

光渦の生成とプラズマ分光への応用

日大生産工 ○山本 将来

核融合研 吉村 信次 森崎 友宏 九大総理工 寺坂 健一郎 田中 雅慶
北大院工 戸田 泰則 日大生産工 荒巻 光利

1 はじめに

光渦とは、らせん状の等位相面やトポロジカルチャージ(軌道角運動量)を持つ光波である。また、断面内で位相が1周で 2π 変化するため、中心は全ての位相が集中し位相が特定できない。この部分を位相特異点と呼び、光の強度が極めて低い点となる。このことから、光渦の断面の強度分布はドーナツ型になる。このような特徴をレーザー分光法に利用することで、レーザードップラー分光計測における測定上の制限を解除することが本研究の目的である。

本講演では、この光渦の基礎的な内容や生成方法、さらに現在行っているプラズマの分光計測への応用について報告する。

2 ラゲールガウス(LG)光

光渦は、波動方程式を円筒座標系で展開した際の解であるラゲールガウス光(LG光、もしくはLGモード)のことである。LGモードの式を(1)に示す。

$$\begin{aligned}
 u_{\ell,p}(r, \phi, z) &= \frac{2p!}{\pi(p+|l|)!} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(z)}\right)^{|l|} \cdot L_{|l|}^p \left[\frac{2r^2}{w(z)^2}\right] \\
 &\quad \cdot \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \cdot \exp[i l \phi] \\
 &\quad \cdot \exp\left[-i(1+2p+|l|)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \\
 &\quad \cdot \exp\left[-i\frac{kr^2}{2R(z)}\right] \\
 &\quad \dots (1)
 \end{aligned}$$

$L_{|l|}^p$ はラゲール陪多項式、 z_R はレイリー長、 w_0 はビームウエスト、 l はトポロジカルチャージ、 $R(z)$ は波面の曲率半径を表している。LGモード強度分布は、レーザーの基本モードであるガウス光に、

ラゲール陪多項式 $L_{|l|}^p$ による変調が加わった形状になる。この式で光渦の位相分布の特徴を反映しているのが方位角に依存して変化する位相項 $\exp[i l \phi]$ である。 l はトポロジカルチャージであり、光渦の回転方向とねじれの度合いを表している。 $l=+1$ の場合、時計回りに位相が変化し、1波長中のねじれの数が1つであることを表す。

3 光渦の生成

光渦の生成には軸対称偏光素子や螺旋位相板などを用いた方法があるが、本実験では空間光変調器と計算機合成ホログラムを用いた平面波の変換により光渦を生成した。空間光変調器(SLM)とは光源からの光の位相を、液晶素子を電気的に制御することにより、光を変調させるものである。また計算機合成ホログラム(CGH)とは、コンピュータグラフィックスにおいて、記録に光を使わず、計算機で架空の映像を合成する手法である。このCGHにより物体光として光渦、参照光として平面波を仮定し、物体光と参照光の干渉縞を計算し、ホログラム回折格子として出力する。このホログラム回折格子をSLMに表示させ、Fig.1のように平面波を入射すると、再生光として光渦が生成される。

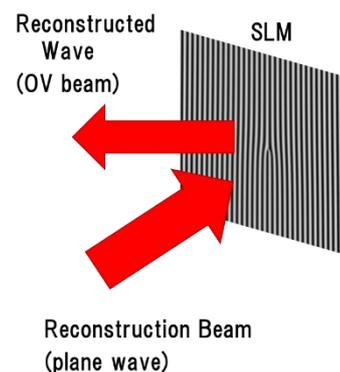


Fig.1 Generation of optical vortex beam with CGH

Generation of optical vortex and its application to plasma spectroscopy

Masaki YAMAMOTO, Shinji YOSHIMURA, Tomohiro MORISAKI, Kenichiro TERASAKA,
Masayoshi TANAKA, Yasunori TODA, Mitsutoshi ARAMAKI

4 光渦によるドップラー分光法

4-1 吸収分光法

原子は、それぞれが持つエネルギー準位間と等しいエネルギーの光を照射されると、その光を吸収し励起する。吸収分光法とは、外部から原子が吸収する波長のレーザーを入射することでプラズマを透過してきた光の減衰率からプラズマ中の原子や分子の温度や密度を求める方法である。

4-2 ドップラー分光法

ドップラー分光法とは、ドップラー効果を利用した分光法である。気体中の原子はランダムな動きを持っており、速度にばらつきがある。このとき原子はマクスウェル・ボルツマン分布に従った速度の分布を持っている。速度を持つ原子は、ドップラー効果により本来吸収する波長からずれた波長の光を吸収する。これをドップラーシフトと呼び、ドップラー分光法では、線幅の細い波長可変レーザーを用いることで、ドップラー効果により広がる原子や分子のスペクトルを観測し、プラズマ中の原子や分子の温度や密度、更に流速等の情報を得ることができる。

4-3 光渦ドップラー分光法

通常のレーザーを用いたドップラー分光では、レーザーの波面が平面であり、伝播方向でしかドップラー効果が起きないため、測定できる自由度に対する制限が非常に強い。しかし光渦では、(2)式に示すように伝播方向の V_z 項以外に波面の径方向の V_r 項と回転方向の V_ϕ 項の3次元でドップラー効果が起きることが分かっている。¹⁾

$$\delta_{LG} = \left[-k + \frac{kr^2}{2(z^2 + z_R^2)} \left(\frac{2z^2}{(z^2 + z_R^2)} - 1 \right) - \frac{(2p + l + 1)z_R}{(z^2 + z_R^2)} \right] V_z - \left(\frac{kr}{z} \right) V_r - \left(\frac{l}{r} \right) V_\phi \quad \dots (2)$$

ここで k はレーザーの波数である。この性質を利用することで、従来の平面波のレーザーでは不可能であった、速度の3次元に感度があるレーザー分光を可能にすることができる。つまり、プラズマ中の流れに対して垂直な向きからの測定を可能にする。ビームが最小に絞られる位置をビームウエストといい、このビームウエスト半径の $\sqrt{2}$ 倍まで広がる距離のことをレイリー長(z_R)という。現在の実験系では光路長 z がレイリー長より十分大きいと仮定し、 V_z 項で z の入る項の効果は無視できると仮定している。また、径方向のドップラー効果は、他の自由度のドップラー効果と比較して数桁小さいため、無視している。従って無

視できる項を省略した(3)式で表される近似的な式で考えている。

$$\delta_{LG} = -kV_z - \left(\frac{l}{r} \right) V_\phi \quad \dots (3)$$

この式から、伝播方向のドップラーシフトは使用するレーザーの波数で決まり、方位角方向のドップラーシフトはトポロジカルチャージの値に比例し、位相特異点からの距離 r に反比例することが分かる。つまり、横方向のドップラー効果を観測するためには位相特異点付近でデータを取ればよい。本実験では l の値は1で固定している。

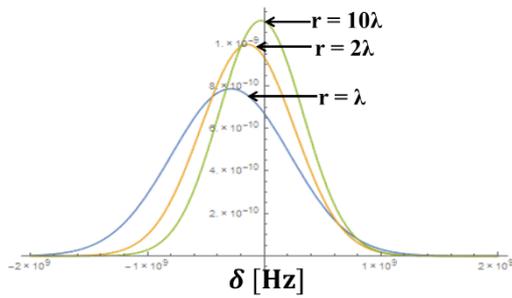
4-4 光渦のドップラースペクトル

光渦のドップラースペクトルの理論式を(4)式に示す。Fig.2は、(4)式に基づき計算した、ガス流(200m/s)に対して垂直方向に光渦を入射した際の、位相特異点からの距離による吸収スペクトルの形状の変化を示す。

$$f(\delta) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{r^2}{l^2} k^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{r}{l} \exp \left(-\frac{m}{2k_B T} \frac{1}{l^2 + k^2} \left(\delta + \frac{l}{r} v_{flow} \right)^2 \right) \quad \dots (4)$$

(4)式は、円筒座標系の速度分布関数を V_r 、 V_z について積分し、(3)式を V_ϕ について解いたものを代入することで導き出される。この式に変数の値を代入することでスペクトルを算出したものがFig.2になっている。Fig.2から、位相特異点からの距離が近いほど吸収率は下がり、スペクトルの幅が広がっていることが分かる。また、スペクトルのシフト量は特異点からの距離が近いほど大きく、離れるにつれシフト量が小さくなっている。 k はレーザーの波数であるため、特異点からの距離 r がレーザーの波長と同じ距離ならば、伝播方向と方位角方向のドップラーシフトが同じ大きさになり、 r が λ の10倍離れると方位角方向のドップラーシフトは伝播方向の10分の1になることを示している。この図から、 r が λ 程度の距離ならば280MHzシフトするため観測は容易だが、実際は、特異点付近は信号が非常に弱いため、理論どおりのスペクトルを観測することは困難である。 r が λ の10倍離れた距離ならば、シフト量は小さくはなるが十分観測可能である。 λ は実

験に使うレーザーの波長であり、本実験では、準安定 Ar 原子の吸収ラインである 697nm の光源を使用している。



Azimuthal Doppler Shift
 $r = \lambda$: 280MHz
 $r = 2\lambda$: 140MHz
 $r = 10\lambda$: 28MHz

Fig.2 Calculated absorption spectrum of optical vortex beam

5 実験方法

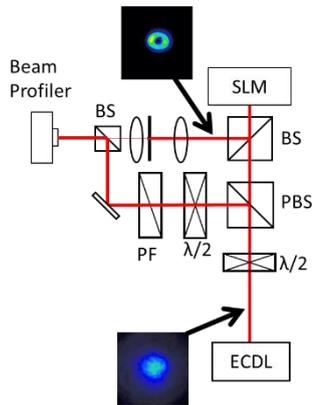


Fig.3 Experimental setup of phase confirmation of optical vortex

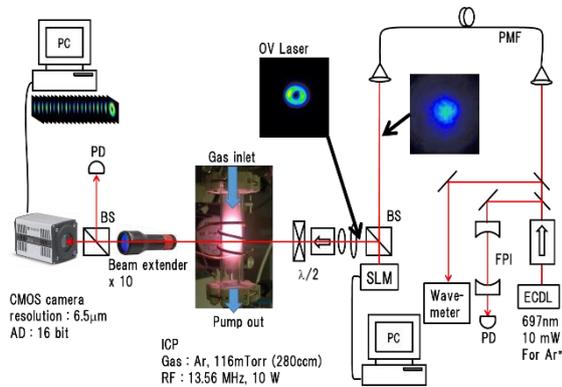


Fig.4 Experimental setup of optical vortex Doppler spectroscopy

実験装置をFig.3,4に示す。Fig.3は、SLMにより光渦を生成し、平面波と干渉させることで生成された光渦の位相を確認するための実験系である。光源である外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を偏光保持ファイバにカップルし、SLMに入射している。SLMにより光渦へと変換されたレーザーをピンホール等の縮小光学系によりSLMの一次回折光のみを分離して使用し、平面波と干渉させ、その様子をカメラで記録している。Fig.4は、光渦を用いたドップラー吸収分光測定を行う実験装置となっている。Fig.3同様、SLMで光渦へと変換されたレーザーをArのテストプラズマへと入射しドップラー分光を行っている。PCでSLMに表示させるホログラム回折格子の $l = \pm 1, 0$ の切り替えとプラズマのON/OFF、そしてレーザーの波長の制御を自動で行い、ビームの様子を、変化した波長ごとにカメラで記録している。この時、カメラの前に設置してあるビームエキスパンダでビームの大きさを10倍に拡大している。

6 結果

6-1 光渦の位相確認

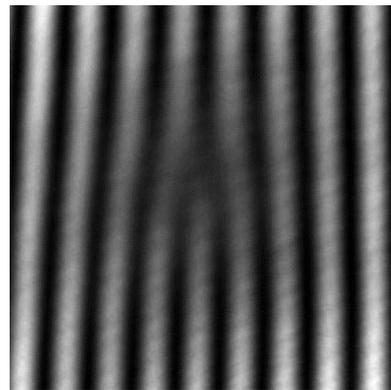


Fig.5 Interference between optical vortex and plane wave

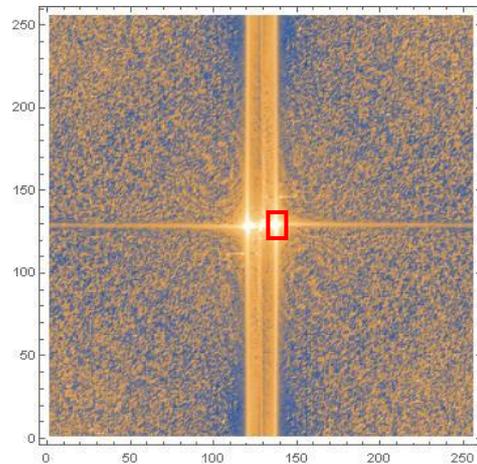


Fig.6 2D Fourier transform

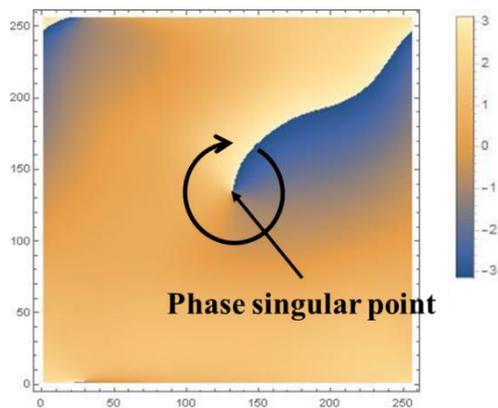


Fig.7 2D phase structure

Fig.5 に生成した $l=+1$ の光渦と平面波を干渉させた画像を示す。光渦と平面波を干渉させると Fig.5 に示したフォーク型の干渉縞が形成される。この干渉縞から l の次数を決定することができる。フォーク型干渉縞の分岐数 n は、 $n = |l| + 1$ で表されるため、分岐数 -1 が l の値である。また、分岐部分は位相特異点を示している。Fig.6 は干渉画像を 2次元フーリエ変換する際に SLM からの回折光のどの部分の回折光を使用するかを決定する画像である。今回使用しているのは一回折光のため画像の四角で囲まれたフーリエ成分を選択し、中心座標と回折光の切り出しの大きさをプログラムに入力することで Fig.7 の画像が得られる。Fig.7 は、Fig.6 で選んだ一回折光を 2次元フーリエ変換して得られた光渦の位相分布を示している。この画像から、方位角方向の位相分布の中心が位相特異点であると確認できる。

6-2 光渦を用いたドップラー分光法

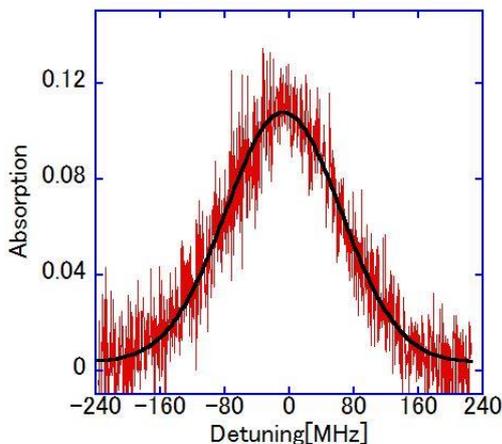


Fig.7 Absorption spectrum obtained with optical vortex

Fig.7は画像1ピクセルの強度変化から得られる吸収スペクトルである。光渦吸収分光ではこの吸収スペクトルのシフトの空間変化より横方向への流速が得られる。

7 まとめ

本講演では、光渦についての基礎的な内容と、3次元の位相構造を持つ光渦を用いることでプラズマの分光計測における測定の高自由度化の可能性とその進捗について述べた。現段階では、方位角方向のドップラーシフトを観測することは可能ではあるが、スペクトルにノイズが大きいため測定精度の向上が必要となっている。ノイズの原因としては、SLMでホログラム回折格子の切り替えを行う際のレーザーの強度の揺らぎやレーザー波長の掃引などが考えられる。今後はSLMとは別の方法で生成した光渦との比較することで、ノイズの原因を突き止め、測定の更なる高精度化を目指す。また、光渦のドップラーシフトの理論式において、レイリー長の部分を無視しているが、線幅の細いレーザーのレイリー長は長いため、光路を十分長くとはいるが、この部分の項も考慮すべき可能性がある。そのため理論計算にレイリー長を含む項も含めて計算し、実験結果と比較、検討する必要がある。

「参考文献」

- 1) L.Allen, M.Babiker, W.L.Power Azimuthal Doppler shift in light beams with orbital angular momentum Optics Communications 112 (1994) p.141-144
- 2) 戸田泰則 光のトポロジーを使った物性探索 物性探求・電子版 Vol.4, No.1 (2015)
- 3) 板里 一輝 光渦を光源とした2次元レーザー吸収分光画像の解析 日本大学生産工学部 電気電子工学科 2014
- 4) 野々部 和樹 ドップラー吸収分光に向けた波長可変光渦光源の開発 名古屋大学工学部 電気電子・情報工学科 2014