

半導体発光素子による光子数量子状態発生と量子光学

井元信之（阪大基礎工）

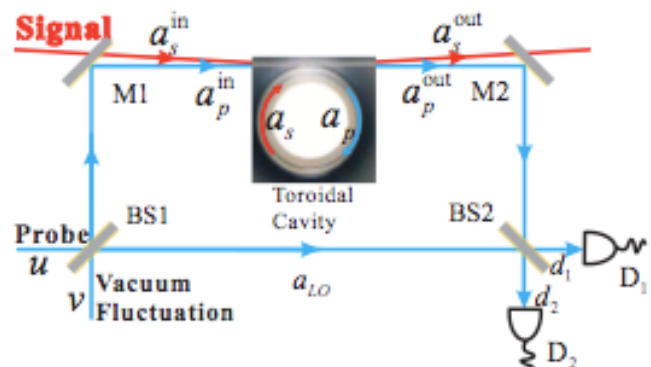
量子力学の非局所相関を利用した超並列の情報処理や究極の信頼性を保証する暗号通信を可能とする量子情報技術は未来技術として期待が大きい。ここで必須となる光子数量子状態を発生するためには、光と物質の相互作用を究極的に制御する必要がある。究極の制御の本質は、光を微小な空間に閉じこめる技術と、その空間に物質系の強い非線形性や光増幅機能などの能動機能を誘起することであり、ブレイクスルーとなる物質科学の展開が待たれている状況である。本課題では、電子系の多体相関効果を活用して新しい光子数量子状態発生技術を開拓し、それと対を成す、量子情報応用に向けた新規な光源評価方法の開拓を行う。本研究では以下の二つについて議論する。

1. マイクロトロイダル共振器を用いた光子数 QND 測定

量子情報処理の基本ゲートには「1-qubit ゲート」と「2-qubit ゲート」があり、特に後者を on-demand で確実に動作させることが困難なため精力的に研究が行われている。光 Kerr 効果を用いる QND(量子非破壊)測定[1]は 2-qubit ゲートの最初の提案と言えるが、これは一光子で位相シフト π を起こす強大な非線形光学効果が必要であり、実現困難であった。これを避けるため線形光学+光子検出+事後選択による方法が現在の主流研究となり、我々は量子雑音除去実験[2]、クラスター状態量子演算実験[3]、エンタングルメント変換[4]、エンタングルメント拡張ゲート[5]やグラフ状態量子演算[6]やリピーター[7]の提案を行った。もし強大 Kerr 効果が使用できれば事後選択不要あるいは拡張性など種々の点でブレイクスルーとなる。

本研究ではマイクロトロイダル共振器を用いた光子数 QND 測定を提案する[8]。これは同共振器の超高 Q 値を利用し光 Kerr 効果を増強するものである。マイクロトロイダル共振器としてはシリコンベースのシリカ共振器[9]をモデルとした。次図で光 Kerr 効果デバイスとして同共振器が用いられている以外は[1]と同じ構成であり、M1 および M2 は signal 光（制御ノットゲートの言葉では制御光子）と probe 光（同ターゲット光子）を同じ空間モードに結合/分離するものである。BS1 および BS2 は 50/50 のビームスプリッターすなわち probe 光について平衡ホモダイン検波器となっている。

光 Kerr デバイスとして用いるマイクロトロイダル共振器の結合特性および損失等を考慮して本装置の特性を検討した結果を報告する。



2. 光源の高次光子統計を利用した長距離量子暗号

半導体量子ドット、ダイヤモンド欠陥及びトラップされた原子などを用いた単一光子発生が盛ん

に研究されている。このような非古典光源の評価は、Hanbury Brown と Twiss の実験でよく知られている 2 次の強度相関 $g^{(2)}$ を測定することで行われている。同時刻におけるこの $g^{(2)}$ の値は、レーザー光のように光子統計がポアソン分布のものは 1 を示し、熱輻射状態では 1 よりも大きくなり、理想的な単一光子光源では 0 となる。量子情報処理としての応用を考えた場合には、 $g^{(2)}=0$ すなわち多光子放出確率が 0 である単一光子光源が望まれているが、実験的に $g^{(2)}=0$ に非常に近い光源を作り出すことは難しい。量子暗号通信では光源からの多光子発生に対して光子分岐攻撃と呼ばれる非常に強力な盗聴法が存在するため、多光子放出確率に依存して量子鍵生成効率が急激に低下してしまう。そのため、これまで実現されてきた単一光子光源では長距離セキュリティ通信が達成されていなかった。

多光子発生確率を 0 に近づける実験的な努力も非常に重要であるが、実は 2 次相関 $g^{(2)}$ を超えて、より高次の光子分布に関する情報を得ることで、 $g^{(2)}$ が比較的大きいにも関わらず長距離の量子暗号通信が可能である方法が存在することを示す。ここで重要なのは、光子数分布を測定により推定し、2 光子以上の分布の裾がポアソン分布よりも急に落ちる傾向（“サブポアソン傾向性”）を確認することである。2 光子以上が放出されても、この傾向に従う部分は光子分岐攻撃から簡単に保護することが可能となる。その結果、興味深いことに、光子数分布の推定精度を高めていくだけで、実際に多光子発生率を減らして理想単一光子光源に近づけた場合と同様の長距離通信が可能になる[10]。図に量子鍵生成率を示す。

一般に、多光子発生のない単一光子光源にポアソン分布の背景放射が雑音として乗る場合にはサブポアソン傾向性を示す。また、背景放射が熱輻射の場合は“サブポアソン傾向”ではないが同じ方法によって長距離化が可能である。これまで、単一光子光源の $g^{(2)}$ を超えたより高次の光子分布に関する実験が皆無であるため、今後の研究の進展が期待される。

参考文献

- [1] N.Imoto, H.A.Haus, and Y.Yamamoto: Phys.Rev.A32,2287(1985).
- [2] T.Yamamoto, K.Hayashi, S.K.Özdemir, M.Koashi, and N.Imoto: Nature Photonics 2,488(2008).
- [3] Y.Tokunaga, S.Kuwashiro, T.Yamamoto, M.Koashi, and N.Imoto: Phys. Rev. Lett. 100, 210501 (2008).
- [4] T. Tashima, T. Wakatsuki, S. K. Ozdemir, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, Phys. Rev. Lett. 102, 130502 (2009).
- [5] T.Tashima, S.K.Özdemir, T.Yamamoto, M.Koashi, and N.Imoto: Phys. Rev. A 77, 030302(R) (2008).
- [6] M. S. Tame, S. K. Ozdemir, M. Koashi, N. Imoto, M. S. Kim, Phys. Rev. A 79, 020302 (2009).
- [7] N.Sota, K.Azuma, R.Namiki, S.K.Özdemir, T.Yamamoto, M.Koashi, N.Imoto: arXiv:0811.3100.
- [8] Y. Xiao, S.K.Özdemir, V. Gaddam, C. Dong, N. Imoto, and L. Yang, Opt. Express 16, 21462 (2008).
- [9] T. Carmon, L. Yang, and K. J. Vahala: Opt. Express 12, 4742–4750 (2004).
- [10] Y. Adachi, T. Yamamoto, M. Koashi and N. Imoto, New J. Phys. 11. 113033 (2009).

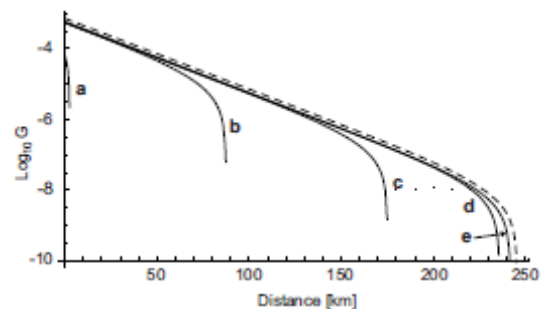


図 1 : 光子数分布を光子数 n まで推定した時の鍵生成率と通信距離。a) $n=4$, b) $n=5$, c) $n=6$, d) $n=7$, e) $n=\infty$ 。光子数分布の推定の精度を上げるに従い鍵生成率が增加している。点線は理想単一光子源の場合。