

氏 名 佐 藤 修 一

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第389号

学位授与の日付 平成11年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 A Recycled Laser Interferometer for Gravitational Wave
Detection

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 石黒 正人
教 授 藤本 眞克
助 教 授 小林 行泰
教 授 植田 憲一（電気通信大学）
助 教 授 川村 静児（国立天文台）

論文内容の要旨

Several ground-based large-scale and medium-scale laser interferometers (LIGO, VIRGO, GEO600 and TAMA300) are now under construction for gravitational wave detection. A power-recycling technique is planned as a standard optical configuration to improve the shot-noise limited sensitivity. However, there was no demonstration of recycling on Fabry-Perot prototype interferometer with suspended masses and it was not clear that the recycling is really applicable to full scale detector.

This work focused on the most exciting issue of power recycling, recycling gain. The recycling gain is defined as a power enhancement factor of light incident on the interferometer. Main purpose of this work is to apply the recycling technique to 20m interferometer which simulates a full scale antenna in its quality and to demonstrate the high power recycling gain of the order of 10, which is required for TAMA300 and also for other projects. In addition to high recycling gain, study of lock acquisition sequence of high recycling gain interferometer was also an important subject of this thesis.

In order to realize a high recycling gain, loss control of optics and interferometer is pretty important since a recycling gain is roughly proportional to the inverse of the total loss of the interferometer. Resulting recycling gain of 450 was reported for simple Michelson interferometer with suspended mirrors. On the other hand, FP Michelson interferometer with fixed mirror table top experiments demonstrated the recycling gain of 18 at the time when this experiment started. The discrepancy between two cases is mainly comes from the difference in reflectivity between simple mirrors and combined FP cavities. Further more, in case of FPMI with suspended mirrors, misalignments of mirrors degrade the contrast of Michelson interferometer as well as reflectivity of FP cavity. Therefore, it is not obvious to attain the high recycling gain with FPMI prototypes.

Among several possible candidates of serious interferometer loss, poor reflectivity of arm cavities due to mirror loss and contrast defects of the Michelson interferometer caused by misalignment of mirrors were predominant in the case of 20m interferometer. For the loss of optics, the quality of mirror coatings were extremely improved to have total loss of below 30ppm/optics. This was the first measurement of total loss for 10mm-size beam and best value for mirrors which are used in prototype interferometers. Further more, wave-front sensing technique was introduced as an alignment control system of the mirrors to stabilize the optical fluctuations of the interferometer. It was first demonstration of WFS on the suspended mirror interferometer.

As a result, 20m prototype interferometer locked with sufficiently high power recycling gain of over 12. This is highest gain ever reported in the world as a suspended mirror Fabry-Perot Michelson interferometer. The whole interferometer was acquired lock by both sequential and automatic locking method within a minute typically. Furthermore the remaining gain fluctuation due to mirror misalignment was sufficiently suppressed by engagement of wave-front sensing technique and stable operation was realized. Success of this work on high

gain recycling and implementation of automatic alignment control system using wave-front sensing on 20m interferometer marks significant progress towards achieving full-configured interferometer.

論文の審査結果の要旨

重力波を観測手段とする新しい天文学の創成を目指して、現在世界でいくつかの大型レーザー干渉計による重力波検出装置の開発・製作が精力的に行われている。レーザー干渉計で重力波が引き起こす極めて微小な空間歪みを干渉縞の変化として計測する場合に、レーザー光自体が持つ量子ゆらぎが原理的な計測限界を与えるため、干渉計内部の光パワーを増やしてこの限界を抑えることが重要である。本論文の中心課題である「リサイクリング」は、1枚のリサイクリングミラーと干渉計の間で光共振器を構成することによって、干渉計に入射する光パワーを増幅する技術で、レーザー光源自体のパワー増強と相補的な、重力波検出感度向上のための必須技術の一つである。そのため我が国の中規模レーザー干渉計TAMA計画を始め現在計画中の大型レーザー干渉計ではいずれもリサイクリング法が使われることになっている。しかしながら、実際の重力波検出装置と同等な、ミラーが吊られたレーザー干渉計で、リサイクリング法が有効に働くことはまだ殆ど確かめられていない。リサイクリングで重要な光パワーの増加率（ゲイン）についても、固定したミラーを用いた卓上実験の用に10を超える大きさが達成されていなかった。

本論文は、国立天文台で開発された重力波検出装置のプロトタイプである20mレーザー干渉計にリサイクリング法を適用して、10を超えるゲインがプロトタイプ干渉計でも達成可能であることを世界ではじめて実証すると共に、そのために必要なミラー単体および干渉計システムの低損失化に関わる実験と計測および検討を行ったものである。本論文で達成された具体的成果は、

(1) 広がった光線ビーム径に対するミラー単体の損失等の性能評価を高精度で行うことに成功し、その測定結果をメーカーのミラー成膜工程の見直しに反映させることによって、mmスケールのビーム径で30ppmという低損失のミラーが世界ではじめて得られたこと、

(2) そのような低損失ミラーでファブリペロー共振器を腕に持つマイケルソン干渉計を構成して、そこにリサイクリング法を適用することによりゲインが10以上得られることを実証したこと、

(3) 波面検出法によるミラーの姿勢制御を導入することにより、干渉計の動作が安定化してゲインの変動が抑えられると共に、干渉のコントラストを高めることができゲインを大きくすることができたこと、

などである。また、適切なサーボ制御回路の設計と適切な光学パラメータを設定することで、複雑な結合共振器系であるシステム全体が比較的容易に目的の状態に到達できることも実証された。

以上のように、本論文によって、10を超える増幅率を持つリサイクリングが重力波検出用のレーザー干渉計で実現可能であることが示され、リサイクリング実用化のための一つの関門をクリアしたことは、重力波検出装置の開発研究、ひいては重力波天文学分野の開拓にとって大きな貢献をなしたものと認められる。本論文に関係する実験研究は共同研究として行われたが、リサイクリング法適用のための20m干渉計の制御系の変更から干渉計の整備、リサイクリング実験の準備から測定や解析、さらにはミラー性能評価のための実験まで全般にわたって論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が

大部分である。よって、審査委員会は本論文が博士論文に値すると判断した。