

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 大川 洋平

「低コヒーレンス光励起によるパラメトリック下方変換を使った非古典光生成の試みと散逸・擾乱のある環境下での通信・計測への応用に関する研究 Nonclassical light generation by parametric down conversion using low-coherence light excitation and its application to communication and sensing under noisy environment」と題した学位請求論文の中で同氏は、低コヒーレンスの半導体レーザーを使ったパラメトリック下方変換 (Parametric Down Conversion, PDC) による非古典的な光の生成とそのデコヒーレンスに関する研究成果を報告している。PDCによって生成される非古典光は伝令付き単一光子源やエンタングルメント光源として古典的な波動論で説明できない様々な現象をもたらすが、光の電場干渉・強度干渉を舞台に発現するこれら量子効果が環境との相互作用から受ける影響を理学・工学的見地から系統的に調べたのが本論文である。

論文は7章から構成される。序論の位置づけにある第1章では研究の背景と問題意識の設定が、第2章では低コヒーレンス励起光源を用いた安定的な相関光子対の生成方法が述べられている。第3章は量子情報処理を意識した音響光学方式の周波数変換における量子性の保存と単一光子ヘテロダインビート観測の報告、第4章は同一の空間モードに局在した識別不可能な2光子状態のような光子への直接アクセスが禁止された状況下での量子状態の情報取得に関する考察である。第5章ではその検証例としてシングルモードファイバ(SMF)に結合した2色偏光もつれ光子対のデコヒーレンスが量子通信における雑音の観点から議論され、頑強な通信法の提案に至っている。第6章では2光子NOON状態を使ったファラデー回転角の測定におけるS/N比への透過損失の影響が量子精密計測の立場から定量的に議論され、最終章において論文全体が総括される。

同氏は、まず励起光コヒーレンスの関数としてのエンタングルメントの「質」を精査した。3mm長の非共軸type-II BBO結晶のPDCによって2光子偏光状態を生成する時、円錐状に放射される直交偏光光子の交線間にエンタングルメントが発生するが、低コヒーレンス(≈ 0.2 mm)励起光に対しても量子状態トモグラフィから推定される密度行列のコンカレンス値が0.83と比較的高い水準にあることを見いだした。さらに外部共振器で励起光コヒーレンスを変化させてもコンカレンスへの影響は予想を常に下回った。このこ

とからSMFによる空間モード制限さえ利用できれば、従来、用いられてきたハイエンドな狭帯域励起光源が不要となる可能性を指摘した。

これを動機として以下、一連のPDC光のデコヒーレンスに関する研究が展開される。まず、同氏は光子の周波数変換に注目し、音響光学変調器上のフォノン吸収を伴う周波数シフトがPDCで発生する伝令付き単一光子の量子性を破壊しないコヒーレントな過程であることを示し、高い明瞭度の1光子ビートの検証に成功している。これにより汎用のヘテロダイン干渉を単一光子流などの微弱光に直接適用することへの道筋をつける一方、スペクトル位相符号化による新しい古典ビット送信法を提案・検証している。

次いで同氏は、隠れた2光子エンタングルメントの判定法を考察した。同一空間モードに2光子偏光状態が局在すると、光子の「隠れた」自由度に差異があってもくだんの2光子状態がエンタングルしているかどうかは定かでない。実際、識別不可能な対称な2光子状態と識別可能なエンタングル光子対の対称状態は同じ密度行列を与える（縮退）。一方、反対称な一重項エンタングル状態には縮退が発生せず、隠れた自由度にアクセスしなくてもエンタングルメントを検知可能な場合がある。同氏は、SMF上の離調した偏光エンタングル光子対に量子状態トモグラフィを施すことで理論通りの大きさの反対称一重項成分を検出し、隠れたエンタングルメントの検知に成功している。

さらに同氏は、量子通信の観点からSMFにおける偏光のデコヒーレンスを調べた。上の一重項状態が曲げや振動に起因する二光子共通の雑音に対して不変な純粋状態であることに注目し、同氏は波長でラベルした偏光一重項エンタングル状態を生成、ファイバ雑音路の前後で波長分解の状態トモグラフィを行った。忠実度の安定性（0.7%未満）を根拠にファイバ雑音に対する耐性を検証するとともに偏波保持ファイバ位相雑音路における2光子状態の頑強なキュビット伝送を実験的に示した。これは単色性を犠牲にすることで波長間の量子相関が偏光状態の保護に役立つことを示す結果である。

最後に同氏は、量子増幅効果を用いた散逸性媒質中のファラデー回転の測定を試みた。2光子NOON状態 ($|2_R 0_L\rangle + |0_R 2_L\rangle$) の左右円偏光間の位相シフトは1光子の倍で波長限界が打破できるが、回転量と透過光量のトレードオフでは必ずしも前者優位とは言えない。そこで同氏は相互作用長の関数として位相推定精度を詳細に追跡し、試料長が短い領域で2光子NOON状態プロトコルが古典プロトコルを凌駕することを見いだした。さらに位相推定精度の最大値が古典プロトコルの $N^{0.5}$ 倍となる一方、位相推定精度の最大値を与える相互作用長が N^{-1} 倍に短縮化されるとの自らの理論予測を実験的に検証し、量子精密計測の効用と限界の論争に一石を投じた。

以上のように低コヒーレンス光励起によって発生したPDC非古典光とそのデコヒーレンスを理論的・実験的に探求した本研究は、それによって得られた新たな知見が従来の認識に変更を迫る内容であるとともに量子光学および周辺関連分野の学理の深化と当該科学技術分野の発展に少なからず貢献することが期待できることに鑑み、本審査委員会は全会一致で博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。