

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：12601  
研究種目：新学術領域研究（研究課題提案型）  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20200046  
研究課題名（和文） スクイズド光を利用した第3世代レーザー干渉計重力波検出器  
研究課題名（英文） 3rd generation laser interferometric gravitational wave detector using squeezed light  
研究代表者  
坪野 公夫 (TSUBONO KIMIO)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：10125271

## 研究成果の概要（和文）：

非線形光学結晶を用いた2次の非線形光学効果を用いたスクイズド真空場生成装置を開発し、8 dBのスクイズングに成功した。そしてプロトタイプ重力波検出器を設置し、生成したスクイズド真空場を入射することにより、スクイズド真空場を用いた重力波検出器の散乱雑音の低減に初めて成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

Applying 2nd order nonlinear effect produced by the nonlinear optical crystal, we have achieved in the generation of the 8-dB squeezed vacuum. Injecting the squeezed vacuum into the dark port of the interferometer, we could reduce the shot-noise level by 2dB. This is the first practical demonstration of the shot-noise reduction in the gravitational-wave detector using squeezed light.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2010年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
年度			
年度			
総計	25,600,000	7,680,000	33,280,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： 重力波、スクイズド光、レーザー干渉計、量子光学、宇宙物理

## 1. 研究開始当初の背景

1980年にCavesは、レーザー干渉計重力波検出器の量子限界はスクイズド光を利用することにより破ることができることを示した。それまでは、原理的な測定限界として量子限界があるので、これ以上に感度を上げることは不可能だと思われていた。しかし、Cavesは干渉計のダークポートにスクイズされた真空揺らぎを入射することにより

ショット雑音が下がり重力波に対する感度が向上することを示した。当時は干渉計の感度もそれほど高くなく、量子論的效果を確かめることは不可能であった。現在は当時に比べてレーザー干渉計の技術は飛躍的に向上し、量子限界が議論できる程度まで感度が向上してきた。一方、スクイズド光の研究もさかんになり、特に最近は応用レベルに達するほど飛躍的に発展してきた。こうしてレー

レーザー干渉計とスクイズド光技術がそれぞれ発展することにより、それを結合して標準量子限界を超えたレーザー干渉計重力波検出器を設計することが可能となった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、スクイズド光を用いてレーザー干渉計重力波検出器の標準量子限界を打ち破り第3世代重力波検出器の可能性を切り開くことである。この技術的アプローチは現在考えられる最も有望な量子限界の克服法であり、その研究は重力波天文学実現にとって大きな意義をもっている。つまりスクイズド光の導入は、重力波が実用的な天文学として成立しうるかどうかの鍵を握る重要な技術である。われわれがこれまで確立した高度な干渉計技術と、近年進歩の著しいスクイズド光技術を融合させることによりこれを実現しようとするものである。レーザー干渉計重力波検出器の検出原理を図1に示してある。マイケルソン型のレーザー干渉計の真上から重力波が入射すると、重力波のもつ4重極特性により干渉計の一方の腕の長さは伸び他方の腕は縮む。両端のミラーからの反射光をビームスプリッターで再結合させそれを光検出器に入射させると、両腕の相対的な変化は干渉縞の変化として光検出器によって電気信号に変えられる。

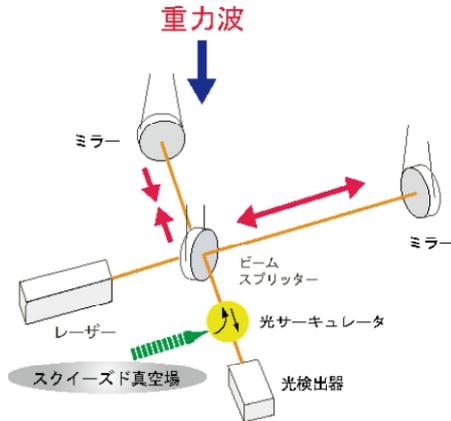


図 1. スクイズド光を利用したマイケルソンレーザー干渉計重力波検出器

スクイズド光導入の基本的な方法としては同じ図に示すように、これまでのレーザー干渉計重力波検出器のダークポートにスクイズされた真空場を注入することによりショット雑音を下げるといったものである。ショット雑音レベルが 6dB 下がれば干渉計の感度は 2 倍良くなり、それにより全天でカバーする領域が 8 倍広がるので、その分だけ重力波検出の頻度が増えることになる。将来的には、ショット雑音レベルが 20dB 下がり、干渉計のカバーする領域が 1000 倍増えるということも夢ではない。

本研究では将来に向けて動作原理の確認とショット雑音低減の実証を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、スクイズド真空場と呼ばれる非古典光を用いたショット雑音の低減の実証を目指し実験を行った。図2に実験装置全体の簡略化したブロックダイアグラムを示している。光源としては波長 1064nm の Nd:YAG レーザーを用いる。レーザーからの光は second-harmonic generator (SHG) で波長 532nm に変換され、その光を optical parametric oscillator (OPO) に入射してスクイズド真空場を作り出す。スクイズド光はローカル信号と混合されホモダイン検波で検出される。その信号は SHG 光共振器や OPO 光共振器の制御に使われる。共振器の制御はミラーに取り付けられた PZT に電圧をかけることによりおこなわれる。それぞれの制御には EO による周波数変調と RF 検波を利用した Pound-Drever-Hall 法が用いられる。OPO の結晶としては PPKTR が用いられている。ここで作られたスクイズド光を干渉計のダークポートに注入することによりショット雑音を下げる。

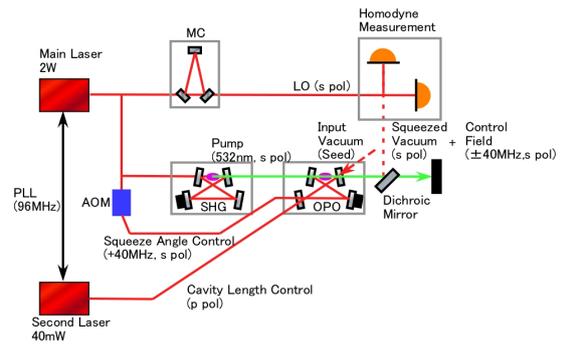


図 2. 実験装置の簡略化されたブロックダイアグラム

## 4. 研究成果

以下が研究成果の概要である。

本研究では、非線形光学結晶を用いた 2 次の非線形光学効果を用いたスクイズド真空場生成装置を開発し、8 dB のスクイズングに成功した。そしてプロトタイプ重力波検出器を設置し、生成したスクイズド真空場を入射する事で初めてスクイズド真空場を用いて重力波検出器の散乱雑音の低減に成功した。現在は、スクイズド真空場の入射光学系の損失が比較的大きいため、散乱雑音の低減は 2 dB であった。

まず、1064nm の Nd:YAG レーザーを波長 532nm に変換するための second-harmonic generator (SHG) を設計製作した。そして SHG が設計通りに機能することを確認した。製作した SHG のブロックダイアグラムを図 3. に示す。

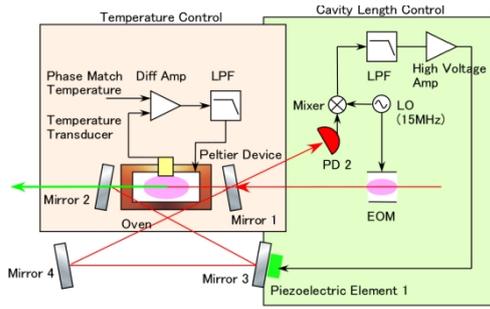


図 3. SHG の構成を示すブロックダイアグラム

PPKTP 結晶の温度をオーブンで調節することにより、1.2W の入力に対して 550mW の第 2 高調波を発生することができた。

図 4. は SHG 出力を利用してスクイズド光を発生するための OPO (Optical Parametric Oscillator) の実際の写真である。共振器のタイプとしては Bow-Tie 型が用いられている。

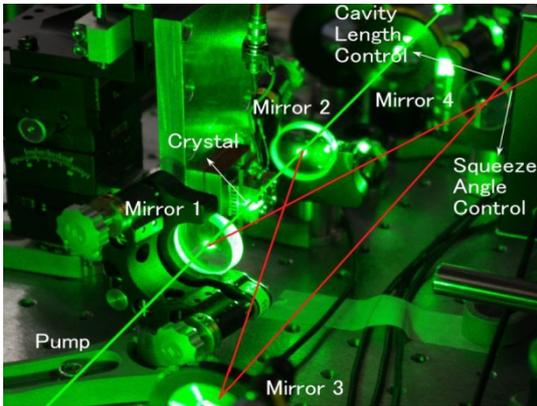


図 4. OPO の写真。緑は 532nm, 赤は 1064nm の光を示している。

図 5. はマイケルソン干渉計部分の写真であり、スクイズド光が入射されている。

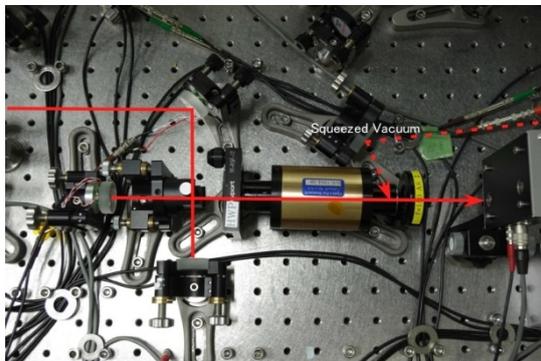


図 5. マイケルソン干渉計と入射スクイズド光

図 6、図 7 に示したのは実験装置全体の写真である。

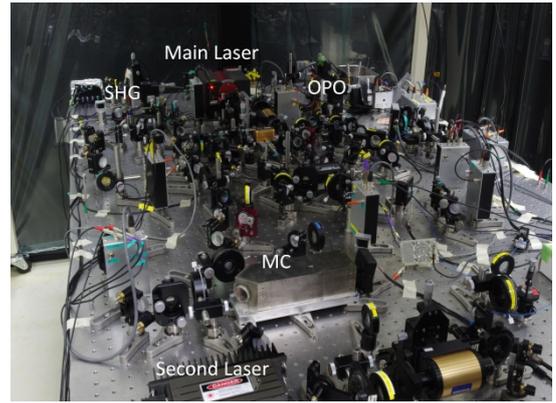


図 6. 実験装置全体の写真(1)

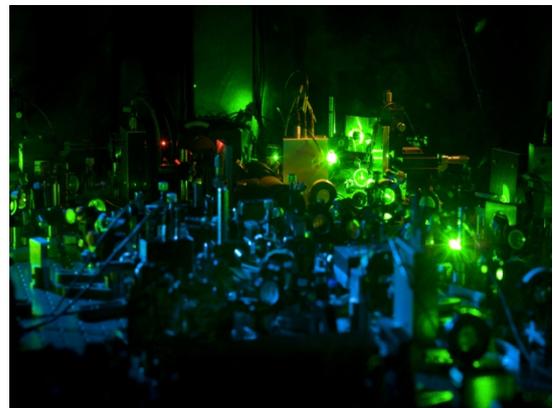


図 7. 実験装置全体の写真(2)

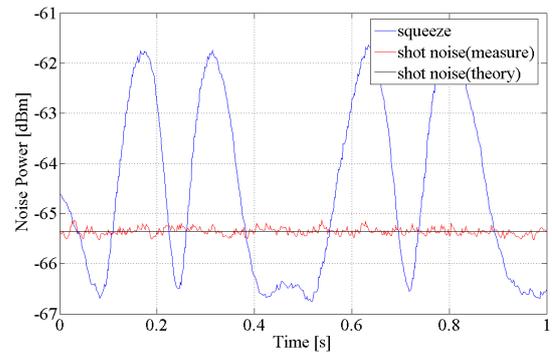


図 8. スクイズド光によるショット雑音の低減

図 8. は最終的にマイケルソン干渉計のショット雑音レベルがダークポートに入射されたスクイズド光により、2dB 低減されたことを示している。この値はスクイズド角度 (グラフ横軸) によって変わることがわかる。現時点では、スクイズド真空場の入射光学系の損失が比較的大きいため、ショット雑音の低減は最大で 2 dB であった。しかし、スクイズド光の生成、およびマイケルソン干渉計への入射

によって、このスキームによってレーザー干渉計重力波検出器の感度が向上できることを実証した意義は大きいと思われる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

①Koji Ishidoshiro, Masaki Ando, Akiteru Takamori, Hirota Takahashi, Kenshi Okada, Nobuyuki Matsumoto, Wataru Kokuyama, Nobuyuki Kanda, Yoichi Aso, and Kimio Tsubono: First Observational Upper Limit on Gravitational Wave Backgrounds at 0.2 Hz with a Torsion-Bar Antenna, Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 161101.

②Masaki Ando, Koji Ishidoshiro, Kazuhiro Yamamoto, Kent Yagi, Wataru Kokuyama, Kimio Tsubono, and Akiteru Takamori: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observations, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 161101.

[学会発表] (計9件)

①松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 VI、日本物理学会、三宮、2012年3月

②松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 V、日本物理学会、青森、2011年9月

③Nobuyuki Matsumoto, Kakeru Takahashi, Yoichi Aso, Kimio Tsubono, Genta Masada, Akira Furusawa, The production of a squeezed state for LCGT, Amaldi9, Wales, July 2011

④松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 IV、日本物理学会、新潟、2011年3月

⑤松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 III、日本物理学会、北九州、2010年9月

⑥高橋走、松本伸之、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、量子光学的手法を用いた

重力波検出器の感度向上実験 II、日本物理学会、岡山、2010年3月

⑦松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 II、日本物理学会、岡山、2010年3月

⑧高橋走、松本伸之、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、量子光学的手法を用いた重力波検出器の感度向上実験 I、日本物理学会、兵庫、2009年9月

⑨松本伸之、高橋走、麻生洋一、坪野公夫、政田元太、古澤明、重力波検出器の感度向上に向けたスクイーズド光の生成実験 I、日本物理学会、兵庫、2009年9月

[その他]

ホームページ等

<https://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/wiki/Lab/index.php/SqueezingExp>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

坪野 公夫 (TSUBONO KIMIO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：10125271

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし