

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340077

研究課題名(和文)重力波検出器 LCGT のための量子雑音低減法の開発

研究課題名(英文)Reduction of quantum noise for gravitational wave detector LCGT

## 研究代表者

川村 静児 (KAWAMURA, Seiji)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：40301725

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000 円

研究成果の概要(和文)：重力波検出器KAGRAのため、超軽量鏡と普通サイズの鏡を用いた高フィネス光共振器を利用して輻射圧雑音の観測、低減実験を行った。その際問題となる輻射圧による角度の反バネ効果についての詳しい研究を行った。以前よりもより詳細なモデルをたて、新たな防振装置を組み込むことにより共振器動作の安定度を大幅に向上させ、さらに普通サイズの鏡へのトルクから超軽量鏡の角度への伝達関数を測定するという新たな手法により、信頼度の高い計測を行った。また、輻射圧を用いた高精度のレーザーパワー測定器を開発した。

研究成果の概要(英文)：An experiment was performed to observe and reduce radiation pressure noise using a high finesse optical cavity consisting of super-light and regular mirrors. The angular anti-spring effect of radiation pressure, which is a serious problem in this experiment, was investigated. Detailed model was established, the new vibration isolation system was installed, and a new method of measuring the transfer function from the torque of the regular mirror to the angle of the super-light mirror was performed. A new laser power measurement system using radiation pressure was also developed.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 レーザー干渉計 量子雑音

### 1. 研究開始当初の背景

重力波の存在は、アインシュタインの一般相対性理論により予言されたが、未だ検出されていない。もし重力波が検出できれば、ブラックホールの衝突や宇宙誕生の瞬間などこれまで見ることはできなかった様々な天体現象を観測できるようになる。そして、宇宙論、天文学、物理学などを含めた広い意味での重力波天文学が創成され、電磁波や宇宙線による天文学と相補して、我々がより深く宇宙を理解することを可能にしてくれるのである。

研究開始当初、第1世代大型レーザー干渉計(LIGO、Virgoなど)は重力波の直接検出まであと僅かの感度で稼働しており、数年後には第2世代検出器(Advanced LIGO、KAGRAなど)により重力波の初検出がなされると期待されていた。しかし、さまざまな天体現象からの重力波をより頻繁に検出し、重力波天文学を創成するためには、より一層の感度の向上が必要であった。日本の計画KAGRAがそうであるように、レーザー干渉計型重力波検出器の感度は、最終的には量子雑音で制限される。量子雑音にはショットノイズと輻射圧雑音があり、それぞれ高周波領域、低周波領域で支配的である。ショットノイズと輻射圧雑音が等しくなる周波数においては両者の2乗和は不確定性原理で規定される標準量子限界に一致する。しかし、ポンディロモティブ・スクイーズされた光をホモダイン検出によって感度を最適化することにより、輻射圧雑音を引き下げ、さらには標準量子限界さえも破ることが可能であることが分かってきた。

### 2. 研究の目的

輻射圧雑音の低減は理論的には可能であることが示されているが、その実験的検証は容易ではない。なぜならば、通常の干渉計の感度を輻射圧雑音が測定できるレベルまで高めることは、第2世代干渉計を実現することと同程度の技術、人力、経費が必要となるからであるからである。そこで我々は、わずか20 mgという超軽量鏡と1インチの普通サイズの鏡で構成された、フィネス10,000という超高フィネスの光共振器を用いることにより、輻射圧雑音の影響を意図的に増大させ、これを実測し、その低減を実証するという、世界に類をみない独創的な手法を用いて量子雑音低減の実証を行うことにした。この方法を用いれば輻射圧雑音が比較的容易に実測でき、したがって、その低減のための実験も小規模の実験室で実現可能なものとなる。

本実験の最終的な概念図を図1に示す。レーザー光をビームスプリッターで2つに分け、それぞれ超軽量鏡(20 mg)と1インチ鏡で構成される2本の光共振器(フィネス10,000)に入射する。光共振器からの反射光はビームスプリッターで結合し、干渉光とな

る。その光を元のレーザー光を参照光としてホモダイン検出する。干渉光はポンディロモティブ・スクイージングを受けており、ホモダイン位相を調整することにより量子雑音に対する感度を最適化、すなわち、輻射圧雑音を低減することが可能となる。本研究では、標準量子限界を破るための最初のステップとして、輻射圧雑音の低減を目指す。

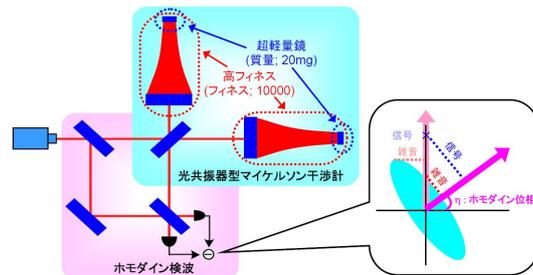


図1. 実験の概念図。

本研究が成功すれば、KAGRAなどの重力波検出器の感度をさらに向上させるために是非とも必要な先進的技術を獲得することができる。また、重力波天文学の創成・発展にとってのブレークスルーとなる可能性を秘めている。また、本研究は次のステップとして、標準量子限界を破る感度を実現すること、つまり量子非破壊計測を考えている。これは、量子論の基礎の解明にとっても重要な鍵を握る研究であり、量子暗号、量子計算、量子テレポーテーションなどの分野にも大きな波及効果を与えることが期待できる。

### 3. 研究の方法

図2に示すように、20 mgの超軽量鏡と1インチ鏡は、2段に吊り下げられている。それぞれ中段の金属製のマスは外部に置かれた磁石から渦電流ダンピングを受け振り子の揺れが抑えられている。1インチ鏡は金属フレームに収まっており、金属フレームには磁石が4本取り付けられている。外部に設置されたコイルに電流を流すことにより鏡の変位を変化させることができる。

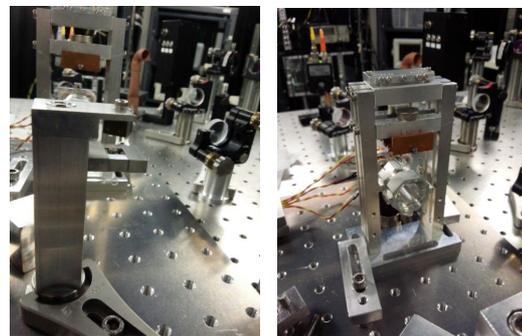


図2. 超軽量鏡(左)と1インチ鏡(右)の振り子系。

2つの鏡は予備実験としてフィネス1,000の光共振器を設定するように反射率が設定

されている。光共振器は真空容器の中に置かれた防振システムの上に置かれている。防振システムは当初は、図3に示すように、スタックの上に置かれた初段のブレッドボードの上にポールを立て、その上に固定された天板から2段に吊り下げられた最終段のブレッドボードから構成されていた。金属製の中段マスは天板からバネで吊り下げられたフレームに固定された磁石から渦電流ダンピングを受け、それにより最終段ブレッドボードの揺れを抑える機構となっていた。

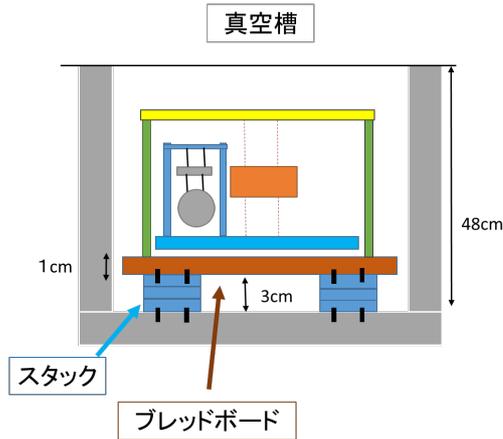


図3．以前の防振システム。

この防振システムで光共振器は比較的安定に動作していたのであるが、平成23年度に代表者の異動に伴い実験室を引っ越した。しかし、新しい実験室は以前の実験室に比べ2 Hz ~ 6 Hz 程度の振動状況が格段に悪く、光共振器の安定な動作が得られない状況となった。そこで、図4に示すように、スタックを取りやめ、初段のブレッドボードをワイヤーで吊るし、真空槽の底に敷き詰めた磁石とブレッドボードとの間の渦電流ダンピングによりブレッドボードの揺れを抑えた。初段ブレッドボードの上は以前と同様な機構により最終段のブレッドボードが吊り下げられている。この実験装置を用いて光共振器の各種実験を行った。

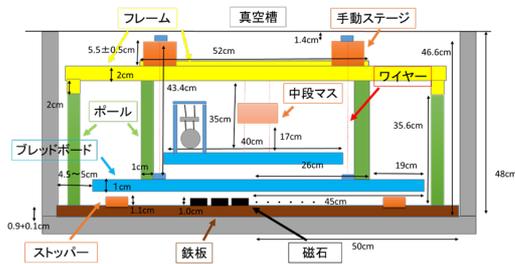


図4．改造後の防振システム。

#### 4．研究成果

まずは新しい防振システムであるが、真空槽の底に敷き詰める磁石の数を調整することにより、最終的には、例えば超軽量鏡のYawの角度揺れのRMS振幅が、以前は110 μm (夜

間に計測)であったものが、改造後は4.3 μm (夜間に計測)まで抑えこむことに成功した。これにより夜間の光共振器の典型的なロックの継続時間は15分間から2時間へと飛躍的に改善した。図5に共振器の透過光量の時間変化(夜間測定)を示す。いずれの入射光量においても非常に安定に動作していることが分かる。

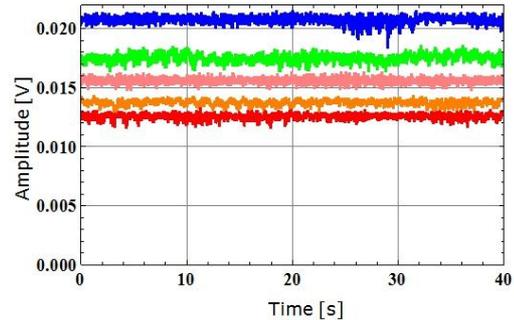


図5．光共振器の透過光量の時間変化。入射光量はそれぞれ、青:4.82 mW、緑:4.00 mW、ピンク:3.19 mW、オレンジ:2.66 mW、赤:2.20 mWである。

本研究においては輻射圧雑音を計測するために共振器内の光のパワーを増大させる必要がある、しかし、そこで問題となるのが、輻射圧による鏡の角度の反バネ効果である。図6に示すように、超軽量鏡(図の右側の鏡)の角度が共振器の光軸と入射光軸が完璧に合致した状態から少しだけずれると、光共振器の光軸がずれる方向にトルクが働く。これは反バネ効果であるため、超軽量鏡を吊り下げている石英ファイバーの機械的バネ効果より大きくなってしまおうとそのモードが不安定になってしまう。

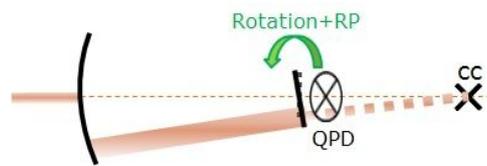


図6．輻射圧による鏡の角度の反バネ効果。

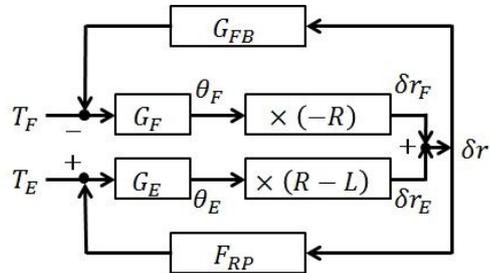


図7．輻射圧による角度反バネ効果の抑制制御システム。ここで、 $T_F, T_E$ : 鏡へ加わるトルク、 $G_F, G_E$ : 鏡のトルクから角度揺れまでの伝達関数、 $G_{FB}$ : 制御の伝達関数、 $F_{RP}$ : 輻射圧トルクの効果である。

そこで我々は、超軽量鏡におけるビームスポットの位置を検出し、それが常に鏡の真ん中に来るように1インチ鏡の角度を制御する方法を考案した。図7に制御システムのブロックダイアグラムを示す。

この制御を用いた場合の超軽量鏡のトルクから角度への伝達関数は、シミュレーションによると図8で示すものとなる。これによると、輻射圧の反バネ効果により低下した超軽量鏡のYawの共振周波数が制御ゲインを上げるとともに元の機械的な構成のみで決まる共振周波数へと戻っていくことが分かる。これは、制御の効果により、超軽量鏡におけるビームスポットの位置が鏡の中心に固定され、輻射圧の影響がなくなるためである。また、共振ピークは制御ゲインがある程度大きくなると、先鋭度が低下する現象が見られるがこれは、制御の反バネ効果の抑制が周波数依存性を持ち、それがちょうどダンピング項として働くことによって起こると考えられる。

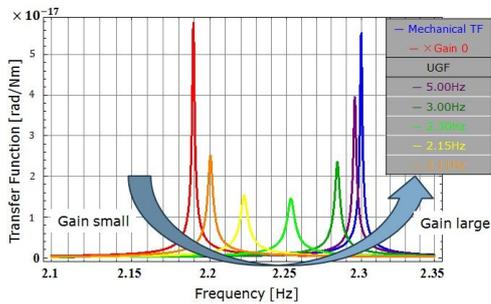


図8．超軽量鏡の角度の伝達関数の制御ゲイン依存性（シミュレーション）

以前の実験においては超軽量鏡のYawの共振周波数の変化を光てこのスペクトルを見ることにより計測していたが、本実験においては、1インチ鏡へのトルクから超軽量鏡の角度までの伝達関数を光てこを用いて測ることにより行った。これは、1インチ鏡の角度を振ることにより、光共振器の光軸がずれ、超軽量鏡におけるビームスポットの位置が変化し、結果として超軽量鏡に輻射圧トルクを引き起こすことを利用して超軽量鏡の共振周波数を測るものである。

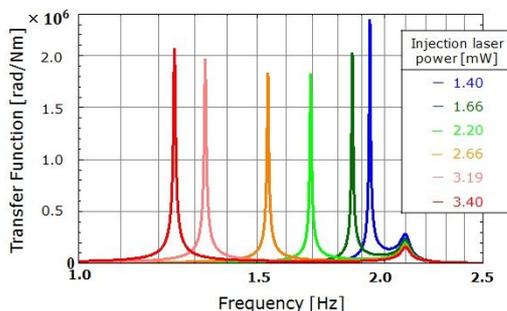


図9．1インチ鏡へのトルクから超軽量鏡の角度までの伝達関数の入射光量依存性（シミュレーション）

図9にシミュレーション結果を示す。1インチ鏡を媒介とした測定であるため、この伝達関数には1インチ鏡と超軽量鏡の2つの鏡の共振ピークが現れることになる。この方法は、光てこのスペクトルを計測する方法と比べて、原理的に地面振動やその他の機械系の共振などの周波数特性の影響を受けないため、計測の質は飛躍的に向上するはずである。

図10に1インチ鏡へのトルクから超軽量鏡の角度までの伝達関数の入射光量依存性の測定結果を示す。また、図11に伝達関数の制御ゲイン依存性を示す。両データともに、残念ながら十分な装置の調整時間がとれなかったため、予備的な計測結果しか得られず、共振周波数の明確な測定に成功したとは言いがたい。しかし、今後、装置の調整と計測の最適化を行うことにより、より明瞭なデータが得られることが期待できる。

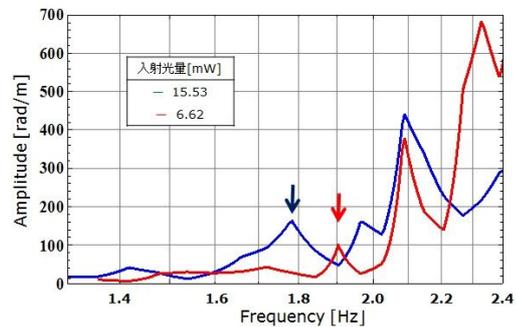


図10．1インチ鏡へのトルクから超軽量鏡の角度までの伝達関数の入射光量依存性。

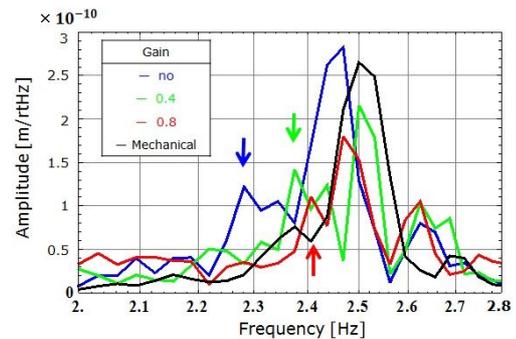


図11．1インチ鏡へのトルクから超軽量鏡の角度までの伝達関数の制御ゲイン依存性。

また、輻射圧雑音の低減には光検出器の量子効率をできるだけ高める必要がある。しかし、問題は従来のパワーメーターでは精度が低く、本実験に必要な計測ができないことであった。そこで、本研究では強度変調を施したレーザー光を超軽量鏡に照射し、それに伴って引き起こされる鏡の変位変動をマイケルソンレーザー干渉計を用いて測定した。輻射圧はレーザーパワーによって決まるため、この実験で、光のパワーを正確に測定することができる。最終的には光検出器の量子効率を1%の制度で測定する方法を確立することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Kazuhiro Agatsuma, Daniel Friedrich, Stefan Ballmer, Giulia DeSalvo, Shihori Sakata, Erina Nishida, and Seiji Kawamura, Precise measurement of laser power using an optomechanical system, Optics Express, 査読有, 22 (2014) 2013-2030

DOI:10.1364/OE.22.002013

DOI:10.1088/1742-6596/363/1/012002

T Mori, K Agatsuma, S Ballmer, S Sakata, O Miyakawa, S Kawamura, A Furusawa and N Mio, Development of a high power optical cavity for optomechanical QND experiment, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 363 (2012) 12015

DOI:10.1088/1742-6596/363/1/012015

Kazuhiro Agatsuma, Takumi Mori, Stefan Ballmer, Giulia DeSalvo, Shihori Sakata, Erina Nishida, Seiji Kawamura, High accuracy measurement of the quantum efficiency using radiation pressure, J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 363 (2012) 12002

〔学会発表〕(計10件)

Shiori Konisho, Observation and reduction of radiation pressure noise, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop, 2014年05月25日~2014年05月30日, ひだホテルプラザ(岐阜県高山市)

阪田紫帆里, レーザー干渉計重力波検出器における量子非破壊計測の研究 XV, 日本物理学会, 2013年09月20日~2013年09月23日, 高知大学(高知県高知市)

Masayuki Nakano, Control of the angular motion of the tiny 20mg suspended mirror in the high power cavity for QRPN measurement, The 10th Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2013年07月07日~2013年07月13日, Warsaw (Poland)

中野雅之, レーザー干渉計重力波検出器における量子非破壊計測の研究(14), 日本物理学会, 2013年03月26日~2013年03月29日, 広島大学(広島県東広島市)

Kazuhiro Agatsuma, Accurate measurement of quantum efficiency, Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop, 2012年05月13日~2012年05月19日, Waikoloa (USA)

Daniel Friedrich, Quantum Radiation Pressure Experiment with a Suspended 20mg Mirror, Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop, 2012年05月13日~2012年05月19日, Waikoloa (USA)

Kazuhiro Agatsuma, High accuracy measurement of the quantum efficiency using radiation pressure, 9th Edoardo

Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2011年07月10日~2011年07月15日, Cardiff (UK)

Takumi Mori, Control of motions of a suspended mirror through radiation pressure in a high-power optical cavity, 9th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, 2011年07月10日~2011年07月15日, Cardiff (UK)

我妻一博, 輻射圧を利用した量子効率の精密測定(2), 日本物理学会, 2012年03月24日~2012年03月27日, 関西学院大学(兵庫県西宮市)

森匠, 極小鏡を用いた輻射圧による鏡の多自由度振動制御, 日本物理学会, 2011年09月16日~2011年09月19日, 弘前大学(青森県弘前市)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

川村 静児 (KAWAMURA, Seiji)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号: 40301725

### (2)連携研究者

我妻 一博 (AGATSUMA, Kazuhiro)

国立天文台・重力波プロジェクト推進室・研究員

研究者番号: 60599489

(平成23年度まで連携研究者)

阪田 紫帆里 (SAKATA, Shihori)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号: 40534590

(平成23年度まで連携研究者)

### (3)研究協力者

小仁所 志栞 (KONISHO, Shiori)

西村 翼 (NISHIMURA, Tsubasa)

中野 雅之 (NAKANO Masayuki)

Daniel Friedrich (FRIEDRICH, Daniel)

森 匠 (MORI, Takumi)