

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2016

課題番号：24684014

研究課題名(和文) 光スクイーズ装置を用いた能動的信号増幅システムの開発

研究課題名(英文) Development of a parametric signal amplification system for a gravitational-wave detector

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) 19,200,000円

研究成果の概要(和文)：重力波検出器を構成する光共振器をわずかに共振からずらすことで、輻射圧による復元力が働き、光バネが形成される。光バネの共振周波数で重力波に対する感受率が向上するため、非線形光学素子を用いて光バネの共振周波数を上昇させることで、中性子星連星合体などといった高周波の重力波の観測が可能となる。

我々は東工大にプロトタイプ機を製作し、非線形光学素子を組み込んだ、シグナルリサイクリング干渉計の二自由度同時制御に成功した。本技術は、ドイツの第二世代検出器GEO-HFの将来計画としても取り上げられており、今後は、実機への導入に向けたさらなる開発を進めていく。

研究成果の概要(英文)：An optical spring can be formed via radiation pressure by detuning a distance of two test masses in a gravitational-wave detector from an integer multiple of the laser wavelength. The susceptibility of the detector to gravitational waves is enhanced at the resonant frequency of the optical spring. We propose to use a non-linear crystal inside the signal-recycling cavity to increase the resonant frequency so that one can expect to observe gravitational waves from, for example, a merger of binary neutron stars.

We constructed a prototype interferometer at Tokyo Tech and succeeded in operating a signal-recycled Michelson interferometer with a non-linear crystal inside the recycling cavity. We propose this technique to a German detector and the success of our experiment is an important milestone.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 非線形光学 光バネ

1. 研究開始当初の背景

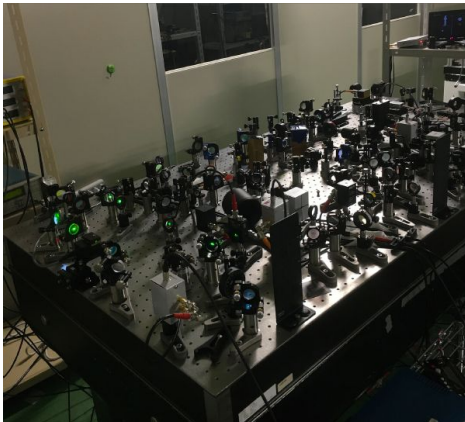
2010 年は、世界各国で第二世代重力波検出器の建設が開始された年である。日本では KAGRA の大型予算が採択され、米国では LIGO から Advanced LIGO へのアップグレードが開始された。重力波の初観測へ向けて、最も有望と言われた 100Hz 付近の感度の向上が重点的に行われた。一方で、キロヘルツ帯の重力波に対する感度は、光のショットノイズで制限されることが分かっており、その改善のためにはレーザーパワーを上げるか、スクイーミング技術を導入するしかないと考えられていた。第二世代以降の展開を考えると、高周波の感度向上を実現する技術がなく、一縷の望みを託されたのが、本研究で開発するパラメトリック信号増幅であった。

2. 研究の目的

パラメトリック信号増幅は、ドイツの重力波検出器のような、基線に共振器のない、シグナルリサイクル型干渉計に適していることが分かっていた。本研究では、それと同じ干渉計構成を持つプロトタイプ機を製作し、信号増幅の原理検証実験を成功させることを目標とした。本実験を成功させ、ドイツの検出器の将来計画として信号増幅技術を提案したいと考えている。

3. 研究の方法

パラメトリック信号増幅による感度向上には、まず干渉計内に光バネを形成する必要がある。光バネは非共振状態に制御された干渉計内で輻射圧の影響で鏡に復元力が働く現象である。実機では 10kW 程度の光が干渉計内に蓄えられるが、プロトタイプ機(下図)ではそのような高出力光源は使用しないので、代わりに鏡の質量を軽くすることで、同じ程度の輻射圧効果が検証できるように工夫をした。



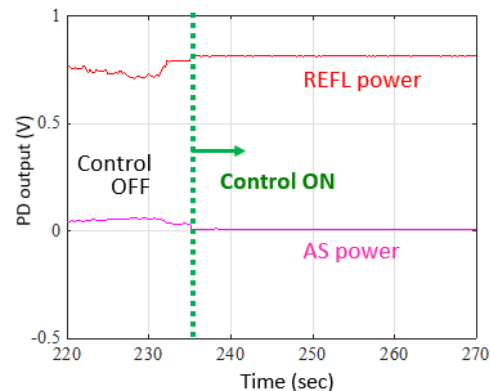
研究はいくつかのステップに分けられ、複数の大学院生により並行して進められた。まずは非線形光学素子を組み込んだ共振器の動作実験である。PPKTP 結晶で SHG を製作し、

200mW 以上の倍波の光を生成することに成功した。次にシグナルリサイクル干渉計の 2 自由度同時制御を行った。AOM を用いて周波数シフトした電場で共振器を非共振状態に安定に制御した。さらに、シグナルリサイクル共振器内にさきほどは別の PPKTP 結晶を導入し、SHG で生成した倍波を入射し、干渉計の出力電場とモードマッチングを行った。これと並行して、軽量鏡を吊るす特殊な懸架系を製作した。

4. 研究成果

我々はパラメトリック信号増幅という効果について、理論面と実験面の両方で研究を進めた。理論面では、ドイツの検出器で感度向上を実現するセットアップを見つけ出すとともに、光学ロスがパラメトリック増幅してしまうという問題点も発見した。理論面では研究成果を投稿論文にまとめ、Physics Letters A に出版した。

実験面では、シグナルリサイクル干渉計の同時制御は難航したが、フォトデテクタの改良や制御法の改良により、安定な 2 自由度同時制御を実現できた(下図)。



この干渉計構成を実験的に実現したのは、本実験が初めてとなる。2016 年 9 月には、ドイツの重力波検出器の将来計画会議において、最も魅力的な計画の一つとして挙げられた。また軽量鏡を干渉計内に組み込んではいないが、実験は継続しており、2017 年度中には光バネの観測とパラメトリック信号増幅による周波数の上昇を確認できると考えている。

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 4 件)

"Concepts and research for future Detectors,"

F. Acernese et al. (incl. K. Somiya) General Relativity and Gravitation, 46:1700 (2014) 査読有

"Method to reduce excess noise of a

detuned cavity for application in KAGRA,"
S.Ueda, N.Saito, D.Friedrich, Y.Aso,
and K.Somiya
Class.Quantum Grav. 31, 095003 (2014) 査読有

"Parametric signal amplification to
create a stiff optical bar,"
K.Somiya, Y.Kataoka, J.Kato, N.Saito,
and K.Yano
Phys. Lett. A 380, 521-524 (2016) 査読有
"Estimation of losses in a 300 m filter
cavity and quantum noise reduction in the
KAGRA gravitational-wave detector,"
E.Capocasa, M.Barsuglia, J.Degallaix,
L.Pinard, N.Straniero, R.Schnabel,
K.Somiya, Y.Aso, D.Tatsumi, and
R. Flaminio
Phys. Rev. D 93, 082004 (2016) 査読有

〔学会発表〕(計 14 件)

"デチューンをした干渉計におけるオフ
セット問題の解決 I"
上田慎一郎, 斎藤那菜, Daniel Friedrich,
麻生洋一, 大前宣招, 宗宮健太郎, KAGRA
Collaboration
日本物理学会 (京都産業大学, '12/9/11)
"デチューンをした干渉計におけるオフ
セット問題の解決 I"
斎藤那菜, 上田慎一郎, Daniel Friedrich,
麻生洋一, 大前宣招, 宗宮健太郎, 菅本晶夫,
KAGRA Collaboration
日本物理学会 (京都産業大学, '12/9/11)
"A new topology for future detectors,"
K.Somiya

The 4th ET meeting (Hannover, '12/12/4)

"重力波検出器における光スクイーミング
技術の応用"
宗宮健太郎, 上田慎一郎, 斎藤那菜,
須佐友紀

日本物理学会 (広島大学, '13/3/26)
"An optical spring with an intra-cavity
squeezer," (poster)
J.Kato, Y.Sakihama, T.Westphal,
S.Gossler, and K.Somiya
GR20/Amaldi10 (Warsaw, '13/7/10-12)

"A solution of an offset problem in
detuned RSE," (poster)
N.Saito, D.Friedrich, Y.Aso, and K.Somiya
GR20/Amaldi10 (Warsaw, '13/7/8-9)

"デチューンをした干渉計におけるオフ
セット問題の解決 III,"
斎藤那菜, 上田慎一郎, Daniel Friedrich,
麻生洋一, 大前宣招, 宗宮健太郎, 菅本晶夫,
KAGRA Collaboration,
日本物理学会 (高知大学, '13/9/22)

"重力波測定器におけるスクイーミングと
光バネの移動,"
加藤準平, 斎藤那菜, 矢野和城,
宗宮健太郎
日本物理学会 (東海大学, '14/3/28)

"Signal amplification for a stiff
optical spring," (poster)
K. Yano, J. Kato, S. Atsuta, Y. Kataoka,
and K.Somiya

GWADW2014 (Takayama, '14/5/26-30)
"Parametric amplification for a stiff
optical spring" (poster)
K. Yano, J. Kato, S. Atsuta, Y. Kataoka and
K. Somiya

LSC-Virgo Collaboration meeting
(Pasadena, '15/3/16-19)
"重力波検出のための非線形光学素子を
用いた信号増幅システムの開発"
宗宮健太郎, 加藤準平, 矢野和城,
KAGRA Collaboration
日本物理学会 (早稲田大学, '15/3/23)

"Parametric amplification for a stiff
optical spring"(poster)
Y. Kataoka, J. kato, K. Yano, S. Atsuta,
and K. Somiya
GWADW2015 (Alaska, '15/5/17-22)

"Parametric amplification to improve the
sensitivity of next generation detectors
at high frequencies"
K.Somiya, K. Yano, Y. Kataoka,
and T. Yaginuma
7th Einstein Telescope Symposium
(Florence, '16/2/2-3)

"次世代重力波検出器に向けた非線形光学
結晶を用いた信号増幅システムの開発"
片岡優, 宗宮健太郎, 柳沼拓哉
日本物理学会 (宮崎大学, '16/9/24)"

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者

宗宮健太郎 (SOMIYA, Kentaro)

東京工業大学・理学院物理学系・准教授

研究者番号：10582603

(2)研究分担者

なし

(3)研究協力者

なし