

파장이 각각 640 nm, 660 nm인 광자쌍의 간섭

Interference experiment using entangled photons with wavelengths of 640 nm and 660 nm

김현오, 신하림, 김원식, 권오성, 김태수
울산대학교 물리학과
tskim@mail.ulsan.ac.kr

얽힘상태(entangled state)란 양자역학에서 나타나는 가장 기본적인 특성중의 하나로서, 둘 이상의 입자들이 서로 중첩된 상태에 있어서 그 전체 상태가 개별적인 입자들의 파동함수의 곱으로 기술할 수 없을 때 사용되는 표현이다. 1980년대 후반부터 비선형 결정에 높은 진동수의 레이저빔을 입사시켰을 때, 낮은 진동수의 두-광자가 동시에 발생하는 매개하향변환(Parametric Down-Conversion; PDC)이 얽힘상태의 광자들을 만드는 가장 유용한 광원으로 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 De-Cd 레이저에서 나온 325 nm 파장의 광을 BBO 결정에 입사시켰을 때 발생하는 640 nm와 660 nm의 파장을 갖는 두 광자의 진동수 얽힘상태를 이용한 간섭실험을 수행하였다. 두-광자 간섭계에서 진동수의 선택과 두 광자를 동시에 측정하는 두 검출기의 배열, 그리고 두-광자 확률진폭들 사이의 위상변화에 따라 다른 간섭무늬를 측정할 수 있었다. 특히 두 광자가 빔분할기에서 시간적, 공간적으로 중첩되지 않는 경우에도 동시계수 측정과 관련된 두-광자의 경로를 서로 구별할 수 없을 때, 이에 대응하는 두-광자 확률진폭들의 중첩으로부터 일어나는 간섭효과를 관측하였다. 이러한 결과는 두-광자 간섭현상이 진동수가 다른 두 광자 사이의 간섭이 아니라 진동수 얽힘상태에 있는 두-광자의 경로에 대한 확률진폭의 간섭이라는 것을 보여준다.

그림 1은 PDC에서 발생한 진동수 얽힘상태 광자쌍들의 간섭현상을 관측하기 위한 간섭계의 개념도를 나타낸 것이다. 각진동수 ω_1 (ω_2)인 하나의 광자가 signal 경로를 따라서 발생하고, 이와 동시에 발생하는 다른 하나의 광자가 ω_2 (ω_1)의 각진동수를 갖고 idler 경로를 따라서 발생한다. 이 과정에서 펌프빔과 하향변환된 두 광자들 사이에 위상조화조건을 만족한다면, 간섭계에서 signal과 idler 광자의 경로에는 각진동수가 각각 ω_1 과 ω_2 또는 ω_2 와 ω_1 인 광자들이 중첩된 상태에 있으므로, 이러한 경우 진동수 얽힘상태의 두-광자는 다음과 같이 표현된다.

$$|\Psi\rangle_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i + |\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i)$$

PDC에 의해 발생한 각진동수 ω_1 인 signal 광자(ω_1^s)와 ω_2 인 idler 광자(ω_2^i)는 두 거울 M_s 와 M_i 에서 반사된 후 빔분할기(BS)를 거쳐 두 검출기 D_1 (또는 D_1)과 D_2 (또는 D_2)로 입사하게 된다. 마찬가지로 각진동수 ω_2 인 signal 광자(ω_2^s)와 ω_1 인 idler 광자(ω_1^i)는 BS를 거쳐 D_2 (또는 D_2)과

D_1 (또는 D_2)로 입사하게 된다. 그러면 서로 다른 각진동수의 광자쌍을 동시에 측정하는 한 쌍의 검출기 ($D_1 - D_2$, $D_1' - D_2$, $D_1 - D_2'$, 그리고 $D_1' - D_2'$)를 이용하여 두 광자를 동시에 측정할 확률은 두 광자가 BS에 도달하는 시간차에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$P_{D_1, D_2}(\delta\tau) = P_{D_1', D_2}(\delta\tau) = \frac{1}{4} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta\nu^2 \delta\tau^2}{2}\right) \cos(\omega_1 - \omega_2) \delta\tau \right]$$

$$P_{D_1, D_2'}(\delta\tau) = P_{D_1', D_2'}(\delta\tau) = \frac{1}{4} \left[1 + \exp\left(-\frac{\Delta\nu^2 \delta\tau^2}{2}\right) \cos(\omega_1 - \omega_2) \delta\tau \right]$$

그림 2는 BS에 도달하는 두 광자의 시간차(또는 BS1의 위치변화)에 따른 두 검출기 D_1 & D_2 그리고 D_1 & D_2' 의 동시계수를 측정한 결과이다.

본 연구는 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-070-C00029).

참고문헌

1. M. A. Horne, A. Shimony, and A. Zeilinger, "Two-particle interferometry," Phys. Rev. Lett., vol. 62, no. 19, pp. 2209-2212, 1989.
2. Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, "Two-particle interference experiment with frequency-entangled photon pairs," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 20, no. 4, pp. 760-763, 2003.
3. Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, "Quantum-eraser experiment with frequency-entangled photon pairs," Phys. Rev. A, vol. 67, no. 5, 054102, 2003.

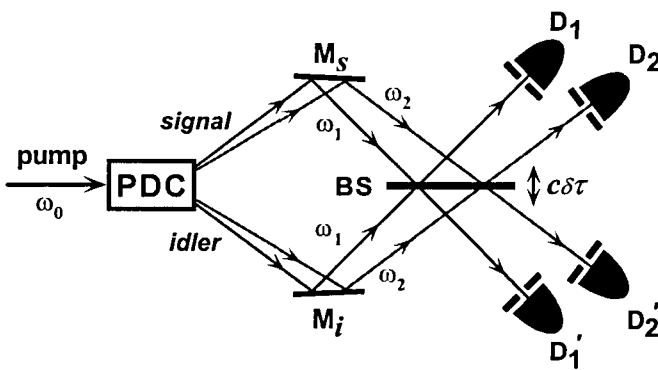


그림 1. 두-광자 간섭계

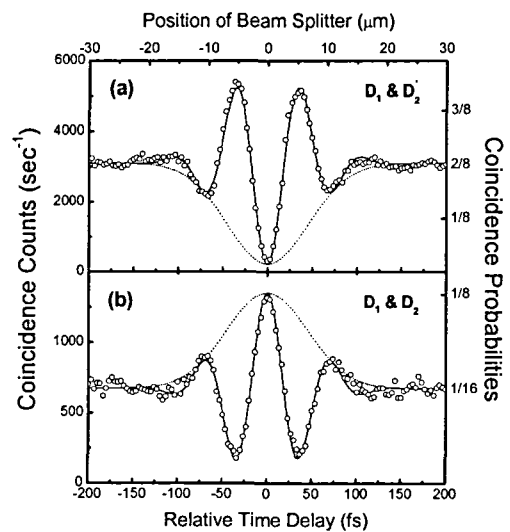


그림 2. BS에 도달하는 두 광자의 시간차에 따른 두 검출기의 동시계수

