

# LCGT 各種パラメタ検討書

LCGT Optical Configuration Group

September 25, 2010

## 1 はじめに

この検討書は LCGT 最終形の細かいパラメタの洗い直しと許容値の決定を目的とする。Optical Configuration Group はこれを元に iLCGT のパラメタを決定する。

## 2 感度の目安

中性子連星に対する inspiral range を尺度とする。既定のデザイン (VRSE-D [1]) だと垂直入射、SN 比 8 として 291Mpc である<sup>1</sup>。この値は量子雑音、熱雑音、地面振動雑音のみから計算されたものである。もっと細かい要因を加味していくと感度が悪化することが予想されるが、どこまで許容できるだろうか。以下の数字が参考になるであろう。

- BRSE オペレーション時の aLIGO 目標感度は IR で 297Mpc となる [3]
- 2014 年末に予定されている S7 での aLIGO 目標感度は IR で 170Mpc となる<sup>2</sup>
- IR が 200Mpc の感度をもつ検出器が単独で 1 年間の観測をすると、90 % の確率で重力波を検出する [1]
- 全低温の VRSE-B で DC readout の homodyne 位相 (HD 位相) を 90 度としたときの IR は 242Mpc となる
- 半低温の VRSE-B で DC readout の homodyne 位相 (HD 位相) を 90 度としたときの IR は 221Mpc となる

## 3 雑音スペクトル

LCGT の干渉計パラメタの中には、暫定的に決められたものが多く含まれている。感度曲線の計算は 2009 年夏に行なわれ、帯域検討レポート [1] にその結果が掲載されているが、これ以降は干渉計デザインが一通り決まるまでよほどのことがない限り変更しない、という方針をとってきた。

本検討書では、新たに判明した事実や他項目との整合性を加味して、感度曲線をアップデートしていく。前節で登場した LCGT の IR はすでに帯域検討レポートに掲載されている数字とは

<sup>1</sup>以下、この方法で IR を計算する。LIGO の定義と比べて 0.59 倍大きくなる [2]。

<sup>2</sup>LIGO 定義で 100Mpc。

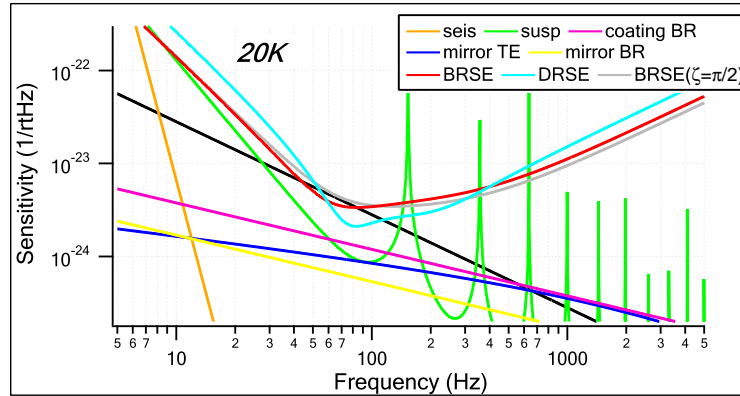


Figure 1: LCGT の基本的な雑音のスペクトル。量子雑音については VRSE-D、VRSE-B(HD 位相最適化)、VRSE-B(HD 位相固定) の 3 種類を示している。

異なる。これはビーム径の変更と熱弾性雑音の式のアップデートにより、熱雑音が下がったためである。それに伴い、detune 位相や HD 位相も新しい熱雑音に対して最適化されている。

図 1 に LCGT の感度を制限する雑音のスペクトルを示す。ここでは計算式については触れない。次節でこの雑音スペクトルを計算するのに用いられたパラメタに関して、その妥当性、整合性について検討する。なお、2010 年 8 月以降に変更した点は以下の通り。

#### 最近変更した項目

- ビーム径を 3cm から 3.5cm に修正
- コーティング熱雑音の計算で破損防止用のシリカキャップ半波長分を加味した
- 熱弾性雑音の周波数依存性を加味した

## 4 パラメタの考察

図 2 に各パラメタを要求値から変化させた場合の IR の増減を示す。緑の点線は全てのパラメタが要求値通りであった場合の IR である。以下、各々のパラメタについて考えていく。なお、簡単のため、detune 位相や DC readout 位相はデフォルト値に固定している。

### 4.1 鏡およびファイバーの機械損失

基材の Q 値は  $10^8$  を想定している。これは低温のサファイアであることと、LIGO で推定している常温シリカの Q 値が  $10^{10}$  以上であることを考えると、もっと高くなりそうところだが、これが実際に測定されたサファイアの Q 値である。基材熱雑音は膜の熱雑音の半分以下なので、Q 値が  $10^8$  より高くても感度はあまり変わらない。

膜に関しては、シリカ膜の機械損失を  $1.0 \times 10^{-4}$  (レイヤーあたり)、タンタラ膜の機械損失を  $4.0 \times 10^{-4}$  と見積もっている。これは LIGO の見積もりより倍近く悪いが、低温では膜の機械損失がやや上昇するという実験結果が出ており、この程度の値が妥当である。共に予定の倍になった場合、IR は 273Mpc に低下する。

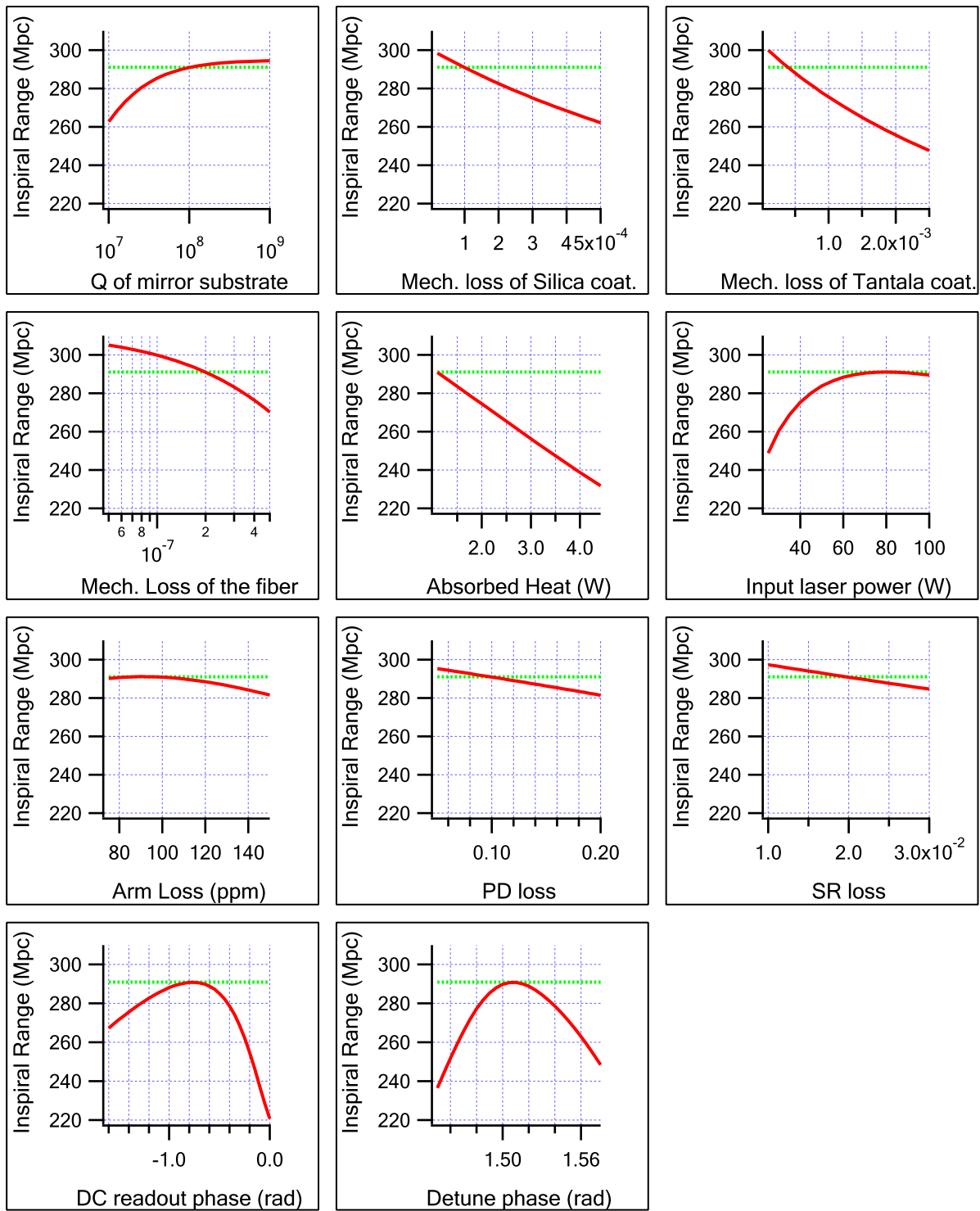


Figure 2: 干渉計の各パラメタについて、LCGTで予定している値からずれた場合の inspiral range の変化。

ファイバーの機械損失は  $2 \times 10^{-7}$  を想定している。これは dilution factor 込みでおよそ  $10^8$  になる。損失がこの倍になった場合、IR は 276Mpc に低下する。懸架系熱雑音については 4.5 節でもう少し詳しく扱う。

## 4.2 鏡の光学損失

光学損失に関しては、参考文献 [4] に従い、以下の 3 種類に分けて導入している。

- 腕のロス:1 往復あたり 100 ppm (散乱と回折で 45 ppm、ETM の透過が 10 ppm)
- Recycling Cavity (RC) のロス:リサイクリングゲイン込みで 2 % を想定
- 光検出器 (PD) の量子効率:90 % を想定、すなわち光学損失 10 % に相当する

鏡あたりのロス 45 ppm というのは厳しい要求である。このとき腕の反射率は 90.4 % であり、RC はほぼ critical coupling となっている。鏡あたりのロスが 70 ppm まで増えると PRC 内パワーは 825 W から 533 W に低下し、IR は 281Mpc になる。

RC のロスには PRM もしくは SRM のロス、BS のロス、ITM 基材のロス、ITM の AR 面ロス、コントラストデフェクトが含まれる。リサイクリングゲインはおよそ 10 ~ 11 だから、RC での 1 往復あたりおよそ 2000 ppm のロスを見込んでいる。

PD の量子効率は、SRM から PD までの様々なロスも含む。制御用に光をピックアップする場合などはそれも含む。

## 4.3 光源

光源出力の低下は上記ロスとほぼ同様に量子雑音の悪化を招き、感度を下げる。ここでは detune 位相と DC readout 位相を固定して計算しているの、予定されている 80 W 入射を超えるパワーを用意しても感度はあまり上がらない。また、位相の最適化で出力低下の影響はもう少し抑えることができると考えられる (ロスについても同様)。

図 2 では 80 W 以上の出力も表示されているが、予定以上のパワーの導入は鏡の冷却を困難にする可能性を伴う。

## 4.4 鏡の熱吸収

サファイア基材の吸収損失は片道あたり 20 ppm/cm と想定している。ITM 基材での熱吸収は

$$\frac{825(\text{W})}{2} \times 20 \text{ ppm} \times 15 \text{ cm} \times 2 \simeq 0.25 \text{ W}$$

となる。反射膜の吸収は 0.5 ppm と想定しており、熱吸収は

$$\frac{825(\text{W})}{2} \times 1000 \times 0.5 \text{ ppm} \simeq 0.20 \text{ W}$$

となる。合計すると ITM で 0.45 W、ETM で 0.20 W の熱吸収が存在する。これに鏡の汚れなどが加わる。安全係数を含めて各鏡で 1 W の冷却ができるよう設定している。

熱吸収が 1 W を超え、2 W になったとすると、鏡の温度は 23.7 K まで上昇する。熱雑音が悪化し、IR は 274 Mpc に低下する。比熱などのパラメタの温度依存性は考慮している。サスペンションの温度 (平均温度で計算している) は不変としている。

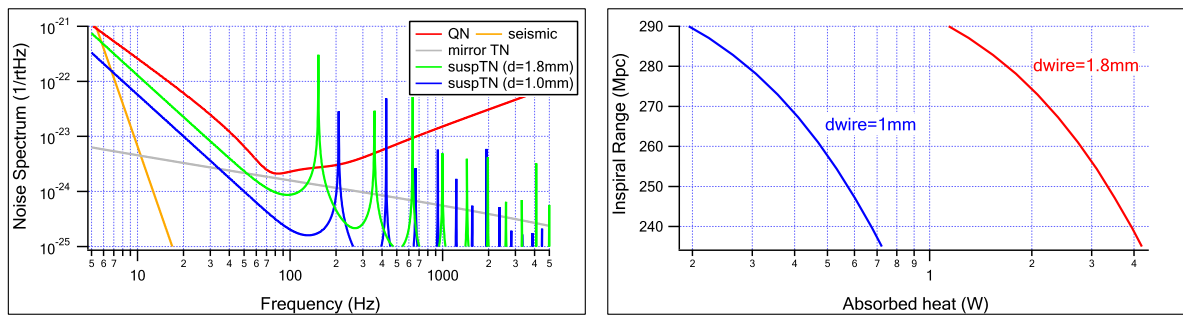


Figure 3: (左) ファイバーの径を 1.0 mm および 1.8 mm にした場合の懸架系熱雑音スペクトルの比較。(右) 熱吸収と IR の関係。

#### 4.5 懸架系熱雑音

ファイバー径が 1.8 mm のとき、バイオリン基本モードの周波数は 153 Hz となり、観測帯域の中央部分にピークが立つことになる。バイオリンモード周波数付近には非線形雑音が現れるとの懸念がある。それを避けるためにはファイバーを細くすればよいが、鏡を冷却するためにはファイバーは太くなくてはならず、細くすると熱吸収の上昇と同様に鏡の温度が上がり、IR が低下する危険が増す。図 3 にファイバー径を 1.0 mm にした場合の懸架系熱雑音スペクトルと、鏡の熱吸収と IR の関係を表したものを示す。ファイバー径を 1 mm にして、現在推定されている 0.45 W の熱吸収があったとすると、鏡の温度が上昇し、IR が 263 Mpc まで低下するが、非線形雑音の脅威は抑えられる。次節で非線形雑音について扱うが、そのリスクが高い場合はファイバー径を細くすることを検討するべきであろう。

ところで、現在の懸架系熱雑音の計算には、ファイバーの縦振動成分と、上段振り子の熱雑音の影響が含まれていない。山元さんの計算だと、縦振動の影響で IR が 4 % ほど悪化すること。上段の計算はまだ進んでいない。この部分は至急、どうにかしなければならない。

#### 4.6 非線形雑音

麻生君が検討中です。

#### 4.7 制御系

制御系の問題に関しては ISC で詳細を検討していく予定。とりあえず感度に関わる大きな問題を列挙しておく。

- AM 生成器雑音および MZ 雑音 周波数雑音
- OMC-REFL のジャンク光の量 MICH のループ雑音
- OMC の雑音
- 散乱光

この他に detuning により上下 SB がアンバランスになることで引き起こされるオフセットの問題と、腕のロス差による DC readout 位相の選択幅、という問題があるが、これらは第 5 節と第 6 節で扱う。

## 5 Detuning に関する考察

この節では干渉計制御に少しだけ踏み込む。帯域検討部会で話し合われた際の、detuning に関する制御の基本方針は以下の通り。

- VRSE-D をデフォルトの干渉計構成としつつ、重力波初検出後の VRSE-B への移行を視野に入れる
- 11.25 MHz の AM(DRMI 部分透過) と 45 MHz の PM(DRMI 完全反射) で制御を行なう
- SRM 制御信号のゼロ交差点は VRSE-B に合わせ、電気オフセットで VRSE-D に動作点を移動する
- DC readout の位相は VRSE-D の帯域が広がるように、また VRSE-B の IR が高くなるように選択される

Detuning を採用するという方針は、BRSE から開始する aLIGO の結論とは異なる。この違いは次の点から来ている。

- LCGT は熱雑音が低く、aLIGO と比べて detuning による利点が顕著である
- LCGT はフィネスが高く、3.6 度くらいの小さな detuning はループ雑音などを大きく悪化させることはない
- LCGT では DC readout の位相を最適化する方針をとるため、detuning してもそれなりに広帯域な感度曲線を実現できる
- PM が DRMI 完全反射であるため detuning の影響を受けない
- AM の代わりに Single SB を用いればオフセットを除去できることが分かっており、これについては詳細な検討が必要だが、detuning の難点の一つを解決できる
- SRC 長をマクロに調整し、動作点を VRSE-D のゼロ交差点にもってくれば、電気オフセットを加える必要はなくなり、VRSE-B との違いはない

フィネスに関しては次節で述べる。問題は最後の2点である。SSB の使用と SRC 長の調整を導入することで VRSE-D と VRSE-B の違いがなくなるというわけだが、詳細の検討が後回しになっている状況である。おそらく、SSB の使用と SRC 長の変更は間に合わないのではないかと考える。SSB の使用は入射光学系を複雑にする。また、SSB を導入してもオフセット問題は完全には解決されないことも分かっている<sup>3</sup>。SRC 長を VRSE-D に合わせて最適化した場合の計算は実はまだほとんど行なわれていない。ASC などデフォルトの SRC 長について計算されており、全ての計算をもう一度やるのは、それなりの時間を要する。

SSB の使用と SRC の調整を行なわないということは、VRSE-D と VRSE-B の完成に要する時間の差が、当初の見積もりより大きくなることを意味する。低温の効果を発揮するという観点から、7年後に目指す形としては VRSE-D で変わらないのだが、aLIGO や AdVirgo との同時観測の重要性を考慮すれば、状況次第で柔軟に対応する準備をすることが大切である。

<sup>3</sup>SRC 制御に関して、ゼロ交差点で制御信号を最大とする二重復調位相を選択すると確かにオフセットはなく、それと直交する3点のうち2点についてもオフセットはないのだが、最後の1点でオフセットが生じる。この1点について PD 出力がサチらないようにオフセット電流を加える必要がある、ということである。詳細は宮川さんが検討する予定。

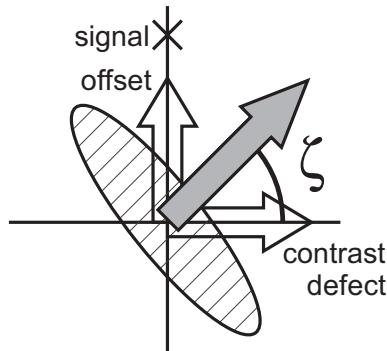


Figure 4: DC readout.

## 6 輻射圧雑音に関する考察

LCGTでは、DC readoutの位相を90度からずらして輻射圧雑音を減らす、Back-action Evasion (BAE) と呼ばれる QND 技術を採用する。Advanced LIGO では、許容値の観点から BAE の採用を見送っている。この違いが、フィネスに対する扱いの違いに結びついている。

両腕における鏡の機械損失の差は、キャリア光と同じ位相をもつコントラストデフェクト<sup>4</sup>としてダークポートに現れる。一方、両腕の誤差信号に差動でオフセットを加えると、キャリア光と90度ずれた位相をもつ成分がダークポートに現れる。コントラストデフェクトとオフセット成分の比でDC readoutの位相(=ホモダイン位相  $\zeta$ )が決まる(図4)。フィネスが高いとコントラストデフェクトが大きくなり、PDの入射光量に制限がある状況下で、DC readoutの位相を90度にするのは難しくなる。これがaLIGOがフィネスを下げた理由である。LCGTはVRSE-Dの動作時で136度、VRSE-Bの動作時で122度、と90度からかなり離す設計をしている。そのため、フィネスが高いことはこの点については問題にならない。むしろ、損失差が予定より少ないとDC readoutに用いる光の総量が低くなりすぎるといった懸念がある。図5にDC readoutの位相が90度になってしまった場合の量子雑音スペクトルを示す。このときIRは242 Mpcに低下する。VRSE-Dと比べると17%の悪化である。

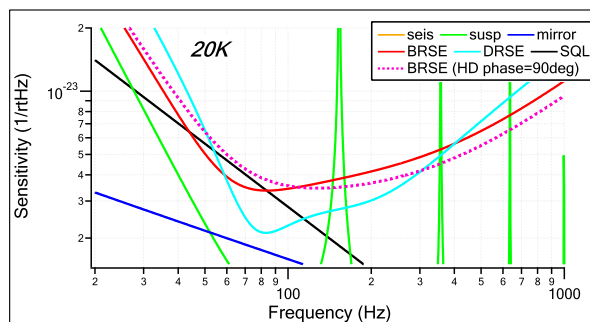


Figure 5: DC readoutの位相が90度になってしまった場合のVRSE-B量子雑音曲線と最適化した場合の曲線との比較。

<sup>4</sup>空間高次モードを除いた正味のコントラストデフェクトである。

## 7 半低温に関する考察

サファイアに関して2つの大きな問題が残されている。第一に基材の問題。吸収損失とは別に、複屈折や内部散乱によるビーム波面の変形が未解決である。第二はファイバーの問題。1.8 mmという太さのサファイア結晶ファイバーを作った実績はまだない。また、30 kgのマスを懸架するだけの強度のあるボンディングがまだ完成していない。

これらの問題が7年後にまだ未解決であった場合、どうするのか。リスク管理という観点から提案されたのが、半低温というアイデアである。ITMを常温シリカにすることで基材の問題を解決。ファイバーはどうか解決して欲しいところであるが、もしこちらも解決しない場合はETMをシリコンにして透過光なし(1064 nmの光はシリコンで吸収されてしまう)でがんばって制御すればよい。

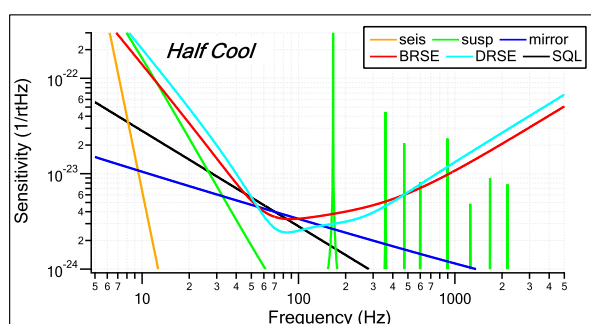


Figure 6: 半低温にした場合の感度曲線。

半分が常温なので熱雑音は悪化するが、最も大きい反射膜の熱雑音に関しては、膜数の多いETMの熱雑音が支配的であり、ITMを常温にしても感度の低下はそれほど大きくない。図6に半低温にしたときの感度曲線を示す。IRはVRSE-Dで232 Mpc、VRSE-B( $\zeta$ 最適化)で220 Mpc、VRSE-B( $\zeta = 90$  deg)で212 Mpcとなる。

ここで、ITMのマスは30 kgを想定している。もしaLIGOと同じ40 kgのマスを用いると、IRはVRSE-Dで239 Mpc、VRSE-B( $\zeta$ 最適化)で227 Mpc、VRSE-B( $\zeta = 90$  deg)で219 Mpcと少し改善する。熱雑音が量子雑音とほぼ同じ程度まで増えているので、マスの重量化による量子雑音の改善はそれほど顕著ではない。

## 8 まとめと結論

TBD

## References

- [1] "Study report on LCGT interferometer observation band," JGW-DCC-T1000065-v1 (2009)
- [2] "Definition of binary range in LCGT and AdLIGO," in Japanese, K. Yamamoto, JGW-G0400128-v1 (2004)



- [3] "AdvLIGO Interferometer Sensing and Control Conceptual Design," R. Abbott *et al.*, LIGO-T020247-01-I (2008)
- [4] A. Buonanno and Y. Chen, Phys. Rev. D, **64**, 042006 (2001)