

Tomo-e Gozenによる マルチメッセンジャー (多波長) 突発天体観測

新納 悠 (東京大学木曾観測所)

on behalf of the Tomo-e Gozen collaboration

マルチメッセンジャー突発天体観測における Tomo-e Gozen

- Tomo-e Gozen による追観測
 - 広視野によって位置決定精度の悪い現象でも可視光対応天体を探査可能
 - e.g., 重力波現象、超新星ニュートリノ
- Tomo-e Gozen による同時観測
 - 動画観測によって時間変動現象発生の一瞬の振る舞いを高時間分解能で捉える

突発天体アラート

- 特定の観測装置が突発現象を検出 → ネットワーク経由で速報
 - プラットフォーム：GCN 等
 - フォーマット：VOEvent, JSON packets, テキスト eメール, バイナリ信号等
- 木曾シュミット／トモエゴゼン
 - ターゲットとする天体の検出を知らせるアラートを受信すると自動で追観測

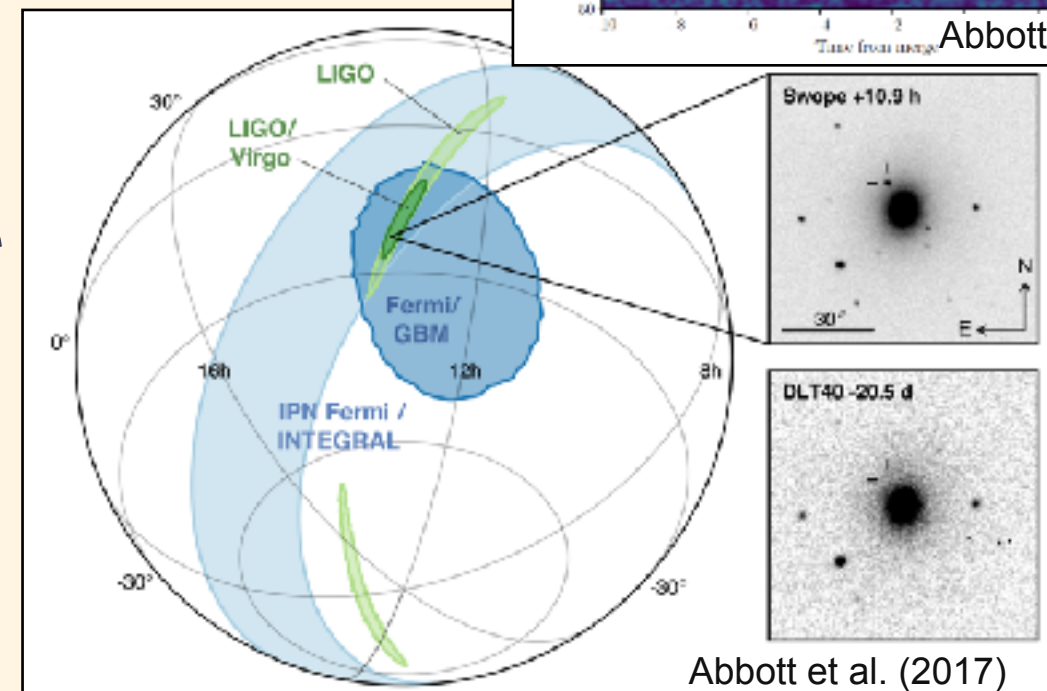
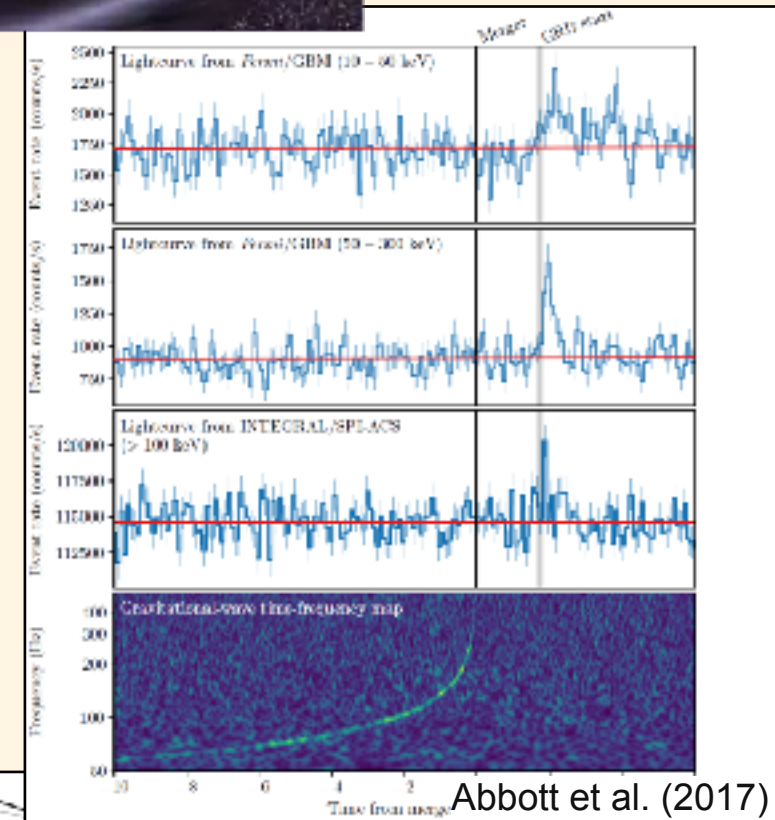


重力波イベントと 電磁波対応天体



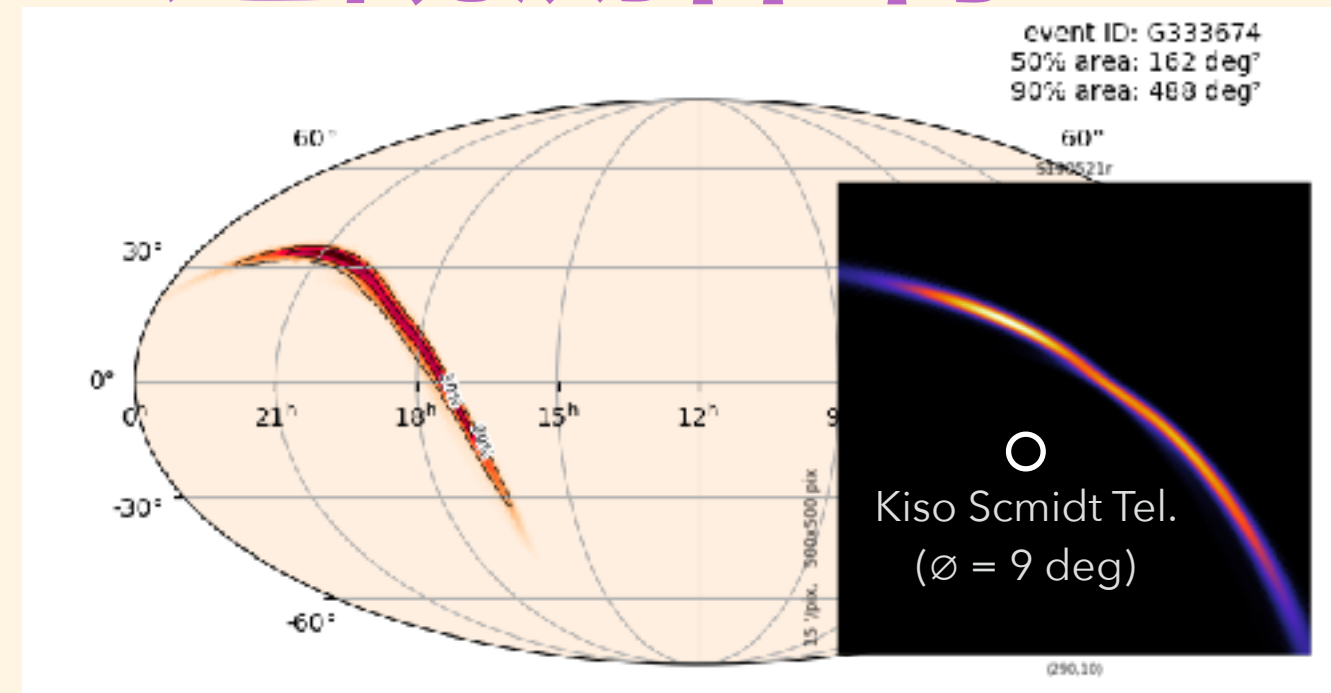
Credit: NASA/Goddard
Space Flight Center

- 中性子星連星合体 GW170817/
AT2017gfo/GRB 170817A
 - 重力波と電磁波の両方で観測される
 - 史上初&これまで唯一
- 全ての中性子星連星合体が
GW170817 like とは限らない
- 観測例を増やしたい



重力波イベントの追観測体制

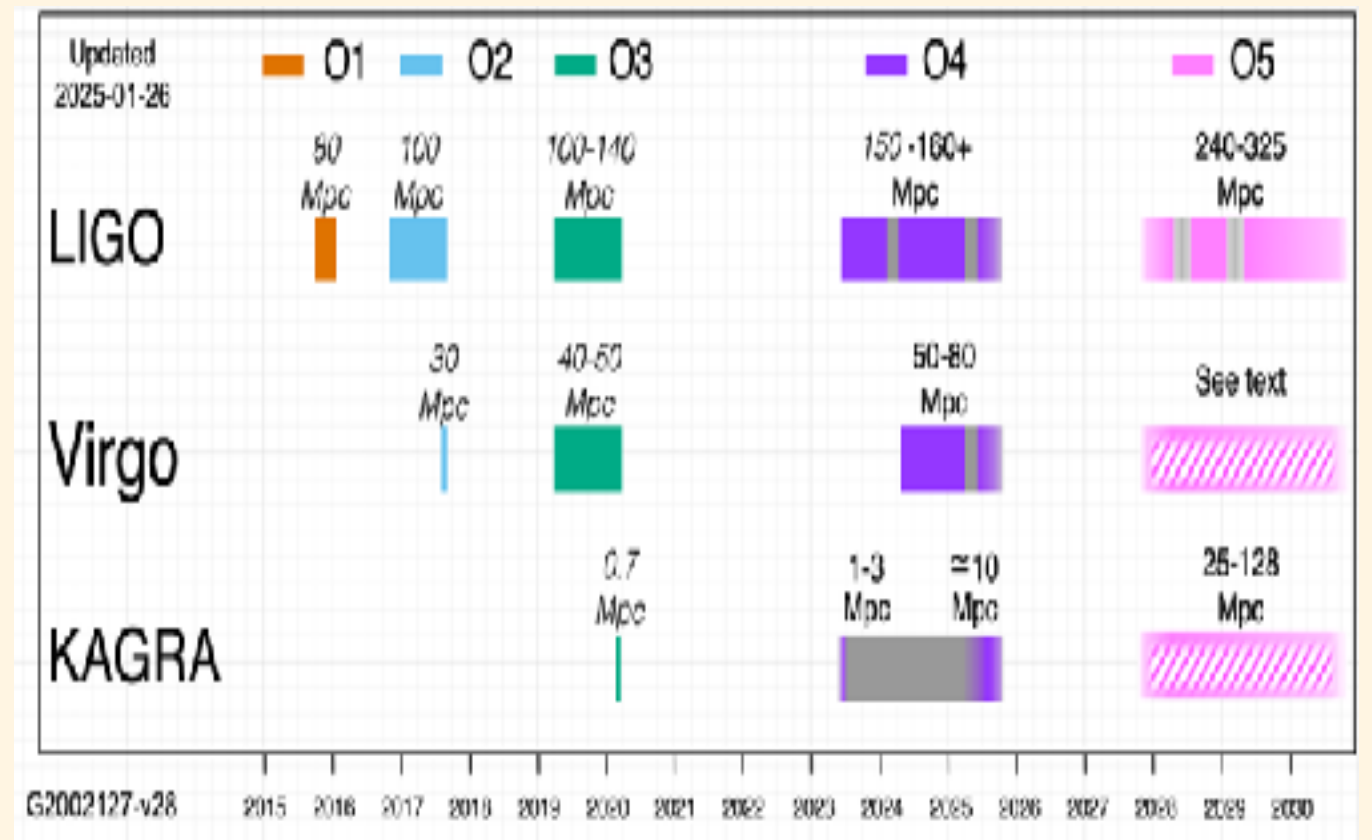
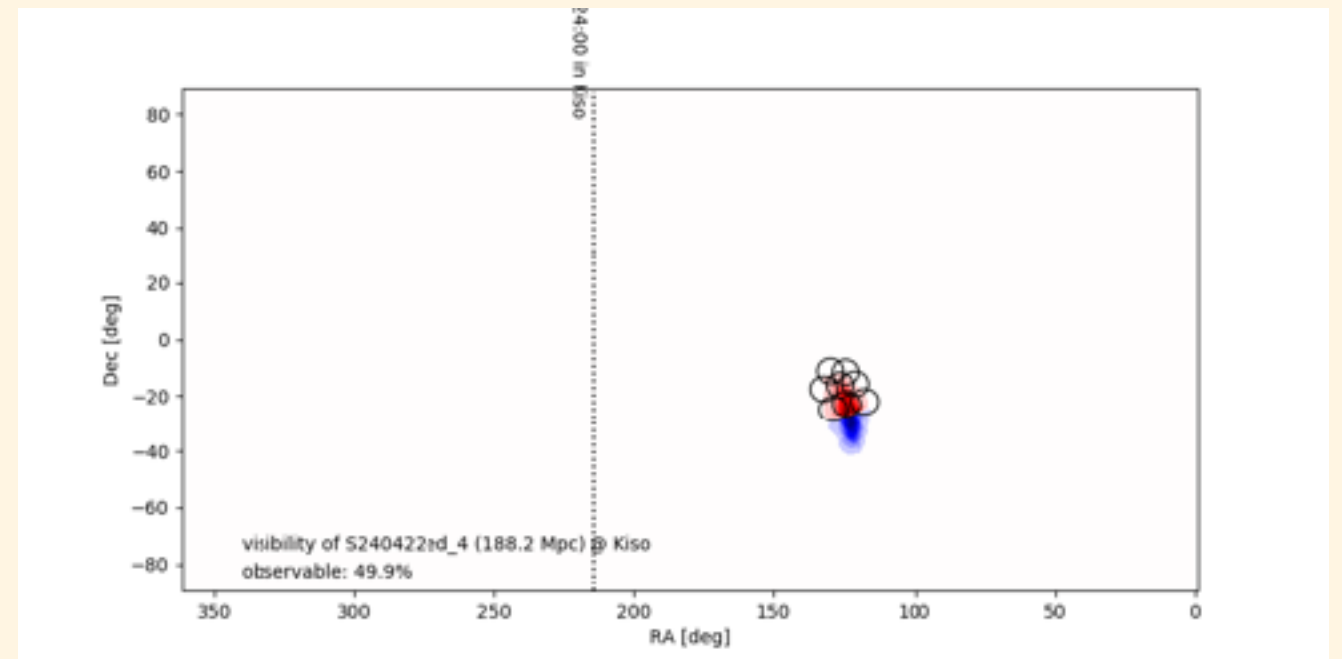
- 重力波検出アラート via GCN を受けて自動で対応天体を探査
 - 初期光度曲線をとらえる
 - 分光能力のある観測所に速報
- 重力波位置決定精度
 - O3 (2019-) : 数百-数千 deg^2
 - O4 (2023-) : 数十-千 deg^2
- Tomo-e Gozen の視野 $\sim 20 \text{ deg}^2$
- 取得したデータは超新星探査と同様のパイプラインで処理
 - 対応天体候補をウェブインターフェイス上で目視確認



7928161	133.2001803, -18.1460311	17.07	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79373296	83161983	5240422ed	3.06643472371396						2	Star	Unclear	Begin	Checked
7928161	128.499388, -20.648481	22.80	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79375270	83112179	5240422ed	1.140491						2	Star	Unclear	Begin	Checked
7928161	134.1610677, -14.3410607	22.80	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79375268	83175213	5240422ed	1.034036						2	Star	Unclear	Begin	Checked
7928161	119.9316004, -10.8160431	16.86	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79374572	83171435	5240422ed	1.088884						2	Star	Unclear	Begin	Checked
7928161	126.7880716, -8.3210953	18.74	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79375303	83174962	5240422ed	3						3	Star	Unclear	Begin	Checked
7928160	119.9316256, -11.1580102	22.80	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79375756	83169360	5240422ed	3.114381						1	Star	Unclear	Begin	Checked
7928150	124.5487104, -7.1622935	16.14	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79374316	83171099	5240422ed	3.159681						3	Star	Unclear	Begin	Checked
7928150	125.0387084, -7.1017795	17.31	2024-04-25	3W follow-up (O4)	79374327	83167963	5240422ed	3.016857						1	Star	Unclear	Begin	Checked

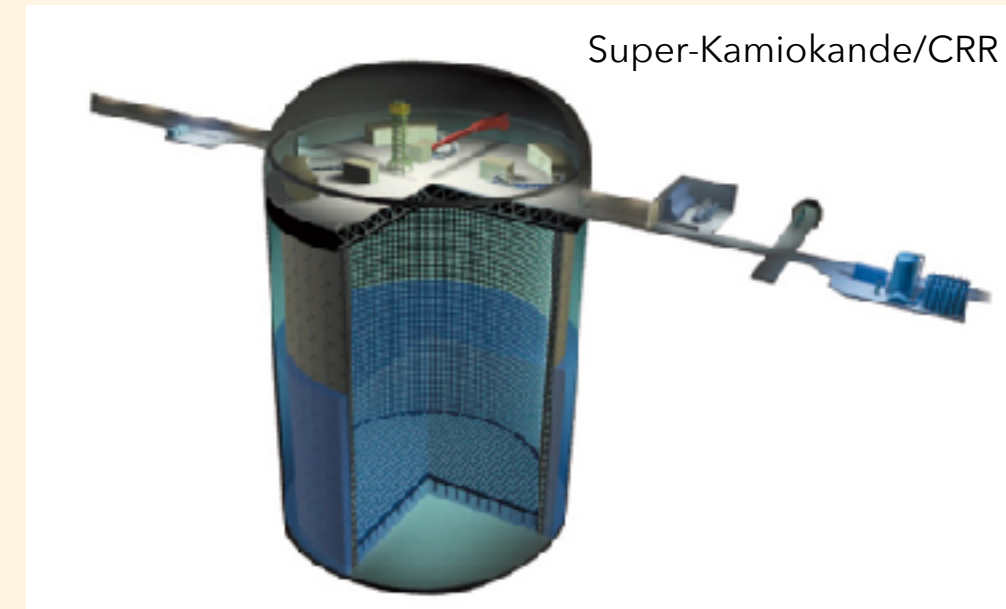
- O4期間：2023年5月-2025年11月
- 追観測実施条件
 - BNS or NS-BH は原則観測
 - BBH は 99% area < 5000 deg² かつ木曾から50%以上観測可の場合
- O4期間中に 49 event を追観測（述約40,000 deg²）
- 面積で積分時間を調整 → 2-3時間で掃く
 - 99% area < 300 deg²
 - 240秒露光 → $m_{\text{lim}} \sim 20.5$
 - 99% area ≥ 300 deg²
 - 48秒露光 → $m_{\text{lim}} \sim 19.5$
- 候補天体数 $\sim 1 \text{ deg}^{-2}$ ($m_{\text{lim}} \sim 19.5$)
 - high-proper motion star と思われるものが主
 - 有力なものは見つからず

O4 観測状況



Super-Kamiokande ニュートリノアラート

- Super-Kamiokande (SK) からのアラートを受けて即時追観測し超新星 (SN) のたち上がりを捉える
 - 重力波と同様に GCN にアラートが発せられると自動追観測
 - 2024/6より運用
 - 数十-百年に1回の頻度
 - Tomo-e と SK のプロジェクト間 MoU に基づき low-level アラート情報を受ける
 - 年に ~ 1-2回の頻度
- SKのアラート発信体制については **Guillaume** さんの講演



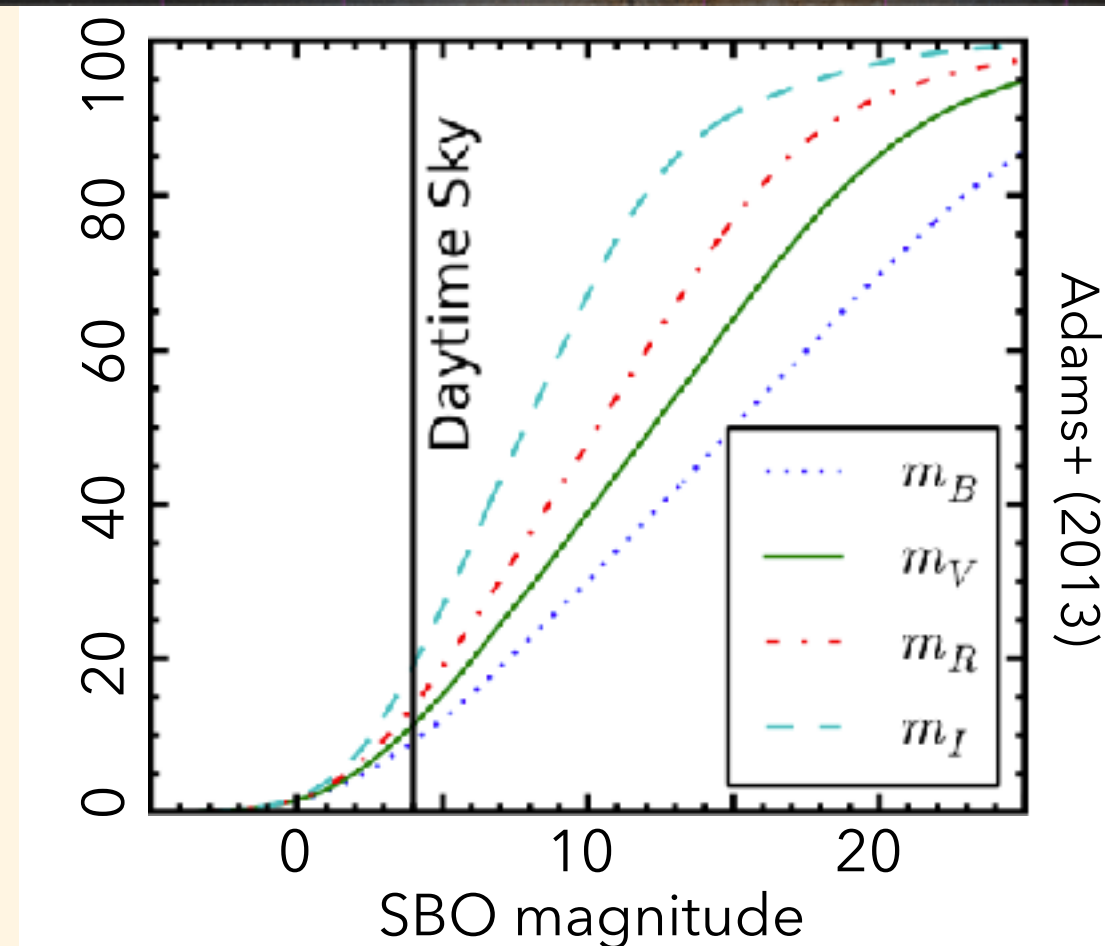
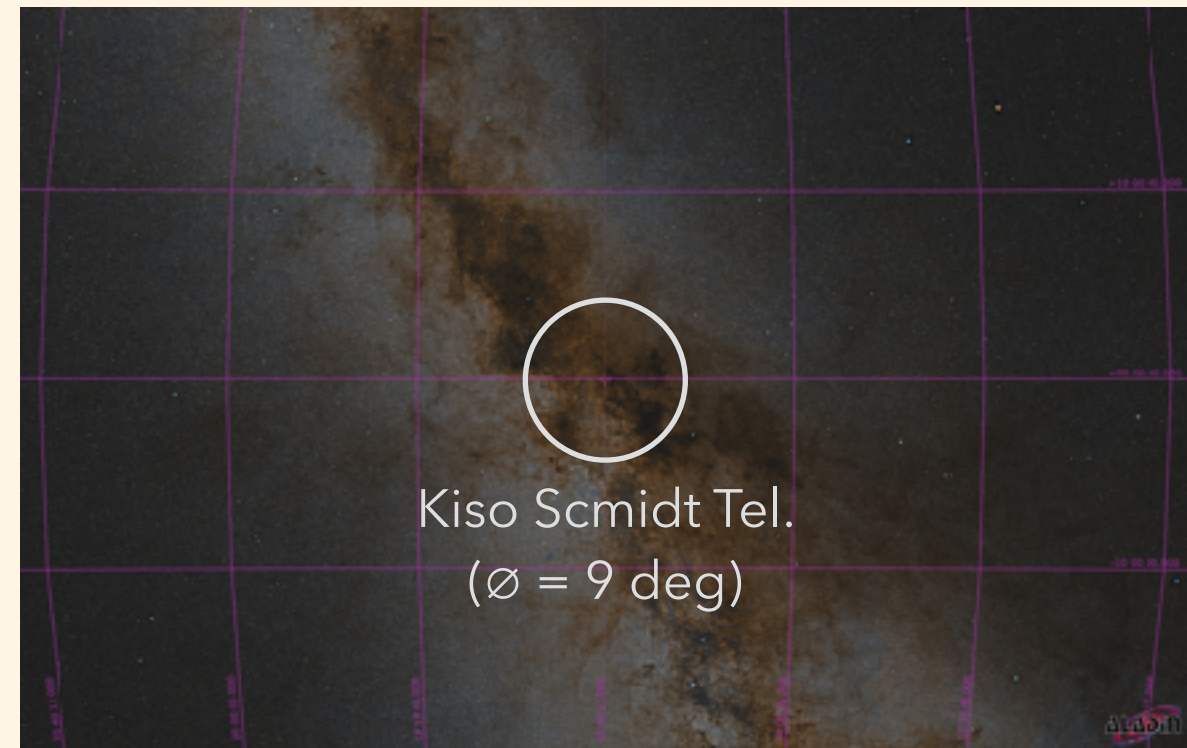
golden alerts
public
via GCN

low-level alerts
private
via email



SK Golden アラートの追観測

- 銀河系内 SN 由来と考えられる
 - 数十–百年に1回（貴重！！）
- SK による位置決定精度 ~ 3 deg
 - 木曾シュミット望遠鏡の広視野観測にマッチ
- 限界等級 ~ 20 mag (露光 $\sim$ a few min)
 - 銀河円盤の減光越しに大部分の SN shock breakout を検出可
- 親星の種族によってニュートリノバーストから可視光増光まで分-日スケールの時間差
 - 人の手を介さない自動追観測で即時対応
 - 初日はひとまず一晩中監視を続ける
- 専用の検出パイプラインが必要かも？



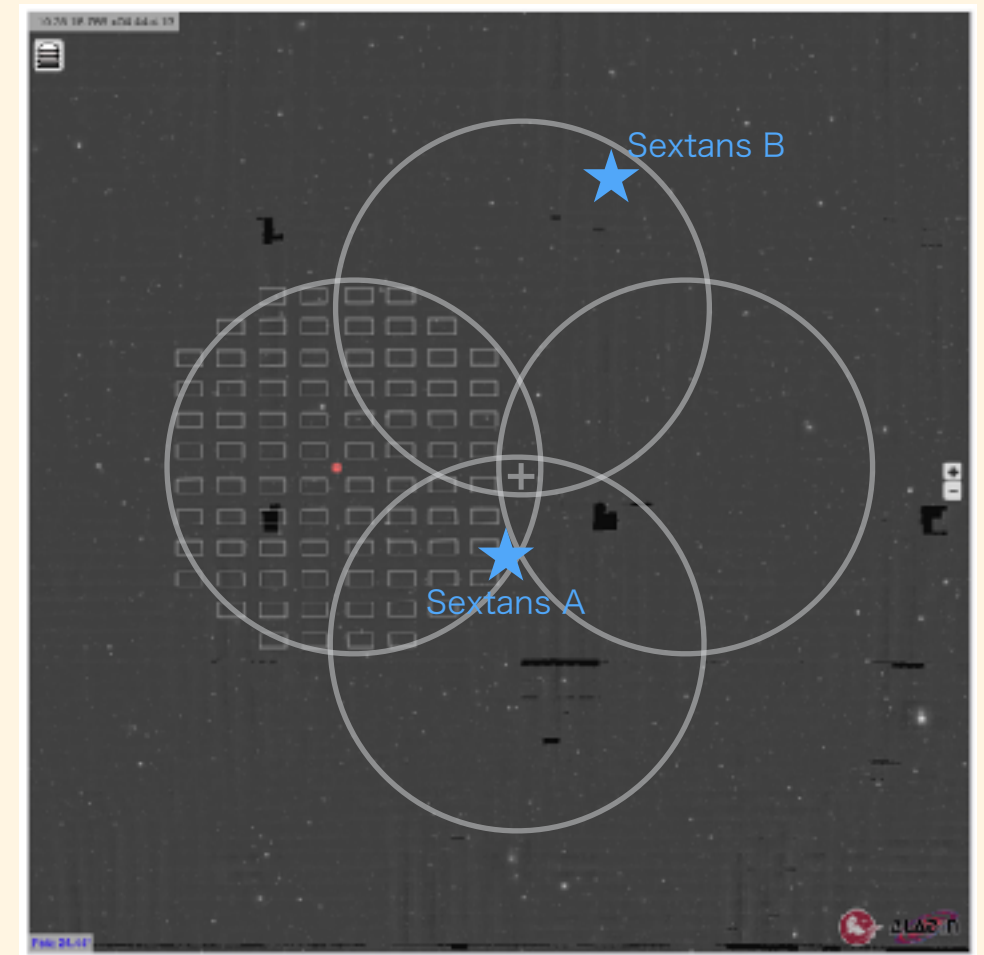
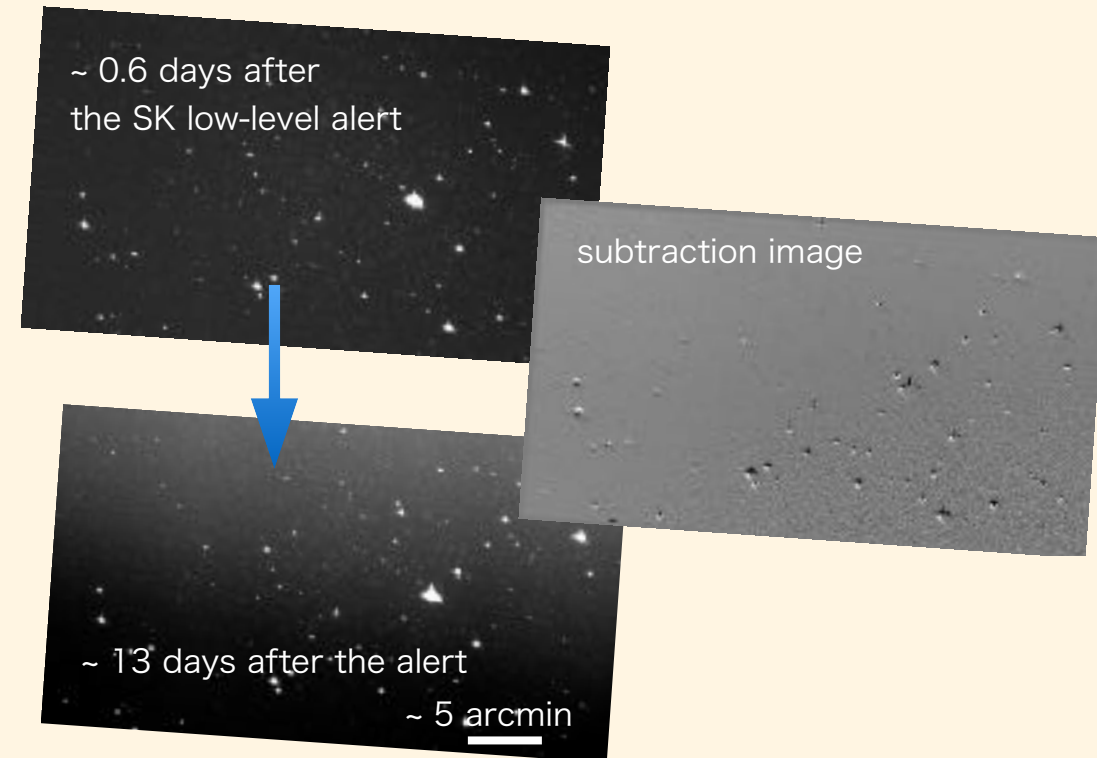
SK low-level アラートの追観測

- 確度の低い low level alert（非公開）についても連携観測
 - 2024年 MoU締結
 - ニュートリノ事象数 > 10
 - 位置決定精度 ~ 20-30 deg
 - ほとんどはバックグラウンド
 - 本番に向けた練習
 - 何か見つければ大発見！
- 実際に low level の現象が発生してTomo-e Gozenで追観測
 - 1年あたり 1-2 回
- Hyper-Kamiokande では局所銀河群内（アンドロメダ銀河、他）のSNニュートリノバーストが low-level 検出される可能性がある。
 - low-level 検出にどう対応していくかは今のうちに検討しておくべき

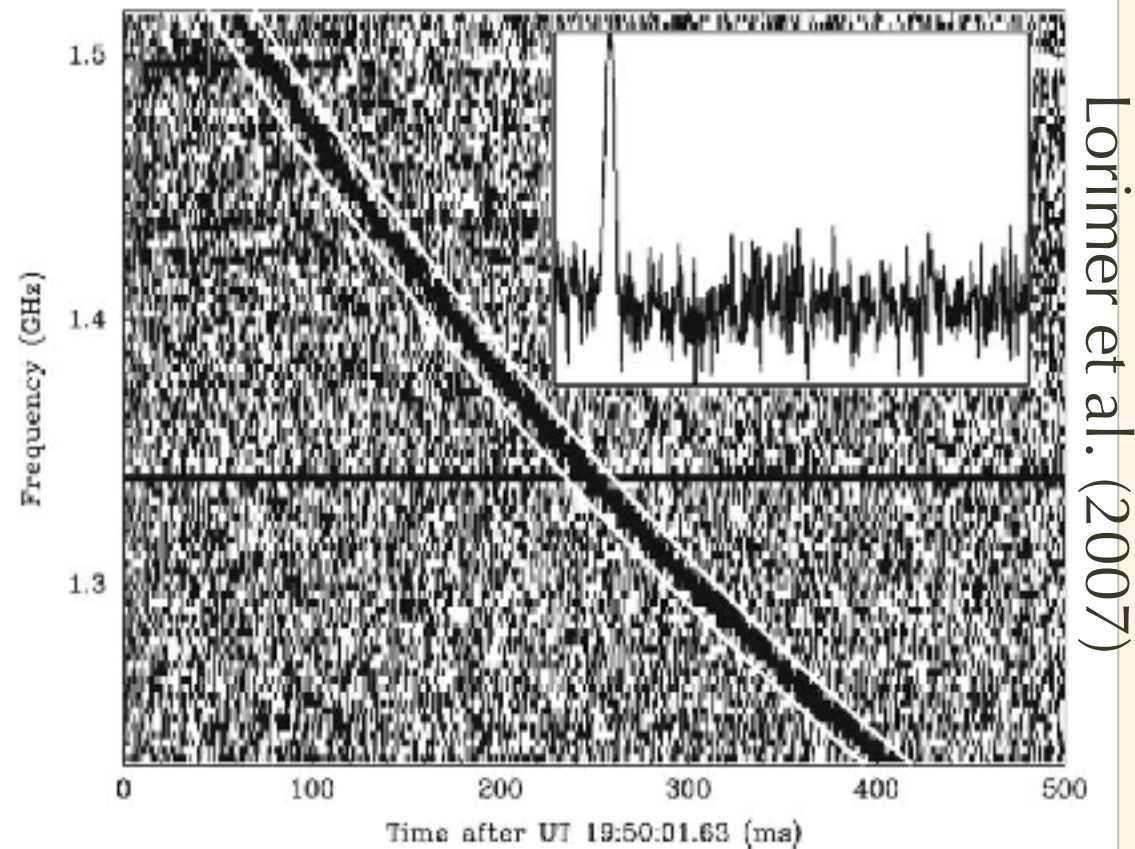


SK low-level アラートの追観測

- low-level アラート1 on Oct. 1, 2024
 - 事象数: 16, error radius: 28.6 deg
 - 領域内に Fornax dSph (~ 140 kpc)
 - Dec ~ -34 deg で reference image なし
 - アラート後 $\sim 0.6, 13$ days に Fornax dSph を観測
 - 差分画像上に天体なし
- low-level アラート2 on Apr. 15, 2025
 - 事象数: 21, error radius: 29 deg
 - Sextans 領域
 - アラート後 $\sim 3, 26$ hrs で ≤ 10 deg 領域を観測
 - 自動パイプライン解析で有力な候補は見つからず
 - 望遠鏡振動の影響あり
- low-level アラート3 on Feb. 6, 2026
 - 事象数: 16, error radius: 28.6 deg
 - アラート後 $\sim 3, 6$ days で ≤ 13 deg 領域を観測
 - 自動パイプライン解析で有力な候補は見つからず



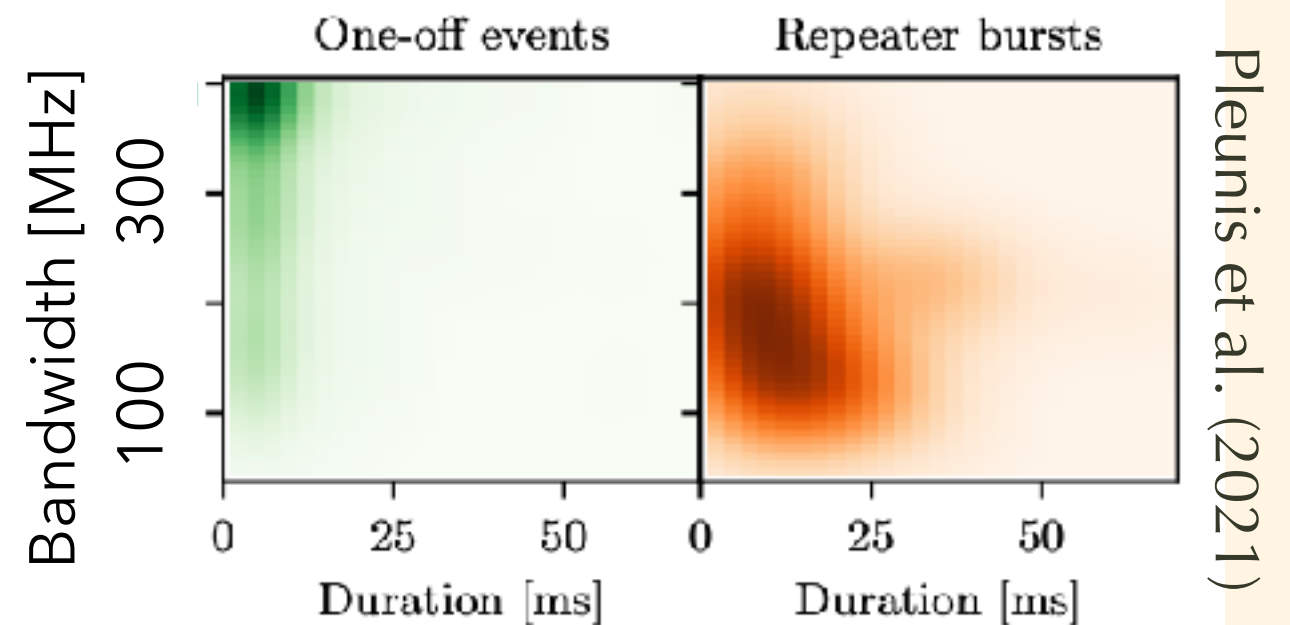
FRBの電波-可視同時探査



- Fast Radio Burst (FRB) :
 - 数ミリ秒の継続時間の電波突発現象
 - これまでに4000以上発見
 - 大部分は銀河系外起源と考えられる
 - repeater/non-repeater が存在
 - 時間・波長幅が異なる → 別種族？
 - 発生源は未解明
- 他波長放射をとらえて正体解明したい

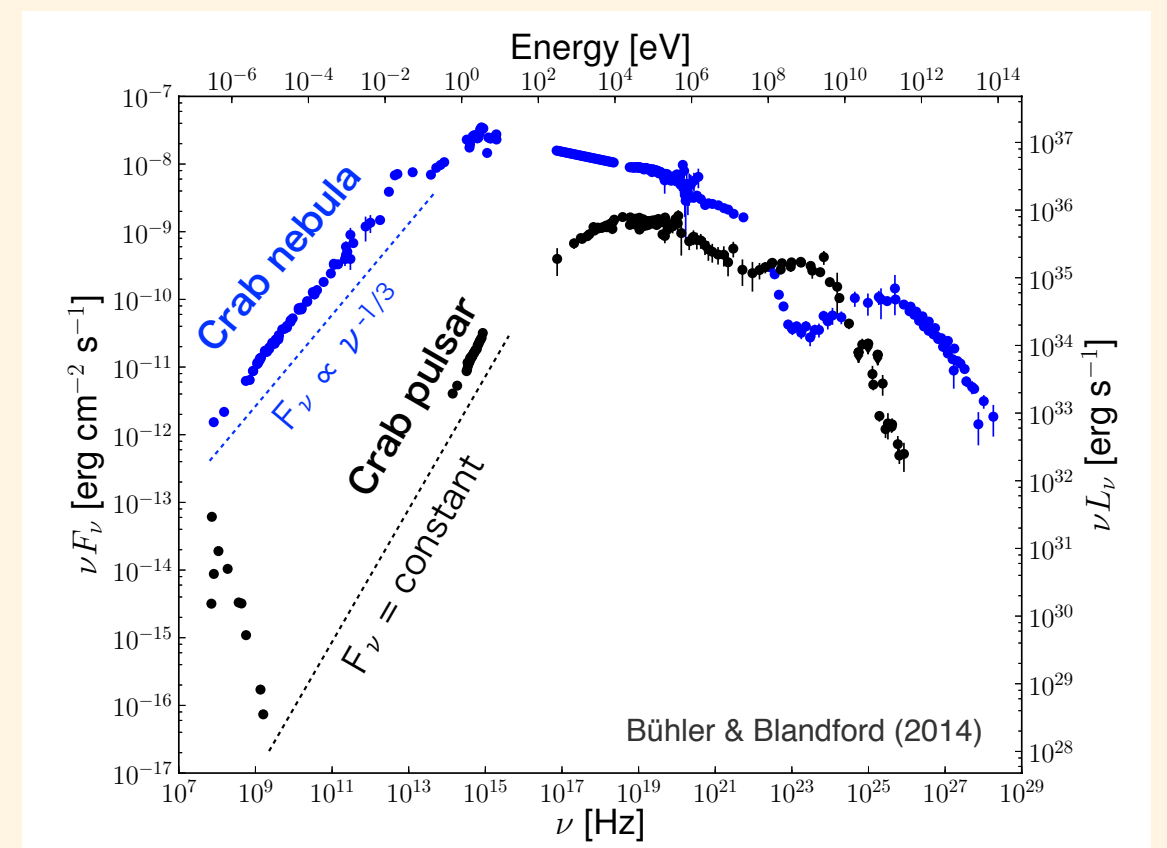
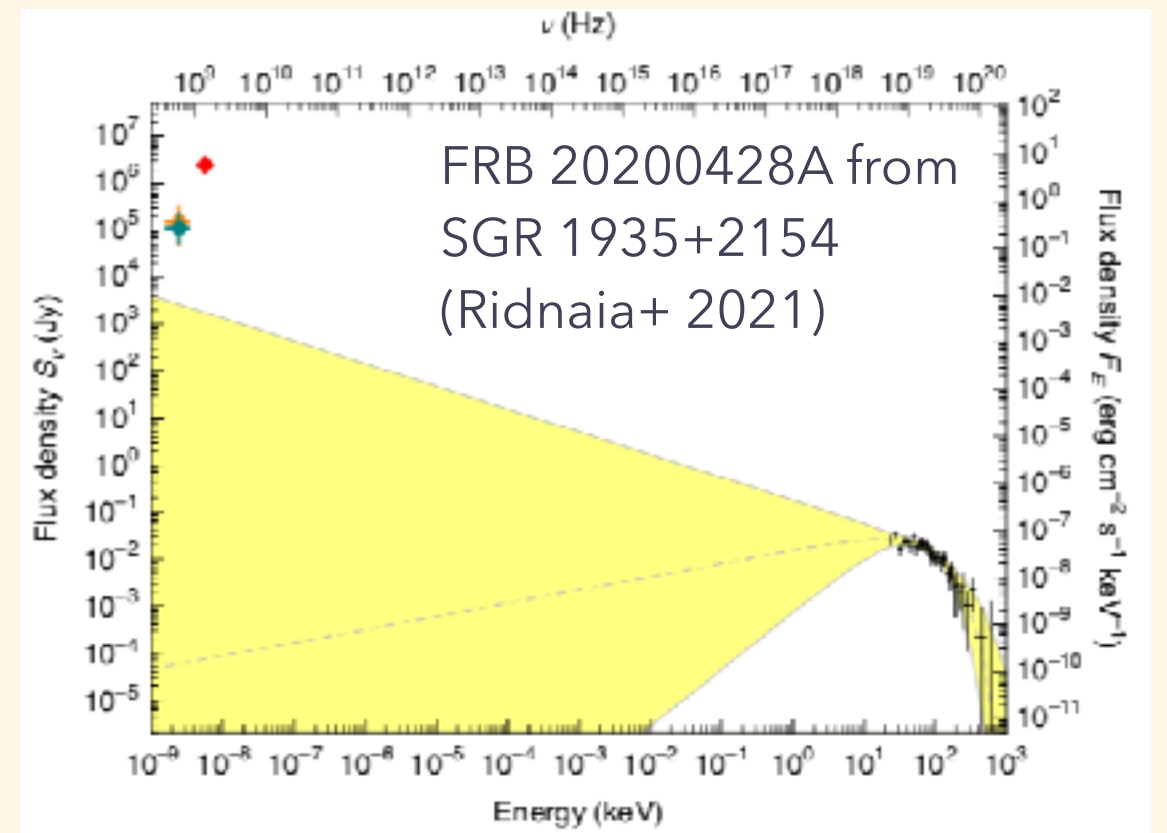


Caption: CSIRO's Parkes radio telescope. Credit: David McClenaghan, CSIRO



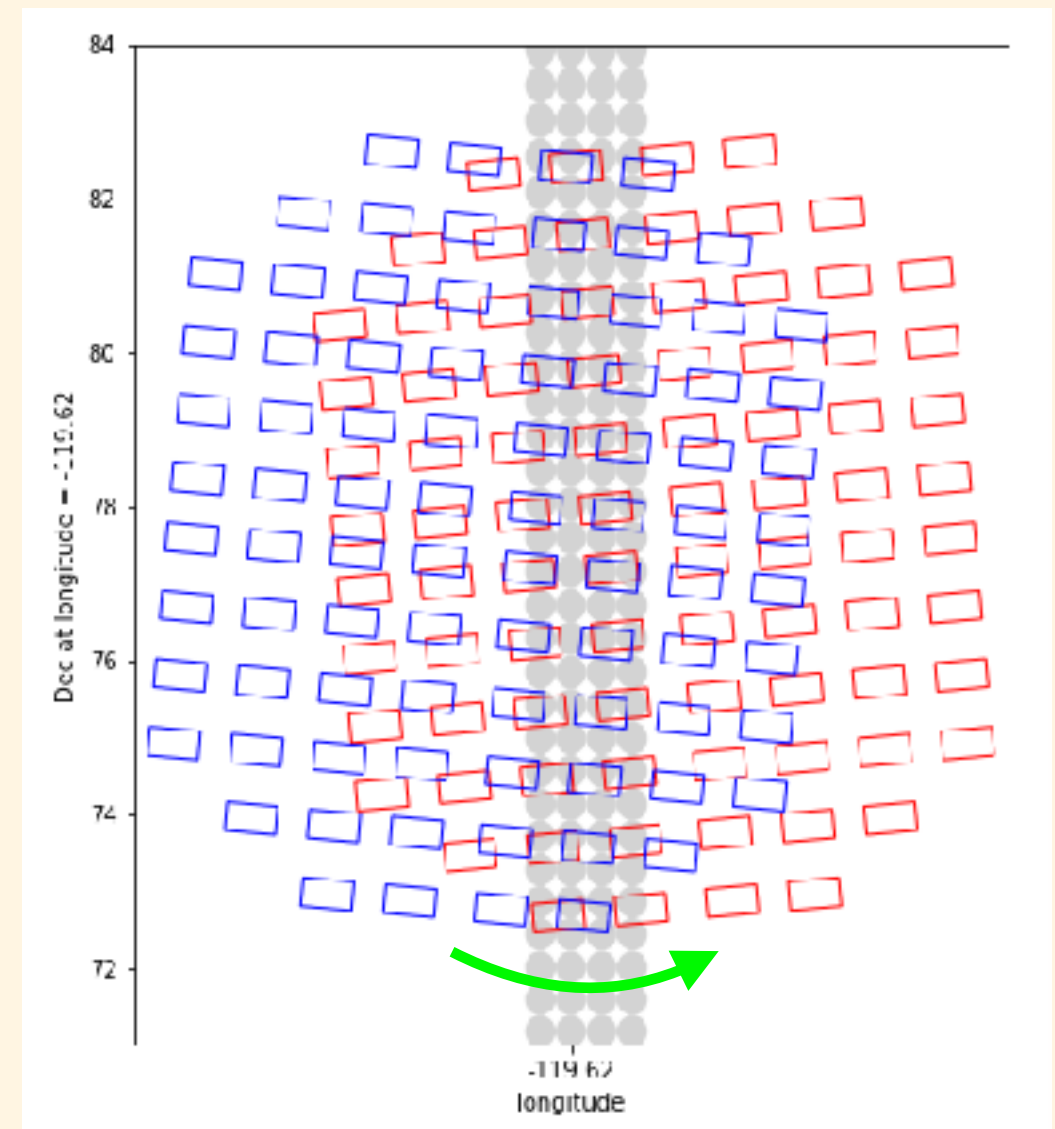
FRB の他波長での放射

- 他波長放射をとらえて正体解明したい
 - 一部の起源モデルでは多波長の放射成分を予言 (e.g., Yang+ 2019, Beloborodov 2020)
- 経験的にも他波長成分はあり得る
 - SGR 1935+2154 burst の際には同時にX線成分も検出
 - 一部のパルサーでは可視光でもパルスが観測されている。
- 可視光での < 1 s 現象を探查できる観測装置は珍しく、これまでも観測例は少ない。
 - Tomo-e Gozen なら可能
- より長いタイムスケールでの可視光放射の探查も並行して実施 (間所君講演)



CHIME/FRBとの同時探査

- CHIMEの視野：E-W $\sim 2^\circ$, N-S $\sim 120^\circ$
 - 子午線に固定の視野で北天を走査
- Tomo-e Gozen は Dec $\sim 80^\circ$ で CHIME 視野と重なる位置を観測
 - 重複視野 $\sim 5 \text{ deg}^2$
 - HA $\pm 2.5 \text{ deg}$ (20分間隔)
- FRB検出頻度 by CHIME/FRB
 - $\sim 820 \text{ sky}^{-1}\text{day}^{-1}$ (CHIME/FRB collaboration 2021)
 - 重複視野内頻度 $\sim 1 \text{ per } 240 \text{ hrs}$
- 現在は Video Monitoring Survey の一部として実施
 - これまで150時間超
 - 重複視野内でのFRB発生はまだなし



Summary

- 木曽シュミット／Tomo-e Gozen の広視野・高時間分解能は他波長・他メッセンジャーとの連携観測においても強力
- 様々な観測チームとの連携観測体制が築かれ、幅広い突発天体種族を対象とした可視光対応天体探査が進められている。