

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05018

研究課題名(和文) 突発変動天体でさぐる初期宇宙

研究課題名(英文) Probing the Early Universe with Transient Objects

研究代表者

戸谷 友則 (Totani, Tomonori)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：90321588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：高速電波バーストについては、連星中性子星合体から高速電波バーストが発生しうるかどうかを理論的に検討した。一般相対論的連星合体シミュレーションのデータを用いて、高速回転が始まってから数ミリ秒ほど経過してから物質が飛ばされることがわかり、この時間窓の中で高速電波バーストが生じうることを示した。一方、繰り返すFRB121102の発見を受けて、こうしたリピーターバーストの起源について、連星中性子星合体の後に残った中性子星が考えられることを提唱した。観測研究では、すばる望遠鏡で追観測を行った FRB 150418 について母銀河候補を発見し、大きな注目を得た。

研究成果の概要(英文)：We theoretically examined the possibility that fast radio bursts (FRBs) are produced by binary neutron star mergers. Using a numerical merger simulation, we found that ejecta is expelled a few ms after the merger, and there is a time window for a FRB radio signal to escape to an observer. On the other hand, following the discovery of a repeating FRB 121102, we proposed a scenario that a long-lived surviving neutron star after the merger becomes such a repeater FRB. As observational studies, we performed follow-up observations using Subaru Telescope for some FRBs. We found a host galaxy candidate for FRB 150418, and set the deepest optical upper limit of possible optical afterglow to FRB 151230.

研究分野：天文学

キーワード：高速電波バースト ガンマ線バースト 連星中性子星

1. 研究開始当初の背景

高速電波バースト(Fast Radio Burst, FRB)という全く新しいタイプの突発変動天体が見つかった(Thornton et al. 2013, Sci. 341, 53)。高銀緯のパルサーサーベイで見つかった、継続時間がわずかに数ミリ秒というものである。現在の所、同じ場所で繰り返し起きる事例や、電波以外の波長での対応天体は見つかっていない。興味深いのは、パルサー同様、dispersion measure (DM)が測定されていて、その値が銀河系内の天体としてはあり得ないほど大きいことである。現在の所、唯一のもっともらしい説明は、これら FRB が宇宙論的距離($z \sim 0.5-1$)にあり、視線上の電離した銀河間物質によって大きな DM が観測される、というものである。すでにいくつかの理論的仮説が提唱されている(マグネターの巨大フレア、超新星から遅延した中性子星の重力崩壊、連星中性子星合体、連星白色矮星合体など)が、未だ観測的な制限がほとんど無い状態である。

その起源天体が何であれ、FRB が本当に宇宙論的距離にあることが確定すれば、GRB 同様に宇宙論的な研究が可能となる。まず、 z と DM の定量的関係から、DM が銀河間の電離ガスによるものと証明されれば、宇宙のバリオンの大半は(未だ観測されていない)銀河間の電離ガスとして存在していることの証明となり、いわゆる「ミッシングバリオン問題」の解明につながる。また、将来的に SKA など再電離期に達するような高赤方偏移 FRB が見つければ、その DM の詳細観測から、再電離について情報が得られる可能性がある。偏光が観測されれば、ファラデー回転から銀河間磁場の情報も得られるかもしれない。

申請者は、この発見を受けていち早く、FRB は連星中性子星の合体であるという説を提唱した(Totani 2013, PASJ 65, L12)。数ミリ秒という短い継続時間を最も自然に説明できるシナリオで、パルサーと同様の放射機構で FRB の電波強度も無理なく説明でき、発生頻度も矛盾しないことを示した。

一方、GRB が宇宙論的遠距離で起きることが確定し、その宇宙論や初期宇宙・銀河形成研究への応用が認識され始めてすでに 17 年の歳月が流れた。long-duration と short-duration の二種族のうち、前者は超大質量星の重力崩壊と超新星爆発に関連した現象であることが確立した。GRB の最遠方記録も徐々に、しかし確実に伸びており、2005 年には初めて赤方偏移 $z=6$ を越える GRB 050904 が発生し、すばる望遠鏡の活躍で赤方偏移が測定された。さらに 2009 年には、クエーサーや銀河の記録を凌駕する $z=8.3$ の GRB 090423 が発見され、GRB は一躍、人類にとっての最遠方天体の地位を獲得した。

宇宙のバリオンの大半は銀河間空間にあ

り、 $z=5-6$ ぐらいまでにはほぼ完全に電離されたと考えられている。その電離源の有力候補は初期の星形成銀河からの紫外線であり、従って再電離の時期やプロセスを観測的に明らかにすることは、宇宙史の解明のために極めて重要であり、最遠方宇宙研究の重要課題として認識されている。GRB はベキ型の単純な可視赤外スペクトルに銀河間中性水素による吸収の減衰翼プロファイルが見える可能性があり、それを通じて中性度を高い精度で測定できる可能性がある。これは銀河やクエーサーなど他の天体にはない強みであり、GRB を再電離探査の有力手段の一つにしている。

2. 研究の目的

本研究では、この魅力的な FRB の起源解明に様々なアプローチで迫ることを目的とする。

GRB による初期宇宙探索は一定の成果をあげているが、 $z>6$ の GRB はまだ少数なのが問題である。TMT などが登場すれば検出頻度の大幅向上が期待されるが、それまでは、既存装置での追観測態勢の継続が重要である。本研究では、今後のすばる望遠鏡での GRB 追観測で得られたデータの理論解析を担当し、初期 GRB の性質や再電離への制限などについて迅速な論文化と成果の公表を行っていくことを目的とする。

3. 研究の方法

FRB の起源解明を目指す研究の主な方法は、すばる望遠鏡による追観測である。現在、最も数多くの FRB を検出しているのはオーストラリアのパークス電波天文台のグループ(SUPERB team)である。申請者は、自身が日本側代表となり、この SUPERB チームと連携するすばる望遠鏡追観測チームを立ち上げ、SUPERB チームから FRB 検出時の座標などの情報をリアルタイムで提供してもらう共同観測態勢を構築した。FRB の典型的な位置決定精度は数十分角であり、この広さを一度にカバーできるのは 8m クラスではすばる望遠鏡のみである。この強みを生かし、すばる望遠鏡によって FRB の初その他波長対応天体の検出や、さらには赤方偏移の確定に挑む。

4. 研究成果

すばる望遠鏡による高速電波バーストの追観測プログラムを本格的に開始した。2015年4月に発生した高速電波バーストに対して早速、すばる望遠鏡による追観測を実施した。この高速電波バーストに電波残光が発見され、すばる望遠鏡の可視光画像データが母銀河を同定する上で重要な役割を果たした。さらに、すばる望遠鏡でこの母銀河を分光観測し、赤方偏移 $z=0.49$ と決定した。母銀河は楕円銀河であり、星形成を行っていない銀河であった。この銀河が FRB とは無関

系の活動銀河ではないかという主張もあり、議論が続いているが、FRB の多波長フォローアップ観測研究の先駆けとなった。

高速電波バーストについてはさらに、連星中性子星合体から高速電波バーストが発生しうるかどうかを理論的に検討した。特に、合体時に物質がまき散らされることで電波が吸収されてしまうのではという問題を調べるために、一般相対論的連星合体シミュレーションのデータを用いて、合体後の大質量中性子星が高速で回転を始める時刻と、物質がまき散らされ始める時刻の比較を行った。その結果、高速回転が始まってから数ミリ秒ほど経過してから物質が飛ばされることがわかり、この時間窓の中で高速電波バーストが生じうることを示した。一方、物質がまき散らされた後は電波が出てこられないため、数ミリ秒で終わって繰り返しが無いという高速電波バーストの性質をうまく説明することもできる。

一方、繰り返す FRB121102 の発見を受けて、こうしたリピーターバーストの起源について理論的研究を行った。連星中性子星合体の後で、総質量が比較的軽い場合は、合体後の中性子星が長く生き残る可能性が考えられている。そうした中性子星は、まき散らされた物質が拡散で消え去った 10 年程度の後に、極めて若く高速回転する特異な中性子星となる。そのシナリオで様々な観測量を見積もり、FRB 121102 と矛盾が無いことを示した。

その後の観測研究では、すばる望遠鏡で追観測を行った FRB 151230 について、視野内にあった可視変動天体を詳細に吟味し、FRB との関連が疑われる天体があるかどうかを調べた。その結果、Rapid Transient と呼ばれる天体が FRB と関連しているかもしれないという示唆を得た。まだ今後の検証が必要であるが、興味深い結果である。

ガンマ線バーストに関しては、赤方偏移 $z=5.913$ で極めて明るく、宇宙再電離を調べる上で理想的なケースとなった GRB 130609A について、宇宙再電離に関する解析結果がすばる望遠鏡とヨーロッパの VLT との間で食い違っている状態であったが、お互いのデータを交換して吟味した結果、我々すばるチームの結果は VLT のデータでも再現されること、食い違いの原因は VLT チームの解析に系統誤差が大きい部分があるため、ということが判明した。この結果は論文として公表した。また、この内容について中国とイタリアの研究会で招待講演を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)(全て査読あり)

1. The SURvey for Pulsars and

Extragalactic Radio Bursts - II. New FRB discoveries and their follow-up
Bhandari, S. et al. (Totani, T. 175 人中 45 番目)

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 475, Issue 2, p.1427-1446 (2018)

2. Repeating and non-repeating fast radio bursts from binary neutron star mergers
Yamasaki, Shotaro; Totani, Tomonori; Kiuchi, Kenta
PASJ in press (2018)

3. The host galaxy of a fast radio burst
Keane, E. F. et al. (T. Totani, 41 人中 18 番目)
Nature, Volume 530, Issue 7591, pp. 453-456 (2016)

4. High Precision Analyses of Lyman alpha Damping Wing of Gamma-Ray Bursts in the Reionization Era: On the Controversial Results from GRB 130606A at $z = 5.91$

Tomonori Totani, Kentaro Aoki, Takashi Hattori, Nobuyuki Kawai

Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 1, id.158 pp (2016)

5. A blind search for prompt gamma-ray counterparts of fast radio bursts with Fermi-LAT data

Yamasaki, Shotaro; Totani, Tomonori; Kawanaka, Norita

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 460, Issue 3, p.2875-2880 (2016)

6. Optical and radio astrometry of the galaxy associated with FRB 150418

Bassa, C. G.; Beswick, R.; Tingay, S. J.; Keane, E. F.; Bhandari, S.; Johnston, S.; Totani, T (7/13).; Tominaga, N.; Yasuda, N.; Stappers, B. W.; Barr, E. D.; Kramer, M.; Possenti, A.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 463, Issue 1, p.L36-L40 (2016)

7. GRBs as Probes of the IGM

Cucchiara, Antonino, Totani, Tomonori; Tanvir, Nial

Space Science Reviews, Volume 202, Issue 1-4, pp. 143-158 (2016)

[学会発表](計 8 件)

1. Difficulties for Star-Forming Galaxies

as the Sources of the IceCube Neutrinos
Tomonori Totani

29th International Texas Symposium on
Relativistic Astrophysics, Cape Town,
South Africa, 2017/12/3-8

2. Repeating and Non-Repeating Fast Radio
Bursts from Binary Neutron Star Mergers
Tomonori Totani

29th International Texas Symposium on
Relativistic Astrophysics, Cape Town,
South Africa, 2017/12/3-8

3. Recent Topics about Fast Radio Bursts
Tomonori Totani

Invited talk given at RIKEN-RESCEU Joint
Seminar, Jul. 25-26, 2016, RESCEU, Tokyo,
Japan

4. Fast Radio Bursts
Tomonori Totani

Invited talk given at "The extreme
Universe viewed in very-high-energy gamma
rays 2016", Dec. 15-16, Kashiwa, Chiba,
Japan

5. Gamma-ray bursts as a reionization
probe
Tomonori Totani

Invited talk at "ISSI-BJ workshop on
Gamma-Ray Bursts", April 13-17, 2015
Beijing, China

6. Gamma-ray bursts as a reionization
probe
Tomonori Totani

Invited talk at Fourteenth Marcel
Grossmann Meeting, July 12-18, 2015, Rome,
Italy

7. Fast Radio Burst from Binary Neutron
Star Mergers
Tomonori Totani

Invited talk at Fourteenth Marcel
Grossmann Meeting, July 12-18, 2015, Rome,
Italy

8. Gamma-ray bursts as a Reionization
Probe
Tomonori Totani

Invited talk given at "RIKEN GRB workshop
2015", Aug. 31- Sep. 1, 2015, Wako,
Saitama, Japan

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

戸谷 友則 (TOTANI, Tomonori)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：90321588

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし

(4) 研究協力者
なし