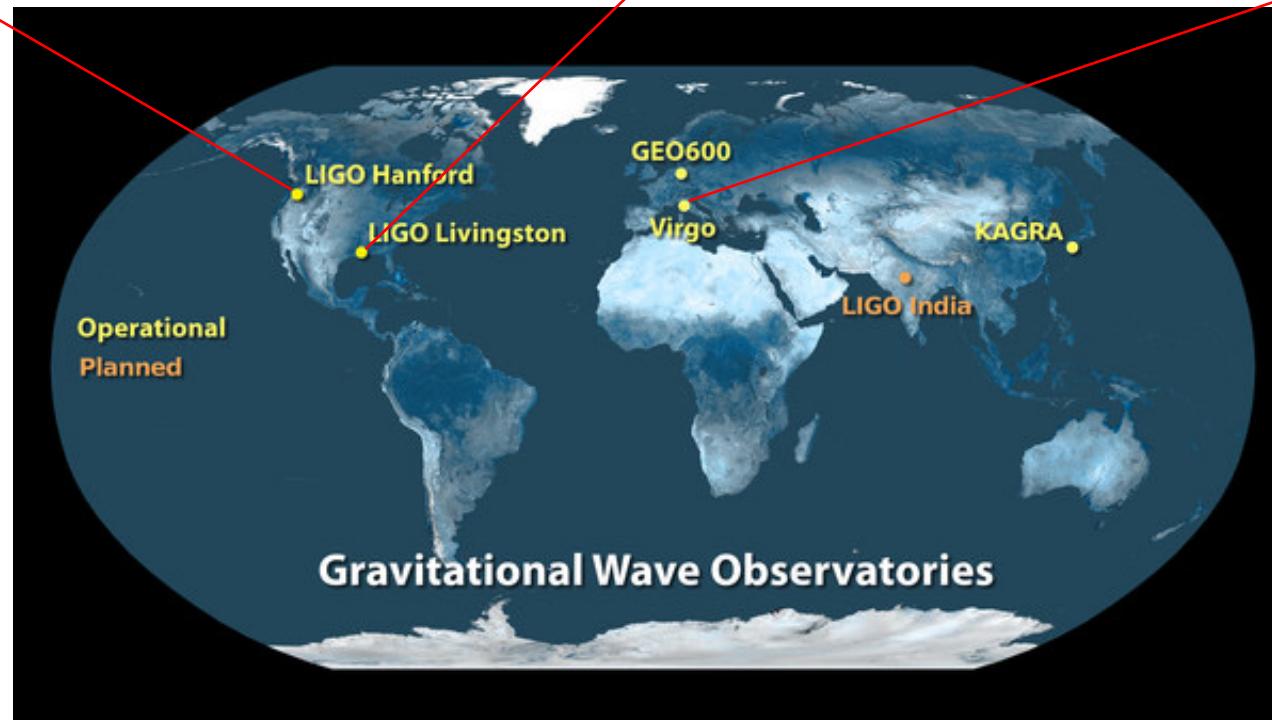


LIGO-Virgo実験による重力波観測の 現状と将来

森崎 宗一郎

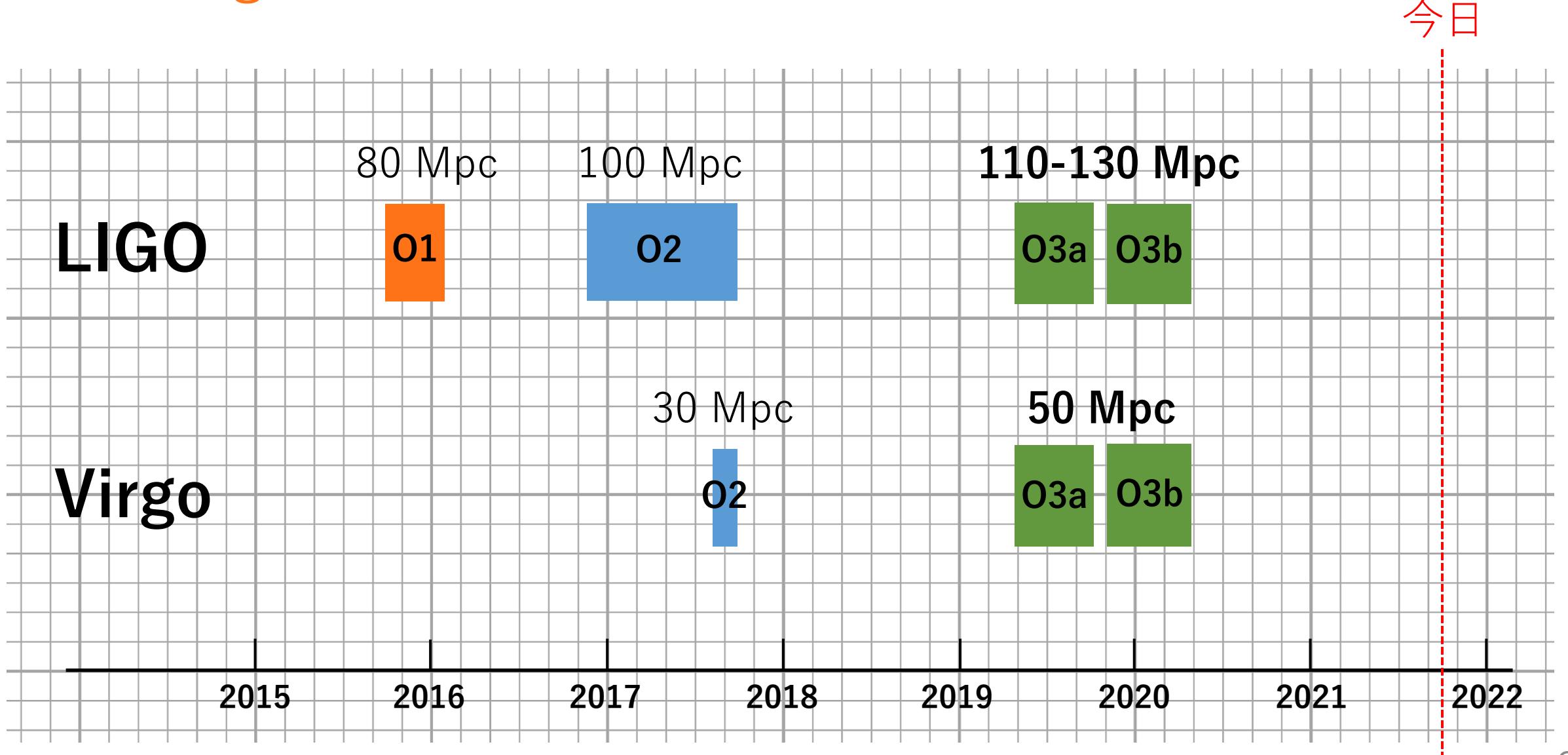
University of Wisconsin-Milwaukee

LIGO-Virgoの検出器ネットワーク



Credit:
Caltech/MIT/LIGO Lab

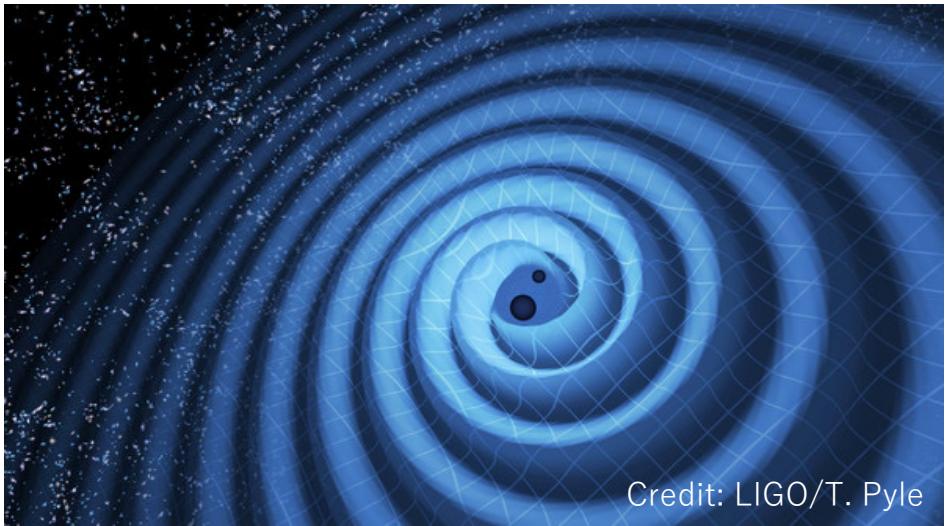
LIGO-Virgoの観測



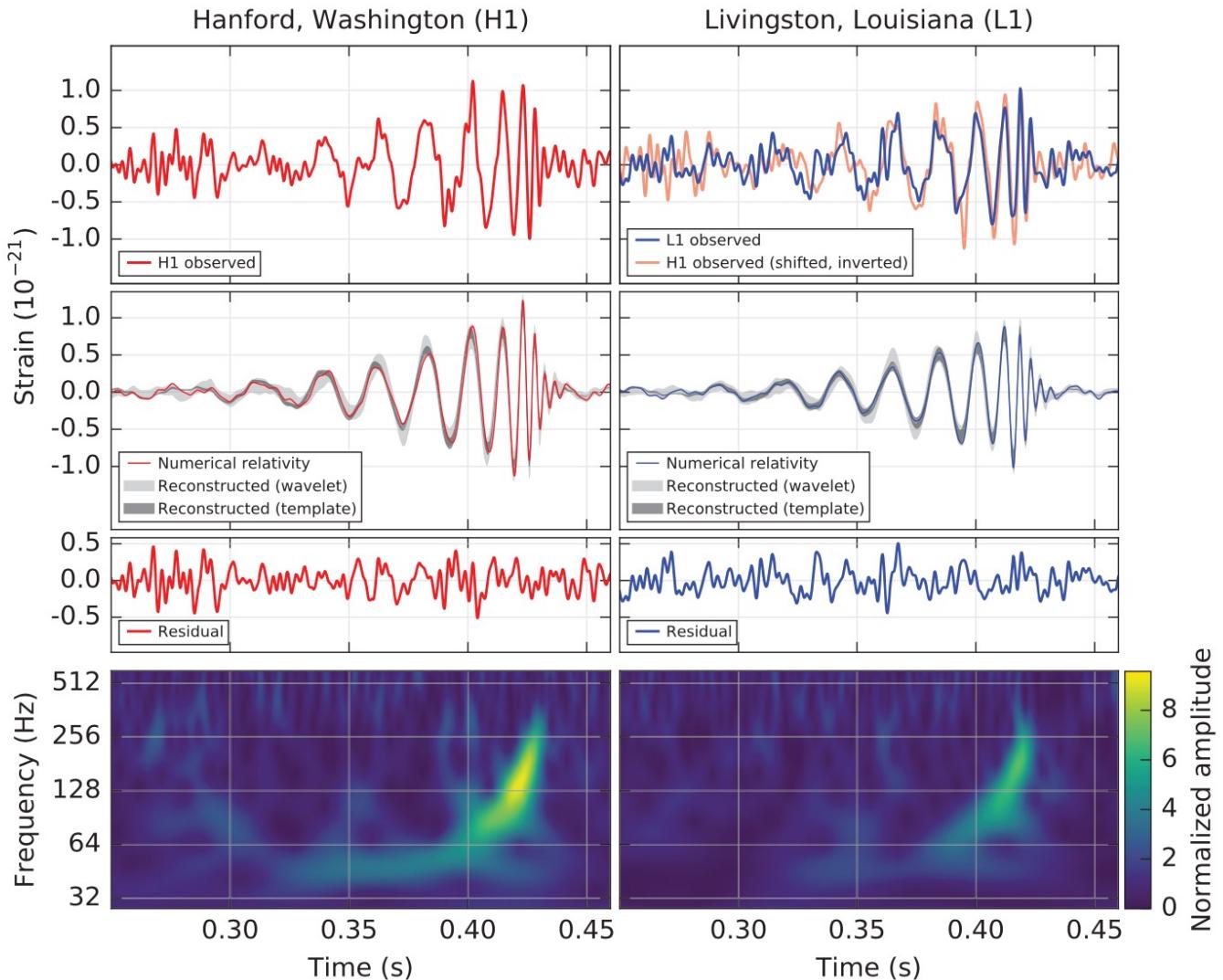
GW150914

B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **116**, no.6, 061102 (2016).

- 重力波の初検出
- ブラックホール連星の合体：
 $m_1 = 36^{+5}_{-4} M_{\odot}, m_2 = 29^{+4}_{-4} M_{\odot}$.



ブラックホール連星の合体のイメージ図

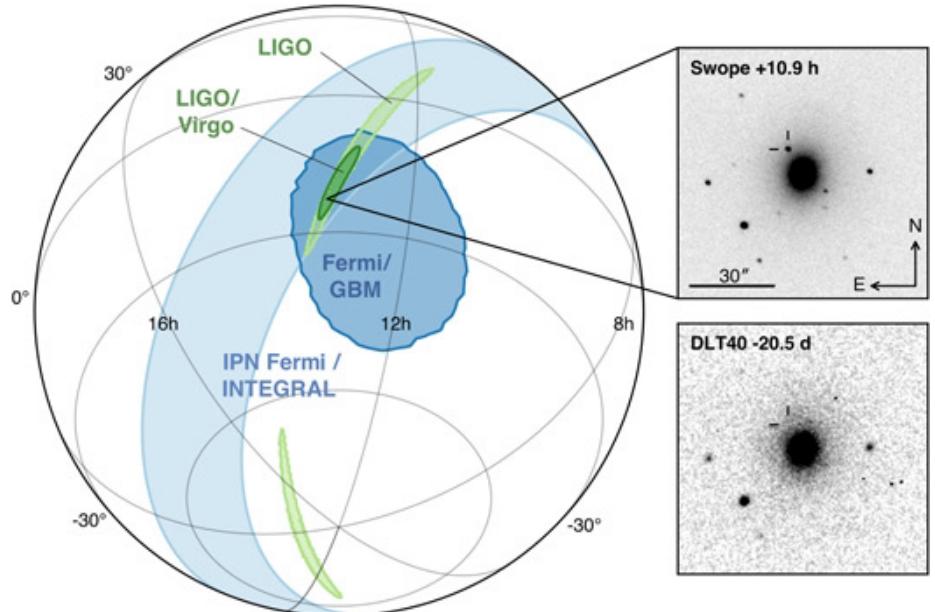


GW150914の観測データとベストフィット波形

GW170817

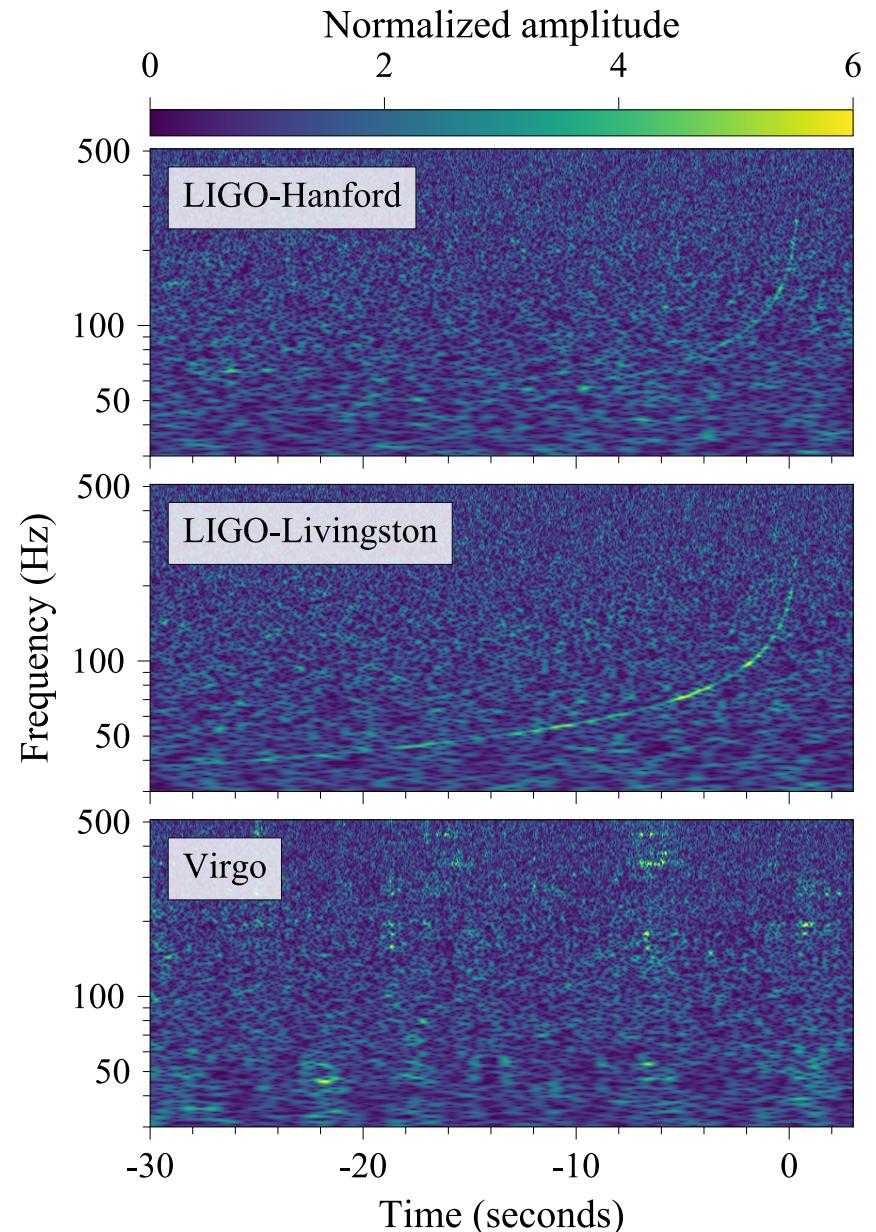
B. P. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **119**, no.16, 161101 (2017).

- 中性子星連星の合体：
 $m_1 = 1.36 - 1.60 M_{\odot}$, $m_2 = 0.86 - 1.36 M_{\odot}$.
- 電波- γ 線の広い帯域での電磁波追観測
→ マルチメッセンジャー天文学の始まり



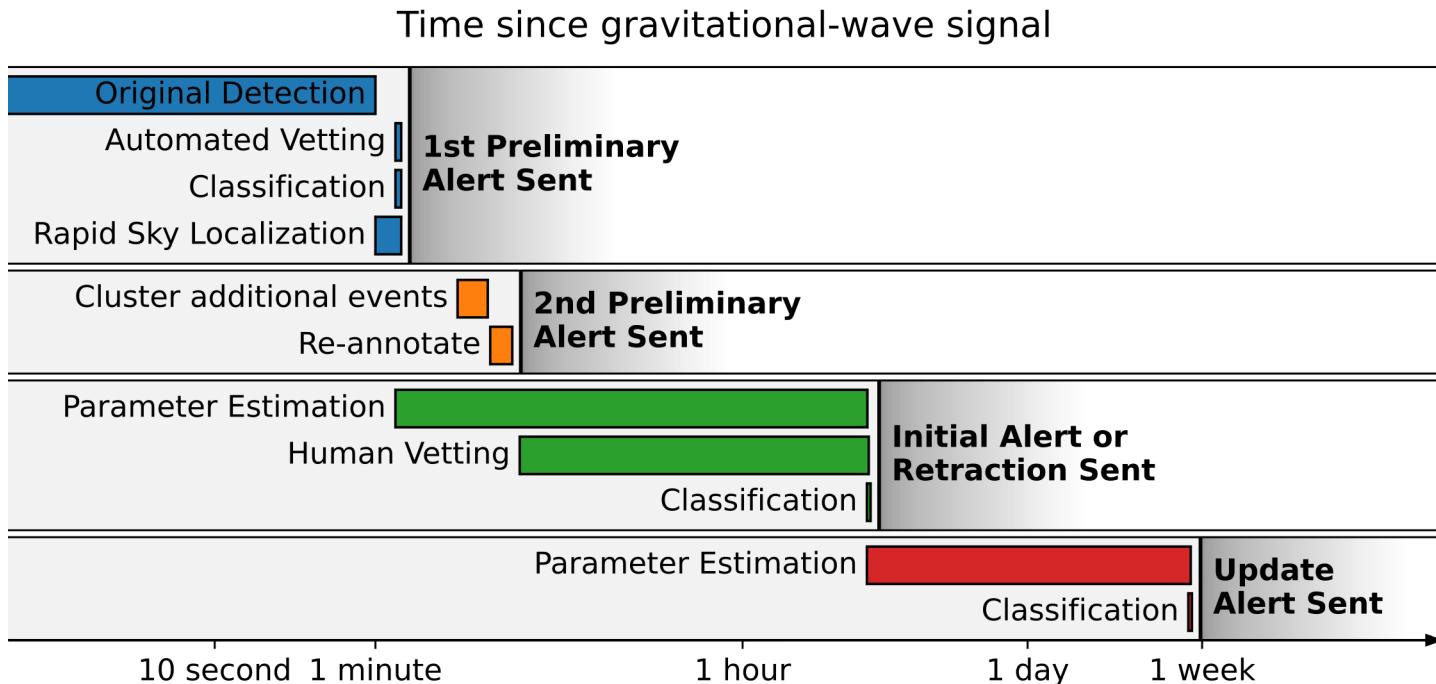
GW170817の推定位置と母銀河NGC4993の観測

B. P. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **848**, no.2, L12 (2017).



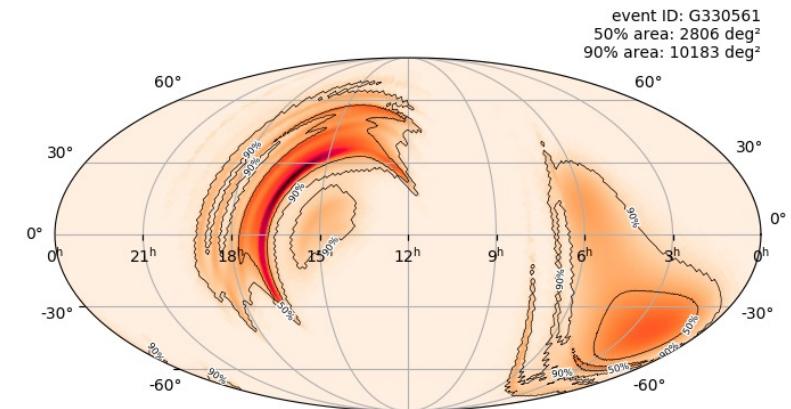
GW170817の時間周波数プロット

重力波速報システム

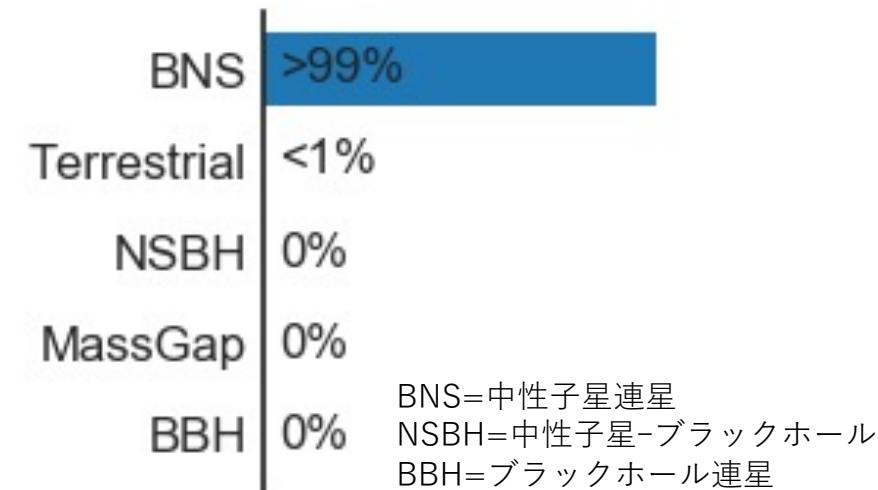


図：重力波速報のタイムライン

03からは、重力波検出後、**数十秒以内**に、位置・重力波源のカテゴリの情報が追観測グループに報告された。



図：GW190425の推定位置



図：GW190425のカテゴリ

連星合体の検出数

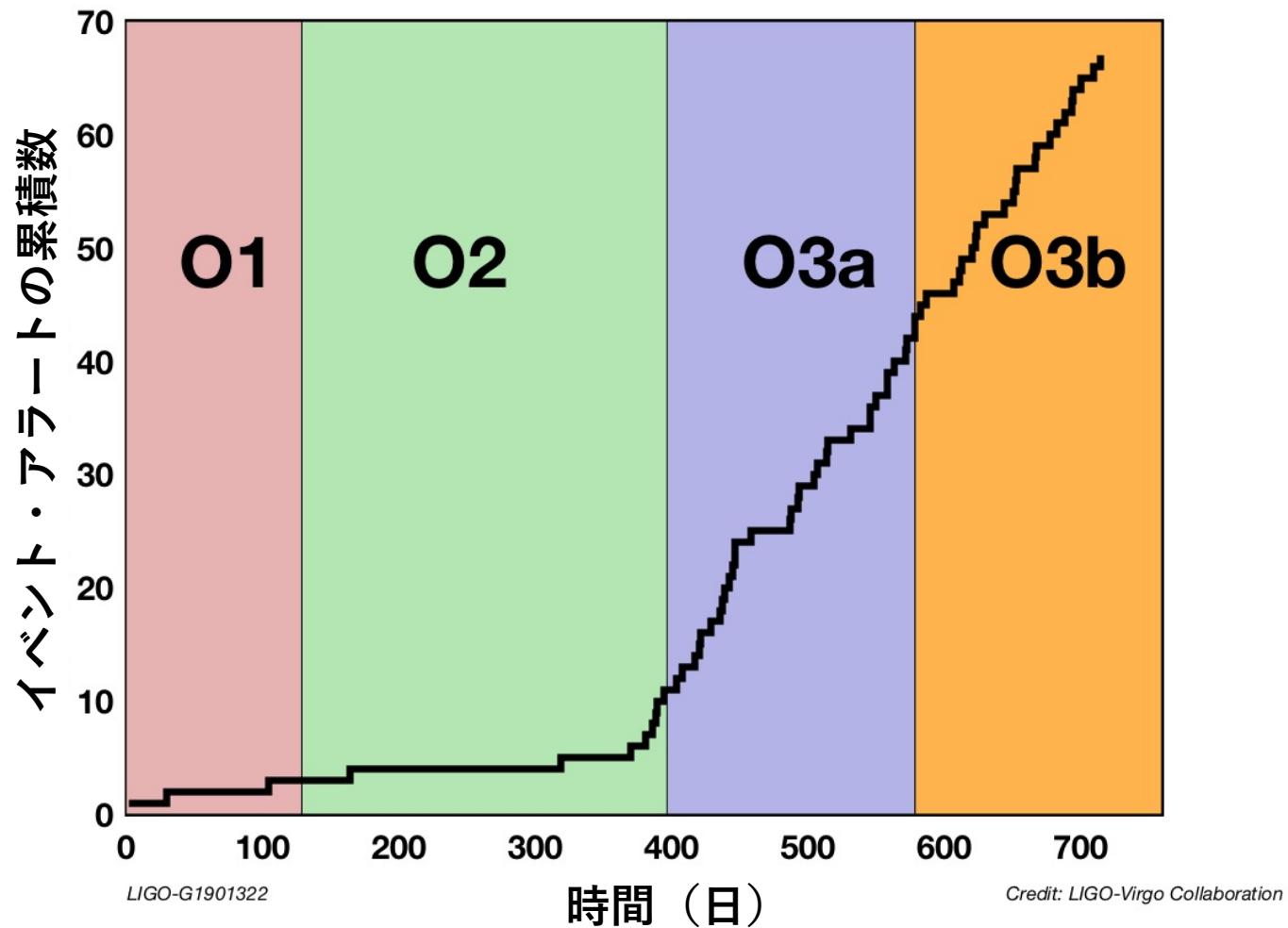
- O3では週に~1イベントの頻度
- 論文で報告されているのは、
O3aまでの全55イベント +
O3bの2イベント

R. Abbott et al., Phys. Rev. X **11**, 021053 (2021).

R. Abbott et al., arXiv:2108.01045 (2021).

R. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **915**, no.1, L5 (2021).

- 51イベントが $m_1, m_2 > 3M_{\odot}$ を満たすブラックホール連星
- O3bイベントを報告する論文は近日公開

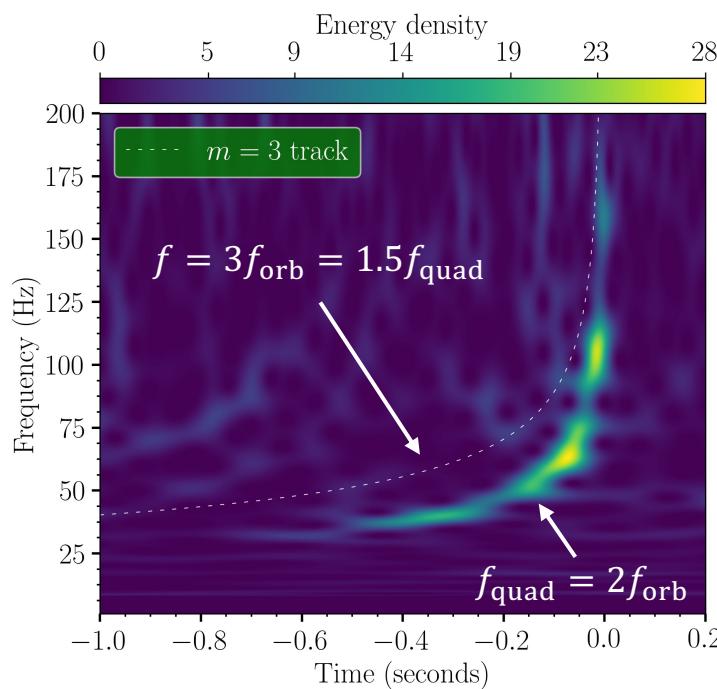


01, 02で検出されたイベントと03のアラートの累積数

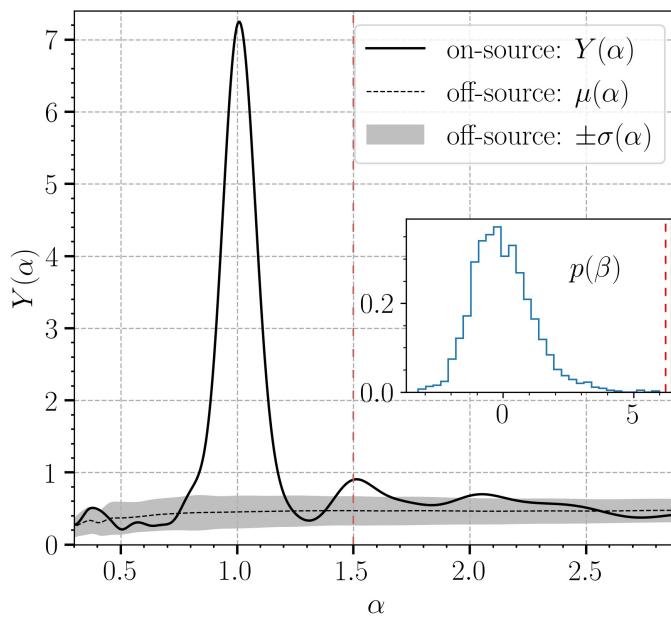
GW190412

R. Abbott et al., Phys. Rev. D 102, no. 4, 043015 (2020).

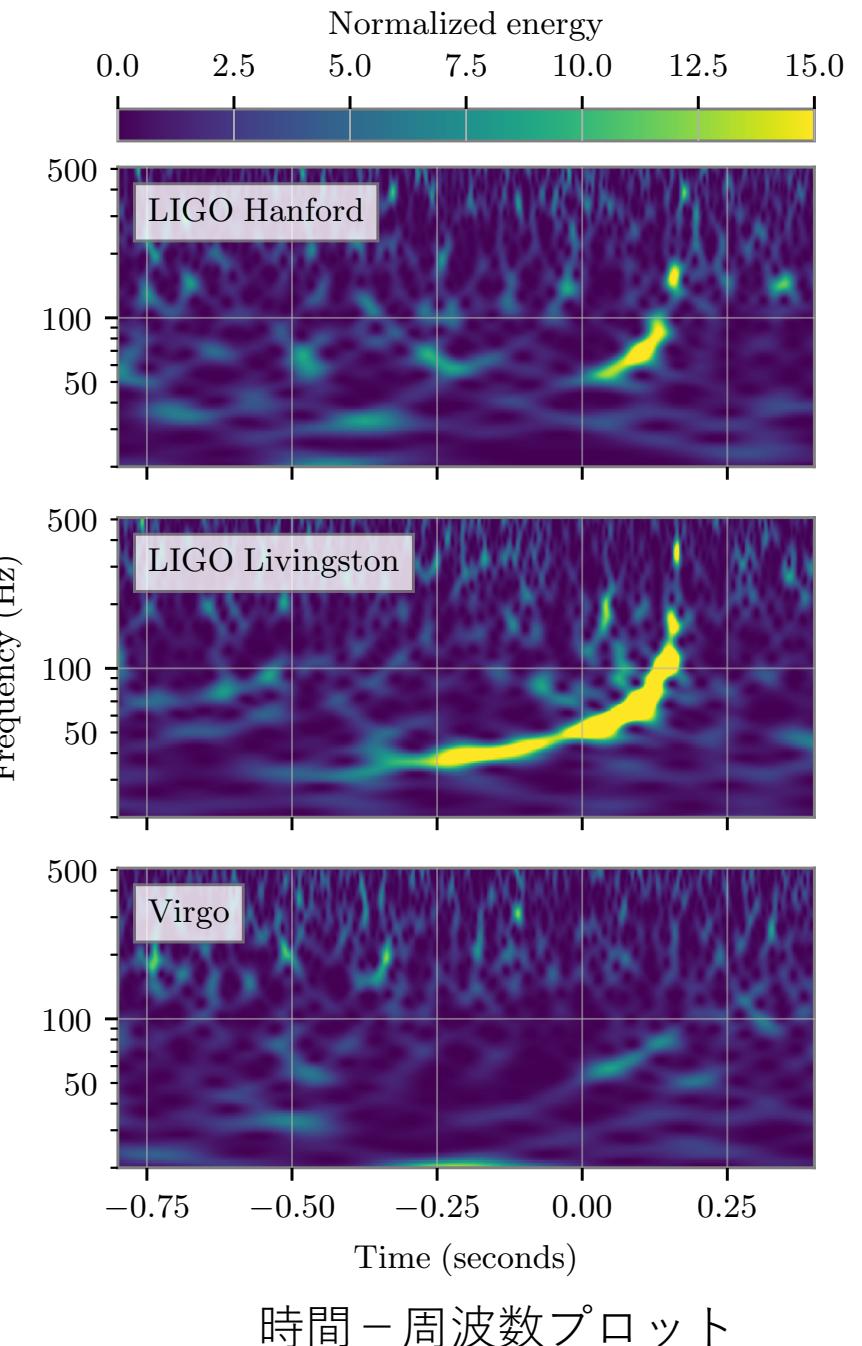
- 質量比の大きいブラックホール連星の初検出：
 $m_1 = 30.1^{+4.6}_{-5.3} M_\odot, m_2 = 8.3^{+1.6}_{-0.9} M_\odot$.
- 軌道周波数の3倍の高次モードが検出($p \sim 6 \times 10^{-4}$)



LIGO-Livingston の時間 – 周波数プロット



$f(t) = \alpha f_{\text{quad}}(t)$ に沿ってスタッツ
したエネルギー $Y(\alpha)$

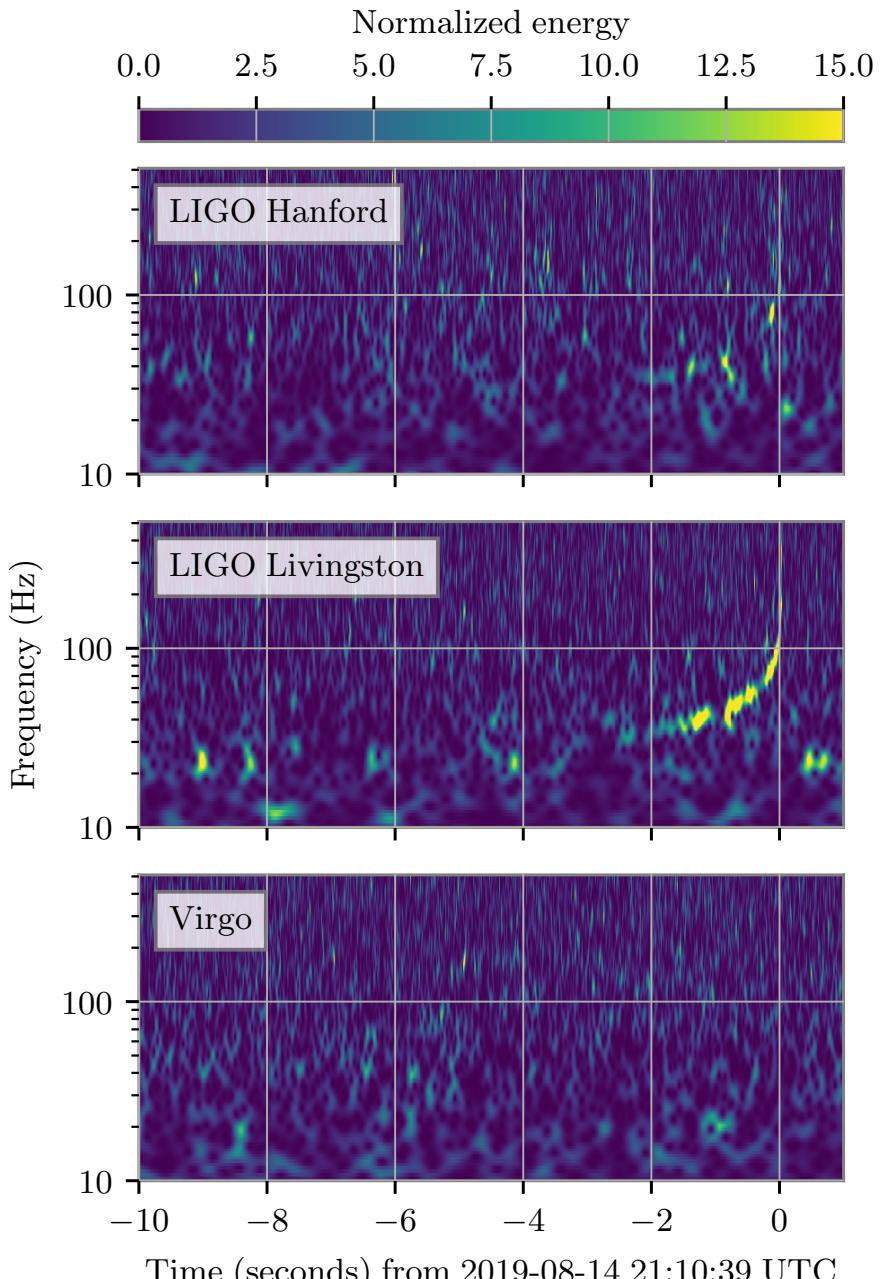


時間 – 周波数プロット

GW190814

R. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* 896, no.2, L44 (2020).

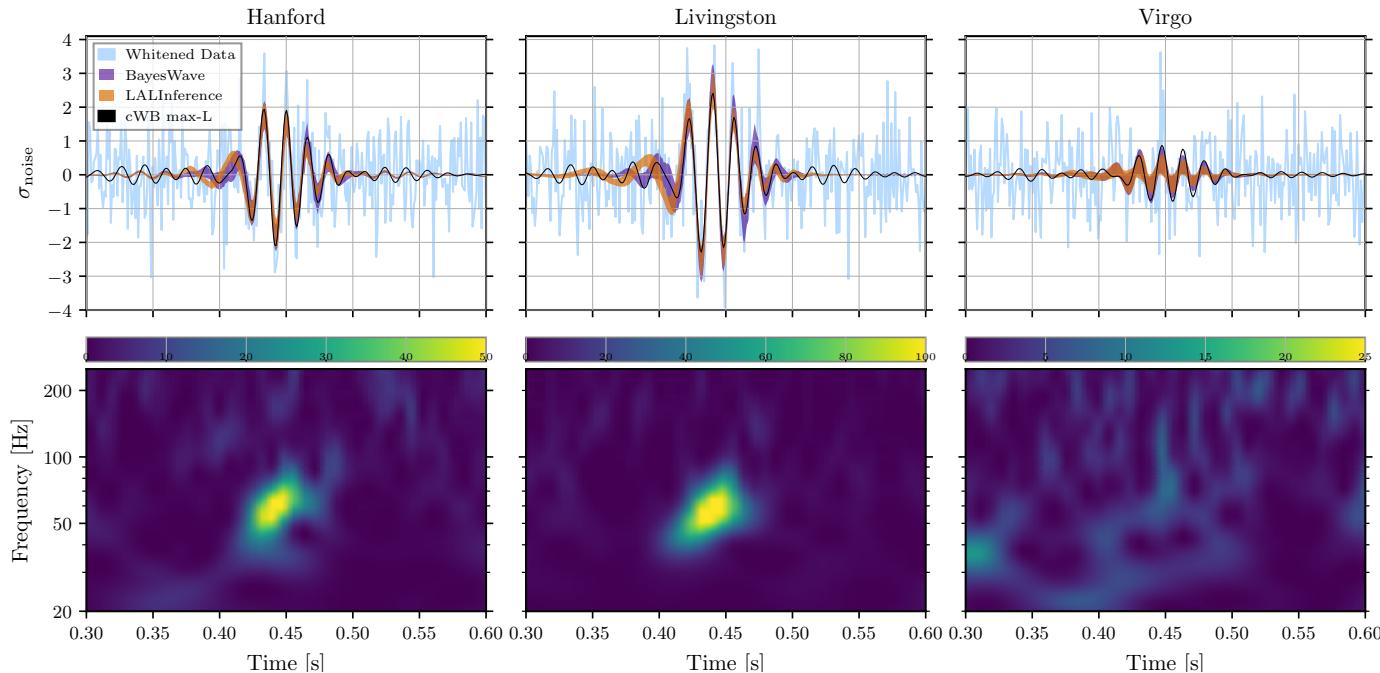
- 質量比が大きい連星：
 $m_1 = 23.2^{+1.1}_{-1.0} M_{\odot}$, $m_2 = 2.59^{+0.08}_{-0.09} M_{\odot}$.
- 伴星はこれまでに発見された中で
最も重い中性子星 か 最も軽いブラックホール
- GW170817から推定される
自転していない中性子星の最大質量は
 $M_{\max} \leq 2.43 M_{\odot}$ (at 90%)
- 電磁波対応天体は見つかっていない。



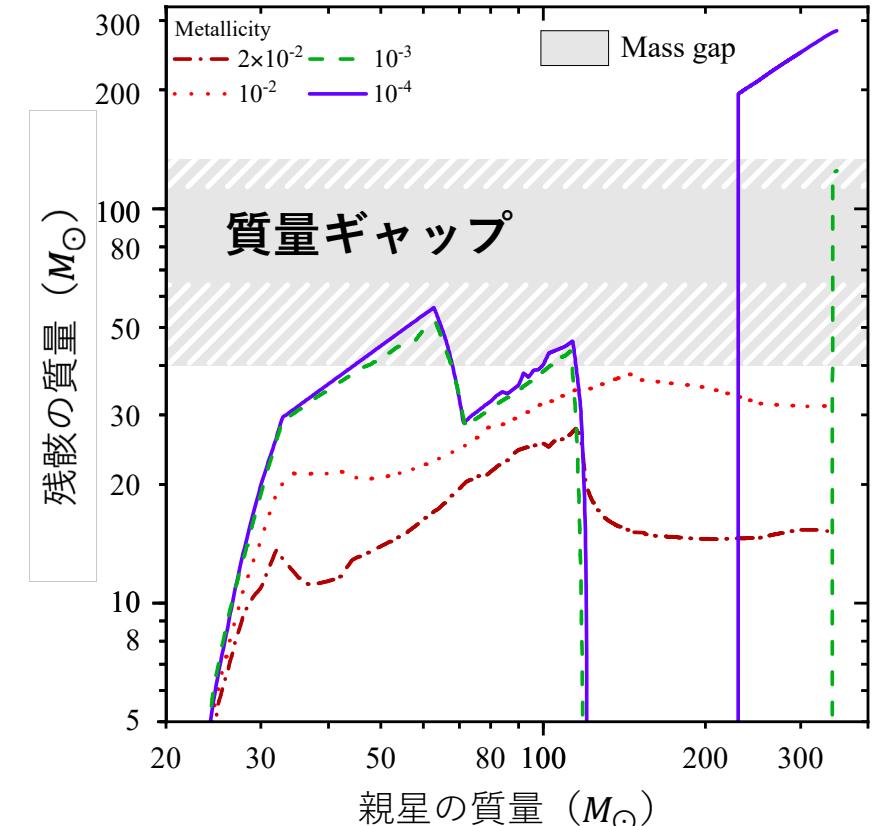
時間 – 周波数プロット

GW190521

R. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 125, no.10, 101102 (2020),
 R. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. 900, no.1, L13 (2020).



図：時間－周波数プロット



図：親星の質量に対する残骸の質量

- 最も重いブラックホール連星： $m_1 = 85^{+21}_{-14} M_\odot$, $m_2 = 66^{+17}_{-18} M_\odot$.
- 主星の質量 m_1 は対不安定型超新星爆発の質量ギャップ領域 ($65 - 120 M_\odot$) に入る。
- 合体後は中間質量ブラックホール： $M_f = 142^{+28}_{-16} M_\odot$.

連星ブラックホールの質量分布

- $m_1, m_2 > 3M_\odot$ を満たす44イベントを解析 (GW190814は除外)

R. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* **913**, no.1, L7 (2021).

- 3つの重い ($m_1 > 45M_\odot$) イベント : GW190521, GW190602_175927, GW190519_153544

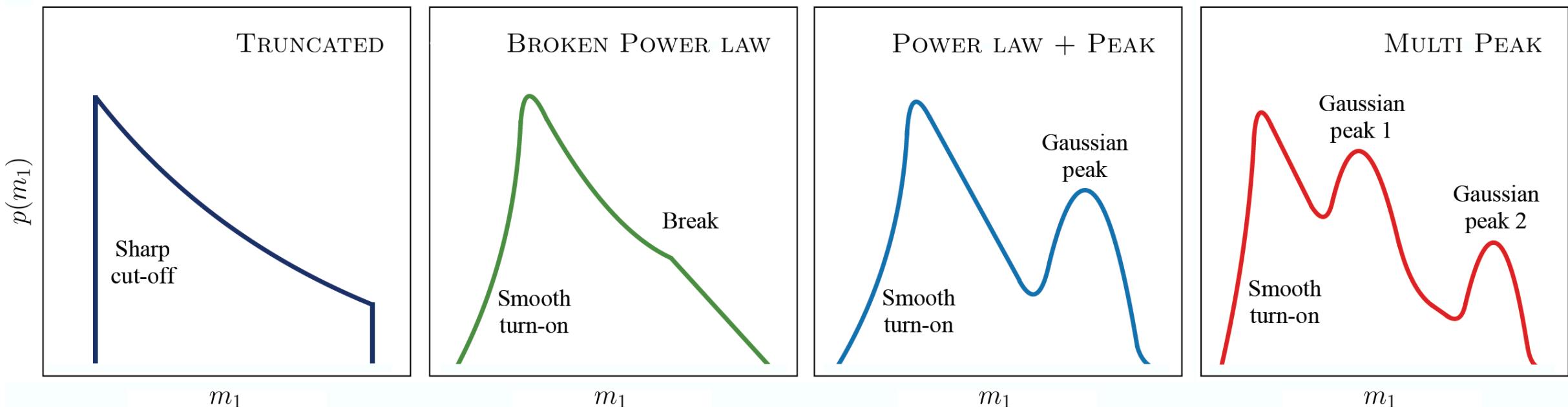
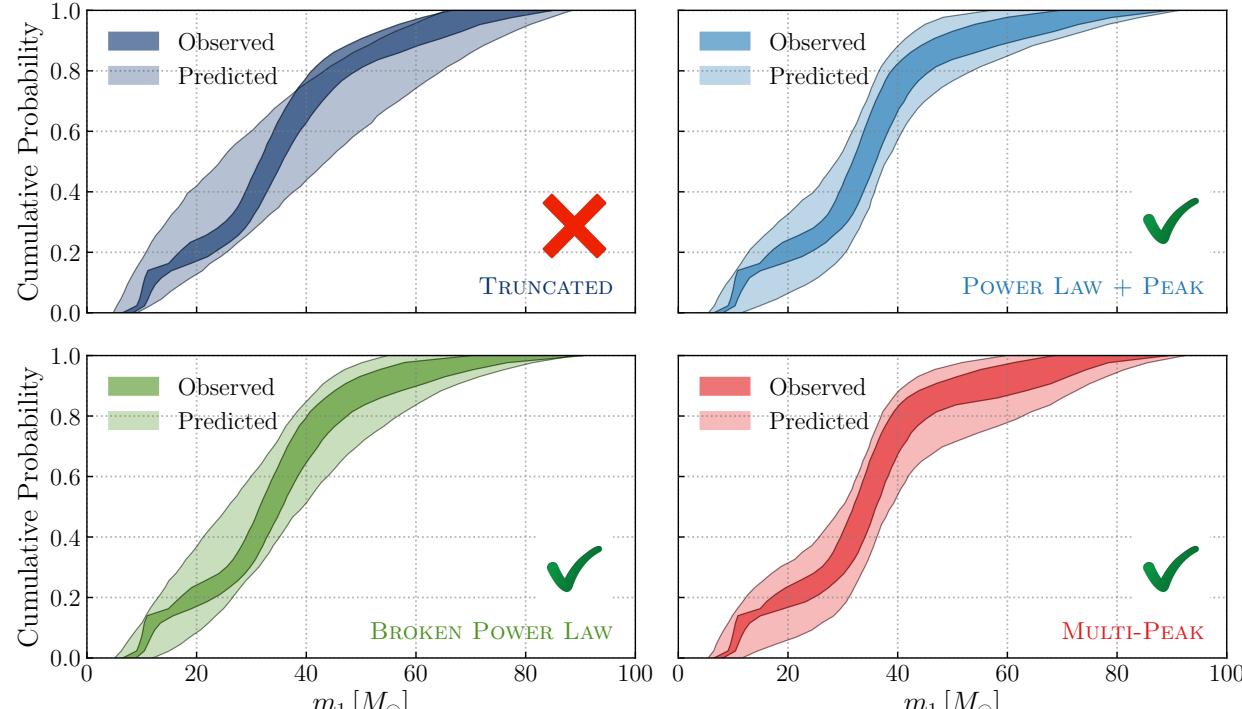


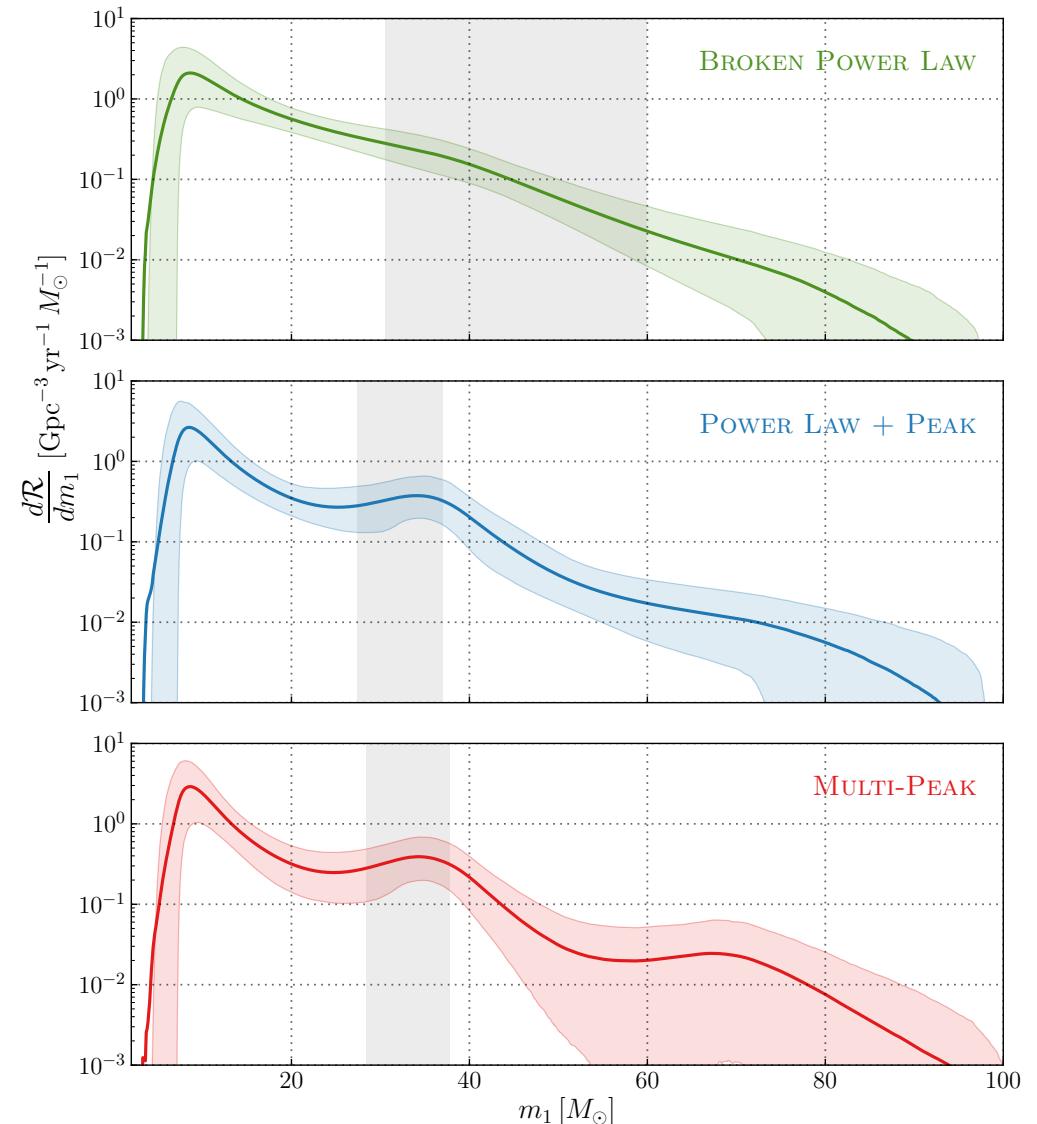
図 : LIGO-Virgo解析で用いられた質量分布モデル

連星ブラックホールの質量分布



図：主星の質量 (m_1) の累積分布

TRUNCATEDモデルは観測と合わない。
ベイズファクターで10 – 80劣る。



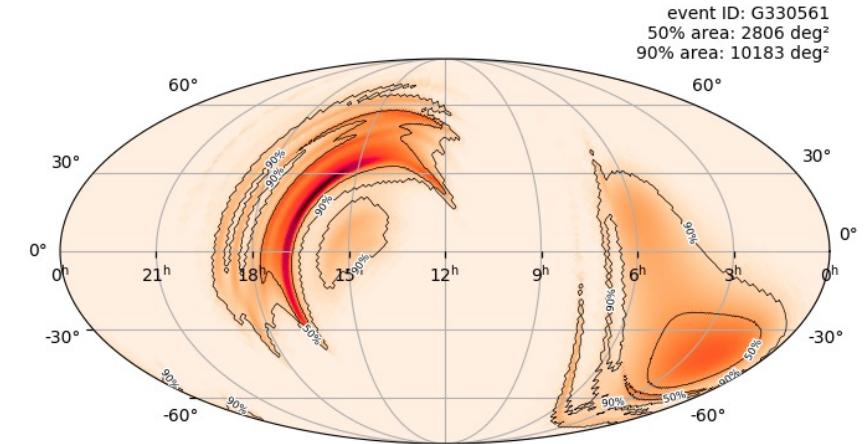
図：主星の質量 (m_1) の分布

$\sim 30 - 40 M_\odot$ に構造
 $m_1 > 45 M_\odot$ の連星は $2.9^{+3.5\%}_{-1.7\%}$

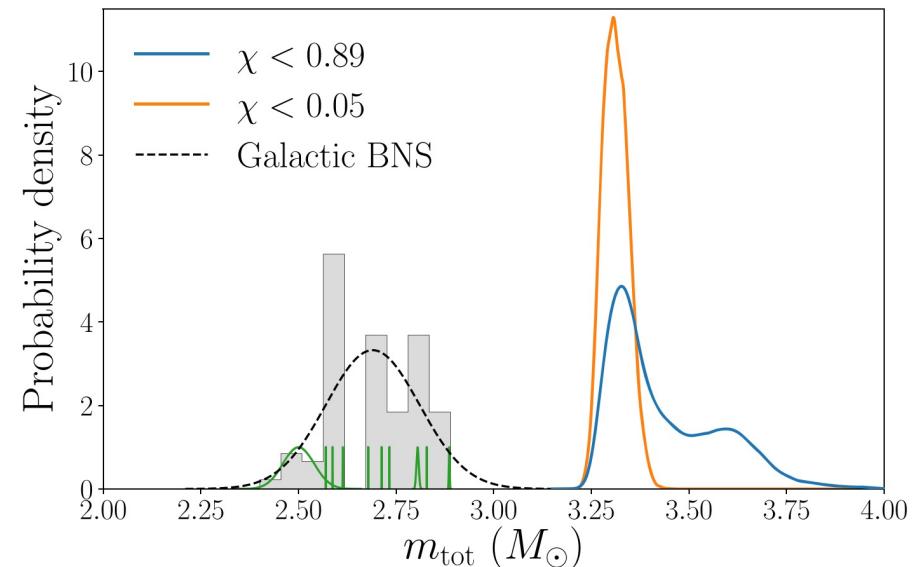
GW190425

B. P. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* **892**, no.1, L3 (2020).

- GW170817以来の中性子星連星候補：
 $m_1 = 1.61 - 2.52M_\odot$, $m_2 = 1.12 - 1.68M_\odot$.
- LIGO-Hanfordは観測していなかった。
→ 位置ほぼ決まらず（全天の~16%）
- 電磁波・ニュートリノ対応天体は未発見
- 今まで見つかった（宇宙年齢以内に衝突する）
中性子星連星の中で最も重い。



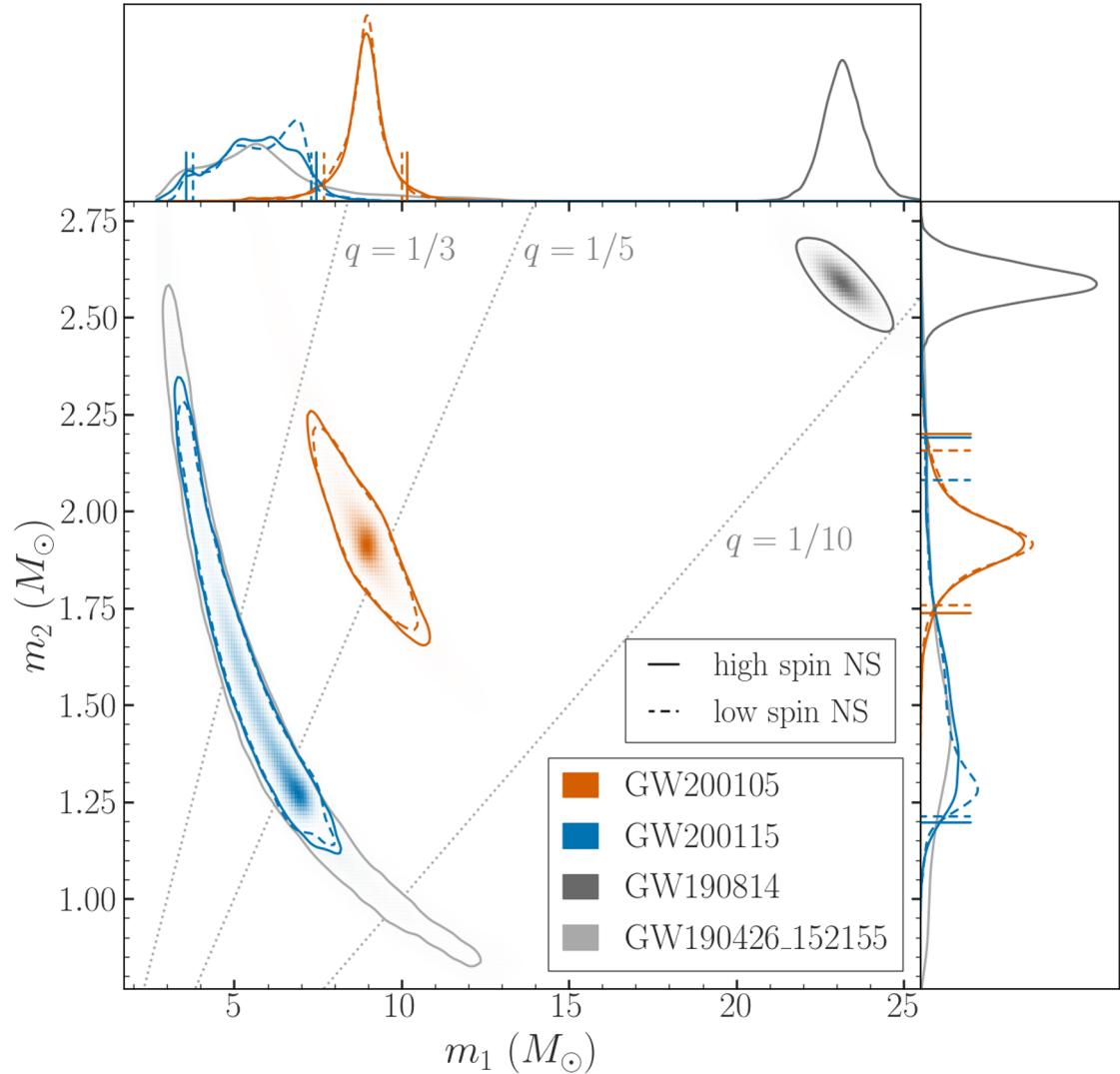
GW190425の推定位置



銀河内の宇宙年齢以内に衝突する連星中性子星と
GW190425の合計質量 13

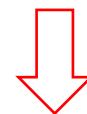
GW200105 & GW200115

R. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* **915**, no.1, L5 (2021).



	m_1	m_2
GW200105	$8.9^{+1.2}_{-1.5} M_{\odot}$	$1.9^{+0.3}_{-0.2} M_{\odot}$
GW200115	$5.7^{+1.8}_{-2.1} M_{\odot}$	$1.5^{+0.7}_{-0.3} M_{\odot}$

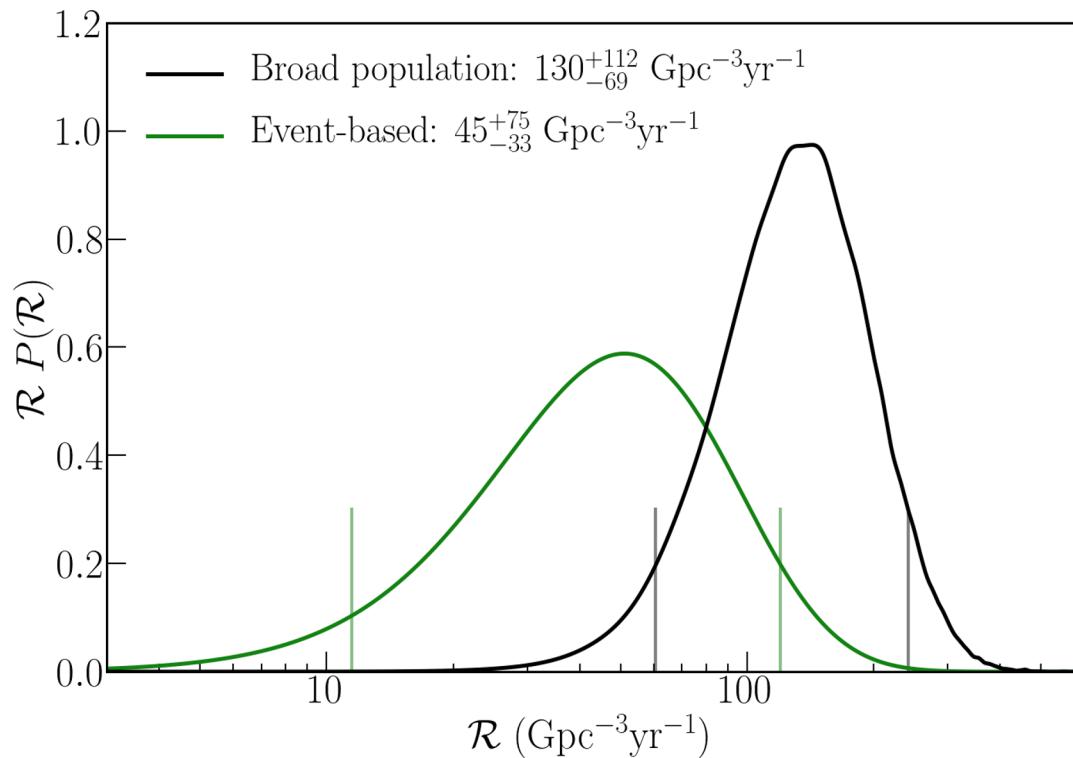
全て90%信頼区間



中性子星の質量レンジ

- 中性子星 - ブラックホールと質量が無矛盾な信号の初検出
- 伴星が中性子星である直接的証拠（電磁波対応天体・潮汐変形）は検出されなかった。

GW200105 & GW200115



Event-basedの合体率

- GW200105とGW200115のみを考慮
- **12-120 Gpc $^{-3}$ yr $^{-1}$**

Broad populationの合体率

- 中性子星 - ブラックホールの質量レンジに入る全てのイベント候補を考慮
($m_1 \in [2.5, 40]M_\odot$, $m_2 \in [1, 3]M_\odot$)
- **61-242 Gpc $^{-3}$ yr $^{-1}$**

全力テグリーの連星合体率が測定された:

中性子星 - ブラックホール

12-242 Gpc $^{-3}$ yr $^{-1}$

連星中性子星

80-810 Gpc $^{-3}$ yr $^{-1}$

連星ブラックホール

15-38 Gpc $^{-3}$ yr $^{-1}$

GW200105 & GW200115

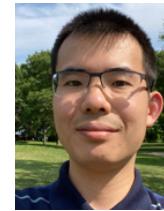
R. Abbott et al., *Astrophys. J. Lett.* **915**, no.1, L5 (2021).

Completing the trilogy: GW200105 and GW200115

Detecting the signals

At the time of GW200105, the LIGO Hanford detector was offline and only the LIGO Livingston detector observed a signal with a signal-to-noise ratio above the threshold of detection. GW200115, on the other hand, was seen by both LIGO Hanford and LIGO Livingston. For both events, the signal-to-noise ratio recorded by the Virgo detector didn't meet the detection threshold.

When we make any detection, we estimate how confident it is. We compute the statistical significance of a detection by working out the possibility that noise could randomly produce the same signal by chance. We consider GW200115 to be an astro-



Soichiro Morisaki

is a postdoctoral researcher at the University of Wisconsin-Milwaukee. In his free time, he visits breweries and enjoys some beers and cheese curds.



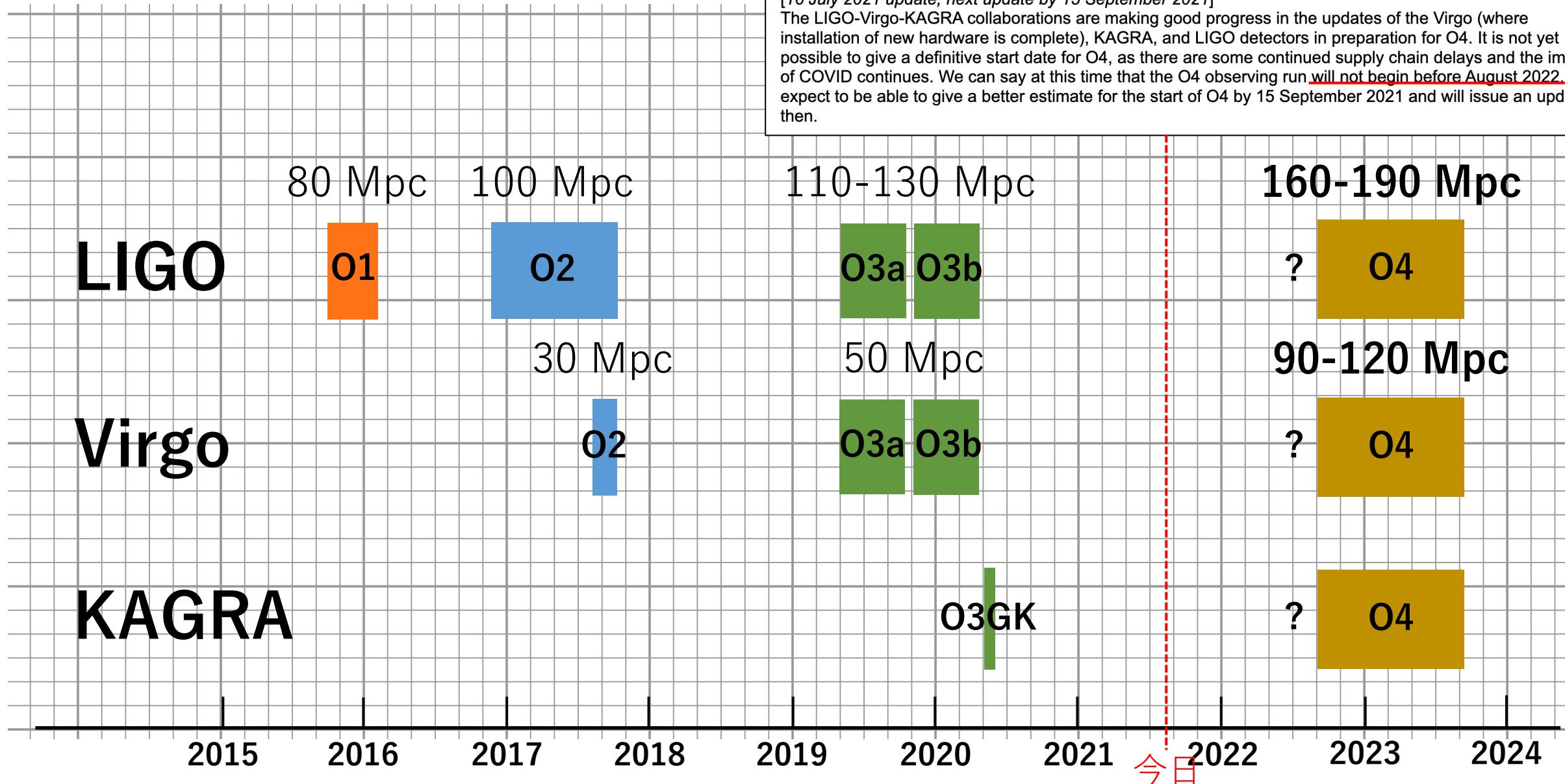
Leo Tsukada

is a postdoctoral researcher at the Pennsylvania State University. He likes workout and hiking as well as enjoying sci-fi movies on Netflix on weekends.

Black holes can spin, and measuring the rate and orientation of the spins can help us piece together how the binaries are formed. There is a theoretical maximum spin of a black hole. We found the black hole spin for GW200105 could lie between 0 and as high as 30% of the maximum rotation rate of black holes, while for GW200115, the spin lies between 0 and 80% of the maximum rate. For GW200115, the black hole spin is likely to have a negative spin projection. This means it is spinning in the opposite sense to orbital rotation of the binary system, which is quite unusual if it is the case. We do not have strong evidence of neutron star spin because our measure-

LIGO magazineは
<https://www.ligo.org/magazine/>にて無料公開

次回の観測



OBSERVING PLANS AND PUBLIC ALERTS

LIGO, VIRGO AND KAGRA OBSERVING RUN PLANS

[16 July 2021 update; next update by 15 September 2021]

The LIGO-Virgo-KAGRA collaborations are making good progress in the updates of the Virgo (where installation of new hardware is complete), KAGRA, and LIGO detectors in preparation for O4. It is not yet possible to give a definitive start date for O4, as there are some continued supply chain delays and the impact of COVID continues. We can say at this time that the O4 observing run will not begin before August 2022. We expect to be able to give a better estimate for the start of O4 by 15 September 2021 and will issue an update then.

結論

- O3からは重力波の速報が行われるようになった。
- O3でいくつか面白いイベントが検出された。
 - 質量比の大きいブラックホール連星
 - 中性子星とブラックホールの境界の質量を持つコンパクト天体
 - 対不安定型超新星爆発の質量ギャップ領域 ($65 - 120M_{\odot}$) に入る重いブラックホール連星
 - 中性子星 - ブラックホール連星
- 連星ブラックホールの質量分布は $\sim 30 - 40M_{\odot}$ に構造を持つ。
- 今後の展望
 - 連星ブラックホールの質量・スピン分布
 - 中性子星 - ブラックホール連星の電磁波対応天体
 - 超新星爆発からのバースト重力波
 - 回転する中性子星からの連續的重力波
 - 連星合体信号の重ね合わせなどの背景重力波
 - ...

Extra slides

連星ブラックホールのスピン分布

- 精度良く測れるスピン成分：

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{(m_1 \vec{\chi}_1 + m_2 \vec{\chi}_2) \cdot \hat{L}_N}{m_1 + m_2}$$

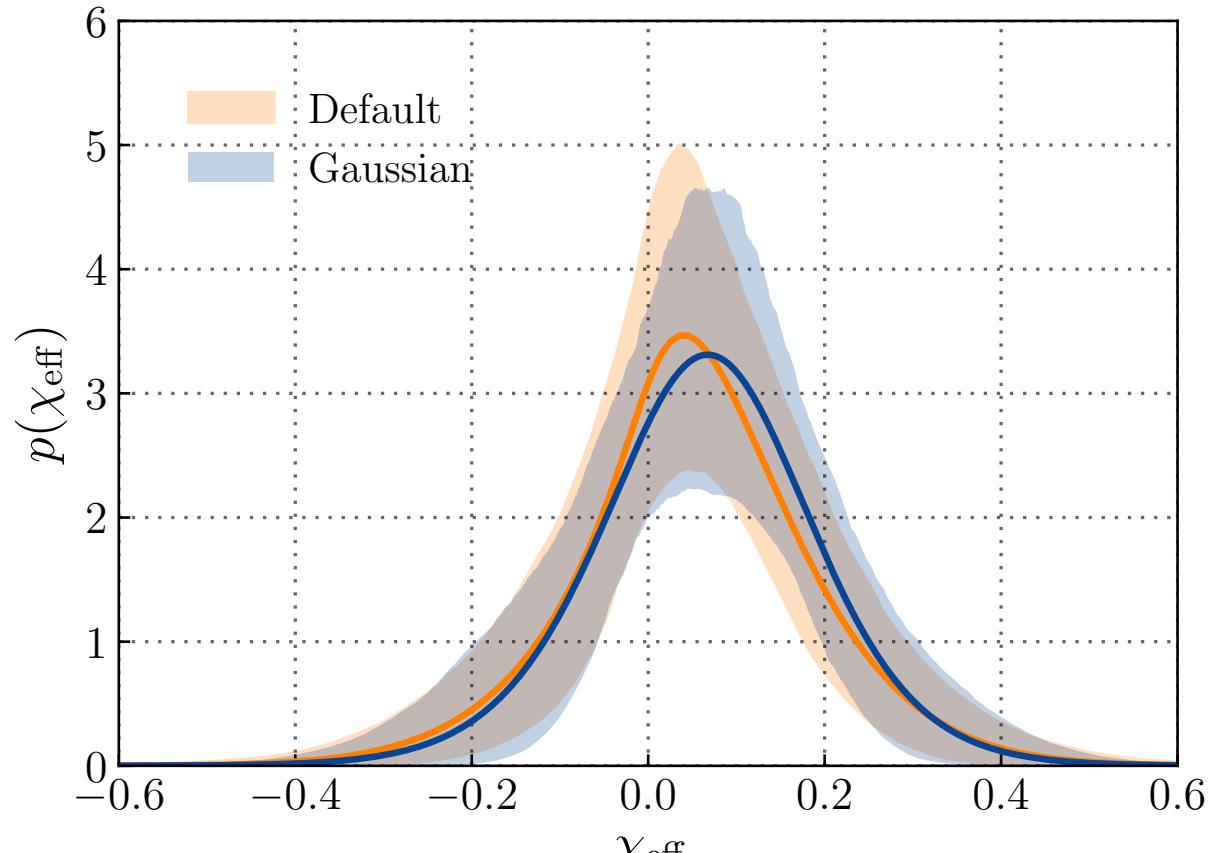
$\vec{\chi}_1, \vec{\chi}_2$ ：（無次元）スピン角運動量

\hat{L}_N ：軌道角運動量方向の単位ベクトル

- 9イベントに対して $\chi_{\text{eff}} > 0$ (at 95%)
→ 分布は $\chi_{\text{eff}} > 0$ によっている。

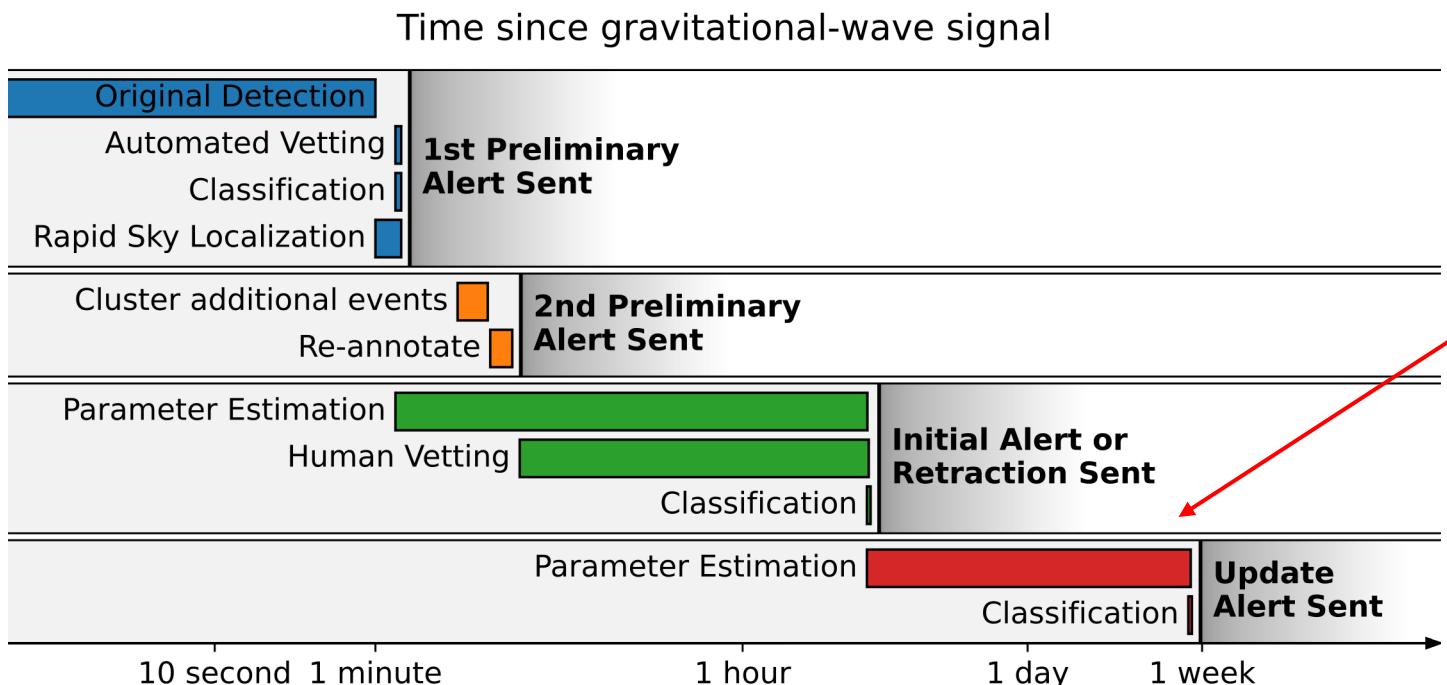
- 12% – 44% は $\chi_{\text{eff}} < 0$
ダイナミカルに形成された連星？

- 異なる分布モデルを用いた解析では
 $\chi_{\text{eff}} < 0$ の集団の兆候は見つからなかった。



推定された χ_{eff} の分布

04に向けたパラメター推定の高速化



図：重力波速報のタイムライン

- 重力波波形ベクトルの次元削減を用いた高速化
→ 中性子星連星の解析を~ 10^4 倍高速化 Morisaki and Raymond, Phys. Rev. D **102**, 104020 (2020).
- 連星合体信号の周波数が単調増加することを利用して高速化

Morisaki , Phys. Rev. D **104**, 044062 (2021).

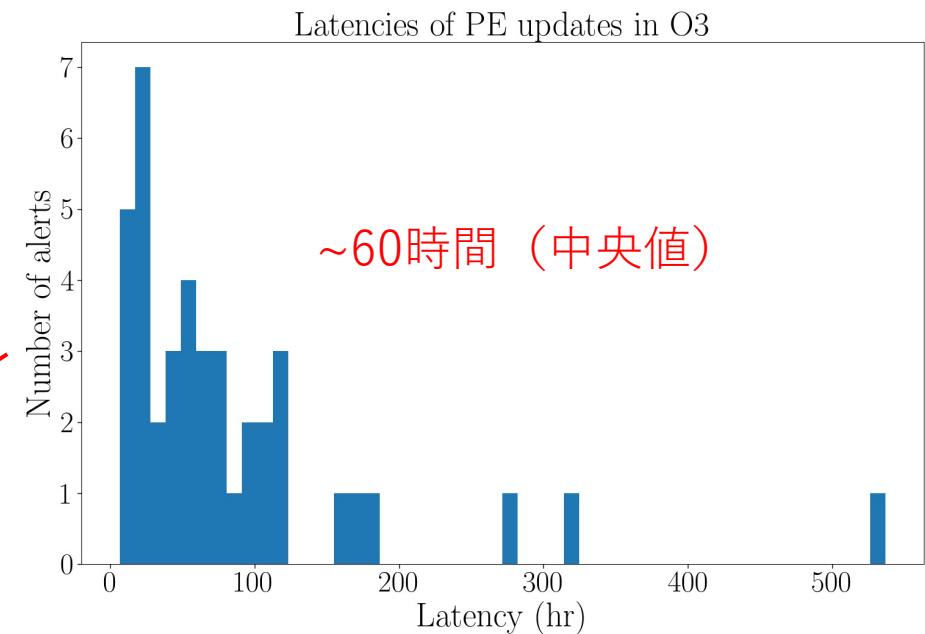
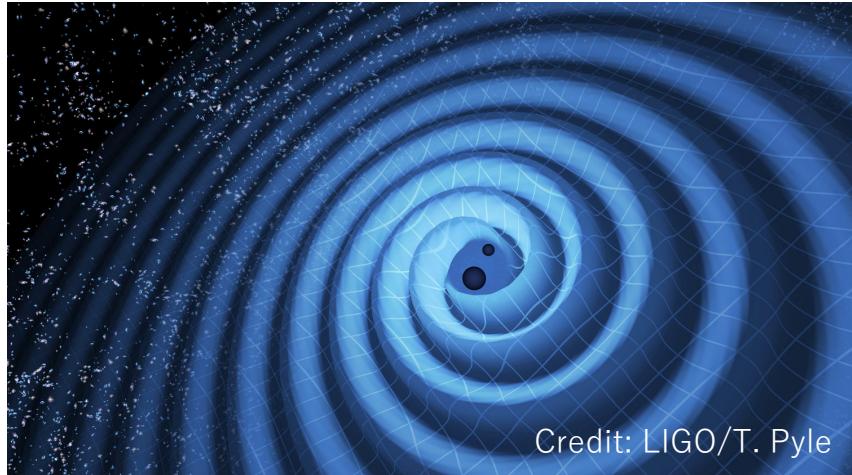


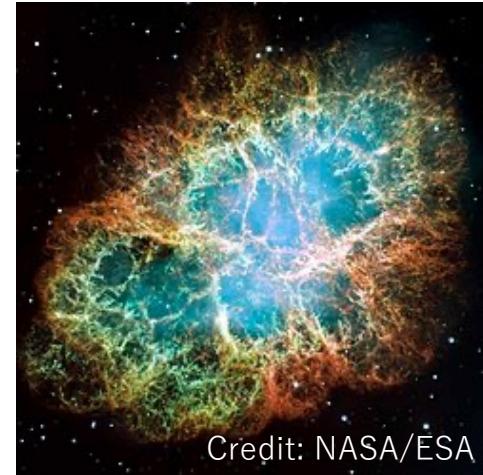
Figure: O3でパラメター推定にかかった時間

様々な重力波源

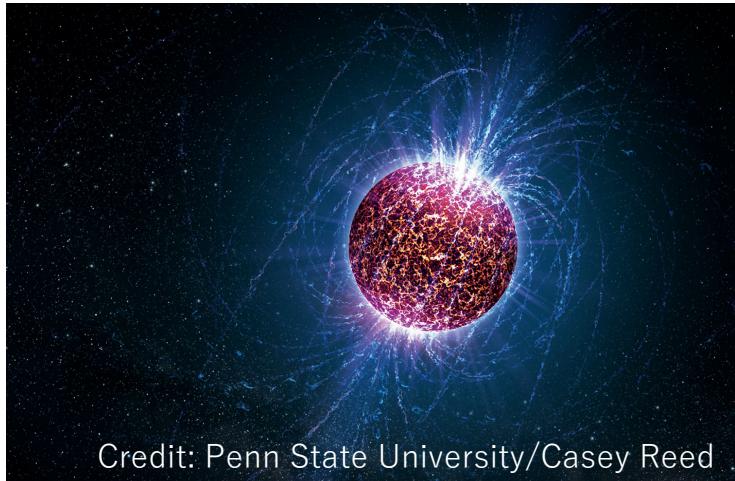
連星合体



バースト重力波（例：超新星爆発）



連続波（例：回転する中性子星）



背景重力波（例：連星合体の重ね合わせ）



GW190521

R. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. **125**, no.10, 101102 (2020),
 R. Abbott et al., Astrophys. J. Lett. **900**, no.1, L13 (2020).

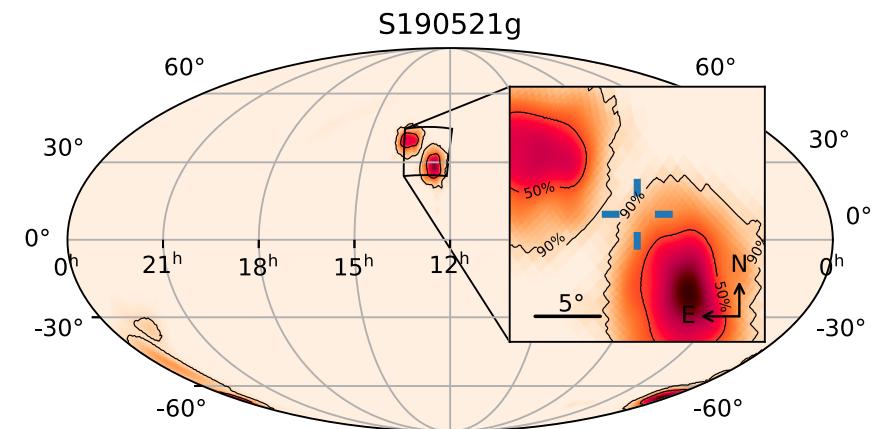
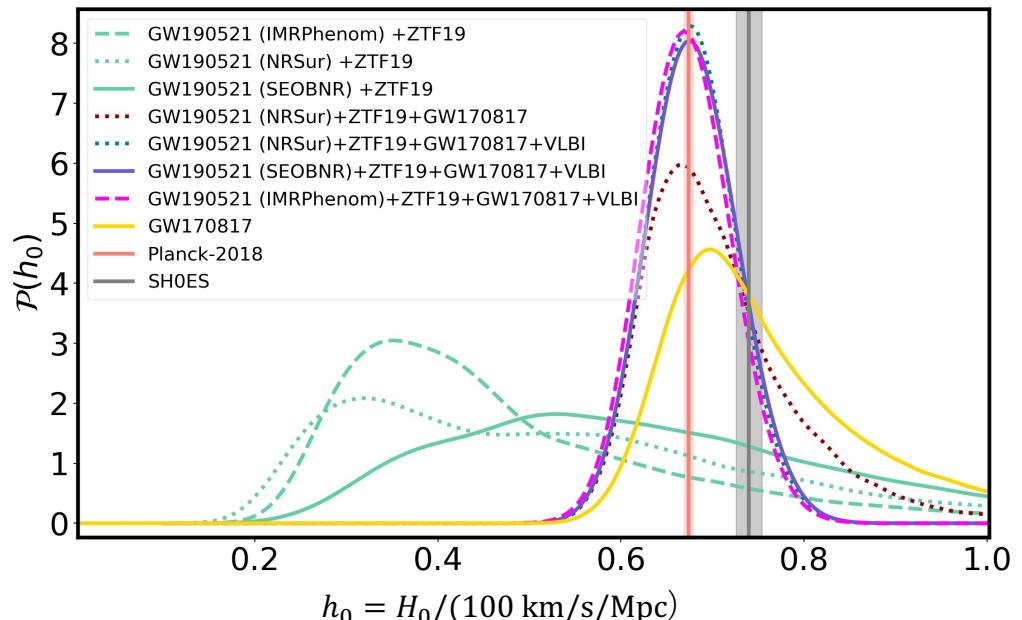
- Zwicky transient facility (ZTF) による電磁波対応天体ZTF19abanrhrの検出

M. J. Graham et al., Phys. Rev. Lett. **124**, no.25, 251102 (2020).

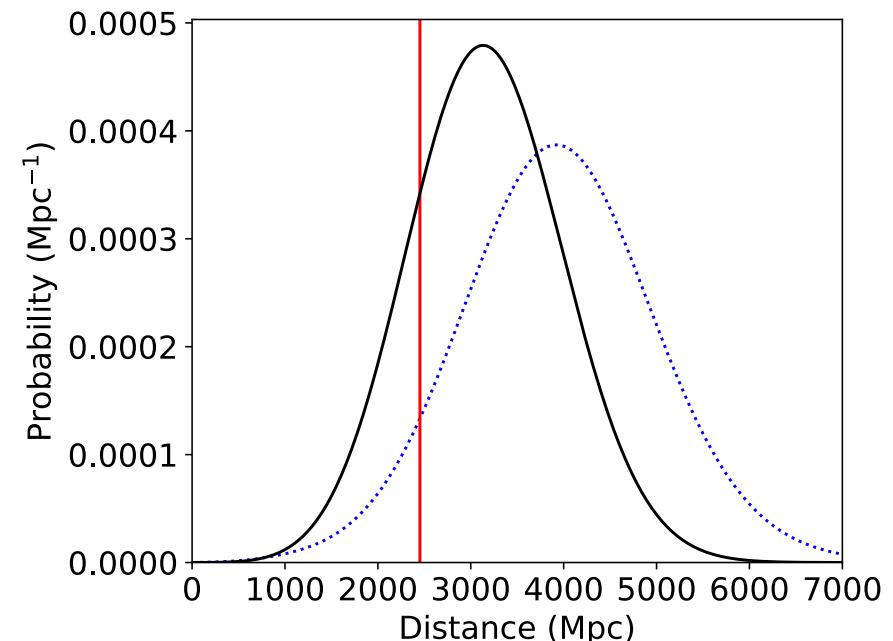
- ハッブル定数の測定：

$$H_0 = 50.4^{+28.1}_{-19.5} \text{ km/s/Mpc (NRSur7dq4)}$$

S. Mukherjee et al., arXiv:2009.14199 (2020).



GW190521 (赤い領域) と ZTF19abanrhr (経緯線) の二次元位置



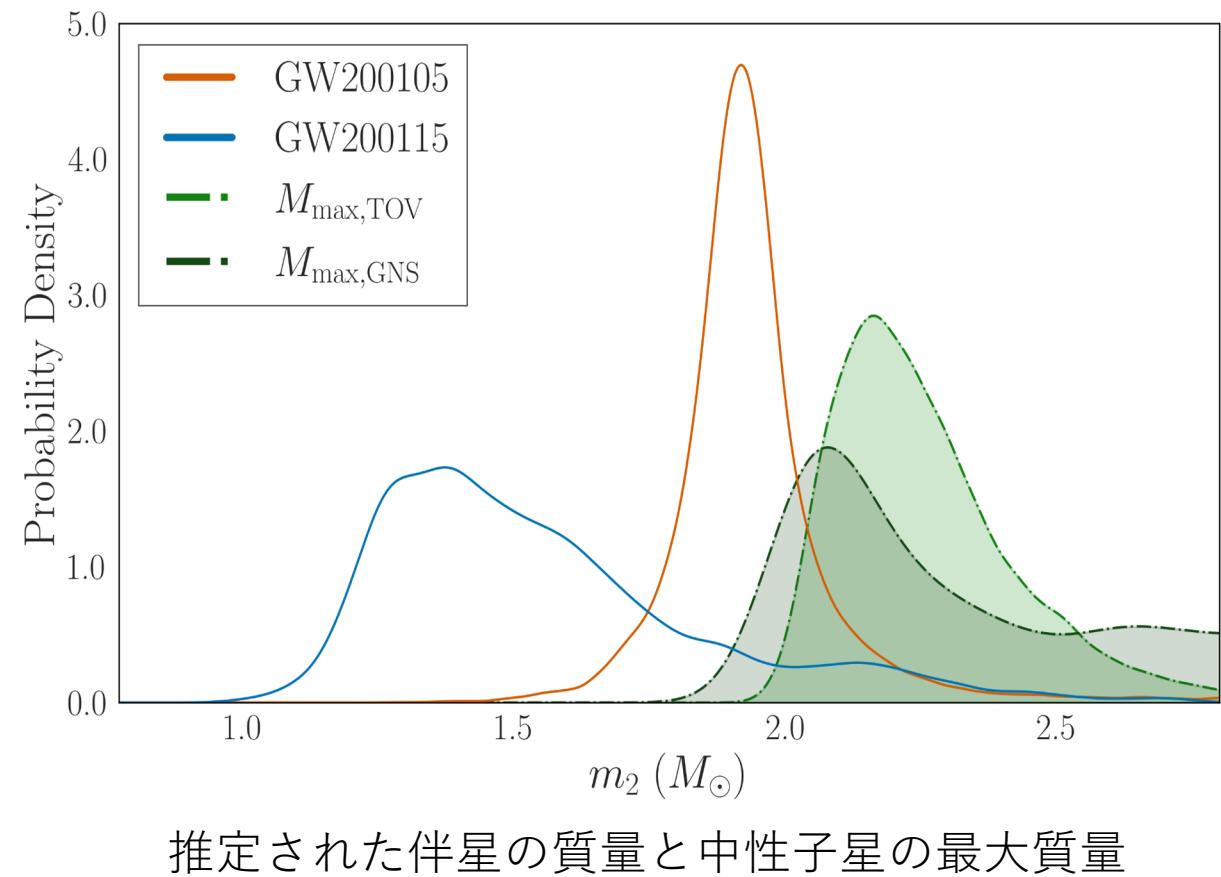
二次元位置を固定した条件でのGW190521までの距離 (黒線)
 とZTF19abanrhrの母銀河 (赤線) までの距離
 23

伴星は中性子星か？

中性子星の最大質量との比較

- $M_{\max, \text{TOV}}$ 電波、X線、重力波観測から推定された状態方程式から計算
(Landry, Essick & Chatzioannou 2020)
- $M_{\max, \text{GNS}}$ 銀河内の中性子星の質量分布をフィッティングすることで計算
(Farr & Chatzioannou 2020)
- $M_{\max}(\text{spin})$ 中性子星のスピンが大きい場合も考慮して計算 (右図には示されてない)

どの場合でも、 $p(m_2 < M_{\max}) \sim 95\%$

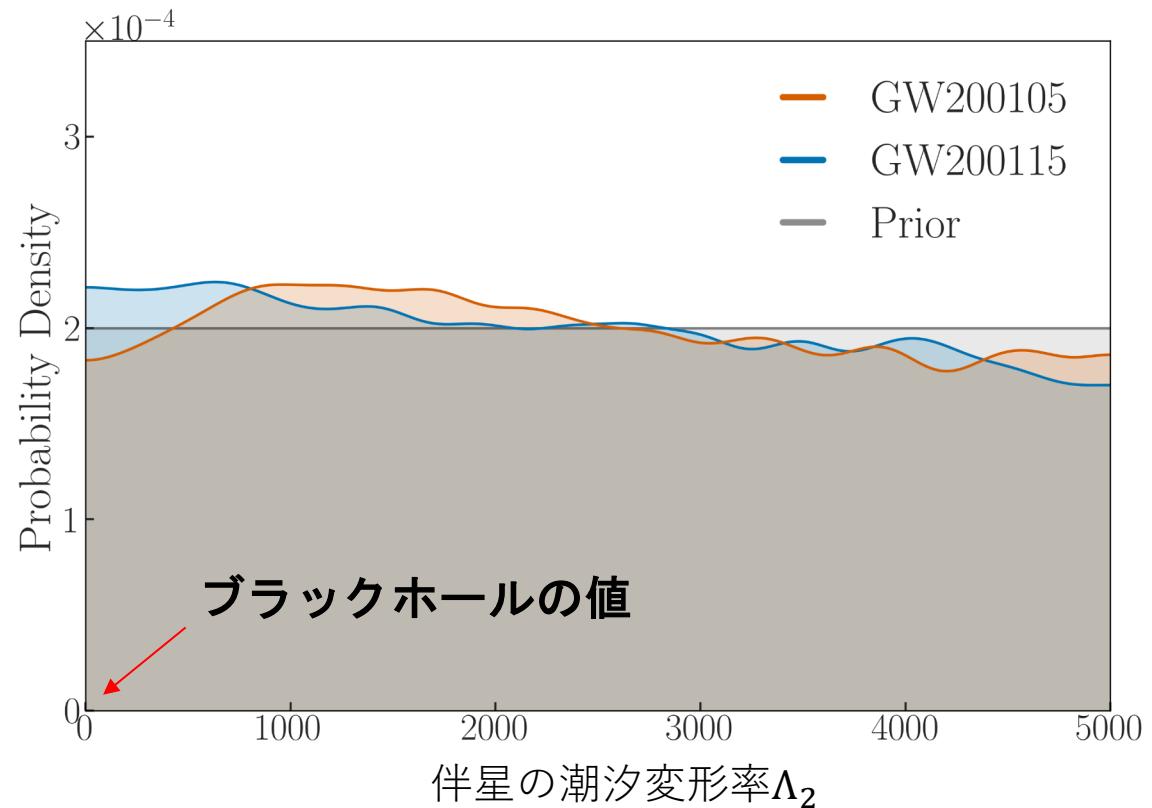


伴星は中性子星か？

しかし、伴星が中性子星である直接的な証拠は見つかっていない。

- 電磁波対応天体は見つかっていない。
- 重力波データから潮汐変形の兆候は見えてない（右図参照）。

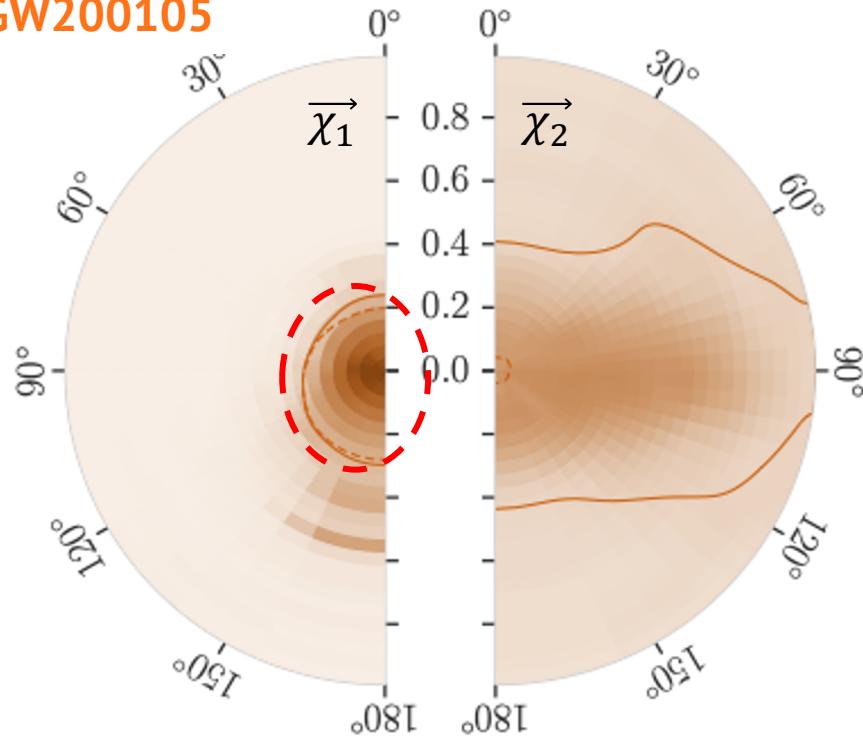
→ 軽いブラックホールの可能性は否定できない（例：原始ブラックホール）。



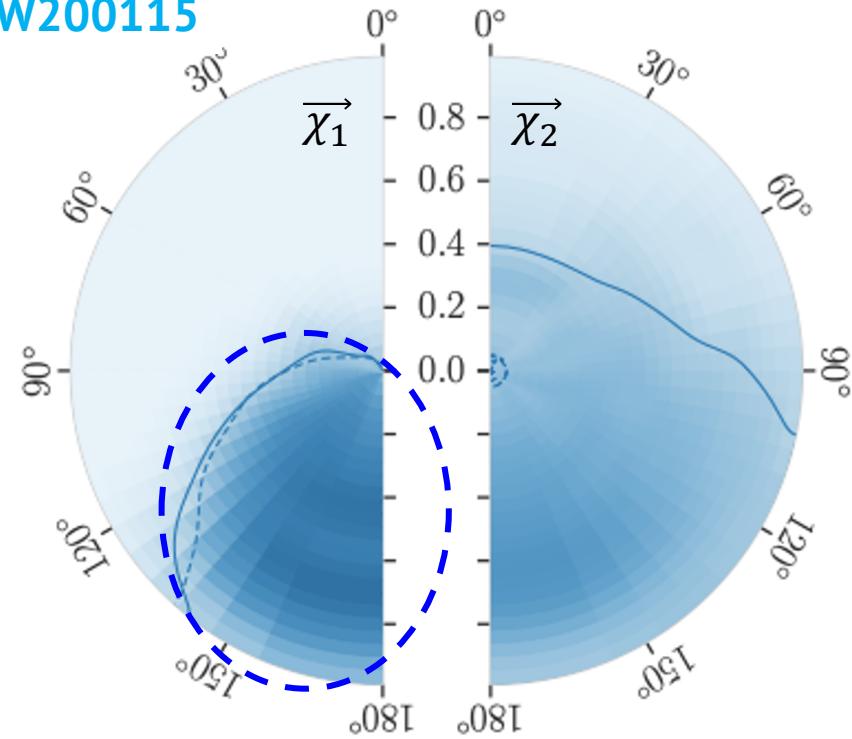
推定された伴星の潮汐変形率

自転角運動量（スピン）

GW200105

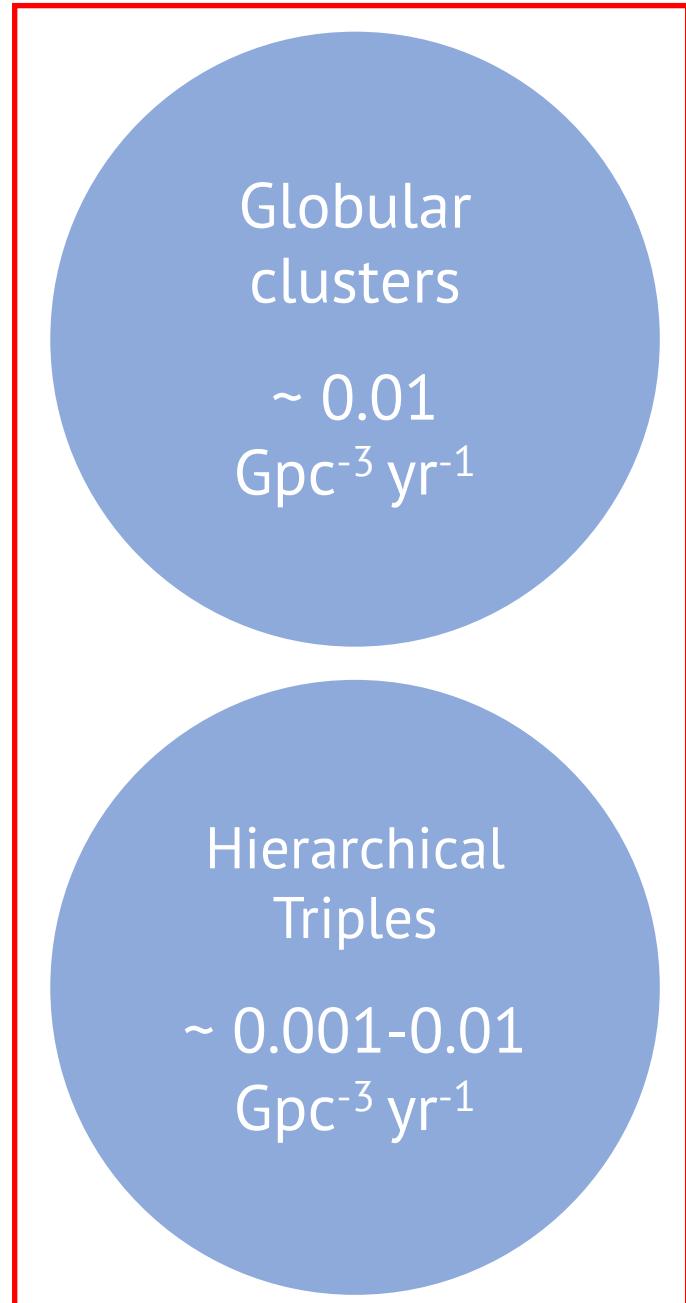
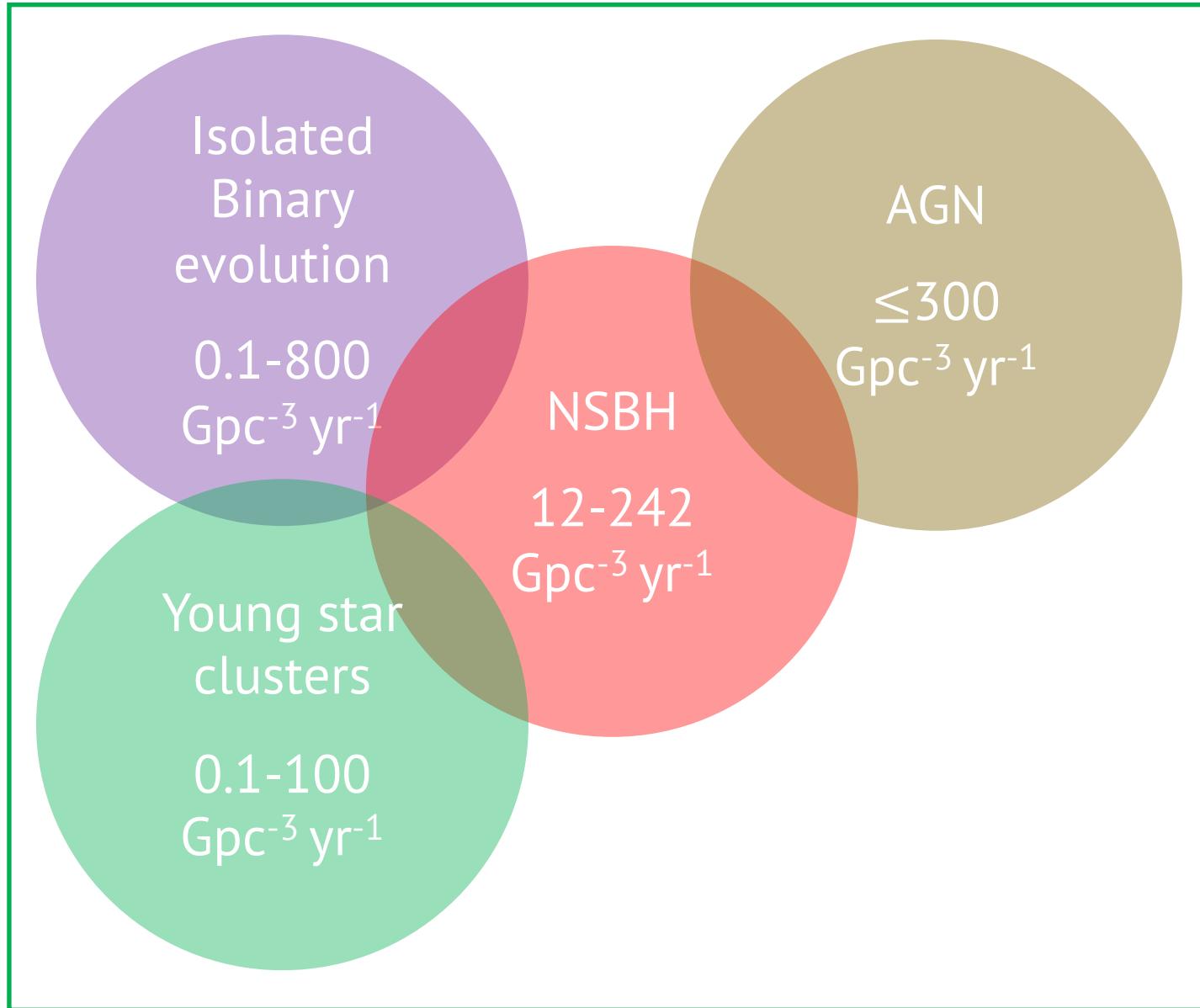


GW200115



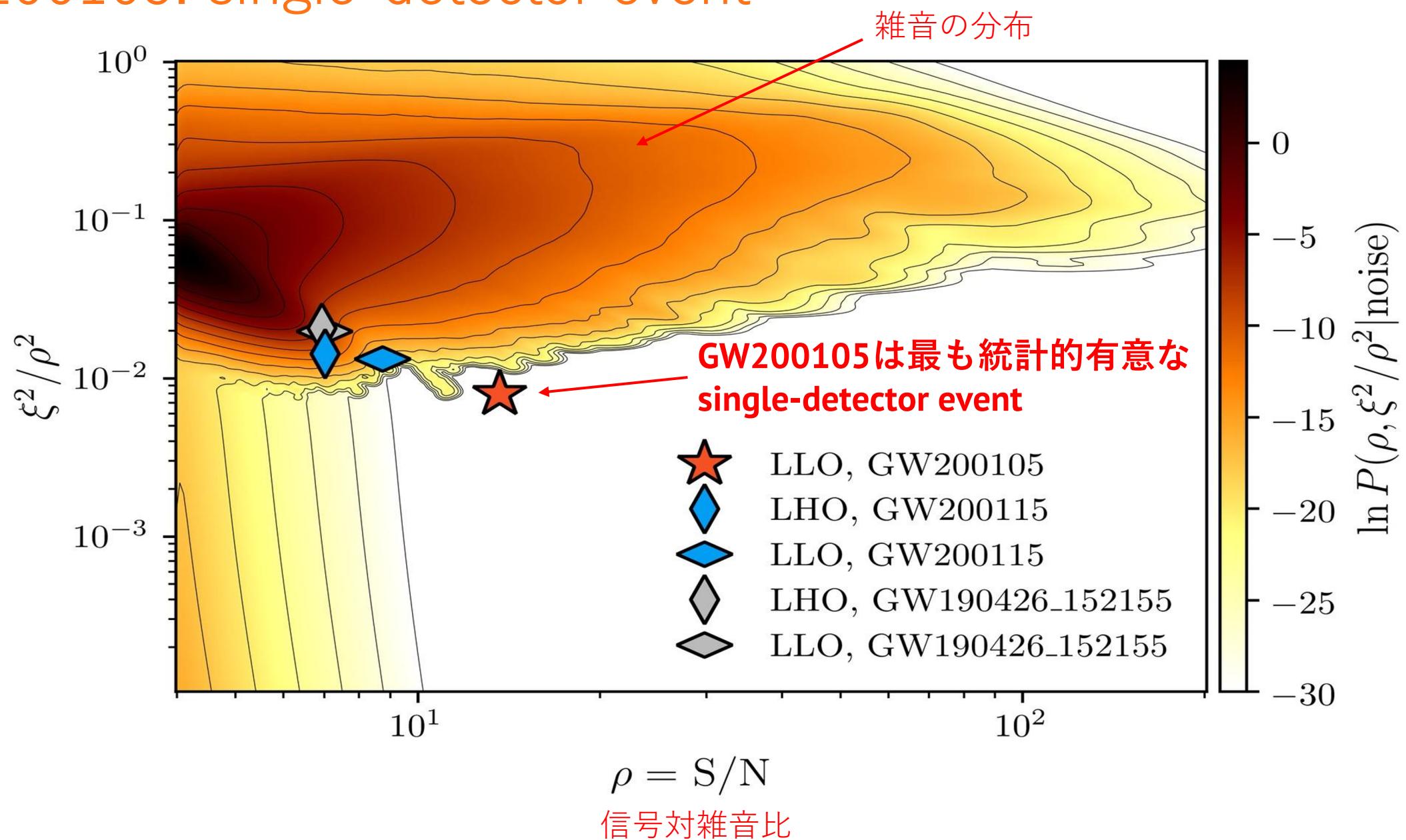
	GW200105	GW200115
$\vec{\chi}_1$	$ \vec{\chi}_1 < 0.23$ (90%上限)	$\chi_{1,z} = -0.19^{+0.24}_{-0.50}$ $P(\chi_{1,z} < 0) = 88\%$
$\vec{\chi}_2$	ほぼ制限なし	ほぼ制限なし

連星の形成過程

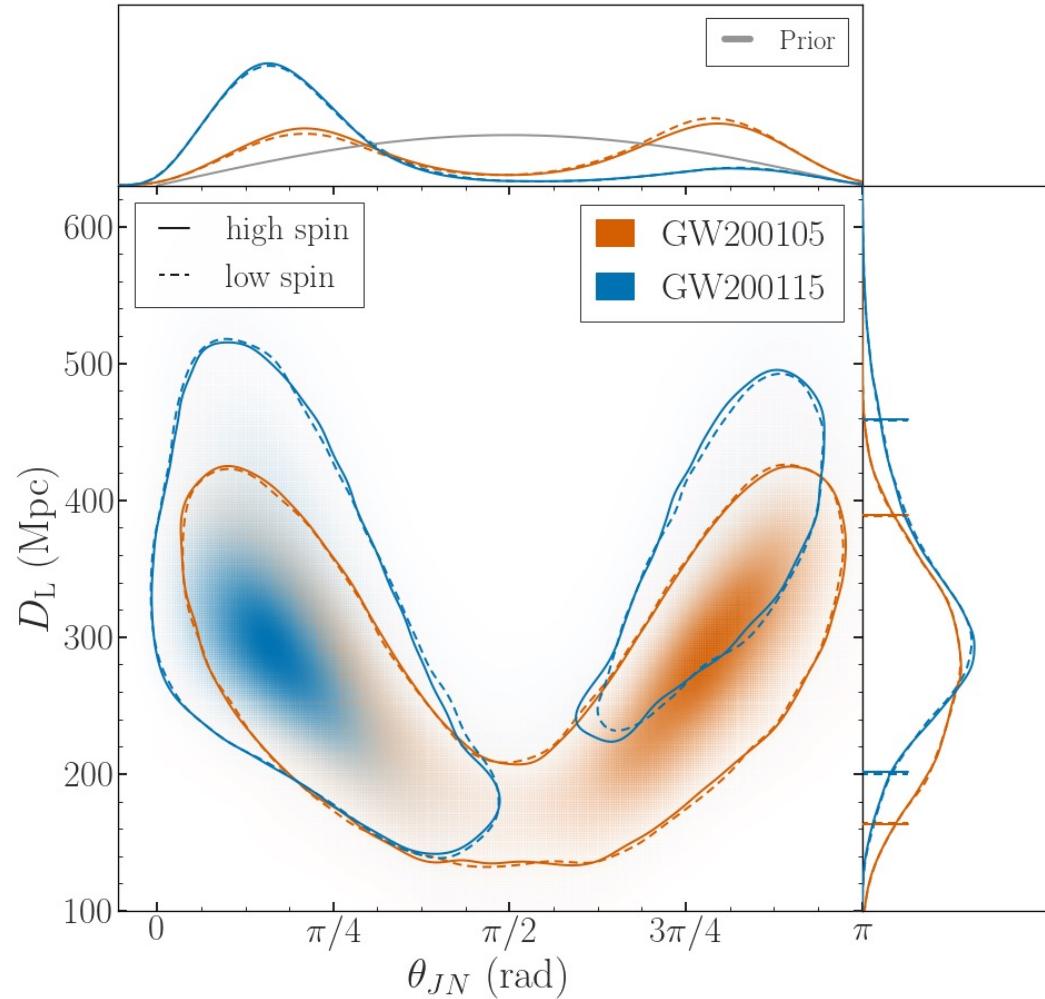


GW200105: single-detector event

波形が予測
と合って
いるかを測る
量

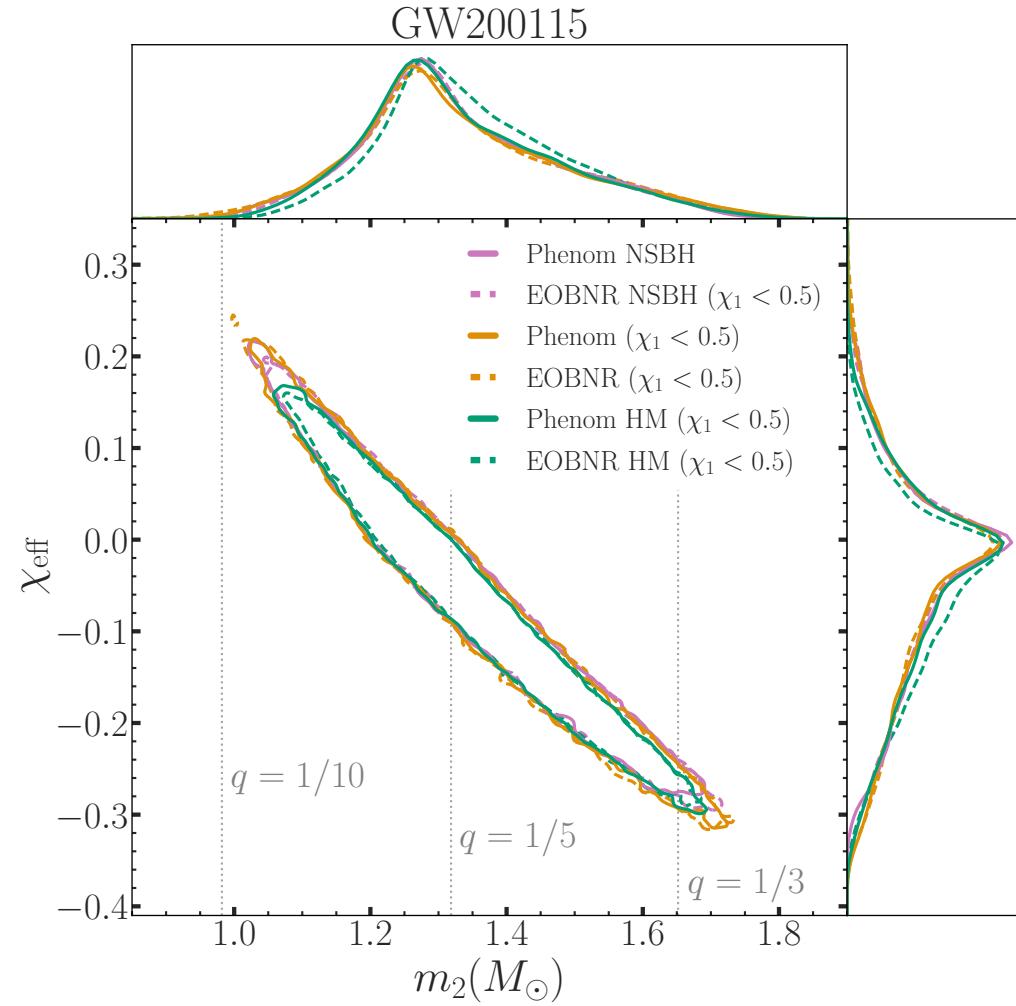
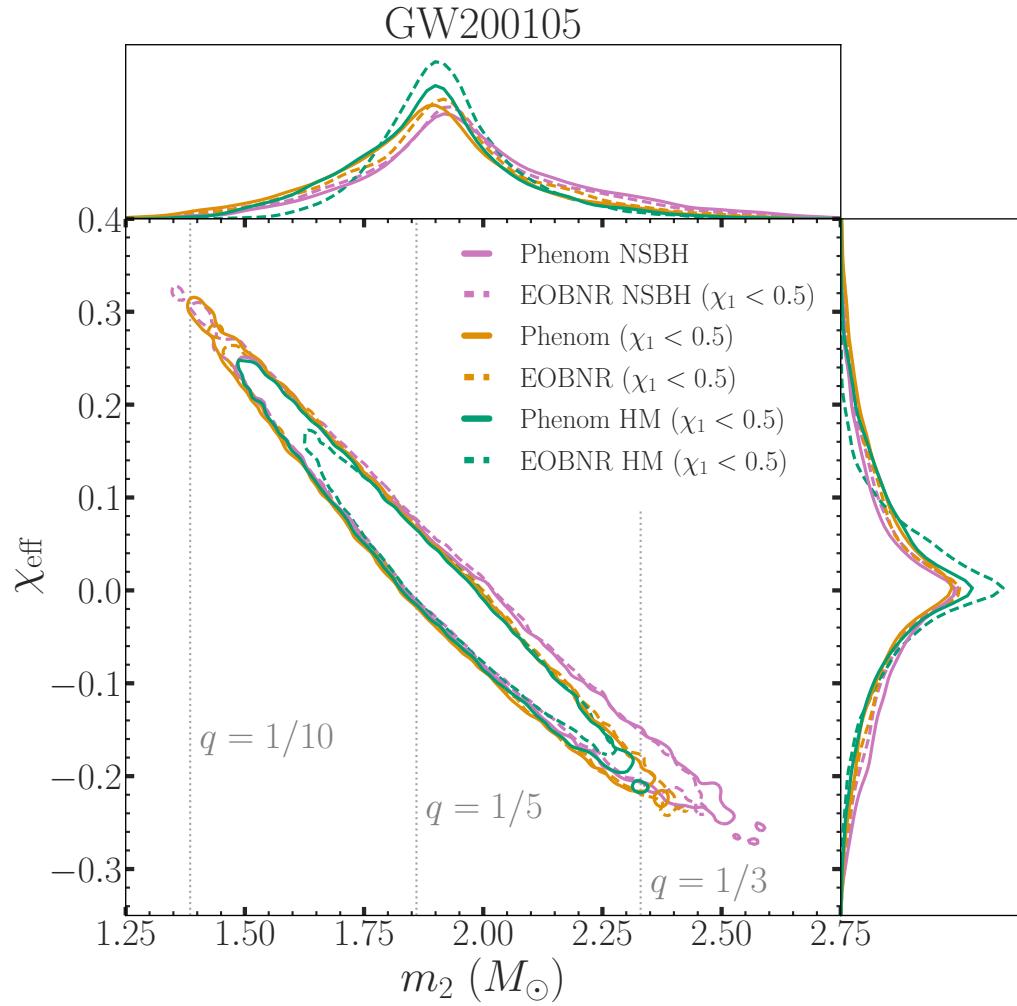


Distance-inclination



- Distance
 - GW200105**: 280^{+110}_{-110} Mpc
 - GW200115**: 300^{+150}_{-100} Mpc
 - (c.f. 40 Mpc for GW170817)
- Inclination
 - Both events disfavor $\theta_{JN} \sim 90^\circ$, suppressing higher-order moments.

Waveform systematics



Miscellaneous properties

- Remnant objects

Mass

$$M_f = \begin{cases} 10.4^{+2.7}_{-2.0} M_\odot & (\text{GW200105}) \\ 7.8^{+1.4}_{-1.6} M_\odot & (\text{GW200115}) \end{cases}$$

Spin

$$\chi_f = \begin{cases} 0.43^{+0.04}_{-0.03} & (\text{GW200105}) \\ 0.38^{+0.04}_{-0.02} & (\text{GW200115}) \end{cases}$$

- Test of general relativity

Less stringent constraints than the current ones due to the weak signals.

- Higher-order modes

Inconclusive

- Precession effect

Inconclusive

- Lensing scenario unlikely for GW200105 and GW200115, as masses do not overlap.

Masses

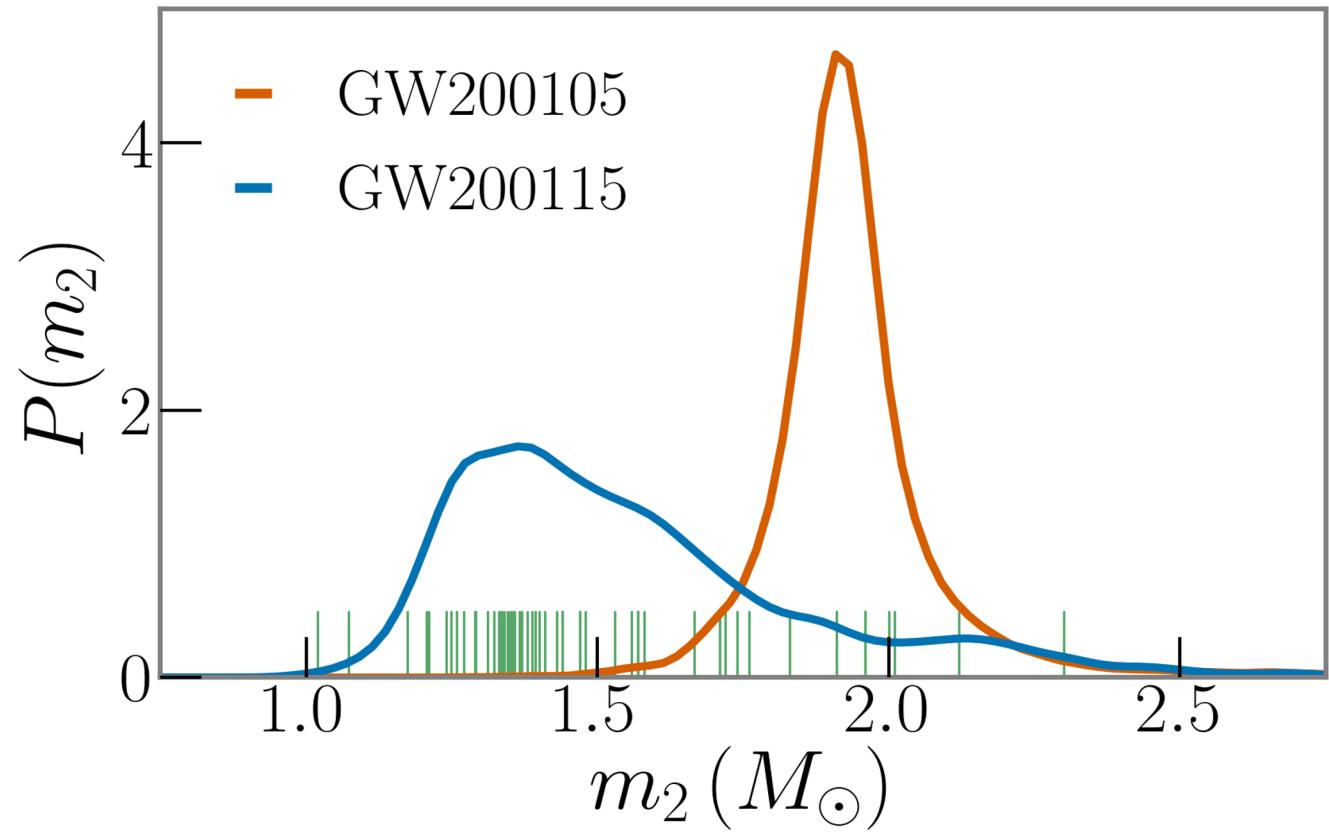
Neutron star masses

Consistent with Galactic NS population from EM observations

Black hole masses

GW200115 BH may be in the lower mass gap

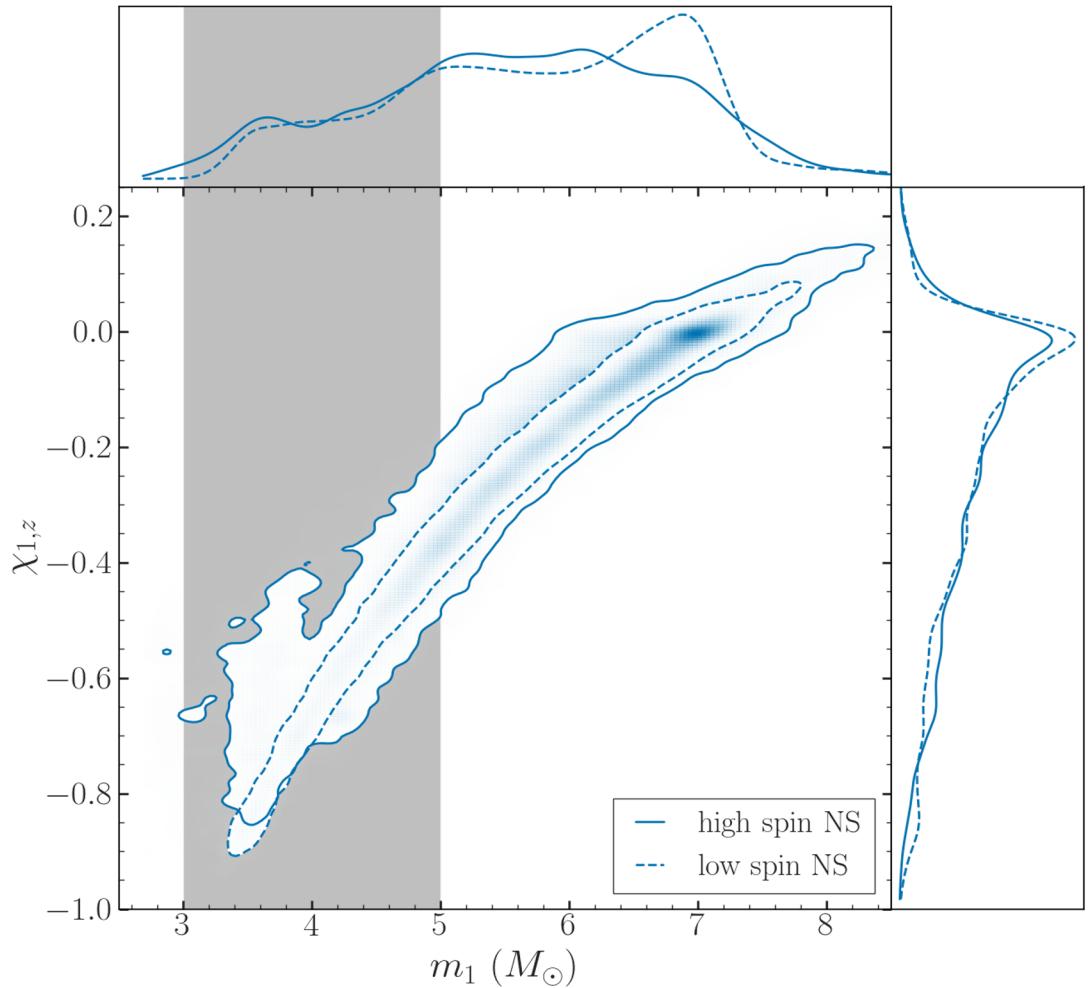
- $P(3M_{\odot} \leq m_1 \leq 5M_{\odot}) = 30\%$
- Correlated with negatively-aligned primary spin



Galactic NS masses from Alsing et al. 2018, MNRAS **478**, no.1, 1377-1391

Spins

GW200115



Magnitudes

- BHs consistent with zero spin
- **GW200115**: can't rule out high BH spin
 - Consistent with high BH spins from NSBH progenitors

Alignment

- **GW200115** BH: probably negatively-aligned
 - Correlated with low primary mass
 - $P(\chi_{1,z} < 0) = 88\%$

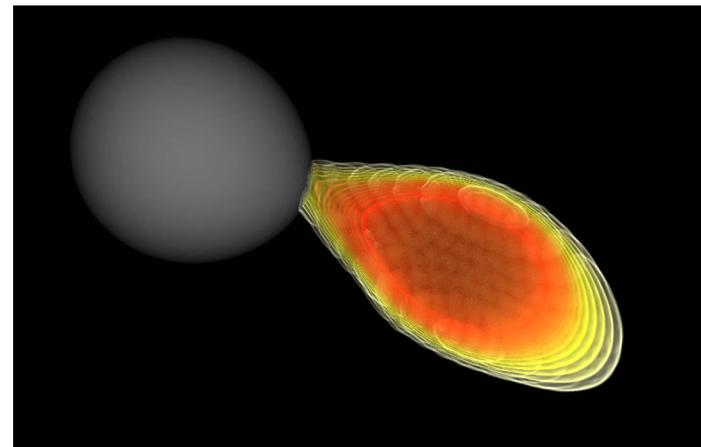
Electromagnetic observations

No significant detections of electromagnetic counterparts for both events.

e.g. S. Anand et al., Nature Astron. 5, 46 (2021).

This is consistent with

- **No** tidal disruption expected due to highly asymmetric masses (and negative spins for GW200115)
- The large distances (~7 times more distant than GW170817) and large uncertainties of their sky localization



Tidal deformability

The combination enters the leading tidal effect:

$$\tilde{\Lambda} = \frac{16}{13} \frac{(m_1 + 12m_2)m_1^4\Lambda_1 + (m_2 + 12m_1)m_2^4\Lambda_2}{(m_1 + m_2)^5}.$$

For NSBH ($\Lambda_1 = 0$),

$$\tilde{\Lambda} = \frac{16}{13} \frac{12 + q}{(1 + q)^5} q^4 \Lambda_2, \quad \left(q \equiv \frac{m_2}{m_1} \right)$$

which becomes vanishing for highly asymmetric masses ($q \rightarrow 0$).