

Tomo-e Gozenによる

突発天体

マルチメッセンジャー観測

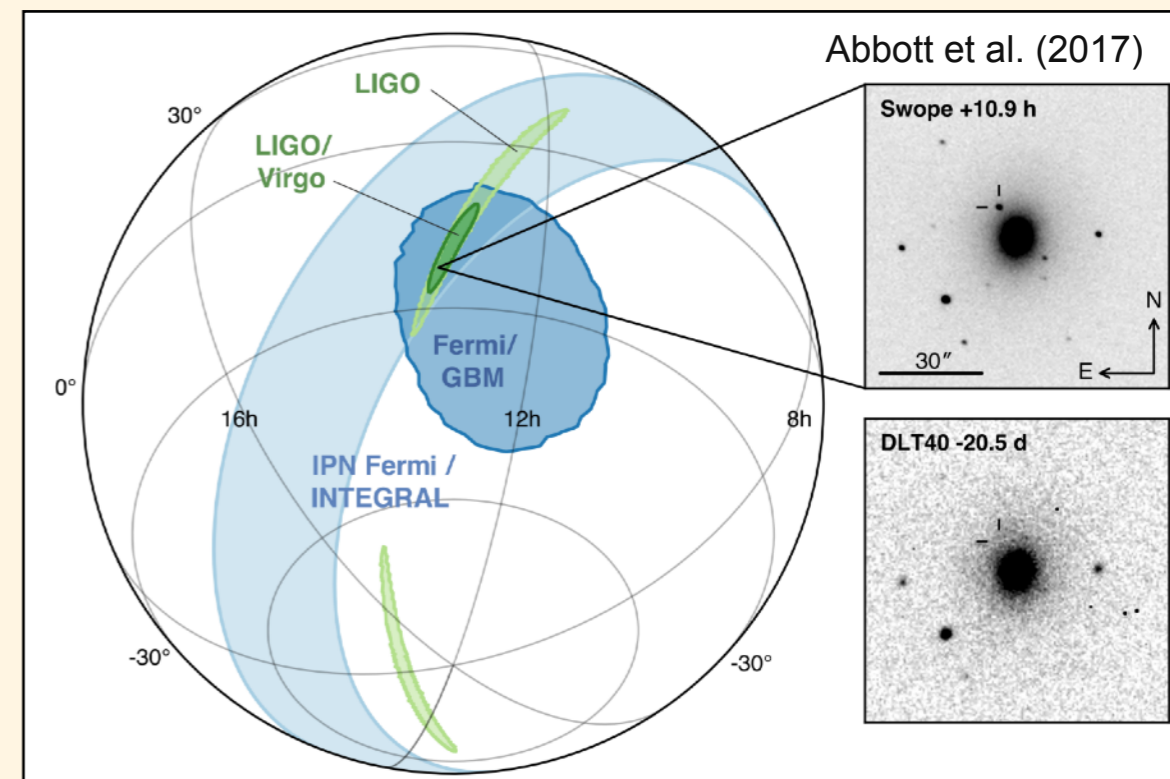
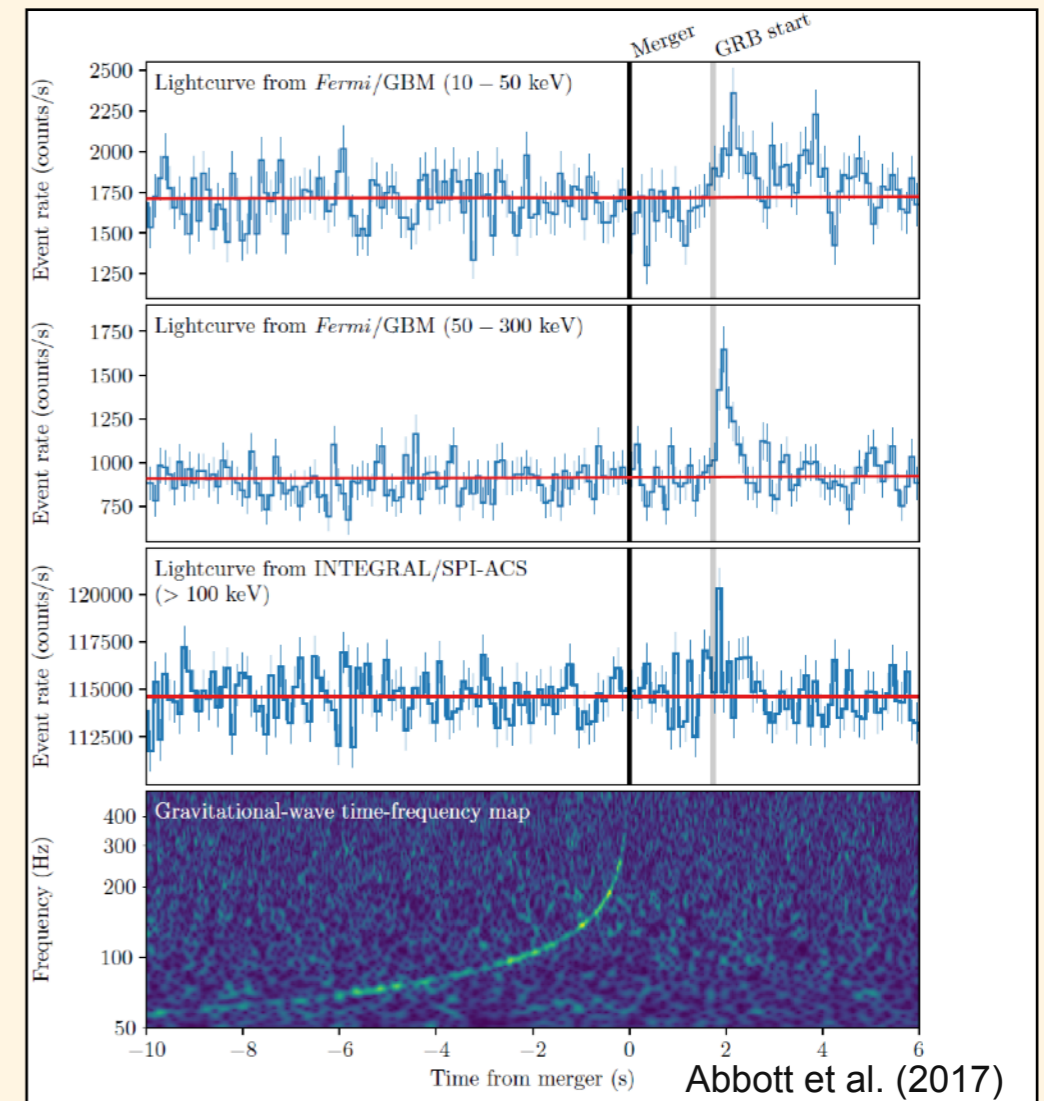
新納 悠 (東京大学木曾観測所)

on behalf of Tomo-e Gozen GWチーム,

Tomo-e Gozen FRBチーム

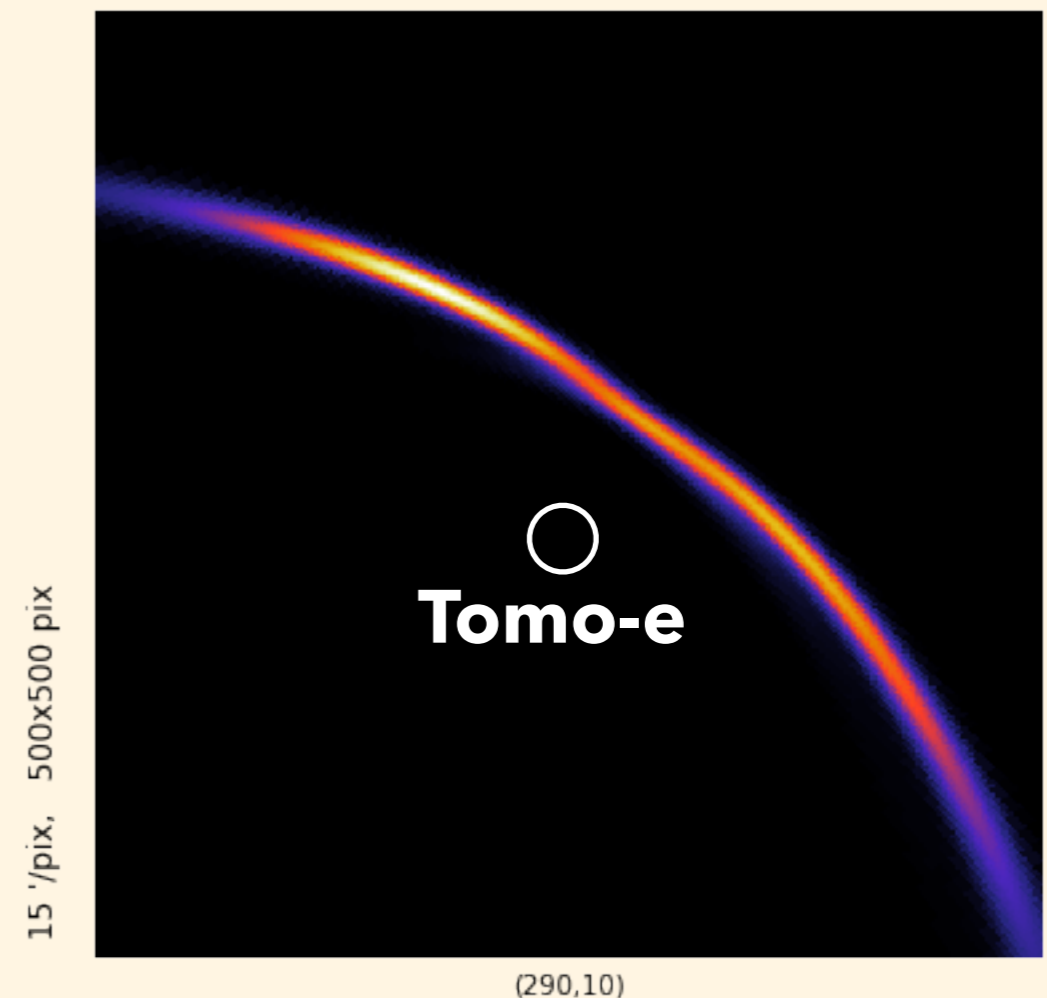
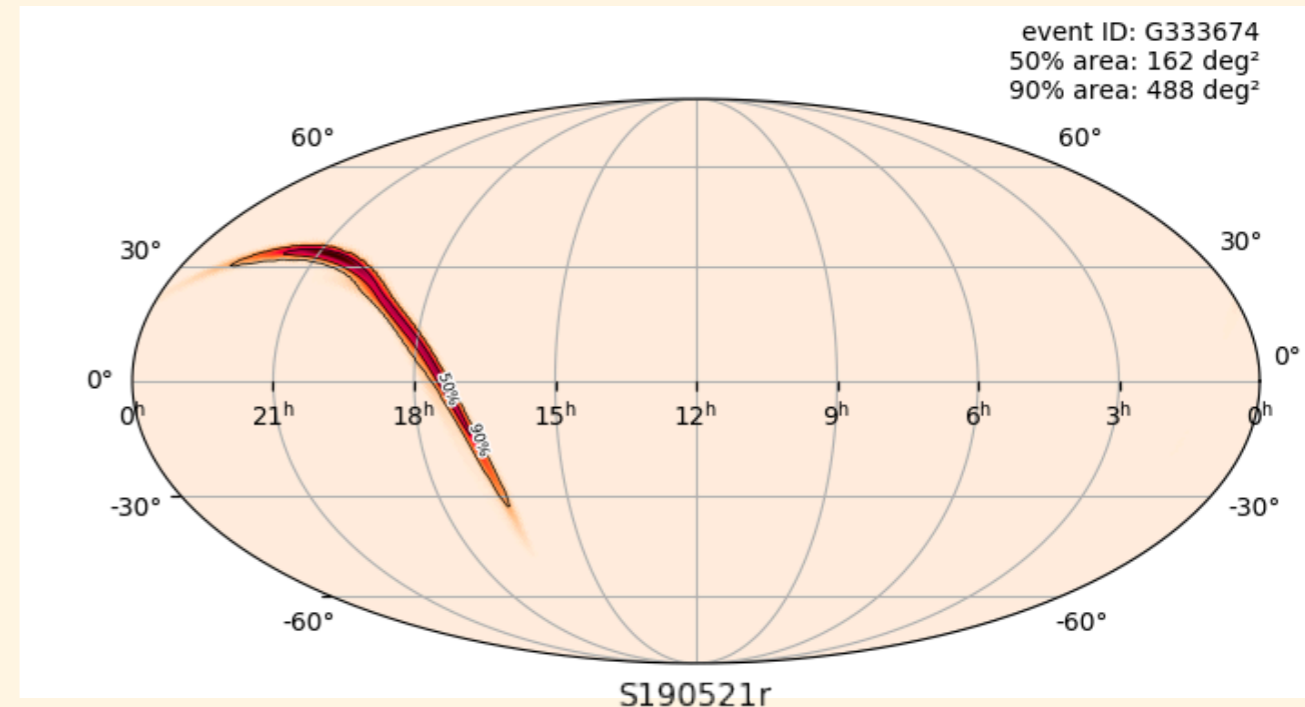
重力波イベントと 電磁波対応天体

- 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
 - 観測例を増やす
 - 発見したら分光することも重要



重力波イベントの追観測体制

- 重力波検出を受けてその到来方向を観測して対応天体を探す
- 木曾観測所では自動追観測&解析システムを運用
 - 初期光度曲線をとらえる
 - 分光能力のある観測所に速報 (J-GEM)
- 重力波位置決定精度
 - O3 (2019-) : 数百-数千 deg²
 - O4 (2023-) : 数十 deg²
 - Virgo が目標感度で参加した場合
- Tomo-e Gozen の視野 ~ 20 deg²
 - ディザーして gap を埋めると ~ 60 deg²



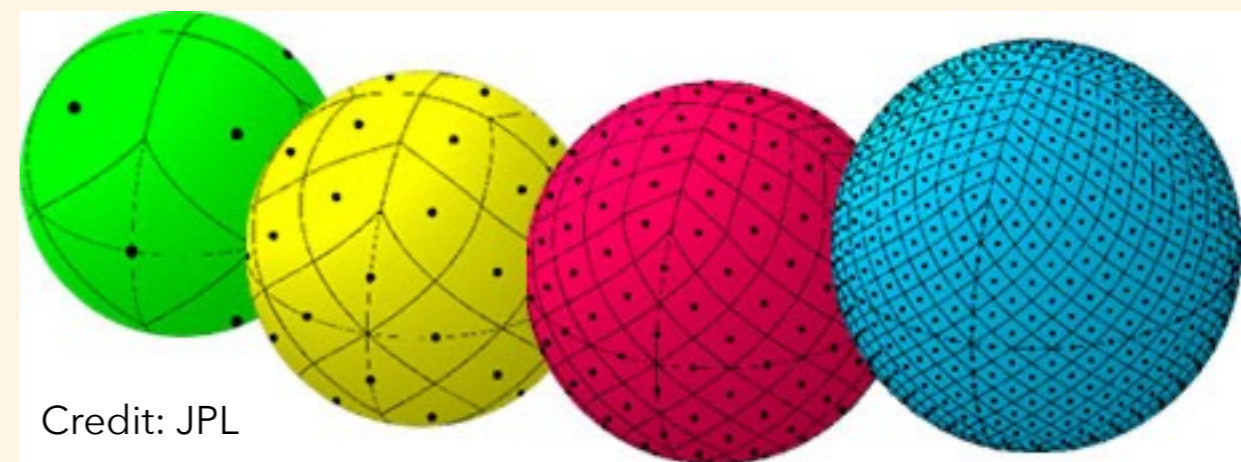
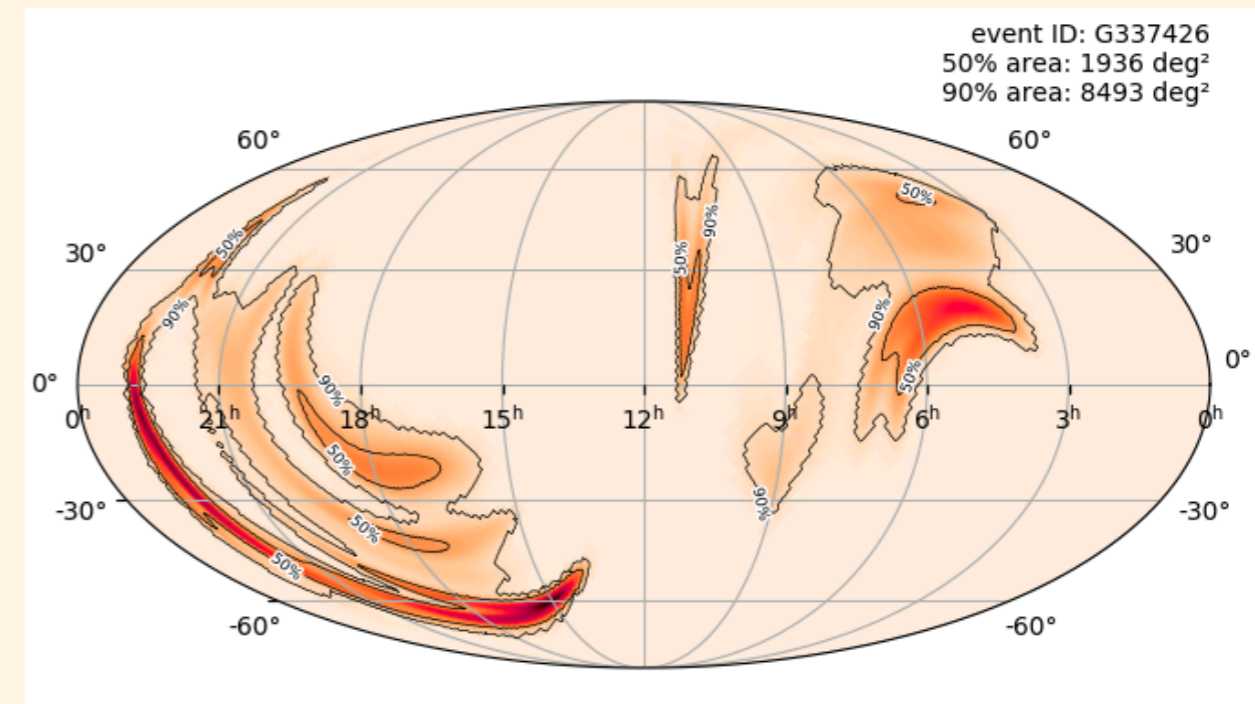
VOEvent alert と自動追観測

- LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration (LVK) のアラートはGCN経由
- 人間の介在しない自動観測には VOEvents 形式のアラートが便利
 - XMLで書かれた情報パッケージ
- VOEvent Transfer Protocol (VTP) で GCNのVTPサーバ (broker) に接続
 - PythonのGCNpyパッケージ
 - 冗長化のため2つの broker に同時に接続
- 常駐スクリプトがアラートを受けるとアラート内容に応じた観測レシピを生成してスケジューラシステムに投稿

```
<?xml version="1.0" ?>
<voe:VOEvent xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xmlns:voe="http://www.ivoa.net/xml/VOEvent/v2.0"
xsi:schemaLocation="http://www.ivoa.net/xml/VOEvent/v2.0 http://www.ivoa.net/xml/VOEvent/VOEvent-v2.0
version="2.0" role="test" ivorn="ivo://gwnet/gcn_sender#MS181220k-1-Preliminary">
  <Who>
    <Date>2018-12-20T10:16:03</Date>
    <Author>
      <contactName>LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration</contactName>
    </Author>
  </Who>
  <What>
    <Param name="Packet_Type" dataType="int" value="150">
      <Description>The Notice Type number is assigned/used within GCN, eg type=150 is an LVC_PRELI
    </Param>
    <Param name="internal" dataType="int" value="0">
      <Description>Indicates whether this event should be distributed to LSC/Virgo members only</Descri
    </Param>
    <Param name="Pkt_Ser_Num" dataType="string" value="1"/>
    <Param name="GraceID" dataType="string" value="MS181220k" ucd="meta.id">
      <Description>Identifier in GraceDB</Description>
    </Param>
    <Param name="AlertType" dataType="string" value="Preliminary" ucd="meta.version">
      <Description>VOEvent alert type</Description>
    </Param>
    <Param name="Retraction" dataType="int" value="0" ucd="meta.number">
      <Description>Set to 1 if the event is retracted, otherwise 0</Description>
    </Param>
    <Param name="HardwareInj" dataType="int" value="0" ucd="meta.number">
      <Description>Indicates that this event is a hardware injection if 1, no if 0</Description>
    </Param>
    <Param name="OpenAlert" dataType="int" value="1" ucd="meta.number">
      <Description>Indicates that this event is an open alert if 1, no if 0</Description>
    </Param>
    <Param name="EventPage" dataType="string" value="https://gracedb.ligo.org/superevents/MS181220
      <Description>Web page for evolving status of this GW candidate</Description>
    </Param>
    <Param name="Instruments" dataType="string" value="H1,L1" ucd="meta.code">
      <Description>List of instruments used in analysis to identify this event</Description>
    </Param>
```

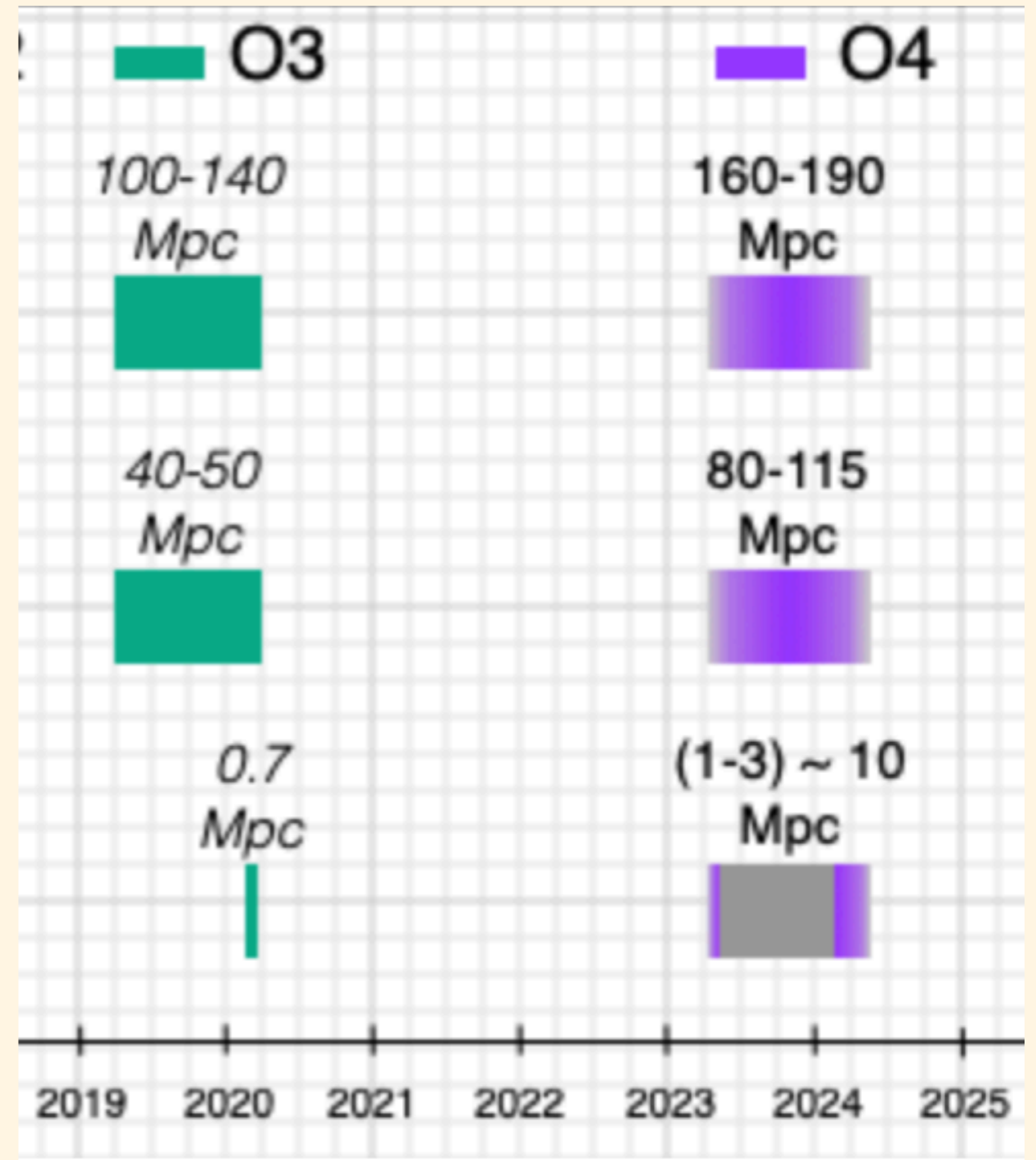
Probability Skymap と HEALPix

- 重力波源位置の誤差領域は複雑で表現しにくい
- LVCのアラートでは誤差領域をHEALPixで記述
 - fitsファイルとしてオンラインデータベース (GraceDb) に置きアラート文に URL
- HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelization)
 - 球面を等面積のセルに分割して番号を振っておくことで、球面上の分布を一次元ベクトルで表現。
- 処理を速くするため NSIDE = 64 (1ピクセル ~ 1 deg²) に degrade
 - アラート受信後10-20秒程度で処理



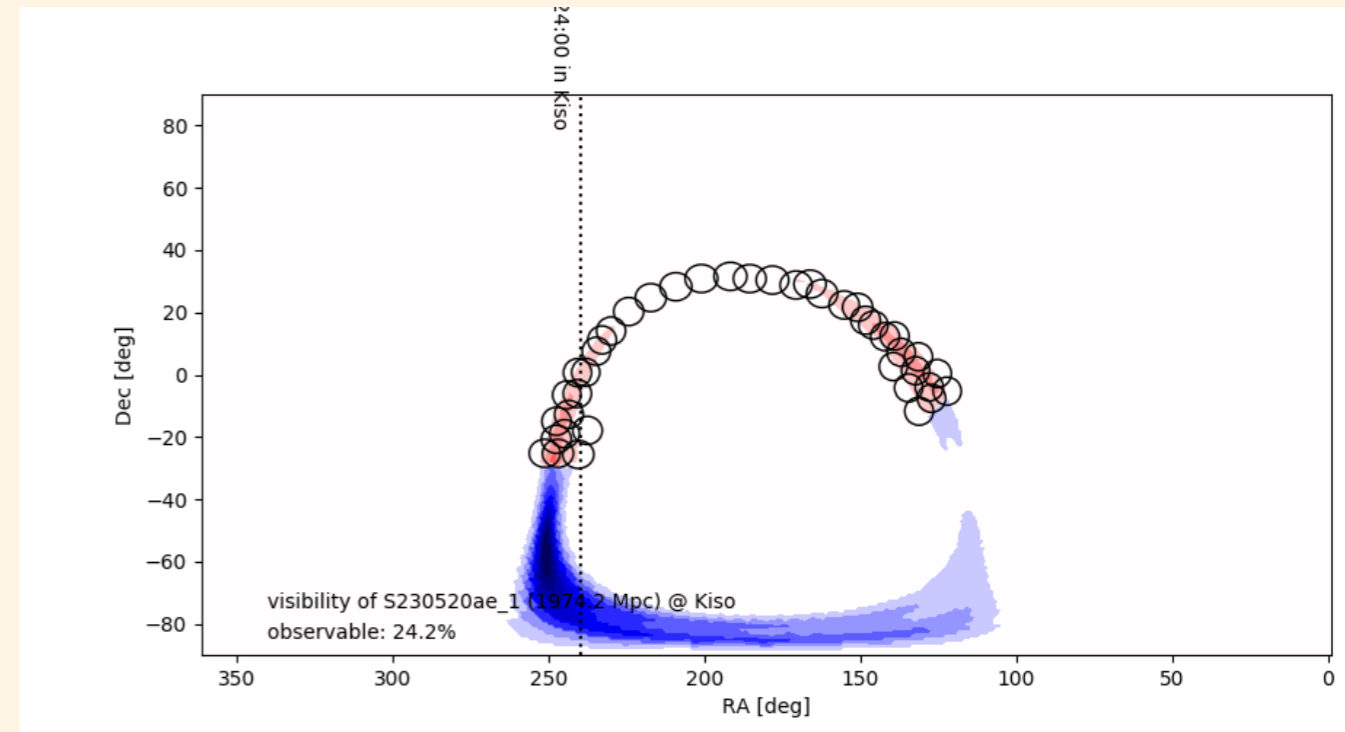
○4観測状況

- 4/26 から1ヶ月 engineering run、5/24 から正式に開始。
 - Virgo は目標感度を大幅に下回っており参加が遅れる
- O4 でのイベント頻度予想
 - $\sim O3 \times 3.4 \sim 200 \text{ yr}^{-1}$
- 全てのイベントを追観測するには多すぎる
 - BNS or NS-BH or 位置決定が良く距離の近いBBH
 - $\sim 40 \text{ yr}^{-1}$
 - 観測時間 $\sim 2 \text{ hr/event}$
 - 位置決定精度の良い場合のみ深く
- Low significance event は考慮しない



○4観測状況

- 5/30時点で4 イベント中 Tomo-e
では1 イベントを追観測
- S230520ae
 - BBH @ ~ 2000 Mpc
 - 誤差領域 ~ 3424.3 deg² (99%)
 - 木曾から観測可能 ~ 1744.1
deg² (24%)
 - 検出候補天体数 ~ 2400
 - 移動天体が多い (?)
 - ~ 1-2 deg⁻²
 - 数十平方度になれば目視
確認も難しくない



7903117	206.7604119, 29.9231051	22.50	<input type="checkbox"/>	202305aaecx	GW follow-up (O4)	78821656						4	4	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked
7903116	214.3195853, 26.7673979	22.50	<input type="checkbox"/>	202305aaecw	GW follow-up (O4)	78821645						2	2	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked
7903115	243.1244291, -20.3902846	18.27	<input type="checkbox"/>	202305aaecv	GW follow-up (O4)	78821606						3	3	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked
7903114	246.2154676, -17.1603084	22.50	<input type="checkbox"/>	202305aaecu	GW follow-up (O4)	78821603						4	4	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked
7903113	246.4572224, -17.3950791	18.23	<input type="checkbox"/>	202305aaect	GW follow-up (O4)	78828557						2	2	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked
7903112	242.3524301, -16.1682179	20.28	<input type="checkbox"/>	202305aaecs	GW follow-up (O4)	78828555						2	2	SN	AGN	SN/AGN	Star	Unclear	Bogus	Checked

自動追観測の拡張

- MAXI alert への対応（酒向さん、瀧田さん）
- GRB alert (Swift, Fermi) への対応（Dainottiさん等）
- IceCube ニュートリノへの対応（田中さん等）
- Fast Radio Burst への対応（新納）

Fast Radio Burst の観測

HPPW: 4.6 ms

Lorimer et al. (2007)

time →

- Fast Radio Burst とは
 - 数ミリ秒の継続時間の電波突発現象
 - 初発見はLorimer+ (2007) のFRB 010824 (Parkes 電波望遠鏡アーカイブデータ)
 - ~ 15年で > 600天体発見
 - CHIME による発見 > 500 FRBs



Parkes電波望遠鏡

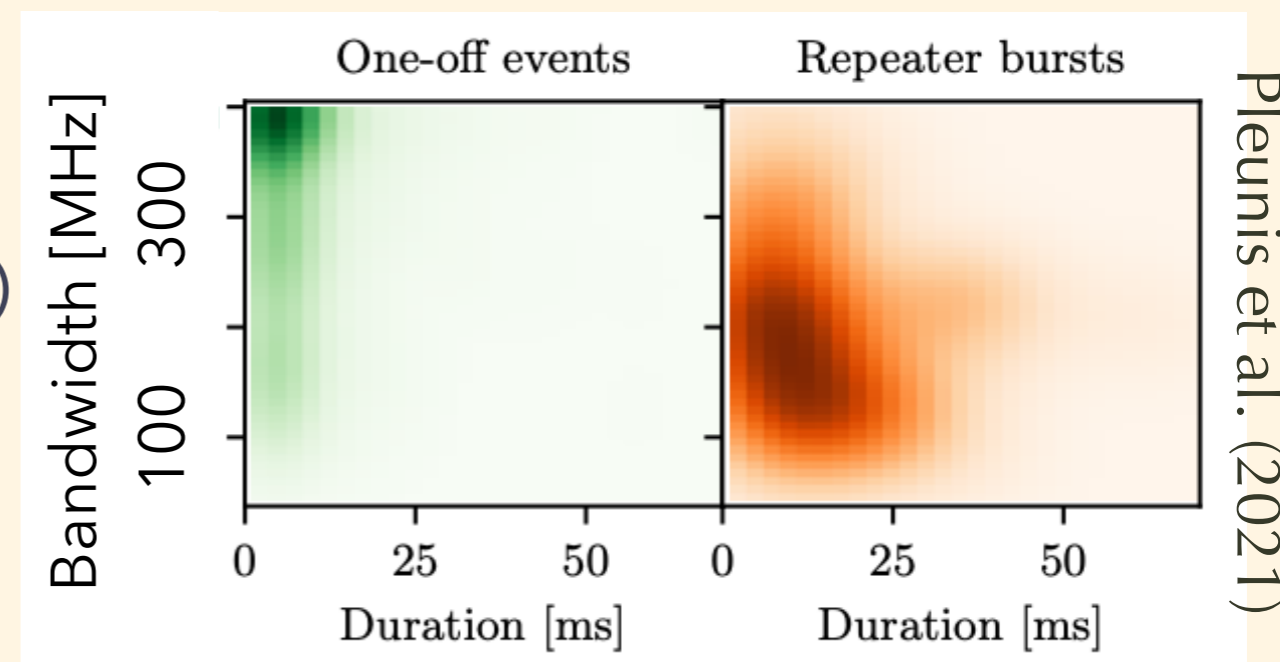
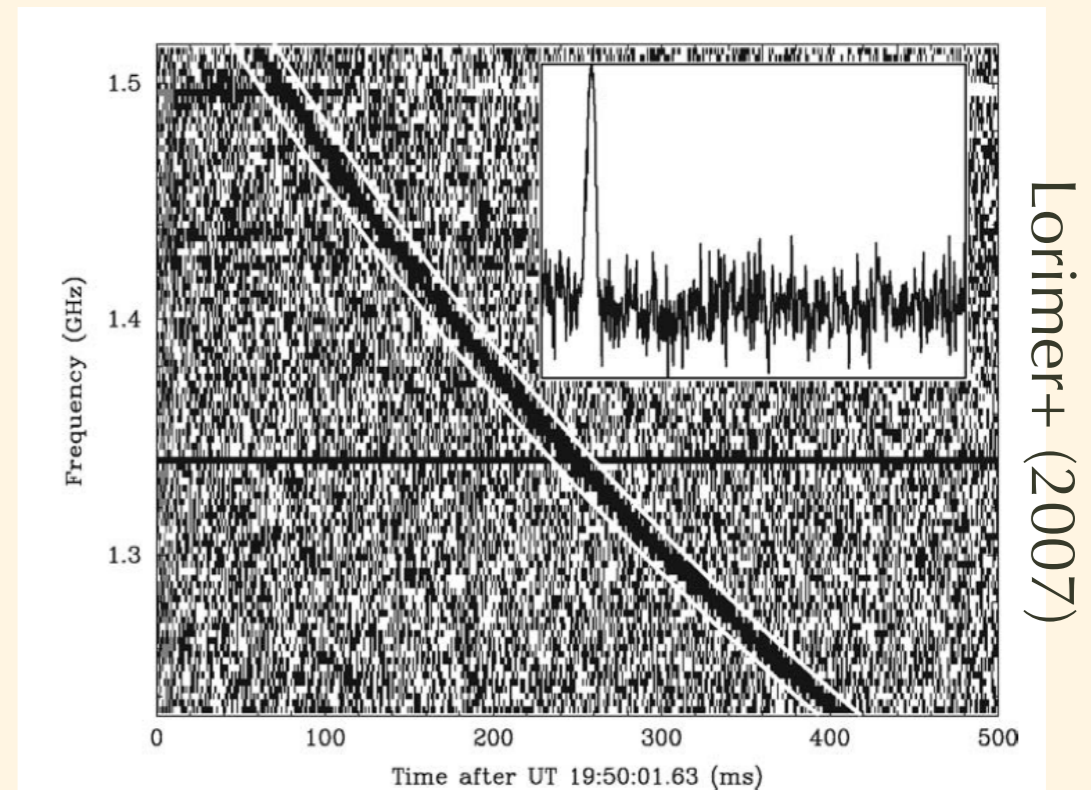


CHIME

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

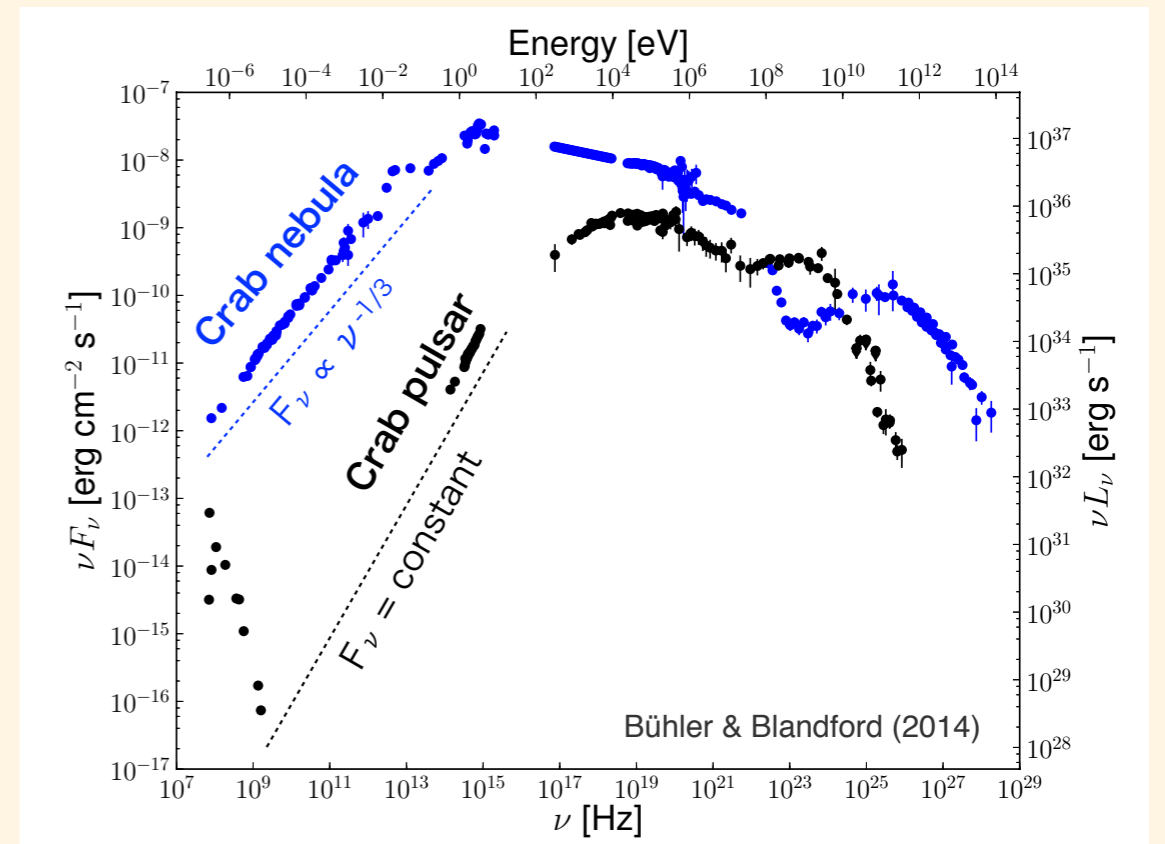
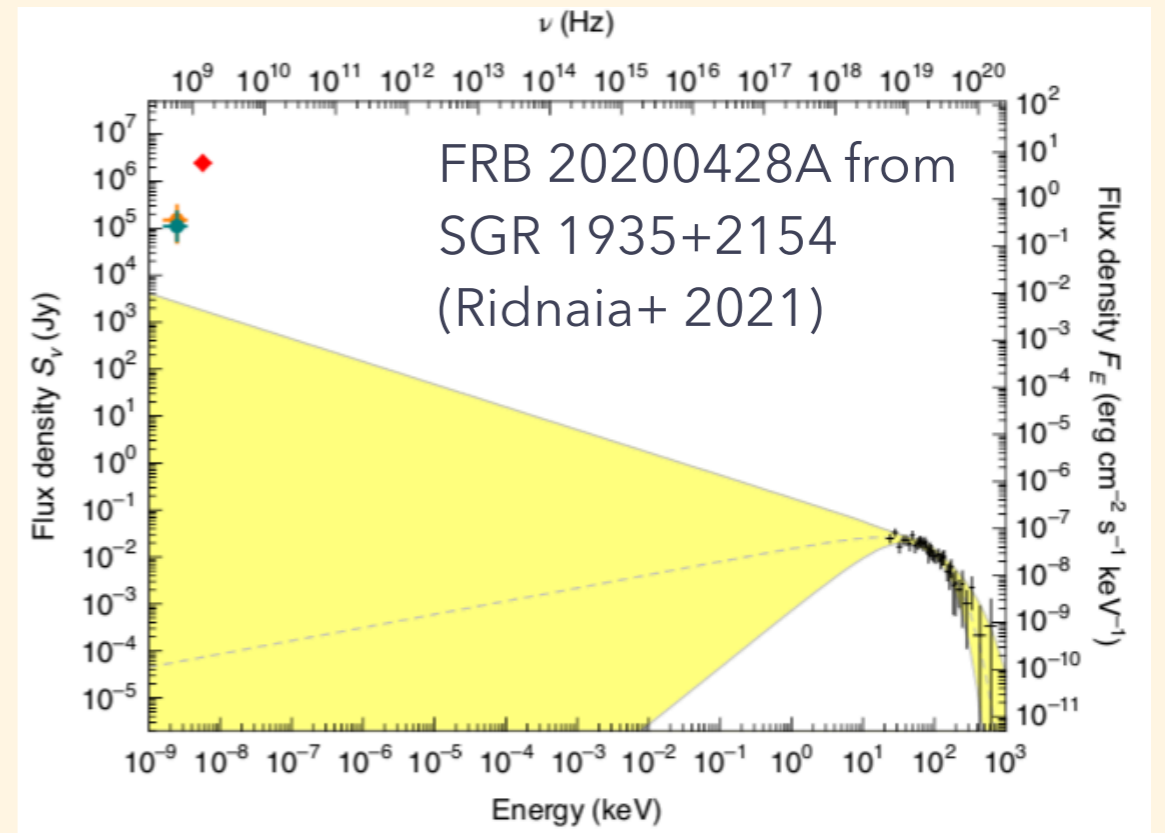
Fast Radio Burst の性質

- Dispersion measure (DM, 自由電子柱密度) が大きい
 - 銀河系外の起源を示唆 (@ $z \sim 0.1-2$)
 - → 一部のイベントで母銀河同定
- 一部のFRBは repeat burst を見せる
 - 大部分のFRBは repeat しない
 - repeat するものは電波パルスの時間幅が広く、スペクトル範囲は狭い。
 - “FRB” は複数種族の天体現象？
- 銀河系内のマグネター (SGR 1935+2154) で FRB like burst (FRB 20200428A)
 - 一部の FRB はマグネター由来か？



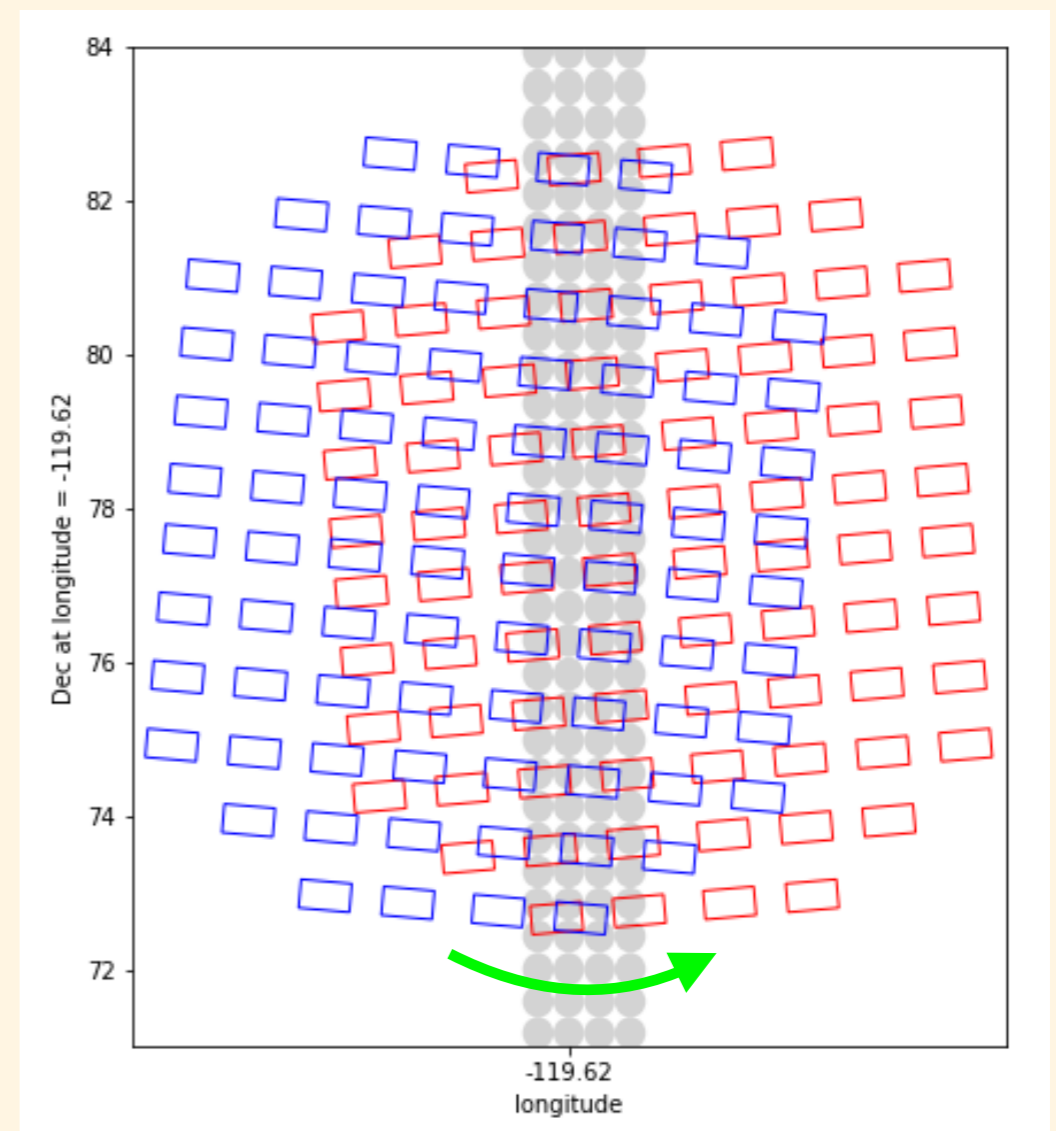
FRB の他波長での放射

- SGR 1935+2154 burst の際には同時にX線成分も検出
- 他波長成分はあり得る
- 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 突発現象を
探査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



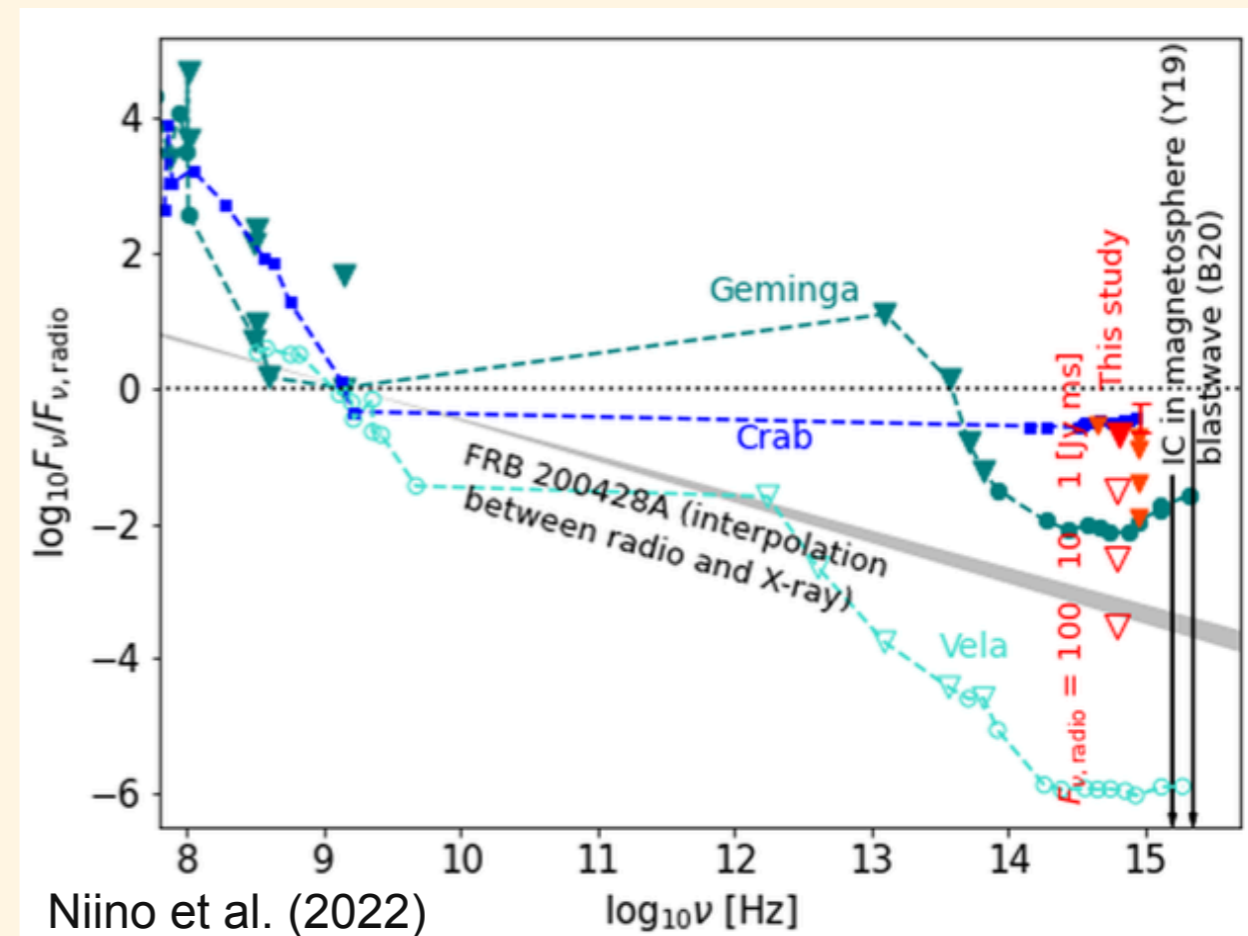
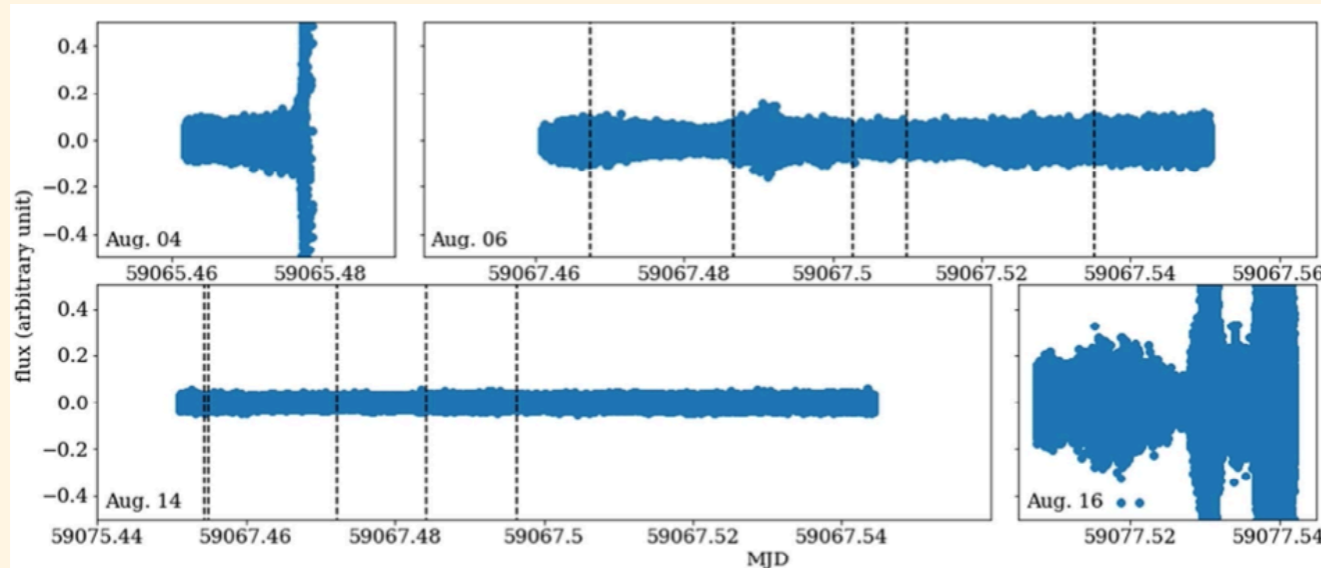
CHIME/FRBとの同時探査

- FoV of CHIME $\sim 250 \text{ deg}^2$
 - E-W $\sim 2^\circ$, N-S $\sim 120^\circ$
- Tomo-e Gozen observes the meridian of the CHIME location at Dec $\sim 80^\circ$.
 - overlapped FoV $\sim 5 \text{ deg}^2$
 - HA $\pm 2.5 \text{ deg}$ (20 min period)
- rate of FRBs detectable by CHIME/FRB
 - $\sim 820 \text{ sky}^{-1}\text{day}^{-1}$ (CHIME/FRB collaboration 2021)
 - expected event rate in the overlapped FoV $\sim 1 \text{ per } 240 \text{ hrs}$



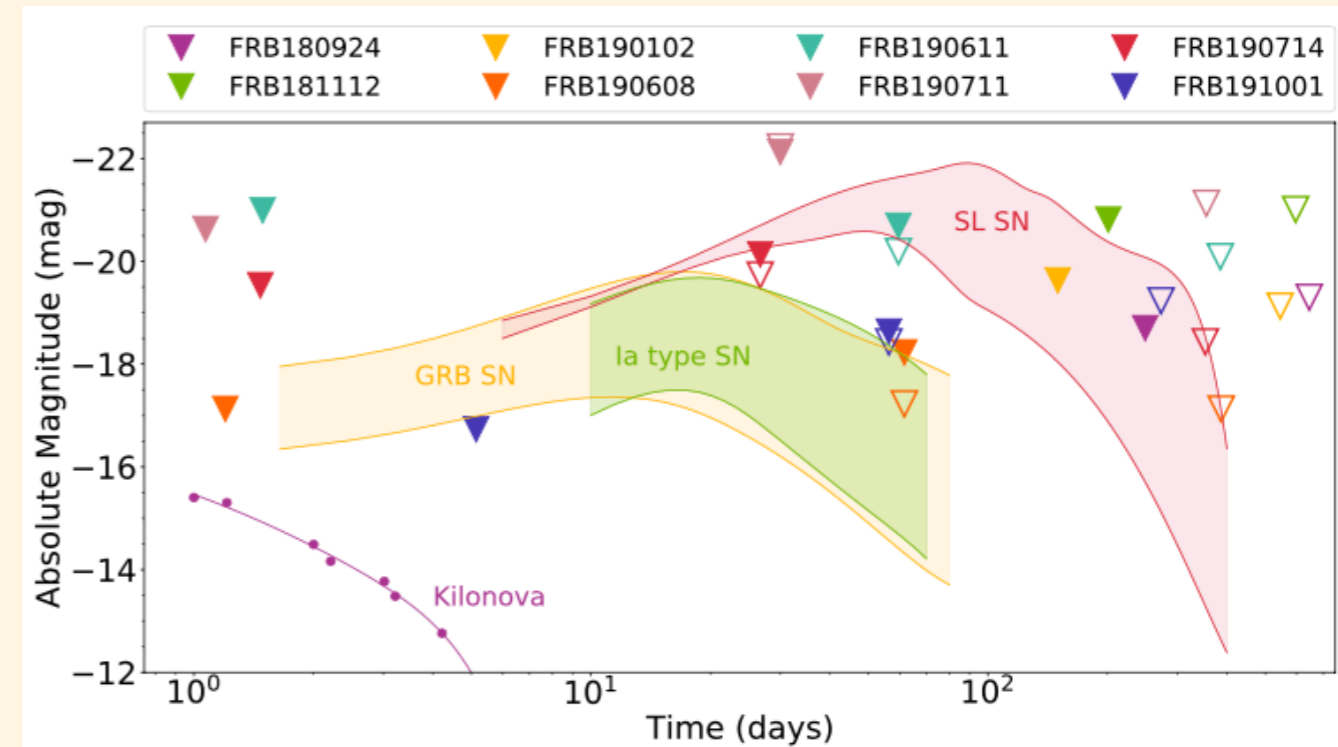
Repeating FRB の監視観測

- 座標が既知の repeating FRB
 - 部分読み出しでより高速の観測ができる
- Niino et al. (2022)
 - repeating FRB 20190520B のFAST との同時観測
 - 短時間可視光パルスに対する高い感度を実証
- 岡山のTriCCSと連携して継続



FRB の追観測

- 非同時放射を探す追観測もさまざまな波長で行われている
- 可視光対応天体に対する制限は SN Ia 程度
 - 近傍イベントを追観測したい
- CHIME の FRB 発見 $\sim 500 \text{ yr}^{-1}$
 - $z < 0.1$ の割合 $\sim 1\%$ (DM分布から推定)
- CHIME の位置決定精度
 - $\sim a \text{ few} \times 10 \text{ arcmin}$
 - 追観測には広視野が必要



Núñez+ (2021)

自動追観測に組み込めば
新しいパラメータスペース
に切り込める

Summary

- 木曾シュミット / 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
- 木曾シュミット / Tomo-e Gozen の特性を活かした観測が実施・準備中