

2種類の同位体が拓く量子ビット読み出しの新展開 —中性原子型量子コンピュータにおける課題を克服—

概要

量子力学の原理を用いて計算を行う量子コンピュータは、特定の問題を現在のコンピュータよりも高速に解くことができるとされ、盛んに研究開発が行われています。量子コンピュータの様々な実装方式の中でも、中性冷却原子^{*1}を用いた方式は大規模化が容易であることや量子ビット間の接続性の良さから近年注目度が高まっています。しかし、この系では大規模な量子計算に必要な量子誤り訂正を行うための補助的な量子ビット^{*2}の読み出しを、データを保持する量子ビットに影響を与えずに行うことが困難でした。

中村勇真 理学研究科博士課程学生、高橋義朗 同教授らの研究グループは、量子ビットとして優れた性質を持つイッテルビウム原子の2種類の同位体をそれぞれ補助量子ビットおよびデータ量子ビットとして用いる手法を開発しました。この方法により、データ量子ビットに影響を与えない補助量子ビットの読み出しが可能になることを実証しました。これにより中性原子型量子コンピュータにおいて量子誤り訂正の実装が容易になり、量子コンピュータの実用化が加速すると期待されます。

本研究成果は、2024年12月10日に、米国の国際学術誌「*Physical Review X*」誌にオンライン掲載されました。

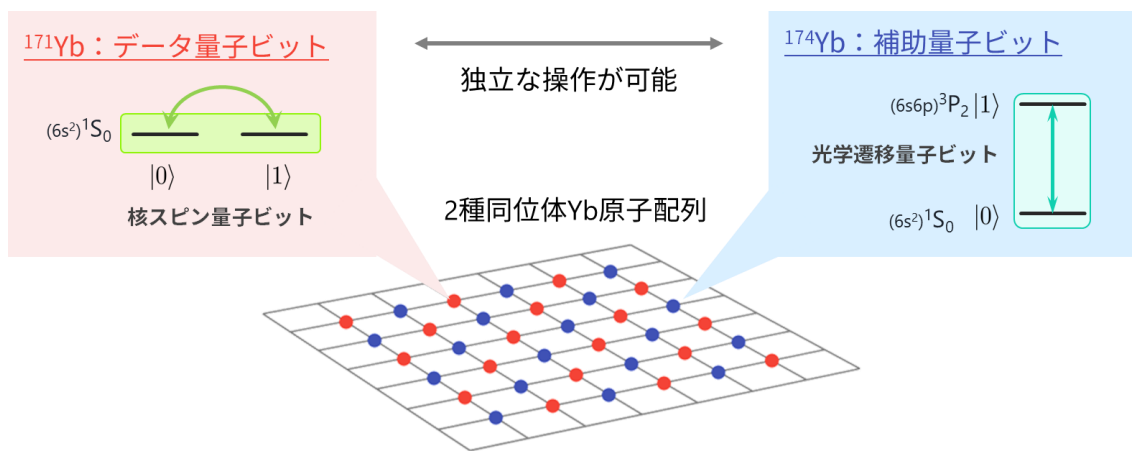


図1：本研究の概要図。イッテルビウム(Yb)原子の2種類の同位体を一つの光ピンセット配列に収め、それぞれをデータ量子ビット、補助量子ビットとして用いる。両者の間には同位体シフトと呼ばれる遷移周波数の差があるため、両者を独立に制御し読み出すことが可能になる。これによって、量子誤り訂正に必要な補助量子ビットの読み出しを、データ量子ビットに悪影響を及ぼさずに行うことができる。

1. 背景

現在盛んに研究開発が行われている量子コンピュータを実用的で大規模な問題へ適用するためには、計算の途中に生じたエラーを訂正する「量子誤り訂正」と呼ばれる操作を行わなければなりません。そのためには、データを保持している量子ビットを乱さずに誤り訂正に必要な補助量子ビットを読み出す必要があります。

近年急速に発展している中性原子型量子コンピュータは、大規模化の容易さや量子ビットの高い接続性から注目を集めています。しかしながら、量子誤り訂正の実行においては他の方式に比べて実装例が少ないのが現状です。これは上記の読み出しが困難であることに起因します。これまで様々な解決策が提案されてきましたが、それらのほとんどが多少のエラーを伴ってしまう操作が必要なものでした。先行研究の中で唯一、2種類のアルカリ原子を用いた系がそのような操作なしで補助量子ビットの読み出しを行うことができることを実証しましたが、読み出しが破壊的^{*3}であるために量子ビットを継続して使い続けられないことや、量子ビットのコヒーレンス時間^{*4}が数ミリ秒程度と短いことが実用的な量子計算に向けた課題として残ったままでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、イッテルビウム (Yb) 原子の2種類の同位体 (¹⁷¹Yb, ¹⁷⁴Yb) を同時に光ピンセット配列^{*5}に用意し、それぞれをデータ量子ビット、補助量子ビットとして用いることで上記の課題解決を試みました。同位体の間には同位体シフトと呼ばれる遷移周波数の差があり、補助量子ビットの読み出しに用いる光がデータ量子ビットに対しては非共鳴であるため影響を与えないと期待されます。さらに、¹⁷¹Yb が持つ核スピン量子ビットはコヒーレンス時間が数秒程度と非常に長く、理想的なデータ量子ビットとして活用できます。また同時に ¹⁷⁴Yb が持つ光学遷移量子ビットは読み出しが非破壊的であるため、繰り返し測定が可能な補助量子ビットとして活用できます。したがって、2種類の Yb 原子同位体からなる系は、先行研究のアルカリ原子系の課題を克服する理想的な系となっています。

2 種同位体 Yb 原子配列の作成

私たちは初めに2種同位体 Yb 原子配列の作成を試みました。まず、2つの同位体を同時にレーザー冷却し、光ピンセット配列にトラップします。その後、それぞれの同位体の原子の光学遷移に対して共鳴するレーザー光 (波長 556 nm) を照射することで光誘起衝突と呼ばれる分子を生成する機構により2つの原子を同時にトラップから逃がす過程を引き起こし、各光ピンセットに含まれる原子の個数が0または1であるような状況にします。最後にそれぞれの同位体の原子の光学遷移に対して共鳴する波長 399 nm の光を照射して、原子からの散乱光をカメラで撮影します。その結果が図 2 (a)です。この時点では原子はランダムに光ピンセット配列にトラップされています。さらに、その状態から撮影結果をもとに、動的な光ピンセットを用いて原子を再配列し欠損がない原子配列を作成することに成功しました (図 2 (b))。

補助量子ビットの読み出しが与える影響の評価

次に補助量子ビット (¹⁷⁴Yb) の読み出しがデータ量子ビット (¹⁷¹Yb) のコヒーレンスにどれくらい影響を与えるかを評価しました。そのために、2種同位体 Yb 原子アレイを用意し、スピンエコーシーケンスと呼ばれる方法でデータ量子ビットのコヒーレンスを評価しました。その際、補助量子ビットの読み出しに用いる光 (プローブ光) を照射しながらコヒーレンスを評価した場合と照射せずに評価した場合を比較することで、読み出しが与える影響を定量的に解析しました (図 3 (a))。その結果、プローブ光を照射した状況でもデータ量子ビットのコヒーレンスの $99.1 \pm 1.8\%$ が保たれることが分かり、補助量子ビットの読み出しはデータ量子ビットに影響をほとんど与えないことを実証できました。さらに、この読み出し忠実度は 99.92%であり、量子誤り訂正に必要な性能を満たしていることも示すことができました (図 3 (b))。

3. 波及効果、今後の予定

本研究では、2種同位体 Yb 原子配列において、量子誤り訂正に必要な性能を満たした補助量子ビットの読み出しを、技術的に難易度の高い操作なしでデータ量子ビットに影響を与えずに行うことが可能であることを実証しました。今後は、同位体間での量子もつれ生成を行い、実際に量子誤り訂正の実装を目指します。本成果が中性原子型量子コンピュータにおける量子誤り訂正を容易にし、量子コンピュータの実用化が加速することを期待します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費 (No. JP17H06138, No. JP18H05405, No. JP18H05228, No. JP21H01014, No. JP22K20356, No. 22KJ1949)、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム (No. JPMJSP2110)、JST さきがけ (No. JPMJPR23F5)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (No. JPMJCR1673, No. JPMJCR23I3)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP (No. JPMXS0118069021)、JST ムーンショット型研究開発事業 (No. JPMJMS2268, No. JPMJMS2269) の助成を受けて行われました。

<用語解説>

- ※1 **中性冷却原子**：真空装置内でレーザー光によって冷却された中性原子のこと。外部環境から隔離され良い制御性を持つため、量子シミュレーションや量子コンピューティングの良いプラットフォームとなる。
- ※2 **量子ビット**：量子計算で情報を保持する最小単位。0と1の2つの状態をとる。
- ※3 **読み出しが破壊的**：アルカリ原子の典型的な読み出しでは、量子ビットの状態を区別するために1の状態である原子をロスさせる手法をとる。この手法では読み出しのたびに一定の量子ビットが失われてしまう。
- ※4 **コヒーレンス時間**：量子ビットが重ね合わせ状態などの量子的な性質を保っていられる時間。
- ※5 **光ピンセット配列**：1 μm 以下程度まで細く絞られたレーザー光（光ピンセット）が規則的に並んだ配列のこと。各光ピンセットで単一原子をトラップすることができる。

<研究者のコメント>

「中性原子型量子コンピュータは他の系に比べて歴史が浅いですが、非常に競争が激しく日進月歩で発展しています。そのような中でも実用化において重要な鍵である量子誤り訂正の実現を加速させられる貢献ができたことをうれしく思います。」（中村勇真）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Hybrid Atom Tweezer Array of Nuclear Spin and Optical Clock Qubits

(核スピン量子ビットおよび光学遷移量子ビットのハイブリッド原子配列)

著者：Yuma Nakamura, Toshi Kusano, Rei Yokoyama, Keito Saito, Koichiro Higashi, Naoya Ozawa, Tetsushi Takano, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi

掲載誌：Physical Review X DOI：10.1103/PhysRevX.14.041062

< 参考図表 >

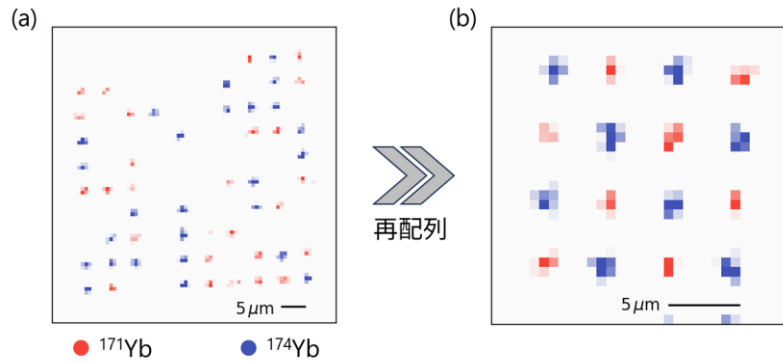


図2：2種 Yb 原子配列。(a)10 行 10 列の光ピンセット配列にランダムにトラップされた Yb 原子。赤色の点が ^{171}Yb 、青色の点が ^{174}Yb の単一原子を表す。(b)動的な光ピンセットによってランダムな原子配列から再配列された無欠損原子配列。

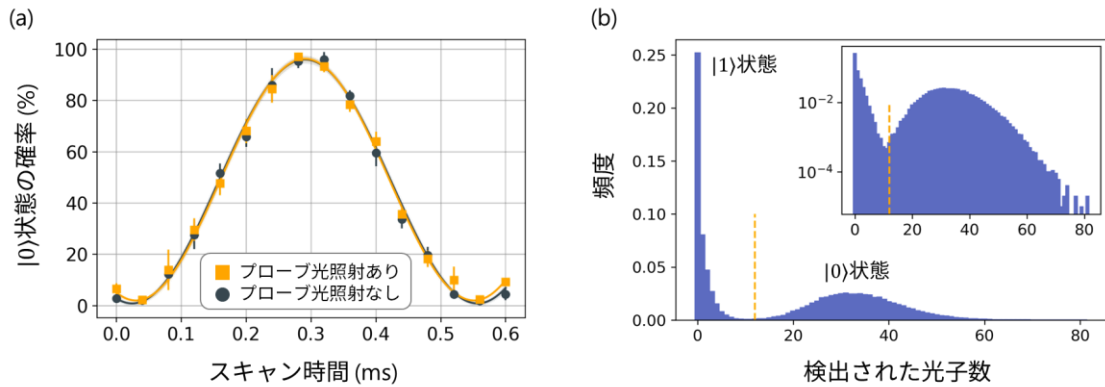


図3：補助量子ビットの読み出しが与える影響の評価。(a)スピンエコーシーケンスにより測定されたデータ量子ビットのコヒーレンス。黒点がプローブ光を照射した場合、黄色点が照射しなかった場合のコヒーレンス測定値。振幅の大きさがコヒーレンスを表す。両者の振幅の比率は $99.1 \pm 1.8\%$ であり、プローブ光照射はデータ量子ビットのコヒーレンスにほとんど影響を与えないことが明らかになった。(b)プローブ光照射中に補助量子ビットから得られた散乱光子数のヒストグラム。量子ビットの状態によって散乱光子数が異なるため、状態を区別することができる。図中の黄色点線は状態を区別するための閾値。ヒストグラムでそれぞれのピークが明瞭に分離されており、正しく状態を読み出せる確率は 99.92% であることが分かった。