

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：92615

研究種目：国際共同研究加速基金（帰国発展研究）

研究期間：2020～2022

課題番号：18K19958

研究課題名（和文）フォトニック強相関系の創出

研究課題名（英文）Innovation by Strongly Correlated Photonic System

研究代表者

斎藤 慎一（Shinichi, Saito）

株式会社日立製作所（研究開発グループ）・基礎研究センタ・主管研究員・部長

研究者番号：80308212

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 47,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではフォトニック強相関系の創出を目標に、理論と実験の両面からコヒーレント光の角運動量に関する基礎研究を実施した。その結果、ストークスパラメータが量子力学的スピン期待値である事を示した。また、軌道角運動量が交換関係を満たし、導波路や近軸近似が成立する系ではスピンと軌道角運動量を分離可能である事を証明した。

SU(2)空間の任意の回転を実現するポアンカレ回転子を考案し、実験的な動作実証としてC60や地球儀の描画に成功した。光渦と偏光を組合せマクロな量子ビットによるエンタングルメント状態を実現しそのベル射影にも成功した。当初の予想を超えて、光の軌道角運動量とリーダ代数のつながりを実証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子力学の創生に深く関わったアインシュタインは、光子とは何かを理解できなかつたと述べています。本研究では、光の角運動量とは何かという基礎的な問題に対して、最先端の実験技術と場の量子論という理論的な枠組みで取り組みました。その結果、光の角運動量は量子的な性質を持っており、その状態を制御する事で様々な新しい応用が可能であることが分かりました。本研究に基づく偏光制御技術を用いると、現在の通信量を100倍程度増大できる可能性がある事が実験的に明らかになりました。また、光の角運動量を量子ビットとして動作させる事にも成功しました。今後、新しい国産光量子コンピュータや高感度の量子センサ応用が期待されます。

研究成果の概要（英文）：In this project, I was aiming to realise photonic strongly correlated system by manipulating angular momentum of coherent photons both theoretically and experimentally. I have shown that the Stokes parameters are expectation values of coherent photons. I have also shown the validity of commutation relationship for orbital angular momentum of photons. In a waveguide, I have theoretically proven that we can split spin and orbital angular momentum of photons.

I have proposed Poincare rotator, which can realise an arbitrary superposition state of SU(2) in spin and orbital angular momentum. As a demonstration, I have realised photonic C60 and the coastline of the earth, drawn on Poincare sphere. I have also realised macroscopic entangled state of spin and orbital angular momentum. I have also experimentally obtained the images of singlet and triplet states after the Bell projection. It was beyond my expectation that the angular momentum of photons are related to Lie group.

研究分野：フォトニクス

キーワード：フォトニクス 量子技術 角運動量 光渦 偏光 エンタングルメント 強相関 コヒーレント光

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、量子技術への大規模投資が始まり出していた。英国での£270M投資をはじめ、ヨーロッパの量子フラグシッププロジェクトでの€10B投資や、米国・中国でも量子技術への官民による投資が盛んになり、世界的な競争が熾烈になり、学术界でも量子関連の新雑誌の創刊が相次いでいる。量子技術では、何らかの形で量子ビットを利用する事になるが、量子ビットは、単一光子、単一電子、イオン、中性原子、超伝導クーパ対、磁束量子などの素粒子や素励起を利用するため、極低温や真空などの特別な測定環境を用意しないとデバイスを動作させる事ができない。シュレディンガーの猫のパラドクスで説明されるように、マクロな物理量に対して量子効果を期待する事は難しく、巨視的量子現象の発現は、超伝導や超流動、ボーズ・アインシュタイン凝縮、そして、レーザー光など限られた系でしか実現せず、また、これらの系においてもそのマクロな量子状態を量子ビットとして制御可能であるとは考えられていなかった。巨視的量子状態の実現として良く知られる超伝導においては、位相の巨視的量子トンネル(MQT)が観測されたものの、マクロ系では散逸を伴う事が判明した。そのため、量子ビットとして使われているのは、微視的なキャパシタにおけるクーパ対やインダクターによる磁束量子であり、微視的な素励起を用いなければ、量子ビットを実現する事はできない。巨視的物理量で量子ビットを構成できれば、実用化しやすい量子技術の開発につながるだけでなく、なぜ微視的現象を支配する量子力学が巨視的現象では古典力学のようになるのか？といった学術的な疑問に対する解答のヒントを与える事ができると期待された。しかし、そのためには、レーザー光を巨視的量子状態として取り扱い、その内部量子自由度を量子ビットとして制御する必要があった。光のスピン状態は偏光として知られており、その状態は、SU(2)と呼ばれる2準位系で記述できる事が広く知られていたが、なぜ巨視的な自由度を持ち古典光と呼ばれるレーザー光が量子2準位系として取り扱う事が可能であるのか十分に理解されていなかった。

2. 研究の目的

そこで、本研究の目的は、“光の角運動量とは何か？”という根本的な学術的疑問を迫り、場の量子論を用いた理論的な研究を実施するとともに、その実験的な検証を進める事を目的とした。量子力学の創生に絶大な貢献をした Einstein は、自分自身の研究を振り返り、「50年間にもおよび光量子とは何か？自問自答したが、答えに少しも近づいていない」との名言を残している。本研究は、その補題である光の角運動量にフォーカスしたものであるが、学会でその重要性が認識されたのは、比較的最近であり、1992年に Allen らが光の軌道角運動量の存在を理論的に提唱した事より研究が爆発的に進展した。ところが、その基礎は確立したとは言い難く、光の全角運動量は良い量子数であるものの、スピンと軌道への分離は不可能であると考えられていた。光のスピンや軌道角運動量を任意に制御できるようになれば、光で量子スピン系を実現する事ができるようになり、フォトリック強相関係の創出につながると考えた。研究目的として、以下の5点を掲げた：

- (1) 理論と実験を駆使し、光の角運動量とは何かという核心的疑問に対して深く洞察
- (2) 回転対称性と光の角運動量の関係を明確にし、量子ビットや量子ビット間の操作を実証
- (3) 局所的偏光制御技術を確立し、全く新しい量子状態を実現
- (4) フォトリック強相関係を実現し、量子スピン系の理論を実験的に検証
- (5) 量子シミュレータや偏光変調器などの新たな応用分野を開拓

3. 研究の方法

本研究では、次の5つの Work Package を用意し、PDCA(Plan-Do-Check-Action)サイクルを回す事で、理論を実験で検証しつつ、研究を進めた：

- (1) 理論：場の量子論を用いたコヒーレント状態の解析
- (2) 設計：光学シミュレーションツールを用いた光回路設計
- (3) 試作：ポアンカレ回転子、高速 Polarimeter や Spin to Orbit 変換器などの試作
- (4) 測定：光学定盤における試作評価と理論検証
- (5) 応用：光量子シミュレータや光暗号通信などを見据えた応用探索

4. 研究成果

(1)理論解析1：Stokes パラメータがコヒーレント光のスピン期待値である事を証明[1].

光の偏光状態が Stokes パラメータ \mathbf{S} で記載可能である事は、量子力学誕生以前から明らかにされていたが、Jones ベクトルを用いた計算方法は完全に1粒子量子力学の2準位系 SU(2) と等価であり、なぜ多粒子の光子からなるレーザー光の偏光状態を1粒子状態で記述できるのか十分な説明がなされていなかった。そこで、場の量子論を駆使して、レーザー光の偏光状態を解析する事に挑戦した。その結果、縦偏光と横偏光の光子の生成演算子をそれぞれ、 \hat{a}_H^\dagger 、 \hat{a}_V^\dagger と定義した際に、コヒーレント状態を $|\alpha_H\rangle = e^{-|\alpha_H|^2} e^{-\alpha_H \hat{a}_H^\dagger} |0\rangle$ 、 $|\alpha_V\rangle = e^{-|\alpha_V|^2} e^{-\alpha_V \hat{a}_V^\dagger} |0\rangle$ の直積状態である $|\alpha_H \alpha_V\rangle = |\alpha_H\rangle |\alpha_V\rangle$ と表せる事が明確になった。ここで、 α_H と α_V は SU(2) の偏光状態を表す巨視的な波動関数であり、巨視的な数の光子が同一の振幅と位相を持っている事を特徴とする。この多体の波動関数を用いると、同じく多体のスピン演算子を、Pauli 行列 $\hat{\sigma}$ と南部演算子 $\hat{\psi} = (\hat{a}_H, \hat{a}_V)$ を用いて $\hat{\mathbf{S}} = \hat{\psi}^\dagger \hat{\sigma} \hat{\psi}$ と定義すれば良い事が分かり、Stokes パラメータとは、コヒーレント状態における光のスピン期待値 $\mathbf{S} = \langle \hat{\mathbf{S}} \rangle$ である事を証明する事ができた。非常に基礎的な解析であり、分かってし

まうと明らかであるが、このような解釈は浸透しておらず、以下にみるように応用範囲も大きくインパクトや波及効果もあると考えている。理論的な解析技術としては、公知の理論の組合せであり取り立てて新規性はない。それより、Stokes や Poincaré といった偉人が、量子多体理論やレーザーの発明はおろか光子という概念の発案以前に、偏光の本質的な性質を見抜いていたという驚愕の事実が明確になった。

(2) 理論解析 2：光の軌道角運動量に関する交換関係成立を確認 [2]

光の角運動量としては、スピン以外に軌道角運動量が考えられ、近年、注目を集めている。ところが、膨大な研究発表がなされているにも関わらず、光の軌道角運動量が良い量子数である事に関して懐疑的な見解が多い。そこで、軌道角運動量を有する波動関数として最有力の Laguerre-Gauss モードに関して、交換関係が成立しているかどうかを検証した。特に、Laguerre-Gauss モードが Helmholtz 方程式の近軸近似の解として正当化される円柱座標系において、角運動量演算子を再定義した。その結果、軌道角運動量演算子から、軌道角運動量の昇降演算子を構成できる事が示され、Laguerre-Gauss モードに適用すると、軌道角運動量の量子数をひとつずつ増減させる事が可能である事が証明された。この計算の過程では、Laguerre 多項式や陪多項式に関する新しい数学公式を導出する事ができ、数値シミュレーションに頼る昨今では手薄になっている解析的アプローチに貢献できたと考えている。その結果、軌道角運動量の大きさに対する期待値も解析的に計算する事ができた。また、Laguerre-Gauss モードは軌道角運動量の固有状態ではあるが、大きさ(軌道角運動量の 2 乗)に関しては固有状態になっていない事も明確になった。

(3) 理論解析 3：光のスピンと軌道角運動量の分離に成功 [3]

本研究の理論的解析において、最も注目すべき成果のひとつがスピンと軌道角運動量の分離に成功した事である。従来の主流な学説は、軌道角運動量そのものは良い量子数であるが、スピンと軌道角運動量は結びついていて、完全に別々の自由度として切り離す事はできないというものであった。分離に成功したという論文も数本発表されているが、手厳しい反論があり論争になっていた。数学的に決定的なステップは、単なる部分積分であり、境界からの寄与が無視できないというものである。境界からの寄与を無視すれば分離可能な事は、Jackson の電磁気学の教科書の演習問題に記載されているレベルの解析で証明できる。この問題に挑戦したところ、従来の理論的アプローチは平面波展開に基づくものであり、平面波展開では、中心でノードを持つ Laguerre-Gauss モードを表現できない事が明らかになった。台風や超伝導体の磁束量子と同様に光渦も中心の振幅をゼロにできない限り、安定に存在できない。量子力学の誕生は黒体輻射の解析を基にしている事から、平面波展開が一般的であったが、レーザー光の伝搬や点光源からの発光、ファイバ中の伝搬などを取り扱うためには、平面波展開は有効ではなく、束縛状態あるいは伝搬状態として、モード形状が有限である事を考慮に入れる必要がある。このような場合、上述の不定積分の境界項が消えるため、スピンと軌道角運動量は分離可能である。特に、Graded Index (GRIN) ファイバなどスピン軌道相互作用が無視できる系においては、この分離は厳密に可能である事を証明できた。この研究の結果、コヒーレント光のスピンと軌道角運動量を別々の良い量子数として取り扱う事が可能である事を示す事ができ、光の角運動量を量子技術へ応用するための理論的根拠を確立する事ができた。なお、上述の通り、この理論は従来の学説から反するため、実験的な検証をするまで発表を控えていた。これまでのところ、全ての実験結果は理論的予想と矛盾しないため、論文として発表する事にし、現在、査読審査中 [1-10] である。

(4) 理論解析 4：光の Dirac 方程式による偏光の起源に対する考察 [4]

上述のように、光の軌道角運動量が良い量子数である事が明確になったため、そこから一歩進めて、なぜ、光はスピンを持たねばならないのか? という物理的な起源に迫る研究を理論的に実施した。このような考察を進める上で、解析的に厳密に解ける事が重要であるため、GRIN ファイバを想定して理論を構築した。この場合、エネルギー・ギャップを有する BCS 超伝導型になる事が判明した。これは、南部理論で議論されたように、自発的対称性の破れに伴う質量発生機構と類似している事を示唆している。そこで、分散関係の量子化から導出される Schrödinger 方程式を変形すると時空 2 次元の Klein-Gordon 方程式になった。ここで、確立流の流速が連続の式を満たす形で保存するためには、2 次形式である Klein-Gordon 方程式は因数分解されて 1 次方程式の積となる必要がある。すると、自然な形で、係数が非可換の Pauli 行列となる事が示された。すなわち、GRIN ファイバにおいて、レーザー光を満たすべき波動関数に対して確立解釈と連続流体としての保存則を課すだけで、偏光という量子自由度が必須である事が導かれた。ここで、その偏光の回転対称性が自発的に敗れている事が重要であった。そして、その対称性の自由度はエネルギー・ギャップ Δ の振幅と位相として、SU(2) の波動関数と対応する事が明確になった。コヒーレント状態の巨視的波動関数では、 $\alpha_H = \sqrt{N}e^{-i\phi/2} \cos(\theta/2)$ 、 $\alpha_V = \sqrt{N}e^{i\phi/2} \sin(\theta/2)$ とおけば良い。このコヒーレント状態の波動関数は、SU(2) 対称性を破っており、BCS 波動関数が U(1) 対称性を破っている事と対称的である。超伝導の場合、U(1) 対称性を回復させるためにはプラズマを励起してしまうが、レーザー光の場合、電荷を持っていないため、エネルギーを与える事なく、波長板などで偏光を回転させる事ができる。コヒーレント状態の波動関数を始めて導出したのは朝永やパインズのポーラロン理論であるが、本研究では、その理論を SU(2) に拡張する事で、偏光の起源に迫る事ができた。

(5) 理論解析 5：GRIN ファイバ中の特殊相対性理論 [5]

当初の想定以上に光のスピンに関して基礎的な知見が得られたため、偏光について更に理解

を深めるために、GRIN ファイバにおいて、観測者が光速に近いスピードで偏光を観測した場合に、光がどのように見えるか思考実験を行った。これは、特殊相対性理論の応用であるが、ファイバ中の光のスピードは真空中よりも遅いため、観測系はファイバ中での光速を超えて、観測する事が可能である。この場合、異常なドップラー効果が期待でき、光速をこえると赤方偏移と逆に波長が紫外方向にシフトする事が判明した。観測系が光速を超えたところで、光の見かけ上の周波数が負になり、あたかも時間と逆行しているように見える事も明らかになった。さらに、光の軌道角運動量大きい場合、光の質量が実効的に重くなり、十分に質量が重いと、観測系のスピードを上げて、周波数の符号は反転せずに運動量の符号が反転する事が判明した。このような実験を実際に行う事は現実的ではないが、光の進行方向によって、偏光がどのように観測されるかなど、偏光に対する知見を深めるのに有効であった。

(6) 実験 1: パッシブ Poincaré 回転子の実証[6]

上述の理論に基づき、偏光状態の巨視的波動関数を通常の半波長板と 1/4 波長板を組み合わせる事により、任意の SU(2) 状態を実現する Poincaré 回転子を考案し、そのパッシブ動作を実証した。半波長板を回転させると、偏光状態を変化させる事ができる事は知られていたが、その状態変化は、Poincaré 球上の鏡映変換であり、回転のように群をなさない。これは、鏡映変換を 2 回行くと元に戻ってしまい、2 倍の回転角にならないことがからも明らかである。従って、半波長板の回転で偏光状態を変化させようとすると、任意の回転を実現するのは難しく、予め入力偏光状態を測定した上で、鏡映変換を行うなどの操作が必要であった。ところが、観測してしまうと光の量子状態は決定してしまうだけでなく、フォトダイオードによって吸収されてしまうため、強度が減少してしまうという課題があった。この困難を克服して、任意の偏光回転を実現するには、もう 1 枚半波長板を用意すれば良い事を明らかにした。これにより、鏡映変換を回転変換に変える事ができる。回転は群をなすため、半波長板により、SO(2) 回転群を構成できる。加えて、2 枚の 1/4 波長板によって、SO(2) 回転の前後に回転軸を 90° 回転させる事により、任意の位相変調ができる事も実証した。このように、振幅変調のための半波長板 2 枚と、位相変調のための半波長板 2 枚と 1/4 波長板 2 枚という合計 6 枚の波長板を用意する事で、Poincaré 球上の任意の回転を実現した。提案する Poincaré 回転子は、通常入手できる光学部品の組合せにより、任意の偏光状態を実現できるため、今後、広く応用できる技術であると期待される。

(7) 実験 2: アクティブ Poincaré 回転子の実証による 1 量子ビット演算の実証[7]

Poincaré 回転子のパッシブ動作に引き続き、アクティブ動作にも成功した。これは、LiNbO₃ 光変調器を AWG (Arbitrary Waveform Generator) によって高速制御する事によって、任意の偏光状態をダイナミカルに操作する素子である。Poincaré 回転子は任意の SU(2) 演算を実行できるため、Poincaré 回転子による偏光操作は、偏光状態を表す巨視的波動関数に対して任意の 1 量子ビット演算を実行した事に相当する。アクティブ Poincaré 回転子は、光ファイバとビーム分波器、波長板、光変調器などから構成され、コンピュータプログラムにより制御できるようにソフトウェアも開発した。原理検証のため、図 1 にデモンストレーションとして実施したポアンカレ球上に描いたフラウレン C₆₀ と地球儀を示す。これは、偏光状態を制御する事によって、多値を表現できることを表している。例えば、光通信技術に応用すれば、通信帯域を 60 倍~100 倍程度に増大させる事も可能となる。動作スピードは、スピードは最大 100MHz と LiNbO₃ 光変調器としては、非常に遅いスピードで動作させた。原理的には、40GHz 程度での高速変調にも何ら問題ない。従って、Poincaré 回転子 1 台の 1 波長によって、最大 4Tbps 程度の光通信が可能になる事が期待される。

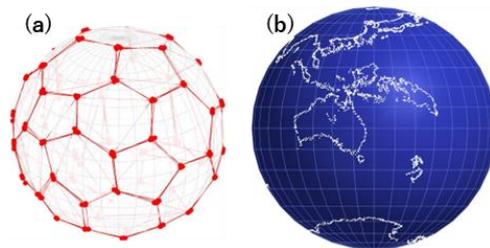


図 1 Poincaré 回転子の実証。
(a) C₆₀, (b) 地球儀。

(8) 理論+実験 3: トポロジカル偏光状態の実証[8]

レーザー光の偏光状態が巨視的量子状態である事を理論的にも実験的にも検証したところで、微視的な単一光子による量子状態との相違に気付いた。それは、量子ビットを担う光子の数である。単一光子の場合には、Poincaré 球の半径は、1 に固定されるが、コヒーレントなレーザー光の場合は、ビットに含まれる光子数 N に相当する。これは、スピン期待値である Stokes パラメータが 3 次元 Euclid 空間を表現できるという事を示している。従って、3 次元空間における自明なトポロジー構造である球に限らず、トポロジカルに非自明な構造を偏光状態の軌跡として表現できる (図 2)。そこで、トーラス構造を偏光状態として実験的に実現した。また、トーラスに限らず、メビウス帯や Hopf リンク、Dirac 光円錐なども実現できることを理論的に示した。

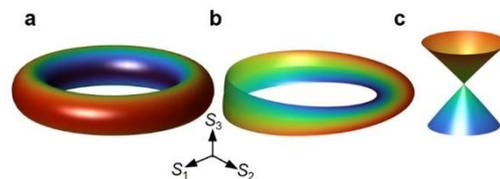


図 2 トポロジカル偏光状態。(a) トーラス, (b) メビウス帯, (c) Dirac 光円錐。

(9) 理論解析 6: フォトニック量子色力学(QCD)の提唱[9]

レーザー光のスピンや軌道角運動量を制御することによって、巨視的な量子ビットで SU(2) 状態を表現できることが明らかになった。その際、ポアンカレ球という SO(3) 空間と波動関数という SU(2) 空間という異なる位相空間の関係が波動関数とその期待値という関係で結ばれている事が

明らかになった。これは、リー代数やリー群といった位相幾何学という数学と光学や物理学が緊密な関係を持っている事を示している。そこで、SU(2)から更に解析を深めて、SU(3)状態を実現する事を理論的に検討した。これは、偏光を固定した上で、渦の無い通常のガウス・ビームと左渦、右渦の3状態を考慮し、それらの重ね合わせ状態により実現する事ができるはずである。偏光において、SU(2)とSO(3)が関連したように、SU(3)のリー代数の8つの生成子 \hat{x}_i ($i = 1 \dots 8$)に対する量子力学的期待値を考慮すると、SU(3)とSO(8)が関連する事が理論的に示された。これは、 $\langle \hat{x}_i \rangle_F = \sum_k (e^{-f_i \theta})_{jk} \langle \hat{x}_i \rangle_1$ と表現する事ができ、生成子の始状態の期待値が、交換関係の特徴づける構造定数 $(f_i)_{jk} = f_{ijk}$ を用いたSO(8)空間での回転によって終状態の期待値となる事を表している。従って、SU(3)の状態は、8次元超球によって表す事ができるため、この超球をクォークの発案者を記念してGe11-Mann超球と名付けた。3つの量子状態は、3原色に対応付けられるため、光を用いたフォトニック量子色力学を開拓したことになる。ここに偏光の自由度を加えれば、SU(6)からSU(2) x SU(3)への対称性の破れなど素粒子物理学の統一理論にもつながりうる実験を簡便な光学定盤上で実現する道を切り拓いた。

実際に、このようなSU(3)状態を実験的に実証する事にも成功した[10]。これは、ドーナツのような光渦とボールのようなガウス・ビームの任意の重ね合わせ状態を実現したことになる。トポロジーの世界で良く知られている様に、ドーナツは変形してもボールにはならない。両者は異なるので量子的には直交すると表現される。ところが、量子力学では、このように異なる状態の重ね合わせを実現できる。すると、振幅を制御する事で、ドーナツからボールへの連続変形が量子的に可能である。実際にこのような状態を実現すると、光渦の中心に存在するトポロジカル・チャージが運動する様子が観測された。トポロジカル・チャージが光渦から脱出することによって、ガウス・ビームが実現し、その脱出方向が位相を表している事が実証された。

(10) 実験 10: 巨視的 2 量子エンタングルメントとベル射影の実証 [10, 11]

偏光と軌道角運動量のそれぞれの量子自由度に対して、SU(2)状態を実現すると、4つの直交する状態の任意の重ね合わせ状態が実現できるため、SU(4)状態を実現できる。これは、本研究の主軸であるフォトニック強相関係を、シングレット状態やトリプレット状態を実現したことに相当する。実際に、Poincaré回転子と渦の生成子を組み合わせる事によって、このような状態を実現した(図3)。所望のエンタングルメント状態の実現を検証するにあたって、Far-Field像を取得しても右渦(a, e)と左渦(c, g)を画像から区別する事は困難である。ところが、シングレット状態やトリプレット状態となれば、どちらの方向に射影したとしても、全角運動量は保存されるはずである。たとえば、シングレット状態であれば、角運動量の総和はゼロであるため、偏光子により斜め偏光に射影した際、偏光方向と渦によるダイポールの向きは直交する(b, d)。一方、トリプレット状態のときは、平行になる(f, h)。実験結果は、理論通りであったばかりでなく、Poincaré回転子によって位相を変化させることによって、シングレットからトリプレットへ自由自在に変調できる事も実証できた。これは、可視化可能な巨視的な系において、ベル射影を実現したことになる。

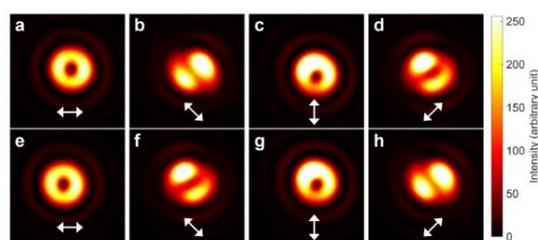


図3 巨視的エンタングルメント状態。
a-d シングレット, e-h トリプレット。
矢印は偏光方向。

(11) まとめと今後の展望

フォトニック強相関係の創出を目標に、理論と実験の双方のアプローチから研究を進めてきた。光の角運動量が良い量子数である事を示す事ができ、スピンと軌道角運動量は分離できないとする学説に反して、導波路や近軸近似が成立する系では、分離が可能である事を実証する事ができた。従来の理論的研究は平面波展開が有効な系では成立しているので間違いであった訳ではないが、Laguerre-Gaussモードを用いるGRINファイバなどでは、分離を厳密に証明する事ができた事には学術的インパクトがあるものと考えている。理論に基づき提案したポアンカレ回転子は任意のSU(2)重ね合わせ状態を実現するため、今後、光通信や光暗号通信への応用探索を進めていきたい。また、フォトニック量子色力学(QCD)を提唱し、光渦と偏光を駆使した系を用いて、対称性の破れとその回復を議論できるプラットフォームを構築できた。さらに、2量子ビット状態による巨星的エンタングルメント状態の実現にも成功した。この研究成果は新原理に基づく光量子コンピュータの実現や量子センサなどの新量子技術の創生につながる可能性がある。と期待している。

本研究は概ねその目的を達成する事ができた。また、研究開始前には、想像もできなかった事ではあるが、リー代数やリー群といった数学と光の角運動量の関係を明確にすることができ、SU(2)に限らず、SU(2) x SU(2), SU(3), SU(4)といった位相空間を軌道角運動量の量子状態によって実験的に実装する事ができた。今後、より大型の国家プロジェクトで共同研究を開始する事を希求している。

引用文献

- [1] S. Saito, ArXiv, 2303.17112. [2] ArXiv, 2303.17116. [3] ArXiv, 2303.17129. [4] ArXiv, 2303.18196. [5] ArXiv, 2303.18197. [6] ArXiv, 2303.18199. [7] ArXiv, 2304.00013. [8] ArXiv, 2304.00014. [9] ArXiv, 2304.01217. [10] ArXiv, 2304.01216. [11] ArXiv, 2304.02178.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Spin of Photons: Nature of Polarisation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2303.17112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2303.17112	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Quantum Commutation Relationship for Photonic Orbital Angular Momentum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2303.17116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2303.17116	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 11
2. 論文標題 Spin and Orbital Angular Momentum of Coherent Photons in a Waveguide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 1225360
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2023.1225360	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Dirac Equation for Photons: Origin of Polarisation Shinichi Saito	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2303.18196
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2303.18196	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Special Theory of Relativity for a Graded Index Fibre	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2303.18197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2303.18197	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 11
2. 論文標題 SU(2) Symmetry of Coherent Photons and Application to Poincare Rotator	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 1225419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2023.1225419	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Macroscopic Single-Qubit Operation for Coherent Photons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2304.00013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.00013	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Topological Polarisation States	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2304.00014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.00014	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Macroscopic Singlet, Triplet, and Colour-Charged States of Coherent Photons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2304.01216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.01216	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Photonic Quantum Chromo-Dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2304.01217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.01217	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 Optics
2. 論文標題 Representation Theory and Topology of Coherent Photons with Angular Momentum	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv	6. 最初と最後の頁 2304.02178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2304.02178	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi Saito	4. 巻 9
2. 論文標題 Poincare Rotator for Vortexed Photons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 646228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2021.646228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shinichi Saito
2. 発表標題 SU(4) States of Coherent Photons and Symmetry-Breaking: A Quantum-Classical Crossover
3. 学会等名 Micro Optics Conference (MOC) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Saito
2. 発表標題 Conservation law of spin & orbital angular momentum for a vortex generated by a silicon photonic gear
3. 学会等名 Micro-Optics-Conference (MOC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 レーザー発振器	発明者 斎藤慎一	権利者 (株)日立製作所
産業財産権の種類、番号 特許、P2021-136061	出願年 2021年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 光変調器、光受信器、変換装置、スピン軌道直積状態生成装置及び量子コンピュータ	発明者 斎藤慎一	権利者 (株)日立製作所
産業財産権の種類、番号 特許、P2020-196726	出願年 2020年	国内・外国の別 国内
産業財産権の名称 OPTICAL MODULATOR, OPTICAL RECEIVER, CONVERSION DEVICE, SPIN ORBITAL DIRECT PRODUCT STATE GENERATION DEVICE, AND QUANTUM COMPUTER	発明者 斎藤慎一	権利者 (株)日立製作所
産業財産権の種類、番号 特許、US2022/0171251	出願年 2022年	国内・外国の別 外国
産業財産権の名称 LASER OSCILLATOR	発明者 斎藤慎一	権利者 (株)日立製作所
産業財産権の種類、番号 特許、US2023/0075435	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------