

## 原子時計は「時間」の重ね合わせを明らかにできるのか？ 超高精度の原子時計が時間の量子的な性質を観測できる可能性をもつ新理論

### ポイント

- ① 時間の本質は、物理学における最も深遠な問いの一つです。しかし、相対論的な時間の理解と量子物理学との相互作用は、これまで実験的に観測されたことはありませんでした。
- ② 単一の原子において「時間の量子重ね合わせ」が現れ得ることを明らかにし、アインシュタインの古典的な相対性理論を超える観測可能な効果が生じることを示しました。
- ③ 原子時計を用いて時間の量子的性質を実験的に探る新たな道を切り拓き、基礎物理学と超高精度時刻計測の双方に革新をもたらす成果です。

### 概要

時間の本質は、物理学における最も根源的な問いの一つです。本研究成果はこれまで検出が不可能と考えられてきた「時間の量子的性質」が、最先端の原子時計によって観測可能な段階に近づいていることを示しました。

相対性理論によれば、時間の流れは時計の運動や重力の影響を受けます。これに対し量子論は、「時計が量子力学に従う場合、異なる経路の重ね合わせ状態として存在でき、その結果として時間も重ね合わせ状態になる」という新たな視点を加えます。

本研究では、九州大学高等研究院稲盛フロンティアプログラムのジョシュア・フー准教授の研究グループと、米国コロラド州立大学のクリスチャン・サナー助教、米国国立標準技術研究所（NIST）のディートリッヒ・ライブフリート博士及びスティーブンス工科大学のガブリエル・ソルチ博士、イゴール・ピコフスキー助教とで共同研究を行いました。その結果、単一の原子において「時間の重ね合わせ」が理論的に現れ得ることを示し、原子時計の運動を制御する新たな技術により、アインシュタインの古典的相対性理論を超えた新しい効果に対する感度を、従来の100~1000倍に向上できることを明らかにしました。

原子時計は、GPSをはじめとする現代技術を支え、「秒」の定義にも用いられている、人類史上最も精密な時刻計測装置です。本研究は、原子時計を「時間の量子的性質」を探究するための新たな実験基盤として位置づけるものであり、基礎物理学における新しい実験フロンティアを切り拓く成果です。また、次世代原子時計のさらなる高精度化につながる可能性も期待されます。

本研究成果は、4月20日（月）（現地時間）に米国物理学会（American Physical Society）が発行する学術誌 *Physical Review Letters* に掲載されました。



本研究で考察するトラップドイオン原子時計における、古典的、半古典的、および量子的な固有時ダイナミクスの模式図。ここでは、時計のダイナミクスと空間的な相対論効果が干渉する様子を示している。

**研究者からひとこと：**原子時計はすでに多くの分野で実用化されており、社会のさまざまな場面で活用されています。今回の研究により、原子時計が相対性理論と量子力学が交差する領域における基礎物理の探究にも、新たな可能性をもたらすことが示されました。  
(ジョシュア・フー)

## 【研究の背景と経緯】

時間の本質は、物理学における最も深遠な問いの一つです。アインシュタインの相対性理論によれば、時間の進み方は時計の運動や重力の影響によって異なります。一方、量子力学はこれに新たな視点を加えます。すなわち、時計の運動そのものが「重ね合わせ」の状態として存在でき、それに伴って時間の流れ自体も重ね合わせになる可能性があるということです。しかし、時間に対する相対論的な理解と量子力学的な性質がどのように関わり合うのかは、これまで実験によって観測されたことがありませんでした。こうした相互作用を理解することは、アインシュタインの重力理論（一般相対性理論）と量子力学を統合するための重要な一歩になると期待されています。

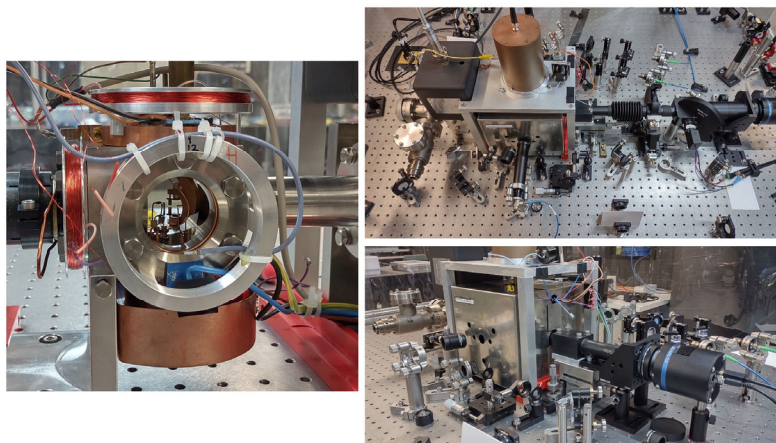
これまで原子時計は、GPSによる測位や国際的な「秒」の定義など、さまざまな実用分野で活用されてきました。しかし、基礎物理学を探究するためのツールとしての可能性は、今まさに開拓され始めたばかりです。記録的な高精度を誇る原子時計は、相対性理論と量子物理学の相互作用を検証するための理想的な実験基盤です。

## 【研究の内容と成果】

本研究では、現在の最先端のトラップドイオン原子時計が、「時間そのものの量子的な性質」を実験的に観測できる領域に入りつつあることを示しました。単一の原子において「時間の量子重ね合わせ」が現れ得ることを明らかにし、アインシュタインの古典的な相対性理論を超える観測可能な効果が生じることを示しています。特に、原子時計の運動がその内部エネルギーと「量子的にもつれ（エンタングルメント）」状態になることが示されました。このもつれの特徴として、時計自身が持つ量子的性質の一部が失われることが予測され、これは最新の実験技術によって検出可能です。原子時計の運動を精密に制御する新しい手法を導入することで、これらの極めて微小な効果に対する感度を従来 $100\sim 1000$ 倍に向上させることに成功しました。

## 【今後の展開】

原子時計は、これまでに人類が開発した中で最も精密な時刻計測装置であり、GPSによる測位から国際単位系における「秒」の定義に至るまで、さまざまな技術を根底から支えています。本研究は、原子時計を「時間の量子的な性質」を探究するための実験基盤として位置づけ、基礎物理学における新たな実験フロンティアを切り拓くものであり次世代原子時計のさらなる高精度化につながる可能性も秘めています。このような実験は、基礎物理学的に重要であるだけでなく、原子時計の動作における根本的な限界を理解する上でも重要な意味を持ちます。



組み立て中の原子時計

### 【謝辞】

本研究はアメリカ国立科学財団 (NSF) (No. 2239498、No. 2409166)、アメリカ航空宇宙局 (NASA)(No. 80NSSC25K7051)、アルフレッド・P・スローン財団「Table-top experiments for fundamental physics」プログラム、ゴードン・アンド・ベティ・ムーア財団、ジョン・テンプレートン財団、サイモンズ財団 (G-2023-21102) バンティング・ポスドク研究員フェローシップ、ノバルティス・サイエンス・スカラーシップから助成を受けたものです。

### 【論文情報】

掲載誌：Physical Review Letters

タイトル：Quantum Signatures of Proper Time in Optical Ion Clocks

著者名：Gabriel Sorci, Joshua Foo, Deitrich Leibfried, Christian Sanner, and Igor Pikovski

D O I : 10.1103/qhj9-pc2b

### 【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 高等研究院 稲盛フロンティアプログラム 准教授 ジョシュア・フー

Mail : [foo.joshua.403@m.kyushu-u.ac.jp](mailto:foo.joshua.403@m.kyushu-u.ac.jp)

<報道に関すること>

九州大学 広報課

T E L : 092-802-2130

Mail : [koho@jimu.kyushu-u.ac.jp](mailto:koho@jimu.kyushu-u.ac.jp)