

重力波対応天体の フォローアップ

OISTER Workshop
2021年11月24 - 26日

太田耕司
京都大学大学院理学研究科

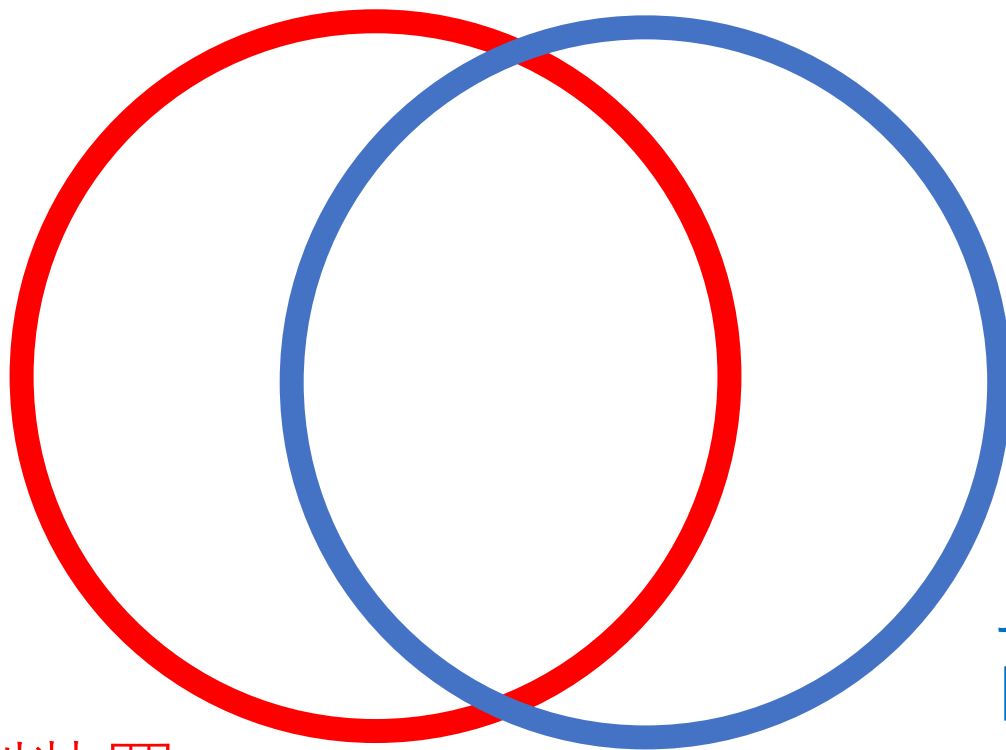
第2期 大学間連携

- 2017年4月－2022年3月までの5年間
- その前の期の大学間連携で観測ネットワークが完成したので
- 新たに誕生しつつある、マルチメッセンジャー天文学にも取り組もう
- 重力波源の可視・近赤外対応天体
- ニュートリノ放出天体の可視・近赤外対応天体
- 2017年8月 重力波天体 (Ligo+Virgo) GW170817
- 2017年9月 高エネルギーニュートリノ天体 IceCube170922A

重力波観測

- O1 2015.09.12-2016.01.19
最初の重力波検出 GW150914 (でもこれはO1の開始前では?)
 - O2 2016.11.30-2017.08.25
NS-NS重力波源 GW170817 最初の可視・近赤外同定
 - O3 2019.04.01-2020.03.27
 - O4 2022.12.半ばー
-
- 第2期OISTERでは2017年4月以降のフォローアップ
O2の後半 + O3

OISTER と J-GEM



OISTER

各種望遠鏡・観測装置の
運用と観測

J-GEM

LVCとMoU（初期段階）

フォローアップの策定

・観測支援システム等
すばるでの観測

フォローアップの流れ

GW Trigger + GCN等



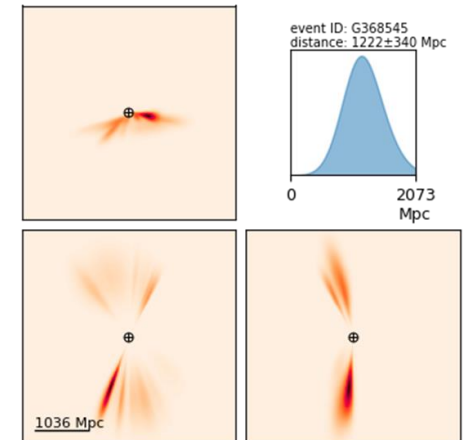
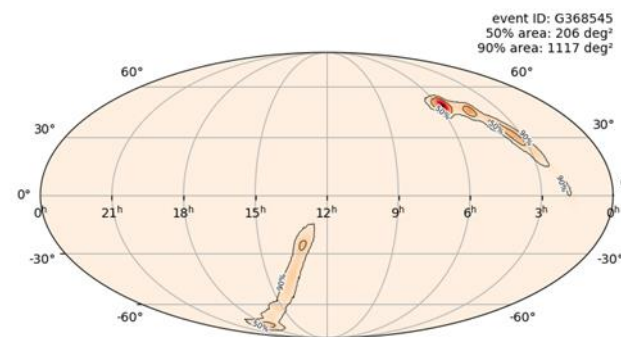
```
...
Instruments = H1,L1,V1
FAR = 9.73523002123e-10
Group = CBC
Pipeline = gstlal
Search = AllSky
...
Classification.BNS = 0.0
Classification.NSBH = 0.0
Classification.BBH = 0.994724094356
Classification.MassGap = 0.0
...
Properties.HasRemnant = 0.0
Distance = 1557.213081(+/-)380.770495
```

planner: 誤差領域内の銀河リスト・
顔写真等、確率の高いもの順

観測可能なら各観測所で観測予約、
観測実施、データ処理 (差引画像)
image server: 各種画像アップ

当番他で画像を目視でチェック

候補天体あれば分光観測等へ



広範囲を撮像するパターンは、すばる・Tomo-e

GW170817

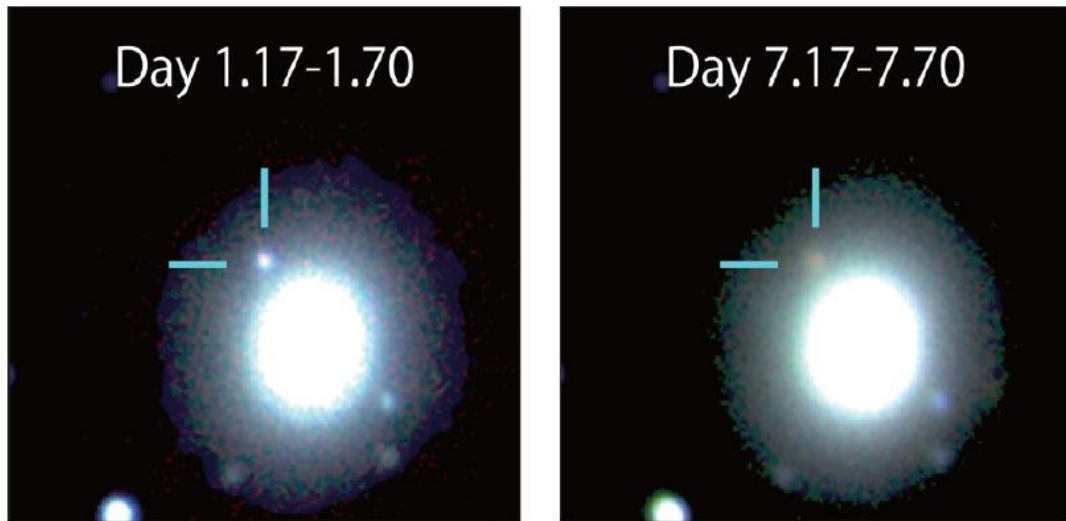
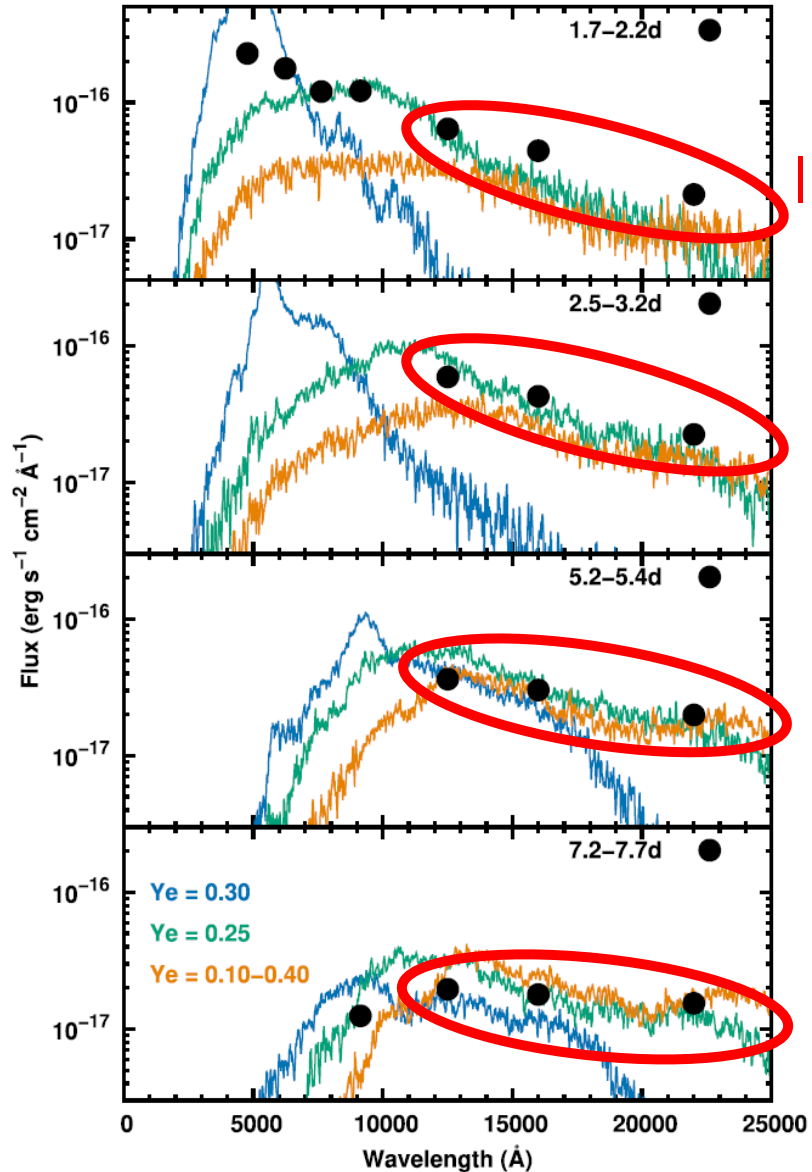


Fig. 1. Three-color composite images of SSS17a using z -, H -, and K_s -band images. The size of the image is $56'' \times 56''$. From left to right, the combined images created from the images taken between $t = 1.17$ and 1.70 d and between $t = 7.17$ and 7.70 d are shown.

<= すばる + IRSF での観測

距離は40Mpc

GW170817



IRSF/SIRIUSによる観測

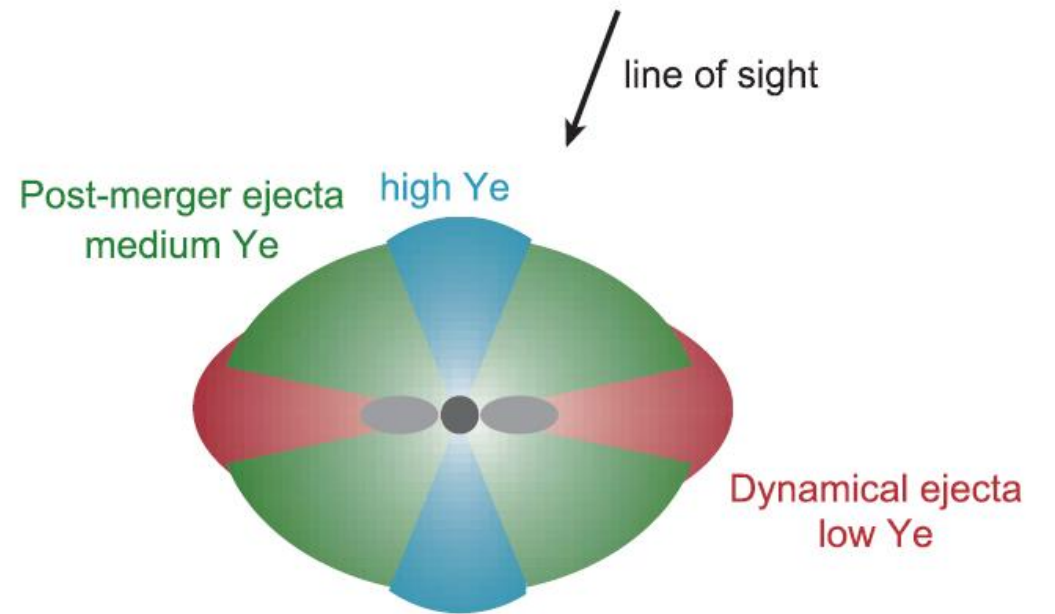


Fig. 4. Schematic picture of the ejecta of the NS merger event GW170817.

03でのフォローアップ

Sasada et al. 2021,
Progress of Theoretical and Experimental Physics,
vol. 2021, issue 5, Id.05A104, 23
にまとめ論文 (J-GEM)

最初のうちは、BBH (連星ブラックホール) でも
観測をしていたが、遠方のものが多く、また
Intrinsicにも暗いと考えられ、観測しない方向に

中性子星を含むもの (hasNS) なら可視・近赤外で
見えるかもしれないので、観測。
とはいえ、誤差領域がひどいものなどは
見送りの

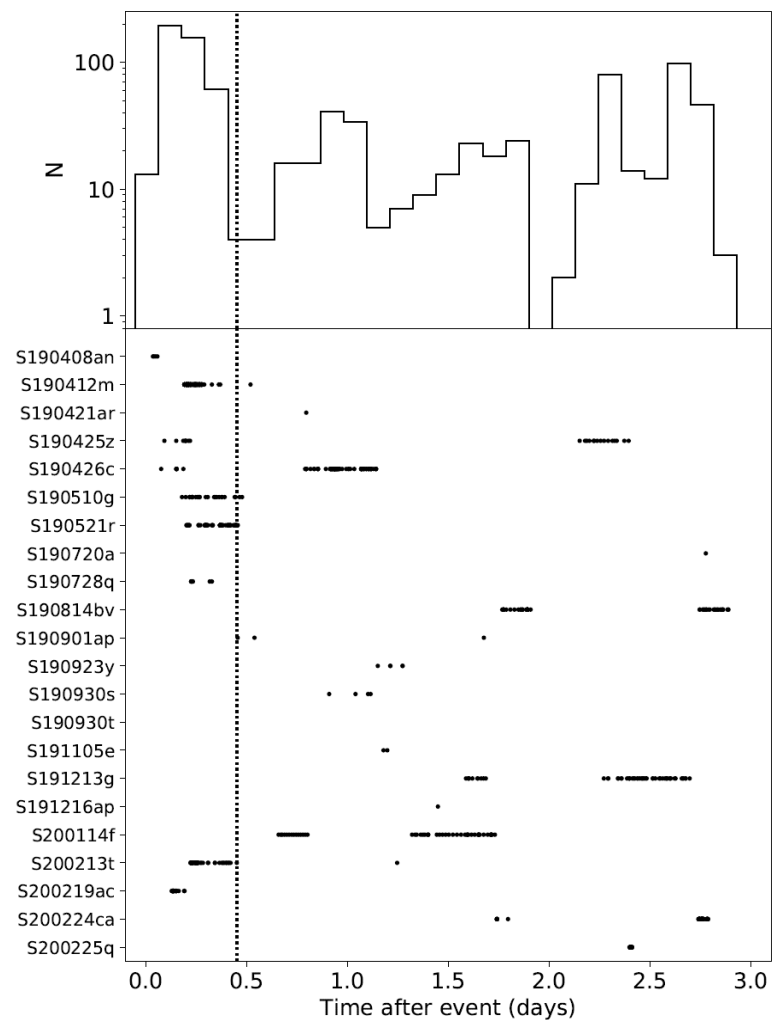
(後で誤差領域が変わったり、retractされた例もある)

Table 3: J-GEM galaxy-targeted follow-up during GW

Superevent	Classification	N ¹	Start time ² (days)	Coverage ³ (%)	Telescope	GCN
S190408an	BBH	1	0.042	0.0042	HONIR, MITSuME-Akeno MITSuME-Okayama	[94]
S190412m	BBH	157	0.211	0.62	NIC, HONIR Tomo-e Gozen, Tripole5 MITSuME-Akeno, OAOWFC MuSaSHI	[95] [96]
S190421ar	BBH	3	0.796	0.00078	Tomo-e Gozen, OAOWFC	[97]
S190425z	BNS	170	0.093	1.9	FOCAS, SIRIUS Tripole5, MITSuME-Akeno	[98] [99] [100] [101]
S190426c	BNS/MassGap	64	0.077	2.0	NIC, HONIR Tomo-e Gozen, OAOWFC	[102]
S190510g	Ter/BNS	15	0.308	1.3	(HSC) ⁴ , KOOLS-IFU NIC, HONIR Tomo-e Gozen, Tripole5 MITSuME-Akeno, OAOWFC MITSuME-Okayama, MuSaSHI	[103]
S190521r	BBH	1	0.203	0.0	HONIR	[104]
S190720a	BBH	1	2.776	0.0017	MITSuME-Akeno	[105]
S190728q	BBH	7	0.226	0.0070	HONIR, MITSuME-Akeno MITSuME-Okayama	[106]
S190814bv	NSBH	24	1.767	9.8	HONIR, Tripole5 MITSuME-Akeno, OAOWFC MuSaSHI	[107] [108] [109]
S190901ap	BNS/Ter	2	0.456	0.010	OAOWFC, MuSaSHI	[110]
S190923y	NSBH/Ter	1	1.151	0.014	OAOWFC	[111]
S190930s	MassGap	4	0.041	0.0058	MITSuME-Akeno	[112]
S190930t	NSBH/Ter	18	4.841	0.27	Tripole5, MITSuME-Akeno	[113]
S191105e	BBH	3	1.179	0.00036	MITSuME-Akeno, MITSuME-Okayama	[114]
S191205ah	NSBH	1	1.886	0.0	MITSuME-Akeno	[115]
S191213g	BNS/Ter	45	1.587	1.5	NIC, HONIR MITSuME-Akeno, OAOWFC MITSuME-Okayama	[116]
S191216ap	BBH	1	1.449	0.00065	(HSC) ⁴ , NIC MITSuME-Akeno, OAOWFC BAO101 ⁵	[117] [118]
S200114f	Burst	42	0.659	—	NIC, HONIR OAOWFC	[119]
S200213t	BNS/Ter	74	0.238	5.0	NIC, HONIR Tomo-e Gozen, OAOWFC	[120]
S200219ac	BBH	23	0.130	0.00015	Tomo-e Gozen	[121]
S200224ca	BBH	108	0.558	0.069	(HSC) ⁴ , Tomo-e Gozen	[122]
S200225q	BBH	75	2.398	0.38	Tomo-e Gozen	[123]

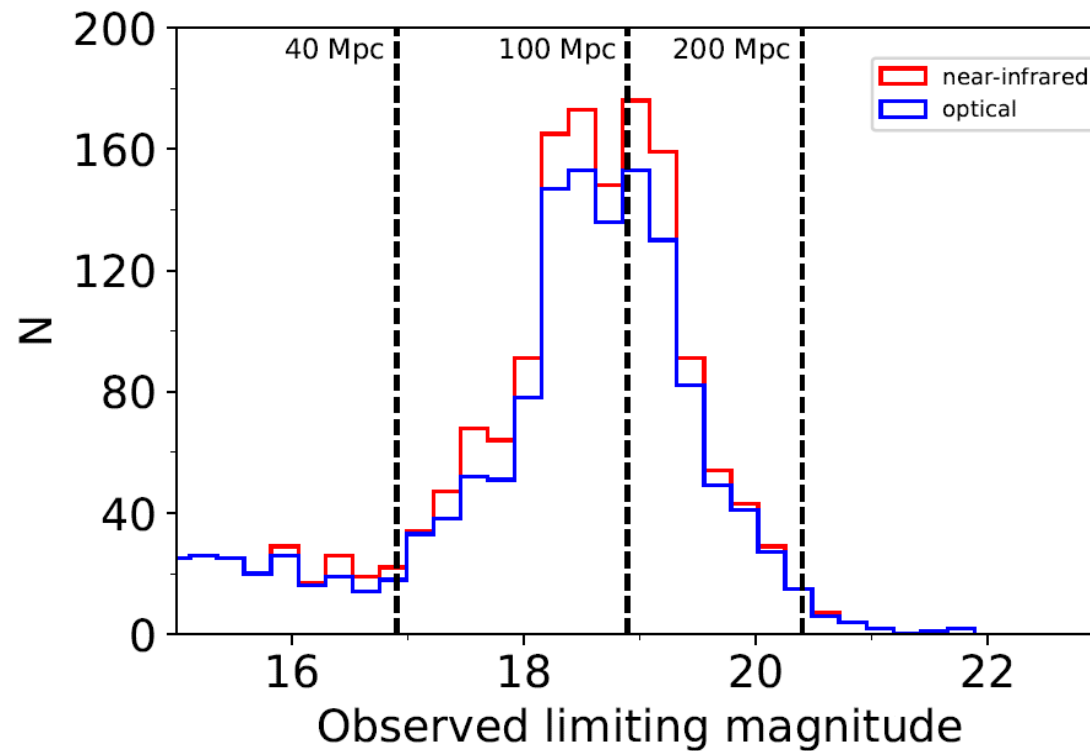
¹ Number of observed galaxies. ² Start time of observations after detection of GW signals. ³ Total covered probability of observed galaxies by our follow-up campaigns. ⁴ Data obtained by HSC is not included in the calculation of the coverage. ⁵ BAO101cm: 101 cm telescope at Bisei Astronomical Observatory and CCD optical camera (I_C band)

どの位素早く観測開始できたか？



0.5 – 1夜以内も結構ある

どの位のみかけ等級を見たか？
その距離は？



GW170817(BNS)と同じなら
100Mpc位までは届いている
しかし多くのイベントはGpc以上

GW170817が100Mpcに居たら
見えるような観測をしてきたか？

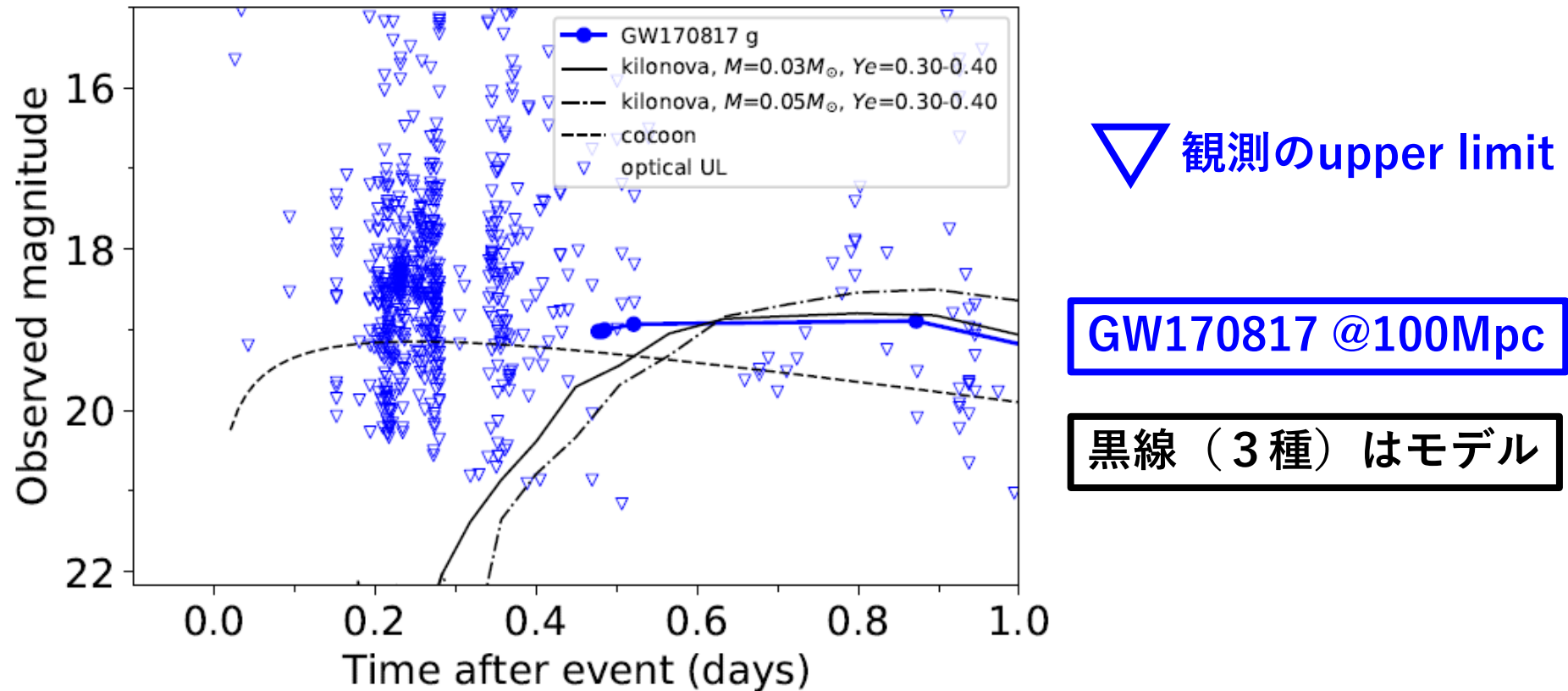


Fig. 6: Time series of our limiting magnitudes in the optical (g , r , R_C , i , I_C , and BLANC) bands (open triangle) taken for all galaxy-targeted observations in O3 run together with the light curve of GW170817 scaled to a distance to 100 Mpc (filled circle), and model curves based on the merger of a binary NS. Curves were calculated based on two kilonova models, where $M_{ej} = 0.03$ or $0.05 M_{\odot}$ and $Y_e = 0.30-0.40$ (solid and dot-dashed lines) and a cocoon model (dashed line.)

OISTERは中小望遠鏡なので、
遠くて暗いのは厳しい

Gravitational-Wave Transient Catalog 2

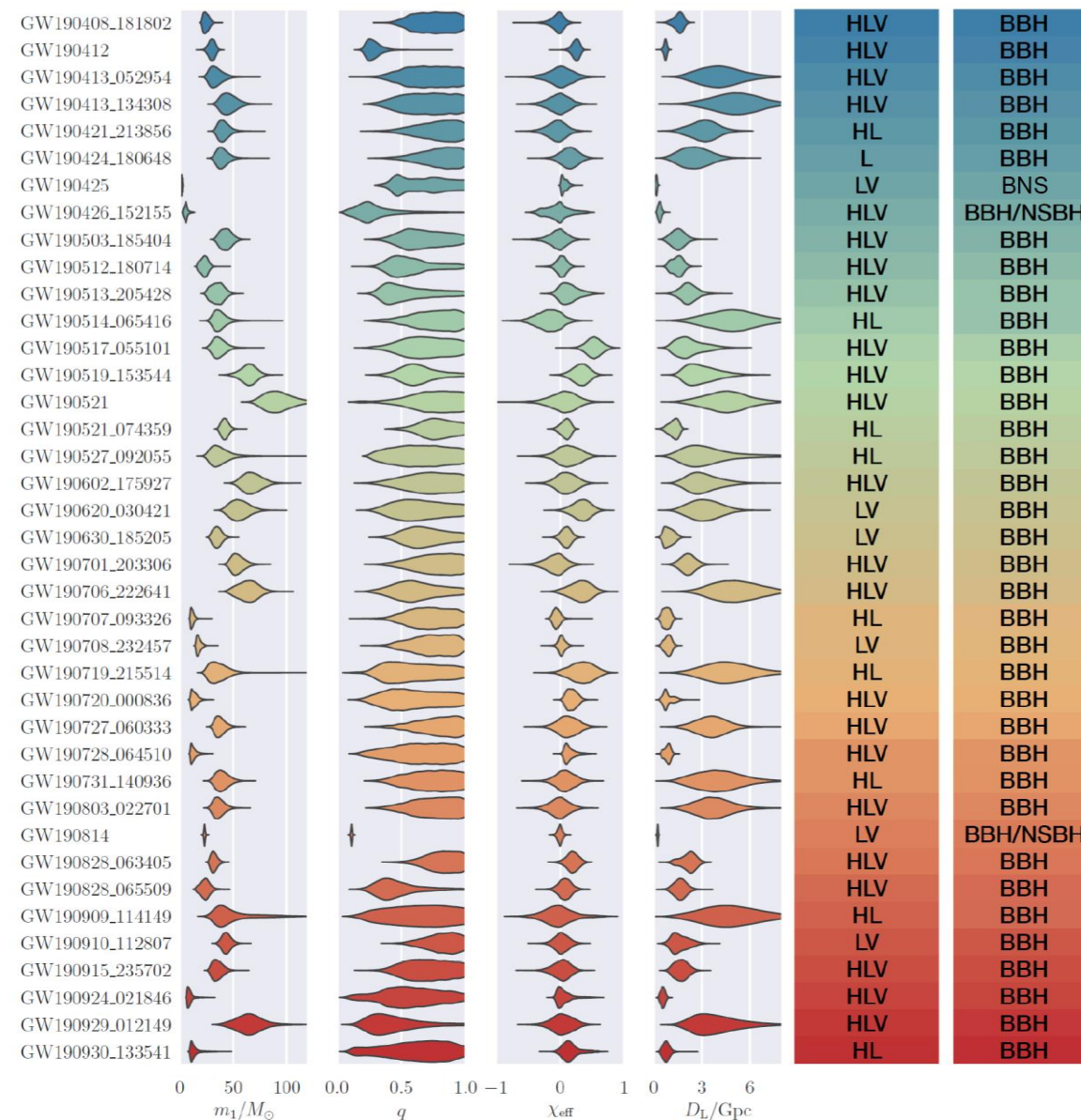
Compact Binary Coalescences from the
first part of the third Observing Run (O3a)



O3前半の結果 (後半も似たような感じ)

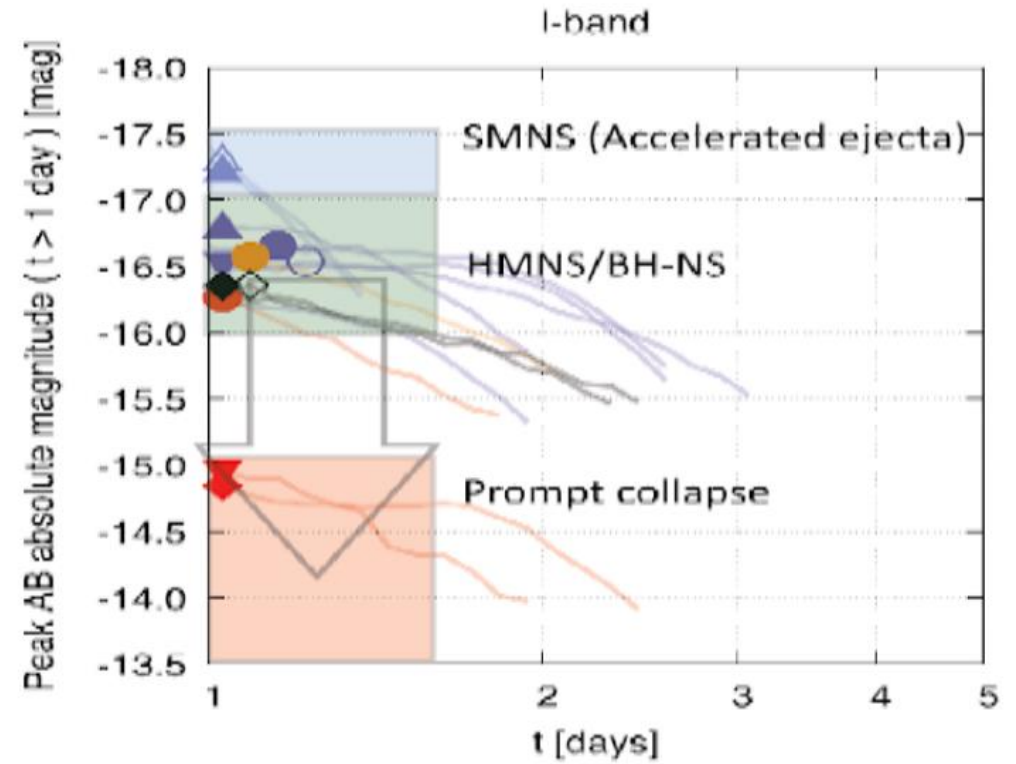
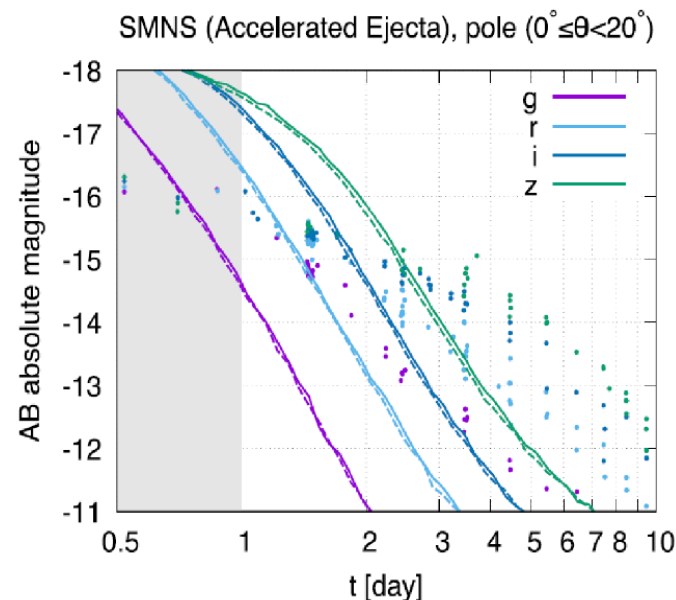
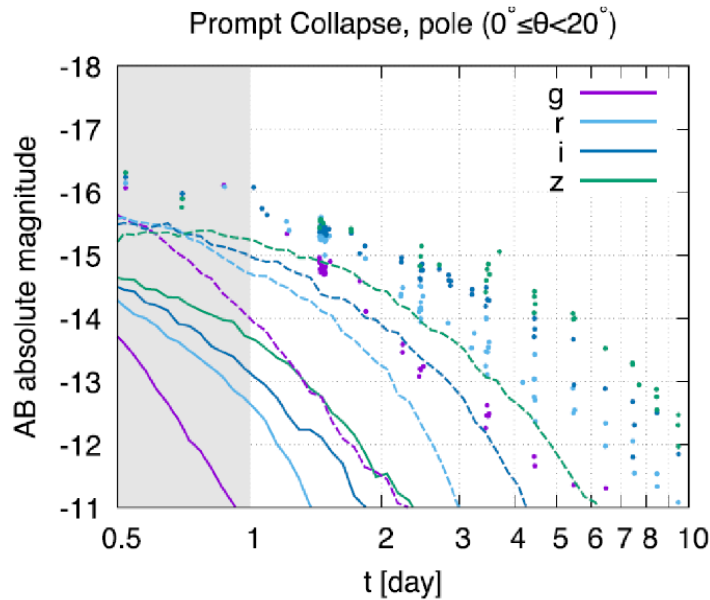
ほとんど BBH
=> 可視・NIRでは見えないだろう

距離 1Gpc以上が多い
=> BNSでも暗くて見えないだろう



今後 (1)

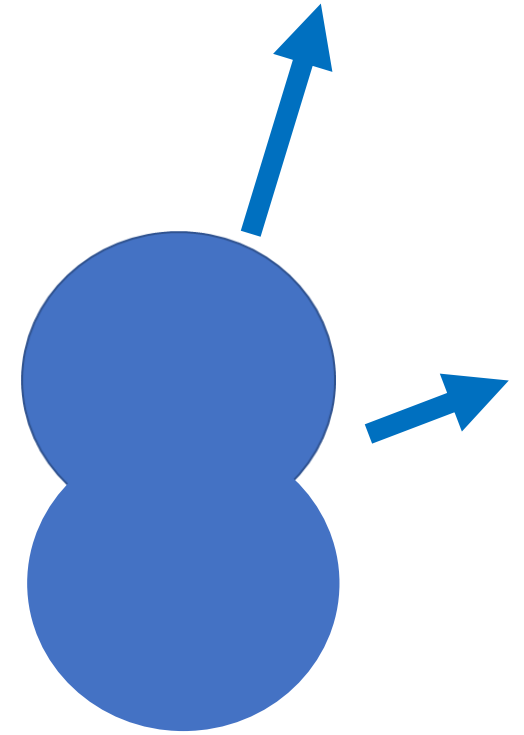
- まだ1例のみの可視同定
- 何が光っているか、どっちから見ているか？
- 放出される質量は？そもそもどんな合体か？
- r過程元素はBNSだけで作れるか？
- とにかく例を増やす 0、1、2、沢山
- 多様性があって、明るいのもあるかも



今後（2）

- 重力波望遠鏡の感度が上がる
=> 遠くのBBHの検出が増えてもイマイチだけど、
近くのBNSのような検出が増える（？）と嬉しい
可視・NIRの光度がわりと等方的なら
或いは近傍超新星？
- エラー領域が狭くなる
=> 期待
- 理論研究が進むと upper limitsでも意義がありそう

重力波の強さの
方向依存性？



横方向に弱いなら、
近くの重力波源でも
こちら向きの重力波も検出可能？
それなら近くのソース数も増える？

