

## 단일광자 검출에서 비고전적인 간섭효과의 측정

### Nonclassical interference effect in single photon detection rates

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

자발적인 매개하향변환 과정(Spontaneous parametric down conversion; SPDC)에서 발생하는 광자쌍(photon pair, two-photon, 또는 biphoton)을 이용한 실험들이 지난 10여년 동안 다양하게(여러 연구자들에 의해) 수행되었다. 특히 광자쌍은 양자역학적으로만 설명될 수 있는 얽힘상태(entangled state)에 있기 때문에 양자역학 이론을 근본적으로 검증하는 순수 학문적인 입장에서 많이 이용되었지만, 최근에는 양자 컴퓨터(computer), 양자 전송(teleportation), 양자 암호화(cryptography), 양자 통신(communication) 등을 포함하는 양자정보 분야에 효과적으로 이용되고 있다. 얽힘상태의 광자쌍을 이용한 간섭실험에서 나타나는 비고전적인 효과들은 2차(세기의 2차 또는 전기장의 4차)이상의 상관관계를 통해서만 관측이 가능하다. 따라서 대부분의 실험에서는 두 개의 검출기를 이용한 동시계수(coincidence detection)를 통해서 이루어지며, 하나의 검출기에서는 간섭효과가 관측되지 않는다.

본 연구에서는 SPDC에서 발생한 광자쌍(signal과 idler)을 빔분할기(BS)의 두 입구에 동시에 입사시켰을 때 일어나는 비고전적인 간섭현상으로 인하여 하나의 검출기를 이용한 단일광자 검출(single photon detection)에서 나타나는 영향을 관측하였다. 이러한 간섭효과는 검출기에 입사하는 광에 반응하는 광검출기의 비선형성으로써 설명될 수 있지만, 단일광자 검출기가 연속적으로 입사하는 광자들 중에서 각각의 광자를 구별할 수 있는 단일광자 시간분해능(single photon timing resolution)과 광자계수장치의 선별기에서 아주 짧은 시간간격으로 도달하는 두 개의 펄스를 분해할 수 있는 시간의 한계에 의한 것으로 보인다.

광자쌍을 이용한 실험장치의 구조는 광자쌍의 발생장치(매개하향변환), 간섭계, 두 개의 단일광자 검출기 그리고 검출기에서 측정된 광자의 수를 헤아리는 광자계수장치로 이루어진다(그림 1). He-Cd 레이저(Liconix model 3207N)에서 나온 325nm의 광자가 비선형 결정(BBO)에 입사하면 650nm 파장의 두 광자가 동시에 쌍으로 발생하고, 이러한 광자쌍이 빔분할기(BS)에 도달하는 시간간격이 광자의 결맞음 시간(본 실험에서는 약 100fs FWHM)보다 짧으면 두 광자는 쌍을 이루어 BS를 빠져나간다. 따라서 BS 뒤에서 두 검출기를 놓고 광자계수 장치의 분해시간 이내에서 두 검출기에 동시에 입사하는 광자의 수를 측정하면, 광자의 도달 시간간격이 없을 때, 동시계수는 최소가 된다. 이는 BBO(광원)에서 BS를 통해서 두 검출기( $D_1$  또는  $D_2$ )에 이르는 광자쌍의 경로(signal의 반사와 idler의 반사 그리고 signal의 투과와 idler의 투과)가 서로 구별이 되지 않아, 이러한 경우 구별이 되지 않는 두 광자의 확률진폭들이 서로 소멸간섭을 일으키기 때문이다. 여기서 동시계수는 BS의 위치변화에 의한 두 광자의 광경로차에 따라 변화를 나타내지만 각각의 검출기( $D_1$  또는  $D_2$ )에서의 단일계수는 일정하게 유지된다.

검출기에 입사하는 광자쌍의 수가 많아지면, 비록 광자들의 간섭은 비고전적으로 취급되지만, 하나의 검출기에서도 비고전적인 간섭효과를 측정하는 것이 가능하다. 그림 1의 뒷부분에서 빔분할기(BS)를 통과한 두 광자의 상태(광자쌍)와 단일광자 검출기(EG&G SPCM AQ-141)의 시간분해능, 그리고 광자계수 장치(NIM discriminators LeCroy Model 821)의 이중펄스 분해능(double pulse resolution)을 보였다.

본 실험에 사용된 단일광자 검출기의 시간분해능은 약 300ps, 광자계수장치의 이중 펄스 분해능은 9ns 이다. BS에 입사하는 signal과 idler 광자가 쌍으로 BS를 빠져나가기 위해서 BS에 도달하는 두 광자의 평균적인 시간 간격은 100fs(FWHM)이므로 검출기에 동시에 도달하는 경우 분해능이 300ps인 검출기는 동시에 입사하는 두 광자를 하나의 광자로 인식한다. BS에 입사하는 signal과 idler 광자의 상대적인 지연 시간(time delay)이 각각의 광자의 파속(wave-packet)의 길이에 해당하는 시간간격보다 짧으면 BS의 양쪽 입구에서 입사한 두 광자가 쌍을 이루어 BS를 빠져나가는 공간적인 뭉침(spatial bunching)현상이 두드러지게 나타난다. BS에 입사하는 평균적인 광의 세기가 일정한 경우, 광자가 쌍을 이루는 BS의 위치에서 분해시간이 두 광자의 시간간격보다 긴 검출기는 광자쌍을 두 개의 광자로 분해할 수 없으므로 하나의 검출기에서도 광자 계수율이 현저하게 줄어드는 비고전적인 효과를 관측할 수 있다(그림 3).

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

참고문헌

1. C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 59, 2044(1987).
2. K. J. Resch, J. S. Lundeen, and A. M. Steinberg, Phys. Rev. A 63, 020102(R)(2001)

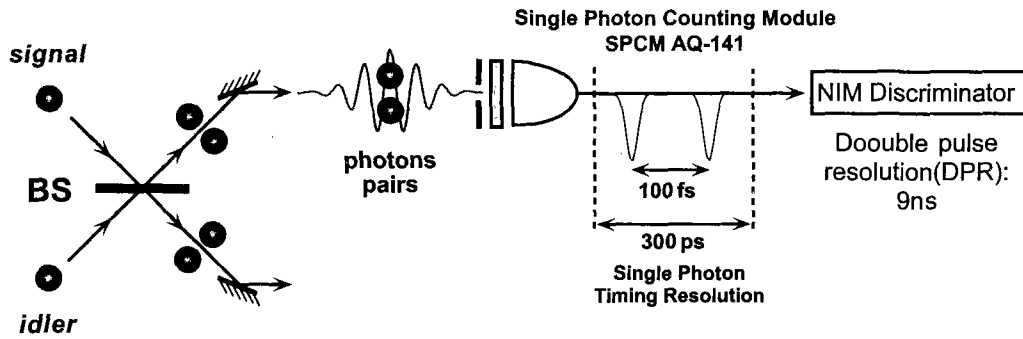


Fig. 2. 얽힘상태의 두 광자(signal과 idler)가 상대적인 시간지연 없이 빔분할기에 입사할 때 빔분할기를 통과한 두 광자의 상태(광자쌍)와 단일광자 검출기의 시간분해능.

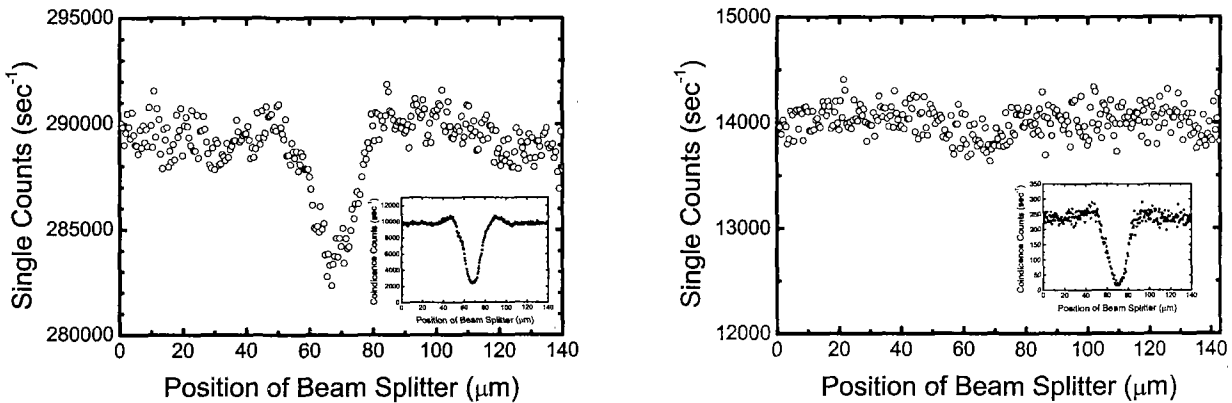


Fig. 3. 빔분할기(BS)의 위치변화에 따른 하나의 검출기( $D_1$  또는  $D_2$ )에서 측정된 단일광자 계수율. 그래프안의 작은 그래프는 두 검출기의 동시계수율을 나타낸다.