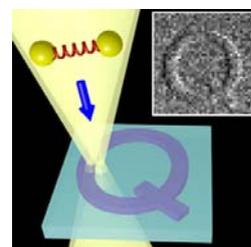




古典理論の限界を超えた感度をもつ光学顕微鏡を実現 量子コンピュータの原理を応用

研究成果のポイント

- ・世界で初めて、「量子もつれ光」を用いた顕微鏡を実現。
- ・従来の光の限界を、1.35倍超える測定精度を達成。
- ・生物学、医学など幅広い分野への応用が期待。



研究成果の概要

光学顕微鏡の感度には、標準量子限界¹⁾と呼ばれる限界が存在します。北海道大学電子科学研究所の竹内繁樹教授(兼大阪大学産業科学研究所 招へい教授)、小野貴史博士研究員(同連携推進員)らは、量子力学的にもつれあった光²⁾を用いて、世界で初めて、この限界を超えた感度をもつ「量子もつれ顕微鏡」を実現しました。本研究の成果により、生体細胞などをより高い精度で観測することが可能になり、生物学、医学などをはじめ幅広い分野への応用が期待されます。

論文発表の概要

研究論文名：An Entanglement-Enhanced Microscope (もつれ合いによって増強された顕微鏡)
著者：氏名(所属)：小野貴史、岡本亮、竹内繁樹(北海道大学電子科学研究所・大阪大学産業科学研究所)
公表雑誌：Nature Communications
公表日：日本時間(現地時間)2013年9月12日(木)午後6時(英国時間9月12日(木)午前10時)

研究成果の概要

(背景)

光学顕微鏡のなかでも、微分干渉顕微鏡³⁾は、対象物を染色等することなく、そのまま非侵襲で観察・計測する手段として、生物学や医学などで広く用いられています。その顕微鏡の深さ方向分解能や計測精度は、標準量子限界と呼ばれる、光の古典理論によって決まる信号雑音比で決まっています。その限界の下では、より高い深さの分解能や計測精度を得るためには、より強い光を当てるしか方法がありません。強い光を照射すると、対象サンプルの損傷などの影響を与えるため、重大な問題

となっていました。

(研究手法)

私たちの研究グループは、量子力学的な相関を持った光子⁴⁾を用いる事で、この標準量子限界を超えた位相測定が可能であるという原理検証実験に2007年に成功(Science)、その成果は、サイエンティフィックアメリカン誌に同年の世界ベスト50研究に選ばれるなど注目されました。そこで、この量子もつれ光子を微分干渉顕微鏡の照明光として利用することで、標準量子限界を突破することを発案しました。

(研究成果)

我々は、光量子コンピュータの研究で培った、良質な量子もつれ光子対源などの技術を用い、「量子もつれ顕微鏡」を世界で初めて実現しました。その顕微鏡を用い、ガラス基盤の表面に、原子100個程度の厚みで浮き彫りされた「Q」という文字の観察を行った結果、通常の光を用いた観察(標準量子限界)に比べ、1.35倍の信号雑音比を達成しました。

(今後への期待)

今後、より多数の光子のもつれ状態を実現することで、微分干渉顕微鏡の「感度」を、標準量子限界を大きく超えていくことが可能です。将来的には、生体細胞内部のわずかな物質分布の変化や、蛋白質結晶の結晶化過程の解明など、これまで感度が不足し観察・測定できなかったさまざまな課題への応用が期待されます。また、現在急激に発展している、量子コンピュータ⁵⁾に代表される量子情報技術の、より広範な分野への応用のさきがけでもあります。

本研究は、内閣府/日本学術振興会(最先端研究開発支援プログラム「量子情報処理」)、日本学術振興会(新学術領域研究)、科学技術振興機構(戦略的創造研究推進事業)、科学研究費補助金、科学技術振興調整費などの支援により行われました。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学電子科学研究所・教授 竹内 繁樹(たけうち しげき)

TEL: 06-6879-8548 FAX: 06-6876-3448 E-mail: takeuchi@es.hokudai.ac.jp

ホームページ: <http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html>

【用語解説】

1) 標準量子限界：

レーザー光などのいわゆる「古典光」を用いた場合、光位相の測定精度はその光に含まれる光子数(=光強度) n に対して $1/\sqrt{n}$ が限界であり、これを「標準量子限界」と呼ぶ。これは、測定を n 回行うと、その統計誤差が \sqrt{n} で与えられる事に対応している。この標準量子限界が存在するため、一般により精度を上げるには、入射光強度を増大させるか、測定時間を増やすしかなかった。しかし、一般にはその両者とも技術的な限界があり、それらにより決まる「標準量子限界」により得られる精度が制限されている。

2) 量子もつれ合い：

量子もつれあい(Quantum Entanglement)とは、2つの異なるシステム間で相関した状態が2つ以上あり、それらが(量子において複数の状態が同時に成立する)量子重ね合わせ状態にあることを言う。例えば今回の研究で用いた2光子もつれ合い状態とは、「干渉計の一方の経路(A)に2光子状態が存在し、他方の経路(B)には光子がない」という状態と、「干渉計の一方の経路(A)には光子がなく、他方の経路(B)に2光子状態が存在する」という、全く異なる2つの状態の量子重ね合わせ状態である。

3) 微分干渉顕微鏡 :

サンプルに照射した複数の光線の位相差を可視化する顕微鏡。サンプルを、非染色・無侵襲的に観察することができるため、生物細胞や、蛋白質結晶、ゲルなどの透明物質の観察によく用いられる。また、その位相差像から、内部の物質の密度情報なども得ることができる。

4) 光子 :

光のエネルギーの最小単位で、素粒子の1つ。1ワットの光（可視光）は、毎秒約 10^{19} 乗個の光子から出来ている。

5) 量子コンピュータ :

量子力学的な重ね合わせの原理を利用して、莫大な数の並列演算を実施する、まったく新しい原理に基づく計算機。因数分解など、既存のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて全く解けない問題を解くことができるとして、注目されている。

【補足図】

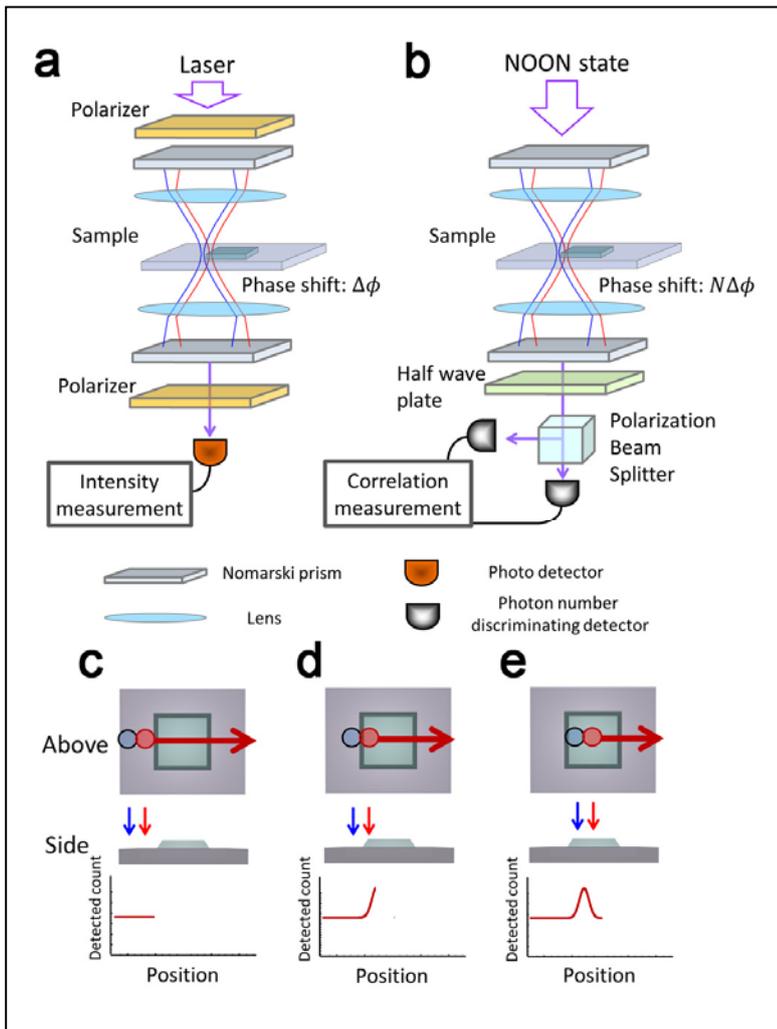


図 1 (a) 微分干渉顕微鏡。偏光プリズムによって、光を2つの偏光（赤：垂直偏光 青：水平偏光）の光線に分離、その2つの光がサンプルのわずかに異なる点を通ります。それら2つの光線を、再度偏光プリズムで合波すると、古典的な光の干渉により、その2つの光線の光路長の差を検知することが可能です。ただ

し、その精度には、標準量子限界とよばれる古典理論による限界が存在します。(b) 量子もつれ顕微鏡。先ほどの普通の光の代わりに、「垂直偏光が2光子存在」と「水平偏光が2光子存在」という量子もつれ光を光源として利用します。すると、偏光プリズムで合波した際に生じる量子干渉信号は、光路長の差に対する信号の変化が、通常の光の場合よりもより鋭敏になります。その結果、古典理論による限界を超えた精度を達成することが可能になります。(c)–(e) 微分干渉顕微鏡および量子もつれ顕微鏡での、信号取得の様子。2つの光線が同じ厚みを通る(c, e)場合に対し、異なる厚み(d)を通る場合に信号が変化します。

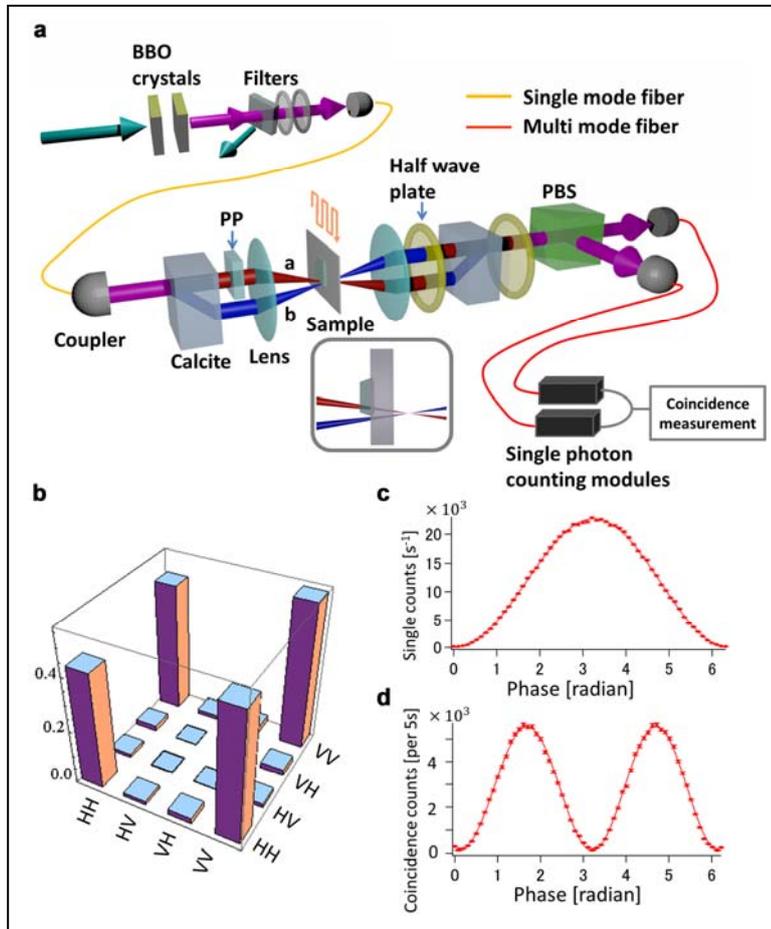


図2 実験装置図。(a) ポンプ光（水色）によって励起された、2枚のホウ酸バリウム結晶(BBO)のそれぞれから、量子もつれ光子対が発生します。発生した量子もつれ光子対は、光ファイバによって微分干渉顕微鏡部に導入されます。微分干渉顕微鏡部では、方解石（カルサイト）を用いて偏光成分ごとに2つの光路に分離され、サンプルに入射されます。サンプルを透過した量子もつれ光は、方解石によって合波されたのち、半波長板と偏光ビームスプリッター(PBS)によってその2光子量子干渉が生じます。その結果を2台の光子検出器によって同時係数します。(b) 発生した量子もつれ光の、量子トモグラフィ結果。良質なもつれ光子対が生成していることが分かります。(c) 微分干渉顕微鏡部での1光子干渉結果。(d) 微分干渉顕微鏡部での2光子量子干渉結果。

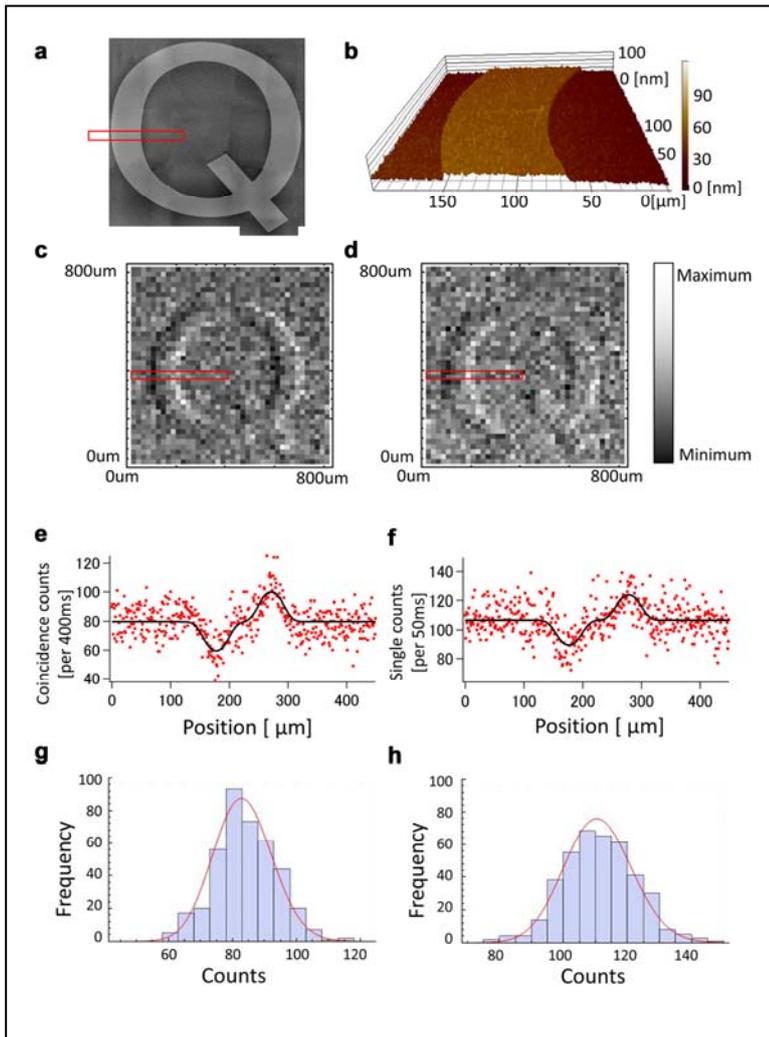


図3 実験結果。(a)観察に用いたサンプルの原子間力顕微鏡像。ガラス基盤上に、Qの字が、厚さ17ナノメートル（ナノメートルは、100万分の1ミリメートル）浮き彫りにされています。(b)図(a)の赤枠線で囲んだ部分を断面方向について画像化したものです。(c)量子もつれ光を用いて取得した画像。同じ光量の、通常の光を用いて得た画像(d)と比較し、Qの字の輪郭がはっきりと確認できます。(e, f)図c, dの赤い枠線で囲んだ部分のデータ強度分布をグラフ化したものです。黒線は、理論的に得られる平均カウント数です。(g, h)理論値からのずれをヒストグラム化したものです。量子もつれ顕微鏡(g)のヒストグラムは、通常の光を用いた場合(h)にくらべて分散が小さく、より高い信号雑音比が得られていることが分かります。