

iLCGT(LCGT phase-1) 設計検討書

LCGT Optical Configuration Group

September 25, 2010

1 はじめに

LCGT は 2014 年 10 月に最初の観測を行なう予定である。このときの LCGT を仮に iLCGT と呼ぶとする。本検討書は iLCGT のデザインを決めることを目的とする。最終的な LCGT の実現に向けて、後戻りできない過ちを犯してはならない。全体的なリスク管理や要求値の設定をここで遂行し、各部門担当者には本検討書を元に詳細を詰めてもらう。

LCGT 最終形の各種パラメタについては、参考文献 [1] で議論している。この中で iLCGT の設計に関わってくるのは次の項目である。

- ファイバーの長さおよび太さ、鏡の重さなど懸架系のデザインに関するもの
- SRC 長、アシンメトリ長、g-factor など、真空槽や鏡の曲率に関わってくるもの
- 入射光学系:PM、AM、Single SB の選択、および MZ や OMC に関するもの
- TCS など補助的な機能に関するもの

これらに加え、iLCGT のパラメタとして選択すべきは、次の 4 点である。

- iLCGT のフィネス
- iLCGT の入射パワー
- iLCGT のファイバー (材質、径)
- iLCGT のシリカ鏡 (重さ)

iLCGT の干渉計構造は PRM および SRM のない FPMI とする。鏡のサイズとビーム径は最終形に至る戦略に合わせて決定される。

2 感度曲線

フィネスを 1550、ファイバーを 550 ミクロン径シリカ、鏡を 30 kg シリカ ($\phi 29.5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) とした場合の雑音スペクトルを図 1 に示す。入射パワーは 3 W と 20 W の各々について量子雑音を計算している。3 年目の段階では OMC を導入する予定はなく、DC readout ではなく RF readout を用いるので、ショットノイズは多少悪化する。防振系は B-type の 3 段目を固定した

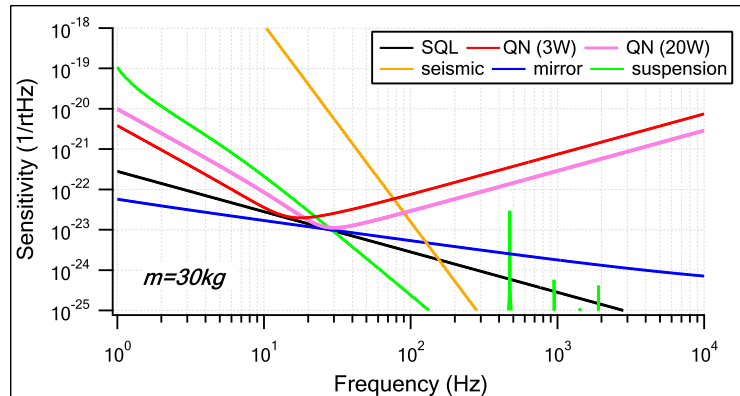


Figure 1: iLCGT の感度。

もの、すなわち 2 段振り子を想定している¹。これを見て分かるように、iLCGT の感度は地面振動雑音とショットノイズのみによってほぼ決まっており、鏡の重量やファイバー径にほとんど依存しない。キャビティポールも低いいためフィネスも影響しない。入射パワーに関しては次節で述べる。

3 パワーに関する考察

入射パワーは高いほどよい。中性子連星の inspiral range と入射パワーの関係を図 2 に示す。ここで用いる IR は LCGT 定義のもので、LIGO で使用する数値はこれより 0.59 倍小さいものになる。

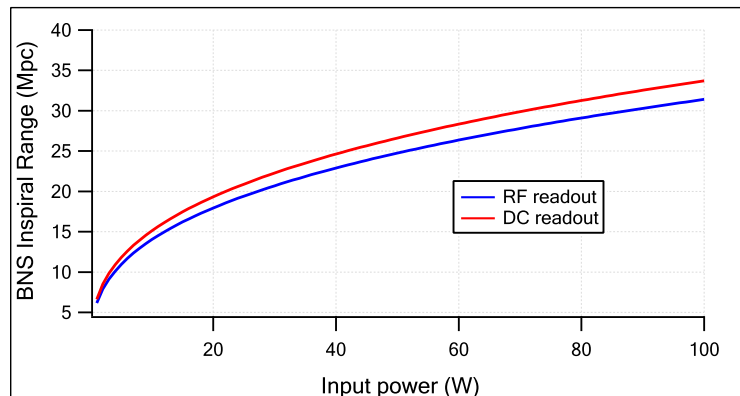


Figure 2: iLCGT の IR の入射光量依存性。

¹高橋さんが計算したものを宮川さんがフィッティングした式を使用している。

4 ファイバーに関する考察

観測帯域における常温シリカファイバーの機械損失は、ほぼ thermoelastic damping のみで決まっており、 $\phi_p = 1.94 \times 10^{-7} \times (100 \text{ [Hz]}/f)$ で与えられる。図 1 を見ると、iLCGT のサスペンション熱雑音にはまだ 1 桁以上の余裕があり、機械損失が 10^{-5} 程度であっても感度を制限しないことが分かる。このことから、iLCGT ではシリカファイバーでなくスチールワイヤーでも問題ないということができる。

ファイバーもしくはワイヤーの長さに関しては、iLCGT には影響しないが、最終形のバイオリンモード周波数を決める重要なパラメタである。懸架系を後で変更するのを避けるためには、現段階で最終決定を下さないといけない。最終形におけるサファイアファイバーの長さは、冷却能力にも関わってくる。デフォルトで 40 cm となっているが、もう少し短い方がよいという結論になる可能性はある。

5 鏡に関する考察

鏡の重量は iLCGT の感度には影響を及ぼさないが、最終形デザインに関連して、以下の 3 つの選択肢が考えられる。

- $m = 16 \text{ kg}$: 最終形と同じサイズで、密度が違う分だけ軽くなる
- $m = 30 \text{ kg}$: 最終形と同じ重量
- $m = 40 \text{ kg}$: aLIGO と同じサイズ・重量

最初の 2 つについては、GAS フィルターの設計を同じにする方が楽であるとの見解から、30 kg にする案が有力である。一方、40 kg というのは、シリカならばサファイアより大きなマスが作成できるということをふまえ、輻射圧雑音を下げするために可能な限り重くするという案である。サファイアが予定通り準備できれば、40 kg のシリカは不要になるわけだが、サファイアが準備できない場合、常温もしくは半低温で長期観測するということになるので、その対策で 40 kg にしておこうというわけである。しかし、表 1 に示すように、30 kg と 40 kg の IR の違いは 3 % 程度であり、懸架系の設計の手間に見合う改善とはいえない。以上のことから、マスは 30 kg とするのがよいだろう。

	iLCGT	半低温	全低温
$m = 30 \text{ kg}$	17.9 Mpc	232 Mpc	291 Mpc
$m = 40 \text{ kg}$	17.9 Mpc	239 Mpc	–

Table 1: 重量ごとの LCGT 各段階の inspiral range。干渉計構成は iLCGT が入射パワー 20 W の FPMI、半低温および全低温は PRC 内パワー 825 W の VRSE-D である。半低温の ETM は 30 kg の低温サファイアである。

6 共振器長に関する考察

真空槽の位置を決めた時点で干渉計の制御法に制約がつくことになる。最終形 LCGT では、11.25 MHz と 45 MHz の 2 周波を用いた制御法を採用することになりそうである [2]。これに合わせて iLCGT の配置も決定される。

6.1 アシンメトリ

ITM-BS 間のアシンメトリ長は、45 MHz の SB がダークフリンジになるように定められる。すなわち、 $\Delta\ell = c/(2 \times 45 \text{ MHz}) = 3.3 \text{ m}$ である。この 45 MHz の SB では、差動系の制御信号 (ℓ_- および L_-) を取得することはできない。一方で 11.25 MHz の SB は最終形の制御デザインでは AM にするので、そのままでは制御信号がとれない。以上のことから、iLCGT では変調系に関して次の 3 つの選択肢がある。

- SB 用 Mach-Zehnder は組み込まず、11.25 MHz の PM を用意して制御に用いる
- SB 用 Mach-Zehnder は組み込むが、11.25 MHz を AM から PM に変えて用いる
- SB 用 Mach-Zehnder を組み込んだ上で 11.25 MHz も 45 MHz も使わず、MZ の中もしくは後に第 3 の SB を用意して制御に用いる

最後に述べた第 3 の SB は、角度制御用に使う余地を残すならば、それに最適な条件を選んでおかなければならないだろう。

6.2 MC 長

デフォルトの MC 長は $L_{MC} = c/(2 \times 11.25 \text{ MHz}) = 13.3 \text{ m}$ である。しかしこれだと、角度制御用に第 3 の SB が必要となったとき、周波数を選択する余地が乏しい。11.25 MHz の倍波は 11.25 MHz とのビートが 11.25 MHz 復調の邪魔をしてしまうし、3 倍波は double-demodulation 信号の邪魔をしてしまう。5 倍波も使えない。6 倍波になると今度は周波数が高すぎて角度制御用に不向きである。

以上のことをふまえ、MC 長を倍にして SB 周波数の選択幅を広げることが提案されている：

$$L_{MC} \rightarrow 2 \times c/(2 \times 11.25 \text{ MHz}) = 26.6 \text{ m} .$$

それならば、MC 長 15 m 以下という条件下で選択された 11.25-45 MHz よりもよい SB 周波数の組み合わせがあるかもしれないが、とりあえずはこのまま計算を進めていく。

6.3 SRC 長

SRC の制御については、VRSE-B にゼロ交差点を持たせ、誤差信号にオフセットを加えることで VRSE-D に移行する案と、VRSE-D にゼロ交差点を持たせる案とが存在する。SRC 長はこの 2 つの制御法の間で 26.7 cm 異なる。真空槽の配置を決めた後では変更するのは困難であろう。

aLIGO や AdVirgo の感度次第では、LCGT が VRSE-B で長期観測に挑む可能性もある。それをふまえると、ゼロ交差点は VRSE-B にしておくのがよいと考える。もう少し詳細な議論は参考文献 [1] で展開する。

6.4 折り返し RC

PRC および SRC で空間高次モードが共振するのを避けるため、folding を施すということが LCGT でも提案され、ほぼそれで決定する方向である。iLCGT では PRM も SRM も導入しないが、次の段階への移行をスムーズにするため、折り返し鏡は導入しておくのがよいと考えられる。PRM と SRM もインストールしてしまっ、その前後で光路をずらすという案もあるが、インストールを後回しにする方が現実的であろう。

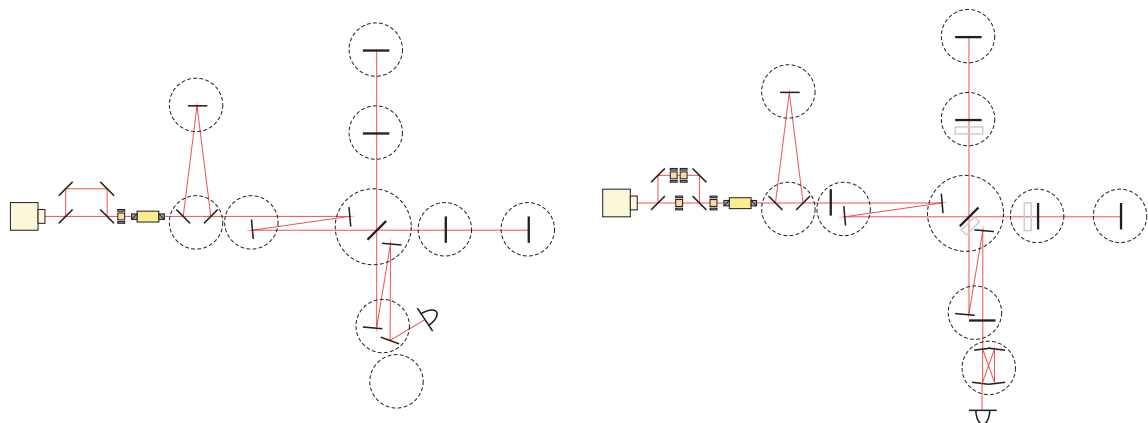


Figure 3: 左図 : iLCGT、右図 : LCGT 最終形。iLCGT には、PRM、SRM、そして OMC がない。また、MZ は設置するが使用しない。TCS は最終形でも使用するかどうかは未定であるが、導入する余地は残しておく。

7 追加機能に関する考察

MZ については先に述べたとおりである。OMC については iLCGT では導入しない。しかしこれらは最終的には導入するものであり、十分なスペースその他を用意しておかなければならない。また、BS の熱レンズを回避するための TCS も iLCGT では導入しないが、最終的には必要となるかもしれない。半低温の場合、入射パワーが 20-30 W ならば大丈夫かもしれないが、それ以上の高出力になると ITM に TCS が必須となる。これらにも注意が必要である。

8 まとめ

iLCGT は PRM などを導入しないシンプルな干渉計構成になる (図 3)。大型干渉計で目標感度を達成するというのが目標である。垂直入射を仮定して、17.8 Mpc 離れた中性子連星からの重力波を SN=8 で検出する感度を目指す。細かな干渉計レイアウトは ISC にまかせるとして、本レポートの主張をまとめると以下の通りである。

- フィネスは最終形と同じ 1550 とする
- 干渉計に入射するキャリア光の出力は、とりあえず 20 W を目指す
- シリカ鏡の重量は 30 kg とする
- ファイバーは Q が 10^5 程度の金属ワイヤーでも構わない
- ファイバー長はデフォルトで 40 cm とするが、検討の余地を残す
- 干渉計制御に用いる SB 周波数は未定である
- MC 長は 26.6 m を推奨する
- SRC 長は、 l_s 制御のゼロ交差点が VRSE-B となるものとするが、検討の余地を残す

ファイバー長と SRC 長に関しては、麻生君と宮川さんのレポートを待ち、LCGT ロードマップ会議などで検討を重ねてから、結論を出すべきだと考える。

References

- [1] "LCGT 各種パラメタ検討書," JGW-T1000179-v1 (2010)
- [2] "Study report on LCGT interferometer observation band," JGW-T1000065-v1 (2009)