散乱光の偏光状態の空間分布の観察

宮本研究室 1910479 永井翔貴

1 序論

本研究の目的は散乱体により光ビームを散乱さ せ偏光状態の空間分布を観察することである.特 に偏光状態と空間分布の不可分性に着目し,散乱 前後で不可分性の変化を観察する.ストークスカ メラ(WPI-200, Photonic Lattice)の解像度の評価 と,ビームに不可分性を付与し散乱させる実験系 の検討を行う.

2 原理

2.1 ストークスパラメタ

近軸近似のビームについて考える.ストークス パラメタは光の偏光状態を表す量であり、次のよ うに定義する.

$$\boldsymbol{S}(\boldsymbol{r}_{\perp}) = \begin{bmatrix} S_0(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ S_1(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ S_2(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ S_3(\boldsymbol{r}_{\perp}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_h(\boldsymbol{r}_{\perp}) + I_v(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ I_h(\boldsymbol{r}_{\perp}) - I_v(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ I_d(\boldsymbol{r}_{\perp}) - I_a(\boldsymbol{r}_{\perp}) \\ I_r(\boldsymbol{r}_{\perp}) - I_l(\boldsymbol{r}_{\perp}) \end{bmatrix}$$
(2.1)

 r_{\perp} はビームの光軸に垂直な平面上の位置ベクトル であり、 $l_j(r_{\perp})$ ($j \in \{h, v, d, a, r, l\}$)はそれぞれ水 平偏光成分,垂直偏光成分,45°直線偏光成分, 135°直線偏光成分,右回り円偏光成分,左回り円 偏光成分の光強度である.

2.2 不可分性

位置ごとに偏光状態の異なる光は空間全体で見 ると偏光が定まらず,このような光は偏光状態と 空間分布の間の不可分性を持つ.散乱過程によっ てこの不可分性が変化する場合と変化しない場合 があることが考えられる.不可分性の度合いは Concurrence という量で定量化することができ, 次の(2.2)のように表される[1].

Concurrence =
$$\sqrt{1 - \frac{P_1^2}{P_0^2} - \frac{P_2^2}{P_0^2} - \frac{P_3^2}{P_0^2}}$$
 (2.2)

ここで、 $P_0 \sim P_3$ は位置に依らないストークスパラ メタとして次の(2.3)と(2.4)のように定義する.

$$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$
(2.3)

$$\boldsymbol{P} = \int d\boldsymbol{r}_{\perp} \cdot \boldsymbol{S}(\boldsymbol{r}_{\perp}) \tag{2.4}$$

2.3 不可分性を持つビームの生成と制御

ガウシアンビームの垂直偏光成分に位相特異点 を付与したビームの不可分性について考える. x軸 が水平であるとして、ビームのx軸成分、y軸成分 の複素振幅を E_x 、 E_y として次のように定義する.

$$E_x = E_{0x}(\rho) \exp i\psi(\rho) \tag{2.5}$$

$$E_{y} = E_{0y}(\rho) \exp i\psi(\rho) \exp(in\phi)$$
(2.6)

ここで ρ , ϕ は動径座標と方位角座標, $n = \pm 1, \pm 2$... であり, $E_{0x}(\rho) \ge E_{0y}(\rho)$ はガウシアンビームの振 幅, $\psi(\rho)$ は位相である. $P_2 \ge P_3 \varepsilon$ (2.4)により計算 すると,

$$P_{2} = 2\operatorname{Re}\left(\int_{0}^{2\pi} \exp(-in\phi) d\phi\right) \cdot \left(\int_{0}^{\infty} \rho E_{0x}(\rho) \exp i\psi(\rho) E_{0y}(\rho) \exp[-i\psi(\rho)] d\rho\right)$$
$$= 0 \qquad (2.7)$$

$$P_3 = \iint_{-\infty}^{\infty} 2\mathrm{Im}E_x E_y^* dx dy = 0 \qquad (2.8)$$

となる. Concurrence $iP_0 \ge P_1$ のみに依存するようになり、垂直偏光成分と水平偏光成分のパワーを制御することで不可分性の度合いを調整できる.

3 ストークスカメラの性能評価

散乱光では位置により偏光状態が大きく変化す るため観察の空間分解能が問題となる.ストーク スカメラ(WPI-200, Photonic Lattice)では複数画 素のデータから仮想的な画素のストークスパラメ タを決定する.空間分解能を実験により評価する.

3.1 実験方法

実験に使用する光学系を図 3.1 に示す.



図 3.1 2パターンの干渉縞を作成する光学系

ビームスプリッター1・2の間の素子を変えるこ とで2パターンの干渉縞を撮影する. 偏光板(1/4 波長板)により135度直線偏光(右回り円偏光) を作成し,経路2では奇数回反射することで水平 偏光成分の位相が π ずれ,45度直線偏光(左回り 円偏光)と135直線偏光(右回り円偏光)が干渉 し S_1 に縞状の空間分布を発生させる.WPI-200の 付属プログラムであるWPI-VIEWから出力された S_1 の空間分布は図 3.2 と図 3.3 のようになる.プ ログラム上では S_0 により規格化されており,-1か ら1の範囲の値として得られる.



干涉稿

よる干渉縞

空間周波数とコントラストを求め、高い周波数に 対してコントラストの低下度合いを評価する.

3.3 空間周波数の算出方法

図 3.4 に干渉縞の模式図を示す. 図に引いた水

平な線をx軸, 垂直な線をy軸とする. 干渉縞の間 隔をLとし, x軸成分を $1/f_x$, y軸成分 $1/f_y$ とする.



図 3.4 干渉縞の模式図 空間周波数をfとして,次のように算出する.

$$f = \frac{1}{L} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{f_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_y}\right)^2}}$$
(3.1)

干渉縞の断面から f_x 及び f_y の算出を行う. WPI-VIEW を用いて軸上の S_1 のデータを取得し, Exel を用いて図 3.5 のように折れ線グラフに表した.



図 3.5 干渉縞の断面

グラフはノイズを含んだ正弦波とする. 値の振れ が大きい範囲を選択し,波形が平均値を横切る位 置を数える. 両端の位置を P_1, P_2 ,横切る回数をmとして空間周波数は(3.2)のように算出する.

$$f_l = \frac{m+1}{2(P_2 - P_1)} \quad (l \in \{x, y\})$$
(3.2)

3.4 コントラストの算出方法

コントラストは空間周波数を算出した範囲内で, グラフからノイズを取り除いた理想的な正弦波の 振幅を推定して算出する.





空間周波数を f_l ,振幅をA, $P_1 \sim P_2$ 間の S_1 の平均をB, pixel をp,初期位相を $2\pi f_l x$ として正弦波は

 $Asin(2\pi f_l(p-x)) + B$ (3.3) となる. Exel を使用し実測値に重ねて 1pixel ごと にプロットを行った. Aの最も確からしい値の極 大値をS_{max}, 極小値をS_{min}とする. 不確かさとして Aのとりうる範囲と最も確からしい値との間隔の 内値が大きい方を Δ S_{max}, Δ S_{min}とする. 各軸成分 のビジビリティーとその不確かさを C_l , ΔC_l とし 次のように算出する.

$$C_{l} = \frac{X}{Y+1} \qquad (3.4)$$

$$\Delta C_{l} = |C_{l}| \sqrt{\left(\frac{1}{X}\right)^{2} + \left(\frac{1}{Y+1}\right)^{2}} \Delta \qquad (3.5)$$

$$\left(X = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}, Y = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}\right)$$

この時、⊿は次のように定義する.

$$\Delta = \frac{\sqrt{(\Delta S_{max})^2 + (\Delta S_{min})^2}}{2}$$
(3.6)

 $C_x \geq C_y$ を平均し空間周波数fに対するビジビリティーとする.不確かさは ΔC_l から合成標準不確かさを求める.

3.5 コントラストの理論値の算出

解像度以外の要因によるコントラストの低下を 評価するために,干渉計の各経路単独のストーク スパラメタの分布を別途撮影し, x軸及びy軸上で コントラストの理論値を算出して比較を行う.

ストークスパラメタから水平偏光成分と鉛直偏

光成分の複素振幅を算出する. 位相差θを変数とし て付与し, 足し合わせ複素振幅からS₁/S₀を算出す る. S₁/S₀は(3.7)のようになる.

$$\frac{S_1(\theta)}{S_0(\theta)} = \frac{[e + U\sin(\theta + \gamma)]}{[f + W\sin(\theta + \phi)]} \quad (3.7)$$

ここで e, f, U, W, γ, ϕ は全て θ を含まず,各経路の ストークスパラメタから算出できる. S_1/S_0 の極 大値を S'_{max} ,極小値を S'_{min} とし, 1pixel ごとのビ ジビリティーを C_p として以下のように求める.

$$C_{p} = \frac{\left|\frac{S'_{max} - S'_{min}}{2}\right|}{\left|\frac{S'_{max} + S'_{min}}{2}\right| + 1} \quad (3.8)$$

x軸及びy軸上で,空間周波数を求めた範囲内で C_p の平均をとり C_l の理論値とする.不確かさは標準 偏差をとる.さらに **3.4** と同様にfに対するビジ ビリティーと不確かさを求める.

3.7 コントラストの評価

fに対するビジビリティーをCとして、2パターンの干渉縞に対する空間周波数とビジビリティーの計算結果は以下の様になった.



0.1pixel⁻¹において図 3.8 では 0.7 付近に対 し,図 3.30 では 0.06 と 90 パーセント近い低下 がみられた.1/4 波長板の角度の設定が適切でな く,干渉させるビームが完全に円偏光でないこと が考えられる.

画面上で干渉縞の明暗が確認できる最小の波長 は2pixelであるためストークスカメラで干渉縞が 確認できる周波数の上限は0.5pixel⁻¹とする.図 3.29 では周波数が0.25pixel⁻¹でビジビリティーが 0.7付近になっている.これは0.5pixel⁻¹に対して 十分大きい値であり,さらにビジビリティーは低 下がみられない.しかしながら,理論値に対して 30%程度の低下がみられる.

4 不可分性を持つビームの散乱



図 4.1 不可分なビームの生成と散乱

コリメートにより拡大したガウシアンビームを 偏光板で任意の角度の透過軸に並行な直線偏光成 分を抜き出したあと,空間光変調器で鉛直偏光成 分に位相特異点を付与することで不可分性を持つ ビームを生成する[2]. P1の回転により不可分性の 度合いを制御する.その後,すりガラスで散乱さ せた光をレンズに通してフラウンホーファー回折 像を生成し,その像をさらにレンズで縮小し CCD カメラの検出面に入射する.ストークスパラメタ を求めるために偏光板と 1/4 波長板を用いる.偏 光板 2 のみを使用し直線偏光成分の光強度を取得 する.1/4 波長板を用いて円偏光を直線偏光に変換 し,偏光板 2 を透過することで円偏光成分の光強 度を取得する.

5 結論

本研究の目的は散乱体により光ビームを散乱さ せ偏光状態の空間分布を観察することであった. 散乱の実験までは行えず,実験系の検討とストー クスカメラの評価を行った.

ストークスカメラの空間分解能の評価について は、直線偏光による干渉縞は高い空間周波数でコ ントラストに著しい低下は見られなかったため、 複雑な偏光状態の空間分布を測定できると見込ま れた.円偏光による干渉縞は直線偏光によるもの と同じ周波数で比較してコントラストの低下がみ られ、ビームの偏光状態に問題があると考えられ た.今後は 1/4 波長板による干渉縞についてコン トラストの理論値を計算することで、偏光状態に よりどれだけコントラストが低下しているか評価 を行う必要がある.

不可分性を持つビームを生成し散乱させる光学 系の検討については、今後は実際に実験を行う必 要がある.

6 参考文献

- $\lceil 1 \rceil$ Adam Selvem. Carmelo Rosales-Guzmán, Sarah Croke, Andrew Forbes, and Sonja Franke-Arnold, " Basisindependent tomography and nonseparability witnesses of pure complex vectorial light fields by Stokes projections," Physical Review A 100 (2019) 063842
- [2] Gangi Reddy Salla, Vijay Kumar, Yoko Miyamoto, and R.P. Singh, "Scattering of Poincaré beams: polarization speckles," Optics Express 25 (2017) 19886-19893