

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05447

研究課題名(和文) 重力波検出器高感度化のための鏡コーティング熱雑音直接測定

研究課題名(英文) Direct measurement of mirror coating thermal noise for improving the sensitivity of gravitational wave detectors

研究代表者

麻生 洋一 (Aso, Yoichi)

国立天文台・重力波プロジェクト推進室・准教授

研究者番号：10568174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低温において、コーティング熱雑音の直接測定を高精度かつ迅速に行える装置の開発を行ってきた。重力波初観測以来、重力波天文学は急速な発展を遂げているが、さらなる検出器感度の向上を目指すためには、100Hz 付近において感度を制限しているコーティング熱雑音を低減させる必要がある。KAGRAのような低温検出器で使えるコーティングを選定するために、本研究では低温光共振器を用いたコーティング熱雑音測定装置の開発を進めてきた。振動による弾性変形のシミュレーションや、光学設計最適による装置設計を行った。また、低温クライオスタットの構築、単結晶シリコン共振器の製作、入射光学系の構築などを完了した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we worked on developing a system to directly measure coating thermal noise at low temperatures quickly and with high accuracy. Since the first direct detection of gravitational wave, the gravitational wave astronomy has expanded rapidly. In order to further improve the detector sensitivity, we need to reduce the coating thermal noise, which limits the sensitivity around 100Hz. In order to select good coating technology for cryogenic interferometers like KAGRA, we have been developing a coating thermal noise measurement system utilizing cryogenic optical cavities. Through the analysis of elastic deformation of the cavities by seismic vibrations, optimization of optical design and so on, we have designed the system. We then constructed a cryostat, optical cavities made of monocrystalline silicon, input optics system and so on.

研究分野：重力波天文学

キーワード：重力波 熱雑音 誘電体多層膜コーティング

1. 研究開始当初の背景

当時、日本の KAGRA 計画を始めとして次世代レーザー干渉計型重力波検出器の建設が進められていた。その後、LIGO によって重力波の初検出が達成されたが、検出可能な重力波イベントの数を増やし、より多くの天体物理学的情報を引き出すためには、さらなる検出器の高感度化へ向けた研究が重要になる。KAGRA は世界に先駆けて低温動作を行う干渉計であるが、それでもその感度は熱雑音によって制限されてしまう。従って、さらなる高感度化には鏡熱雑音の低減が必須となる。また、次世代光周波数標準用のレーザー周波数安定化や、巨視的量子測定等のレーザー精密計測実験においても鏡の熱雑音は精度を制限する主要因であり、その低減技術が求められている。

鏡の熱雑音の中でも、高反射率鏡を実現するために施される誘電体多層膜コーティングに起因する熱雑音はその寄与が最も大きい。しかしその大きさは、成膜条件、コーティング材質等によって、大幅に変わる。そのため現在、様々な新しいコーティング技法が提案されている。従来、これら新手法の性能は機械的 Q 値の測定による間接的推定しか行われてこなかった。しかし、真の熱雑音量を評価し、最適な技法を選択するためには、熱雑音の直接測定が不可欠である。低温におけるコーティング熱雑音の直接測定は未だになされた例がなく、これが可能な装置の開発が強く求められていた。

2. 研究の目的

鏡の熱雑音は、次世代重力波検出器の主要な雑音源であり、検出器感度をさらに高めて重力波天文学の可能性を広げていくためには、その低減が必須である。本研究では、次世代重力波検出器の動作温度である低温において、鏡の熱雑音の中でも特に支配的な、誘電体多層膜コーティングに起因する熱雑音の直接測定を世界で初めて達成することを目指す。この装置は常温から低温まで広い温度範囲で熱雑音の直接測定が可能であり、測定結果をコーティング作成プロセスにフィードバックすることで、最適なコーティング技術を確立する。次世代光周波数標準など他分野への波及効果も期待される。

研究代表者はこれまで、理化学研究所における光格子時計用超高安定レーザー光源開発の一環として、単結晶シリコン製の低温光共振器を開発してきた。現在までに、この装

置は温度 4K での動作確認と、エラー信号評価で 10^{-18} の安定度に到達可能であることが示されている。本研究ではこの成果に基き、同様のクライオスタットを用いたコーティング熱雑音直接測定装置を開発する。これまでに培った低温シリコン光共振器の技術を応用し、小型の共振器 2 台を同一クライオスタット内に設置することで、これまで問題になってきた多くの雑音源を同相除去し、常温から 4K までの幅広い温度範囲で熱雑音を直接測定可能な装置を製作する。この装置を用いることで、様々なコーティング技法によるミラーの熱雑音を直接測定・比較することが可能になる。これによって、提案されている様々な手法の中から最適なコーティング技術を選択可能になる他、測定結果を成膜過程へとフィードバックすることで、さらに低雑音のコーティング技術開発を目指す。

3. 研究の方法

低熱雑音コーティングの開発には、熱雑音を直接測定可能な装置が不可欠である。本研究では (1) 常温から低温までの測定が可能、(2) 様々な手法を試すために鏡の交換が容易、(3) 小型で迅速な測定が可能、という条件を満たす熱雑音測定装置の開発を目指した。

光共振器の長さはコーティング熱雑音によって常に揺らぐため、その共振周波数も揺らいでいる。本実験の原理は、2 台の光共振器の共振周波数を比較することで、コーティング熱雑音の大きさを測定することである。2 台の共振器は同一のクライオスタット内に設置され、同一のレーザーを用いて共振周波数の測定を行う。そのため、温度揺らぎによる熱膨張の影響や、レーザー周波数揺らぎの影響は測定結果から同相除去される。一方で、熱雑音は 2 台の間で無相関のため除去されず、比較測定によって熱雑音の信号のみを取り出すことが可能になる。

光共振器は長さ 5cm の単結晶シリコン製で、円筒両端にこれも単結晶シリコン製の鏡をオプティカルコンタクトして製作する。鏡は専用の治具を使って取り外すことが可能で、様々なコーティングを施した鏡を交換ながら測定することが可能である。単結晶シリコンは低温において極めて高い機械的 Q 値を持つため、鏡基材の熱雑音を低く抑えることができる。そのため、コーティングの熱雑音のみを選択的に測定することが可能になる。

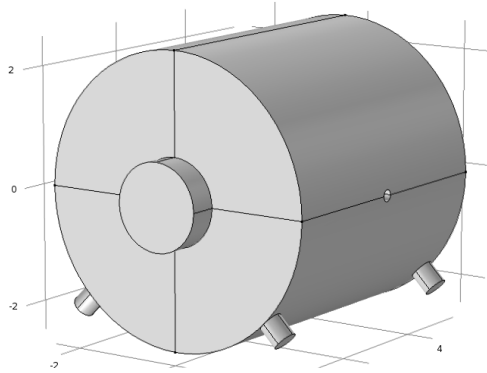


図 1: 光共振器の支持方法

2 台の光共振器は低振動パルス管冷凍機を用いたクライオスタット内に設置され、熱輻射の侵入を避けるためにアルミ製シールドで囲まれる。光学窓を通じて真空槽内に導入されたレーザーの周波数は、片方の共振器に共振するようにフィードバック制御される。このレーザーを用いて、もう一方の光共振器の共振周波数を測定することで、比較測定を行う。

4. 研究成果

本研究では、低温コーティング熱雑音測定装置の、設計最適化を行い、その過程で必要性が判明した低温防振装置の設計を完了した。さらに、単結晶シリコン製光共振器の製作が完了し、入射光学系を構築した。

(1) 低温熱雑音測定装置の雑音見積もり

本研究で開発する装置では、熱雑音による微小な共振器長変動を測定することを目指す。しかし、実際には熱雑音以外の原因で共振器長が変動する、もしくは変動するようになってしまう雑音源が複数存在する。設計した装置に対して、雑音の見積もりを行い、その結果を設計にフィードバックすることで、熱雑音の信号がよりハッキリと測定可能であるような設計最適化を行った。

光学設計と散乱雑音

コーティング熱雑音は、鏡表面のランダムな形状変形である。レーザーを感じる反射位相の変化は、鏡表面におけるビームスポット領域内での変形を平均したものとなる。従って、ビームスポットが大きいと、ネットでの位相変化は小さくなってしまふ。そのため、コーティング熱雑音の測定装置としては、できるだけビームスポットサイズを小さくする必要がある。光共振器の鏡曲率として、ビームスポットサイズができるだけ小さくなり、かつ高次モードが縮退しないものを選択した。また、本装置の測定感度を制限する散乱雑音についても計算した。

各種熱雑音

装置を設計するためには、まず目標とする

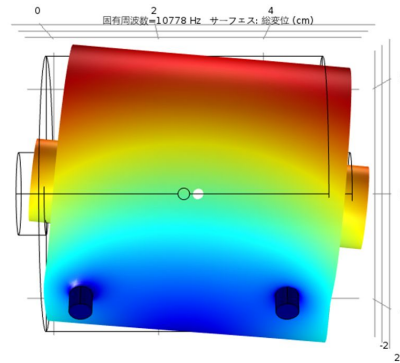


図 2: 有限要素解析による光共振器の弾性変形

コーティング熱雑音のレベルを知る必要がある。また、コーティング以外に、鏡基材やスペーサーの熱振動で生じる熱雑音もある。これらは今回の実験では雑音となるため、できるだけ低減する必要がある。これら熱雑音の推定方法としては、Levin の方法と呼ばれる計算手法を用いた。この手法ではまず、レーザーが鏡表面の変形(反射位相)を検出する際のウェイト関数であるビームパワーのプロファイル(ガウス分布)で鏡表面を押したたき、系に生じる弾性変形と各部位におけるエネルギーの蓄積を計算する。この蓄積されたエネルギーの一部は材質固有の内部損失によって熱浴へと散逸される。この散逸と、機械的揺動力の関係を定めたのが揺動散逸定理である。この定理を用いることで、熱的揺動力による鏡表面の変形をトータルの反射位相変化としてレーザーが検出する量を計算することができる。実際の計算においては、有限要素法によって共振器の変形とエネルギー蓄積量を計算した。

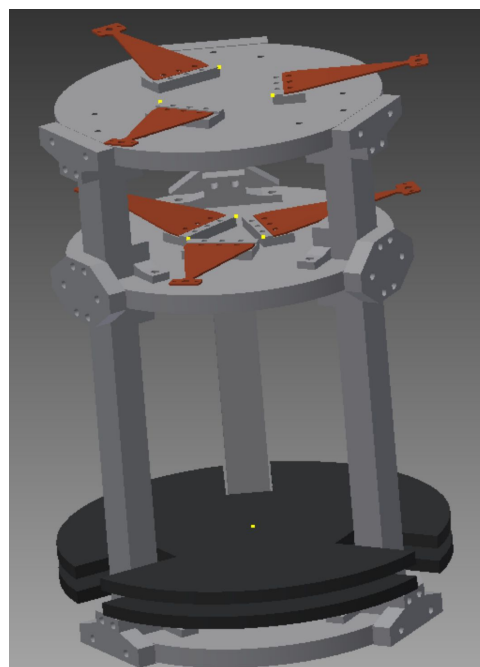


図 3: 低温防振装置の CAD 図

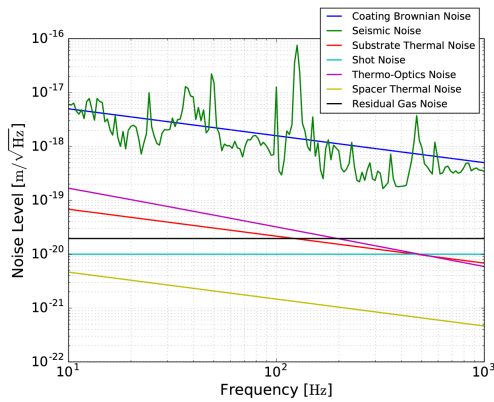


図 4: 推定された雑音

地面振動

地面の振動が光共振器に伝わると、弾性変形を誘起する。この変形によって共振器長が変化してしまうと、熱雑音と区別することができない。そのため、この弾性変形を最小化するような共振器の支持方法を検討する必要がある。図 1 に示すような 4 点で共振器を保持することを仮定し、支持点の位置によって弾性変形量がどのように変わるのかを有限要素解析によって計算した(図 2)。弾性変形によって共振器長が変化する効果には、実際に鏡の中心間の距離が伸縮するものと、鏡の角度が変化することで共振器長が変化するものの 2 通りが存在する。このうち前者は、直近に設置された 2 つの共振器で同様な変形を起こすため、同窓雑音除去が期待できる。一方で、後者は、ビームスポットが鏡中心からどちらにどれだけずれているかによってその量と符号が変わる。ビームスポット位置のずれは共振器製作時の工作誤差によって決まるので、ランダムである。従って同窓雑音除去は期待できない。

雑音見積もりのまとめ

図 4 に、この研究で見積もられた雑音をまとめた。青い線が 20K におけるコーティング熱雑音である。これに対して、地面振動による弾性変形の効果が、ほぼ同じレベルに存在する。従って、このままでは熱雑音の測定ができない、すなわち防振装置が必要であることがわかった。

(2) 低温防振装置の設計

低温において、動作する防振装置の設計を行うにあたって、100Hz における防振性能目標を 1/100 以下と定めた。これは、KAGRA においてコーティング熱雑音が支配的になるのは 100Hz 付近であることと、地面振動を 1/100 に抑えれば、この周波数で十分明確にコーティング熱雑音が測定できるからである。一方で、防振装置を冷却すると、縦方向の防振バネが弾性定数の変化により跳ね上がってしまう。その効果を勘案した上で、低温でもダンピング性能などが維持できる防

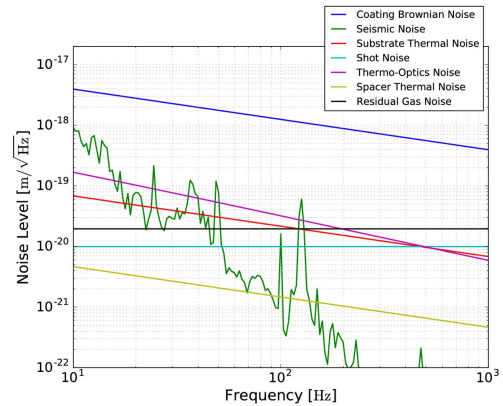


図 5: 防振装置を組み込んだ場合の雑音

振装置を設計しなければならない。図 3 に設計した防振装置の外観を示す。この装置を組み込んだ場合のシミュレーションによる雑音予測が図 5 であり、10Hz 以上においてコーティング熱雑音と比較して、他の雑音が十分小さくなることが分かる。

(3) 光学系の構築

雑音推定による装置設計の最適化に基づき、単結晶シリコン製の光共振器を製作した。また、レーザーやモードマッチング用のレンズ類、Pound-Drever-Hall 法による制御用の位相変調器など、必要な光学素子を調達した。これらを組み合わせて、入射光学系を構築した。特に、レーザーの周波数を安定化するためのプレ安定化共振器にレーザーをロックさせることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Y. Aso, et al. (231 人中 8 番目), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, *Prog Theor Exp Phys*, **2018**, 013F01, (2018), DOI: 10.1093/ptep/ptx180, 査読あり

S. Zeidler, T. Akutsu, Y. Torii, E. Hirose, Y. Aso, and R. Flaminio, Calculation method for light scattering caused by multilayer coated mirrors in gravitational wave detectors, *Opt. Express*, **25**, 4741–4760 (2017), DOI: 10.1364/OE.25.004741, 査読あり

E. Capocasa, M. Barsuglia, J. Degallaix, L. Pinard, N. Straniero, R. Schnabel, K. Somiya, Y. Aso, D. Tatsumi, and R. Flaminio, Estimation of losses in a 300 m filter cavity and quantum noise reduction in the KAGRA gravitational-wave detector, *Phys. Rev. D*, **93**, 082004 (2016), DOI:

10.1103/PhysRevD.93.082004 , 査読あり

F. E. Peña Arellano, T. Sekiguchi, Y. Fujii, R. Takahashi, M. Barton, N. Hirata, A. Shoda, J. van Heijningen, R. Flaminio, R. DeSalvo, K. Okutumi, T. Akutsu, **Y. Aso**, H. Ishizaki, N. Ohishi, K. Yamamoto, T. Uchiyama, O. Miyakawa, M. Kamiizumi, A. Takamori, E. Majorana, K. Agatsuma, E. Hennes, J. van den Brand, and A. Bertolini, Characterization of the room temperature payload prototype for the cryogenic interferometric gravitational wave detector KAGRA, *Review of Scientific Instruments*, **87**, 034501 (2016), DOI: 10.1063/1.4942909, 査読あり

N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, **Y. Aso**, and K. Tsubono, 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, *Phys. Rev. A*, **92**, 033825. (2015), DOI: 10.1103/PhysRevA.94.033822, 査読あり

〔学会発表〕(計 4 件)

谷岡諭, **麻生洋一**, 低温鏡コーティング熱雑音の直接測定 IV, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月

谷岡諭, **麻生洋一**, 低温鏡コーティング熱雑音の直接測定 III, 日本物理学会 秋季大会, 2017 年 9 月

谷岡諭, **麻生洋一**, 低温光共振器を用いたミラーコーティング熱雑音の直接測定 II, 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月

谷岡諭, **麻生洋一**, 低温光共振器を用いたミラーコーティング熱雑音の直接測定, 日本物理学会 秋季大会, 2016 年 9 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://gwpo.nao.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麻生 洋一 (ASO, Yoichi)

国立天文台・重力波プロジェクト推進室・
准教授

研究者番号 : 10568174