

氏名	瀬崎 陸
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	医工農博甲第85号
学位授与年月日	令和4年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
専攻名	工学専攻 エネルギー物質科学コース
学位論文題目	光子場を介した複数分極系における同期現象の全量子論
論文審査委員	主査 准教授 石川 陽
	准教授 居島 薫
	准教授 浮田 芳昭
	准教授 内山 和治
	准教授 酒井 優
	准教授 東海林 篤

## 学位論文内容の要旨

本学位論文は、超放射とレーザーを複数分極系における同期現象として議論することで新しく得られた知見をまとめたものである。まず、分極間の位相ダイナミクスに注目することで超放射の起源が光子場の量子効果にあることが示された。次に、光子場との結合による散逸効果により同期状態の時間的転移現象が起こることが発見された。さらに、共振器 QED 系において超放射とレーザーを同期現象の視点から包括的に議論することで両者とは異なる新しいコヒーレント光発生機構が発見され、光子場を介した複数分極系において量子的な同期現象の基礎と新規量子光デバイスへの応用可能性が示された。

第1章では、超放射の観測事例について触れたうえで、超放射とレーザーが異なる起源を持つ同期現象であることが述べられている。次に、両者の起源を区別するためには光と物質の相互作用を量子論的に扱う必要があることを説明し、本研究の目的が光子場を介した複数分極系における同期現象メカニズムの解明にあることが説明されている。第2章では、超放射に関する基礎事項について解説されている。超放射とは、励起された複数分極が光子場を介してコヒーレントに結合することで得られる Dicke 状態間の自然放出であり、量子コヒーレンスにより Dicke 状態間の遷移確率が通常自然放出よりも大きくなること

で超短時間かつ高強度な発光現象が現れる現象である。第3章では、同期現象を説明する数理モデルの1つである蔵本モデルについて解説されている。異なる固有振動数を持つ振動子集団が均一に相互作用している系の同期現象を記述するものであり、蔵本モデルをもとに振動子集団に対する同期条件が導出される。第4章では、本研究で用いる理論モデルとして、光子場と相互作用する複数の2準位系に対する全量子論的な理論モデルが導入されている。光を量子化し全量子論を用いることで、光子場の量子ゆらぎを起源とする自然放出を古典的な誘導放出と区別して扱うことができる。さらに、系の発光ダイナミクスを記述するルミネセンス方程式が導出された。ルミネセンス方程式は「古典的な誘導放出」「量子論的な自然放出」「光子場を介して結合した2準位系からの協力的光放出」の3種類の発光過程によって表されており、超放射とレーザーの両者の起源を区別して取り扱うための基礎理論の枠組みが構築された。第5章では、超放射に対して、光子場の量子力学的効果が同期現象の起源であることが明確に示されている。第4章で導出されたルミネセンス方程式には超放射の起源である異なる2準位系の分極間の相関が含まれている。これは光子場を介して結合した2準位系の分極間の位相関係を表している。つまり、相関が正の値をとるとき分極は互いに同位相の関係にあり、逆に負の値をとるときは逆位相の関係にあると解釈され、同位相の場合は超放射、逆位相の場合は非放射が実現される。ルミネセンス方程式をもとに、分極間の相関から分極振動の位相に関する情報を抽出することで、分極間の位相ダイナミクスを記述する時間発展方程式が導出された。その方程式は蔵本モデルに相当しており、複数分極を同期させる相互作用に光の量子ゆらぎに起因する自然放出を表す因子が含まれている。つまり、超放射に代表される複数分極系における協力的発光現象の起源が光の量子力学的効果である光子場の真空ゆらぎにあることが明確に示されたことになる。さらに、蔵本モデルとのアナロジーを用いることで、分極同士が同位相または逆位相に同期するための条件が導出された。それによると、同期現象は分極間に作用する相互作用の大きさ、同期を妨げる2準位系の不均一性の大きさ、初期時刻における励起密度によって決定される。また、導出した分極間の位相ダイナミクスを記述する方程式を数値的に解いた結果、分極同士が同位相に同期する状態から逆位相に同期する状態へ時間的に転移する現象が発見された。この新しい現象は散逸をともなう非平衡開放系における同期現象において特有なものであると考えられる。第6章では、共振器 QED 系において超放射の起源である自然放出とレーザーの起源である誘導放出を包括的に議論することで、両者の協奏による新しい同期現象の存在が明らかにされた。光共振器内の複数2準位系が共振器内の単一モードの光子場と相互作用する理論モデルを仮定し、光共振器中の複数分極系に対して平均場近似を適用することで分極間の位相ダイナミクスを記述する方程式が導

出された。この場合においても、蔵本モデルとのアナロジーを用いることで、誘導放出と自然放出のそれぞれが複数分極系における同期現象へ寄与するための条件を見出すことができる。その結果、誘導放出が支配的となって同期するレーザーや自然放出が支配的となって同期する超放射だけではなく、自然放出と誘導放出の両者の協奏を起源とする新しい同期現象の存在が示された。この同期メカニズムは、分極間のコヒーレンス形成を超放射とレーザーが互いに補うことで生じるものであり、新規コヒーレント光放出過程を見出すにあたって超放射の重要性が示されたことになる。第7章では、本研究で新しく得られた知見を総括し今後の展望についてまとめられている。本学位論文の研究成果は、物質系のコヒーレンス形成メカニズムを同期現象の観点から解明したものである。さらに、本学位論文で得られた知見をもとに超放射のメカニズムを用いた新規量子光デバイスの創生へつなげる応用研究が、今後の展望としてまとめられている。

## 論文審査結果の要旨

超放射とレーザーは、ともに光を介して複数分極系がコヒーレントに相関することで生じるが、レーザーが古典的過程である誘導放出を起源としているのに対して、超放射は量子的過程である自然放出を起源としている。しかし、レーザーと超放射はともに光を古典的電磁場として扱う半古典論でも記述できるため、両者のメカニズムの違いには曖昧さが残されているとも考えられていた。本学位論文では、超放射とレーザーを、光子場を介した複数分極系における同期現象としての観点から包括的に議論し、光子場の量子性を起源とする同期メカニズムを解明することに成功した。ほとんどの同期現象はマクロな古典系において多くの知見が得られているが、ミクロな量子系における同期現象についての基本的概念は未だ確立されていない。光子場を介した複数分極系におけるミクロな同期現象に注目した本学位論文の研究成果は、非線形・非平衡物理学に関する新しい学術領域を開拓することにつながる学術的意義を持つ。さらに、本学位論文の研究成果は、新規量子光デバイス等への応用可能性を示すなど新規光科学技術への応用面においても重要である。

本学位論文は、第1章において適切な動機・目的が設定され、続く第2章と第3章では本学位論文の研究課題に関する理論手法について適切にまとめられている。第4章では、光子場と相互作用する複数2準位系に対する全量子論的な理論モデルをもとに、光子場を介した複数分極系における同期現象の基礎理論を構築している。第5章と第6章では、本学位論文で新しく得られた知見についてまとめられており、大きく分けて2つの研究成果

に整理されている。ひとつは、自由光子場を介した複数分極系における同期現象の観点から得られた超放射に関する新しい知見であり、第5章にまとめられている。自由光子場と相互作用する2個の分極を考え、蔵本モデルとのアナロジーを用いることで、2個の分極を同期させる起源が光子場の量子ゆらぎにあることが明確に示された。この研究成果は、光を介したミクロな量子系における同期現象に対する学術的に重要な成果であり非常に高く評価できる。もう1つは、共振器 QED 系における複数分極系における同期現象として超放射とレーザーを包括的に議論することで得られた新しい知見であり、第6章にまとめられている。超放射の起源である量子的過程の自然放出とレーザーの起源である古典的過程の誘導放出をともに考慮した同期現象の数理モデルが構築されている。その数理モデルを用いることで、新しいコヒーレント光発生機構の存在を発見し、超放射の量子光ナノデバイスに対する応用可能性を示すことに成功するなど応用面でも重要な成果が報告された。

令和4年2月15日（火）14：40から16：20に博士論文公聴会および最終試験を実施した。質疑応答により本学位論文の学術的意義・新規性の有無や論理の一貫性などを確認し、博士の学位を与えるに足りる学位論文であるか否かを判定した。具体的には「同期現象を引き起こす非線形性の起源」「同期現象の起源である光子場において相関が形成される時間スケール」「複数分極系が同位相に同期するよう変化する際の光子場への反作用」「定常励起における超放射の評価方法」「分極の位相関係が同位相から逆位相へ変化する現象のメカニズム」「理論手法および近似手法の妥当性」などに関する質問がなされ、それらの質問に対して適切な返答が得られた。

以上で述べたように、瀬崎 陸 氏は、博士（工学）の学位にふさわしい能力を有していると判断できた。さらに、博士論文の内容は査読付き学術論文2編として発表済みである。以上の結果から総合的に判断して、審査委員全員の合意のもと博士（工学）の学位論文として適格であると認め合格と判定した。