光渦吸収分光における Gouy 位相変化の影響

日大生産工(院) ○山本 将来 高知工科大学 小林 弘和 核融合研 吉村 信次 森崎 友宏 九大総理工 寺坂 健一郎 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21π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、光の強度がゼロとなる点である。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。

従来の光渦吸収分光において、吸収率が負を 示す領域が観測されてきた。本講演では光の伝 播に伴うGouy位相変化が光渦吸収分光に及ぼ す影響を、4f光学系により排除する試みについ て報告する。

2 光渦ドップラー吸収分光

原子や分子は、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。吸収分光とは、ター ゲットに外部から光を照射し、透過光の減衰率 からプラズマ中の原子・分子の温度や密度を計 測する方法である。

ドップラー吸収分光とは、ドップラー効果を 利用した吸収分光である。気体中の原子は熱平 衡下においてマクスウェル・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励起する波長 からずれた波長の光を吸収し、励起する。ドッ プラー吸収分光では、光源に線幅の細い波長可 変レーザーを用いることで、吸収スペクトルの ドップラー効果による広がり(ドップラー広が り)を観測し、原子・分子の温度や流速を計測 することができる。

しかし通常の光源を用いたドップラー吸収 分光では、波面が平面もしくは球面で近似でき るレーザーのため、原理的にレーザーの伝播方 向の流れしか測定することができない。しかし 光渦の場合は(1)式に示すように、伝播方向(V_{μ} 項)だけでなく方位角方向(V_{μ} 項)にもドップラ 一効果が起きることが分かっている。¹⁾

$$\delta_{LG} = -kV_z - \left(\frac{l}{r}\right)V_\phi \qquad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

ここでkはレーザーの波数、lはトポロジカルチ ャージ、rは位相特異点からの距離である。こ の式より、方位角方向のドップラーシフトはr に反比例することから、特異点近傍のドップラ ーシフトを観測することができれば、横方向か らの流れ計測へ応用が可能となる。

3 Gouy位相

ガウシアンビームがビームウエストから離れた片側からもう片側に伝播するとき、ビーム が ϕ_G により伝播距離に応じて位相が変化する。 これをGouy位相変化と呼び、以下の式で表される。

$$\phi_G(z) = -\arctan\frac{z}{z_R} \quad \cdot \quad \cdot \quad (2)$$

zは位置を示しており、z = 0のときビームウエ ストとなる。 z_R はレイリー長で、ビームの半径 がビームウエストの $\sqrt{2}$ 倍になる距離である。 このGouy位相変化により、非対称な欠陥をも つ光渦の強度分布がトポロジカルチャージの 符号に依存する方向に回転することが報告さ れている。²⁾

4 4f光学系

4f光学系の概念図をFig.1に示す。fi、f2はそ れぞれLens 1、Lens 2の焦点距離である。レン ズには前側焦点面の強度分布を光学的にフー リエ変換し、後側焦点面にフーリエ変換後の強 度分布を生成する機能がある。これを利用し、 レンズを2枚組み合わせることで、Input Plane での光の情報をLens 1によりフーリエ変換し、 Fourier Planeでの光の情報をLens 2により逆 フーリエ変換することで、Input Planeの情報

Influence of Gouy phase variation on optical vortex absorption spectroscopy

Masaki YAMAMOTO, Hirokazu KOBAYASHI, Shinji YOSHIMURA, Tomohiro MORISAKI, Kenichiro TERASAKA, Mitsutoshi ARAMAKI をOutput Planeに転送する。つまり、1枚目の レンズの前側焦点距離の光の情報を2枚目レン ズの後側焦点距離の位置に転送することがで きる。この入力面と出力面の距離が、レンズの 焦点距離4つ分なので4f光学系と呼ばれている。



Fig.1 Schematic diagram of 4f optical system

5 実験方法

Fig.2 に実験装置図を示す。外部共振器型半 導体レーザー(ECDL)の出力を SLM により光 渦へと変換している。ピンホールにより SLM の一次回折光を分離して使用している。光渦 を Ar のテストプラズマの流れに対して垂直 に入射してドップラー吸収分光を行ってい る。レーザーの波長および SLM に表示する ホログラムは PC により自動制御し、ビーム の強度分布をレーザーの波長掃引に同期して CMOS カメラにより撮影している。この時プ ラズマ入射前の 4f 光学系により SLM から出 射された光渦を真空容器の入射窓に転送し、 プラズマを透過してきた光も 4f 光学系により CMOS カメラへと転送することで Gouy 位相 変化の影響を取り除いている。





6 結果

Fig.3 は波長掃引に伴うビームの強度変化から吸収スペクトルを求めてガウシアンフィットを行い、スペクトルのピーク値を2次元分布にしたものである。(a)は従来の4f光学系を取り入れる前の測定系での吸収率の分布で、(b)は4f光学系を取り入れた測定系での吸収率の分布である。(a)では茶色の部分が負の吸収の領域を示しているが、(b)では負の吸収が起きていないことが確認された。なお、(b)で黒く表示されている部分はスペクトルがガウス型をなしていない、或いは吸収が殆ど起きていないためカーブフィットができていない領域である。



Fig.3 Two-dimensional distribution of absorption rate

7 まとめ

本研究では、光渦吸収分光測定系に4f光学 系を導入し、Gouy 位相変化をキャンセルし た測定系で光渦吸収分光を行った。結果とし て、従来の測定系で観測されてきた負の吸収 領域は確認されなくなったため、Gouy 位相 変化による効果を排除できたと考えられる。 しかし、特異点近傍の吸収スペクトルはきれ いに取得できていないため、今後は特異点近 傍のスペクトルをきれいに観測するため、実 験系の測定精度向上を行う。

「参考文献」

W.L.Power M.Babiker, 1) L.Allen, Azimuthal Doppler shift in light beams with orbiral angular momentum Optics Communications 112 (1994) p.141-144 "Direct 2) J.Hamazaki. et al., observation of Gouy phase shift in a propagating optical vortex". Opt. Express 14, 8382 – 8392 (2006)