

ヨウ素安定化レーザーの残留強度変調抑制

武者研究室 大塚 俊介

2017年3月9日

1 研究背景

空間の歪みが波として伝搬する現象である重力波は、2016年に初めて直接検出された。重力波の観測する方法として、レーザーを利用したマイケルソン干渉計があげられる。重力波は四重極運動をしながら伝搬する。そのため、重力波が干渉計を通過すると、干渉計の片腕が伸びもう一方の腕が縮むことにより干渉の強度が変化する。これにより重力波を観測することができる。重力波の観測は地球上でのみ行われているが、宇宙空間で重力波観測を行う計画が各国で進行中であり、日本ではDECIGO計画が進められている。このDECIGO計画は、宇宙空間に3機1組の人口衛星を一辺1000 kmの正三角形の頂点に配置し、片腕1000 kmのファブリペロ・マイケルソン干渉計を計3台構成することによって0.1~10Hzの周波数の重力波を狙う計画である。宇宙で観測を行う利点として、地面振動の除去と長距離基線長の確保が挙げられる。地面振動を除去することによって低周波域での重力波の感度を上昇させることが可能になる。また、基線長を長くすることで、重力波による距離の変位を長くすることが可能になる。この計画のメインターゲットとなる重力波はインフレーション起源の重力波であり、宇宙初

期の情報を保有し、電磁波で観測できる宇宙よりも古い宇宙の情報を取得することができる。しかし、この計画を達成するための機器、その他への要求値は非常に高い。使用するレーザーの要求値としては周波数が515 nm、パワー10 W、周波数雑音1 Hz/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、強度雑音 $1 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$ である。周波数雑音の要求値は $\Delta f / f = 1 \cdot 6 \times 10^{-15}$ に相当する要求値である。この要求値を達成するために本研究室ではヨウ素安定化レーザーを開発している。

2 ヨウ素安定化レーザー

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。

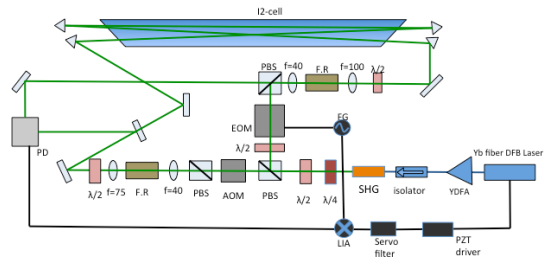


図1 ヨウ素安定化レーザー

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。飽和吸収分光法により周波数弁別信号を取得し、この信号から周波数の安定化を行っている。まず、1030 nm の光を第二高調波発生により 515 nm に

変換し、偏光ビームスプリッターによって励起光と信号光に分ける。励起光は電気光学変調器(EOM)で位相変調を加え、ヨウ素セルに入射させる。信号光はヨウ素セルに励起光に対して同軸に対向入射させる。このときヨウ素セル中で励起光の位相変調が信号光に変調移乗し、信号光に位相変調が加わる。信号光を受光し、復調することで周波数弁別信号を取得。周波数弁別信号は周波数変化を電圧変化として捉えることが可能である。周波数の安定度の評価は、2台のヨウ素安定化レーザーのビート周波数の変動の測定により行っている。図2にヨウ素安定化レーザーの無制御時と制御時の周波数アラン分散を示す。

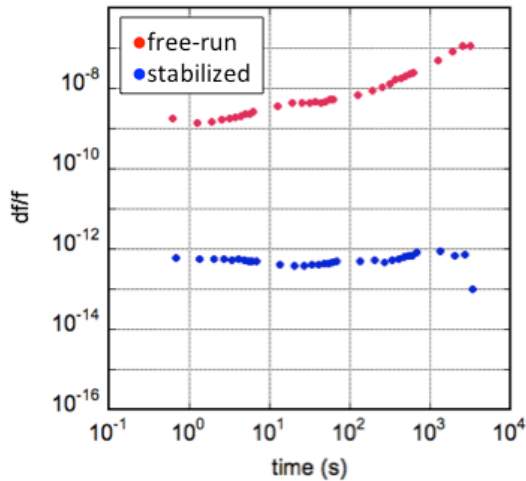


図2 ビート周波数のアラン分散

短期安定度、長期安定度共に目標値とする $\Delta f/f = 10^{-15}$ 台を達成できていない。長期の周波数安定度を向上させるには残留強度変調の抑制と、干渉雑

音の低減が必要である。本研究では、長期安定度を向上すべく、残留強度変調の抑制を行った。

3 残留強度変調

残留強度変調(RAM)はEOMによってビームに位相変調を加える際に強度変調が加わる現象である。EOMの結晶の温度が変化することによって結晶の複屈折率が変化する為起こる現象である。復調前のRAMは式1の様記述できる。

$$I(k\omega_m) = -4ab|E_o|^2 J_k(M) \sin(k\omega_m t) \sin\left(\frac{2\pi l}{\lambda}(\alpha_e - \alpha_o)(T_o - T) + \Delta\phi_{dc}\right)$$

式1

$\Delta\phi_{dc}$	EOMへの印加電圧による各偏光の位相シフトの差	a	偏光の傾きによる項
T_o	設定温度	b	変調深さ
$\alpha_e - \alpha_o$	熱光学係数の差	M	変調周波数
		ω_m	EOM結晶の長さ
		l	ビームの波長
		λ	

4 RAMの評価

励起光にEOMを用いて位相変調を加える際に、温度コントローラーを用いて結晶に温度変化を加えてRAMを発生させた。その後ビームを受光し、復調、観測した。使用した実験系は図3である。

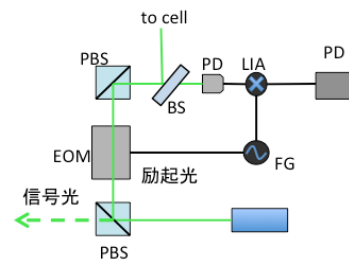


図3 RAM観測の実験系

実験結果を図 4 に示す。

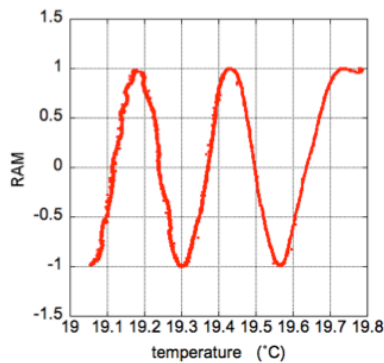


図 4 復調信号の観測結果

図 4 は縦軸が復調した信号を規格化したもの、横軸は EOM の結晶付近の温度である。この測定結果から、式 1 を用いて結晶の常光線と異常光線の熱複屈折の差を求めたところ、データシートとの誤差が 11% であり、復調信号の揺れが RAM であると確認できた。また、RAM の周期は 0.26 °C であることが判明した。

5 励起光の RAM の周波数安定度への影響

励起光に発生した RAM が周波数安定度にどれほど寄与するかを測定した。測定方法は、2 台のヨウ素安定化レーザーのビートを測定しつつ、一方のヨウ素安定化レーザーの EOM に温度変化を加え、ビート周波数の揺れを観測するものである。実験結果を図 5 に示す。

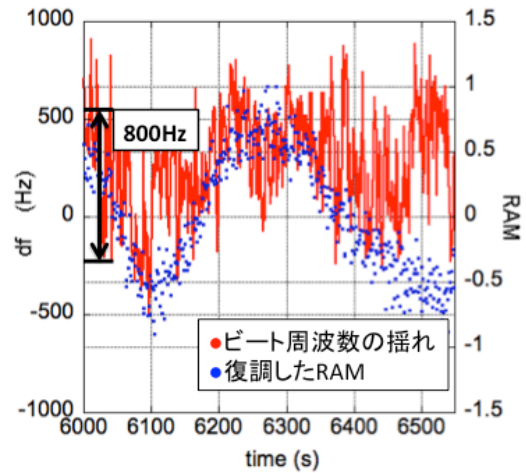


図 5 励起光の RAM の変動によるビート周波数の揺らぎ

RAM が 1 周期発生した際、ビート周波数は 800 Hz 変動した。この測定データと、RAM の観測によってえることのできた RAM の周期から、最大勾配が 10 Hz/m°C であることが分かり、目標とする $\Delta f/f = 10^{-15}$ 台を達成するためには、EOM 結晶の温度変化を 0.1 m°C 以下に抑えなければならないことが分かった。しかし、使用している温度コントローラーで抑えることのできる結晶の温度変化は 5 m°C 以上であるため、温度による RAM の制御が困難であることが判明した。従って他の手段で RAM を制御することが望ましく、EOM 結晶に DC 電圧を印加することによって複屈折率を変化させることによる RAM の高速制御を行っている。

6 まとめ

EOM 結晶に温度変化を加えることによって、ヨウ素安定化レーザーの励起光に発生する RAM を観測することができ、その周期は $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。また、励起光の RAM の周波数安定度への影響を測定し、RAM が一周期発生した場合、ビート周波数が 800 Hz 揺らぐことが判明した。この結果より、目標とする周波数安定度 $\Delta f/f = 10^{-15}$ 台を達成するためには、結晶の温度変化を $0.1\text{ m}^{\circ}\text{C}$ 以下に抑える必要があることが判明した。しかし、使用している温度コントローラーでは EOM 結晶の温度変化を $5\text{ m}^{\circ}\text{C}$ 程度までしか抑えることができないため、温度制御意外の方法での RAM の抑制が必要であることが分かった。

7 展望

EOM 結晶の温度制御のみで RAM の抑制を行うことが困難であることが判明したため、他の方法で RAM を抑制することが求められる。そこで、式 1 にあるように、RAM が EOM 結晶への DC 電圧の印加の影響を受けることを利用しての RAM の抑制が方法としてあげられる。温度制御をしつつ、EOM 結晶への DC 電圧の印加による RAM の高速制御を行い、長期安定度を向上させることを目標とする。