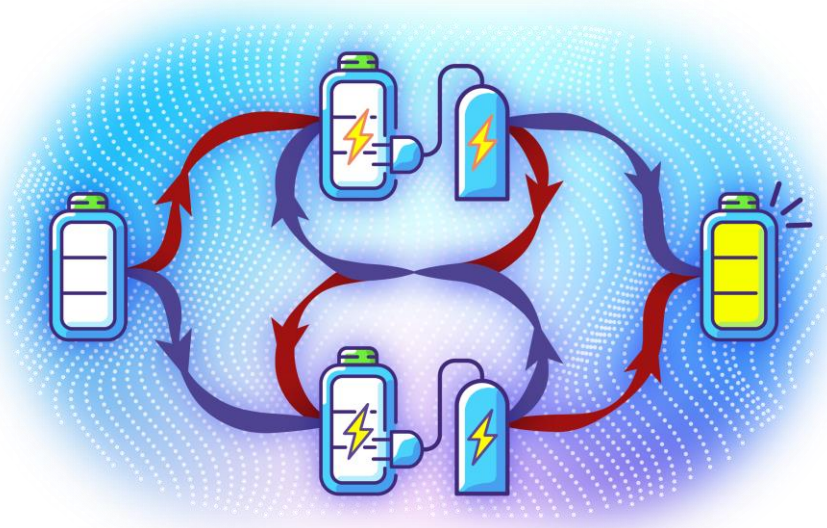


## 因果律の壁を越える！次世代量子バッテリーへの挑戦 ——不確定因果順序が拓く新境地：充電のパラダイムシフトを実証——

### 発表のポイント

- ◆量子衝突モデルにおける不確定因果順序に由来する新たな物理効果を発見しました。また、これを利用した量子バッテリーの充電プロトコルを初めて提案しました。
- ◆さらに、量子光学実験により理論の検証に成功しました。この量子バッテリー充電方式は、既存の方法より優れた性能を示すことを理論と実験の両面から明らかにしました。
- ◆発見した効果は、量子バッテリーに限らず、量子技術分野において量子計算機にかかるエネルギーコストの削減や量子通信の安定性向上など、様々な活用が期待されます。



量子世界の因果順序を活用した効率的な充電方式

### 概要

東京大学大学院情報理工学系研究科の Yuanbo Chen (チェン ユーフォー) 大学院生と長谷川禎彦准教授は量子開放系(注1)の一種である量子衝突モデル(注2)において、不確定因果順序(注3)と呼ばれる新しい因果構造に由来する特異な効果を発見しました。この効果を活用した量子バッテリーの充電プロトコル(図1)を理論的に提案し、その役割と重要性を明らかにしました。一方、共同研究を進めている北京計算科学研究センター(Beijing Computational Science Research Center:CSRC)の Gaoyan Zhu (ガオイエン チュウ) 研究員と Peng Xue (ペン シュエ) 教授は光学実験を行い、我々の理論の検証に成功しました。

これまで、量子系のダイナミクスの具体的な役割は不明でしたが、本研究により、量子衝突モデルにおいてひとつの答えを導くことに成功しました。量子衝突モデルは量子系間のエネルギー転移を記述する物理モデルであり、通常、より多くのエネルギー転移には強い量子系間の相互作用が必要とされています。しかし、今回の発見はこれに反し、弱い相互作用でも強い相互作用と同様の効果をもたらすことが可能であることを示しました。

この物理現象は量子バッテリーの充填において大きな利点となり、従来の限界を超えるエネルギー転移と熱効率の向上を同時に実現することを示します。この研究成果は、量子バッテリーの研究分野における重要な進歩であり、また、量子バッテリーの実装と開発に向けた新たな知見を提供するばかりでなく、様々な量子技術において新たな役割を果たすことが期待されます。

## 発表内容

### 〈研究の背景〉

量子バッテリーは重ね合わせの原理や量子もつれなどの性質を利用したエネルギー貯蔵における最先端の研究として、現在注目を集めています。特に、従来のバッテリー機能を遥かに凌ぐ充填速度や高いキャパシティを実現する可能性を示す理論的な研究が先導しています。これにより、電子デバイスや電気自動車への適用が期待できるからです。しかし、従来のバッテリーと同様に、量子バッテリーの性能にも限界があり、これは量子力学の法則によって制約されています。

一方、近年、従来の量子力学の枠組みを超えて事象の因果順序にも重ね合わせ原理を持ちうるという仮説が提唱されており、量子バッテリーの充填プロセスにおける量子重ね合わせの実現が期待され始めました。我々は、不確定因果順序を導入することで、従来とは一線を画す発展があると確信し、研究を進めてきました。

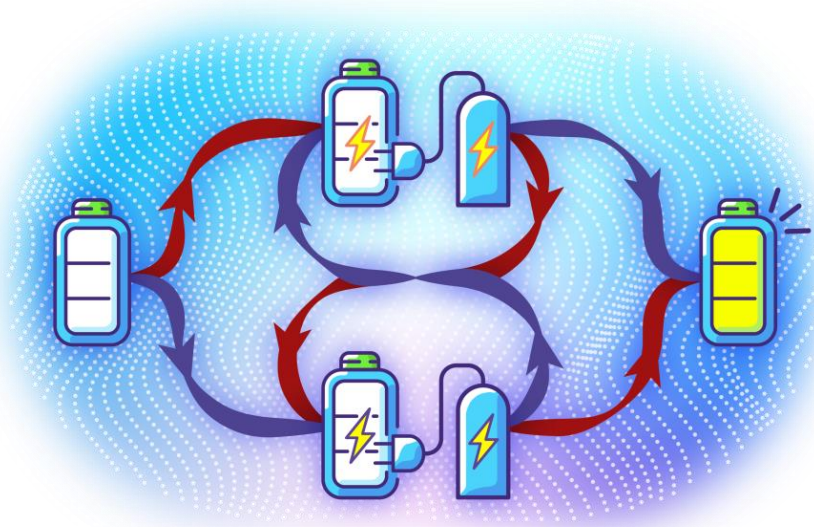


図1：不確定因果順序で実行される量子バッテリーの充填プロセスの様子。古典物理学の世界では、二つのチャージャーは一方が先に実行し、その後もう一方が実行するという因果順序でしか考えられません。一方、量子の世界では、二つの因果順序が同時に成立することが可能になります。

### 〈研究の内容〉

本研究では、量子バッテリーの充填における不確定因果順序が果たす役割を突き止めました。充填プロトコルを考える上でエネルギー転移は極めて重要な要素です。量子開放系の一環である量子衝突モデルを、充填装置（チャージャー）のダイナミクスを生成するモデルとして用い

るプロトコルの構築に成功しました。直感的には、より多くのエネルギー転移を実現するためにより強い相互作用が必要ですが、本研究では、量子衝突モデルのダイナミクスの因果順序が量子の不確定性により、この直感が成り立たなくなることを明らかにしました。これにより、我々は、弱い相互作用を利用して強い相互作用と同様の効果を得ることを可能にする「相互作用の反転効果」（図2）が不確定因果順序のダイナミクスで現れることを見出しました。これによりエネルギー転送を向上させる新たな充填プロトコルの提案が可能になりました。

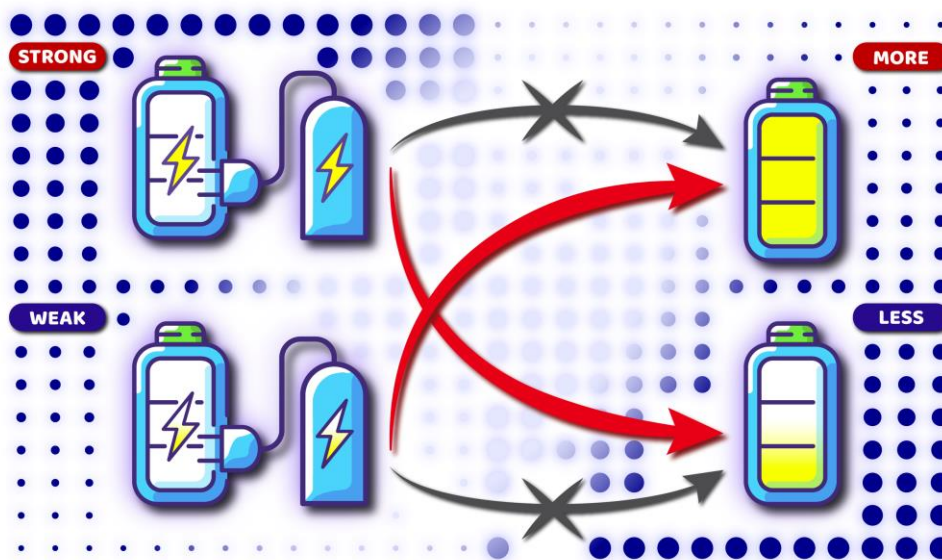


図2：相互作用の反転効果により、弱いチャージャーでも強いチャージャーに等しい効果を得ることが可能になります。

この現象が実際に不確定因果順序に由来するものであることを確かめるため、二つのチャージャーに対して全て可能な接続方式を考慮した比較分析を行い、プロトコルの性能を充填されたエネルギー量と熱効率で評価しました。さらに理論の検証を行うために、量子光学実験（図3）を実施しました。

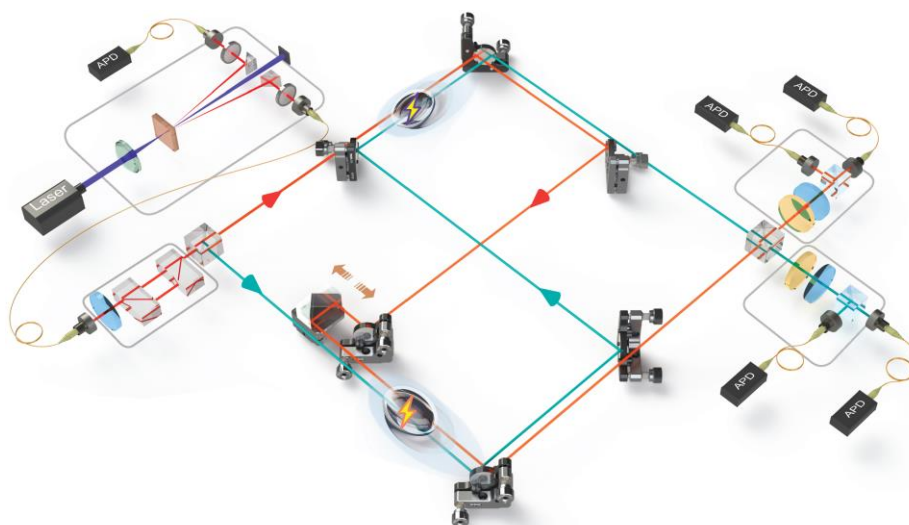


図3：量子光学実験で用いた装置図で、不確定因果順序の充填プロトコルを実現して理論の検証を行う。



今回我々が用いた量子衝突モデルを通じて、エネルギーを蓄積する粒子の初期状態における基底状態の粒子数と励起状態の粒子数が入れ替わる最終状態が、最大のエネルギーを持つことがわかっています。この状態は、充填の観点からは超えられない限界と考えられています。また、この最適なプロセスが伴う熱効率にも、従来の方法では超えられない上限が存在することが知られています。今回提案したプロトコルは、これらの二つの限界を同時に超越することが可能で、さらに相互作用の強さや初期状態に依存しないという重要な利点を有しています。多面的で詳細な実験により、これらの特性を確認することができました。この結果は、量子バッテリーの充填プロセスにおける新たな可能性を示しており、エネルギー転送の効率化に大きく貢献すると考えられ、本プロトコルの有効性を示しています。

加えて、順列および量子的並列という他の可能な接続方式で充填した際の性能と相互作用の依存性について検討しました。この二つの接続方式においては、性能が相互作用の増加とともに向上することが観察されました。しかし、不確定因果順序を用いて充填した場合、この関係性は逆転しました。この比較から、「相互作用の反転効果」という新たな物理現象が不確定因果順序に起因することが明らかであると示すことができました。

#### 〈今後の展望〉

今回、量子バッテリーについて、理論と実験の両面で重要な結果を示すことができました。特に、相互作用の反転効果は、不確定因果順序が量子ダイナミクスに与える独特の影響を示す世界初の証拠となりました。今後、研究面ではこの起源を解き明かすための展開が期待され、さらに、量子バッテリーの実用化や開発に向けた技術開発が期待されます。

### 発表者・研究者等情報

東京大学大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻

チェン ユーフォー (Yuanbo Chen) 博士課程

長谷川 禎彦 准教授

### 論文情報

雑誌名 : Physical Review Letters

題名 : Charging Quantum Batteries via Indefinite Causal Order:  
Theory and Experiment

著者名 : Gaoyan Zhu<sup>+</sup>, Yuanbo Chen<sup>+</sup>, Yoshihiko Hasegawa<sup>\*</sup>, and Peng Xue<sup>\*</sup>

<sup>+</sup> 同等貢献 <sup>\*</sup> 責任著者

DOI: 10.1103/PhysRevLett.131.240401

URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.240401>

### 研究助成

本研究は、科研費「精度の量子熱力学への統合的統計アプローチ (課題番号: 22H03659)」、国立研究開発法人科学技術振興機構の次世代研究者挑戦的研究プログラム「SPRING-GX (課題番号: JPMJSP210)」の支援により実施されました。

### 用語解説

(注 1) 量子開放系: 量子開放系はその外部環境と相互作用し、エネルギーや情報を交換する量子系のことです。

(注 2) 量子衝突モデル：量子衝突モデルは、量子系が一連の短く離散的な相互作用、つまり「衝突」として環境とどのように相互作用するかを記述するための枠組みです。衝突は量子系の状態に影響を与え、エネルギーの変化などを引き起こします。

(注 3) 不確定因果順序：古典物理学の世界では、「A が B を起こす」と「B が A を起こす」のどちらかしか成立しませんが、不確定因果順序ではこのどちらも同時に成立します。これは従来の量子力学での事象間の因果順序があらかじめ決定している仮定と異なります。