

Overview for companion papers of the GW150914 detection paper

安東研輪講 2016.5.12

小森健太郎

本発表の流れ

1. 重力波イベントGW150914の発表時に公開された論文たちの概要を一言ずつ簡単に紹介
2. そのうちの一つ、 Properties of the binary black hole merger GW150914を少し詳しく紹介

主論文

“Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”

➤ 重力波源から推定されるパラメータ

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

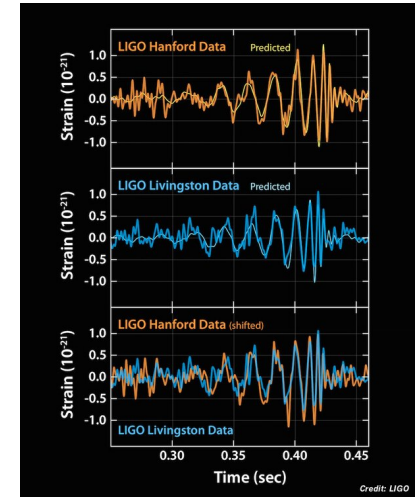
Abbott+(2016)

3太陽質量が重力波
として放出

太陽質量の数十倍の
BH(stellar-mass black
hole)初観測

連星BH初観測

宇宙年齢以内に合体す
る連星BH系の存在



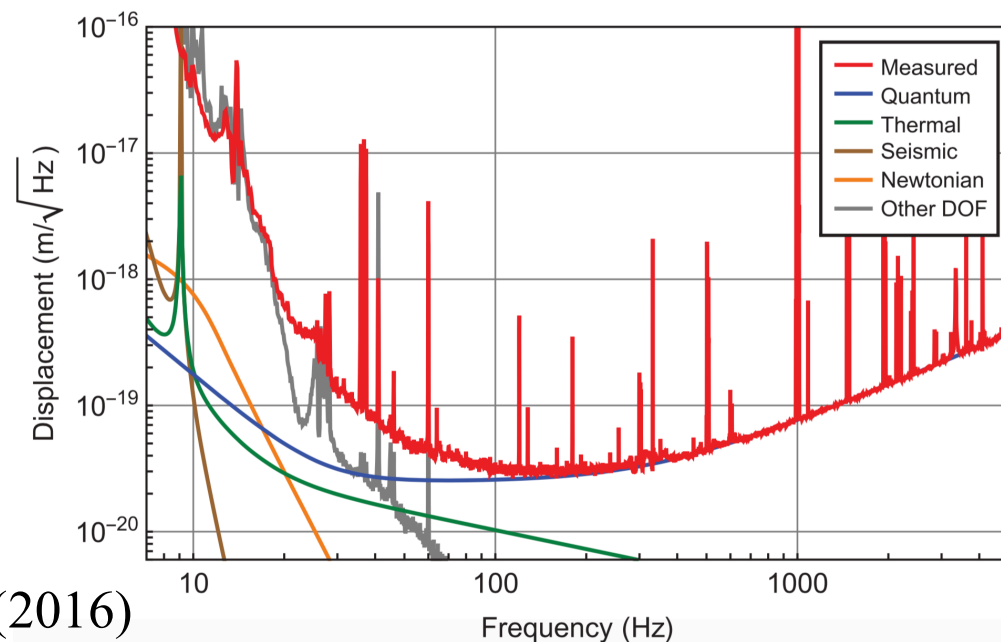
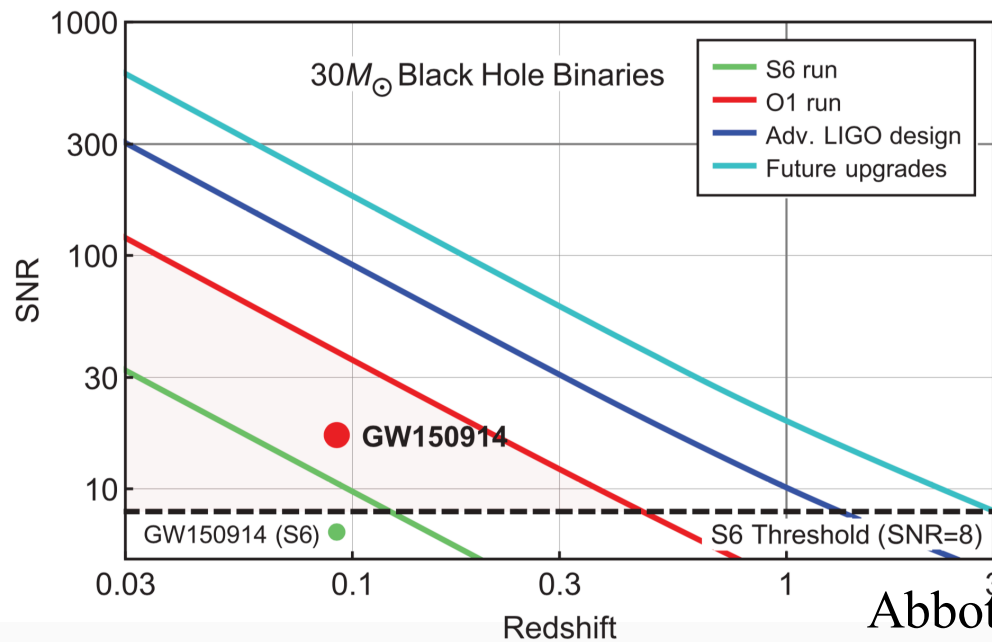
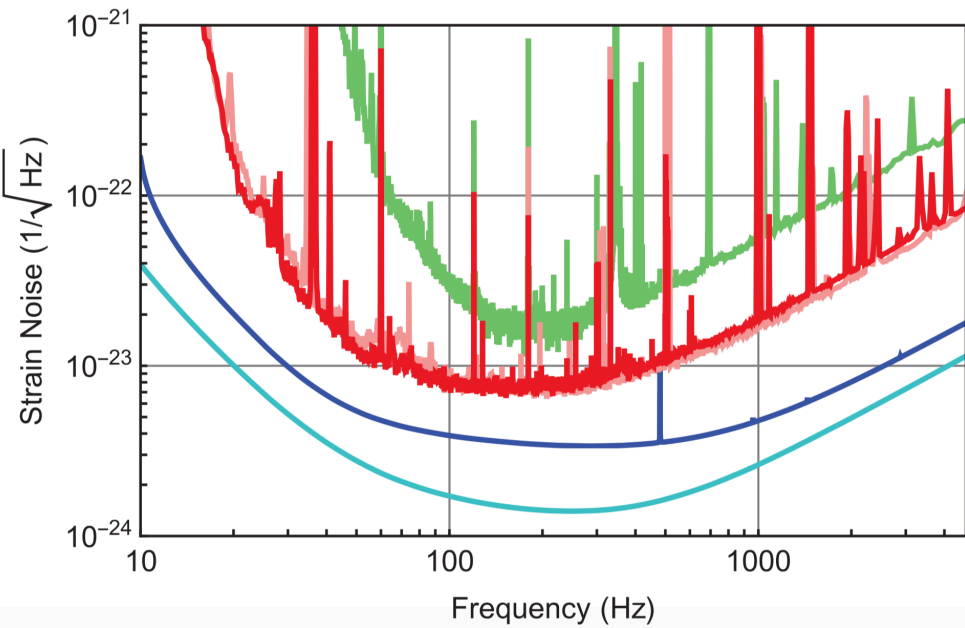
関連論文

1. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries
2. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO
3. Properties of the binary black hole merger GW150914
4. Tests of general relativity with GW150914
5. The rate of binary black hole mergers inferred from advanced LIGO observations surrounding GW150914
6. Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions
7. Characterization of transient noise in advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914
8. Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914
9. Astrophysical implications of the binary black-hole merger GW150914
10. GW150914: Implications for the stochastic gravitational-wave background from binary black holes
11. High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube

1 と 10 → PRL、 9 → ApJ

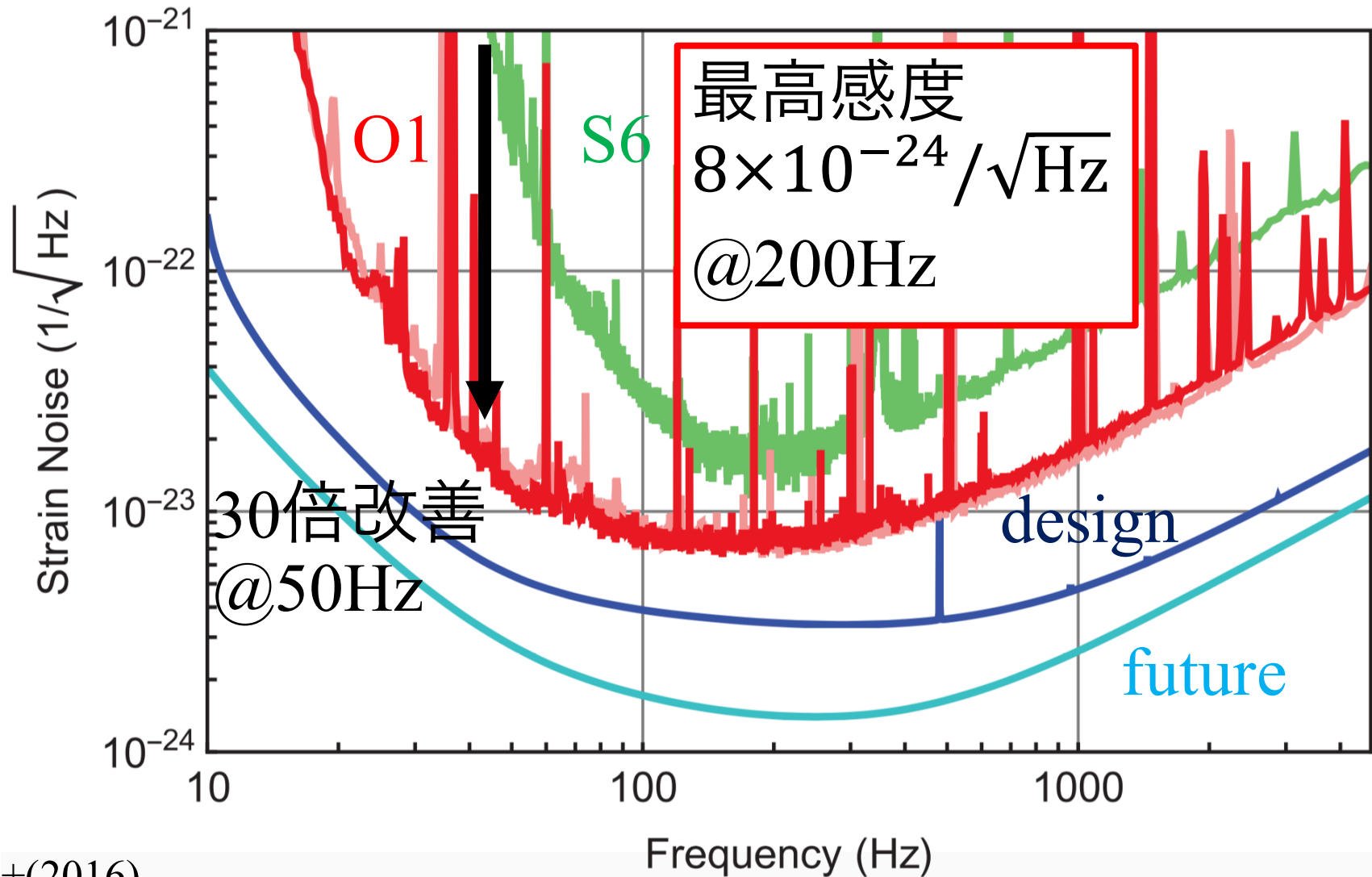
1. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries

➤ O1およびGW150914の、まさに概要といえる論文

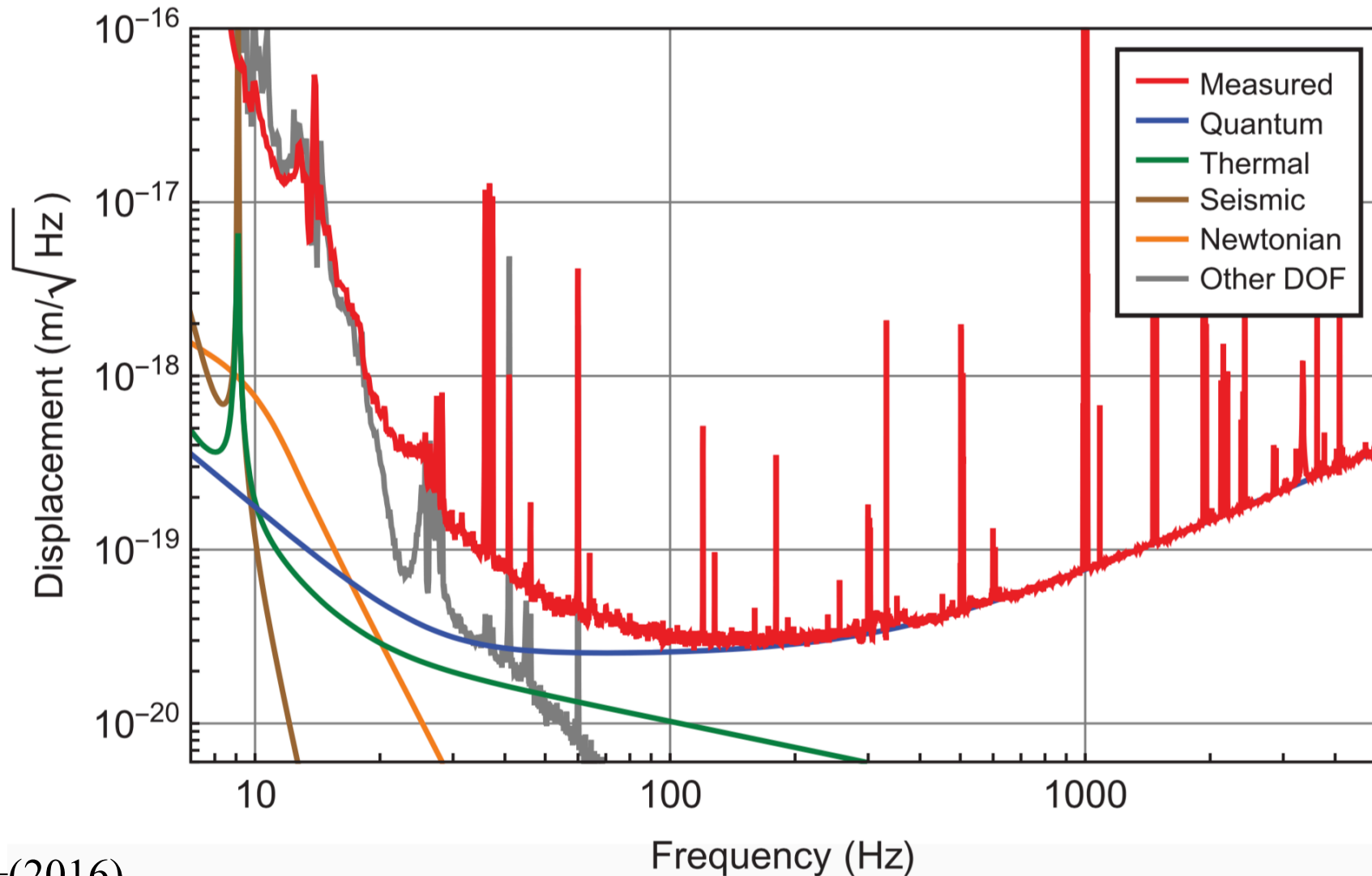


Abbott+(2016)

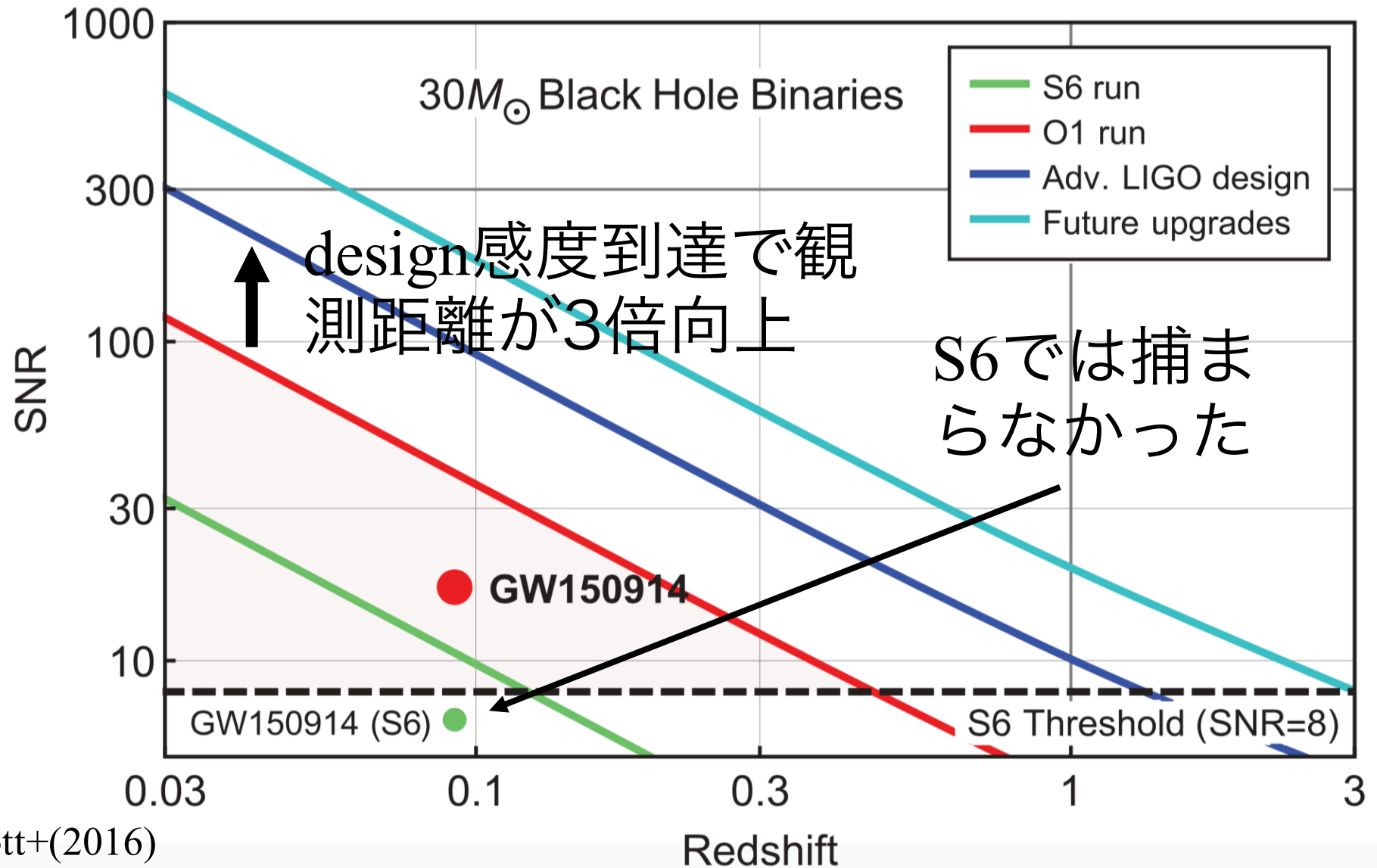
1. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries



1. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries

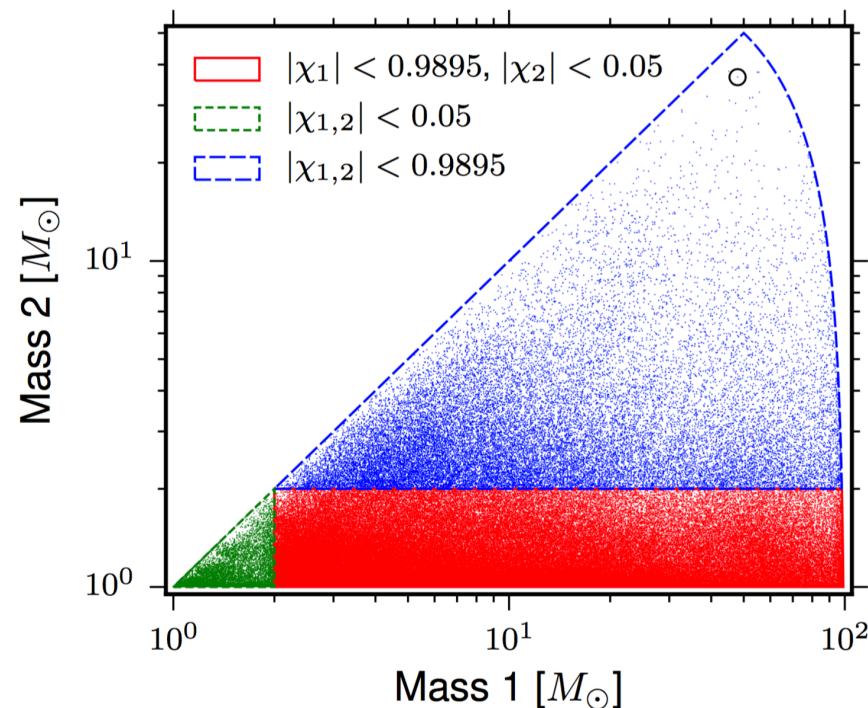


1. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries



2. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO

- O1の初期(9/12 ~ 10/20)の解析結果論文
- 約25万のテンプレート波形を用いたmatched filter解析
- 合計質量 $100M_{\odot}$ 以下で、BHの質量、スピンをパラメータ探査



Abbott+(2016)

Event	Time (UTC)	FAR (yr^{-1})	$\mathcal{F}$	$\mathcal{M}$ ($M_{\odot}$)	m_1 ($M_{\odot}$)	m_2 ($M_{\odot}$)	χ_{eff}	D_L (Mpc)
GW150914	14 September 2015 09:50:45	$< 5 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-7}$ ($> 5.1 \sigma$)	28^{+2}_{-2}	36^{+5}_{-4}	29^{+4}_{-4}	$-0.06^{+0.17}_{-0.18}$	410^{+160}_{-180}
LVT151012	12 October 2015 09:54:43	0.44	0.02 (2.1σ)	15^{+1}_{-1}	23^{+18}_{-5}	13^{+4}_{-5}	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$	1100^{+500}_{-500}

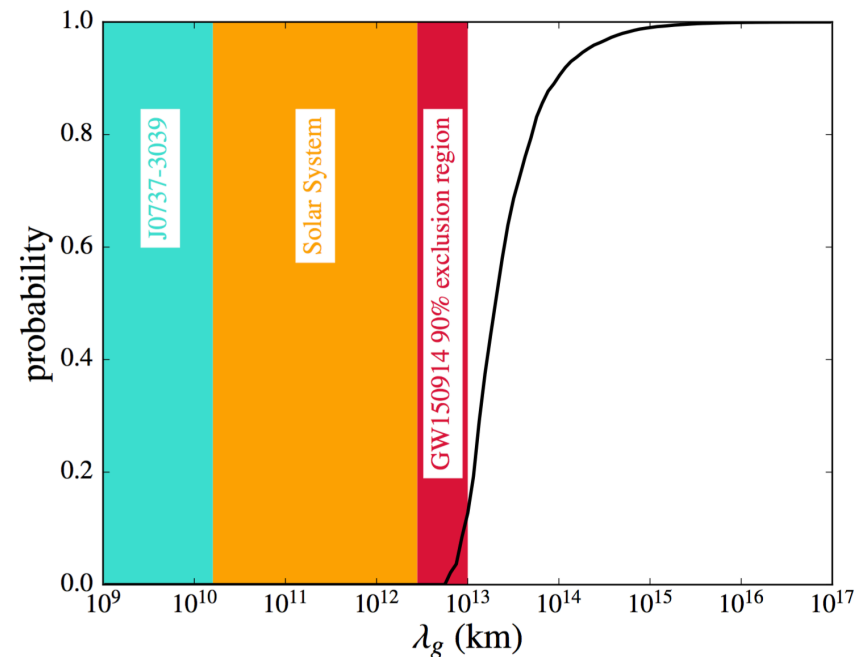
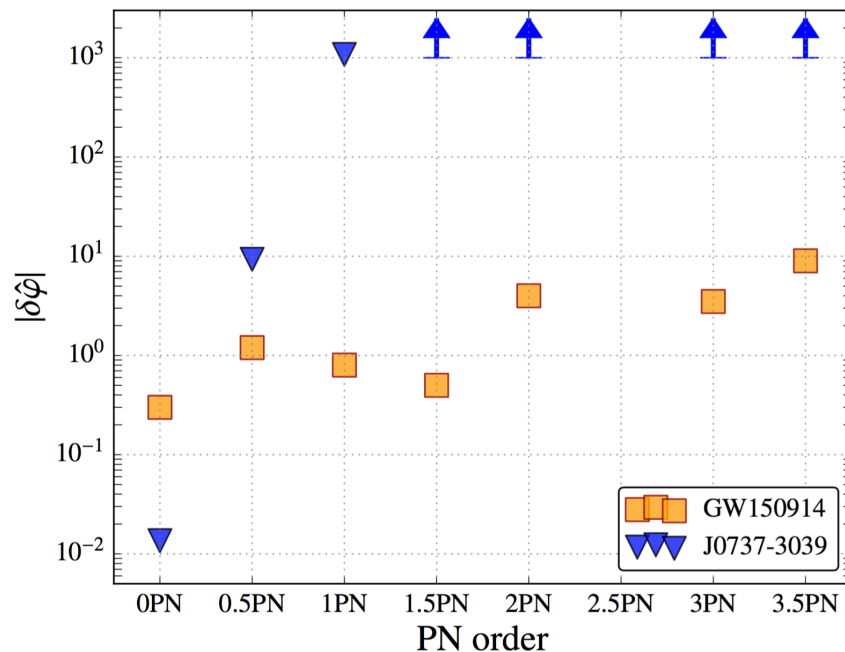
3. Properties of the binary black hole merger GW150914

➤ 後で少し詳しく紹介します

4. Tests of general relativity with GW150914

- 初の強い重力場における一般相対論検証
- post-newtonian 0次以外の項に対し、これまでの連星パルサーによる制限を大きく上回る制限をつけた
- コンプトン波長(重力子の質量)に対する上限値もついた。 $\lambda_g \geq 10^{13}$ km ($m_g \leq 1.2 \times 10^{-22}$ eV $\approx 10^{-58}$ kg)

Abbott+(2016)



5. The rate of binary black hole mergers inferred from advanced LIGO observations surrounding GW150914

- 連星BH合体のイベントレート算出
- パラメータ探査でも用いられていた2通りの解析方法を利用
- 以前は $0.1 \sim 300 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ だったイベントレートは $2 \sim 400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ へ上方修正

Abbott+(2016)

Mass Distribution

$R / (\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$

pycbc

gstlal

Combined

GW150914

16^{+38}_{-13}

17^{+39}_{-14}

17^{+39}_{-13}

LVT151012

61^{+152}_{-53}

62^{+164}_{-55}

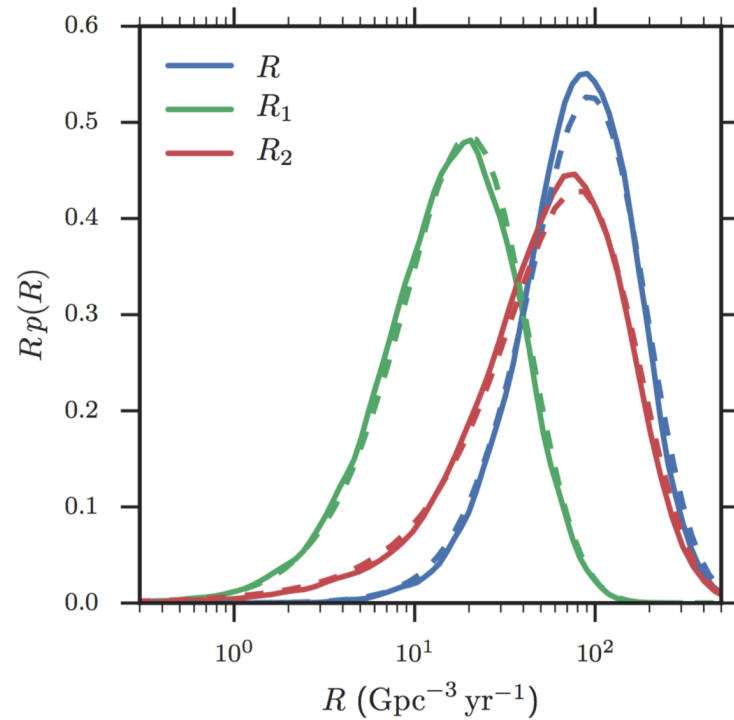
62^{+165}_{-54}

Both

82^{+155}_{-61}

84^{+172}_{-64}

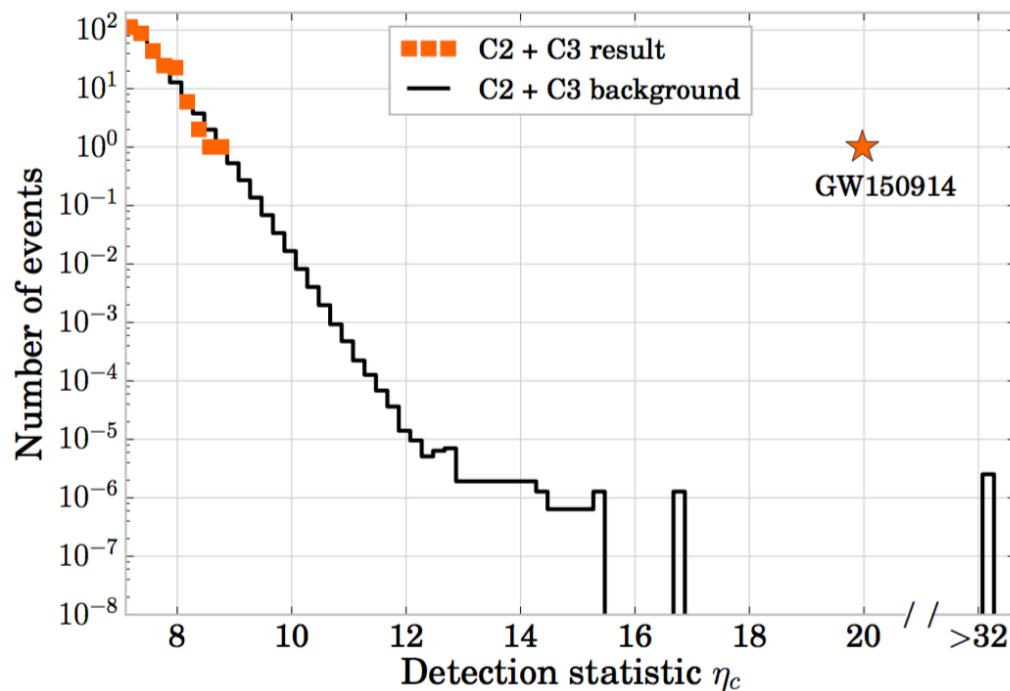
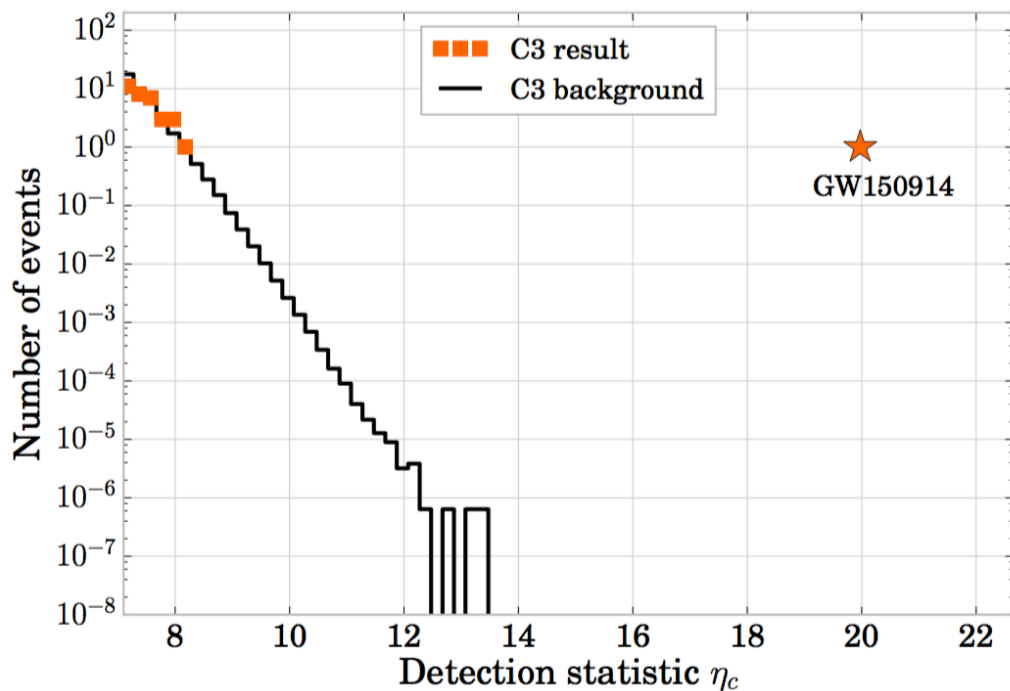
83^{+168}_{-63}



6. Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions

- いかにかにして重力波イベントを探し当てたか、が書かれたburst search論文
- 最初にGW150914を発見したのはバースト波解析のパイプラインだった

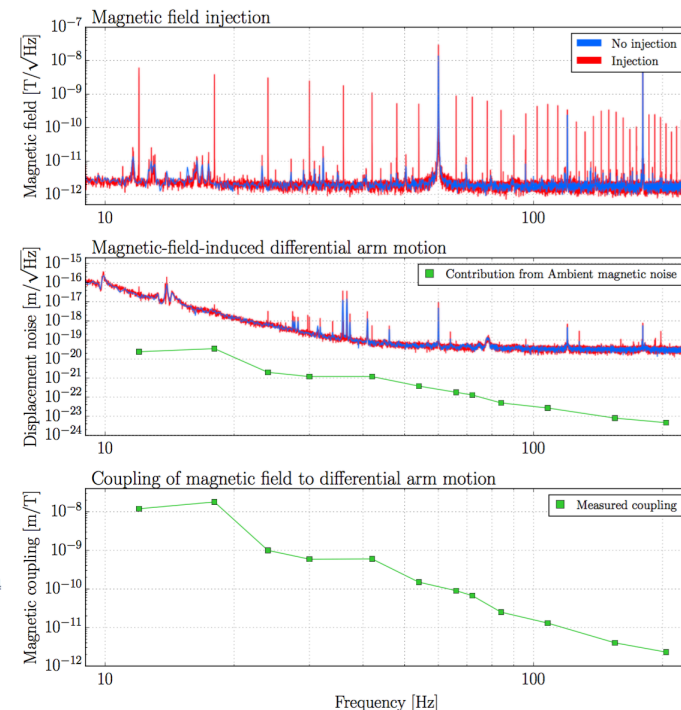
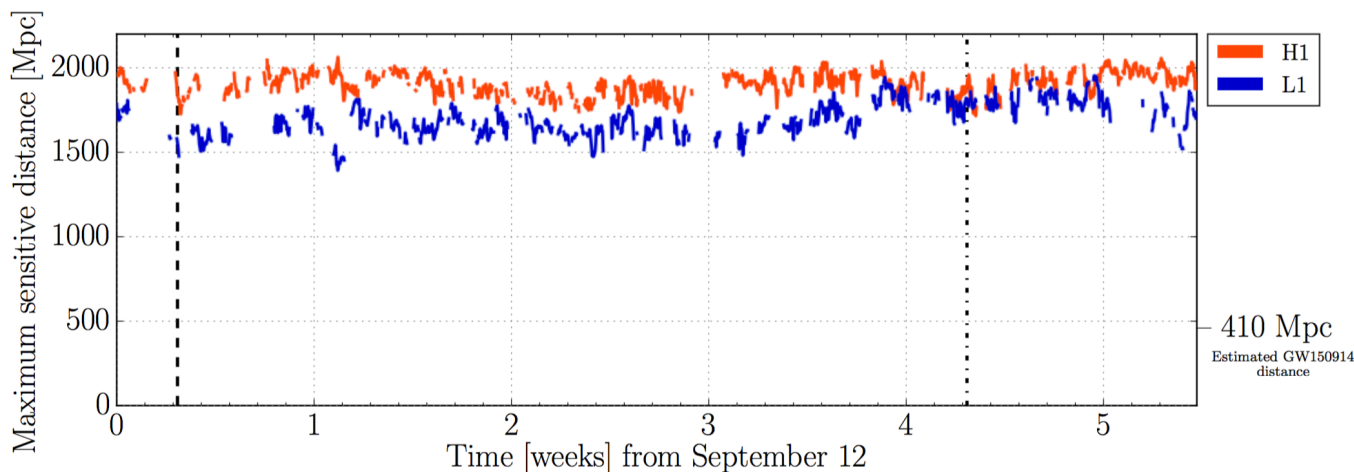
Abbott+(2016)



7. Characterization of transient noise in advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914

- GW150914近辺のデータについて、想定されるあらゆる(突発的な)外乱を見積もった論文
- 人為的、磁場、変調、地震、太陽活動、宇宙線などを検討
- これらの雑音の影響なし

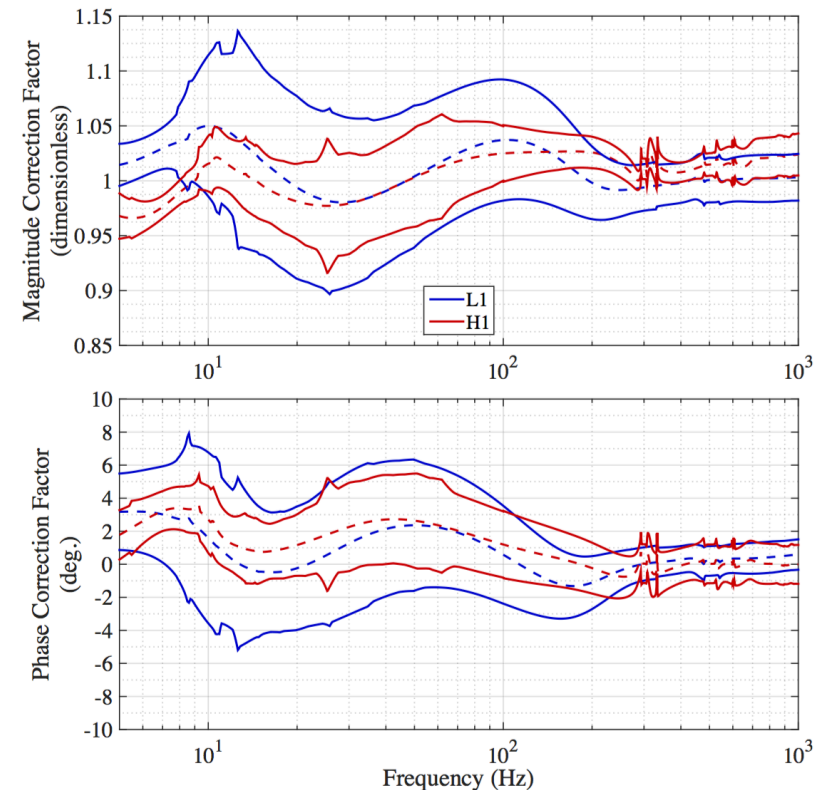
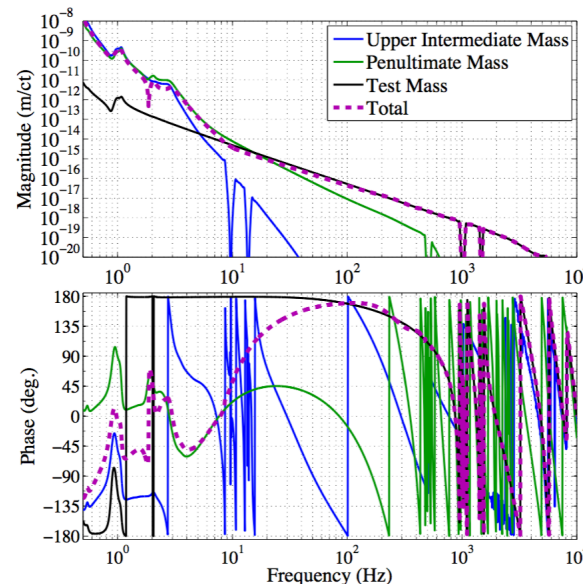
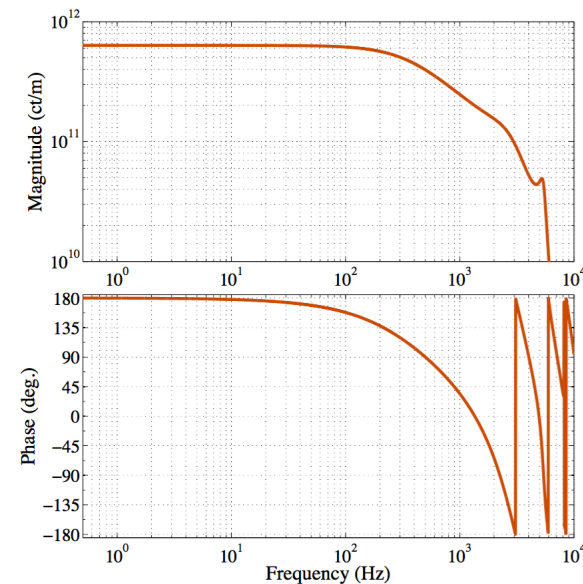
Abbott+(2016)



8. Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914

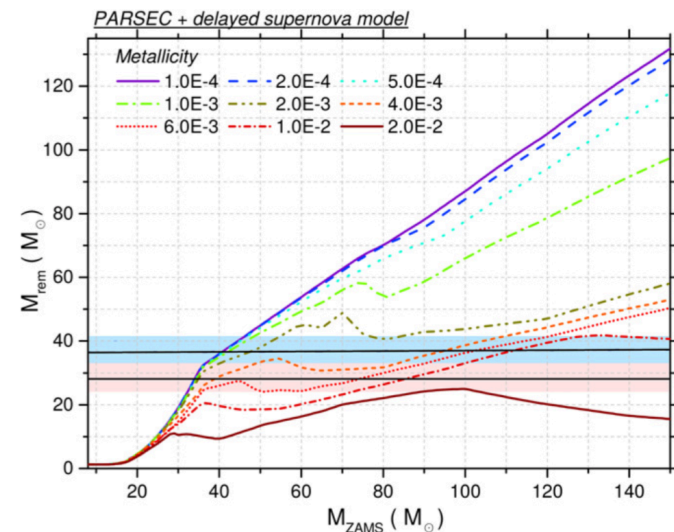
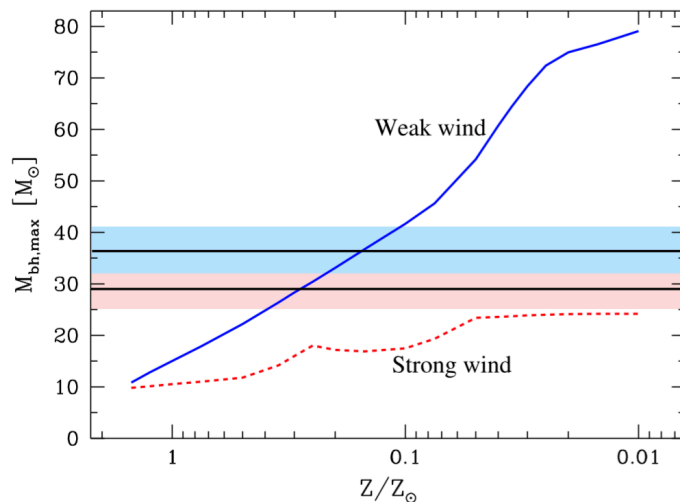
- キャリブレーション方法について書かれた論文
- 静電アクチュエータやキャリブレーションピークを立てるためのphoton calibratorも活躍
- Amplitudeで10%、Phaseで10度の正確さ

Abbott+(2016)

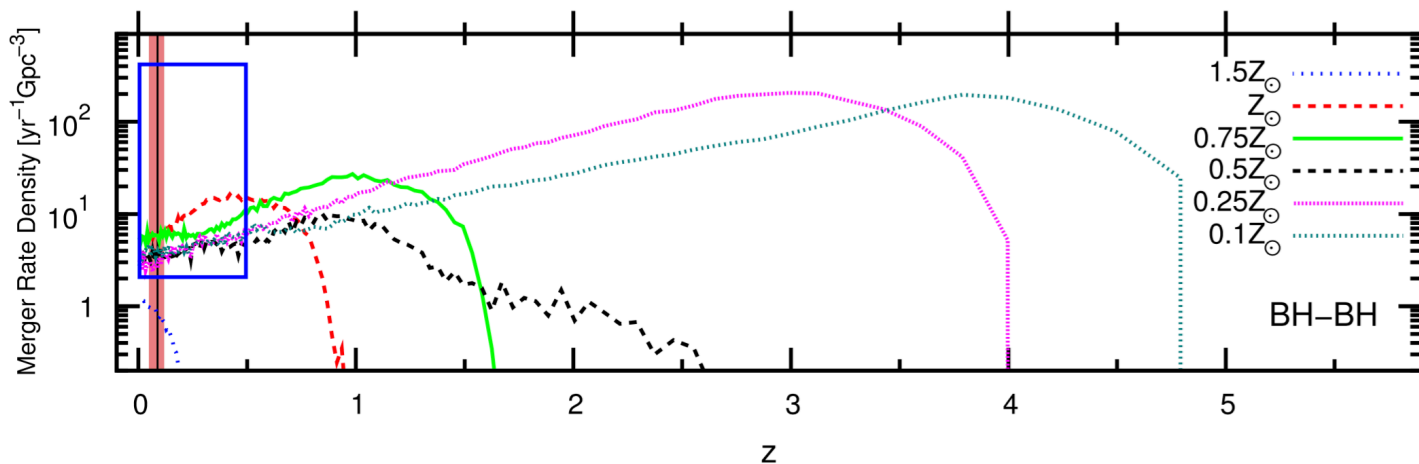


9. Astrophysical implications of the binary black-hole merger GW150914

- 連星形成過程などの宇宙論的にわかることが書いてある
- 弱い星風、少ない金属量(初代星など)をもつ連星だった



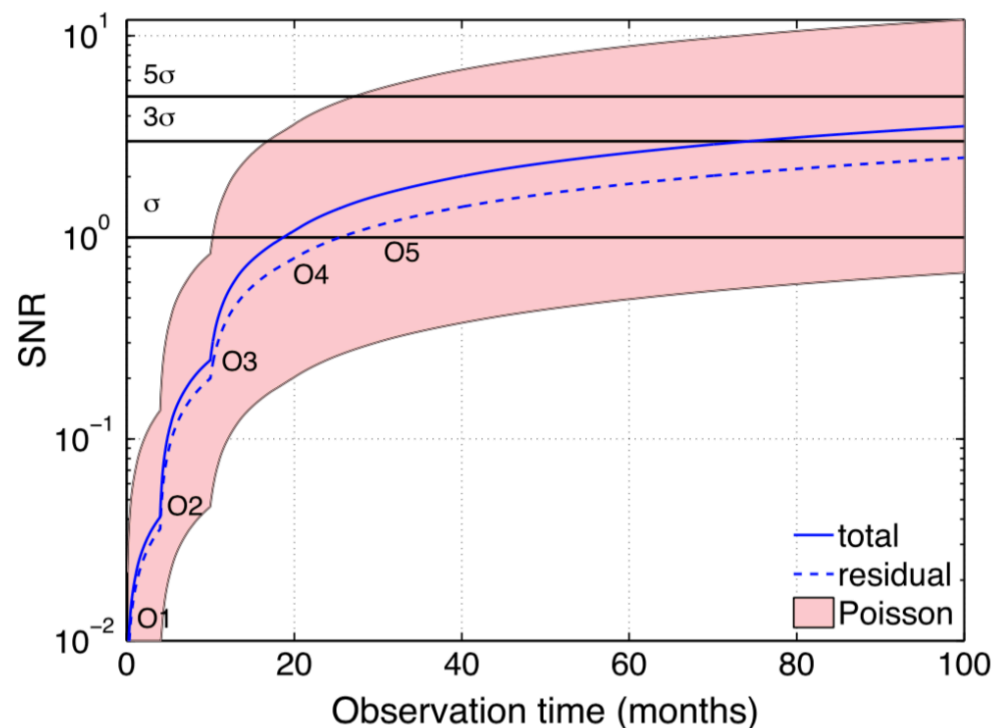
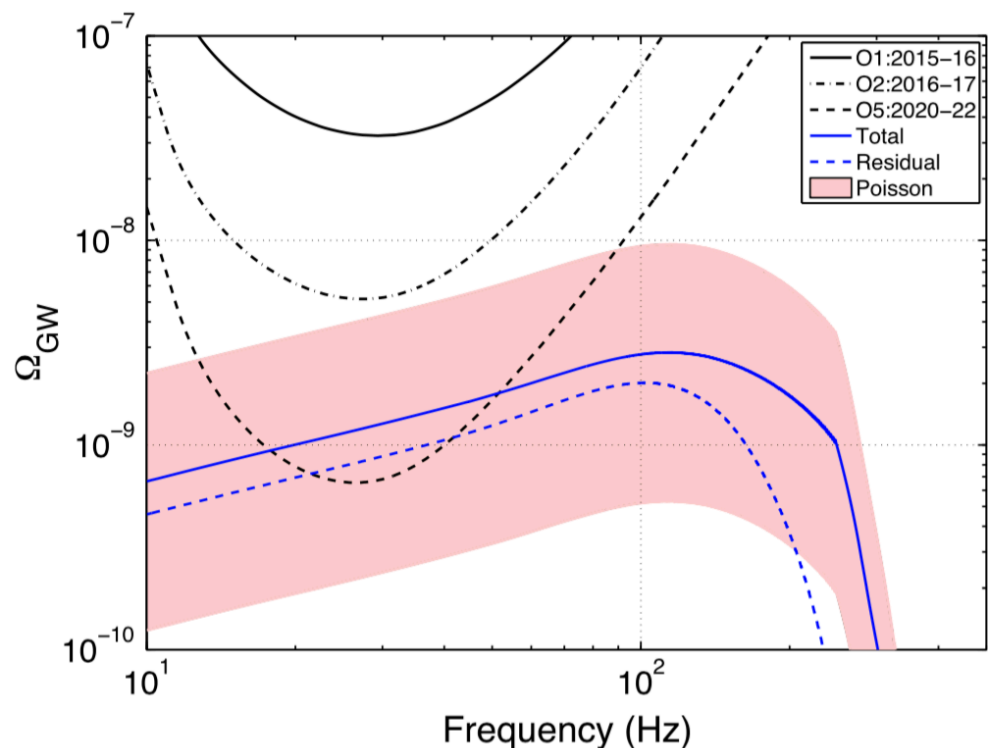
Abbott+(2016)



10. GW150914: Implications for the stochastic gravitational-wave background from binary black holes

- 前回の桑原氏の輪講にて取り上げられた、BH連星合体によって生じる背景重力波の論文
- LIGO-Virgoフルスペック(O5)で3シグマ

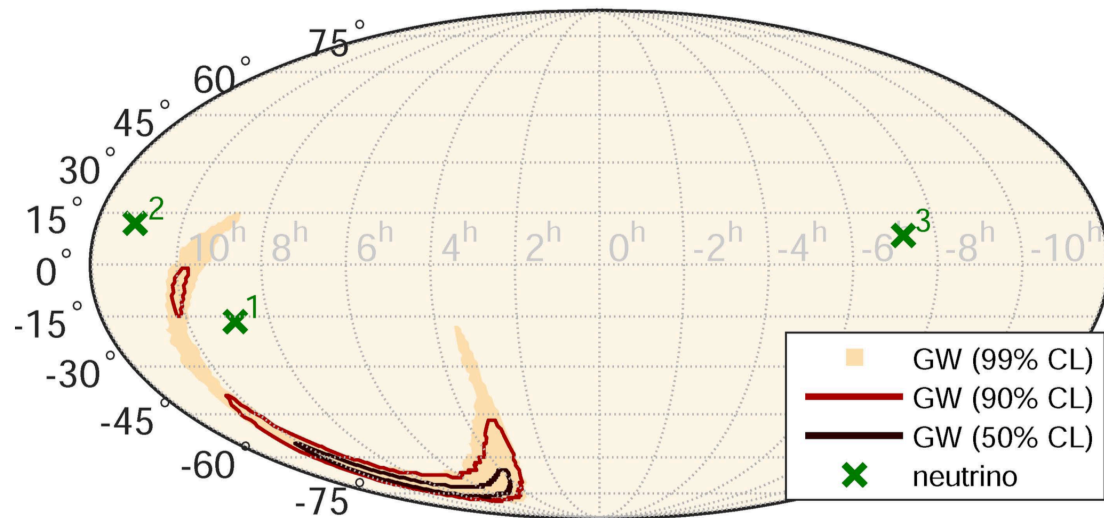
Abbott+(2016)



11. High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube

➤ ニュートリノ観測装置での対応候補天体を検討する論文

➤ 対応していそうなイベントはなかった



Abbott+(2016)

#	ΔT [s]	RA [h]	Dec [°]	$\sigma_{\mu}^{\text{rec}}$ [°]	E_{μ}^{rec} [TeV]	fraction
1	+37.2	8.84	-16.6	0.35	175	12.5%
2	+163.2	11.13	12.0	1.95	1.22	26.5%
3	+311.4	-7.23	8.4	0.47	0.33	98.4%

3. Properties of the binary black hole merger GW150914

- GW150914から分かる、連星BHと合体後にできたBHに関するあらゆるパラメータが網羅された論文
- とにかく詳しい。

	EOBNR	IMRPhenom	Overall
Detector-frame total mass $M/M_\odot$	$70.3^{+5.3}_{-4.8}$	$70.7^{+3.8}_{-4.0}$	$70.5^{+4.6\pm0.9}_{-4.5\pm1.0}$
Detector-frame chirp mass $\mathcal{M}/M_\odot$	$30.2^{+2.5}_{-1.9}$	$30.5^{+1.7}_{-1.8}$	$30.3^{+2.1\pm0.4}_{-1.9\pm0.4}$
Detector-frame primary mass $m_1/M_\odot$	$39.4^{+5.5}_{-4.9}$	$38.3^{+5.5}_{-3.5}$	$38.8^{+5.6\pm0.9}_{-4.1\pm0.3}$
Detector-frame secondary mass $m_2/M_\odot$	$30.9^{+4.8}_{-4.4}$	$32.2^{+3.6}_{-5.0}$	$31.6^{+4.2\pm0.1}_{-4.9\pm0.6}$
Detector-frame final mass $M_f/M_\odot$	$67.1^{+4.6}_{-4.4}$	$67.4^{+3.4}_{-3.6}$	$67.3^{+4.1\pm0.8}_{-4.0\pm0.9}$
Source-frame total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.0^{+5.0}_{-4.4}$	$64.6^{+4.1}_{-3.5}$	$64.8^{+4.6\pm1.0}_{-3.9\pm0.5}$
Source-frame chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$27.9^{+2.3}_{-1.8}$	$27.9^{+1.8}_{-1.6}$	$27.9^{+2.1\pm0.4}_{-1.7\pm0.2}$
Source-frame primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.3^{+5.3}_{-4.5}$	$35.1^{+5.2}_{-3.3}$	$35.7^{+5.4\pm1.1}_{-3.8\pm0.0}$
Source-frame secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$28.6^{+4.4}_{-4.2}$	$29.5^{+3.3}_{-4.5}$	$29.1^{+3.8\pm0.2}_{-4.4\pm0.5}$
Source-frame final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.0^{+4.4}_{-4.0}$	$61.6^{+3.7}_{-3.1}$	$61.8^{+4.2\pm0.9}_{-3.5\pm0.4}$
Mass ratio q	$0.79^{+0.18}_{-0.19}$	$0.84^{+0.14}_{-0.21}$	$0.82^{+0.16\pm0.01}_{-0.21\pm0.03}$
Effective inspiral spin parameter χ_{eff}	$-0.09^{+0.19}_{-0.17}$	$-0.03^{+0.14}_{-0.15}$	$-0.06^{+0.17\pm0.01}_{-0.18\pm0.07}$
Dimensionless primary spin magnitude a_1	$0.32^{+0.45}_{-0.28}$	$0.31^{+0.51}_{-0.27}$	$0.31^{+0.48\pm0.04}_{-0.28\pm0.01}$
Dimensionless secondary spin magnitude a_2	$0.57^{+0.40}_{-0.51}$	$0.39^{+0.50}_{-0.34}$	$0.46^{+0.48\pm0.07}_{-0.42\pm0.01}$
Final spin a_f	$0.67^{+0.06}_{-0.08}$	$0.67^{+0.05}_{-0.05}$	$0.67^{+0.05\pm0.00}_{-0.07\pm0.03}$
Luminosity distance D_L/Mpc	Abbott+(2016)		
	390^{+170}_{-180}	440^{+140}_{-180}	$410^{+160\pm20}_{-180\pm40}$
Source redshift z	$0.083^{+0.033}_{-0.036}$	$0.093^{+0.028}_{-0.036}$	$0.088^{+0.031\pm0.004}_{-0.038\pm0.009}$
Upper bound on primary spin magnitude a_1	0.65	0.71	0.69 ± 0.05
Upper bound on secondary spin magnitude a_2	0.93	0.81	0.88 ± 0.10
Lower bound on mass ratio q	0.64	0.67	0.65 ± 0.03
Log Bayes factor $\ln \mathcal{B}_{\text{s/n}}$	288.7 ± 0.2	290.1 ± 0.2	—

波形から分かること

➤ Chirp mass

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} \simeq \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

：波形の時間発展、PN展開の第0項から

➤ 質量比 $q = \frac{m_2}{m_1} \leq 1$: PN展開の低次の項から

➤ 光学距離 D_L と軌道面の傾き θ_{JN} : 振幅の絶対値から

➤ 重力波の波形は赤方偏移し、見かけの質量 m と実際の質量 m_{source} は $m = (1+z)m_{source}$ で結ばれる

パラメータ推定

- 基本的にはMCMCを用いたシミュレーションで確率密度関数を計算している。
- 用いたモデルはEOBNR、IMRPhenomの2つ



Effective-One-Body
Numerical Relativity

弱重力場でのPN展開と、
強重力場での数値相対論
を組み合わせている

とりあえず歳差運動は考
えていない

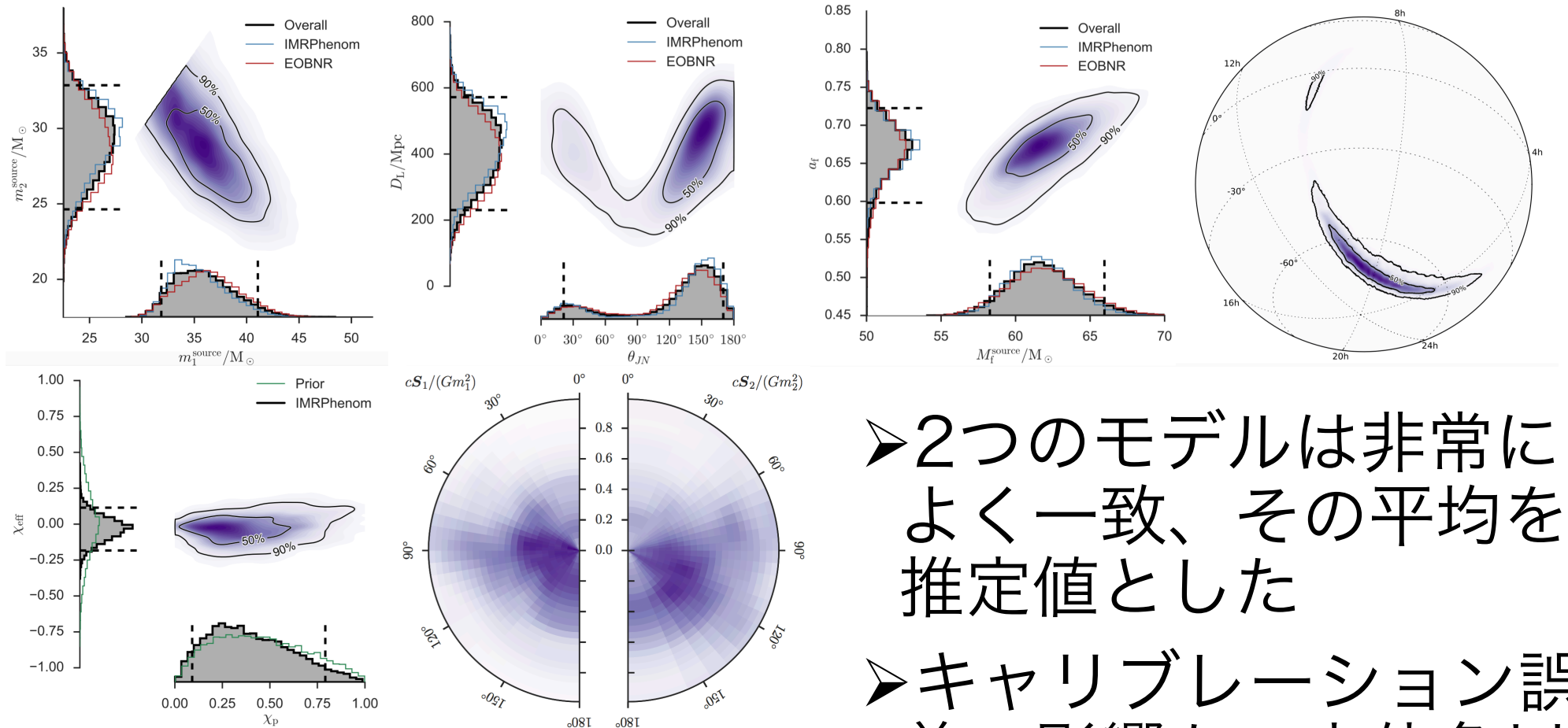


Inspiral-Merger-Ringdown
Phenomenological

PN展開を周波数空間で
記述したもの…?

パラメータ推定

Abbott+(2016)



➤ 2つのモデルは非常によく一致、その平均を推定値とした

➤ キャリブレーション誤差の影響も、立体角以外は極めて小さい

$$a = \frac{c|S|}{Gm^2} \leq 1 \quad \chi_{\text{eff}} = \frac{c}{G} \left(\frac{\mathbf{S}_1}{m_1} + \frac{\mathbf{S}_2}{m_2} \right) \cdot \frac{\mathbf{L}}{M}$$

パラメータ推定結果一覧

➤ source mass

$$m_1 = 36^{+5}_{-4} M_{\odot}$$

$$m_2 = 29^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

$$M = 62^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

$$m_{rad} = 3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$$

➤ position

$$D_L = 410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$$

$$z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$$

$$\sigma_{area} = 590 \text{ deg}^2$$

$$\sigma_{volume} \sim 10^{-2} \text{ Gpc}$$

$$(\text{c.f. } \rho_{galaxy} = 10^7 \text{ Gpc}^{-3})$$

➤ spin

$$a_1 < 0.7$$

$$a_2 < 0.9$$

$$a_f = 0.67^{+0.05}_{-0.07}$$

$$\chi_{eff} = -0.06^{+0.17}_{-0.18}$$

スピン

合体前のBHスピンより精度良く求められている

最終スピンは軌道角運動量からの寄与が支配的なため

➤ spin

$$a_1 < 0.7$$

$$a_2 < 0.9$$

$$a_f = 0.67^{+0.05}_{-0.07}$$

$$\chi_{eff} = -0.06^{+0.17}_{-0.18}$$

絶対値が0に近い

最初から連星として形成されスピンのそろっていたなら、

$$a_1 < 0.2 \quad a_2 < 0.3$$

合体時エネルギー放出

$$m_{rad} = 3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$$

➤ 全質量のおよそ5%のエネルギーが重力波として放出された

➤ オーダー推定なら一般相対論を用いなくても、

$$E = (m_1 + m_2)c^2 - \frac{Gm_1m_2}{2r}$$

にインスパイラルの終わる距離 $r = \frac{5GM}{c^2}$ を代入して

$$E = Mc^2 \left(1 - \frac{1}{40} \right)$$

となることから、2-3%程度放出されるとわかる。

合体時エネルギー放出

すでに
2.8%放出

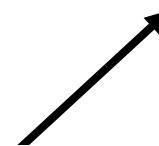


全体で
4.7%放出



by 京大天体核
中野さん

合体時エネルギー放出



GW luminosity

$$200^{+30}_{-20} M_{\odot} c^2/s = 3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56} \text{ erg/s}$$



GRB110918A $4.7^{+0.2}_{-0.2} \times 10^{54} \text{ erg/s}$

by 京大天体核
中野さん

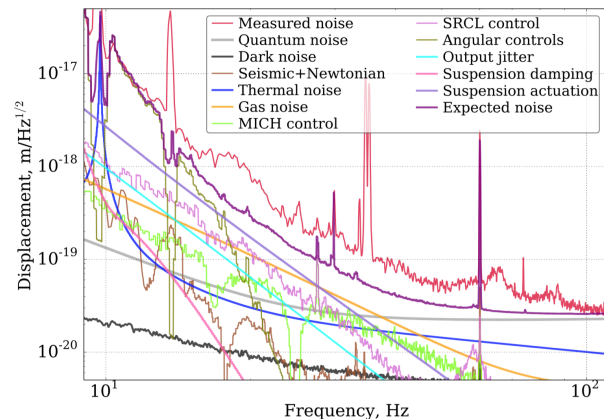
その他

- 個々のBHのスピンや歳差運動に関するパラメータはあまり良い精度で決定できなかった。
 - ⇒ 波形にスピンの影響が出にくいこともあり、今回のイベントではSNが足りなかった。
- EOBNRで歳差運動を考えていない。
- 連星の軌道を円軌道として計算している。楕円率0.1以下@10Hzなら波形にはほぼ影響しないが、より大きな楕円率をもつ連星では考慮する必要あり。
 - ⇒ これから解析していく。

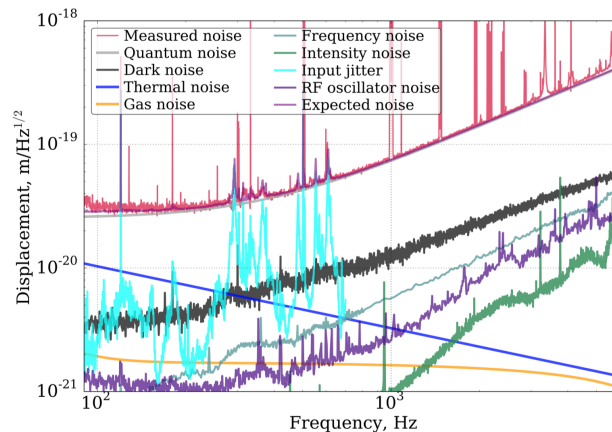
かなり最近に出た論文1

➤ The sensitivity of the Advanced LIGO Detectors at the Beginning of Gravitational Wave Astronomy

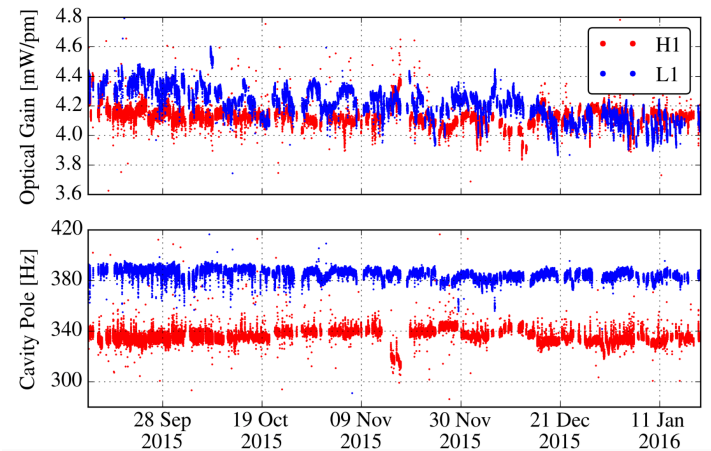
細かなnoise budget論文



(a) LIGO Livingston Observatory



(b) LIGO Hanford Observatory



すさまじい正確さ

かなり最近に出た論文2

- Search for transient gravitational waves in coincidence with short duration radio transients during 2007-2013

aLIGO, Virgo, GEOによる、FRBと同時刻に重力波イベントがあったかどうかの解析

- A First Targeted Search for Gravitational-Wave Bursts from Core-Collapse Supernovae in Data of First-Generation Laser Interferometer Detectors

超新星爆発(1~10Mpc)からの重力波探査

- ✓ 第3世代の検出器なら10Mpcくらいまで見えるかも？

まとめ

- どれも読み応えのある、面白い論文ばかり。もっとしっかり読み込みたい。
- やっぱり重力波って面白いなあと思いました。