

称号及び氏名 博士(理学) 山本 康男

学位授与の日付 平成 29 年 3 月 31 日

論文名 励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱により発生した量子もつれ光子対の量子状態に関する研究

論文審査委員 主査 溝口 幸司  
副査 久保田 佳基  
副査 田中 智  
副査 大畠 悟郎

## 論文要旨

# 励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱により発生した量子もつれ光子対の量子状態に関する研究

(Study on quantum states of quantum entangled photon pair generated by biexciton-resonant hyper-parametric scattering)

理学系研究科 物理科学専攻  
山本 康男

本論文では CuCl における励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱 (RHPS) による偏光量子もつれ光子対の発生効率の評価と詳細な量子状態の解析について報告し、その内容は全 4 章で構成される。第 1 章は背景である。背景として、現在の量子情報の潮流に対する RHPS の重要性を述べ、重要な概念である量子もつれ光子対と RHPS の詳細を紹介する。第 2 章の内容は RHPS によって発生した量子相関光子対の定量的評価である。RHPS では発生効率などの定量的評価がこれまでされておらず、他の量子もつれ光子対の発生手法と比較されていなかった。そこで、RHPS の光子検出頻度を様々な励起密度において測定することで、RHPS 以外の現象の寄与を分離し、RHPS の発生効率を決定することに成功した。また、2 光子同時検出頻度の観測から、真の同時観測頻度と偶然の同時観測頻度の比を評価し、得られた物理量を用いて他の量子もつれ光子対発生手法との比較に成功した。第 3 章の内容は RHPS によって発生した量子相関光子対における 2 光子偏光密度行列の励起密度依存性である。いくつかの条件で偏光射影測定を行うことで 2 光子偏光密度行列を算出することができる。この測定を様々な励起密度下において行い、得られた偏光密度行列の変化について議論した。得られた密度行列に対する忠実度、線形エントロピーおよびタングルの評価から、実験で得られた密度行列は無偏光状態と理想状態の混合で表現できることがわかった。無偏光状態の混合比は励起密度の上昇に伴って増加する傾向にあり、その原因が複数の光子対が同時発生する確率が増大することにあることを突き止めた。第 4 章は本論文の総括を述べている。

### 第 1 章 背景

近年、量子アニーリングを行う量子コンピュータの商業運用などに代表されるように量子情報の発展がめざましい。量子演算に関しても初期状態として大規模な量子もつれ状態を用意することで線形変換のみで量子コンピューティングを実現出来るという提案がある。このように、多粒子からなる量子もつれ状態を実現することは量子情報の大きな進展につながる可能性がある。そのような多粒子間における量子もつれ状態を実現出来る可能性が

ある系として、半導体 CuCl における励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱 (RHPS) という現象に着目した。この現象は半導体中の励起子分子状態を 2 光子吸収によって直接生成するため、非常に大きな非線形光学係数を有している。生成された励起子分子から量子もつれ光子対が放出されることから、生成効率の高い量子もつれ光子対発生手法として知られている。しかし、この手法に関する報告は量子もつれ光子対の観測のみであり、生成効率の定量化や複数の光子対発生については議論されていない。

## 第 2 章 RHPS によって発生する量子相関光子対の定量的評価

RHPS では発生効率などの定量的評価がこれまでされておらず、他の量子もつれ光子対の発生手法と比較されていなかった。しかし、RHPS では従来の自発的パラメトリック下方変換などを用いた手法と異なり、RHPS 以外の現象に由来する光子の寄与が無視できない程度に存在する。従って、RHPS の発生効率を決定するためには RHPS 以外の現象の寄与を分離する必要がある。そこで、RHPS とそれ以外の光子の発生頻度の励起密度依存性が異なっていることを利用し、光子検出頻度の測定を行うことで RHPS およびそれ以外の光子の発生効率を決定した。また、2 光子同時検出効率の励起密度依存性を観測することで量子もつれもつれ光子対の純度の指標である真の同時検出と偶然の同時検出の比を求めることができ、得られた値を他の発生手法と比較することが出来た。これらの結果から RHPS が励起子分子の共鳴の効果によって非常に大きな量子もつれ光子対の発生効率を有していることが明らかになった。

## 第 3 章 RHPS によって発生した量子相関光子対における 2 光子偏光密度行列の励起密度依存性

RHPS では励起子分子の実励起を伴うために高密度励起下においてはどのような量子状態をとるかを予測できない。このような状況ではより複雑な量子相関が発達する場合があります、他の系にはない条件として興味深い。しかし、RHPS においては高密度励起下における量子もつれ光子対の量子状態については全く議論されておらず、ほとんど何も分かっていない。そこで、本論文では RHPS における高密度励起下における量子もつれ光子対の観測を初めて行い、その量子状態について議論した。量子もつれ光子対の量子状態 2 光子偏光密度行列で表現される。偏光密度行列は様々な組み合わせの偏光射影測定を行うことで算出することが出来、本論文ではいくつかの励起密度下において偏光密度行列を算出した。得られた密度行列は励起密度の増大に伴って大きく変化しており、その変化の原因を解析するため、忠実度、線形エントロピー及びタングルと呼ばれる物理量を評価した。その結果、実験で得られた密度行列は無偏光状態と理想状態の混合で表され、励起密度の増大に伴って無偏光状態の混合比が増加していることがわかった。この無偏光状態の増加は複数の量子もつれ光子対の同時発生を考慮することで上手く説明出来ることが分かった。

## 第 4 章 結論

この章では本論文の総括を述べる。

## 発表リスト

### 雑誌 :

- “Quantitative characterization of highly efficient correlated photon-pair source using biexciton resonance”, Yasuo Yamamoto, Goro Oohata, Kohji Mizoguchi, *Optics Express*, **24**, pp.6034-6040 (2016).

### 会議録 :

- “Photon Statistics Analysis of Entangled Photon Pairs via Biexciton Resonant Hyper-Parametric Scattering”, Y. Yamamoto, G. Oohata, and K. Mizoguchi, *Nonlinear Optics (NLO)*, (Kohala Coast, Hawaii, USA, 21-26/July/2013), NW1A.6.

## 参考論文

- “Photoluminescence of Excitons and Biexcitons in  $(\text{C}_4\text{H}_9\text{NH}_3)_2\text{PbBr}_4$  Crystals under High Excitation Density”, Y. Yamamoto, G. Oohata, H. Ichida, Y. Kanematsu, K. Mizoguchi, *physica status solidi (c)* **9**, pp.2501-2504 (2012).
- “Evaluation of two-photon polarization density matrix of polarization-entangled photon-pairs generated through biexciton resonant hyper-parametric scattering”, Y. Yamamoto, G. Oohata, K. Mizoguchi (to be submitted).

## 学位論文審査結果の要旨

学位論文提出者氏名： 山本 康男

学位論文題目： 励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱により発生した量子もつれ光子対の量子状態に関する研究

(Study on quantum states of quantum entangled photon pair generated by biexciton-resonant hyper-parametric scattering)

量子光学分野において注目されている量子相関光子対（以後、量子もつれ光子対と呼ぶ）は、量子情報通信や量子コンピュータなどへの応用が期待されている。この量子もつれ光子対は、2つの光子の単純な重ね合わせの状態では表されず、2つの光子間でお互いに相関を有した状態を示している。本研究では、励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱(Biexciton-Resonant Hyper-parametric Scattering: RHPS)を用いることによって、CuCl 半導体結晶から量子もつれ光子対を発生させ、その量子もつれ光子対の量子状態を明らかにすることを目的に研究を行っている。特に、RHPS 法によって生じた量子もつれ光子対の発生効率、および、高密度励起条件下における量子もつれ光子対の量子状態を世界で初めて明らかにしている。

本論文では、RHPS 法を用いて生成された CuCl 半導体からの量子もつれ光子対の発生効率、および、高密度励起条件下における量子もつれ光子対の量子状態を明らかにすることを主目的とし、以下の2つの内容について報告している。

本研究で着目する3次の非線形光学過程である RHPS を用いた CuCl 半導体からの量子もつれ光子対の発生効率は非常に高いと期待されていたが、今まで、その発生効率についての研究報告が無かった。本研究では、RHPS による量子もつれ光子対の光子検出頻度を様々な励起光強度で測定することで、量子もつれ光子対の発生効率を定量的に評価している。本研究によって、RHPS による量子もつれ光子対の発生効率は、励起子分子の共鳴効果によって非常に大きな値を示すことを初めて明らかにしており、他の3次の非線形光学過程を利用した発生方法と同程度であることを見出している。

RHPS を用いた量子もつれ光子対の発生において、高密度励起下における量子もつれ光子対の量子状態を明らかにすることは、量子情報通信への応用や量子もつれ光子対のレーザーの開発のためには必要不可欠の課題である。本研究において、様々な励起光強度で、量子もつれ光子対の偏光相関測定をすることで、高密度励起による量子もつれ光子対の量子状態の変化を明らかにしている。その結果、本研究によって、高密度励起下における量子もつれ光子対の量子状態は、無偏光状態と、量子もつれ光子対の理想状態との混合状態を有していることを見出している。また、励起光強度の増加による無偏光状態の増加は複数の量子もつれ光子対の同時発生が原因であることを初めて明らかにしている。

以上のように本研究において、励起子分子共鳴ハイパーパラメトリック散乱によって生じた量子もつれ光子の発生効率の評価、および、高密度励起下における量子もつれ光子対の量子状態の解明は卓越した成果であり、高く評価できる。また、この成果は、物理分野のみならず、応用分野である情報通信の領域にも多大なる影響を与えるものと期待される。

本委員会は、本論文は学位論文として十分な内容を有しており、また、本学位論文提出者である山本康男は学位を授与するのに十分な学力および見識を有しているものと判断した。

委員長 溝口 幸司  
田中 智  
久保田 佳基  
大畠 悟郎