

# 高速電波バースト (Fast Radio Bursts) の 起源を明らかに —台湾 BURSTT の紹介



後藤



橋本



正岡

後藤 友嗣<sup>1</sup>・橋本 哲也<sup>2</sup>・正岡 滉翔<sup>3,4</sup>

〈<sup>1</sup> 台湾国立清華大学天文研究所 〒30013 台湾新竹市東區光復路二段 101 號〉

〈<sup>2</sup> 台湾国立中興大學物理學系 〒40227 台湾台中市南區興大路 145 號〉

〈<sup>3</sup> 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈<sup>4</sup> 国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢星ガ丘町 2-12〉

e-mail: <sup>1</sup>tomo@gapp.nthu.edu.tw, <sup>2</sup>tetsuya@phys.nchu.edu.tw, <sup>3</sup>hmasaoka@ecc.u-tokyo.ac.jp

わずか数ミリ秒の間に巨大なエネルギーを放出する高速電波バースト (Fast Radio Burst: FRB) は毎日何千回も起こっているにもかかわらず、いまだにその物理起源は解明されないままとなっている。研究が進まない主な原因は (1) 位置決定精度が足りず母銀河を同定できないこと, (2) リピーターと単発型を区別するのが難しいこと, 及び, (3) 多波長観測の難しさ, にあった。この3つの問題を同時に解決するための新しい電波干渉計 Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) の建設が台湾と日本を含む共同チームで進められている。本稿では, FRBの研究に飛躍的進歩をもたらすと期待されている BURSTT について解説したい。

## 高速電波バースト (FRB) とは？

2013年に発表された Thornton et al. [1] の論文は衝撃的であった。ミリ秒という非常に短い時間スケールで観測を行うと、宇宙空間で突如として強力な電波バースト [2] が多数発生していることが明らかになったのである。その数は、毎日何千個にも及ぶと推定された。しかも、その起源は不明。新しい研究分野の誕生を予期させる論文であった。

これらの電波バーストは高速電波バースト (Fast Radio Burst: 以降FRB) [2] と呼ばれ (図1), わずか数ミリ秒の間に巨大なエネルギーを持った電波パルスが空の上で突然現れる天体現象であ

る。その短い間で放出されるエネルギーは典型的には太陽が3日間で放出する量に匹敵し [3], 最も明るいものでは太陽の30年分にもおよぶ [4]。非常に短い時間に巨大なエネルギーが放射されるため、いわゆる輝度温度 (電波の明るさを黒体放射を仮定した時の温度として近似的に表したもの) は  $10^{30}$  K よりも高い [3]。しかし、熱的な放射 (黒体放射) の場合、コンプトン散乱により  $10^{12}$  K を超えると電子が光子と相互作用してエネルギーを奪われ、放射が抑制される (コンプトン抑制)。したがって、これほど高い輝度温度を実現するためには非熱的な放射かつ、電波の位相 (電波の山谷) がそろっていなければならない。これは例えばレーザー光のような放射でコヒーレント放射

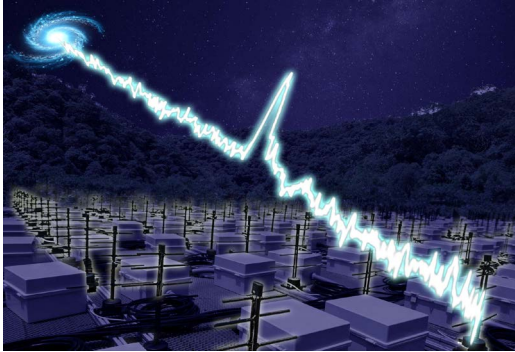


図1 FRBをBURSTTで観測するイメージ図。FRBは毎日数千回も発生しているがその物理起源は未だ解明されていない (credit: Tomo Goto)。

と呼ばれる特殊な放射メカニズムが関係していると考えられている [3]。

観測的にFRBには2つのタイプが存在することが知られている。1つは一度だけバーストが起こる「単発型」で、もう1つは空の同じ場所から何度も繰り返しバーストが来る「リピート型」である [3]。これら2つのタイプが異なる起源を意味するのか、あるいは同じ起源天体から見掛け上このような違いが現れるだけなのかはいまだ決着のつかない問題として議論されている [3]。いずれにしてもその物理起源はいまだ解明されておらず、これを解明することは天文学の最重要課題の1つとなっている。

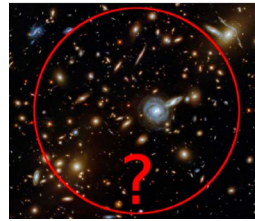
## これまでの研究の弱点

従来のFRB観測には以下に述べる3つの問題点があり、物理起源の解明が進まない原因となっている。

### 弱点1. 不十分な位置決定精度

先行研究 [5] ではFRBが発見されても位置決定精度が不十分で、追観測を含めたその先の研究に進めないことが最大の問題点であった。一例を挙げると、今日までに最大数のFRBを検出したのはカナダのCHIME望遠鏡であるが、その位置決定精度は30分角程度しかなく、母銀河を特定す

### 従来の観測



### BURSTT

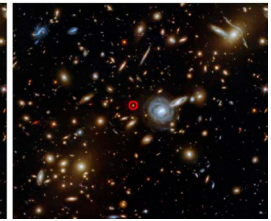


図2 FRBの位置決定精度の概念図。(左)以前の望遠鏡は位置決定精度が30分角程度(大円)と悪く、どの銀河が発生源が特定することが難しかった。(右)台湾のBURSTTでは、位置決定精度は1秒角以下(小円)に向上し、母銀河を確実に特定できる。これは、起源天体の理解に画期的な進歩をもたらす。

るには不十分であった (図2, The CHIME/FRB Collaboration 2021 [5])。FRBのうち、リピート型については後ほど大型の電波望遠鏡で追観測を行い位置を決定することが可能であるが [6]、FRBのうち観測されるリピート型は数パーセントのみであり [5]、大多数の単発型のバーストについては位置決定ができないままとなっていた。位置が決定できなければ、FRBがどの天体から来たのかかわらず、その正体を突き止めることができない。この問題を解決するため、FRBを検出すると同時にその位置を特定することのできる観測装置が待ち望まれていた。

### 弱点2. 狭い望遠鏡視野

FRBの多くは銀河系外宇宙から来ていることが知られており [1]、空の上では一様に起こっていることがわかっている [7]。つまりFRBを検出するためには空の上でいつどこから来るかわからないものを、たった数ミリ秒のタイミングで見つけなければならないことになる。CHIME望遠鏡は約200平方度という視野をもって多数のFRBを検出してきたが [5]、それでもこの視野は北天全体のたったの1%にしかすぎない。この1%視野の外で起こったFRBについては検出することができない (図3)。つまり、相当数のFRBが観測されないまま見逃されてきたことになる。

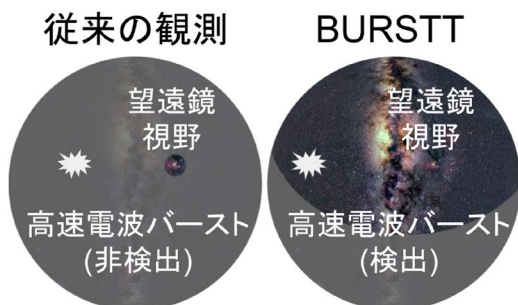


図3 FRB観測における望遠鏡の視野の概念図。(左)従来の望遠鏡の視野は狭く、その外側(灰色)で起こったバーストを検出できない。(右)BURSTTは従来の望遠鏡よりも遥かに大きな視野を持ち、基本的には北半球の空のどこで起こっても検出することができる。

この問題は単に多数のFRBを見逃しているというだけではなく、その起源を明らかにするうえで非常に重大な問題となっている。というのも先に述べた単発型のFRBが本当に単発だったのか、あるいはリピート型のバーストのうち、偶然望遠鏡の観測期間に視野内に入っていた1つのバーストだけしか検出できなかったのか判別できないからである。つまり、現在の狭い視野による限られた観測では単発型とリピート型を正しく切り分けることができない。この問題を解決するには、天空の大きな領域を一度にカバーし、モニター観測をすることができる非常に広い視野を持った観測装置が必要である。

### 弱点3. 多波長観測／マルチメッセンジャーとのミスマッチ

FRBの理論的研究は非常に盛んで、これまでに50以上もの理論モデルが提案されている[8]。生き残っているモデルはそのどれもが基本的にはFRBの特徴である「ミリ秒で起こる高エネルギーなコヒーレント電波放射」を説明することができる。そのため、電波観測だけからFRBの理論モデルを強く制限することが困難な状況になっている。

この状況を打開することができると期待されるのが多波長観測である。理論モデル、特に放射メ

カニズムの違いは電波以外に現れると期待されている[9]。代表的なモデルとして、パルサー型磁気圏モデルやガンマ線バースト型モデルなどが提案されている[10]。パルサー型磁気圏モデルの一例として、起源天体(マグネター等)の磁気圏において相対論的速度で運動する粒子からの放射によってFRBが起こると提案されている[10]。ガンマ線バースト型モデルでは起源天体の爆発現象の際に放出されるアウトフローがその外側を取り囲むガスと相互作用し、相対論的な衝撃波が形成され、そこでFRBが発生すると考えられている[10]。一般にガンマ線バースト型モデルの方が(他波長を含めた)エネルギー総量が高いため、パルサー型磁気圏モデルよりも明るいガンマ線／X線／可視光対応天体が期待されている(ただし、逆コンプトン散乱の有無によってはパルサー型磁気圏モデルの方が明るい可視光放射がみられる可能性もある)[10]。

これらに加えて、FRBの起源天体の一つとして連星中性子星合体が候補として挙げられている[11]。この場合はFRBと同時に重力波や可視光でのキロノヴァが発見されることが期待されている。

このように、多波長観測とマルチメッセンジャー観測はFRBの放射メカニズムとその正体を突き止める上で非常に重要である。しかしながら、FRBと同時に起こった他波長でのイベントが明確に検出されたのは銀河系内のマグネター[12,13]の例のみである[14-16](執筆時点2025年2月)。その理由として、これまでに検出されているFRBの多くが遠方宇宙(典型的に約50億光年の距離[5])で発見されていることが挙げられる(図4)。

例えば重力波のうち、電磁波の期待される中性子星合体の検出は現在はまだ近宇宙に限られており(<6億光年)[17]、このような重力波検出を遠方宇宙に拡張することは容易ではない。ガンマ線、X線の望遠鏡にも感度に限界があることは同じである。このため、FRBのマルチメッセンジャー観

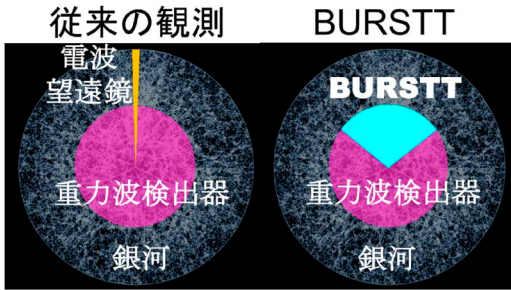


図4 FRBと重力波の観測領域の概念図。中心の観測者から見た時の宇宙の領域と銀河の分布（多数の白点）を示す。（左）従来の電波望遠鏡による観測（狭い三角形）は主に遠方宇宙を見ており、近傍をくまなく探す重力波の観測（球）との間で重なる部分がほとんどない。（右）BURSTT（扇状の領域）は重力波の観測する領域と重なる部分が遥かに大きい。

測を可能にするためには、まず近傍宇宙でFRBを見つける必要がある。

## BURSTT新望遠鏡計画

これら3つの弱点を同時に克服し、FRB研究にブレイクスルーをもたらすと期待されているのが台湾で建設中のBustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT)である[18]。

0. BURSTTを可能にした1つのアイデアは図5に示すような小型のアンテナを多数設置することにより非常に安価に電波干渉計を実現することである。このような小型の電波アンテナはネット通販でも購入できるような汎用で安価なものであり、従来のパラボラアンテナを用いた電波望遠鏡に比べて大幅なコストダウンを実現した。この工夫により台湾の限られた研究予算の中でも欧米の巨大望遠鏡にも匹敵する性能を引き出すことが可能になった。

1. BURSTTではこのような小型アンテナを多数備えたステーションを図6のように台湾国内数ヵ所に設置することにより、数百キロの基線長を確保し、1秒角以下の位置決定精度を実現する。1秒角以下の位置決定精度があれば、検出される

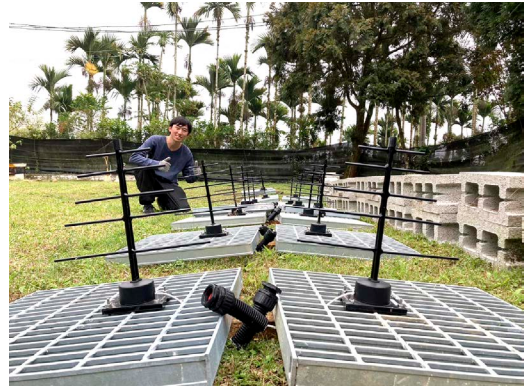


図5 台湾南投サブステーションのアンテナ群の一部（写真は設置作業中のもの）。



図6 台湾国内のBURSTTサブステーション。福山（256台）、南投、綠島（それぞれ64台）のアンテナはすでに設置済み。

ほぼ全てのFRBに対して位置を特定し、バーストの起こった銀河（母銀河）を同定することができる。母銀河が同定されればFRBの研究は飛躍的に進むことが期待される。

2. BURSTT望遠鏡は100度もの視野角を持っており、この視野角内で起こった検出感度以上のFRBはすべて検出することができる。これだけの広視野でモニター観測ができれば、ほぼ全てのリピート型を同定できるはずである。これまで曖昧であったリピート型と単発型がはっきりと区別できるようになり、物理的起源もそれぞれクリアに同定できるようになると期待される。単発型のほぼ100%が連続的に観測すればリピート型であるという説も提唱されており[19]、BURSTTによる

検証が待たれる。

3. 広い視野をモニター観測することで、近傍で発生する明るいバーストを検出することができる。明るいバーストは、他の波長や重力波でも明るいため、多波長観測が飛躍的に進み、前述の理論モデルに対する制約が得られると期待される。カナダのCHIME望遠鏡で検出されているFRBは典型的に約50億光年の距離から来ている [5]。BURSTTはその約1/10の距離から来るFRBを多く検出することができる [18]。これは重力波においては約10倍強い信号、多波長観測においては約100倍明るいイベントに対応し、これまでよりも遥かに容易にFRBを観測できるようになると期待される。

これら3つの利点から、BURSTT望遠鏡はFRB研究を飛躍的に前進させると期待されている。

## BURSTTの建設状況

執筆時点（2025年2月）において、台湾福山のBURSTTのメインステーションには256台、南投と緑島のサブステーションにそれぞれ64台のアンテナが設置され、観測を始めている。これまでにフリンジ観測とパルサーの検出に成功し、FRBの初検出がすぐにも期待される状況である。今後、アンテナの数を徐々に増やしていくことが計画されており、最終的には約2000台までアンテナを増やす予定である。

## BURSTTの海外拡張計画

BURSTTはまさに稼働し始めたところでいささか気の早い話ではあるが、すでにBURSTT望遠鏡の海外への拡張計画も動き始めている。台湾国内では基線長はせいぜい数百kmに限られるが、海外にサブステーションを設置すれば一気に数千kmまで拡張することができ、0.1秒角以下の解像度を実現することができる。これだけの解像度があれば、母銀河を特定するだけでなく、母銀河の中のどこでFRBが起こったのかまで特定するこ



図7 BURSTT小笠原サブステーションのアンテナ群（手前）。台湾のBURSTTメインステーションと干渉計として使用すれば、その基線長は2000kmとなり、FRBの位置決定精度は0.1秒角以下となる。

とができる。そうなれば物理起源の特定に一気に近づくはずである。BURSTTの特徴は安価なアンテナを多数設置することにより、低コストで干渉計を実現することにあるため、まさに海外に進出するのにうってつけである。

海外進出の初めての試みとして、小笠原のVERA観測所と共同で敷地内に16台のアンテナを設置させていただいた（図7）。小笠原は離島であるため携帯電話やテレビからの電波ノイズが少なく、BURSTTのサブステーションを設置するのに理想的な環境である。台湾からの基線長は約2000kmもあり、明るいFRBに対して0.1秒角の位置決定精度を実現できる予定である。すでに太陽のフリンジ検出に成功し、現在パルサーの観測データを解析中である。尽力いただいた共同研究者の国立天文台VERA観測所の本間所長、並びにVERA小笠原観測所の皆様には大変感謝している。なお、小笠原ステーションは近い将来、32台、64台とアンテナを増やす予定である。

小笠原を成功例として、海外サブステーションはインド、タイ、ハワイ等にも建設を模索している。東西方向のみの長基線だけではビームが歪んでしまうため、南北方向に基線を伸ばすことも重要だ。日本の皆様にも、サブステーション建設に

協力いただける方がおられたらぜひご連絡をいただきたい。

## 建設における苦労話

筆者らの研究はこれまでデータ解析をして論文を出版するというスタイルであったため、望遠鏡の建設に携わるのは初めての経験であった。自分で予算を取って、自分の望遠鏡を作るという作業に興味気味に参加したのはよかったが、実際に数十のアンテナを設置するのはなかなかの重労働であった。ほとんどの作業は、土台を作り、運搬してネジで固定して、ケーブルを繋げるという単純な作業であるが、台湾の炎天下の中で作業をしていると汗びっしょりで、意識もうろうとしてくる。限られたスケジュールの中、黙々と働いてくださった学生、ポスドクの方々には頭の上がらない思いである。

また小笠原でのアンテナ設置作業の際には、船が出航直前に故障し、東京で足止めになってしまった。その際に臨時滞在を受け入れてくださった国立天文台の廿日出さんには大変感謝している。

天文学で公開されている観測データは、どの望遠鏡のデータも建設者の汗と工夫に支えられたものだと実感すると、解析も丁寧に行わなければと身の引き締まる思いである。

## 将来への期待

2025年度はBURSTTは本格稼働を開始し、年間100個にもおよぶFRBを検出し、位置を特定する予定である。現在までに位置が特定されているFRBは全部合わせても100個[20–22]に満たないため、このサンプルはFRBの研究を大きく推進させることが期待される。そうなればアンテナを設置した苦労も報われる思いである。2025年がFRB研究の飛躍の年となるよう期待して、筆をおきたい。

## 謝 辞

BURSTTプロジェクトは卓越領航研究計画のサポートを受けております。PIのUe-Li Pen氏並びにBURSTTプロジェクトチームの皆様には感謝いたします。また、BURSTT小笠原サブステーションの建設をサポートしてくださった国立清华大学火種研究計画、建設に尽力して下さっている国立天文台VERA観測所長本間希樹様、VERA小笠原観測所の皆様、並びに中央研究院天文及天文物理研究所(ASIAA) Shih-Hao Wang様に深く感謝致します。また、原稿をチェックして下さった国立中興大学山崎翔太郎様、和田知己様に感謝致します。

## 参考文献

- [1] Thornton, D., et al., 2013, Science, 341, 53
- [2] Lorimer, D. R., et al., 2007, Science, 318, 777
- [3] Petroff, E., et al., 2019, A&AR, 27, 4
- [4] Ryder, S., et al., 2023, Science, 382, 294
- [5] The CHIME/FRB Collaboration, 2021, ApJS, 257, 59
- [6] Chatterjee, S., et al., 2017, Nature, 541, 58
- [7] Josephy, A., et al., 2021, ApJ, 923, 2
- [8] Platts, E., et al., 2019, Elsevier BV, 821, 1
- [9] Yang, Y.-P., et al., 2019, ApJ, 878, 2
- [10] Zhang, B., 2020, Nature, 587, 45
- [11] Totani, M., 2013, PASJ, 65, L12
- [12] 山崎翔太郎, 2019, 天文月報, 112, 375
- [13] The CHIME/FRB Collaboration, 2020, Nature, 587, 54
- [14] Bochenek, C., et al., 2020, Nature, 587, 59
- [15] Younes, G., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 408
- [16] Li, C., et al., 2021, Nat. Astron., 5, 378
- [17] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/archives/1650> (2022/05/15)
- [18] Lin, H.-H., et al., 2022, PASP, 134, 094106
- [19] Yamasaki, S., et al., 2024, MNRAS, 527, 4
- [20] Bhandari, S., et al., 2022, AJ, 163, 69
- [21] Law, C., et al., 2024, ApJ, 967, 29
- [22] <https://ecommons.cornell.edu/server/api/core/bitstreams/fee91717-9c94-458a-9a1a-9ef468563ed7/content> (2024/12/21)



## Unveiling the Origins of Fast Radio Bursts: An Introduction to Taiwan's BURSTT Tele- scope

Tomotsugu GOTO<sup>1</sup> Tetsuya HASHIMOTO<sup>2</sup> and  
Hiroto MASAOKA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Astronomy, National Tsing Hua University, No. 101, Section 2, Kuang-Fu Road, East District, Hsinchu City, Taiwan 30013*

<sup>2</sup>*Department of Physics, National Chung Hsing University, No. 145, Xingda Rd., South Dist., Taichung, 40227, Taiwan*

<sup>3</sup>*The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

<sup>4</sup>*Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12 Hoshigaoka, Mizusawa, Oshu, Iwate 023-0861, Japan*

**Abstract:** Fast Radio Bursts (FRBs) are millisecond-duration bursts of radio waves with unknown physical origins. The lack of progress in understanding FRBs is due to three main challenges: 1) insufficient localization precision to identify host galaxies, 2) difficulty in distinguishing between repeater and single-burst types, and 3) the challenge of multi-wavelength observation. The Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) is a new radio interferometer being developed by a team including Taiwan and Japan to address these three issues simultaneously. BURSTT utilizes a large number of small, inexpensive antennas to achieve high sensitivity and a wide field of view. This design enables sub-arcsec localization of FRBs, identification of host galaxies, and differentiation between repeater and single-burst types. Furthermore, the wide field of view increases the likelihood of detecting nearby, bright FRBs suitable for multi-wavelength follow-up observations. The BURSTT project has deployed antennas at several sites in Taiwan and is expanding internationally, with a station in Ogasawara, Japan. The telescope is expected to detect and localize hundreds of FRBs each year, significantly advancing the field and providing crucial data for understanding the physical mechanisms responsible for these enigmatic events.