

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02886

研究課題名(和文) 中性子星連星合体の観測を可能にする重力波信号のパラメトリック増幅装置の開発

研究課題名(英文) Development of a parametric amplification method of a gravitational wave signal for the observation of a binary neutron star merger

研究代表者

宗宮 健太郎 (Somiya, Kentaro)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：10582603

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)：2015年に米国LIGO望遠鏡が初観測に成功して以来、50例に及び重力波の観測が報告されている。そのうち数例が中性子星連星の公転運動がもたらす重力波であると考えられている。中性子星連星は、合体時に4-5kHzのバースト信号を生むと考えられているが、現行の望遠鏡はその帯域の感度が悪いため、鮮明な観測は不可能である。本研究では、望遠鏡に非線形光学素子を組み込み、オプトメカ結合を増強することで、4-5kHzの感度を大幅に向上する技術を開発している。4年の研究期間内に、信号リサイクル干渉計と光共振器実験を構築し、信号増幅の検証と伝達関数測定によるオプトメカ結合の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力波の初観測以降、次世代望遠鏡の計画が世界各地で始まっている。我々が全世界に先駆けて実施したパラメトリック信号増幅は国際的な注目をあび、ここ数年で類似の提案が相次いだ。そして、いくつかのプロトタイプ実験が行われ、次世代望遠鏡にそれらの技術を組み込むかどうかの議論が活性化している。現行の第二世代までは、欧米日の望遠鏡が同じ周波数帯での高感度化を目指したが、次世代では、それぞれが特徴を発揮して、さまざまな望遠鏡が実現していくだろう。本研究がもたらした意義はとても大きいと考えている。

研究成果の概要(英文)：There have been 50 cases of gravitational-wave events reported since the first discovery accomplished by the LIGO telescope in 2015. A few of them are the events by binary neutron stars, which are expected to generate a 4-5kHz burst signal at the merger. Current telescopes, however, cannot observe the merger signal as their sensitivities in the band is not as good. In this research, we propose to implement a non-linear crystal for the parametric signal amplification process to enhance the opto-mechanical coupling and then to improve the sensitivity at the 4-5kHz. We built a signal-recycled interferometer and a Fabry-Perot cavity and have succeeded in demonstrating the parametric signal amplification and in observing the optical spring.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 光バネ 非線形光学

1. 研究開始当初の背景

2015年9月、米国のLIGO望遠鏡がブラックホール連星からの重力波を観測し、100年前にアインシュタインによって存在が予言された重力波の直接観測を史上初めて実現すると共に、光では見えない天体現象を重力波によって観測することによる重力波天文学の窓が開いた(図1)。本研究が開始された2017年度は、LIGOの第二次観測が実施されたときで、重力波の観測例もまだブラックホール連星の3例であった。次の観測ターゲットとして、中性子星連星合体からの重力波が期待されており、研究代表らは連星合体の瞬間を高い信号雑音比で観測するための新技术を模索していた。研究代表は、2012年度に採択された若手研究Aにおいて、非線形光学効果を用いたパラメトリック信号増幅装置を提案し、プロトタイプ実験の運転に成功していた。そこで、この方法をドイツのGEO-HFに導入することで、キロヘルツ帯でLIGOを大幅に上回る感度を実現し、中性子星の内部構造を明らかにするという目標を掲げ、本研究を開始した。

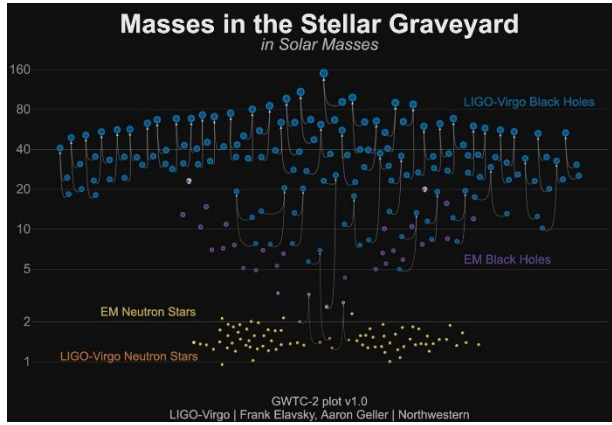


図1: LIGOとVirgoがこれまでに観測したブラックホールと中性子星の質量分布 [Credit: LIGO-Virgo / Northwestern U / Frank Elavsky & Aaron Geller]。本研究開始当時は3例の観測だったが、第3次観測前半までに50個の重力波イベントが観測されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、パラメトリック信号増幅装置による重力波望遠鏡の高感度化のデモンストレーション実験を成功させ、GEO-HFに本技術を導入して、中性子星連星合体からの重力波を高感度に観測する技術を確立することである。若手研究Aでは、非線形光学素子を組み込んだ干渉計を運転するところまでは成功したが、信号増幅は確認できず、光バネも観測できなかった。本研究では、パラメトリック信号増幅の本質である、光バネの共振周波数のシフトを観測することを目標とした。干渉計の構成は、ダークフリッジに制御したマイケルソン干渉計のダークポート側に信号リサイクル鏡を設置し、干渉計と信号リサイクル鏡で構成される信号リサイクル共振器内に非線形光学素子を配置するというものである(図2)。信号リサイクル共振器は共振状態からわずかに離調されており、干渉計の差動信号は信号リサイクル鏡で反射して干渉計に再入射する際に、位相変調信号から部分的な振幅変調成分を含む信号に変わる。振幅変調成分はレーザーから入射されるキャリア光と結合し、輻射圧で鏡を揺らすため、再び干渉計に差動信号をもたらし、ここに信号のループが形成される。輻射圧を経由した信号のループはオプトメカニカル結合と呼ばれ、光バネという振動子を生成する。本研究では、この光バネの観測と、非線形光学素子による信号増幅、そして信号増幅による光バネ周波数のシフトという3つを目標にしている。

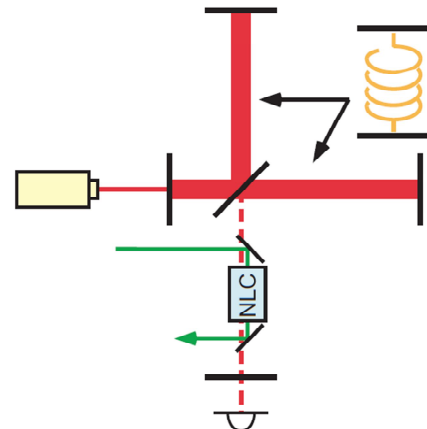


図2: 信号リサイクル干渉計に非線形光学素子(NLC)を導入して光バネを増強する。

3. 研究の方法

本研究では東工大北実験棟に建設したクラス1000のクリーンルーム内に信号リサイクル干渉計を構築し、干渉計の鏡位置を変化させて干渉計の応答を測定する伝達関数測定により、光バネの観測を行い、さらに非線形光学素子を制御して光バネの共振周波数のシフトを観測する(図3)。本実験で用いる主レーザーの波長は1064nmである。信号リサイクル共振器内にはDichroic鏡を通じて波長532nmのポンプ光を投入する。主レーザーとポンプ光の間の相対位相次第で、信号増幅の度合いが変わる。本実験ではコヒーレントコントロール法と呼ばれる手法で、この相対位相を獲得する。干渉計の片方の腕には、質量200mgの軽量

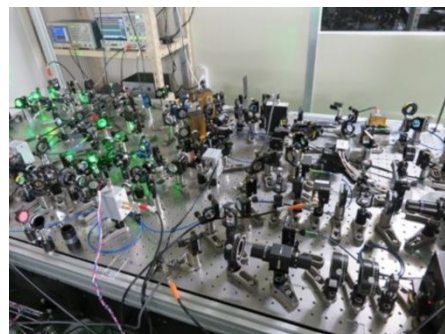


図3: プロトタイプ実験の様子。

鏡が、4点支持の渦巻バネで懸架されている。伝達関数測定で観測できる帯域は数十 Hz 以上であるので、光バネの周波数をそこまで押し上げるため、ファイバーアンプを用いて入射光量を 10W まで増幅して実験を行う。

それでも、信号リサイクル干渉計だと輻射圧が弱いので、ファブリーペロー共振器に非線形光学素子を組み込んだ実験も合わせて実施した。パワーと信号を分離しない単純な光共振器の場合、パラメトリック増幅するのはパワーか信号のどちらかだけで、もう一方は増幅指数が小さいうちは減衰してしまうのだが、増幅指数がある閾値を超えると、どちらも増えていくことが分かっている。ファブリーペロー実験でも信号リサイクル干渉計と同様の効果を検証することが可能である。

4. 研究成果

信号リサイクル干渉計実験では、ファイバーアンプを導入して入射光量を最大 10W まで増強し、さらに制御系を改良して安定動作を確立した。ポンプ光生成においては、最大 300mW まで増強することができた。パラメトリック信号増幅にも成功し、片腕をブロックした状態で 0.2dB の増幅、干渉計をダークフリンジに制御した状態で、1.3dB の増幅を確認することができた(図4)。計算上は、0.3dB 程度の増幅で、光バネの共振周波数は 100Hz まで上昇するはずであり、要求値は満たしているが、光バネの観測には成功していない。原因としては、コヒーレントコントロール法がまだ完全ではないため、パラメトリック増幅の相対位相が制御できていないからである。サブキャリアの周波数が 80MHz と高すぎたため、AOM を追加して 5MHz 程度の周波数のサブキャリアでコヒーレントコントロール法を実施することを計画している。

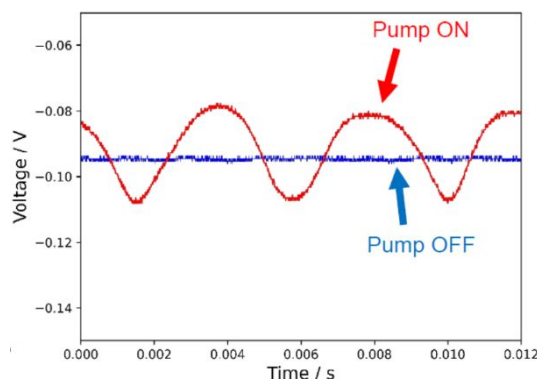


図 4: 信号リサイクル干渉計実験において、ポンプ光の相対位相を掃引した際に干渉計から漏れ出るキャリア光の出力の変化から、パラメトリック信号増幅度を見積もることができる。

ファブリーペロー共振器実験では、共振器内の光強度測定と、掃引スペクトル解析によるフィネスの測定から、パワーの増幅度が 19 倍程度で、パワーを規格化した際の信号の増幅度が 1.4 倍程度であることが分かった。増幅の閾値を超えて、どちらも増幅していることになる。また、非線形光学結晶を導入しない状態で、伝達関数測定による光バネの観測に成功した(図5)。懸架系は安定度の高いベリリウム銅製の渦巻バネを用いており、機械共振周波数は 35Hz 程度である。光バネの周波数は 100-250Hz 程度であった。この状態で、非線形光学結晶を導入した状態では光バネが観測できなかった。これは、PPLN 結晶の熱吸収が大きかったため、PPKTP 結晶に変更して実験を行ったところ、光バネの観測に成功した。パラメトリック増幅による光バネ周波数のシフトを観測するところまでは至らなかったが、2021 年度中には観測できると考えている。

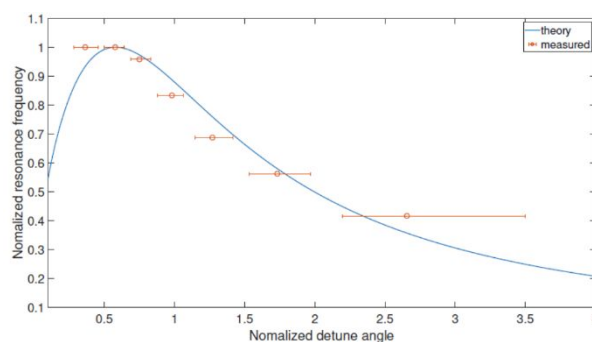


図 5: ファブリーペロー共振器実験で光バネを観測したときの様子。非線形光学結晶は入っていない。共振器の離調角を変えると、光バネの共振周波数が変わっていくのが分かる。

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 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yamamoto Kohei, Kokeyama Keiko, Michimura Yuta, Enomoto Yutaro, Nakano Masayuki, Ge Gui-Guo, Uehara Tomoyuki, Somiya Kentaro, Izumi Kiwamu, Miyakawa Osamu, Yamamoto Takahiro, Yokozawa Takaaki, Fujikawa Yuta, Fujii Nobuyuki, Kajita Takaaki	4. 巻 36
2. 論文標題 Design and experimental demonstration of a laser modulation system for future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 205009 ~ 205009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab4489	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 Somiya K., Hirose E., Michimura Y.	4. 巻 100
2. 論文標題 Influence of nonuniformity in sapphire substrates for a gravitational wave telescope	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 82005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.082005	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 Somiya Kentaro	4. 巻 74
2. 論文標題 Quantum noise reduction techniques in KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The European Physical Journal D	6. 最初と最後の頁 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjd/e2019-100471-2	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 Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer	4. 巻 97
2. 論文標題 A Direct Approach for the Fluctuation-Dissipation Theorem under Non-Equilibrium Steady-State Conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.102001	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 Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, and Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Particle swarm optimization of the sensitivity of cryogenic gravitational wave detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 122003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.122003	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 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.Flamini	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 future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review 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 Junko Kasuya, John Winterflood, Ju Li, Kentaro Somiya	4. 巻 957
2. 論文標題 Optical design and suspension system of the KAGRA output mode-cleaner	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/957/1/012009	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 Yuta Michimura et al.	4. 巻 34
2. 論文標題 Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 225001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/aa90e3	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 KAGRA Collaboration et al	4. 巻 1
2. 論文標題 Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptx180	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

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 K.Somiya and E.Hirose
2. 発表標題 Study of the inhomogeneity in a sapphire substrate for KAGRA
3. 学会等名 GR22/Amaldi13
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Harada, S.Otobe, and K.Somiya
2. 発表標題 Optical parametric amplification using nonlinear optical effect for the next generation gravitational wave detector
3. 学会等名 GR22/Amaldi13
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Otobe, R.Nakashima, and K.Somiya
2. 発表標題 Development and installation of the output mode-cleaner for KAGRA
3. 学会等名 GR22/Amaldi13
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小田部荘達, 宗宮健太郎, 原田健一
2. 発表標題 次世代重力波検出器に向けた非線形光学効果を用いた信号増幅システムの開発III
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田健一, 小田部荘達, 宗宮健太郎
2. 発表標題 次世代重力波検出器に向けた非線形光学効果を用いた信号増幅システムの開発IV
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Harada, S.Otobe, and K.Somiya
2. 発表標題 Parametric signal amplification for a high-frequency gravitational detector
3. 学会等名 "Challenges and Opportunities of High Frequency Gravitational Wave Detection"
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S.Otobe, K.Harada, and K.Somiya
2. 発表標題 Development of the signal amplification system using a nonlinear optical effect for the next generation gravitational wave detector
3. 学会等名 "Challenges and Opportunities of High Frequency Gravitational Wave Detection"
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Somiya
2. 発表標題 KAGRA+
3. 学会等名 GWADW meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Somiya
2. 発表標題 Active media and unstable filters: Commonalities and difference
3. 学会等名 GWADW meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宗宮健太郎, 廣瀬栄一
2. 発表標題 重力波望遠鏡における部分反射鏡の内部の非一様性が引き起こす問題の検証
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島良介, 宗宮健太郎
2. 発表標題 磁石懸架を用いた光干渉計の制御
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宗宮健太郎
2. 発表標題 重力波検出器の開発
3. 学会等名 産業計測第36委員会 第429回研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Somiya Lab. http://www.gravity.ircs.titech.ac.jp/index.html Somiya Lab. http://www.gravity.ircs.titech.ac.jp/index.html Somiya Lab. http://www.gravity.ircs.titech.ac.jp/
--

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