

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 「量子暗号の実用化を可能にする光子状態制御技術」

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

中村 和夫 (物質・材料研究機構若手国際研究拠点 副センター長)

主たる共同研究者

富田 章久 (日本電気基礎・環境研究所(NEC 筑波) 主任研究員)

Lijun Wang (MAX PLANCK RESEARCH GROUP, Institute of Optics, Information and Photonics, University of Erlangen-Nuremberg 教授)

小林 孝嘉 (東京大学理学研究科 教授)

広田 修 (玉川大学工学部 教授)

佐々木 雅英 (情報通信研究機構(NICT)量子情報グループ リーダ)

3. 研究内容及び成果

本チームは現在の量子暗号システムをより広範に実用化して行く上で、量子中継などの量子絡み合いを利用する技術が重要となり、そこに研究の主眼を置いた。これは量子暗号を量子情報通信システムとして見直してみると、送信部における量子状態の生成技術、通信路における制御・変換技術、受信部における検出技術など各要素基盤技術の高度化が必要になることを意味する。これにより、量子情報全体の技術のレベルアップも期待される。

本チームでは各要素基盤技術を各グループの保有するポテンシャルを使い、種々の手法で高度化を行った。また同時に、研究の途上で得られた成果をベースに量子暗号システムの実証実験に関するテーマもその後の展開として追加した。

(1) 送信部での量子絡み合いの生成技術

①量子状態トモグラフィーによるフェムト秒短パルス励起で量子絡み合い光子対の高効率生成技術(従来のタイプII結晶より高効率)(NEC筑波)、②フォトニック結晶ファイバを用いた量子絡み合い光子対の生成技術(結晶を用いる方法よりも高photon flux)(マックスプランク)、さらに③3光子の多光子量子絡み合いを生成する光子源技術の実現(東大)にも成功した。

フォトニック結晶ファイバ光源は発生する絡み合い光子対の波長相互に違いが有り、片方を単一光子源とする量子暗号などに応用されて行くであろう。また、多光子絡み合い技術は前者の技術との組合せでさらなる高度化が可能であり、また種々の量子プロトコルへの応用も期待される。

(2) 通信路での量子状態の制御・変換技術

①量子状態を制御する量子操作(量子チャネル)の評価技術(2ビット操作のビームスプリッタで新たな知見)(NEC筑波)、②量子インターフェースやゲート操作へ向けた単一量子ドットの分光研究と低温・強磁場環境での近接場顕微鏡開発(NEC筑波)、③量子情報源符号化と量子通信路符号化技術(シャノン限界を超える世界初の実証実験)を実現(NICT)しており、さらに④量子絡み合いのコヒーレント状態への拡張(玉川大)や量子絡み合いの定量化と劣化の回復に関する理論的成果(有名な未解決問題の一つの解決を含む)(NEC筑波)を得た。

これらの技術はいずれも量子状態の制御・変換に関する重要な基盤技術であり、今後のこの分野の発展に大きなステップとなる。

(3) 受信部での量子状態の検出技術

①低ノイズ・高感度な光子検出器の開発(従来より1桁以上の高性能)(NEC筑波)、②真空中に感度を有する新たな光子検出技術(従来の検出器が吸収過程を用いるのに対し、誘導放出過程を初めて用いる)(NEC筑波)、③量子暗号の安全性保証や光量子計算へ繋がる光子数識別器の開発(他と比べ総合性能と汎用性で優る)(NICT)、④量子絡み合い状態の干渉や位相を観測する新たな検出技術の開発に成功(東大)した。

これらの検出器は実用システムへ搭載したり、新たな量子情報研究用として用いられたり各場面に応じて使い分けられて行くものである。今後、検出技術もその価値が認められて行くと期待され、また本プロジェクトで量子情報の広い範囲に渡る基盤技術が育成されたことが判る。

(4) 量子暗号システムの実証実験

本テーマは研究途上で加えられたもので、本研究での成果をベースに短距離ではあるが、従来のシステムと比べ、高性能でより実用化に近いシステムの実現を目指したものである。①高性能単一光子検出器を用いた量子暗号システム(世界最長150km伝送)(NEC筑波)、②量子絡み合い光子対の片方の受信信号を伝令信号とした量子暗号システム(東大)、③コヒーレント光通信による新量子暗号システム(多値強度変調方式)の開発(玉川大)にそれぞれ成功した。

前者2つは光源が異なるが同じ単一光子による量子暗号である。特に1番目は単一光子を用いた量子暗号の実用性を大きく前進させるものとなっている。また3番目はコヒーレント光を用いた原理の異なる量子暗号であり、安全性の証明に関してはまだコンセンサスが得られていないが、用途によっては従来の単一光子量子暗号と棲み分けることも考えられる。

以上、示した様に、本プロジェクトでは量子情報の重要な要素となる基礎基盤技術の他、実用化に近いシステムまで含め、広範な量子情報技術をテーマにし、その全体の技術的レベルアップに大きく貢献した事を強調しておきたい。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

量子エンタングルメントが、暗号通信の分野で実際に有用に機能することを実証したことは、今後のこの分野の研究の発展に貢献する基盤的研究であって成果の学問的、および応用上のインパクトは極めて大きい。技術的な面では各要素技術はそれぞれ有用な応用分野を含んでおり、今後中継なしの通信システムとしての具体的応用は勿論、分光学や物性研究の手段の提供など色々な分野に応用されるであろうという意味でも貢献は大きい。

論文発表は英文167件、和文30件、口頭発表(ポスター発表含む)は国際会議114件、国内会議192件、そのうち招待されたものが夫々21件と16件、特許出願は国内1件など国際的評価の高い学会誌や国際会議に多くの優れた研究成果が発表されており、下記は其中でも特筆すべきもので、いずれも世界で初めて報告された独創的な成果である。

- ①高絡み合いパルス光子対源、光子対を利用したプロセスモグラフィによるゲート評価法の開発、真空ゆらぎに感度のある測定の実証、近赤外単一量子ドットの励起子分光評価技術の開発、相対エントロピーに基づく絡み合い定量化、高次元の絡み合い回復可能条件の理論、単一光子 150km 伝送実証の成功。
- ②高効率 PC ファイバを用い、量子絡み合い光子対光源開発の成功。
- ③3光子量子絡み合いW状態の高効率生成に成功し、伝令光子信号を用いた Quantum Key Distributor の実証。
- ④強度変調による新しい光通信量子暗号の考案。
- ⑤量子通信路符号化、量子情報源符号化の原理検証、シャノンの理論限界を超える実証実験。通信波長光子数識別器の市販の半導体素子を用いた実現。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

量子中継という点からは現時点ではいまだ十分な貢献があったとは言い難いが、ここで得られた光子状態制御技術に関する成果は量子ネットワーク分野の基礎となるもので、量子暗号通信という広い立場で見ると科学的、技術的貢献は大きく、今後この成果を更に発展させて実用化のレベルに近づけることができれば技術的インパクトも更に大きくなることが期待される。特に

- ①PC ファイバを使用した高効率の量子絡み合い光子対光源の作製。
- ②強度変調による解読不能と考えられる光通信量子暗号の考案。
- ③シャノンの古典的通信容量の限界を超える実験を光量子符号化により実証。
- ④単一光子の 150km 伝送の成功。

により当研究チームの戦略目標を達成し、科学技術の発展に大きな貢献をした。

4-3. その他の特記事項

量子通信の研究そのものがまだ端緒にすぎたばかりで、実用化の成否は今後の研究にかかっている。量子絡み合い、量子ゲート、励起子及びスピン制御、光子からの変換媒体、量子バッファ等量子ネットワークの要素技術に関する基礎的成果については今後も学術的展開、成果が期待できるが、これらの要素技術の研究成果の展開、価値の向上は量子暗号通信システムの実現によ

り初めて果たされるものであるので、今後は実用的技術に向けて、システムとしての実証への更なる展開へ向け、組織的な研究が継続されることが期待される。

受賞については、小林孝嘉教授の、国際時間分解振動分光学会賞(平成 17 年 5 月)、松尾財団学術賞受賞(平成 17 年 10 月)が挙げられる。