

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

主 論 文 の 要 旨

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)

氏 名 後藤 勇樹

論 文 内 容 の 要 旨

2017年、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。電子サイクロトロン(EC)運動は円運動の一種であるため、EC放射(ECE)もヘリカル波面を有するはずである。ECE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、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。しかしながら、ヘリカル波面を持つECE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いない。

Laguerre-Gaussian(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。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。

光渦は通常、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が、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適用できない場合もある。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かつ大電力で生成する手法を開発することは大きな意義がある。

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可能性があることが計算で示された。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相対論的電子ビームを通過させることで発生する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、サブミリ波などの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、ミリ波帯でのECE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ECEは、EC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EC運動している電子を大電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との着想を得た。この基礎実験は核融合プラズマにおけるEC共鳴加熱(ECRH)の原理と同等であり、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いる。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ECE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、ECEのヘリカル波面が相殺されるはずである。そのため、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。従って、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。

本研究では長波長帯であるミリ波領域におけるECEが持つヘリカル波面の実証に向け1) - 4)の総合的な研究を行った。

1) ヘリカル波面を持つECEの数値計算 (第3章)

この計算では磁場中でEC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EC運動する電子が右回り円偏波により加速される系はECRHの最も単純な系であり、外部電磁場中でのEC運動の基礎的な振る舞いを調べることが出来る。またミラー磁場中でEC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、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、EC周波数は小さくなる。同時に $\beta_{\perp} \times B_{in}$ 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、 B_{in} は外部から入射される右回り円偏波の磁場成分であり、 β_{\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EC周波数と電子から見た入射電磁波の周波数がほぼ等しくなるEC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。このような運動状態にある電子からの放射をLiénard-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を観測点として計算した。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、

z 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。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がドーナツ状をしていることを示している。また、光軸を挟んで方位角が 180 度異なる観測点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、n 次高調波では $180(n-1)$ 度の位相差が現れる結果を得た。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高次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。

実験で用いるミラー磁場配位の場合に対しても同様の計算を行った。この場合は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 ECE を確認した。ミラー磁場中を EC 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した。

2) 実験装置の開発 (第 4 章)

1) の計算結果により、ヘリカル波面を持つ ECE 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、旋回位相を制御する。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 EC 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るため、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(GM)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た。

3) グレーティングミラーの開発及びその一般理論 (第 5 章)

高次高調波を含む ECE を 2) の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る。ECE 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 GM を設計した。つまり、GM 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。この様に設計した GM を低電力で実験し所望の分離性能を確認した。この GM は機械加工の便宜上、平面タイプであるが、本研究では GM の設計法を一般化し、任意の表面形状を持つ GM 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 GM 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形状を持つ準光学的 GM を設計手法を確立した。

4) 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 (第 6 章)

GM 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、本研究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回折を利用した計測装置の開発を行った。

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。本研究では-3から+3までの渦度を持つスパイラルミラーを作製し、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、計測装置の開発を行った。

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。

以上の研究成果より、本研究ではヘリカル波面を持つ ECE の計測に向けた、数値計算による ECE のヘリカル波面の検証、実験装置の開発、GM 及びその一般理論の開発、そしてヘリカル波面の同定手法の開発を行うことが出来た。これらの成果は ECE という従来より知られていた現象の”渦性”という新たな性質の発生機構解明とその高効率化、大電力化に大きな寄与をするだけでなく、その制御性を利用したミリ波帯における軌道角運動量を応用した通信技術の開発や核融合発電に向けたプラズマ加熱物理の高機能化など様々な分野への波及が期待される。