

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21244037

研究課題名（和文）変位雑音相殺技術を用いた標準量子限界を超える量子非破壊干渉計の開発

研究課題名（英文）Development of Quantum-Non-Demolition laser interferometer using displacement noise cancelling technique.

研究代表者

佐藤 修一（SATO SHUICHI）

法政大学・理工学部・教授

研究者番号：30425409

研究成果の概要（和文）：変位雑音フリー干渉計（DFI）技術を用いて、標準量子限界（SQL）を超えるための超高感度変位計の開発を行った。プロトタイプ実験によって原理検証および実証試験を行った DFI の技術を更に拡張し、SQL を観測・越えるために必要とされる基礎的技術開発を進めた。装置の真空化、光源の高輝度化など、設備のアップグレードを経て変位センサーとしての干渉計の高感度化を行った。マッハツェンダー干渉計部の光学素子を固着したモノリシック干渉計を採用したところ、数 Hz 以上の周波数帯域で光の散射雑音（量子雑音）に制限される干渉計感度を実現し、SQL の観測を想定する感度レベルまであと 1 桁と迫るところまで到達した。

研究成果の概要（英文）：High-sensitivity displacement sensor had been developed to beat Standard Quantum Limit (SQL) using a technique of Displacement-noise Free Interferometer (DFI). Extracting the idea and results of prototype DFI, a package of basic techniques needed to observe and then overcome the SQL was demonstrated. After a series of upgrades of instruments including vacuum enclosure and intensive light source, we have tried to improve the sensitivity of the instrument as a displacement sensor. Employing the monolithic interferometer that fix the optics rigidly on the single base plate for a Mach-Zhender interferometer, the sensitivity of the interferometer was limited by the shot noise (quantum noise) down to several Hz, which corresponds to the level less sensitive by only factor of 10 to reach to the SQL.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	20,500,000	6,150,000	26,650,000
2010年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2012年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：相対論・重力（実験）、重力波、レーザー干渉計

1. 研究開始当初の背景

重力波の初めての直接検出を目指して世界がしのぎを削っている。世界各地で大型のレーザー干渉計型検出器の建設が行われ、米国 LIGO 計画などはすでに計画目標に近い感度での観測運用を実現している。日本の KAGRA 計画も 2010 年度よりようやく建設がスタートした。これらの計画はシステムのアップグレードを経て、2010 年代後半には現在よりも 1 桁高い感度を実現し、1 年に複数イベントの観測が現実的になるものと予想される。特に米 LIGO 計画はすでにアップグレードの予算が認められ、現在の設計での観測運用を停止してアップグレード作業に着手している。この種のアップグレードによって、世界の大型干渉計は、後述する標準量子限界に迫るような超高感度な領域に達する。

一方、米国と欧州では衛星を利用したスペース干渉計型重力波アンテナ計画が検討されており、2010 年中頃の前哨衛星打ち上げを目指して技術開発が行われている。この計画は地上の検出器よりも遥かに低周波の 1-30mHz の重力波検出を目指すことにより、ユニークなサイエンスを狙っている。

これに対し日本のグループは、地上の検出器群と LISA 計画の観測帯域の中間の未開拓領域を狙って、DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational-wave Observatory) 計画を提案した。DECIGO 計画は欧米の計画の 1/1000 のスケールのスペース干渉計で、0.1-10Hz を観測帯域としており、地上検出器群と LISA 計画が観測できない周波数領域を広くカバーする検出器である。

これらの重力波検出計画は、地上型・スペース型を問わず、光の干渉を用いた自由質点間の微小な相対距離変動の計測を重力波検出の原理としている。したがって、検出器の感度は究極的には光の量子雑音（散乱雑音および輻射圧雑音）によってのみ制限される。事実、地上の干渉計群が今後数年間のアップグレードを経て、ありとあらゆる雑音を排除していった結果、2010 年代に実現するであろう次世代干渉計は散乱雑音と輻射圧雑音との最小不確定性関係に似た関係で導かれる「標準量子限界」に迫る感度を持つと想定される。

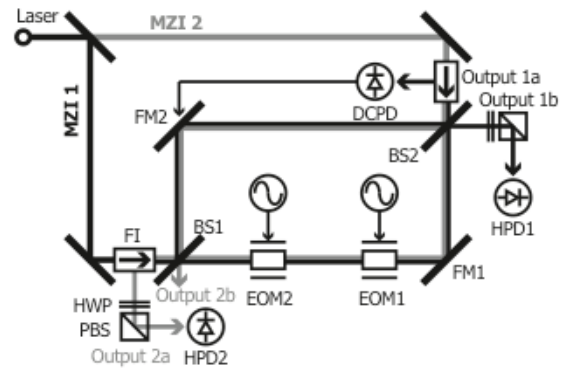
標準量子限界とは散乱雑音と輻射圧雑音で決まる干渉計感度スペクトルの最小値の包絡線であり、干渉計の光源であるレーザーのパワーを上げて散乱雑音レベルを下げる、という論理が通用しない。つまり、自由質点を巨大にすることでしか解決できない感度の壁があるのである。

2. 研究の目的

従来と全く異なるアプローチである変位雑音相殺技術をさらに展開することによって、レーザー干渉計による位置測定 of 量子力学的限界である標準量子限界を越える方法を提案し、実験によって超標準量子限界となるレーザー干渉計を実現することを目的とする。早晚、レーザー干渉を用いた重力波アンテナはこの標準量子限界で制限される感度に迫ると予想されることから、この量子雑音限界を破ることは干渉計の低周波での感度限界を取り除くことでもある。その結果、標準量子限界という感度の壁を実験を以って破ることのインパクトはもろんであるが、天体からの重力波観測に重要な低周波領域の感度の向上に直結することはきわめて重要である。探査対象となる重力波源が増加することで、豊穡なサイエンスを期待できることは、天文学としての重力波研究にとって大変意義が深い。

3. 研究の方法

本研究のアイデアの核心は変位雑音に感度のない DFI を使うことで変位雑音の一種である輻射圧雑音をも相殺するというところにある。したがって、基本となる干渉計光学設計は最もシンプルな DFI である双方向マツェンダー干渉計を採用する。



この干渉計では 2 つの干渉計出力を演算することにより、FM1 および FM2 の変位雑音が光に付加する位相情報は理想的に相殺できる。一方で BS1 と BS2 の位相情報は、マツェンダー干渉計 1 と 2 とで時間差で受け取るため原理的には相殺しない。ところが、相殺の程度は干渉計に於ける光学素子の非対称性のスケール (BS が FM からどれだけずれているか) と、観測周波数で決まる。例えば干渉計のスケールが 10cm の場合、1Hz の変位情報に対しては $1\omega/c \approx 10^{-9}$ 程度の相殺効果を期待できるということになる。本実験でもまさに

この効果を利用し、干渉計を小さくコンパクトに作ることで BS の変位情報が寄与しない設計を採用する。また、本実験は(変位雑音に感度のない)高感度の「光位相センサー」を開発することが目的なので、干渉計の腕は長い必要はない。特に心臓部となる MZI 部分のサイズは 10cm 程度である。また、輻射圧雑音レベルを上げるためには干渉計内光強度が重要であるが、高出力レーザーで補うことにより共振器などの光学系は使わず、できるだけ簡素にコンパクトに開発を進めた。

4. 研究成果

(1) 実験装置の真空化

プロトタイプを用いた実証試験の結果を総合すると、変位雑音の相殺効果は定常的に 60dB 程度が上限になっていることが確認された。信号処理系の非対称性で定まる相殺効果の上限は 140dB 程度あることがわかっているので、これは干渉計そのものに起因する非対称性が相殺効果の上限を制限していることが考えられる。これら非対称性の原因のひとつとして、直接に地面振動を介する擾乱ではなく、音響擾乱・空気揺らぎの影響であることがこれまでのレーザー干渉計開発の経験と併せて強く示唆されたことから実験系の真空化を進めた。これは DFI 光学系を真空容器に格納し、大気を媒介にする擾乱を抑えることで劇的に改善すると期待される。実際に低周波領域においておよそ 1 桁の雑音レベルの低減の効果が確認された。

(2) 高輝度光源干渉計の構築

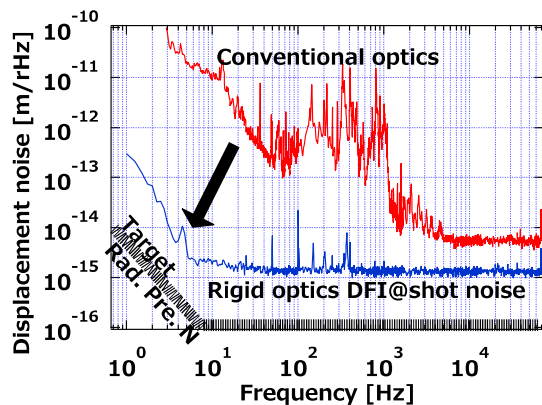
SQL に効率的にアクセスするためには、自由質点の質量で決まる SQL レベルの設定と共に干渉計内の光強度で決まる SQL ポイントの設定が重要である。共振器を用いる等の干渉計設計からのアプローチと、高輝度の光源を用いるアプローチが効果的であるが、測定系の構成をできるだけシンプル・コンパクトにする方針と併せて、ここでは後者を採用することとし、高輝度光源の整備を行った。

(3) モノリシック干渉計

プロトタイプを用いた実証試験の結果を総合すると、干渉計を構成する光学素子の純粋な並進運動による変位雑音の他に、広い意味での干渉計の非対称性が干渉計の感度を制限していることが示されてきた。これら雑音の源あるいは伝播経路をひとつずつ排除することで余剰雑音を低減し、感度の向上をはかった。干渉計の真空化に引き続き、干渉計部の光学素子を固定化したモノリシック光学系を採用することで大幅な雑音の低減、感度向上を実現した。DFI 機構による変位雑

音の相殺、および干渉計部の真空化などによる対処では改善しなかった。主に 1kHz 以下の低周波領域での余剰雑音が一挙に低減した。これは一義的には変位雑音自身が抑圧された効果が顕著に見えていることに相当する。一方で、それ以外にも干渉計のある種の非対称性が抑えられる効果があり、これによって双方向の干渉計に関する感度の差が大幅に小さくなっている。これによって潜在的には DFI 機構の効率の改善が期待される。

モノリシック干渉計を用いた DFI では、シングル MZI で 1kHz 以下に残っていた余剰雑音の多くが DFI 機構によって相殺されている。結果として、数 10Hz 以上の周波数帯域ではほぼ散乱雑音レベルの感度を実現した。しかしながら数 10Hz 以下には依然相殺しきれないフロア状の余剰雑音が残存している。この周波数領域における散乱雑音レベルでの計測では、突発的な地面振動励起によるスペクトルの悪化が無視できない。もう少し広い領域に渡る広い意味での防振が必要ということである。



これらの結果を受けて、本年度はレーザー光源からモノリシック干渉計までの入射光学系を光ファイバーで結び、自由空間での光の伝播部分をなくすと共に、通常の光学マウントの代わりに固着光学系を用いることで全ての光学系をモノリシック構造とした全モノリシック干渉計を設計・製作した。現在は、この可能な部分は全てモノリシック化した干渉計を用いた DFI の感度測定と雑音評価を行っている。

(4) 今後へ向けて

変位雑音相殺干渉計を用いたこれまでの研究によると、標準量子限界を超える感度レベルに到達するためには、「ハイパワーのレーザーを用いる」こと、「徹底された防振系を用いる」こと、および「軽量の鏡(試験質量)を用いる」ことの 3 技術要素を高いレベルで実現することがポイントである。本研究に引き続く研究では後者 2 点について整備を行うことによって外部擾乱を抑え、SQL

の感度領域にアクセスすることが重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

[1] Shuichi Sato, Seiji Kawamura, Atsushi Nishizawa and Yanbei Chen, Noise cancellation properties of displacement noise free interferometer, Journal of physics conference series, 228, 012026, (2010), 査読有

[2] Keiko Kokeyama, Shuichi Sato, Atsushi Nishizawa, Seiji Kawamura, Yanbei Chen and Akio Sugamoto, “Development of a Displacement and Frequency Noise Free Interferometer in a 3D Configuration for Gravitational Wave Detection”, Phys. Rev. Lett., 103, 171101, (2009), 査読有

[学会発表] (計9件)

[1] スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (42): DPF ドラッグフリー, 佐藤修一, DECIGO ワーキンググループ, 日本物理学会 第 68 回年次大会, (広島大学 (広島県), 2013 年 3 月 26 日~29 日)

[2] DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (5), 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 榎藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, 日本物理学会秋季大会, (京都産業大学 (京都府), 2012 年 9 月 11 日~14 日)

[3] DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (4), 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 榎藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, 日本物理学会 第 67 回年次大会, (関西学院大学 (兵庫県), 2012 年 3 月 24 日~27 日)

[4] DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (3), 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 陳たん, 榎藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, 日本物理学会

秋季大会, (弘前大学 (青森県), 2011 年 9 月 16 日~19 日)

[5] DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (2), 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 榎藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, 日本物理学会 第 66 回年次大会, (新潟大学 (新潟県), 2011 年春※中止)

[6] DECIGO pathfinder のための干渉計モジュールの開発 (1), 佐藤修一, 阿久津智忠, 上田暁俊, 新谷昌人, 麻生洋一, 鳥居泰男, 田中伸幸, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 榎藤里奈, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 穀山渉, 安東正樹, 川村静児, 日本物理学会秋季大会, (九州工業大学 (福岡県), 2010 年 9 月 11 日~14 日)

[7] DECIGO pathfinder のための試験マスマジュールの開発 (4), 佐藤修一, 鳥居泰男, 若林野花, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 上田暁俊, 川村静児, 新谷昌人, 安東正樹, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 麻生洋一, 穀山渉, 日本物理学会 第 65 回年次大会, (岡山大学 (岡山県), 2010 年 3 月 20 日~23 日)

[8] DECIGO pathfinder のための試験マスマジュールの開発 (3), 佐藤修一, 鳥居泰男, 若林野花, 江尻悠美子, 鈴木理恵子, 上田暁俊, 川村静児, 新谷昌人, 安東正樹, 大淵喜之, 岡田則夫, 正田亜八香, 道村唯太, 坪野公夫, 麻生洋一, 穀山渉, 日本物理学会秋季大会, (甲南大学 (兵庫県), 2009 年 9 月 10 日~13 日)

[9] Shuichi Sato, “Noise cancellation properties of displacement noise free interferometer”, Edoard Amaldi 会議, Columbia 大学 (米国), (2009 年 6 月 22 日~26 日)

[その他]
学位論文

[1] 角谷昌典「変位雑音フリー干渉計 (DFI) の開発」修士論文, 法政大学 (2012 年)

[2] 田嶋茂樹「変位雑音フリー干渉計 (DFI) の開発」修士論文, 法政大学 (2011 年)

[3] 角谷昌典「変位雑音フリー干渉計 (DFI) の開発」法政大学 (2010 年)

[4] 田嶋茂樹「変位雑音フリー干渉計 (DFI) の開発」法政大学 (2009 年)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 修一 (SATO SHUICHI)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号 : 30425409

(2) 研究分担者

高橋 竜太郎 (TAKAHASHI RYUTARO)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号 : 60270451

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :