

論文内容の要旨

論文題目 Development of a Variable-Bandwidth Laser Interferometer
Gravitational Wave Detector

(帯域可変型レーザー干渉計重力波検出器の開発)

氏名 宮川 治

1916年、一般相対性理論からの帰結として、波として光速で伝わる時空の歪みが存在することが、A.Einsteinによって予測された。これを重力波と呼び、その存在は長らく理論上のものでしかなかったが、J.H.Taylorらの連星パルサーPSR1913+16の周期変化の観測により間接的にはあるが重力波が存在することが確かめられた。J.H.Taylorらはその功績により1993年、ノーベル賞を受賞している。しかしながら重力波と物質との相互作用は非常に微小なため、未だに直接検出には至っていない。

重力波の直接検出はこれまでの電磁波による天文学では得ることのできなかった宇宙からの情報をもたらすと考えられ、新たな重力波天文学という分野を創設する可能性を持っている。このような背景のもと、近年、大型レーザー干渉計を用い直接検証を試みようという気運が国際的に高まっている。現在、世界各地で300mから4kmのアーム長を持つ巨大レーザー干渉計型重力波アンテナが建設中あるいは稼働中である。アメリカのLIGO計画、フランス・イタリアが共同で行なっているVIRGO計画、ドイツ・イギリスのGEO計画、そして日本のTAMA計画である。なかでもTAMA300は2000年夏に世界最高感度を達成し、2001年夏には1000時間の観測を行なうなど、順調な進展を見せている。こういった状況を踏まえると、数年後には人類初の重力波検出がなされる可能性もある。

しかしながら、将来、重力波天文学という分野の創成を目指すならば、重力波検出の頻度をさらに上げる必要があり、検出器のより一層の感度向上が必要である。干渉計の感度を決めるノイズには、ショットノイズ、地面振動、熱雑音の3つの基本的ノイズがある。本研究では干渉計の光学配置を工夫することにより干渉計のミラー変位に対する応答を高め、ショットノイズを改善し、将来の大型干渉計の基礎技術となるような方式を実現することを目指す。

干渉計の光学方式としては、power recycled Fabry-Perot Michelson interferometer (PRFPMI), signal recycling (SR), resonant sideband extraction (RSE)等があるが、将来の大型干渉計の光学設定の選択候補として現在最も有力なのが、RSEである。RSEとはあらかじめフィネスを非常に高く設定した腕共振器において、信号出力ポートにもう一枚鏡(signal extraction mirror (SEM))を置くことで、重力波信号の滞在時間を実質的に短くして、信号がキャンセルし始める前に重力波信号を高感度で取り出し、ショットノイズを改善する

技術である。RSE においては、PRFPMI と同じ感度を実現する場合、マイケルソン部分の光のパワーを小さくすることができ、光による鏡の発熱の問題に関しても有利だと考えられている。また、デチューニングと呼ばれる技術を用いることにより、感度が最大の周波数を自由に設定でき、限られた周波数帯の中で従来のショットノイズの限界を改善することも可能である。

RSE 方式の干渉計は制御すべき自由度が増えるため、これまでの干渉計と比べると制御が難しくなる。これまでに世界各国でさまざまな方式で RSE の動作確認実験が行われたが、それらは全て制御信号を取得するため多変調を用いた信号取得方法であった。しかしながら、多変調を用いた信号取得方法は、ただでさえ複雑な干渉計の制御をより一層複雑にしてしまう上に、変調周波数にモードクリーナー透過の厳しい条件が課せられる。また、これまでに行なわれた実験は全て大気中のテーブルトップ実験であった。しかし最終的に RSE 干渉計をミラーがつり下げられている大型装置に組み込むことを考えた場合、テーブルトップで固定ミラーを用いて行う実験では限界がある。以上のことを踏まえ、本研究では、よりシンプルで、モードクリーナーの透過も容易な一変調での RSE 制御を目指し、また真空装置と新たに開発した超小型のミラーつり下げシステムを用いることにより、テーブルトップ実験の簡便さを損なわぬまま、より現実の重力波アンテナに近い状態で実験を行なった。

ファブリペローマイケルソンタイプの干渉計では腕共振器からの非常に大きな信号がマイケルソン部分の制御信号に混入するという問題がある。RSE の場合、前述の SEM と腕共振器の手前の鏡で構成される signal extraction cavity (SEC) と呼ばれる部分の制御信号を取得することが困難になる。一変調による制御はそのままでは、多変調による信号取得方式に比べ、制御信号の混合比は悪くなる。そこで 3 倍波復調(third harmonic demodulation (THD))方式を用いて、SEC の信号を他信号からの混入を抑えた形で取り出すという新たな制御方式を考案した。

この原理を簡単に説明する。復調の際の局部発信波に変調周波数の 3 倍の周波数の波を用いると、腕共振器の情報を持っている carrier の変動を、3 次の sideband の DC 成分で検出することになる。もともとの 1 倍波での復調では 1 次の sideband の DC 成分で検出しているため、腕共振器の影響が 1 次 sideband と 3 次 sideband の比の分だけ軽減される。その一方 power recycling cavity の信号は 1 倍波復調の場合、-2 次と 1 次、1 次と 2 次の各 sideband のピートの和からなるが、3 倍波復調の場合は -2 次と 1 次、-1 次と 2 次となり、信号の大きさは変わらない。そのため 3 倍波復調を用いることにより、基本波復調を用いた場合に比べて信号比が改善される。さらに、3 次の sideband の振幅を積極的に小さくして、信号比を改善するために、マイケルソン部分の腕の長さの差を調節して 3 次の sideband が検出ポート側で消えるような方法も考案した。

なお、本研究では 3 倍波復調を用いた RSE 干渉計の制御をし、その帯域可変を確認することが主目的であるため、帯域可変とは直接関係の無い power recycling は省いた形で、RSE の実験を行なった。本方式は、power recycling を導入する場合にも拡張が容易であり、また、干渉計の感度を一部の帯域で向上するデチューニングへの応用も可能であるなど、非常に柔軟性の高い光学・制御方式であるといえる。

以上のアイデアを実験的に検証するために、新たに振り子型のプロトタイプ干渉計を国立天文台内に組み上げた。実験装置はレーザー入射系、直径 1m と 50cm の 2 つの真空槽、及びそれらをつなぐための長さ 3m、直径 15cm のチューブからなる。光源には 500mW の Nd:YAG レーザーを用い、そこに 17.25MHz の位相変調をかけている。干渉計部分は全て真空槽内に設置され、大気の影響でミラーが汚れることを防いでいる。真空槽内に入射した光はビームスプリッターで 2 つに分けられ、長さ約 4m の 2 本の腕共振器へと導かれる。FP に入るまでの距離に大きな差をつけ、マイケルソン部分の腕の長さの差を適切に設定することで 3 次 sideband を検出ポート側に漏れでないようにしている。腕共振器からの反射光は再びビームスプリッターで結合され、dark port に漏れ出た光は SEC 内で共振する。SEC の透過光を光検出器で検出し、その信号を 3 倍波復調し SEM の位置制御信号を取り

出している。主要な鏡は地面振動の影響を軽減するために振り子に吊ら、4つのコイルマグネットアクチュエーターを用いてアラインメントの調整と光軸方向のコントロールがなされている。また、振り子の共振周波数での動きは外部マグネットにより渦電流効果を利用してダンピングが行なわれている。この振り子システムは非常にコンパクトに設計されていて、ダンピングのためのマグネットや、コイル、振り子などは全てモジュール化されているため、容易に取り外しができ、ミラーの高さなども自由に変えることができるため、振り子型でありながら固定鏡並の利便さも兼ね備えている。このように実際の重力波検出器に近い真空と振り子を使いながら、テーブルトップ実験並みの手軽さを実現しているのが本実験の特徴である。

これらの実験装置を使い、世界で初めて吊り下げられたミラーを使って、RSE 干渉計の制御に成功した。さらに制御信号の位相を反転することにより、RSE 状態と SR 状態の両方の制御に成功した。SR 状態は SEM の位置が RSE から半波長だけずれた状態にあるが、それらの切り替えの様子をダークポートの光量をモニターすることで確認した。また、干渉計の応答関数を、RSE、SR、及び FPMI の 3 つの場合をそれぞれ測定し比較することで、干渉計の信号の帯域が変化することを確認した。

RSE 干渉計は、将来の超高感度重力波アンテナの実現には必須の技術である。本研究においては、世界で初めて真空中で吊り下げられたミラーという、現実の重力波検出器により近い形で実験を行ない、RSE 干渉計の動作に成功しその効果を確認した。また従来用いられてきた多変調による複雑な信号取得方法から脱却し、単一変調で 3 倍波復調を用いた、シンプルな信号取得法を開発し、より信頼性の高い制御方法を実現することができた。この信号取得方法は、単一変調のシンプルな特性を損なわずに、より安定な干渉計の動作をもたらすものとして、その将来が大いに期待される。この研究成果により RSE 干渉計の理解は一段と深まり、そのフィージビリティも飛躍的に増大したと思われる。

今後の研究の展開であるが、大型アンテナへの組み込みのための光学パラメタの最適化をより実機に近い環境で詰めていくことが必要である。これには power recycling 及び、デチューニング技術の導入も必要となる。それらが実現できれば、大型アンテナへの組み込みが現実のものとなるであろう。