変位雑音・周波数雑音フリー干渉計

佐藤 修一

法政大学 工学部システム制御工学科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町3-7-2)

Displacement- and Frequency-Noise Free Interferometry

Shuichi SATO

Faculty of Engineering, Hosei University, 3-7-2 Kajinocho, Koganei, Tokyo 184-8584

(Received October 14, 2008)

Recently, the optical configuration of laser interferometry which is not sensitive both to displacement motion of the optics and to laser frequency noise is suggested as an application for gravitational wave detection. We have demonstrated displacement- and frequency-noise-free laser interferometry (DFI) by partially implementing a recently proposed optical configuration using bidirectional Mach-Zehnder interferometers (MZIs). This partial implementation, the minimum necessity to be called DFI, has confirmed the essential feature of DFI: the combination of two MZI signals can be carried out in a way that cancels displacement noise of the mirrors while maintaining gravitational-wave signals. The attained maximum displacement noise suppression was 45 dB.

Key Words: Gravitational wave, Laser interferometry, Noise cancellation

1. はじめに

重力波はしばしば「時空のさざなみ」と形容される。自由空間を伝播する電磁波に極めて微かな位相変化として作用する重力波の効果を直接検出しようとする試みが重力波検出器開発である。天体から期待される重力波イベントの頻度と検出器の実現性の観点から、現在の感度目標は、およそ歪み感度で $10^{-24}/\sqrt{\text{Hz}}$ 程度に設定されている。このような超々高感度な計測機器を実現するためには、ありとあらゆる雑音源を抑えること、あるいは場合によってはその伝播経路を断つ工夫が必須となる。事実これまでの干渉計開発の多くは雑音同定とその低減に重点をおき、その結果、米国LIGO計画の干渉計をはじめ、国内の干渉計も計画感度に迫る感度を達成しつつある。

ここでは雑音の寄与を抑える、というこれまでの発想を転換し、雑音を差し引くことで寄与をなくす、という逆転の発想に立ってみる。このアイデアによって、現在の計画感度を制限するとされる雑音のうち後述するように変位の雑音は相殺されるために、広い帯域で散射雑音のみに制限される干渉計が原理的には実現可能である。つまり、計画感度を大幅に書き換える(その結果重力波の観測帯域が広がる)ポテンシャルをもつということである。

本実験のアイデアである「変位雑音フリー干渉計」が発

明されたきっかけとなったのは、十数年前、当時 Caltech にいた川村 静児氏(現国立天文台)が、「重力波と鏡の変位の効果は本質的に作用が異なる」ということはつまり「両者は区別できるはず」と気がついたことに端を発する。多くの先人たちが作用が異なるという事実には気がついていたが、区別するという観点から変位雑音フリー干渉計という形で具体化する契機となったのは川村氏によるところが大きい。

重力波のプロブとなる試験質量が距離 L だけ離れておかれていたときに、重力波の効果は潮汐力となって距離 L を変化させると考えることができる^{†1}。この座標系では、適当な偏光の歪み振幅 h の重力波は、試験質量間の相対的な距離変動 Lh 、あるいは電磁波の飛行時間にして Lh/c の時間遅延を引き起こすと考えられる。これらの効果を電磁波の飛行時間計測をもって観測しようとした場合、一般には

- ・試験質量のもつ時計が $\delta t \sim Lh/c$ より十分よい精度であっていること
- ・試験質量の位置が $\delta x \sim Lh$ より十分よい精度で測地線にそっていること

の二つを要請するようと思われる。しかしながら、次に述べるように両者とも実際には必要ないことがわかってきた。

前者は干渉計測という方法によって回避することがで

^{†1}より正確な取り扱いには次の章を参照のこと。

きる。マイケルソン干渉計に代表されるように、電磁波のビームを2方向に分け、試験質量まで往復してきたビームを再び干渉させることによって両者の差動成分だけを選択的に検出する。つまり、ビーム源のもつ時計のタイミング誤差(周波数雑音といってもよい)は両者に同相で寄与するため、干渉計出力には出てこない。上の議論は、正確には2つに分けた光路長が同じ場合にのみ正しいが、光路長が等しくない非対称干渉計の場合には、さらにこの方法を拡張して時計の揺らぎを低減する手法がTDI(Time Delay Interferometry)として知られている¹⁾。

後者はより密接に重力波検出の原理に関連しており、試験質量は理想的に自由落下させる(あるいは慣性空間に浮かべる)という要請と等価である。この要請を満たすための工夫が、地上の検出器では鏡(試験質量)を吊るす懸架装置であり、宇宙干渉計ではドラッグフリー技術である。しかしながら、この要請もまた必須ではないということがつい最近示された。つまり、重力波のプロープとなる試験質量は、少なくとも原理的には自由落下させる必要がないということである。

これらの結論を導いたのは次に紹介する変位雑音・周波数雑音に感度のない重力波計測法の発明による。通常のレーザー干渉計に対応させた場合、時計の誤差はレーザー光源の周波数雑音に、試験質量の位置の誤差は鏡あるいはビームスプリッタの変位雑音に相当しており、上のアイデアは、変位雑音および周波数雑音に感度のない重力波計測が可能であるということと等価である。本論文ではこれらを実現する「変位雑音・周波数雑音フリー干渉計」の原理を紹介するとともに、後半では原理検証実験の結果を述べる。

2. 変位雑音・周波数雑音フリー干渉計

空間を伝播する電磁波に対して、重力波も光学素子の変位も位相を変化させる効果として作用する。変位雑音・周波数雑音フリー重力波検出は「重力波は電磁波の伝播経路全体に渡ってその効果を積分する一方で、物体の変位は電磁波との相互作用の瞬間にしか作用しない」という原理に由来する。

z 方向から適当な偏光^{†2}の重力波が伝播きたときに、 $x-y$ 平面での4元線素は $ds^2 = -(cdt)^2 + (1+h(t))dx^2 + (1-h(t))dy^2 + dz^2$ で与えられる。 x 方向に距離 L だけ伝播する電磁波に対して、 $h(t)$ が十分小さいという近似を使い、 $dx = c(1 - \frac{1}{2}h(t))dt$ を両辺積分することにより、重力波による位相変化の効果は、

$$\begin{aligned} d\phi_{\text{GW}} &= \frac{\Omega}{2} \int_{t-L/c}^t h(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Omega}{\omega} \sin(L\omega/2c) e^{-iL\omega/2c} h(\omega) e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (1)$$

で与えられる^{†3}。一方、距離 L だけ伝播した先の受信機

が $l(t)$ の変位を持っている場合、電磁波が変位によって余分に受け取る位相変化は同様に

$$\begin{aligned} d\phi_{\text{DN}} &= \frac{\Omega}{c} l(t - L/c) \\ &= \frac{\Omega}{c} \int_{-\infty}^{\infty} l(\omega) e^{-iL\omega/c} e^{i\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。つまり、重力波の効果は電磁波の伝播経路全体に渡って歪み $h(t)$ の効果を積分する一方で、試験質量の変位の影響は電磁波が到着(あるいは出発)する瞬間の効果が位相の変化として取り込まれる。重力波の効果は、重力波の波長 $2\pi c/\omega$ が検出器のスケール L よりも十分に大きい場合($L\omega/c \ll 1$)には近似的に潮汐力(試験質量間の距離が Lh だけ伸縮する)として理解することができる。この場合、試験質量の変位雑音と同じ応答をするため両者は区別できないが、 $L\omega/c = 1$ と検出器のスケールと重力波の波長が同程度になる条件で顕著な差異を示す。この章では変位雑音・周波数雑音フリー干渉計(DFI)の原理と具体的な光学設計の例を述べる。

2.1 変位雑音・周波数雑音フリー計測の原理

思考実験として試験質量の間に光パルスを飛ばして、その飛行時間の計測から重力波を検出することを考える。一般的な場合(Fig. 1)、 d 次元空間に N 個の試験質量を配置し、試験質量間をパルスが伝播するのにかかる時間を計測する。試験質量は各々の時計を持つものとし、時計の精度でパルスの出発・到着時刻を計測できるものとする。この系で重力波の検出を行う場合、雑音となりうるのは原理的には試験質量固有の変位の雑音と時計の雑音(タイミングのずれ)のみである。

N 個の試験質量間でのパルスタイミングの測定数は、その組み合わせを取って $N(N-1)/2$ だけある。一方、時計の雑音は N 、試験質量の変位による雑音は $N \times d$ 次元 $=Nd$

Fig. 1 Schematic view of the configuration of N objects and light pulses propagating between them. The configuration of N -body system can be extracted in arbitrary dimension, linear, planar and three dimensional space.

^{†2} x および y の方向に伸び縮みする“+”モードを仮定する。これとは独立に、 $x-y$ 面内で45度回転した方向に伸縮する“×”モードが存在する。

^{†3}ここで $h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\omega) e^{i\omega t} d\omega$ で与えられるフーリエ変換を用いた。

となる。ここでパルスタイミング測定の情報はいずれも独立としてよいことから、もし測定数 $N(N+1)$ の方が雑音の数 $N+N_d=N(d+1)$ を上回るように $(N>d+2)$ 十分な数の試験質量を考えれば、少なくとも $N(N-1)-N(d+1)=N(N-d-2)$ だけの、雑音の情報を含まない信号のコンビネーションを作ることができる。つまり、 N 体のネットワークで信号のコンビネーションをとることにより、変位雑音にも時計雑音にも感度のない(重力波)計測ができる、ということである²⁾。

この種の信号の冗長性を利用した雑音の相殺のアイデアは、電波・光学天文の分野ではclosure phaseと呼ばれ、一般的な技法の一つである。一方、重力波観測のアプリケーションにおいても重要なことは、コンビネーションを取った後に、重力波信号は相殺せずに残り、重力波検出器として感度を持つことである。詳細な議論は文献3)に譲るが、 $d=2$ 次元以上の場合に重力波に感度のある組み合わせが存在することが分かっている。

さて、ここまでの議論から試験質点の固有変位と時計の雑音を含まない重力波計測が可能であることがわかったが、これは雑音の周波数に因らない特性であり、原理的には完全に雑音フリーな計測が可能である。一方の重力波信号に対する応答は周波数依存する。一般に、低周波極限、つまり重力波の波長 λ に対して検出器のスケール L が十分小さい($L \ll \lambda$)場合には、前述のように重力波による光路長変化の効果と試験質点の変位とは原理的に区別がつかない。したがって、この周波数領域ではDFIの演算によって重力波信号も相殺されてしまう。逆に重力波の波長と検出器のスケールが同等程度($L \sim \lambda$)の時にもっとも重力波と変位との効果の本質的な違いが顕著になり、雑音が消えて重力波信号のみが残る、ということが起こる(Fig. 2)。重力波に対して最も感度が高くなる周波数(最適周波数)は、したがって検出器のスケールだけで決まっており、 $f_c = c/L$ で与えられる。この際、 f_c より

Fig. 2 Transfer function of the 3D, four-MZI configuration to GW signal. The response of this DFI to gravitational wave (supposing appropriate polarization and optimal incident angle) have its maximum around normalized frequency $2L\omega/\pi c = 1$.

り低周波側では信号もまた相殺されるので応答が小さくなるが、その周波数依存性の上限が2次元のネットワークでは f^3 、3次元のネットワークでは f^2 で決まっていることは、純粋に幾何学的な観点から興味深い。

2.2 変位雑音・周波数雑音フリー計測を実現する光学設計

以上の議論は試験質量と光パルスによる思考実験であったが、具体的な検出器設計に反映させるために、光パルスとしてレーザーを、試験質量として通常の光学素子(鏡、ビームスプリッター等)を用いたレーザー干渉計に応用することを考える。DFIの条件を満たすような N -体の配置方法は実は多数あって、実際にいくつかのDFIとなる干渉計構成が提案されている。これらの中で最も最初に提案され、かつ最も構成要素の少ないシンプルな干渉計がFig. 3に示す、3次元型のDFIである⁴⁾。

構成要素となる干渉計は単純なマッハツェンダー干渉計(MZI)であり、Fig. 3のように、2つのMZIを同一の光路を逆向きに共有するように重ね合わせる(双方向MZI)。これによって2台のMZIは反射鏡およびビームスプリッターの変位情報を共有することができるため、2つの干渉計からの干渉信号を同じ条件で引き算することで変位の情報を差し引くことができる。ただし、この演算で消えるのは2つのMZIに対して対称な位置にある2枚の反射鏡の変位情報のみであり、ビームスプリッターの変位

Fig. 3 The 3D octahedron configuration, which consists of four MZIs. One set of bi-directional MZI, MZI1 and MZI2 (MZI3 and MZI4), shares a pair of folding mirror, FM1 and FM2 (FM3 and FM4), and beam splitter, BS1 and BS2.

⁴⁾ N 体のネットワークを展開する次元数で応答関数の低周波側の傾きが決まる³⁾。次の章で紹介するDFIは3次元で展開する構成のため、Fig. 2に示されるように低周波側の周波数依存性は f^2 となっている。

情報はその位置が非対称であることから干渉計出力に時間差で現れるため相殺しない。そこで、この双方向MZIをもう1組用意し、2枚のビームスプリッタを共有するように2組の双方向MZIを3次元に展開する。この場合、ビームスプリッタに対して対称なMZIの信号を演算することでビームスプリッタ変位情報を相殺する。

試験質量の時計雑音に相当する光源の周波数雑音は、例えばマイケルソン干渉計の場合、非等長な二本の腕を往復してきた光が干渉することで疑似信号(雑音)となるが、等長マイケルソン干渉計のような空間的・光学的に対称な光学設計で干渉計測を行うことで自動的に回避することができる。非対称な設計を採用する場合であっても、TDIのような操作を行うことで周波数雑音の効果を低減することは可能である。したがって、光パルスモデルの時点では「変位雑音」と「周波数雑音」とは対等な雑音であったが、対称性のよいレーザー干渉計測を用いた時点で、「変位雑音」のほうがより現実的な対処すべき対象である。

3. 原理検証実験

DFIが原理的に正しく動作することを実験的に示すには、光学素子の変位の情報が相殺されること、および重力波信号には感度が残ること、の二点を示せばよい。具体的には、光学素子の変位および重力波による時空間の歪みを模擬した信号に対するDFIの応答を測定し、予想通りの振る舞いをすることを示せばよい。すべての光学素子(鏡およびビームスプリッタ)の変位情報を同時に相殺するためには、前章で紹介した光学設計のDFIの場合、4台のMZIの信号を演算しなくてはならない。しかしながら、特定の光学素子の変位を大きな信号で模擬して干渉計出力までの応答をみる実験では、その中の2台のMZI信号を組み合わせることで十分である。ここでは鏡およびビームスプリッタの変位情報の相殺効果を実証するために2種類の干渉計構成をもちいた。

3.1 鏡の変位雑音の相殺効果と重力波信号

鏡の変位情報の相殺には、前述のDFIを構成する4つのMZIのうちそれぞれ2組のMZIが関与する。例えば、折り返し鏡FM1の変位情報を相殺するには、Fig. 4に示されるような、FM1を共有する双方向MZIを用いる⁵⁾。光源には半導体励起固体Nd:YAGレーザー、波長1064 nm、出力100 mWのものを用いた。光は二つに分けられ、ファラデーアイソレータを通した後に、それぞれ逆方向からMZI部に入射されることによってMZI1とMZI2を構成する。この際、MZI内でお互いに逆方向に進むビームが空間的に重なり合うことで、通過する光学素子の変位情報をできるだけ厳密に共有することが重要である。MZIのスケールは前節で述べたように重力波信号の最適周波数に関連する。一般にできるだけ干渉計のスケールを大きくし、最適周波数を低周波にしたほうが計測が容易になるが、本実験はテーブルトップの実験であるため、現実的なスケールとしてBS1からBS2までの

片腕の長さ3.6 m、重力波信号に対する最適周波数で数100 MHzに設定した。

重力波信号の影響は残りつつ、かつ光学素子の変位情報は相殺することを示すために、この数100 MHz帯で対応する位相変調を印可することが必要となる。ここでは広帯域の電気光学変調素子(EOM: Electro Optic Modulator)を用いて位相変調を印可した。鏡の変位による位相変調を模擬するためには、MZIの片側の光路のBS1とBS2とのちょうど中点に設置したEOM1で位相変調を印可する。一方、重力波信号を模擬するためには光路全体に渡って時間および位置の関数で発展する位相変調を加える必要があるため、重力波信号を厳密に模擬することは現実的には簡単でない。そのため、本実験ではBS1とBS2の間の非対称な位置に置かれたEOM2で位相変調を印可して、重力波相当の信号を生成した。重力波の効果は光の伝搬経路上における光路長変化による位相変化の積分である。従って実際、EOMの結晶の長さに限れば重力波信号に対応する位相変調が印可されている一方、あるいは光路上のある一点で(鏡の場合のように)位相変調が印可されていると解釈してもよいが、この効果を光路上すべての箇所で積算すれば、真の重力波と相当な効果が得られる。真の重力波信号の最適周波数が干渉計のスケールで決まる一方、EOM2による模擬信号の最適周波数はBS1とBS2の間におけるEOM2の非対称度に依存する。できるだけ非対称な位置に置いて最適周波数を下げるという観点から、EOM2はおおよそBS2から11 cmの場所に設置された。

MZI1の二つの出力ポートのうち、FIを経由して得られた干渉光(1a)は低速(DC~10 kHz)光検出器で受光する。この信号は干渉計の差動変動を反映したフリンジ情報を含むので、適当なオフセットを加えることにより、所謂ミッドフリンジ(明縞暗縞の間)に制御するための誤差信号とする。適当なフィルターを介し、FM2にフィードバックすることでフリンジ制御を行う。制御帯域はおおよそ400 Hzと、模擬信号による応答測定の周波数帯域に較べて十分低く設定しており、制御による応答関

Fig. 4 The experimental set up of partial DFI. MZI1 and MZI2 share a common laser source and Mach-Zehnder interferometer parts. The scale of the MZI was about 4 m, for which purpose the optical paths of the MZI arms had to be folded several times on the optical table, which does not affect the DFI features in this experiment.

数への影響は無視してよい。ひとたびMZI1の光学系によってMZI1のフリンジが制御されると、同一の光軸を共有するMZI2のフリンジは自動的(受動的)に制御されており、フリンジは動作点に保持される。その他の干渉計出力(1b, 2a)は疑似信号への応答を計測するために高速(1 GHz)の光検出器で受けられる。光検出器の直前の偏光光学素子は光量調節のために設置してある。これらの干渉計信号は鏡の疑似信号に対する位相が反転しており、RF信号結合器を介することによって引き算の演算をすることができる。

DFIの疑似信号に対する応答特性の測定は、EOM1およびEOM2による疑似変位信号、疑似重力波信号からDFI出力までの伝達関数測定によって行った。変位雑音の相殺の効果を測定した結果をFig. 5に示す。EOM1からHPD1およびHPD2までの伝達関数は、EOM1の位相変調特性およびHPD1とHPD2の応答特性、さらに光学的・電気的な位相遅延を含んでいるため、特徴的な構造を含んだ周波数特性を示す。干渉計の応答としては理想的には平坦な特性が期待される。これら二つの干渉計に現れる変位疑似信号は、光検出器への入射光量および相対的な信号路長(光学的・電気的)を微調整することにより、振幅・位相の両方がよく一致するように合わせ込まれる。この調整の精度によって変位雑音の相殺の精度(同相信号除去比: CMRR)が決まる。図から分かるよう

Fig. 5 The response functions from displacement noise to output signals. Dashed-gray and dotted-black curves are response to single detector HPD1 and HPD2, giving almost identical response in amplitude while opposite sign. Therefore, summation of these two signals gives cancellation of displacement noise. The suppression depends on a delicate tuning of the balance between two signals. Approximately 30 dB of suppression can be seen in a wide frequency band from 10 kHz to 300 MHz in the solid gray curve, meanwhile, the solid black curve shows maximum suppression exceeding 45 dB at around 25 MHz.

に、広い周波数帯域で30 dB程度のCMRRがみられる一方で、ある特徴的な周波数帯域に於いては50 dBのCMRRが観測された。二つの干渉計は極力対称な構成に設定してあるものの、周波数特性において数%の非対称性は避けることができないため、ある特定の周波数でのみ振幅・位相を最適化することができて、結果的に高いCMRRが観測される。また得られたCMRRの最大値が50 dBであるのは、伝達関数の計測中に広い意味で干渉計の状態が変動することによって二つの干渉計の疑似信号に対する感度(応答特性)が変化し、CMRRが揺らぐためではないかと思われる。

一方、疑似重力波信号に対するDFIの応答特性をFig. 6に示す。HPD1、HPD2のそれぞれ単体の伝達特性はFig. 5の疑似変位雑音に対するものと類似しているが、引き算した後のDFI信号は本質的に異なる。これは二つの干渉計の位相応答が異なるため、ある特定の周波数(最適周波数数100 MHz)では引き算ではなく足し算の効果となってDFI信号に現れる。まさにこれがDFIで重力波信号が検出できる所以である。

3.2 ビームスプリッタの変位雑音の相殺

ビームスプリッタの変位雑音の相殺効果を見るためには、DFIを構成する4台のMZIのうち、前述の双方向MZIとは異なる組み合わせの2つのMZIを用いる(Fig. 7)。前述のDFIでは3次元に展開しているが、ここではビームスプリッタBS1を共有する1組のMZIの対を2次元に展開して用いる。最終的には残るBS2とBS3とは共有されることで両方の変位雑音が相殺されるのであるが、本実験

Fig. 6 The response functions from simulated GW inputs to output signals. The effects of the response functions of EOMs and HPDs on the DFI signal were compensated by using the response function to single detector. This corresponds to an intrinsic DFI (bidirectional MZIs for this experiment) response function to a simulated GW signal. The solid curve is a fitted DFI response giving reasonable fitting parameters.

Fig. 7 Experimental setup for cancellation of beam splitter displacement information. Two MZIs share BS1 the displacement noise source of interest. Both MZIs are fringe-controlled independently under almost same condition giving common information on BS1 displacement.

は原理検証実験なので、BS1の変位情報の相殺効果にのみ注目する。

レーザーからの光はBS1に入射したあと、独立な2つのMZIへと分けられる。ビームスプリッタの変位雑音はBS1の直後に設置されたEOM3による位相変化で模擬する。それぞれ2つあるMZIの出力ポートのうち1つから出てくる干渉光は低速光検出器で受けた後、オフセット調整・適当なフィルタリングを経て piezo 素子にマウントされた折り返し鏡にフィードバックされる。これによって両MZIはミッドフリンジに制御される。もう一方のポートからの光は高速光検出器で受けて、伝達関数測定に用いる。信号の結合方法等は前述の実験と同等である。

BS1からDFI信号までの応答特性の測定結果をFig. 8に示す。2つの干渉計が対称ならばHPD1とHPD2までは厳密に同じ応答を示し、DFI信号は現れないはずであるが、前述のような原因から有限のCMRRが観測される。どの周波数帯域で最適化するかによって全体の様相は大きく変化するが、広い帯域でみれば30 dB、特定の帯域に限れば50 dBのCMRRが観測されたことは、前の実験と同等である。

4. 重力波検出器としての展開へ向けて

以上により、DFIが原理的には正しく動作すること、つまり変位雑音および周波数雑音には感度が低い一方で重力波信号は検出できる具体的な干渉計構成が存在することは確かめられた。このアイデアを地上のフルスケール干渉計、あるいは宇宙干渉計に適用するにはもう一段階段をのほらないといけない。DFIの原理の部分で述べたが、変位雑音はすべての周波数で相殺する一方で、重力波に対する応答(感度)は最大になる周波数(最適周波

Fig. 8 Cancellation of beam splitter displacement noise.

The response of single detector HPD1 and HPD2 are shown in dashed-gray and dotted-black curves, DFI signals are in solid-gray and black-curve respectively. Approximately 20-30 dB of suppression can be seen in a wide frequency band from 10 kHz to 100 MHz in the solid gray curve, meanwhile, the solid-black curve shows maximum suppression exceeding 50 dB at around 1 MHz.

数)が存在する。この周波数はナイーブには干渉計のスケールを L とした時の c/L で決まり、例えば $L=3$ kmの場合で $f_c=100$ kHz程度となる。これより低い周波数では、干渉計を展開する空間の次元によって f^2 あるいは f^3 で急速に応答を失う。つまり、干渉計系の感度が散雑雑音のみによって制限される状態が実現されたとしても、信号雑音比で感度を表した場合に、得をしないということである。したがって、この最適周波数を低周波側にシフトするような干渉計構成の工夫が必要となる。地上の干渉計では10 kmスケールの検出器で10 Hz程度、宇宙干渉計では例えばDECIGOを例にとると1000 kmの基線長で0.1 Hz程度に最適周波数を設定したい、というのがナイーブな要求である。これらを満たすような、現実的な光学設計は今のところ提案されておらず、今後の重要な開発課題である。

一方で、現存する地上の検出器群、あるいは宇宙干渉計計画に於いてもそれぞれの低周波側の変位雑音で制限される感度限界をどうにか改善したいというのが切実な願いである。これは例えば、存在が確実に分かっている連星系の合体に際しての重力波信号は所謂チャープ波形を示し、合体後はリングダウンに転ずる。このチャープ波形は、周波数領域では $f^{-7/6}$ の周波数依存性をもちながら周波数を上げつつ時間発展するために、感度の窓の低周波側での改善が重力波信号の信号雑音比を上げるとともに、直接にサイエンスの質に反映する。従って、変位雑音で制限される低周波側の感度改善が非常にインパクトを持つのである。そのため、DFIのアイデアが発表さ

れた後、世界中の様々なグループでDFIの検討がなされ、いくつかの光学設計のアイデアも提案されている^{6,7)}。

5. まとめ

変位雑音・周波数雑音フリー干渉計の原理と検証実験について紹介してきた。このアイデアは、重力波の計測を目的に慣性空間に浮かぶ試験質点間の距離測定する場合、測定に用いる時計の精度も試験質点の固有の揺らぎも、少なくとも原理的には、必ずしも抑える必要がない、という結論を導いている。これは、より現実的な観点から言えば、現時点の設計感度では変位雑音および散射雑音で制限されるだろう次世代(あるいは次次世代)の干渉計の感度を大幅に改善する可能性を秘めているということに相当する。その際、DFIの特性を余すところなく活かした検出器を構築するためには、DFIの最適周波数を観測目的の周波数帯まで引き下げるような、干渉計構成のもうひと工夫が必要である。遠くない将来、ブレークスルーとなるようなDFI設計が開発され、第3世代の重力波検出器開発に一石を投ずるような、そんな日が来ることを心待ちにしている。

謝 辞

本研究の共同研究者であり、発案者でもある川村 静児氏(国立天文台)、苔山 圭以子氏(お茶の水女子大学)、西澤 篤氏(京都大学)、宗宮 健太郎氏、Ward Robert氏、Chen Yanbei氏(以上Caltech)には、本稿を執筆するにあたり、実験・理論の両面から有意義な助言を頂いた。また本研究は科学研究費補助金および三菱財団研究助成による援助、国立天文台の多大なる協力を得て遂行されたものである。この場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- 1) M. Tinto, F. B. Estabrook, and J. W. Armstrong: Phys. Rev. D **65** (2002) 082003.
- 2) S. Kawamura and Y. Chen: Phys. Rev. Lett. **93** (2004) 211103.
- 3) Y. Chen and S. Kawamura: Phys. Rev. Lett. **96** (2006) 231102.
- 4) Y. Chen et al.: Phys. Rev. Lett. **97** (2006) 151103.
- 5) S. Sato et al.: Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 121101.
- 6) A. Nishizawa et al.: Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 081101.
- 7) S. P. Vyatchanin: arXiv:0808.3445v1[gr-qc].