

ICRR 輪読

譲原 浩貴

2019年10月23日

今日は最近、arXivに出ていた O2 データセットを用いた CBC 解析のカタログ論文 [1] を見ていきます。著者らは LIGO コラボレーション外の人で、pyCBC という解析パイプラインの開発者らです。

関連する研究としては

- 同じ著者らの O1 データセットを用いたカタログ論文 [2]
- LIGO コラボレーションによる O1+O2 データセットを用いたカタログ論文 [3]
- LIGO コラボレーション外のプリンストングループによる O1 データセットを用いたカタログ論文 [4]
- LIGO コラボレーション外のプリンストングループによる O2 データセットを用いたカタログ論文 [5]

簡単に時系列の振り返り

- 2018/11/01 LIGO O1 データが公開 <https://www.gw-openscience.org/about/>
- 2018/11/05 著者らの O1 カタログ論文が arXiv にあがる [2]
- 2018/11/30 LIGO コラボレーションの O1 カタログ論文が arXiv にあがる [3]
- 2つのカタログ論文は無矛盾
- 2019/02 前後 プリンストングループが O1 データセットに↑のカタログ論文では見つかっていない重力波があったと口頭発表
情報はスライドのみで、論文原稿はまだ arXiv がない
- 2019/02/27 プリンストングループの論文原稿 [6] が arXiv にあがる
- 2019/02/27 LIGO O2 データが公開
- 2019/04/15 プリンストングループが O2 データの解析結果 [5] を arXiv にあげるこれらの論文では解析手法が少し異なることはわかるものの、どこがどう違うのか記述がなかった
最近 あがった [7] は新しく提案された PSD 推定についてまとめられている

- 2019/10/11 著者らによる O2 のカタログ論文が arXiv にあがる [1]
- 2019/10/13 著者らによるカタログデータセットが公開される
<https://github.com/gwastro/2-ogc>
- 2019/10/17 国際会議 GWPAW で著者らの一人が O2 のカタログ論文 [1] について口頭発表する
<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/symposium/GWPAW2019/index.php>

0 アブストラクト

- O1 と O2 の公開データに対して連星合体からの重力波探索をした
- Open Gravitational-wave Catalog(2-OGC) と呼んでいる
- 解析手法が前回論文から改良した、具体的には PSD の時間変化 (ドリフト) を補正するようにした
- 14 個の連星ブラックホールの合体イベントと 1 個の連星中性子星の合体イベント (GW170817) を $P_{\text{astro}} > 0.5$ で見つけた
 P_{astro} はイベントが天体起源である確率
- LIGO の解析では見つけられなかった GW170121, GW170304, GW170727 が連星ブラックホールの合体イベントと確認した
- marginal event, 際どい候補イベント (GW151205) も見つけた
- 解析結果のカタログ データセットを github で公開しました (follow-up 解析をする外部の研究者や連星のモデルなどの研究者向け?)

1 イントロ

- アブストとほぼ同じなので省略

2 LIGO and Virgo observing period

LIGO と Virgo の観測期間について

- Figure 1 : 全天+inclination angle で平均したときの $1.4 - 1.4M_{\odot}$ の連星中性子星合体が SNR=8 で検出できる距離の時間変化
いわゆる inspiral range
O1 中は Hanford の方が感度が良かったけど、O2 に入って逆転
O2 の終盤、Virgo が参加したあたりで Hanford は感度が落ちている (にも関わらずこの時期のイベントが多い !! たまたま偏っていたのか?)

- Table1 はデータセットの解析可能な長さ内訳
 $V = 1.7$ days はタイポだと思う
 全データは 288 日分、2 台 or 3 台の検出器が動いていた期間 171 日、LIGO2 台+Virgo が同時に動いていた期間 15.2 日
 1 台の検出器しか動いていなかった期間 117 日 (single detector で候補イベントの有意度を推定する手法も検討中? ここでは 2 台以上でコインシデンスを取る手法について報告する)

3 search for binary mergers

- pyCBC という解析パッケージを用いて解析している
 前回からの改善点は PSD 推定に時間ドリフトの補正 (time variants) を入れている
- Figure 2 : テンプレートバンク、40 万点ある、赤点の BBH のみ後で出てくる detector frame (赤方偏移補正込みの質量) で $m_1 + m_2 > 4M_\odot$ の範囲は SEOBNRv4 という波形
 それ以外は TaylorF2 という波形を用いている
 (軽い連星合体の ringdown は高周波なので、検出器の感度では見えない)
- 基本的に matched filter

$$\rho(t) = 4\Re \int_{f_t}^{f_h} \frac{\tilde{h}^*(f)\tilde{s}(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df \quad (1)$$

ここで \tilde{h} は規格化された周波数領域での波形、 \tilde{s} は周波数領域でのデータ、 S_n は Welch の方法で推定されたパワースペクトル密度 (PSD)

- 式 (1) を計算して、1 台検出器での SNR の時系列を集める
 そのまま 40 万のテンプレートの SNR の時系列を複数台検出器で比較するのは無理なので、ある chirp mass の範囲で trigger を 1 つだけ残すようにする (pre-clustering)
- signal consistency test をする、Bruce allen の提案した χ_r^2 test と [8] で提案された $\chi_{r,sg}^2$
 目的は glitch によって SNR が大きくなった trigger の数を減らすこと ($\chi_{r,sg}^2$ は重力波の最大周波数よりも上のパワーが大きいかどうかによって glitch を除去する、そのときに sine-Gaussian を用いる)
- SNR と χ_r^2 を組み合わせて、re-weight SNR $\tilde{\rho}$ を定義する

$$\tilde{\rho} = \begin{cases} \rho, & \text{for } \chi_r^2 \leq 1 \\ \rho \left[\frac{1}{2} \left(1 + (\chi_r^2)^3 \right) \right]^{-1/6}, & \text{for } \chi_r^2 > 1 \end{cases} \quad (2)$$

- total mass が $40M_\odot$ 以上のテンプレートについてはさらに $\chi_{r,sg}^2$ も用いて re-weight SNR $\hat{\rho}$ を定義する

参考：total mass が $40M_{\odot}$ 以上 = テンプレートの長さ 0.265 秒以下 ($f_{\min} = 40$ Hz) or 0.1849 秒以下 ($f_{\min} = 20$ Hz)、そういえばこの論文のカットオフ周波数が書いていなかったような)

(has has はタイポ)

$$\hat{\rho} = \begin{cases} \tilde{\rho}, & \text{for } \chi_{r,sg}^2 \leq 4 \\ \tilde{\rho} (\chi_{r,sg}^2/4)^{-1/2}, & \text{for } \chi_{r,sg}^2 > 4 \end{cases} \quad (3)$$

- PSD の時間変化 (drift) を補正する係数 $v_S(t)$ を導入する

$$\langle \rho^2 \rangle = \left[\int_{f_i}^{f_h} \frac{|h(f)|^2}{S_s(f)} df \right]^{-1} \int_{f_i}^{f_h} \frac{|h(f)|^2}{S_s(f)} \frac{S_l(f)}{S_s(f)} df \quad (4)$$

ここで $S_l(f)$ は長いデータから推定した PSD、 $S_s(f)$ は短時間での PSD 変動を知るために短いデータから推定した PSD

もし時間変動がなければ 2 つの PSD は一致して、 ρ の分散は 1

実際は non-stationary があるのでずれる

- PSD 補正は BNS や NSBH のような長いテンプレートの解析には効くが、BBH のような短いテンプレートでは影響は無視できるくらいだった
(求めた検出統計量 $\hat{\rho}$ のヒストグラムがほしい
PSD 変動の補正あり/なしでどれくらい向上があったかが見たい)
- PSD 変動の補正によって、ある閾値以上の候補イベントが得られるレートがどう変化するか求めている
(が、イマイチ目的が分かっていない …)
- ranking statistic $\tilde{\Lambda}$ というのを定義している (が、イマイチ目的がわからない)
 $R_{S,i}, R_{N,i}$ は i 番目のテンプレートで解析したときにある閾値 $\tilde{\rho}$ 以上のイベントが天体からまたはノイズから得られるレート (tilde じゃなくて hat のタイポじゃないか?)
- バックグラウンド分布 (ノイズのみのデータを解析したときの検出統計量の分布) は重力波が検出器を通過する最長時間よりも長く時間ずらしをしたデータを解析して求めた (time-slide)
- 解析結果は 2 つに分かれている、すべてのテンプレートを使った結果、BBH のテンプレートを使った結果
 $m_{1,2} > 5M_{\odot}$ かつ $1/3 < m_1/m_2 < 3$ かつ $\mathcal{M} < 60$ を満たすテンプレートを BBH とした

4 解析結果

- 図 1 は BBH のテンプレートを用いて解析した結果
左から UTC 時刻、GPS 時刻、 P_{astro} (候補イベントが天体起源の確率)、inverse false alarm rate [year]、検出に貢献した detector、ranking statistic $\tilde{\Lambda}_{BBH}$ 、 ρ (それぞれの検出器での SNR)、テンプレートの (検出器フレームでの) 質量とスピン

- LIGO の設定した重力波イベントの定義は 30 日に 1 回よりも小さい false alarm rate かつ $P_{\text{astro}} > 0.5$
 なので、上位 14 個の候補イベントは重力波イベントとして認定できる (赤線より上)
 $P_{\text{astro}} = 0.53$ の GW151205 は marginal event と呼んでいる
- 左の赤丸は LIGO が見つけた重力波イベント
 左の青四角はプリンストングループが見つけた重力波イベント
 GW170304, GW151205 は著者らしか見つけていないイベント
- 参考：図 2 は LIGO コラボレーションのカタログ論文 [3] で重力波イベントとして考えられているリスト
- 参考：図 3, 図 4 はプリンストングループによる O1, O2 のカタログ論文 [4, 5] で重力波イベントとして考えられているリスト
 GW170304, GW170425, GW170202, GW170403 はプリンストングループしか見つけていない
- これらのカタログ論文の間では解析手法が色々と異なる (テンプレートバンク, データの取り扱い, signal consistency test の選択, 天体起源である確率を求める手法)
 なので、異なる結果が出ている
 ただし、際どいイベントを除いてそこまで大きく違わない (本当か?)
 さらなるクロスチェックをするにはシミュレーション信号を入れたデータセットの解析結果を比べる必要があるだろう

	Date designation	GPS time	p_{astro}	FAR^{-1} (y)	Detectors	$\tilde{\Lambda}_{\text{BBH}}$	ρ_H	ρ_L	ρ_V	m_1	m_2	χ_{eff}
□ ○	150914+09:50:45UTC	1126259462.43	> 0.999	> 10000	HL	111.71	19.7	13.4	-	44.2	32.2	0.09
□ ○	170814+10:30:43UTC	1186741861.53	> 0.999	> 10000	HL	61.58	9.3	13.8	-	47.9	16.0	0.03
□ ○	170823+13:13:58UTC	1187529256.52	> 0.999	> 10000	HL	59.43	6.3	9.2	-	68.9	47.2	0.23
□ ○	170104+10:11:58UTC	1167559936.60	> 0.999	> 10000	HL	47.32	9.1	9.9	-	38.4	18.2	-0.24
□ ○	151226+03:38:53UTC	1135136350.65	> 0.999	> 10000	HL	40.58	10.7	7.4	-	14.8	8.5	0.24
□ ○	151012+09:54:43UTC	1128678900.45	> 0.999	> 10000	HL	20.25	7.0	6.7	-	30.8	12.9	-0.05
□ ○	170809+08:28:21UTC	1186302519.76	> 0.999	8300 ^a	HL	43.34	6.6	10.7	-	36.0	33.7	0.07
□ ○	170729+18:56:29UTC	1185389807.33	> 0.999	4000	HL	19.16	7.5	7.1	-	68.9	47.2	0.23
□ ○	170608+02:01:16UTC	1180922494.49	> 0.999	> 910	HL	55.12	12.5	8.7	-	16.8	6.1	0.31
□	170121+21:25:36UTC	1169069154.58	> 0.999	210 ^a	HL	23.86	5.1	8.9	-	46.1	27.9	-0.17
□ ○	170818+02:25:09UTC	1187058327.09	> 0.999	5.1 ^a	HL	21.42	4.4	9.4	-	53.7	27.4	0.07
□	170727+01:04:30UTC	1185152688.03	0.994	180	HL	15.84	4.5	6.9	-	65.2	26.5	-0.35
	170304+16:37:53UTC	1172680691.37	0.70	2.5	HL	11.61	4.6	7.1	-	68.9	47.2	0.23
	151205+19:55:25UTC	1133380542.42	0.53	.61	HL	10.97	5.8	4.8	-	107.8	36.9	0.42
	151217+03:47:49UTC	1134359286.35	0.26	.15	HL	9.61	6.7	5.6	-	40.0	14.8	0.84
	170201+11:03:12UTC	1169982210.74	0.24	.16	HL	9.26	6.0	5.6	-	73.7	25.1	0.91
□	170425+05:53:34UTC	1177134832.19	0.21	.2	HL	9.42	5.1	5.8	-	76.1	25.6	-0.17
	151216+09:24:16UTC	1134293073.19	0.18	.1	HL	9.25	5.9	5.5	-	41.8	34.3	0.91
□	170202+13:56:57UTC	1170079035.73	0.13	.06	HL	8.37	5.0	6.6	-	40.0	14.5	-0.32
	170104+21:58:40UTC	1167602338.72	0.12	.03	HL	8.80	5.6	5.4	-	91.5	30.8	0.99
	170220+11:36:24UTC	1171625802.53	0.10	.05	HL	8.43	4.4	5.2	-	107.8	36.9	0.42
	170123+20:16:42UTC	1169237820.55	0.08	.04	HL	7.97	5.0	5.3	-	50.5	31.9	-0.73
	151011+19:27:49UTC	1128626886.61	0.08	.12	HL	8.45	4.9	6.6	-	67.5	32.5	0.15
□	151216+18:49:30UTC	1134326987.60	0.07	.03	HL	8.14	6.1	6.0	-	13.9	5.0	-0.41
	170721+05:55:13UTC	1184651731.37	0.06	.04	HL	7.76	6.6	5.1	-	46.0	18.6	-0.10
□	170403+23:06:11UTC	1175295989.23	0.03	.07	HL	7.26	5.2	5.2	-	76.1	25.6	-0.17
	170629+04:13:55UTC	1182744853.11	0.02	.06	HL	6.72	6.6	4.8	-	43.4	14.8	0.98
	170620+01:14:02UTC	1181956460.10	0.02	.04	HL	6.18	5.7	5.1	-	48.7	19.6	0.07
	170801+23:28:19UTC	1185665317.35	-	.04	LV	8.59	-	6.9	4.3	30.2	12.5	-0.30
	170818+09:34:45UTC	1187084103.28	-	.04	HV	8.40	6.5	-	4.4	65.6	22.2	0.92

図 1: [1] の Table3、BBH のテンプレートを用いて解析した結果

TABLE I. Search results for the 11 GW events. We report a false-alarm rate for each search that found a given event; otherwise, we display \dots . The network SNR for the two matched-filter searches is that of the template ranked highest by that search, which is not necessarily the template with the highest SNR. Moreover, the network SNR is the quadrature sum of the detectors coincident in the highest-ranked trigger; in some cases, only two detectors contribute, even if all three are operating nominally at the time of that event.

Event	UTC time	FAR [y^{-1}]			Network SNR		
		PyCBC	GstLAL	cWB	PyCBC	GstLAL	cWB
GW150914	09:50:45.4	$<1.53 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	$<1.63 \times 10^{-4}$	23.6	24.4	25.2
GW151012	09:54:43.4	0.17	7.92×10^{-3}	\dots	9.5	10.0	\dots
GW151226	03:38:53.6	$<1.69 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	0.02	13.1	13.1	11.9
GW170104	10:11:58.6	$<1.37 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	2.91×10^{-4}	13.0	13.0	13.0
GW170608	02:01:16.5	$<3.09 \times 10^{-4}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	1.44×10^{-4}	15.4	14.9	14.1
GW170729	18:56:29.3	1.36	0.18	0.02	9.8	10.8	10.2
GW170809	08:28:21.8	1.45×10^{-4}	$<1.00 \times 10^{-7}$	\dots	12.2	12.4	\dots
GW170814	10:30:43.5	$<1.25 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	$<2.08 \times 10^{-4}$	16.3	15.9	17.2
GW170817	12:41:04.4	$<1.25 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	\dots	30.9	33.0	\dots
GW170818	02:25:09.1	\dots	4.20×10^{-5}	\dots	\dots	11.3	\dots
GW170823	13:13:58.5	$<3.29 \times 10^{-5}$	$<1.00 \times 10^{-7}$	2.14×10^{-3}	11.1	11.5	10.8

図 2: LIGO が O1, O2 データで見つけた重力波一覧

TABLE III. Events and subthreshold candidates in all of the binary black hole banks.

Name	Bank	$\mathcal{M}(M_{\odot})$	GPS time ^a	ρ_{H}^2	ρ_{L}^2	$\text{FAR}^{-1}(\text{O1})^{\text{b}}$	$\frac{W}{\mathcal{R}(\text{event} H_0)}$ (days)	$\mathcal{R}_{>100}(\text{days}^{-1})$	p_{astro}
GW151226	BBH 1	9.74	1135136350.585	120.0	52.1	$> 20\,000$	c^{c}	–	1^{c}
GW151012	BBH 2	18	1128678900.428	55.66	46.75	$> 20\,000$	$7 \times 10^5 \text{c}^{\text{c}}$	0.01	0.9998^{d}
GW150914	BBH 3	28	1126259462.411	396.1	184.3	$> 20\,000$	c^{c}	–	1^{c}
GW151216 ^e	BBH 3	29	1134293073.164	39.4	34.8	52	74 ± 2	0.033	0.71
151231	BBH 3	30	1135557647.145	37.5	25.2	0.98	5.4 ± 0.4	0.033	0.15
151011	BBH 4	58	1128626886.595	24.5	39.9	1.1	16 ± 1	0.01	0.14

図 3: プリンストングループが O1 データで見つけた重力波一覧 [4]

Name	Bank	GPS time ^a	ρ_{H}^2	ρ_{L}^2	$\text{FAR}^{-1}(\text{O2})^{\text{b}}$	$\frac{W(\text{event})}{\mathcal{R}(\text{event} \mathcal{N})}(\text{O2})$	p_{astro}
GW170104	BBH (3,0)	1167559936.582	85.1	104.3	$> 2 \times 10^4$	> 100	> 0.99
GW170809	BBH (3,0)	1186302519.740	40.5	113	$> 2 \times 10^4$	> 100	> 0.99
GW170814	BBH (3,0)	1186741861.519	90.2	170	$> 2 \times 10^4$	> 100	> 0.99
GW170818	BBH (3,0)	1187058327.075	19.4	95.1	1.7 ^c	—	— ^[c]
GW170729	BBH (3,1)	1185389807.311	62.1	53.6	$> 2 \times 10^4$	> 100	> 0.99
GW170823	BBH (3,1)	1187529256.500	46.0	90.7	$> 2 \times 10^4$	> 100	> 0.99

^a The times given are the ‘linear-free’ times of the best fit templates in our bank; with this time as the origin, the phase of the template is orthogonal to shifts in time, given the fiducial PSD.

^b The FARs given are computed within each bank; our BBH analysis has 5 chirp-mass banks. The inverse FAR is given in terms of ‘‘O2’’ to reflect the volumetric weighting of events. Under the approximation of constant sensitivity of the detectors during the observing run, the unit ‘‘O2’’ corresponds to ≈ 118 days.

^c See discussion in §III.

TABLE II: New events with astrophysical probability $> 50\%$ in all of the BBH banks. The rate distributions used to compute p_{astro} are shown in Fig. 3, the maximum-likelihood rates in banks BBH 3 and BBH 4 are $\mathcal{R}_{\text{max}} = 8/\text{O2}$ and $5/\text{O2}$, respectively.

Name	Bank	$\mathcal{M}^{\text{det}}(M_{\odot})$	χ_{eff}	z	GPS time ^a	ρ_{H}^2	ρ_{L}^2	$\text{FAR}^{-1}(\text{O2})^{\text{b}}$	$\frac{W(\text{event})}{\mathcal{R}(\text{event} \mathcal{N})}(\text{O2})$	p_{astro}
GW170121	BBH (3,0)	29_{-3}^{+4}	$-0.3_{-0.3}^{+0.3}$	$0.24_{-0.13}^{+0.14}$	1169069154.565	29.4	89.7	2.8×10^3	> 30	> 0.99
GW170304	BBH (4,0)	47_{-7}^{+8}	$0.2_{-0.3}^{+0.3}$	$0.5_{-0.2}^{+0.2}$	1172680691.356	24.9	55.9	377	13.6	0.985
GW170727	BBH (4,0)	42_{-6}^{+6}	$-0.1_{-0.3}^{+0.3}$	$0.43_{-0.17}^{+0.18}$	1185152688.019	25.4	53.5	370	11.8	0.98
GW170425	BBH (4,0)	47_{-10}^{+26}	$0.0_{-0.5}^{+0.4}$	$0.5_{-0.3}^{+0.4}$	1177134832.178	28.6	37.5	15	0.65	0.77
GW170202	BBH (3,0)	$21.6_{-1.4}^{+4.2}$	$-0.2_{-0.3}^{+0.4}$	$0.27_{-0.12}^{+0.13}$	1170079035.715	26.5	41.7	6.3	0.25	0.68
GW170403	BBH (4,1)	48_{-7}^{+9}	$-0.7_{-0.3}^{+0.5}$	$0.45_{-0.19}^{+0.22}$	1175295989.221	31.3	31.0	4.7	0.23	0.56

図 4: プリンストングループが O2 データで見つけた重力波一覧 [5]

参考文献

- [1] A. H. Nitz, T. Dent, G. S. Davies, S. Kumar, C. D. Capano, I. Harry, S. Mazzon, L. Nuttall, A. Lundgren, and M. Tápai, (2019), arXiv:1910.05331 .
- [2] A. H. Nitz, C. Capano, A. B. Nielsen, D. A. B. Steven Reyes, Rebecca White, and B. Krishnan, (2018), arXiv:1811.01921 .
- [3] The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration (Virgo, LIGO Scientific), (2018), arXiv:1811.12907 [astro-ph.HE] .
- [4] T. Venumadhav, B. Zackay, J. Roulet, L. Dai, and M. Zaldarriaga, (2019), arXiv:1902.10341 .
- [5] T. Venumadhav, B. Zackay, J. Roulet, L. Dai, and M. Zaldarriaga, (2019), arXiv:1904.07214 .
- [6] B. Zackay, T. Venumadhav, L. Dai, J. Roulet, and M. Zaldarriaga, (2019), arXiv:1902.10331 .
- [7] B. Zackay, T. Venumadhav, J. Roulet, L. Dai, and M. Zaldarriaga, (2019), arXiv:1908.05644 .
- [8] A. H. Nitz, (2017), arXiv:1709.08974 [gr-qc] .