

# Tomo-e Gozenによる 重力波フォロワーアツプ観測 実施状況

新納 悠 (東京大学 RESCEU/IoA)

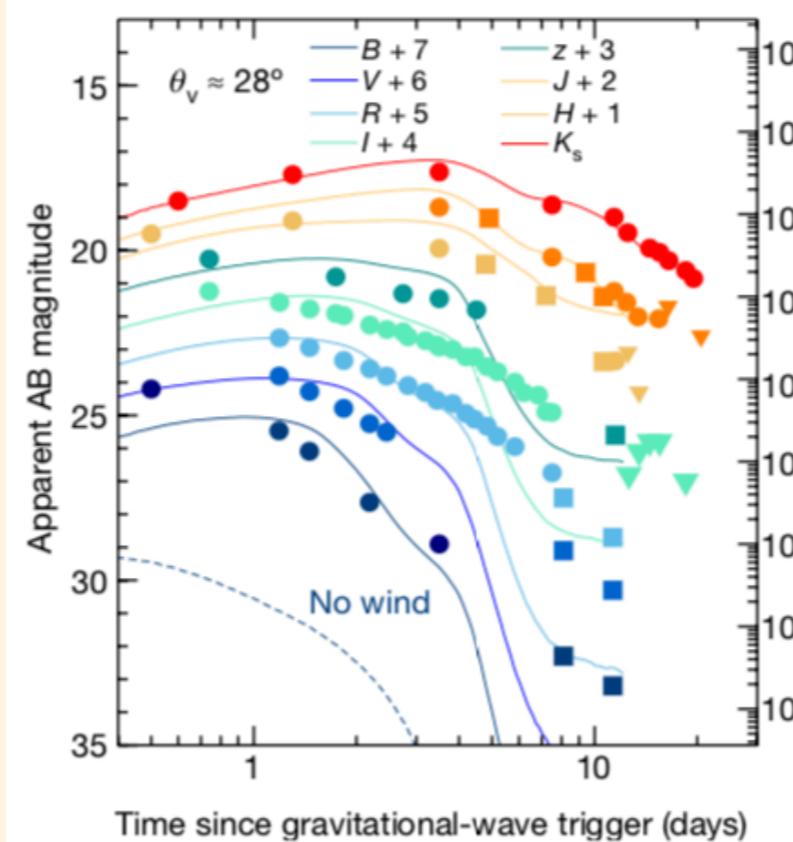
on behalf of the Tomo-e Gozen collaboration

木曾シュミットシンポジウム2019

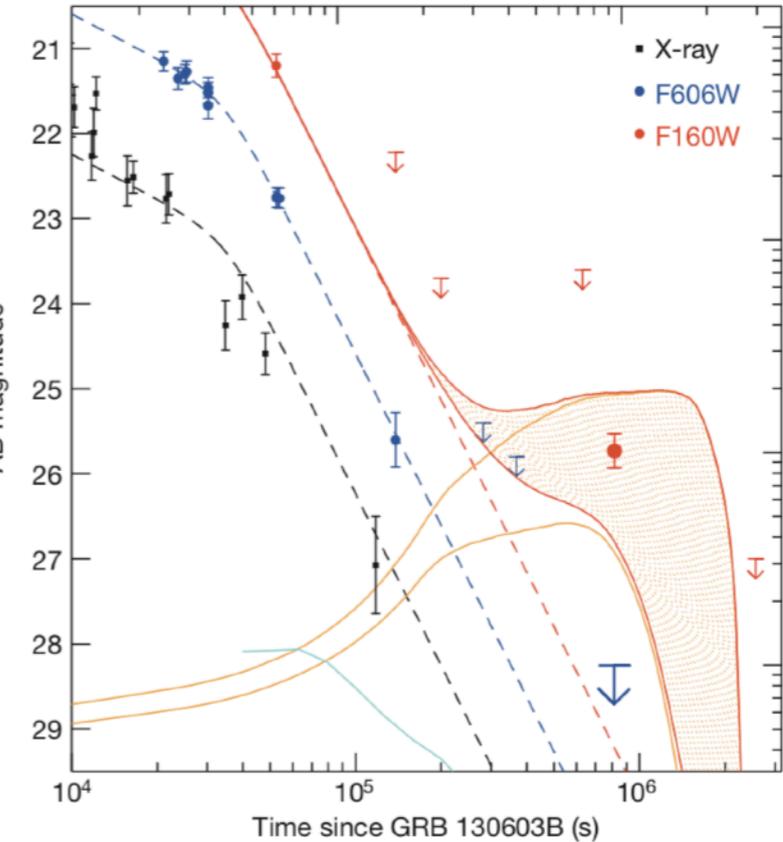
# 重力波イベントの 可視光対応天体

# 重力波イベントの 可視光対応天体

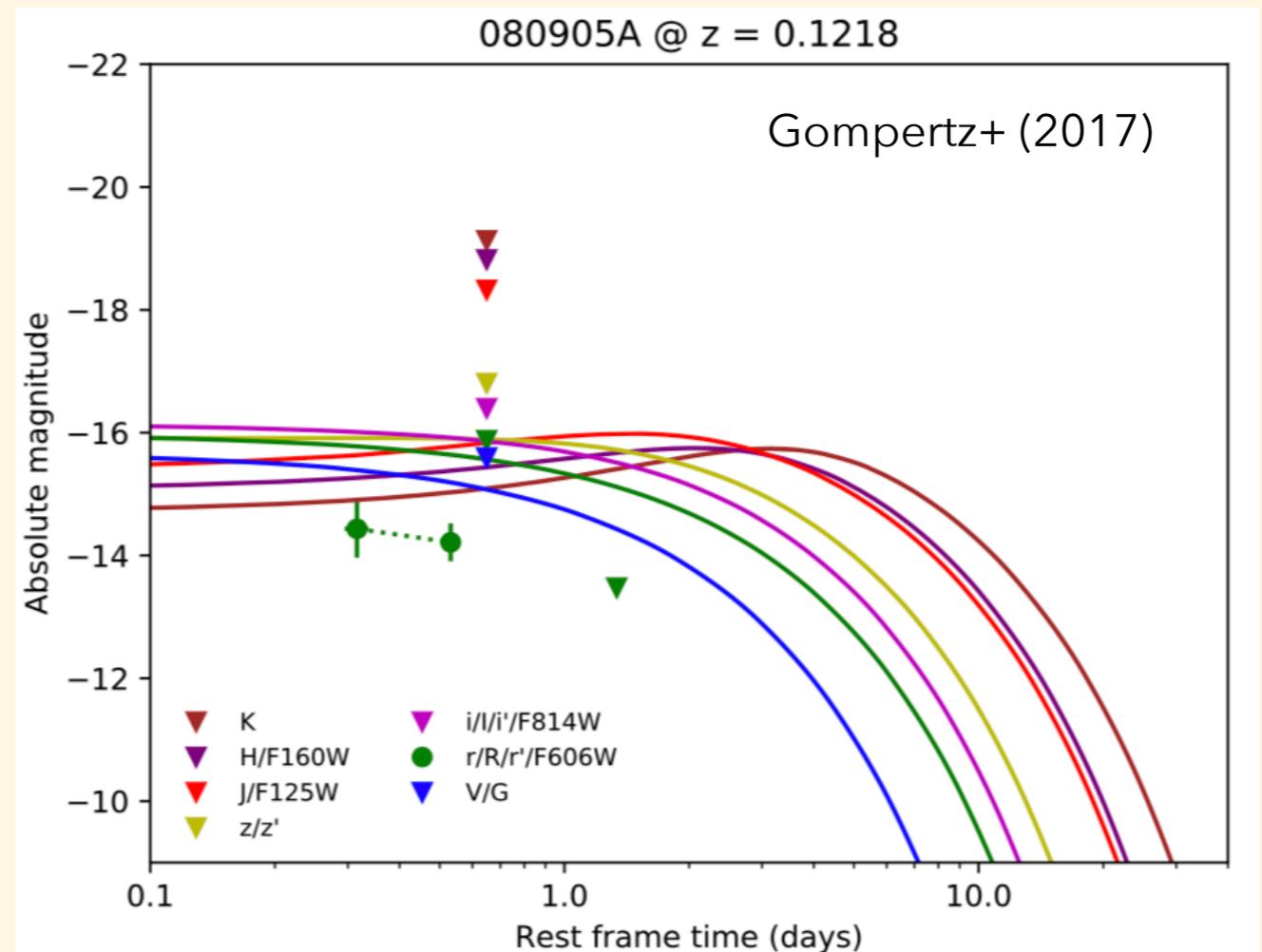
- Binary Neutron-Star (BNS) 重力波対応天体 AT2017gfo
  - GW170817に付随
  - 光度曲線やスペクトルが得られている唯一のkilonova
    - 他にはshort GRBに付随した候補が数例
  - 全てのkilonovaが AT2017gfo like とは限らない
- NS-BHの対応天体は未確認
  - 発見頻度が低い
- Binary Blackhole (BBH) はおそらく光らない



AT2018gfo, Troja+ (2017)



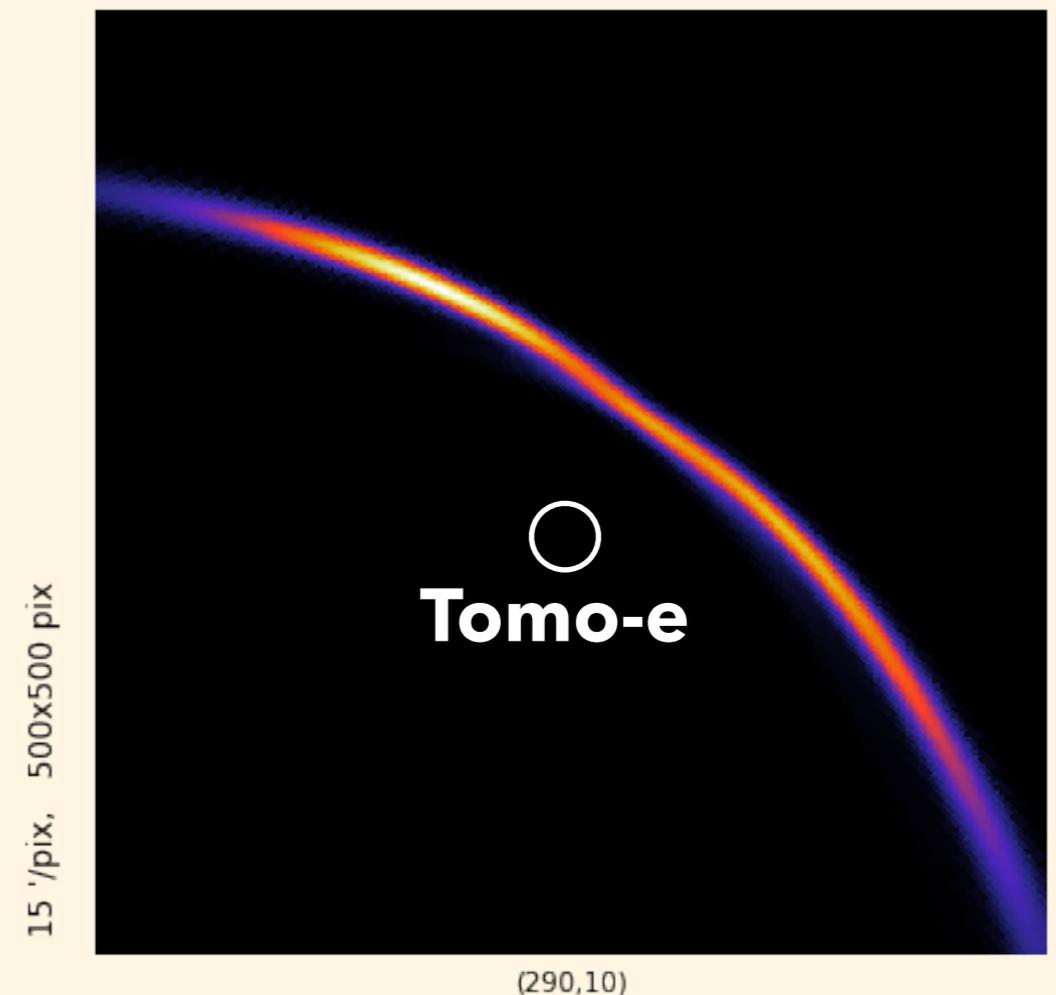
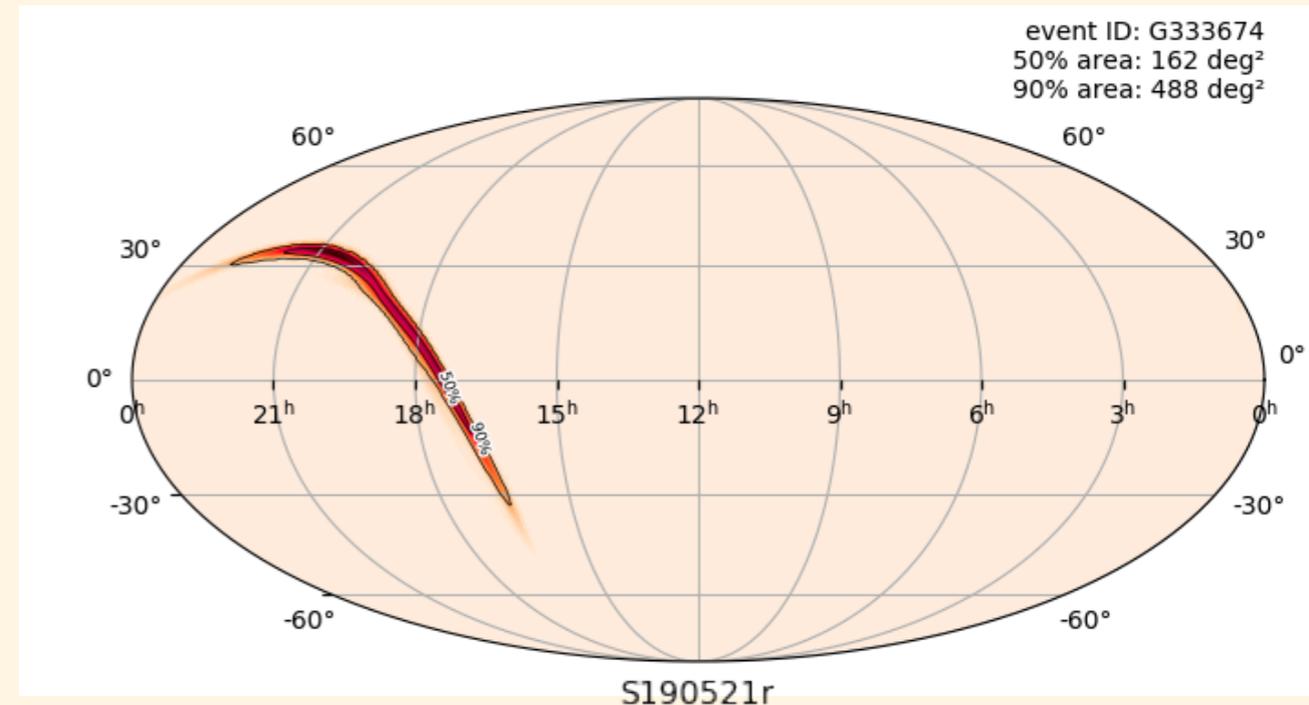
GRB 130603b, Tanvir+ (2013)



Gompertz+ (2017)

# Tomo-e Gozenでの追観測

- O3の重力波位置決定精度
  - ~ 数100 deg<sup>2</sup> (90%-tile)
- Tomo-e Gozen
  - 視野: 20 deg<sup>2</sup>
    - 4x4 dither: ~ 60 deg<sup>2</sup> (重複有)
  - 速い読み出し



木曾観測所  
重力波自動フォローアップ  
観測システム

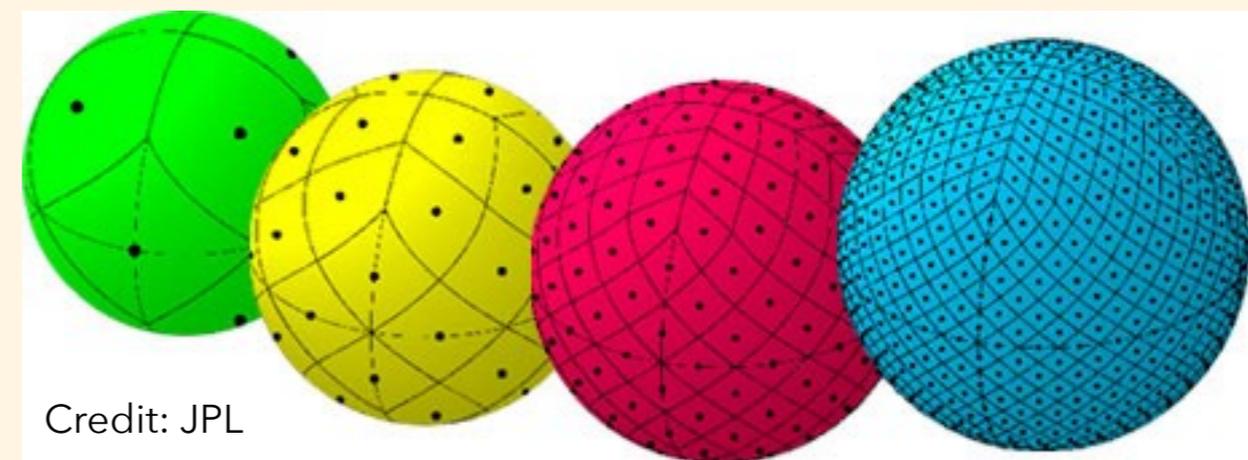
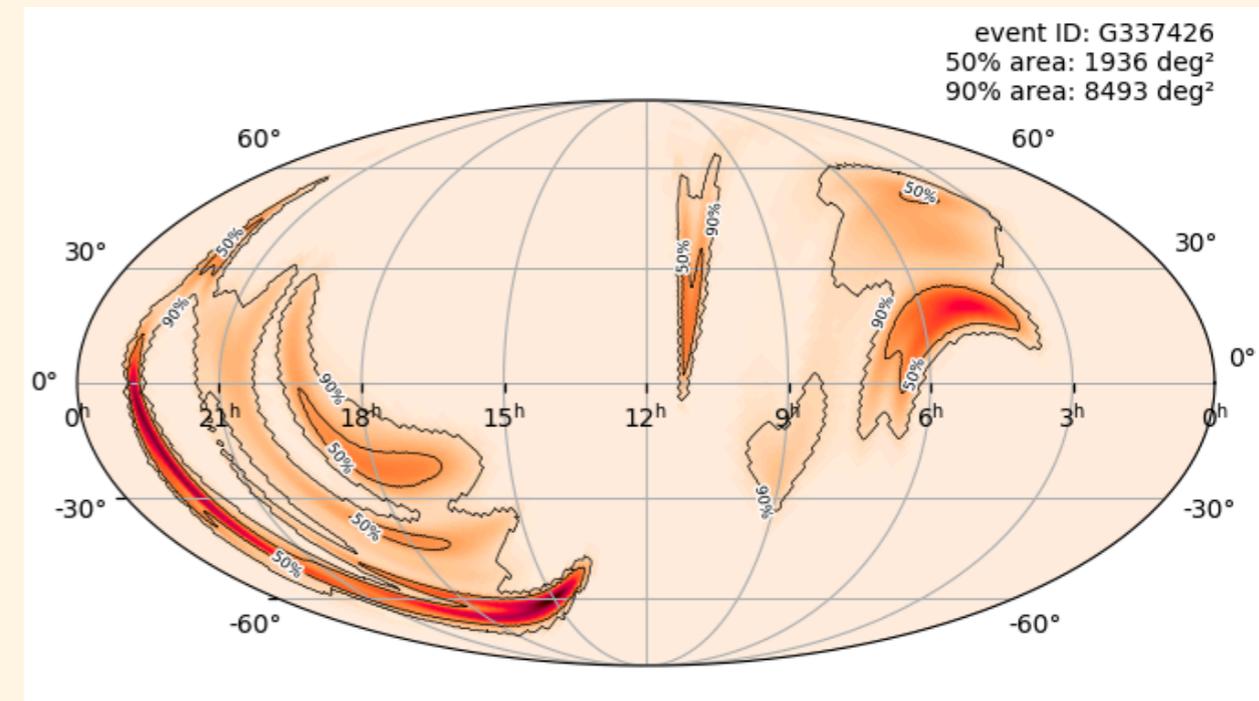
# 重力波アラートとVOEvents

- 現在は重力波検出器の O3 run (4/1開始)
  - アラートはいつ来るかわからない
- LIGO/Virgo Collaboration (LVC) からの重力波イベントアラートは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パッケージを使用
  - 本曾では冗長化のため4つの broker に同時に接続

```
<?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_PRELIMINARY</Description>
    </Param>
    <Param name="internal" dataType="int" value="0">
      <Description>Indicates whether this event should be distributed to LSC/Virgo members only</Description>
    </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/MS181220k-1-Preliminary" ucd="meta.url">
      <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>
  </What>
</voe:VOEvent>
```

# 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 deg<sup>2</sup>) にdegrade
  - アラート受信後10-20秒程度



# VLC関係のVOEventパケット受信

# アラート処理

## (O3初期暫定)

受信時に夜ならば  $t_{obs} = now$ 、昼ならば  $t_{obs} = \text{日没時刻} + 45\text{分}$

AlertType == Retraction

AlertType == Preliminary, Initial, or Update

当夜の予定ターゲットならば取り消し、以前のターゲットがあれば戻す。

### 露光時間決定

HasNS  $\geq 0.05$  : 距離  $\leq 50$  Mpc で6分、 $> 50$  Mpc で16分

HasNS  $< 0.05$  : 99%tile area  $< 180$  deg<sup>2</sup> で16分、 $\geq$  で6分

### 優先順位判断 (処理中のアラートとそれまでの予定ターゲットが異なるとき)

1) FAR  $< 10^{-8}$  Hz を優先、2) HasNS  $\geq 0.05$  を優先、3) 露光時間の短い物を優先

上記の条件が同じなら先着順

処理中のアラートが高い優先順位を持つ場合は当夜の予定ターゲットとして記録 (元の予定ターゲットも記録する)

### 重力波源情報更新 (処理中のアラートとそれまでの予定ターゲットが同じとき)

誤差領域に違いがあれば予定ターゲットを取り消して、処理中のアラートを新しい予定ターゲットにする。違いがなければ予定ターゲットはそのまま

### ポインティング計算 (優先順位的に観測予定でない場合visibility確認のみ)

観測領域が95%未満 &  $t_{obs}$  から薄明まで1 pointing 分以上時間がある。

Yes

No:  $t_{obs}$  を1時間進める

$t_{obs}$  において誤差領域の5%以上が観測可能

$t_{obs}$  を1 pointing分進める

Yes

観測可能な未観測領域からprobabilityの高い場所にpointingを定め視野でカバーする範囲を観測領域として記録 (詳細は次ページ)

No

露光ごとにレシピファイルを作成、各pointing毎の開始予定時刻までサブプロセスが待機。

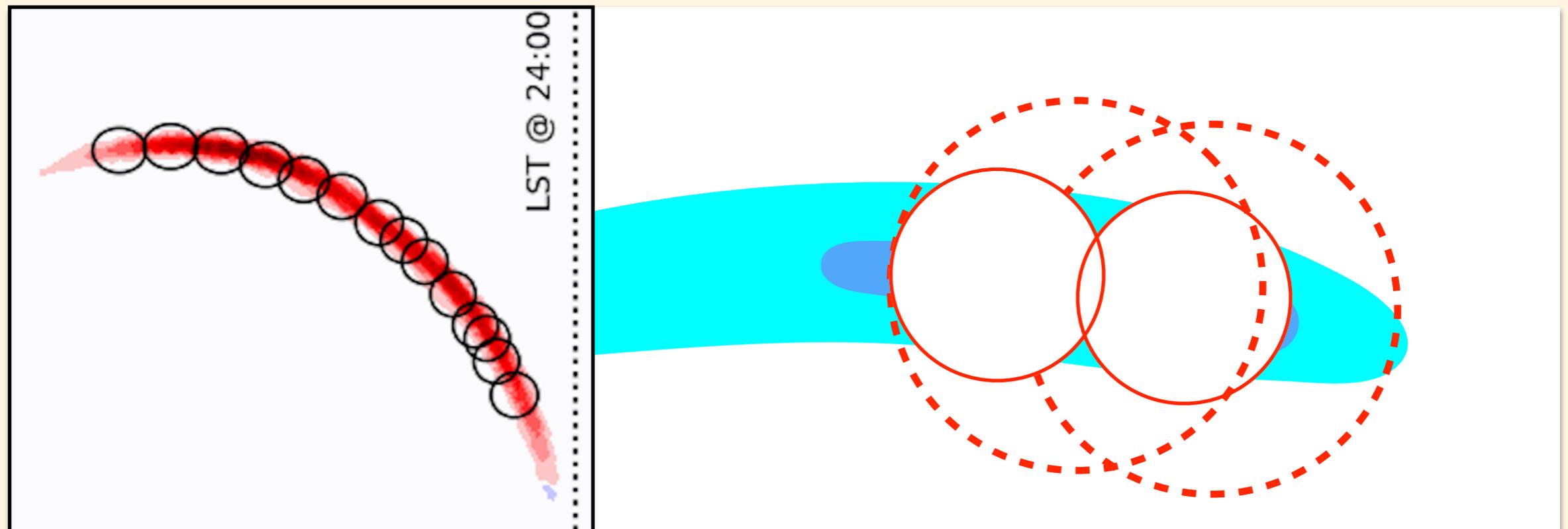
予定時刻が来たらサブプロセスは予定ターゲットが変更されていないか確認して観測レシピファイルをキューに送る。予定ターゲットが変わっていたら何もしない。

アラート処理完了!

※ Mock alert 関連の箇所は省略

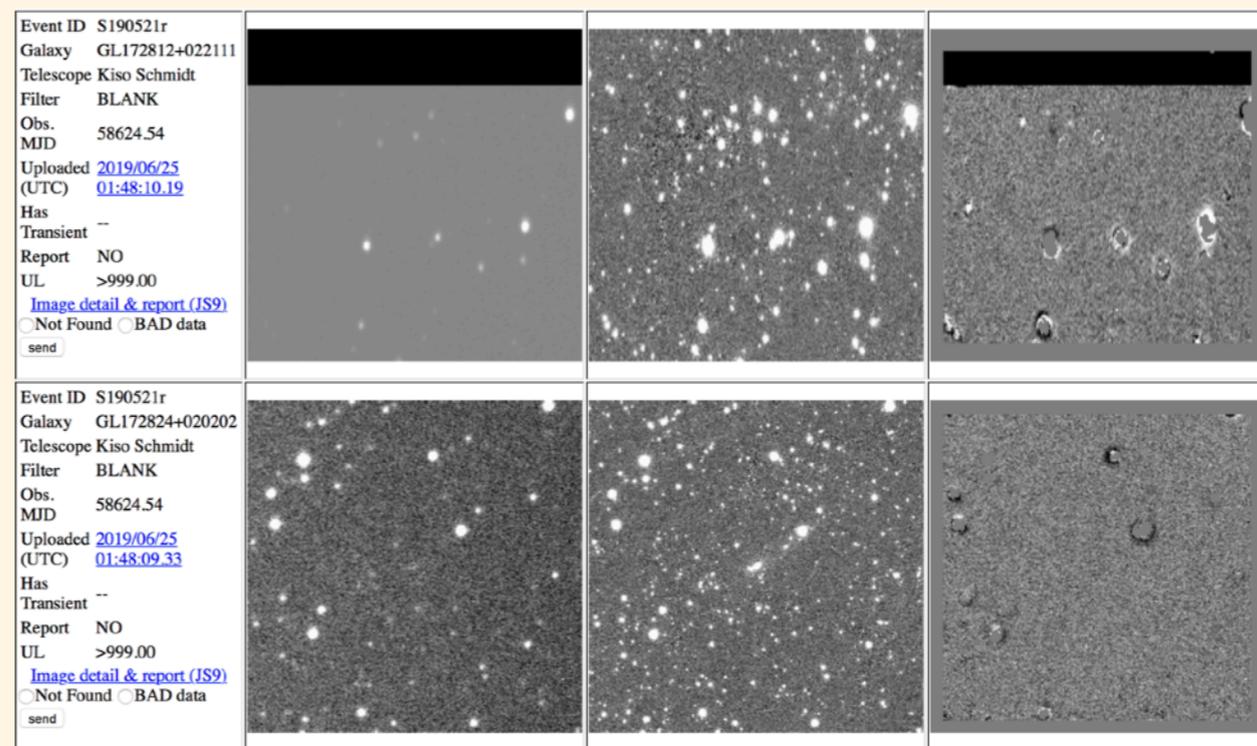
# ポインティング決定

- 予め HEALPix skymap から Probability 99%-tile 領域を取り出す
- Tomo-e の視野は直径 9 deg の円として扱う
- 観測可能な未観測領域の内最も Probability の高い点 ( $P_0$ ) を選択
- $P_0$  から 8 deg 以内の未観測領域の二次元分布を調べ、その重心をポインティング座標 ( $P_1$ ) とする
  - $P_0$  と重心が 3.6 deg 以上なら  $P_1$  は  $P_0$  から 3.6 deg の点
- $P_1$  から 4.5 deg 以内の未観測領域を観測領域として記録



- 6分 (or 16分) 積分を1分露光 (1 Hz × 60 frames) の集まりで取得
- 変動天体探査は超新星探査パイプラインと共用
  - 6分 (or 16分) の画像をスタックした上で超新星探査と同様にreference frameとの差分を取る。
  - 積分を前半と後半に分けて両方で検出し信頼性を高める
  - GLADEカタログ銀河を切り出してJ-GEMのサーバに送る

transientId (variable) project (rawId)	Name	Ra, Dec Date (magnitude)	Ref	New	Sub	SDSS DR15 Ref	PS1 gri 3- color Ref	paramcand cnncand	mark
764912 (2804277) GW follow- up (O3) (2651585)	<b>201905accke</b> 2019-05-21 <a href="#">show</a>	255.40881 , -19.12076						2	<b>Rapid</b> <b>Young?</b> SN? AGN? Variable? MP? NEO? Unclear Bogus Checked <input type="checkbox"/> Bogus <input checked="" type="checkbox"/> Checked
764910 (2804269) GW follow- up (O3) (2651585)	<b>201905acckc</b> 2019-05-21 <a href="#">show</a>	255.23277 , -19.14058						2	<b>Rapid</b> <b>Young?</b> SN? AGN? Variable? MP? NEO? Unclear Bogus Checked <input type="checkbox"/> Bogus <input checked="" type="checkbox"/> Checked



↑Tomo-e transient server    J-GEM image server →

# フォローアップ観測実施状況

# 03のアラート一覧 (7/7まで)

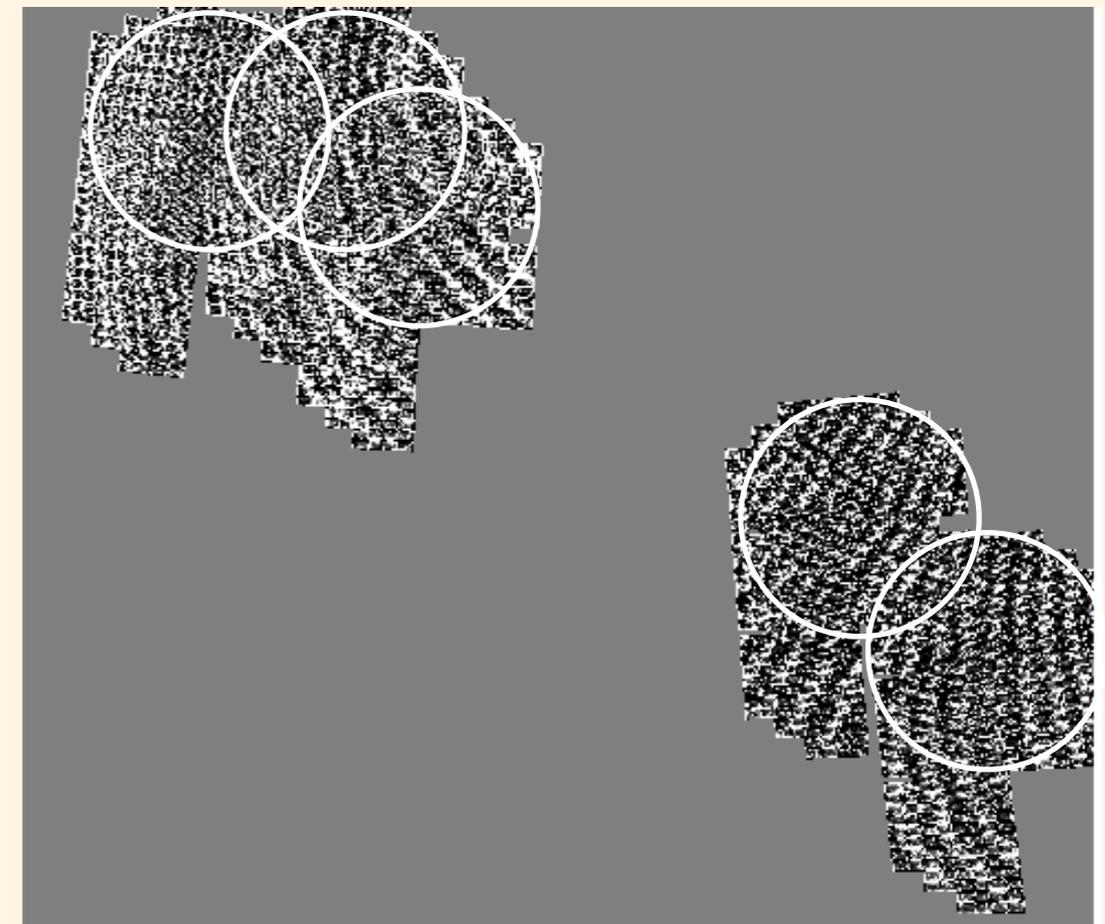
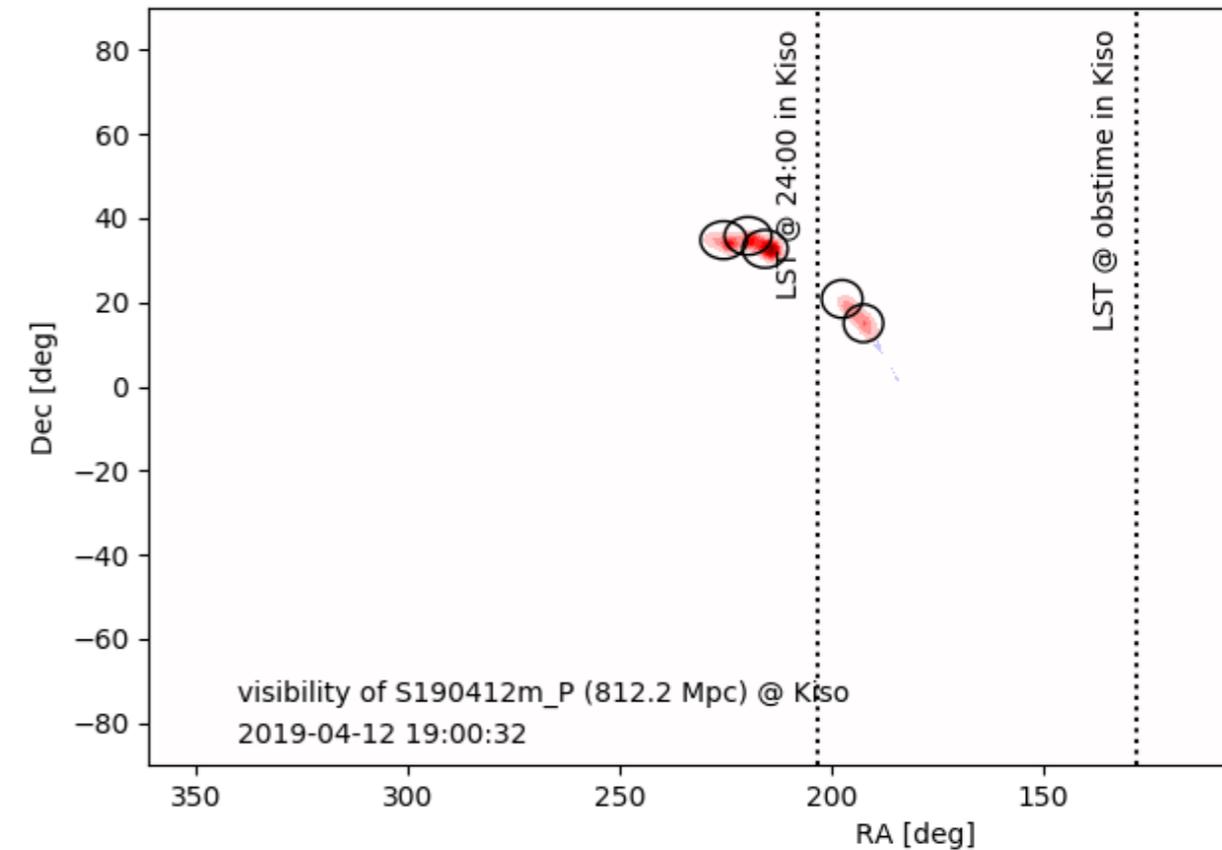
event name	alert date (JST)	
S190408an	4/9	BBH, 03初, <b>明け方に 手動観測</b>
S190412m	4/12	BBH, <b>390 deg<sup>2</sup> (88.5%)</b>
S190405ar	4/13	<b>false alert</b>
S190421ar	4/23	BBH, 観測無し (偽っ ぽかった)
S190425z	4/25	<b>BNS, 観測するも天候 は不良</b>
S190426c	4/27	<b>possible NS-BH, 北 極を避けて180 deg<sup>2</sup> (13.1%)</b>
S190503bf	5/4	BBH, 南天
S190510g	5/10	<b>BNS, 誤差領域変化大, 2 pointing (~ 1%)</b>
S190512at	5/13	BBH, 悪天候
S190513bm	5/14	BBH, 悪天候

event name	alert date (JST)	
S190517h	5/17	BBH, 主に南天
S190518bb	5/19	<b>false alert</b>
S190519bj	5/20	BBH, 悪天候
S190521g	5/21	BBH, 主に南天
S190521r	5/21	BBH, 銀河面, <b>観測する も天候は不良</b>
S190524q	5/24	<b>false alert</b>
S190602aq	6/3	BBH, 主に南天
S190630ag	7/1	BBH, 主に南天
S190701ah	7/2	BBH, 南天
S190706ai	7/7	BBH, 悪天候
S190707q	7/7	BBH, 主に南天

- 03開始 (4/1) から21 アラート
  - BBH: 15, NS有: 3, 偽: 3
  - Tomo-e観測: 6

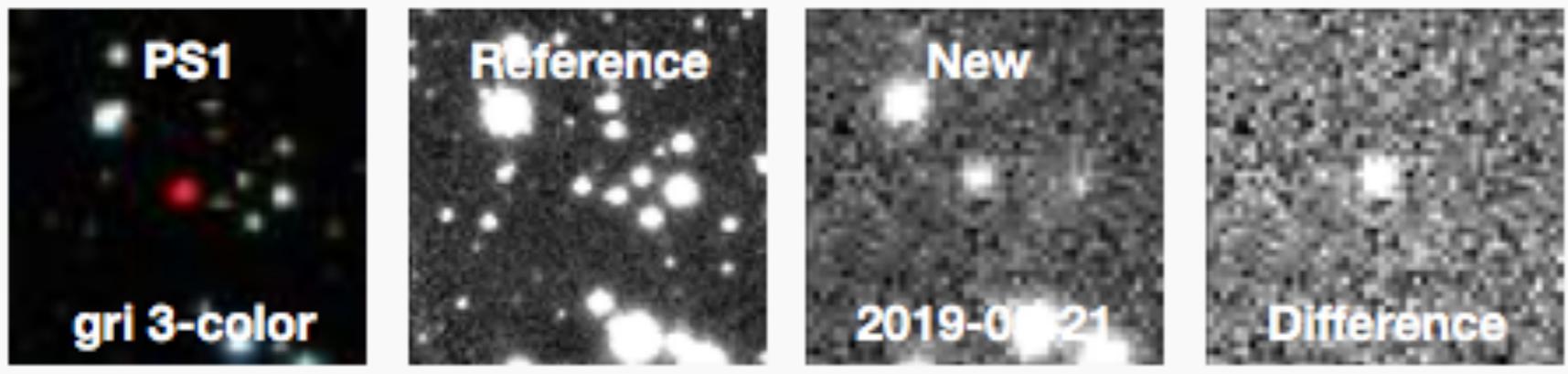
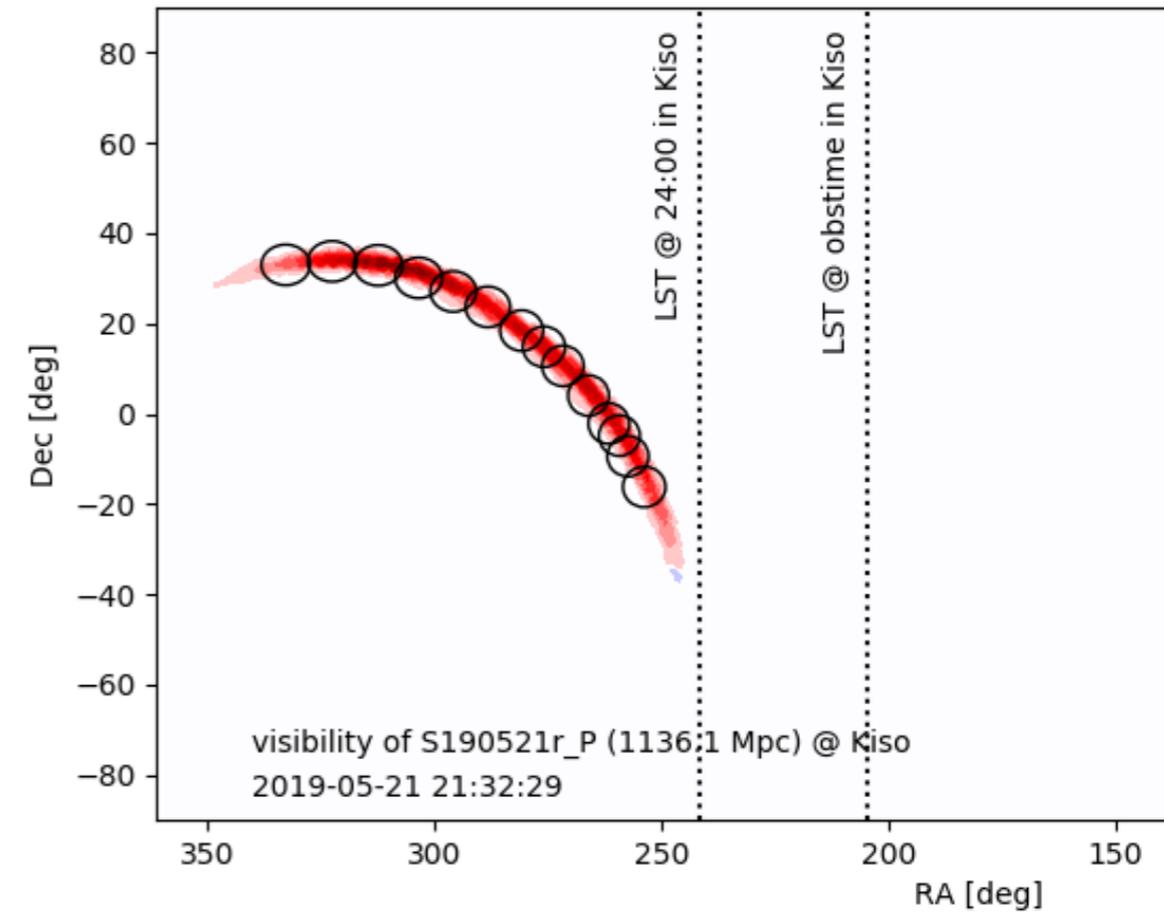
# GW190412m

- 5 pointings
  - 390 deg<sup>2</sup> (88.5%)
- 4 分露光
  - 限界等級: ~ 18.5 mag
- SN pipeline 変動天体候補 : 164
  - 超新星混入期待数 : ~ 3 (YN, Totani, & Okumura 2014)

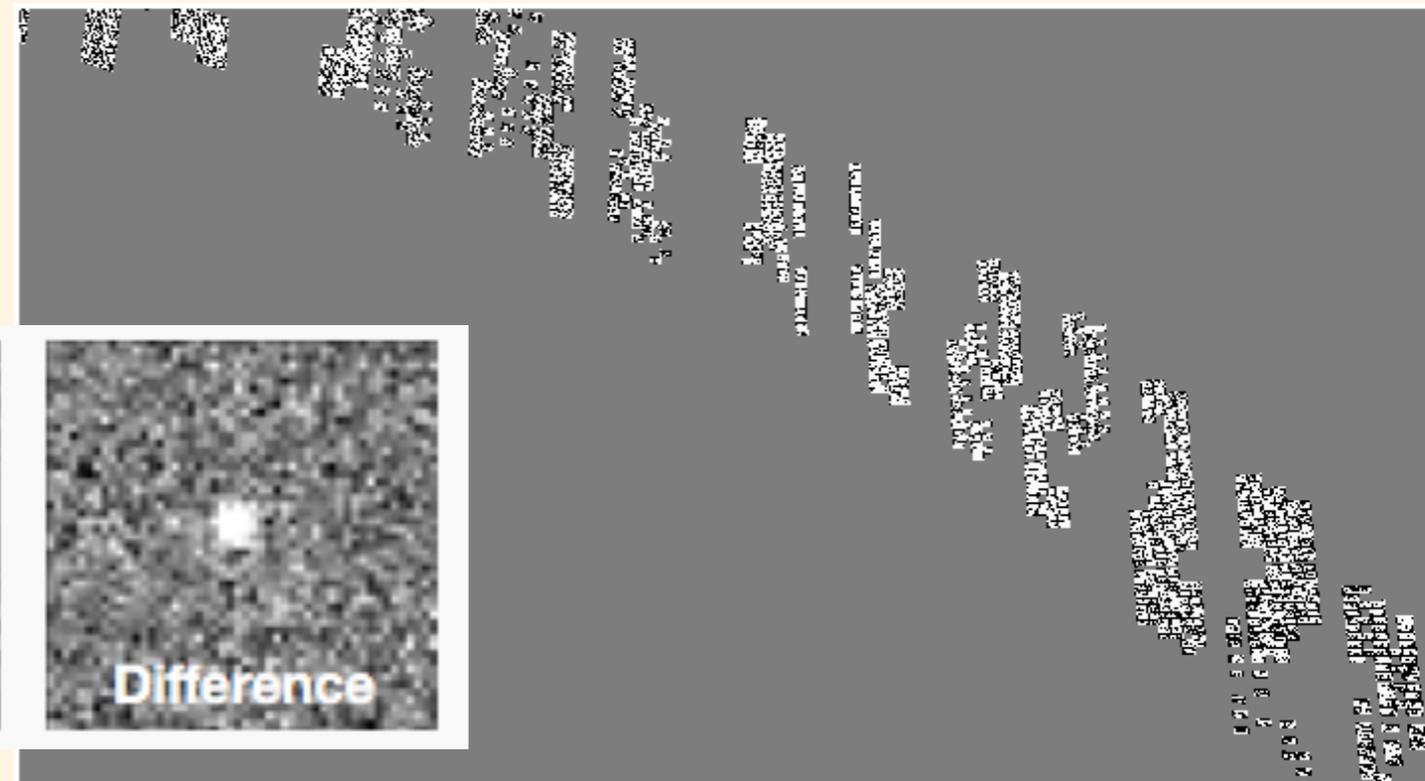


# GW190521r

- 14 pointings
  - 729 deg<sup>2</sup> (91%)
- 曇り
- 6分露光
  - 限界等級: ~ 16 mag?
- SN pipeline 変動天体候補: 42
  - 銀河面のため赤い星が多い?



201905acbbe



# 現状とこれから

- 基本的なフォローアップ観測体制はO3開始までに整えることができた。
- 引き続きアップデート中
  - 自動キュー観測への対応等
  - 超新星パイプラインのアップデート
- 今のところコンディションには恵まれない場合が多いが、秋からに期待したい。