

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K18729

研究課題名（和文）巨視的物体の量子理論に対するワイヤ振動を利用した検証実験

研究課題名（英文）Experimental test of the quantum theory of macroscopic objects using wire oscillations

研究代表者

安東 正樹（Ando, Masaki）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・准教授

研究者番号：90313197

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、巨視的な物体も記述できるような拡張量子力学理論の1つである、CSL (Continuous Spontaneous Localization) 模型に注目し、その検証を進めた。真空中におかれた懸架系で独立に懸架された2つの鏡で光共振器を構成し、2つのレーザー光を双方から入射する装置の研究開発をすすめた。結果としては、CSLモデルに対して制限を与えるには至らなかったが、地面振動や大気などの雑音源の影響、懸架系や光学系の設計や雑音低減技術など、今後の研究につながる知見を得た。また、最終的には熱雑音の影響が課題になることも積み重ねられており、低温下での測定の必要性も認識されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現代の物理学では、相対論と量子論を結びつけることが大きな課題となっており、量子重力理論や拡張量子論の研究が進められている。本研究は、巨視的な物体も記述できるような拡張量子力学理論の1つをを実際に実験的に検証するという野心的な研究であった。感度が足りず、物理的に意味のある検証結果は得られなかったが、今後の実証に向けた知見を蓄積するという意義があった。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focus on the CSL (Continuous Spontaneous Localisation) model, which is an extended theory of quantum mechanics that can describe macroscopic objects. We have developed an optical cavities consisting of two mirrors suspended independently in a suspension in vacuum, and two laser beams are injected from both sides. Although any physically meaningful upper limit has not set to the CSL model, we provide knowledge for future research on the effects of noise sources such as ground vibrations and the atmosphere, the design of the suspension system and optics, and noise reduction techniques. It has also been recognised that the effect of thermal noise will eventually become an issue, and the need for measurements at low temperatures has been identified.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：巨視的量子力学 CSL理論 レーザー干渉計 基礎物理実験

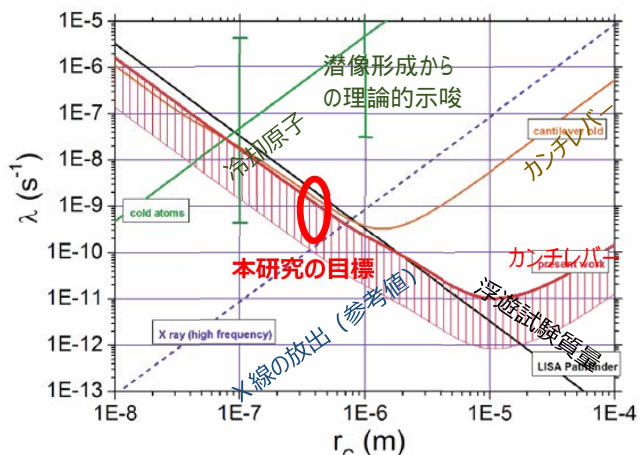
### 1. 研究開始当初の背景

量子力学は、原子・分子といった微視的な物理の記述に対し成功を収めてきている。一方、我々の目で見えるような巨視的な物体においても量子力学が適用可能であるかは必ずしも自明ではない。例えば、量子力学の「シュレディンガーの猫」として知られる思考実験では、毒ガス装置(放射線検出器と同期して放出される)とともに箱の中に閉じ込められた猫は、箱を開けて観測が行われるまで、生きている状態と死んでいる状態の重ね合わせ状態にあると解釈される。しかし、これは我々が巨視的物体に対して持っている経験(実験・観測事実)や直観とは相いれない。これまでに重ね合わせが実現された最も重い物体は  $10^4 \text{amu}$ (原子質量単位)程度であり[3]、それよりも重い巨視的な物体において量子力学的な振る舞いは観測されていない。このような実験事実に対しては、大きく2つの解釈がある。1つは、巨視的な物体においても量子力学は適用できるとする考え方に基づく。シュレディンガー方程式は質量によらず物体の重ね合わせ状態を予言しているが、巨視的な物体ではさまざまな外乱雑音やエネルギー散逸の影響を受けやすいという技術的な困難さのため、状態の重ね合わせの測定がされてない、という解釈である。それに対して2つ目の説は、巨視的な物体ではその質量や粒子数などの影響によって、量子的な性質が失われる、という考え方である。現代物理学においては、重力(時空)を記述する一般相対性理論と量子力学の融合が大きな課題となっている。例えば一般相対性理論を考慮した場合、巨視的な物体の位置の重ね合わせは記述できず[4]、重力の効果を取り入れた量子力学の構築は自明ではなくなる。そのような背景のもと、巨視的な物体の量子的な振る舞いの実験的な検証をめざした研究が盛んに行われている。これまでに重ね合わせが実現された最も重い物体は  $10^4 \text{amu}$  程度であり、さらに大きな質量スケールにおける検証が必要とされている。重ね合わせ状態の実現方法としては、基底状態まで冷却された機械振動子の振動モードと単一光子のエンタングルメント生成が提案されている[5]。オプトメカニクス分野では、 $10\text{-}15\text{g}$  から  $10\text{-}9\text{g}$  といった質量スケールで、振動モードの基底状態冷却まで実現した例は数例あるものの、技術的な困難さもあって未だ重い物体の重ね合わせ状態は実現されていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、巨視的な物体も記述できるような拡張量子力学の理論を実験的に検証することである。量子力学を巨視スケールにまで拡張した理論の枠組みの一つとして、質量が存在することによって量子的な性質が失われるという、重力デコヒーレンスと呼ばれる考え方が提案されている。それに対して、本研究では、CSL (Continuous Spontaneous Localization) 模型[1,2]と呼ばれる理論に注目し、その検証を行う。CSL 模型は、巨視的な物体では「測定」という操作が量子状態に影響を与えないような理論であり、微視的な極限では通常量子力学におけるシュレディンガー方程式に帰着し、粒子数の多い極限では測定に依存しない結果を与えるという理論である。非相対論的な質点の力学しか記述できないなど、物理学の理論としては不十分な点も多いが、現在までに数学的な矛盾は見つかっておらず、従来の量子力学を拡張する可能性を持った理論模型である。

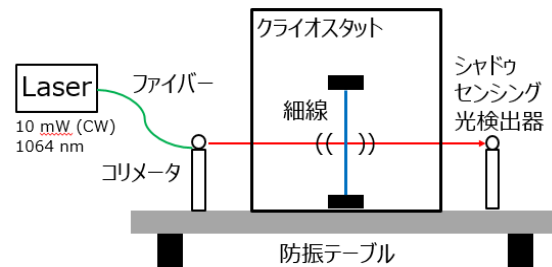
CSL 模型の検証実験の先行研究を右図に示す[6]。CSL 模型においては、標準的な量子力学からのずれは、距離スケールに相当する  $r$  [m]と、局在化のレート  $\lambda$  [ $\text{s}^{-1}$ ] という2つのパラメータで与えられ、その2つのパラメータをそれぞれ横軸、縦軸とした2次元プロットで検証結果がまとめられている。図中には、宇宙重力波望遠鏡のための実証衛星 LISA パスファインダーにおける浮遊試験質量の位置変動測定[7]、極低温に冷却された薄膜(カンチレバー)の振動の測定[8]、冷却ルビジウム原子気体の膨張の測定[9]のそれぞれで与えられた上限値を表す(ゲルマニウムから



自発的に放射される X 線の放出測定による検証[10]も行われているが、 $10^{18}$ Hz という非常に高い周波数での測定であるため参考程度の結果とされている)。縦棒は理論的に示唆[11]されたパラメータ範囲の例を示している。

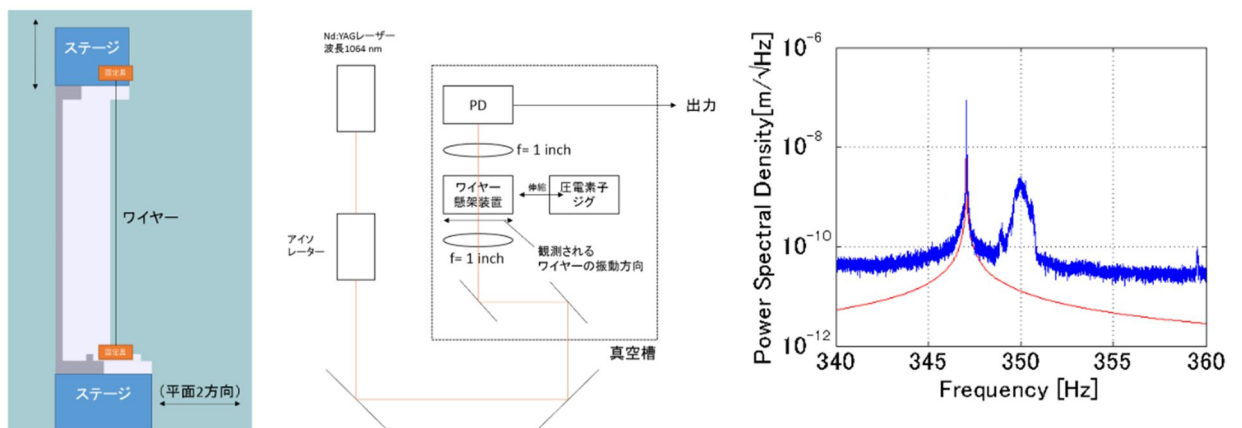
### 3. 研究の方法

本研究では、CSL 模型の検証手法として、微細なワイヤの弦振動モードの変動を精密に測定するという新たな手法を提案し、それによって  $r=10^{-7}$  [m]のスケールにおいて  $<10^{-9}$  [s<sup>-1</sup>]以下での検証を行うことを目標としている。CSL 模型によると、機械的な振動モードでの変動の大きさが、熱変動に起因する振幅からわずかに増大するという理論予想が得られる。そこで先行研究[7-9]では、無重力下での試験質量の運動や、薄膜の振動を精密に計測することでその検証を行っていた。本研究では、ワイヤの弦振動(バイオリン振動)に注目し、100Hz 付近という比較的高い周波数帯での変動測定を行うことで、地面振動などの外乱を大幅に低減し、精密な測定を可能にしている。また、先行研究と異なり、ワイヤや測定系を強固に一体固定することで、長時間測定を行った際の装置のドリフトを抑え、測定における系統誤差を大きく低減することも期待できる。変動はレーザー光をワイヤに当て、それによって生じた影を光検出器で読み取るという比較的単純な系を想定し、レーザー光を細く絞ることなどによって十分な測定精度が得られる見込みになっている。細線の素材としては、当初はベリリウム銅を想定している。また、この測定系はクライオスタット内に設置し、4K にまで冷却される。それによって、ベリリウム銅線の機械損失から見積もられた熱変動に対して、CSL 模型による効果は十分大きく見えるという見込みになっている。さらに、サファイアやシリコンといった機械損失のさらに小さなワイヤの準備も進めており、信号・雑音(熱変動)比はさらに向上できる見込みである。低温状態での精密計測を行う際には冷凍機の振動からの防振といった現実的な課題・挑戦はあるが、その最初の原理実証を本研究で進める。



### 4. 研究成果

実験セットアップの概略と測定結果を下図に示す。本実験では、実験原理の実証を目的とし、クライオスタットや防雨新テーブルは用いず、常温下での測定を行った。ワイヤの弦振動をレーザー光を用いて読み取り、その変動を変位に換算した(右下)。また、理論的に予想される熱雑音レベルを有限要素法を用いて求めた。これらの測定の結果、実験セットアップの構築と測定原理、弦振動の周波数や Q 値の特性評価、校正手法の確立、熱雑音の理論値の算出といった実験の基本原則を実証することができた。一方、感度は地面振動などによって制限されており、CSL 理論の検証には至らなかった。今後、防振や低温化による外来雑音の低減という課題がある。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Komori Kentaro, Kawasaki Takuya, Otabe Sotatsu, Enomoto Yutaro, Michimura Yuta, Ando Masaki	4. 巻 104
2. 論文標題 Improving force sensitivity by amplitude measurements of light reflected from a detuned optomechanical cavity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 31501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.L031501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kawasaki Takuya, Kita Naoki, Nagano Koji, Wada Shotaro, Kuwahara Yuya, Ando Masaki, Michimura Yuta	4. 巻 102
2. 論文標題 Optical trapping of the transversal motion for an optically levitated mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 53520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.102.053520	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Komori Kentaro, Enomoto Yutaro, Ooi Ching Pin, Miyazaki Yuki, Matsumoto Nobuyuki, Sudhir Vivashek, Michimura Yuta, Ando Masaki	4. 巻 101
2. 論文標題 Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 011802(R)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.101.011802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Michimura Yuta, Oshima Yuka, Watanabe Taihei, Kawasaki Takuya, Takeda Hiroki, Ando Masaki, Nagano Koji, Obata Ippei, Fujita Tomohiro	4. 巻 1468
2. 論文標題 DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012032 ~ 012032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimoda Tomofumi, Ando Masaki	4. 巻 36
2. 論文標題 Nonlinear vibration transfer in torsion pendulums	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 125001 ~ 125001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab2162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 KAGRA collaboration	4. 巻 3
2. 論文標題 KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0658-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 KAGRA Collaboration	4. 巻 36
2. 論文標題 Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 95015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab0fcb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 104003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.104003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration	4. 巻 21
2. 論文標題 Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41114-018-0012-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer	4. 巻 97
2. 論文標題 Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.102001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando	4. 巻 97
2. 論文標題 Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 122003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.122003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama	4. 巻 98
2. 論文標題 Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 22008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.022008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Observation of Gravitational-Wave in Space
3. 学会等名 RESCEU Summer School 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Gravitational-wave Observation and KAGRA
3. 学会等名 ILC Summer Camp 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Space-borne Gravitational-Wave Antenna: B-DECIGO
3. 学会等名 GWPAW 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Gravity-Gradient-Based Early Earthquake Alert
3. 学会等名 UK-Japan Workshop on Quantum Sensing and Metrology Research Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Gravitational-wave observation - Recent results and prospects -
3. 学会等名 OMEG15 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 Recent results of gravitational wave
3. 学会等名 Higgs Couplings 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 DECIGO : Gravitational-Wave Observation from Space
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ando
2. 発表標題 TOBA: Torsion-Bar Gravitational-Wave Antenna
3. 学会等名 The 15th MG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年



〔図書〕 計3件

1. 著者名 国立天文台 編	4. 発行年 2021年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 1174
3. 書名 理科年表	

1. 著者名 安東正樹, 白水徹也 他	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 432
3. 書名 相対論と宇宙の事典	

1. 著者名 David Reitze (編集), Peter Saulson (編集)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 World Scientific Pub Co Inc	5. 総ページ数 700
3. 書名 Advanced Interferometric Gravitational-wave Detectors: Essentials of Gravitational Wave Detectors	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------