

令和2年6月5日

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
科学技術振興機構(JST)

量子制御可能な巨視的振り子を開発

量子振り子が生じる重力の検証やダークマター探索などへ応用可能

【今回の発表のポイント】

- ・ミリグラム程度の振動子(振り子)のエネルギー散逸を大きく低減することに成功。
- ・これにより、従来の限界より5桁も重い巨視的振動子の量子制御が可能に。量子制御された重力源としての利用に道を拓く。
- ・重力センサーと組み合わせることで、重力の量子性検証への応用が期待。
- ・ダークマターや重力デコヒーレンスの検証にも応用可能。

【概要】

原子をはじめとする極微の世界の量子と呼ばれるものは、量子揺らぎと呼ばれる不可避の揺らぎを伴います。近年、薄膜やカンチレバーといった巨視的な物体でさえ、それらの量子揺らぎを観測・制御することが可能となってきました。

今回、東北大学 学際科学フロンティア研究所／電気通信研究所の松本伸之 助教(兼JSTさきがけ研究者)とカタニョセスベンジャミンロペス博士課程大学院生、枝松圭一教授らは、石英の超細長線(直径 10^{-6} メートル、長さ5センチメートル)をミリグラム程度の鏡にレーザー溶接することで、エネルギー散逸が世界で最も小さな振動子(振り子)を開発することに成功しました。エネルギー散逸は振動子と外部環境がどの程度分離されているかを示す指標です。低散逸化により、従来の量子制御実験の対象より5桁も重い、ミリグラム程度の超巨視的振動子の量子制御が実現可能になりました。重い物体の量子制御を実現すれば、量子状態にある物体から生じる重力を観測することで、重力の量子的な性質の検証につながると期待されます。

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、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 さきがけ「大質量機械振動子を用いた巨視的量子力学分野の開拓(研究者:松本伸之)」の支援を受けて実施されました。本研究成果は、2020年6月5日(日本時間)に物理学分野のトップジャーナルである『Physical Review Letters』に掲載されました。

【研究の背景】

量子技術の発展により、原子・イオン・光子などの量子状態を精密に制御することが可能になってきました。量子状態は一般に微視的な系でのみ観測され、我々の直観に反した様々な性質を持ちます。例えば、複数の状態が同時に成り立つ重ね合わせ状態や、不確定性原理(*1)から量子揺らぎと呼ばれる不可避の揺らぎが存在することが知られています。これらの不思議な状態や性質は、量子力学によって理解が進んできました。量子力学を土台とした量子制御技術の積み重ねにより、大規模な量子エンタングルメント(*2)を利用した量子暗号通信や量子コンピューターの応用につながるものが期待されています。

他方、さらに基礎的な観点からいえば、量子制御の対象を巨視的にすること自体が興味深いと考えられます。シュレディンガーの猫の思考実験に代表されるように、巨視的な系で量子現象を実現することは、量子力学の黎明期から注目を集めています。特に、1957年のリチャード・ファインマンによる提案以降、量子状態にある物体から生じる重力の性質を解明することに注目が集まっています。

重力とは、アインシュタインの一般相対論から時空のゆがみだと考えられています。そのため、量子状態にある巨視的な物体が生成する重力を検証できれば、時空の量子的な性質の解明につながると期待されます。例えば、‘ここ’にある状態と‘そこ’にある状態の重ね合わせ状態にある物体はどのような重力(時空)を生じるのでしょうか(図1)。私たちはこのような根源的な問いに答えを与える実証実験の実現を目指しています。しかし、量子揺らぎは一般的に物体が巨視化すればするほど観測が困難になり、また重力があまりにも小さい(電磁気力と比較すれば、 10^{36} 倍小さい)ため、重力の量子性を検証することは、最も困難な未解決問題となっています。

巨視的振動子の量子制御が困難な原因は主に二つあります。一つ目は、物体が巨視化すると、環境との相互作用(例えば空気との衝突)が無視できなくなることです。環境との相互作用によって物体はブラウン運動(*3)をするため、量子揺らぎは(重力源として使用できるほどの)巨視系では観測されることがありません。二つ目は、(位置の)量子揺らぎは、振動子の質量を大きくすると小さくなることです。重力の微小さを補うために重力源を大きくすれば、量子揺らぎは反対に小さくなります。これらを考慮に入れ、私たちは、量子制御が可能な程度小さく(従来限界は 10^{-8} グラム程度)、かつ重力源として使える程度に大きな物体(従来限界は 100 グラム)として、中間的なミリグラム(10^{-3} グラム)程度の振動子に注目しています(図2)。しかし、この領域で十分に微小なエネルギー散逸を持つ振動子は存在していませんでした。

【今回の成果と意義】

量子揺らぎを制御するためには、振動子を環境から孤立させ、エネルギー散逸を低減することで、ブラウン運動の影響を抑える必要があります。孤立した振動子は一度揺らされると、長時間揺れ続けます。我々は、ミリグラム程度の振り子のエネルギー散逸

を低減し、100 時間近くその揺れを持続することに成功しました(図 3、4)。これにより、量子制御が可能な巨視的振動子を実現しました。他方、我々は 2019 年の研究成果によって、ミリグラム程度の物体が生じる微小な重力の観測が可能な振り子型センサーの開発にも成功しています(*4)。そのため、‘量子制御の対象としての振り子’と‘力センサーとしての振り子’を同時に活用することで、図 1 のように量子制御された振り子が生じる重力を観測できる可能性があります。このような重力の量子性の検証の他にも、量子振り子を用いることで、ダークマター(*5)の観測、重力デコヒーレンス(*6)を観測するなど、新たな応用が切り開けると考えられます。

【研究の内容】

機械振動子には、振り子、ねじれ振り子、カンチレバーなど、様々な種類があります。今回、我々は振り子振動に着目し、量子制御に求められる低散逸化を、ミリグラム程度の振り子を用いて初めて実現しました(図 4、図 5)。振り子振動は、物体が重力ポテンシャルに閉じ込められるため実現します。重力ポテンシャルには散逸がないと考えられているため、低散逸化にふさわしいことが知られています(*7)。例えば、重力ポテンシャル中で低散逸に運動している物体の代表的なものは地球です。地球は既に 46 億年ほど公転を続けていますが、そのエネルギーはほとんど減衰しておらず、極めて低散逸な振動子と考えることができます。地球の質量は約 10^{25} キログラムであり、重力源として利用可能ですが、その量子揺らぎは 10^{-26} メートルしかないと予想されるため、観測・制御することは不可能に近いです(人類が実現した最高精度の計測は、重力波検出器による空間分解能 10^{-20} メートル程度の計測です)。そのため、地球は量子制御の対象としてはふさわしくありません。

振り子の散逸の研究は、これまで重力波望遠鏡(*8)の分野で進められてきました。重力波望遠鏡とは、懸架された鏡(振り子)の間の距離をレーザーで精密に測定することで、重力波(重力の放射現象。電磁気における電磁波に対応する古典現象)を観測する装置です。低散逸化により振り子自体のブラウン運動の影響を抑えることができるため、重力波の観測にとっても低散逸化が必要不可欠です。重力波望遠鏡では重力波に対する感度を向上するため、センサーとして使用できる物体として可能な限り重たい数十キログラム程度の鏡を使用しています。

ミリグラム程度の振り子の散逸を低減するためには、重力波望遠鏡の開発で蓄えられた知見を基に我々が計算した結果から、シリカ製の超細長線(直径 10^{-6} メートル、長さ 5 センチメートル程度、線自体の散逸も限界まで低減)をシリカ製の鏡に一体化して接合すれば良いことが分かっていました。しかし、このような細長く質の良い線(例えば線の表面にわずかな凸凹があれば散逸が増大します)はこれまで存在していませんでした。さらに、 10^{-6} メートル程度の直径しか持たない線と大きな鏡(直径 3 ミリメートル、厚さ 0.5 ミリメートル)のように、著しくスケールの異なる物体を一体的に接合することも、我々の知る限りではこれまで実現していませんでした。今回、独自に開発したシリ

カ線の延伸装置(図 6)とレーザー溶接システム(図 7)によって、これらの課題を初めて克服し、振動子の低散逸化に成功しました。

【今後の展望】

巨視的な振り子の量子揺らぎを制御することで、原子・イオン・光子などと同様な量子制御が実現可能となります。例えば、振り子の位置と運動量の量子揺らぎが制御されたスクイーズ状態と呼ばれる量子状態を生成できます。さらに、スクイーズ状態にある二つの振り子間の量子エンタングルメントも生成可能です。量子状態は一般に微視系でのみ観測されますが、量子状態を巨視的な振り子で実現することで、我々は量子力学が巨視系でも成り立っているのか検証したいと考えています。重力によるデコヒーレンスのため、巨視系では量子現象は原理的に観測できない可能性もあります。

従来の量子制御と異なり、我々の振動子はこれまでの量子制御の対象と比較して非常に巨視的なため、それ自体を重力源として活用することも可能です。この違いを生かすことで、究極的には時空の量子的な性質の解明につながるかもしれません。また、量子振り子をプローブとして使い、ダークマターと量子振り子の衝突を精密に検証することで、ダークマターの発見につながる可能性もあります。

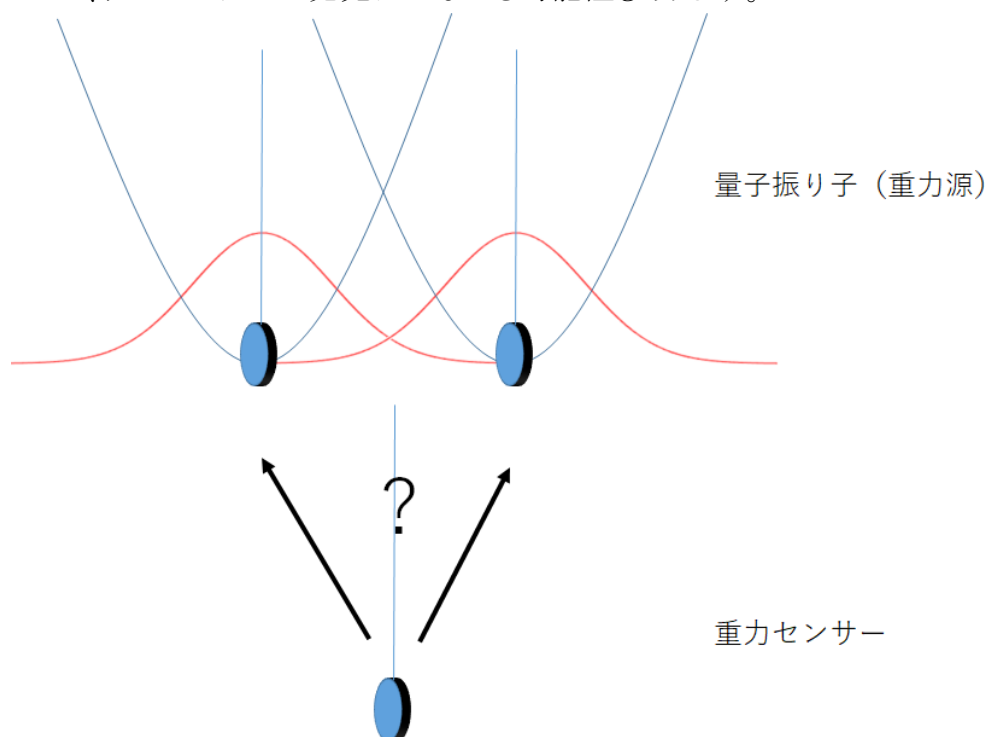


図 1 重力の量子性検証。量子振り子(ここでは‘左’と‘右’にある状態の重ね合わせ状態を示します。これはシュレディンガーの猫と同様な状態です。実際には振り子は一個しかないので、状態が重ね合っているため、どちらにあるのかは区別できません)が生成する量子的な重力にセンサーがどう反応するのかは不明です。赤線がそれぞれの状態の量子揺らぎを表しています。

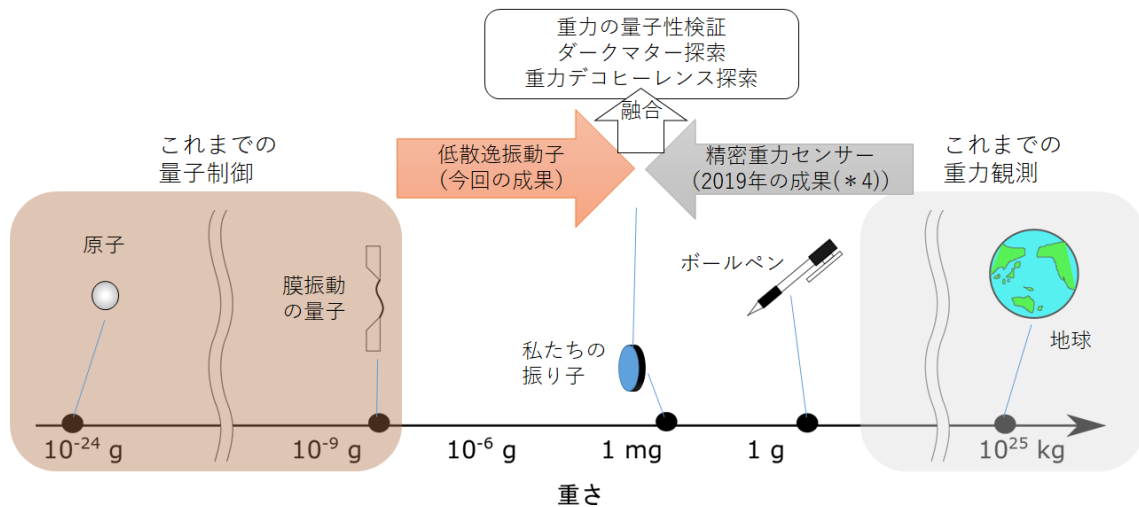


図 2 従来の量子実験と重力実験の対象と我々の実験対象の比較。これまで、重力の観測と量子の実験はかけ離れたスケールで行われてきました。これらの中間的なスケールで実験を行うことで、自然の新たな一面を知ることができるかもしれません。重力観測と量子制御の高度化に取り組むことで、究極的には量子制御された物体が作る重力を観測できると期待しています。量子制御された巨視的物体をプローブとすることで、ダークマターや重力デコヒーレンスなどの未解決問題を高精度に検証することもできます。

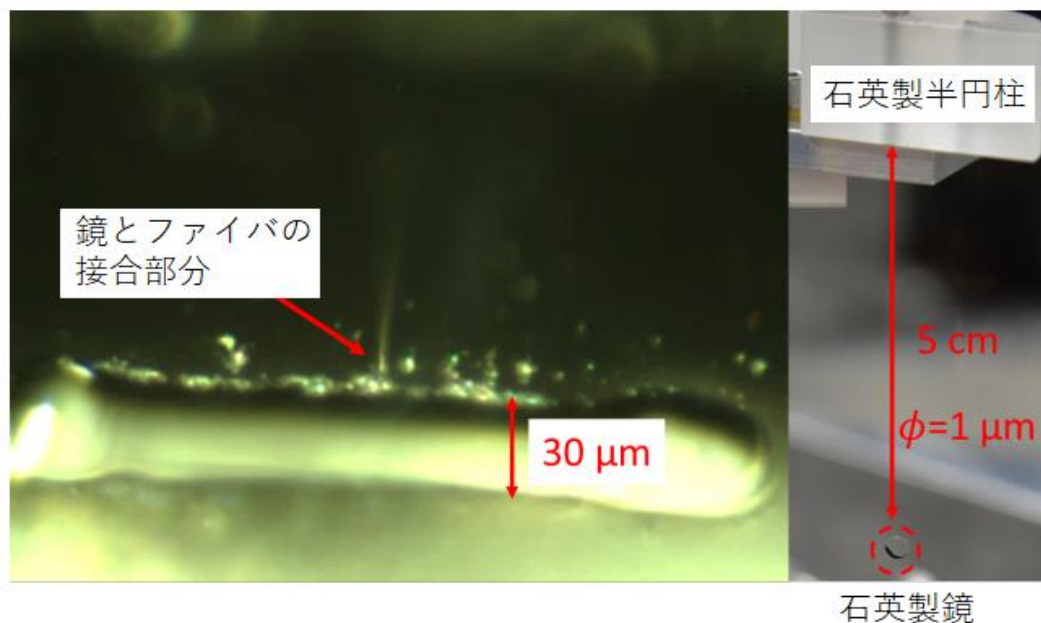


図 3 開発した一体型振り子。左は接合部分の拡大写真。振り子上部は石英製の半円柱に石英線をレーザー溶接しています。

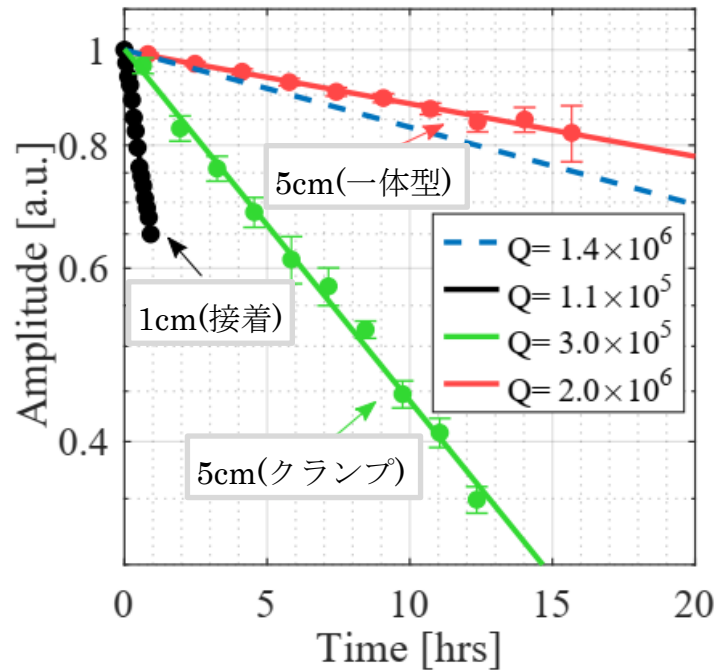


図 4 エネルギー散逸の測定。3 種類の振り子(長さ 1 センチメートルの細線を鏡に接着、5 センチメートル細線の上端は金属板でクランプ、5 センチメートル細線をレーザー溶接で接合したもの)の減衰振動を測定し、その包絡線を示しています。点線が量子制御の要求値であり、赤はそれよりも散逸が小さいことが分かります。

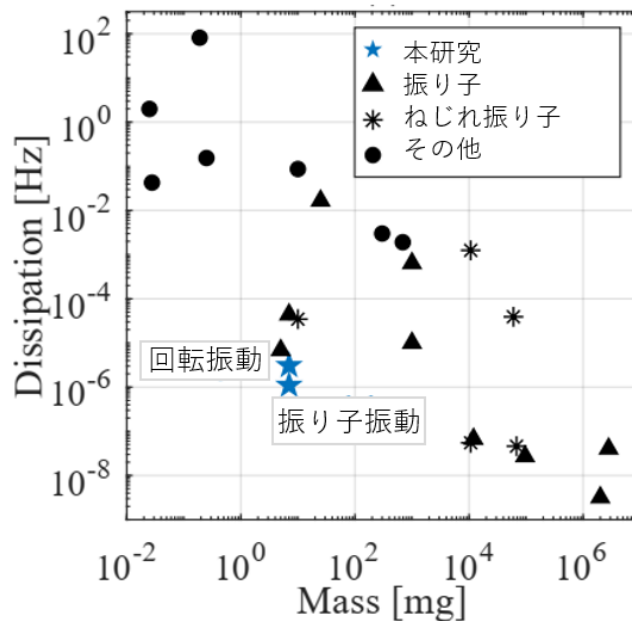


図 5 他の実験との比較。縦軸は減衰振動の持続時間の逆数。星印が本研究の成果(懸架された鏡の振り子振動と回転振動)であり、グラムより小さなスケールで最も低散逸なことが分かります。振り子の回転振動のエネルギー減衰時間から、細線自体の品質も評価しており、理論限界に近い高品質を実現していることを確認しました。

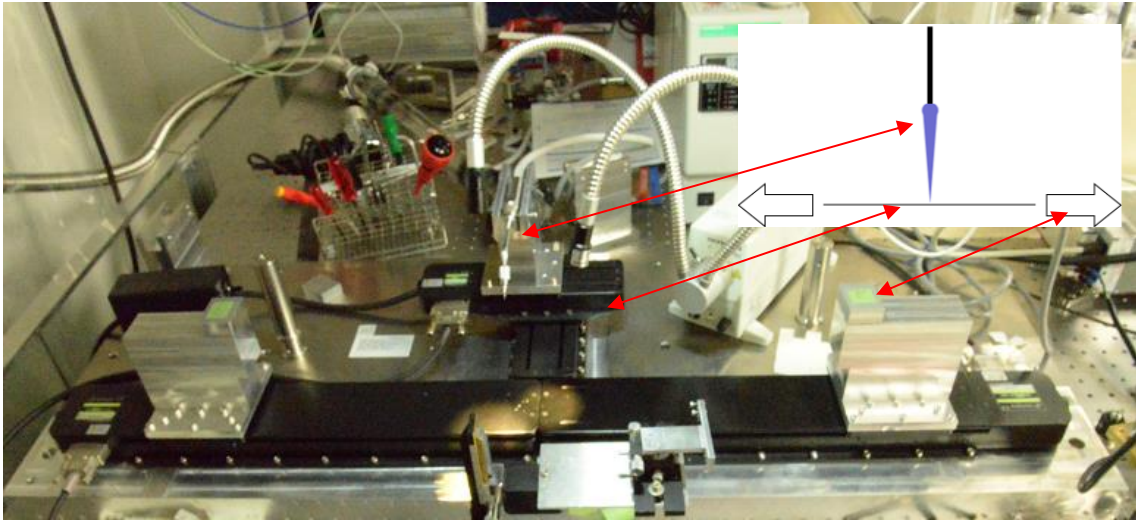


図 6 石英線の延伸装置。純石英製の線(直径 0.125 ミリメートル)を炎で熱し、プログラムで制御されたステージで引っ張ることで直径 10^{-6} メートル、長さ 5 センチメートルまで伸ばしました。炎の軸と細線の軸が精密に一致するように、アルミ製の精密加工された一体型の板の上にステージなどを配置しています。

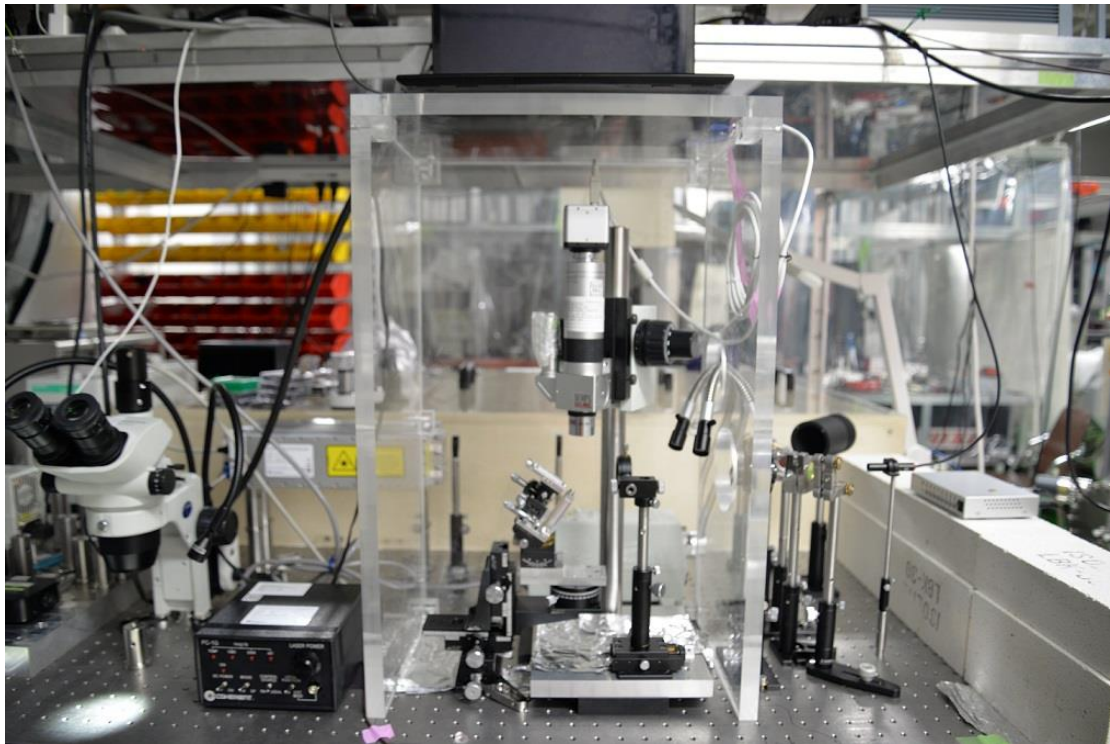


図 7 レーザー溶接システム。

【論文掲載情報】

ジャーナル名: Physical Review Letters

論文名: High- Q milligram-Scale Monolithic Pendulum for Quantum-Limited Gravity Measurements

著者: Seth B. Cataño-Lopez*, Jordy G. Santiago-Condori, Keiichi Edamatsu, and Nobuyuki Matsumoto* (論文掲載順、*責任著者)

DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.221102>

【用語説明】

*1 不確定性原理

量子力学では物理量は単なる数値として扱うことはできません。代わりに、数学上の抽象的なヒルベルト空間における演算子として記述されます。不確定性原理により、非可換な物理量の対(例えば位置と運動量)には量子揺らぎと呼ばれる不可避の揺らぎが原理的に存在することが示されます。量子の性質の多くは物理量が非可換な点に由来しており、直観的に理解することが困難です。

*2 量子エンタングルメント

複数の物体の位置や運動量、スピンなどの量子状態が互いに相関を持ち、独立に説明できない状態のことを量子エンタングルメント(量子もつれ)と呼びます。

*3 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見えます。この運動をブラウン運動と呼びます。

*4 これまでの研究(重力センサーの開発)

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190220/index.html>

*5 ダークマター

様々な天体観測の結果、光学的には観測されていない質量が宇宙の全質量の 2 割程度を占めると考えられています。これをダークマター(暗黒物質)と呼び、その性質の解明に向けた取り組みが継続されています。近年、ある種のダークマター候補との衝突による振動子の揺れを観測できるのではないかという提案がなされ、注目を集めています。振動子の揺れを限界まで精度よく観測すると、その性能限界は振動子自体の量子揺らぎで決まります。そのため、量子揺らぎが観測できるような究極的な感度を持った振動子型のセンサーでダークマターを探索しようという挑戦が始まりました。

*6 重力デコヒーレンス

本文で述べたように、量子の性質は環境との相互作用によって覆い隠されます。これをデコヒーレンスと呼びます。重力によってデコヒーレンスが生じるかどうかはいまだに分かっていません。巨視的な量子振動子を用いることで従来の検証実験よりも精密に重力デコヒーレンスが検証できます。重力はシールドによって遮ることができないため、もし重力デコヒーレンスが生じるのであれば、量子制御の大規模化・巨視化には原理的な制限が伴うことになります。

*7 振り子の散逸

理想的な振り子の場合、重力による位置エネルギー（重力ポテンシャル）から復元力が生じるため、振り子は振動します。ばねの先端に重りを付けた場合、ばねの弾性力による位置エネルギーが復元力を生じることで、重りは振動します。振り子と異なり、後者の場合はばねの伸縮が熱を発生させるため、本質的にエネルギーが散逸します。現実的な振り子の場合、ばねの場合と同様に、細線のわずかな伸縮や変形が熱を発生させるためエネルギーが散逸します。これを避けるため、可能な限り細い線を一体的に物体と接合する必要があります。

*8 重力波望遠鏡

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ことで重力波の到来を観測します。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。日本の大型低温重力波望遠鏡KAGRAは2020年に観測を開始しました。

【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[at]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[at]fris.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構

広報課

Tel: 03-5214-8404

FAX: 03-5214-8432

E-mail: jstkoho[at]jst.go.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

嶋林 ゆう子(しまばやし ゆうこ)

Tel: 03-3512-3531

FAX: 03-3222-2066

E-mail: presto[at]jst.go.jp