# 광섬유의 군속도 분산이 얽힘상태 광자의 전송에 미치는 영향에 대한 이차 상관관계 함수를 통한 조사

# Group velocity dispersion effect on entangled photon transmission through optical fibers

백소영*, 권오성*, 김윤호*

*포항공과대학교 물리학과

simply@postech.ac.kr

얽힘상태(entangled state)의 광자(photon)를 이용하면 고전적으로는 불가능한 양자암호(quantum cryptography), 양자전송(quantum teleportation) 등의 양자통신(quantum communication) 프로토콜(protocol)을 구현할 수 있다는 것이 최근 여러 실험을 통하여 보여졌다. 이러한 프로토콜을 실제로 사용하기 위해서는 얽힘 상태의 광자를 단일모드 광섬유(single-mode optical fiber)를 통해서 원거리 전송을 해야 한다. 본 연구에서는 단일모드 광섬유(single-mode optical fiber)의 군속도 분산 (Group Velocity Dispersion) 현상이 얽힘상태의 광자(entangled photon)의 전송에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

양자얽힘상태에 있는 광자는 그 성질이 일반적인 광자들과 많이 다름이 알려져 있으므로, 물질의 분산현상(dispersion effects)도 얽힘상태의 광자에는 다르게 영향을 미칠 것이라고 쉽게 생각해 볼 수 있다. 예를 들면, 얽힘상태에 있지 않은 2개의 광자는 각각의 광자와 연관된 파속(wave packet)이 따로 존재하므로 이 두 개의 파속이 물질의 분산에 의해 서로 다르게 변해가는 것으로 이해할 수 있다. 하지만 얽힘상태에 있는 두 광자는 각각의 광자가 파속을 가지는 것이 아니라 단 하나의 비국소적인(non-local) 2광자 파속(two-photon wave packet)으로 이해될 수 있다. 따라서 얽힘상태에 있는 두 광자는 분산현상을 두 광자가 복합적으로 또는 비국소적으로 느끼게 되리라고 예상되며, 일반적인 광자들이 분산현상을 겪는 경우와는 매우 다른 현상들이 관찰될 것이라고 예상된다. 이러한 얽힘상태 광자쌍(photon pairs)의 2광자 파속은 2차 상관관계 함수(2nd order correlation function)의 측정을 통해 관측할 수 있다(그림1).

얽힘상태의 광자쌍은 자발매개변수적하향변환(spontaneous parametric down conversion, SPDC)이라고 하는 2차 비선형 현상에 의해 만들어지며 이 광자쌍의 양자상태는 양자역학의 1차 섭동론을 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$|\Psi> \propto \int\int d\omega_s \omega_i \, S(\omega_s,\omega_i)\exp(-i\Delta L/2)a_s^\dagger a_i^\dagger|vac>. \qquad \text{식(1)}$$

여기서 $|vac>$은 양자광학에서의 진공상태(vacuum state)를 나타내며 $\Delta = k_p(\omega_s+\omega_i) - k_s(\omega_s) - k_i(\omega_i)$ 이다.

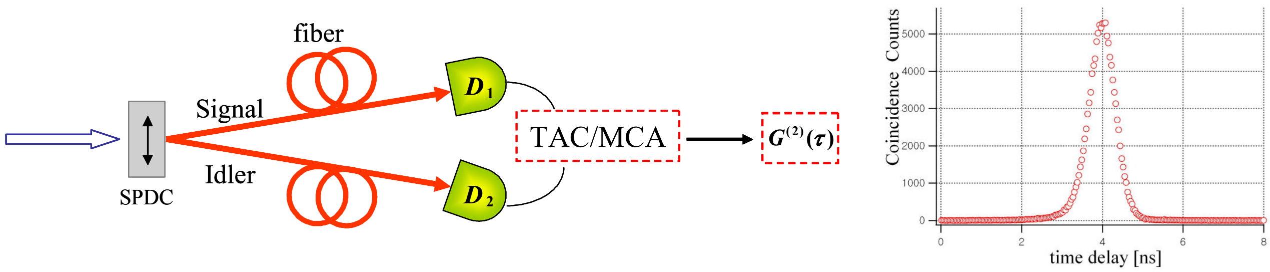


그림 1. SPDC를 통해 생성된 얽힘상태의 광자쌍은 각각 다른 detector를 향해 진행하며 이 과정에서 분산매질을 지나갈 수 있다. TAC = Time to Amplitude Converter, MCA = Multi-Channel Analyzer.

이 경우 Detector D1과 D2에서의 Electric Field Operator는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$E_1^{(+)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\nu \, a_s(\Omega+\nu)\exp[k_s z_s - (\Omega+\nu)t],$$

$$E_2^{(+)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\nu \, a_i(\Omega-\nu)\exp[k_i z_i - (\Omega-\nu)(t+\tau)]. \qquad \text{식(2)}$$

여기서 $s$와 $i$는 각각 signal 와 idler 광자를 의미하며 SPDC를 통해서 생성된 광자쌍은 에너지 보존법칙에 의해 frequency-anticorrelated 됨을 알 수 있다.

광자쌍의 2차 상관관계 함수(2nd order correlation function)의 정의는 다음과 같고,

$$G^{(2)}(\tau) = |<0|E_2(t+\tau)E_1(t)|\Psi>|^2. \qquad \text{식(3)}$$

식(1)과 식(2)를 위 식에 대입해서 계산하면 2광자 파속이 어떻게 물질의 분산에 영향을 받는지를 알 수 있다.

$$G^{(2)}(\tau) = |\int d\nu \, S(\nu)\exp[i\nu^2(K_i'' z_i + K_s'' z_s)]\exp[i\nu(\tau+\tau_{0)}]|^2.$$

여기서 $K_i'' = \frac{d^2K_i}{d\Omega^2}$, $K_s'' = \frac{d^2K_s}{d\Omega^2}$, 즉 signal 광자와 idler 광자의 군속도 분산 (Group Velocity Dispersion)에 의한 효과이며 $\tau_0 = \frac{z_s}{u_s} - \frac{z_i}{u_i}$ 는 signal 광자와 idler 광자의 군속도 차이에 의해 D1과 D2가 시간차를 두고 광자를 측정하게 된다는 것을 나타낸다. 또 위 계산에 포함된 $S(\nu)$는 type-I SPDC는 type-II SPDC와는 크게 다른 형태를 가지므로 같은 매질이라도 이 두 가지 SPDC는 매우 다른 반응을 보일 것이라는 것도 예상할 수 있다.

그림 1의 그래프는 signal과 idler 광자가 광섬유를 통과하지 않을 때, 즉 군속도 분산 현상이 없을 때 동시계수 측정을 통해 이차 상관관계 함수를 얻은 결과이며 실험에서는 signal과 idler 광자를 각각 다른 길이의 단일 모드 광섬유에 통과시켜 군속도 분산이 이차 상관관계 함수에 미치는 영향에 대해 조사하였다.