얽힘 상태 광자쌍의 생성 및 양자간섭

DOI: 10.3938/PhiT.19.048

김현오·김태수·조석범·노태곤

Generations of Entangled State Photon Pairs and Quantum Interference

Heonoh KIM, Taesoo KIM, Seok-Beom CHO and Tae-Gon NOH

Entangled state photon pairs are very important resource for fundamental studies of quantum mechanics and for intriguing research field of photonic quantum information science and technology. Most convenient and reliable method for generating entangled photons is spontaneous parametric down-conversion. We briefly introduced various kinds of quantum interference experiments with photon pairs.

서론

얽힘 상태(entangled state)는 양자역학의 가장 근본적인 특성 중의 하나로서, 어떤 양자계가 특별한 중첩된 상태에 있어서 그 전체 양자상태가 개별적인 부분 양자계들의 파동함수의 곱으로 기술할 수 없는 양자상태를 말한다.^[1] 직관적으로 이해하기 쉬운 두 입자 얽힘 상태의 대표적인 예로는 스핀(spin)이 1/2인 두 개의 전자들로 구성되는 양자계의 전체 양자상태가 $|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2}(|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2)$ 와 같이 표현되는 중첩상태에 있는 경우이다.^[2] 이러한 상태에 있는 양자계

저자약력

김현오 박사는 울산대학교 이학박사(2002)로서 한국전자통신연구원(2004-2007), 한국표준과학연구원(2008-2009)을 거쳐 현재 울산대학교 기초과학연구소 에너지 하베스트 앤 스토리지 연구센터에서 연구교수로 재직 중이다. (quantum@ulsan.ac.kr)

김태수 교수는 연세대학교 이학박사(1985)로서 한국원자력연구소(1974-1985), 울산대학교 물리학과 교수(1985-2010)를 거쳐 현재 울산대학교 물리학과에 특임교수로 재직 중이다. (tskim@ulsan.ac.kr)

조석범 박사는 한국과학기술원 공학박사(2005)로서 2006년부터 한국전자통신연구원 선임연구원으로 재직 중이다. (sbcho@etri.re.kr)

노태곤 교수는 포항공과대학교 이학박사(1999)로서 Northwestern 대학교 전기 및 컴퓨터 공학과 Post-Doc, 삼성종합기술원 전문연구원, 한국전자통신연구원 책임연구원을 거쳐 현재 경성대학교 물리학과에 재직 중이다. (tgnoh@ks.ac.kr)

Fig. 1. Application fields of entangled photon pair sources.

의 개별 입자들은 한 입자의 스핀이 측정을 통해 특정한 방향으로 결정되면 “동시에” 다른 입자의 스핀은 자동적으로 반대 방향으로 결정되는 매우 특별한 상관관계를 갖는다. 양자 얽힘 상태를 구현하는 가장 대표적인 방법은 레이저 광과 비선형 매질의 상호작용에서 자발적 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion: SPDC)으로 발생하는 광자쌍(signal 광자와 idler 광자)을 이용하는 것이다.

얽힘 상태 광자쌍은 80년대 말부터 광학적인 간섭실험에서 나타나는 비고전적인 현상을 규명하고, 나아가 EPR 역설, Bell 부등식 등을 포함하는 양자역학의 근본적인 특성을 연구하는데 유용한 도구로 많이 활용되어 왔다.^[3-5] 이러한 순수 학문적인 관점에서의 연구와 더불어 최근에는 광자기반 양자 정보처리 등의 분야에서 아주 유용한 광원으로 광범위하게 활용되고 있다.^[6] 예를 들어 양자암호, 양자 원격전송(teleportation)을 포함하는 양자통신 분야와 양자 게이트 구현과 같은 양자 컴퓨터 분야, 그리고 양자 정밀측정(metrology), 양자 리소그래피(lithography) 및 양자 영상(imaging) 등은 얽힘 상태 광

REFERENCES

- [1] E. Schrödinger, *Naturwissenschaften* **23**, 807 (1935).
- [2] D. Bohm, *Quantum Theory* (Prentice-Hall, New York, 1951).
- [3] L. Mandel, *Rev. Mod. Phys.* **71**, S274 (1999).
- [4] A. Zeilinger, *Rev. Mod. Phys.* **71**, S288 (1999).
- [5] R. Y. Chiao, P. G. Kwiat and A. M. Steinberg, in *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics* (Academic Press, INC, 1994), Vol. 34, pp. 35-83.
- [6] D. Bouwmeester, A. Ekert and A. Zeilinger, eds., *The Physics of Quantum Information* (Springer, Berlin, 2001).

Fig. 2. Spontaneous parametric down-conversion and digital camera image of conical emission.

자쌍을 이용하는 양자기술(quantum technology)의 대표적인 연구 분야이다(그림 1).

자발적 매개하향변환: 광자쌍 생성

SPDC는 높은 진동수(또는 짧은 파장)의 광자가 비선형 매질과 상호작용을 통해서 낮은 진동수(또는 긴 파장)를 갖는 한 쌍의 광자들로 자발적으로 변환되는 과정으로, 상호작용 전후에 에너지 보존법칙과 운동량 보존법칙에 해당하는 위상정합조건(phase matching condition)이 잘 만족될 때 광자 쌍이 효율적으로 발생한다.^[7]

$$\omega_{\text{pump}} = \omega_{\text{signal}} + \omega_{\text{idler}}, \quad \vec{k}_{\text{pump}} = \vec{k}_{\text{signal}} + \vec{k}_{\text{idler}} \quad (1)$$

SPDC에 사용되는 비선형 매질로는 최근에는 BBO(β -BaB₂O₄), LBO(LiB₃O₅), BiBO(BiB₃O₆) 등과 더불어 주기적인 분극 반전된(periodically poled) 구조를 갖는 PPLN(PP-LiNbO₃), MgO:PPLN, PPKTP 등이 많이 이용된다. 그림 2는 χ^2 비선형 계수를 갖는 매질에서 위상정합조건이 성립될 때 하나의 펌프 광자가 두 개의 광자로 변환되는 과정을 도식으로 보인 것이며, 오른쪽 사진은 325 nm 파장의 펌프 광과 BBO 결정을 이용한 SPDC 과정에서 발생한 빛을 디지털 카메라로 찍은 것이다. SPDC는 펌프 광과 비선형 결정의 상호작용 방식에 따라 다양한 형태의 위상정합이 존재한다. 가장 전형적인 형태는 매질 내에서 복굴절(birefringence)을 이용한 제 1형 및 제 2형의 SPDC이다(그림 3). 제 1형은 펌프 광의 진행방향에 대해서 원추형으로 하향 변환된 빛이 방출되며, 펌프 광과 하향 변환된 빛의 편광은 서로 수직이지만 SPDC에서 생성된 두 광자의 편광은 동일하다. 또한 위상정합을 만족하는 넓은 범위의 스펙트럼이 존재하므로 진동수 얽힘 상태(frequency entangled state)의 구현이 가능하다. 제 2형은 위상정합 각도에 따라 펌프 광의 진행방향에 대해 대칭인 두 개의 원추형으로 하향 변환된 빛이 방출되며, 생성된 두 광자의 편광이 서로 수직이다. 따라서 두 개의 원추가 중첩되는 점에서 두 광자를 선택하면 편광 얽힘 상태(polarization entangled state)의 구현이 가능하다. 이러한 편광 얽힘 상태는 또한 제

Fig. 3. Entangled state generation through type-I and type-II SPDC.

1형의 비선형 매질 두 개의 광축을 서로 수직으로 놓고 펌프 광의 편광을 45°로 하여 순차적으로 SPDC 과정을 일으켜 구현할 수도 있다.

Hong-Ou-Mandel (HOM) 양자간섭

Beam splitter에서 두 광자의 간섭: 그림 4와 같이 투과율과 반사율이 각각 t 와 r 인 빔분할기(Beam Splitter: BS)의 두 입구에 입사하는 두 광자에 대한 소멸 연산자(annihilation operator)를 각각 $\hat{a}_1$, $\hat{a}_2$ 라고 하고 두 출구에서 각각의 광자에 대한 소멸연산자를 $\hat{a}_3$, $\hat{a}_4$ 라고 하면, BS를 투과하기 전후의 두 광자에 대한 생성 연산자(creation operator) 관계는 $\hat{a}_1^\dagger \rightarrow ir\hat{a}_3^\dagger + t\hat{a}_4^\dagger$, $\hat{a}_2^\dagger \rightarrow t\hat{a}_3^\dagger + ir\hat{a}_4^\dagger$ 와 같이 표현된다. 여기서 BS에서 반사되는 광자는 투과되는 광자에 대해서 $e^{i\pi/2} = i$ 의 상대적인 위상변화를 겪게 된다. BS에 동시에 입사하는 두 광자의 상태가 $|\Psi_{\text{in}}\rangle = |1, 1\rangle_{1,2} = \hat{a}_1^\dagger \hat{a}_2^\dagger |0, 0\rangle_{1,2}$ 이면, 투과율과 반사율이 50:50인 BS를 통과한 후의 두 광자의 상태는 다음과 같이 표현된다.

$$|\Psi_{\text{out}}\rangle = \frac{i}{2}(\hat{a}_3^{\dagger 2} + \hat{a}_4^{\dagger 2})|0, 0\rangle_{3,4} = \frac{i}{\sqrt{2}}(|2, 0\rangle_{3,4} + |0, 2\rangle_{3,4}) \quad (2)$$

식 (2)는 서로 구별할 수 없는 두 개의 단일광자가 BS에 동시에 입사하면 두 광자는 쌍을 이루어 BS를 빠져나가는 것으로 해석할 수 있다. 이는 광자의 보존(boson)적인 성질을 보

REFERENCES

- [7] D. N. Klyshko, *Photons and Nonlinear Optics* (Gordon and Breach, New York, 1988).

Fig. 4. Quantum mechanical description of a beam splitter: The relationship between input and output photon annihilation operators.

여주는 실험인 동시에, 두 개의 광자가 BS 출구의 두 경로에 중첩된 상태로 존재하는 광자수경로 얽힘 상태(photon number-path entangled state 또는 NOON state)의 기본적인 구현이기도 하다.^[8] 이러한 얽힘 상태는 $N=2$ 인 NOON 상태의 가장 기본적인 형태이며, 양자광학 및 양자정보 분야에서 광자의 de Broglie 파장, 양자 리토그래피, 위상 정밀측정 등과 같은 분야에서 유용한 자원으로 주목을 받고 있다.

광자쌍을 이용한 Hong-Ou-Mandel 간섭: 고전적인 간섭이론으로는 설명할 수 없는 광자들의 양자 간섭현상은 SPDC에서 발생하는 광자쌍을 이용한 동시계수 실험으로 Rochester 대학의 C. K. Hong, Z. Y. Ou와 L. Mandel 그리고 Maryland 대학의 Y. H. Shih와 C. O. Alley에 의해서 처음으로 보고되었고, 일반적으로 Hong-Ou-Mandel(HOM) 간섭효과로 알려져 있다.^[9,10] 그림 5는 He-Cd 레이저에서 나온 325 nm 파장의 자외선 광과 BBO 결정을 이용한 SPDC에서 발생한 650 nm 파장의 광자쌍을 이용한 HOM 간섭실험을 보인 것이다. BS에 도달하는 두 광자의 시간차가 없을 때 BS 출구의 광자의 상태는 $|\Psi_{\text{out}}\rangle = 1/\sqrt{2}(|2, 0\rangle_{D_1, D_2} + |0, 2\rangle_{D_1, D_2})$ 와 같이 되어 두 개의 단일광자 검출기(Perkin Elmer, SPCM AQ-R) D_1 과 D_2 에서 측정되는 동시계수는 사라진다는 것을 알 수 있다.

두 광자의 중심파장이 동일한 경우 두 검출기 앞에 진동수 폭이 $\Delta\omega$ 인 간섭필터(Interference Filter: IF)를 설치하고 동시계수를 측정하면 BS에 도달하는 두 광자의 상대적인 시간차 $\delta\tau$ 에 따라 동시계수가 변하는 간섭이 관측된다.

$$R_{\text{Coin.}} \propto 1 - \sin^2 \left(\frac{\Delta\omega \delta\tau}{2} \right) \quad (3)$$

이러한 광자쌍의 4차 간섭은 BBO-BS-D에 이르는 두 광자가 동시에 택할 수 있는 서로 다른 4가지 확률진폭 중에서 BS에서 투과-투과와 반사-반사에 해당하는 구별할 수 없는 두광

Fig. 5. Hong-Ou-Mandel interference experiment with photon pairs.

자 확률진폭(two-photon probability amplitude)들이 서로 소멸간섭을 일으켜 두 광자는 쌍을 이루어 BS의 한 쪽 출구로만 쌍을 이루어 빠져나가는 두광자 뭉침(bunching) 효과로 설명된다.

HOM 간섭계에서 광자쌍의 공간적인 간섭: HOM 간섭계의 두 경로를 약간 어긋나게 정렬하여 BS에 입사하는 두 광자의 각도를 서로 다르게 하면 입사각도의 변화에 따라 동시계수 측정에서 공간적인 HOM 간섭효과를 관측할 수 있다. 그림 5의 HOM 간섭계에서 단일광자 검출기의 유한한 폭을 Δx 라고 하면 검출기에 도달하는 두 광자의 입사각도 θ 에 따라 두 검출기에서 측정되는 동시계수 $R_{\text{Coin.}}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{\text{Coin.}} = K \left\{ 1 - \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta x \theta}{\lambda} \right) \cos \left[\frac{2\pi(x_A - x_B)\theta}{\lambda} \right] \right\} \quad (4)$$

여기서 K 는 상수이고, x_A 와 x_B 는 두 검출기의 위치를 나타낸다. 그림 6은 각도 θ 를 서로 다르게 했을 때 BS에 도달하

REFERENCES

- [8] H. Lee, P. Kok and J. P. Dowling, J. Mod. Opt. **49**, 2325 (2002).
- [9] C. K. Hong, Z. Y. Ou and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **59**, 2044 (1987).
- [10] Y. H. Shih and C. O. Alley, Phys. Rev. Lett. **61**, 2921 (1988).

Fig. 6. Spatial two-photon interference in a HOM interferometer.

는 두 광자의 경로차에 따른 동시계수 변화(HOM 간섭)와 경로차가 없을 때 각도변화 θ 에 따라 측정된 동시계수이다. 입사각도에 따라 두 광자 확률진폭들 사이의 위상변화에 따라 소멸 및 보강 간섭이 번갈아 일어난다는 것을 알 수 있고, 따라서 θ 변화에 따라 HOM dip과 peak의 연속적인 변화를 관측할 수 있다.^[11]

진동수 얽힘 상태 광자쌍을 이용한 Hong-Ou-Mandel 간섭: 식 (1)의 위상정합조건으로부터 SPDC 광자들은 하나의 펌프 광자에 대해서 넓은 스펙트럼 영역의 광자쌍이 발생할 확률을 갖고 있으므로, signal과 idler 광자의 각 진동수(또는 파장)를 서로 다르게 선택하면 다음과 같은 진동수 얽힘 상태를 구현할 수 있다.

$$|\Psi\rangle_{\omega_1, \omega_2} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i + e^{i\phi} |\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i) \quad (5)$$

HOM 간섭계에서 signal 광의 경로에 ω_1 (또는 ω_2)의 광자가 있고 idler 광의 경로에는 ω_2 (또는 ω_1)의 광자가 있는 두 가지 상태가 서로 중첩된 상태에 있으므로 BS의 위치를 이동시키면 $|\omega_1\rangle_s |\omega_2\rangle_i$ 와 $|\omega_2\rangle_s |\omega_1\rangle_i$ 의 두 상태 사이에 위상차가 발생하여 동시계수 측정에서 공간적인 맥놀이(spatial beating)와 유사한 간섭현상을 관측할 수 있다.^[12]

그림 7은 두 검출기 앞에 투과 중심파장이 각각 630 nm와 670 nm인 간섭필터를 설치하고 BS의 위치변화에 따라 동시계수 측정에서 나타나는 양자 간섭현상을 보인 것이

Fig. 7. Complementarity and quantum eraser effect in a HOM interference with frequency-entangled photon pairs.

다.^[13] 여기서 HWP는 반파장판(Half Wave Plate)을 나타내며, HWP의 각도변화에 따라 두 광자 사이에 편광에 의한 구별 가능성이 도입되면 간섭무늬의 선명도(visibility)가 감소하게 된다는 것을 보여준다. 만약 두 광자의 편광이 서로 수직이 되면 두 광자의 경로에 대한 정보를 완전히 알 수 있으므로 간섭현상은 더 이상 보이지 않게 된다. 하지만 두 검출기 앞에 편광자(polarizer)를 45°로 설치하게 되면 편광에 의한 경로의 구별 가능성이 사라지게 되므로 간섭무늬는 다시 되살아난다. 이러한 현상은 양자 지우개(quantum eraser) 효과로 알려져 있으며 양자역학의 상보성 원리(complementarity principle)의 직접적인 증명실험이 된다.

HOM 간섭계에서 편광 얽힘 상태의 생성 및 양자간섭: 제 1형의 SPDC에서 발생한 두 광자의 편광이 동일한 경우 HOM 간섭계의 출구에서의 두 광자 상태는 식 (2)와 같이 주어지지만, 두 광자의 편광이 서로 다른 경우에는

REFERENCES

- [11] H. Kim, O. Kwon, W. Kim and T. Kim, Phys. Rev. A **73**, 023820 (2006).
- [12] H. Kim, J. Ko and T. Kim, J. Opt. Soc. Am. B **20**, 760 (2003).
- [13] H. Kim, J. Ko and T. Kim, Phys. Rev. A **67**, 054102 (2003).

Fig. 8. Generation of polarization-entangled Bell states in a HOM interferometer. Quantum interference experiments and correlation coefficients of the $|\Psi^-\rangle$ state.

$$\begin{aligned}
 |\Psi_{\text{out}}\rangle = & \frac{1}{2} \cos\theta \left[\sqrt{2} i (|2H, 0\rangle_{3,4} + |0, 2H\rangle_{3,4}) \right. \\
 & \left. - |H, H\rangle_{3,4} + |H, H\rangle_{3,4} \right] \\
 & + \frac{1}{2} \sin\theta \left[i (|HV, 0\rangle_{3,4} + |0, HV\rangle_{3,4}) \right. \\
 & \left. - (|H, V\rangle_{3,4} - |V, H\rangle_{3,4}) \right] \quad (6)
 \end{aligned}$$

와 같이 주어진다. 여기서 θ 는 간섭계의 한 쪽 경로에 놓인 HWP의 각도에 따른 광자의 편광방향을 나타낸다. $\theta=0^\circ$ 인 경우 식 (6)은 식 (2)와 같아지고, $\theta=90^\circ$ 인 특별한 경우에는 수평(H)과 수직(V) 방향의 편광을 가진 두 광자가 같은 출구에 쌍으로 있을 경우와 서로 다른 출구에 있을 경우가 같은 확률로 존재하게 된다. 만약 두 검출기를 이용한 동시계수 측정을 하는 경우만을 고려하면 $|\Psi_{\text{out}}\rangle = 1/\sqrt{2} (|H, V\rangle_{3,4} - |V, H\rangle_{3,4})$ 와 같은 편광 얽힘 상태를 얻을 수 있다. 또한 간섭계 출구의 두 경로에 HWP와 QWP(Quarter Wave Plate)를 놓아서 편광방향 및 위상변화를 조절하면 다음과 같은 4가지 편광 얽힘 벨 상태(Bell state)를 구현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 |\Psi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H, V\rangle_{3,4} \pm |V, H\rangle_{3,4}), \\
 |\Phi^\pm\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|H, H\rangle_{3,4} \pm |V, V\rangle_{3,4}) \quad (7)
 \end{aligned}$$

그림 8은 제 1형의 SPDC를 이용한 HOM 간섭계에서 편광 얽힘 벨 상태를 생성하고, 벨 부등식의 위배를 검증하는 실험이다.^[14] HWP1,2는 초기의 $|\Psi\rangle$ 상태를 $|\Phi\rangle$ 상태로 변환시키는 데 이용되고, QWP1과 QWP2는 수직편광과 수평편광 사이

의 위상변화를 도입하여 $|\Psi^+\rangle \leftrightarrow |\Psi^-\rangle$ 또는 $|\Phi^+\rangle \leftrightarrow |\Phi^-\rangle$ 의 상태를 바꾸는 데 이용된다. 편광자 Pol.1과 Pol.2는 편광 얽힘 상태 광자쌍의 편광분석을 통해 간섭을 측정하고 벨 부등식의 위배를 검증하는 데 사용되었다. 편광 얽힘 광자쌍을 이용한 벨 부등식의 위배 검증 실험은 1969년 J. Clauser, M. Horne, A. Shimony, 그리고 R. Holt(CHSH)에 의해 제안된 CHSH 부등식이 실험결과를 분석하는 데 많이 이용되며

$$\begin{aligned}
 S(\alpha, \beta, \alpha', \beta') &= |E(\alpha, \beta)| + |E(\alpha', \beta')| \\
 &\quad - |E(\alpha, \beta')| + |E(\alpha', \beta)| \leq 2 \quad (8)
 \end{aligned}$$

와 같은 형태로 표현된다.^[15] 여기서 $\alpha(\alpha')$ 와 $\beta(\beta')$ 는 Pol.1,2의 편광 방향을 나타내고, $E(a, b)$ 는 각각의 편광 방향의 조합에서 측정된 상관관계를 나타낸다. 국소적 실재론에 근거한 숨은 변수 이론에 의한 S 의 최대값은 2를 넘을 수 없지만, 특정한 각도의 조합에서 양자역학적인 예측에 의한 S 의 최대값은 $2\sqrt{2}$ 가 된다. 두 편광자의 각도가 $\{\alpha, \beta, \alpha', \beta'\} = \{0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ\}$ 일 때 측정된 S 값은 $|\Psi^\pm\rangle$ 와 $|\Phi^\pm\rangle$ 에 대해서 대략 2.5, S 값의 평균 초과량은 대략 표준편차의 7배 정도였다.

SPDC를 이용한 1550 nm 통신파장 대역의 광자쌍 생성 및 양자간섭

얽힘 상태 광자쌍의 특성 및 양자간섭현상에 관한 연구는 대부분 가시광선 및 근적외선 영역에서 수행되어 왔지만, 최근에는 이러한 양자광학에 기반을 둔 광학적 얽힘 상태의 구현 및 응용은 양자정보 분야에서 특히 양자통신의 실험적인 구현에도 중요한 자원으로 활용되고 있다. 광섬유 기반 장거리 양자통신을 위한 얽힘 상태의 생성을 위해서는 광섬유에서 손실이 가장 작은 1550 nm 파장대역의 광자쌍 광원이 요구된다. 최근에 우리는 Ti:Sapphire 레이저에서 방출된 775 nm 파장의 펄스(150 fs, 75 MHz)와 BBO 결정을 이용한 제 1형의 SPDC에서 광섬유 기반 광통신 표준파장대역인 1550 nm 파장의 공간적으로 분리된 광자쌍을 생성시키고,^[16] 광섬유 기반 HOM 간섭계를 구성하여 광자쌍의 양자간섭 실험을 수행하였다.^[17] 투과 파장 폭이 약 18 nm인 CWDM 필터를 통과한 1550 nm의 동일한 광자쌍의 간섭에서는 HOM dip을, 1530 nm와 1570 nm인 진동수 얽힘 상태 광자쌍의 간섭에서는

REFERENCES

- [14] Osung Kwon, Heonho Kim, Gudong Park and Taesoo Kim, Sae Mulli **54**, 59 (2007).
- [15] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony and R. A. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969).
- [16] T.-G. Noh *et al.*, Opt. Express **14**, 2805 (2006).
- [17] S.-B. Cho and T.-G. Noh, Opt. Express **15**, 7591 (2007).

Fig. 9. Quantum interference of photon pairs at telecommunication wavelength in a fiber optic HOM interferometer.^[17]

HOM beating을 측정하였다. 이러한 실험은 서로 독립적인 광자들을 얽힘 광자로 만드는 얽힘 교환(entanglement swapping)의 기본이 되며, 얽힘 상태 광자를 광섬유 기반 장거리 양자통신에 이용할 때 채널과 채널 사이의 얽힘을 유지하게 만드는 양자 중계기(quantum relay)에 응용할 수 있는 가능성을 보여준다. 본 실험은 비교적 짧은 거리의 광섬유 간섭계에서 수행되었지만, 안정화된 장거리 광섬유 간섭계를 이용하면 실제로 아주 먼 거리에서도 광자쌍의 비국소적인 상관관계가 유지되고 또한 고전적인 선명도의 한계를 훨씬 넘는 양자 간섭 현상을 관측할 수 있을 것으로 예상된다.^[18]

그림 10은 제 2형의 SPDC를 이용하여 1550 nm 통신과 장대역에서 편광 얽힘 벨 상태를 생성하고 편광 분석 및 편광 상관관계 측정을 통해 CHSH 부등식의 위배를 검증한 실험을 보인 것이다.^[19] 위에 그림은 위상정합조건에 따라 signal과 idler 광이 두 개의 빔 형태로 방출된 것(beam-like)과 두 광자가 공선상에서 방출된 것(collinear), 그리고 두 광자가 얽힘 상태로 공간적으로 분리되어 방출된 것(non-collinear)의 공간적인 분포를 직접 측정한 것이다. 아래 그림은 공간적으로 분리된 편광 얽힘 상태에서부터 4개의 벨 상태 즉, $|\Psi^{\pm}\rangle$ 와 $|\Phi^{\pm}\rangle$ 를 구현하고 편광 분석에 의한 간섭실험의 결과를 보인 것이다. 또한 두 광자의 편광 상태의 조합으로부터 CHSH 부등식 위배를 검증하여($S > 2$) 편광 얽힘 상태 광자

Fig. 10. Efficient generation of polarization-entangled photon pairs in the 1550 nm telecommunication band.^[19]

들의 비국소적인 상관관계를 확인하였다. 최근에는 광섬유 기반 양자 키 분배(quantum key distribution: QKD) 실험에서 편광 얽힘 상태 광자쌍이 이용되고 있으며, 특히 통신과 장대역에서 생성된 이러한 편광 얽힘 상태 광원은 광섬유 기반 장거리 QKD 실험에 효과적으로 활용될 수 있다.

결론

지금까지 자발적 매개하향변환 과정에서 발생하는 광자들의 얽힘 특성과 연관된 대표적인 몇 가지 양자간섭 실험을 간략하게 기술하였다. 얽힘 상태 광자쌍 광원은 고전물리학으로 설명할 수 없는 양자역학의 다양한 특성들을 규명하는 순수학문적인 측면에서부터 양자역학을 기반으로 하는 양자정보 분야와 차세대 양자기술 개발의 가능성을 탐구하는 도구로써 효과적으로 이용되고 있다. 특히 SPDC를 이용한 얽힘 상태 광자의 생성은 가장 간편하고 신뢰성이 높은 방법으로 광자 기반 양자컴퓨터, 양자통신, 그리고 양자정밀측정 분야에 이르기까지 그 중요성과 효용성이 점점 증가하고 있으며, 전 세계적으로 활발하게 연구가 진행되고 있다.

REFERENCES

- [18] S.-B. Cho and T.-G. Noh, Opt. Express **17**, 19027 (2009).
- [19] T.-G. Noh *et al.*, Appl. Phys. Lett. **90**, 011116 (2007).
- [20] The authors note that parts of this review article are based on "Optical Science and Technology," Vol. 11, No. 3/4, pp. 5-11 (Optical Society of Korea, 2007).