

最近の技術から

光子の波動-粒子二重性の同時観測

鈴木 隆 史

キヤノン(株)イメージング研究所 〒146 東京都大田区下丸子 3-30-2

1. はじめに

量子力学において、光子、電子などの量子は、波動性と粒子性との二重性を有する。例えば、ヤングの干渉実験において、量子が二つのスリットのどちらを通過したかという粒子性の観測を行うと干渉縞は壊れてしまう。これを、波動性と粒子性が相補的であるという。

本号の総合報告にもあるように、Mandel とその共同研究者は、1991年に、光子の二次の干渉について一連の基礎的実験結果を発表した^{1,2)}。その実験では、光子の運動を乱さずにその通路を検知する方法を用いたはずであったが、波動-粒子二重性の同時観測は成功せず、相補性を再確認する結果となった³⁾。

彼らの実験にやや遅れ、筆者は異なった手法で同時観測実験を行い、その結果と解釈をまとめ、現在投稿中である。したがってここでは、公開された特許²⁾と、物理学学会の予稿^{3,4)}に記された範囲で、この同時観測実験とその意義について紹介させていただくことにしたい。

2. 二重性の同時観測法

図1に、用いた実験装置の概略を示す^{4,5)}。開口面 S_1 上の矩形開口 A_l, A_r 内には相互に微小な傾き角 θ をなし、波長 λ をもつ平行光束 B_1 と B_2 を入射させ、あらかじめ図2の上段に示した周期 $l = \lambda/\theta$ の干渉縞を形成しておく。焦点距離 f をもつレンズ CL_2 の焦点面 S_2 上には、図2の下段に示したように距離 $f\theta$ だけ離れた二つのピークをもつ二つの回折パターン $I_{act}(P_1, P_2)$ と $I_{act}(Q_1, Q_2)$ とが生ずる。光束 B_1 のみを開口面に入射させたときは、図2の下段に示したようなフラウンホーファー回折パターン $I(P_1)$ と $I(Q_1)$ が生じ、 B_2 のみの入射では、 $I(P_2)$ と $I(Q_2)$ とが生ずる。これら四つのパターンはすべて同じ強度分布を示す。

同時観測の原理は、以下のように簡明である。光子が S_2 面上のどの点像に属するかで、検出された光子の光路が識別でき、その粒子性を観測できる。しかし、この

ままでは開口面上の干渉縞、すなわち、光子の波動性を同時には観測できない、焦点面上で光子の到達を観測している間に、開口面上では明暗の干渉縞が形成されるべきことは間違いなからうが、これは“推測”でしかない。しかし、もし開口面上の干渉縞を、 S_2 面上の点像の強度の違いとして観測できれば、開口面上での干渉縞の存在を実証できよう。これを実現するために二つの光学楔 OW_l と OW_r を図1の開口面に設置する。図2に示したように、個々の開口の幅の中には、それぞれ2.5周期分の干渉縞が含まれるが、開口 A_l には明るい縞が3本、 A_r には2本含まれるので、二つの開口を通る光量

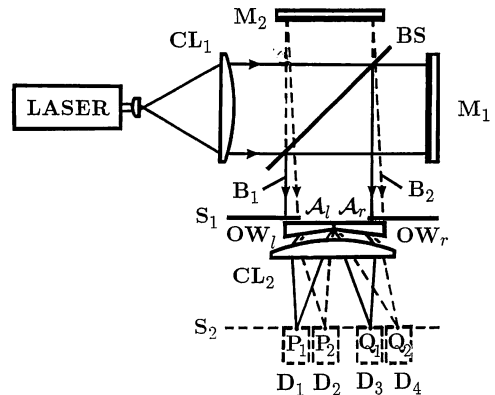


図1 波動-粒子同時観測用干渉実験装置

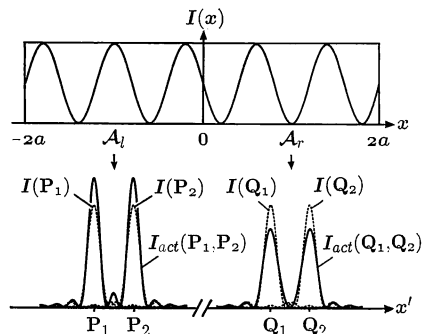


図2 開口上の干渉縞と対応する回折パターン

の比は1とは異なる。ビジビリティー1の干渉縞が開口上に形成されていたとすると、図2の干渉縞の強度分布を開口ごとに積分して光量比を算出できる。逆に、その光量比を観測することにより干渉縞の存在とビジビリティーとが知られる。

実験では、 $I_{\text{act}}(P_1, P_2)$ と $I_{\text{act}}(Q_1, Q_2)$ の四つのピーク位置に、スリット開口を置き、それぞれのピーク光量を測定し、 $I[P_1]$, $I[P_2]$, $I[Q_1]$, $I[Q_2]$ の四つの測定値を得る。例えば、 P_1 上のピークに寄与する光子は大部分光路 B_1 を通ったものであることは容易に想像できる。実際、理論的にも測定値 $I[P_1]$ の99%は光路 B_1 を通った光子、1%が B_2 を通った光子の寄与によるとわかる。これは、 $P=0.99$ の確率で光子の通過光路が識別できたことを意味する。

他方、 S_1 面上のピーク間距離の $\bar{P}_1\bar{P}_2 = \lambda f/l = 53 \pm 3 \mu\text{m}$ という測定値から、 $l = 6 \pm 0.3 \text{ mm}$ を得る。光量比 $R_2 = (I[P_1] + I[P_2]) / (I[Q_1] + I[Q_2])$ を5回測定し、 $R_2 = 1.25 \pm 0.02$ を得た。既知の開口幅 $2a = 30.0 \text{ mm}$ と、測定して得られた l と R_2 の値とから、開口面上の干渉縞について、ビジビリティー $V \approx 0.87 \pm 0.06$ が得られた。

3. 同時観測の物理的意義

観測された光子の二重性を、 P - V 座標空間の点 (P, V) で表す。Mandel は、一連の干渉実験を解析して観測された二重性を表すある不等式を得た³⁾ が、それは容易に $P+V \leq 1$ と変形できる⁶⁾。これをグラフにすると

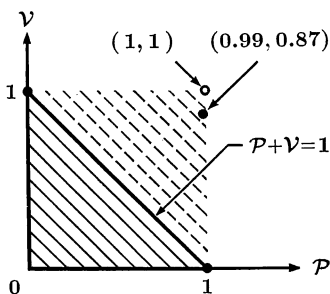


図3 二重性の P - V 座標表示

図3が得られる。すなわち、彼らの言う光子の運動が乱されない観測法によっても、観測可能な二重性の上限 $P+V=1$ が存在し明らかに波動性と粒子性とが相補的であることを示している。筆者の観測した二重性 $(P, V) \approx (0.99, 0.87)$ は、 $P+V \approx 1.86$ となり、この上限をはるかに越えており、本質的には光子において、波動-粒子の相補性が存在しないことを意味する⁶⁾。この違いの原因について筆者は、本稿で述べた実験方法は光子の運動を直接は乱さぬ測定となっているが、Mandel らは彼らの主張とは異なり、光子の運動を乱してしまったのと等価な観測の仕方をしたためと理解している。

4. おわりに

光の二重性を通常の強度のレーザー光を用いて同時観測することに成功した。また、その強度を極度に弱めて、干渉計の中に光子が平均的には一個以下しか存在しない状態でも、本稿に続いて紹介される極微弱光画像計測システムを用い、図2下段に示した点像強度分布 I_{act} をほぼ再現できた⁵⁾。さらに、二次の干渉縞は、多光子状態の光と単一光子状態の光とで全く同じ表現となる。これらの事実から、本実験結果は量子力学的波動関数を確率振幅とする解釈に影響を与える可能性が極めて高いといえよう。

文 献

- 1) X.Y. Zou, L.J. Wang and L. Mandel: "Induced coherence and indistinguishability in optical interference," *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991) 318-321.
- 2) L.J. Wang, X.Y. Zou and L. Mandel: "Induced coherence without induced emission," *Phys. Rev. A*, **44** (1991) 4614-4622.
- 3) L. Mandel: "Coherence and indistinguishability," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1882-1883.
- 4) 鈴木隆史: 特開平 4-366736.
- 5) 鈴木隆史: "光子の波動-粒子二重性の同時観測", 日本物理学会第47回年会講演予稿集, **1** (1992) p. 8, 27P-J-7.
- 6) 鈴木隆史: "波動-粒子二重性のビジビリティーと確率による表現", 日本物理学会講演概要集第48回年会, **1** (1993) p. 10, 1a-ZK-10.

(1993年5月10日受理)