 監視衛 星 HETE-2(High Energy Transient Explorer-2)<sup>1)</sup>と連携して, GRB 発生後即座に GRB の可視光残光の観測を行ってい る。

本研究の目的は RIMOTS により GRB の可視光残光を 観測し,取得した画像により GRB の位置・光度を解析 すること,またその結果から残光のメカニズムを考える ことである。これまでに観測された GRB 可視光残光の ほとんどは,時間に対してべき乗型に減光しており<sup>2</sup>, そのメカニズムはバースト発生源から光速に近い速度で 噴出したジェットが,星間ガスと衝突しながらその膨張 速度を次第におとしていくというモデル<sup>3</sup>が広く受け入 れられている。

## 2. HETE-2

# 2.1 概要

HETE-2 (High Energy Transient Explorer 2;高エネルギ ートランジェント天体探査機)は、主にガンマ線バース トを検出しその位置を決めるために作られた小型科学衛 星であり、このプロジェクトは、米国マサチューセッツ 工科大学 (MIT) 宇宙研究センター、理化学研究所宇宙 放射線研究室、米国ロスアラモス国立研究所、仏国宇宙 線研究センターなどによる国際共同研究として進められ ている。

初代 HETE は 1996 年 11 月に打ち上げられたが, ロケ ットの切り離しに失敗してしまい,太陽電池パネルを展 開できず,一度も活躍することができなかった。現在は その2号機「HETE-2」がその役目を果たしている。 HETE-2 は,2000 年 10 月 9 日 5 時 38 分 18 秒 (世界時: 以下 UT と表記する)(日本時間 14 時 38 分 18 秒),マー シャル諸島クウェジェリン環礁南方沖でL-1011 飛行 機からペガサスロケットで打ち上げられた。ほぼ予定通 り近地点 590km,遠地点 560km,傾斜角 1.95 度で地球の 赤道軌道に投入され、その直後の5時50分(UT)にロケットから衛星が分離され、太陽電池パネルを展開し、反太陽方向への姿勢制御が行われた。HETE-2の軌道は観測効率を向上させるために放射線帯の影響が一番小さい地球の赤道軌道が選ばれた。

HETE-2 は、ガンマ線バーストに対して最も高感度な ガンマ線分光器,10分角程度のバースト位置決定能力を 持つ広視野X線モニター,高密度の符号化マスクを備え, 統計が良いバーストに対して広視野X線モニターで得ら れたバースト位置の精度をさらに数秒角まで改善するこ とが可能な軟 X 線カメラを搭載している。図 2.1 は HETE-2 衛星の写真である。



図 2.1 HETE-2 衛星

## 2.2 HETE-2の情報配信

GRB が発生すると、HETE-2 がその位置を計算し、位 置情報として赤道上に配置した専用受信局へ送信する。 受信局が受け取った GRB の位置情報は、すべて一度 MIT に集められ、NASA の GCN によりインターネットを通 して世界中の観測地へ配信される。図 2.2 に HETE-2 に よる位置情報の配信の流れを示す。



#### 3. RIMOTS

2001年3月に理化学研究所との共同研究により宮崎大 学工学部A棟屋上に、ガンマ線バーストの残光を即座に とらえることを目的としたシステム RIMOTS を設置し た<sup>4</sup>。RIMOTS は、ガンマ線バースト監視衛星 HETE-2 などの衛星によりガンマ線バーストが検出されると、 GCN を通してその位置情報を受け取り、自動で即座に望 遠鏡をバースト発生方向に向け可視光残光の観測を行う ことができるので、GRB 観測には理想的な観測システム である。HETE-2 が GRB を発見してから最速で約 20 秒 後には、RIMOTS の望遠鏡で GRB の可視光残光を観測 することができる。

#### 3.1 観測機器

# 3.1.1 小屋

図 3.1.1 は RIMOTS システムが設置されている小屋で ある。大きさは約 2m×2m×2m で,この中に CCD カメ ラを搭載した望遠鏡,Linux と Windows のそれぞれが搭 載されたパソコン 2 台が収められている。屋根は RIMOTS 制御プログラムにより制御されており,自動開 閉される。

# 3.1.2 望遠鏡

図 3.1.2 は RIMOTS システムで用いている Meade-LX200 望遠鏡である<sup>5</sup>。Meade-LX200 はシュミットカセ グレン式望遠鏡で、口径は 300mm、f/3.3 のレデューサ使 用時の焦点距離は 923.6mm、赤道儀の移動の速さは最大 約8度/s である。GCN サーバーよりガンマ線バースト発 生情報を受信した際、目標天体をいかに早く視野内に入 れるかが非常に重要であるので、市販の望遠鏡の中で導 入速度の最も早い Meade-LX200 を使用している。

# 3.1.3 CCD カメラ

天体画像の撮影に用いる CCD カメラには,SBIG 社製 ST 9E を使用し<sup>9</sup>,図 3.1.2 に示されるように望遠鏡の焦 点部分に取り付けられている。CCD チップの大きさは 10.2mm×10.2mm,ピクセルサイズは 20µm である。CCD カメラを使用すると,画像データを電気的に扱えるため 自動観測に最適であるということ以外に,写真用フィル ムと比べて感度が高い,入力信号と出力信号がほぼ比例 関係にあり測光や位置測定の精度がよい,ダイナミック レンジが広い,などの利点も持っている。CCD カメラは 一般に本体やその周辺から発生する熱からの赤外線でさ えもノイズとしてとらえてしまうほどの感度を持つが, CCD チップを冷却することで飛躍的にノイズを抑える ことができる。我々がガンマ線バースト観測に用いるシ ステムでは、冷却 CCD カメラは撮影に使用するまでに 常温より 35℃低い温度に冷却される。



図 3.1.1 小屋



図 3.1.2 望遠鏡・CCD カメラ

# 3.2 RIMOTS 制御

RIMOTS は Linux を搭載したパソコンと Windows を搭載したパソコン各 1 台で制御されている。Linux マシーンでは、GCN からの GRB 位置情報の受け取り、屋根の開閉、望遠鏡の制御、CCD カメラが取得した画像の保存を行い、Windows マシーンでは CCD カメラの制御を行っている。図 3.2 に Linux マシーンと Windows マシーン それぞれの役割を示す。



図 3.2 Linux マシーンと Windows マシーンの役割

## 3.3 観測スケジュール

RIMOTSは地平線からの太陽高度によりスケジュール が決められおり、夜になると自動で屋根を開け、CCDカ メラの冷却やダークフレームの撮影などの観測準備を行 い、その後、観測を行う。

GRB が発見されていない時には, RIMOTS は HETE-2 の視野方向である反太陽方向の観測を 15 秒積分で行っ ている。GRB が発見され,その位置情報を受け取った場 合には,それまでの反太陽方向の観測をすぐにやめ, GRB 方向へ望遠鏡を向け GRB 残光観測を15秒積分で行 う。しかし,すでに GRB 残光観測を行い撮影中である 場合は,撮影中の1枚の撮影が終了してから,新たに受 け取った GRB の方向へ望遠鏡を向け観測する。

## 4. GRB030329の観測

2003 年 3 月 29 日に発生した GRB030329 は HETE-2 に より発見され、すぐに GCN に発見の速報が配信された。 その後、HETE-2 に搭載されている軟 X 線カメラから得 られた情報を MIT や理化学研究所などが解析し、発見の 速報から 73 分後にこの GRB の最初の位置情報が配信さ れた。図 4.1 は RIMOTS で撮影した GRB030329 方向の 画像である。視野は 43'×43'であり、中央付近の点線の 丸印は GCN から最初に送られてきた GRB030329 の位置 を表す直径 4 分角の誤差範囲である。実線の丸印は、そ の後 GRB を軟 X 線カメラの端のほうで感知したために 生じる誤差を考慮してさらに解析され、19:53:03(UT)に 90%の誤差範囲で決定されたもので、この範囲も直径 4 分角である。

GRB030329 可視光残光は, 発生直後 R バンドにおいて 12 等級台で観測されたという報告<sup>78)</sup>もあるほど明るく, 発生直後の位置は日本においてちょうど天頂付近であっ たことから, 日本でも理化学研究所<sup>9)</sup>, 東京工業大学<sup>10)</sup>, 木曽観測所<sup>11)</sup>, 京都大学<sup>12)</sup>, ぐんま天文台<sup>13)14)</sup>, 美星天 文台<sup>15)</sup>などの研究グループが観測を行い, また日本で観 測できる時刻をすぎてからも世界中で観測され,数多く の報告がなされている。HETE-2 が GRB030329 を発見し てから, RIMOTS を用いてそれを観測し終えるまでの流 れを表 4.2 に示す。

RIMOTS システムは、今回、自動で位置情報を受け取ることができず、希望すれば誰でも購読できる VSNET(Variable Star Network)から携帯電話に送られてきたガンマ線バースト即時通報のメールで GRB が発見さ れたことを知り,手動で望遠鏡を GRB の方向へ向けた。 また,この時望遠鏡のエンコーダーがずれていたため, 正しい方向へ望遠鏡を向け直す必要があった。これらの 理由から,HETE-2 が GRB を発見してから RIMOTS で 最初に GRB をとらえるまでに 163 分かかってしまった。

その後, GRB が西へ沈んで観測できなくなる 18:17:59(UT)まで15秒積分で, ノンフィルター観測を続 け, 304 枚の画像を得ることができた。



図 4.1 RIMOTS により取得した GRB030329 方向の画像

HETE-2による GRB030329の発見	11:37:14.67	UT
GCN から最初の報告	11:38:41	UT
GCN から最初の位置情報の報告	12:50:24	UT
RIMOTS による観測開始	13:52:14	UT
RIMOTS により残光を初めて取得	14:19:32	UT
RIMOTS による観測終了	18:17:59	UT

表4.2 HETE-2による GRB030329 の発見から RIMOTS によ る観測終了までの流れ

# 5. データ解析

#### 5.1 一次処理

5.1.1 ダークフレーム処理

冷却 CCD カメラを冷却してノイズを抑えても,どう しても一部の暗電流によるノイズは残ってしまう。暗電 流によるノイズは同じ温度で同じ装置を使用している場 合に,非常によく似た形であらわれることがわかってい る。よって,ダークフレームという夜空を撮影するとき と同じ温度,露出時間で真っ暗な何もない場所を撮影し, その後夜空を撮影した画像からダークフレームを画素ご とに引き算することで、星の光だけを含んだ画像が得られる。これで完全にノイズを除去できるわけではないが、 大幅に低減できる。今回のダークフレーム処理には、観 測直前に取得したダークフレームを使用した。

#### 5.1.2 フラットフレーム補正

フラットフレーム補正とは CCD 素子の感度のばらつ き・光学系のひずみ・レンズの周辺減光・ごみなどによ るばらつきを取り除くものである。一般的には均一な光 量を持った壁面やスクリーンを撮影したものをフラット フレームとするが、今回はそれに代わりナイトスカイフ ラットを作成しフラットフレーム補正に使用した。ナイ トスカイフラットはある一方向を基準として、できるだ け同じ画像を撮影しないように撮影方向を少しずつラン ダムにずらしていきながら撮影したものをすべて重ね合 わせてメジアンをとり、感度ムラのみを表すよう規格化 することで作成できる。この方法は星像の形が残ってし まう場合があるが、RIMOTS の場合、一晩で最大約 600 枚ほどの大量のデータを取得できるので、積極的に画像 を取得することでこれを解決する方が、効率良くフラッ トフレームを得ることができる。今回のフラットフレー ム補正には、2002年5月19日の画像を用いこの方法で 作成したフラットフレームを用いて補正を行った。

ダークフレーム処理,フラットフレーム補正は,画像 に対して次の計算をすることにより行うことができる。

$$E(x,y) = \frac{I(x,y) - D(x,y)}{F(x,y) - D(x,y)}$$

ここで(x,y)は画像のビクセル座標とし, E(x,y)はダーク フレーム処理とフラットフレーム補正を行った画像の x,y 座標のピクセル値, D(x,y)はダークフレームの x,y 座 標のピクセル値, F(x,y)はフラットフレームの x,y 座標の ピクセル値, I(x,y)はダークフレーム処理前の画像の x,y 座標のピクセル値である。

## 5.2 位置測定

RIMOTS で取得した画像を解析し GRB030329 の位置 を決定する際,変光星を観測する MISAO Project の吉田 誠一氏が開発した天体画像自動検査システム PIXY を使 用した<sup>16)</sup>。これは天体画像に写っているすべての星像を 検出し,USNO-A2.0(US Naval Observatory)などの恒星カ タログと比較して新天体や変光星を自動で検出するとと もに,画像に写っている各星像の位置と光量の測定をす ることができるソフトウェアである。このシステムでは 星像の検出は閾値を超えるピクセルを星像とみなすという, 簡単な閾値法を用いている。今回使用したカタログは USNO-A2.0 である。

GRB030329の可視光残光は、RIMOTS により取得した 画像である図 4.1 において、実線の丸印の中央に存在す ることが確認できた。PIXY を用いて GRB030329の位置 を解析した結果、赤経 10h 44m 50s、赤緯 21°31′18″ であった。

# 5.3 測光

フィルターをつけずに観測すると、それぞれの観測者 が使う CCD カメラの分光感度特性の違いにより取得し たデータから得られる等級に差が生じてしまうが、異な る観測装置で得られたデータとの比較を行うために、特 定の波長範囲しか通さないバンドフィルターをつけて天 体の観測を行うのが通常である。また、フィルターをつ けて観測することで星のスペクトルの形を知ることがで きる。このときよく使われるフィルターは中心波長 U=350nm, B=440nm, V=550nm, R=650nm, I=800nm O ものである。しかしフィルターをつけて観測すると、つ けないときに比べ限界等級が明るくなってしまう。とこ ろがすぐに暗くなってしまう GRB 残光観測では、でき るだけ多くの GRB 残光をとらえるために可能な限り限 界等級を暗くしておくことが望ましい。そのため RIMOTS ではフィルターをつけないノンフィルター観測 を行い, Henden 氏によって求められた変換式<sup>17</sup>を用いて, R バンド等級に変換することにより、他の観測者のデー タと比較できるようにした。

図 5.3.1 は RIMOTS で取得した GRB030329 付近の画像 である。測光には米国 NOAO のグループによって開発さ れた IRAF(Image Reduction and Analysis Facility)<sup>18)</sup>を用い た。この画像の大きさは約 14.5'×14.5'で,(a)は 14:45:59UT,(b)は 15:44:22UT,(c)は 18:08:27UT の画像 であり,丸で示された領域の中心部分に写っているのが GRB030329 の可視光残光である。それぞれの画像におい て矢印で示した 2 つの星と GRB030329 可視光残光を見 ると,(a)では矢印で示した星よりも GRB 可視光残光の ほうが明るく写っており,(b)では矢印で示した星と GRB 可視光残光とはほぼ同じくらいの明るさ,(c)では矢印で 示した星よりも GRB 可視光残光は暗く写っていること が分かる。つまり,時間の経過とともに GRB 可視光残 光は暗くなっていることが分かる。

図 5.3.1 RIMOTS により取得した画像



(a) 14:45:59UT



(c)

図 5.3.2 は、RIMOTS で得られた R バンド等級と GCN で報告されている GRB030329 の R バンド等級をプロッ トしたライトカーブである。横軸は GRB030329 が発生 した時刻を0時とし、時刻を日単位に換算し対数目盛で 表したもの、縦軸はRバンド等級を表す。 〇プロットは RIMOTS で取得した画像を解析したもの、 ◇プロットは GCN circ. 2080<sup>19)</sup>,  $\times \mathcal{T}^{\Box} \mathcal{V} \vdash t$  GCN circ. 2091<sup>20)</sup>,  $\Box \mathcal{T}$ ロットは GCN circ. 2064<sup>21)</sup>により報告されたものである。 直線は RIMOTS で得られたデータに最もよく合うべき 関数であり、べき指数は  $1.0\pm0.1$  である。この時の  $\chi^2$ は0.176,自由度は41である。図 5.3.2より、我々の観測 結果は他の観測所の結果と誤差範囲内で一致しているこ とが分かる。

図 5.3.3 は図 5.3.2 から RIMOTS のデータのみを取り出 したものである。非常に微妙な変化であるが、バースト 発生後 0.16 日から 0.20 日にかけて, それまでよりも減光 がゆるやかになっている。我々と同じノンフィルター観 測を行った京都大学のライトカーブでも、バースト発生 後0.163日から0.227日にかけて、それまでよりも減光が ゆるやかになっている<sup>10</sup>。しかし, R バンドフィルター をつけて観測した木曽観測所のライトカーブにはこのよ うな一部分だけのゆるやかな減光はみられない<sup>11)</sup>。 RIMOTS におけるライトカーブが同じノンフィルター観 測を行った京都大学と同様の結果が得られたことで、一 部分のゆるやかな減光はノンフィルター観測することで 見つけることができたものだと考えられる。





#### 6. 議論とまとめ

RIMOTS システムを用いて、バーストが発生してから 163 分後の 14:19:32(UT)から 18:17:59(UT)までの GRB030329 可視光残光を観測することに成功した。

図 5.3.2 に示された RIMOTS による観測データに注目 すると、残光は指数が1.0±0.1の単一のべき指数で減光 しているが,我々が観測できる時刻以降のデータ<sup>20)21)</sup>を みると、バースト発生後0.58日あたりから急速に減光し ている折れ曲がりがあることから,バースト発生後1日 間のライトカーブは一つの関数では表現できないことが 分かる。これまでに観測されている GRB はほとんどが 時間に対して一つのべき関数で表現できる減光をしてお り、またそのメカニズムはバースト発生源から光速に近 い速度で噴出したジェットが,星間ガスと衝突しながら その膨張速度を次第におとしていくというモデルが広く 受け入れられている<sup>3</sup>。GRB030329残光の場合は,折れ 曲がりがあるものの,その前後ではべき関数型で減光し ているので,この部分についてはいままでのモデルにあ てはまると言える。その折れ曲がりの原因は,バースト 源から光速に近い速度で噴出したジェット状のシェル放 出の時間間隔が大きくなったこと,またはシェルそのも ののエネルギーが低くなったこと,星間ガスに密度の揺 らぎがあることなどが考えられている<sup>20</sup>が,ジェットが 連続的に放出されているのか,単発的なジェット状のシ ェルが繰り返し放出されているのかはまだ解明されてい ない。GRB030329の可視光残光は,バースト発生後1日 間を通してみるとこれまでのモデルだけでは表現できな い複雑な動きをしている。

バースト源についても依然明らかになっておらず大質 量星の崩壊や中性子星の合体,ブラックホールなどが考 えられている<sup>20)</sup>が,GRB030329では分光観測を行った観 測所の結果より,残光現象から極超新星の成分が現れた という報告がなされ<sup>23)</sup>,バースト源は極超新星と密接に 関連していると言われている。

我々のノンフィルター観測では、図 5.3.3 に見られるよ うに減光がゆるやかになっている部分が存在するが、こ れは R バンドでの観測ではみられない。これは約 580nm ~850nm の R 波長域以外の成分,おそらく R 波長域より も短い U,B,V の波長域の放射を強くする現象が起こった ことでノンフィルター観測では明るく写り、減光がゆる やかになったものと考えられる。一部分のゆるやかな減 光の現象として上記に述べたモデルより、先にジェット 状に噴出されたシェルが後から噴出されたジェットに追 いつかれて合体することや星間ガスに密度のゆらぎがあ ることが考えられるが、その場合はこれまでの観測結果 から R バンドフィルターをつけた観測にも同じ影響が出 ると考える。この原因を調べるには同じ時間に同じ光を 分光させてその成分を観測する分光観測を行うことで、 解決の手がかりをつかめるものと考えられる。

# 参考文献

- D. Q. Lamb et al., AIP conference Proc. vol.522. p.265, 2000
- 2) D. W. Fow et al., Nature vol.422 p.284, 2003
- 3) A. J. Castro-Tirado et al., Science Vol.2069, 1999
- 4) 茶谷道夫, 宮崎大学大学院博士前期課程工学研究科 物質工学専攻修士論文, 2002
- 5) Meade LX200 ユーザーズマニュアル, Meade Instruments Corporation
- SBIG ST7 8(E) / 9E イメージングオートガイダーハ ードウエア取扱説明書,株式会社マゼラン天文機器 事業部国際光機
- 7) P.A.Price and B.A.Peterson, GCN circ. No.1987, 2003
- 8) E S. Rykoff and D. A. Smith, GCN circ. No.1995, 2003
- 9) K.Torii, GCN circ. No.1986, 2003
- N. Kawai, http://www.hp.phys.titech.ac.jp/nkawai/ 030329/index\_e.html, 2003
- 11) 浦田裕次,日本天文学会秋季年会予稿集 p.73 H40b, 2003
- 12) M. Uemura et al., Nature Vol.423 no.6942 p.843, 2003
- 13) ぐんま天文台, http://www.astron.pref.gunma.jp/news/ 030329grb.html
- 14) 西原英治 et al., 日本天文学会秋季年会予稿集 p.73 H41b, 2003
- 15) 美星天文台, http://www.town.bisei.okayama.jp/bao/ astro/grb/grb030329/, 2003
- 16) 吉田誠一, 早稲田大学大学院理工学研究科情報科学 専攻修士論文, 1999
- 17) A. A. Henden, JAAVSO Vol.29 p.35, 2000
- 18) IRAF, http://iraf.noao.edu/iraf-homepage.html
- 19) R. Sato et al., GCN circ. 2080, 2003
- 20) V. Lipunov et al., GCN circ. No.2091, 2003
- 21) W. Li et al., GCN circ. No.2064, 2003
- 22) J. S. Bloom et al., Ap.J. Vol.518 p.1, 1999
- 23) T. Matheson et al., GCN circ. No.2120, 2003