

FM 分光法による飽和吸収信号の SN 比向上

武者研究室 濱口 太一

2017 年 3 月 8 日

1 研究背景

2015 年にアメリカの研究グループが初の重力波直接検出に成功したと発表している。重力波は四重極変位の伝搬であるため、レーザーマイケルソン干渉計による観測が可能である。重力波は透過性がよく、相互作用をほとんど起こさないために、様々な情報を保持している反面、検出が難しい。また地球から遠く離れた系で発生した重力波を観測するので、観測時には相対振幅が 10^{-21} オーダーとかなり微小になる。よってレーザー光源には高い精度の周波数が必要とされる。前述のアメリカでは直接検出に成功した地上型の重力波検出器「aLIGO」、日本でも地下トンネルを掘って外乱の影響を少なく、極低温で観測する「KAGURA」計画など、世界では様々な重力波検出器が存在している。また次世代の重力波検出器として宇宙型重力波検出器計画が複数の国で進められている。本研究室は日本の「DECIGO」計画にレーザー光源、衛星位置決定システムなどの開発で参加している。

「DECIGO」では重力波検出を宇宙で行う。三基のドラッグフリー衛星を打ち上げて精密編隊飛行によってマイケルソン干渉計を構築するというものである。地上では制限されるアー

ム長や、地面振動による雑音感度限界が無くなるので、地上型のものとは感度の異なる、低周波数領域 0.1~10Hz での重力波検出が可能である。よって得られる科学的意義も多く、他の検出器との補完性も高い。レーザー光源には高い周波数安定度と同時に強度安定度が必要となる。

2 FM 分光法と MT 分光法

本研究室で研究中であるヨウ素安定化レーザーを図 1 に示す。

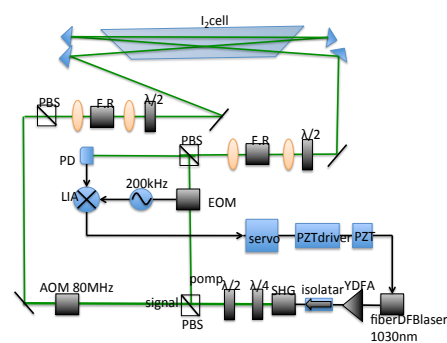


図 1 ヨウ素安定化レーザー

光源として波長 1030 nm の Fiber DFB レーザーを使用。周波数基準はヨウ素の 515 nm の飽和吸収線を利用。現在は図 1 のように変調周波数 200kHz の Modulation Transfer Spectroscopy(MT 分光法)によって飽和吸収信号、周波数弁別曲線(図 2)を得ている。この周波数弁別曲線を参照にして誤差信号を servo 回路を介し

て Fiber DFB レーザーにフィードバックして周波数安定化をしている。MT 分光法ではまず、515nm の光を励起光と信号光の 2 つにわけ、励起光を位相変調してヨウ素を封入したセルに対向に同軸で入射する。励起光によって吸収が飽和し、透過した信号光の強度には吸収が飽和した周波数でラムディップが観測される。さらに励起光の位相変調はこの際に信号光に移乗し、これをロックインアンプで復調するとラムディップが微分形で得られる。これが周波数弁別曲線である。変調の移乗はラムディップのみに起こるので信号は線形吸収の影響を受けずにオフセットフリーであるという利点があるが、変調周波数は 200kHz 程度に制限される。これに対して Frequency Modulation Spectroscopy (FM 分光法)では信号光を直接位相変調する。復調の際に線形吸収の影響を受けてしまう代わりに数 MHz の高い変調周波数を利用することができるというメリットがある。図 3 にヨウ素安定化レーザーの相対強度雑音スペクトルを示す。200 kHz よりも数 MHz 帯の方が一桁以上も強度雑音が高いところで変調をかけられることがわかる。FM 分光法により高い SN 比の周波数弁別曲線が得られることが期待される。

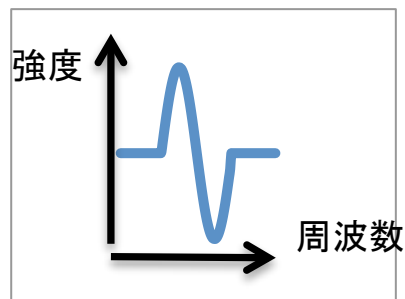


図 2 周波数弁別曲線

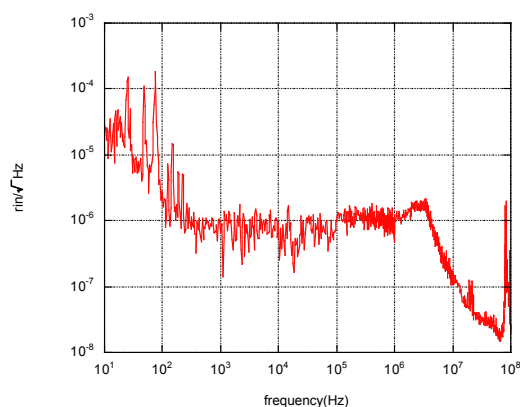


図 3 相対強度雑音スペクトル

3 実験

3.1 FMS 信号取得

FM 分光法のために図 1 の実験系を組み直した。これを図 4 に示す。変調周波数 11.8MHz として信号を取得した。オシロスコープ画像が図 5 に示したものである。雑音レベルが高くて信号が弱いため判別は困難だが周波数弁別曲線が確認できる。

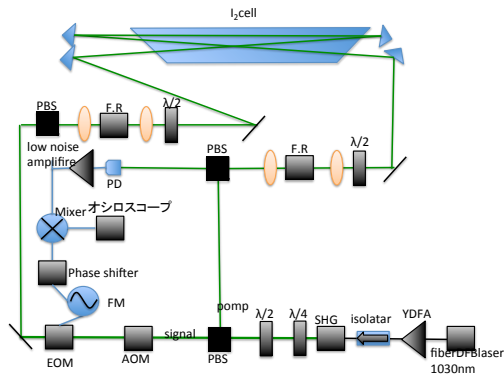


図 4 FMS 信号取得のための実験系

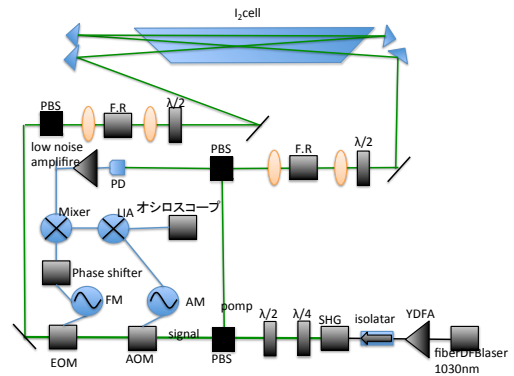


図 6 強度変調併用のための実験系

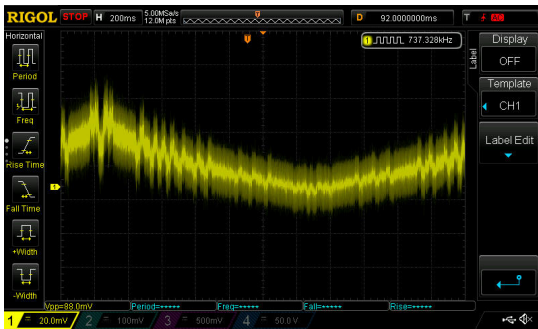


図 5 FMS 信号。変調周波数 11.8MHz

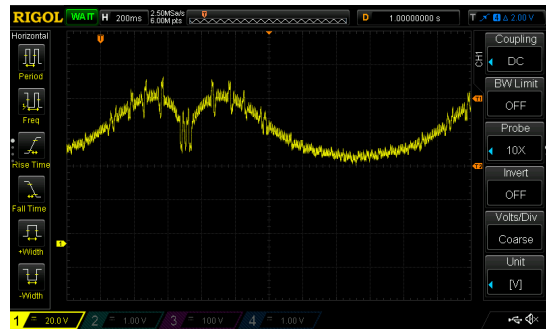


図 7 強度変調 10kHz を併用した FMS 信号

3.2 強度変調の併用

SN 比向上のため図 6 に示す実験系を組んで周波数弁別曲線を取得した。AOM によって 10kHz の強度変調をかけ、これをロックインアンプで復調している。取得した信号のオシロスコープ画像を図 7 に示す。SN 比 9.05dB、信号強度 2.07V と、図 5 の信号の場合よりも向上している。

3.3 変調周波数の最適化

次に EOM の結晶に送る RF 信号を増幅させる共振回路のコイルを可変に改造して位相変調の変調周波数を変えそれぞれの SN 比を計測した。図 8 に結果を示す。また、26MHz の位相変調に固定し、強度変調を変えてそれぞれの SN 比を計測した。これを図 9 に示す。位相変調周波数 23MHz まで上げることで SN 比 24.42 dB まで向上した。このときの強度変調は 50kHz であった。図 9 のように強度変

調周波数 160kHz 程度で利得は飽和し、最大で 27.4dB まで SN 比が向上した。これは同じ実験系で MT 分光法による信号の 17.1dB よりも良い値である。

4 まとめ

本研究室では宇宙重力検出器 DECIGO に搭載するレーザー光源の開発を行っている。重力波検出には非常に精密な周波数安定度が必要であり、飽和吸収線を周波数基準に採用している。飽和吸収線分光法には主に 2 つの方法がある。励起光を変調してこれを信号光に移乗する Modulation-Transfer-Spectroscopy (MTS) と信号光を直接変調する Frequency Modulation Spectroscopy (FMS) である。信号光を復調すればラムディップの微分形として周波数弁別曲線が現れる。現在本研究室では MTS を採用しているが FMS ならオフセットが載る代わりに強度雑音の影響を受けにくい高周波数域での変調が可能で、MTS より高い SN 比の周波数弁別曲線が期待できる。

本研究では FMS 信号の取得と、FMS 変調周波数の最適化と強度変調などを用いての SN 比の向上とにつとめた。得られた結果として MTS 信号の SN 比は 17.1 dB、信号の強さは 0.195 V、変調周波数 11.8 MHz、強度

変調 10kHz での FMS 信号の SN 比は 9.05 dB、信号の強さが 2.07 V であったのが、変調周波数 26 MHz、強度変調 160 kHz での FMS 信号では SN 比は 27.4 dB、信号の強さが 4.72 V まで向上した。