

学 位 論 文 題 名

Generation of ultrabroadband and ultrashort optical pulses with singularities and spectroscopic evaluation of closed-loop electron coherence

(位相・偏光特異点を持つ超広帯域超短パルス光発生と
閉ループ電子コヒーレンスの分光評価)

学位論文内容の要旨

巨視的な量子現象において電子のコヒーレンスは重要な役割を持っている。超伝導現象におけるクーパ対のコヒーレンスはその例である。電子コヒーレンスは特徴的な長さで表される空間的な広がりを持っているが、この空間的な分布が閉ループとなる場合には、これまでとは違った量子現象を生じるため興味をもたれている。この形状を持つコヒーレンスを閉ループコヒーレンスという。閉ループコヒーレンスが存在すると、アハラノフ・ボーム効果やフレイリッヒ超伝導、超伝導における磁束の量子化などの特徴的な現象が生じる。これらの現象を捉えるため、様々な実証実験が行われてきた。しかし、これらの現象の理解に必要である、電子のコヒーレンスの時間的、空間的な性質はこれまで十分に調べられてこなかった。これは閉ループコヒーレンスを測定する手法が無いためである。そこで本研究では、物質中の電子の閉ループコヒーレンスを測定する手法を提案し、方法の有効性について実験的に検証する。閉ループコヒーレンスを観察するためには、閉ループを壊さず、非破壊、非接触でコヒーレンスを測定できる方法が望ましい。非線形分光測定はその有力な候補である。しかし、均一な位相や偏光を持つレーザー光を用いたこれまでの測定法では閉ループコヒーレンスを十分に捉えることが出来ない。本研究では、光にも閉ループ構造を持たせることで、閉ループコヒーレンスを観察する方法を提案する。これは近年注目されている、位相渦/偏光渦という特異点を持った光を非線形分光測定に用いることである。本研究では、従来の非線形分光測定に特異点を持つ光を取り入れるために、まず、特異点を持つ光を分散無く発生させる方法を開発し、それを用いた非線形分光測定により、閉ループコヒーレンスに特徴的な現象を検出する。これにより、位相特異点を持つ光を用いた分光法が、閉ループコヒーレンスを直接検出する方法に有効であることを明らかにする。

第一章: 閉ループコヒーレンスと特異点を持つ光による検出法の必要性

第一章では、アハラノフ・ボーム効果などで重要な役割を持つ閉ループコヒーレンスという概念を説明し、その検出方法として、特異点を持つ光を用いた分光方法を提案しこの方法が有用であることを述べる。

第二章: 非線形分光のための超広帯域超短光渦パルスの分散の無い発生法の確立

第二章では、非線形分光測定に必要な、分散の無い超広帯域超短光渦パルスの発生法について述べる。位相の渦、偏光の渦を用いた定常分光測定や非平衡状態の分光測定では、より広いエネルギーを一度に観測できる、より高い時間分解能を得るという目的から、位相の渦、偏光渦の超広帯域超短パルス発生が必要となる。光渦については、これまでの発生法として、空間位相変調器 (SLM) や、らせん位相板を使った発生法が主流で

あった。しかし、これらの方法で超広帯域超短光渦パルスが発生させようとする、波長ごとに光渦の位置が異なる空間分散や、波長ごとに渦のチャージが異なるチャージの分散が生じる。これは分光測定において、波長ごとに試料の測る場所が違う、用いる渦の性質が違う、ということであり、問題となる。そこで、本研究では空間分散、チャージの分散の無い、新しい光渦発生方法を考案し、これを超広帯域パルス光に適用した。そして、発生した光が広帯域にわたって空間分散、チャージの分散の無いことを実証した。これによって、超広帯域超短光渦パルスを分散無く発生する方法を確立したといえる。

第三章: 非線形分光のための超広帯域超短偏光渦パルスの分散の無い発生法の確立

第三章では偏光渦について超広帯域超短パルス化を実現した。偏光渦ではこれまでの方法として、円錐ブリュースタープリズムを共振器の中に挿入して発振させる方法や、軸対称偏光子を共振器のミラーとして利用し、発生させる方法が主流であった。しかし、これらの方法では、狭いスペクトルでの発生しか実現しない。分光測定のためには偏光渦を超広帯域パルス発生させる必要がある。そこで本研究では、位相渦発生で用いた新たな発生系を改良し、分散の無い偏光渦発生系とし、これを用いた。この方法に対して超広帯域超短パルスを光源に用い、発生した光の偏光分布の波長依存性が無いことを実証した。これにより本研究は広帯域にわたり偏光分布の分散の無い超広帯域超短偏光渦パルスの発生を実現したといえる。

第四章: 偏光渦パルスをを用いた非線形分光による閉ループコヒーレント物質の閉ループ一次元分極の検出

第四章では、第三章で発生させた偏光渦発生法を超短パルスに用いたポンプ・プローブ測定を行い、閉ループ分極を検出した。閉ループコヒーレンスを検出するためには、方位方向にそろった電子特性を、光によって非破壊非接触で検出する必要がある。しかし、これまでの均一な偏光をもつ光では、この特性を検出することが出来ない。そこで本研究では、偏光特異性を持つ偏光渦を用いて、これを分光測定に適用した。実験では、偏光渦パルスを、閉ループコヒーレント物質である擬一次元リング結晶 (NbSe_3 リング結晶) に用いた。この物質は、低温で長いコヒーレンス長を持つ電荷密度波物質であり、リング径 ($\sim 10\ \mu\text{m}$) 程度のコヒーレンス長を持つ。つまりリング結晶中に閉ループコヒーレンスが存在すると考えられる。また、光のビームスポットサイズよりも大きな外径を持つので、光による測定に適する。電荷密度波状態を検出する方法として、非線形分光法である、超短時間分解能を持つポンプ・プローブ法を利用した。ポンプ・プローブ測定においては、第二章で用いた分散の無い方法で発生させた偏光渦パルスをを用いた。この結果、一粒子緩和の成分が、偏光渦の方向に対し強い異方性を示した。これは、直線状の擬一次元導体に直線偏光を用いた場合と同様の偏光異方性であった。すなわち結果は、閉ループコヒーレント物質に、閉ループ方向のコヒーレントな分極が生じていることを示している。つまり超短偏光渦パルスをを用いた分光によって、閉ループコヒーレント物質におけるコヒーレントな一次元分極を観測したといえる。すなわち本研究は、光によって様々な物質における閉ループコヒーレンスを見るための基礎となる方法を提案、確立したといえる。これは汎用的な超短パルスレーザーを用いて簡単に、試料を選ばずに AB 効果を観測する手法として応用できると考えられる。

第五章: まとめと展望

第五章では本研究をまとめ、そこから得られた知見と今後の展望について述べる。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	森 田 隆 二
副 査	教 授	馬 場 直 志
副 査	教 授	武 藤 俊 一
副 査	准教授	岡 和 彦
副 査	准教授	戸 田 泰 則

学 位 論 文 題 名

Generation of ultrabroadband and ultrashort optical pulses with singularities and spectroscopic evaluation of closed-loop electron coherence

(位相・偏光特異点を持つ超広帯域超短パルス光発生と
閉ループ電子コヒーレンスの分光評価)

巨視的な量子現象において電子のコヒーレンスは重要な役割を持っている。電子コヒーレンスは特徴的な長さで表される空間的な広がりを持っているが、この空間的な分布が閉ループ (閉ループコヒーレンス) となる場合には、これまでとは違った量子現象を生じるため興味をもたれている。閉ループコヒーレンスが存在すると、アハラノフ・ボーム効果やフレイリッヒ超伝導などの特徴的な現象が生じる。これらの現象を捉えるため、様々な実証実験が行われてきた。しかし、閉ループコヒーレンスを測定する手法がないために、電子閉ループコヒーレンスの時間的、空間的な性質はこれまで十分に調べられてこなかった。そこで本研究では、特異点を持つ光 (位相渦・偏光渦) を用い、光にも閉ループ構造を持たせることで、物質中の電子閉ループコヒーレンスを測定する手法を提案、さらには、その有効性について実験的に検証する。まず、超短時間・超広帯域非線形分光に応用するため、特異点を持つ光を分散なく発生させる方法を開発する。続いて、これらの方法を用いた非線形分光により、閉ループコヒーレンスに特徴的な現象を検出する。これにより、偏光特異点を持つ光を用いた分光法が、閉ループコヒーレンスを直接検出する方法に有効であることを明らかにする。

第一章では、アハラノフ・ボーム効果などで重要な役割を持つ閉ループコヒーレンスという概念を説明し、その検出方法として、特異点を持つ光を用いた分光方法を提案し、この方法が有用であることを述べている。

第二章では、非線形分光測定に必要な、分散のない超広帯域超短光渦 (位相渦) パルスの発生法について述べている。超短時間・超広帯域分光を行うには、光渦パルスの超広帯域化が重要となる。これまでの光渦パルス発生法を用いて超広帯域化を行おうとすると、空間分散やチャージの分散が

生じる。これは分光測定において大きな問題となる。そこで、本研究では空間分散・チャージの分散のない、新しい光渦発生方法を考案し、これを超広帯域パルス光に適用した。そして、発生した光が広帯域 (500–800 nm) にわたって空間分散・チャージの分散を持たないことを実証した。

第三章では偏光渦について超広帯域超短パルス化を実現した。これまでには超広帯域の偏光渦の発生は困難であった。そこで本研究では、位相渦発生で用いた分散のない発生系を改良し、分散のない偏光渦の発生系として用いた。この系を超広帯域超短パルスに適用し、発生した光が超広帯域 (600–800 nm) にわたって偏光分布の波長依存性を持たないことを実証した。

第四章では、発生させた超短偏光渦パルスを用いたポンプ・プローブ測定を行い、閉ループ分極を検出した。閉ループコヒーレンスを検出するためには、方位方向にそろった電子特性を、光によって非破壊非接触で検出する必要がある。しかし、これまでのような偏光をもつ光では、この特性を大域的に検出することが出来ない。そこで本研究では、偏光特異性を持つ偏光渦を分光測定に適用することを提案する。また、閉ループコヒーレント物質としては擬一次元リング結晶である NbSe₃ リング結晶に着目した。この物質は、低温で長いコヒーレンス長を持つ電荷密度波物質であり、リング径 (~10 nm) 程度のコヒーレンス長を持つ。つまりリング結晶中に閉ループコヒーレンスが存在すると考えられる。さらには、光のビームスポットサイズよりも大きな外径を持つので、光による測定に適する。電荷密度波状態を検出する方法としては、非線形分光法である超短時間分解ポンプ・プローブ法を用い、プローブ光として、第三章で用いた分散のない方法により発生させた超短偏光渦パルスを用いた。この結果、一粒子緩和の成分が、偏光渦の方向に対し強い異方性を示し、これは、直線状の擬一次元導体に直線偏光を用いた場合と同様の偏光異方性であった。この結果は、閉ループコヒーレント物質に閉ループに沿ったコヒーレントな分極が生じていることを示している。すなわち、超短偏光渦パルスを用いた分光によって、閉ループコヒーレント物質におけるコヒーレントな一次元分極を明らかにしたといえる。

第五章では本研究をまとめ、そこから得られた知見と今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は位相・偏光特異点を持つ超広帯域・超短パルスを発生する独自の方法の開発、ならびにこれを応用した非線形分光による、閉ループ物質の閉ループ電子コヒーレンス評価を行い、非線形光学および光物性の新知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。