

Tomo-e Gozen による高速電波バーストの 可視光対応天体探査の現状と展望

東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻 修士2年
間所 捺, 新納 悠, 小林 尚人

FRB現象の概要

- 高速電波バースト（FRB）：数ミリ秒の電波パルスを放出する、高エネルギー突発天体現象

2007年にLorimerらにより初検出

現在までに数千回検出されている

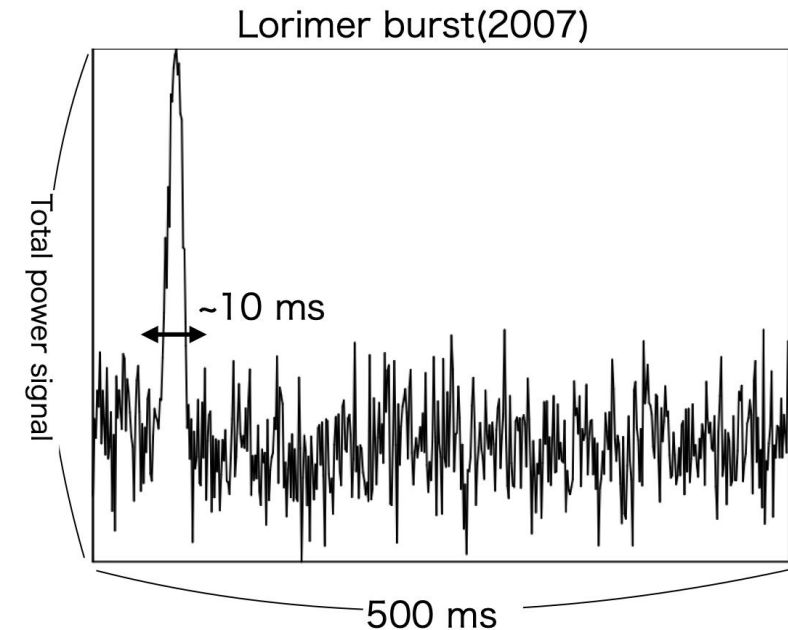
FRBを繰り返すものがあったり、エネルギーが違ったりと多様

主に銀河系外の現象（1例だけ銀河系内でもFRB-Likeな現象が発見されている）



© 2024 Souichi Takahashi

FRBのイメージ図



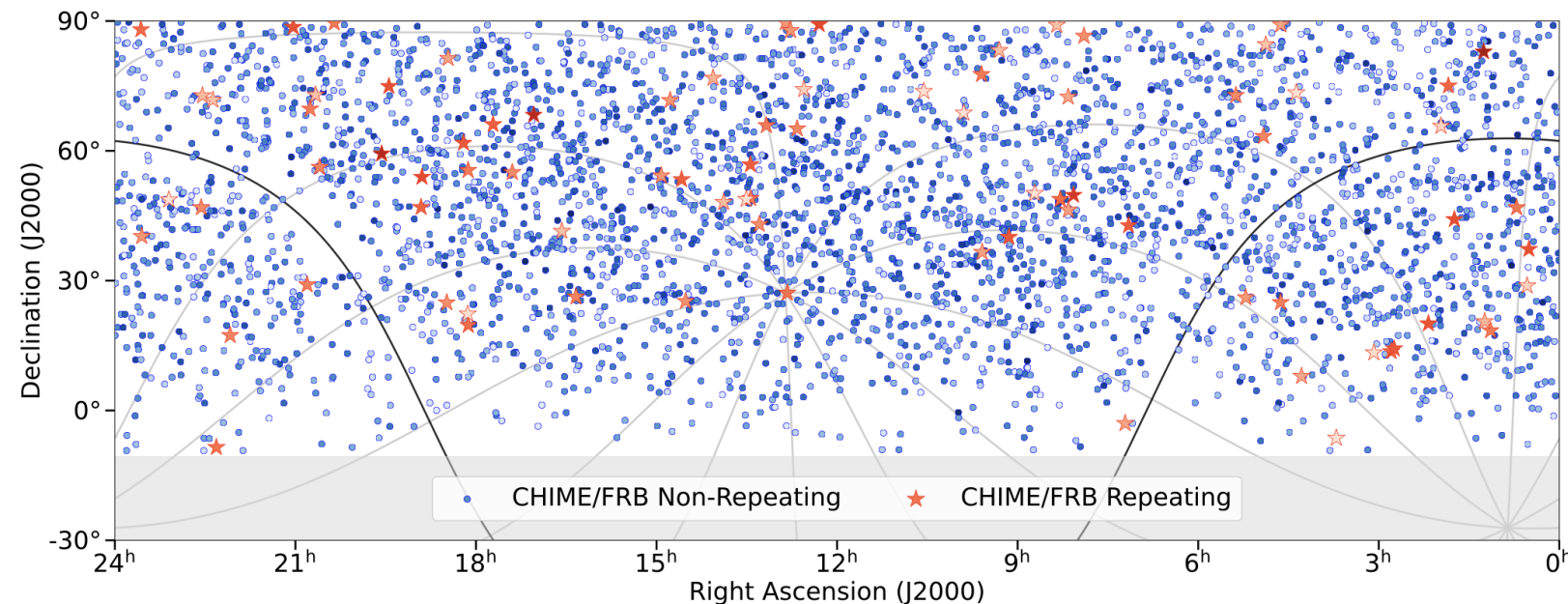
FRBを検出する電波望遠鏡

・電波望遠鏡CHIME (Outrigger)

現在最も頻繁にFRB電波を検出している電波望遠鏡（カナダ）

→現在までに見つかったFRBの95%以上がCHIMEによるもの

近年は電波干渉計の技術を使って位置決定精度を上げる**CHIME Outrigger**が始動



CHIMEが発見したFRBの座標分布

The CHIME/FRB Collaboration(2026)



CHIME電波望遠鏡

追観測の現状

• FRBの多波長追観測

FRB起源となる天体（=FRB対応天体）からは電波放射だけでなく多波長放射の存在が予想されている

しかし・・・

銀河系内(X線と電波成分が同時に検出された)を除き、**電波帯以外の放射は一切見つかっていない**

先行研究例：

Ye Li et al(2025)：普通のFRBに比べ数千倍の電波フラックスをもつFRB20250316を多波長観測した。
X線成分が発見されたと一時騒がれたが、結局FRBとは位置的に無関係であった
可視光でも追観測が行われたが天体検出に至らず。

起源がわからないからFRB現象の全体像がつかめない

なぜ多波長放射が検出できていないのか？

追観測の難しさ

- ・ FRBを観測するCHIME電波望遠鏡は位置決定精度が悪く（～数度）多くの望遠鏡では**追観測自体ができない**
- ・ 電波干渉計は精度が良いが視野が狭いためFRB検出数が少ない

その他原因：①FRB電波とそれ以外では地球到達までの時間に年単位の遅延がある？

②極めて暗いか、一瞬で光度が下がる？ 等

唯一X線が見つかった銀河系内FRB20200428Aについて

FRB以前から知られていたマグネターSGR 1935+2154由来の電波パルスとX線フレアが同時検出された。

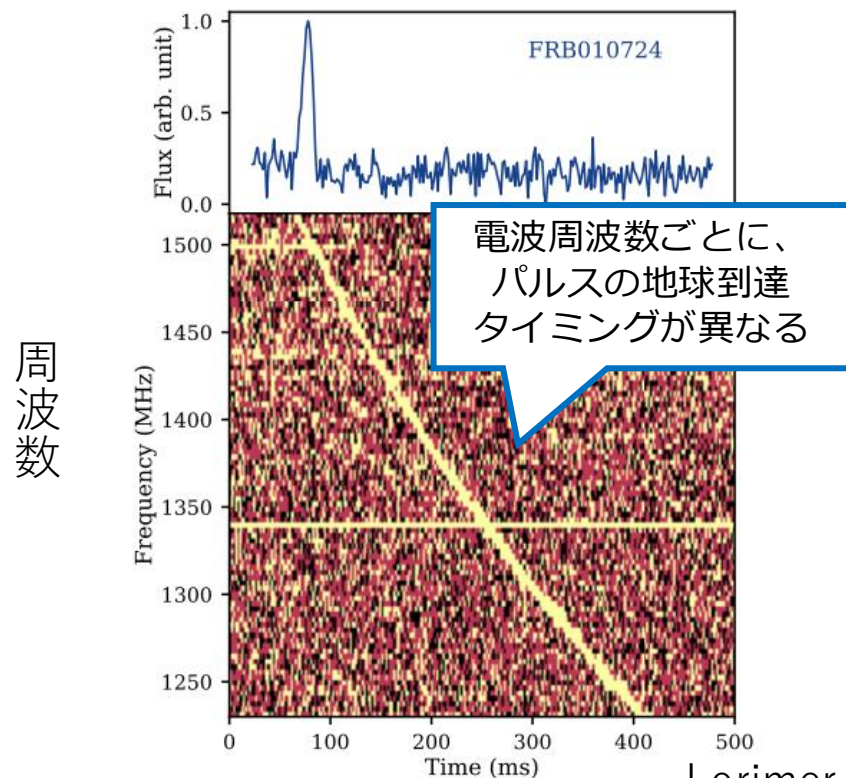
普通のFRBと比べて電波放射エネルギーが数桁低いという問題はあるが、唯一の電波以外の検出例

FRBの距離推定

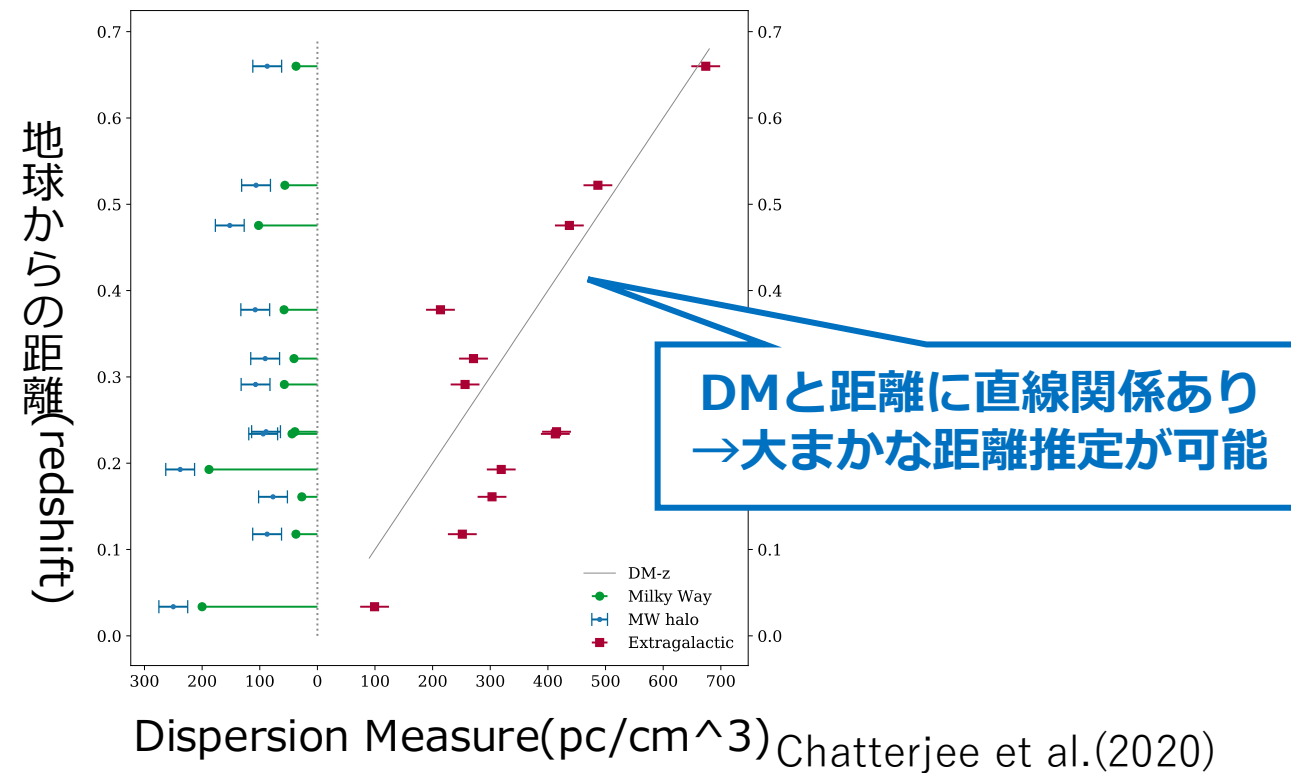
• FRB対応天体の検出可能性を上げる

地球近傍であるほど明るく検出できることが期待されるため、追観測では距離が重要な指標
ほとんどのFRBは母銀河が不明であり距離がわからないので、別のパラメータで距離推定

Dispersion Measure (DM, 分散量度) : FRB天体 — 地球間プラズマの柱密度を表すパラメータ



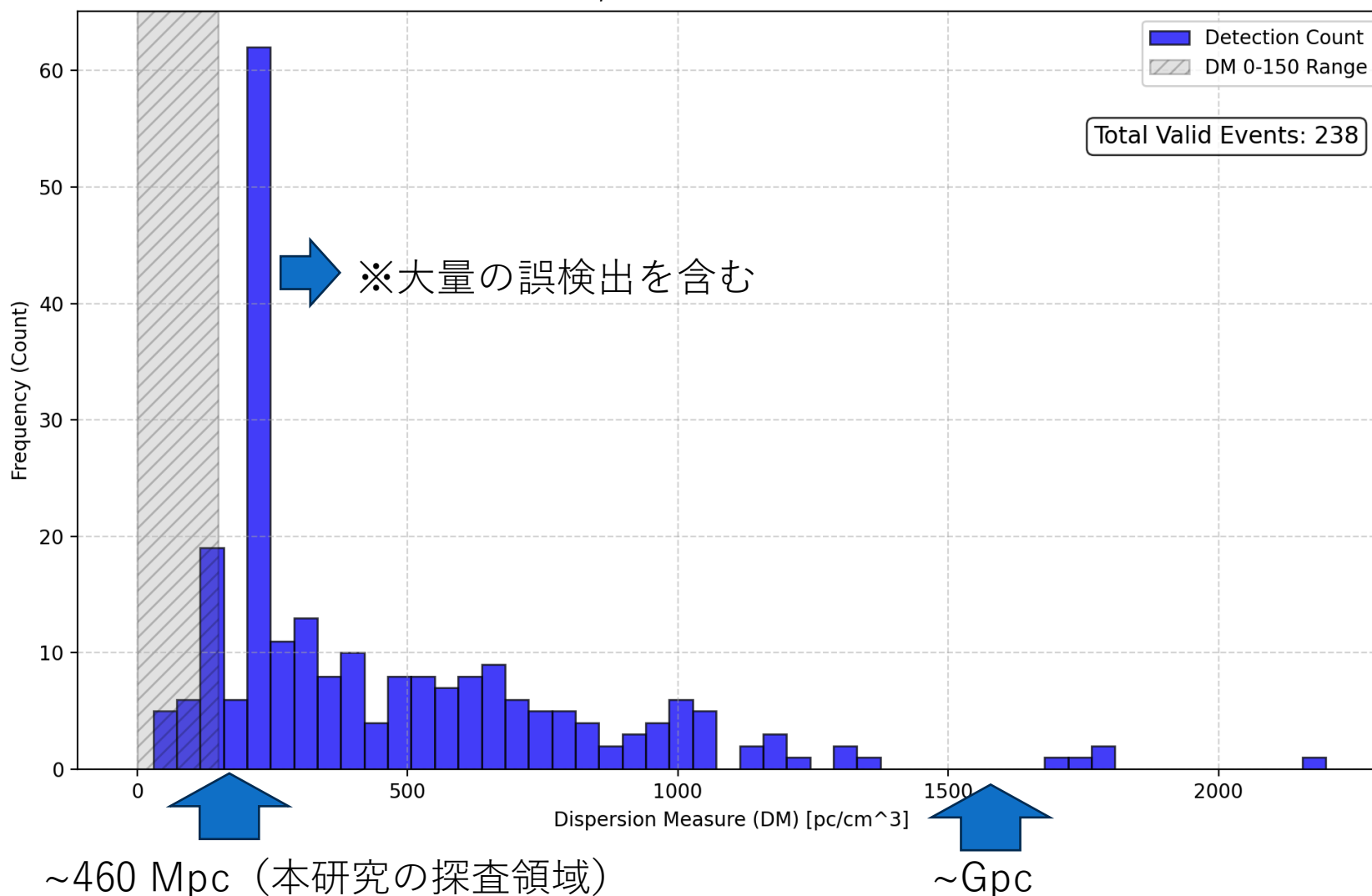
Lorimer et al.(2007)



Dispersion Measure(pc/cm³) Chatterjee et al.(2020)

FRBのDispersion Measure分布

CHIME/FRB Events: DM Distribution



- 2025年6月から12月までの半年間でCHIMEから通知されたFRB
- 本研究では地球近傍FRBを狙いより深い絶対等級を達成したいためDispersion Measure $< \sim 150 \text{ pc/cm}^3$ $\sim 460 \text{ Mpc}$ を閾値とする
- 閾値内で確からしいFRBは合計10件程度そのうち木曽で観測できるものは数件

FRB対応天体モデルの検証

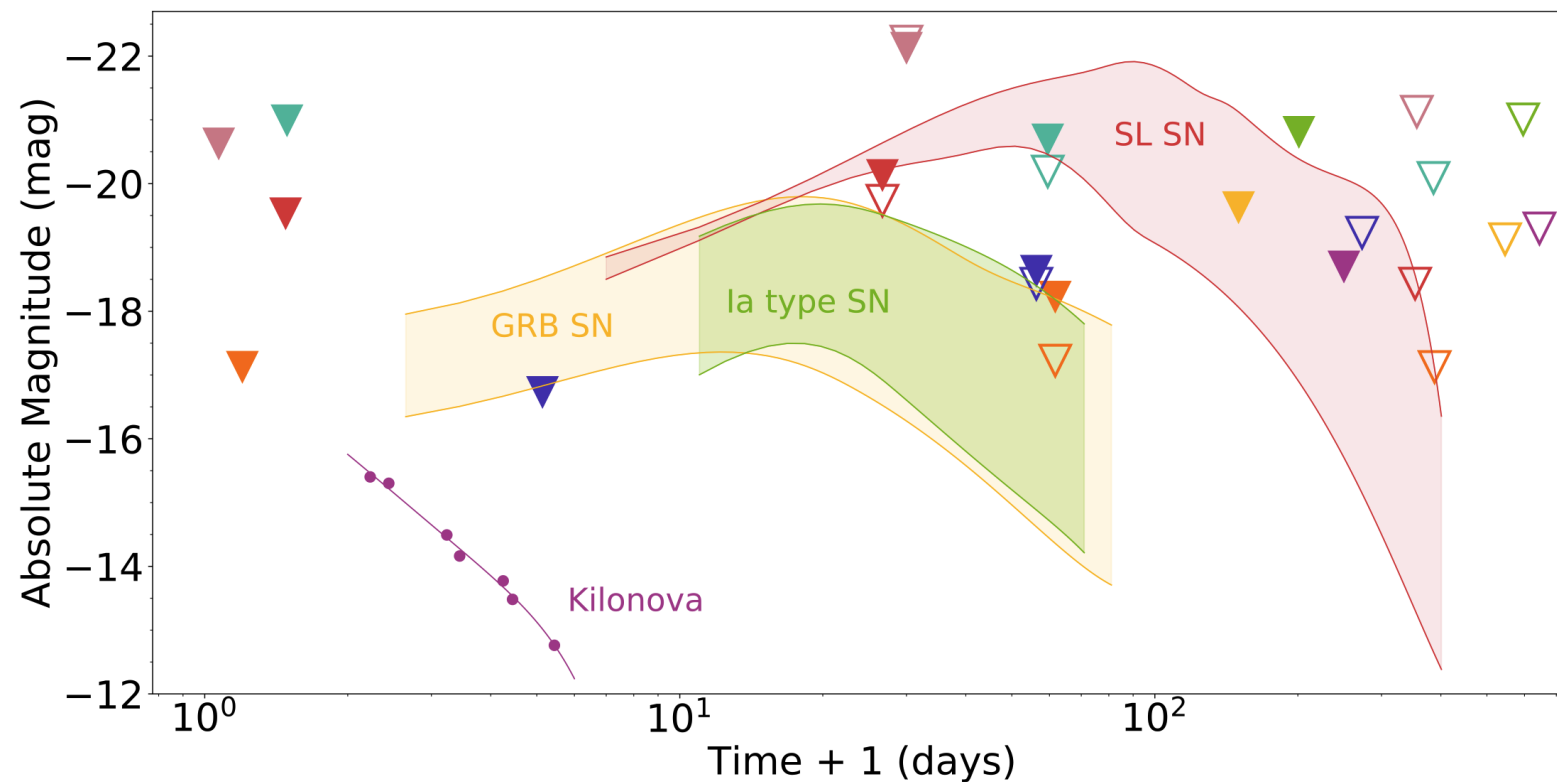
・突発天体モデル

超新星やGRBなど突発天体を起源とするFRB対応天体モデル

先行研究の例

C.Núñez et al.(2021)

8個の独立したFRBに対し複数回の
可視光追観測を実施した
限界等級を突発天体のライトカーブ図に
プロットし、FRBとの関連性を調査した
少なくともSL SNとの関連性は否定された



FRB突発天体モデルの調査

研究目的

広視野撮像装置Tomo-e GozenでFRB可視光対応天体を発見する、
またはこれまでに予想された対応天体候補を制限する

本研究の強み

- ✓ 多くの可視光望遠鏡では不可能なFRB座標誤差範囲を一度におおう広視野観測を行うため、
明るく受かることが期待できる **近距離FRBの網羅的観測が可能**
- ✓ 東大が専有的に観測できる夜が多く融通が効きやすいため観測機会を逃しにくい
- ✓ 対応天体を発見できない場合でも、これまでのFRB可視光追観測に対し **最も多くの起源を制限できる**

FRB可視光追観測 手法

①Tomo-e Gozenを用いて合計30分間の露光で追観測を実行

Tomo-e Gozenの84枚のセンサ間に隙間があるため、6回ディザーをかけて観測する

1 ディザーにつき5分、 $S/N = 5$ で限界等級21.5等級

FRB天体の可視光増光タイミングは不明であることから即時追観測に加えて、

5日後、2週間後、1ヶ月後・・・に再度追観測を行う

②対応天体候補が見つかった場合、京都大学岡山天文台せいめい望遠鏡で再度追観測

Tomo-e同様の可視光撮像観測と、分光を実行する（2日以内のToO観測）

Tomo-e よりも限界等級が約2等級深いため、対応天体の光度変化をより詳しく調べられる

FRB自動追観測システムの構築

- ・即時追観測を行うための追観測対象の選定→観測終了まで全自動で進行するシステムを作成した

1. CHIMEからのFRBアラートを即座に解析

アラートから抜き出す情報：座標、座標誤差、Dispersion Measure

2. 追観測対象に適するか即座に自動判断、観測を実行

追観測条件： 1. FRB発生座標が木曽で高度30度以上

2. 月との離角が10度以上

3. Dispersion Measure < 150 pc/cm³ (~460 Mpc)

以上を満たすと観測レシピが自動で作成され、観測キューに自動投入される

2025年11月頃から自動追観測システムが本格始動、複数回の自動追観測に成功している

FRB観測データ解析パイプライン

>5分露光データに最適化した解析

- ・既存パイプライン（突発天体パイプライン等）は長時間露光を想定しておらずFRB対応天体探査に最適とは言えない

作成したパイプライン：

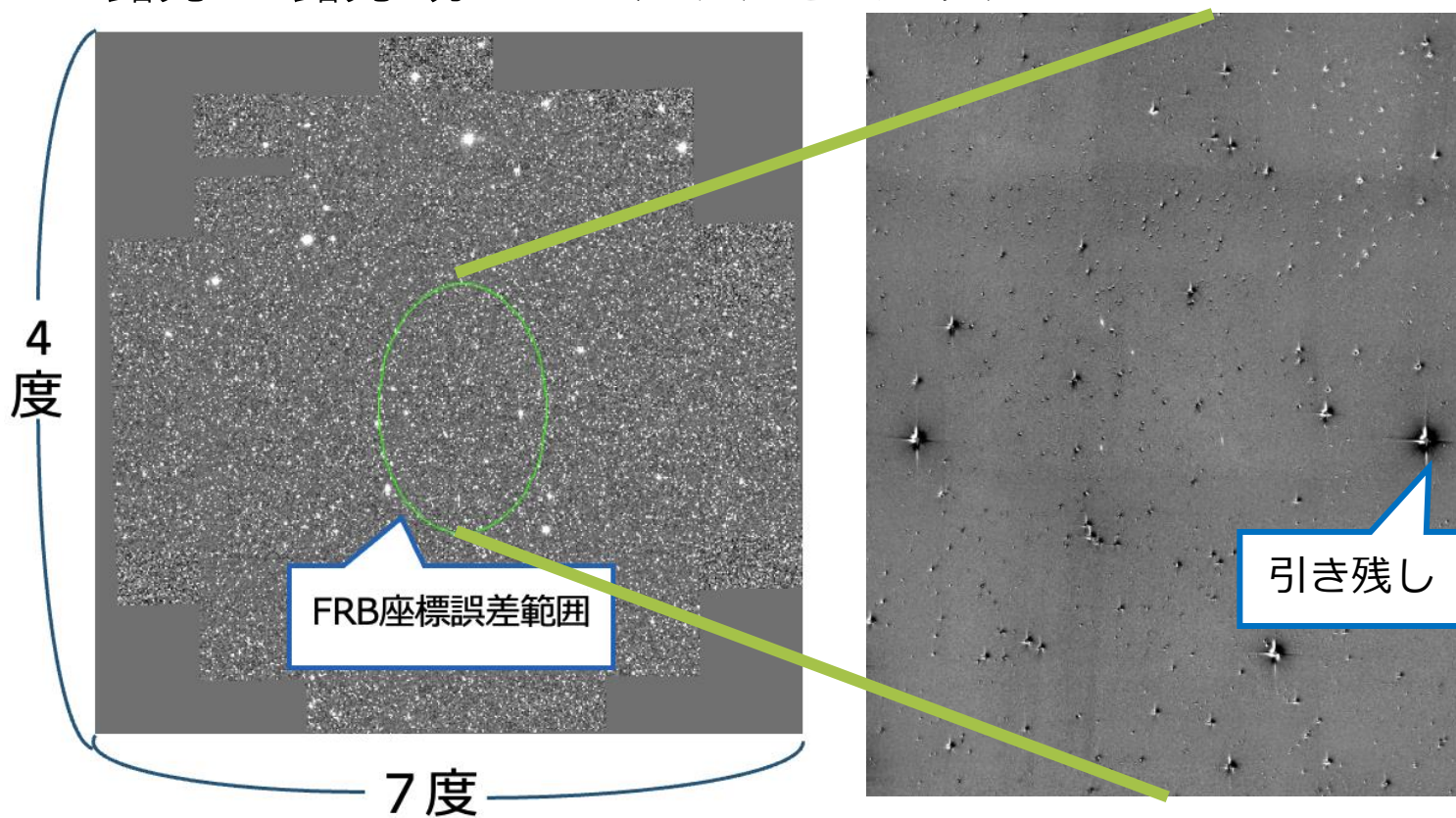
1. FRB観測画像とその参照画像を一括ダウンロード（サイエンスフレームが約100fits）
2. Swarpで足し算、hotpantsで引き算を行い差分画像の作成
3. Sepで天体検出し天体候補を描画
4. 差分画像の背景に円形アパーチャを置き、カウント値の足し算と標準偏差の算出で背景ノイズ評価、限界等級の算出

→約10分でパイプライン解析完了

- ・天体候補「**有り**」：無関係な天体光である可能性を考慮しつつ、さらなる追観測で光度変化を調査する
- ・天体候補「**無し**」：背景ノイズ評価の限界等級からFRB可視光対応天体モデルを絞り込む

観測結果の一例

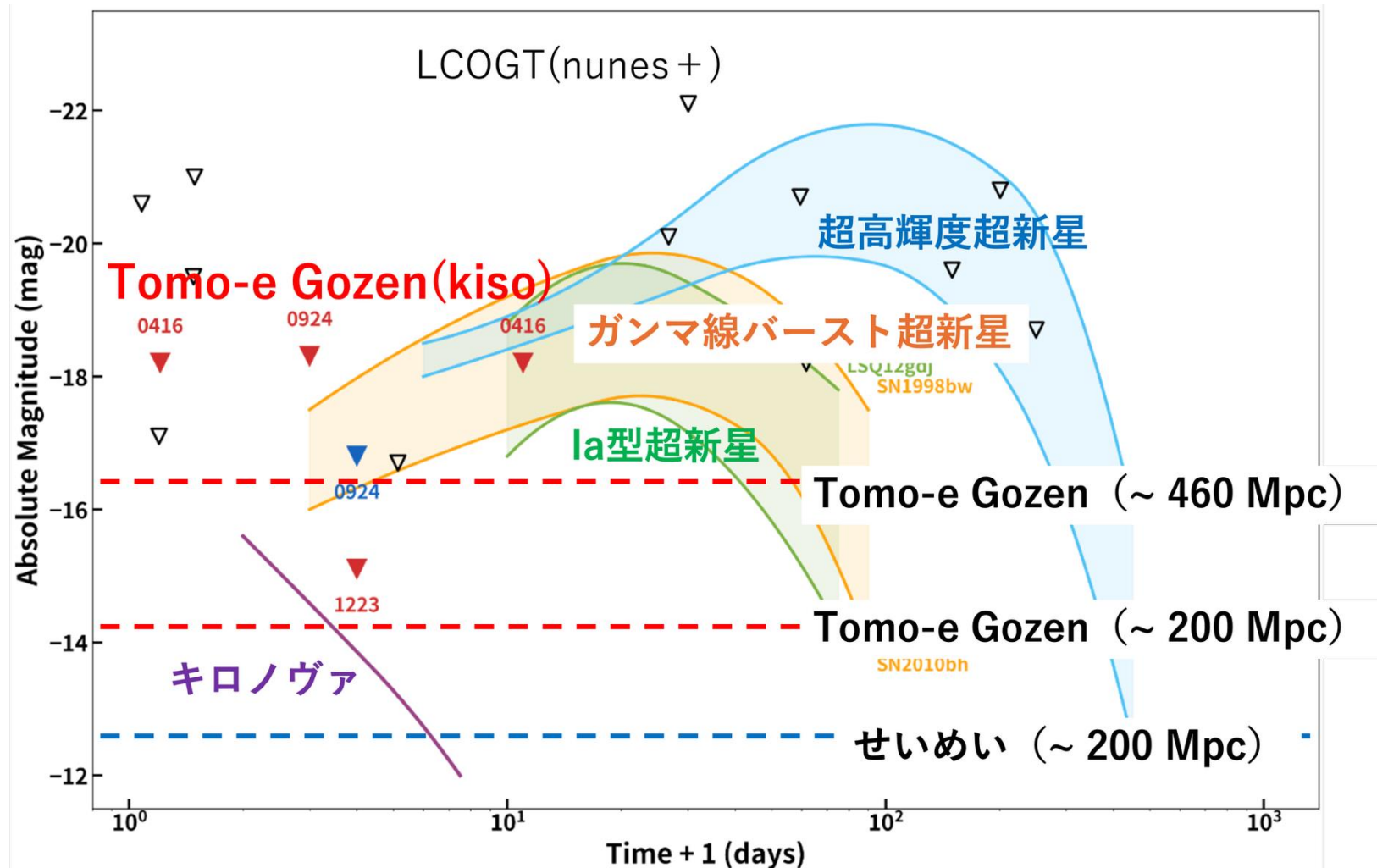
- 観測対象：2025年12月23日に発生したFRB20251223 (55.13, 1.700 deg)
- 距離：約 $z \sim 0.02$ (Dispersion Measure ~ 40 pc/cm³、極めて近傍)
- 観測日時：2025年12月28日
- 露光：1露光1分×5 スタックを6ディザー



- 有意な新発光は検出できなかった
(背景ノイズの 5σ 検出閾値)
- 左図は全fitsスタックだが、解析は
センサごとにやっている
限界等級は約**19.7等級**
- この追観測以外を含め、
これまでに対応天体候補は発見できず

引き算画像

これまでの追観測による考察

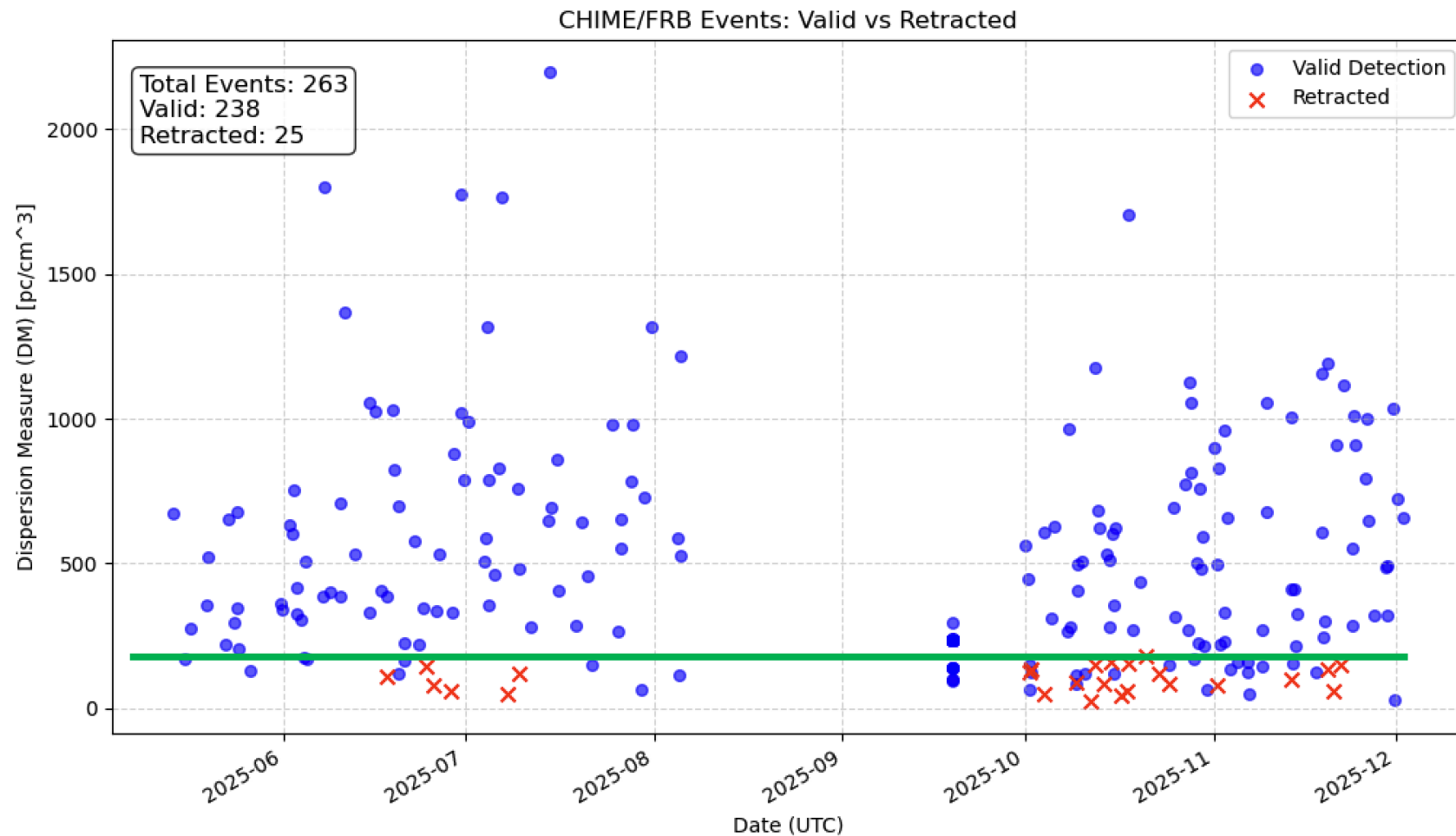


- (棄却されたFRBを除き) 約半年間で5回追観測できた
- やや遠い&ベストコンディションではないためやや浅い制限が目立つ
- 観測点が時間方向に十分ではないがいくつかの超新星タイプとの関連性が否定できる:

FRB20250924: ~~SL SN~~, ~~GRB SN~~
 FRB20251223: ~~SL SN~~, ~~GRB SN~~
 FRB20250416: ~~SL SN~~, ~~Ia SN~~, ~~GRB SN~~

問題点①

- CHIMEによる近距離FRBアラートの後日撤回(Retraction)率があまりに高すぎる

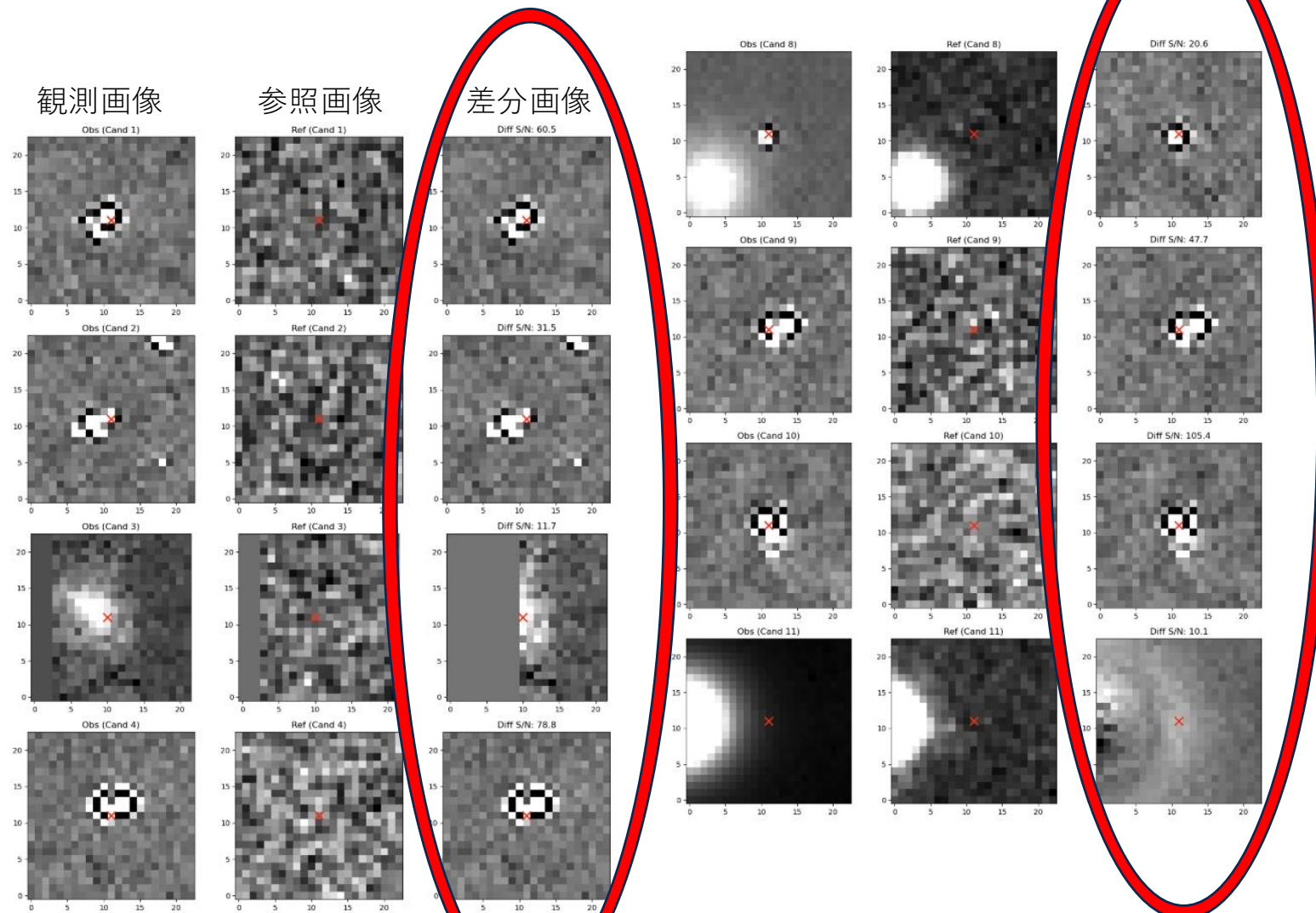


- Dispersion Measureが小さいほどRetractionされる場合が多い
- $\text{DM} = 40 \text{ pc}/\text{cm}^3$ あたりでretractionされないFRBも稀にあるが、本物かどうか怪しい (CHIMEに問い合わせ中)
- Retractionを含めればこれまでに約20回追観測が実行されている

近距離ライン $\text{DM} = 150 \text{ pc}/\text{cm}^3$

問題点②と今後

- SEPで天体検出する際、誤検出が目立つ



1チップにつき数十個
全チップ合わせて300個以上の誤検出

改善策：

- ・ホットピクセルはマスクする
- ・引き残しの特性をもつ領域をうまく排除する

工夫を凝らして修正中

まとめ

- FRB起源はわかっておらず、候補の一部として超新星などの突発天体が考えられていて世界中で多波長観測が行われている
- **広視野撮像装置Tomo-e Gozen**により、世界初と思われる近距離FRBに対する即時観測を含めた網羅的な追観測がスタートした
- 観測の自動化や膨大なデータを効率的に解析するパイプラインを作成したことで、短時間で全FRB追観測データの解析ができるようになった
- 4つのFRBに対し追観測を実行したが視等級約20等の深さで対応天体の検出には至らなかったため光度上限を課し、対応天体候補のSL SN, GRB SN, Ia SNとの関係性を一部制限した