

宇宙型重力波検出器のための周波数・強度安定化光源の開発

武者満研究室 末正有

平成 28 年 3 月 7 日

1 序論

レーザーは空間・時間的にも非常にコヒーレンスの高い光であり、測距や通信などの分野で広く用いられている。近年は宇宙空間でもその需要が高まっており、測距や衛星間の通信だけでなくレーザーを用いた宇宙空間における物理量の測定などが計画されている。重力波検出計画もその一つであり、これを実現するためには非常に高い周波数安定度と強度安定度を持ったレーザーの開発が必須である。本研究では宇宙型重力波検出器DECIGO のための1 Hz 帯で周波数・強度が安定化されたレーザーの開発を行っている。本研究では重力波検出器用光源として試作機であるBreadboard Model (BBM2) の開発を行った。1 Hz における周波数安定度が高い共振器の共振スペクトルではなく、あえて分子（ヨウ素）の吸収線にレーザーの周波数を安定化させている。また、従来周波数基準として広く用いられてきたヨウ素の532 nm 帯の吸収線ではなく、515 nm 帯の吸収線を周波数基準として用いている。515 nm の吸収線は532 nm の吸収線よりも線幅が細く、低周波数域では高い周波数安定度が見込めるからである。BBM2 では誤差信号評価で $0.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ の周波数安定度を得た。また、レーザーの短期的な周波数安定度は周波数基準のSN

比で決まる。SN 比の良い信号を得るためには信号を精密に分光したうえで線幅や測定時の条件などを吟味し、評価しなければならない。そこで、先に開発した周波数安定化光源 (BBM2) を光源としたヨウ素分子の精密分光装置を作成することで周波数軸の正確な分光を可能にし、SN 比や線幅などの評価を行った。その結果、ヨウ素の飽和吸収線の圧力広がりによる線形性などを取得し、ヨウ素の飽和吸収線のSN 比や線幅はまだ改善の余地があることが分かった。レーザーの強度雑音は自由空間光学系とファイバー光学系の両方で安定化を行った。光の偏光揺らぎやファイバーの機械的振動の影響を抑圧することで、 $10^{-7}/\sqrt{\text{Hz}}$ 台まで雑音を抑圧した。そしてBBM2 の周波数安定度の評価のために二台目の安定化光源であるBBM3の開発を行った。BBM3はBBM2の機械的安定度の反省や精密分光装置で得られた結果などを元に光学設計を1 から行いビーム系などの最適化を行っている。

2 BBM2の開発・周波数安定化

2.1 BBM2の概要

図1にBBM2の概略図を示す。光源には波長1030 nm のfiber DFB laser を用いる。光源からの出力はまず手製のファイバー光増幅器 (Yb-doped fiber amplifier: YDFA) を用

いて増幅され、光源への戻り光の影響を避けるために接続されたアイソレーターを通過後に非線形光学素子(MgOPPLN)へと導入される。MgOPPLN 結晶によって515 nm の第二高調波が発生し、その後インライン型の偏光ビームスプリッターによって二つの光に分岐される。この光の分岐比は偏光子(Polarization Controller:PC)によって調節される。PBS によって2つに分岐された光をそれぞれSignal 光、Pump光とする。Signal 光は光干渉を防ぐために設置されたAOM を用いて周波数が80 MHz シフトされた1次光を取り出し、Pump光は電気光学変調器(Electrical Optical Modulator:EOM)を用いて200 kHz の位相変調を掛けた後にファラデーローテーター(FR)、半波長板($\lambda/2$ 板)を通してP 偏光に変換される。この二つの光はヨウ素分子が封入されたガラスセル(ヨウ素セル)へと同軸に対向入射され、セル両端に接着されたミラーによって光を5回往復させている。ヨウ素セル中で位相変調成分がPump 光から移乗(変調移乗)されたSignal 光はFRと $\lambda/2$ 板を通過した後にS 偏光へと変換されPhotodetector(PD)によって検出される。PD で受光された光は電圧信号へと変換された後にLock-in amplifier(LIA)によって復調され、周波数弁別曲線となる。周波数弁別曲線から検出された誤差信号は手製の制御回路(Servo filter)を介してfiber DFB laser のPZT driver へ帰還され周波数が安定化される。

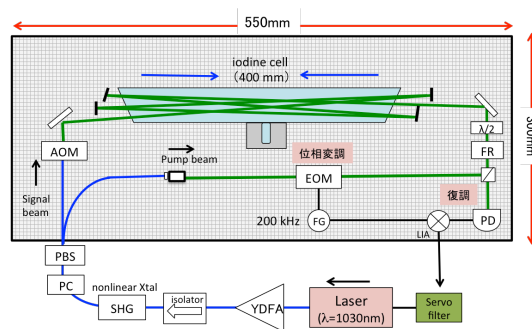


図1 BBM2の概略図

2.2 周波数安定化結果

BBM2 を用いて取得した周波数弁別曲線を周波数基準とし、作成した制御回路を用いて周波数安定化を行った。周波数安定度はFFT アナライザーを用いて周波数雑音スペクトルを測定することで評価を行った。その結果を図2に示す。

帯域1 Hz における周波数雑音スペクトルに注目すると無制御時では $\Delta f = 10^4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ 位の安定度であるが、周波数安定化を行った制御時では $\Delta f = 0.4 \text{ Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ まで周波数雑音を抑圧し、DECIGO と

Pre-DECIGO の要求値を満たした。この結果よりfiber DFB laser の周波数は周波数基準に対して十分に追従しているといえるが、これはあくまでも誤差信号評価による評価であるため絶対的な周波数安定度の評価にはならない。そのため、二台の安定化光源を用いたビート測定または光コム等の周波数安定度評価システムを用いた周波数安定度の評価を行う必要がある。

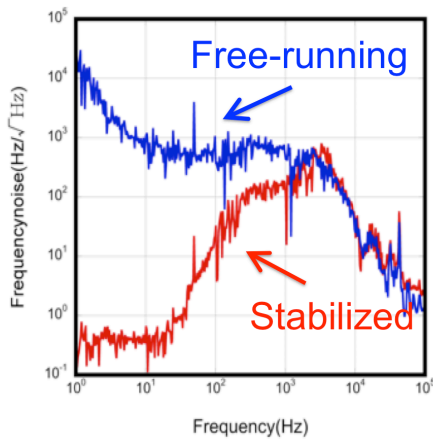


図2 周波数雑音スペクトル (誤差信号評価)

3 精密分光装置の開発

レーザーの周波数安定度は最終的には周波数基準自体の持つ安定度によって決まる。つまり、周波数基準に対して十分に追従しているヨウ素安定化レーザーの場合は線幅が細くSN比の良い飽和吸収信号を周波数基準に用いることでより周波数安定度を向上させることが出来ると考えられる。このような線幅が細くSN比の良い飽和吸収信号を得るためには、従来よりも正しく精密に飽和吸収信号のSN比や線幅を評価するシステムが必要であり、また分光時の圧力や光路長、パワーなども最適化することが必須である。そのため、周波数を安定化したBBM2を光源として精密に分光し、線幅やSN比などを正當に評価出来る精密分光装置の開発を行った。

3.1 精密分光装置の概要

図3に精密分光装置の概略図を示す。

この分光装置は安定化光源部、周波数掃引部、分光部で構成されている。

安定化光源部にはヨウ素の飽和吸収線を用いて周波数安定化を行ったBBM2を用いた。周波数掃引部では安定化光源部の非線形光学素子出射後の光の一部をAODに導入し一次光を取り出している。AODの駆動にはdirect digital synthesizer (DDS)を用いており、PCを用いて掃引速度やサンプル数などを設定する。これにより安定化光源部で周波数安定化された状態で周波数掃引することが可能となっている。

分光部では周波数掃引部からの光をAOMへと導入し、さらにその一次光をPBSで二つの偏光の光 (pump光とsignal光)に分けた。BBM2と同じくpump光には位相変調を行い、signal光にはAOMで周波数シフトさせた後にヨウ素セルへと対向入射する変調移乘法を用いて飽和吸収信号の取得を行っている。BBM2と異なり光はセル内で1回だけパスしているため、光路長は400 mmとなっている。分光信号はPCへ掃引周波数と同期取り込みされるため、周波数軸が正確な飽和吸収信号が得られる。

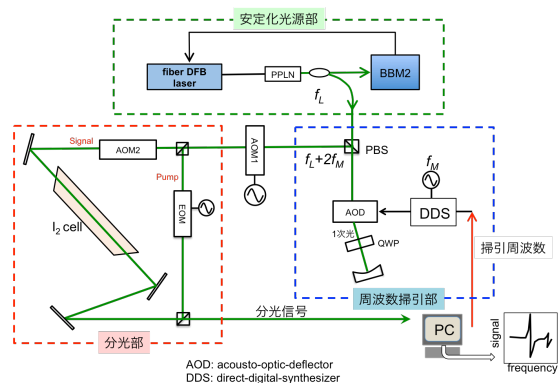


図3 精密分光装置概略図

3.2 精密分光装置による分光結果

精密分光装置によって得られた飽和吸収線の線幅の圧力広がりの様子を図4に示す。

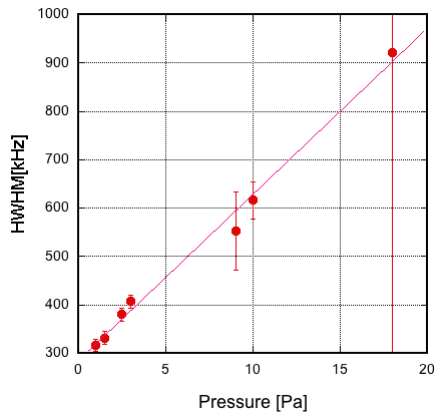


図4 線幅の圧力広がり

分光部のヨウ素セルの圧力を変化させるとヨウ素の飽和吸収線の線幅が変化し、BBM2単体では得られなかった圧力と線幅の間の線形の関係が得られた。線幅は最小で半値半幅 316 kHz (@1 Pa)を得た。他にも波長の違いによる飽和吸収線の SN 比・線幅の違いや、ヨウ素セル内の相互作用長の違いによる線形吸収と飽和吸収のコントラストの違いなどを測定し、波長や相互作用長などの条件を最適化することにより更なる周波数安定度の向上が見込めることが分かった。

4 強度安定化

重力波検出器用光源には高い強度安定度が求められている。この理由は二つあり、一つ目の理由は高い強度雑音は輻射圧雑音となりレーザー干渉計測の測定リミットとなるからであり、二つ目の理由はレーザーのパワー揺らぎにより衛星間で構成される干

渉計の腕の長さの揺らぎにカップリングし測定精度が低下してしまうからである。また、レーザーの強度安定化は比較的高周波数域では行われているが、低周波数域では雑音を取り除くことが非常に難しいためほぼ前例はない。重力波検出器DECIGO の強度雑音の要求値は1 Hz で $10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ であるため、今まで前例の無い低周波数域でレーザーの強度安定化を行った。

4.1 実験概要

BBM2 は図5のように光源とファイバー増幅器によるMaster Oscillator Power Amplifier (MOPA) 構造になっているため強度雑音はファイバー増幅器によって支配される。つまりYDFAの励起用半導体レーザーの電流源をコントロールすることで強度安定化を達成することができる。YDFAから出射された増幅光を二つに分岐し片方を制御用ループ、もう片方を実際に干渉計に用いるための光として用いた。二つの光はそれぞれ強度雑音をin-loop(誤差信号評価)、out-of-loop(絶対評価)として評価を行った。

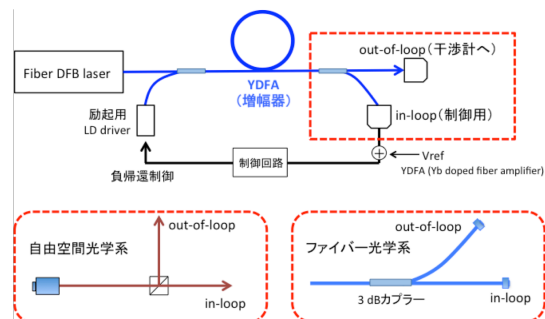


図5 強度安定化実験概略図

自由空間光学系とファイバー光学系の二つの実験系で強度安定度を評価した。自由空間光学系では自由空間で光をビームスプリッター (BS) で 2 つに分け、片方の光は in-loop として制御用に用い、もう片方の光は out-of-loop として実際に重力波検出器に用いる光とした。この実験系では偏光子などを用い YDFA からの出力の偏光のゆらぎの影響を抑圧することにより、out-of-loop の強度安定度の向上を行った。ファイバー光学系では YDFA からの出力を 3 dB カプラーで二つに分け、自由空間光学系と同様にそれぞれ in-loop、out-of-loop とした。この実験系ではファイバーをエポキシ樹脂で固め、機械的振動を抑える事で out-of-loop の強度安定度の向上を図った。なお、両方の実験系で in-loop、out-of-loop 両方の強度雑音スペクトルを測定した。

4.3 結果と考察

2 つの実験系の強度雑音スペクトルを図 6, 7 に示す。in-loop では自由空間光学系とファイバー光学系の両方で $\Delta I/I=10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ (@1 Hz) を達成した。out-of-loop ではそれぞれ $\Delta I/I=1.5 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$, $1.2 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$ を達成した。自由空間光学系では BS に偏光依存性があり YDFA の偏光揺らぎの影響を受けて光の分岐比が変化することで out-of-loop の強度安定度が悪化していたが、偏光子を用い BS の角度を傾けることにより偏光揺らぎの影響を抑圧することに成功した。ファイバー光学系ではファイバーの機械的振動が out-of-loop の強度安定度

悪化に繋がっていたが、エポキシ樹脂でファイバーを固めることにより振動を抑えるだけでなく、2 つの loop の雑音成分を共通にすることが出来たことが強度安定度向上に繋がった。2 つの実験系の out-of-loop の安定度は定電圧源の安定度と一致しているため、定電圧源をより安定度の高いものに変更すれば更に安定度向上が期待出来る。

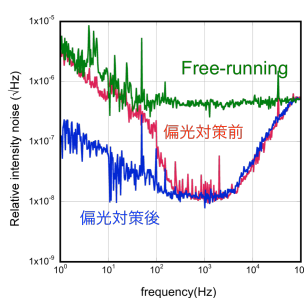


図6 自由空間光学系

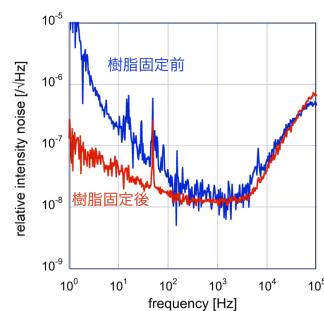


図7 ファイバー光学系

5 BBM3の開発

2章ではBBM2を開発し周波数雑音スペクトルを測定、誤差信号評価を行ったが BBM2 が持つ本当の安定度は不明であるため、これとは別に評価を行う必要がある。BBM2 の周波数を評価する方法は自己遅延ヘテロダイン法や光周波数コムを用いた周波数測定システム、同安定度の光源との比較などが候補に挙げられたが、本研究では二台の安定化光源の周波数比較で安定度を評価する方法を選択した。またBBM2 には機械的安定度やビーム径などの光学設計に課題があり、改善の余地があると考えた。そのためBBM3 は基本的な光学設計などを一から見直し、開発を進めてきた。

5.1 BBM3の概要

BBM3の概略図を図7に示す。

BBM3の光源や波長変換用の非線形光学素子、ヨウ素セルなどはBBM2と同様のものを使用しているが、アルミ定盤に載せる一部の部品や光増幅器(YDFA)などを自作している。信号取得方法などの基本設計はBBM2と同じであるが、機械的安定度と信号の線幅を向上させるために以下の工夫を行っている。

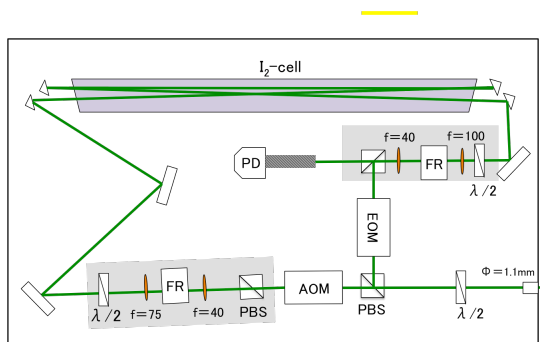


図7 BBM3の概略図

5.2 ビーム径の計算

BBM3の信号取得部は計4枚のレンズを用いてpump光とsignal光にビームエキスパンダーを構成している。ビーム径をある程度広げた状態で光をヨウ素セルに導入すると相互作用時間が増え、ヨウ素の飽和吸収線の線幅が細くなる効果があるからである。線幅100 kHz以下の飽和吸収線を得るためにはビーム径を1.4mm以上にしなければならぬため、signal光のビーム径が2mm程度になるように設計を行った。 $\phi = 1.1\text{mm}$ のファイバーコリメーターから出射した光のうちsignal光はビームエキスパンダー

により1.9倍、pump光は2.5倍に広げられ、それぞれビーム径が約2.1mm、2.3mmとなってヨウ素セルへと導入されている。

5.3 機械的安定度の向上

今まで使用していたBBM2は可動部が多く、数週間経つとアラインメントが狂ってしまうという問題点があった。また、殆ど全ての光学部品をロッドに取り付けフォークで固定していたため定盤にはスペースの余裕が殆ど無く、新たな実験のための光学系を構成する余裕もなかった。この二つの問題点を解決するためにPBS、レンズ、FR、半波長板を作成した一体型マウントに固定し、マウントは直接定盤に固定する方式を採用した。実際に作製したBBM3を図8に示す。

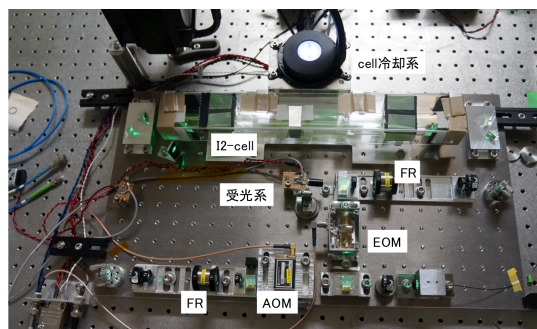


図8 実際に作製したBBM3