

バイオイメージングのコントラストと解像度を量子増強するスクイズド光

光子間の量子相関を使えば、生体顕微鏡使用アプリケーションにおけるショット雑音や回折限界を超えることができる。生物学的な細胞内構造の物理的サイズは可視光の回折限界よりもはるかに小さいので、量子増強イメージング法を使ったサブ回折限界結像が可能である。

原理証明量子増強実験でエンタングルメント光子を使ったイメージング改善が示されたが、残念ながら、エンタングルメント光子源のパワーレベルは低く、そのような実験もまた回折限界の制約を残したままであった。オーストラリアのクイーンズランド大学(University of Queensland)とオーストラリア国立大学(Australian National University)の研究チームは、その代わりに、光のスクイズド状態を使って生物学的構造のサブ回折限界イメージングを実現した^{(1), (2)}。

スクイズド光の発生

スクイズド光は、その要素(振幅または位相)の1つの雑音が標準量子限界以下となる、非古典的な光の状態である。換言すれば、その光で測定される光電流は非常に低く、古典的なフォトンから予測される雑音よりもさらに低いということだ。さらに、スクイズド光は、エンタングルメント光子源とは異なり、画像コントラストを改善するために任意のパワーレベルの光源を使って発生させることもできる。

酵母細胞内の粒子を追跡する実験装置では、スクイズド光を生成するための振幅スクイズド局部発振器と暗

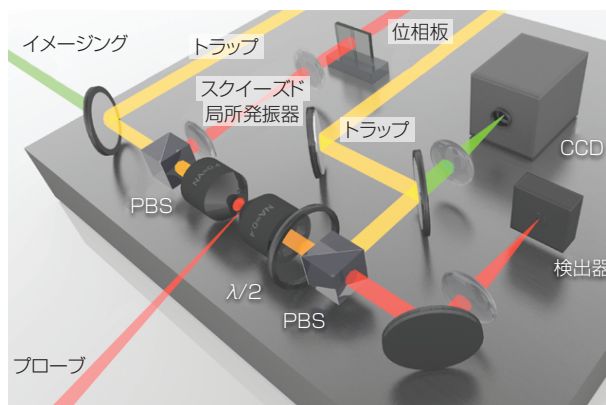


図1 酵母細胞内の細胞内構造を追跡し、画像化するための実験装置は、局部発振器からの振幅スクイズド光とプローブ光源を使用する。粒子はトラッピングフィールド(黄色)によって操作され、イメージングフィールド(緑)によってCCDカメラ上に可視化される。PBS=偏光ビームスプリッタ; λ/2=半波長板。(資料提供: クイーンズランド大学)

視野照明を提供する振幅変調プローブを使って、プローブ散乱光と局部発振器との間の干渉信号を介して粒子を追跡した(図1)。生きた酵母細胞内の粒子のリアルタイム粘弾性測定によって、コヒーレントなレーザー光使用よりも64%速い収集速度で、細胞の構造と機能に関する情報を得た。健康あるいは癌化した細胞を識別することもできた。

光子力顕微鏡

粘弾性測定を越えて、スクイズド光は、ナノ粒子の熱振動が周囲粒子に与える影響の追跡にも利用でき、10nm程度の小さい細胞内構造についての局所情報を提供する。その1つ、いわゆる量子増強光子力顕微鏡法(PFM)では、原子間力顕微鏡(AFM)イメージング法においてカンチレバーチップが目的物を走査するのと同じ機能を、他の細胞内構造と相互作用するナノ粒子が果たす。ナノ粒子がその環境を探索するように、細胞内構造はナノ粒子の熱振動に測定可能な影響を与える。熱運動のプロファイルをさまざまな位置でマッピングすることによって、全空

間プロファイルが構成される。

これまでのところ、スクイズド光研究では、1次元の粒子追跡による物理情報だけしか得られていない。このことが、従来のコヒーレントなレーザー光イメージングに比べて解像度が14%高いとはいえ、全画像の再構成を妨げている。「このことから、われわれの技術の明瞭な将来展望と、真に競争力を高めるために必要な手順が明確になった」と、クイーンズランド大学のポスドク研究員マイケル・テイラー氏(Michael Taylor)は語っている。「われわれはすでに設計を改善し、三次元(3D)撮像能力の開発に取り組み始めた。成功すればサブナノメートルの分解能での3D画像化が可能であり、かつてない機能が実現されるであろう」と付け加えた。(Gail Overton)

参考文献

- (1) Michael Taylor et al., "Squeezed light pushes the quantum limit in biological microscopy," SPIE Newsroom online (June 29, 2014); doi:10.1117/2.1201406.005506.
- (2) Michael Taylor et al., Nat. Photonics 7, 229-233 (2013).