

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

研究課題名	ホログラフィックに制御された光ポテンシャルによる大規模2次元量子計算機の実現
研究機関・部局・職名	東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
氏名	上妻 幹旺

【研究目的】

古典計算機では手が届かない領域の計算を、短時間で完遂する力をもつのが量子計算機である。計算能力の質的变化が魅力となり、これまで理論及び実験研究が精力的になされてきた。この10年の間に、量子計算を行う候補として、光子、原子、分子、イオン、超伝導素子、量子ドット、など多くのものが現れたが、実験は難を極め、ごく少数の量子ビット間における演算を実現するにとどまっている。しかし冷静に状況を観察してみると、多くの系で地道な基礎研究がなされた結果、どの系が演算回数を飛躍的に伸ばすことができるか、またどの計算方法が現実的であるか、などがかなり明確になってきた。さらに量子エレクトロニクス技術の目覚ましい進展に後押しされ、大規模量子計算が実現できる可能性が今まさに萌芽しているといえる。

本研究は、光学顕微鏡の分解能をその屈折率分だけ増大させる力をもつ固浸レンズの表面から約 $1\mu\text{m}$ 離れた平面内に、光ポテンシャルを駆使して中性イッテルビウム(Yb)原子集団を基盤の目状に配置し、個々の原子を量子ビットとして起用することで、大規模な量子計算を実現することを目指す。これまでも中性原子を用いた量子計算に関する実験研究がなされてきたが、その多くが基底状態に電子性のスピンを有するアルカリ原子を利用していた。電子性スピンはボーア磁子程度の磁気モーメントを有するため、環境磁場の影響でスピンの回転し、長時間にわたってスピン情報を保持することができないという欠点をもつ。これに対してYb原子は、基底状態が 1S_0 、すなわち電子性スピンのキャンセルしており、核スピンしか顕わにならない。核スピンに対応する磁気モーメントの大きさは核磁子程度、つまりボーア磁子の2000分の1であるため、スピン情報を長時間にわたって保持することが可能となるのである。

【総合評価】

<input type="radio"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>研究代表者は、核スピンを用いた2次元量子縮退系の量子計算研究の世界的な先駆者であり、本研究課題にて固浸レンズ一体型超高真空ガラスセルを新たに構築し、2次元系の大規模量子計算の実現に向けて着実に研究を前進させた。本補助事業期間内にどこまでが実現し、その先に本研究で目指している目標を実現するまでの道筋も見通せており、本研究目的の達成はほぼなされた。</p> <p>量子計算というチャレンジングであるが夢のある研究に前向きに取り組み、東日本大震災等だけでなく、研究上の予期せぬ困難にも前向きに取り組みハイレベルで世界初の成果を出していることも高く評価できる。知的財産に関しては、現段階における特許出願は難しいかもしれないが、何らかの関連技術への応用（量子計測など）も含めて、もう少し前向きに考えてほしい。また成果を展示会、プレスリリースなどを通じて、より積極的に成果をアピールしてほしい。</p>

② 目的の達成状況
<p>・所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/> 全て達成された ・ <input type="checkbox"/> 一部達成された ・ <input type="checkbox"/> 達成されなかった</p> <p>本研究課題では、光学顕微鏡の分解能を回折限界以上に高めることができる固浸レンズを用い、レンズ表面から1μm程度離れた平面内に、中性Yb原子集団をアレイ上に配列させ、100qubitを超える大規模量子計算を実現することを目的としている。これまでに、Yb原子の2次元量子縮退系を世界で初めて実現しており、大きな成果であった。今後の更なる発展が大いに期待できる。</p>

③ 研究の成果
<p>・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が <input checked="" type="checkbox"/> ある ・ <input type="checkbox"/> ない</p> <p>・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が <input checked="" type="checkbox"/> 創出された ・ <input type="checkbox"/> 創出されなかった</p> <p>・当初の目的の他に得られた成果が <input checked="" type="checkbox"/> ある ・ <input type="checkbox"/> ない</p> <p>論文数は少ないもののPRL誌などの高いIFの雑誌に掲載されるだけでなく、量子計算の実証自体が非常にチャレンジングでその一步一步のマイルストーンをきっちりすることにも世界初の言葉が付くほどこの分野は難しい。単一量子ドットの可視化など非常に高い先進性、優位性がある。特に2次元系の構築が構築された明確な証拠を得ることができたことは非常に先進性がある。</p> <p>量子計算の実現という視点からはまず2次元系の構築が構築された明確な証拠を得ることができたことは当然大きなブレークスルーである。続けて新しい蒸発冷却の理論的提案と基礎的なデモンストレーションなどフェルミオンに関する研究も特筆できる。</p> <p>これだけでなく研究者自身も述べているがマクロな量子系をマイクロスコピックに探索するという視点でもブレークスルーとなる可能性がある。チャレンジングでギャングブルライクな側面がある研究であるが、成果イコールブレークスルーとなる良い面</p>

もある。研究の進展に伴い当初予期されなかった問題点に対して、明確化された技術的課題の解決の過程で得られた新たなアイデアに基づいて、新規の実験手法の開拓を行った点は特記すべき成果である。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

2次元系の構築が構築された明確な証拠を得ることができたことは量子計算実現にとって当然大きなブレークスルーである。続けて新しい蒸発冷却の理論的提案と基礎的なデモンストレーションなどフェルミオンに関する研究、そして Yb の光格子中の個々の原子の蛍光撮像など、これらの成果は量子計算の実現、量子物理の進展に大きく寄与できる。装置作りが中心の仕事であるので論文数は稼げないが、内容のインパクトの強さが重要であり、十分に関連分野で世界的にトップレベルの位置にあると思われる。

社会的、経済的課題の解決への貢献については、量子計算による高速計算などの利点が社会的にはわかっているものの、量子計算が実現しただけでは不十分で、応用出口を明確にし、アーキテクチャーの構築などまだまだたくさんやることがある。そのため、さらに膨大な開発の時間がかかると思われるので、現段階では近未来の社会的、経済的課題の解決への貢献やや弱い。特に量子コンピューターは特殊な系であり既存のシリコンコンピューターと違うため実用はまだ数十年先の遠い先であると思われる、やや遠い将来に社会的・経済的課題への貢献が見込まれる。しかし、それ以外にも近い将来に応用可能な領域があると思われる(単純な量子効果を利用した高密度メモリーなど)、この成果を見た企業の研究者などとの異業種の情報交換などでさらに幅を広げることにはできないものだろうか。そのようにすれば本研究課題の成果が社会的、経済的課題の解決への貢献がさらに早くなる可能性もある。あるいは高感度計測、新型のイメージング法などの視点でもバイオ、材料科学などを考慮した展開によってはより近い将来の社会貢献が可能であろう。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

研究計画は計画がうまくいかなかった場合に、その場その場で適切に見直されており、その見直し時点から目的達成に向けてきちんとシナリオを描き、常に微修正をかけながら着実に研究を進められた。例えばなぜ Rb ではうまくいくのに Yb でうまくいかなかったのか、Yb での実験成功のために3次元シミュレーションなどを行い、成功させるためのポイントを押さえた。このような柔軟性は高く評価できる。ただ実施体制については適切であるものの、研究の加速のためにマンパワーを増やせないかという気がする。マネジメント、助成金の有効活用は問題なく、設備品、旅費など研究の目的にしたがって予算執行が行われた。