

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 2019 年度

受付番号 201960096

氏名 小森 健太郎

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地：ボストン (国名：アメリカ合衆国)

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。

LIGO の量子雑音低減による重力波天文学の発展

3. 派遣期間：平成 31 年 4 月 1 日～令和 2 年 9 月 13 日

4. 受入機関名及び部局名

受入機関名：Massachusetts Institute of Technology

部局名：Department of physics

5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

【概要】

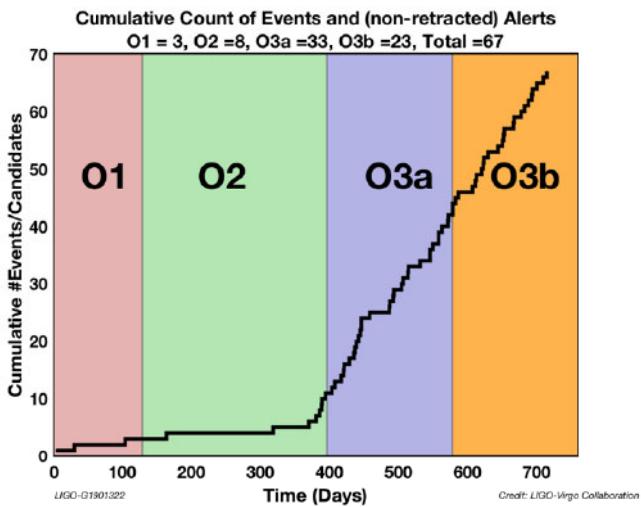
重力波望遠鏡 Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO)は、2015 年の重力波初観測以来、感度を向上させながら数 10 以上の重力波イベントを観測してきた。しかし、さらなる物理学・天文学的な知見を得るために現在の感度では不足しており、特にレーザー光の量子雑音を低減させる必要がある。そこで本研究では、フィルター共振器と呼ばれる、レーザー光の量子雑音を全周波数帯で低減可能な光共振器を実験的に実証した[L. McCuller, C. Whittle, D. Ganapathy, K. Komori, et al, PRL 124, 171101 (2020)]。実証されたフィルター共振器を LIGO に導入することで、重力波イベントの観測頻度が現在の 3 倍程度となり、数日に 1 回の観測が期待される。また、光損失が大きい場合に適するフィルター共振器の構成の実験的な実証 [K. Komori, et al, PRD 掲載決定済] や、様々な技術的限界を考慮した上でのフィルター共振器の最適なパラメータの探査 [C. Whittle, K. Komori, et al, PRD 掲載決定済] など、汎用的な研究も発展させた。

【目的の遂行状況および成果】

2015 年の初観測以来、LIGO による重力波観測はさらなる加速を見せている。図に示すように、初回および 2 回目の観測運転(O1,O2)では、観測頻度はおよそ月に 1 回程度であったが、2019 年より始まった 3 回目の観測運転(O3)では週 1 回以上の観測が実現している。これにより、これまで以上の精度で一般相対性理論を検証、あるいは連星ブ

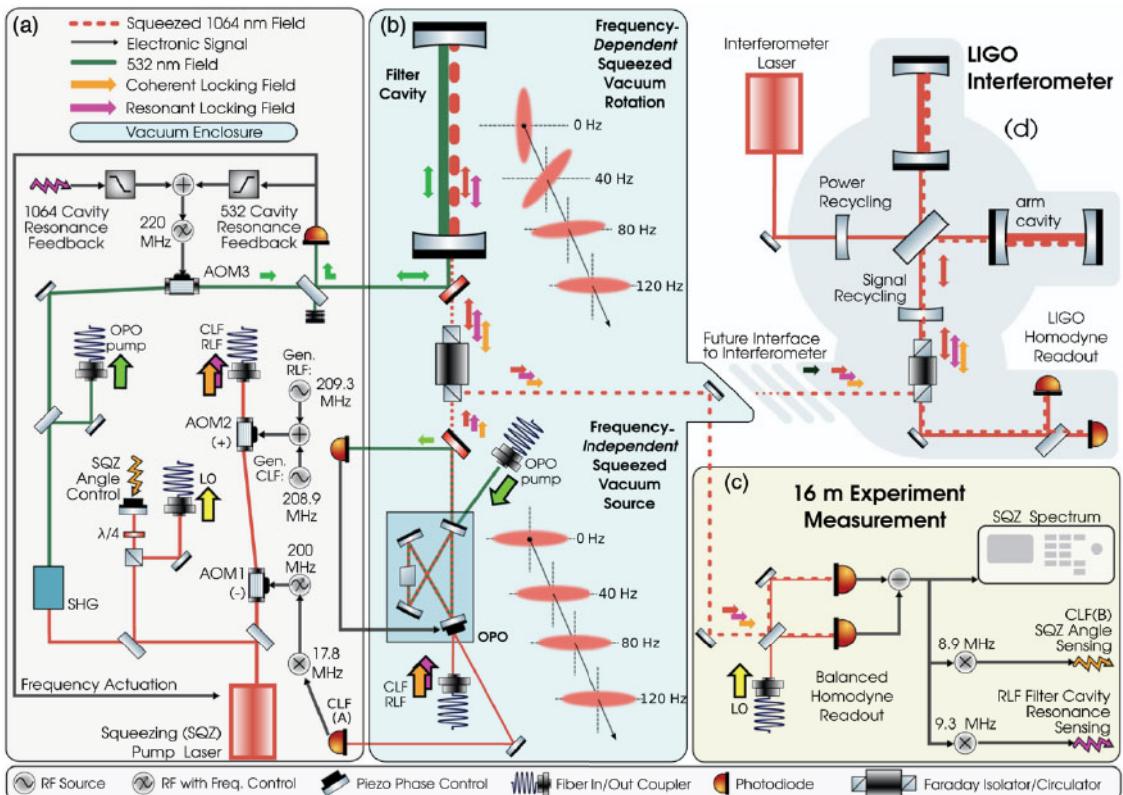
ブラックホールの質量分布や合体頻度の見積もりが可能となり、物理学・天文学に大きなインパクトを与えてきた。しかしながら、観測されたイベントは近傍の連星ブラックホール合体のみであり、宇宙論的なスケールでの合体頻度の見積もるためにより遠方のイベントを観測する必要がある。また、ブラックホールのスピンを測定するためには、近傍のイベントをさらに高い信号雑音比で観測しなければならない。

加えて、連星中性子星合体の観測はこれまで合計でわずか 2 例であり、中性子星の分布や状態方程式への制限、ハップル定数の高精度測定といったフロンティアを開拓するには、望遠鏡の感度をさらに高めることが求められる。



望遠鏡の感度向上の際に問題となる雑音に、レーザー光の量子雑音がある。重力波望遠鏡では重力波によって生じるレーザー光の位相変化をマイケルソン干渉計で測定するが、レーザー光自身の位相の量子揺らぎが雑音となる。この位相雑音は、散射雑音と呼ばれる。またレーザー光の振幅の量子揺らぎは、干渉計の端にある懸架鏡を光の輻射圧を介して量子的に揺らす。この振幅雑音は輻射圧雑音と呼ばれる。これら 2 つの量子雑音は重力波望遠鏡における最も原理的な雑音として知られており、干渉計の出力ポートから入射する真空場の揺らぎによって引き起こされると解釈することができる。量子雑音を低減する手法としては、この出力ポートから位相または振幅方向にスクイーズされた真空場を入射する方法が用いられる。それぞれの自由度がスクイーズされた真空場を入射することで対応する量子雑音は低減可能であり、実際にこれまでの観測運転などでも用いられてきた。しかしながらスクイーズド真空場には、不確定性関係により、一方の真空場揺らぎを低減すると他方が悪化してしまうというトレードオフが存在する。現在の望遠鏡の感度は、このトレードオフによる輻射圧雑音の悪化によって感度が制限されている。

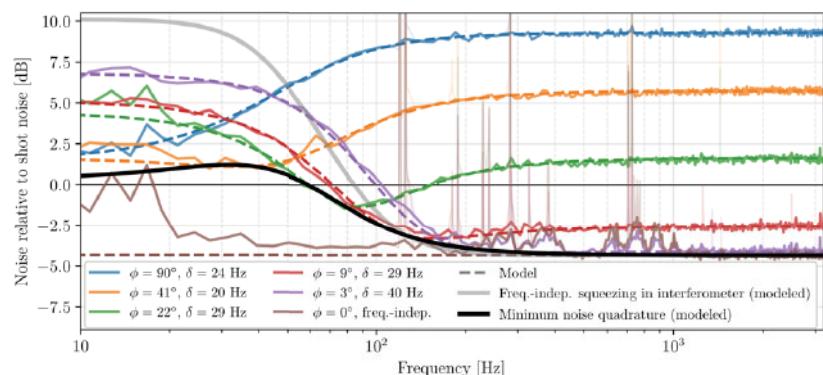
トレードオフを解消する手段として研究してきたのが、フィルター共振器と呼ばれる光共振器である。重力波望遠鏡において、輻射圧雑音は低周波、散射雑音は高周波で支配的であるため、低周波で振幅方向、高周波で位相方向にスクイーズされた周波数依存スクイーズド真空場を入射すれば、全周波数帯で同時に量子雑音が低減可能となる。フィルター共振器に関する実験的な先行研究では、kHz~MHz の周波数帯での周波数依存スクイーズド真空場生成に成功してきた。しかしながら、重力波望遠鏡で用いるためには 100 Hz 以下で周波数依存性を持たせる必要があり、そのための原理実証実験が不可欠であった。そこで、派遣先のマサチューセッツ工科大学の LIGO グループにて、16 m の長さの光共振器を用いた周波数依存スクイーズド真空場生成実験を行った。100 Hz 付近で周波数依存性を持たせるためには、3 ms 程度の長い時間、光を蓄積できるような



共振器を用意する必要があり、非常に高い反射率の鏡でフィネスの高い光共振器を構築・制御しなければならない。この点が本実験の独創的な点である。

本研究では、上図のような実験系を構築した。(a,b,c)の3つに分けられた領域のうち、(a)がレーザー光源である。波長1064 nmのNd:YAGレーザーに、音響光学素子(AOM)を用いて数種類の周波数の異なる光を生成する。これらは実験系の様々な制御に用いられる。また、第二次高調波生成(SHG)により波長532 nmの倍波を生成する。この倍波は、16 mのフィルター共振器の予備制御、およびスクイーズド真空場の生成に用いられる。

(b)の領域でスクイーズド真空場の生成と、フィルター共振器によって周波数依存性の付与を行う。この領域は大気による外乱を防ぐため 10^{-4} Pa以下の真空に保たれている。OPOと呼ばれる光共振器に532 nmの光を入射することで、スクイーズド真空場を生成する。OPOから出射される真空場には周波数依存性がないが、これをフィルター共振器に入射すると、反射されたスクイーズド真空場には周波数依存性が付与される。



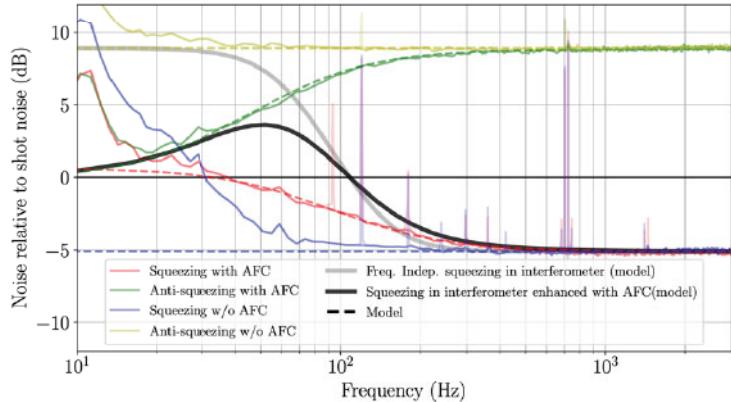
最後に(c)の領域で、生成された周波数依存スクイーズド真空場の測定を行う。ビームスプリッターで参照光と干渉させることで、真空場がどの程度スクイーズされているか、どのような周波数依存性を持っているかを測定することが可能である。その結果が上図である。横軸が周波数、縦軸が通常の真空場(0 dB)と比較

してどの程度スクイーズされているかを示している。各実線はビームスプリッターで参照光と干渉させる位相を変化させたときの結果であり、例えば紫線では真空場揺らぎが高周波で減少・低周波で増大していることがわかる。逆に青線では高周波で増大・低周波で減少している。これらの結果から、高周波では位相方向にスクイーズ、低周波で振幅方向にスクイーズされた真空場が生成されたことが分かる。

以上の結果から、本実験において、重力波望遠鏡 LIGO で量子雑音を全周波数帯にわたって低減することが可能な、100 Hz 以下で周波数依存性をもつスクイーズド真空場生成の原理実証に成功したと言える。このフィルター共振器を用いた手法は、現在の望遠鏡だけでなく将来のより高感度の望遠鏡でも導入される予定である。今後は LIGO の 4 回目の観測運転(O4)に向けて 300 m のフィルター共振器が導入される。これにより、現在 130 Mpc 先の連星中性子星合体からの重力波が検出可能である望遠鏡の性能は 190 Mpc まで向上し、数日に 1 イベントの観測が見込まれる。

また、共振器内の光損失が大きい場合に適切なフィルター共振器の構成の実験的な実証も行った。通常、低損失なフィルター共振器では、光の共振周波数を離調させることで、入射したスクイーズド真空場の位相を回転させ、周波数依存性を付与する。しかし実際には、特に共振器長が十分長くない場合に低損失なフィルター共振器を実現することは難しい。損失が大きい場合は、低周波の輻射圧雑音を増大させるスクイーズド真空場を、光共振器を透過させてことで除去するという構成が効果的である。本研究ではこの構成を実験的に実証した(右図)。緑線や赤線のように、高周波ではスクイージングが維持され、低周波ではスクイーズド真空場が反射されず 0 dB に近づいている。

その他にも、制御が容易である、散乱光や共振器長変動の影響を受けにくいといった、実践的な長所を持つことを明らかにした。



さらに、より一般的なフィルター共振器における最適なパラメータ探査も行った。これまで、共振器の光損失、および重力波望遠鏡で用いるレーザーパワーに対応する特定の入射鏡の透過率を仮定した、フィルター共振器の性能のみ計算されていた。しかし実際には、光損失は共振器を構築して初めて明らかになるパラメータであり、用いるレーザーパワーも他の要因によって大きく変動しうる。この問題点に着目し、本研究では様々な光損失や望遠鏡のレーザーパワー、入射鏡透過率を考慮した上で、望遠鏡の性能を最大にする共振器のパラメータを議論した。

以上が、MIT でのフィルター共振器に関する主な成果である。これに加え、独立した

研究として mg 程度の質量スケールの機械光学結合系に関するレビュー論文の執筆も行った。機械光学結合系とは、機械振動子と光共振器の相互作用を記述する分野であり、近年大きな盛り上がりを見せている。レーザー光の輻射圧を介して振動モードの制御が可能となるため、例えば巨視的な振動子さえも基底状態まで冷却し、量子力学的な重ね合わせ状態を生成することができると期待されている。しかし巨視的振動子とレーザー光を十分に結合させることは実験的に難しく、特に mg スケールの研究はあまり進んでいない。この mg スケールの機械光学結合系の先行研究のまとめ、および今後の研究の方向性などを議論するレビュー論文を執筆した。