

# 研 究

## 単一光子状態における偏光干渉実験

高橋 宏典・青島紳一郎・浦上 恒幸・竹森 民樹  
平野 伊助・土屋 裕

浜松ホトニクス(株)中央研究所 〒434 浜北市平口 5000

(1991年12月2日受付, 1992年1月6日受理)

### Interference Experiment of Polarized Light in the Single-Photon Region

Hironori TAKAHASHI, Shinichiro AOSHIMA, Tsuneyuki URAKAMI,  
Tamiki TAKEMORI, Isuke HIRANO and Yutaka TSUCHIYA

Central Research Laboratory, Hamamatsu Photonics K. K., 5000, Hirakuchi, Hamakita 434

(Received December 2, 1991; Accepted January 6, 1992)

Fresnel-Arago's interference experiment in the single-photon region has been carried out using short optical pulses and a photon-counting image acquisition system. Picosecond optical pulses at the wavelength of 410 nm, which are second harmonics of pulses generated from a gain switched diode laser, have been used as a light source. The pulse duration and the repetition rate were less than 40 ps and 10 MHz, respectively. Under the single-photon region, where the incoming rate of photon in front of the double slits is  $1.12 \times 10^5$  photons/s, a single photon exists in every 90 pulses. Two polarizers are behind each slit of the double slit, and the polarized angle is inclined by  $+45^\circ$  and  $-45^\circ$  to the slit direction. The interference patterns have been observed for linearly and circularly polarized incident light to the double slit, with and without an analyzer placed on a rotating mount in front of the photon-counting image acquisition system.

#### 1. はじめに

光量を減らしていくと、時間的にも、空間的にも、光が離散した個々の粒子として検出されるような、単一光子状態を実現することができる。しかし、この場合でも、光子を単なる粒子として扱うと説明できず、量子力学的な考え方が必要となる現象がある。たとえば、単一光子状態におけるヤングの干渉実験では、一つの光子が二つのスリットを同時に通過しており、光子が波と粒子の二重性を持つことが示される<sup>1,2)</sup>。このほかに、単一光子状態における光子の偏光の問題がある<sup>3)</sup>。

フレネル・アラゴの干渉実験は、光の偏光の性質を利用して、光が縦波でなく横波であることを示したことで有名である<sup>4)</sup>。ヤングの干渉計のダブルスリットの各々に、スリットの長手方向に対して $\pm 45^\circ$ 傾き、互いに直交する二つの偏光子を設けた時、光は干渉しないことを

見いだした。この事実は、光が縦波であると考えたと決して説明できない。さらに二つの偏光子の後ろにそれぞれの偏光子に対して $45^\circ$ の角度をなす検光子を置く。ダブルスリットへの入射光が偏光している光、すなわち、ある決まった振動方向をもつ横波であれば干渉縞が観察されるが、特定の偏光を持たない自然光の場合には干渉縞が見られないことを示した<sup>5)</sup>。

われわれは、単一光子状態でこのフレネル・アラゴの干渉実験を行い、一つ一つの光子が互いに直交した二つの偏光子を同時に通過することを、はじめて、実験的に確認したので報告する。

#### 2. 実 験

実験系の構成を Fig. 1 に示す。干渉計および光検出器は暗室内の暗箱中に置かれている。シングルスリットの幅は  $100 \mu\text{m}$ 、ダブルスリットの幅と間隔は、それぞ

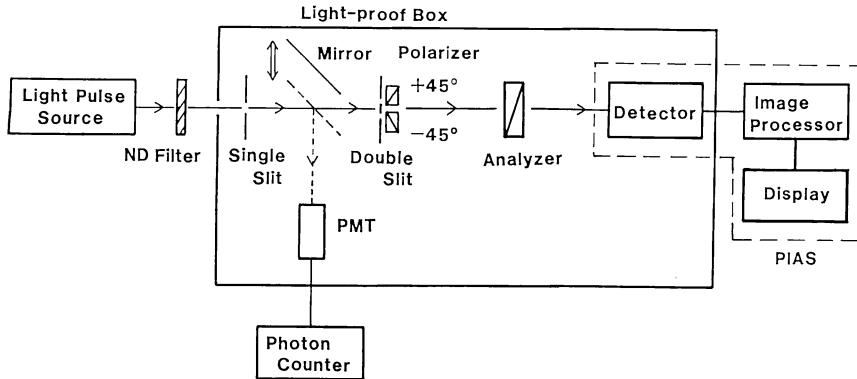


Fig. 1 Setup for interference experiment of polarized light in the single-photon region.

れ,  $75\ \mu\text{m}$  と  $250\ \mu\text{m}$  であり, これら二つのスリット板の間の距離は  $24.5\ \text{cm}$  である. ダブルスリットは厚さ  $40\ \mu\text{m}$  の金属板で作り, 各々のスリットの背面に, 厚さ  $50\ \mu\text{m}$  のフィルム偏光板 (ポラロイド, HNP'B) を互いに直交させて張り付け偏光子とした. 偏光板の最大透過率は 29% であり, 対で使用したときの消光比は  $2 \times 10^{-4}$  である. 偏光子の透過軸は, スリットの長手方向に対して  $\pm 45^\circ$  の角度である. 検光子は同じフィルム偏光板を用い, 光軸を中心に回転可能なホルダーに取り付けた.

その他の構成は筆者らが既に報告した<sup>2)</sup> 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と同じである. すなわち, 光検出器は光子計数型画像計測装置 (浜松ホトニクス, PIAS) を用いており, 光子が1個1個の粒子として検出されるような極微弱光域でのイメージングと画像解析が行える. 光源には, 半導体レーザーを用いた短パルス光源 (浜松ホトニクス, PLP-01) を使用した. この光源は, 半導体レーザーの第2高調波を利用するもので, 波長  $410\ \text{nm}$ , 繰り返し周波数  $10\ \text{MHz}$ , パルス幅約  $40\ \text{ps}$ , ピーク出力約  $0.5\ \text{mW}$  の短パルス光が得られる. 出力光はダブルスリットの長手方向の直線偏光であり, それと垂直な直線偏光との強度比は約  $100:1$  である. また, 円偏光入射に対する実験を行うために, 光源の直後に  $1/4$  波長板を置き, 直線偏光を円偏光に変換した.

また, 光量の測定は, シングルスリット直後の光子を光電子増倍管で検出し, フォトンカウンターで計数した.

### 3. 実験条件

パルス光の繰り返し周期  $100\ \text{ns}$  とパルス幅  $40\ \text{ps}$  を光が進む距離に換算すると, それぞれ  $30\ \text{m}$  と  $12\ \text{mm}$

になる. Fig. 1 に示した実験系では, 光源から検出器までの距離が  $167\ \text{cm}$  で, この光路内には最大でも1個の光パルスしか存在しない.

入射光をニュートラルデンシティフィルターで減光し, シングルスリットを通過した直後の光量が, 光子数に換算して  $1.12 \times 10^5$  個/s の条件で実験した. これは, パルスの繰り返し周波数  $10\ \text{MHz}$  を考慮すると, 約  $90$  パルスに1個の割合で光子が存在するような光量である. したがって, 光子が存在するパルスには, 99% 以上の確率で1個だけ光子が含まれる単一光子状態になっている.

単一光子状態における個々の光子の偏光と干渉との関係を調べるため, 種々の条件で実験した. まずはじめに, 直線偏光の光入力に対して検光子がない場合, および検光子の角度を変えた場合について実験した. つぎに, 円偏光の光入力に対して同様の実験を行った.

### 4. 実験結果

上記の実験条件で, 1時間積算したときに得られた画像を Fig. 2~Fig. 4 に示す. これらの図は, 光子計数画像と正規化した輝度分布曲線を重畳表示したものである. また, 中央部の下向きの矢印は, 横軸方向の中心すなわち光軸の位置を示す.

検光子がない場合の結果を Fig. 2 に示す. 検光子がない時, 干渉縞は観測されなかった.

つぎに, 実験系に検光子を加えて, その検光子の角度をダブルスリットの長手方向に対して  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-45^\circ$  とした時の結果をそれぞれ Fig. 3 (a), (b), (c), (d) に示す. (a) と (b) では, 干渉縞の明暗, すなわち輝度分布の山と谷の位置が逆転した干渉縞が観察された. また, (c) と (d) では, 上述のような干渉縞は見られなかった.

最後に、 $1/4$  波長板を用いて光源からの直線偏光を円偏光に変換して実験した。この時、検光子の角度はダブルスリットの長手方向に対して  $0^\circ$  とした。Fig. 4 は、その結果を示す。干渉縞の山と谷の位置は Fig. 3 (a) と (b) の中間となった。

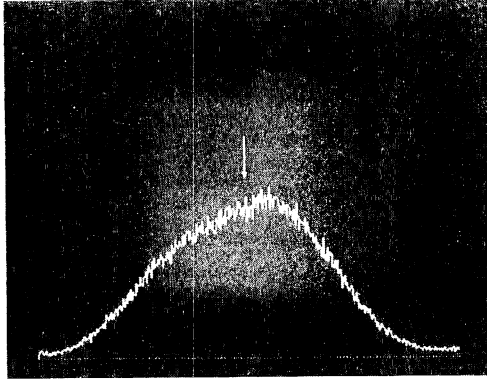


Fig. 2 Intensity distribution and its profile, observed without the analyzer. No interference pattern appears. An arrow represents the position of the optical axis. The same applies to the following pictures.

## 5. 考 察

通常の光量においては、光を波として扱うと、今回得られたような干渉縞の様子は容易に説明できる。すなわち、ヤングの干渉計の場合、ダブルスリットの各々からの光路長差がゼロか、あるいは波長の整数倍にある位置では、二つの光の波の位相が一致するので干渉縞の山となる。また、位相差が  $180^\circ$  の場合は干渉縞の谷となる。

フレネル・アラゴの干渉計では、上記に加えて入射光の偏光状態、ダブルスリットに取り付けられた偏光子、および検出器の前に置かれた検光子の向きを考慮して、干渉する二つの光の位相差を考える必要がある。

検光子がない場合、ダブルスリットからの二つの光の偏光方向は直交するので干渉縞は生じない。ダブルスリットの長手方向に平行な検光子を追加した場合は、ダブルスリットからの二つの光に検光子の偏光方向と一致する成分があるので、互いに干渉する。ここでは、光源がダブルスリットの長手方向の直線偏光であるから、 $\pm 45^\circ$  の角度の偏光子からの二つの光が検光子を通過したとき、それらの位相は一致している。このため、ダブ

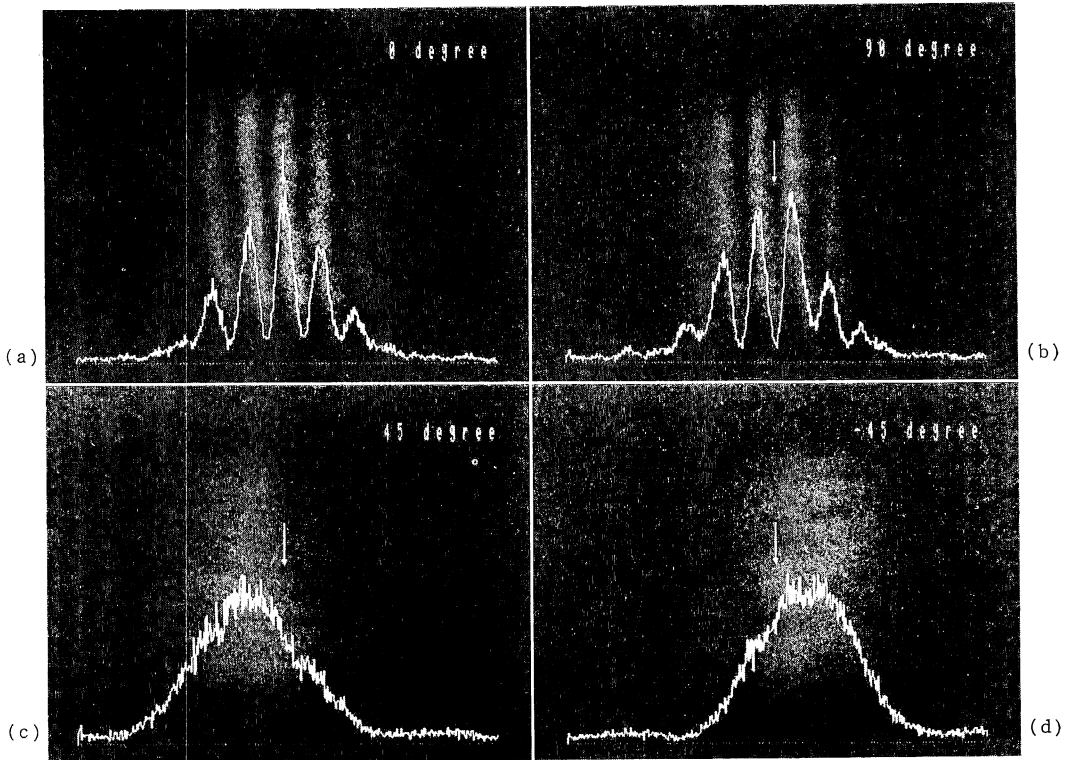


Fig. 3 Intensity distribution and its profiles, observed when the analyzer is set at the various angles; (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $45^\circ$ , (d)  $-45^\circ$ . Interference patterns appear in (a) and (b), where the maxima and the minima of the intensity is reversed.

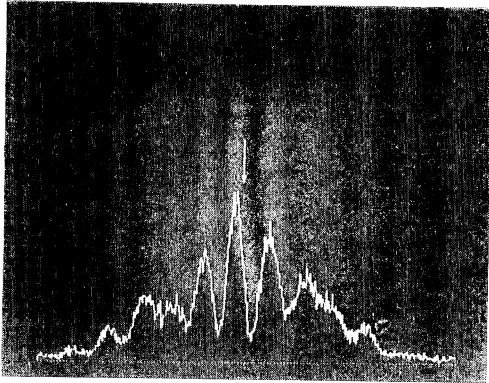


Fig. 4 Interference pattern observed when the incident light has circular polarization. The pattern is shifted by a half of the interval between the maxima and the minima of the intensity.

ルスリットの各々からの光路長が等しいときに干涉縞の山となる。検光子の角度がダブルスリットの長手方向に対して  $90^\circ$  の場合は、検光子を通過した二つの光の位相が  $180^\circ$  ずれるので、光路長が等しいときに干涉縞の谷となる。

検光子の角度が  $\pm 45^\circ$  の場合は、検光子の角度と一致する偏光子を持つスリットからの光、つまりいずれか一方のスリットからの光しか検光子を通過しないので、干涉縞は生じない。さらに、入射光が円偏光の場合、ダブルスリットからの二つの光にすでに  $1/4$  波長 ( $90^\circ$ ) の位相差がある。検光子の偏光方向がスリットの長手方向と一致する場合、検光子を通過した二つの光の位相は  $90^\circ$  ずれているので、入射光が直線偏光の時に比べ干涉縞は山と谷の間隔の半分だけずれる。

単一光子状態の光を単なる粒子として考えると、1個の粒子がダブルスリットを同時に通過するだけでなく、1個の粒子が同時に二つの直交した偏光子を通過すると考えないと、今回の実験結果をうまく説明することができない。

したがって、単一光子状態においては、光の振舞いは量子、すなわち、光子として、その偏光も含めて量子力学的に扱う必要がある。この時、光子の存在は確率として与えられ、その振舞いは確率振幅を用いて表現される。すなわち、上記実験において、互いに直交した偏光子を持つダブルスリットと検光子を通過する光子は波として扱われ、位相を考慮した二つの経路の確率振幅の和として記述される。そして、検出されたときに初めて光子は粒子として扱われ、その存在確率は確率振幅の絶対値の2乗で与えられる。多くの実験結果を積算すること

によって、その存在確率は粒子の分布として観測されるようになる。

今回の実験結果は、上記のように、光を波と粒子の二重性を持つ光子とし、かつ偏光を量子的に取り扱うことによって、はじめて説明される。以上から、今回はじめて、1個の光子が二つの直交した偏光子を同時に通過することが実験的に確認された。

## 6. ま と め

短パルス光を減光して、系の中に同時に存在するパルス数が最大1個であり、かつ、光子が存在するパルスは99%以上の確率で1個だけ光子を含むという単一光子状態を実現し、フレネル・アラゴの干渉実験を行った。得られた実験結果は、光を波と粒子の二重性を持つ光子として扱い、光源の偏光状態とダブルスリットに取り付けられた偏光子、および検出器の前に置かれた検光子の向きによって決まる位相を考慮することによって説明できた。この結果、一つ一つの光子が直交する二つの偏光子を同時に通過することが確かめられた。これは光子の波と粒子の二重性と同様に、偏光についても量子力学的な扱いが必要であることを示すものである。

光の粒子性、波動性に対する正しい認識が不足していることが指摘され、こうした物理の基礎概念を正しく理解して、教育や研究に反映させることが求められている<sup>6)</sup>。偏光を扱った今回の実験が、こうした量子力学的な概念の正しい理解の助けになれば幸いである。

終わりに本研究の機会を与えて下さった代表取締役社長晝馬輝夫、取締役中央研究所長鈴木義二博士および、実験に協力して下さいました藤田勝吉の諸氏に深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) A. I. M. Rae: *Quantum Physics Illusion or Reality?* (Cambridge University Press, Cambridge, 1986); 林一訳: 量子論一幻想か実在か(岩波書店, 東京, 1987) pp. 24-42.
- 4) M. Born and E. Wolf: *Principle of Optics*, 1st ed. (Pergamon Press, New York, 1959); 草川 徹, 横田英嗣訳: 光学の原理(東海大学出版会, 東京, 1975) pp. 1-11.
- 5) 辻内順平: 光学概論 II—波動光学—(朝倉書店, 東京, 1979) pp. 178-181.
- 6) 矢島達夫: "光の粒子性・波動性について", 光学, 20 (1991) 352-358.