

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03681

研究課題名(和文) 折り返し光共振器を用いた低温コーティング熱雑音の直接測定

研究課題名(英文) Direct measurement of coating thermal noise at low temperatures with a folded optical cavity

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・准教授

研究者番号：10568174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：重力波検出器の主要な雑音である熱雑音を低減するため、次世代検出器では鏡を低温に冷却する。しかし、そのような鏡の表面には、時間とともに吸着分子層が形成されていき、光学ロスを増大させる。我々は折返し光共振器を用いて、低温分子層の光学ロスと、厚みを同時に測定する手法を開発した。これによって、低温分子層の吸収係数を求め、アモルファス氷の文献値とほぼ同等であることを確認した。本研究の結果、シリコン鏡を用いた次世代重力波検出器では、低温バッフルの追加による吸着層の形成抑制、CO₂レーザーを用いた吸着層の加熱脱離などの対策が必要であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、真空中で鏡表面に形成される薄膜の光学損失と、膜厚を同時に測定する手法を開発することに成功した。またこれを用いて低温鏡の表面に形成される吸着分子層の吸収係数を求めることにも成功した。これは次世代低温重力波検出器の設計に重要な示唆を与える結果である。本研究の成果を活用することで、低温バッフルや、分子層除去システムの設計を最適化することができる。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the thermal noise, which is one of the main noises of gravitational wave detectors, mirrors are cooled down to a cryogenic temperature in the next generation detectors. However, an adsorbed molecular layer is formed on the surface of such a mirror with time, which increases the optical loss. We have developed a method to simultaneously measure the optical loss and thickness of the cryogenic molecular layer (CML) using a folded optical cavity. The absorption coefficient of the CML was determined by this method, and it was found to be almost the same as the literature value for amorphous ice. The results of this study indicate that the next generation gravitational wave detectors using silicon mirrors require measures such as the suppression of CML formation by adding low-temperature baffles and/or the heating and desorption of CMLs using a CO₂ laser.

研究分野：重力波天文学

キーワード：重力波 低温 薄膜

1. 研究開始当初の背景

2015年の重力波初検出以来、重力波天文学は急速な発展を見せている。今後、重力波天文学を更に進展させていくためには、重力波検出器の高感度化を行い、より多くのイベント検出と、方向決定精度の向上を図っていく必要がある。

重力波検出器の感度を制限する支配的な雑音の一つが熱雑音である。これを低減するため、日本の重力波検出器 KAGRA や、現在計画中の次世代重力波検出器では、鏡を低温に冷却する。しかし、低温での鏡のコーティングの振る舞いや、表面に形成される吸着分子層の性質は、よく理解されているとは言い難い。本研究では、低温に冷却可能な折返し型光共振器を用いて、低温における鏡表面薄膜の性質解明に向けた研究を進めてきた。

2. 研究の目的

低温レーザー干渉計型重力波検出器において、冷却された鏡に残留ガス分子が衝突すると、エネルギーを失い、吸着される。このような吸着分子が降り積もると、一種の吸着膜を形成する。これを本研究では低温分子層(Cryogenic Molecular Layer=CML)と呼ぶ。鏡の周囲が全て低温の壁で覆われている場合、残留ガス分子は壁に吸着され、鏡の周りは極めて高い真空状態に保たれるため、残留ガス分子の吸着量は時間と共に減少する。特に、鏡周囲の壁を先に冷却しておけば、鏡への低温分子層の形成は最小限に留めることができる。しかし、レーザー干渉計の場合、鏡にレーザー光を当てる必要があり、低温システムには、そのための開口部を必ず作る必要がある。この開口部は、マイケルソン型レーザー干渉計の腕を構成する km スケールの真空ダクトに通じており、km もの長いダクトを全て低温にすることはコスト的に難しいため、常温部分へと開いていることになる。この場合、常温部分から定常的な分子流が鏡表面に当たることになり、一定の速度で低温分子層が形成され続ける。

低温分子層を構成するのは残留ガスの主成分である水分子が主である。水分子は、重力波検出器で用いられるレーザー波長においてある程度の吸収を持つため、低温分子層はレーザー干渉計に光学ロスを導入することになる。特に、次世代重力波検出器では、大型の鏡を製作するために単結晶シリコンを用いることが検討されている。しかし、シリコンは現在の重力波検出器で用いられている $1\mu\text{m}$ の波長では不透明なため、より長い波長 ($1.5\mu\text{m}$ や $2\mu\text{m}$) を利用する必要がある。こういった波長では、 $1\mu\text{m}$ に比べて水分子の吸収が大幅に増加するため、低温分子層による光学ロスがより深刻な問題となってくる。

本研究では、低温分子層が次世代重力波検出器の性能、特に冷却性能に与える影響を見積もるため、

1. アモルファス氷の光学吸収に関する文献値を用いた理論的な評価
2. 折返し型光共振器を用いた、低温分子層による光学ロスの測定
3. Cavity Enhanced Ellipsometry を用いた、低温分子層の膜厚測定

を行った。

これらの計算、測定結果から、次世代重力波検出器の設計に対する示唆を与え、またこの問題の解決方法を探ることが本研究の目的である。

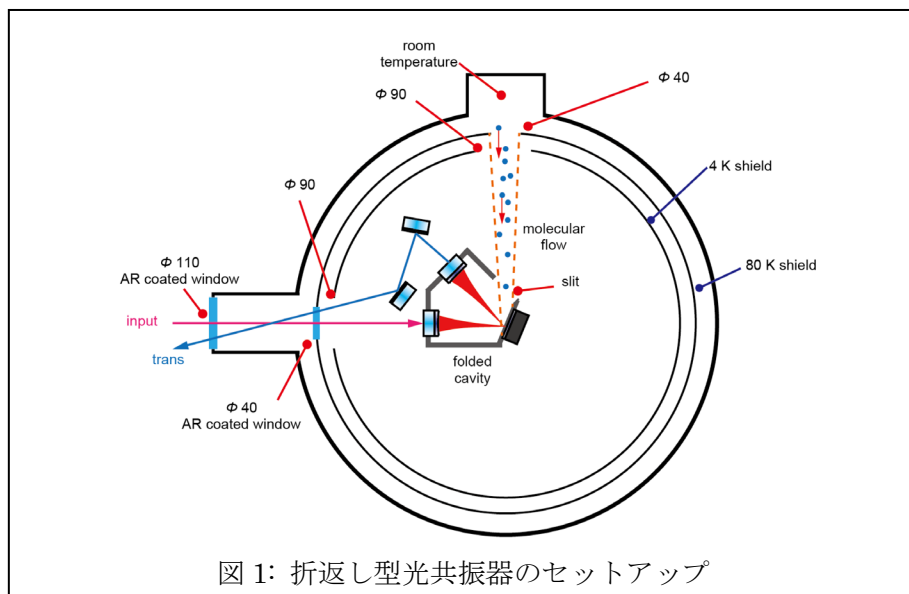


図 1: 折返し型光共振器のセットアップ

3. 研究の方法

本研究では最初に、低温分子層の主成分はアモルファス氷であると仮定し、アモルファス氷の光学吸収係数に関する既存研究の文献値から、重力波検出器における光学ロスを経もった。ここでは、nm オーダーの薄い分子層に対しても Lambert-Beer の法則が成り立つことを仮定した計算を行った。

実際の重力波検出器で形成される低温分子層は、純水に水分子だけからできているとは考えにくい。また、非常に薄い膜厚において、Lambert-Beer の法則が成り立つかどうか、疑問が残る。そこで、実際に低温鏡を用いて意図的に低温分子層を形成させ、その光学ロスと膜厚を測定する実験を行った。

具体的な実験装置は、図 1 に示すような折返し型光共振器である。光共振器を構成する 3 枚の鏡のうち、折返しに用いる 1 枚のみが、常温部分に暴露されるように、低温システムに開口部を設けておく。本実験の真空度 (10^{-4} Pa 程度) では、分子の平均自由行程は数十 m になり、実験装置よりも充分大きいので、常温部からの分子流は直線的に飛んでくる。そのため、全ての分子は折返し鏡に吸着され、他の鏡への吸着は無視しても良い。

低温分子層による光学ロスは、光共振器のフィネスを測定することによって知ることができる。フィネスとは、光共振器の共振の鋭さを表すパラメータであり、光共振器に入射する光を瞬間的に遮断した際の、共振器透過光の減衰曲線から求めることができる。まず、常温においてフィネスを測定しておく。これによって、低温分子層が全く存在しない場合の、光共振器のフィネス(鏡の透過率や、低温分子層以外の要因による光学ロスで決まる)が求まる。このフィネスを、光学ロスに焼き直しておく。次に、光共振器を冷却した状態で、フィネスを測り、光学ロスを算出する。常温における光学ロスとの差が、低温分子層によって付加された光学ロスである。冷却後のフィネスは、時間の経過とともに低下していくことが分かる。これは、低温分子層の成長によって、光学ロスが増大するからである。また、光共振器を常温に戻すと、フィネスも回復する。これは、低温分子層が昇温によって蒸発したからと考えられる。

低温分子層の光学吸収率を求めるには、光学ロスの値と同時に、形成された層の厚みを知る必要がある。これには、偏光を用いた Ellipsometry の手法を用いる。折返し鏡にレーザーはある角度 (22.5 度) を持って入射する。この時、形成された低温分子層の実効的屈折率は、偏光の向き (P か S か) によって変わる。そのため、分子層の光学厚みが P と S では異なり、光共振器の実効長も異なることになる。これは、P 偏光と S 偏光では共振器の共振周波数がズレるという効果として観測することができる。すなわち、P と S の共振周波数の差から、分子層の厚みを知ることができるのである。これを本研究では Cavity Enhanced Ellipsometry (CEE) と呼ぶ。

実際の重力波検出器においてどの程度の速度で分子層が形成されるかは、想定される真空度と鏡が常温部を見込む立体角から求めることができる。そこで本研究では、次世代重力波検出器計画の ET と Voyager における分子層の形成速度を、分子流シミュレーションソフトによって計算した。その結果と、実験で求めた低温分子層の光学吸収率を組み合わせることで、各次世代計画において低温分子層における熱吸収量が冷却能力を上回るまでにどのぐらいの時間がかかるかを見積もる。

4. 研究成果

まず、アモルファス氷吸収率の文献値を用いた理論計算では、1nm 程度の薄い低温分子層であっても、ET や Voyager の冷却能力を超える発熱を生み出す可能性があることが分かった。[1] 次に、折返し光共振器を用いて低温分子層の光学ロスと厚みの変化を、約 10 日間に渡って測定

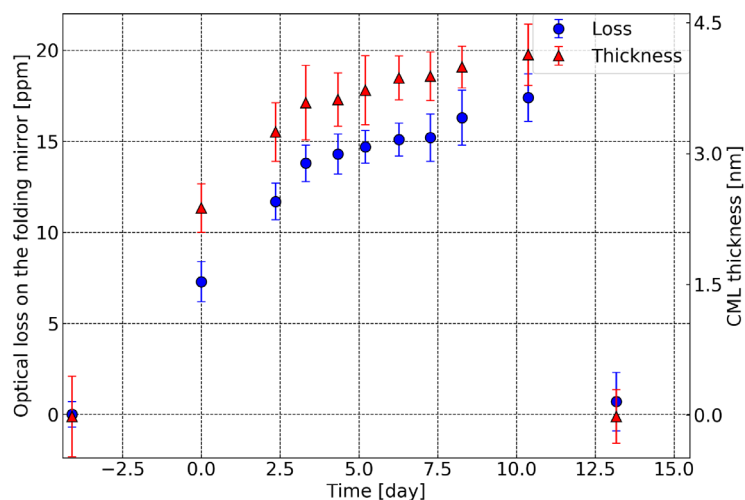


図 2: 光学ロスと低温分子層厚みの時間変化

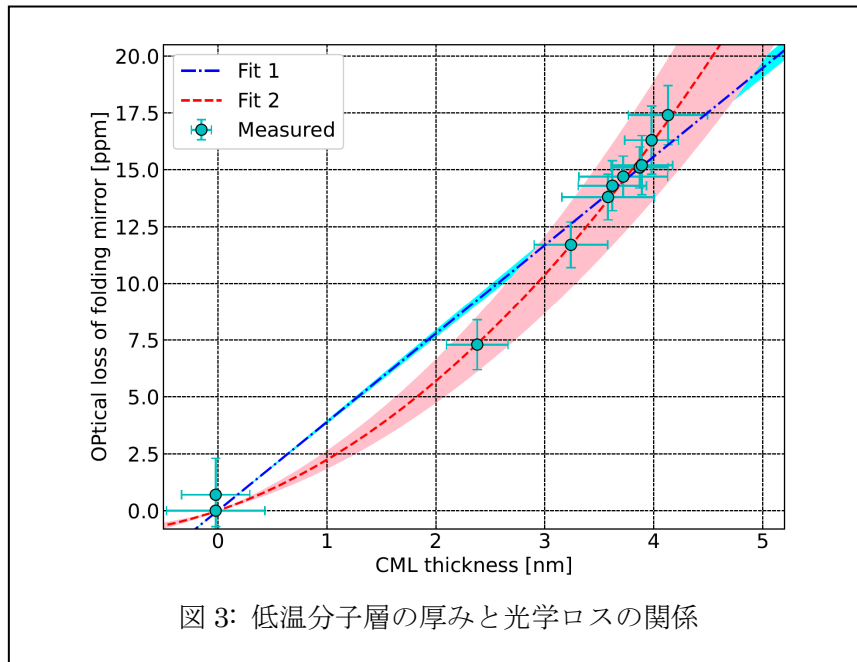


図 3: 低温分子層の厚みと光学ロスの関係

した(図 2)。その結果、光学ロスの増加と CEE で測定された膜厚の間には良い相関が得られた。[2]またこの 2 つの間の比例関係から、光学吸収係数を求めた(図 3)。膜厚が 2nm よりも大きい領域では、良い比例関係が見られるが、膜厚 0 の付近を考えると、一本の直線には乗らないことが分かる。これは、膜厚の小さい領域では、Lambert-Beer の法則からズレが生じるためではないかと推察される。膜厚の大きな領域で得られた比例関係から求めた光学吸収係数は、アモルファス氷の文献値とよく一致した。従って、低温分子層の主成分を水と考えるのは大きな間違いではないと言える。

得られた光学吸収係数から、ET, Voyager それぞれで許容可能な低温分子層の厚みが分かる。これと、分子流シミュレーションによる分子層形成速度を組み合わせると、これらの検出器がどのぐらいの期間、連続的に運転できるかを計算できる。

ET では、長い低温ダクトと多くのバップルのおかげで低温分子層の形成速度が遅く、約 4 年間は低温のまま運転が可能という結果になった。一方で、Voyager の場合、何も措置を取らない場合 1 年ほどで運転限界を迎える。

形成された低温分子層を破壊するには、鏡を昇温することが手っ取り早いですが、鏡全体を昇温すると、再冷却に長い時間がかかる。これは、観測効率の観点から問題である。そこで、CO2 レーザーなどを使って低温分子層のみを選択的に温めて蒸発させる手法が考えられている。我々の研究グループでは今後、折返し光共振器に CO2 レーザーを組み合わせ、低温分子層除去の実験を行っていく予定である。本研究によって、次世代低温重力波検出器の設計に対する重要な指針が得られた。また本研究で開発された、CEE による薄膜厚み測定の手法は、他の分野への応用が期待される。

[1] Tanioka, S., Hasegawa, K., Aso, Y., 2020. Optical loss study of molecular layer for a cryogenic interferometric gravitational-wave detector. *Phys. Rev. D* 102, 022009.

[2] Tanioka, S., Tanioka, S., Aso, Y., Aso, Y., 2021. Optical loss study of the cryogenic molecular layer using a folded cavity for future gravitational-wave detectors. *Opt. Express*, OE 29, 6780–6793.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Akutsu T, Ando M, Arai K, Arai Y, Araki S, Araya A, Aritomi N, Asada H, Aso Y, et. al.	4. 巻 36
2. 論文標題 First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 165008 ~ 165008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab28a9	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 Zeidler Simon, Akutsu Tomotada, Torii Yasuo, Aso Yoichi	4. 巻 27
2. 論文標題 Measuring scattering light distributions on high-absorptive surfaces for stray-light reduction in gravitational-wave detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 16890 ~ 16890
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.016890	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 -
1. 著者名 N. Matsumoto, S. B. Catano-Lopez, M. Sugawara, S. Suzuki, N. Abe, K. Komori, Y. Michimura, Y. Aso, and K. Edamatsu	4. 巻 122
2. 論文標題 Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 71101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.071101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 E. Capocasa, Y. Guo, M. Eisenmann, Y. Zhao, A. Tomura, K. Arai, Y. Aso, M. Marchio, L. Pinard, P. Prat, K. Somiya, R. Schnabel, M. Tacca, R. Takahashi, D. Tatsumi, M. Leonardi, M. Barsuglia, and R. Flaminio	4. 巻 98
2. 論文標題 Measurement of optical losses in a high-finesse 300 m filter cavity for broadband quantum noise reduction in gravitational-wave detectors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.022010	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 Tanioka Satoshi、Hasegawa Kunihiko、Aso Yoichi	4. 巻 102
2. 論文標題 Optical loss study of molecular layer for a cryogenic interferometric gravitational-wave detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.022009	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 -

1. 著者名 Tanioka Satoshi、Aso Yoichi	4. 巻 29
2. 論文標題 Optical loss study of the cryogenic molecular layer using a folded cavity for future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 6780 ~ 6793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.415921	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------