

Highly stable laser

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

武者研究室 末正有

平成31年3月7日

1. 序論

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 $dL/L < 10^{-23}$ と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ファブリーペロー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る低周波数域での重力波検出が可能であり、直接検出が成し遂げられればインフレーションなどの初期宇宙の解明・理解につながるとされている。しかしながらDECIGOの観測帯域である1Hz付近は検出器の感度向上を妨げる雑音が多く、その条件下で使用するレーザー光源の雑音低減が求められている。本研究では日本における宇宙型重力波検出器DECIGOのための光源開発を行っており、まずはその試作機であるBreadboard Model (BBM) を2台開発した。そしてその観測帯域である1 Hz 帯で周波数を安定化し、短期安定度と長期安定度の評価を行った。また、周波数安定化に加え観測帯域と変調周波数における強度安定化を行った。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。

2. 周波数安定化

本研究で作製したBBMの概略図を図1に示す。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非線形結晶子 (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、

ている。DECIGO用光源の周波数雑音の要求値は短期安定度・長期安定度共に $df/f=10^{-15}$ 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。これらを達成するためにまず、周波数基準には長期安定度が優れたヨウ素分子の飽和吸収線を選択し、さらに従来ヨウ素安定化レーザーの周波数基準に用いられてきたヨウ素の532nmの飽和吸収線ではなく、より線幅が細く短期安定度の向上

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波長変換された光を導入し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550x300 mm のアルミ製ブレッドボードの上に配置されている。

が見込める515 nmの飽和吸収線を選択し、短期的安定度と長期的安定度両方の向上を図った。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BBM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 $df/f=10^{-13}$ 台、100秒以上（長期安定度）では $df/f=10^{-14}$ 台の安定度を達成した。

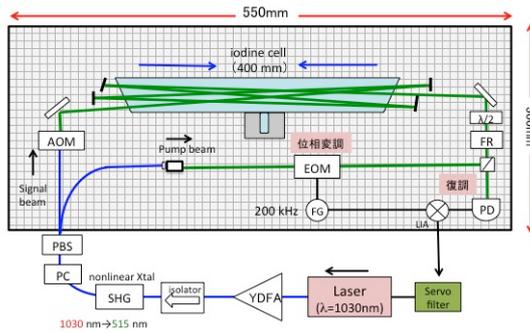


図1 BBM概略図

3. 強度安定化

重力波検出器の感度向上のためには周波数安定化に加え光源の強度安定化が必要不可欠である。特に観測帯域では光源の強度雑音は量子雑音よりも下回り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。また、受動的な強度雑音抑圧である差動受光も合わせて行った。

4. まとめ

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 (Frequency modulation) を組み合わせた信号取得法を併用してさらに信号の SNR を向上させ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予定である。

てなければならない。光源の強度安定化は信号取得の変調帯域である 200 kHz においても求められており、その要求値は共に $dI/I = 1 \times 10^{-8} \sqrt{\text{Hz}}$ 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に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、観測帯域 1Hz で $dI/I = 5 \times 10^{-8} \sqrt{\text{Hz}}$ 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 modulator (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