

論文の内容の要旨

Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source with Filter Cavity Control using Coherent Control Sidebands for Gravitational-Wave Detectors

(重力波望遠鏡のためのコヒーレントコントロール光によるフィルタ
ー共振器制御を用いた周波数依存スクイズド真空場)

有富尚紀

重力波とは、一般相対性理論から導かれる時空の歪みが波として伝わる現象である。2015年にアメリカの重力波望遠鏡LIGOがブラックホール連星合体からの重力波の初観測に成功した。また、2017年には、LIGOとイタリアの重力波望遠鏡Virgoが中性子星連星合体からの重力波の初観測に成功し、電磁波によるフォローアップ観測も行われた。LIGOとVirgoはこれまで3回の重力波観測を行っており、50イベントの重力波が観測された。

しかし、現在の重力波望遠鏡の感度では、より強い重力場での一般相対性理論の検証やブラックホールや中性子星のようなコンパクト天体の性質、およびその連星系の形成過程などについて、決定的な知見を得るには不十分である。そのため、重力波イベントの検出統計の増大と精密な波形計測のため、感度のさらなる向上が必要である。

重力波望遠鏡の究極的な感度は、量子雑音と呼ばれる光の量子的な揺らぎによって制限される。量子雑音は、重力波望遠鏡の干渉計の出力ポートから入る真空場が原因であることがわかっている。量子雑音には散乱雑音と輻射圧雑音の2つがあり、散乱雑音は真空場の位相揺らぎ起因で高周波の感度を制限し、輻射圧雑音は真空場の振幅揺らぎ起因で低周波の感度を制限する。すでに、現在の重力波望遠鏡の感度は、高周波では散乱雑音で制限されており、さらなる感度向上のため、使用するレーザー光源のハイパワー化の他に、スクイズド真空場を入射するという方法があり、LIGOおよびVirgoは、位相方向にスクイ

ーズされたスクイズド真空場によって放射雑音の3dB程度の低減に成功した。しかし、この方法には、低周波の放射雑音を悪化させるという問題がある。実際、LIGO、Virgoにおいて放射雑音の悪化による感度の悪化が観測された。この二つの量子雑音を同時に低減するには、高周波で位相方向に、低周波で振幅方向にスクイズされた周波数依存性をもったスクイズド真空場が必要となる。この周波数依存スクイズド真空場を実現する最も有力な方法として、周波数依存性のないスクイズド真空場をフィルター共振器と呼ばれる光共振器に反射させる方法がある。LIGOとVirgoは量子雑音の低減のため、300 mのフィルター共振器を用いた周波数依存スクイズド真空場を導入する予定である。先行研究では、1 mスケールのフィルター共振器を用いたMHz、kHz帯域での周波数依存スクイズド真空場は実現されていたが、重力波望遠鏡で必要となる100 Hz以下での周波数依存スクイズド真空場は実現されていなかった。

我々は、LIGOやVirgoで用いられる予定の300 mのフィルター共振器を用いて、100 Hz以下での周波数依存スクイズド真空場を初めて実現した。そして、この周波数依存スクイズド真空場を重力波望遠鏡に導入することで、重力波望遠鏡の感度を全周波数帯域で向上させることができることを示した。

フィルター共振器によるさらなる量子雑音低減のためには、フィルター共振器の共振器長揺らぎ、アラインメント揺らぎおよびdetune周波数の揺らぎを抑える必要がある。これまで、フィルター共振器はスクイズド真空場の倍波であるグリーン光によって制御されていたが、グリーン光はスクイズド真空場と光路が異なるため、グリーン光を使った制御ではスクイズド真空場に対するフィルター共振器の共振器長揺らぎやdetune周波数揺らぎを十分抑えることができないという問題点があった。

この問題を解決するために、私はコヒーレントコントロール光を使ったフィルター共振器の新しい制御手法を提案した。コヒーレントコントロール光はスクイズ角を制御するためにすでに使われている光であるが、スクイズド真空場と光路が同じで、周波数もほぼ同じであるため、このコヒーレントコントロール光を使ってフィルター共振器を制御することで、スクイズド真空場に対するフィルター共振器の共振器長やアラインメント、detune周波数を精密に制御することができる。私は、この制御手法を用いて300 mのフィルター共振器の共振器長を制御し、共振器長揺らぎを3.4 pmから、目標値である1 pm以下の0.75 pmまで低減することに成功した。また、この制御手法を用いて100 Hz付近での周波数依存スクイズド真空場の生成に成功した。

本研究で開発した周波数依存スクイズド真空場の性能は、ロスやスクイズド真空場源とフィルター共振器の間のモードミスマッチなどによって制限されているため、ロスの低減およびコヒーレントコントロール光を用いたフィルター共振器のアラインメント制御

などを行うことによって、今後のさらなる量子雑音低減レベルの向上が期待できる。また、フィルター共振器のアラインメント制御によってdetune周波数揺らぎの低減も期待される。これらの改善を行い、この周波数依存スクイズド真空場を重力波望遠鏡に導入することで、重力波望遠鏡の感度は50%程度向上し、重力波の検出頻度は3倍以上向上することが期待できる。

本研究の成果は、LIGOやVirgo、KAGRAといった現在の重力波望遠鏡だけではなく、より共振器長の長いフィルター共振器を用いる予定であるEinstein TelescopeやCosmic Explorerといった次世代の重力波望遠鏡の感度向上にとっても重要な結果である。