

# LCGTの感度向上案

内部資料 ver. 0.1

宗宮健太郎

平成 21 年 5 月 20 日

## 1 雑音スペクトルと中性子連星への感度

2004年の時点で我々が採用した LCGT の干渉計デザインは、RF readout を用いた Broadband RSE であった [1]。その後、Caltech 40m や enhanced LIGO で RSE の detuning や DC readout といった新しい技術の開発が進み、LCGT の干渉計デザインのリニューアルが検討されるべきであると考えられる。ここでは以下の 5 点を変更し、LCGT の感度がどれほど向上可能か計算する。

- **detuning** 干渉計制御および伝達関数による光バネの検証が 40m で実現され、制御雑音は解析コード Optickle で計算できるようになった。
- **DC readout** Enhanced LIGO が RF readout から DC readout へアップグレードして感度を向上している。
- **パワーリサイクリングゲインを上げる** 冷凍機の性能が向上していることを加味すると可能かもしれない。
- **鏡を大きくする** これについてはどこまで可能なのが不明。
- **ビーム径を大きくする** ビーム径拡大に伴う parametric instability について研究が進み、解決策が提示され、実験で検証されている。

図 1 に感度スペクトルを示す。Configuration、readout scheme、PRG、鏡の重量、ビーム径の順で、(i) BRSE, RF, 11, 30 kg, 3 cm, (ii) BRSE, DC, 11, 30 kg, 3 cm, (iii) DRSE, DC, 11, 30 kg, 3 cm, (iv) DRSE, DC, 11, 30 kg, 4.5 cm, (v) DRSE, DC, 14, 42 kg, 5.4 cm である。変更案のうち実現可能性が高いのは DC readout と detuning、次がビーム径拡大だと思われる。詳細は Sec. 3 で議論する。ここでは中性子連星への感度を重視し、各々についてフィネス、SRM 反射率、detune phase を最適化してある。光学ロス、検出器効率、非定常散射雑音 [2] が考慮されている。DRSE と RF readout を組み合わせた場合、現行の信号取得法のままでは非定常散射雑

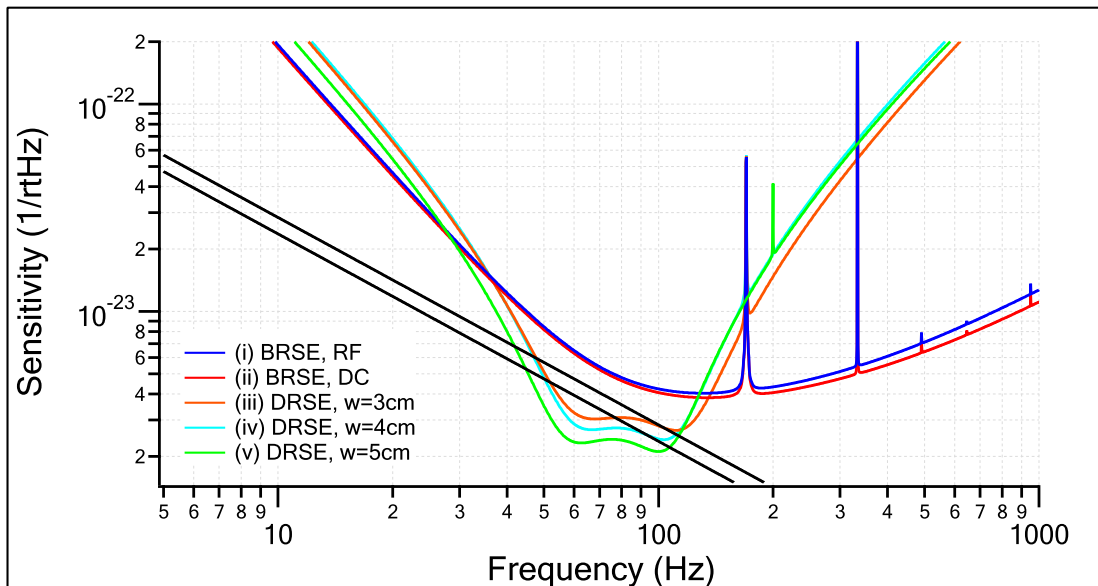


図 1: 現行デザインの LCGT の感度曲線 (青) および各種アップグレード版 LCGT の感度曲線.

音が大幅に上昇することが分かっており、変調器の位相雑音混入問題も解決されていないので、DRSE 採用時には DC readout を用いることとする。

表 1 に SN=10 とした場合の中性子連星への感度を示す。全天平均ではなく最適角で信号が入射した場合の感度である。最も安全に設計した場合の (i) と比べると、上記 5 点について最もアップグレードに設計した場合の (iv) は、observable distance が 70 パーセント向上することが分かる。

	configuration	readout	PRG	mass	beam	obs. dist.
(i)	BRSE	RF	11	30 kg	3 cm	183 Mpc
(ii)	BRSE	DC	11	30 kg	3 cm	191 Mpc
(iii)	DRSE	DC	11	30 kg	3 cm	242 Mpc
(iv)	DRSE	DC	11	30 kg	4.5 cm	262 Mpc
(v)	DRSE	DC	14	42 kg	5.4 cm	311 Mpc

表 1: SN=10 としたときの中性子連星への感度.

## 2 Advanced LIGO との比較

LCGT は米国の Advanced LIGO や欧州の Advanced Virgo と同時期に観測を開始し、重力波検出の確度を増したり、ソースの情報を増やすことが期待されている。重力波検出ネットワークで重要な役割を果たすためには、これらの検出器と同様かそれ以上の歪み感度を実現していること

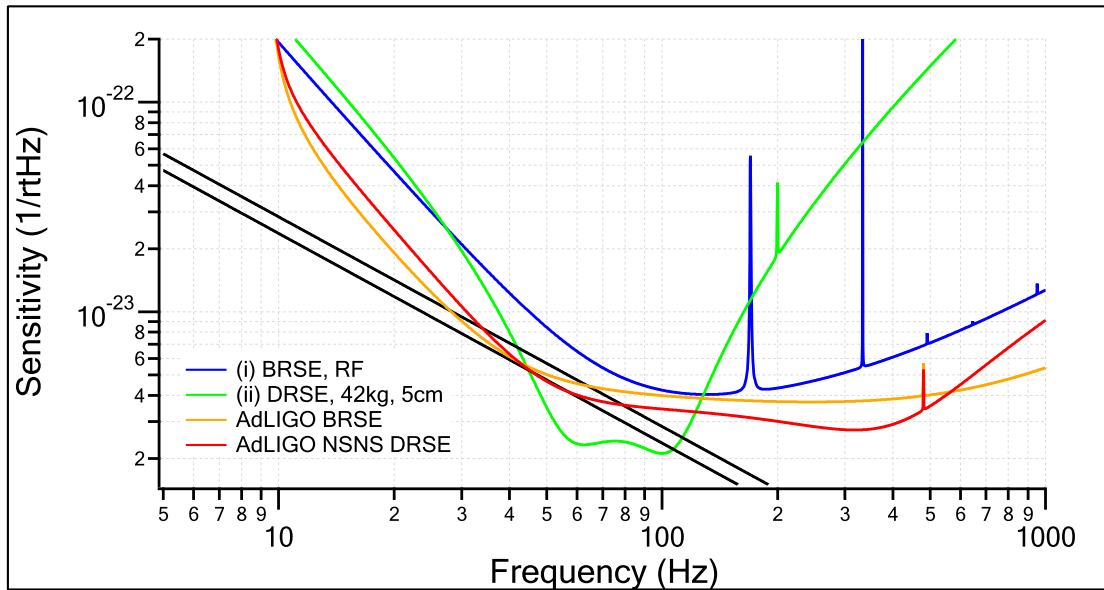


図 2: LCGT 感度曲線と AdLIGO 感度曲線.

が大切である。図 2 に Sec. 1 で示した干渉計デザイン (i) および (v) と、Advanced LIGO の感度 [3] を並べる。

表 2 に SN=10 の observable distance をまとめる。ちなみに、Advanced LIGO は tunable RSE を導入することを決めており、鏡の反射率は変えずに入射パワーと detune phase だけを変えることで異なるソースからの重力波に最適化する構造となっているため、BRSE と DRSE でフィネスも SRM 反射率も一定である。本レポートでの LCGT 感度は中性子連星のみに対して感度が最高となるように干渉計構造を決めた上で求めており、BRSE と DRSE でフィネスや SRM 反射率が異なる。

detector	design	obs. dist.
LCGT (i)	BRSE, RF, safe design	183 Mpc
LCGT (v)	DRSE, DC, aggressive design	311 Mpc
AdLIGO	BRSE, DC, starting setup	247 Mpc
AdLIGO	DRSE, DC, tuned for NSNS	270 Mpc

表 2: SN=10 としたときの中性子連星への感度. LCGT と AdLIGO の比較.

### 3 難易度

Detuning および DC readout を導入することで、量子雑音の低減が実現できるが、干渉計制御に少なからず負担がかかる。詳細は干渉計制御部会の方で後日まとめることとして、ここでは概略を述べる。

RSE の制御は RF sideband を PR-SRC に共振させることで実現される。BRSE の場合は、upper sideband と lower sideband の両方を共振させ、キャリアを中心とした対称性が保たれる。DRSE の場合は、どちらかの sideband のみを共振させることでキャリアを共振から少しだけずらす。そのため対称性は崩れ、制御信号にオフセットが乗るなどの問題が生じる。DC readout は両腕間に差動のオフセットを加え、腕内のキャリアをダークポートに少しだけリークさせることで実現される。Detuning も DC readout も制御系の対称性を崩すという共通点があり、制御系を簡単にするためには両方とも導入しない、というのは一貫性のある判断だと言える。

逆に、detuning の導入には DC readout が伴う。既述のように、DRSE と RF readout を組み合わせると非定常散乱雑音が増加する。これは single SB と矩形波復調を組み合わせたときの現象で、balanced SB のときはパワーで 23 % 程度のロスなのだが、single SB だとおよそ 150 % のロスとなって現れてしまう。BRSE に DC readout を導入すると、この 23 % のロスが除去できる。また、それだけでなく、周波数雑音の低減、変調雑音の低減などの効果も期待される。Output MC は RF sideband を共振させない構造にすることになる。

対称性の崩壊は重力波信号取得ポートだけでなく、ほぼ全ての制御信号に影響を及ぼす。オフセットや制御信号の縮退などの問題がループ雑音を増すことが危惧される。しかしこれらを計算する手法は確立されており [4]、解析コード Optickle も使うことができるので、制御法開発の道は開けている。

DRSE を導入するということは、重力波源を 1 つか 2 つに絞り込むか、もしくは tunable RSE にするかの選択を迫られる。鏡のマクロな位置と RF sideband の周波数とを変更しないという制約の下で、detune phase を変えるには、SRM 制御のダイナミックレンジを広げておき、制御信号にオフセットを加えることで実現するしかない。ダイナミックレンジの拡張は、SRM 制御信号および  $l_2$  信号の減少を伴い、ループ雑音が上昇する。この問題は干渉計制御部会で時間をかけて議論されるものであり、DRSE 導入にとって重要な項目である。

鏡の重量化に関しては定性的な議論はできない。熱吸収を減らすために厚みを固定し、径を広げることが提案されている。アスペクト比を上げることで熱雑音が増加することが知られているが、厚みと径が同じ程度なら大きな増加ではない。

パワーリサイクリングゲインは 2 つのファクターで制限される。一つ目は、光学ロスにより腕の反射率が 1 でないということである。腕のロスを 70 ppm、PRC のロスを 500ppm とし、フィネス 1550 だと、ゲインは最大で 14.6 ということになる。二つ目は、ITM の熱吸収をどこまで冷却できるかということである。吸収を 20 ppm/cm、冷却能力を 1 W、安全係数を 3 とし、ゲインは最大で 27 程度であるが、吸収ロスは不確定な要素があるので気をつけなければならない。

ビーム径拡大は、共振器が不安定に近づき、高次の空間モードの共振を招く。LCGT(30 kg:ミラー径 12.5 cm, 42 kg:ミラー径 15 cm) ではこの条件を重視して 3 cm という値を求めており、diffraction loss からビーム径を決めた AdLIGO(ミラー径 17 cm、ビーム径 6.2 cm) と比べると

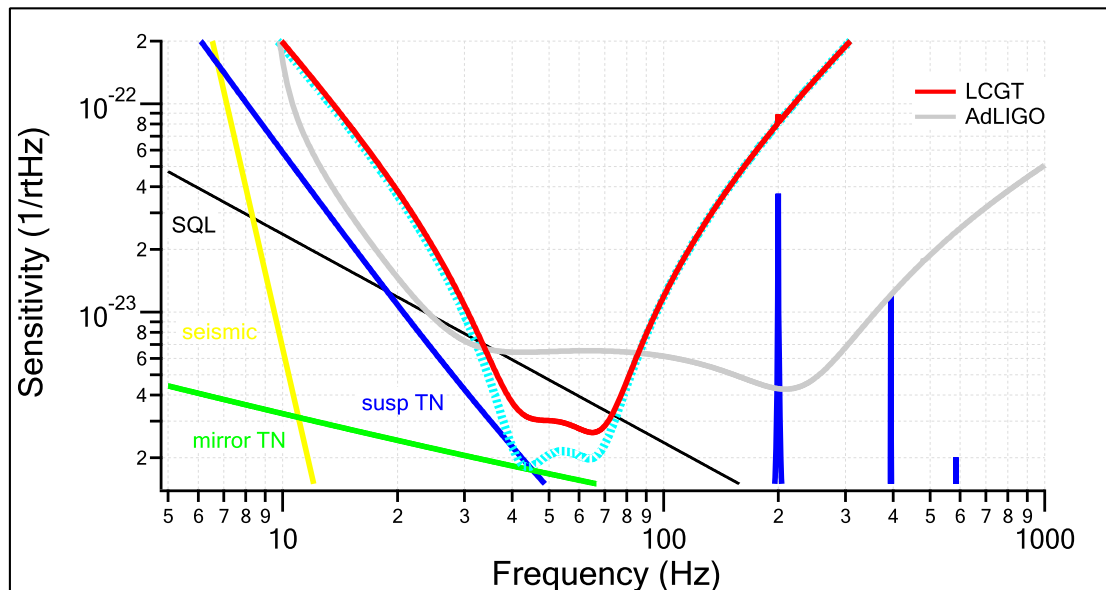


図 3: LCGT 感度曲線と AdLIGO 感度曲線. フィネスと SRM 反射率は中性子連星のときと変えずに、パワーと detune phase をブラックホールに対して最適化したもの。

半分ほどの大きさである。ビーム径を 2 倍にするとコーティング熱雑音は半分になる。BRSE だと量子雑音の方が熱雑音より大きいので、あえてビーム径を大きくしなくてもよいという意見もあるが、DRSE では熱雑音が感度を制限しており、ビーム径の拡大は魅力的である。ビーム径を大きくすると parametric instability を生じる内部モードの数が増えるが、解決策がいくつか提示されており、解決不可能な問題ではないと考える。また、角度揺らぎの不安定条件も存在し、ビーム径を拡大するならば  $g$ -factor を負にしておいた方が安全である。この点に関してはサファイアの大型鏡で曲率を 1.5 km まで短くできるか、という問題が伴う。

#### 4 ブラックホール連星への感度

神岡の地下、SPI、低温、という 3 本柱によって、LCGT は低周波でこそその真価を発揮する潜在能力がある。BRSE では標準量子限界に阻まれて、その能力をフルに発揮できないが、detuning によって量子限界を超え、ブラックホールへの感度を大幅に上げることが可能なのではないだろうか。同時に、低周波で感度を出す場合、高いレーザーパワーを必要とせず、さらなる低温化を目論むことも現実味を帯びてくる。

ブラックホール連星のみに観測帯域を特化するというのは、より確実に存在が予言されている中性子連星をあきらめることになり、単独の重力波検出器として見たときに価値が下がるかもしれないが、近い将来に構築されるであろう重力波検出ネットワークの中で他の追従を許さない重要な役割を担うという意味では、考慮されてしかるべきアイデアのひとつと言えるだろう。

まず、鏡の反射率およびビーム径は上記 (v) と同じだとする。すなわち中性子連星に最適化す

ることも可能な状態で、パワーを下げ、detune phase を変えて、ブラックホール連星に最適化してみる。図 3 に結果を示す。SN=10 としたときの observable range は AdLIGO が 2.3 Gpc なのに対して LCGT は 3.5 Gpc であり、熱雑音を下げた効果が顕著に出ている。ちなみにこのときの入射パワーは 25 W である (PRG=14)。

雑音スペクトルを見ると、suspension 熱雑音が感度の一部を制限している。LCGT は低温であると同時に太いファイバーを使って冷却しなければならないため、suspension 熱雑音が低温の割りには大きいのである。試しにパワーを 10 分の 1 以下にして、ファイバーの径を 3 分の 1 にした状態で、同様の最適化をしてみると、フィネス 1570、入射パワー 7 W、SRM 反射率 94 % で、さきほどより 1 % ほどよい結果を得るにとどまった。表 3 に結果をまとめる。

detector	design	obs. dist.
LCGT	DRSE, 25 W, $\phi = 1.8$ mm	3.50 Gpc
LCGT	DRSE, 7 W, $\phi = 0.6$ mm	3.54 Gpc
AdLIGO	DRSE, 20 W	2.31 Gpc

表 3: SN=10 としたときのブラックホール連星への感度. LCGT と AdLIGO の比較.

## 参考文献

- [1] LCGT Design Document (internal report), 2004
- [2] Shot noise with RF readout (internal report), 2006
- [3] Advanced LIGO Conceptual Design Report, LIGO-T070247, 2008; the sensitivity curves are available on the website (password protected):  
[http://lhocds.ligo-wa.caltech.edu:8000/advligo/AdvLIGO\\_noise\\_curves](http://lhocds.ligo-wa.caltech.edu:8000/advligo/AdvLIGO_noise_curves)
- [4] Length Sensing Control for AdLIGO, LIGO-T060272, 2006