

最近の技術から

極微弱光画像計測システムを使った光学干渉実験

平野 伊助・浦上 恒幸

浜松ホトニクス(株)中央研究所第三研究室 〒434 浜北市平口 5000

1. ま え が き

光の量を少なくしていくと、光は観測系の応答時間内に一個一個の粒子、すなわち光子として検出されるようになる。系内に光子がたかだか一個しか存在しない条件下で行われる単一光子領域での光学干渉実験は、光の波動と粒子の二重性を知る上でたいへん興味深いものである。

ここでは極微弱光領域での光子の二次元分布を一個ずつ粒子として検出し、画像化すると同時にその解析ができる光子計数型画像計測装置¹⁾(浜松ホトニクス, PIAS)を用いて行ってきた一連の実験結果について紹介する。

2. 光子計数型画像計測装置による光学干渉実験

2.1 低圧水銀ランプでのヤングの干渉実験²⁾

光子のもつ波動と粒子の二重性を単一光子領域で視覚的に示した最初の例として、低圧水銀ランプから特定のスペクトルを抽出して行ったヤングの干渉実験がある。時間の経過とともに検出された光子が積算され、PIASのモニター上に干渉縞が形成される様子から、光の粒子性と波動性が直感的に理解できる。また、装置が光子の入射位置を半導体位置検出器による重心検出¹⁾で求め、一つの点として表示しているため、観察者に光の粒子性を印象づける結果となっている。

2.2 短パルス光源による干渉実験³⁾

光源を短パルスにした場合、光子はパルス中のみ存在する。実験系内に光パルスがたかだか一個しか存在しないくらいにパルス間隔を十分広くし、かつパルス光に含まれる光子数が最大でも一個となるように減光して光子間の相互作用を無視できる単一光子領域をつくれた実験が行われている。このとき、一つのパルスに二個以上の光子が存在する確率は $6.0 \times 10^{-5} * 1$ であった。この実験により、光子の一つ一つがダブルスリットを同時に通

過し、自分自身と干渉していることを明確にでき、光子の二重性をより確かなものにした。

2.3 フレネルアラゴの実験

光が横波であることを証明した偏光干渉実験⁴⁾を単一光子領域で実現している⁵⁾。図1の実線部がその実験系である。

この実験では一個の光子がダブルスリットとともに直交した偏光子も同時に通過するという量子的解釈をしないと説明できないことを確認した。また、入射光の偏光状態によってダブルスリットを通過して観測面で検出される光子自身に位相差が生じる。この位相差は干渉縞の明暗位置の移動となって現れることも示された。

上で説明した光源には直線偏光のレーザーダイオードが用いられている。そこで、ランダムな偏光特性の発光ダイオードを光源とした場合について、同一系で実験したので紹介する。まず、LEDの光量を減らし、偏光板により特定の偏光成分のみ取り出して暗箱の中に導入した。このとき、PIASでのカウント数が約200 cpsの単一光子領域になるまで光量を減少させた。検光子を 0° と 90° にした場合の干渉縞の様子を図2の(a), (b)に示す。ただし、検光子の角度が $\pm 45^\circ$ のときには干渉縞が観測されなかった。なお、強度分布が対称でないのはダブルスリットへの偏光板の取付けが不完全なためである。一方、シングルスリットの前の偏光板を取り外し

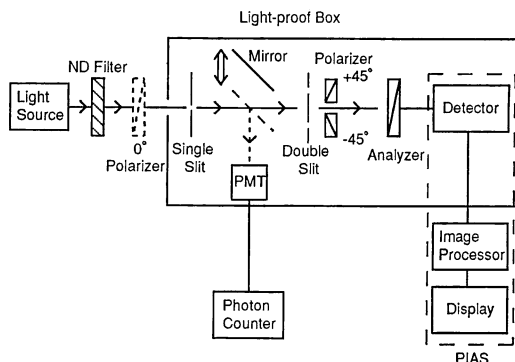


図1 単一光子領域における偏光干渉実験系

*1 文献3)では 6.9×10^{-5} となっているが、本文の数値 6.0×10^{-5} が正しい。

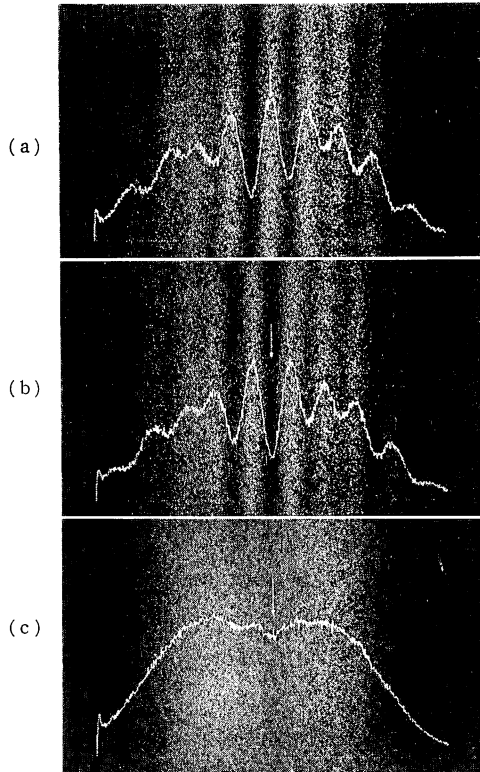


図 2 観測された干渉縞の強度分布
(a), (b): シングルスリット部に偏光子を入れたとき, (c): シングルスリット部の偏光子がないとき. 検光子の角度: (a) 0° , (b) 90° , (c) 0° . 矢印は観測面における光軸の位置を表す.

た場合には, 検光子の角度を 0° もしくは 90° にしても干渉縞を観測することができなかつた. 検光子の角度を 0° にしたときの観測結果を図 2 (c) に示す. これは, 自然光を方位角がランダムに変わる直線偏光の集合体と考えたとき, それぞれの偏光による干渉縞が打ち消し合うために, 干渉縞が観測されなくなると考えるのがわかりやすい.

2.4 ホログラフィの実験⁶⁾

単一光子領域におけるヤングの干渉実験で形成されるような微弱光による干渉縞を実際に利用する方法としてホログラフィがあげられる. ここでは物体光と参照光の交叉角を小さくすることにより, 干渉縞の間隔を検出器

の空間分解能よりも大きくできるインライン方式を用いた. 再生像は PIAS で得られた積算画像を写真フィルムに記録したものをアルゴンレーザーで再生したものであり, 単一光子領域においてもホログラフィが実現できることを証明した. 光源の可干渉性と対象物体の大きさの条件が合致すれば, 微弱光領域での現象を記録できることを示唆する結果であった.

3. ま と め

極微弱光画像計測システムを単一光子領域での干渉実験に用いて, 光子が自分自身と干渉し, かつ, 波動と粒子の二重性のあることを画像化により確認した. 干渉縞の観測は, 量子力学を知らない人に対しても, 光子の二重性について直感的な理解を促すことができる.

このシステムに代表される極微弱光画像計測は干渉実験系以外にも種々の観測に応用されている⁷⁾. しかし, 微弱光計測において有為な結果を出すには一般に時間がかかる. 最尤推定法⁸⁾のような統計的手法の採用により, 観測データに我々が先験的に持っている情報を折り込んで, 少ない情報量から最も確度の高い物理現象を予測することができればおもしろいと考えている.

文 献

- 1) Y. Tuchiya, E. Inuzuka, T. Kurono and M. Hosoda: "Photon counting imaging and its application," *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol. 64 A (Academic Press, London, 1985) pp. 21-31.
- 2) 土屋 裕, 犬塚英治, 杉山 優, 黒野剛弘, 堀口千代春: "フォトンカウンティング領域における「ヤングの干渉実験」," *テレビジョン学会誌*, **36** (1982) 1010-1012.
- 3) 高橋宏典, 青島紳一郎, 浦上恒幸, 竹森民樹, 平野伊助, 土屋 裕: "短パルス光を用いた単一光子状態におけるヤングの干渉実験", *光学*, **20** (1991) 108-111.
- 4) 鶴田匡夫: "続 光の鉛筆 31 偏光の干渉", *O plus E*, No. 10 (1987) 108-115.
- 5) 高橋宏典, 青島紳一郎, 浦上恒幸, 竹森民樹, 平野伊助, 土屋 裕: "単一光子状態における偏光干渉実験", *光学*, **21** (1992) 165-168.
- 6) I. Hirano and N. Hirai: "Holography in the single-photon region," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1741-1742.
- 7) 土屋 裕: "極微弱光計測", *計測と制御*, **29** (1990) 49-55.
- 8) 中川 徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析 (東京大学出版会, 1984) pp. 18-20.

(1993年5月6日受理)