

論文の内容の要旨

論文題目	Highly stable light source for space gravitational wave detector: DECIGO (宇宙重力波検出器DECIGOのための超高安定化光源)
学位 申請者	末正 有

重力波とは一般相対性理論でA.Einsteinによって予言された、超新星爆発やブラックホール連星の合体などの巨大な質量変化が宇宙空間で発生した際に空間が歪み、横波として伝搬する現象である。重力波は相対変位量 $\delta L/L < 10^{-23}$ の微小な空間の歪みでありその直接検出は困難とされていたが、2015年にアメリカの地上型重力波検出器LIGOの研究グループによる重力波の直接検出の達成がきっかけとなり、新たな宇宙現象の解明及び重力波天文学の創生が始まっている。

重力波の微小な変位量を検出するために、世界中の多くの研究機関でレーザー干渉計が開発されており、日本でも地上型重力波検出器KAGRAと宇宙型重力波検出器DECIGOの開発計画が推進されている。中でも宇宙型重力波検出器DECIGOは宇宙空間で衛星を用いてFabry-Perot Michelsonレーザー干渉計を構成するため、地上型では地面振動で制限されて検出不可能な低周波数域での重力波検出が可能であり、レーザー光源にもその観測帯域である1 Hz周辺での雑音低減が求められている。本論文では日本における宇宙重力波検出器DECIGOのための安定化光源の開発及び安定度評価に関して述べられている。

まず、重力波検出器用光源の安定度を地上で検証し、達成するために光源のBreadboard model (BBM)を作成した。光源は波長1030 nmのYb添加fiber DFB laserを用い、その出力を自作した光増幅器(Yd-doped fiber amplifier: YDFA)によって増幅した後に波長変換のための非線形結晶であるPPLN結晶に導入して515 nmの光に変換する。そしてブレッドボード部に光を導入しPBSによって光をpump光とsignal光の二つに分岐し、pump光のみに電気光学変調子(Electric optical modulator: EOM)によって200 kHzの位相変調を行う。二つの光は長さ400 mmのガラス製ヨウ素セルの中で同軸に対向入射され、3回折り返した後に変調成分が移乗されたsignal光をphoto detectorによって受光する。受光された光は電圧信号に変換されたのちにlock-in amplifier (LIA)により復調され、周波数安定化のための基準である周波数弁別曲線に変換され誤差信号がフィルター回路に通され、光源の変調端子にfeedbackされることによって周波数安定化が行われる。これらの信号取得のための光学系は、衛星搭載を考慮し全て550x 300 mm のアルミ製ブレッ

ドボードの上に配置されている。DECIGO用光源の周波数雑音は重力波検出器の感度に大きく影響するため、相対周波数安定度の要求値は $\delta f/f=10^{-15}$ 台である。これはレーザーの線幅1 Hzに相当する非常に高安定な値である。さらに周波数安定度はDECIGOの観測帯域である1 Hz付近(短期的安定度)のみならず、波長がDECIGOの基線長のリファレンスとして用いられるために長期的にも安定であることが求められている。まず、周波数の長期安定度を達成するために周波数安定化の基準としてヨウ素分子の飽和吸収線を用い、またその波長は従来用いられてきた532 nmではなくより線幅の細い515 nmを選択する事で長期と短期安定度両方の実現を図った。また、短期安定度は最終的には周波数基準の信号対雑音比(SNR)で制限されるため、変調帯域における強度安定化(詳細は後述する)による周波数基準の雑音抑圧、差動受光を行った。このBBMは光源の周波数安定度の絶対評価を行うために同一の仕様のもを2台作成し、これらのビート測定によって周波数安定度のアラン分散や周波数雑音スペクトルより絶対評価を行った。その結果、1秒(短期安定度)では $\delta f/f=10^{-13}$ 台、100秒以上(長期安定度)では $\delta f/f=10^{-14}$ 台の安定度を達成した。

また、重力波検出器の感度向上のためには光源の強度安定化が必要不可欠である光源の強度は観測帯域1 Hz付近と信号取得の変調帯域である200 kHzの両方において求められており、その要求値は共に $\delta I/I=1 \times 10^{-8} \sqrt{\text{Hz}}$ である。観測帯域における光源の強度安定化は、光源の光増幅器の励起用光源を強度アクチュエーターとして用い、増幅後の光を光ファイバーで分岐し受光した光を電気信号に変換した後低ノイズ電圧源を基準として安定化を行った。光ファイバーを樹脂で固定するなどの雑音対策を行いその結果、絶対安定度評価かつ観測帯域で $\delta I/I=5 \times 10^{-8} \sqrt{\text{Hz}}$ の安定度を得る事に成功した。変調帯域における強度安定化は、BBMで用いられているacousto-optic modular (AOM)を強度アクチュエーターとして用いfeedback法とfeed forward法の両方で検証を行った。両方の方法で10 dB以上の雑音抑圧に成功したが、最終的に信号の強度を保ったままfeed forward法で変調帯域のみの強度安定化を行い、復調信号のSNR向上に成功した。周波数安定度は長期・短期ともにさらなる向上が必要なため、今後は残留強度変調(residual amplitude modulation: RAM)の抑圧による長期安定度の向上を行い、短期安定度に関しては直接変調法を組み合わせた信号取得法を併用する事でさらなる安定度の向上を図る予定である。また、強度安定化に関しては周波数安定化と同時に両立できるような制御システムを構築する。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 末正 有

審査委員主査 武者 満

委員 中川 賢一

委員 桂川 眞幸

委員 美濃島 薫

委員 岸本 哲夫

本論文は宇宙重力波検出器 DECIGOのための光源の開発について述べている。重力波検出には非常に高感度なマイケルソン干渉計がつかわれており、その高い変位感度を実現するためには光源にも非常に高い周波数安定度と強度安定度そして高出力が要求される。DECIGOは日本が計画を進めている宇宙重力波検出器であり、3台の人工衛星で構築された一辺1000 kmのFabry-Perot Michelson型レーザー干渉計であり、地上検出器では得られない低周波数域での重力波の検出を目指している。DECIGOのための光源には周波数・強度の高い安定度のみならず人工衛星搭載のための高効率・小型・堅牢等のさまざまな制約がある。これらの条件をみたすべく、ヨウ素分子の飽和吸収を周波数基準とした周波数安定化光源のプロトタイプを開発し、強度安定化も併せておこないDECIGOの要求値をほぼ満たした性能を実現した。得られた周波数・強度安定度は安定化光源としても世界最高レベルの値を実現しており、特に分子の吸収を用いて短期周波数安定度を得る事が本研究の特色のひとつとなっている。

本論文は以下の8章により構成されている

第1と2章は序章であり、本論文の目的とともに重力波と重力波検出器の解説、そして宇宙重力波アンテナDECIGOとDECIGO検出器が求める光源に対する要求値の導出の詳細な解説を行っている。周波数安定度 $\delta f/f=10^{-15}$ [$1/\sqrt{\text{Hz}}$]、強度安定度 $\delta I/I=10^{-8}$ [$1/\sqrt{\text{Hz}}$]の要求値は、その値が高いだけではなく実現が困難な1 Hz帯で達成しなければならない事が重要である。

第3章は周波数安定化の周波数基準として用いるヨウ素の飽和吸収について述べている。本論文では通常用いられている532 nm帯ではなくてより細かい線幅が期待される515 nmの吸収を用いて短期安定度の向上を目指している事が特徴の一つである。そのため515 nm帯の吸収自身の説明とともにドップラー拡がり等を除く飽和吸収分光法について解説している。

またその515 nmの線幅を実証するために自ら考案した分光装置を作り測定を行っているが、その分光装置の原理を説明し、得られた結果から吸収線幅のヨウ素の圧力に対する依存性等も求めている。

4章では開発したヨウ素安定化レーザーの試作機(ブレッドボードモデル:BBM)についての解説を行っている。光源には波長1030 nmのfiber DFBレーザーの第2高調波を用いており、FM分光法や変調移乘法を用いてヨウ素515 nm帯の振動回転遷移の超微細構造から高いSN比を持った周波数弁別曲線を得て、それを周波数誤差信号として負帰還制御することにより周波数安定化を行っている。SN比を高めるためにセル内を多数回往復させて光学長をかせぐマルチパルス構造等を非常に小さくまとめており、衛星搭載に可能なように堅牢に構築してある。この章では周波数基準への追従度を現すサーボの誤差信号評価で要求値を達成している事を示している。

第5章では周波数基準の安定度も含めた、レーザー周波数の安定度評価をおこない、その安定度の向上について説明している。同安定度を持つ周波数安定化光源をもう一台作成し、2台のビート周波数から絶対安定度評価を行っているが、信号のSN比の低さや残留強度変調(RAM)の影響で要求値が達成していない事が判明した。そのため変調周波数帯域(200 kHz)での強度雑音抑制によるSN比の向上を何通りが試し、SN比の向上に成功している。その結果得られた周波数安定度 $\delta f=13 \text{ Hz}/[\sqrt{\text{Hz}}]$ は目標には一桁程届かないが、現在分子の吸収線を基準として得られて意周波数安定度としては世界最高レベルである事が示された。

6章では強度安定化について述べている。出力光の一部から強度雑音を検出してファイバ増幅器の励起用レーザーに対して負帰還制御することにより強度安定化を行い、制御ループ内評価では要求値の $\delta I/I < 10^{-8} [/\sqrt{\text{Hz}}]$ を達成している。しかし実際に使用する分岐している光(ループ外)では外乱雑音の影響を受け、特に低周波側では強度安定度が劣化してしまい、この事が1Hz帯での強度安定化を困難にしている。本論文では雑音の混入について検討し、さまざまな対策を講じる事により、世界で初めて1Hz帯で 10^{-8} 台の相対強度雑音レベルの実現に成功している。第7、第8章では本研究で得られた成果をまとめるとともに、さらなる安定度向上に対する課題を検討してDECIGOの要求値の達成のための方法や出力増大についての将来展望を述べて論文を結んでいる。

本論文では理論的考察や検証・実験・製作を行うことにより、宇宙動作できる光源という制約の中で世界最高レベルの安定度を持つ光源の開発しており、重力波検出のみならず現在盛んに進められている宇宙空間での光のコヒーレントな性能を利用に対して多大な寄与をすることが期待される。

よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める