

国際重力波観測ネットワークへの参入 —— 神岡に大型重力波検出器 LCGT の建設始まる ——

宗 宮 健太郎

要 旨

2010 年 6 月、最先端研究基盤事業に採択され、国内では初となるキロメートル級の光干渉計型重力波検出器が建設されることとなった。建設場所は岐阜県神岡、地下数百 m のトンネル内である。20K まで冷却したサファイア鏡を用いるなど、日本が開発してきた先進技術を導入して、年間数回の重力波を確実に観測することができるデザインとなっている。日本では、世界に先駆けて、1995 年に基線長 300m の干渉計 TAMA300 を国立天文台に建設し、その後の大型干渉計における技術開発をリードしてきた。2001 年には低温干渉計プロトタイプとして基線長 100m の CLIO を神岡に建設し、低温化による感度向上を確認した。2011 年から建設を開始する LCGT (= Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope) は、これまで培ってきた技術を結集し、究極の感度を目指す。米国や欧州で建設中の Advanced LIGO、Advanced Virgo、GEO-HF と並び、第二世代重力波検出器として、光学望遠鏡で見ることのできない中性子連星やブラックホールの深遠な情報をもたらし、新しい天文学への道を開拓していくことになる。

LCGT and the global network of gravitational-wave observation

Kentaro Somiya

Abstract

The first km-scale Japanese gravitational-wave detector, approved by the government in June 2010, is soon to be constructed in the underground of the Kamioka mine. The detector LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational-wave Telescope) is based on the Michelson interferometer. The baseline is 3km and the core optics of the interferometer are cooled down to 20K. With the advanced techniques developed in Japan, LCGT will detect gravitational-wave signals a few times per year. In Japan, we built the 300-m TAMA detector in the National Astronomical Observatory in 1995 and have lead the international activity of developing gravitational-wave detectors. We also built the 100-m CLIO detector in Kamioka in 2001 and have demonstrated the cryogenic techniques to improve the sensitivity by reducing thermal noise. The construction of LCGT starts in 2011 and will open the window to the Gravitational-Wave Astronomy, cooperating with the other detectors that are now under construction in the US (Advanced LIGO) and in Europe (Advanced Virgo and GEO-HF).

はじめに

重力波とは、ブラックホール合体などの大質量を伴う天体現象で空間に大きな歪が生じたとき、その影響を遠方に伝える時空のさざ波のことである。1916年にアインシュタインが一般相対性理論を提唱し、それに基づいて翌年には重力波の存在が预言されたのだが、電磁波などと比べると物体との相互作用がほとんどない重力波を検出することはとても難しく、100年余り経過した2010年現在でもまだ重力波の直接検出は実現していない。相対論が预言したものは全部で4つであり、水星の近日点移動、重力レンズ、赤方偏移、そして重力波である。このうち20世紀のうちに検証されなかったものは重力波の直接検出のみであり、21世紀に残された宿題と言えるだろう。また、検証済みの事象は全て静的な重力場の現象を観測したものであり、動的な現象である重力波の検出は一般相対性理論の正当性をよりいっそう高めるものとなる。1974年にMITのTaylorらが、連星パルサーPSR1913+16の公転周期減少から重力波の存在を間接的に証明している。あとは重力波の直接検出を残すのみである。

重力波検出の試みは、1m級のアルミ製共鳴型検出器で始まった。狭帯域の重力波信号を弾性体の共鳴で増幅する手法で、超新星爆発などからの重力波検出が期待されたが、弾性体のサイズに限界があり、感度がある程度以上を上回ることにはなかったため、主流は光干渉計型に移行し、共鳴型は衰退した。

光干渉計型重力波検出器は、L字のMichelson干渉計における鏡間の距離を測定することで重力波の影響を広帯域で捉える。干渉計の各腕にはFabry-Perot共振器が組み込まれ、適度な回数だけ光を往復させ、感度を稼いでいる。第一世代と呼ばれる干渉計は世界4カ国に存在する。最長の干渉計は米国

のワシントン州とルイジアナ州に建設されたLIGOであり、その基線長は4kmに及ぶ。ワシントン州にはもう1台2kmの干渉計も存在し、米国だけで3つの検出器を保持していることになる。欧州では、フランスとイタリアの共同計画である、基線長3kmのVirgoがイタリアのカッシーナに建設されており、LIGOとほぼ同等の感度が達成されている。また、ドイツとイギリスの共同計画であるGEO600がドイツのハノーファーに建設されており、基線長は600mと短い、独自の技術を導入し、高い感度を実現している。日本のTAMA300も第一世代検出器の一翼を担っていたが、基線長が300mと短いこともあり、現在は観測活動は休止している。

第一世代検出器は10のマイナス19乗メートルという極小の変位を測定することができるが、この感度では重力波の検出頻度が数十年に一度以下であり、近年行なわれた長期観測期間内にそのようなラッキーソースが出現することは残念ながらなかった。しかし、ほとんどの干渉計がデザイン感度を実現し、感度を制限する雑音源を特定できたことで、第二世代検出器への道が開け、各国で検出器のアップグレードが行なわれることとなった。欧米では干渉計を包み込む真空装置はそのまま、中に入れる干渉計の改良のみを行なう。日本では地面振動の少ない神岡鉱山内に新たに装置を建設し、新しい干渉計を組み込む。

検出器感度は周波数ごとのスペクトルで表される。低周波では地面振動起源の雑音が感度を制限し、100Hz付近では鏡や懸架系の熱雑音、数百Hz以上ではレーザーのショットノイズ（散射雑音）が感度を制限している。地面振動雑音は多段の防振装置を用いることで軽減される。Virgoではすでに7段振り子が用いられており、Advanced LIGO（以下、aLIGO）やLIGOもそれに追従する。熱雑音に関

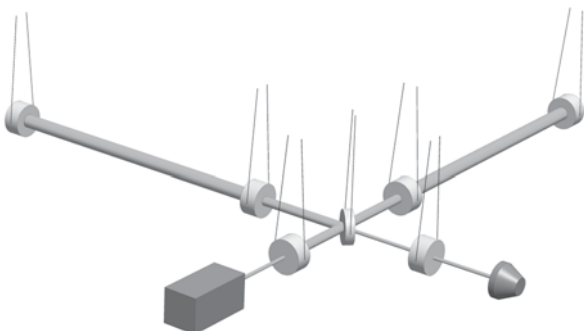


図1：重力波検出器の干渉計構造（第二世代）

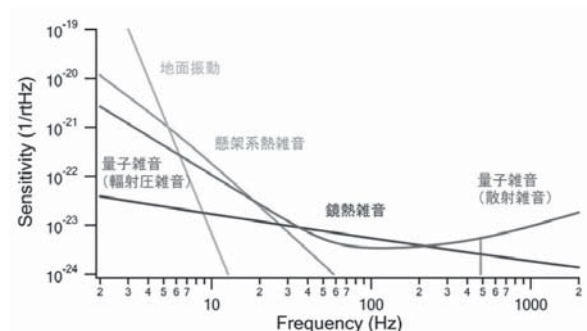


図2：重力波検出器の感度（常温干渉計）

しては、揺動散逸定理を用いた解析により、雑音レベルが鏡上のビーム径に反比例することが知られており、aLIGO と Advanced Virgo（以下、AdVirgo）は回折ぎりぎりまでビーム径を大きくして熱雑音を軽減することを計画している。LCGT は鏡を低温化することで熱雑音は十分に下がるので、ビーム径に関しては共振器の安定度をより重視するデザインとなっている。散射雑音は信号量に反比例するので、第二世代検出器では光源の出力を上げて信号量を増すことで、散射雑音の軽減を図っている。高出力化に伴い、鏡の熱変形などが問題となることから、Resonant Sideband Extraction（RSE）と呼ばれる新しい干渉計構造を採用し、鏡内部での光エネルギーを下げるような工夫が施されている。ちなみにこの RSE 技術は、発案から実験的検証に至るまで日本人の手によって開発されたものである。

第二世代検出器は、そのデザイン感度を達成すると、数週間に一度の割合で重力波を観測する能力を持っている。2015 年を目処に、各検出器が目標に近い感度を実現する予定であり、2015 年か 2016 年には史上初の重力波直接検出が現実のものとなるであろう。アインシュタインが相対論を発表してから 100 年の歳月を経て、予言の検証が完結することとなる。検出された信号が重力波である確信を得るためには、以下の 3 つのポイントが重要になる。まず理論予測との整合性である。連星合体などでは正確な重力波波形が予想されており、実際に検出した重力波によって星の質量や地球からの距離、軌道面の傾きといった物理量を重力波のみで検証できる。また、正確な理論予想波形は、信号雑音比を最適化するフィルターを可能にする。この作業はむしろ信号雑音比の改善に使われる。次に複数検出器のコインシデンスである。異なる場所の検出器 3~4 台でコヒーレントな信号が検出された場合、局所的な雑音ではなく、宇宙から飛来した重力波であると言える。飛来する方向によって信号を受信する時間にずれが生じるので、複数台の検出器によって重力波の到来方向を決めることが可能である。この観点から、米国と欧州から十分離れたところに存在する日本に LCGT が建設されることの意義は、非常に高い。ちなみに、米国ではルイジアナ州に 1 台、ワシントン州に 2 台の検出器があり、後者 2 台は同じ場所に並んで配置されている。これは飛来時間というフリーパラメータを排除して、信号と雑音の分

離をすることを目的としており、実際に成功しているが、地面振動起源の雑音は 2 台にコヒーレントに現れてしまうという問題は残存する。さて、最後のポイントは、他の観測（可視・赤外光、X 線、ガンマ線、高エネルギー宇宙線など）との同時検出である。例えば超新星爆発は重力波の他にニュートリノを放出する。LCGT とスーパーカミオカンデにより同じイベントを観測して、日本国内だけで重力波検出を裏付けることも可能と言える。

重力波の飛来する方向角ということについては、到達時間の違いだけでなく、信号量も異なる。干渉計型重力波検出器は、それを含む平面に垂直な方向から重力波が飛来するときに信号量が最大となり、同じ平面内で干渉計の両腕の中間から飛来すると信号はゼロになる。信号量の角度依存性をアンテナパターンと呼ぶが、LCGT は欧米の検出器を補完するようなアンテナパターンを持っており、その点でも大きな意義がある。

重力波の研究は、重力波発生に関する理論研究、検出器の高感度化を目指す理論・実験、検出されたデータから信号を抽出するデータ解析、の 3 つに分かれているが、本稿では LCGT をはじめとする検出器に焦点をあて、高感度化技術について説明する。

地面振動

干渉計を構成する鏡は振り子で吊られており、重力波による外力に対して自由質点として振舞うと同時に、地面の振動から分離されている。振り子による防振は、その共振周波数以上で周波数の 2 乗に反比例して地面振動雑音を軽減する。LCGT ではイタリアで開発された SAS（Seismic Attenuation System）という高性能な防振システムを導入する。共振周波数が低い方が観測帯域での防振度は上がる。SAS はまず倒立振り子で全体を支えており、この倒立振り子の共振周波数は 100mHz 以下に設定することができる。さらに GAS（Geometrical Anti-Spring）フィルタで縦方向の地面振動も防振している。GAS フィルタはモノリシックな弾性体でできていて、弾性力と重力を相殺させて緩やかなポテンシャルを作り、数百 mHz の共振周波数を実現している。

TAMA300 が設置されていた東京都三鷹市と比較すると、LCGT が建設される神岡鉱山内の地面振動

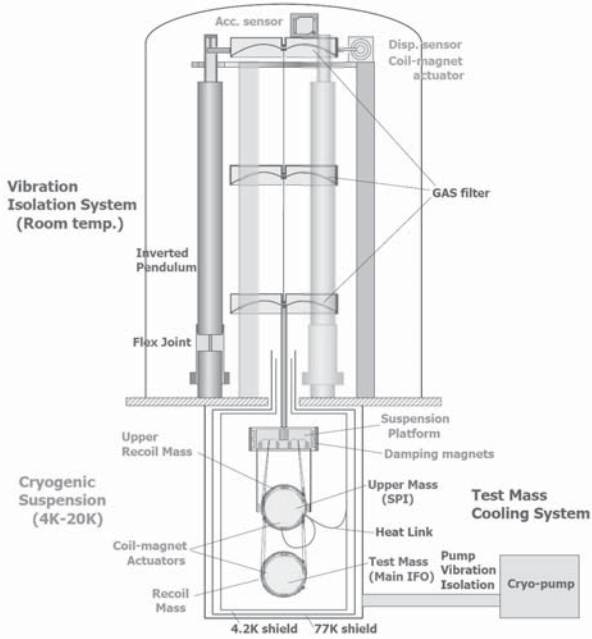


図3：冷却懸架系。上部は常温、下部は低温。

は1Hzで2桁小さい、10のマイナス9乗メートルほどである。SASの効果も合わせると、10Hzで10のマイナス20乗メートルほどまで地面振動は抑えられ、広い帯域で重力波観測を実施することが可能である。

LCGTの場合、冷却に用いるヒートリンクと呼ばれる純アルミのワイヤーを通して、地面振動が伝えられてしまう可能性が危惧されていた。この問題を解決すべく、最終段の一つ上のマスでも干渉計を構成して振動が伝わらないようにする Suspension-point Interferometer (SPI) という技術を導入する計画もあったが、コスト面などの問題から LCGT には導入されないことになった。ヒートリンク経由の振動については、冷凍機からヒートリンクまでの間での軽減策が施される。SPI は観測帯域での地面振動を下げる役割も担っていたが、SAS だけで要求値を満たせるという判断である。将来的に SPI が導入される可能性はまだ残されている。

熱雑音

数百ヘルツ付近の最も感度がよい帯域では、鏡や懸架系の熱揺らぎが感度を制限している。熱雑音はいくつかの種類に分けられるが、大きく分類すれば、物体のブラウン運動で位置や体積が変化すること、温度揺らぎが熱膨張係数や屈折率の温度変化と結合して表れるものと分かれる。揺動散逸定理を解くことで、熱雑音レベルを解析的に求めること

ができる。近似を施して簡易化した式をいくつか紹介して、雑音特性を説明しよう。

まず、懸架系の熱雑音パワースペクトルは次式で表される。

$$S_x = \frac{4k_B T}{M\Omega^5} \sqrt{\frac{4\pi Y g}{M}} \left(\frac{d_{\text{wire}}}{\ell} \right)^2 \phi_{\text{wire}}$$

ここで k_B はボルツマン定数、 T は温度（均一と仮定する）、 M は鏡の重量、 Ω は角周波数、 Y は鏡を吊るワイヤーのヤング率、 g は重力加速度、 d_{wire} はワイヤー直径、 ℓ はワイヤー長、 ϕ_{wire} はワイヤーの機械損失である。バイオリンモードは無視されている。振り子は重力を復元力とするが、ワイヤーが太くなると弾性力が支配的となり、バイオリンモードを考慮する必要性が出てくる。さて、LCGT の場合、振り子はサファイアファイバーでできており、ファイバーを通じて鏡の熱を冷凍機まで伝播させるため、 d_{wire} は aLIGO より大きい (aLIGO のシリカファイバーが直径 0.6mm、LCGT のファイバーが 1.8mm である)。 T が下がるのと d_{wire} が大きいのが相殺して、懸架系熱雑音は常温干渉計と低温干渉計でほぼ同じレベルになる。ちなみにファイバーを長くすると雑音のフロアレベルは下がるが、バイオリンモードが低周波に移動する。LCGT では 40cm に設定している。ワイヤーの機械損失は、バルクとしての損失の他、ワイヤー内の温度変化に起因する熱弾性損失とワイヤー表面の損失を含むため、形状依存性と周波数依存性をもつ。

鏡の基材の熱雑音パワースペクトルは次式で表される。

$$S_x = \frac{4k_B T}{\Omega} \frac{1 - \sigma^2}{\sqrt{\pi Y w}} \phi_m$$

新たに登場するパラメタとして、 σ はポワソン比、 w はビーム半径である。バルクの機械損失が小さいので、鏡機材の熱雑音レベルは低く、次式で表される反射膜の熱雑音が支配的となる。

$$S_x = \frac{4k_B T}{\Omega} \frac{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}{\pi Y w^2} 2d_{\text{coat}} \phi_c$$

ここで d_{coat} は反射膜の厚さである。なお上式は基材と膜が同じ素材のときに成り立つ式である。実際には屈折率の違う素材を 1/4 波長ずつ交互にコーティングするので、式は少し異なる。ビーム径が大

きいほど雑音レベルが下がるのは、空間周波数の高い成分の熱揺らぎがビーム径内で打ち消し合うからである。このことをふまえて、aLIGO や AdVirgo では鏡の大きさがぎりぎまでビーム径を大きくする。空間高次モードの共振が基本モードの共振とオーバーラップし始め、共振器の安定性という意味では条件が厳しくなるのだが、熱雑音軽減を優先した結果の選択である。LCGT では鏡の温度が低いため、ビーム径に関しては共振器の安定性を優先することができる。ビーム半径は aLIGO が 6cm、LCGT が 3.5cm で、温度はそれぞれ 290K、20K であるから、LCGT の熱雑音の方が低い。ちなみに鏡半径は aLIGO が 17cm、LCGT が 12.5cm である。

鏡の温度変化に起因した雑音として、熱弾性雑音は次式で表される。

$$S_x = \frac{16k_B T^2}{\Omega^2} \frac{(1+\sigma)^2}{\sqrt{\pi} C_V w^3} \kappa \alpha^2$$

新たに登場するパラメタとして、 κ は熱伝導率、 α は熱膨張係数、 C_V は比熱である。これまでに見た熱雑音と比べると、パワースペクトルが温度の 2 乗に比例するという違いがある。サファイアのような熱伝導率の高い機材を用いると、熱弾性雑音が感度を制限するが、低温化すると熱弾性雑音は急激に下がる。実際、常温の第二世代検出器でも基材損失の小さいサファイアを用いるというプランがあったが、熱弾性雑音が大きいことが判明して却下されたという経緯がある。ちなみに上式は低温にすると低周波で合わなくなる。拡散距離がビーム径より大きくなるため、結果的に低温での熱弾性雑音はビーム径に依存しなくなる。

ここでは熱雑音を表す式を 4 種類だけ紹介した

が、これら以外にも、反射膜の熱弾性雑音、反射膜内で屈折率の温度依存性が引き起こす雑音、などいくつかの種類の熱雑音が存在する。また、近年では、これらの雑音解析に基づいて、熱雑音軽減化を模索する研究も進んでいる。ガウシアン基本モードの代わりに熱雑音が低くなるようなビームを用いる案、反射膜の厚さを 1/4 波長から変える案、従来の鏡の代わりにエタロンを使う案など、いろいろなものがある。

量子雑音

重力波測定のプロブであるレーザー光の量子揺らぎに起因する雑音を量子雑音と呼ぶ。量子雑音は、量子的位相揺らぎに起因する散雑雑音と、量子的振幅揺らぎに起因する輻射圧雑音とに分かれる。ショットノイズは信号取得時に付加される雑音であり、レーザーパワーを上げるなどして重力波に対する応答が上げれば、ショットノイズは下がる。干渉計構造はショットノイズ軽減のためにデザインされていると言える。しかし応答を上げると、その反作用として輻射圧雑音が現れる。量子的輻射圧雑音を実験的に観察した例はいまのところないが、高出力レーザーを用いる第二世代検出器では感度を制限する雑音源の一つとなる。

Fabry-Perot 共振器を組み込んだ干渉計の重力波に対する周波数応答は、低周波におけるフロアレベルとバンド幅という 2 つのパラメタで表すことができ、この 2 つのパラメタは、共振器内の光パワーと信号量によって決まっている。入射側の鏡 (Input Test Mass = ITM) の反射率を上げて共振器内での光の滞在時間を延ばすと、パワーと信号が同時に蓄積され、フロアレベルが改善すると共に、高周波信

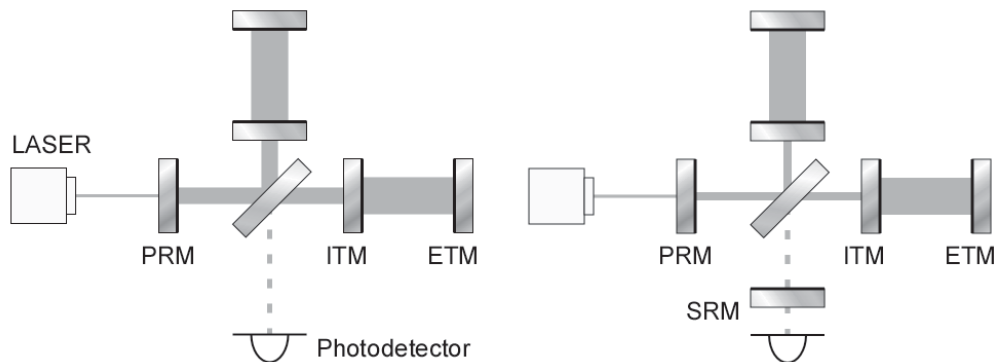


図4：左は第一世代で用いられる Power-recycled Fabry-Perot Michelson 干渉計 (PRFPMI)、右は第二世代検出器で用いられる Resonant Sideband Extraction (RSE) 型の干渉計

号は共振器内での滞在中に打ち消しあい、バンド幅が狭くなる。腕の長さを 3km とすると、100Hz のバンド幅を持つために必要な ITM の反射率は 97.5% であり、それ以上高い反射率にしても 100Hz より高い周波数でのショットノイズレベルは改善しない。一方で ITM はそのままに入射するレーザーパワーを上げると、バンド幅はそのままフロアレベルが改善する。

End Test Mass (ETM) の反射率はなるべく高い方がよい。ETM で透過する分と、各々の鏡で散乱・吸収する分を合わせて、およそ 100ppm の光が共振器内 1 往復で失われる（光学損失）。ITM の反射率が 97.5% ならば、光は共振器内をおよそ 160 回往復するので、共振器の反射率は 98.8% ということになる。干渉計はレーザー光を含む同相成分がレーザー方向に、重力波信号を含む差動成分が対極方向に向かうよう制御されており（暗縞制御）、98% 以上の光はレーザー側に戻される。ここでレーザー側に鏡を配置し、信号成分と分離された後の光を干渉計に再入射させてやると、実効的なレーザーパワーを上げたのと同じであり、バンド幅を変えることなくフロアレベルを改善することができる。この技術はパワーリサイクリングと呼ばれ、第一世代検出器ですでに用いられている。

信号取得側に鏡を配置してパワーリサイクリングと同様のこともできる（シグナルリサイクリング）が、信号をパワー同様に共振させてしまうと、ただ単に ITM の反射率を上げたのと同じになってしまう。むしろ信号に関しては反共振に制御してバンド幅を広げる、という作戦が効果的である。ITM の反射率をあらかじめ高く設定しておき、それに伴ってレーザー側に戻される光が減るのでパワーリサイクリング鏡の反射率も落としておく。その上でバンド幅を広げると、元と同じフロアレベルとバンド幅を復元できる。これが先述の RSE と呼ばれる干渉計構造である。同じ感度曲線を実現して何が得かという点、腕共振器の外で光の出力が低いという点で、鏡の基材における光の吸収が熱を生み出して鏡を変形させる、といった熱問題を回避することができる。特に LCGT では吸収の大きいサファイアを用いるため、RSE を採用しないと冷却能力が追いつかない。RSE は LCGT にとって非常に重要な技術である。

ところで、量子的位相揺らぎとは何であろうか。

レーザー光の揺らぎを量子レベルまで安定化したものだとすると、それはレーザー側に戻ってしまい、光検波器には入らない。すなわち、量子雑音の元となる揺らぎは光検波器側から入射する電場の揺らぎということになる。光検波器側からレーザー光を入射するわけではないので、この電場は真空場である。真空場が干渉計に入射し、差動信号と共に戻ってくる。真空場の揺らぎの位相成分がショットノイズを生み出す。また、揺らぎの振幅成分は、レーザー光と結合し、干渉計の鏡に差動の輻射圧を与える。レーザー光の出力を上げたり、信号を増幅したりすると、輻射圧も同時に大きくなり、さらに鏡の動きに対する応答も上がるので、輻射圧雑音は信号よりも顕著に増えることになる。ショットノイズが下がって輻射圧雑音上がるため、量子雑音全体としては、パワーを上げるだけでは超えることができない限界、標準量子限界が存在する。この標準量子限界（Standard Quantum Limit = SQL）はハイゼンベルグの不確定性原理から要請されるもので、次式で与えられる。

$$S_{SQL} = \frac{8\hbar}{m\Omega^2}$$

ここで $\hbar$ はディラック定数（プランク定数を 2π で割ったもの）である。この SQL を用いて、量子雑音のパワースペクトルは次式で与えられる。

$$S_x = S_{SQL} \times \frac{K^2 + 1}{2K}$$

ただし

$$K = \frac{8\omega_0 I_{BS}}{mL^2\Omega^2(\Omega^2 + \gamma^2)}$$

であり、 ω_0 はレーザー光の角周波数、 γ は腕共

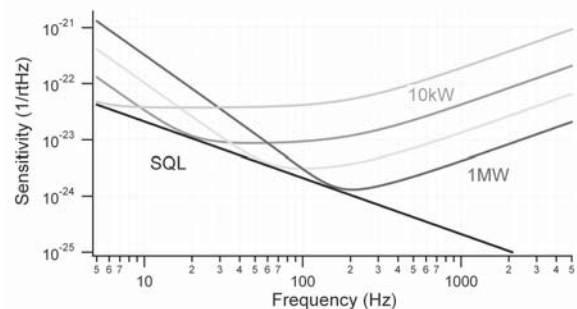


図5：異なる腕内パワーでの量子雑音と SQL

振器のカットオフ角周波数である。パワースペクトルは K に反比例するショットノイズと K に比例する輻射圧雑音の自乗和で書かれており、 K を変えても S_{SQL} を超えることはない。

重力波検出器にとって、SQL を超える感度が実現可能かどうかは非常に重要なテーマである。現在までに SQL をスペクトルで確認した例はないが、理論的には SQL を超えることは可能であると考えられており、その手法を量子非破壊計測 (Quantum non-demolition = QND) と呼ぶ。いくつかの方法が考案されているが、ここでは、QND もしくはそれに準ずる技術として、LCGT に導入が計画されている、Back-action Evasion (BAE) と Optical spring の 2 種類を簡単に紹介する。

まず BAE は、量子制御によって輻射圧雑音を相殺するというアイデアである。ショットノイズは真空場の位相揺らぎが光検波器で直接読み込まれて現れる雑音で、輻射圧雑音は鏡の運動を介して現れる雑音であったが、それは信号取得を位相方向で行なっているからであり、振幅方向に少しずらしてやると、振幅揺らぎも光検波器で直接読み込まれる雑音として現れる。輻射圧雑音が低い状況でこのようなことを行なうと、ショットノイズが増える結果となるのだが、輻射圧雑音が高い状況では、すらすら角度 ($=\zeta$) をチューンすることで、直接の雑音と鏡を介して現れる雑音とを相殺することが可能である。これはいわゆる量子制御の一種と考えることができる。輻射圧雑音の源である振幅揺らぎを別の検波器で測定してから、輻射圧雑音を相殺しようとすると、検波時に量子状態が破壊されてうまくいかないので、量子状態を破壊しないために、同時に測定

するわけである。BAE を導入した場合の量子雑音パワースペクトルは次式ようになる。

$$S_x = S_{SQL} \times \frac{(K - \tan \zeta)^2 + 1}{2K}$$

ここで $\tan \zeta = K$ となるように ζ を選ぶと、ショットノイズだけのときと同じ式になり、SQL を超えることが分かる。ただし、上記の K に周波数依存性があることから、うまく相殺するのは特定の周波数だけであり、SQL を超える周波数帯も限られる。また、干渉計の光学ロスが真空場のコヒーレントな加減算を妨げるため、輻射圧雑音があまりに高い状況では相殺はうまくいかない。このあたりに注意して干渉計のパラメタを設定する必要がある。

もう一つは、輻射圧により光のパネを構成し、重力波に対する干渉計の感受率を上げて、SQL を超えるという手法である。RSE の説明で、シグナリサイクリング共振器を反共振に設定したが、これを共振でも反共振でもない中間的な状態にする (デチューンする) と、位相信号として生み出された重力波信号が、振幅と位相の混合信号として干渉計に再入射することになる。すると、振幅成分がレーザー光と結合して輻射圧で鏡を差動に振ることになる。鏡の運動は再び位相信号を生み出し、信号のループができる。これが Optical spring であり、その共振周波数付近では信号への応答が大きく増幅される。鏡の運動を測定するという意味では、特別な QND 技術を導入しているわけではないが、重力波が及ぼす外力に対する鏡の応答が変化しているため、自由質点に対して定義された SQL を超えることが可能である。

BAE や Optical spring は aLIGO や AdVirgo でも導入が検討されている技術であるが、干渉計制御などの難易度が上がることが懸念され、少なくとも最初の段階では採用されない方向で干渉計設計が進められている。LCGT でもそれは同じことであるが、冷却により熱雑音が下がり、量子雑音軽減の利得が他の検出器より大きいと、比較的早い段階での導入が予定されている。

干渉計設計

これまで説明してきた雑音の特性をふまえ、そして雑音軽減化に伴う問題も考慮しながら、干渉計の

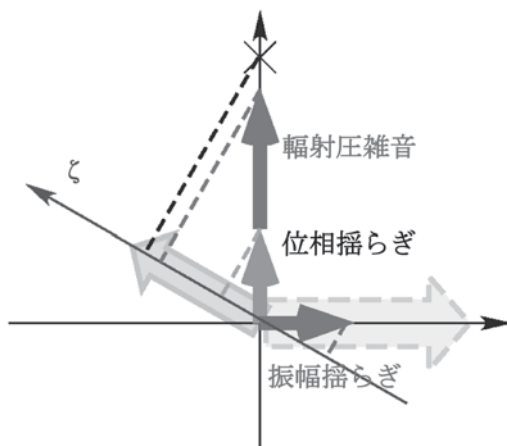


図6：信号取得角を0度からずらして、振幅揺らぎを輻射圧雑音と同時に読み込み、相殺する

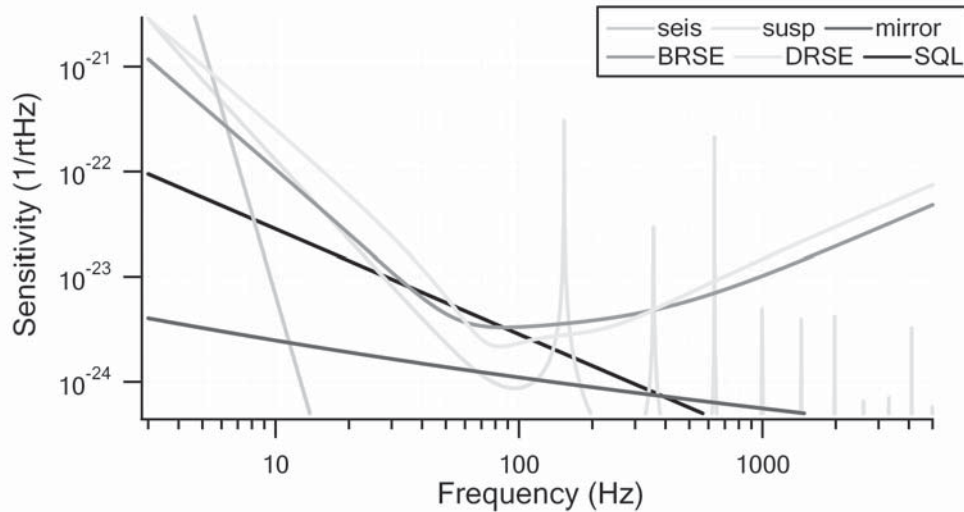


図7：LCGTの感度を制限する雑音スペクトル

設計が行なわれる。鏡の反射率と曲率、サスペンションワイヤーの径、共振器長、制御に用いる側帯波周波数、などなど決定すべき項目は様々で、またこれらのパラメタが複雑に絡み合っている。

まず、サファイアファイバーを介して移動できる熱量がおよそ1W程度と決まっている。これだけの熱を移動させるにはファイバー径が1.8mm程度はないといけない。径を小さくすると、断面積が減るだけでなく、ファイバー表面でのフォノン散乱により熱伝導率も下がり、熱移動量は一気に悪くなる。そしてこれ以上太くすると、鏡の重量30kgに対してファイバーが太すぎて、懸架系熱雑音が急激に大きくなる。ファイバーを長くしたり、鏡の設定温度を上げたりすることで、もう少し熱移動量を上げることも可能だが、熱雑音は逆に増えてしまい、改善の余地はほとんどない。

鏡での熱吸収を1W以下に抑えるために鏡の反射率が決定される。LCGTが目標とする、地球から200Mpcの距離にある中性子連星から重力波をとらえるような感度を達成するには、腕内パワーが400kW程度はないといけない。鏡の表面の吸収を0.5ppmと見積もると0.2Wの熱吸収が生じる。そしてサファイア基材は1cmあたり20ppmの吸収があり、15cmの鏡は往復で600ppmの光を吸収してしまう。ITMの反射率が99.6%だと、ITM基材を透過する光量は400Wになり、0.24Wの熱吸収が生じることになる。結果として合計0.44Wの熱を移動せねばならず、安全係数2を入れてぎりぎりのところである。腕共振器を光が一周したときの光学

損失を合計100ppmと見積もると、腕共振器の反射率は90%となり、PRM反射率を90%にするとパワーリサイクリングゲインはおよそ10となる。腕で共振するキャリア光が80W含まれるようなレーザーを用意すれば、以上のパラメタで要求値を満たせることになる。SRMの反射率については後で述べる。

ITMとETMの曲率を決めると鏡上のビーム径が決まり、また基本モード以外の空間高次モードがどれだけ腕内で共振するかが決まる。両方の鏡でビーム径が同じになるようにすると、LCGTでは曲率が共に7100m、ビーム半径が3.5cmになるようにしている。これは、高次モードが共振から十分離れるということから決められている。ビーム半径を大きくして熱雑音を下げる余地が残っているが、低温化で熱雑音が十分下がっているので、共振器の安定化を優先する。例えば曲率を7100mの代わりに20160mにすると、ビーム径は4.4cmになる。これならば鏡の径に対する割合がaLIGOの場合と一緒である。また、7100mの代わりに1900mにすると、ビーム径は3.5cmで等しく、高次モードの共振具合については同じになるが、輻射圧による鏡の姿勢不安定性という問題に関する要求値が楽になり、一方で鏡の機械共振と光のモードとの結合に関する要求値が厳しくなる、という違いが生じる。現在のところ7100mの方を選択してデザインが進められている。PRMとSRMの曲率は、そのままだとITMとほぼ同じになるが、リサイクリング共振器内に折り返し型望遠鏡を入れるという案が浮上して

おり、詳細はまだ決定していない。PRM や SRM と ITM の曲率が近いと、空間高次モードが共振しやすくなり、僅かなモードずれがメインビームの出力を大幅に下げることにつながる。LCGT では腕が安定共振器なので事情が異なるかもしれないが、aLIGO などでは望遠鏡の導入が必須と考えられている。

PRM、SRM、ビームスプリッター (BS)、ITM の間隔を何 m にするか、というのは、干渉計の制御法と関わっている。重力波を検出するためのキャリア光の他に、2 周波の制御用側帯波 (SB) が用意されており、これらの組み合わせで、第二世代検出器の 5 自由度が正しい動作点に制御される。2 周波の SB は PR 共振器で共振し SR 共振器で共振しないものと、両方で共振するものとに分けておく。どちらも腕共振器では共振しない。このコントラストを利用して PRM と SRM の位置、BS と両 ITM との間隔を制御する。これらの制御信号が十分にとれない状態で干渉計を動作させると、フィードバックされたショットノイズが PRM や SRM など動かすことになり、循環して重力波信号に対する感度を悪化させかねないので、適切な制御法の開発は干渉計設計の重要な部分である。腕共振器の同相モードはレーザー側に戻ってくるキャリアとどちらかの SB のビートをとって制御する。この自由度はレーザーの周波数揺らぎと区別がつかず、まとめて 1 つの自由度として扱う。腕共振器の差動モードは重力波信号を含み、レーザーと反対側のポートへ漏れ出す。両腕の光学損失が完全に同じ場合は、こちら側のポート (ダークポート) には片方の SB と信号しか漏れてこないが、実際には損失差により僅かなキャリアが漏れてくる (コントラストデフェクト)。第一世代検出器ではダークポートで SB とビートさせて差動信号を得ていたが、第二世代検出器では、アウトプットモードクリーナーと呼ばれる短い光共振器で SB とキャリア成分を分離し、SB を使わずに信号を取得する。両腕に差動で 1pm 程度のオフセットを加え、キャリアの DC 成分がダークポートに漏れるようにして、これを参照光として差動信号を得るのである。このとき、振幅成分であるコントラストデフェクトと位相方向のオフセット光とのバランスを調整すると、先述のものをチューンすることができる。コントラストデフェクトは干渉計を建設するまでどれくらいになるか正確には分からない

が、 $\pm 15\text{ppm}$ 程度の損失差だと、適度な光量の参照光を準備することができる。

さて、SRM の位置制御についてももう少し解説しておこう。共振器の制御信号は Pound-Drever-Hall 法と呼ばれる手法、すなわち共振する光と共振しない光を共振器の反射ポートでビートさせる手法で得られる。通常は動作点付近で線形信号を返し、かつなるべく応答が大きい設定が望ましい。PR-SR 共振器の場合、PRM と SRM の間に ITM と BS による Michelson 干渉計が挟まった格好になっている。ITM-BS 間の距離が 2 つの ITM で $\Delta \ell$ だけ異なると、中央の Michelson 干渉計は反射率 $\cos(\omega_m \Delta \ell / c)$ をもつ鏡のように振る舞い、PR-SR 共振器は 3 枚の鏡による結合共振器となる。SRM に対する応答を上げるためには、結合共振器が片方の SB にとって critical coupling になるように $\Delta \ell$ をチューンすればよいことが分かっている。当初は aLIGO も LCGT もそのようなデザインだったのだが、最近になって応答を多少犠牲にしてでも線形領域を広げるという方針が変わった。SR 共振器の制御の線形領域を広げるということは、すなわち広帯域型 RSE からデチューンド RSE へ制御系の変更だけで移行できるということである。重力波のファーストデテクションは、存在が確実視されている中性子連星をターゲットにする予定で、RSE の帯域は中性子連星に合わせて最適化される。しかしその後、パルサーや超新星爆発などにターゲットを変更する場合、広帯域型に変更したり、各々のターゲットに最

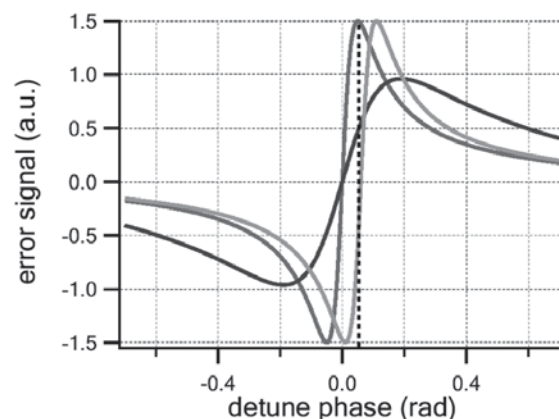


図 8 : SRM 制御の誤差信号 (概念図)。赤は広帯域 RSE の場合で、デチューンが 0 rad の点で誤差信号が 0 になる。緑はデチューンが 0.05 rad 付近で誤差信号が 0 になる。青は線形領域が広く、誤差信号にオフセットを加えれば広い範囲で動作させられる。

適化したり、そのような自由度を残しておくことは重要である。ITM や SRM の反射率は RSE の可変性を加味して、総合的に最もよい組み合わせを選んで決定されているのである。

プロトタイプ実験

LCGT に必要な技術は、プロトタイプ実験で確立され、準備が整っている。SAS は国立天文台の TAMA300 に組み込まれ、安定に動作している。低温化による熱雑音軽減は神岡に建設された 100m の干渉計 CLIO で確認された。RSE の動作は国立天文台の 4m プロトタイプで確認され、伝達関数測定により信号増幅も検証されている。海外でも日本人が活躍しており、カリフォルニア工科大の 40m プロトタイプで RSE 関連の様々な実験が行なわれている。輻射圧雑音や標準量子限界の観察は、いまだ成されていないが、小型鏡を用いた実験が各地で行なわれている。これらのプロトタイプ実験による知見の蓄積と技術の向上により、大型検出器の成功がもたらされるのである。

第三世代検出器への道

第一世代検出器として、LIGO、Virgo、GEO を比較してみると、デジタル制御を導入するなどして細かな雑音を除去し、いち早くデザイン感度に到達して、重力波検出器開発の中心的役割を果たしている LIGO に対し、LIGO より遅れたが、第二世代で

も通用する大型の防振装置を開発して低周波の感度を大きく改善した Virgo、LIGO や Virgo と異なる戦略をとり、すでに SRM を導入している GEO、とそれぞれが特徴をもっている。そして、aLIGO や AdVirgo といった第二世代干渉計は、LIGO のデジタル制御、Virgo の防振装置、GEO の SRM、と第一世代の技術を結集した構造となっている。LCGT はこれらと並び、第二世代重力波検出器に属するが、低温化、地下建設、量子非破壊計測、など第三世代検出器に期待される先進技術を盛り込んでおり、第 2.5 世代検出器であると言っても過言ではない。LCGT は第三世代へ向けての架け橋としての役割も期待されていると言えるだろう。

では、第三世代に向けて解決しなければならない点は何かという、熱の問題である。LCGT はサファイアの熱吸収が入射パワーを制限している。冷却により熱雑音を下げることができるとはできるが、入射パワーが低いために散雑雑音が多い。第三世代検出器計画 Einstein Telescope (ET) では、この問題を解決するために、基材をサファイアではなくシリコンにすることを提案している。シリコンは、これまで重力波検出器で使われてきた波長 1064nm のレーザーを透過しないため、LCGT での採用は検討されていなかったが、ET ではシリコンの使用を念頭において、波長 1550nm の高出力レーザーの開発を始めており、近い将来に 100W クラスの光源が完成すると見られている。シリコン基材の 1550nm 光の吸収はほぼゼロであり、熱吸収はコーティングによるものだけになる。ET ではさらに帯域分割 (Xylophone 型と呼ばれる) により熱問題の回避を検討している。要するに 2 台の検出器を用意し、片方は低温干渉計でレーザーは低出力にして低周波の感度を上げ、もう片方は常温で高出力にして高周波の感度を上げるのに用いるのである。ちなみに、帯域分割という考え方は、実は第二世代でも適用できる。高周波の感度を他の検出器にまかせてしまえば、LCGT は低周波でよりよい感度を実現することができる。ファーストデテクションが成就すればそのような話も出てくるかもしれない。データだけでなくハードウェアの面での本格的な国際協力ということになるだろう。

もう一つ、第三世代に向けて期待されている先進技術は、スクイーミングである。すでにドイツで重力波観測帯域内での 12dB のスクイーズ生成に成功

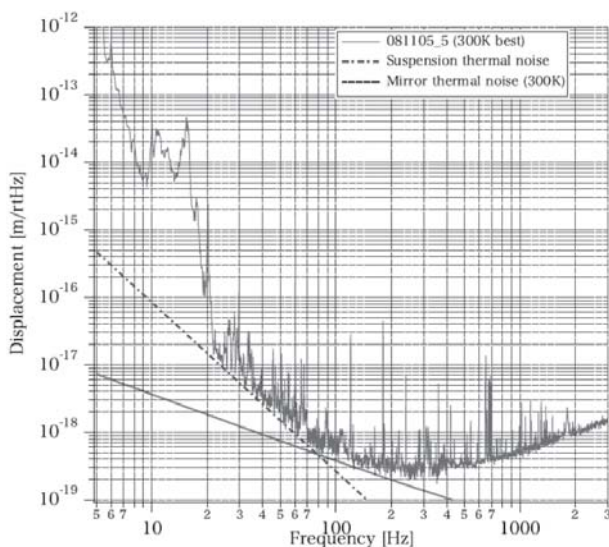


図 9：低温干渉計 CLIO による熱雑音軽減実験。このグラフは、常温での感度が熱雑音で制限されていることを示し、この後、低温化による熱雑音軽減が確認された（結果は別論文に掲載予定）。

しており、GEO-HF では重力波検出器にスクイーズを入射してショットノイズを改善する実験が開始されている。スクイーズはレーザー出力を上げずにショットノイズを改善するという点で、熱問題を回避する手段の一つである。さらに、スクイーズ場を共振器に入れ、適切な周波数依存性をつけてやることで、高周波ではショットノイズを、低周波では輻射圧雑音を軽減するというアイデアがあり、ET ではそれを採用する予定になっている。LCGT でも、将来的にはスクイーズの導入を検討する可能性もあるだろう。

最後に

本稿では、最先端研究基盤事業に採択された LCGT の意義と今後の見通しを紹介した。干渉計技術に関することをメインに執筆したが、設計など細かい点は今後、時々刻々と変化していくと思われる。これまで参考文献は特に記載しなかったが、詳細に関しては、LCGT レポート『大型低温重力波望遠鏡 (LCGT) 計画—設計文書 第 3 版—』(LCGT Collaboration, 2009/11/25) を参照してほしい。なお、図 3 は上記文献より借用した。

本稿の執筆に際して、カリフォルニア工科大の山本博章博士と大阪市立大の神田展行教授に多大なご協力をいただいたので、感謝いたします。また、図 9 は東京大学宇宙線研究所の内山隆助教に提供していただきました。感謝いたします。