Injection test with pcal

2016/11/24

Takaaki Yokozawa

目的

- Photon calibratorは2018年4月に導入が予定されている。bKAGRAの各フェーズ(もしくはdesign sensitivityで)物理的に意味のあるhardware injectionがphoton calibratorで行えるかの評価を行った。
- 先週(11/17,18)井上さんが市大に訪問された際にpcalのスペック(特にレーザーパワー)の決定の参考にしたいということだったので、議論を開始した。
- (言い訳になってしまうかも知れませんが。。)今週神岡で別の測定を行っており、まだ最低限の検証しかできておりません。F2F meetingまでにはもう少し進めます。
  - 連続波解析における[m/rHz]上での比較
  - コンパクト連星合体上での[m]上での比較・[m/rHz]上での比較
  - まだpreliminaryです。

Photon calibratorのdisplacement

メモを作成しながら、式を追ってミスをしないように解析を進めております。(メモは今週末公開を目指しておりますので公開後、確認、ご指摘をお願いします。)
メモ：2W laserを用いる場合、振幅として変化させられるのは1Wなので以下の計算式の半分にしなくては行けない。更にのイズフロアと比較する場合は、RMSにするために、1/sqrt(2)をする。

Photon calibrator の displacement(δx) は Laser power $P(f)$、transfer function $s(f)$ と記述して、

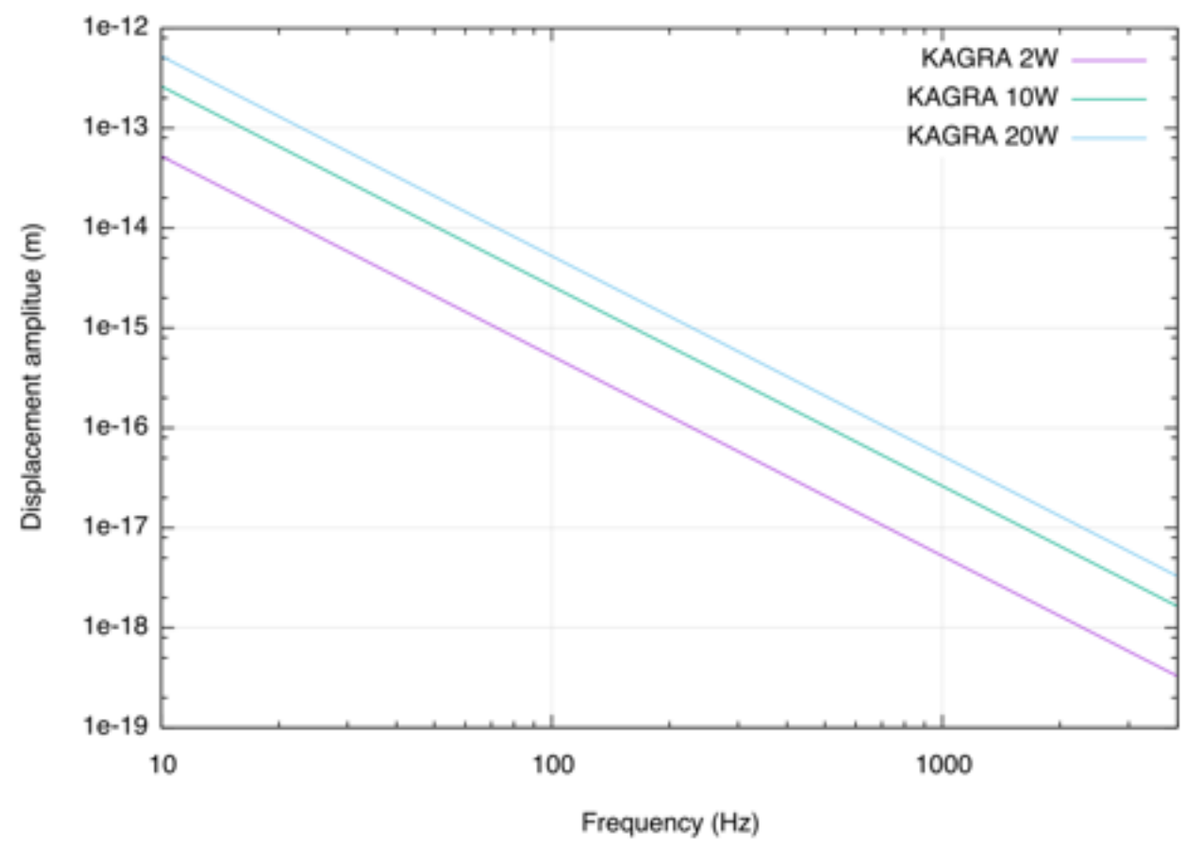
$$\delta x \sim \frac{2P(f)}{c} s(f) \left(1 + \frac{M}{I} \vec{a} \cdot \vec{b}\right) cos\theta \tag{1}$$

ここで、 c は光速で、$\vec{a} \cdot \vec{b} = 0$ と仮定する。すべての laser power を一つの周波数に押し込んだときに動かせる量は、

$$\delta x(\omega) = \frac{2P_{\text{power}}}{cM} \frac{cos\theta}{\omega^2} \tag{2}$$

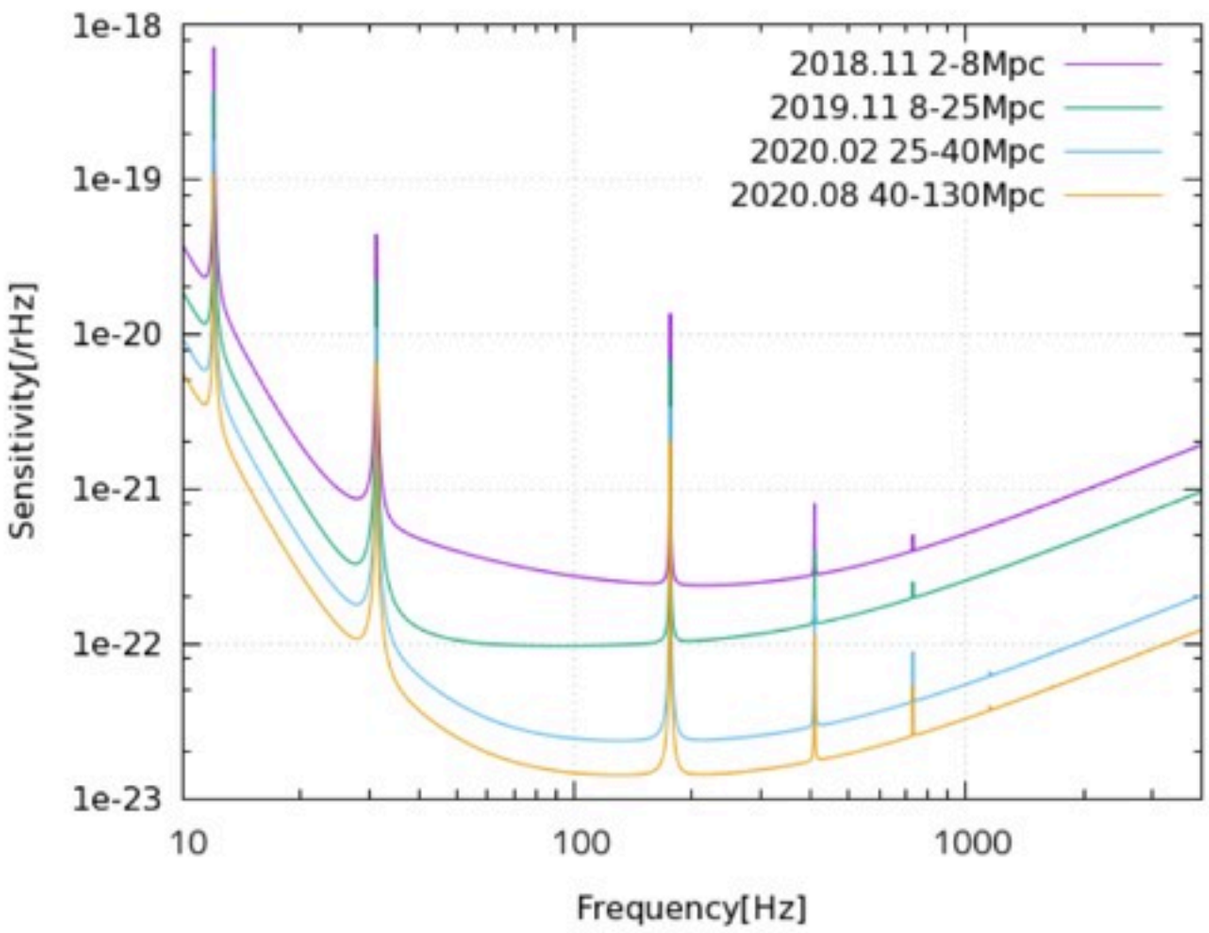
KAGRA の configuration を考え、以下の値を代入して

$$\begin{aligned} P_{\text{power}} &= 2, 10, 20 \text{ [W]} \\ c &= 3.0 \times 10^8 \text{ [m/s]} \\ M &= 22.8 \text{ [kg]} \\ \theta &= 0.72 \text{ [deg]} \end{aligned}$$



bKAGRA各phaseのsensitivity curve

宗宮さんよりdat fileを頂きました。(まだofficialではないのですが、おそらく次回F2F meetingで議論が行われると思いますのでこの解析では使用しております。)



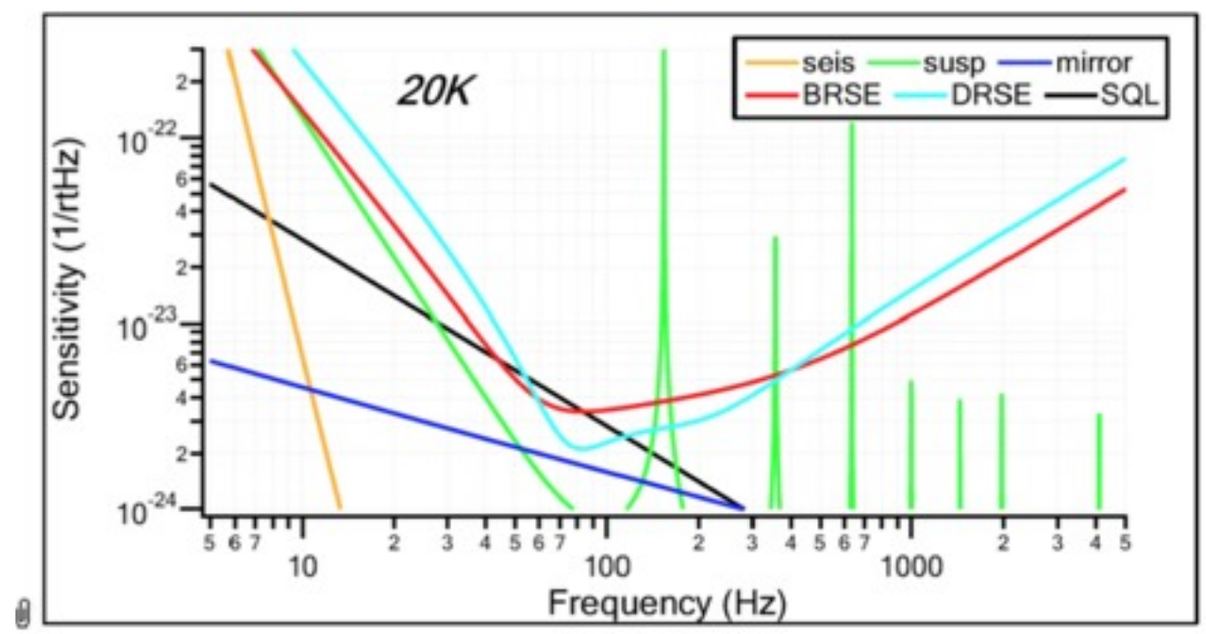


図 2　bKAGRA design sensitivity。

連続波解析

過程1：常に同じ大きさのsin波をinjectionすることを想定する。
(パルサーなどからの連続波の振幅は様々な影響により時々刻々と変化している。LIGOではLALソフトウェアを利用して連続波を入れているようだが、これはadvancedなinjectionなので本日の検証では定常振幅とする。
過程2：ノイズフロアは、sqrt(T[s])に比例して落ちていく。
(長時間積分により、連続波は同位相でinjectionし続けるのに対して、ノイズはランダム位相なので長時間積分することによって信号雑音比を稼ぐことができる。)

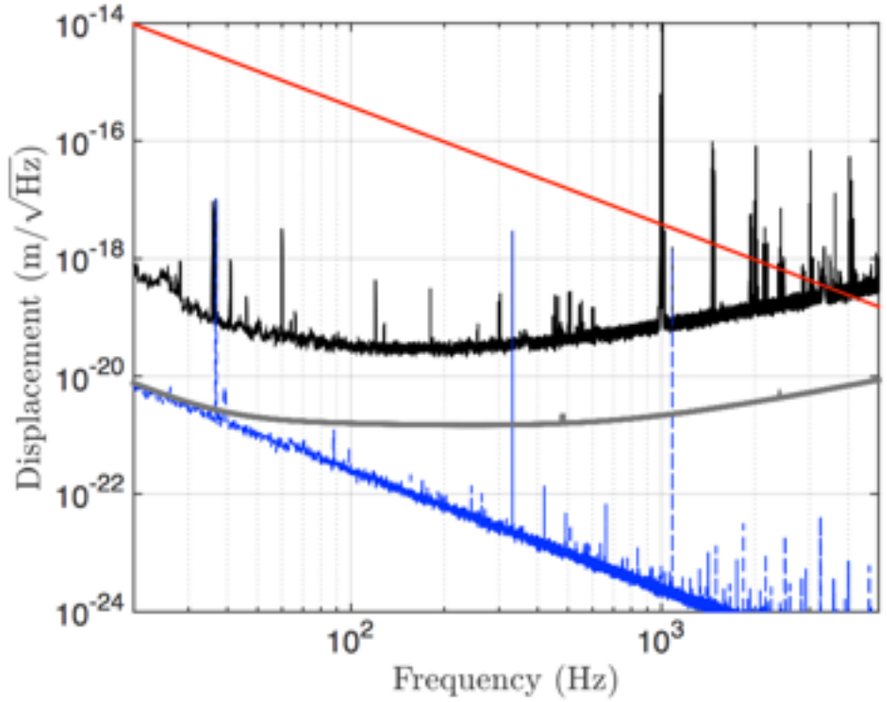


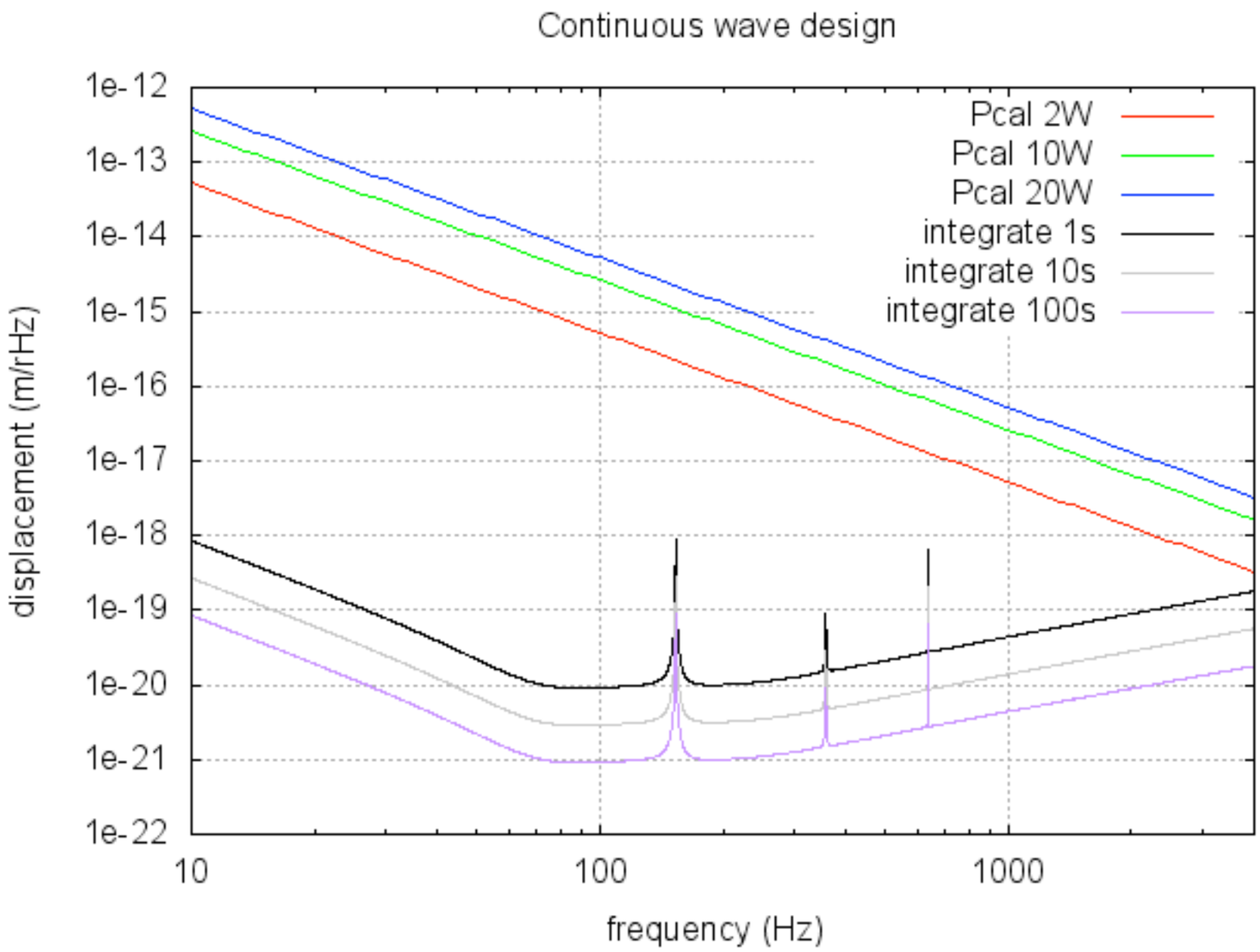
Figure 14. Maximum modulated displacement using all of the available Photon Calibrator power at one frequency (red). Pcal-induced displacements in Sept. 2015 (blue) along with the Sept. 2015 sensitivity noise floor (black) with a 10 second integration time. The gray curve is the maximum allowed unintended displacement noise, one tenth of the design sensitivity noise floor.

The Advanced LIGO Photon Calibrator
arXiv:1608.05055
P1500249

10秒積分での[m/rHz]比較。grayはdesign sensitivity、青はpcal でexcitationされるノイズsensitivityによって強度の調整が必要(らしい)。

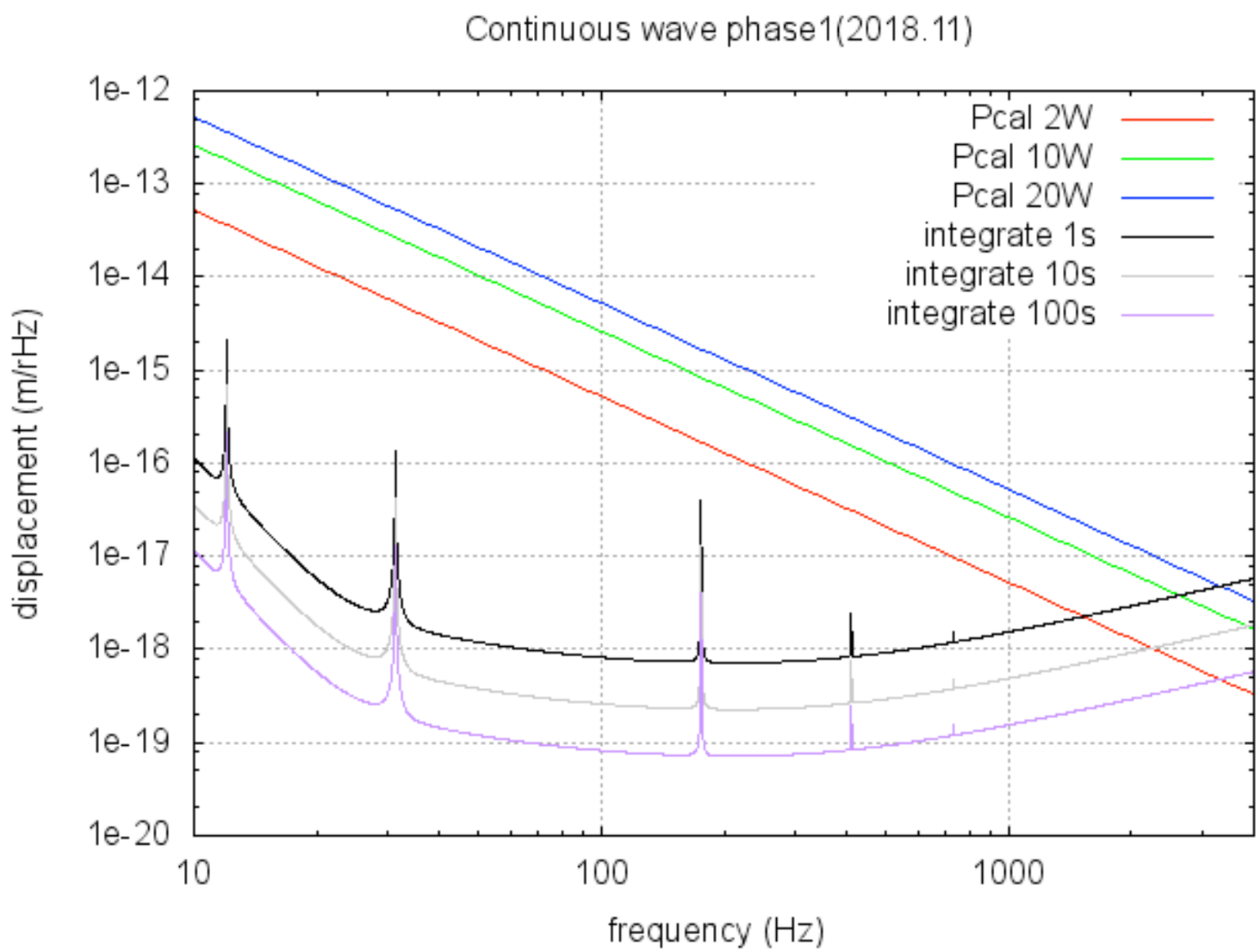
この図のbKAGRA versionを作成していく。

解析結果



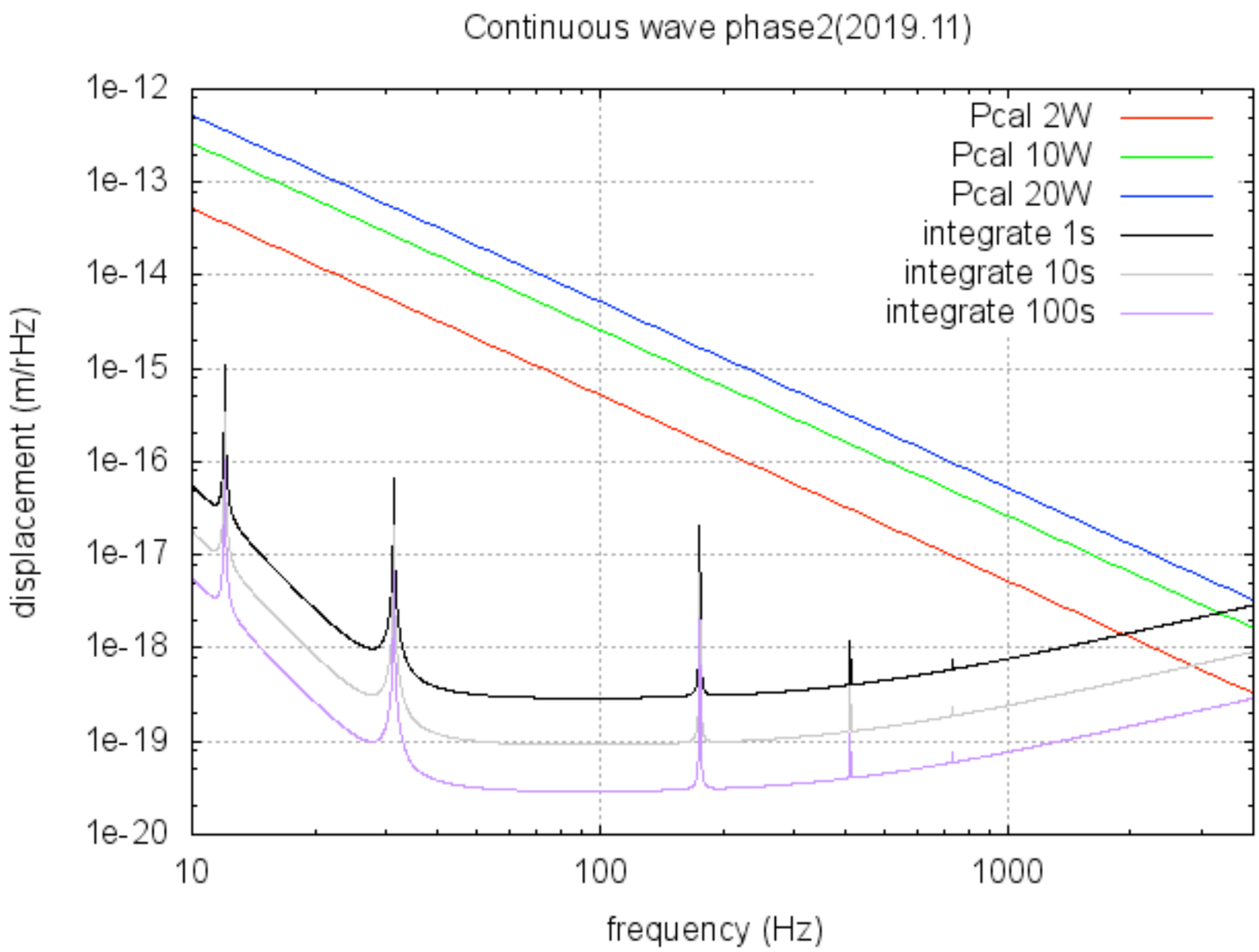
Design sensitivityの場合は、結構な高周波まで信号を入れても優位に見ることができる。(LIGOと比べて、pcal性能が2->10W、鏡が軽い、レーザーの垂直入射の影響大)

解析結果

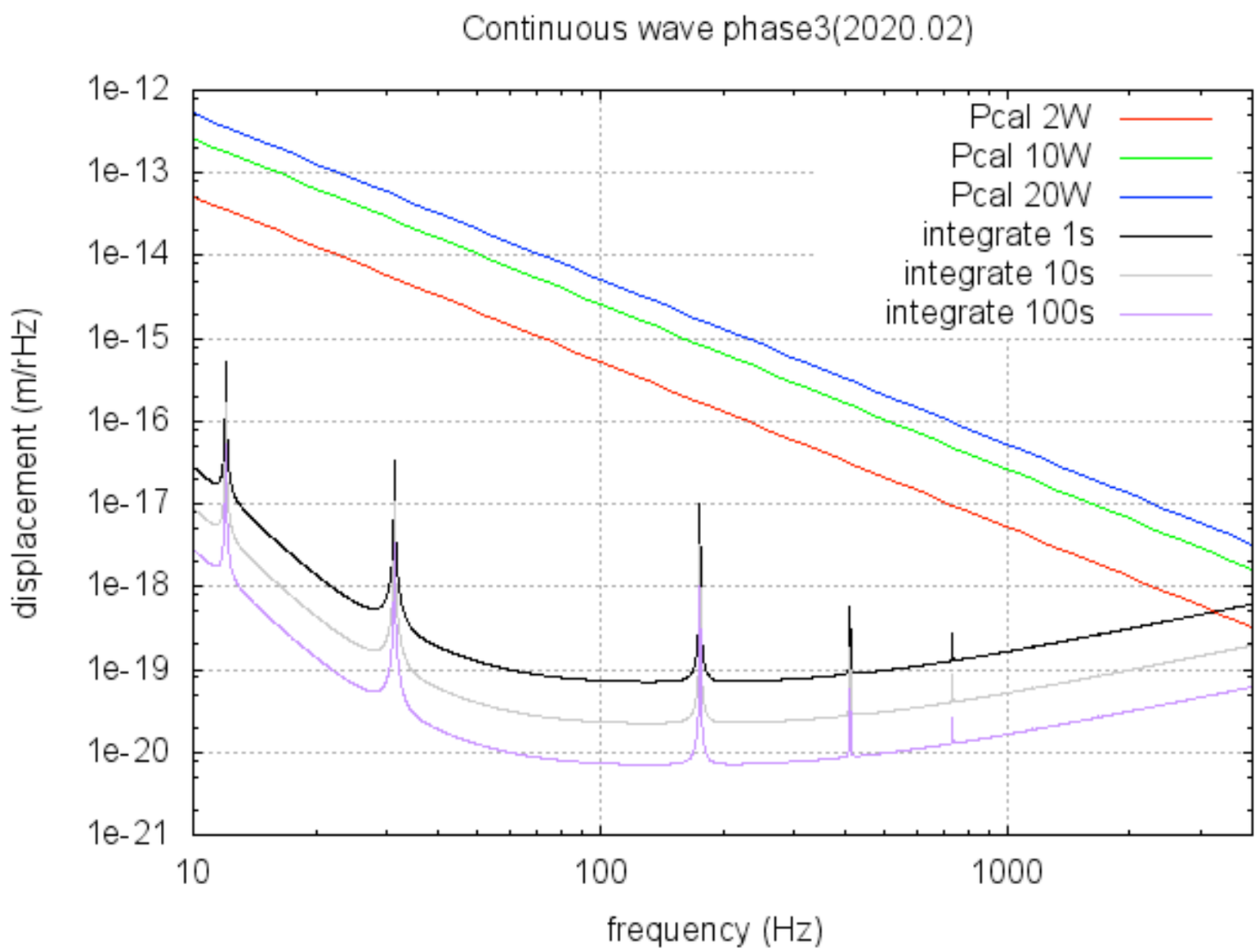


Continuousの場合は、~1kHzまでなら十分観測可能な信号をphase1(感度はO1の20倍くらい悪いが、Pcalのdisplacementが~10倍くらいいいのので同等程度の感度が見込まれる。)

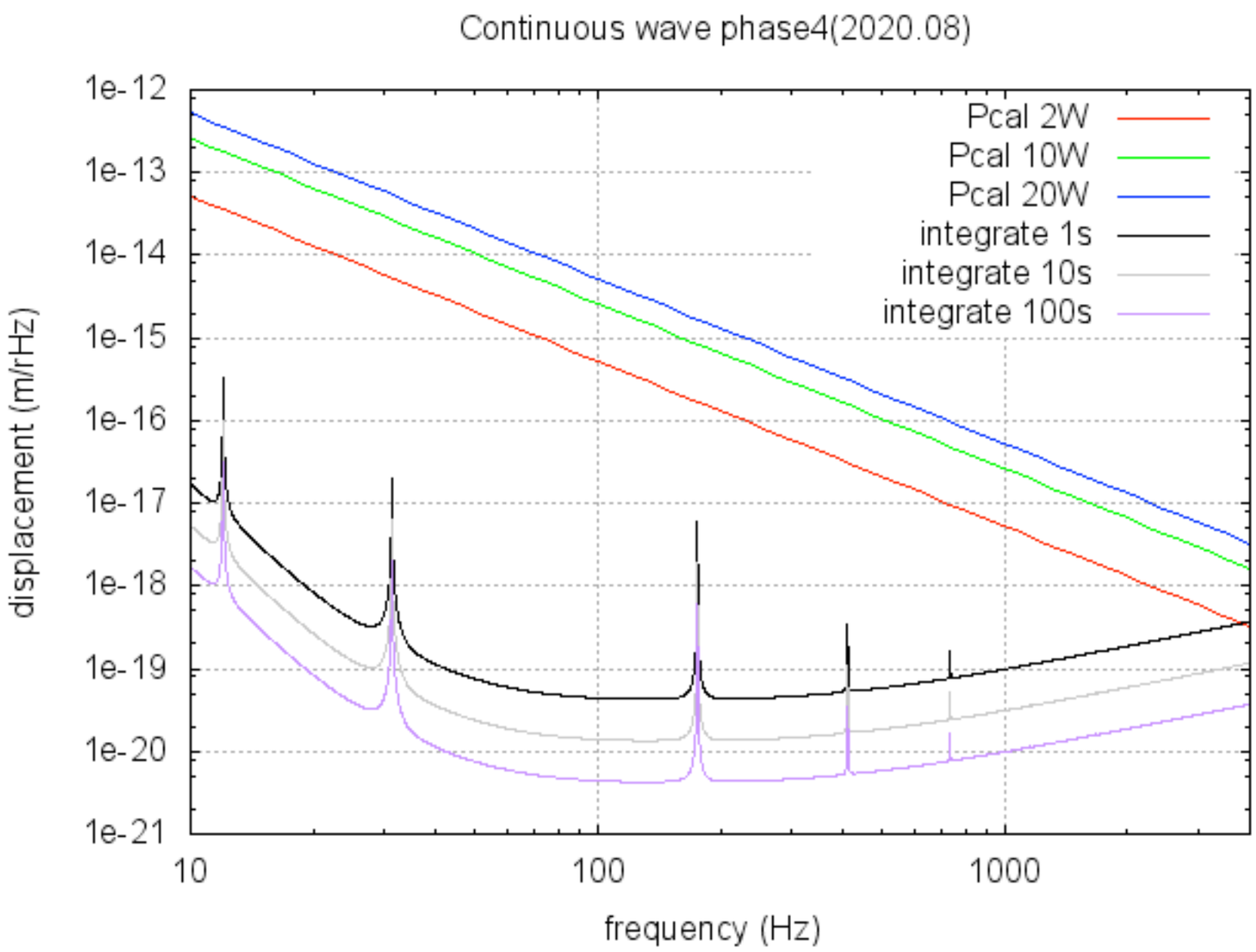
解析結果


Continuous wave phase2(2019.11)
Pcal 2W
Pcal 10W
Pcal 20W
integrate 1s
integrate 10s
integrate 100s
displacement (m/rHz)
1e-12
1e-13
1e-14
1e-15
1e-16
1e-17
1e-18
1e-19
1e-20
10
100
1000
frequency (Hz)

解析結果

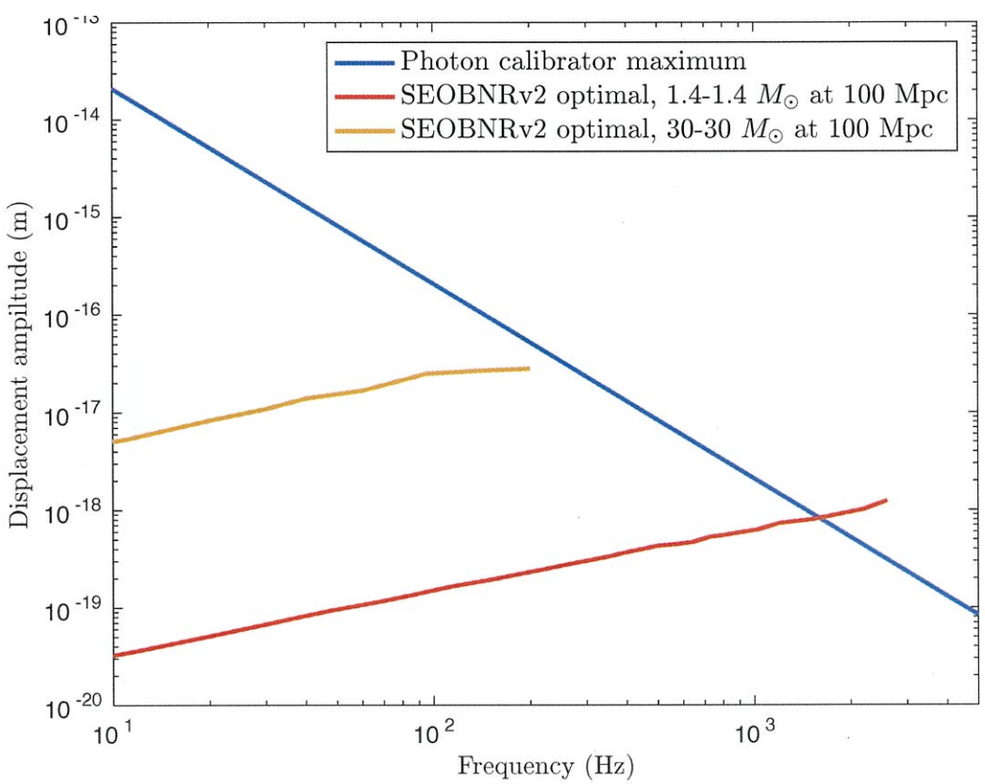

Continuous wave phase3(2020.02)
Pcal 2W
Pcal 10W
Pcal 20W
integrate 1s
integrate 10s
integrate 100s
displacement (m/rHz)
1e-12
1e-13
1e-14
1e-15
1e-16
1e-17
1e-18
1e-19
1e-20
1e-21
10
100
1000
frequency (Hz)

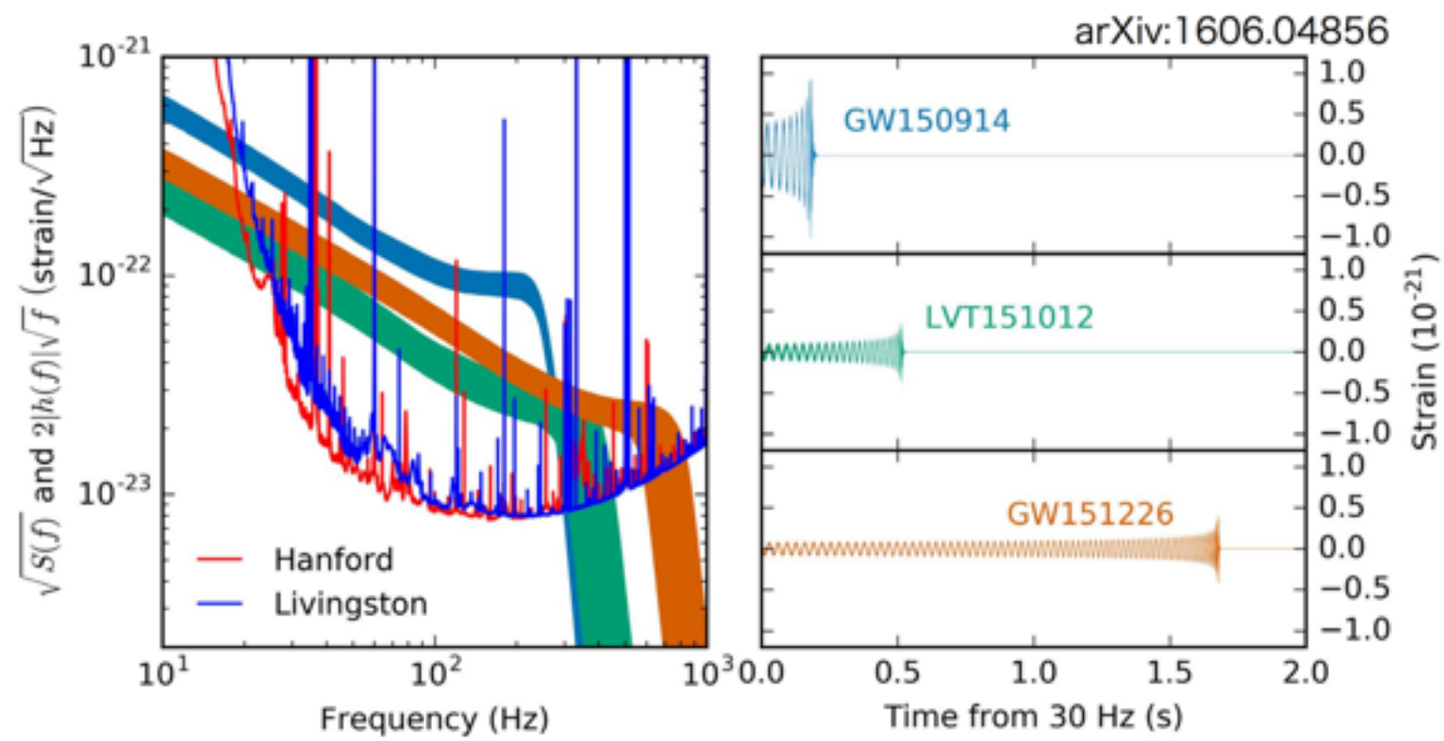
解析結果


Continuous wave phase4(2020.08)
Pcal 2W
Pcal 10W
Pcal 20W
integrate 1s
integrate 10s
integrate 100s
displacement (m/rHz)
1e-12
1e-13
1e-14
1e-15
1e-16
1e-17
1e-18
1e-19
1e-20
1e-21
10
100
1000
frequency (Hz)

CBC解析

過程1：1PN neutonian近似(ISCOまで)
将来的にはTaylorやEffective One Bodyなどで出した波形に対して行いたい。今日は、まだmaggioreのGravitational Wavesの4章の式を参考にしている。
過程2：matched filtering解析
displacement[m]の比較は、周波数vs振幅の式が導出できるため記述可能。
[m/rHz]でのsensitivityとの比較の場合、CBC解析ではmatched filteringを使用するのが一般的なのでSn(f)(sensitivity curve)と $2|\sqrt{f}\tilde{h}(f)|$ を比較するのが通例





T1400349

CBC解析

過程3：+偏極のみ垂直方向に入射する。

strainの時間変化

$$h_+(t) = \frac{4}{r}\left(\frac{GM_c}{c^2}\right)^{5/3}\left(\frac{\pi f_{gw}}{c}\right)^{2/3}\cos(2\pi f_{gw} t_{ret} + 2\phi)$$

の式から以下のstrainの周波数依存性が示せる。

$$A = \frac{1}{2^{1/3}}\left(\frac{R_c}{r}\right)\left(\frac{2\pi f_{gw} R_c}{c}\right)^{2/3} \qquad R_c \equiv \frac{2GM_c}{c^2} \qquad f_{\mathrm{ISCO}} = \frac{1}{6\sqrt{6}(2\pi)}\frac{c^3}{GM}$$

質量m1, m2と距離rを与えれば、displacement[m]上で比較できる。
ただし、1PNのインスパイラルのみでmerger、ringdownや軌道半径が小さいところでは信用できない。なので(勉強して)templateとして利用している波形のもので比較をするのが次の目標。h(t)をフーリエ変換すると、

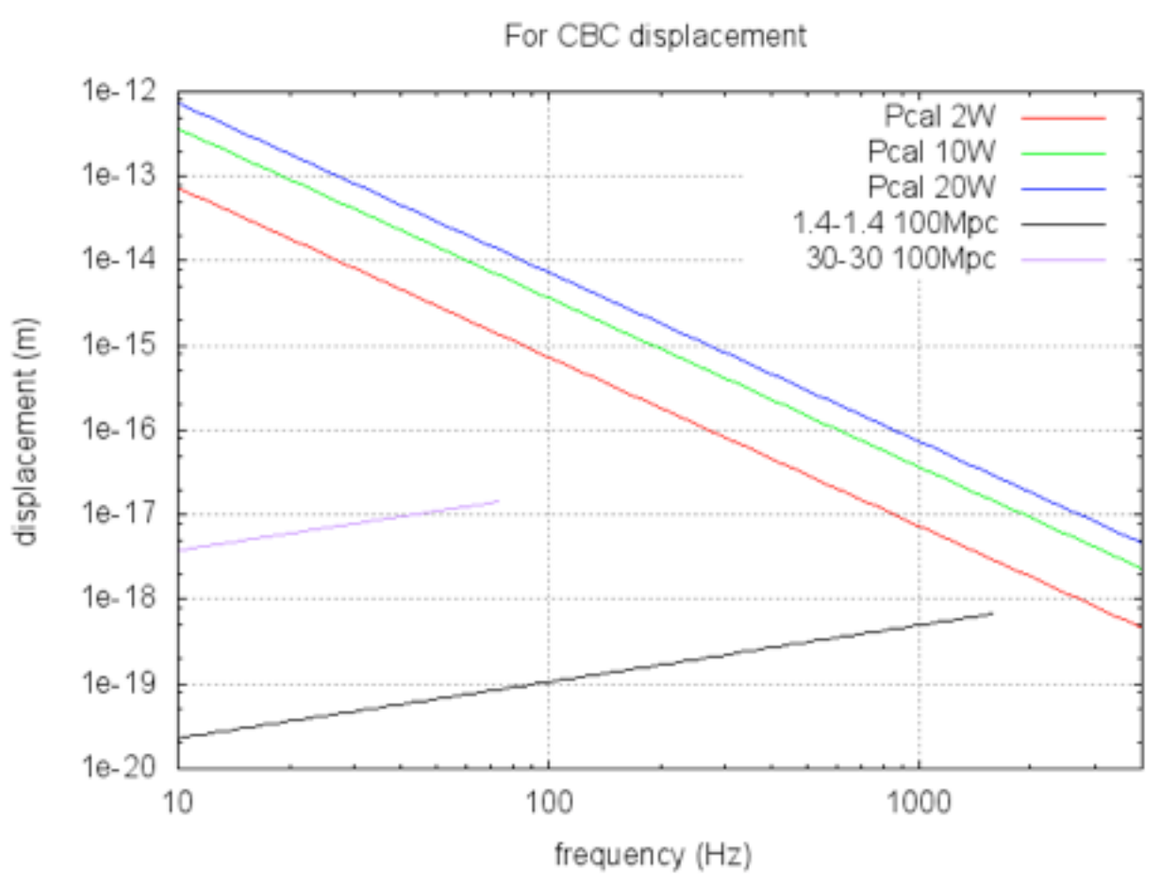
$$\tilde{h}_+(f) = A' e^{i\Psi_+(f)}\frac{c}{r}\left(\frac{GM_c}{c^3}\right)^{5/6}\frac{1}{f^{7/6}} \qquad A' = \frac{1}{\pi^{2/3}}\left(\frac{5}{24}\right)^{1/2}$$

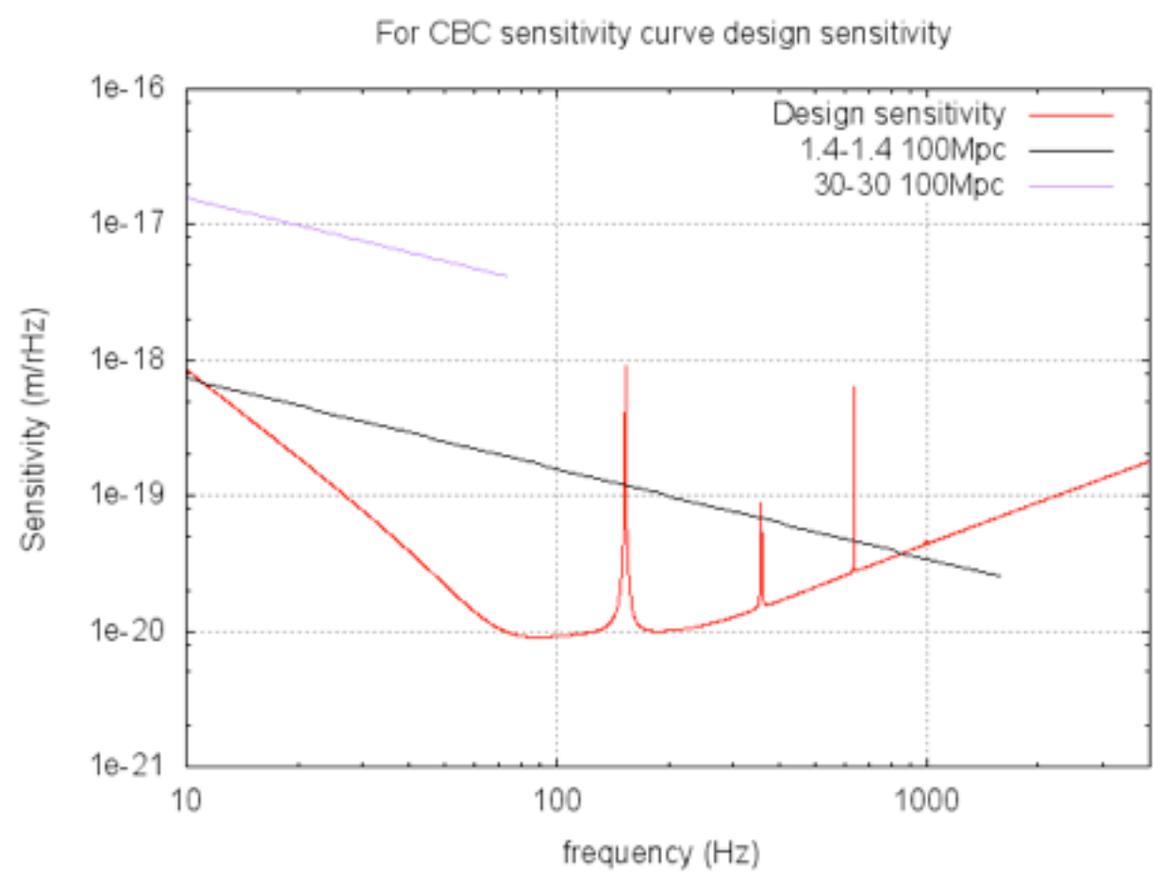
という結果から以下の式を得ることができる。

$$2|\sqrt{f}\tilde{h}(f)| = 2A'\frac{c}{r}\left(\frac{GM_c}{c^3}\right)f^{-2/3}$$

CBC解析

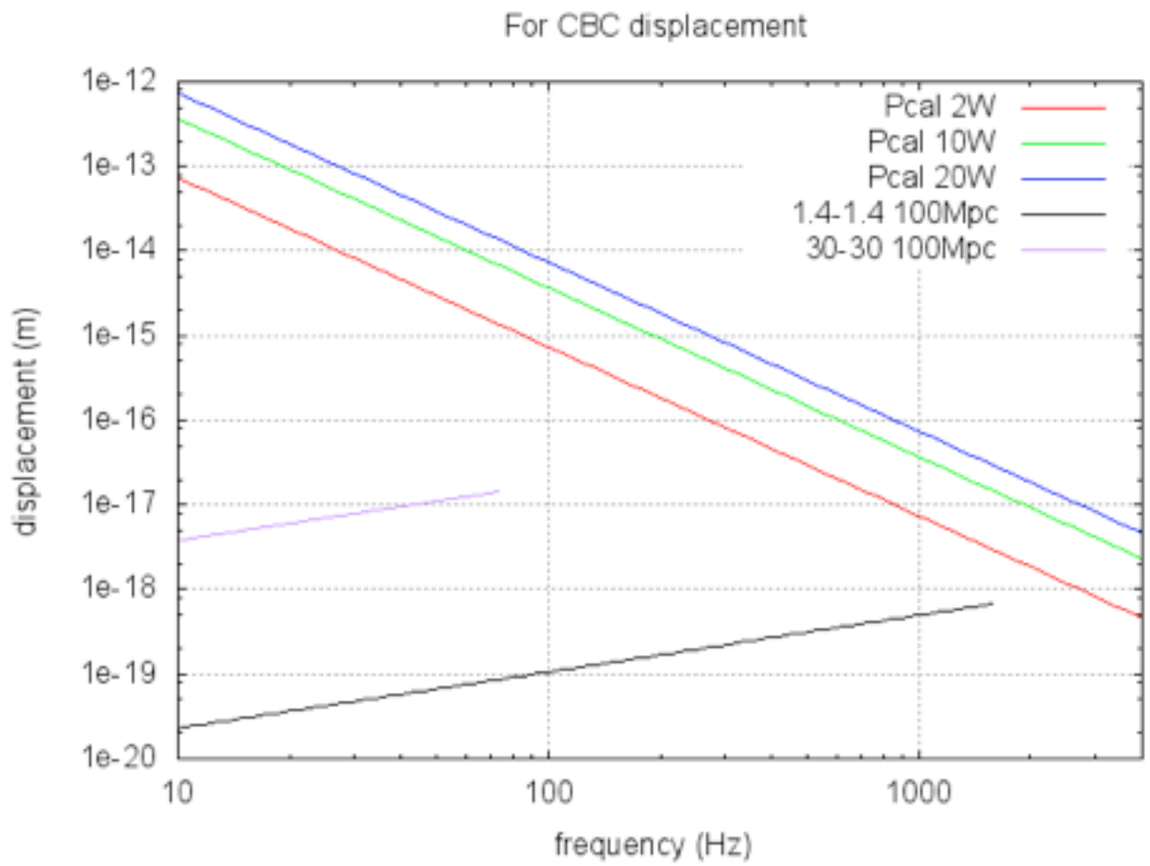
1.4-1.4M⊙のNS-NS binaryの場合と、30-30M⊙のBH-BHの場合(100Mpc)
赤方偏移は考慮してません。。
For design sensitivity

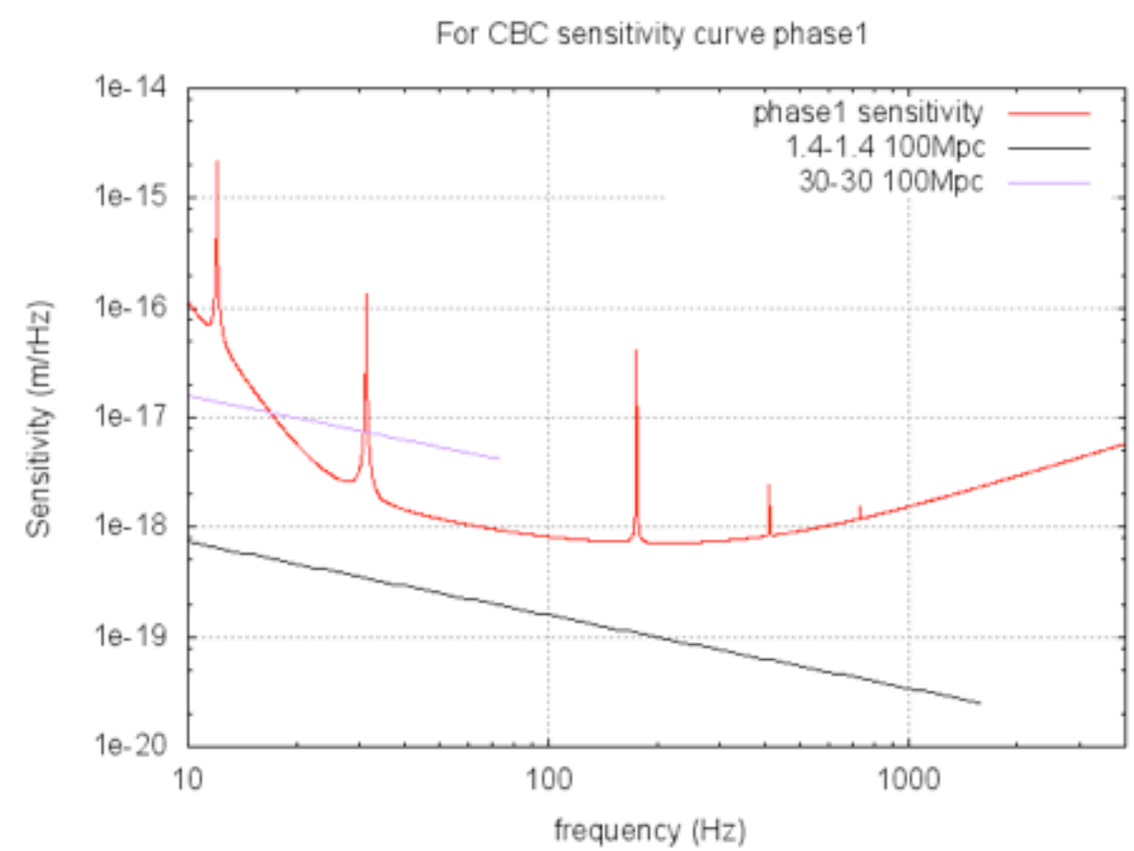




CBC解析

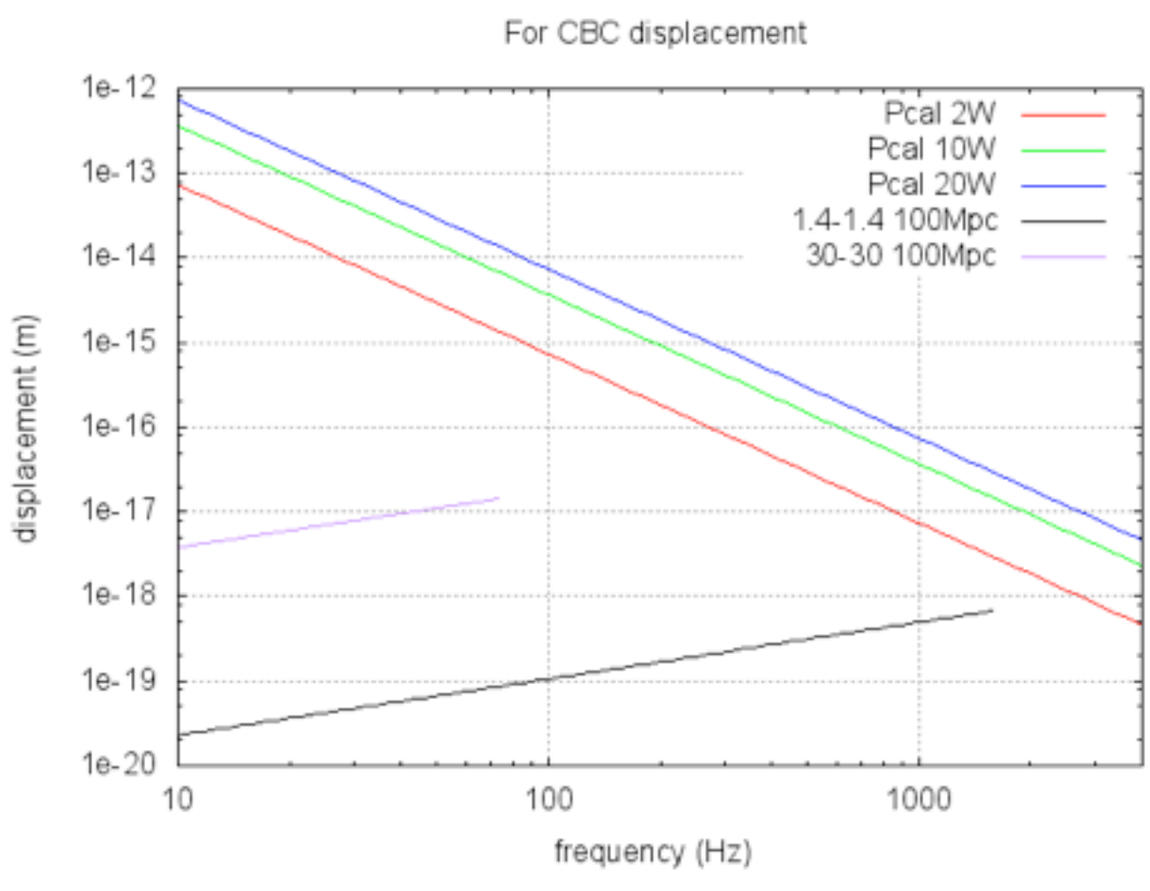
1.4-1.4M⊙のNS-NS binaryの場合と、30-30M⊙のBH-BHの場合(100Mpc)
赤方偏移は考慮してません。。
For phase1

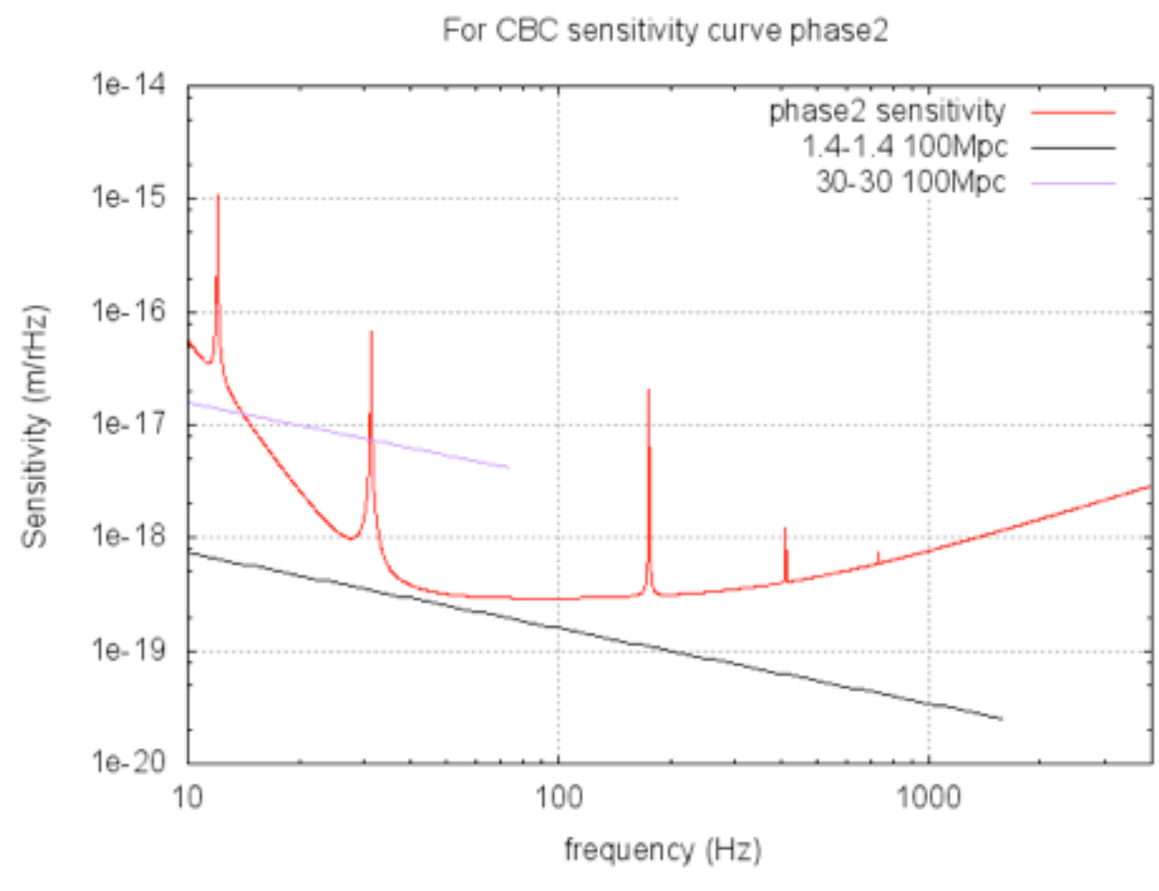




CBC解析

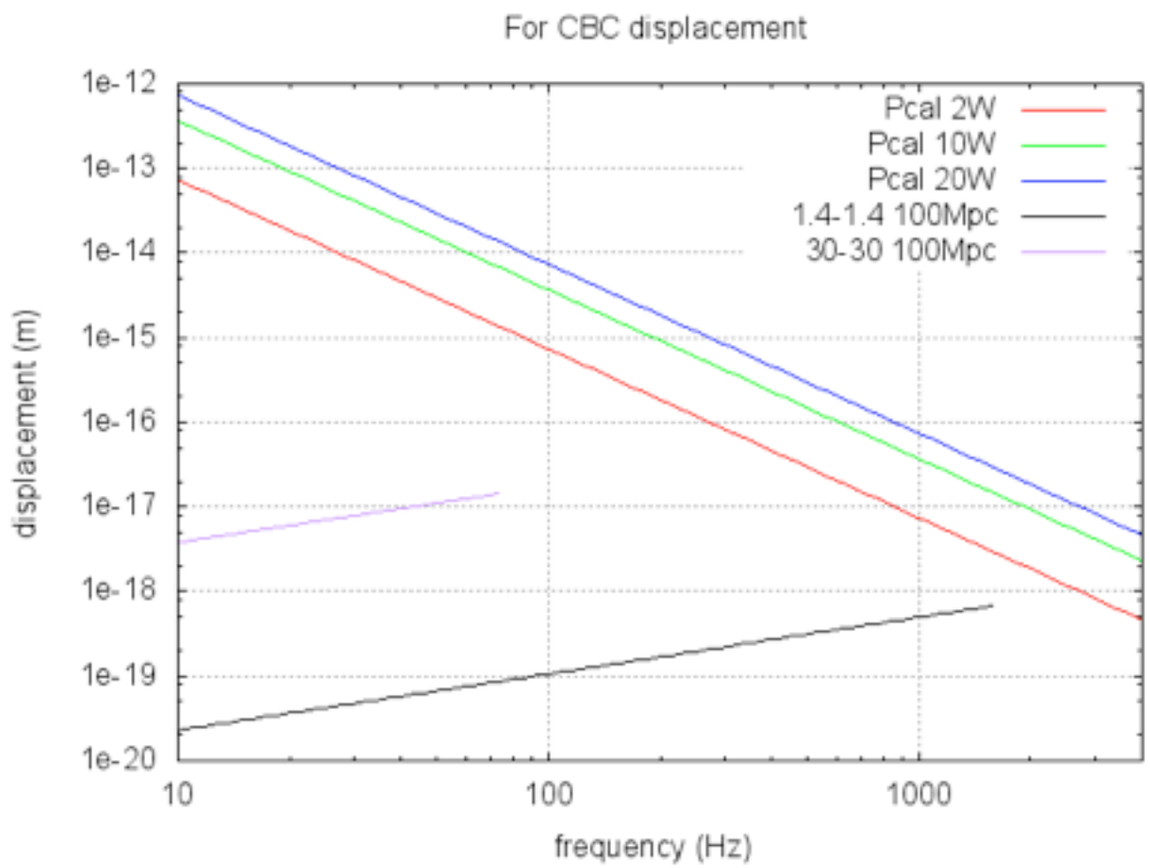
1.4-1.4M⊙のNS-NS binaryの場合と、30-30M⊙のBH-BHの場合(100Mpc)
赤方偏移は考慮してません。。
For design phase2

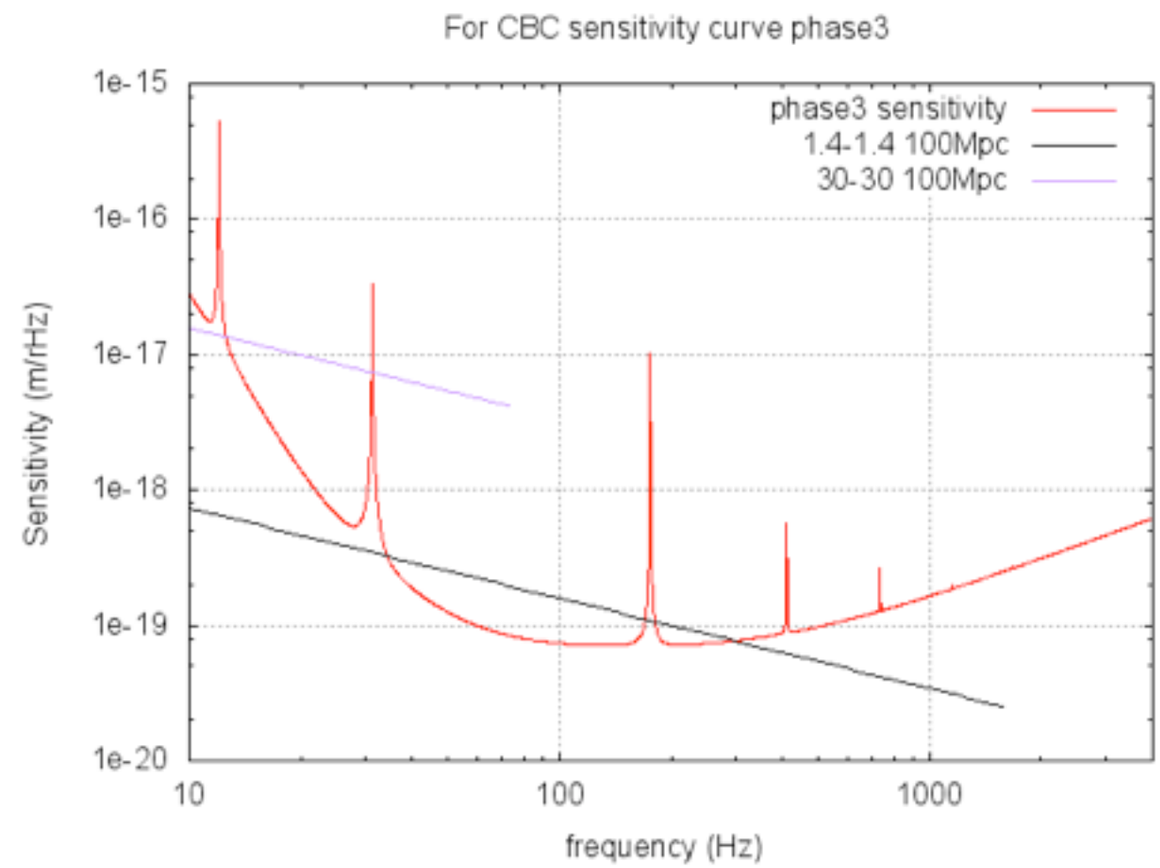




CBC解析

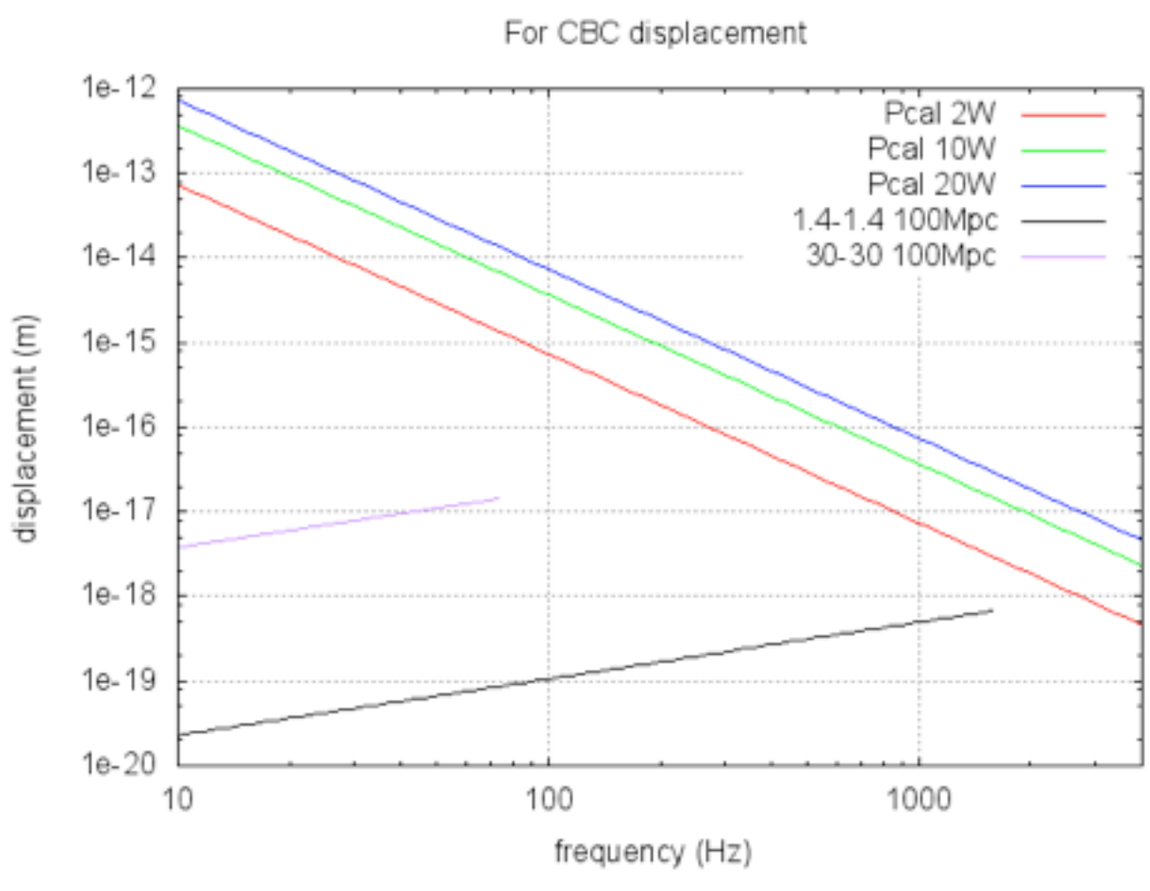
1.4-1.4M⊙のNS-NS binaryの場合と、30-30M⊙のBH-BHの場合(100Mpc)
赤方偏移は考慮してません。。
For design phase3

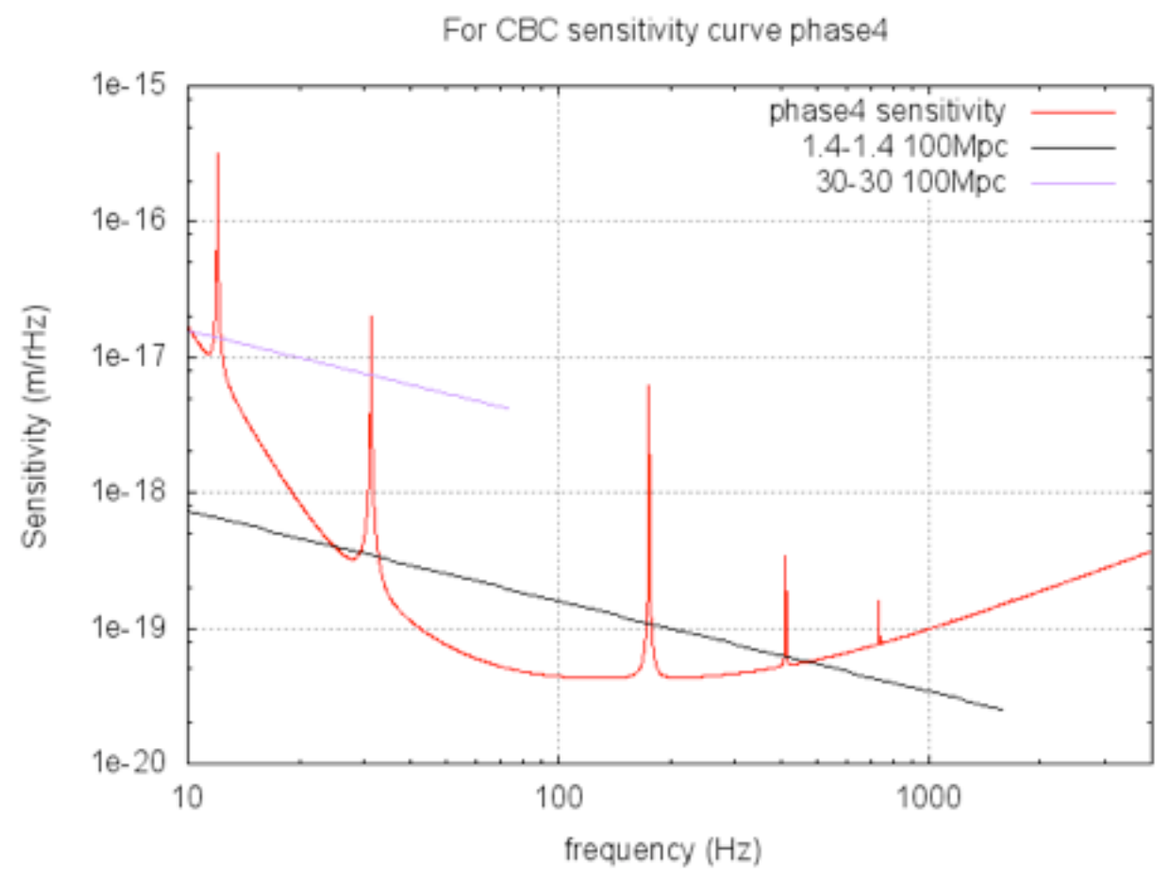




CBC解析

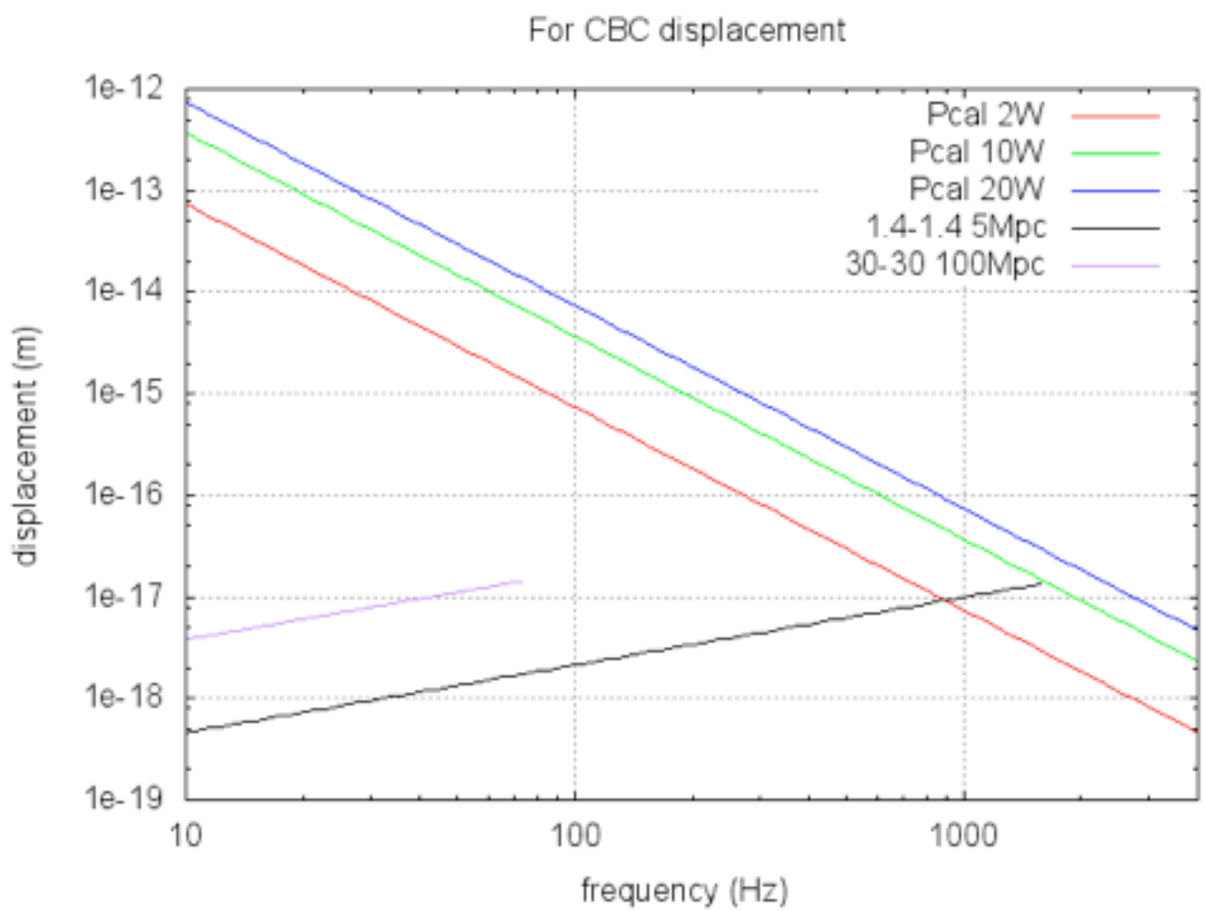
1.4-1.4M⊙のNS-NS binaryの場合と、30-30M⊙のBH-BHの場合(100Mpc)
赤方偏移は考慮してません。。
For design phase4

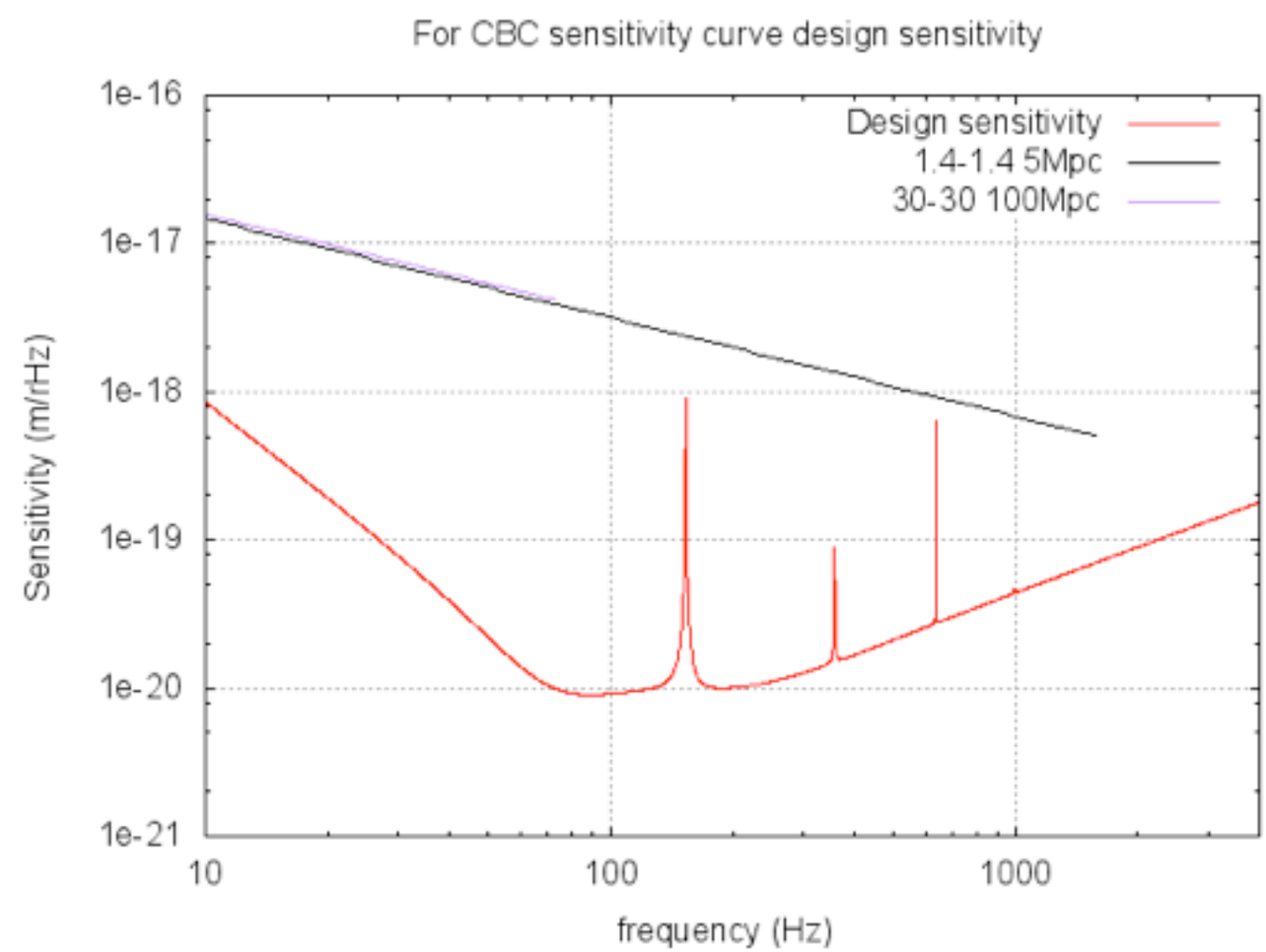




CBC解析

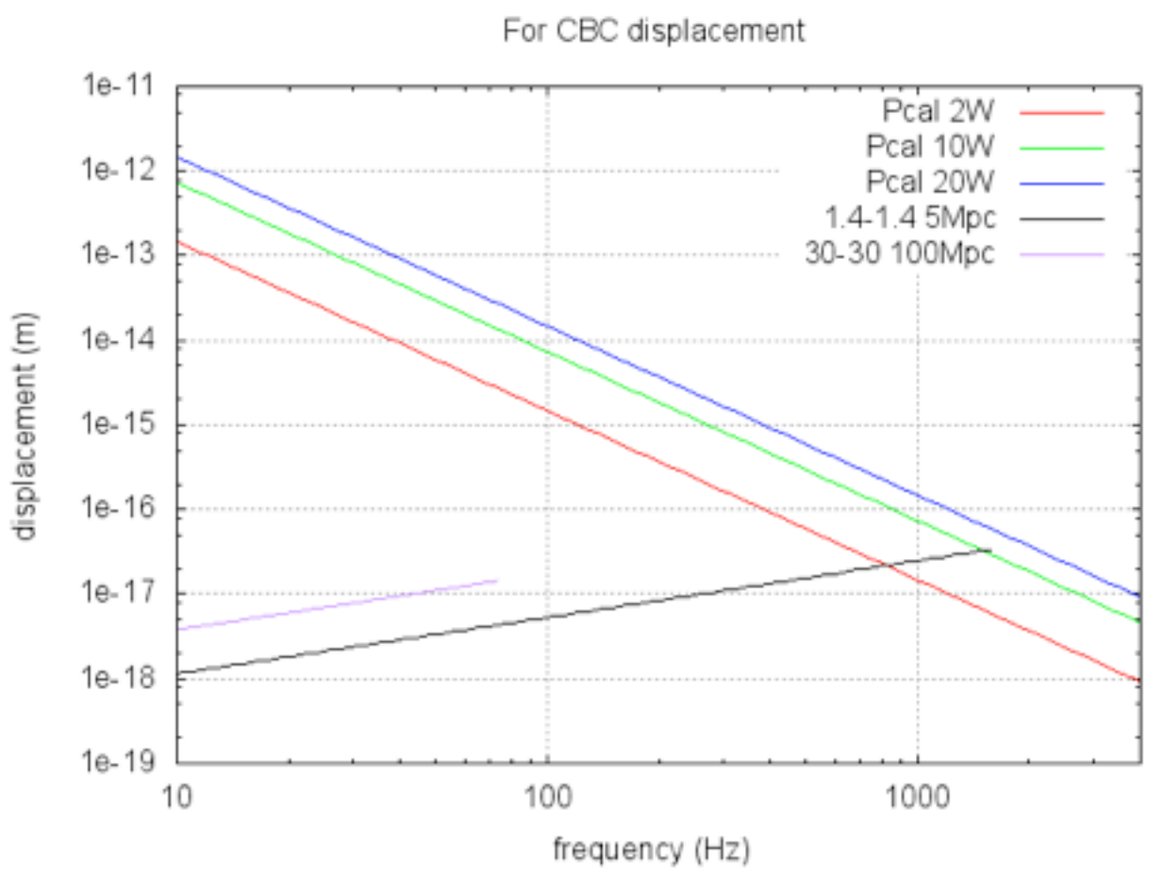
KAGRAのPcalの場合、5Mpcの1.4-1.4NS-NSを10Wでギリギリ入れることができる
design sensitivityでは全ての周波数の信号をノイズを上回って入射することができる。

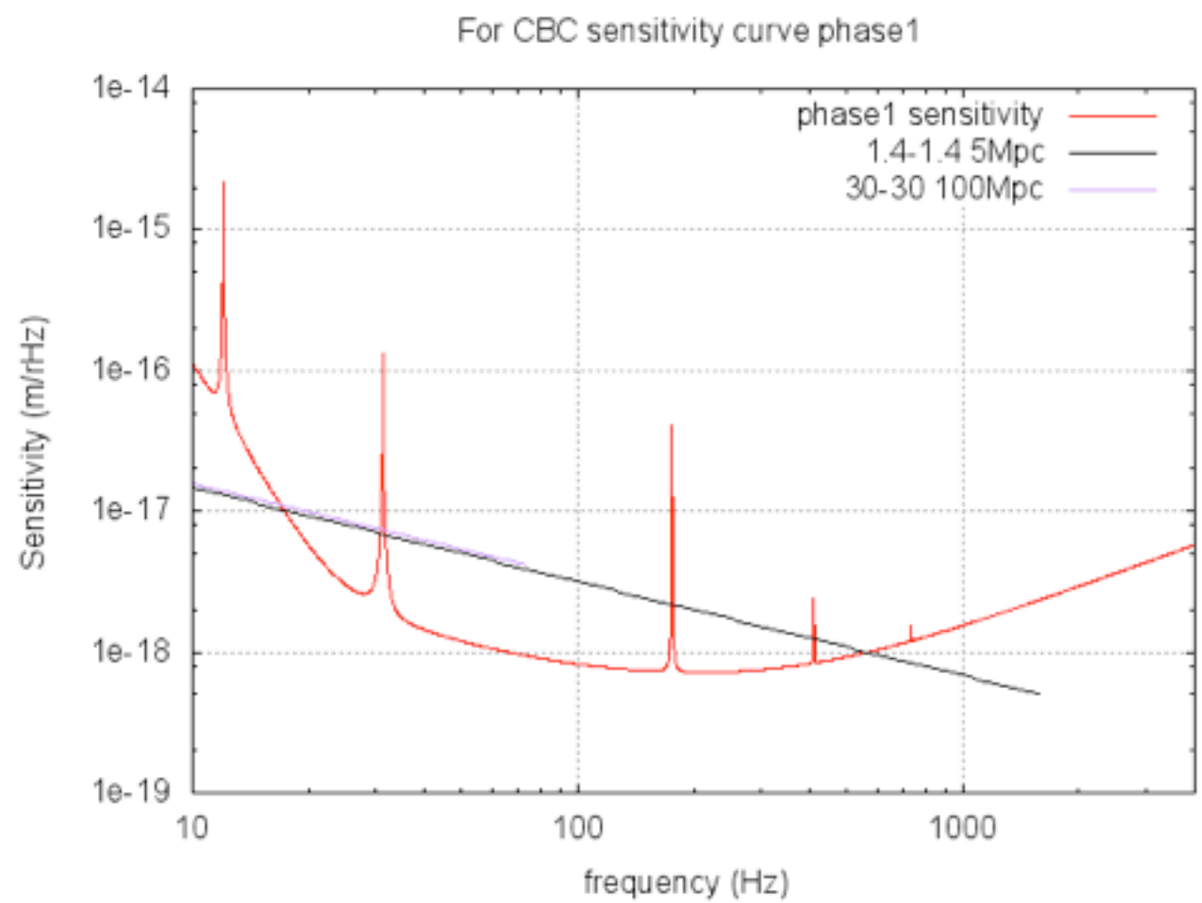




CBC解析

KAGRAのPcalの場合、5Mpcの1.4-1.4NS-NSを10Wでギリギリ入れることができる
phase1でも十分観測可能な信号を入射することが可能となる。



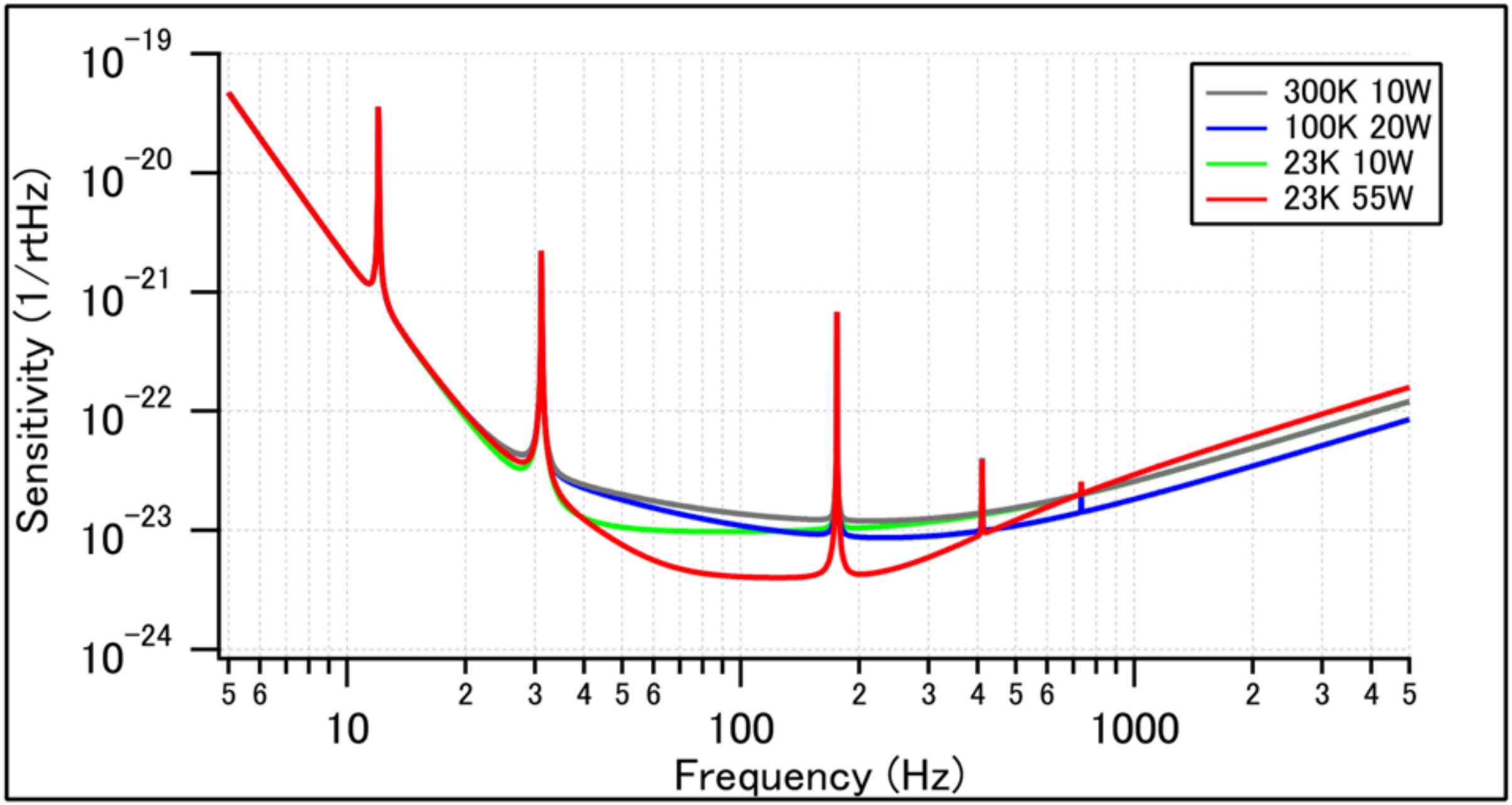


Summary and next step

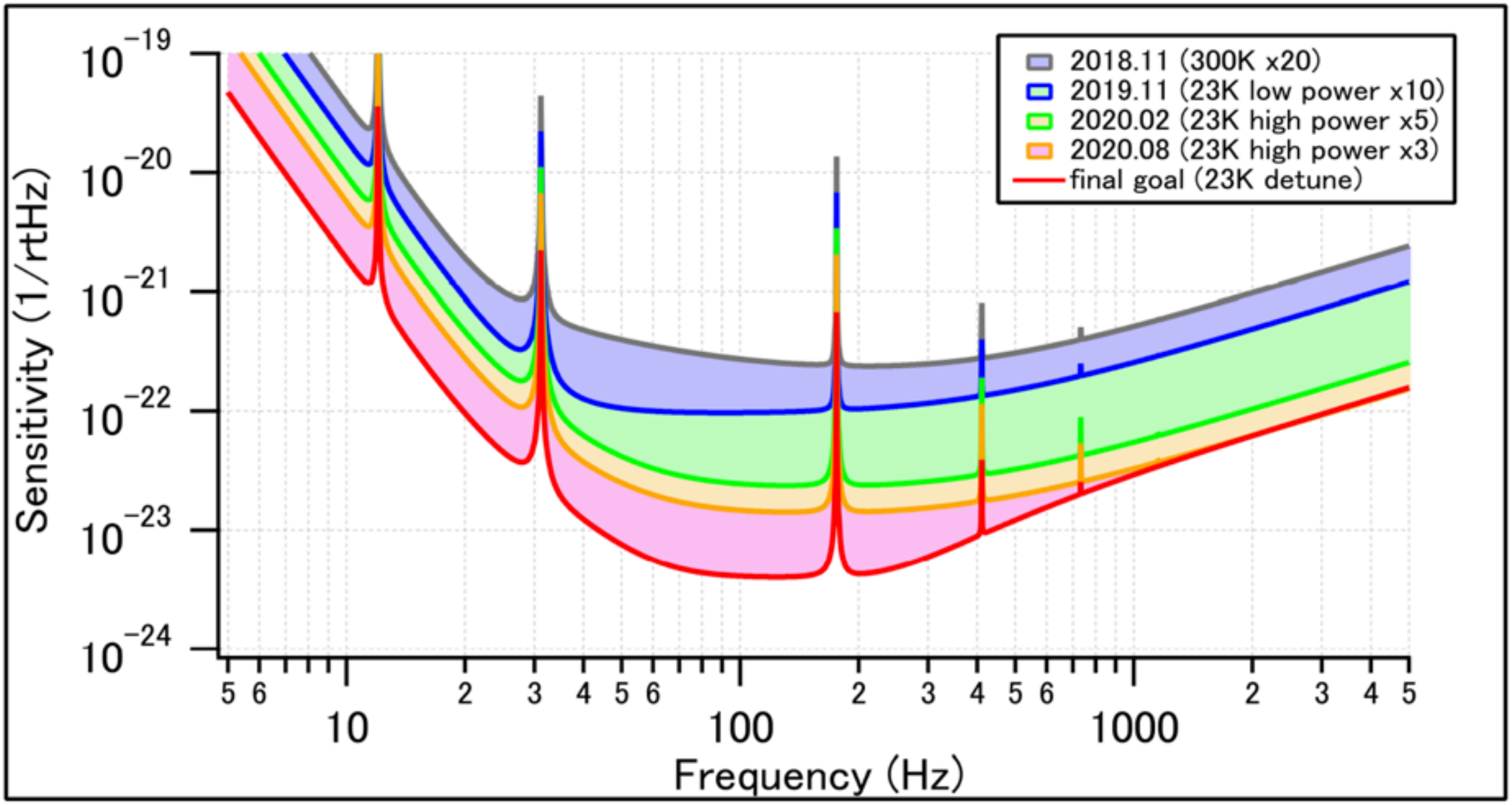
- 非常に簡単な物理仮定の下で生成した連続波・CBC信号に対してpcal displacementとの比較、各bKAGRA phaseにおけるsensitivity curveとの比較を行った。
  - 10Wレーザーを用いれば、5MpcのNS-NSを入射できるのでphase1の時からHardware injectionができる。
- 今後行わなくては行けないこと
  - バースト(超新星爆発)信号に関する議論
    - 超新星爆発の場合は、一番ネックとなるのがコアバウンス(高振幅・高周波)だと思われるのでそこを中心に入射可能かの議論を行う。
  - CBCの方はtemplateで用いられるような波形に対して行う。
  - 解析メモを早くまとめる。

Backups

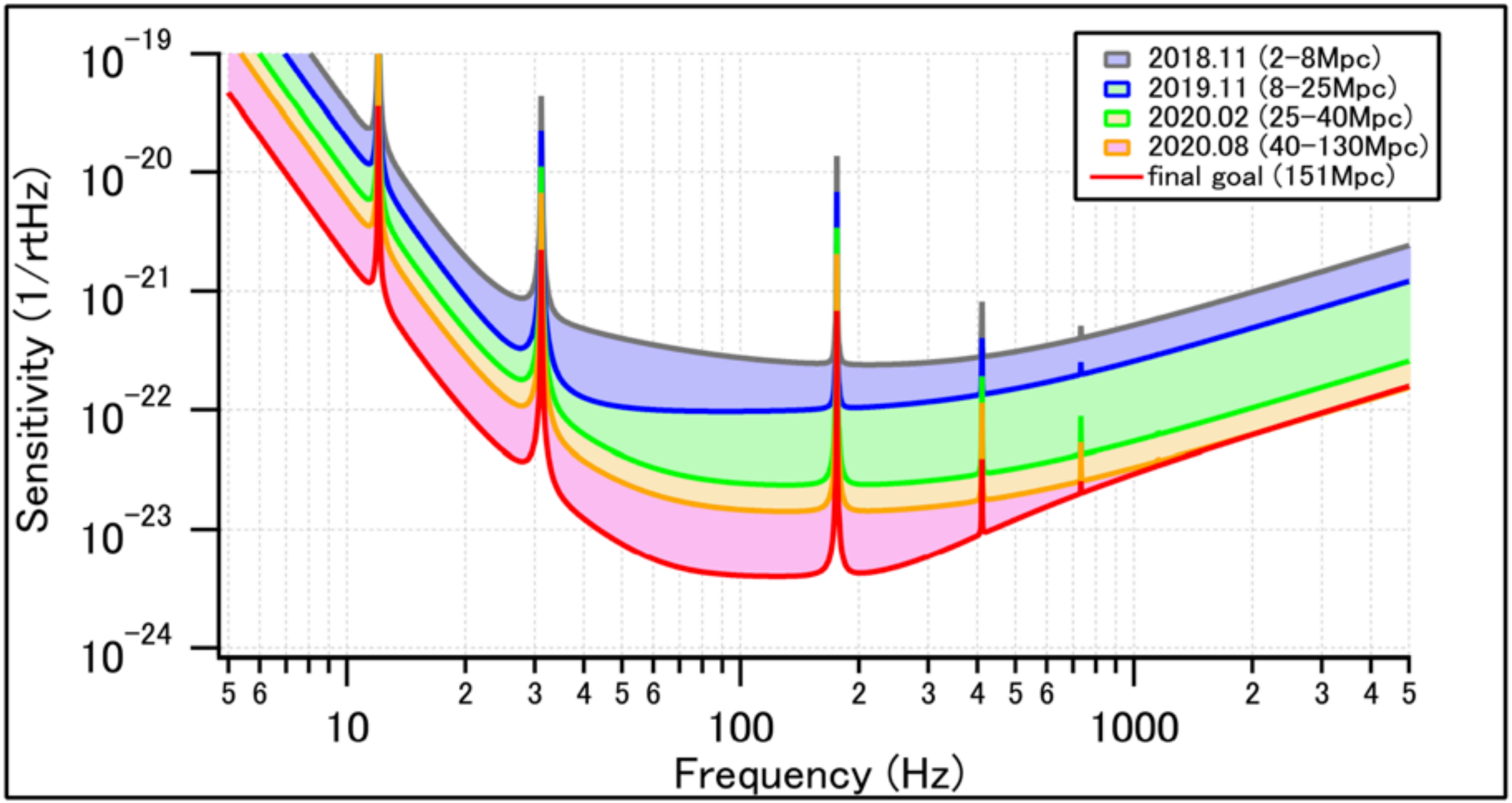
宗宮さん資料


300K 10W
100K 20W
23K 10W
23K 55W
Sensitivity (1/rtHz)
10^{-19}
10^{-20}
10^{-21}
10^{-22}
10^{-23}
10^{-24}
5 6 10 2 3 4 5 6 100 2 3 4 5 6 1000 2 3 4 5
Frequency (Hz)

宗宮さん資料


2018.11 (300K x20)
2019.11 (23K low power x10)
2020.02 (23K high power x5)
2020.08 (23K high power x3)
final goal (23K detune)
Sensitivity (1/rtHz)
10^-19
10^-20
10^-21
10^-22
10^-23
10^-24
5 6 10 2 3 4 5 6 100 2 3 4 5 6 1000 2 3 4 5
Frequency (Hz)

宗宮さん資料


2018.11 (2-8Mpc)
2019.11 (8-25Mpc)
2020.02 (25-40Mpc)
2020.08 (40-130Mpc)
final goal (151Mpc)
Sensitivity (1/rtHz)
10^-19
10^-20
10^-21
10^-22
10^-23
10^-24
5 6 10 2 3 4 5 6 100 2 3 4 5 6 1000 2 3 4 5
Frequency (Hz)