

平成 31 年 2 月 19 日

報道機関 各位

東北大学学際科学フロンティア研究所
東北大学電気通信研究所
東京大学大学院理学系研究科
自然科学研究機構・国立天文台
科学技術振興機構

**微小な重力の測定を可能とする
小型低雑音重力センサーを開発
重力の量子的な性質の実験的解明に期待**

【発表のポイント】

- ・従来の限界よりも 3 桁軽い 100 mg の物体が生成する微小重力を 1 秒で測定可能な低雑音の重力センサーを実現
- ・重力波検出器^(注1)の開発で発展した技術を応用することで従来の限界を打破
- ・重力の量子的な性質を明らかにする新たな研究分野の創成に期待

【概要】

東北大学学際科学フロンティア研究所(電気通信研究所兼任、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ研究者兼任)の松本伸之助教、東京大学大学院理学系研究科の道村唯太助教、国立天文台重力波プロジェクト推進室の麻生洋一准教授、東北大学電気通信研究所の枝松圭一教授らの研究グループは、石英の細線で懸架された 7 mg の鏡の振動を 1 秒の測定時間で 10^{-14} m 程度の分解能で読み取れる測定器を開発しました。これは、100 mg の物体が懸架鏡から数 mm 離れたところで振動したときの重力変化を捉えることができる性能です。

本研究は東北大学学際科学フロンティア研究所が主体となり、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけの支援を受けて実施されました。研究開発のうち、真空装置の開発を国立天文台グループと共同で、電気系の構築を東京大学と共同で行い、高性能懸架鏡の作製を東北大学電気通信研究所と共同で実施しました。本研究成果は、2019 年 2 月 20 日午前 1 時(日本時間)にこの分野でのトップジャーナルのひとつである専門誌 *Physical Review Letters* に掲載されます。

【研究の背景】

現在の科学技術は量子力学と呼ばれるミクロな原子や電子の運動を記述する法則と一般相対性理論と呼ばれるマクロな重力法則の二つを土台にして築かれてきました。これらの法則の発見以来 100 年近く経過しますが、各々の理論はその間に実施された全ての実験結果と整合性のとれた優れた理論であることが知られています。しかし、これらの理論が適用されてきた実験的なスケールは大きく隔たっており、両理論の統合に向けた検証実験は未だ実現していません。

これまで、重力の観測は主に度量衡分野で発展しており、原子干渉計・ねじれ振り子・光格子時計といったセンサーを用いた実験が進められてきました。しかしながら、重力は電磁気力よりも格段に弱いため、90 g 未満の軽い物体の生成する重力はこれまで測定されたことがありません。例えば、ボールペンの重さは 10 g 程度ですが、それ以下の質量スケールの重力はこれまでのセンサーでは観測できていません。一方、巨視的スケールで量子状態^(注 2)を実現しようとする探求は超伝導現象等を利用して発展してきましたが、振り子など機械振動子における量子状態の実現は、重力の量子的な性質の検証につながると期待されます。振動子の振動モードの最も低いエネルギーの量子状態は基底状態と呼ばれています。基底状態においてさえ振動子は僅かに揺れており、それはゼロ点振動と呼ばれます。振動子のゼロ点振動を変位測定で読み取り、フィードバック冷却^(注 3)することで基底状態を実現することができます。しかし、ゼロ点振動の大きさは振動子の質量とともに小さくなるため、重力が観測できるような巨視的なスケールの重たい振動子における基底状態は実現していません。

このように、従来の実験では重力と量子状態はそれぞれ異なるスケールで検証されてきました。既に説明したように、これまでに測定された最も小さな重力源の質量は 90 g である一方、これまでに量子状態を実現した最も重い物体は 40 ng です。つまり、両実験のスケールには 10 桁もの隔たりがありました。現在、2 つの異なるスケールを統合することで創成される新たな研究領域に注目が集まっています。

【研究の内容】

重力と量子の実験スケールを統合するためには、微小重力やゼロ点振動の観測が可能な精密な変位測定系の構築が課題となっています。現在、世界で最高の空間分解能を誇る変位測定装置は重力波検出器です。東北大学、東京大学、国立天文台から成る研究グループはその技術を応用することで、懸架鏡(図1参照。7 mg の鏡を直径 1 μ m、長さ 1 cm の石英の細線で吊るしている)の変位を 1 秒の測定時間で 10^{-14} m 程度の高い分解能で測定することに成功しました。懸架鏡は重力波検出器と同様に光共振器^(注 4)(図2)の一端を担っています。共振器によって懸架鏡は光学トラップ^(注 5)されており、さらにフィードバック冷却により基底状態付近まで冷却可能です。重力測定の原理は極めて単純です。懸架された鏡の振動は光共振器の反射光量を

変化させるため、その変動は光検出器で測定できます。鏡のとなりに重力源を設置し、両者の重力相互作用で生じる懸架鏡の揺れを光で検出することで重力が観測されます。例えば、懸架鏡の4 mm程度となりで質量100 mgの物体が、(光学トラップされた)懸架鏡の周期で1 mmの振幅で振動すれば、重力相互作用によって懸架鏡は 10^{-14} m程度揺らされます。この僅かな揺れを我々の開発した光共振器の応答から測定することで微小重力が観測可能です。

測定の雑音を低減するために、光共振器は真空容器内に設置した多段防振装置上(図3)に構築しています。同じ防振板上に設置したレーザー光の強度・周波数安定化システムによりレーザー光は安定化されています。雑音低減の結果、図4で示される変位測定の結果を得ました。この結果から、mgスケールにおける重力測定が可能であることを実証することに成功し、さらにmgスケールにおける量子状態制御が将来的に可能であることを示しました。

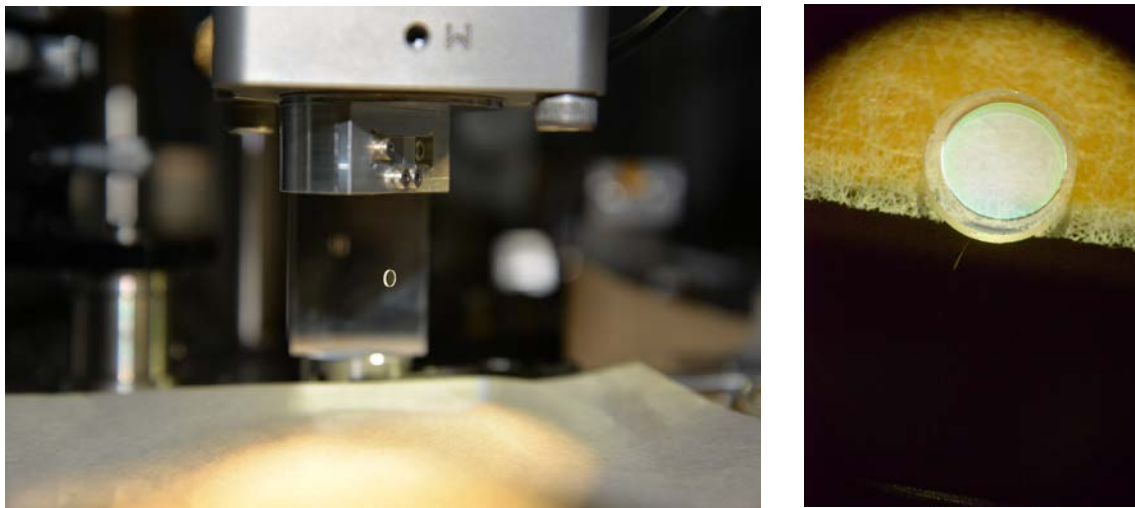


図1 直径1 μ mの石英の細線で懸架された質量7 mgの鏡(直径3 mm、厚さ0.5 mm、シグマ光機製)。右は懸架鏡を実体顕微鏡で撮影した写真。

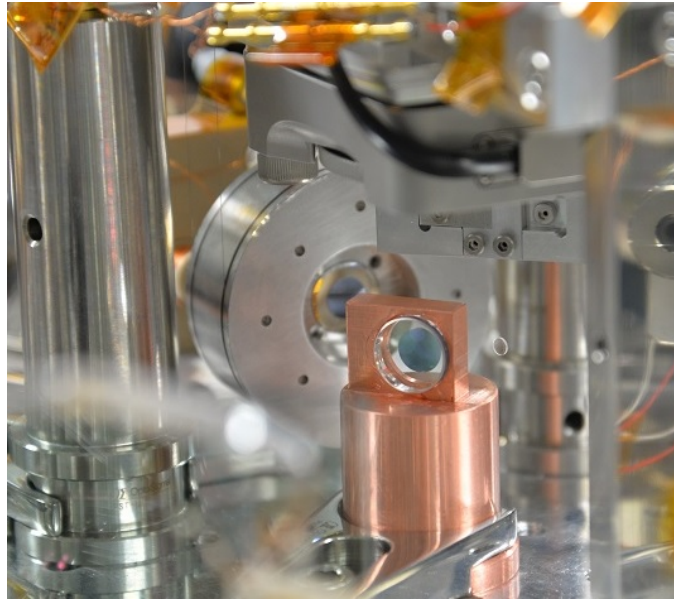


図2 開発した重力センサー。懸架鏡を一端とした光共振器であり、懸架鏡の揺れをレーザー光により観測します。100 mg の物体が生成する重力を 1 秒で測定可能な性能を実現しました。

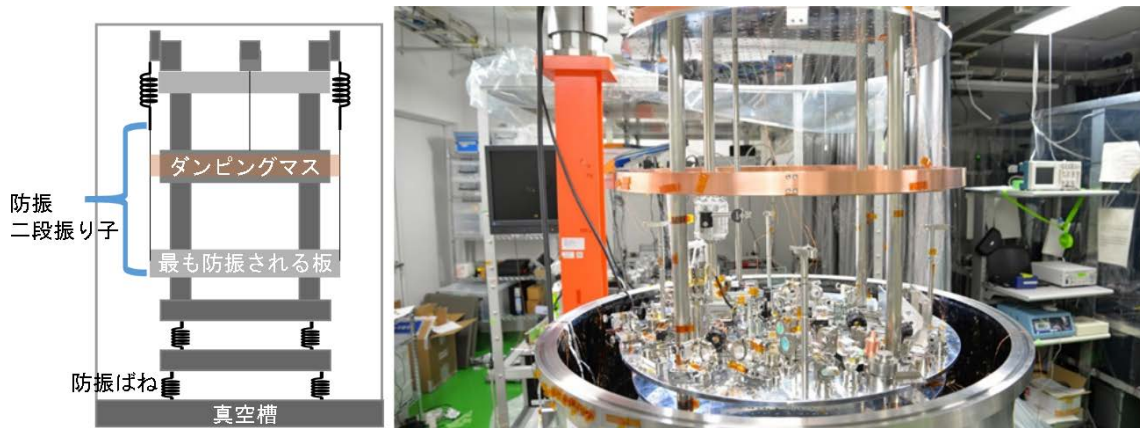


図3 開発した多段防振装置の略図(左)と真空容器(直径 1 m、高さ 1 m、ミラプロ製)内部に設置される多段防振装置(右)。最も振動が小さくなる板の上に光共振器とレーザー光の安定化システムを構築しています。

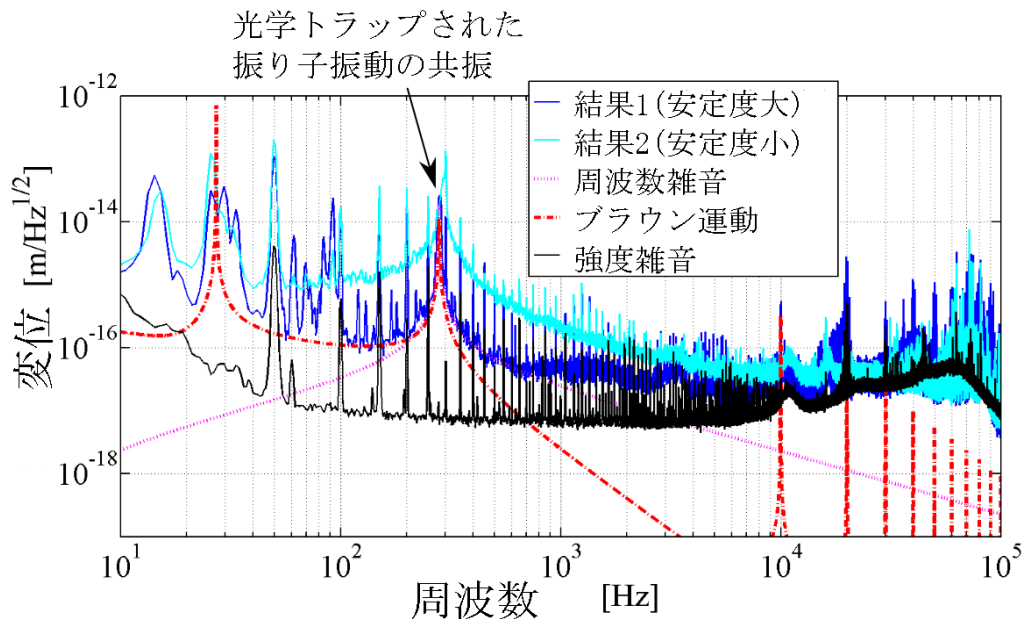


図4 変位測定結果(パワースペクトル密度)。青線と水色線が測定結果を示します。水色は比較的レーザー光の安定度が低い(周波数変動が大きい)ときの結果であり、青色は安定度が高い(周波数を十分に安定化した)ときの結果です。赤線は懸架鏡のブラウン運動^(注6)、紫線は十分に周波数を安定化したときの光の周波数変動由来の雑音、黒線は光の強度変動による雑音を示します。300 Hz あたりのピークが光学トラップされた振り子振動の共振を示しているため、1秒の測定時間で 10^{-14} m程度の分解能があることが分かります。

【今後の展望】

研究グループは現在、微小重力の初観測に向けて、重力源となる100 mg程度のカンチレバー(片持ち梁の自由端に100 mg程度の金属球を接合した機械振動子)の開発に着手しています。重力源をセンサー近くに配置するとセンサーの雑音(例えば、重力源の振動がセンサーに伝わることで生じる雑音や、両物体間の電磁気的な相互作用で生じる雑音)が増えることが予想されるため、それらを除去する小型多段防振装置やシールドの開発にも取り組んでいます。また、mgスケールにおける量子効果の初観測に向けたさらなる低雑音化にも着手しています。

これらの進展により、量子状態を実現したセンサーと、センサーと同様な(量子状態を実現した)重力源の間の重力相互作用を観測できる可能性があります。このように重力実験と量子実験の両スケールが統合すれば、重力相互作用によって量子状態間に種々の量子的な相関を生み出すことができるかどうか検証できるようになります。検証の結果、重力が量子的な性質を持っているのかどうか(重力以外の全ての相互作用は量子的であることが既に知られていますが、重力だけは未だに不明です)実証できるのではないかと期待されています。

【より詳細な研究の内容】

本研究で到達した変位測定の精度を実現するためには、懸架鏡のブラウン運動の影響を抑える必要があります。懸架鏡自身のブラウン運動が大きければ重力の影響を観測できません。ブラウン運動を生じる熱的な揺動力の大きさは、揺動散逸定理と呼ばれる定理から系のエネルギー散逸の大きさに決まります。例えば、振り子を指ではじいた時に、10回揺れて振幅が小さくなる振り子と1000回揺れて振幅が小さくなる振り子があったとします。この場合、前者がエネルギー散逸の大きな振り子であり、熱的な揺動力が大きくなります。振幅が小さくなるまでに振動する回数を Q 値と呼び、この値が高いほど変位測定のパフォーマンスが良いといえます。光のばねで繋がった振動子は Q 値が向上するため変位測定のパフォーマンスが向上します。本研究では、光学トラップによって Q 値を 10^8 まで向上することに成功し、世界最小レベルまで懸架鏡のエネルギー散逸を低減することに成功しました。

さらに、このように微小なブラウン運動を読み取ることのできる精密変位測定系の実現にも成功しました。変位測定の高精度化のためには、主にレーザー光の強度・周波数揺らぎ、光の散射雑音(量子揺らぎ)、地面の振動、屈折率の揺らぎ、音響などに由来した雑音を低減する必要があります。これらのうち、レーザー光の強度・周波数揺らぎは安定化により低減できます。光の散射雑音の影響は懸架鏡に結合するレーザー光の強度を高くすれば抑えることができます。それ以外に関しては装置全体を真空容器内に設置した多段防振装置上に構築(図3)することで抑えることができます。

光共振器には種々の不安定性が潜在しており、一般に懸架鏡に高強度レーザー光を結合させることは困難です。重力波検出器では不安定性を解消するためにフィードバック制御を利用しています。しかし、本研究のような mg スケールの振動子の場合にはフィードバック制御のためのアクチュエータの取り付けが困難です。そこで研究グループは、特に光共振器の角度不安定性を解消するために3枚の合わせ鏡からなる共振器構成を利用しています。角度不安定性とは、光の圧力によって懸架鏡の回転運動の振幅が増大(共振周波数が低減)する現象です。図5の左図のように、2枚の合わせ鏡の場合は、懸架鏡の回転運動を増大する向きに光の圧力によるトルクが生じるため、反ばねが生成されます。3枚の場合、鏡における光軸の鏡像反転の回数が2回から3回になるため、鏡の回転軸と光の圧力による回転軸の向きを反転することが可能となります(図5)。そのため、鏡の回転振動も光のばねでトラップされることになり、高強度レーザーを入射しても回転振動の振幅は大きくなりません。

以上のように、振動子の Q 値向上・高強度レーザー光の利用・光源の安定化・多段防振装置の利用・高真空環境下における測定によって高精度化に成功しました。

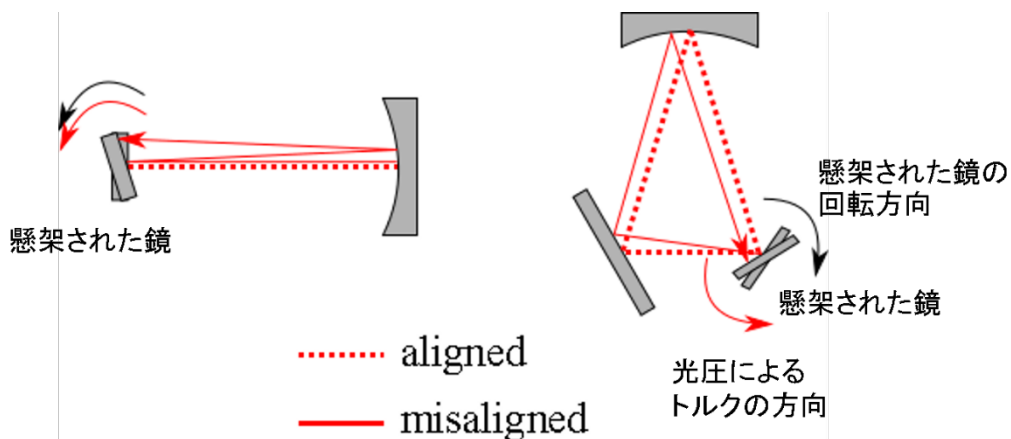


図5 光共振器を2枚の合わせ鏡と3枚の合わせ鏡で構築した場合の比較。懸架鏡 (movable mirror)は回転すると合わせ鏡内の光の軸が点線から実線のように移動します。光は鏡で反射すると鏡をpushするため、2枚の合わせ鏡の場合、懸架鏡の回転が増幅されて不安定になります。3枚の場合は反対に安定化されます。

【論文掲載情報】

論文名: Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg- Scale Gravity Measurements

著者: Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Cataño-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, and Keiichi Edamatsu

ジャーナル名: Physical Review Letters

【用語説明】

注 1) 重力波検出器

一般相対性理論から導出される重力波(時空の変動が光速で伝搬する波)を検出するための装置。懸架された数十 kg の鏡(振り子)の間の距離の変動をレーザー光で読み取る装置。2015年にアメリカの検出器 LIGO が世界で初めて重力波の検出に成功し、2017年にノーベル賞を受賞しました。現在、日本の検出器 KAGRA は2019年中の稼働を目指して開発が進んでいます。

注 2) 量子状態

原子や電子などは我々の直感に反する様々な振る舞いを示します。例えば、我々の身近にあるボールはある軌跡を描いて運動することは誰もが知っていますが、マイクロなボールだと考えられていた原子や電子はぼやけて運動しており、特定の軌跡を描きません。このような現象を巨視的なスケールで実験的に検証する試みが長年の間進められています。

注 3) フィードバック冷却

振動子の揺れ(変位)を観測し、ネガティブフィードバックすることで振動子の速度(つまり運動エネルギー、温度)を低減すること。例えば、振り子が左に動いていることを観測した場合、右向きに力を加えると振り子の振動振幅は低減します。変位と速度は微分積分の関係があるため、観測した変位信号を微分してフィードバックすれば振り子に働く(速度に比例する)減衰力が増大することになり、振動振幅と速度を低減できます。観測した変位信号を微分しないでフィードバックすると、振り子に働く復元力が増大(振動子の共振周波数が増大)するため振動振幅は低減します。前者は「冷却(クーリング)」と呼ばれ、後者は「トラップ(ばね効果)」と呼ばれます。

注 4) 光共振器

合わせ鏡の間の距離と光の波長を合わせることで、光は合わせ鏡の間で共振します。共振のピークが鋭ければ鋭いほど(合わせ鏡の間の光の往復回数が多いほど)、鏡の揺れに対する光の応答は敏感になり、測定器の感度は向上します。共振状態からわずかに合わせ鏡の間の距離をずらすと注5で説明する光ばねを生成することが可能です。

注 5) 光学トラップ(光ばね)

光の圧力によって生成されるばね。光の圧力はレーザー光量が高いほど強くなります。従って、懸架鏡が共振器長を伸ばす向きに動いた時に共振器内の光量が減る(反対に懸架鏡が共振器長を短くする向きに動いた時に共振器内の光量が増える)ように調整すれば、光の圧力でばねが生成されます。

注 6) ブラウン運動

ブラウン運動は様々な多体系で見られます。例えば、空気中に置かれた振り子は酸素や窒素原子と衝突することで力(熱的な揺動力)を受けます。酸素や窒素原子の運動を観測しないで振り子の運動を観測すると、振り子はランダムな運動をしているように観測されます。このような運動をブラウン運動と呼びます。

問い合わせ先

<研究に関すること>

東北大学学際科学フロンティア研究所

新領域創成研究部 助教

松本 伸之(まつもと のぶゆき)

Tel: 022-217-6398

E-mail: matsu@riec.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学学際科学フロンティア研究所

企画部 URA

鈴木 一行(すずき かずゆき)

Tel: 022-795-4353

FAX: 022-795-7810

E-mail: suzukik@fris.tohoku.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

科学技術振興機構

戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ

中村 幹(なかむら つよし)

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

Tel: 03-3512-3531 Fax: 03-3222-2066

E-mail: presto@jst.go.jp

科学技術振興機構

広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3

Tel: 03-5214-8404 Fax: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho@jst.go.jp