

非ガウス型量子操作によるシュレーディンガーの子猫状態の生成

和久井健太郎^{*,**}

Generation of Schrödinger Kitten States of Light

Kentaro WAKUI^{*,**}

We generate various kinds of photon-subtracted squeezed states, including non-Gaussian, nonclassical optical quantum states, i.e. Schrödinger kittens closely similar to the superpositions of small coherent states. Nonclassicality of the generated states clearly appears as its negative region of the Wigner quasiprobability distribution functions. The generation method of such nonclassical states would play an important role as a basic building block toward optical quantum computation by coherent superposition states.

Key words: quantum optics, quantum information, squeezed state, Schrödinger cat state

現在までの光を用いた量子情報処理には、2つの領域がある。1つは qubit をはじめとする離散変数が情報処理の担い手となった離散量量子情報処理、もう1つが直交位相成分という連続変数を情報処理に活用した、連続量量子情報処理である¹⁾。近年の連続量量子情報処理の研究分野では、上記2つの領域の技術を同時に制御することにより、3次以上の非線形性をもつ量子操作を実現しようとする試みが広がっている。この3次以上の量子操作は通称「非ガウス操作」とよばれ、この操作を用いることで、2次までの非線形性を利用した量子操作^{*1}を包含し、さらに多彩かつ高機能な量子情報処理を実現できることが知られている²⁾。この研究分野の具体的な現状については、本号の特集で武岡による系統的な解説がなされる予定なので、そちらもぜひ参照されたい。

現状の非ガウス型操作では、実効的に3次以上の非線形性を誘起するため、非線形光学効果の代わりに、連続量量子もつれと、離散量量子情報処理ではおなじみの光子測定を組み合わせる^{*2}。本解説で述べるシュレーディンガーの子猫状態の生成においても、スクイーズド状態から生成し

た量子もつれと、光子測定の組み合わせが活用されている。次章以降では、その生成原理を中心に解説してゆきたい。

1. シュレーディンガーの子猫状態

「シュレーディンガーの子猫」とは、量子光学の分野で「シュレーディンガーの猫」とよばれている量子状態のうち、そのサイズが小さい状態（詳しくは後述）に関する通称である。シュレーディンガーの子猫状態の説明に入る前に、ここではまず量子光学におけるシュレーディンガーの猫状態について触れておく。

元々のシュレーディンガーの猫とは、生きた猫と死んだ猫というマクロな状態の、“量子力学的”重ね合わせであった³⁾。一方、量子光学における「マクロ」な重ね合わせ状態とは、互いに十分識別可能な2つのコヒーレント状態の量子力学的重ね合わせであり、互いに位相が180度反転した2つのコヒーレント状態を用いて、次式のように定義される⁴⁾。

$$|\text{cat}(\varphi, \alpha)\rangle = \mathcal{N}\{|+\alpha\rangle + e^{i\varphi}|-\alpha\rangle\}$$

* (独)情報通信研究機構光量子・ミリ波 ICT グループ (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

** 現所属：(株)富士通研究所 (〒243-0197 厚木市森の里若宮10-1) E-mail: wakui.kentaro@jp.fujitsu.com

^{*1} この操作は「ガウス型量子操作」とよばれている。

^{*2} これは、単一光子レベルの微弱光でも適用できるほどの大きな非線形性をもつ非線形光学材料が、いまだ知られていないからである。

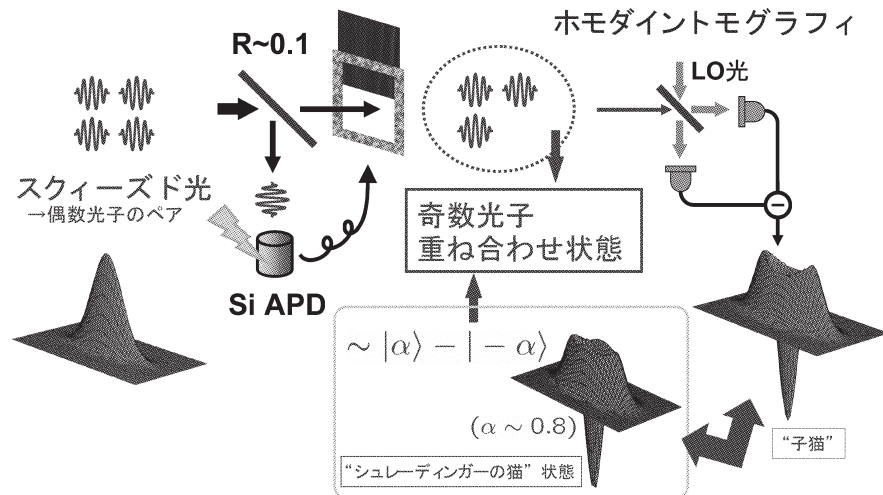


図1 Dakna らの方法。三次元プロットは左からそれぞれ、入力のスクイーズド状態、 $\alpha \sim 0.8$ の“シュレーディンガーの猫”状態、1光子を除去した後のスクイーズド状態 (“子猫”) のウィグナー関数である。

N は規格化定数、 φ は重ね合わせ位相、 α はコヒーレント振幅を表している。ここで α の値が大きくなればなるほど、 $|+\alpha\rangle$ と $|-\alpha\rangle$ の重なりは小さくなり相互に識別しやすくなる。ここで、重ね合わせ位相の異なる $|+\alpha\rangle + |-\alpha\rangle$ 、および $|+\alpha\rangle - |-\alpha\rangle$ という2種類のコヒーレント重ね合わせ状態を用意できたとする、これらは互いに直交した基底となる。この性質から、コヒーレント重ね合わせ状態は光量子計算の量子ビットとして利用可能であることがわかり、近年注目を集めている⁵⁾。

このコヒーレント重ね合わせ状態の生成に関しては、まず1986年に、Yurke と Stoler によって3次の非線形光学効果を用いた方法が提唱された⁶⁾。さらに10年ほど後になり、近似的な状態を生成可能であるとして Dakna らによって提案されたのが、今回紹介するスクイーズド状態から光子を除去する方法である⁷⁾。

1.1 生成原理

以下の図1に、Dakna らによって提案された方法を示す。

この生成方法では、まず非古典状態としてスクイーズド状態が用意される。スクイーズド状態はガウス型の量子状態である。このスクイーズド状態がビームスプリッターで分割された際に量子もつれを形成するため、量子もつれの非局所相関により、片方の系での光子測定の結果がもう片方の系に影響を及ぼす。ここでは、ビームスプリッターの反射側にて光子を1つ引き去る処理が成功した場合のみ、透過側の量子状態が、中心部にバスタブ状のくぼみをもった非ガウス型の量子状態へと変化することを表している。この劇的な変化は光子測定のもつ非線形性によってもたら

されたものであるが、ここでは量子もつれ状態にある2つの系のうちの1つが光子測定用の補助系として活用されており、測定により量子状態が壊れてしまうデメリットを補っている。

ガウス型/非ガウス型などといったような、生成された量子状態の特性評価には、ウィグナー関数とよばれる電磁場の直交位相成分の擬確率分布関数を用いる。このウィグナー関数は、光ホモダイン測定を用いた電磁場の直交位相成分測定の結果より実験的に再構成することが可能である。この実験手法は光ホモダイントモグラフィとよばれる⁸⁾。ここで光子除去後のウィグナー関数を眺めると、くぼみが下方へ大きく突出していることがわかる。このくぼみはウィグナー関数の負の領域である。この負の領域は量子干渉の結果として生じるものと考えられ、コヒーレント重ね合わせ状態など、一部の非古典的量子状態のウィグナー関数は負の領域をもつことが知られている⁸⁾。この性質からウィグナー関数は「擬」確率分布とよばれ、古典的な確率分布とは区別される。仮にレーザー光を弱めるなどしてコヒーレント状態の統計的な混合状態を作ったとしても、ウィグナー関数が負の値を取ることはない⁹⁾。このウィグナー関数の負の領域の観測は、量子状態の非古典性を確認するためのひとつの手段となっており、測定結果における負の値が大きいほど非古典性が保たれていると考えられている。

この一連の手順で生成される量子状態は、その生成方法から「光子を除去したスクイーズド状態」とよばれる。スクイーズド状態は理想的には偶数光子のみを含んだ量子状態であり、図1のようにスクイーズド状態から光子を1つ

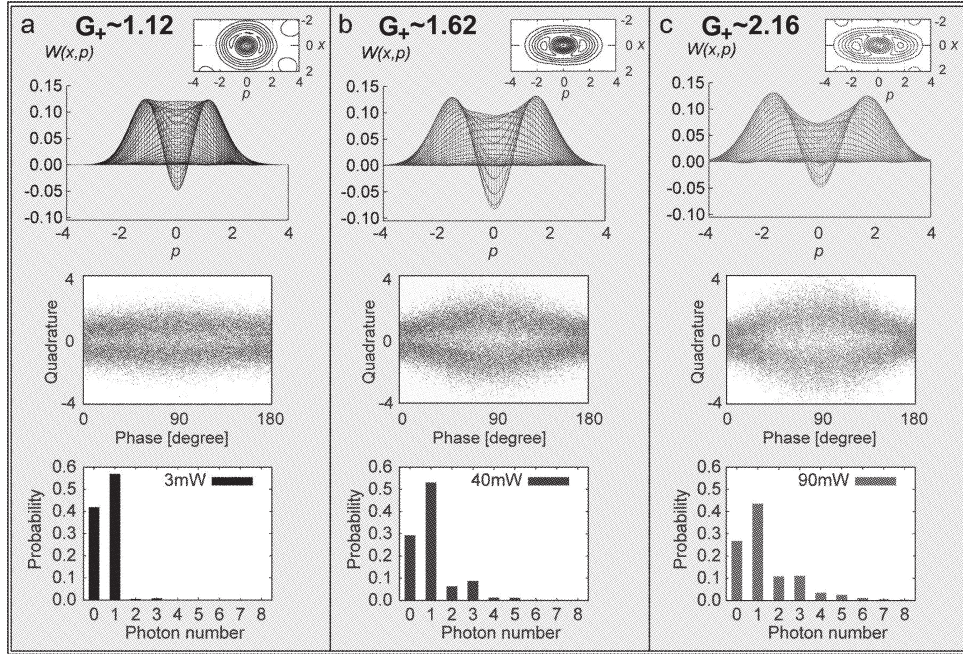


図2 励起光強度を変化させたときの実験結果。 G_+ は閾値以下で駆動した OPO のゲインである。図中段は測定の実波形データ、上段は実波形データから再構成したウィグナー関数とその等高線、下段は実波形データから算出した光子統計である。

引き去った場合、出力の量子状態は奇数光子のみを含んだ状態となる。コヒーレント重ね合わせ状態も理想的には奇数光子のみを含んだ量子状態であり⁴⁾、この点で共通している。この光子を1つ除去したスクイーズド状態は、コヒーレント振幅が非常に小さい場合 ($|\alpha|^2 \leq 1$) のコヒーレント重ね合わせ状態と高い同一性をもっているため、しばしば「シュレーディンガーの子猫」状態ともよばれる。ここでバスタブの形状にもう一度着目すると、長手方向の両ふちが若干せり上がってピーク状になっているのがわかる。実はこれら2つのピークが、振幅の小さな $|\alpha\rangle$ と $|- \alpha\rangle$ に近似的に対応している。

1.2 生成実験とその結果

この状態は、実際の実験では、閾値以下で駆動された光パラメトリック発振器 (OPO) により生成される真空スクイーズド光をビームスプリッターで分割し、その出力のうち片方をアバランシフォトダイオード (APD) を用いて光子検出することにより生成できる。APD には厳密な意味での光子数識別能力はないが、測定対象とする光が単一光子レベルの微弱光であるため、近似的に単一光子検出を行っているとみなすことができる。

この分野における先駆的な実験結果は、フランス国立科学研究センターのグループから報告され^{9,10)}、次いでコペンハーゲン大学ニールス・ボーア研究所からも報告された¹¹⁾。これらのグループでは、スクイーズド光生成の際の

非線形光学結晶に、いずれもニオブ酸カリウム (KNbO_3) を用いていた。これに対してわれわれのグループでは、使用波長 860 nm における光学損失が KNbO_3 より大幅に少ない周期分極反転燐酸チタン酸カリウム (PPKTP) を用いることで、先行の2研究より大きな負の値を実測することに成功している。われわれの実験の詳細に関しては文献 12) を参照されたい。

以下の図2に、われわれのグループで得られた実験結果を示す¹²⁾。図中 a, b, c は、それぞれ a \rightarrow c の順で OPO への励起光 (波長 430 nm) の強度を大きくしたときの実験結果であり、 G_+ は OPO のゲインである。ここでは生成したスクイーズド光の5%を APD で検出し、その検出信号を測定のトリガーとして用いている。図2中段は光ホモダイン測定結果から得られた直交位相成分の実波形データ、上段が実波形データを元に最尤推定法を用いて算出したウィグナー関数、下段が光子数統計である。ウィグナー関数に関しては三次元プロットを真横から透かして表示し、右上に等高線を示している。

まず a の光子統計から、1光子除去で得られた状態がおもに真空 (0光子) と1光子のみを含んでいることがわかる。これは OPO のゲインが小さいとき、元のスクイーズド光に含まれる光子がほぼ2つまでに限られるからである。実波形データやウィグナー関数からは位相依存性がほとんどみられないが、これは単一光子状態に特有の性質で

ある⁸⁾。一方 b や c の状態では、実波形およびウィグナー関数から 2 つのピークが識別できる程度離れているのがわかる。これは、OPO のゲインが大きくなるとスクイズド光に含まれる偶数光子が増え、1 光子除去後の状態に 3 個や 5 個といった高次の奇数光子が含まれるためである。なお、光子統計からもわかるように、実験上のさまざまな損失のため、実際に生成された状態には偶数光子も介在している。この偶数光子の寄与が大きいとウィグナー関数の負の領域は消えてゆくため、われわれの実験系ではさまざまな光学損失を限界まで減らし、さらに、光学損失の少ない PPKTP を利用することで、ようやくウィグナー関数の顕著な負の領域を実測することに成功している。

本稿では、離散量連続量同時制御の簡単なプロトコルとして、光子を 1 つ除去したスクイズド状態の生成方法について紹介した。この量子状態は振幅の小さなコヒーレント重ね合わせ状態によく似た状態であったが、よりコヒーレント振幅の大きい重ね合わせ状態を生成しようとする実験的試みが現在も継続されている¹³⁾。われわれのグループにおいても、今回紹介したものよりさらに大きな振幅 ($|\alpha|^2 \sim 2$) をもった重ね合わせ状態の生成に成功しており^{14,15)}、今回紹介した子猫状態とともに、光量子計算の基底として今後の応用が期待されている^{5,16)}。

文 献

- 1) S. L. Braunstein and A. K. Pati: *Quantum Information with Continuous Variables* (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003).
- 2) A. Ferraro, S. Olivares and M. G. Paris: *Gaussian States in Quantum Information* (Biliopolis, Napoli, 2005).
- 3) E. Schrödinger: *Naturwissenschaften*, **23** (1935) 807-812; **23** (1935) 823-828; **23** (1935) 844-849.
- 4) C. C. Gerry and P. L. Knight: *Introductory Quantum Optics*

(Cambridge University Press, Cambridge, 2005).

- 5) T. C. Ralph, A. Gilchrist, G. J. Milburn, W. J. Munro and S. Glancy: "Quantum computation with optical coherent states," *Phys. Rev. A*, **68** (2003) 042319.
- 6) B. Yurke and D. Stoler: "Generating quantum mechanical superpositions of macroscopically distinguishable states via amplitude dispersion," *Phys. Rev. Lett.*, **57** (1986) 13-16.
- 7) M. Dakna, T. Anhut, T. Opatrny, L. Knoll and D.-G. Welsch: "Generating Schrödinger-cat-like states by means of conditional measurements on a beam splitter," *Phys. Rev. A*, **55** (1997) 3184-3194.
- 8) U. Leonhardt: *Measuring the Quantum State of Light* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- 9) J. Wenger, R. Tualle-Brouri and Ph. Grangier: "Non-Gaussian statistics from individual pulses of squeezed light," *Phys. Rev. Lett.*, **92** (2004) 153601.
- 10) A. Ourjoumtsev, R. Tualle-Brouri, J. Laurat and Ph. Grangier: "Generating optical Schrödinger kittens for quantum information processing," *Science*, **312** (2006) 83-86.
- 11) J. S. Neergaard-Nielsen, B. Melholt Nielsen, C. Hettich, K. Molmer and E. S. Polzik: "Generation of a superposition of odd photon number states for quantum information networks," *Phys. Rev. Lett.*, **97** (2006) 083604.
- 12) K. Wakui, H. Takahashi, A. Furusawa and M. Sasaki: "Photon subtracted squeezed states generated with periodically poled KTiOPO₄," *Opt. Express*, **15** (2007) 3568-3578.
- 13) A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri and Ph. Grangier: "Generation of optical 'Schrödinger cats' from photon number states," *Nature*, **448** (2007) 784-786.
- 14) H. Takahashi, K. Wakui, S. Suzuki, M. Takeoka, K. Hayasaka, A. Furusawa and M. Sasaki: "Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted photon-subtraction," *Phys. Rev. Lett.*, **101** (2008) 233605.
- 15) M. Takeoka, H. Takahashi and M. Sasaki: "Large-amplitude coherent-state superposition generated by a time-separated two-photon subtraction from a continuous-wave squeezed vacuum," *Phys. Rev. A*, **77** (2008) 062315.
- 16) A. P. Lund, T. C. Ralph and H. L. Haselgrove: "Fault-tolerant linear optical quantum computing with small-amplitude coherent states," *Phys. Rev. Lett.*, **100** (2008) 030503.

(2008 年 9 月 17 日受理)