

研 究 報 告 書

「重力波検出技術が拓く超巨視的量子性の物理」

研究期間：平成 19 年 10 月～平成 23 年 3 月

研究者：三代木伸二

1. 研究のねらい

原子のサイズの世界と、それが莫大な数集合して形成されている日常我々がよく接する物体(超巨視的物体)では、その運動の見え方が大きく異なっている。その運動は、原子の世界では「量子力学」、日常生活では「ニュートン力学」で表現できる。ただし、極低温状態では、大きいスケールでも、量子渦など量子力学的世界の観測例はいくつかある。量子力学の世界では、ニュートン力学にはない様々な奇妙な現象が現れ、その応用は、現代科学技術の発展そのものである。本研究では、超巨視的物体でありながら、その動きを 10^{-18} [m/rHz] という極限的精度でその運動を観測し、かつ制御する事で、その超巨視的物体が「量子力学的振る舞い」をするのかどうか検証する事を究極の目標としている。もし、観測できれば、逆に、超巨視的物体を、日常生活の常識ではありえない、量子力学的にふるまわせる全く新しい手法が開発されるかもしれない。その超巨視的物体がどの程度、量子力学の世界に近づいたかを示すのが、「量子数」で定義される値であり、この値が 1 に近いほどよい。何もしない超巨視的物体の「量子数」は、はるか 1 億以上であり、量子力学の世界はかきけされて見えない。本実験では、まずは、「実験装置は常温のまま」でこの「量子数」を下げることを目指している。

2. 研究成果

本研究では、巨視的物体として、超精密長さ計測でよく利用されるレーザー干渉計で使用される、グラム～キログラムスケールの「鏡」を観測対象に設定している。そのために、周波数 100Hz 付近において、 10^{-18} ～ 10^{-19} [m/rHz] という 極限的に小さな鏡の変位を検出しなければならないが、これを実現するために、レーザー干渉計を重力波望遠鏡として運用するために開発されてきた技術群を応用する。その経験によれば、この極限的に小さな感度を達成するために、残留ガス雑音、レーザー周波数雑音、レーザー強度雑音、レーザービームジッター雑音、地面振動雑音、制御にかかわる電気雑音、そして、鏡やそれを懸架する振り子の熱雑音など、様々な雑音源を除去し、光の量子性に起因する原理的な雑音である光のショット雑音と輻射圧雑音のみで決定される極限感度、つまり標準量子限界感度を目指さねばならない。その雑音の中でも、標準量子極限感度達成の最後の壁となるのが「熱雑音」である。しかし、このレーザー干渉計における「鏡」と「振り子」の熱雑音は、理論的考察はされているものの、鏡や振り子の機械的なロスが十分小さいレベルで直接的に観測し検証された例はあまりない。よって、まず、レーザー干渉計において発生する熱雑音を直接観測し検証し、その特性を熟知することは、本実験を進めるうえで非常に重要なステップである。

(1)レーザー干渉計における鏡と振り子の熱雑音の直接計測と揺動散逸理論の検証

そこで、低温レーザー干渉計 CLIO (マイケルソン腕部分に Fabry Perot 共振器を内包するレーザー干渉計スタイルを採用) を利用し、常温における鏡と振り子の熱雑音の直接検出をめざし、レーザー干渉計の高感度化実験を行った結果、ついに 2008 年 12 月に、世界で初めて、レーザー干渉計において、機械的なロスの少ない系での鏡と振り子の熱雑音の直接観測に成功した(図 1: Structure Damping 起因の熱雑音と鏡の Thermoelastic Noise が顕在化された CLIO の変位感度度)。図の青実線のなかで、20Hz～80Hz の間が、機械的ロスが 10^{-5} レベルの振り子の Structure Damping による熱雑音(水色破線)、80Hz～250Hz の間が、サファイア鏡の Thermoelastic Noise (緑点線)であり、これらは、理論的な予測レベルとほぼ一致する。この成果は、“Underground Cryogenic Laser Interferometer CLIO”, S.Miyoki and LCGT, CLIO

Collaboration, Journal of Conference Series (TAUP2009) 203 012075 (2009)として報告された。この振り子の Structure Dampingによる熱雑音に到達する過程において、同時にViscous Dampingによる振り子の熱雑音の直接計測にも成功した。これは、揺動散逸理論から予測される“機械系調和振動子”の共振周波数より上の幅広い周波数領域におけるViscous Dampingによる熱雑音の振る舞いを実験的に検証し、その特性が理論と一致する事を世界で初めて確認し(図 2: Viscous Damping起因の振り子の熱雑音の検証)、

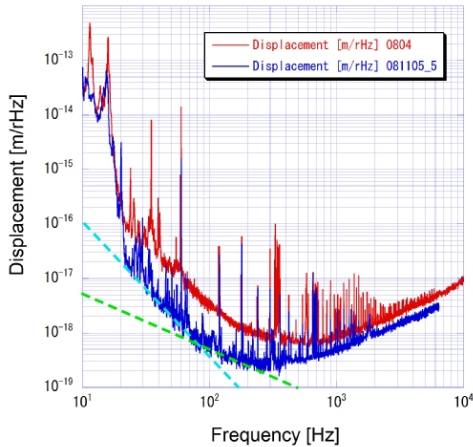


図 1: Structure Damping 起因の熱雑音と鏡の Thermoelastic Noise が顕在化された CLIO の変位感度

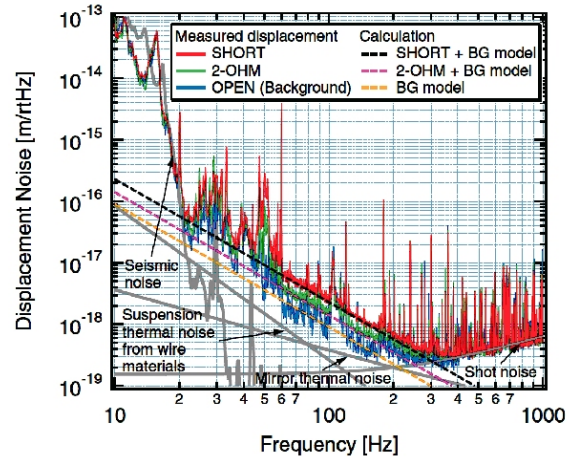


図 2: Viscous Damping 起因の振り子の熱雑音の検証

“Direct Measurement of Thermal Fluctuation of High-Q Pendulum”, Kazuhiro Agatsuma, Takashi Uchiyama, Kazuhiro Yamamoto, Masatake Ohashi, Seiji Kawamura, Shinji Miyoki, Osamu Miyakawa, Souichi Telada, and Kazuaki Kuroda, Phys. Rev. Lett. **104** 040602 (2010) として発表された。以上の成果は、“Thermal-noise-limited underground interferometer CLIO”, K.Agatsuma, K.Arai, M-K.Fujimoto, S.Kawamura, K.Kuroda, O.Miyakawa, S.Miyoki, M.Ohashi, T.Suzuki, R.Takahashi, D.Tatsumi, S.Telada, T.Uchiyama, K.Yamamoto and CLIO collaborators, Class. Quantum Grav. **27** 084022 (2010) としてまとめて発表され、この論文は、学術雑誌・Classical and Quantum Gravity のエディターにより、2009～2010 のハイライト論文に選出された。この成果は、“機械系調和振動子”の共振周波数より上の幅広い周波数領域における熱雑音」を克服することが必須な本実験において画期的な進歩であると同時に、物性物理学の見地から「熱雑音の研究」そのものに大きく貢献している点で有意義である。さらに、近年では、「光周波数標準」という究極的な時刻基準を作る工学的、実用的見地からも、その「熱雑音の克服」は重要課題であり、これらテーマ達成のための重要な指針を提示している。その最たるものは、まさに、この熱雑音がその性能限界を決めていることが判明している「光子時計」であろう。

(2) レーザー干渉計における鏡と振り子の低温化による変位感度向上の実現

さて、本実験の最終目標達成のためには、このように特性が判明した熱雑音をさらに低減し、レーザーの量子性のみで感度が決定される標準量子限界感度を達成しなければならず、さらなる技術的飛躍が必要である。熱雑音を低減するには、鏡やその振り子を冷却する方法と、鏡基材の機械的ロス、その鏡に蒸着されている誘電多層膜の機械的ロス、そして振り子の機械的なロスのすべてをより低減する方法の二つが存在する。後者は、ほとんど選択肢がない中で、より機械的ロスの少ない素材選びや鏡の懸架方法の発案という多くの試行錯誤が必要で、かつ、得られた各要素のわずかな改良の合わせ技で、やっと熱雑音がファクタ一程度改善されることが理論的に予想されている。一方、前者冷却法は、鏡の反射性能を維

持するために、鏡を振り子状に懸架しているループ状に巻いた2本のワイヤーの熱伝導のみでしか鏡の熱を奪うことがなく、かつそこから新たな振動を導入してはならないという、相反する要求を満たさなくてはならない厳しい技術的制限があるが、成功すれば、オーダーレベルの熱雑音の改善が見込まれる。どちらもいばらの道であることには変わりないが、本研究では、成功した時の熱雑音低減効果の大きさを鑑み、前者冷却法を選択した。鏡の冷却装置としては、すでに、超低振動型パルスチューブタイプ冷凍機によって、純アルミ金属素材の熱伝導だけで真空タンク内部を10ケルビン程度まで冷却するクライオスタットという装置が開発されていたので、それを利用した。鏡への地面振動の影響を低減するために、六段という多段の振り子を設計し、鏡を最終端に懸架した。その鏡を20ケルビン程度まで冷却するために、振り子下三段分(鏡が下三段の一番下に位置し、その上の段をアッパーマス、さらにその上の段をクライオベースと呼ぶ)は、その低温化されたクライオスタット内の空間に位置するようにしている。そのクライオベースと10ケルビンまで冷却されたクライオスタットの内壁の間に1本、クライオベースとアッパーマスの上に1本の直径1mmでU字に整形した99.999%の純度を持つアルミ線を接続し、それで熱接触と熱伝導を持たせ、最終端の鏡は、ニループの純アルミ線で懸架させることで、振り子としての機能と、熱伝導体としての機能を持たせる設計を行った。現状では、Fabry Perot 型レーザー干渉計を構成する4枚の鏡のうち、ビームスプリッターに近い側の2枚の鏡しか冷却できていないが、結果、まず、確かに、振り子の熱雑音が、振り子の温度の低減に合わせて振り子の熱雑音も低減されることを世界で初めて検証した(図3:振り子の熱雑音の低下の様子)。さらに、170Hz付近においては、鏡基材のThermoelastic Noiseの低減も確認し、わずかではあるが、常温熱雑音レベルをさらに低減することに成功した(図4:鏡の低温化によるThermoelastic Noiseの低減)。これらの成果は、鏡や振り子の低温化により熱雑音の克服が可能であることを実証した点で画期的である。現状、まだ、巨視的量子性が観測できる目標の標準量子限界感度には到達していないが、設計目標感度の3倍上の変位感度レベルまで肉薄している。

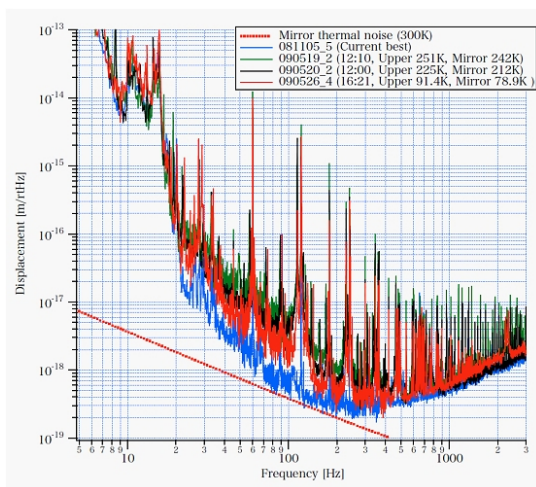


図3: 振り子の熱雑音の低下の様子。緑線、黒線、赤線は、振り子がそれぞれ251K、212K、79Kに相当する。

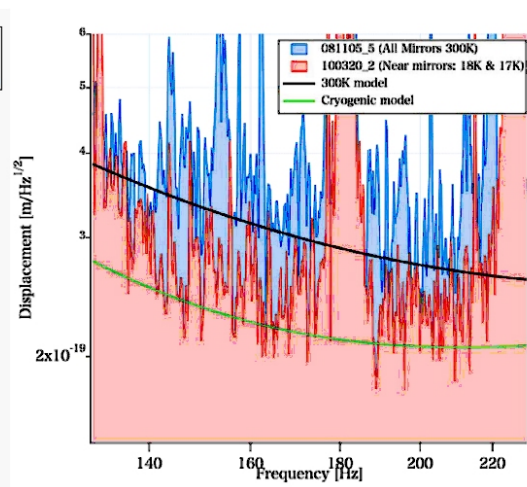


図4: 鏡の低温化によるThermoelastic Noiseの低減。青が常温感度。赤が低温感度。

(3) 光滞在時間が長いFP共振器の共振制御導入困難問題への解決法の開発

本研究の副産物として、重力波望遠鏡で使用されるFabry-Perot型レーザー干渉計のように、Fabry-Perot共振器を構成する鏡が100nm/秒ほどの速度を持ち、かつそのFabry-Perot共振器の光の滞在時間が10ミリ秒もあるような状態で特異的に問題になる、Fabry-Perot共振器の共振制御導入の困難化問題を解決するのに補助となる全く新規なアイデアを考案し、それは、“Expansion of linear range of the Pound-Drever-Hall signal”, S.Miyoki, S.Telada and T.Uchiyama, Applied Optics, **49**, pp 5217-25 (2010)として発表された。従来のFabry-Perot共

振器制御で利用される Pound-Drever-Hall 法によって取得される線形信号の線形領域は、共振線幅程度に限られ、また、鏡が動くことによる光の周波数のドップラーシフトによって、この線形性が大幅に大きな乱れ、かつ、オフセットがのることにより、Fabry-Perot 共振器の共振制御に全く使えない。本提案では、従来の Pound-Drever-Hall 法では、いわゆる In-Phase で復調することで信号を取得していたのを、Q-Phase 付近に調節することや、あるいは、変調周波数の奇数倍 In-Phase 復調信号同士の適切な加算により、線形領域を約 10 倍に、理論的には、変調周波数幅を超えて拡大できるとともに、ドップラーシフトによる線形性の乱れもより小さくし、かつ、オフセットがのりにくい制御信号を取得することが可能であることを示し、問題のほとんどを解決できることも示した。これにより、従来はその制御さえ不可能であると思われた極めて長い光の滞在時間を持つ、一定の初期速度を持つ鏡で構成される Fabry-Perot 共振器の共振制御実現の可能性を広げることができると思われる。

3. 今後の展開

今後は、標準量子限界レベルを意図的に大きくしながらも、熱雑音を悪化させない程度に機械的なノイズを維持させることのできる鏡の最適な重さ 200 グラムを設定し、レーザー干渉計を構成する鏡を交換することと、本研究で開発された鏡の冷却技術による熱雑音そのものの低減を行うことで、標準量子限界感度の達成を目指す。

本研究の科学技術に与えるインパクトとしては、極限時空計測研究分野のうち、新しい研究分野「超巨視的量子性顕在化実験」の発展、新しい研究分野「巨視的物体の標準量子限界精度での精密位置計測実験」開拓、新しい研究分野「(未踏の)極限的光周波数安定化実験」の開拓が期待できるまた、応用分野を含めた科学技術に与えるインパクトとしては、巨視的量子性の性質そのものの解明(または、デコヒーレンス過程の実時間計測とその性質の解明)、重力波検出を通じた、強重力場の物理、余剰次元の可能性、宇宙誕生初期の様子、宇宙の時空構造に関する新規な知識の提供、光格子時計の理論的極限性能達成に関する熱雑音克服手法の開拓、標準量子限界計測精度をさらに打破する精密計測手法の開拓、などが期待される。さらに、産業応用に対しては、量子情報通信用の強力な量子相関ビームの生成技術開発、超精密長さ計測技術の提供、超精密時刻基準の提供、超精密長さ計測技術を用いた地球地殻ひずみの精密測定による、地震予知・防災への応用や、地殻内水圧変動計測による環境変動予想精度の向上などが期待される。

4. 自己評価

レーザー干渉計における超巨視的物体としての鏡の巨視的量子性の直接観測には至っていないが、それに至るに必須の熱雑音に関する知識の検証、および、低温化技術による熱雑音低減の実証という極めて重要かつ世界に類のない技術的飛躍を達成でき、事実この成果は、学術誌 Classical and Quantum Gravity において、2009-2010 のハイライト論文に選出されるなど、客観的にも高く評価されており、目標達成へのステップを確実に歩んでいると考える。

5. 研究総括の見解

超巨視的物体の動きを極限的精度で観測することによる「量子力学的振る舞い」の検証に取り組み、熱雑音に関する知識の検証、および、低温化技術による熱雑音低減の実証という極めて重要かつ世界に類のない技術的飛躍を達成した。主な研究成果は下記3点であるが、近年では、光周波数標準などでも「熱雑音の克服」は重要課題であり、本研究成果は重要な指針を提示している。

(1) レーザー干渉計における鏡と振り子の熱雑音の直接計測と揺動散逸理論の検証

熱雑音の振る舞いを実験的に検証し、その特性が理論と一致する事を世界で初めて確認したもので、論文は学術雑誌・Classical and Quantum Gravity のハイライト論文に選出された。

(2) レーザー干渉計における鏡と振り子の低温化による変位感度向上の実現

振り子の温度の低減に合わせて振り子の熱雑音も低減されることを世界で初めて検証し、鏡や振り子の低温化により熱雑音の克服が可能であることの実証に成功した。

- (3) 光滞在時間が長い Fabry-Perot 共振器の共振制御導入困難問題への解決法の開発
全く新規なアイデアを考案し、従来はその制御さえ不可能であると思われた、一定の初期速度を持つ鏡で構成される Fabry-Perot 共振器の共振制御実現の可能性を開いた。

本研究成果の応用範囲は広く、今後、巨視的量子性の性質そのものの解明、宇宙の時空構造に関する新規な知識の提供、標準量子限界計測精度の精密計測手法の開拓、などに繋がることを期待する。

6. 主要な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Kazuhiro Agatsuma, Takashi Uchiyama, Kazuhiro Yamamoto, Masatake Ohashi, Seiji Kawamura, Shinji Miyoki, Osamu Miyakawa, Souichi Telada, and Kazuaki Kuroda, "Direct Measurement of Thermal Fluctuation of High-Q Pendulum", <i>Physical Review Letters</i> , 104 , 040602 (2010)
2. Kazuhiro Agatsuma, Koji Arai, Masa-Katsu Fujimoto, Seiji Kawamura, Kazuaki Kuroda, Osamu Miyakawa, Shinji Miyoki, Masatake Ohashi, Toshikazu Suzuki, Ryutarō Takahashi, Daisuke Tatsumi, Souichi Telada, Takashi Uchiyama, Kazuhiro Yamamoto and CLIO collaborators, "Thermal-noise-limited underground interferometer CLIO", <i>Classical and Quantum Gravity</i> , 27 , 084022 (2010)
3. S.Miyoki, S.Telada and T.Uchiyama, "Expansion of linear range of the Pound-Drever-Hall signal", <i>Applied Optics</i> , 49 , pp 5217-25 (2010)

(2) その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

S.Miyoki and LCGT, CLIO Collaboration, "Development of Cryogenic Laser Interferometer in the Kamioka mine", *Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (Isola d'Elaba, Italy)* May 2008.

S.Miyoki and LCGT, CLIO Collaboration, "Knowledge about ground motion around the Kamioka mine from geophysical instruments data", *Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (Isola d'Elaba, Italy)* May 2008.

三代木伸二と CLIO Collaboration, "低温レーザー干渉計 CLIO (18)", 日本物理学会 (立教大学, 東京) 3月 2009年.

(招待講演) S.Miyoki, M.Ohashi, T.Uchiyama and CLIO Collaboration, "Status of CLIO", 12th Marcel Grossmann Meeting (France : Paris) July 2009.

三代木伸二, "重力波検出技術による極限時空計測への挑戦", 大阪府立大学ナノ科学・材料研究センター・第9回 N2RC 拠点セミナー (大阪府立大学, 大阪) 9月 2009年.

三代木伸二と CLIO Collaboration, "低温レーザー干渉計 CLIO (21)", 日本物理学会 (甲南大学, 兵庫) 9月 2009年.

三代木伸二と CLIO Collaboration, "低温レーザー干渉計 CLIO (27)", 日本物理学会 (岡山大学, 岡山) 3月 2010年.

S.Miyoki, M.Ohashi and CLIO Collaboration, “CLIO Introduction and Overview”, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (Kyoto, Japan) May 2010.

(招待講演) S.Miyoki and CLIO Collaboration, “CLIO Experiment and Reconstruction for MQM”, CLIO-MQM Workshop (Tokyo, Japan) May 2010.

(招待講演) S.Miyoki and CLIO Collaboration, “CLIO Experiment Result”, 19th international conference general relativity and gravitation (Mexico city, Mexico) July 2010.

三代木伸二, 内山隆, 宮川治, 宗宮健太郎, Yanbei Chen, “重力波検出器プロトタイプ CLIO によるマクロな物体の量子計測研究”, 日本物理学会 (九州工業大学, 福岡) 9 月 2010 年.

三代木伸二 と LCGT Collaboration, “LCGT 計画: 重力波の直接検出を目指して”, 重力と水のワークショップ (東京大学宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設, 岐阜県) 9 月 2010 年.

(招待講演) S.Miyoki and LCGT, CLIO Collaboration, “Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope Project”, Gravitational Wave 2010 (Minneapolis, USA) October 2010.