

# 편광-얽힘 상태 광자쌍을 이용한 Bell 부등식 위배에 관한 실험

## Experiment on violation of Bell inequality using polarization-entangled photon pairs

권오성, 김태수<sup>†</sup>

울산대학교 물리학과

☎ 680-749 울산시 남구 무거2동 산29번지

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

1964년 John Bell은 시·공간적으로 서로 멀리 떨어져 있는 한 쌍의 입자들 사이에 행해진 상관관계 측정의 통계적인 결과가 국소적인 숨은 변수 이론을 따르는지 아니면 양자역학의 예측을 따르는지를 판단하는 기준을 제공하는 부등식을 고안하였다[1]. 그 이후에 1969년에 John Clauser, Michael Horne, Abner Shimony 그리고 Richard Holt (CHSH)는 Bell의 이론을 실험적으로 검증할 수 있는 형태의 부등식을 제안하였다[2]. Bell의 정리 및 CHSH 부등식은 국소적 실재론(local realism)과 비국소적 상관관계 (nonlocal correlation)의 존재를 정량적으로 구분 짓는데 효과적으로 이용되고 있으며, 특히 얽힘-상태를 이용하는 양자정보 전 분야에서 얽힘의 정도 (degree of entanglement)를 검증하는데 많이 이용된다.

자발적인 매개하향변화 (spontaneous parametric down-conversion; SPDC)에서 발생하는 광자의 상관관계 특성을 이용한 여러 가지 실험적인 연구들 중에서 특히 편광-얽힘 상태를 이용한 다양한 실험들이 Bell의 부등식과 양자역학의 타당성을 검증하기 위해서 많이 수행되었다. 1995년에는 Kwiat 외 다수의 연구자들의 제 2형의 SPDC에서 발생하는 모든 광자들이 편광-얽힘 상태가 되는 광자쌍을 발생시키고, 4가지의 최대로 얽힌 Bell 상태를 구현했으며, Bell 부등식을 위배하는 결과를 보이는 실험을 수행하였다[2].

본 연구에서는 제 1형의 SPDC에서 발생하는 두 광자를 post-selection하는 즉, Hong-Ou-Mandel (HOM) 간섭계에서 전체 광자쌍의 50%를 부분적으로 선택하는 방법으로 두 광자의 편광-얽힘 상태를 만들고, 반파장판 (half wave plate; HWP)과 1/4파장판 (quarter wave plate; QWP)의 조합을 이용하여 4가지 Bell 상태를 구현하였다. 또한 두 검출기 앞에 편광자를 설치하고 두 편광자의 상대적인 각도를 변화시키면서 편광상태의 상관관계를 보여주는 4차 간섭무늬를 측정하고, 특정한 편광판 각도의 조합에서 Bell 부등식을 위배하는 결과를 얻을 수 있다는 것을 조사하였다.

그림 1은 제 1형의 SPDC에서 발생한 두 광자와 HOM 간섭계를 이용하여 편광-얽힘상태를 발생시키고, 편광상관관계 분석에 의한 간섭무늬의 측정과 Bell 부등식의 위배를 검증하는 실험을 위한 실제 장치도를 보인 것이다. HOM 간섭계에서, idler 광자의 경로에 놓인 HWP의 각도가 45°로 놓여 있는 경우에는 편광의 구별가능성 때문에 두-광자 간섭효과는 일어나지 않는다. 따라서 빔분할기 (beam splitter: BS)에서 두 광자의 투과-투과, 반사-반사, 투과-반사, 그리고 반사-투과에 해당하는 확률 진폭들이 모두 존재하게 된다. 본 실험에서는 두 검출기에서 동시계수가 측정될 수 있는 경우 즉, BS의 두 출구에서 두 광자가 투과-투과 또는 반사-반사를 하는 경우에 해당하는 확률 진폭들만 고려하여 두-광자의 편광-얽힘 상태를 만들었다. 그러면 BS 이후의 두 광자의 상태는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|\Psi\rangle = (|H_1, V_2\rangle + |V_1, H_2\rangle) / \sqrt{2}$$

BS이후의 한쪽 경로에 HWP를 추가로 설치하여 수평(수직)편광을 수직(수평)편광으로 변화 시키고,

QWP을 이용하여 두-광자 진폭 사이의 위상 차이가 0에서  $\pi$ 만큼 변화시키면 4가지 Bell state를 만들 수 있다. 국소적 실재론에 근거한 CHSH 부등식에 의하면, 두 광자의 편광상관계 측정에서 얻을 수 있는 계수  $S$ 의 최대값은  $|S| \leq 2$ 로 제한된다. 하지만 양자역학은 특정한 편광자의 조합에서는  $|S|$  값이 2를 넘을 수 있다는 것을 예측한다.

본 실험에서는 한 쌍의 선형 편광자를 두 검출기 앞에 설치하고 편광자 1이  $-45^\circ$ 로 고정된 상태에서 편광자 2의 각도를  $0^\circ \sim 180^\circ$ 로 변화시키면서 동시계수를 측정하였다. 그림 2는 4가지 Bell 상태에 대해서 검출기  $D_1$  앞에 놓인 편광자의 각도를 수직방향에 대해  $-45^\circ$ 로 고정시키고,  $D_2$  앞에 놓인 편광자의 각도를 수직편광을 기준으로  $0^\circ$ 에서  $180^\circ$ 까지  $22.5^\circ$ 씩 변화시키면서 측정된 동시계수의 변화에서 선명도 81%의 간섭무늬를 측정하였다. 또한 편광자 1의 각도가 각각  $0^\circ$ 와  $45^\circ$ 이고, 편광자 2의 각도가 각각  $22.5^\circ$ 와  $67.5^\circ$ 로 설치하고 측정된 Bell 매개변수는  $S = 2.502 \pm 0.065$ 로서 Bell 부등식을 위배하는 결과를 얻었다.

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-070-C00029).

**참고문헌**

1. A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
2. J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, Phys. Rev. Lett. **23**, 880 (1969).
3. Paul G. Kwiat, Klaus Mattle, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, Phys. Rev. Lett. **75**, 4337 (1995).

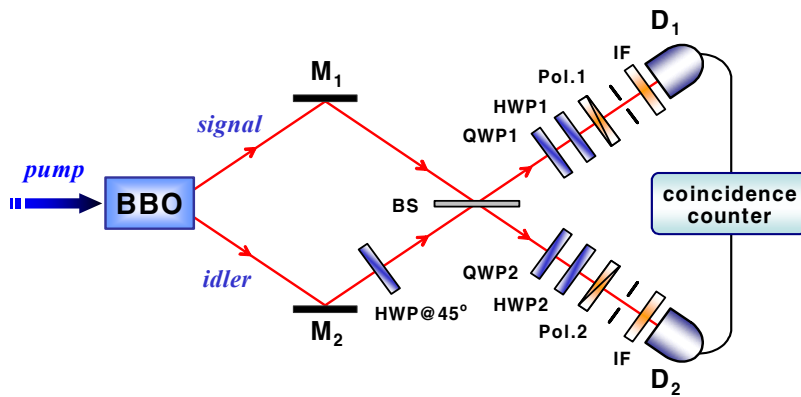


그림 1. 실험장치도.

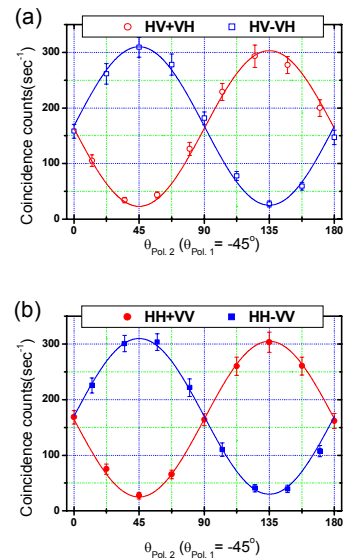


그림 2. 4가지 Bell 상태의 편광분석에 의해 측정된 간섭무늬