

平成 30 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25287052

研究課題名(和文) 第三世代重力波望遠鏡における超長光滞在時間を持つFP共振器共振導入制御

研究課題名(英文) Resonance introduction control for FP cavity that has long optical storage time for 3rd generation gravitational wave detectors

研究代表者

三代木 伸二 (Miyoki, Shinji)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：20302680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：重力波波形の精密計測を目標とした第三世代重力波望遠鏡で必要とされる要素技術の開発の一つとして、約100Hz以上のさらなる感度向上に貢献するResonant Sideband Extraction(RSE)法のRSEゲインを、第二世代重力波望遠鏡における10倍程度から、第三世代重力波望遠鏡で想定される50倍程度に増加させていくのに必要な、光滞在時間の長いFP共振器の制御に挑戦し、光滞在時間が第二世代重力波望遠鏡の約10ミリ秒を超える長さを持つFP共振器の実現に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded to demonstrated a Fabry-Perot cavity resonance that had longer optical storage time than about 10 milliseconds which was realized in the 2nd generation gravitational wave telescope. This demonstration is essential to realize the resonant-sideband-extraction method that has larger signal recycling gain, that is about 50, in the 3rd generation gravitational wave telescope (GWT) than that in the 2nd generation GWT.

研究分野：重力波物理学

キーワード：Fabry-Perot共振器 重力波 レーザー干渉計 PDH法 誘電多層膜

1. 研究開始当初の背景

新しい観察手段が発見されれば、全く新しい世界が開けることは、人類の歴史を振りかえれば疑う余地のない真実である。現代物理学においても、様々なエネルギー・波長の電磁波、様々な素粒子を発見し活用してきた。しかし、ニュートリノ以外のこれらは、非常に高温であった宇宙の始まりに近い時期を観測する手段にはなりえない。さらに、近年 WMAP の観測により、我々宇宙の主役は、既知の物質ではなく、暗黒物質・暗黒エネルギーであることが判明し、特に前者は、重力により宇宙の構造決定に大きく影響を与えている。質量を起源とする「重力」、あるいは、その時空構造が波動となって伝搬する「重力波」は、今までそのあまりの弱さのために、観測道具としての有用性は皆無であったが、このような、「重力」をキーワードとする新発見の相次ぐ 21 世紀においては、その重要性は非常に高まり、「重力波」という新たな手段により「新しい世界」が開けることが期待されている。

世界的には、第一世代と呼ばれる、キロメートルスケールのレーザー干渉計重力波アンテナにより、すでに重力波のテスト的観測が完了している。アメリカは、基線長が 4km の重力波望遠鏡 2 台 (LIGO 計画) をもち、2005 年～2007 年に、約 1/200 の確率を狙って、重力波観測を行ったが、有意な重力波信号はなかった。しかし、いくつかのガンマ線バースト現象、自転中性子星からの重力波放出に関し、物理的上限值を与えた。イタリア、フランス、オランダも、基線長 3km の重力波望遠鏡を建設し (VIRGO 計画) 断続的に感度改善と観測を繰り返している。現在は、第一世代に比べて 10 倍よい感度を持つ設計の、第二世代重力波望遠鏡が、既存の第一世代重力波望遠鏡の改良により、Advanced-LIGO、Advanced-VIRGO、GEO-HF として準備中で、日本も「KAGRA 計画」という km スケール重力波望遠鏡を、「地面振動の少ない、静粛安定な環境」である神岡鉱山内に設置し、「鏡の低温化で熱雑音を低減」する計画を遂行中である。それぞれの計画は、2017～2018 年までの完成をめざし、年に数回の中性子星合体からの世界初の重力波観測を確実に達成する予定である。

このような、第一世代の「重力波テスト観測」、第二世代による「重力波の初の直接検出」に次いで、既に、「重力波波形の精密計測」を目指した、第二世代に比べて 10 倍程度感度の良い、第三世代重力波望遠鏡のデザインが各計画で模索されている。例えば、ヨーロッパ (VIRGO、GEO を含む) では、KAGRA 計画で既に取り入れている、「地下に設置」と「鏡の低温化による熱雑音の低減」を軸に、「FP 共振器長 10km」の光滞在時間の長い FP 共振器を利用した ET 計画を既に立案し、建設サイトの調査や要素技術開発を行っている。アメリカの LIGO 計画でも、感度向上の

ための道筋を 3 パターン(「鏡の低温化」、「薄膜コーティングの低ロス化」、「スクイーミングなどによる高周波側感度の向上」など)掲げ、それぞれの手法の最大限の可能性を調査・実験・競争させることで、ベストな手法を模索中である。しかし、これらの各グループのアプローチで共通するのは、「熱雑音のさらなる低減」と「鏡の大型化」により、低周波側感度を向上する一方、高周波側は、「レーザーハイパワー化、スクイーミングや RSE ゲインの向上により」向上させる方針である。

2. 研究の目的

重力波の確実な直接検出を目指した現在進行中の第二世代レーザー干渉計型重力波望遠鏡 (KAGRA (日)、Advanced-LIGO (米)、Advanced-VIRGO (伊仏)、GEO-HF (英独)) よりさらに 10 倍程度感度を向上させることで、重力波波形の精密計測を目標とした第三世代重力波望遠鏡で必要とされる要素技術の開発を行う。特に、約 100Hz 以上のさらなる感度向上に貢献する Resonant Sideband Extraction (RSE) 法の RSE ゲインを、第二世代における 10 倍から第三世代の 50 倍化するのに必要な、光滞在時間の長い FP 共振器の制御に挑戦し、光滞在時間が第二世代の 5 ミリ秒より長い第三世代における十ミリ秒にも及ぶ FP 共振器の共振導入制御に関連する研究を行う。

第三世代の重力波望遠鏡の要素技術の内、高周波側の感度向上のために行う RSE ゲインの増大は、腕 FP 共振器の光滞在時間を、第二世代重力波望遠鏡以上に大きくすることが大前提となる。もちろん、それに伴う輻射圧雑音の上昇は、鏡の大型化や「Quantum Non Demolition」という将来技術による別の低減努力が必要になるが、そのようなトレードオフは第三世代重力波望遠鏡デザインでは避けては通れず、むしろそれを解決するのが第三世代重力波望遠鏡要素技術開発の研究課題である。そのような研究課題の中、本研究は、第三世代重力波望遠鏡では、光の滞在時間がさらに 10 倍程度の十ミリ秒オーダーになり、その FP 共振器の共振導入制御は第二世代に比してさらに困難を極めることに着目し、我々の提案する方法により、それを技術的に解決できることを立証することで、第三世代重力波望遠鏡のレーザー干渉計としての基本的動作を保証することを目的とする。

光の滞在時間が長い FP 共振器では、防振しきれない鏡のゆれによる (100 [ナノメートル/秒]程度) 鏡で反射するレーザー周波数のわずかな周波数ドップラーシフトでさえ、その位相への影響は大きく、鏡の位置と信号の線形関係が保たれた Pound-Drever-Hall (PDH) 信号が取得できない問題 (ビート問題という) が発生する。ただでさえ PDH 法では、線形信号領域が狭いという問題もあり、重力波望遠鏡開発グループの世界では、その二つ

の問題を総称して、「FP 共振器の Lock Acquire 問題」と認識し、その解決策がいくつか提案されている。その対策としては、例えば、アメリカ LIGO 計画では、干渉計に使用する波長 1064nm の倍波である 532nm のレーザーをその基本波から生成し、FP 共振器を構成する鏡の反射膜を倍波に対しては低い反射率になるように設計することで、まず倍波で共振制御に持ち込み、その後、基本波の共振に切り替える方法が提案されている（倍波ロック）また、日本等では、FP 共振器の透過光の強度信号を平方根演算することで、疑似線型信号を取得し、それを使って共振制御した後、PDH 法によって得た信号に切り替える、「オフセットロック」などが提案、実証されている。これに対し、我々は、発明されて 20 余年経過した PDH 法の常識的な利用法から離れ、今まで、無価値、かつ好ましくないと思われていた利用法に着目すること（Near Q-Phase demodulation (NQD)、および Odd-Harmonics Demodulation (OHD)と命名）で、線形信号領域が狭いという常識を打ち破り、それを拡大することが可能であることを理論的に導き、その検証を、科学研究費補助金研究・基盤 C(平成 22 年~24 年)の形でを行い、理論を実証する成果を残した。さらにその研究の中で、NQD、OHD が、先のドップラシフトのビートにすら鈍感になれるという他の手法にはない極めて特筆すべき利点を併せ持つことも理論的計算で示すことができた。

本研究では、この独創的な NQD、OHD 信号取得におけるビート攪乱耐性が、第三世代重力波望遠鏡で予想され十ミリ秒程度の光滞在時間の FP 共振器の共振導入制御においても有効であることを、第二世代重力波望遠鏡プロトタイプである基線長 100 メートルの CLIO(東大宇宙線研所有の研究施設)の光学系を改造し、この光滞在時間十ミリ秒程度の FP 共振器を構築し、それに適用することで実証する。

3. 研究の方法

神岡鉱山内に設置された、東京大学宇宙線研究所・宇宙基礎物理研究部門が中心となり開発してきた、基線長 100 メートル・低温レーザー干渉計重力波検出装置プロトタイプを利用し、(1)まず、現在、サファイア基材を利用し、反射率 0.999 で構成される CLIO の FP 共振器の鏡を同じくサファイア基材ではあるが、KAGRA の開発で培った超低吸収ロス基材を利用した、可能な限り反射率 0.99999 に近づけたものに交換し、フィネスを約 3000 から 60000 程度にすることで、光滞在時間 10 ミリ秒程度の実現を目指す。その後、(2)NQD、OHD 手法により PDH 信号が得られるような変更を CLIO に施し、(3)Digital 制御により、Lock Acquire 問題の克服を確認する。

4. 研究成果

まず、本研究で使用するサファイア鏡の本基材の調達に先がけて、テストピースによる基材の吸収率の事前検査を行った。結果、要求する吸収率が得られてないことが判明し、原因を究明し、H26 年度中のサファイア基材の入手を目指すこととした。コーティングに関しても、最高性能（低いロスと高強度）が得られるメーカーの選定のためのテストピースでの誘電多層膜の性能評価の準備を進めた。鏡の研磨に関しても、マイクロラフネス 1 オングストローム以下、形状誤差 $\lambda/20$ 以下の曲率 150m (凹面)を達成できるメーカーの選定と交渉を続けた。一方、本研究に向けて使用される低温レーザー干渉計 CLIO の干渉計の鏡懸架装置の改造を行った。既存の性能の劣るサファイア鏡の懸架ワイヤーを冷却のためのアルミのワイヤーから金属より進展性の高いボルファアワイヤーに交換し、鏡の位置安定度を回復した。またデジタル制御システムの準備も行った。デジタル入出力のための電子機器、Anti-Imaging Filters, Anti Alias, Filters, DAC adapter, ADC adapter, Binary output adapter などの整備を一部先行して行った。さらに、現 CLIO は片側平面、片側曲率 150m の Fabry-Perot 共振器だが、本研究のために、一時的に基線長は 100m のまま、両鏡とも曲率 150m の共振器として構成するため、入射ビームのビーム径を太く修正する必要があるが、この修正を既存光学系へのレンズ光学系の追加で実現するための光学設計を行い、位置及び、レンズパラメーターを決定した。

その後、熱吸収 (100ppm/cm) と、不純物の量の面でスペックを満たすサファイア鏡基材(直径 100mm、厚み 60mm)を入手した。本研磨の前段階として、全面光学研磨を行った。そのサファイア鏡基材に対し、片面は曲率 150m、面精度 $\lambda/10$ 以下、もう片面は平面で面精度 $\lambda/2$ 以下 0、面精度は両面で 1 オングストローム以下の製作を開始した。当初、石英基材の研磨で実績のある、高い表面形状精度とマイクロラフネスと速い研磨速度を両立のできる方法である、「磁性流体研磨法」を採用した。しかし、今回、石英より固い基材である本研究に必須のサファイア基材(直径 100mm 厚み 15 mm)でテスト研磨したところ、表面形状形成や研磨速度には問題がない一方、研磨砥粒の「基材へのひっかかり」と思われる深い研磨傷が、何度研磨を繰り返しても減少しない問題が発覚した。磁性流体研磨では、研磨砥粒の種類も限られ、研磨砥粒の速やかな改良が不可能なため、研磨を、「磁性流体研磨だけ」で行うことをあきらめ、よりサファイアに親和する研磨砥粒が利用できる「オスカー法」を併用することで、問題の解決の見通しが立った。このオスカー法のテスト研磨の成果をもとに本番基材である直径 100mm 厚み 60mm の丹憲章サファイア基盤に対し、片面は曲率 150m+/-0.5m、面精

度は $1/10$ 以下、面荒さ 1 オングストローム以下、片面はウェッジ平面はウェッジ角 0.5 度、面精度 $1/20$ 、面荒さ 1 オングストローム以下を目指し研磨を行い、完成した。一方レーザー干渉計をデジタル制御するための AD, DA 回路系、アンチエイリアシングフィルターなどの設計を行った。準備された、直径 100mm 厚み 60mm のサファイア研磨基盤 2 枚に対し、曲率面に対しては、有効面積 80% 以内で、 1064nm 波長用の反射率 99.995% 以上目標の薄膜コーティングを行い、ウェッジ面に関しては、 1064nm 用の無反射コーティングを施す時に同時にコートして薄膜コートの性能を見るためのテストピース基盤 10 枚を作製した。直径 25.4mm 、厚み 5mm で、基材は合成石英で、 5 枚が曲率 1m 、 5 枚が平面の仕様とした。このうち、曲率鏡、平面鏡それぞれ 2 枚づつを直径 100mm 基盤と同時にコートした。結果、直径 100mm 基盤の 1 枚について、基盤の真ん中付近の極めて重要な部位に埃状のもの付着し、目標反射率を満たせないことが分かった。その他の基盤とテストピースについては、目視では問題がなかった。テストピースの基盤で Fabry-Perot 共振器を構成し、反射率の精密測定の前準備を行った。測定方法は、 1) 入射射出パワー比較、 2) Ring-Down 法、 3) 伝達関数測定法の 3 種類を準備した。

この使用を満たさない 1 枚の基板に対し、そのやり直しについて、施工会社、施工会社の日本側代理店、我々で議論してきた。結果、やり直しの方法について、 (1) 基盤に固着している誘電多層膜を、施工業者の持つエッチング技術により剥離することとした。その剥離による、もと基盤面の形状・表面粗さの保持に関しては、今回と同様のサファイア基盤に蒸着した誘電多層膜を剥離した実験を 1 インチ鏡に対し行い、蒸着前後での基盤面の粗さ・形状誤差に大きな変化がないことが確認されたので、それを根拠に、今回の大基盤のエッチングも可能との提案を受け行うこととした。 (2) 剥離した後の基盤の表面形状・粗さについて、最初にこの基盤を研磨した日本の光学機器メーカーで再検査を行い、蒸着前のデータと比較し、同等の性能が保持されていることを確認することとした。もし、著しい変形・悪化がある場合は、再度研磨しなおすこととした。 (3) 性能が維持されていることを確認の後、再度施工業者において誘電多層膜の蒸着作業を行い、仕様を満たしているかの可否を我々側が判断することとした。一方仕様を満たしたもう一枚の鏡と同等の誘電多層膜蒸着を行ったサンプル基盤を利用した反射率の計測実験を、 (1) 伝達関数法と (2) Ringdown 法で行い、透過率が 20ppm 程度、フィネスが 60000 程度あることが判明し、本実験を行う上で十分な性能であることが確認された。

エッチングの剥離作業は、その成功の報告と、彼らが計測した表面形状誤差データの開

示後、その基盤を受けとり、最初にこの基盤を研磨した日本の光学機器メーカーで再検査を行った。結果、蒸着前のデータと比較し、同等の性能が保持されていることを確認された。問題ないことが確認されたので、直径 100mm のサファイア基盤への誘電多層膜の再コーティングを行い、欠陥のない薄膜コーティングが得られ、その反射率性能も、前回成功分と同様のものではあった。

本鏡を用い Fabry-Perot 共振器を構成し、その共振制御実験を行った。直径 100mm の大口径鏡においても、 60000 程度の Finesse が得られていることが確認され、CLIO において光滞在時間 10 ミリ秒程度が実現する性能であり、目標を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

T.Uchiyama, K.Furuta, M.Ohashi, S.Miyoki, O.Miyakawa and Y.Saito, "Excavation of an underground site for a km-scale laser interferometric gravitational-wave detector", *Classical and Quantum Gravity*, 31 224004 (2014)

C.Tokoku, et al., "Cryogenics System for the Interferometric Cryogenics Gravitational Wave Telescope, KAGRA -Design, Fabrication, and Performance Test -", *Adv. Cryog. Eng.*, 59B, pp.1254-1261 (2014)

〔学会発表〕(計 12 件)

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, "Gravitational wave physics and KAGRA", International Linear Collider Research Summer School, Kurayoshi, July (2014) (Invited Talk)

Y.Aso and KAGRA Collaboration, "大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)プロジェクトの現状", 佐賀大学, 2014 年秋の物理学会
T.Uchiyama and KAGRA Collaboration, "大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)プロジェクトの現状", 大阪市立大学, 2015 年秋の物理学会

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, "Present status of KAGRA cryogenic gravitational wave telescope", 14th International conference on topics in astroparticle and underground physics (TAUP2015), (Italy : Torino), September (2015) (Invited Talk)

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, "A new window to observe the Universe, "Gravitational Wave", The Vacuum Society of Japan, Tokai Branch. Hida August (2016) (Invited Talk)

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, "A new window to observe the Universe, "Gravitational Wave", Atomic collision society of Japan, Toyama (2016) (Invited Talk)

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, “A new window to observe the Universe, “Gravitational Wave”, Advanced Acceleration Association promoting Science and Technology, Chiyoda-ku, November (2016) (Invited Talk)

S.Miyoki, KAGRA Collaboration, “The Present Status of KAGRA”, NCTS 台湾理論物理学会 (Taiwan), December (2016) (Invited Talk)

R.Takahashi and KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)プロジェクトの現状”, 東北学院大学, 2016年春の学会

Y.Michimura and KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状”, 宮崎大学, 2016年秋の物理学会

T.Suzuki and KAGRA Collaboration, “KAGRA の現状”, 大阪大学, 2017年春の物理学会

K.Yamamoto and KAGRA Collaboration, “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状”, 宇都宮大学, 2017年秋の物理学会

〔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〕

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者 (H25 ~ H29)

三代木伸二 (MIYOKI, Shinji)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 20302680

(2) 研究分担者

(H26 ~ H29)

広瀬榮一 (HIROSE Eiichi)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号: 60587757

(H25)

大橋正健 (OHASHI Masatake)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 80213833

(H26 ~ H29)

宮川 治 (MIYAKAWA Osamu)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号: 90532680