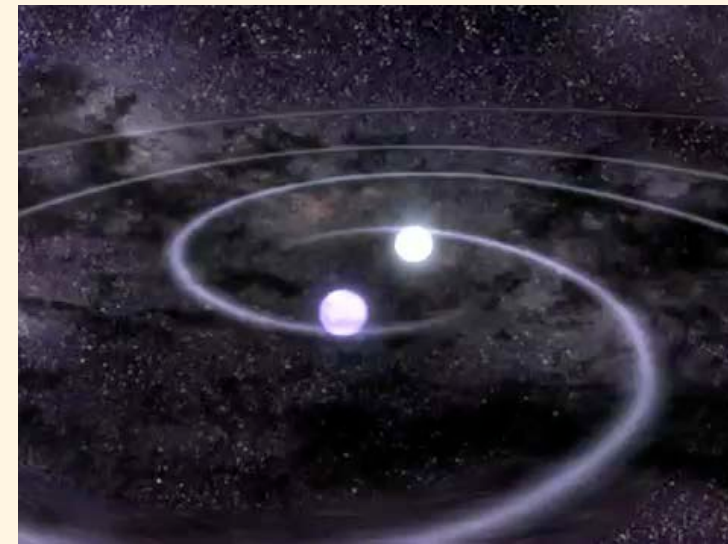


Tomo-e Gozenによる 重力波イベント追観測

新納 悠（東京大学木曾観測所）

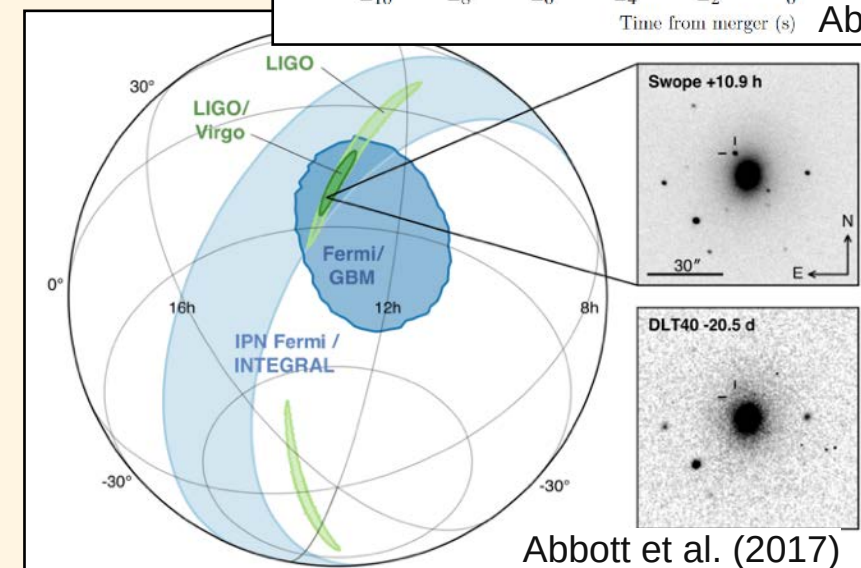
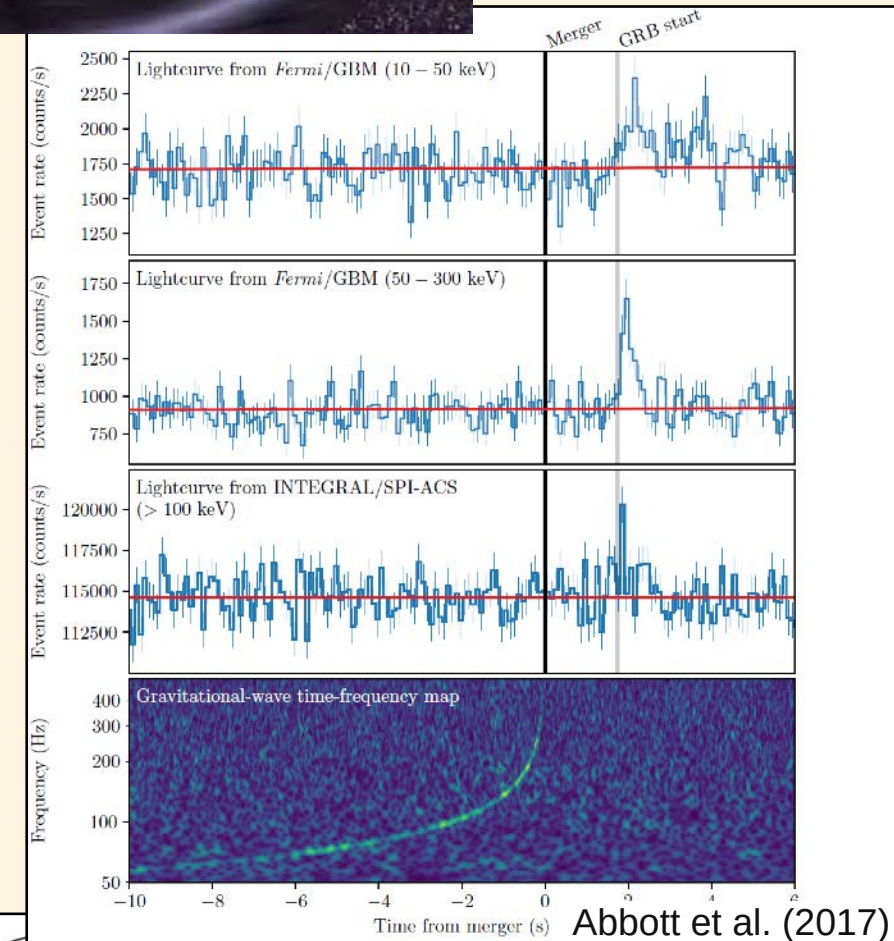
on behalf of Tomo-e Gozen GWチーム

重力波イベントと 電磁波対応天体



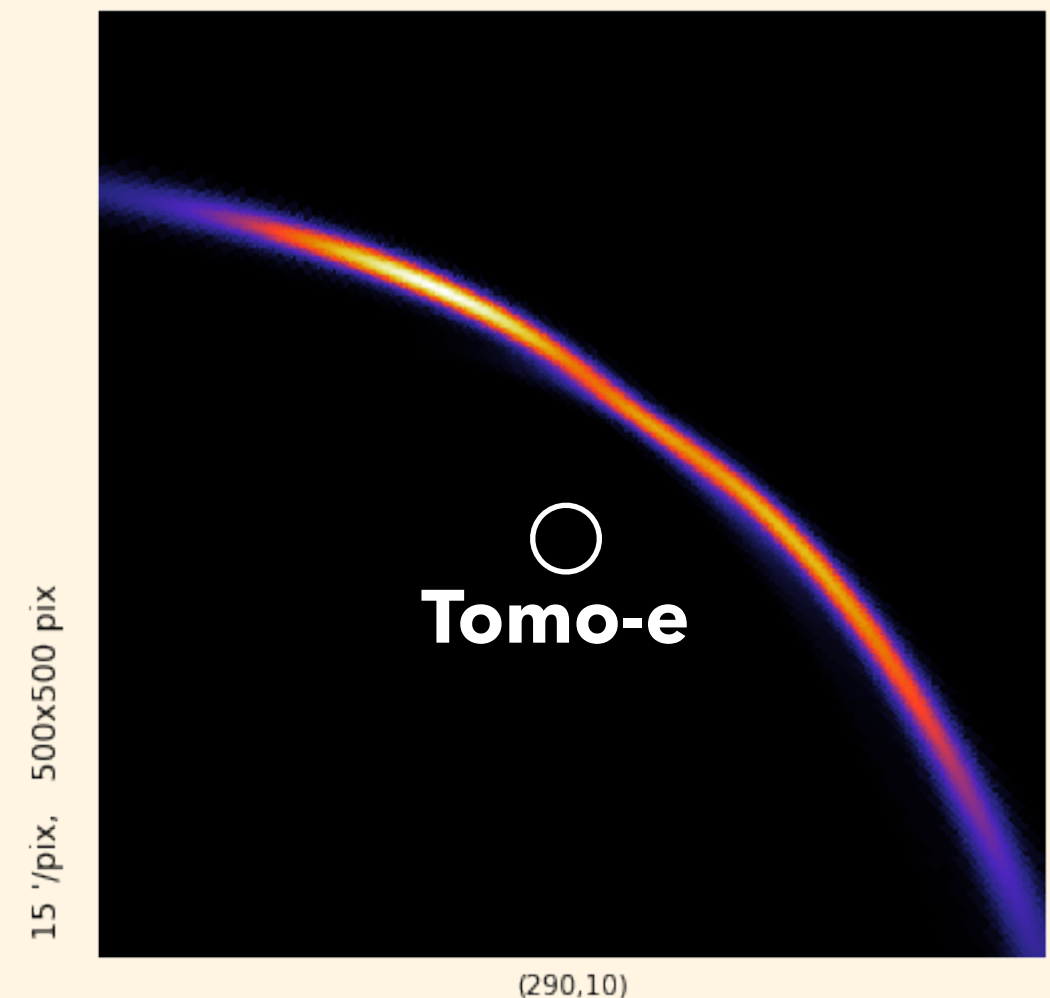
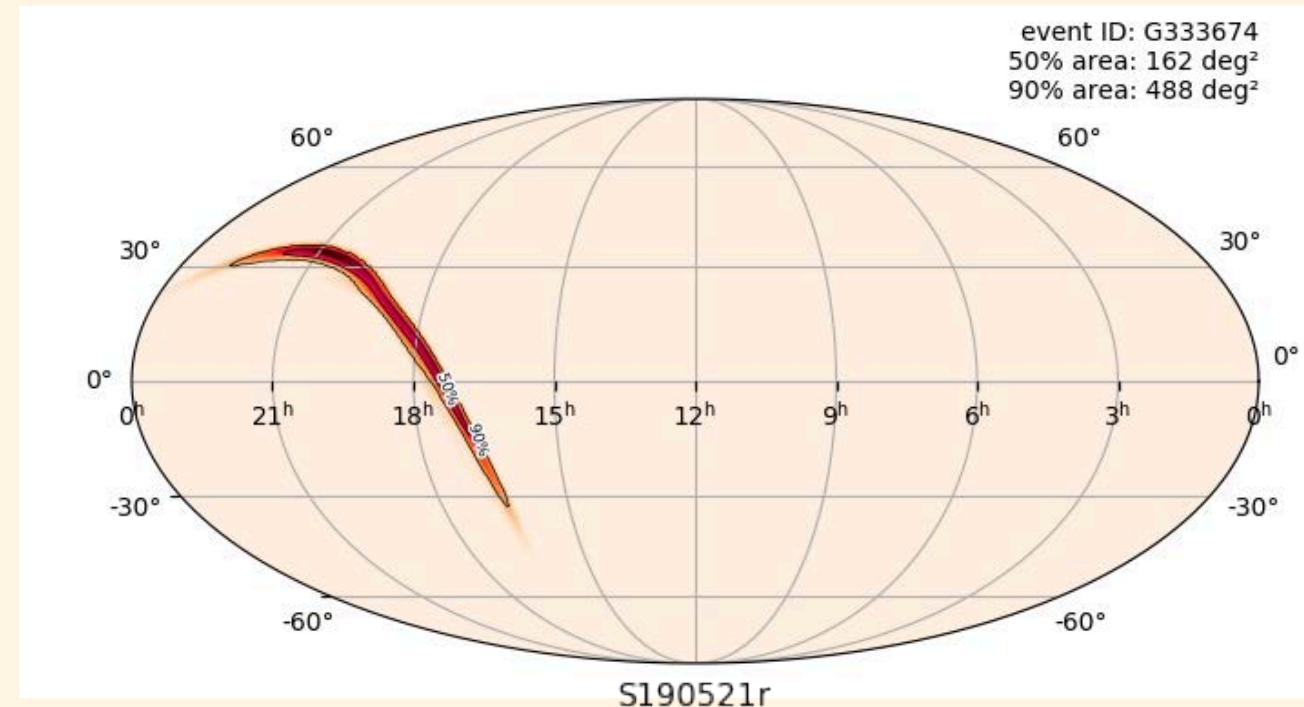
Credit: NASA/Goddard
Space Flight Center

- 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
- 木曽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 deg^2
 - O4 (2023-) : 数十 deg^2
 - Virgo が目標感度で参加した場合
- Tomo-e Gozen の視野 $\sim 20 \text{ deg}^2$
 - ディザーして gap を埋めると $\sim 60 \text{ deg}^2$



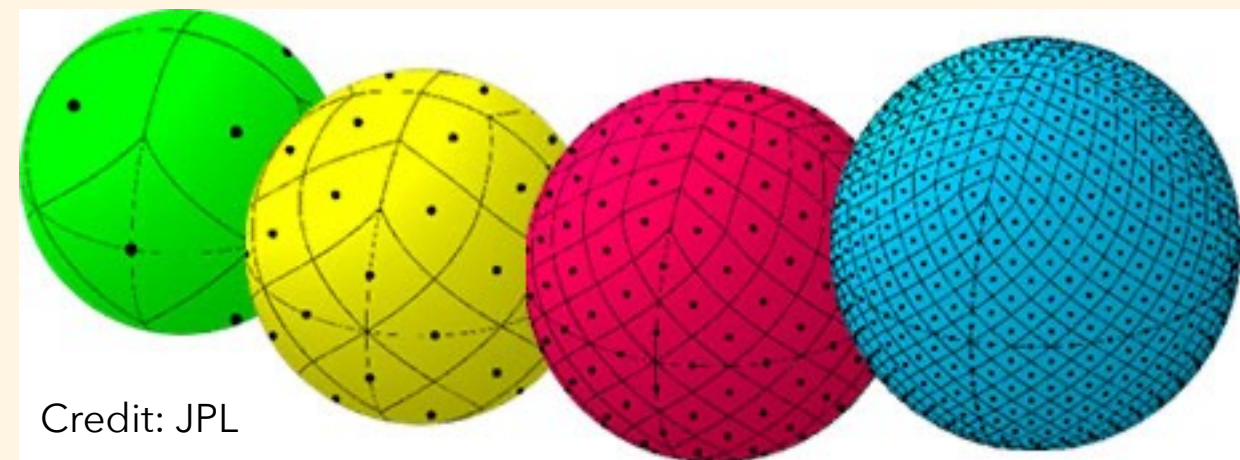
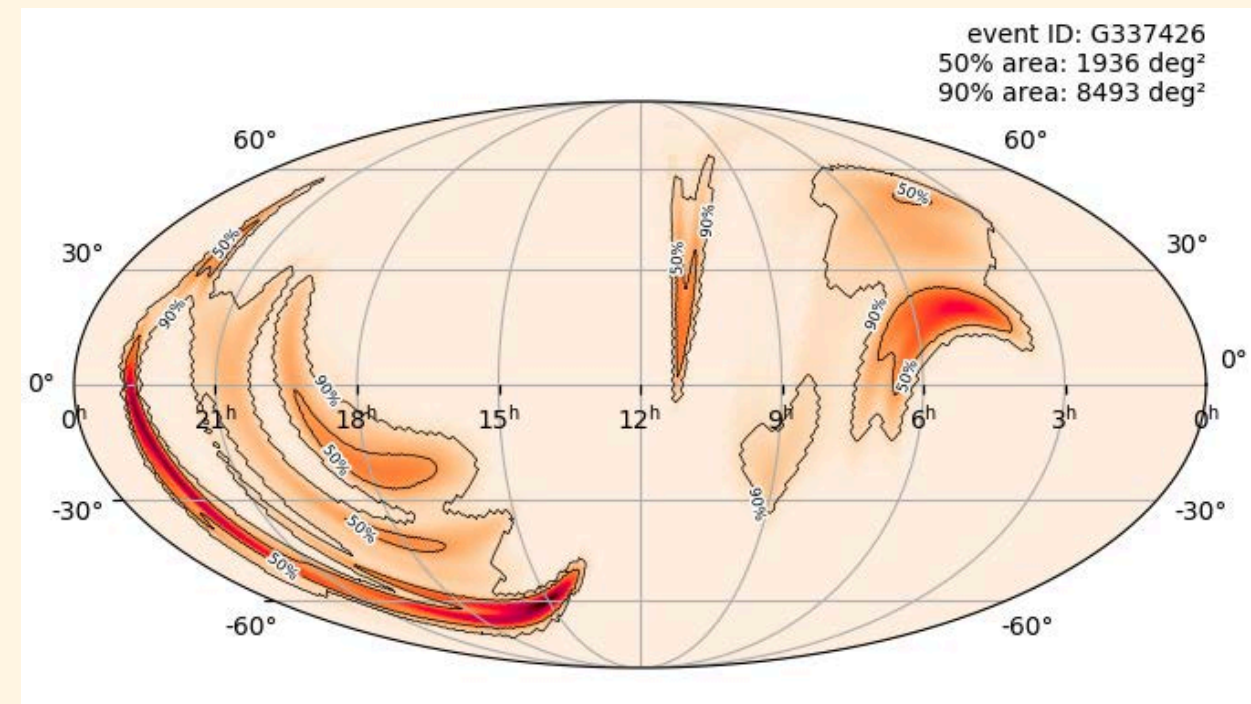
VOEvent alert と自動追観測

- 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>
```

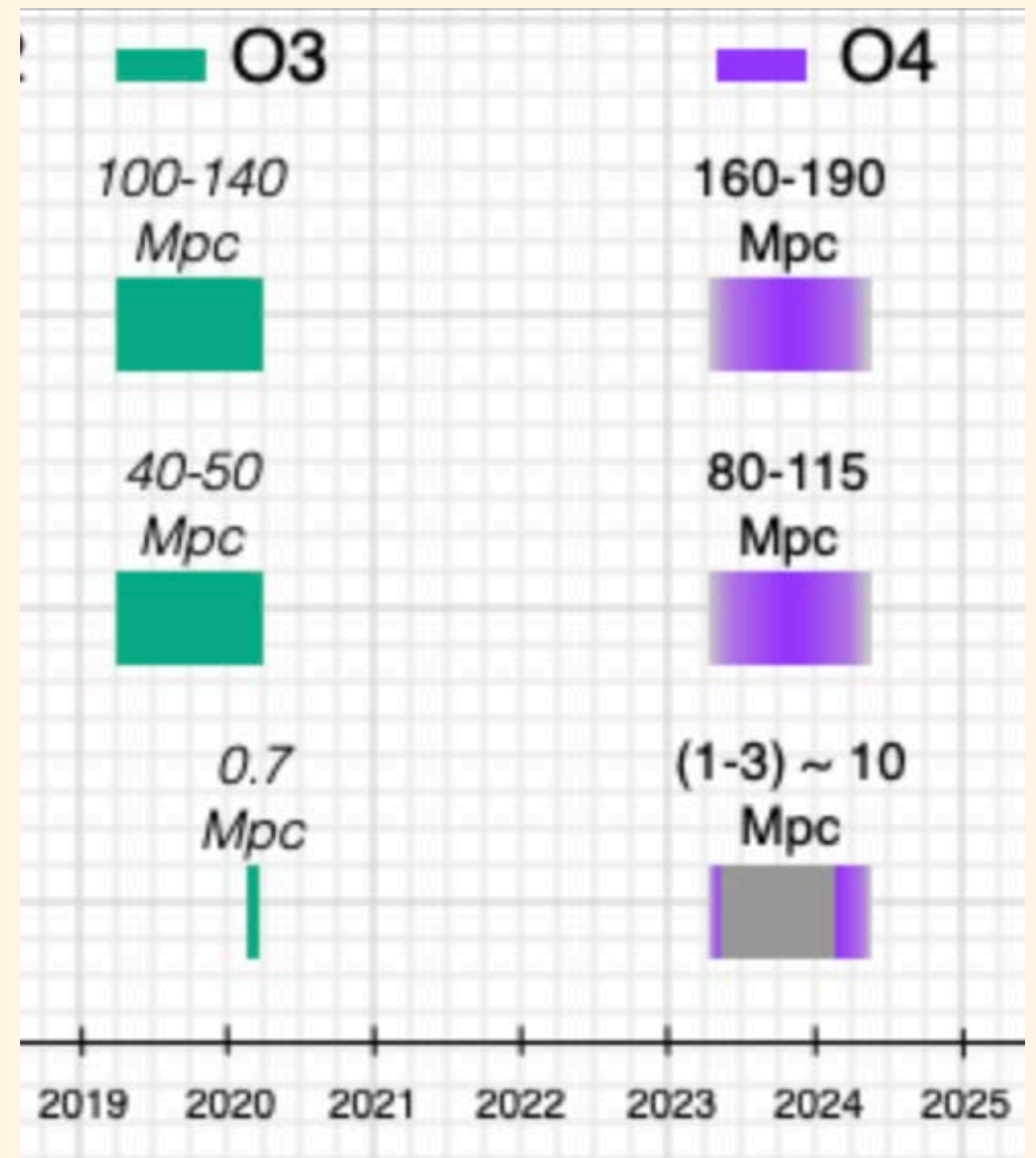
Probability SkymapとHEALPix

- 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



O4 での観測

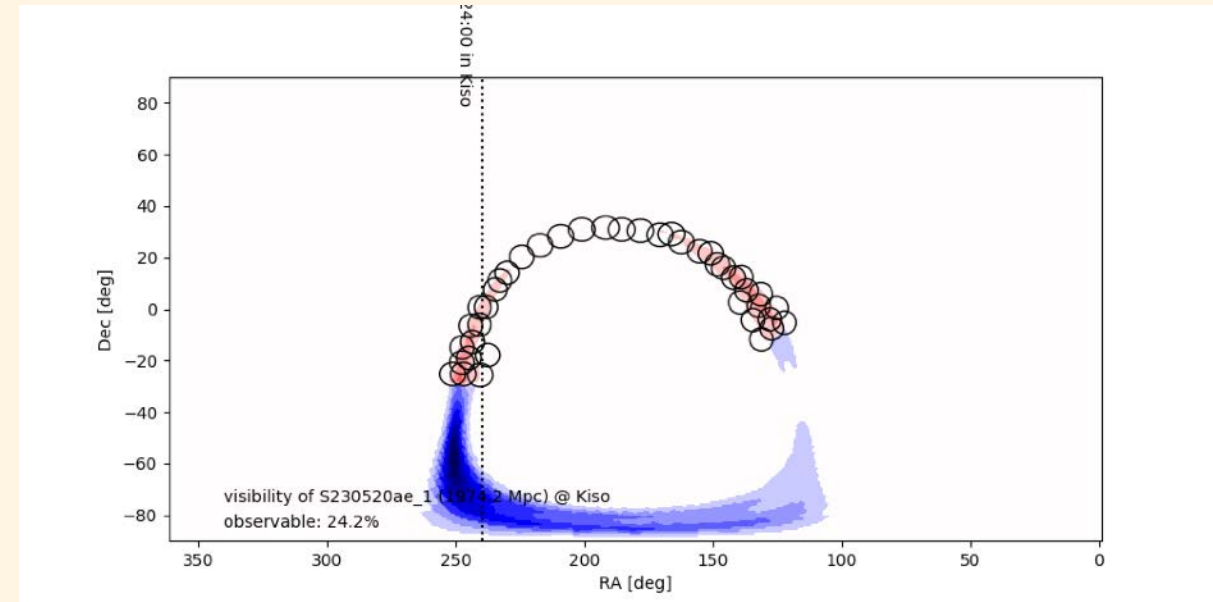
- 4/26 から1ヶ月 engineering run ののち 5/24 から正式に開始
 - 2024年1-4月に休止期間 (O4a, O4b)
 - Virgo は O4b から参加
 - KAGRAは O4b 終了までに参加予定
- O4 でのイベント頻度予想
 - $\sim 200 \text{ yr}^{-1}$?
 - Low significance event は対象外
- 全てのイベントを追観測するには多すぎる
 - BNS or NS-BH は原則観測
 - BBH は 99% area $< 5000 \text{ deg}^2$ かつ木曽から50%以上観測可の場合のみ
 - $\sim 40 \text{ yr}^{-1}$ in total
- 位置決定が良ければ深く
 - 99% area $< 300 \text{ deg}^2$
 - 240秒露光 $\rightarrow m_{\text{lim}} \sim 20.5$
 - 99% area $\geq 300 \text{ deg}^2$
 - 48秒露光 $\rightarrow m_{\text{lim}} \sim 19.5$



- O4a では Tomo-e Gozen によって 17 イベントを追観測
 - ほとんどが BBH
 - 有力な対応天体候補の発見は今のところなし
- 10月下旬から3月中旬まで突発天体探査パイプラインが不調
 - 現在は復旧
 - 不調期間の観測データについても順次処理中

O4a イベント一例

- 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
 - 移動天体と思われる天体が多い
 - カタログマッチングのコードに問題があった
 - 12月に修正済
 - ~ 1-2 deg⁻²
 - 100 deg² 程度以下になれば目視確認も難しくない



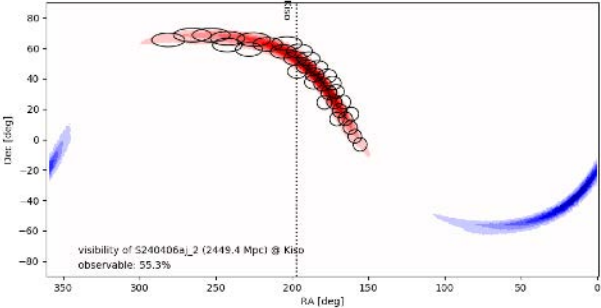
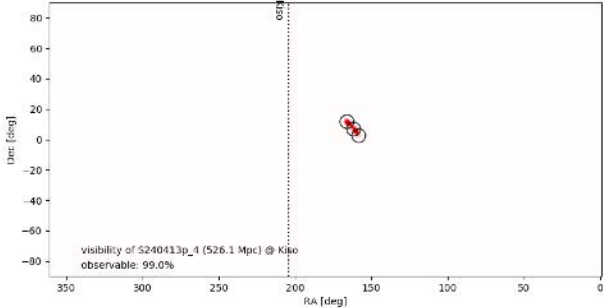
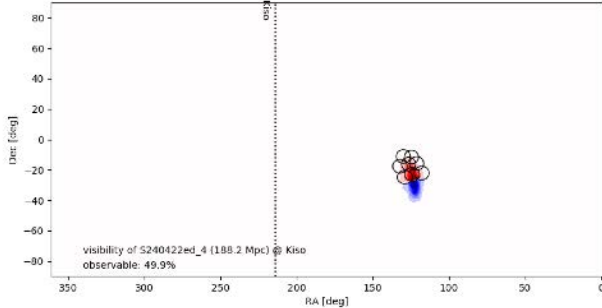
SN	Star	Bogus	Check
7903117	206.7604119, 29.9231051	22.50	
202305aaecx	GW follow-up (O4)	78821656	
2023-05-21	S230520ae	66378158	
7903116	214.3195853, 26.7673979	22.50	
202305aaecw	GW follow-up (O4)	78821645	
2023-05-21	S230520ae	66381865	
7903115	243.1244291, -20.3902846	18.27	
202305aaecv	GW follow-up (O4)	78821606	
2023-05-21	S230520ae	66380880	
7903114	246.2154676, -17.1603084	22.50	
202305aaecu	GW follow-up (O4)	78821603	
2023-05-21	S230520ae	66381342	
7903113	246.4572224, -17.3950791	18.23	
202305aaect	GW follow-up (O4)	78828557	
2023-05-21	S230520ae	66380950	
7903112	242.3524301, -16.1682179	20.28	
202305aaecs	GW follow-up (O4)	78828555	
2023-05-21	S230520ae	66381849	

その他のO4aイベント (解析済分)

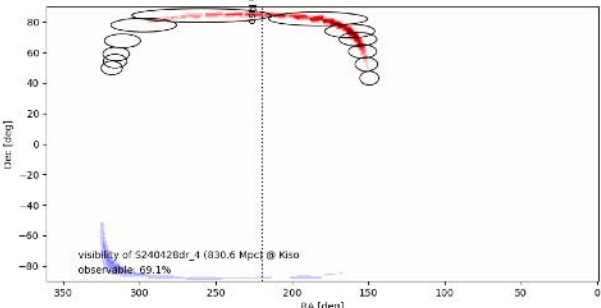
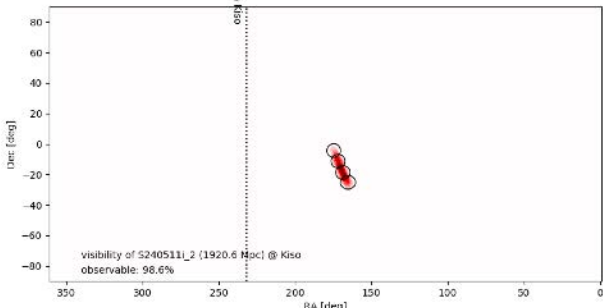
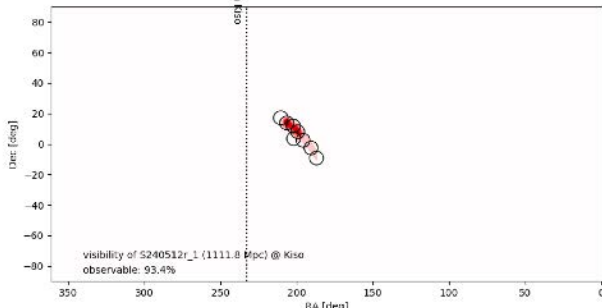
S230520ae	S230529ay	S230731an	S230808i	S230922g
BBH ~ 1770 deg ² observed ~ 2440 transient objects (candidates) were discovered by the pipeline	Possibly NSBH ~ 100 deg ² observed 13 transient objects discovered (Poor weather)	Possibly NSBH ~ 460 deg ² observed 243 transient objects discovered (Poor weather)	Burst (retracted) ~ 1040 deg ² observed 709 transient objects discovered (Poor weather)	BBH ~ 50 deg ² observed 9 transient objects discovered (Poor weather)
S230924an	S230927be	S231020ba	S231020bw	
BBH ~ 1270 deg ² observed 1537 transient objects discovered	BBH ~ 560 deg ² observed 336 transient objects discovered	BBH ~ 480 deg ² observed (stopped due to an error in the alert handling system) 323 transient objects discovered	BBH ~ 820 deg ² observed 1008 transient objects discovered	

S231020bw より後は突発天体パイプライン不調の期間に8イベント観測

O4b 観測状況

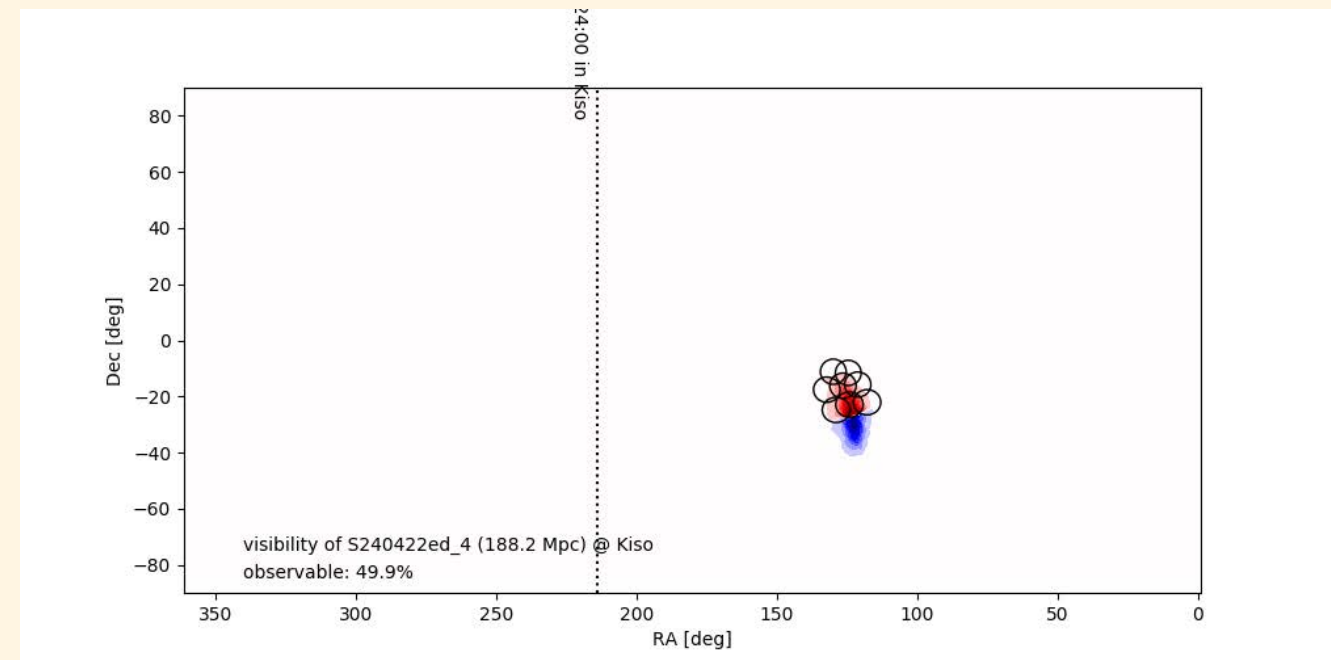
S240406aj	S240413p	S240422ed
		
BBH ~ 1310 deg² observed 1159 transient objects	BBH ~ 300 deg² observed 395 transient objects (deep mode)	NSBH ~ 420 deg² observed 231 transient objects

- O4b 開始からの1ヶ月余りで3イベントを追観測
- 検出候補天体は high-proper motion star と思われるものが多そう
 - 移動天体を除いても総数はそれほど減っていない？
- 天候不良で観測できなかったイベントも含めてO4aより位置決定がよい

S240428dr	S240511i	S240512r
		

S240422ed

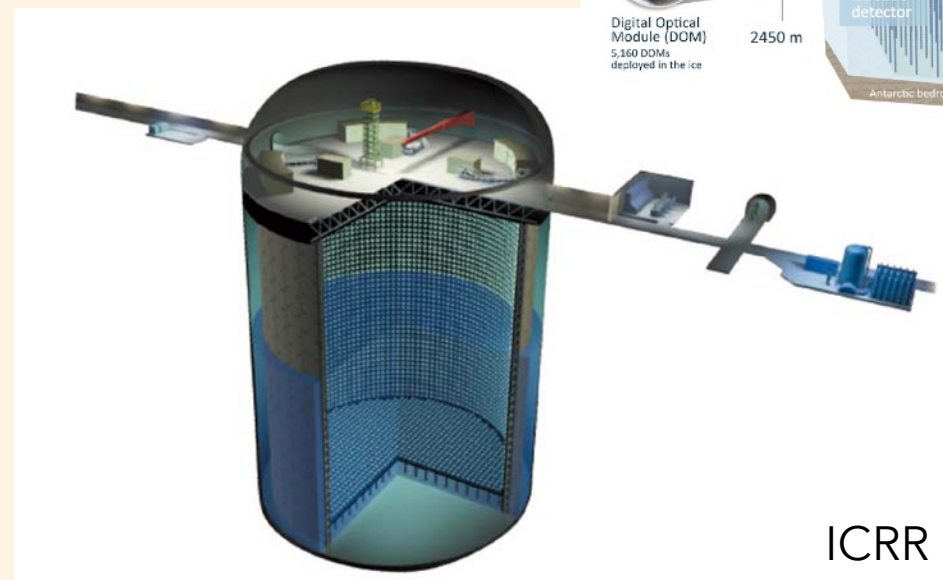
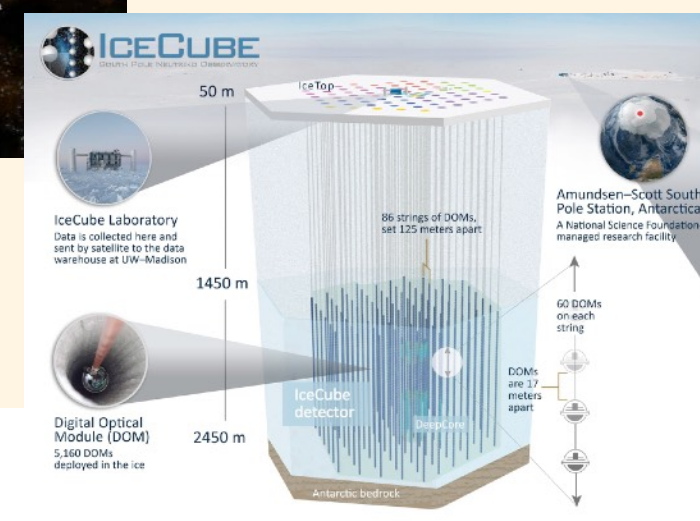
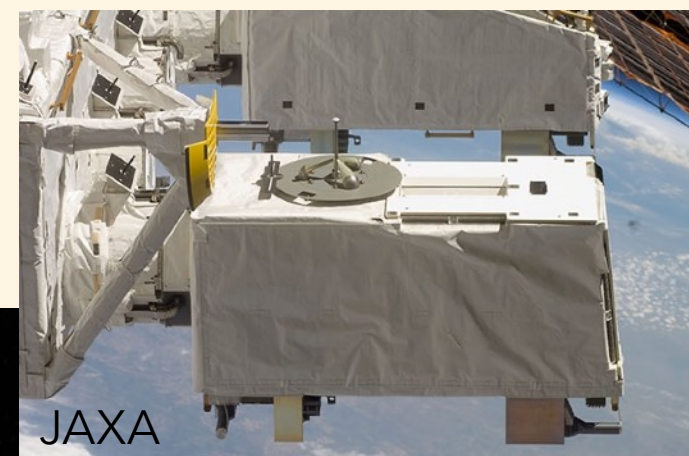
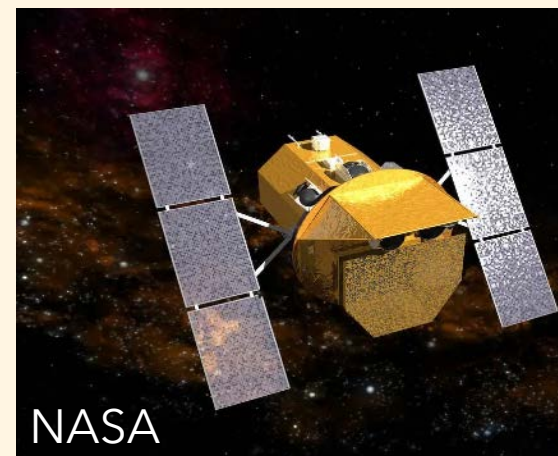
- NSBH @ ~ 188 Mpc
 - 待ちに待った中性子星イベント
- 南天のため木曽から観測できるのは領域の半分程度
- ~ 420 deg² を観測して
231 の突発天体候補を検出
 - 有望そうなものはなし
- O4b は2025年2月まで



☒	7928167	133.2901503, -18.1660211	17.01						2
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79373296						2
	2024-04-25	S240422ed	83161983						
		0.00542472271236							
☒	7928164	128.499355, -20.448481	22.50						2
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79375270						2
	2024-04-25	S240422ed	83172179						
		0.149691							
☒	7928163	134.1670977, -14.3440607	22.50						2
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79375268						2
	2024-04-25	S240422ed	83175213						
		0.074025							
☒	7928162	119.9205004, -10.5350425	16.96						2
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79374572						2
	2024-04-25	S240422ed	83171435						
		0.089464							
☒	7928161	126.7830716, -8.2220953	18.74						3
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79375303						3
	2024-04-25	S240422ed	83174962						
		0							
☒	7928160	119.9334256, -11.1560102	22.50						1
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79375756						1
	2024-04-25	S240422ed	83169360						
		0.114381							
☒	7928159	124.5487104, -7.1652935	16.14						3
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79374316						3
	2024-04-25	S240422ed	83171099						
		0.159691							
☒	7928158	125.0397084, -7.1057795	17.33						1
	202404aadt	GW follow-up (O4)	79374327						1
	2024-04-25	S240422ed	83167963						
		0.016857							

自動追観測システムの拡張

- MAXI アラートへの対応（酒向さん、瀧田さん）
- GRB アラート (Swift, Fermi) への対応（Dainottiさん等）
- IceCube ニュートリノアラートへの対応（田中さん等）
- Super-Kamiokande ニュートリノアラートへの対応（新納）



Summary

- VOEvent によるアラートに自動即応する体制
 - O4a では 17 のGWイベントの追観測を実施
 - O4b 開始からは NSBH イベント1つを含む 3 イベント
- 突発天体パイプライン処理に問題のあった期間もあったが現在は修正・復旧済み
- 木曾シュミット／Tomo-e Gozen の特性を活かしたToO 観測が実施・準備中