

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01924

研究課題名（和文）宇宙重力波検出器DECIGOのための広帯域量子ロッキングによる標準量子限界の打破

研究課題名（英文）Beating the standard quantum limit with broadband quantum locking for the space gravitational wave detector DECIGO

研究代表者

川村 静児（Kawamura, Seiji）

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：40301725

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙重力波望遠鏡DECIGOが原始重力波の検出をより確実に行えるように、光バネ量子ロッキングの開発を行った。光バネ量子ロッキングは、主光共振器の鏡を補助の光共振器で共有し、共振点からずれた位置に制御することにより量子雑音を広帯域で低減する手法である。我々は、理論面では、平方完成の手法を用いることにより、原始重力波に対する信号雑音比が大きく改善できることをシミュレーションで示した。また、実験面においては2台の光共振器に、輻射圧雑音とショットノイズの模擬信号を印加し、平方完成の手法により作り出した合成信号の信号雑音比が、全ての周波数において、2つの信号の良い方と同じになっていることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究が成功し、光バネ量子ロッキングの技術が完成し、宇宙重力波望遠鏡DECIGOへの実装が可能になれば、原始重力波の検出の可能性がより確実なものとなる。原始重力波は宇宙誕生直後に起きたと考えられているインフレーションの時代に時空の量子揺らぎから発生したと考えられているため、もし、原始重力波が検出されれば、インフレーションや宇宙誕生に関する謎が解明される可能性がある。また、DECIGOにより、ダークエネルギー、原始ブラックホール、一般相対性理論の検証など様々な物理の新しい知見が得られることが期待される。また、本研究は、標準量子限界を破るという意味で、量子論の基礎の解明にもつながる。

研究成果の概要（英文）：We have developed the technique of optical-spring quantum locking to improve the detection of primordial gravitational waves using the space gravitational wave antenna DECIGO. This method reduces quantum noise over a wide bandwidth by sharing the mirrors of the main cavity with an auxiliary cavities and controlling its position offset from the resonance point. Through simulations using the method of square completion, we have shown that the signal-to-noise ratio for primordial gravitational waves can be significantly improved. In experiments, we applied simulated signals of radiation pressure noise and shot noise to two cavities and confirmed that the signal-to-noise ratio of the synthesized signal produced by the square completion method is equivalent to the better of the two signals at all frequencies.

研究分野：重力波物理学

キーワード：原始重力波 DECIGO 量子ロッキング 標準量子限界 光バネ

## 1. 研究開始当初の背景

2015年にアメリカの Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) により重力波が初検出されて以来、ブラックホール連星や中性子星連星の合体などからの重力波が頻りに検出され、いわゆる重力波天文学が創成した。将来的には、宇宙誕生直後に起きたと考えられているインフレーションの期間に生成された原始重力波を検出し、インフレーションのモデルの選別、エネルギースケールの決定、再加熱温度の推定など、極初期宇宙に関する重要な知見を得ることが期待できる。

原始重力波の引き起こす空間ひずみは、電磁波の背景放射の観測から、宇宙の臨界密度に対する背景重力波のエネルギーの比 ( $\Omega_{GW}$ ) の上限値として 0.1 Hz で  $2 \times 10^{-15}$  であった。(その後、観測精度の向上により、現在では 0.1 Hz での  $\Omega_{GW}$  の上限値は  $1 \times 10^{-16}$  である。) これはストレインでいうと、0.1 Hz で  $1 \times 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$  である。原始重力波の引き起こす空間のひずみは、周波数が低いほど大きいが、白色矮星連星から放射される分解不可能な重力波雑音が 0.1 Hz 以下で大きいいため原始重力波検出の最適周波数は 0.1 ~ 1 Hz である。

しかし、地上のレーザー干渉計型検出器では、鏡の懸架に伴う地面振動や振り子の熱雑音が低周波数帯で大きいいため原始重力波の検出に足る感度は達成できない。そこで応募者が中心となって考えたのが宇宙重力波望遠鏡 Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory (DECIGO) である。図1に示すように、DECIGOは1辺1,000 kmの正三角形に配置された3台のドラッグフリー衛星を結ぶ、光共振器レーザー干渉計型重力波検出器である。レーザーのパワーは10 W、波長は515 nm、鏡の質量は100 kg、直径は1 m、光共振器のフィネスは10である。これを1つのクラスターとして、太陽周回地球トレイル軌道に4つのクラスター(うち2つのクラスターは同じ位置)を配置する計画である。

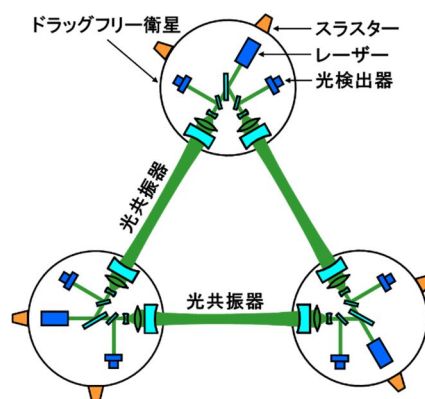


図1. 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO.

DECIGOの目標感度は1 Hz で  $4 \times 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2}$  であり、同じ場所においた2つのクラスターの相関を3年間取ることにより、その感度を1 Hz で  $7 \times 10^{-26} \text{ Hz}^{-1/2}$  まで高めることができる。この感度が実現できれば、 $\Omega_{GW} \sim 2 \times 10^{-15}$  @ 1 Hz に対応する原始重力波が検出できる。

しかし、予測される原始重力波の上限値は電磁波の背景放射の観測精度の向上により徐々に下がってきており、またその強度やスペクトルは、インフレーションのモデルなどに依存するため、極初期宇宙に関するさまざまな情報を最大限に引き出すためには、DECIGOの到達可能感度をできるだけ高めておく必要がある。そして、DECIGOの感度はショットノイズと輻射圧雑音からなる量子雑音で制限されているため量子光学的手法を用いてこれを改善する必要がある。しかし、DECIGOの光共振器は1,000 kmもあり、回折による光学的ロスが大きすぎ、地上検出器で用いられているような、通常のスケーリング技術は使えない。そこで、我々が考えたのが、以前に応募者が考案した量子ロッキングの手法を利用することである。量子ロッキングは短い光共振器におけるスケーリングを利用するため、光学的ロスが小さく、スケーリング特性が維持できる。これを利用すると、ある周波数において輻射圧雑音を除去できる。我々は、さらに、光バネを量子ロッキングに組み込み輻射圧雑音の除去を広帯域化する手法を考案した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、光バネ量子ロッキングをDECIGOに組み込む際の理論的な解析を行い、どのような手法で量子雑音が最適化できるかを検討し、そして、本手法の原理実証実験を行い、その有効性を確認し、問題点を洗い出し、輻射圧雑音除去の現実的な限界を見極めることである。

まず、量子ロッキングの原理について説明する。図2に示すように、DECIGOにおいては、2台の宇宙機に搭載された2枚の鏡

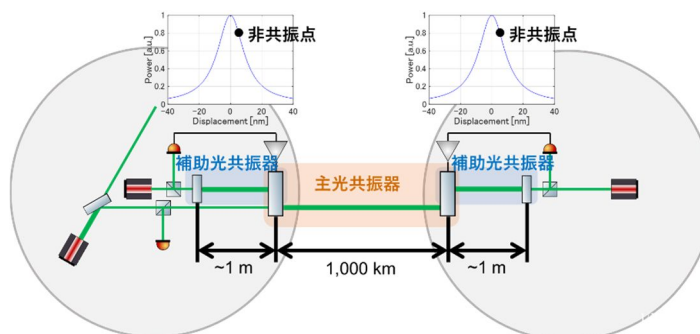


図2. 光バネ量子ロッキングを組み込んだDECIGOの構成。

で構成される1,000kmの光共振器により、鏡間の距離の重力波による変化を計測する。この干渉計の感度は低周波帯では輻射圧雑音、高周波帯ではショットノイズで制限される。ここで、そ

それぞれの鏡と同じ宇宙機に搭載された別の鏡で補助光共振器を構成し、ホモダイン検波で得られた信号により主光共振器の鏡を制御する。ここで、ホモダイン検波の軸を適切に選ぶことにより、主光共振器の輻射圧雑音をある周波数でキャンセルすることができる。これが量子ロッキングである。量子ロッキングの手法を使えば、不確定性原理で規定される標準量子限界を破る感度を実現することも可能である。

主光共振器の検出系の量子雑音は、実際には、主光共振器で使うレーザーの振幅の量子揺らぎと位相の量子揺らぎ、そして補助光共振器で使うレーザーの振幅の量子揺らぎと位相の量子揺らぎが存在し、その特性は複雑な周波数依存性を持つ。したがって、それら4つの独立な量子雑音によって決まる感度の信号雑音比を最もよくするため、補助光共振器の検出系のホモダイン検波の検出軸の角度（ホモダイン角）、各光共振器のレーザーパワーとフィネスなどの量子雑音に影響のあるパラメータを最適化する必要がある。しかし、それらの量子パラメータは完全に独立なものではなく、それだけでは最適値に到達できない可能性がある。そこで補助光共振器を共振点から少しずらした非共振点に制御することにより、補助光共振器の共振点からのずれ（ディチューニング角）という新たな量子パラメータを組み込む。これが光バネ量子ロッキングである。

なお、補助光共振器の2枚の鏡は同一の宇宙機の中にあるため、その共振器長（ $\sim 1\text{ m}$ ）は主光共振器長（ $\sim 1,000\text{ km}$ ）に比べて非常に短い。したがって、重力波によって引き起こされる補助光共振器長の変化は無視できるほど小さく、補助光共振器の出力信号を使って、補助光共振器のエンド鏡（主光共振器の鏡）を制御しても、主光共振器において、重力波信号が影響を受けない。

### 3. 研究の方法

#### (1) 理論

DECIGOの主光共振器に光バネ量子ロッキングを組み込んだ際の量子雑音は制御ゲインなどにも依存するため高度に複雑であり、解析的に行うことは非常に困難である。そこで我々は、シミュレーションにより量子雑音を数値的に計算することにした。シミュレーションはmatlabのSimulinkを利用して行われた。光共振器、補助光共振器2台のそれぞれについて、レーザー光の振幅の量子雑音と位相の量子雑音が光共振器および制御システムの中でどのように伝達するかのモデルを立てた。そしてそれぞれの量子雑音から主光共振器の出力である $V_0$ と補助光共振器の出力である $V_1$ と $V_2$ までの伝達関数を数値的に計算できるようにした。また重力波信号からそれぞれの出力信号までの伝達関数も計算できるようにした。そして、周波数特性を持つ $\chi$ を用いて3つの出力のコンビネーション（ $V=V_0+\chi(V_1+V_2)$ ）を作った。次に、各量子パラメータを独立に振り、量子パラメータの組み合わせごとに、平方完成の手法を用いて、 $V$ における雑音が最小になるように、 $\chi$ を選び信号雑音比を計算した。重力波信号としては原始重力波の最新の上限值（ $\Omega_{\text{GW}}\sim 1\times 10^{-16}$  @1 Hz に対応）を用い、3年間の相関解析を仮定して計算を行った。最後に、最高の信号雑音比を与える量子パラメータの組み合わせを決定し、その際の各量子雑音の周波数特性とそれらの2乗和として量子雑音によって規定される感度曲線を計算した。なお、この計算において、主光共振器のレーザーパワーは100 Wに、フィネスは10に固定した。また、補助光共振器のレーザーパワーは100 Wまでの範囲で振り、フィネスとホモダイン角とディチューニング角は完全にフリーとした。

#### (2) 実験

光バネ量子ロッキングの原理検証には、最終的には実際の量子雑音が本手法により確かに低減することを示す必要がある。しかし、干渉計における輻射圧雑音の測定は極めて難しく、これまでに成功した例は数えるほどしかない。そこで、本研究では、まずは、古典雑音により量子雑音を模擬し、模擬輻射圧雑音が低減することを確認する。そして最後に、実際の量子雑音である輻射圧雑音が低減することを確認する。体的には以下のように3段階の実験に分けて行う。

ステップ1：[固定鏡を用いた古典雑音による模擬量子雑音を用いた実験]

ショットノイズは古典雑音を光検出器に印加し、また、輻射圧雑音は、固定鏡をピエゾ素子により古典的に振動させることにより模擬する。これらの模擬量子雑音が平方完成を用いた本手法により低減することを確認する。

ステップ2：[懸架鏡を用いた古典雑音による模擬量子雑音を用いた実験]

ショットノイズはステップ1と同様に、輻射圧雑音はレーザー光の振幅を古典的に振動させ、それにより懸架鏡が揺さぶられることで模擬する。そして、模擬量子雑音の低減を確認する。

ステップ3：[懸架鏡を用いた本物の量子雑音による実験]

超小型鏡の懸架システムを作り、防振装置や真空装置により、量子雑音以外の雑音を下げ、実際の量子雑音の低減を確認する。

ステップ3においては、輻射圧雑音の低減という、いまだ世界の誰も成功していないこの難しい実験に挑戦するため、我々は、23 mgの超軽量の鏡からなる光共振器を用いる予定である。この超軽量鏡、超高フィネスの実験については我々は別実験において十分な経験がある。したがって、この世界初の成果を達成できる可能性は十分にあると考えられる。

以下、今回の実験で行った、ステップ1の実験方法について説明する。

ステップ1の実験は、固定鏡を用いた古典雑音による模擬量子雑音を用いた実験である。本実験の目的は、主光共振器のレーザーパワーが高く、補助光共振器のレーザーパワーが低いという

想定で行う。したがって、主光共振器の輻射圧雑音は大きく、ショットノイズは小さい。一方、補助光共振器の輻射圧雑音は小さく、ショットノイズは大きい。このような想定の下、本来であれば大きいはずの主光共振器の輻射圧雑音を、補助光共振器の小さな輻射圧雑音で置き換える。また、その際にもともと小さい主光共振器のショットノイズが補助光共振器の大きなショットノイズの影響を受けて悪化しないようにする。この言わば感度の“いいとこ取り”を、平方完成を用いて行うのである。

図3に光学系、制御系のセットアップを示す。まず、レーザー光を、ファラディアイソレーターに通し戻り光を防ぐ。次に、反射率と透過率がともに50%のビームスプリッターに入射する。ビームスプリッターによる反射光を電気光学素子により11.9 MHzで位相変調する。次にモードマッチングレンズを調整し、主光共振器（長さ33 cm）のモードに合わせたの

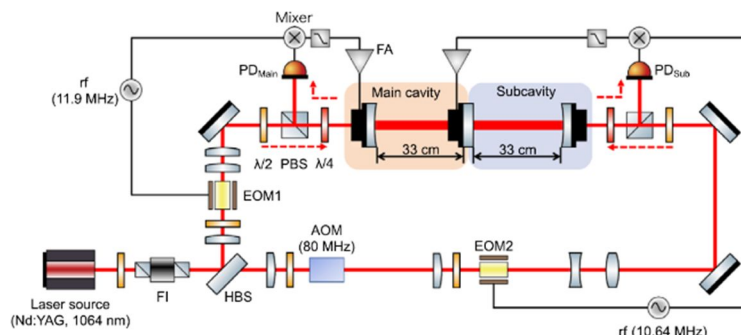


図3 . ステップ1の実験の光学系、制御系のセットアップ。

ち、偏光ビームスプリッターと4分の1波長板で構成されるサーキュレーターを通して主光共振器に入射する。主光共振器からの反射光はサーキュレーターにより反射されるので、それを光検出器で受ける。光検出器の出力と位相変調用の11.9 MHzの信号をダブルバランスドミキサーで掛け合わせ、ローパスフィルターを通す（この一連の動作を復調と呼ぶ）ことにより、共振点からのずれに比例する信号（エラー信号）を得る。このエラー信号を、適切に設計されたフィルターアンプと高電圧アンプを通して、主光共振器の片方の鏡（補助光共振器と共有されていない方の鏡）のピエゾ素子に返して主光共振器を共振点にロックする。

ビームスプリッターの透過光の方は、まず音響光学素子を通しその一次光を使うことにより、周波数を80 MHzシフトさせる。これにより、主光共振器の光と補助光共振器の光の干渉を防ぐことができる。次に電気光学素子により10.64 MHzで位相変調し、モードマッチングレンズで補助光共振器（長さ33 cm）のモードに合わせたのち、サーキュレーターを通して補助光共振器に入射する。補助光共振器からの反射光はサーキュレーターにより反射され、それを光検出器で受ける。光検出器の出力を位相変調用の10.64 MHzの信号を使って復調しエラー信号を得る。このエラー信号をフィルターアンプと高電圧アンプを通して補助光共振器の片方の鏡（主共振器と共有されている方の鏡）のピエゾ素子に返して補助光共振器を共振点にロックする。なお、主光共振器と補助光共振器で共有されている鏡は両面コーティングが施されており、それぞれの面がそれぞれ主光共振器と補助光共振器の鏡を構成する。鏡にはウェッジ角がつけられており、ここでも主光共振器と補助光共振器のレーザー光の干渉を防ぐ構成になっている。

次に、この主光共振器と補助光共振器を共にロックした状態において、量子雑音の模擬信号を印加する。具体的には電気信号によりホワイトな雑音を作りそれをショットノイズの模擬信号とする。また、その信号を2次のローパスフィルターに通すことにより、 $f^{-2}$ の周波数依存性を持つ雑音を作り、それを輻射圧雑音の模擬信号とする。これらの模擬信号を、ショットノイズに関しては、主光共振器と補助光共振器のエラー信号の直後に加える。輻射圧雑音に関しては、主光共振器と補助光共振器を構成するそれぞれの鏡のピエゾ素子に印加する。ただし、主光共振器の一方の鏡（共有鏡ではない方）には印加しない。これは実験の簡素化のため、この鏡が無限大の質量を持つと仮定したためである。

実験においては、以下の3つの場合の信号のスペクトルを取得した。

主共振器にのみハイパワーのレーザー光に対応する量子雑音の模擬信号を印加した場合の主共振器の出力信号を共振器長で校正したもの。

主共振器にのみローパワーのレーザー光に対応する量子雑音の模擬信号を印加した場合の主共振器の出力信号を共振器長で校正したもの。（ただし、実際の実験においては実用上の問題から補助共振器を用いて行った。ちなみに、補助共振器は主共振器と同様のスペックを持つためこのようにしても大丈夫である。）

主共振器にハイパワーのレーザー光に対応する量子雑音の模擬信号を印加し、補助共振器にローパワーのレーザー光に対応する量子雑音の模擬信号を印加し、主共振器の出力信号を共振器長で校正したものと補助共振器の出力信号を共振器長で校正したものとの間で、 $\chi$ を係数とするコンビネーションを取り、平方完成の手法を使って信号雑音比を最適化したもの。

#### 4 . 研究成果

##### (1) 理論

各量子パラメータを独立に振り、量子パラメータの組み合わせごとに、平方完成の手法を用いて、 $\chi$ を選び信号雑音比を計算し、最高の信号雑音比を与える量子パラメータの組み合わせを決定した。そして、その際の各量子雑音の周波数特性とそれらの2乗和として量子雑音によって規

定される感度曲線を計算した。

まず、量子ロッキングを組み込まない場合、量子ロッキングを組み込んだ場合、光バネ量子ロッキングを組み込んだ場合、それぞれの量子雑音によって制限される感度曲線を図4に示す。これによると、量子ロッキングを組み込むことにより、ある周波数で量子雑音がディップを作っていることが分かる。また、低周波帯では、量子雑音が少し改善している一方、ディップ周波数より少し高い周波数では逆に量子雑音が少しだけ悪くなっていることが分かる。そして、光バネを加えることにより、ディップの幅が大きく広がり、また、ディップ周波数より低い周波数帯でも高い周波数でも量子雑音が低減していることが分かる。信号雑音比としては、量子ロッキングを組み込まない場合が1.41であったのに対して、量子ロッキング(光バネなし)を組み込んだ場合の信号雑音比が84.3に、量子ロッキング(光バネあり)を組み込んだ場合の信号雑音比が214に大きく改善された。

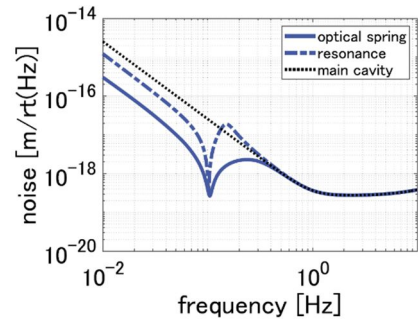


図4 . 光バネ量子ロッキングによる感度の改善。

また、(光バネなし)量子ロッキングの場合、光バネ量子ロッキングの場合のそれぞれの感度曲線における量子雑音のノイズバジットを図5に示す。これによると、(光バネなし)量子ロッキングの場合それぞれの独立な量子雑音のディップ周波数を決めることとディップの幅を広げることが、

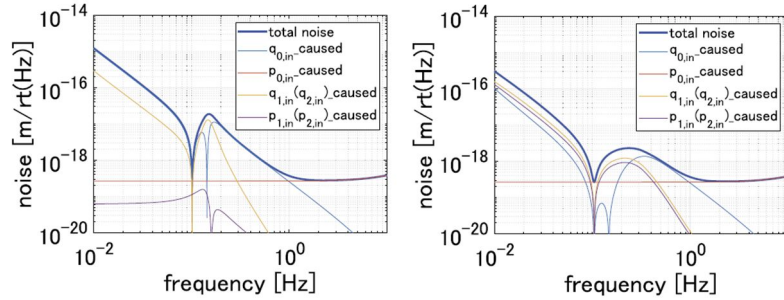


図5 . 感度曲線における量子雑音のノイズバジット。(左)(光バネなし)量子ロッキング、(右)光バネ量子ロッキング。

全ての量子雑音について両立できておらず、そのためディップの幅が狭いままであるのに対し、光バネ量子ロッキングの場合、全ての量子雑音のディップ周波数が一致し、かつディップの幅が広がっていることが分かる。これは、補助光共振器のディチューニング角という新たな量子パラメータが加わったため、雑音の最適化がより広範囲のパラメータ空間で行えるようになったことが理由だと考えられる。

以上の結果により、DECIGO に光バネ量子ロッキングを組み込むことにより量子雑音が大きく改善し、原始重力波に対する信号雑音比が飛躍的に改善することが分かった。

## (2) 実験

研究方法のセクションで述べた3つのスペクトル(ハイパワー、ローパワー、最適)を図6の左側に示す。

『ハイパワー』は輻射圧雑音に対応する模擬雑音が高く、ショットノイズに対応する模擬雑音が低くなっており、『ローパワー』は輻射圧雑音に対応する

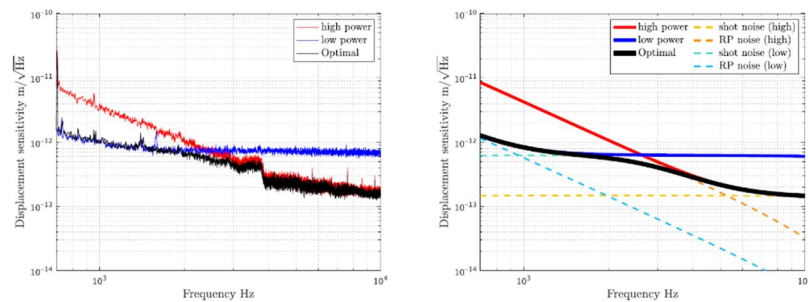


図6 . 平方完成による模擬量子雑音の最適化。左は実験結果、右はシミュレーション結果。

模擬雑音が低く、ショットノイズに対応する模擬雑音が高くなっている。『最適』は、輻射圧雑音に対応する模擬雑音とショットノイズに対応する模擬雑音がともに低くなっており周波数によって“いいとこ取り”ができていていることが分かる。また、図6の右側にこれらのスペクトルをシミュレーションにより得たものを示す。これらと比べると、実験で得られた結果とシミュレーションで得られた結果がよく一致していることが分かる。

以上の実験により、光バネ量子ロッキングで DECIGO の量子雑音が低減し、信号雑音比が飛躍的に改善することを実証するための実証実験の最初のステップである、古典雑音による模擬量子雑音とピエゾ素子付きの固定鏡を用いて平方完成の有効性を実証することに成功した。今後はステップ2、ステップ3と進め、最終的には、本物の輻射圧雑音を低減し、標準量子限界を破る感度を実現し、光バネ量子ロッキングを DECIGO に適用することの有効性を示していく。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Rika Yamada, Yutaro Enomoto, Izumi Watanabe, Koji Nagano, Yuta Michimura, Atsushi Nishizawa, Kentaro Komori, Takeo Naito, Taigen Morimoto, Shoki Iwaguchi, Tomohiro Ishikawa, Masaki Ando, Akira Furusawa, Seiji Kawamura	4. 巻 402
2. 論文標題 Reduction of quantum noise using the quantum locking with an optical spring for gravitational wave detectors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Lett. A	6. 最初と最後の頁 127365
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2021.127365	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 Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Tomohiro Ishikawa, Koji Nagano, Shoki Iwaguchi, Izumi Watanabe, Bin Wu, Shuichiro Yokoyama and Seiji Kawamura	4. 巻 10
2. 論文標題 Optimization of design parameters for Gravitational Wave detector DECIGO including fundamental noises	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 10010025
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies10010025	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 -
1. 著者名 Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Bin Wu, Izumi Watanabe, Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Yutaro Enomoto, Yuta Michimura, Akira Furusawa, Seiji Kawamura	4. 巻 453
2. 論文標題 Can the phase of radiation pressure fluctuations be flipped in a single path for laser interferometric gravitational wave detectors?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Lett. A	6. 最初と最後の頁 128485
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2022.128485	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 Tomohiro Ishikawa, Yuki Kawasaki, Kenji Tsuji, Rika Yamada, Izumi Watanabe, Bin Wu, Shoki Iwaguchi, Ryuma Shimizu, Kurumi Umemura, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Akira Furusawa, and Seiji Kawamura	4. 巻 107
2. 論文標題 First-step experiment for sensitivity improvement of DECIGO: Sensitivity optimization for simulated quantum noise by completing the square	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.022007	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 S. Kawamura and the DECIGO working group	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Space Gravitational Wave Antenna DECIGO and B-DECIGO	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proc. of MG16 on General Relativity	6. 最初と最後の頁 3254-3260
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Shoki Iwaguchi, Tomohiro Ishikawa, Masaki Ando, Yuta Michimura, Kentaro Komori, Koji Nagano, Tomotada Akutsu, Mitsuru Musha, Rika Yamada, Izumi Watanabe, Takeo Naito, Taigen Morimoto, and Seiji Kawamura	4. 巻 9
2. 論文標題 Quantum Noise in a Fabry-Perot Interferometer Including the Influence of Diffraction Loss of Light	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 9010009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies9010009	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 -

1. 著者名 Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Yuta Michimura, Masaki Ando, Rika Yamada, Izumi Watanabe, Koji Nagano, Tomotada Akutsu, Kentaro Komori, Mitsuru Musha, Takeo Naito, Taigen Morimoto, and Seiji Kawamura	4. 巻 9
2. 論文標題 Improvement of the target sensitivity in DECIGO by optimizing its parameters for quantum noise including the effect of diffraction loss	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Galaxies	6. 最初と最後の頁 9010014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/galaxies9010014	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 -

1. 著者名 Seiji Kawamura, Masaki Ando, Naoki Seto, Shuichi Sato, Mitsuru Musha, Isao Kawano, Jun'ichi Yokoyama, Takahiro Tanaka, Kunihito Ioka, Tomotada Akutsu, Takeshi Takashima, Kazuhiro Agatsuma, Akito Araya, Naoki Aritomi, Hideki Asada, Takeshi Chiba, Satoshi Eguchi, Motohiro Enoki, Masa-Katsu Fujimoto, et al.	4. 巻 05A105
2. 論文標題 Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 05A105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab019	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 Yamada Rika, Enomoto Yutaro, Nishizawa Atsushi, Nagano Koji, Kuroyanagi Sachiko, Kokeyama Keiko, Komori Kentaro, Michimura Yuta, Naito Takeo, Watanabe Izumi, Morimoto Taigen, Ando Masaki, Furusawa Akira, Kawamura Seiji	4. 巻 384
2. 論文標題 Optimization of quantum noise by completing the square of multiple interferometer outputs in quantum locking for gravitational wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 126626 ~ 126626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2020.126626	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 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Seiji Kawamura and the DECIGO working group
2. 発表標題 Space Gravitational Wave Antenna DECIGO and B-DECIGO
3. 学会等名 16th Marcel Grossmann Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村静児, 他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(131): DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺泉実, 石川智浩, 岩口翔輝, Wu Bin, 川崎祐輝, 清水龍真, 榎本雄太郎, 長野晃士, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(136): 感度向上のための量子ロッキングの検討3
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 石川智浩, 岩口翔輝, Wu Bin, 渡辺泉実, 川崎祐輝, 清水龍真, 榎本雄太郎, 道村唯太, 古澤明, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(137): 感度向上のための量子雑音低減の検討1
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiji Kawamura and the DECIGO working group
2. 発表標題 DECIGO
3. 学会等名 Gravitational wave detection at the Moon Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村静児, 他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (138): DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎祐輝, 清水龍真, 石川智浩, 長野晃士, 岩口翔輝, 渡辺泉実, Wu Bin, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(142): 量子雑音, 熱雑音, 白色矮星連星 からの重力波雑音を含めた感度の最適化
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水龍真, 川崎祐輝, 渡辺泉実, 石川智浩, 岩口翔輝, Wu Bin, 榎本雄太郎, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(143) : 感度向上のための量子ロッキングの検討 4
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川智浩, 渡辺泉実, 岩口翔輝, Wu Bin, 川崎祐輝, 清水龍真, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(144) : 感度向上のための量子ロッキングの検討 5
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiji Kawamura and the DECIGO working group
2. 発表標題 Space Gravitational Wave Antenna DECIGO
3. 学会等名 The international workshop of “Physics in LHC and Beyond” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiji Kawamura and the DECIGO working group
2. 発表標題 Space Gravitational Wave Antenna DECIGO
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Ishikawa, I. Watanabe, S. Iwaguchi, B. Wu, Y. Kawasaki, R. Shimizu, K. Nagano, Y. Enomoto, K. Komori, Y. Michimura, A. Furusawa, S. Kawamura
2. 発表標題 Current Status of Quantum Locking Experiment for Space Gravitational Wave Antenna DECIGO
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Izumi Watanabe, Bin Wu, Shuichiro Yokoyama, Seiji Kawamura
2. 発表標題 Optimization of design parameters for Gravitational Wave detector DECIGO including fundamental noises
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryuma Shimizu, Yuki Kawasaki, Izumi Watanabe, Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Bin Wu, Yutaro Enomoto, Shuichiro Yokoyama, Seiji Kawamura
2. 発表標題 Practical quantum noise estimate of optical-spring quantum locking for space gravitational wave detector DECIGO
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村静児, 他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (146) : DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水龍真, 石川智浩, 川崎祐輝, Wu Bin, 岩口翔輝, 梅村来未, 辻健志, 榎本雄太郎, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (152): 感度向上のための量子ロッキングの検討 6
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻健志, 石川智浩, 川崎祐輝, Wu Bin, 岩口翔輝, 清水龍真, 梅村来未, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (153): 感度向上のための量子ロッキングの検討 7
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川智浩, 川崎祐輝, 辻健志, Wu Bin, 岩口翔輝, 清水龍真, 梅村来未, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (154): 感度向上のための量子ロッキングの検討 8
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiji Kawamura and the DECIGO working group
2. 発表標題 Space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO
3. 学会等名 The 5th KMI International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川村静児, 他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (156) : DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川智浩, 川崎祐輝, 辻健志, 清水龍真, 梅村来未, Wu Bin, 岩口翔輝, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (164) : 感度向上のための量子ロッキングの検討 9
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梅村来未, 辻健志, 石川智浩, 清水龍真, Wu Bin, 岩口翔輝, 川崎祐輝, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(165) : 感度向上のための量子ロッキングの検討 10
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻健志, 梅村来未, 石川智浩, 清水龍真, Wu Bin, 岩口翔輝, 川崎祐輝, 長野晃士, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 道村唯太, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(166) : 感度向上のための量子ロッキングの検討 11
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川村静児、他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(118) DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田梨加, 榎本雄太郎, 渡辺泉実, 西澤篤志, 長野晃士, 黒柳幸子, 苔山圭以子, 小森健太郎, 道村唯太, 内藤丈雄, 森本泰玄, 石川智浩, 岩口翔輝, 安東正樹, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(123) : 感度向上のための量子ロッキングの検討1
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺泉実, 山田梨加, 榎本雄太郎, 西澤篤志, 長野晃士, 黒柳幸子, 苔山圭以子, 小森健太郎, 道村唯太, 内藤丈雄, 森本泰玄, 石川智浩, 岩口翔輝, 安東正樹, 古澤明, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(124) : 感度向上のための量子ロッキングの検討2
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村静児、他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(125) DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩口翔輝, 石川智浩, 安東正樹, 道村唯太, 小森健太郎, 長野晃士, 阿久津智忠, 武者満, 山田梨加, 渡辺泉実, 内藤丈雄, 森本泰玄, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(129): 回折損失のある場合の量子雑音
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石川智浩, 岩口翔輝, 道村唯太, 安東正樹, 山田梨加, 渡辺泉実, 長野晃士, 阿久津智忠, 小森健太郎, 武者満, 内藤丈雄, 森本泰玄, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(130): 量子雑音の最適化
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiji Kawamura
2. 発表標題 Space Gravitational Wave Antenna DECIGO and B-DECIGO
3. 学会等名 Korea Astronomy and Space Science Institute informal workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川村静児、他
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画 (110): DECIGOの概要
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田梨加, 榎本雄太郎, 黒柳幸子, 西澤篤志, 苔山圭以子, 中野雅之, 長野晃士, 安東正樹, 道村唯太, 小森健太郎, 内藤丈雄, 森本泰玄, 渡辺泉実, 川村静児
2. 発表標題 スペース重力波アンテナDECIGO計画(116): DECIGOの光学設計の検討
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020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

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