T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	重力波信号増幅システムにおける光熱効果及び非線形光学効果の研究
Title(English)	Photothermal and nonlinear optical effects in the signal amplification system for a gravitational wave detector
著者(和文)	小田部荘達
Author(English)	Sotatsu Otabe
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12310号, 授与年月日:2023年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:宗宮 健太郎,上妻 幹旺,佐藤 琢哉,陣内 修,相川 清隆
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12310号, Conferred date:2023/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	物理学 系 物理学 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 （ 理学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	小田部 荘達	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	宗宮 健太郎
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

重力波は時空の歪みが光速で伝わる現象であり、一般相対論の枠組みにおいて導出される。重力波の初検出は2015 年になされ、それ以降 90 程度の重力波イベントが観測されている。特に、2017 年には連星中性子星合体に伴う重力波が観測され、電磁波望遠鏡による追観測により重力波対応天体が発見された。重力波と電磁波によるマルチメッセンジャー観測により、ショートガンマ線バーストの起源の解明、速い中性子捕獲過程による重元素合成の確認、Hubble 定数の独立した新たな測定結果など、数々の知見がもたらされた。

現在の重力波検出器は、中性子星連星合体のインスパイラル期を捉えるために、100 Hz 程度の帯域で最も感度が良くなるよう設計されている。一方、超新星爆発、一部のパルサー、そして中性子星連星合体後に形成される残骸などからは、周波数が数 kHz の高周波重力波が放出されると予測されている。特に、中性子星連星合体後に放出される重力波には、中性子星の状態方程式の推定に決定的な役割を果たす情報が含まれている。しかし、現在稼働している重力波検出器の高周波数帯域における感度は光の量子性に起因する雑音により制限されており、これらの検出器が今後高周波重力波を捉える見込みは薄い。高周波イベントに特化した重力波検出器も新規設計されているほど、高周波数重力波を捉えるための更なる研究開発が切実に求められている。

特定の帯域における重力波検出器の感度を改善する手法として、光ばねによる信号増幅が挙げられる。光ばねは輻射圧が鏡の変位に比例するとき発生し、その共振周波数で重力波信号を増幅することができる。しかし、光ばね定数はレーザー光強度に比例するため、共振周波数の高い光ばねを生成することは通常困難である。使用できる安定したレーザー光強度には制限があり、高強度のレーザー光により引き起こされる熱レンズ効果は干渉計の正常な動作を妨げる。また、共振器内のレーザー光往復回数を増やすと検出器の帯域幅が狭くなってしまう。

この問題を解決するために、非線形光学効果を用いて硬い光ばねを生成する手法が提唱された。共振器内で非線形光学効果を起こすことで、共振器の信号に対する応答率を高めることができる。すなわち、鏡の変位に対して輻射圧がより鋭く応答するようになるので、共振器内レーザー光強度を変えずに光ばねの共振周波数を高くすることができるのである。この手法を用いて共振周波数が数 kHz の光ばねを生成することができれば、高周波数重力波を感度良く捉えることができるようになる。

実際の重力波検出器に信号増幅システムを実装する前に、本手法の原理検証実験を行う必要があることは言うまでもない。重力波信号増幅システムの本質は、非線形光学効果による光ばねの強化にある。共振器内信号増幅による光ばねの共振周波数変化を観測することは、本手法の実用性を示すための重要なマイルストーンである。本研究では、光パラメトリック増幅と光 Kerr 効果という二つの非線形光学効果を用いて信号増幅システムを構築し、共振器内信号増幅効果により強化した光ばねの観測を試みた。実際の重力波検出器の基本構成よりも簡易な光学系である Fabry-Perot 共振器を用いて実験を行うために、構築した光学系と重力波検出器の対応関係については特に注意深く議論を行った。また、非線形光学結晶に強いレーザー光強度が入射するため、光熱効果が輻射圧や光ばね定数に影響を及ぼした。光熱効果と非線形光学効果が光ばねに及ぼす影響を区別するために、光熱効果のモデリングとパラメータ推定法についても詳しく議論した。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	物理学 系 物理学 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 （ 理学 ） Doctor of
学生氏名： Student's Name	小田部 荘達	指導教員（主）： Academic Supervisor(main)	宗宮 健太郎
		指導教員（副）： Academic Supervisor(sub)	

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

光パラメトリック増幅実験においては、非常に優れた変換効率を持つ二次高調波発生共振器と光パラメトリック発振器を構築することに成功した。光ばねの強化が観測されると予測できる程度の十分な信号増幅率を達成したが、光ばねの生成に必要となる強い共振器内強度のために光パラメトリック過程が抑圧されてしまい、光ばねの強化を確認することはできなかった。光熱効果実験においては、オプトメカ振動子の感受率測定に基づく光熱パラメータの新しい推定法を開発した。本手法を用いると、従来手法では推定できないような僅かな光熱効果であっても精密に推定することが可能である。光熱効果と光ばね定数を同時に推定することにより、測定結果から光熱効果の影響を実質的に除去する手法も確立した。光 Kerr 効果実験においては、二次の非線形光学効果を連鎖的に引き起こすことで、強い信号増幅効果を達成した。最終的に、固定鏡を用いた測定結果に基づき光熱効果の影響を除去することで、信号増幅効果によって強化された光ばねの観測に成功した。

The inception of gravitational wave astronomy has revealed astonishing astronomical insights and also underscored the importance of further improving the sensitivity of detectors. High-frequency gravitational waves emitted from binary neutron star post-merger remnants contain critical information about high-density nuclear materials that cannot be accessed by terrestrial experiments. However, high-frequency gravitational waves have yet to be observed and are unlikely to be observed because of the lack of sensitivity of modern gravitational wave detectors. Intracavity signal amplification using nonlinear optical effects is a promising technique for dramatically improving the sensitivity of gravitational wave detectors in the high-frequency band. The signal amplification effect generates a stiff optical spring that can amplify high-frequency gravitational wave signals at its resonant frequency. In this thesis, we construct an intracavity signal amplification system using two nonlinear optical effects, namely, optical parametric amplification and the optical Kerr effect, and investigate the behavior of the optical spring generated in the cavity. We found that the photothermal effect caused by thermal absorption in a nonlinear optical crystal is an essential characteristic of a signal amplification system. We developed a method to precisely estimate the photothermal parameters by measuring the susceptibility of an optomechanical oscillator. Finally, we successfully observed an optical spring enhanced by the intracavity signal amplification effect by appropriately eliminating the photothermal effect from the measurement results. This study revealed the impact of intracavity signal amplification on optomechanical systems and demonstrated a signal amplification system that improved the sensitivity of gravitational wave detectors in the high-frequency band.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).