

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13150 号
------	---------------

氏 名 後藤 勇樹

論文題目

Investigation of a Millimeter Wave with a Helical Wavefront
(ヘリカル波面を持つミリ波の研究)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	客員教授	久保 伸
委員	名古屋大学	教授	八木 伸也
委員	名古屋大学	客員教授	中村 浩章
委員	広島大学	教授	加藤 政博

論文審査の結果の要旨

後藤勇樹君提出の論文「Investigation of a Millimeter Wave with a Helical Wavefront (ヘリカル波面を持つミリ波の研究)」は、電子サイクロトロン放射が本来持つ渦性を大電力ミリ波の右回り円偏光で熱的に運動する電子の旋回位相を強制的に揃えることによって観測可能にできることを明らかにしている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、2017年に円軌道を持つ荷電粒子からの高次高調波放射がヘリカル波面を持つことが理論的に示されたことから、電子サイクロトロン運動は円運動の一種であるため、電子サイクロトロン放射もヘリカル波面を有しているはずであると考え、電子サイクロトロン放射はオーロラに代表される太陽風と地球磁気圏との相互作用や太陽フレアに起因する磁気リコネクション、更には磁場閉じ込め型核融合プラズマからの放射など、自然界に普遍的に存在していることを示した。しかし、ヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射の存在が認知されるまで、その位相構造に着目した計測は行われておらず、実験的な検証はこれらの研究に大きく寄与されることから本論文にLaguerre-Gauss(LG)ビームはヘリカル波面を持つビームとしてよく知られており、光渦とも呼ばれている。光渦は1992年、Allenにより波動方程式の円柱座標系での近軸近似解における波の位相構造が空間の方位角成分に依存することが明らかにされて以降、盛んに研究が行われるようになった。ヘリカル波面を持つビームは、その強度分布が光軸上に強度を持たないドーナツ状をしており、また偏光が有するスピン角運動量に加えて軌道角運動量を有する特徴を持つ。これらの特徴を応用し、光渦と物質の相互作用を利用したナノ構造の形成や磁性体研究、不斉性を有する分子の化学的性質の研究、更に軌道角運動量の制御による通信技術への適用などが考えられている。光渦は螺旋位相板やホログラフィー、qプレートなどの受動的光学素子を用いてヘリカル波面を持たないガウスビームを変換して生成される。しかしながら既存の光学素子は適用できる波長が限られており、可視光領域以外での光渦の生成は容易ではない。また、大電力での応用においてはこれらの受動素子が使えない可能性もある。そのため、荷電粒子の回転周波数を制御することで、ヘリカル波面を持つあらゆる周波数帯のビームを能動的に生成することに大きな意義があること、また、これまでに γ 線や極端紫外光の短波長領域において能動的なヘリカル波面を持つビームの生成実験が行われている。 γ 線領域では高エネルギーの電子に円偏光を持つ低エネルギーのレーザー光子を衝突させることで、逆コンプトン散乱により円環状の強度分布を持つ γ 線ビームが生成されることが実証された。また極端紫外光領域ではヘリカルアンジュレーター内に電子を通過させることで円軌道を持つ相対論的な電子を生成し、その放射光がヘリカル波面を持つことが実験的に示された。一方、ミリ波のような長波長領域では能動的なヘリカル波面を持つビームの生成に関する報告はされていない。これは、前述のようにミリ波帯での電子サイクロトロン放射のヘリカル位相に着目していなかったことも要因の一つと考えられるが、元より通常観測される電子サイクロトロン放射は、サイクロトロン運動する電子群のランダムな旋回位相により、個々の放射のヘリカル波面が打ち消し合っているためであると考えられる。そのため、磁場中でサイクロトロン運動している電子を高出力の右回り円偏波で共鳴的に加速し、電子の旋回位相を印加電場によって制御することで、実験的に観測可能なヘリカル波面を持つコヒーレント放射が得られるのではないかの着想を得た。この基礎実験は核融合プラズマにおける電子サイクロトロン共鳴加熱の原理と同等であり、能動的なヘリカル波面を持つミリ波を生成・計測することは核融合研究におけるプラズマ加熱物理の理解に大きな寄与をすることが期待される。核融合プラズマでは高温プラズマ電子を生成・維持する必要があるため、磁場中をサイクロトロン運動する電子に外部から高出力なミリ波で共鳴的に加熱する電子サイクロトロン共鳴加熱が行われている。この時、プラズマ中の電子群は共鳴加熱により局所的に電子群の旋回位相が制御された状態となっており、このような電子群からは同様にヘリカル波面を持つコヒーレントな電子サイクロトロン放射が得られる。これらの電子群が熱化され旋回位相がランダムになることで、電子サイクロトロン放射のヘリカル波面が相殺されるはずである。従って、渦性の強弱がコヒーレントな加速と熱的な緩和過程の指標になると考えられる。基礎実験で可能な限り純粋な条件で共鳴電子群を生成し、ミリ波領域における能動的なヘリカル波面を持つビームの生成・計測を行うことは核融合研究におけるプラズマ加熱物理の理解に大きな寄与をすることを述べている。

第2章では、この円運動による光渦の放射理論を展開する基礎として、Lienard-Wiechertポテンシャルや、Kirchhoffの回折式を論じている。

第3章では、磁場中をサイクロトロン運動する電子と外部から印加した共鳴円偏波との相互作用から発生するヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射の数値計算を論じた。この計算では磁場中でサイクロトロン運動している電子に外部から右回り円偏波を入射し、旋回位相の制御された電子からの放射の数値計算を行った。外部磁場配位は一樣磁場の場合とミラー磁場の場合の2パターンで行った。一樣磁場中をサイクロトロン運動する電子が右回り円偏波により加速される系はサイクロトロン共鳴加熱の最も単純な系であり、外部電磁場中でのサイクロトロン運動の基礎的な振る舞いを調べる事が出来る。またミラー磁場中をサイクロトロン運動する電子が右回り円偏波により加速される系は実際の実験を模擬した系であり、実験結果の解釈に役立てることが出来る。一樣磁場の場合、サイクロトロン運動している電子に外部から右回り円偏波を入射すると、電子は入射ビームからエネルギーを受け取り相対論効果により質量が徐々に大きくなり、その結果、電子の回転半径は大きく、サイクロトロン周波数は小さくなる。同時に $\beta \perp \times \text{Bin}$ の効果で電子はz方向(磁場方向)にも加速され、相対論的な速度まで到達する。ここで、Binは外部から入射される右回り円偏波の磁場成分であり、 $\beta \perp$ は磁場に垂直な方向の電子の規格化速度である。この場合、電子から見た外部電磁波の周波数はドップラー効果によりダウンシフトした周波数が観測される。この時、相対論効果によりダウンシフトした電子のサイクロトロン周波数と電子から見た入射電磁波の周波数

論文審査の結果の要旨

がほぼ等しくなるサイクロトロン自動共鳴と呼ばれる、電子が常に加速状態を維持する現象が確認された。またこの時、外部電場と電子の加速度の向きが同じ方向を向いており、電子が外部電磁波に捕捉されていることも確認された。この計算は単一電子に対して行われているが、電子同士の相互作用を無視した多電子系においても同様の現象が発生するため、ランダムな回転位相を持つ多電子系に外部電磁波を入射することですべての電子の回転位相が制御され、コヒーレントな放射を得ることが出来る。このような運動状態にある電子からの放射をLienard-Wiechertポテンシャルにより計算し、電子の進行方向の半球面上で観測した。その結果、z軸上での放射の周波数スペクトルは基本波しか現れず、高次高調波は観測されなかった。しかしながら光軸から離れた位置では高次高調波も含む放射のスペクトルが観測された。光軸(z軸)に高調波放射が現れないのは、高次高調波の強度分布はドーナツ状をしていることを示しており、これは円軌道を持つ荷電粒子からの能動的な放射がヘリカル波面を持つ特徴の一つである。また、光軸を挟んで対称な位置で放射のスペクトルを計算し、それらの位相差を計算した結果、基本波では位相差はゼロとなり、一方n次高調波では $180(n-1)$ 度という関係で位相差が現れる結果を得た。光軸を挟んで対称な位置では方位角は180度の位相差があり、高調波次数nの増加とともに2点間の放射位相差も増加していることから、この放射は空間的な位相構造を有していることが分かる。従って、ドーナツ状の強度分布及び方位角依存の位相構造を持つ特徴からサイクロトロン高調波はヘリカル波面を有することが計算でも明らかになった。

また、ミラー磁場配位の場合も同様の計算を行った。この場合も前述した自動共鳴効果はないものの一様磁場と同様、ヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射を確認した。実際に用いる実験装置はミラー磁場となっており、ミラー磁場中をサイクロトロン運動する電子と右回り円偏波との相互作用によるヘリカル波面を持つ放射の実験的な観測が可能であることを示す重要な知見である。

第4章では、第3章の結果に基づき、ヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射を生成する実験装置を設計・開発した。放射源となる電子群は実験装置下部の電子銃より供給され、超電導コイルにより生成されたミラー磁場に沿って相互作用領域まで移動する。この時、外部より右回り円偏波を入射することで共鳴領域で電子群を加速し、回転位相を制御する。これにより基本波及び高次高調波を含むコヒーレントなサイクロトロン放射を得ることが出来る。しかしながらこれらの光軸は同軸であり、大電力で入射した基本波と電子群による2次高調波放射成分をグレーティングミラーにより分離する。分離された基本波はダミーロードへ、2次高調波は計測器により計測される。この実験装置はジャイロトロンからの右回り円偏波を導く伝送系も含めて設計・製作及び設置が完了し、調整運転を開始している。これらは、ヘリカル波面を持つ電子サイクロトロン放射の実験的観測を可能にする大きな成果である。

第5章では、高次高調波を含む電子サイクロトロン放射を実験装置内で基本波と2次高調波に分離することがヘリカル波面を観測するためには重要であり、そのためのグレーティングミラーの開発を行った。電子サイクロトロン放射は低電力の放射であるため、2次高調波を効果的に分離することが出来るよう、Littrow条件を満たす格子間隔及び最適ブレイズ角を持つグレーティングミラーを設計した。つまり、グレーティングミラーの格子間隔による波の1次回折光と鋸上の斜面での反射光の伝搬方向が同じになるように最適化されている。このようにすることで、より低電力の2次高調波を効率的に分離することが出来る。このグレーティングミラーは機械加工の便宜上、平面タイプであるが、本研究ではグレーティングミラーの設計法を一般化し、任意の表面形状を持つグレーティングミラーを定義することにも成功した。入射されるガウスビームとグレーティングミラーにより回折されるm次の回折光の焦点距離やウエストサイズ等のパラメーターが与えられているとき、Littrow条件を満たす集光型など任意の形状を持つ準光学的グレーティングミラーを設計することが可能となった。

第6章では三角形アパチャーによるヘリカル波面を持つビームの計測手法の開発について述べている。グレーティングミラーにより分離されたヘリカル波面を持つ2次高調波を検知するための計測装置を開発した。電子のサイクロトロン運動に起因するヘリカル波面を持つ放射は自然界に普遍的に存在しているがこれまで計測されていないのは、回転位相がランダムであることと同時に、計測装置の開発が行われていなかったこと、またはヘリカル波面に着目した計測が行われていなかったことが挙げられる。そこで本研究ではヘリカル波面を持つ2次高調波を検知するための三角形アパチャーによるヘリカル波面の回折法を開発した。また、アパチャーによる回折は個々の光子が引き起こすため、コヒーレントな放射でなくてもヘリカル波面を同定できる点で非常に優れている。しかしながら前述の通り、電子サイクロトロン放射の高次高調波成分は低電力であるため、本実験のように外部電磁波により加速し、コヒーレントな放射を生成することは、計測の感度を向上させる上で非常に重要である。まず、計測装置の開発には受動的に生成されたヘリカル波面を持つ光源が必要であるため、入射するガウスビームをヘリカル波面を持つビームに変換するミラーを開発した。このミラーはスパイラルミラーと呼ばれ、その鏡面は方位角方向に連続的に変化するヘリカル形状となっており、ミラー中心は高さが一意に定まらない特異点となっている。幾何光学における集光ミラー設計では、入射・反射波のウエスト位置を焦点とする回転楕円面がミラー面を形成するが、回折の効果が大きいミリ波のような長波長帯では、入射・反射波の光軸が交わる位置での位相差を基準とする等位相面がミラー面を形成する。この方法は準光学集光ミラーの設計においては有効であるが、スパイラルミラーの設計には不十分である。そこで我々は通常の集光ミラーと平面型スパイラルミラーの2種類を用意し、平面型スパイラルミラー各点上での法線ベクトルの向きを、その位置に対応する通常の集光ミラーの法線ベクトルの向きに揃えるという手法で集光型のスパイラルミラーの開発にも成功した。本研究では-3から+3までの渦度を持つスパイラル

論文審査の結果の要旨

ミラーを作製し、低電力試験によりドーナツ状の強度分布を有していることを確認した。これにより、定常発振可能なヘリカル波面を持つ光源が得られるので、計測装置の開発を行うことが可能となる。Huygens-Fresnelの原理より、ヘリカル波面を持つビームがアパチャーを通過すると、その渦度に応じて特徴的な回折模様を示す。三角形アパチャーの場合、渦度の正負に応じて対称な回折模様が現れ、さらに開口面が大きいため低エネルギーのビームでもアパチャーの縁で遮断される割合を抑えることが出来る。実験では1辺が40 mmの正三角形アパチャーを用意し、その重心とヘリカル波面を持つビームの光軸が一致するよう光学系を設計し実験を行った。その結果、渦度に応じた水玉模様の回折模様をミリ波カメラにより検出することに成功した。またこれらの回折模様はHuygens-Fresnelの原理の厳密な数学的表現であるKirchhoffの積分表示による計算結果とよく一致した。さらに、ヘリカル波面を持たない通常のガウスビームの場合、特徴的な回折模様は現れないことも確認した。従って、三角形アパチャーによるヘリカル波面を持つビームの回折法は渦度を特定するのに有効であることが確認された。これらの結果もヘリカル波面を持つミリ波の発生、検出に有用な知見である。

第7章では、本研究の結論として、大電力ミリ波の右回り円偏光で熱的に運動する電子の旋回位相を強制的に揃えることによって観測可能にできることを明らかにしている。

これらの光渦発生方法並びにその評価手法の開発は、核融合発電に向けたプラズマ加熱物理の高機能化に大きく寄与するとともに、ミリ波領域の光渦を物質の相互作用や軌道角運動量を利用した通信への応用を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である後藤勇樹君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。