

## 1. 서론

간섭은 회절과 더불어 파동이 가지는 중요한 특성이다. 오래전부터 잘 알려진 사실인데도 불구하고 오늘날에도 간섭이 중요한 이슈가 되고 있는 것은, 간섭성을 지닌 광원인 레이저가 개발되어 광범위하게 이용되고 있는 데다, 간섭은 고전적으로는 설명할 수 없는 비 고전적인(또는 양자적인) 현상을 규명하는 데 필수적이라 할 만큼 학문적인 면에서도 중요한 위치를 점하고 있기 때문이다. 간섭은 둘 이상의 파동이 중첩될 때 세기에 있어서 변화가 나타나는 현상을 말하고 이 때 일정하지 않는 세기를 간섭무늬라고 한다. 간섭무늬는 주기적으로 세기가 변하는 것이 가장 보편적이지만, 반드시 싸인함수 형태만 있는 것은 아니다. 드물게는 세기가 산과 같이 증가를 보이기도 하고 골짜기처럼 감소하는 경우도 있는 등 다양한 형

양자효과를 검증할 필요성이 대두되었다<sup>[1]</sup>. Taylor는 간섭계내에 광자가 평균적으로 두 개 이상이 지나가는 경우를 배제한 극도의 미약한 세기의 광원으로 하는 간섭실험을 실시하였다<sup>[2]</sup>. 그것은 한차례의 측정시간이 길게는 2000시간 즉 3개월이 걸리는 실험이었고, 그 결과는 놀랍게도 간섭계 내에 한 개의 광자만 존재하는 경우에도 빛의 세기가 훨씬 큰 경우와 마찬가지로 여전히 간섭무늬는 생성되는 것을 볼 수 있었다. 이것은 기존의 간섭에 대한 지식으로는 설명이 불가능한 것으로 새로운 해석이 필요하였으며, 이러한 단일광자에 의한 간섭현상을 보고 Dirac은 광자가 택하는 경로에 대한 확률 진폭(probability amplitude)의 간섭이라는 분석을 제시하였다. 또한 나아가 그는 간섭이란 단일 광자에서만 일어나는 현상으로 두 광자 사이에서는 간섭이 일어날 수 없다고 주장하였다<sup>[3]</sup>.

# 특집 ■ 양자광학 특집

## 광자쌍의 간섭

김태수\*, 김현오

태를 가질 수 있다.

최초의 빛의 간섭실험은 1801년 Young이 행한 이중슬릿 간섭실험으로서, 이것은 Newton이래 보편적으로 알려진 빛의 입자설을 정면으로 반박하는 사건이었다. 그 후 오랫동안 간섭은 회절과 더불어 빛이 파동임을 입증하는 증거로서 자리매김을 해왔다. 공간 간섭 장치인 Young의 이중 슬릿실험에 더불어 19세기 후반 시간 간섭 장치인 Michelson 간섭계 등이 고안되고 이어 Mach-Zehnder 간섭계 등 다양한 광 간섭계가 개발되어 정밀한 길이 측정 등에 응용되었다. 이에 따라 간섭현상이 일어나는 조건에 대한 연구가 이루어졌으며, 간섭계 내에서 중첩되는 두 빛 사이에 위상차가 일정하게 유지되면 간섭무늬가 형성되는 것을 알게 되었다.

20세기 초 빛의 입자론의 재등장과 함께 간섭에서의

고전적으로는 두 파동이 중첩되면 간섭무늬는 항상 존재하지만 그 무늬가 빠르고 무질서하게 움직일 경우 간섭무늬가 나타나지 않는다는 관점을 취한다. 일반적인 측정장치로는 따라잡을 수 없어 간섭무늬를 측정하지 못하는 것 뿐이며, 측정장치의 시간 분해능이 충분히 짧으면 간섭무늬는 얼마든지 측정이 가능하다는 것이다. 반면에 Feynman은 Dirac의 간섭에 대한 새로운 해석을 바탕으로 빛, 원자, 전자와 같은 대상 입자에 대하여 간섭이란 이들의 입자성을 확인 할 수 없을 때 일어나는 것이라고 하였다<sup>[4]</sup>. 간섭계에서 이들이 택하는 경로를 알 수 없을 때, 즉 경로가 구별이 되지 않을 때, 각 경로에 대한 확률진폭의 간섭으로 설명하는 Feynman의 양자역학적인 해석은 오늘날 정설로 광범위하게 받아들여지고 있다.

\* 울산대학교 물리학과

1963년 Mandel은 두 개의 루비 레이저에서 나오는 빛을 중첩시키고 사진촬영을 하였을 때 간섭무늬가 생기는 것을 확인하였다<sup>5)</sup>. 이것은 단일광자에서만 간섭이 일어난다는 Dirac의 주장과는 달리 두 광자 사이에서도 어느 광원에서 출발하였는지 알 수 없을 때 간섭이 일어날 수 있음을 보여 주는 것이다. 오늘날 간섭은 Feynman과 Mandel의 주장을 통합하여 “경로나 광원에서 구별이 불가능할 때 간섭이 발생하는 것”으로 알려져 있다.

간섭이라 함은 위에서 언급한 바와 같이 세기가 일정하지 않은 경우를 말하는데 1950년대 후반 간섭은 이러한 세기의 변화 외에 따른 종류의 간섭이 있음이 Hanbury-Brown과 Twiss에 의해 밝혀졌다<sup>6)</sup>. 이들은 별의 직경을 좀 더 정확하게 측정하기 위한 방법으로 먼 별로부터 오는 별 빛의 시간차 세기상관을 측정을 처음으로 시도하였다. 이들이 행한 세기의 곱에 있어서의 변화를 4차간섭이라 하고 (전기장의 4승에 해당하기 때문이다. 그러나 혹은 이것을 2차간섭이라 한다.), 전통적인 세기의 변화를 2차간섭이라 한다(또는 1차간섭이라 하는 경우도 있다). 이들의 실험으로 다수의 측정장치를 이용하는 차수가 높은 고차간섭도 있을 수 있음이 알려졌다. 2차 간섭과 고차간섭은 광원에 따라 관계가 있을 수도 있지만, 경우에 따라서는 독립적인 경우도 있다. 가령 2차 간섭은 없지만 4차 간섭은 측정되는 경우도 있을 수 있다.

최근에 간섭현상에서 가장 주목받고 있는 것이 광자쌍의 간섭이다. 이들의 간섭은 양자정보에의 응용가능성이 높을 뿐 아니라 양자얽힘상태광을 용이하게 만들 수 있기 때문이다. 자발적 매개하향 변환과정(spontaneous parametric down-conversion; SPDC)으로 생성되는 광자들은 간섭계(대표적인 간섭계가 Hong-Ou-Mandel 간섭계이다)에서 중첩될 때 정확히 일치하면 얽힘상태광이 된다<sup>7)</sup>. 이때 세기의 변화가 없어서 2차 간섭현상은 볼 수 없지만, 얽힘상태로 됨에 따라 동시계수(세기상관)에서는 감소하는 4차 간섭무늬가 측정된다. 본고에서는 자외선과 같은 짧은 파장의 광이 비선형매질과의 상호작용으로 생성된 가시광의 광자쌍으로 실시한 몇 가지의 간섭실험을 소개하고자 한다. 주로 HOM 간섭계에서 파장이 동일한 광자쌍을 이용한 4차 간섭현상과, 파장이 서로 다른 광자쌍의 진동수 얽힘상태와 연관된 간섭현상들이다.

## 2. 자발적인 매개하향변환과정과 광자쌍의 생성

광학적인 자발적 매개하향변환과정은 레이저 광원에서 나온 높은 진동수의 광자들이 비선형성을 갖는 매질과 상호작용을 통해 낮은 진동수의 광자쌍(관례적으로 signal과 idler라 부름)으로 변환되는 과정이다<sup>8)</sup>. 1970년 Burnham과 Weinberg가 ADP(ammonium dihydrogen phosphate) 결정에 He-Cd 레이저에서 나온 325 nm 파장의 레이저빔을 입사시켰을 때 발생하는 광자쌍들의 밀접한 시간 상관관계에 관한 실험결과를 발표한 후<sup>9)</sup>, 80년대 후반부터 광학적인 간섭실험에서 나타나는 비고전적인 양자효과들을 검증하는데 이용되었다<sup>10)</sup>. SPDC는 최근에 연구가 활발히 이루어지고 있는 원격전송(teleportation), 암호화(cryptography) 등을 포함하는 양자정보 분야의 실험에서 얽힘상태의 광자들을 만드는 유용한 광원으로 많이 이용되고 있다<sup>11)</sup>.

SPDC는 비선형 매질내에서 펌프빔과 하향변환된 광자들 사이에 다음과 같은 위상조화조건 즉, 에너지 보존 법칙과 운동량보존법칙이 동시에 만족될 때 효율적으로 일어난다.

$$\omega_s + \omega_i = \omega_p, \quad \vec{k}_s + \vec{k}_i = \vec{k}_p \quad (1)$$

따라서 SPDC에서 발생하는 광자들의 각진동수(또는 파장)  $\omega_s$ 와  $\omega_i$ (또는 파장  $\lambda_s$ 와  $\lambda_i$ )는 임의의 값을 가질 수 있지만, 임의의 각진동수와 파수벡터를 갖고 하나의 signal 광자가 발생하면 식(1)의 조건을 만족시키는 특정한 각진동수와 파수벡터를 갖는 idler 광자가 반드시 발생하게 된다. 식(1)의 에너지 보존법칙으로부터, 발생한 하나의 signal 광자의 파장  $\lambda_s$ 에 대응하는 idler 광자의 파장은  $\lambda_i = \frac{\lambda_s \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_s}$ 로 주어진다. 또한 운동량보존법칙에 따라 signal, idler 그리고 펌프빔의 파수벡터는 반드시 동일 평면상에 있어야 하지만, 두 광자가 발생하는 각도는 임의의 방향을 가질 수 있기 때문에 펌프빔의 진행방향에 대해서 signal과 idler 광자는 원추형으로 발생하게 된다(그림 1).

SPDC는 발생한 두 광자가 동일한 편광상태에 있으면 제 1형(type-I), 두 광자가 서로 직교하는 편광을 가지면 제 2형(type-II)으로 구분한다. 또한 두 광자의 파장이 같

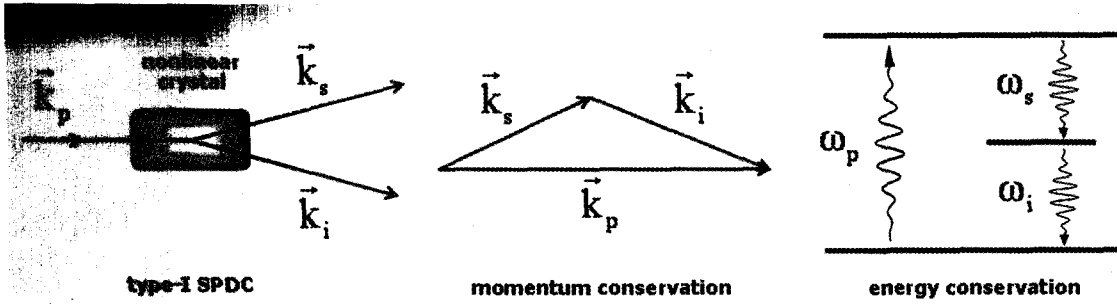
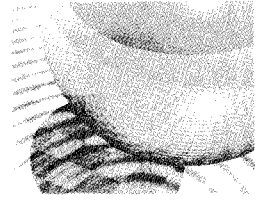


그림 1. 제 1형의 자발적 매개하향변환과정. 이 과정에서 펌프빔과 하향변환된 광자들은 운동량과 에너지 보존법칙을 만족한다.

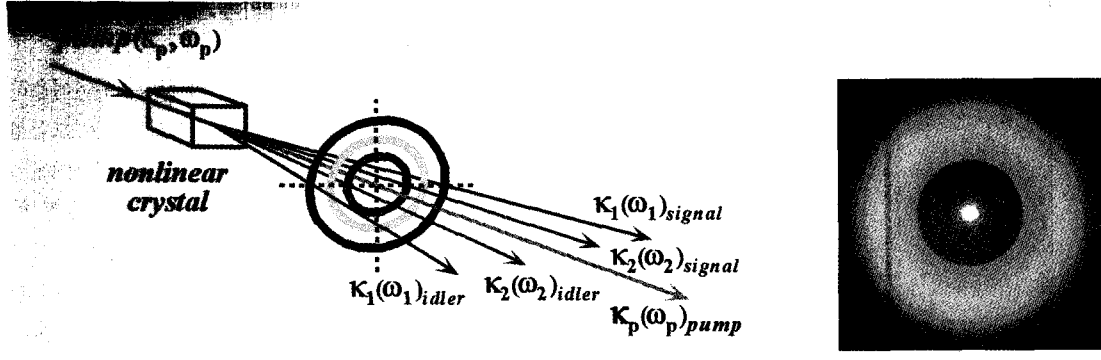


그림 2. 제 1형의 자발적 매개하향변환과정. 비선형 결정에 레이저 빔이 입사하면 넓은 스펙트럼을 갖는 하향변환된 광이 펌프빔의 진행방향 주위로 원추형으로 발생한다. 오른쪽 사진은 디지털 카메라로 촬영한 단면사진.

으면 degenerate, 다르면 nondegenerate라고 부르며, 두 광자의 진행방향이 펌프빔의 방향과 같으면 collinear, 그렇지 않으면 noncollinear라고 부른다. SPDC를 위한 비선형 매질로는 BBO, LBO, KDP, KTP, LiIO<sub>3</sub>, KNbO<sub>3</sub> 등이 이용되는데, 주로 BBO( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 결정이 많이 이용되고, 최근에는 주기적으로 분극반전된 (periodically poled) 구조를 갖는 비선형 매질이 많이 이용된다.

그림 2는 제 1형의 SPDC의 겨냥도이다. 파장에 따라 방출각도가 다르며, 또한 동일한 파장의 광자라도 결정의 광축과 펌프빔의 진행방향이 이루는 각도에 따라 방출각도는 달라진다. 그림 2의 사진은 BBO 결정에 325 nm 파장의 레이저빔을 입사시켰을 때 비선형 결정 뒤에 렌즈를 설치한 상태에서 디지털 카메라로 촬영된 단면 사진이다.

### 3. Hong-Ou-Mandel 간섭계에서 광자쌍의 간섭

#### 3.1. 광자쌍(두-광자)의 4차 간섭

SPDC과정에서 발생하는 광자쌍을 빔분할기 (beam splitter; BS)에서 중첩시킨 최초의 4차 간섭실험은 1987년 Rochester 대학의 Mandel 그룹에 의해 수행되었다<sup>7)</sup>. 그들은 동일한 파장을 갖는 광자쌍을 결맞음 시간보다 짧은 시간 이내에 BS의 두 입구에 입사시키면 두 광자는 BS의 한 쪽 출구로만 쌍을 이루어 빠져나가는 두-광자 간섭효과를 관측하였다. 이들은 이 실험에서 단일광자의 파속(single photon wave packet)의 길이 또는 BS에 도달하는 두 광자의 시간간격을 10<sup>-12</sup>초 이하의 정밀도로 측정하였다. 그림 3은 이들이 사용한 HOM(Hong-Ou-Mandel) 간섭계를 보인 것이다.

그림 3과 같이 투과율과 반사율이 각각 50:50인 BS에

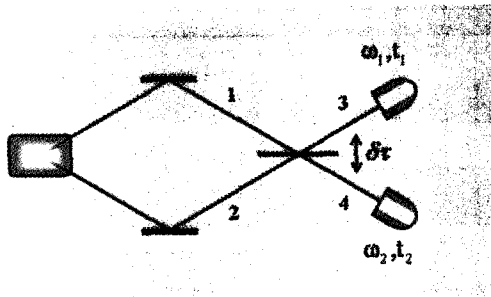


그림 3. 광자쌍(두-광자)의 간섭현상을 측정하는 HOM 간섭계

두 광자가 동시에 입사하는 경우 광자가 단일광자 상태  $|1\rangle_1|1\rangle_2$  이라면 BS에 도달하는 두 광자 사이의 상대적인 시간차  $\delta\tau$ 에 따른 두 검출기에서의 동시계수는 두 광자의 중심파장이 동일한 경우( $\omega_1 = \omega_2$ ),

$$N_C \propto \frac{1}{2} [1 - \text{sinc}^2(\frac{\Delta\omega\delta\tau}{2})] \quad (2)$$

와 같이 되며, 시간차  $\delta\tau=0$ 이면 동시계수는 사라진다. 여기서  $\Delta\omega$ 는 간섭필터의 각진동수 폭을 의미한다. 이는 BS를 지난 두 광자는 쌍을 이루어 한 쪽 출구로만 뭉쳐서 진행하게 된다는 것을 의미한다. 이와 같이 단일광자 상태에 있는 두 광의 4차 간섭에서는 최대선명도가 1인 간섭효과를 관측할 수 있다. 만약 BS에 입사하는 두 광의 상태가  $|\alpha_1\rangle_1|\alpha_2\rangle_2$ 와 같이 결맞음상태의 고전적인 광이라면 BS에 도달하는 두 광 사이의 상대적인 시간차  $\delta\tau$ 에 따른 동시계수는

$$N_C \propto \frac{1}{4} (|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2)^2 [1 - \frac{2|\alpha_1|^2|\alpha_2|^2}{(|\alpha_1|^2 + |\alpha_2|^2)^2} \text{sinc}^2(\frac{\Delta\omega\delta\tau}{2})] \quad (3)$$

와 같이 되며,  $|\alpha_1|^2 = |\alpha_2|^2$ ,  $\omega_1 = \omega_2$ 인 경우 최대선명도는 0.5가 된다. 따라서 광자쌍의 간섭은 선명도가 0.5 이상 이 되는 경우에 해당하므로 비고전적인 간섭현상이다.

### 3.2. HOM 간섭계에서 광자쌍의 시간적인 4차 간섭실험

SPDC에서 발생한 650 nm 파장의 두 광자를 이용하여 4차 간섭효과를 관측하기 위한 실험장치도는 그림 4와 같다. 두 광자가 거울  $M_s$ 와  $M_i$ 에서 반사된 후 BS에서 중첩되면 BS의 두 출구에 놓인 두 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 로 입사하게 된다. BS에 도달하는 두 광자의 시간차를 조절하기 위해서 위치 분해능이 0.5 $\mu\text{m}$ 인 미세이동기에 BS를 부착시키고 위치변화( $\pm\delta\tau$ )에 따른 두 검출기의 동시계수를 측정하였다.

그림 5는 BS의 위치변화(또는 BS에 도달하는 두 광자 사이의 상대적인 시간차  $\delta\tau$ )에 따라 측정된 두 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 에서의 동시계수의 변화를 보인 것이다. BS의 위치이동에 따른 두 광자의 도달 시간차에 따라 나타나는 동시계수 dip의 폭은 하향변환된 빔의 결맞음 길이 또는 결맞음 시간에 대응하며, 실제 실험에서는 두 검출기 앞에 놓인 간섭필터의 투과특성에 따라 결정된다. 동시계

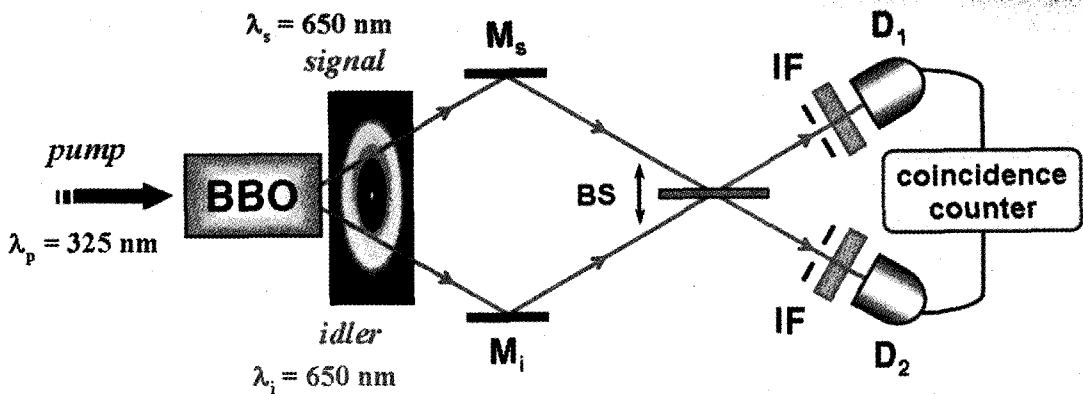


그림 4. HOM 간섭계. BS에서 중첩된 두 광자의 중첩효과 또는 HOM 간섭효과를 관측하기 위해서 BS의 두 출구에 검출기  $D_1$ 과  $D_2$ 를 설치하였다.

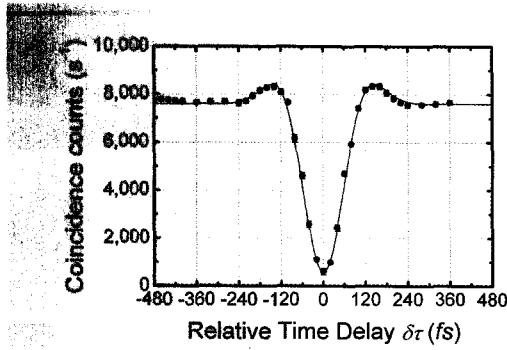


그림 5. 두 광자의 시간차에 따라 두 검출기 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>에서 측정된 동시계수. 간섭무늬의 선명도는 약 0.88이다.

수에서 측정된 4차 간섭무늬의 선명도(visibility)는 약 0.88정도 되었다. 이와같이 두 광자의 시간차가 없는 경우 간섭계를 통과한 후에는  $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2,1\rangle + |0,2\rangle)$ 의 광자수 얽힘 상태가 되는 것이다. 그러나 시간차가 있는 경우에는 얽힘상태와 곱상태( $|\Phi\rangle = |1,1\rangle$ )의 혼합 상태가 된다.

### 3.3. HOM 간섭계에서 진동수 얽힘상태 광자쌍의 4차 간섭실험

그림 6은 SPDC에서 발생한 진동수가 서로 다른 광자쌍의 얽힘상태 광자쌍( $\omega_1, \omega_2$  또는  $\omega_2, \omega_1$ )의 중첩에서 간섭현상을 관측하기 위한 간섭계의 개념도를 나타낸 것이다. 각진동수  $\omega_1$  또는  $\omega_2$ 인 하나의 광자가 signal 경로를 따라서 진행하면, 이와 동시에 발생하는 다른 하나의 광자는  $\omega_2$  또는  $\omega_1$ 의 각진동수를 갖고 idler 경로를 따라서 진행한다. 이 과정에서 간섭계내에서 signal과 idler 광자의 경로에는 각진동수가 각각  $\omega_1$ 과  $\omega_2$  또는  $\omega_2$ 와  $\omega_1$ 인 광자들이 중첩된 상태에 있으므로, 동시에 발생한 두광자의 상태는  $|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i$  인 상태와  $|\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i$ 의 상태의 중첩으로 표현된다.

$$|\Psi\rangle_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i + |\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i) \quad (4)$$

각진동수가  $\omega_1$ 인 signal 광자( $\omega_1^s$ )와  $\omega_2$ 인 idler 광자( $\omega_2^i$ )는 두 거울 M<sub>s</sub>와 M<sub>i</sub>에서 반사된 후 BS를 거쳐 두 검출기 D<sub>1</sub>(또는 D<sub>1</sub>')과 D<sub>2</sub>(또는 D<sub>2</sub>')로 입사하게 된다. 마찬가지로  $\omega_2$ 의 signal 광자( $\omega_2^s$ )와  $\omega_1$ 의 idler 광자( $\omega_1^i$ )는 BS를

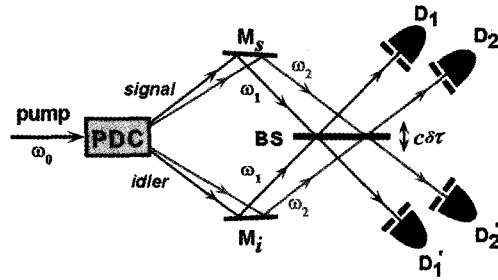


그림 6. 진동수 얽힘상태 두-광자 간섭계.

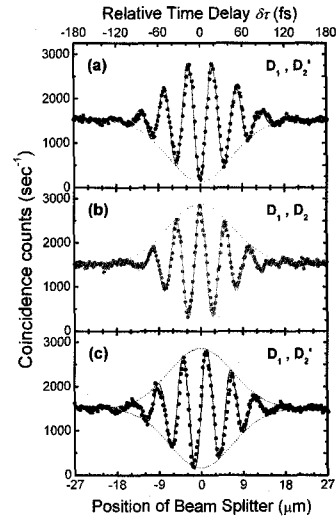


그림 7. 진동수 얽힘상태 광자쌍의 4차 간섭

거쳐 D<sub>2</sub>(또는 D<sub>2</sub>')와 D<sub>1</sub>(또는 D<sub>1</sub>')으로 입사하게 된다. 서로 다른 각진동수의 광자쌍을 동시에 측정하는 한 쌍의 검출기 (D<sub>1</sub>&D<sub>2</sub>, D<sub>1</sub>&D<sub>2</sub>', D<sub>1</sub>'&D<sub>2</sub>, 그리고 D<sub>1</sub>'&D<sub>2</sub>')를 이용하여 두 광자를 동시에 측정할 경우  $\cos(\omega_1 - \omega_2)\delta\tau$ 에 따라 동시계수가 변하는 4차 간섭효과를 관측할 수 있다<sup>[16,17]</sup>.

그림 7은 검출기 D<sub>1</sub>(D<sub>1</sub>') 앞에는 630.5±5 nm의 간섭필터를, D<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>') 앞에는 671±5 nm의 간섭필터를 부착하고 BS의 위치변화 또는 두 광자 사이의 시간차에 따라 두 검출기 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>과, D<sub>1</sub>'과 D<sub>2</sub>'에서 각각 측정된 동시계수의 변화를 보인 것이다. 그림 7(a)는 두 검출기가 BS의 서로 반대편에 놓여 있을 때, (b)는 같은 편의 출구에 놓여 있을 때 측정된 결과이다. 그리고 (c)는 식(4)의 두 상태 사이에 +π/2의 위상변화가 있을 때 D<sub>1</sub>'&D<sub>2</sub>'에서 측정된 결과이다. 이러한 위상의 변화를 위해서 두 거울

중에서 한 쪽 거울의 각도를 미세하게 조절하였다.

HOM 간섭실험의 결과를 보인 그림 5에서는 빔분할기에 도달하는 동일한 파장의 두 광자가 공간적으로나 시간적으로 겹치는 경우에 나타나는 두-광자 뭉침효과를 보여 주었다. 반면에 그림 7에서 보인 것과 같이 중심에서의 최소 동시계수(dip)는 파장이 서로 다른 두 광자가 빔분할기에서 공간적으로 서로 겹치지 않는 경우에도 간섭효과를 관측할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 두-광자 간섭은 측정과정에서 스펙트럼의 선택과 검출기의 배열, 그리고 두-광자 확률진폭 사이의 위상변화에 따라 서로 다른 간섭효과를 관측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 두-광자 간섭현상은 간섭계에서 두 광자가 취할 수 있는 구별이 불가능한 경로 즉, 원리적으로도 구별할 수 없는 두 광자의 확률진폭들의 간섭으로 해석할 수 있다.

### 3.4. HOM 간섭계에서 광자쌍의 공간적인 4차 간섭실험

그림 8은 기존의 HOM 간섭계와는 달리 BS를 고정하고 가운데 거울(M2)의 각도를 조정하여 측정장치에 입사하는 두 광의 각도 차이에 대한 간섭현상 즉, 공간적인 4차 간섭현상을 관측한 것이다<sup>[18]</sup>. BS의 두 출구(3,4)에서의 동시계수는

$$N_C = K \{ 1 - \text{sinc}^2 \left( \frac{\pi \Delta x \theta}{\lambda} \right) \cos \left[ \frac{2\pi(x_A - x_B)\theta}{\lambda} \right] \} \quad (5)$$

와 같이 되며, 여기서 K는 검출기의 효율과 연관된 상수,  $\Delta x$ 는 검출기의 입구 폭, 그리고  $x_A$ 와  $x_B$ 는 각각 두 검출기의 위치를 나타낸다. 간섭계 내에서 거울  $M_2$ 를 회전시켜  $\phi$ 를 변화시키면  $\theta$ 의 변화에 따라 두 검출기의 동시계수가 변하는 공간적인 4차 간섭현상을 관측할 수 있다. 그림 9는  $M_2$ 의 각도변화 즉,  $\theta$ 의 변화에 따른 동시계수이고 (a)~(g)는 peak 또는 dip이 나타나는 위치에서 BS의 위치변화에 따라 측정된 동시계수이다. 이와 같이 제 1형의 SPDC에서 발생하는 광자쌍의 간섭에서는 BS만에 의한 기존의 dip 뿐만 아니라, 거울의 각도와 BS의 조작으로 peak도 가능하다는 것이 확인되었다. 이는  $M_2$ 의 각도를 조절하면 광자수 얽힘상태  $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2, 0\rangle + |0, 2\rangle)$ 상태와 곱상태  $|\Phi\rangle = |1, 1\rangle$ 를 임의로 선택하는 것이 가능하다는 것을 알려준다.

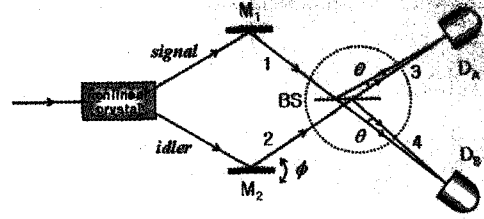


그림 8. 공간적인 HOM 간섭효과를 측정하기 위한 간섭계

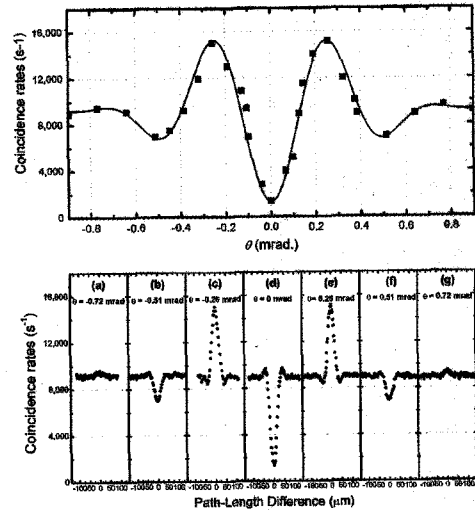
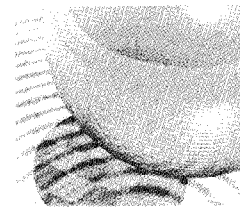


그림 9. 공간적인 HOM 간섭현상

## 4. 요약

제 1형의 SPDC에서 발생한 광자쌍의 얽힘특성과 연관된 간섭실험들을 소개하였다. 양자역학적으로 두-광자 간섭현상은 간섭계에서 동시계수가 가능한 경로에 대한 확률진폭들의 결맞음으로부터 일어나며, 이는 측정과정에서의 경로에 대한 구별 불가능성과 연관된다. HOM 간섭계에서는 BS에 도달하는 두 광자의 시간차가 없을 때, BS의 출구에서 광자들이 쌍을 이루는 시간적인 두-광자 간섭효과를 관측하였다. SPDC에서 발생하는 넓은 파장영역의 광자들 중에서 서로 다른 두 파장의 광자쌍을 선택하는 경우에도 동시계수 측정에서 두 광자의 경로를 구별할 수 없는 경우에는 두 광자의 진동수 차이에 해당하는 주기로 동시계수가 변하는 간섭효과를 관측할 수



있다. 또한 HOM 간섭계에서 BS에 입사하는 두 광의 각도를 변화시키면 광자쌍의 공간적인 4차 간섭현상을 관찰할 수 있다

### 참고문헌

- [1] P. Knight and L. Allen, Concept of Quantum Optics, Pergamon Press, 1983.
- [2] G. Taylor, Proc. Camb. Philos. Soc. 15, 114-115 (1909).
- [3] P. A. M. Dirac, The Principles of Quantum Mechanics, 3rd ed. (Clarendon Press, Oxford, 1947), p. 9.
- [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, The Feynman Lectures on Physics (Addison Wesley, Reading, 1965), Chap. 37 in Vol. I and Chap. 3, Vol. II.
- [5] G. Magyar, and L. Mandel, Nature 198, 255(1963).
- [6] R. Hanbury, Brown, and R. Q. Twiss, Nature 177, 27 (1956).
- [7] C. K. Hong, Z. Ou, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987).
- [8] D. N. Klyshko, Photons and Nonlinear Optics, (New York, Gordon and Breach, 1988) p. 325.
- [9] D. C. Burnham and D. L. Weinberg, Phys. Rev. Lett., vol. 25, no. 2, pp. 84-87, 1970.
- [10] R. Y. Chiao, P. G. Kwiat, and A. M. Steinberg, Advances in atomic, molecular, and optical physics (Academic Press, INC), 34, 35 (1994).
- [11] H. Hariharan and B. C. Sanders, Quantum phenomena in optical interferometry, (Elsevier Science B. V.), 36, pp. 49 (1996).
- [12] G. Jaeger and A. V. Sergienko, Multi-photon quantum interferometry, (Elsevier Science B. V.), 42, 277 (2001).
- [13] L. Mandel, Rev. Mod. Phys., 71, S274 (1999).
- [14] A. Zeilinger, Rev. Mod. Phys., 71, S288 (1999).
- [15] D. Bouwmeester, A. Ekert, and A. Zeilinger, The Physics of Quantum Information (Springer, Berlin, 2000).
- [16] Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, J. Opt. Soc. Am. B, 20, 760 (2003).
- [17] Heonoh Kim, Jeonghoon Ko, and Taesoo Kim, Phys. Rev. A, 67, 054102 (2003).
- [18] Heonoh Kim, Osung Kwon, Wonsik Kim, and Taesoo Kim, Phys. Rev. A 73, 023820 (2006).



#### 김태수

근무처  
울산대학교 물리학과 (교수)

최종학력  
연세대학교 물리학과 (박사)

주요경력  
한국원자력연구소 선임연구원,  
Rochester대학(미), Colorado대학(미),  
Oxford(영)대학에서 연구

e-mail : tskim@mail.ulsan.ac.kr



#### 김현오

근무처  
한국전자통신연구원, 양자정보통신팀

최종학력  
울산대학교 물리학과 (박사)

주요경력  
한국전자통신연구원, 선임연구원

e-mail : heon-oh@etri.re.kr