

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01913

研究課題名（和文）低温重力波望遠鏡の高性能化のためのサファイア鏡光吸収の評価

研究課題名（英文）Evaluation of sapphire mirror absorption for improvement of cryogenic gravitational wave detectors

研究代表者

山元 一広 (Yamamoto, Kazuhiro)

富山大学・学術研究部理学系・准教授

研究者番号：00401290

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は重力波望遠鏡の性能を向上、特に低温での鏡基材（サファイア）の光吸収を低減させるために、低温での光吸収測定装置を開発し、光吸収の原因であると考えられる不純物の種類や量を測定する方法を確立させることである。寒剤を用いたクライオスタットを開発し、その性能を確認した。光吸収測定のための光学系（クリーンブースを含む）の開発を進めている。サンプル内不純物の種類や量の測定のためにサファイアサンプルの磁性の温度依存性（2K程度から常温まで）を測定した。不純物起源と思われる磁性の温度依存性を発見した。これから種類や量を解析で導出することを進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力波による天文学は近年確立された新しくかつホットな分野である。すでに他の手段では得られない様々な宇宙に関する知見を得ることができた。今後さらにこの分野を発展させるために望遠鏡の改良は必須である。この改良に対して本研究およびその後続の研究は貢献することができる。天文学は一般の人の興味をひきやすい分野であるので、科学への興味を引くことに貢献することができる。また光吸収の低減は他の精密測定分野もしくは物性においても重要であり、貢献することができる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is (for improvement of gravitational wave telescope, especially, to reduce optical absorption of cooled mirror substrate) to develop measurement system of optical absorption at cryogenic temperature and method for evaluation of impurities which could cause absorption.

We developed cryostat with liquid nitrogen and helium and confirmed its performance. We also are developing optical system to measure absorption (including clean booth).

In order to evaluate impurities, temperature dependence (between 2K and room temperature) of magnetism of sapphire samples was measured. We found temperature dependence which might be caused by impurities. We are proceeding with analysis to derive kinds and concentration of impurities.

研究分野：重力波検出器の開発

キーワード：重力波 サファイア 低温検出器 光吸収

1. 研究開始当初の背景

2015年9月にアメリカのレーザー干渉計型重力波望遠鏡(LIGO)が史上初の重力波検出を成し遂げた(2017年ノーベル物理学賞)。新たな天文学、重力波天文学、の創生である。初めて光学望遠鏡で月や木星を観測したガリレイに相当する偉業である。ガリレイ以降光学望遠鏡は暗くて遠い天体の観測のため、改良が繰り返されたように重力波望遠鏡もより遠い源からの振幅の小さい重力波を検出するために改良を重ねていくことが世界的な方針となっている。すでに欧米では将来計画の策定が始まっている。これらの将来計画では現在のLIGOより雑音を1桁程度低減することを目標とする。この雑音低減により10倍遠い天体からの重力波を捉えることができるようになり、観測できる体積(すなわち観測の頻度)は観測できる距離の3乗に比例するため1000倍にもなる。また観測できる距離が10倍になるということはほぼ宇宙の果てまで重力波で見通せることを意味し、天文学的に大きな意味を持つ。

2. 研究の目的

干渉計型重力波望遠鏡の究極的な雑音として光の量子性に起因する量子雑音と、干渉計を構成する鏡やその懸架系の熱的な振動、すなわち熱雑音がある。この2つの雑音を低減するために高パワーレーザーと鏡の冷却が必要である。この2つの技術の両立の肝となるのが、鏡基材の光吸収の低減である。具体例として岐阜県飛騨市神岡町に建設された重力波望遠鏡KAGRA(2023年5月から第4期国際共同観測(04)に参加)を考えてみる。KAGRAは鏡基材としてサファイアを採用している(図1)。現在KAGRAに設置された鏡基材の光吸収は50ppm/cmである(重力波望遠鏡のレーザーの波長は1064nm、つまり近赤外である)。これを1桁程度低減することにより、量子雑音と熱雑音を1/3倍にすることが可能となる(欧米の将来計画ではこれ以外の技術も導入することで、雑音を総計1桁低減させる)。

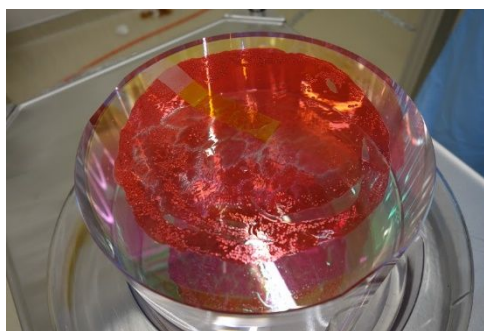


図1: 低温重力波望遠鏡KAGRAのサファイア鏡。直径22cm、厚さ15cm、質量は23kgである。現在この鏡はKAGRAに設置済みである。

光吸収の原因としては不純物が考えられる。これに関して有名な例としては光ファイバがある。光ファイバの材質である熔融石英の光吸収は不純物(遷移元素)が主原因であり、この不純物の濃度を極限まで低減することによって遠距離通信が可能となった(2009年ノーベル賞)。本研究ではサファイアなどの基材の低温での光吸収を評価する装置を開発すること、基材内の不純物の種類と濃度を評価する方法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

低温で鏡基材の光吸収を測定するためには基材を冷却するクライオスタットと光吸収を測定する光学系が必要である。これの開発を進めている。また光吸収の原因は不純物であると考えているので光吸収と不純物の対応がつけられるように、基材内の不純物の種類と濃度を評価する方法の開発も行っている。

(1)クライオスタット: R. Nawrodt et al., Cryogenics 46 (2006) 718-723を参考とした。寒剤(液体窒素とヘリウム)を使う。光吸収サンプルが設置される台(実験領域)は液体ヘリウムを通す熱交換器で冷却する。交換器内の液体ヘリウムの流量の調整と実験領域のヒーターで温度を調整(5Kから80K)できるようにする。初期冷却時間は6時間程度。温度調整後は1日の温度変化が0.1K程度であるようにする。将来の汎用性も考え、冷却スペースは200mmから300mm程度と広めにとる。光吸収を測定するために光学窓をとりつける。真空槽開閉に伴う光学系の再調整が最小限になるように構造を工夫する。

(2)光学系: 光吸収を測定するためには光を基材に入れる必要がある。この光はできるだけパワーが大きいものが望ましい。吸収した光の量を評価する方法としては温度計をとりつけてその温度上昇の速さから評価する方法(例えばJerome Degallaix et al., Journal of Physics: Conference Series 363(2012) 012008)、マイケルソン干渉計の中に入れて、温度変化による屈折率(光学的厚さ)の変化を測る方法(例えば渡部 恭平、修士論文(2012)、東京大学)がある。後者の場合、S/Nを大きくするために、チョッパーで光の強度変調をかけて、lock in ampを使用

する。これら2つの方法の光学系を開発する。

(3) 不純物評価測定：不純物の評価として磁性を利用することにした。遷移元素であるので鏡基材内の不純物は磁性を持つことが期待できる。サファイア自体は反磁性であり、温度依存性を持たないが不純物由来の磁性は常磁性で温度依存性を持つことが予想される。このため磁化の温度依存性を測定することで不純物を検出できる可能性がある。富山大学機器分析施設の磁気特性精密測定システム（SQUIDを用いて0.5Kから400Kの磁化を測定することが可能。7Tまで磁場をかけることができ、 10^{-8} emuまで測定可能。図2）を利用して遷移元素の不純物をドーブしたサファイアサンプルの磁性の温度依存性を測定した。



図2：富山大学機器分析施設の磁気特性精密測定システム

4. 研究成果

(1) クライオスタット：製作後、富山大学の極低温量子科学施設で試験を行った。まず真空引きを行いリークがないことを確認した。そのうえで液体窒素と液体ヘリウムを所定の槽に入れて冷却を行った。最低到達温度は3K程度であった。8K、15K、30K、70Kと温度を調整が可能であること、調整後温度を一定に保てることを確認した。これによって低温での光に関する物性を測定できるクライオスタットが完成した。そのあと実験室に設置した（図3）。



図3：製作されたクライオスタット

(2) 光学系：高パワーレーザーとして10Wのレーザーを用いることにした。さらにそれ以外の部品、レーザー（10W）、鏡、レンズ、ビームスプリッター、偏光板、 $1/2$ 板、 $1/4$ 板、チョップ、lock in ampなど必要な部品を全て準備した。実験室のクライオスタット（図3）の隣に光学台を用意し、そのうえに光学系を組み上げた。そのうえでレーザーの評価を行った。測定したのはパワー、偏光、ビームプロファイル、コヒーレンスである。レーザーのパワーであることと直線偏光であることを確認した。ビームプロファイルからレンズの置く場所を決めて、コリメートを行った。マイケルソン干渉計を組み、光が干渉することを確認した。様々な要素の基礎確認を行ったので、サンプルに光を通し、光吸収を測定する。

図3：製作されたクライオスタット

(3) 不純物評価測定：まず不純物をドーブしたサファイアサンプルを用意した（図4）。ドーブされたものは遷移元素である。明らかに色がついているが、これらが重力波望遠鏡のレーザーの波長である近赤外においてどのような光吸収をもつかが重要である。また不純物が同一でも色が異なる場合がある（図4の緑と青は不純物はいずれも同じ）。この差異も調べる必要がある。これらサンプルの磁化の温度依存性を測定した。結果が図5である。常温（300K）付近ではほぼ温度に依存せず、符号は負である。サファイア自体は温度依存性を持たない反磁性という知見と合致する結果である。一方低温では磁化の温度依存性が観測された。これは不純物による常磁性と考えられる。現在のこの低温での磁化の温度依存性から不純物の種類や濃度を推定する解析を進めている。



図4：不純物をドーブしたサファイアサンプル（直径20mm、厚さ9mm）。緑と青の不純物は同じである。

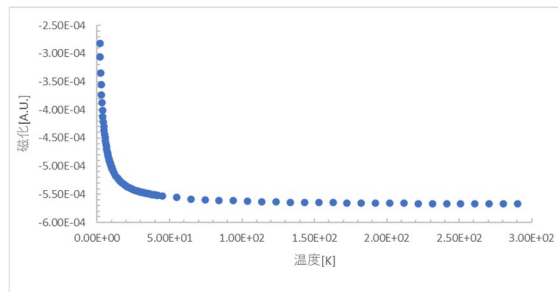


図5：不純物をドーブしたサファイアの磁化の温度依存性の測定結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Michimura Yuta, ... Ando Masaki, Yamamoto Kazuhiro, Hayama Kazuhiro, Haino Sadakazu, Somiya Kentaro	4. 巻 102
2. 論文標題 Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/physrevd.102.022008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ushiba Takafumi, ... Yamada Tomohiro, Yamamoto Kazuhiro, Zeidler Simon	4. 巻 38
2. 論文標題 Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 085013 ~ 085013
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6382/abe9f3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 K. Yamamoto
2. 発表標題 Coating mechanical loss measurement at Toyama
3. 学会等名 Virgo coating workshop (online) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto
2. 発表標題 Payload design at KAGRA and its impact to vacuum and cryogenics
3. 学会等名 The Gravitational Wave Detector Vacuum workshop (online) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yamamoto
2. 発表標題 Coating thermal noise research plans
3. 学会等名 KAGRA Future Working Group 1st open meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamamoto
2. 発表標題 KAGRA +, Next step for KAGRA
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	三尾 典克 (Mio Norikatsu) (70209724)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授 (12601)	
研究分担者	森脇 喜紀 (Moriwaki Yoshiki) (90270470)	富山大学・学術研究部理学系・教授 (13201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------