

- スクィーズド光の世界記録を更新
～量子計算や超高感度計測の実現へ向けて大きく前進～
- 平成18年5月26日

独立行政法人情報通信研究機構(以下NICT。理事長:長尾 真)、東京大学(総長:小宮山 宏)、慶應義塾大学(塾長:安西 祐一郎)の共同研究チームは、光の量子揺らぎを真空レベルの -7.2dB (約20%)まで抑圧すること(スクィージング)に成功し、これまでの世界記録 -6.0dB (約25%)を14年ぶりに塗り替えました。今回開発した装置の最適化で -10dB (10%)のスクィージングレベルの達成も原理的に可能で、今後の量子計算*1や超高感度計測の実現に向けた大きな一歩となります。

【背景】

レーザー光の持つ量子揺らぎを特定の位相領域で人為的に抑圧した光はスクィーズド光と呼ばれ、超並列計算を可能とする量子計算や従来限界を超える超高感度計測を実現する上で重要な光源です。通常、ポンプ光と呼ばれる強い光を特殊な結晶に当てて、波長が2倍の光に変換(パラメトリック下方変換*2)することによって生成します。スクィージングレベルは、非線形相互作用係数が大きい結晶を使って、ポンプ光強度を強くするほど高くすることができます。しかし、これまで使われてきた結晶では、ポンプ光が誘起する損失のためポンプ光強度を上げててもスクィージングレベルが頭打ちとなるため、1992年にカリフォルニア工科大学で達成された -6.0dB を長らく超えることができませんでした。

【本研究成果の概要】

今回の成果は、擬似位相整合構造を持つポタシウムチタニルフォスフォレート結晶(KTiOPO₄)を用いてポンプ光誘起性損失が極めて低いパラメトリック発振器を開発し、新たなスクィーズド光源の技術に道を開いたものです。

スクィージングは、ある特定の位相領域(時間間隔)で起こるため、その効果を活かすためには観測のタイミングを最適な位相領域に保持(位相ロック)する必要があります。今回の実験では、カリフォルニア工科大学の実験と同じ430nm帯のポンプ光を用いて860nm帯でスクィーズド光を生成し、位相のぶれを4度以下に抑えて安定な位相ロックのもとで -7.2dB という世界最高のスクィージングレベルの観測に成功しました。

この成果はアメリカ、カリフォルニア、ロングビーチで開催されている量子エレクトロニクス及びレーザー科学会議(CLEO/QELS 2006)において5月26日(本時間5月27日)に発表されます。

【今後の展開】

スクィーズド光は複数のビームを干渉させることで量子もつれ状態*3を生成することができ、光の量子計算を実現する上で重要な光源となります。今回スクィージングレベルが -7dB を越えたことで、万量子ゲートに必要な4段の量子テレポーテーションによる信号処理が可能になるほか、従来の計測における理論限界を超える量子もつれ計測技術を実現することができます。

今回生成したスクィーズド光の波長帯はセシウム原子の共鳴準位(852nm)に対応し、スクィーズド光を用いて原子制御を行う将来の周波数標準技術やセシウム原子セルによる量子メモリの実証にも役立つものと期待されます。

今回開発した装置を最適化すれば -10dB のスクィージングレベルの達成も原理的に可能で、今後さらに性能改善を進めてゆく予定です。

＜お問い合わせ＞

独立行政法人情報通信研究機構
総合企画部広報室
栗原則幸、大野由樹子
TEL:042-327-6923、FAX:042-327-7587

＜研究内容に関する問い合わせ先＞

情報通信研究機構
新世代ネットワーク研究センター
光波量子・ミリ波ICTグループ
佐々木雅英
Tel:042-327-6524
Fax:042-327-6629

【用語解説】

* 1 量子計算

量子もつれ状態のように量子力学的な状態を、積極的に利用して行われる計算のことをいいます。従来の計算が、0または1の値しか取りえないビットを用いて行われるのに対し、量子計算では0でも1でもあるようなビット(量子ビット)を複数用いた並列計算を行います。そして、これは従来の計算に比べ、桁違いに高い処理能力を持ちうるということが知られています。たとえば、素因数分解のように、従来の計算で解こうとすれば天文学的な時間を要する問題が、この量子計算を用いれば数秒で解けるとも言われています。

* 2 パラメトリック下方変換

2次の非線形光学効果の一種で、非線形光学結晶に光が入射した際、入射した光の2倍の波長(すなわち半分の周波数)を持つ光が発生する現象です。これは、あるエネルギーを持った1つの光子が、その半分のエネルギーを持つ2つの光子に分裂することに相当します。ここで発生した光子のペアは、前述の量子もつれ状態にあり、さらにこの光子ペアの集まりがスクィーズド光となります。

* 3 量子もつれ状態

二個以上の量子(光子や電子のような粒子)が、古典力学的には考えられない強力な相関をもって結びついている状態をいいます。この状態を構成する量子のうち、ある一つについての情報が測定によって確定すると、それにもなって別の粒子についての情報も確定します。この量子もつれ状態が、量子計算などといった量子情報技術の基盤となっています。

補足資料

(1) スクィーズド光とは

レーザー光は位相のそろった最もきれいな波の状態ですが、ある時間の1点における波の振幅の値を完全な精度で決めることは不可能で、必ずある「ぼやけ」すなわち揺らぎを伴います。この揺らぎは量子力学の不確定性原理に起因しており、量子揺らぎと呼ばれ、完全に消し去ることは原理的に不可能です。しかし、ある位相の領域(時間間隔)で量子揺らぎを抑圧することは可能です。そのかわり、別の位相(正確には90度ずれた位相)の揺らぎは逆に大きくなってしまいます。このように量子揺らぎを人為的に制御した光がスクィーズド光です。スクィーズド光を使って量子揺らぎが抑圧された位相の領域にロックして、情報処理を行えば、量子揺らぎに制限されない高度な情報処理が可能になります。

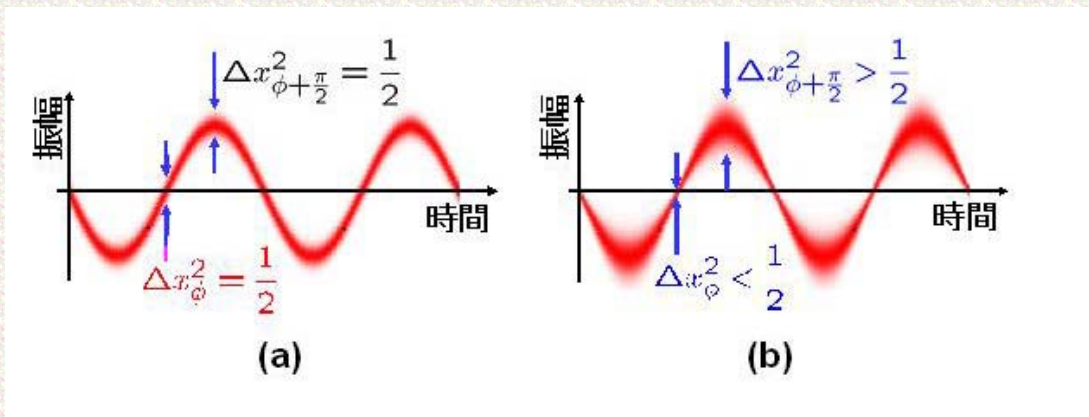
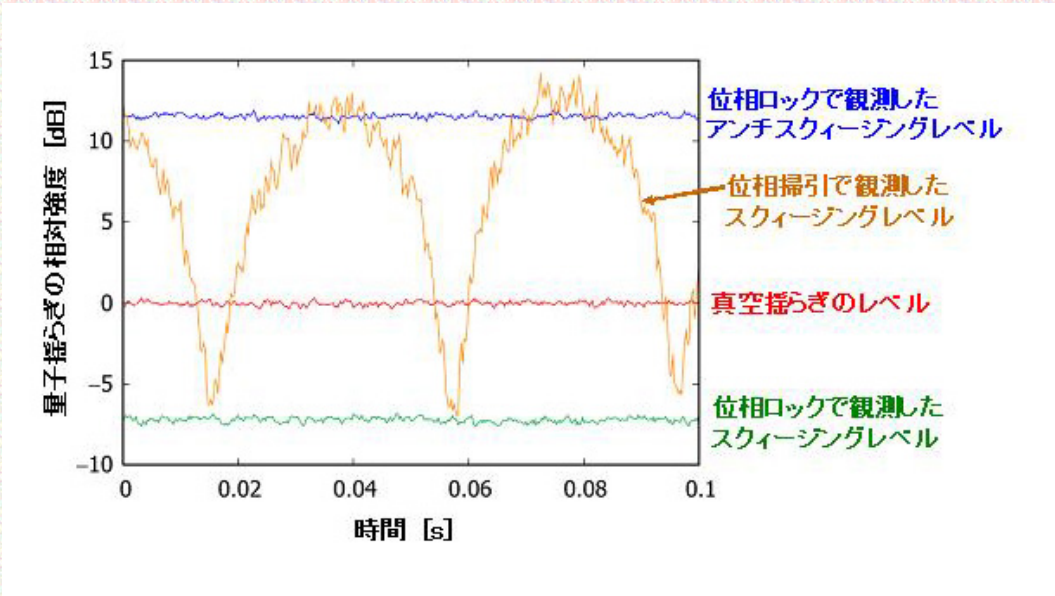


図1 (a) 理想的なレーザー光(コヒーレント状態)の量子揺らぎ。位相に寄らず等方的。

(b) スクィーズド光の量子揺らぎ。180度毎の位相で量子揺らぎを抑圧できる。

(2)実験データ

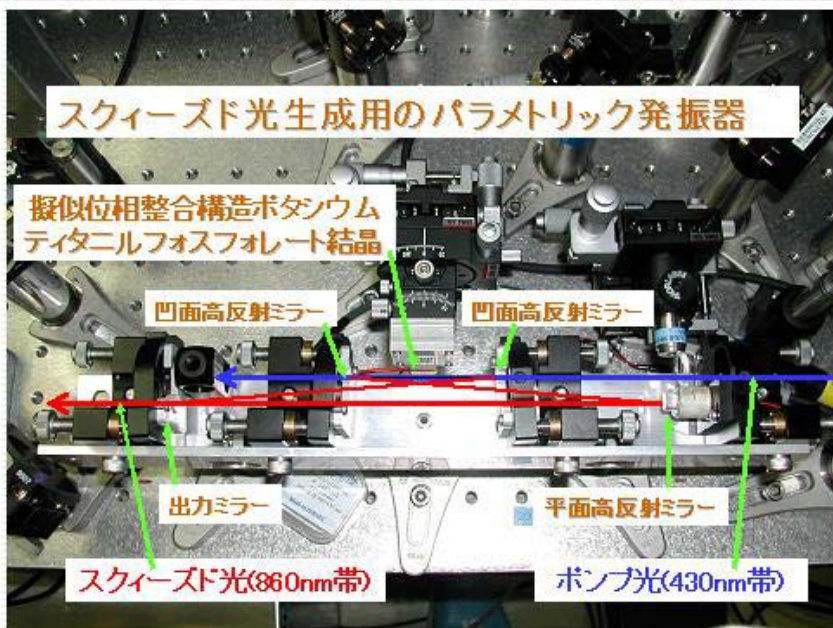
下図は量子揺らぎの時間変化を観測した結果を表しています。横軸は時刻、縦軸は真空揺らぎのレベルを基準にした揺らぎの大きさを表しています。この中で「真空揺らぎのレベル」は図1(a)における $\Delta x_{\phi}^2 = \Delta x_{\phi+\pi/2}^2 = 1/2$ 、「位相ロックで観測したスクィージングレベル」は図1(b)における Δx_{ϕ}^2 、「位相ロックで観測したアンチスクィージングレベル」は同じく $\Delta x_{\phi+\pi/2}^2$ に相当します。また「位相掃引で観測したスクィージングレベル」は、位相(図1における ϕ)を変えながら揺らぎの大きさを測定したものです。特に、「位相ロックで観測したスクィージングレベル」として、量子揺らぎの大きさを真空揺らぎのレベルより7.2 dB下に保持した状態で観測できた点が本件における重要なポイントです。



(3)装置の写真

我々が今回用いたパラメトリック発振器は、3枚の高反射ミラー(波長860 nmの光を全反射)、1枚の出力ミラー(波長860 nmの光を一部透過)、そして非線形光学結晶(擬似位相整合ポタジウムタイタニルフォスフェート結晶)により構成されます。写真の右側から凹面高反射ミラーを通して入射してきた波長430 nmのポンプ光は、非線形系光学結晶において波長860 nmのスクィーズド光に変換されます。ここで発生したスクィーズド光は、ミラーに反射されて発振器内を周回し、非線形光学結晶を繰り返し通過することにより、より強くスクィーズされ、最終的に出力ミラーから取り出されます。

従来の非線形光学結晶(KNbO3)は、ポンプ光を強くした際に、発生したスクィーズド光を吸収してしまう難点がありました。今回用いた擬似位相整合ポタジウムタイタニルフォスフェートには、そのような欠点がないため、高いスクィージングレベルを得ることができました。



(4)発表論文

著者: Shigenari Suzuki, Hidehiro Yonezawa, Fumihiko Kannari, Masahide Sasaki, Akira Furusawa,

講演タイトル: "7.2 dB Quadrature Squeezing at 860 nm with Periodically-Poled KTiOPO₄,"

講演番号: QFD1(May 26), CLEO/QELS 2006, Long Beach, California, USA, May 21--26 (2006).