



高速パラメター推定手法を用いた 重力波源の正確な位置・質量情報の速報

森崎宗一郎

日本天文学会2023年秋季年会 @ 名古屋大学

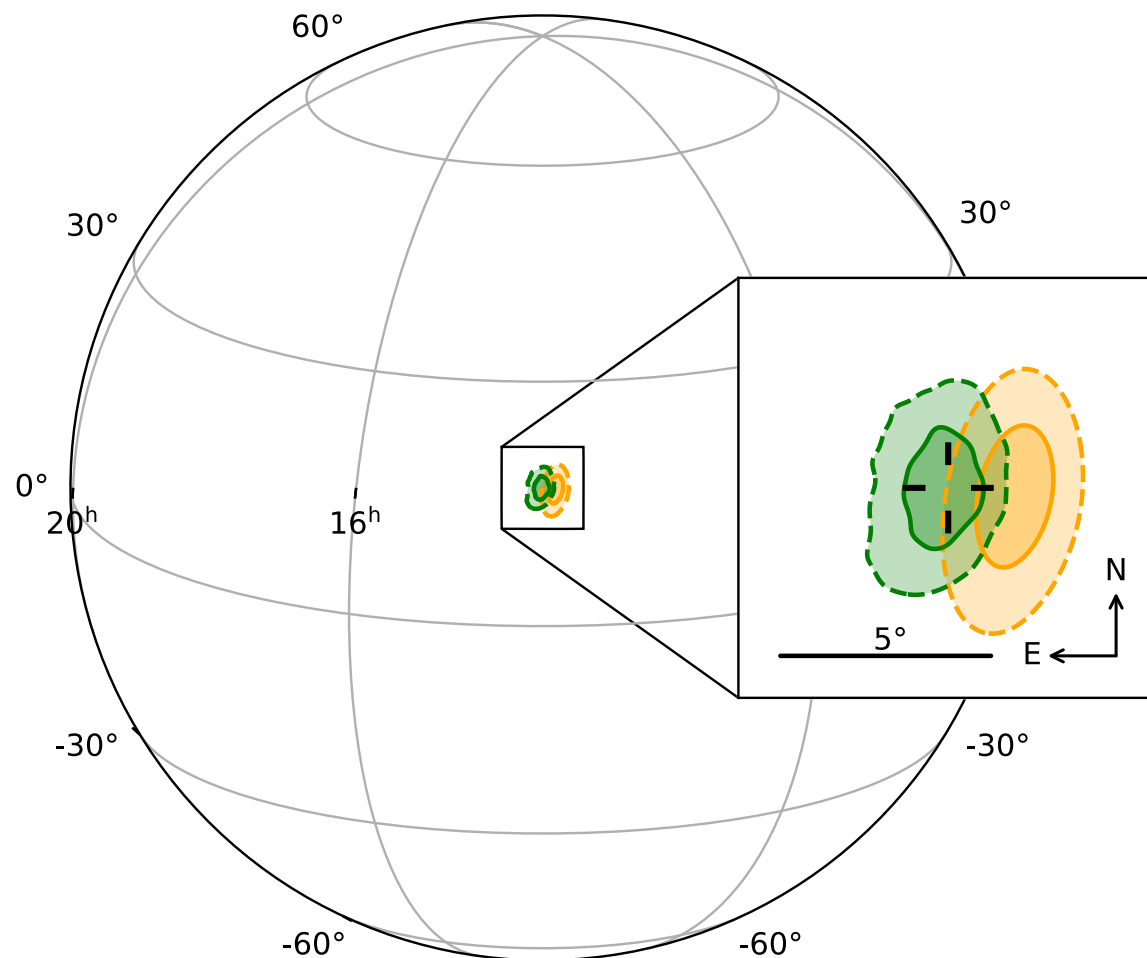
詳細パラメータ推定による位置情報の更新

BAYESTAR (Singer+ 2016)

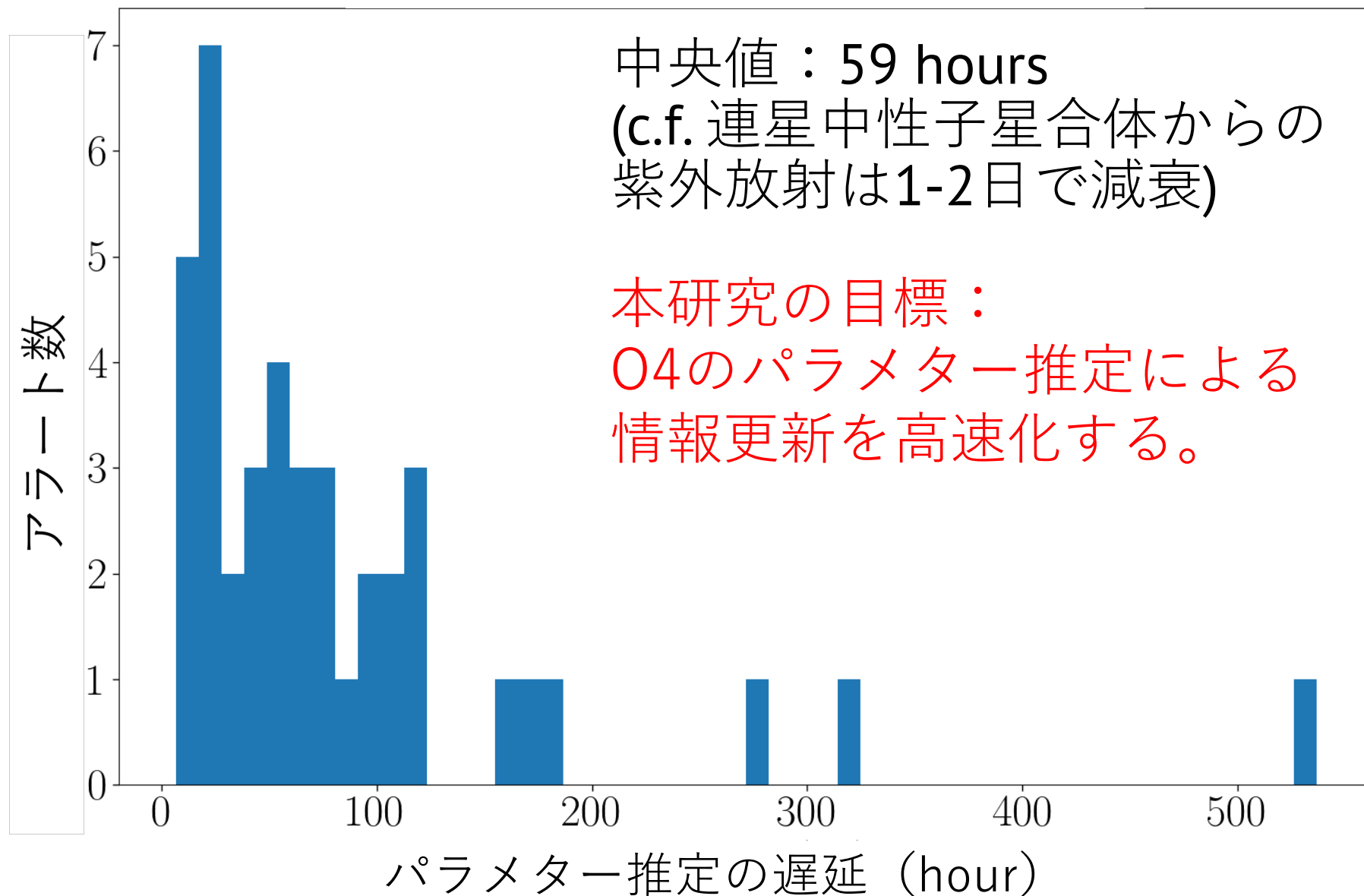
- 高速（数秒）な位置推定
- 質量、スピン固定

BILBY (Ashton+ 2019, Romero-Shaw+ 2020) による詳細なパラメータ推定

- 質量、スピンについて探索
- 歳差運動、重力高調波、
検出器の較正誤差を考慮



03でのパラメーター推定による更新



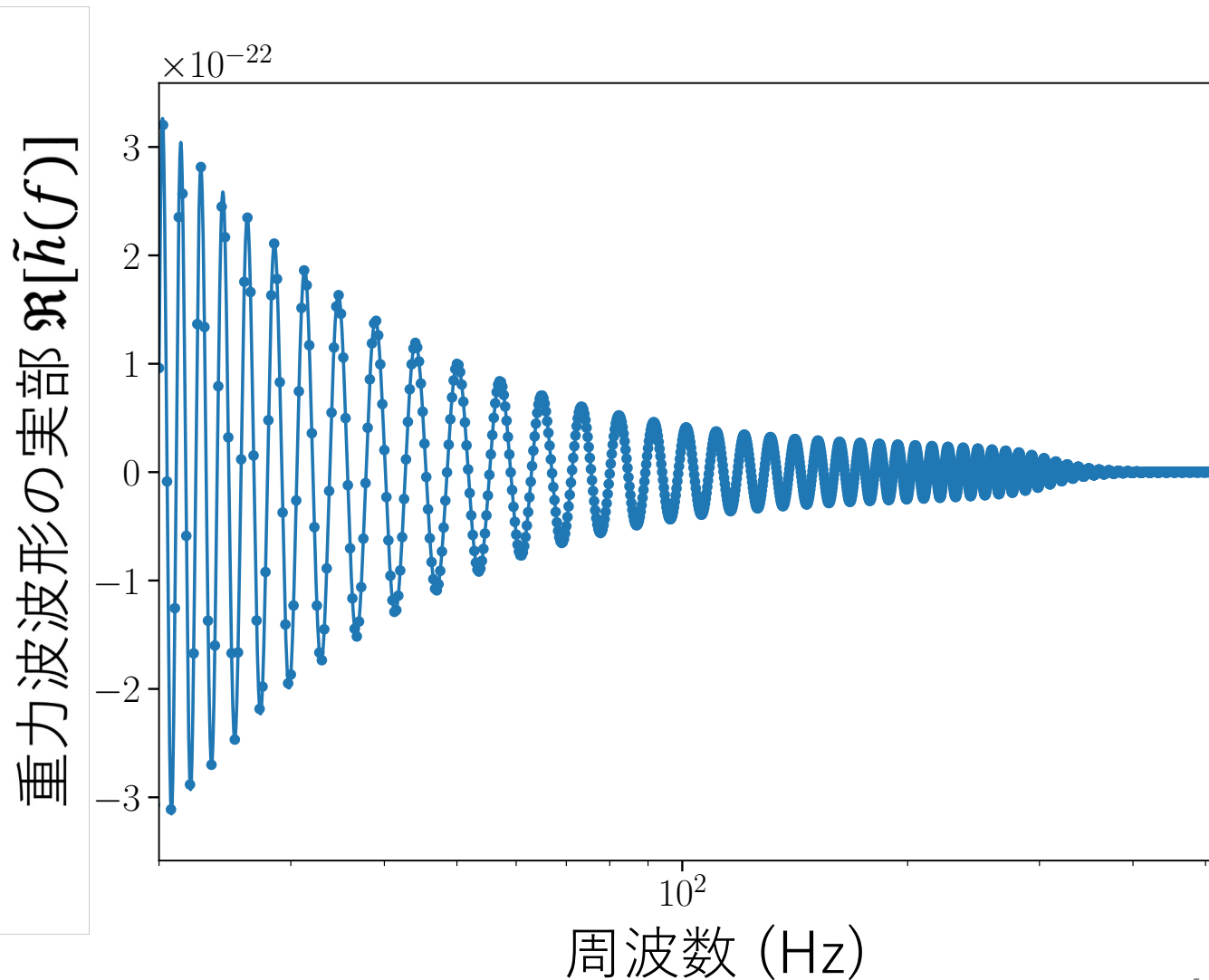
なぜパラメータ推定が遅いのか？

パラメータ推定では、数百万回以上の**重力波波形の計算**が必要

計算のコストは**周波数点の数 L** に比例：

$$\{f_i\}_{i=1}^L = \left\{ f_{\text{low}}, f_{\text{low}} + \frac{1}{T}, \dots, f_{\text{high}} \right\}.$$

データ長 T が長いほど L が大きくなり、コストが上がる。



Reduced Order Quadrature (ROQ)

References:

Canizares+, Phys. Rev. Lett. **114**, 071104 (2015).

Smith+, Phys. Rev. D **94**, 044031 (2016).

重力波波形を $K (\ll L)$ 個の周波数点上の波形の内挿で近似：

$$\tilde{h}(f_l) \simeq \sum_{k=1}^K \tilde{h}(F_k) B_k(f_l). \quad (l = 1, 2, \dots, L)$$

$\{F_k\}_{k=1}^K$: Empirical nodes

$B_k(f_l)$: ROQ基底

→ 波形計算コストが $K/L \ll 1$ 倍になり、 $\sim L/K$ のスピードアップ

Empirical nodesとROQ基底はそれぞれの波形モデル、質量・スピン領域に対して作っておく。

O4に向けたROQの改善

Reference:

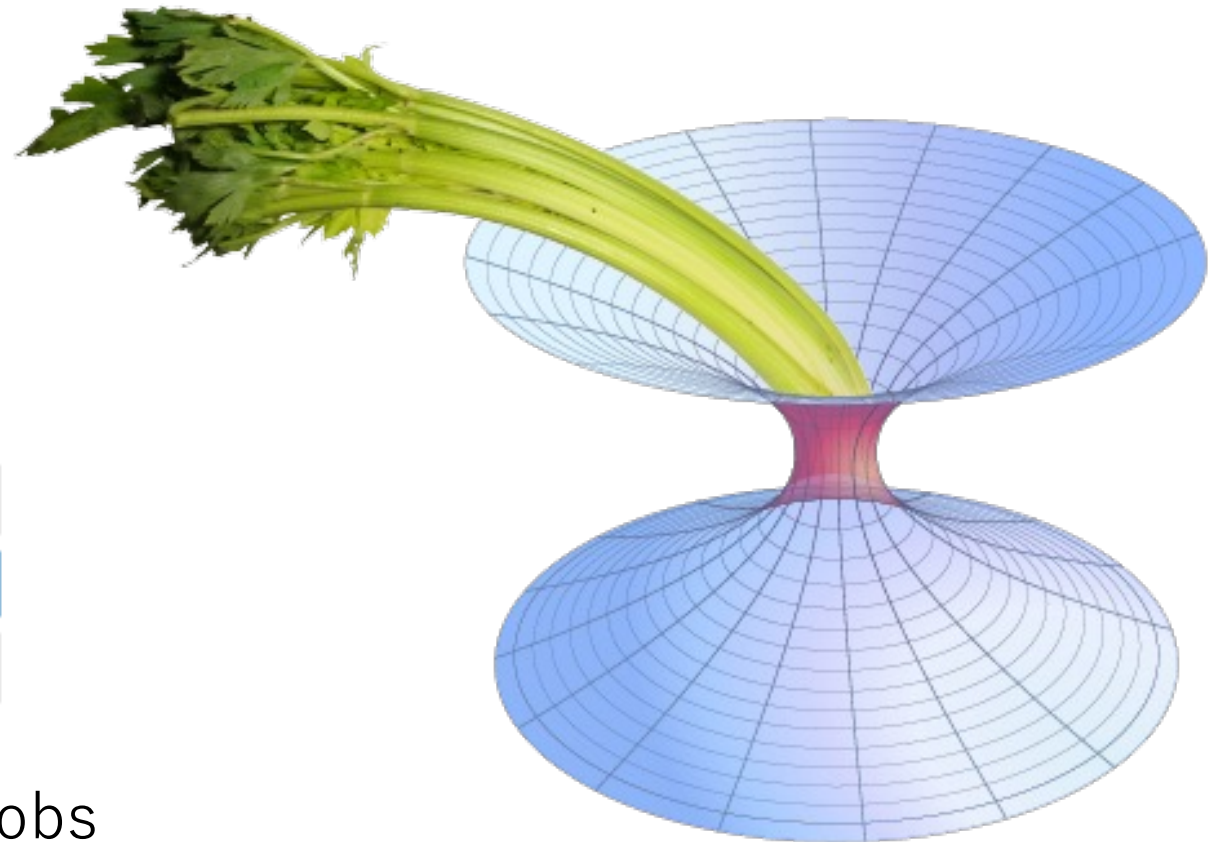
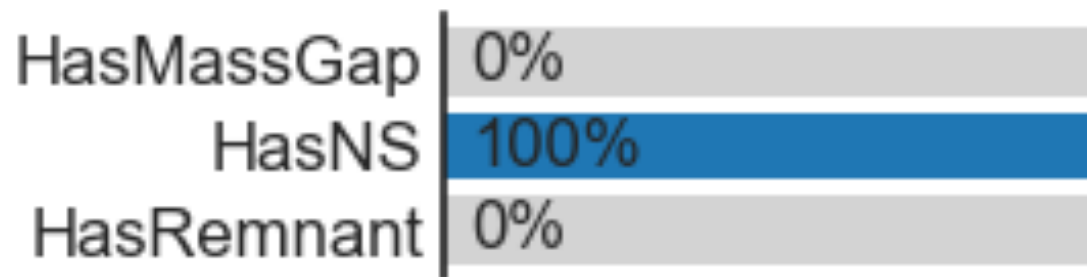
Morisaki, Smith, Tsukada+, arXiv: 2307.13380.

- 複数のROQ基底を同時に使えるようにする。
 - 狭い質量・スピン領域でROQ基底を作れば、より高速化できる。
(Morisaki and Raymond, “Focused Reduced Order Quadrature”, 2020)
 - 複数のROQ基底を組み合わせれば、高いスピードアップゲインを保ちつつ、広いパラメータ領域を探索できる。
- 周波数の単調増加性を利用したROQ基底のファイルサイズ削減
(Morisaki, “Multibanding”, 2021)
- 新たなROQ基底の作成
 - 連星中性子星に対しては小スピン (< 0.05)、歳差運動なし (IMRPhenomD) を仮定し、数百倍の高速化
 - より重いイベントに対しては、歳差運動・重力高調波を取り入れた最新波形 (IMRPhenomPv2, IMRPhenomXPHM) を用い、数十倍の高速化

04における解析の自動化 [1] <https://git.ligo.org/emfollow/gwcelery>

この高速パラメータ推定解析を、**信号検出後、自動で開始する機能**をLIGO-Virgo-KAGRAのアラートソフトウェア**GWCelery** [1]に実装した。

- 解析ジョブの自動モニター
- 解析結果から2D, 3Dマップの作成とEM-bright probsの計算



図：S230518hの推定されたEM-bright probs

S230518h

GCN Circular 33816

Subject

LIGO/Virgo/KAGRA S230518h: Updated Sky localization and EM Bright Classification

Date

2023-05-18T17:30:57Z (4 months ago)

From

Keita Kawabe at LIGO Hanford <kkawabe@caltech.edu>

The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration report:

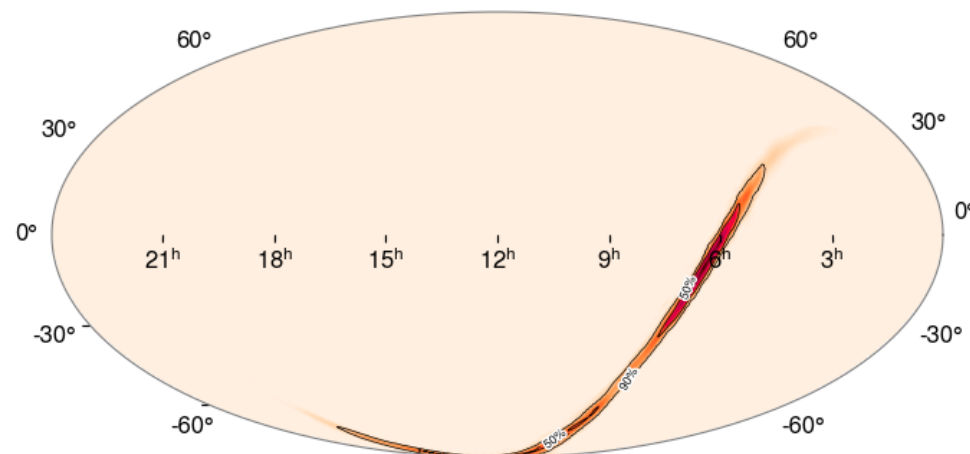
We have conducted further analysis of the LIGO Hanford Observatory (H1) and LIGO Livingston Observatory (L1) data around the time of the compact binary merger (CBC) candidate S230518h (GCN Circular 33813). Parameter estimation has been performed using Bilby [1] and a new sky map, Bilby.multiorder.fits,0, distributed via GCN Notice, is available for retrieval from the GraceDB event page:

<https://gcn.nasa.gov/circulars/33816>

ブラックホールー中性子星

約4時間で位置情報とEM-bright probsが更新され、GCN circularが送られた。

1002 deg² → 666 deg² (90%)



S230627c

GCN Circular 34087

Subject

LIGO/Virgo/KAGRA S230627c: Updated Sky localization and EM Bright Classification

Date

2023-06-27T04:37:12Z (3 months ago)

From

jgolomb@caltech.edu

The LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration, and the KAGRA Collaboration report:

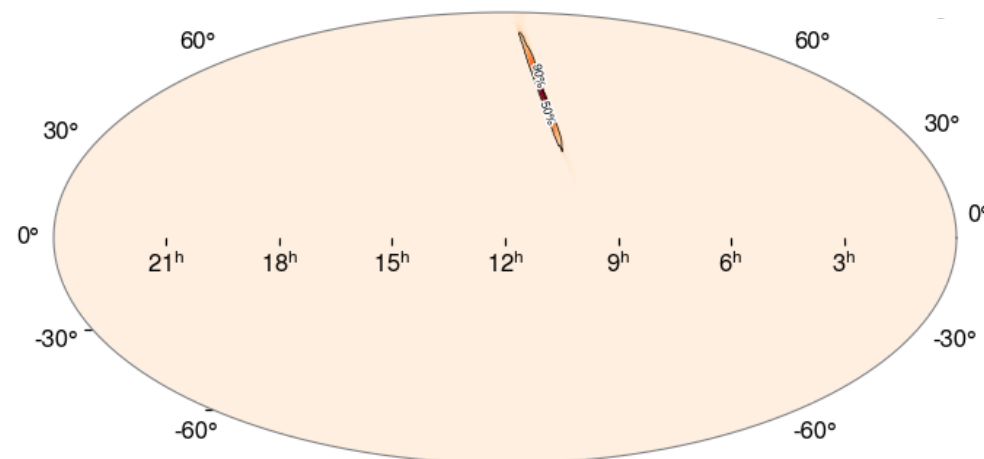
We have conducted further analysis of the LIGO Hanford Observatory (H1) and LIGO Livingston Observatory (L1) data around the time of the compact binary merger (CBC) candidate S230627c (GCN Circular 34086). Parameter estimation has been performed using Bilby [1] and a new sky map, Bilby.multiorder.fits,0, distributed via GCN Notice, is available for retrieval from the GraceDB event page:

<https://gcn.nasa.gov/circulars/34087>

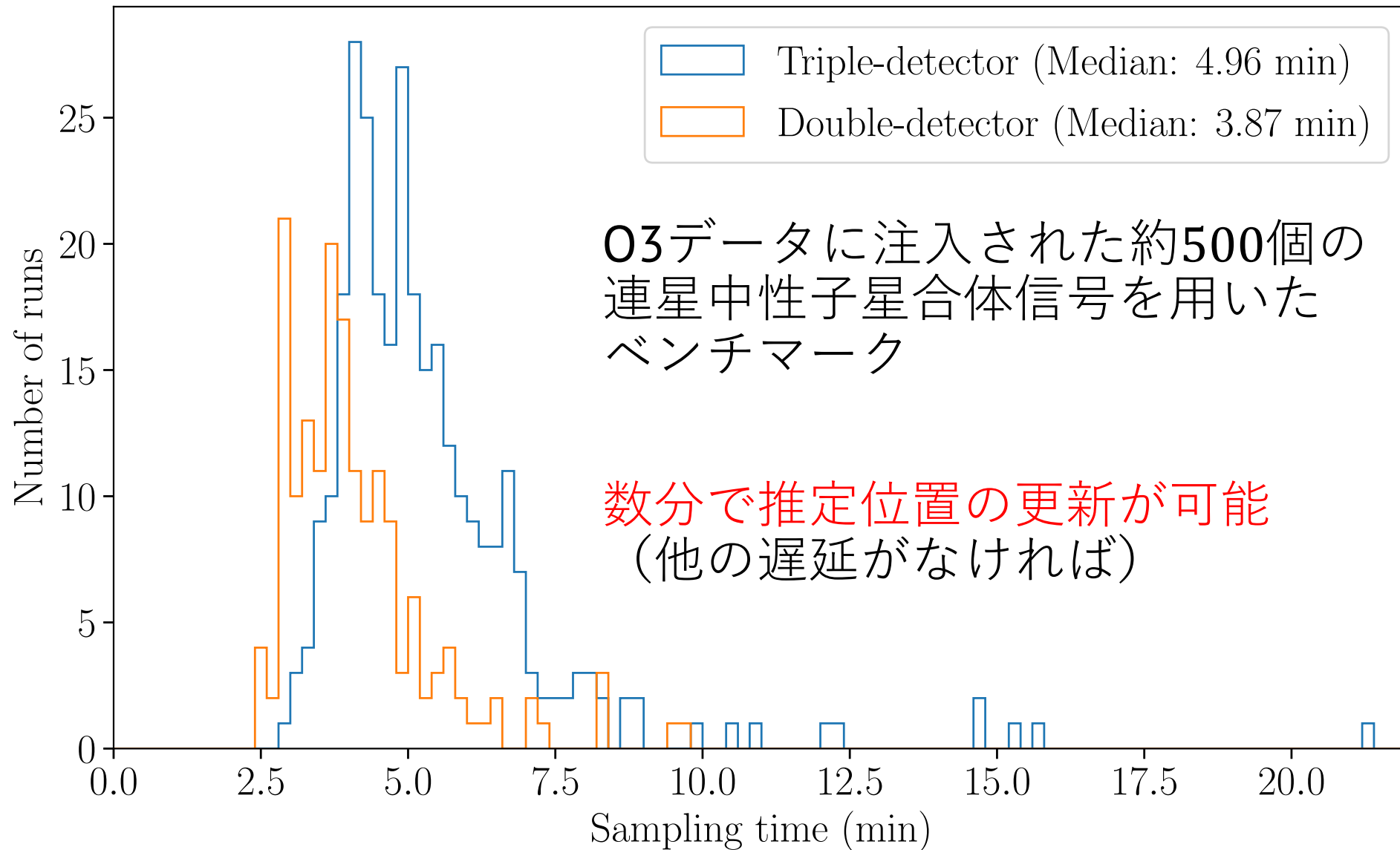
ブラックホールー中性子星
またはブラックホール連星

約2時間で位置情報と
EM-bright probsが更新され、
GCN circularが送られた。

90 deg² → 82 deg² (90%)



連星中性子星信号のシミュレーション



結論

- パラメータ推定解析を高速化する手法であるReduced Order Quadrature (ROQ)をさらに改良した。
 - 複数のROQ基底を同時に使った高速かつ正確な解析
 - 周波数単調増加性を利用したROQ基底データの削減
- 我々の手法・ROQ基底は、LIGO-Virgo-KAGRAの観測で用いられている。
 - BBH/NSBHに対しては数時間の計算時間
 - BNSに対しては数分
- 今後の改善点
 - 最新の重力波波形モデル (IMRPhenomXPHM Spin-Taylor, ...)
 - 質量・スピンの効率的な座標の取り方 (Lee, Morisaki & Tagoshi, 2022)

新たなROQ基底の作成

Reference:

SM, R. Smith, L. Tsukada *et al.*, arXiv: 2307.13380.

Waveform model	Chirp mass (M_{\odot})		#Bases	Basis size	Speedup
	Min	Max			
IMRPhenomD (Husa+ 2016, Khan+ 2016) 小スピ (< 0.05)、歳差運動なし	0.6	1.1	149	150–161	250–460
	0.92	1.7	74	145–155	110–210
	1.4	2.6	37	140–150	58–100
	2.1	4.0	20	141–149	29–43
IMRPhenomPv2 (Hannam+ 2014) 高スピ (< 0.99)、歳差運動あり	1.4	2.6	37	4348–5300	26–31
	2.1	4.0	20	4972–6126	11–14
	3.3	6.3	10	5819–6524	5.7–6.4
	5.2	11.0	5	6109–6360	3.0–3.2
	8.7	21.0	3	4587–5436	2.0–2.3
IMRPhenomXPHM (Pratten+ 2021) さらに重力高調波あり	10.02	19.05	23	4315–4711	14–19
	15.52	31.85	15	4349–6190	4.9–8.0
	26.54	62.86	11	2444–3672	2.4–3.8
	52.38	200.0	11	616–1612	1.9–3.7 ¹²

Application: Skymap updates of binary neutron star (BNS)

Inject ~ 1000 simulated BNS signals into O3 data
Masses: $(1-3)M_{\odot}$, Spins: $-0.05-0.05$, Distance: $(30-600)$ Mpc



Matched filter data using GstLAL (K. Cannon et al., 2020)
308 triple-detector and **173 double-detector detections**



Run Bayestar on
SNR time series

Comparison

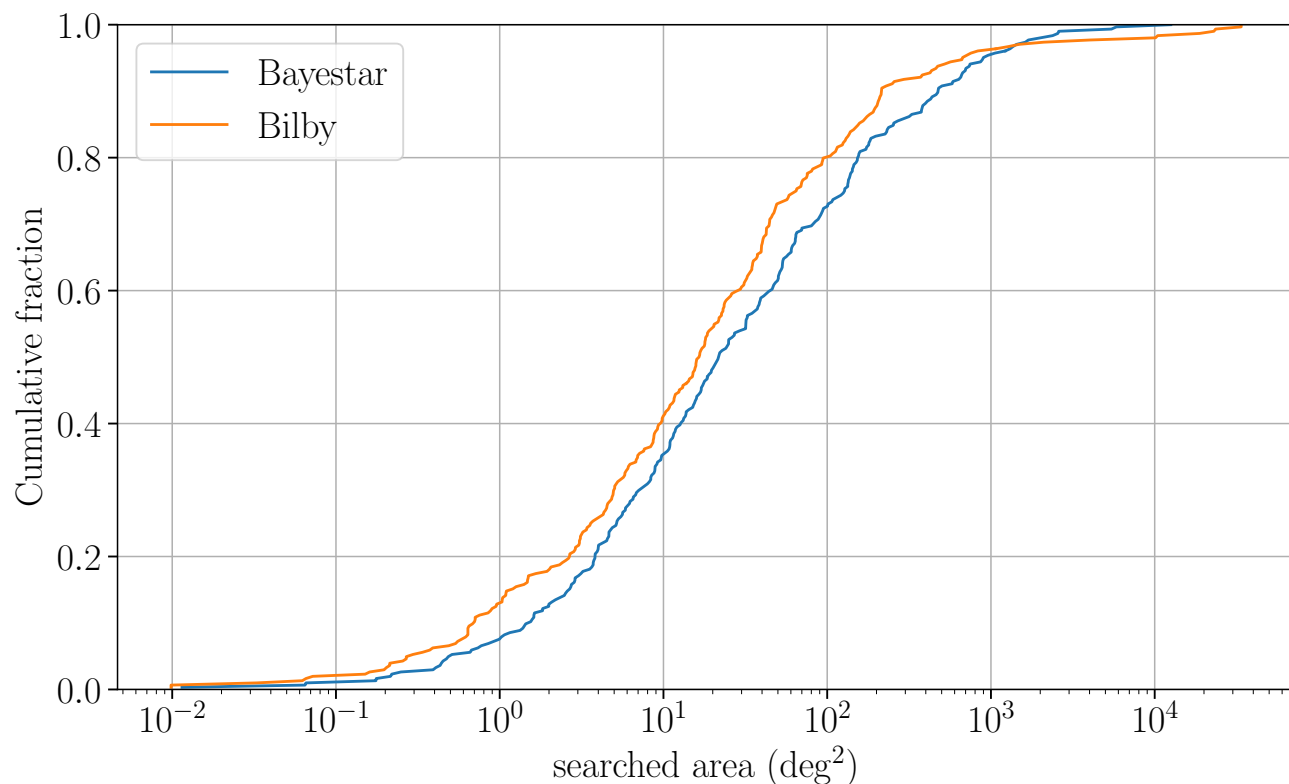


Run Bilby with
IMRPhenomD ROQ

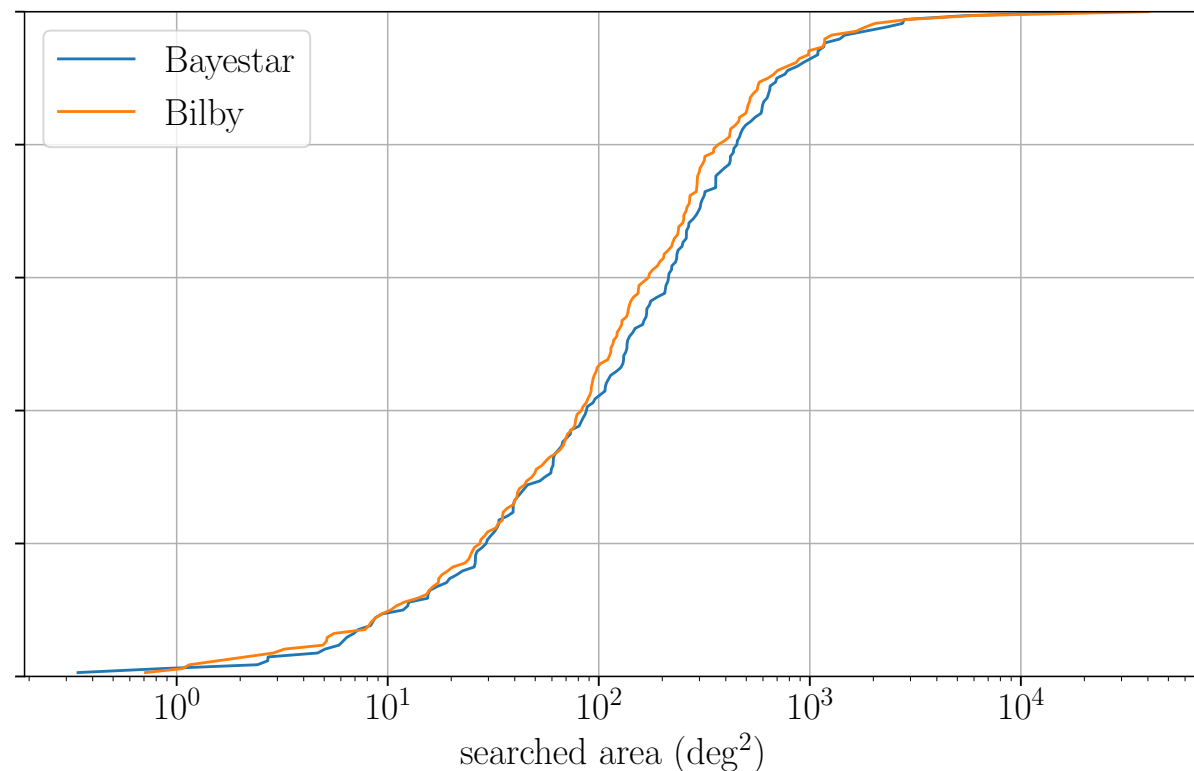
連星中性子星信号のシミュレーション

21.8 deg² → 16.6 deg² (中央値)

137 deg² → 117 deg² (中央値)



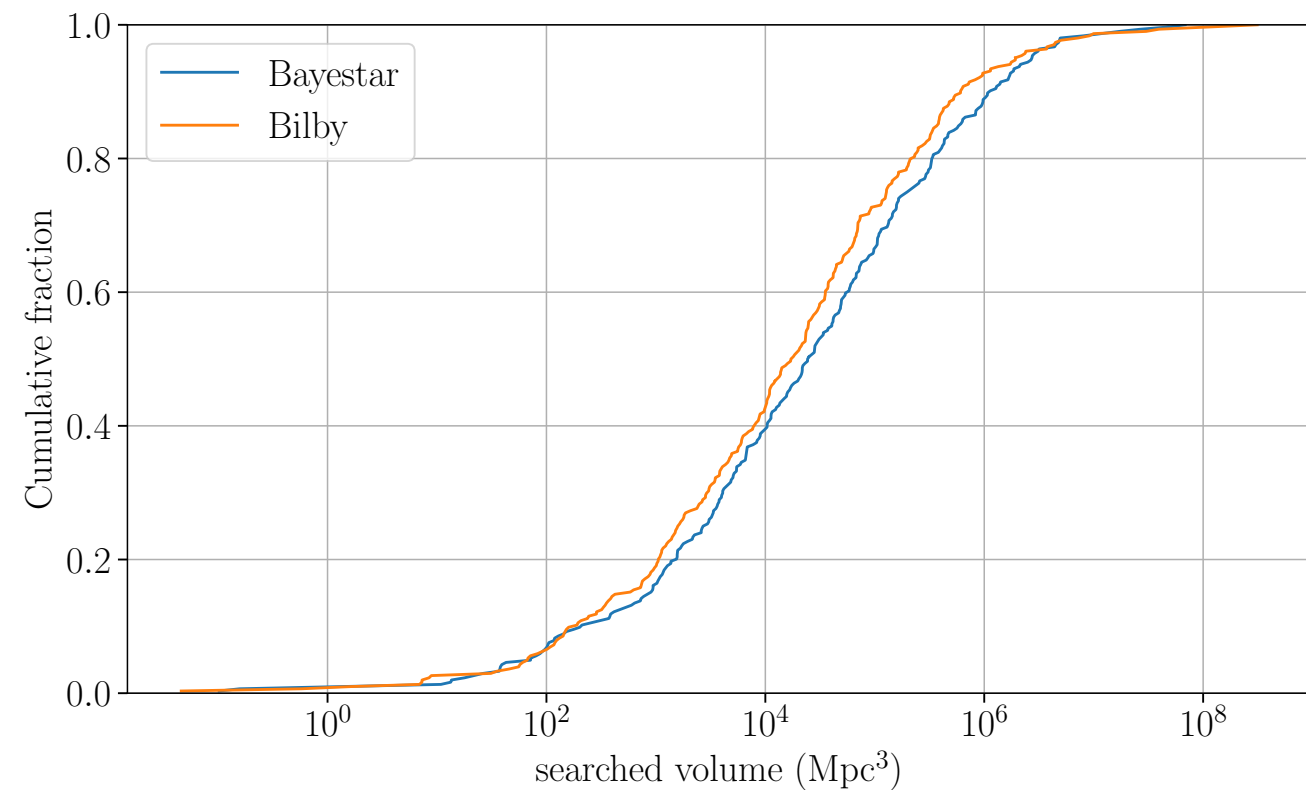
Triple-detector case



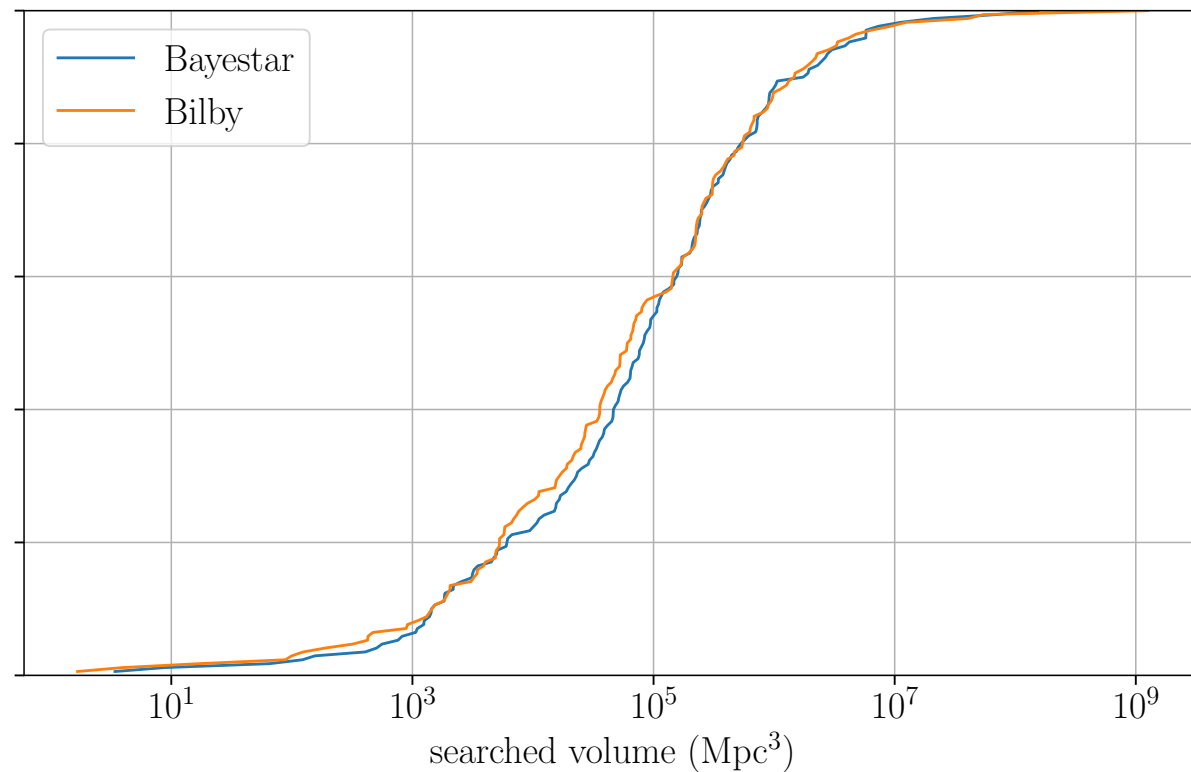
Double-detector case

Volume

$2.47 \times 10^4 \text{ Mpc}^3 \rightarrow 1.75 \times 10^4 \text{ Mpc}^3$ $8.30 \times 10^4 \text{ Mpc}^3 \rightarrow 6.27 \times 10^4 \text{ Mpc}^3$



Triple-detector case



Double-detector case

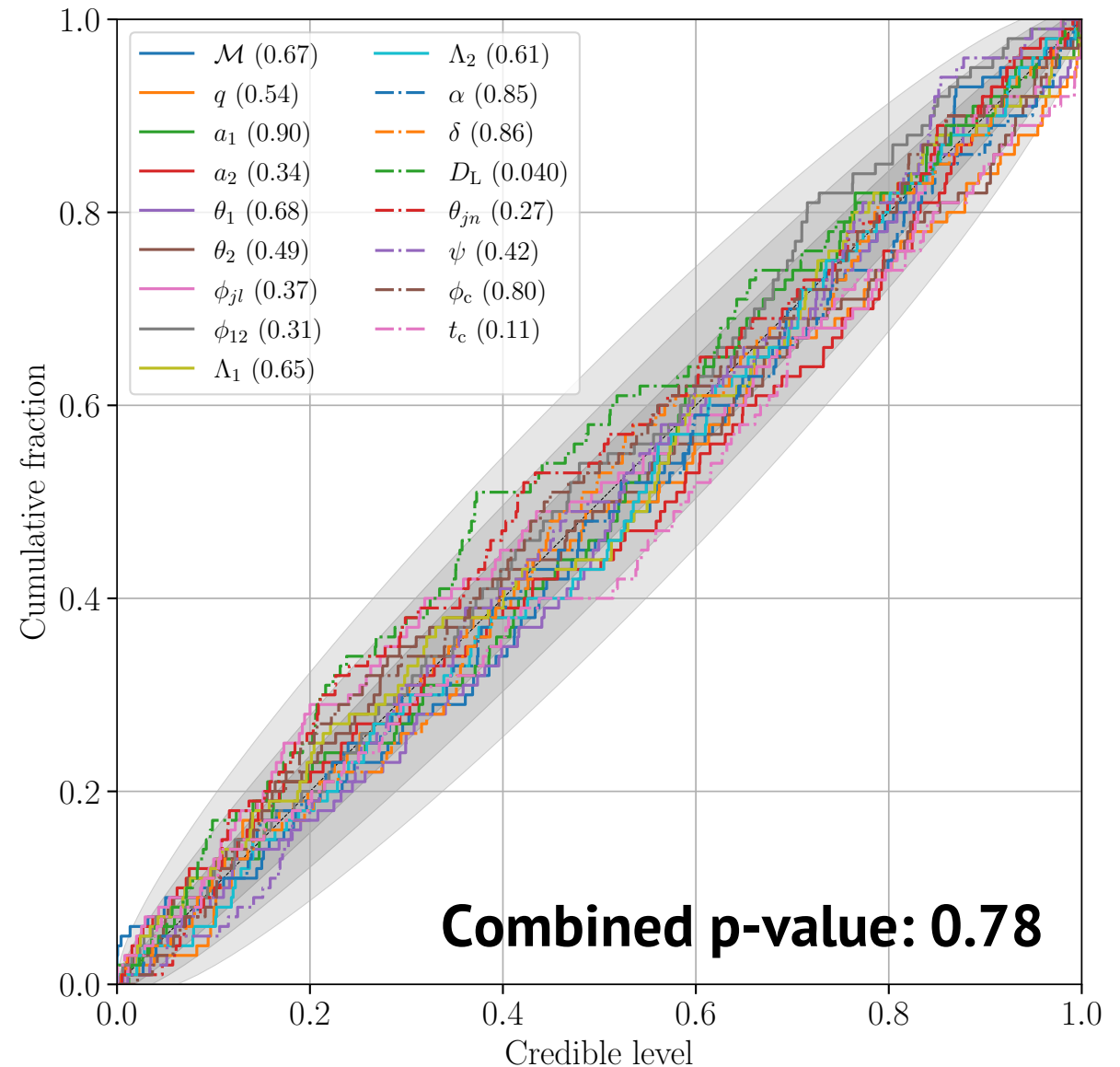
Application: Fast PE including tidal effects

100 simulated BNSs computed and recovered with **IMRPhenomPv2_NRTv2** (Median SNR: 21)

Analysis time with ROQ: 1hr48min (c.f. ~1 months without ROQ)

The true values should be **within $X\%$ credible intervals $X\%$ of the time.**

→ **Credible level vs Fraction of signals within the credible intervals** should be diagonal.



Application: Fast PE including higher order moments

100 simulated binary black holes
computed and recovered with
IMRPhenomXPHM (Median SNR: 29)

Analysis time with ROQ: 3hr18min
(c.f. ~10 hours without ROQ)

