

## Photon wavefunction 과 two-photon 위그너 함수

조기영 ,노재우  
 인하대학교 양자광학연구실  
 sperelat@hanmail.net

abstract: 최근 Two-particle 위그너 함수 를 이용한 quantum nonlocality의 검증이 시도되고 있다. 우리는 Coherence function에 대한 two-photon 위그너 함수를 측정하는 방법을 개발했으나, 이를 일반적인 two-particle 위그너 함수로 해석하기 위해서는 photon wavefunction 개념이 필요하다.

Two-photon 위그너 함수와 photon wavefunction 에 대한 논의들을 소개한다.

존 벨이 유명한 벨 부등식을 유도할 때 처음 고려했던 것은 Bohm이 제안한 spin entangled state가 아니라, EPR [1]이 제안한 것과 같은 연속적인 물리량과 관련된 양자 비국소성(Quantum non-locality)였던 것으로 알려져 있다.[2]

그러나, 벨은 이러한 양자상태의 위그너 함수를 분석한 결과, 이 상태가 양자비국소성을 보이지 않을 것이라는 결론을 내리고 two-state system으로 연구를 옮겨갔다.

그 후, 벨의 처음 결론과는 달리 EPR 상태의 위그너 함수를 이용해서 양자비국소성을 검증할 수 있다는 연구가 이어졌는데, 대표적으로 Banaszek과 Wodkiewicz[2]는 Parity 연산자와 위그너 함수의 관계를 이용하여 EPR 상태의 위그너 함수로부터 벨 부등식과 같은 관계를 검증할 수 있다고 주장했다.

Monken[3,4] 등은 그러한 논의를 SPDC 를 통해 생성된 signal-idler photon pair의 transverse position 과 transverse momentum correlation을 이용해 검증하는 연구를 했는데, 이는 SPDC 를 통해 생성된 빛을 Fractional Fourier 변환을 통해 분석하고, 이를 통해 벨 부등식에 대응하는 관계를 측정하는 것이었다.

그렇다면 이러한 two-particle 위그너 함수를 어떻게 측정할 수 있을까?

우리는 최근에 Ghost imaging[5]을 이용하여, two-photon에 대하여 coherence function을 이용해 정의된 위그너 함수를 측정하는 방법을 연구했다. 그러나, 이러한 측정들이 EPR의 논의와 놀라울 정도로 많은 유사점을 가짐에도, two-photon 위그너 함수를 바로 양자역학에서의 two-particle 위그너 함수에 대응시키는 데는 무리가 따른다.

광자는 전자와는 달리 공간상의 한 점에 위치를 가질 수 있는 입자가 아니기 때문에 위치로 양자상태를 정의할 수가 없다.

광자에는 대응하는 위치 연산자가 없고, 양자광학에서의 Coherence function 을 양자역학에서의 파동함수에 바로 대응시키는 데는 무리가 있으며, 따라서 position-momentum 위상공간에 존재하는 위그너 함수와의 대응관계는 불분명해진다.

그러나, 광자를 전자와 마찬가지로 파동함수의 관점에서 바라보려는 시도는 계속해서 있어 왔는데, 그 중에서 90년대 이후 B-B[6] 등이 디랙이 상대론적 양자역학의 전자에 대한 디랙 방정식을 만든 방식에 힌트를 얻어 만들어낸 Photon wavefunction의 이론이 있다.

B-B가 만들어낸 방정식은 ,맥스웰 방정식과 일치하며 Lorentz 불변을 만족하는 것으로 알려져 있다.

그러나, 그 방정식의 파동함수는 광자의 number density가 아니라 ,energy density 에 해당하는 개념이며, 통상의 양자역학적인 파동함수와는 여러 가지로 다른 성질을 지니고 있다.

Smith와 Raymer는 이 파동함수를 측정하는 방법의 하나로, Walmsley[7] 등이 이미 구현한 바 있는 Parity inversion 사냥 간섭계를 이용한 위그너 함수 측정을 이용하여 단일 광자 상태의 transverse coherence 와 관련된 위그너 함수[8]를 구현 바 있다.

이들은 또 두 개의 사냥 간섭계를 이용하여 두 개의 광자에 대한 correlated measurement 를 통해서 two-photon 위그너 함수를 구할 수 있을 것이라 기대하고 있다.

우리는 이러한 Two-paricle 위그너 함수와 two-photon 위그너 함수에 대한 논의들과 연구결과를 소개하고, photon wavefunction 에 대한 논의들이 이들과 어떤 관계를 가지는지 보이코자 한다

#### 참고문헌

- [1]A.Einstein, B.Podolski, and N.Rosen, Physical Review 47,777(1935)
- [2]K.Banaszek and K.Wodkiewicz , Physical Review A 58,4345
- [3]C.H.Monken et al. quant-ph 0605061
- [4]C.H.Monken et al. quant-ph 0612141
- [5]T.B.Pittman et.al. Physical Review A. R3429
- [6]Coherence and Quantum Optics VII,p313(1996)
- [7]Eran Mukamel, Konrad Banaszek, Ian A. Walmsley, and Christophe Dorrer  
Optics Letters 28,1317
- [8]Brian J. Smith, Bryan Killelt, M. G. Raymer, I. A. Walmsley, and K. Banaszek  
Optics Letters 30,3365