

「電子・光子等の機能制御」
平成12年度採択研究代表者

中村 和夫

(日本電気(株)基礎・環境研究所 研究部長)

「量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術」

1. 研究実施の概要

量子暗号を短距離応用だけではなく、より広範な実用化へと可能にする為、量子中継技術を初めとする量子情報処理通信技術の基盤技術、特に量子絡み合いを主とした光子状態制御技術を開発する。昨年度、各グループから以下の様な成果が得られており、最終年度となる今年度は、さらにこれらを発展させ、量子情報処理通信技術の総合的な底上げを実現し、本CRESTチームの纏めとする。

<中村グループ (NEC筑波)>

H16年度では、量子演算(操作)を表す演算子をさらに他の演算子に移す変換操作に関する表現法に2種類ある事が知られているが、この間の相互関係式を明らかにした。これにより、種々の量子演算過程の統一的理解が可能になる。又、量子状態制御デバイスとして候補となる量子ドットの評価では、1.2 μm 帯の単一量子ドットからの励起子・励起子分子発光の蛍光寿命を評価し、量子ドットのサイズ、閉じ込めエネルギーの違いを起因とする従来と異なる結果を得た。さらに、新たな量子情報デバイス評価用の近接場顕微鏡を開発してきているが、低温、磁場中において空間分解能が波長程度の近接場像の測定に成功した。

<Wangグループ (マックスプランク研究所)>

H16年度は、NECプリンストンに残っていたグループを終結し、マックスプランクに集約した。これまで、フォトニック結晶ファイバーを利用した相関光子対生成を行ってきたが、構成要素のパラメータの最適化を図る事で、他の同様のファイバー光源や、パラメトリック下方変換を使った光源に比べても、1桁以上の大きな量子相関光子対生成率の実現に成功した。さらにファイバー光源を2つ使い、最初のファイバーからのシグナル光を2つめへ導入する事で、パラメトリックアンプを構成できる事を実証した。又、シグナルとアイドラーの双方を2つ目のファイバーに導入する事で、両者の平均周波数を有する光子の生成にも成功しており、今年度、この手法による高効率光子対光源の実現を狙う。

<小林グループ（東京大学）>

これまで、光パラメトリック発振器(OPO)を用いて、量子テレポーテーション・デンスコーディングの実験研究を行う中で、OPO装置から発生する光子対は共振器の作用により、狭バンド幅で時間相関が長いという性質を持ち、多モードの光子対の重ね合わせになることが判ってきた。これらの性質は、量子情報・量子通信の光源として有用である。また、新たな光源として4光子絡み合い状態の開発を開始した。さらに、実用的な量子情報通信の実証実験として、自然放出パラメトリック下方変換光を用いた量子鍵配布実験を開始した。

<広田グループ（玉川大学）>

量子情報理論の応用としての量子暗号を実用化するために、量子鍵配送のみではなく、多様な暗号技術に量子技術を応用するのは好ましい方向である。これまで量子共通鍵暗号を実装する理論を開発してきたが、本年度はその基本技術である量子ゆらぎ拡散符号の理論を完成させ、その簡単な実装実験を行った。その結果、既存の量子技術では解読できない量子共通鍵暗号が可能であることが実証された。また、当該グループが開発してきたコヒーレント状態による量子情報処理において干渉性崩壊が存在しない現象があることを理論的に発見した。

<佐々木グループ（情報通信研究機構）>

H16年度は、低雑音JFETによる積分型読出回路を使った光子検出器(CIPD)の開発を進め、通信波長帯においてサンプリング速度～数Hzと低速ではあるが、量子効率80%、暗電流0.14カウント/秒、光子数識別のS/N比2という極めて高感度の検出性能を達成した。これを用いて平均20光子程度までの微弱ポアソン光源の光子統計の系統的な変化を測定することに成功した。また、このような高感度の光子検出器と線形光学回路及びフィードバックを用いて、量子最適検出器を構成するための一般理論を構築した。

2. 研究実施内容

<中村グループ>

(1) 量子演算の行列表現とその応用に関する研究

量子演算は量子情報処理技術において量子状態と並び鍵となる概念である。量子演算は、密度演算子のような正定値演算子を別の正定値演算子に変換する完全正值な超演算子として記述できる。演算子が任意の状態基底を用いて行列表現できるように、超演算子は任意の演算子基底を用いて行列表現できる。我々は、 χ 行列および S 行列と呼ばれる代表的な超演算子の表現行列とその応用について考察した。 χ 行列は量子演算の物理的・量子情報論的特性評価に有用であり、複合量子系の量子演算の自然な表現行列を与える。他方、 S 行列は一連の量子演算の合成演算を計算するのに有用である。このように、これらの表現行列はそれぞれ異なる適用領域を持つが、相互関係は必ずしも明確ではなかった。今回、

1量子dit (d準位量子系) および2量子ditの量子演算の、任意の演算子基底を用いて定義される χ 行列と S 行列について考察し、両者を結ぶ明解な関係式を導出した。これらの相互関係式は容易に n 量子ditの量子演算に拡張可能である。本成果は量子演算の実験的同定の一般的方法を与える。また本成果は、 χ 行列および S 行列に基づく量子演算の行列計算および分析の相互交流を可能とし、従来のユニタリ行列を基にする分析では不可能であった、デコヒーレンス過程や確率的サブルーチン、測定過程、フィルタリング過程などの非ユニタリ過程を含む、広範な量子回路やアルゴリズムの分析や設計を行う方法の基礎を与えるものである。

(2) 自己成長型InAs/GaAs量子ドットの単一ドット分光

量子暗号通信における情報キャリアとしては単一光子が重要となるが、この量子状態を変換制御する量子情報処理通信用デバイスを実現するために、半導体単一量子ドットをデバイスの重要な候補として選び、これを単一光子と相互作用させようとしている。今年度は、 $1.2\mu\text{m}$ に共鳴波長のある単一量子ドットからの励起子・励起子分子発光の蛍光寿命を、時間相関単一光子係数法を用いて評価した(図1)。昨年度までに開発した顕微分光装置を用いて、微小開口の在る金属マスクを作成した量子ドットサンプルに対して測定を行った。励起子分子から励起子へのカスケード遷移の時間依存性を解析した結果、励起子分子の輻射寿命が励起子の輻射寿命よりも長いことが見出された。これは、近赤外領域に共鳴エネルギーのあるInAs/GaAs量子ドットに特徴的に見られる、大きな量子ドット直径、深い閉じ込めエネルギーに起因すると考えられる。近赤外領域での単一量子ドット分光は、通信波長帯への応用が最近期待されているが、長波長のドットに特有の励起子状態の深いエネルギー閉じ込めは、コヒーレンス時間の長時間化や振動子強度の増大などが期待され、物性解明によって量子情報処理デバイスのための新たな機能の発現を開拓することが可能になると考えられる。

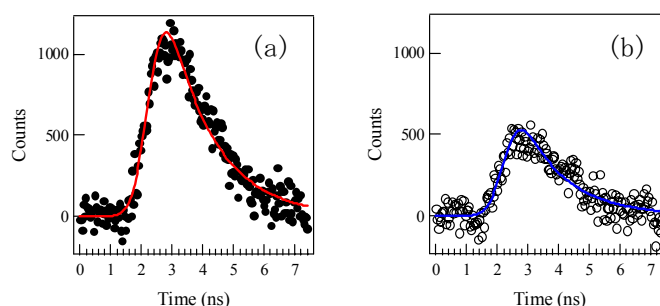


図1 : InAs/GaAs単一量子ドットの(a)励起子分子発光の時間依存性, (b)励起子発光の時間依存性. 図中実線はレート方程式による解析の結果を示す. 評価された輻射寿命は (a)励起子分子 1.5 ns (b)励起子0.5 ns である.

(3) 近接場プローブ顕微鏡の開発

また、新たなデバイスを開発するためには、新たな実験手段の開発が不可欠である。その目的で本研究グループでは近接場効果を利用した極低温走査型プローブ顕微鏡の開発を進めている。今年度は、昨年度考案した光学系を実装し装置を考案・試作して、組み立て

精度を向上させた。その結果、低温、磁場中において評価用の試料を用いて空間分解能が波長程度の近接場像の測定に成功した（図2）。今年度開発した方式は、プローブ顕微鏡において必要な性能を得るために必須であり、これを用いて、低温磁場中における量子ドットの発光の観測を進める予定である。

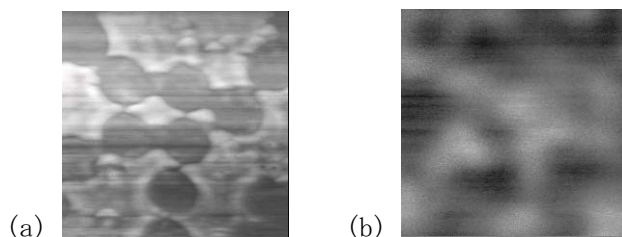


図2：低温、磁場中で測定した評価用試料の(a) AFM像と(b) SNOM像。評価用試料は直径500 nmの微小な開口が多数あるガラス基板上的金属膜である。図(a)中では金属開口の部分が黒くなっているのに対し、図(b)のSNOM像では、金属開口を抜けて出る近接場光の信号が観測され、白い部分となっている。

<Wang グループ>

量子相関光子対を用いた量子通信・量子暗号において、高速性と高い忠実度 (fidelity) を実現する為には、相関光子対光源に対する2つの基本的な要件として、同時計測率 (coincidence count rate) が大きく、さらに雑音となる偶発的計測率 (accidental count rate) の比 (同時計測雑音比 (C/A)) が大きいことが挙げられる。

今年度、当グループではフォトニック結晶光ファイバーの4光子混合過程を用いた量子相関光子対光源の性能を飛躍的に向上させる事に成功した [1,2]。種々の計測システムの構成要素のパラメータを注意深く合わせ込む事により、集光帯域幅0.8nm、同時計測雑音比10:1の条件で、相関光子対の同時計測率としては37.6kHzという最も大きな値を得た。単位帯域幅、単位励起パワー当たりの同時計数率に関しては、現在47kHz/nm/mW という値を得ており、光ファイバーを使った相関光子対光源の現在の記録0.013kHz/nm/mW [3]、パラメトリック下方変換を使った記録0.2kHz/nm/mW [4]のいずれも大きく凌駕している。又、同時計測雑音比 (C/A) に関しては100Hzにおいて300という値であり、本相関光子対源の実用性を示すものである。現在、詳細を示した論文を準備中である。

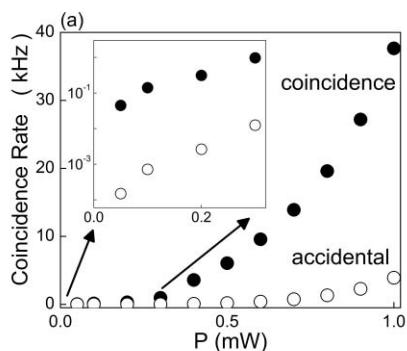


図1(a)測定された同時計測率（黒丸）と偶発的計測（白丸）のパワー依存性

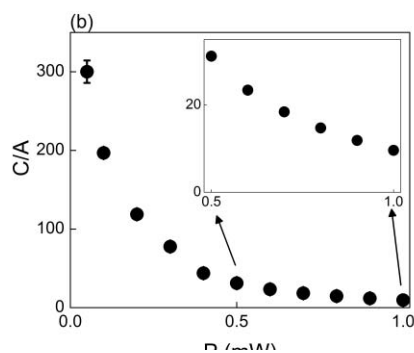


図1(b)同時計測率と偶発的計測の比 (C/A) のパワー依存性

さらに我々は本ファイバー光子対源の非古典的な性質をZou-Wang-Mandel不等式[3]を用いて調べた。通常の古典的な光源の場合には次の不等式 $V=(D_c-D_a)-2(D_s-D_{s,a}+D_i-D_{i,a})<0$ が成立する。ここで D_c 、 D_a は光子対の片方（シグナル）をトリガーに他方（アイドラー）を測定した同時計測率と偶発的計測率、 D_s (D_i) はシグナル、アイドラーを単独でそれ自体をトリガーにして測定した同時計測率、 $D_{s,a}$ ($D_{i,a}$) はそれぞれ対応する偶発計測率を示す。非古典的な光源ではこの不等式が成立しなくなり、非古典性の指標として V/σ (σ は V の標準偏差) で特徴付けられる。我々の実験の

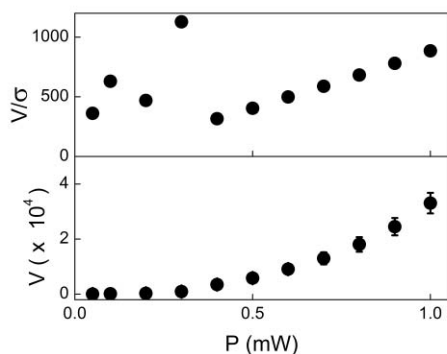


図2. V (下段) と V/σ (上段) のパワー依存性。 V のエラーバーは100倍に拡大

場合、図2に示した様に、平均ポンプパワーが50 μ Wから1 mWで、この指標は360 σ から1100 σ となっており、上述の不等式が破れている事が判る。

我々はさらに図3 (a)に示した様に、シグナル、又はアイドラーを2つめのファイバーでのパラメトリックアンプ用の種光源として用いる事により、このシステムが非常に効率の良いファイバーベースのパラメトリックアンプとなる事を実証した。図3 (b)に示した様に、30dB以上のゲインを観測しており、又、シグナルとアイドラー光も強い量子相関を示し、スペクトルも十分に狭い事を確認した。詳細は文献[6]に掲載予定。

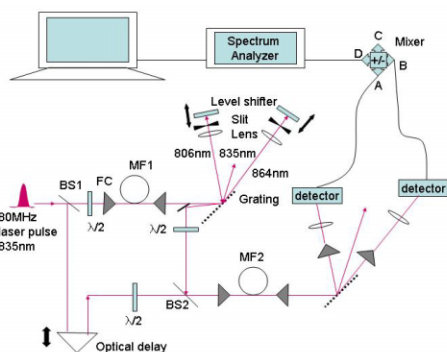


図3 (a) 実験の構成図

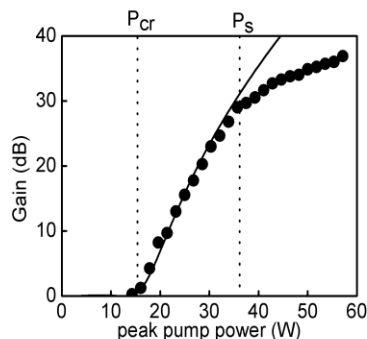


図3 (b) ピーク時のポンプパワーに対するアンプされたシグナル光のゲイン。黒丸は実験値、線はフィッティング結果。

この他にもシグナルとアイドラーの2つの光を用いて、これらの平均周波数を有する光の発生を確認[2]している。このプロセスも高効率の相関光子対生成に用いる事ができ、最終年度の2005年度にさらに高度化を図る予定である。

参考文献

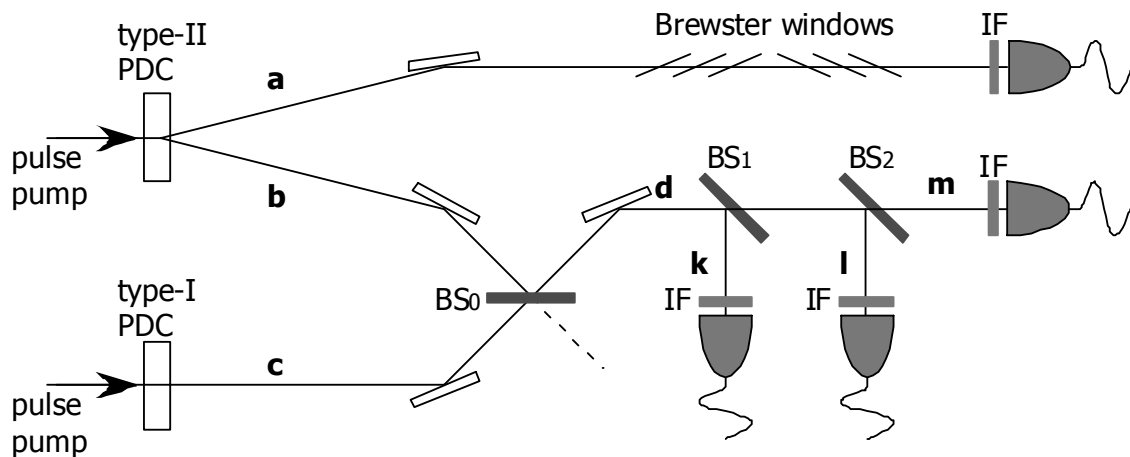
- [1] L. J. Wang, C.K.Hong, and S.R. Friberg, J. Opt. B: Quantum Semiclass Opt. 3, (2001) 346-352.
- [2] J. Fan, A. Dogariu, and L. J. Wang, "Generation of correlated photon pairs in a micro-structured fiber" Opt. Lett. (in press).
- [3] J. G. Rarity, J. Fulconis, J. Duligall, W. J. Wadsworth and P. St. J. Russel, Optics Express 13, 534(2005).
- [4] C. Kurtsiefer, M. Oberparleiter, and H. Weinfurter, Phys. Rev. A 64, 023802 (2001).
- [5] X. Y. Zou, L. J. Wang, and L. Mandel, Optics Commun. 84, 351(1991).
- [6] J. Fan, A. Dogariu, and L. J. Wang, "Parametric amplification in a microstructure fiber" J. Appl. Phys. B. (in press).

<小林グループ>

四光子 n 状態の生成

量子情報科学の分野においてエンタングルメントは非常に重要な役割を持つ。これまで二体間のエンタングルメントの性質やその応用などの研究が主に行われてきたが、近年は多体間のエンタングルメントの研究も行われ始めている。しかし、理論的な研究が急速に進む一方で、実験的な研究は実現が比較的難しいこともあり、まだそれ程行われていない。特に四体の系については、最も特徴的なエンタングルメントであるGHZ状態 $1/\sqrt{2}(|0000\rangle + |1111\rangle)$ と、類似の性質を持つ別の状態が光のqubitで確認されているのみである。

今回我々は、2非線型光学結晶配置による、4光子量子絡み合い状態の直接生成を提案した。この4光子絡み合い状態は、一般化ベル不等式の破れを導く。局所的隠された変数理論によれば、 $S_i^{(4)} \leq 1$ の不等式が成立するが、量子論によれば、 $S_0^{(4)} = 8/3\sqrt{2}$ となる。この状態を用いた応用の一つが、量子秘密分散共有であるが、このような高強度の4光子絡み合い状態は、他の量子情報分野でも応用可能である。現在このスキームの実証実験を行っているGHZ状態と並んで重要な性質を持つエンタングルメントである四体 n 状態 $1/2(|1000\rangle + |0100\rangle + |0010\rangle + |0001\rangle)$ の生成方法を提案し、その実現にむけて実験装置の構築に取り組んでいる。この方法はパラメトリック下方変換と線形光学素子、商用の光子検出器のみで構成され、現在の技術で十分実現可能である。

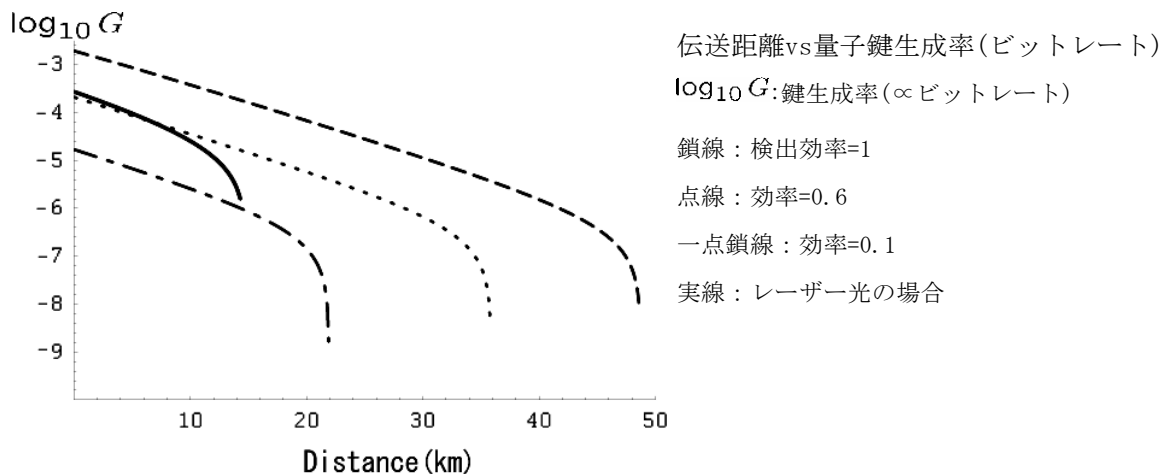


ゲート単一光子源を用いた量子暗号実験

量子力学の原理により、盗聴不可能な情報伝送方法：量子鍵配布の研究が多くの物理学者、情報学者等の下で進められている。しかし実環境下での、雑音等による影響で実際には安全性が必ずしも保証されない。安全性保証には信頼性の高い単一光子源を用いる必要があるが、実用レベルにまでは未だ至っていない。そこで本研究では、現在多くのグループで行われているレーザー光を用いた量子鍵配布に対してより高い安全性とビットレートを実現できる系の提案を行い、かつ実験的に検証する事を目的としている。

(理論的基盤の確立)

本研究で用いるパラメトリック下方変換 (SPDC) 光子対の片方をトリガー信号とする単一光子源は、光子数分布において他の単一光子源にくらべ複数光子確率が増加してしまうと考えられる。しかしトリガー側で光子数識別ができれば複数光子の場合、鍵として採用せずすみ、より長距離での安全性を確保できかつレーザー光を用いた場合に比べ高いビットレートを得られることを計算により示した。(下図)



図から明らかに検出器の効率が不完全でも、より長距離での鍵配布が出来ることがわかる。この光子数識別器は、我々が保有している光子検出器と光ファイバーを用いて構成できる。

もう一つSPDC光を用いる利点として同時計数を取ることによるノイズ軽減効果がある。同時計数を測定することによるこれらの利点により、単一光子源としての相対的な信頼性の低さをカバーして安全性の高い量子鍵配布システムを構築することができる。

(実験)

まず初めに光子数識別を行わずに鍵生成実験を行った。共有鍵生成を達成するためには、光検出器からの出力電気信号の記録を行い、その後古典通信 (ex. インターネット、LAN) を通じて受信者・送信者の各々が用いた基底照合を行い、最終的な鍵を生成する。受信者側記録はデジタルオシロスコープで行い、そのデータをPCに送り受信者側PCとの通信を行う。

測定結果として、1kbits/sのビットレートが得られた。またより小さな光透過率での実験もおこない、10%の場合(光ファイバー通信波長帯1550nmにおいて50kmに相当)、100bits/sのビットレートが得られた。この値は電気信号の変調速度増加及び、ポンプレーザーの出力増加により改善する事ができる。

光子対の周波数の量子相関を用いた分光測定

SPDC(spontaneous parametric down conversion)において発生する光子対はさまざまな物理量において相関を持つ。光子の偏光の量子相関を用いた例では、量子テレポーテーションや量子暗号、波数ベクトルの量子相関を用いた例としてはghost imaging、量子干渉などがある。古典光源では実現不可能な実験が、これら光の量子性を用いることにより、容易に実現されるというのは非常に興味深い。本実験ではSPDC光子対の周波数の量子相関を用い、試料の吸収スペクトルの測定を行った。試料としては、希土類イオンであるNd³⁺を添加したガラスを用いた。

SPDC発生にはType-IIのBBO結晶を用いており、光子対は互いに偏光の直交した光子を持つが、これを偏光ビームスプリッターで分けた後、信号光の光子は試料を透過させ、アイドラー光の光子は回折格子により波長分解を行った。回折格子の水平方向の角度を挿引しながら、光子対の同時計数測定を行い、試料有りの場合、無しの場合の測定データから試料の吸収スペクトルが得られた。光子対の周波数の量子相関を用いたことにより、試料を透過した光子について分光することなく試料の分光測定を行うことが可能になった。

本試料はSPDC蛍光のスペクトル領域に鋭い吸収ピークを持つが、光子対の周波数の量子相関を用いた本実験においてもそれが測定された。(図1、図2)

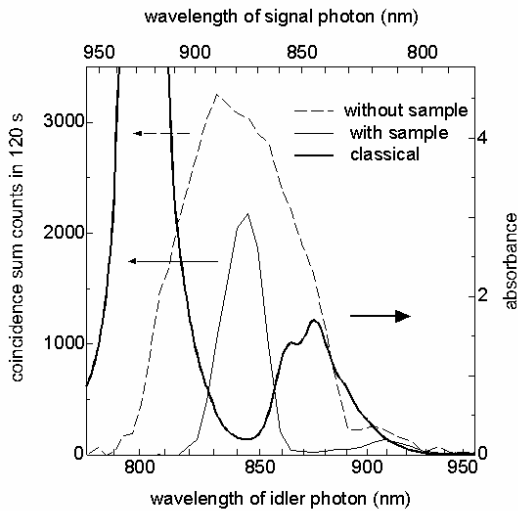


図1 波長を挿引して行った同時計数測定。
細（点）線は試料有り（無し）での測定値。
太線は吸光度計で測定した吸収スペクトル。

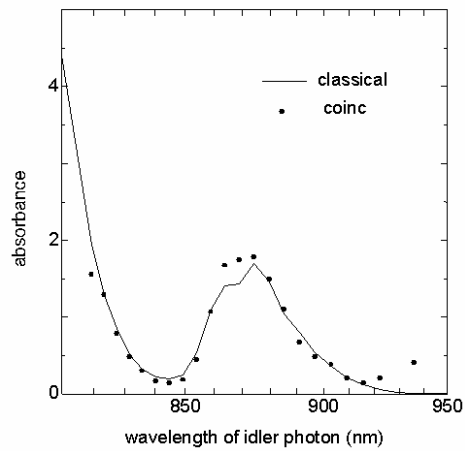


図2 同時計数測定で測定した吸収
スペクトルと、吸光度計で計った
吸収スペクトル。

< 広田グループ >

研究方法：

通常の光通信による情報理論的安全な量子共通鍵暗号を実施するための量子ゆらぎ拡散符号の開発を行い、そのシステム実証実験のための設計を行う。

研究成果：

(1) 情報理論的安全な量子共通鍵暗号の設計法の開発

本方式は盗聴者には多値信号、正規受信者には2値の信号となるように構成されるが、多値の信号が量子ゆらぎに埋没する条件等を計算し、送信電力と多値に最適値があることを示した。(広田、相馬、加藤)

(2) 量子共通鍵暗号のための拡散符号化法の研究

本年度は特に光通信量子暗号としての量子共通鍵暗号の安全性向上のための拡散符号として、多値基底の新しい配置法を開発した。これによって選択平文攻撃に対して情報理論的安全な量子共通鍵暗号が構成可能になった(広田、相馬、加藤)。また、初期鍵を使わない拡散符号の初めての構成法を発明した(臼田)。

(3) ユーエンとキム(YK)プロトコルの鍵生成速度の増幅器の効果

YKプロトコルにおいて光増幅器による中継の可能性とその安全性への影響を解析した。その結果、増幅器による中継は可能であるが、古典雑音の相関を安全性評価に組み込む必要があることが示され、その評価を行った。(山崎、大崎)

(4) コヒーレント状態による量子情報処理

コヒーレント状態を量子ビットとする系において、完全古典相関を持つ量子通信路で

は干渉性崩壊が存在しない現象があることを理論的に発見した。（廣嶋、広田）

<佐々木グループ>

研究目的：

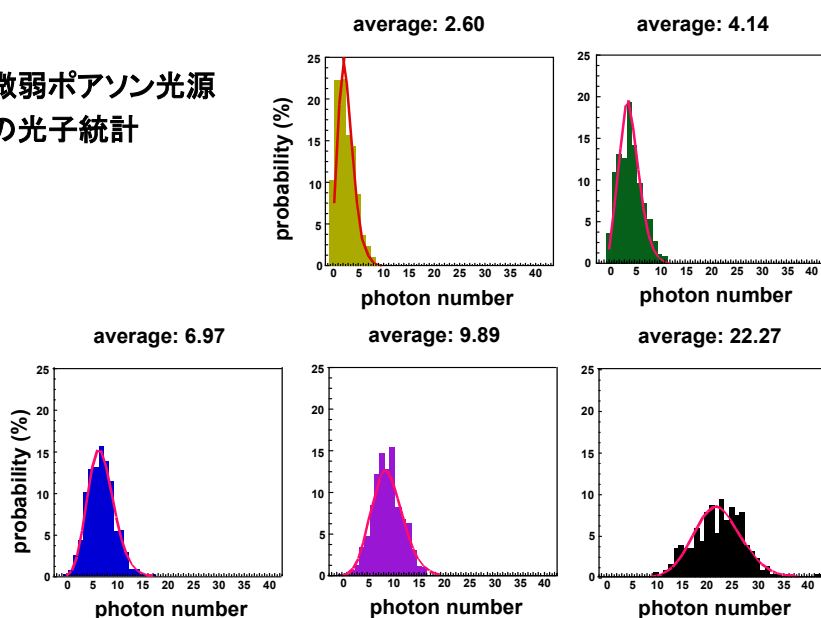
量子状態を使って情報を符号化し、量子通信路で最適な情報伝送を行うための基礎技術を開発する。これは全ての通常の通信技術において、データの圧縮と誤り訂正に関する符号化が不可欠の技術であるのと同様に、量子レベルの信号による大容量伝送や高度な安全性を保証する量子暗号技術の実現には必須の技術である。理論と実験の両面から研究を進めている。

研究成果：

(1) 高感度光子検出技術

InGaAs PIN PDによる高感度・低雑音の光電変換と低雑音GaAs JFETによる積分型読出回路を組合わせた通信波長帯用の光子検出器（CIPD）の開発を進めた。4Kの極低温動作で、サンプリング速度～数Hzと低速ではあるが、量子効率80%、暗電流0.14カウント/秒、光子数識別のS/N比2という極めて高感度の検出性能を達成した。これを用いて平均20光子程度までの微弱ポアソン光源の光子統計の系統的な変化を測定することに成功した（下図）。今後、さらに動作の高速化と安定化を進め、非古典光源による光子統計測定のための準備を進める。

微弱ポアソン光源 の光子統計



(2) 量子信号検出理論の構築とその応用

単一光子状態やコヒーレント状態の変調信号に対する量子最適信号検出技術の実装法について理論研究を進めた。特に、2値コヒーレント信号に対する量子最適検出限界（ヘル

ストローム限界) を達成する方法として知られるドリナー方式を一般化して、光子のキュービット状態等まで含めた量子状態信号に対する量子最適検出器を、光子検出器と線形光学回路及びフィードフォワードを用いて系統的に設計するための一般理論を構築した。

3. 研究実施体制

<中村グループ>

- ① 研究分担グループ長：中村 和夫 (日本電気(株)基礎・環境研究所、研究部長)
- ② 研究項目：絡み合い制御素子開発と量子中継システム

<Wangグループ>

- ① 研究分担グループ長：L. J. Wang (Max Plank Research Institute、Research Scientist)
- ② 研究項目：絡み合い光源開発等

<小林グループ>

- ① 研究分担グループ長：小林 孝嘉 (東京大学大学院理学系研究科、教授)
- ② 研究項目：スクイズド状態の絡み合い制御技術

<広田グループ>

- ① 研究分担グループ長：広田 修 (玉川大学学術研究所、教授)
- ② 研究項目：量子暗号安全性理論

<佐々木グループ>

- ① 研究分担グループ長：佐々木雅英 (情報通信研究機構基礎先端部門、
量子情報技術グループリーダー)
- ② 研究項目：量子符号化技術と高感度光子検出技術

4. 主な研究成果の発表 (論文発表および特許出願)

(1) 論文発表

<中村グループ>

- Y. Nambu and K. Nakamura, "Experimental Characterization of Non-ideal Two-qubit Quantum Devices by Quantum Process Tomography", Phys. Rev. Lett. **94**, 010404 (2005).

<W a n gグループ>

- J. Fan, A. Dogariu, L J Wang, "Generation of correlated photon pairs in a micro-structured fiber", to appear in Optics Lett., (2005)

- J. Fan, A. Dogariu, L J Wang, "Parametric amplification in a microstructure fiber", submitted to Applied Physics, B (2005)
- J. Fan, A. Dogariu, and L. J. Wang, "Reflection of a Gaussain Laser Pulse by an Active Medium," Opt. Comm, submitted (2004).

<小林グループ>

- H. Goto, H. Wang, T. Horikiri, Y. Yanagihara, and T. Kobayashi, Two-photon interference of multimode two-photon pairs with an unbalanced interferometer, Phys. Rev. A, 69, 035801, 2004
- Y. Li and T. Kobayashi, Four-photon entanglement from two-crystal geometry, Phys. Rev. A, 69, 020302, 2004
- A. Yabushita, and T. Kobayashi, Spectroscopy by frequency-entangled photon pairs, Phys. Rev. A, 69, 013806, 2004
- H. Wang, T. Horikiri, and T. Kobayashi, Polarization-entangled mode-locked photons from cavity-enhanced spontaneous parametric down-conversion, Phys. Rev. A, 70, 043804, 2004
- Y. Li and T. Kobayashi, Four-photon W state using two-crystal geometry parametric down-conversion, Phys. Rev. A, 70, 014301, 2004
- H. Wang, and T. Kobayashi, Quantum interference of a mode-locked two-photon state, Phys. Rev. A, 70, 053816, 2004
- Y. Li and T. Kobayashi, Multi-photon entangled states from two-crystal parametric down-conversion and their application in quantum teleportation, Opt. Comm., 244, 285-289, 2005
- H. Wang and T. Kobayashi, Phase measurement at the Heisenberg limit with three photons, Phys. Rev. A, 71, 021802, 2005

<広田グループ>

- T.Hiroshima, and O.Hirota,; Continuous variable noise free states in correlated quantum noisy channels, Proceedings, vol.734, S. M. Barnett, E. Andersson, J. Jeffers, P. Ohberg, and O. Hirota (Eds.), American Institute of Physics, New York, (2004).
- O.Hirota, K.Kato, M.Sohma, and M.Fuse,; A quantum symmetric key cipher(Y-00) and key generation: Quantum stream cipher part II, Proc. of Quantum Informatics 2004.
- 広田 修, 量子暗号の最新動向 情報処理、vol-45, no-11, (2004)
- O.Hirota, K.Kato, M.Sohma, T.Usuda, and K.Harasawa,; Quantum stream cipher based on optical communications, Proc. SPIE, vol-5551, (2004).

- 広田 修, 光通信ネットワークと量子暗号 電子情報通信学会、論文誌 B, No-4, pp 478-486, (2004)
- S. Usami, H. Shiraki, T. S. Usuda, and I. Takumi, Construction of quantum error correcting code for specific position errors, Proceedings, vol.734, S. M. Barnett, E. Andersson, J. Jeffers, P. Ohberg, and O. Hirota (Eds.), American Institute of Physics, New York, (2004).
- K.Yamazaki, Eavesdropping on Key Distribution Scheme based on Shot Noise of Intense Laser Pulses Proceedings, vol.734, S. M. Barnett, E. Andersson, J. Jeffers, P. Ohberg, and O. Hirota (Eds.), American Institute of Physics, New York, (2004).
- M.Osaki, K.Yamazaki, and M.Ban, Interference of the correlation by beam splitting in YK protocol QKD system Proceedings, vol.734, S. M. Barnett, E. Andersson, J. Jeffers, P. Ohberg, and O. Hirota (Eds.), American Institute of Physics, New York, (2004).

<佐々木グループ>

- M. Fujiwara, and M. Sasaki: “ Multiphoton discrimination at telecom wavelength with charge integration photon detector,” Appl. Phys. Lett. 86(11), 111119 (2005).
- M. Akiba, M. Fujiwara, and M. Sasaki: “ Ultrahigh-sensitivity high-linearity photodetection system using a low-gain avalanche photodiode with an ultralow-noise readout circuit,” Opt. Lett. 30(2), 123 (2005).
- M. Takeoka, M. Sasaki, P. van Loock, and N. Lütkenhaus, “Implementation of projective measurements with linear optics and continuous photon counting,” Phys. Rev. A 71, 022318 (2005).
- J. Mizuno, K. Wakui, A. Furusawa, and M. Sasaki: “ Experimental demonstration of entanglement-assisted coding using a two mode squeezed vacuum state,” Phys. Rev. A 71, 012301(2005).
- A. Kitagawa, and K. Yamamoto: “ Analysis for practical realization of number-state manipulation by number-sum Bell measurement with linear optics,” Phys. Rev. A 70, 052311 (2004).
- M. Fujiwara, and M Sasaki: “ Performance of GaAs JFET at a Cryogenic Temperature for Application to Readout Circuit of High-Impedance Detectors,” IEEE Transactions on Electron Devices, 51(12),2042 (2004).
- M. Takeoka, M. Sasaki, P. van Loock, and N. Nutkenhaus: “ Quantum State Discrimination with Linear Optics and Continuous Measurement,”

Quantum Communication, Measurement and Computing, pp67--70 (American Institute of Physics 2004).

- K. Nagata, W. Laskowski, M. Wiesniak, and M. Zukowski: “Rotational Invariance as an Additional Constraint on Local Realism,” Phys. Rev. Lett. 93, 230403 (2004).
- M. Fujiwara and M. Sasaki: “Photon Number Resolving Detector At Telecommunication Wavelength,” Quantum Communication, Measurement and Computing, pp40--43 (American Institute of Physics 2004).
- M. Sasaki, K. Wakui, J. Mizuno, M. Fujiwara, and M. Akiba: “EPR Beams and Photon Number Detector: Toward Synthesizing Optical Nonlinearity,” Quantum Communication, Measurement and Computing, pp44--47 (American Institute of Physics 2004).
- M. Takeoka, M. Fujiwara, J. Mizuno, and M. Sasaki: “Implementation of generalized quantum measurements: Superadditive quantum coding, accessible information extraction, and classical capacity limit,” Phys. Rev. A 69, 052329 (2004).

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：1件（CREST研究期間累積件数：1件）