

두-광자 간섭 실험에서의 비고전적 효과: 맥놀이 현상

Nonclassical effect in two-photon interference experiment: quantum beating

고정훈, 김현오, 김태수
울산대학교 광전자 물리학과
tskim@mail.ulsan.ac.kr

일반적으로 빛의 간섭은 고전적인 파동 현상처럼 취급되었지만, 광자수가 적은 경우나 두 검출기로 광자들의 상관관계(correlation)를 측정하는 경우에는 비고전적인 효과가 나타난다는 사실이 최근의 여러 실험들을 통해 잘 알려지고 있다. 특히 자발적인 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion; SPDC)에서 생성된 광자쌍을 이용한 4차 간섭실험은 두 검출기를 이용한 동시계수(coincidence counting)측정에 의해서만 관측되는 대표적인 비고전 현상이다.

본 연구에서는 짧은 파장의 pump 빔이 비선형 매질을 통과하면서 긴 파장의 signal과 idler 빔이 생성되는 SPDC과정을 이용하여 두-광자 동시계수 측정에서 얻어진 공간적 맥놀이(beatting) 형태의 간섭 무늬를 통해 비고전적인 간섭 효과를 관측하였다. PDC과정은 에너지 보존 ($\omega_p = \omega_s + \omega_i$)과 운동량 보존 ($\vec{k}_p = \vec{k}_s + \vec{k}_i$)에 해당하는 위상 조화(phase matching)조건을 만족할 때 효과적으로 일어난다.

실험 장치도는 그림 1에 나타내었다. 중심 파장이 630nm와 671nm인 signal과 idler 빔은 He-Cd 레이저에서 나오는 325nm의 pump 빔과 비선형 결정인 BBO와의 상호작용에 의한 PDC과정에서 생성되어진다. 이렇게 생성된 서로 다른 각 진동수를 갖는 두 빔은 두 거울을 거쳐 빔 분할기에서 합쳐지고, 빔 분할기의 양쪽 면을 통과한 광자쌍은 9.7nm의 대역폭을 갖는 두 개의 간섭필터(IF)를 거쳐 두 개의 검출기(APD's)로 진행하게 된다. 두 검출기에서 검출된 광자쌍은 검출기의 분해시간(resolving time) $T_R = 171\text{ns}$ 내에 도달할 경우에만 동시계수로서 취급하였다. 측정된 동시계수는 우발계수를 뺀 것으로 간섭효과는 광자쌍이 빔 분할기에 도달하는 시간 간격에 따라 $\cos(\omega_1 - \omega_2)\tau$ 의 함수로 나타남을 확인할 수 있었다.

그림 2는 signal과 idler 광자들 사이의 시간지연(time delay) $\delta\tau$ 또는 빔 분할기의 위치에 대한 두-광자 동시계수율을 나타내었다. 빔 분할기에 의한 간섭무늬에서 빔 분할기의 $1\mu\text{m}$ 이동은 6.67fs 의 시간지연과 일치한다. 따라서 동시계수율은 $5.2\mu\text{m}$ 또는 34.4fs 의 주기성을 가진 간섭 무늬를 나타내며, 이는 두-광자의 중심파장이 630nm와 671nm로 되어있고, 파장 차이가 41nm일 때 측정되는 맥놀이 진동수(beatting frequency) $(\omega_1 - \omega_2)/2\pi = 0.29 \times 10^{14}$ 의 주기와 정확히 일치한다.

이렇듯 검출기의 분해시간 보다 천 배나 더 짧은 주기를 가진 맥놀이 간섭무늬를 관측할 수 있는 이유는 직접적으로 그 시간 내에 beating을 관측하는 것이 아니라, 오직 매우 짧은 시간동안에 동시에 생성되는 두-광자(광자쌍)를 이용하여 빔 분할기의 위치 이동에 의한 간섭계의 다양한 경로차 $c\delta\tau$ 에 따라 나타나는 동시계수율을 통해서 측정하기 때문이다.

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음(KRF-99-041-D00220).

참고문헌

1. C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, "Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference," Phys. Rev. Lett. 59, 2044(1987).
2. Z. Y. Ou and L. Mandel, "Observation of Spatial Quantum Beating with Separated Photodetectors," Phys. Rev. Lett. 61, 54(1988).
3. Y. H. Shih and A. V. Sergienko, "Observation of quantum beating in a simple beam-splitting experiment: Two-particle entanglement in spin and space-time," Phys. Rev. A 50, 2564(1994)

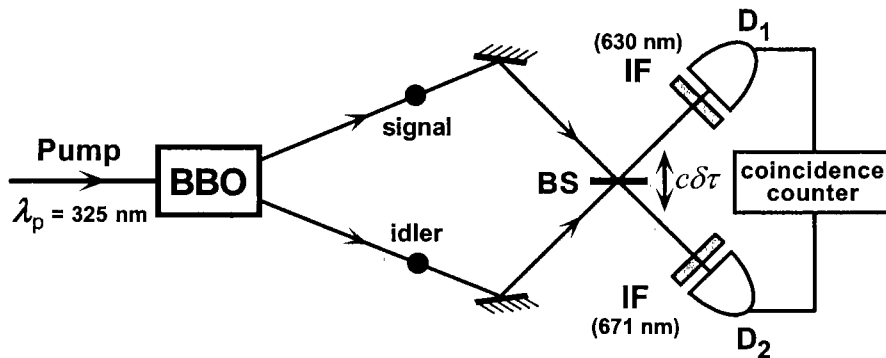


그림. 1. quantum beating을 측정하기 위한 실험 장치도.

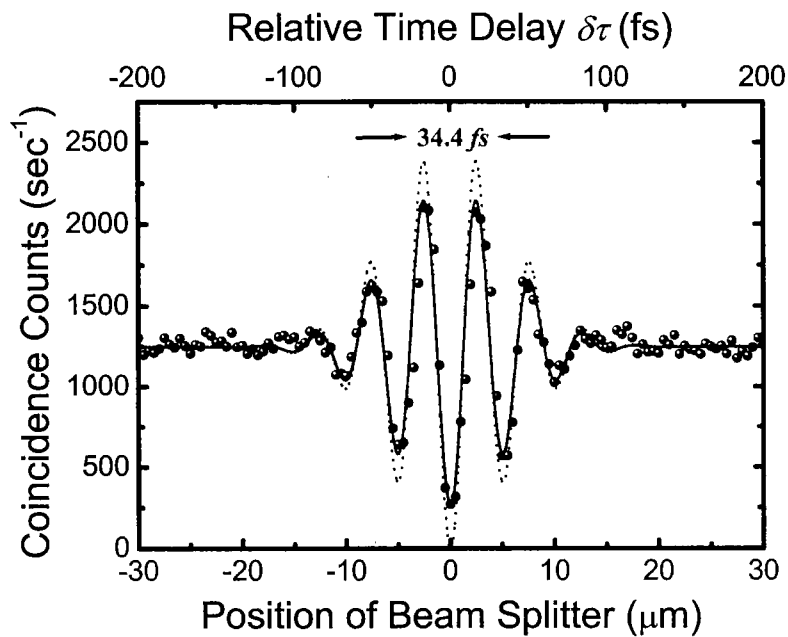


그림. 2. 빔 분할기의 위치 변화에 따른 두 검출기의 동시계수에 의한 맥놀이 간섭무늬.

