

氏 名 寺 田 聡 一

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第318号

学位授与の日付 平成10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 Development of a Mode Cleaner for a Laser

Interferometer Gravitational Wave Detector

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 石黒 正人

教 授 平松 成範

教 授 藤本 眞克

助 教 授 小林 行泰

教 授 三尾 典克（東京大学）

論文内容の要旨

Einsteinの一般相対性理論で予言された重力波は、物質との相互作用が非常に弱く、未だ直接的に検出されたことはないが、これが検出できるようになれば、電磁波やニュートリノでは見ることはできなかった、高温、高密度な天体現象を解明する手段に成り得るため、近年レーザー干渉計型重力波検出器の開発が進展している。

本研究では、レーザー干渉計型重力波検出器で使われる位相変調光が透過できるモードクリーナーを開発し、その性能評価を行った。

レーザー干渉計型重力波検出器は、数kmにおよぶ基線長をもつ巨大なレーザー干渉計であり、その原理はMichelson型干渉計で、ビームスプリッターによって分かれた互いに直交する2つの光路の固有距離が重力波によって逆相に伸縮をすることで生じる干渉縞の変化から重力波を検出するものである。

モードクリーナーとは、干渉計へ入射するレーザー光の波面の整形、ビームジッターの除去、周波数安定化を担う光共振器である。

位相変調光はレーザー干渉計を動作点に保つための制御に必要であり、通常モードクリーナーの後に置かれた位相変調器でつくられる。モードクリーナーが光共振器なので、通常、位相変調光はこれを透過することができないからである。しかし、位相変調器はレーザーの波面を乱すことがあり、これはモードクリーナーの目的であるレーザービームの整形やビームジッター除去の効果を損なうものである。これを避けるのに、位相変調器をモードクリーナーの前に置くために、光共振器の共振条件が、「共振器長が光の半波長の整数倍」であることを利用して、共振器長を調整し、その共振周波数の間隔(FSR)が位相変調の周波数に一致するようにすることで、位相変調光が透過できるモードクリーナーを開発した。

まず、この方式の3.75mモードクリーナーを制作し、40MHz位相変調光を透過させ、20mプロトタイプ検出器を運転することに成功した。モードクリーナーの効果によって、干渉計のコントラストが向上し、感度が上がった。この実験では、透過した位相変調光にショットノイズ以上の強度ノイズが見られた。20mプロトタイプ検出器では現在、このノイズは検出器の感度を制限するものではないが、検出器の感度が向上すれば、問題となることは明らかであり、これを除去しなければならない。アメリカの大型レーザー干渉計計画LIGOでも、同様のノイズが報告されているが、原因は究明されていなかった。

次に開発したTAMA300用10mモードクリーナーでは、強度ノイズの原因が変調周波数とFSRのずれとレーザー光の周波数ノイズとのコンボリューションによるものであることを確認し、強度ノイズを抑制することに成功した。具体的には、変調周波数とFSRのずれのDC的(約1Hz以下)成分、レーザー光の周波数ノイズのDC的成分をそれぞれ除去した。変調周波数とFSRのずれを除去するために、レーザー光に周波数変調をほどこし、モードクリーナーの透過光を同期検波することで、このずれのDC的成分を検出し、変調周波数を発振している発信器の周波数をフィードバック制御した。この制御信号から、0.2Hz程度の変調周波数とFSRのずれが数秒周期で変化しており、またさらに長周期のドリフトも観測された。長周期の変化のうち1~2分周期の変化は発信器の発振周波数の変化によるもので、さらに長い周期の変化はFSRの変化であることが確認でき

た。この周期ではレーザーの波長を基準として共振器長を制御しているため、温度変化によってレーザーの波長が変化することで共振器長が変化し、FSRが変化すると考えられる。一方、レーザー光の周波数ノイズのDC的成分とは、レーザー光が共振器に共振する際に、共振中心から僅かにずれた点にロックするオフセットロックのことであり、この除去のために、透過変調光の変調周波数に周波数変調をかけ、モードクリーナーの透過光を同期検波することで、これを検出し、制御した。これらによって、重力波観測帯域でショットノイズレベルに達成した。

本研究により、変調透過型モードクリーナーが、原理的困難なしにレーザー干渉計型重力波検出器で使用可能なことが示された。

論文の審査結果の要旨

重力波はその極端に大きい透過性のために、従来の天文観測手段では決して得ることができない新しい宇宙の現象や姿に関する情報をもたらすものと期待され、現在各国で、重力波検出装置の開発研究が精力的に行われている。なかでも、大型のレーザー干渉計による精密な空間歪みの検出が有望な重力波検出手段と考えられている。重力波が引き起こす極めて微小な歪みをレーザー干渉計で計測するためには、干渉計に入射するレーザー光の時間的空間的モードに極めて高い安定性が要求されると同時に干渉計自体の安定動作も不可欠である。前者のために通常、モードクリーナーと呼ばれる光共振器のモード選択性が利用される。また後者の目的で干渉計の動作状態を知るためには、干渉計に入出力するレーザー光の位相を変復調する方式が一般的に使われる。ところが、位相を変調する光学素子をモードクリーナーの後に導入するとせつかくのモード安定性を損なう恐れがあり、逆に、位相変調された光はモードクリーナーの選択効果によって変調成分を除去されるのが普通である。この困難を回避する方法が変調透過型モードクリーナーである。これは、モードクリーナーが持つ複数の共振モードに位相変調によって分かれた光の各周波数成分を一致させることで、変調成分もモードクリーナーを通過できるようにしたものである。この方法により位相変調素子をモードクリーナー入射の前に置くことが可能となり、モードクリーナーのモード安定化の効果を損なわないで済むことになる。そのため、我が国の中規模レーザー干渉計TAMA計画をはじめ現在計画中の大型レーザー干渉計ではいずれもこの方式のモードクリーナーが使われることになっている。しかしながら、これまでに報告されている実験では、モードクリーナーの変調透過光にショット雑音より大きい強度雑音が付加されることが観測され、その原因が特定されていなかった。本論文は、国立天文台で開発されている20mプロトタイプ干渉計およびTAMA300m干渉計用にそれぞれ変調透過型モードクリーナーを製作し、原理的な動作確認を行うとともに付加雑音の原因特定およびその抑制に成功したものである。

本論文で示されたことは、(1)モードクリーナーの縦モードの共振周波数の間隔(FSR)に等しい変調周波数を持つ位相変調光はモードクリーナーを透過できて、干渉計の制御用として利用可能であること、(2)この光を干渉計に入射すると、モードクリーナーのモード選択効果により、干渉縞のコントラストが向上して同相雑音除去比が増して、レーザー光の周波数雑音の寄与が抑制され干渉計の歪み検出感度が高まったこと、(3)問題とされていた変調透過光に見られる付加雑音は、レーザー光と共振モードとの周波数のずれと、FSRと変調周波数のずれとの積として現れることが、理論的にも実験的にも明らかにされたこと、(4)付加雑音の生成メカニズムを利用して、一方の周波数ずれを人為的に加えることで、他方のずれの効果を拡大してそのずれが小さくなるように調整できることを実証したこと、(5)それにより双方のずれを十分小さくして、変調透過光に付加される強度雑音をショット雑音レベルにまで下げることに成功したこと、である。

以上のように、本論文によって、変調透過型モードクリーナーが高感度レーザー干渉計用に実用可能であることが示されたことになり、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。本論文に係る実験研究全体は、多数の研究者との共同研究であるが、変調透過型モードクリーナーにつ

いては、20m用、300m用ともに設計、製作から実験、解析まで論文提出者が主体となっていたもので、論文提出者の寄与が大部分であると判断する。

以上により、審査委員会は本論文が博士論文に値すると判断した。