

고전 상관관계를 갖는 두 빛을 이용한 고스트 이미징

배삼용 · 윤선현[†]

전남대학교 물리학과

Ⓣ 500-757 광주광역시 북구 용봉동 300번지

(2005년 9월 5일 받음, 2005년 11월 23일 수정본 받음)

빛의 양자역학적 성질인 얽힘(entanglement)을 이용한 양자 고스트 이미징(quantum ghost imaging)은 고전적인 동시계수 측정(classical coincidence measurement)에 의해서도 정성적으로 재현됨이 알려져 있다^[1,2]. 본 실험에서는 진행방향에서 고전적인 상관관계를 가지는 빛을 이용하여 고전 동시계수 이미징(classical coincidence imaging) 실험을 수행하여 양자역학적 얽힘 상태에서 볼 수 있는 현상들을 관측하고 고스트 이미지가 나오는 원리를 분석하였다. 고전적인 상관관계를 가지는 광원은 아르곤이온 레이저에서 나오는 빛의 경로를 스피커에 부착되어 회전하는 거울에 반사시켜 진행방향에 대해 상관관계를 가지도록 만들어 사용하였다.

주제어 : Ghost imaging, Entangled state, Classical correlation.

I. 서 론

광학장의 고품형성과 함께 비고전적 상태에 대한 이해와 이를 이용하는 실험들이 개척되어가는 마당에서 특히 광학시스템에 대한 정보를 추출하는 새로운 방법으로 두 빛을 이용한 동시계수 이미징^[3] 기술이 등장하였다. 이 기술에서는 광자쌍을 생성하는 광원이 필요한데 광자쌍 중 한 개의 광자는 알려진 광학시스템(reference system)을 지나며, 다른 한 개의 광자는 알려지지 않은 광학시스템(test system)을 통과하게 된다(그림 1).

레퍼런스 시스템을 통과한 광자의 위치는 검출기배열에 기록이 되고, 다른 검출기는 테스트 시스템을 통과한 광자의 검출여부만을 기록하며, 테스트 시스템의 이미지는 특정한 동시계수 통계에 의해 레퍼런스 검출기에 나타나게 된다. 동시계수 통계는 레퍼런스 검출기를 테스트 검출기에 의해 계이팅함으로써 얻어진다.

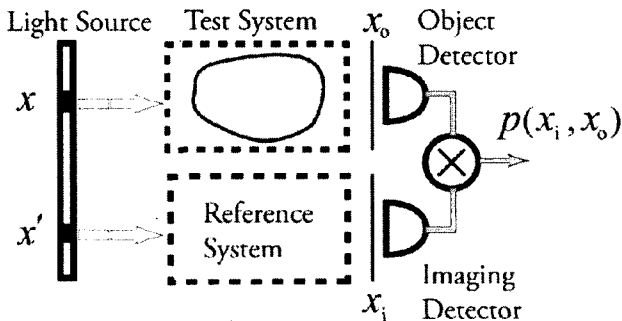


그림 1. 고전적 또는 양자적 상관관계를 갖는 두 빛을 이용한 동시계수 이미징의 모식도.

이러한 기술에 대한 초기 구현은 양자적 얽힘상태에 있는 광자쌍 광원을 이용해서 이루어졌는데^[3,4] 그 후 이러한 광원을 이용한 이미징은 고전적 광원으로는 흉내 낼 수 없는 몇몇 통계적 속성을 가지지만^[5-7] 동시계수 이미징 기술에 그러한 양자적 얽힘이 반드시 필요한 것은 아니라는 연구와 실험들^[1,2]이 행해졌다.

본 논문에서는 Bennink 등이 제안한 방법^[2]을 응용하여 진행방향에서 고전적 상관관계를 갖는 두 빛을 이용하여 겹실험의 고스트 간섭무늬를 측정하고 무늬가 나타나는 원리를 자세히 분석하여 양자 고스트 이미지가 양자역학적으로 얽힌 광자의 어떤 성질에 의하여 일어나는지를 규명하였다.

II. 본 론

실험 장치는 그림 2와 같이 장치했으며, 실험의 너비는 100 μm 이고 실험 중심의 간격은 700 μm 이다. 진행방향에서 상관관계를 갖는 두 빛의 광원은 아르곤이온 레이저와 회전거울, 그리고 빛살가르개로 이루어져있다.

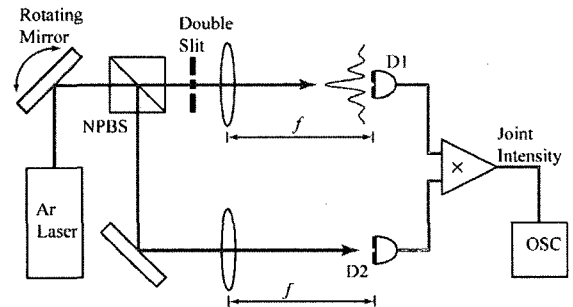


그림 2. 고전적 상관관계를 갖는 두 빛을 이용한 고스트 간섭무늬 측정을 위한 실험장치도.

[†]E-mail: sunyoun@chonnam.ac.kr

회전거울과 빛살가르개를 이용해서 진행방향이 계속 변하지만 서로 상관관계를 갖는 두 빛살이 만들어진다. Bennink의 실험에서는 검류계에 거울을 부착하여 회전거울을 만든 것과는 다르게 본 실험에서는 개인용 컴퓨터에서 사용하는 소형 스피커를 이용하여 거울을 회전시켰다(그림 3). 평면거울을 소형 스피커위에 중심에 부착하고 거울의 한쪽 수직면이 진동할 수 없도록 고정하면 부착된 거울은 스피커에 입력된 파형발생기의 신호에 따라 고정된 변을 축으로 왕복 회전운동을 하게 되고 거울에서 반사된 빛살은 거울과 스피커 계의 고유공진진동수인 약 330Hz 정도의 반복 울로 싹트 및 검출기 등을 훑게 된다. 실험에서는 왕복운동 가운데 돌아올 때의 훑음은 고려하지 않고 한쪽 방향으로의 훑음만 고려한다.

빛살가르개에서 나온 두 빛살중 하나의 빛살(물체쪽 빛살)은 접실틈을 지나면서 간섭무늬를 만들고 검출기 D₁(물체쪽 검출기)에 의해 측정된다. 다른 하나의 빛살(기준 빛살)은 렌즈를 통해 모아져서 직선이동단에 장착된 검출기 D₂(이미징 검출기)에 의해 측정된다. 두 검출기에서 나오는 신호는 디지털 오실로스코프에 의해 기록된다. 이제 몇 초 동안(100스캔) 두 신호의 곱을 측정해서 평균하면 곱세기(joint intensity)의 평균을 얻게 된다. 이와 같은 측정을 이미징 검출기의 위치를 바꿔가며 반복하면 그림 4와 같은 결과를 얻게 된다.

이제 이와 같은 고스트 간섭무늬가 어떻게 나오게 되는가를 자세히 살펴보자.

먼저 회전하는 거울에 의해 빛살들이 각 검출기를 스캔할 때 오실로스코프에는 어떤 파형이 나타날지를 알아보자. 거울을 고정시키고 접실틈을 지난 빛살들을 검출하는 물체쪽 검출기를 스캔하면서 측정하면 검출기의 위치가 변함에 따라 간섭무늬가 나타나는데 이때 제0차의 밝은 무늬는 회절각 θ 가 0인 위치에 나타난다. 이는 빛살이 싹트면에 수직으로 입사할 때의 간섭무늬의 위치이다. 이제 거울이 회전하여 빛살이 싹트면에 수직인 직선에서 어떤 각 α 만큼 기울어져 비스듬히 들어온다면(그림 5) 밝은 무늬가 나타날 간섭조건은

$$d \sin \alpha + d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

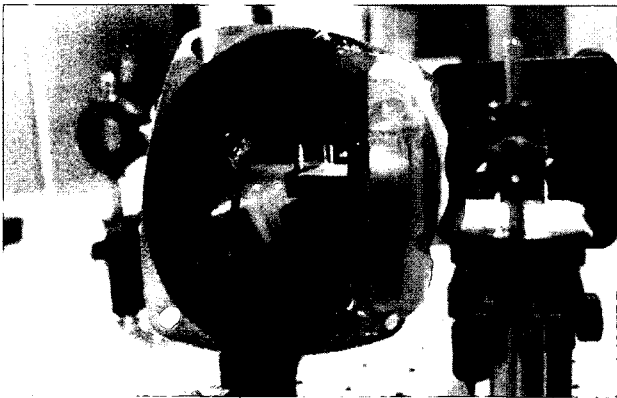


그림 3. 평면거울과 스피커로 구성된 회전거울.

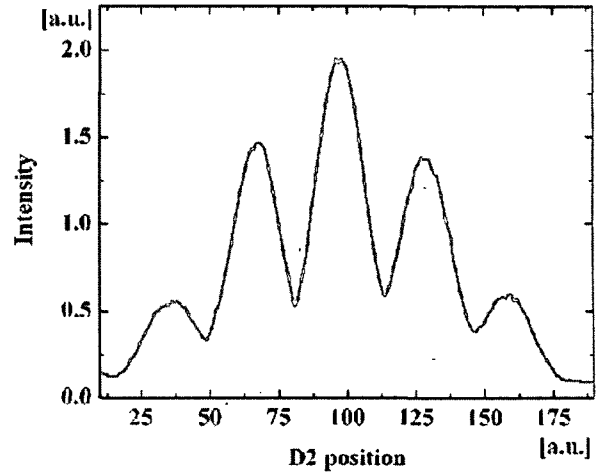


그림 4. 물체쪽 검출기와 이미징 검출기와의 곱세기에 의한 고스트 간섭 무늬

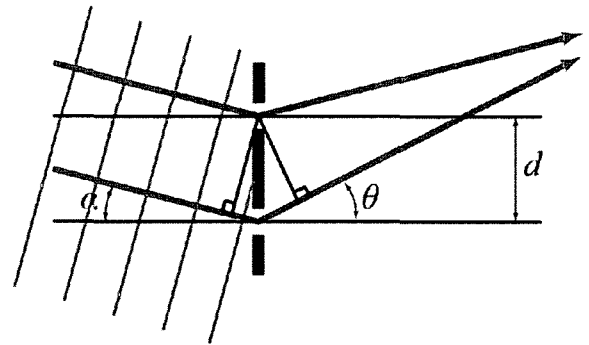


그림 5. 싹트면에 비스듬히 들어오는 빛살에 의한 간섭조건.

가 된다. 여기서 d 는 싹트간격, λ 는 빛살의 파장, n 은 무늬의 차수를 나타내는 정수이다.

제0차의 밝은 간섭무늬는 $n=0$ 일 때이므로 $\theta=-\alpha$ 인 위치에 나타난다. 즉 간섭무늬의 위치가 이동되었는데, 입사각 α 는 거울의 회전각과 같으므로 간섭무늬는 거울이 회전함에 따라 그 회전각만큼 이동하게 된다(그림 6).

그리고 이제 각 α 를 무늬의 위치를 나타내는 좌표로 사용할 수 있으며 검출기의 위치도 이 좌표를 이용하여 나타내겠다. 이는 싹트가 없어서 회절각 θ 를 말할 수 없는 이미징 검출기쪽의 경우에도 α 를 이용하여 위치를 나타내기 위함이다.

이제 물체쪽 검출기를 $\alpha=0$ 일 때 제0차 밝은 간섭무늬가 나타나는 위치에 고정하고 거울을 회전시키면서 그 회전각에 따른 검출기의 신호변화를 보면(그림 6) 결국 각이 변함에 따라 공간상에 분포한 간섭무늬가 검출기를 휩쓸고 지나가게 되는 것이므로 검출기의 신호는, 검출기의 입사면의 너비가 간섭무늬의 너비보다 크지 않다면, 시간에 따라 간섭무늬를 이루고 가로축이 시간인 오실로스코프 화면에 그 간섭무늬가 나타나게 된다.

결국 거울을 회전시킨다는 것은 공간상에 퍼져있는 간섭무늬의 시간에 대한 함수로의 변환을 의미하며 따라서 CCD

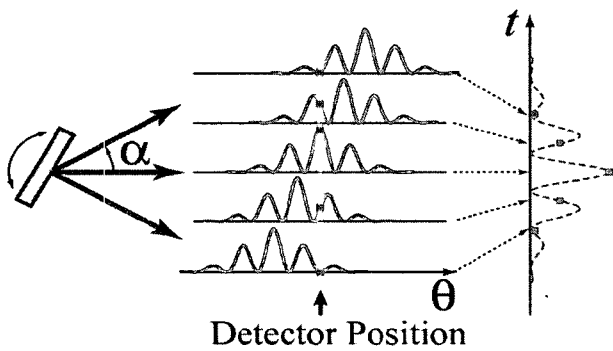


그림 6. 거울의 회전각 α 에 따른 간섭무늬의 이동과 고정된 검출기에 나타나는 신호. 거울이 회전하면서 간섭무늬가 검출기를 휩쓸고 지나가며 검출기의 신호는 시간에 따라 간섭무늬를 이룬다.

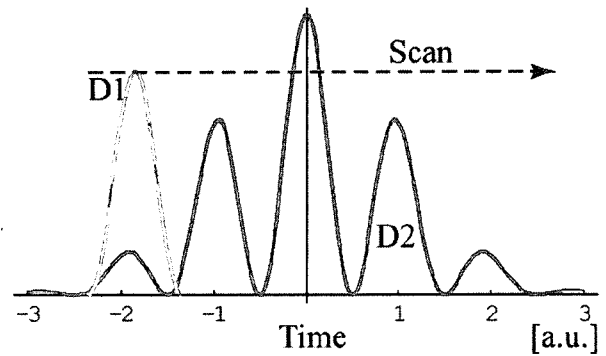


그림 7. 이미징 검출기를 $-|a_1|$ 에서 $+|a_1|$ 까지 스캔할 때의 두 무늬의 상대적 위치

등 검출기배열(detector array)을 이용하지 않고 단일 검출기만으로 그 위치를 변화시키지 않고도 바로바로 오실로스코프를 통해 초당 수 백회씩 간섭무늬의 관찰 및 기록이 가능하게 된다.

이미징 검출기에는 장애물을 거치지 않은 기준빛살이 들어오므로 거울을 고정하고 검출기를 스캔해하면서 측정하면 검출기의 위치가 변함에 따라 가우스 분포 모양의 하나의 밝은 봉우리를 갖는 무늬가 나타난다. 이 봉우리의 위치 역시 회전거울의 회전각 α 를 좌표로 하여 나타낼 수 있다.

이제 이미징 검출기를 $\alpha=0$ 일 때 밝은 봉우리가 나타나는 위치에 고정하고 거울을 회전시키면서 그 회전각에 따른 검출기의 신호변화를 보면 물체쪽 검출기에서와 같은 원리로 시간에 따른 밝은 봉우리 무늬를 얻게 된다. 또한 두 검출기에서 무늬의 위치를 결정하는 회전각 α 는 하나의 회전거울에 의한 것이므로 두 검출기에서 무늬의 위치는 서로 상관관계를 가지고 있다.

이미징 검출기에서의 밝은 봉우리 무늬의 시간상에서의 위치를 결정하는 요소는 이미징 검출기의 위치이다. 검출기의 위치가 거울이 $\alpha=a_1$ 일 때 밝은 봉우리 무늬의 위치일 때, 밝은 봉우리 무늬의 시간축상에서의 위치는 거울이 $\alpha=0$ 에서 $\alpha=a_1$ 까지 회전하는데 걸린 시간만큼 지연된다. 따라서 이미징 검출기의 신호와 물체쪽 검출기의 신호를 오실로스코프 화면이 함께 띄어 놓고 보면 이미징 검출기의 위치에 따라 물체쪽 검출기의 간섭무늬와 이미징 검출기의 밝은 봉우리무늬의 상대적인 위치가 다르게 된다.

이제 이미징 검출기의 위치를 $\alpha=-|a_1|$ 에서 $\alpha=+|a_1|$ 까지 스캔하면서 오실로스코프를 통해 두 무늬를 관찰해보면 이미징 검출기의 밝은 봉우리 무늬가 물체쪽 검출기의 간섭무늬를 왼쪽에서 오른쪽으로 스캔하게 된다(그림 7). 실제 회전거울은 한 쪽으로만 회전하는 것이 아니고 왕복 회전하므로 오실로스코프의 시간 간격을 크게 하면 두 가지 방향의 스캔하는 모습을 모두 볼 수 있으며, 시간 간격을 한번 스캔할 정도로 하고 시간지연을 조절하면 두가지중 하나를 자세

히 볼 수 있다.

이제 두 검출기 신호를 서로 곱해서 얻어지는 곱세기를 구해보자. 그림 7에서 보듯이 곱세기는 두 무늬의 상대위치에 따라 그 값이 달라지는데, 이미징 검출기의 밝은 봉우리 무늬의 모양 또는 너비는 검출기에 들어오는 빛살의 너비 (beam width)에만 의존하고 검출기의 위치(거울에서 검출기까지의 거리는 변하지 않고 가로위지만 변함)에 무관하게 일정하므로 곱세기의 이미징 검출기의 위치에 대한 분포모양은 물체쪽 검출기의 간섭무늬에서 이미징 검출기의 밝은 봉우리가 위치한 곳의 세기에 따라 결정된다. 따라서 이미징 검출기를 스캔하면 밝은 봉우리 무늬가 간섭무늬의 끝에서 다른 끝으로 스캔하게 되고 이때의 곱세기는 간섭무늬의 패턴을 그대로 따르게 된다.

물체쪽 검출기에서의 간섭무늬와 곱세기에 의한 고스트 간섭무늬의 모양을 비교하기 위해 그림 8에 두 무늬를 스케일을 맞추어서 함께 그려 보았다. 이미징 검출기의 위치는 50 μm 씩 이동시켰으며 각 위치에서 거울이 100회 스캔한 각 무늬를 평균해서 곱한 무늬의 평균을 점으로 나타내었다.

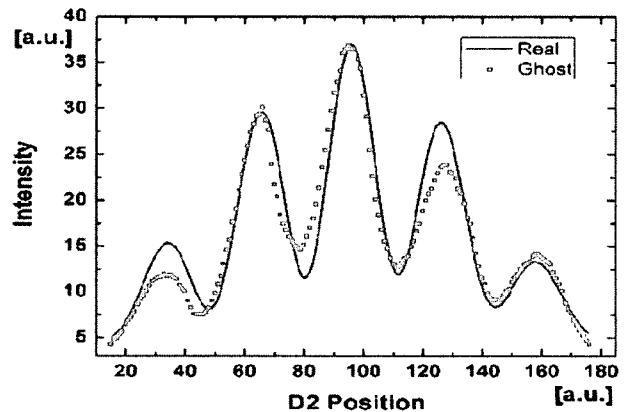


그림 8. 물체쪽 검출기의 간섭무늬와 두 검출기의 곱세기에 의한 고스트 간섭무늬.

III. 결 론

두 빛을 이용한 동시계수 혹은 고스트 이미징 기술은 상관관계를 갖는 광원으로 두 시스템을 비추고 레퍼런스 시스템을 통과한 빛의 통계로부터 테스트 시스템의 이미지를 추출하는 기술이다. 양자적 얽힘상태인 두 빛을 이용한 고스트 이미징은 고전적 상관관계를 갖는 두 빛을 이용한 동시계수 이미징으로는 흉내낼 수 없는 몇몇 통계적 특성을 가지지만 [5-7] 동시계수 이미징에 양자적 얽힘상태의 광자쌍 광원이 반드시 필요한 것은 아니라는 것이 연구되어있다^[1,2]. 본 논문에서는 고전적 상관관계를 갖는 두 빛을 이용하여 동시계수 이미징 기법에 의해 겹실름의 고스트 간섭무늬를 측정해 보았으며 고전적 상관관계를 갖는 두 빛에서 고스트 간섭무늬가 추출되는 원리를 자세히 분석함으로써 양자 고스트 이미지가 양자역학적으로 얽힌 광자가 얽힘상태의 여러 현상 중 두 광자의 진행 방향이 같이 연관되어있지만 하면 나타날 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2002-070-C00029)과 한국과학기술부(MOST)의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] R. Bennink, S. Bentley, and R. Boyd, "Two-Photon Coincidence Imaging with a Classical Source", *Phys. Rev. Lett.* vol. 89, no. 11, pp. 3601-3604, 2002.
- [2] R. Bennink, S. Bentley, R. Boyd, and J. Howell, "Quantum and Classical Coincidence Imaging", *Phys. Rev. Lett.* vol. 92, no. 03, pp. 3601-3604, 2002.
- [3] T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov, and A. V. Sergienko, "Optical imaging by means of tow-photon quantum entanglement" *Phys. Rev. A.* vol. 52, no. 5, pp. 3429-3432, 1995
- [4] D. V. Strekalov, A. V. Sergienko, D. N. Klyshko, and Y. H. Shih, "Observation of Two-Photon Ghost Interference and Diffraction", *Phys. Rev. Lett.* vol. 74, no. 18, pp. 3600-3603, 1995
- [5] Ayman F. Abouraddy, Bahaa E. A. Saleh, Alexander V. Sergienko, and Malvin C. Teich, "Role of Entanglement in Two-Photon Imaging", *Phys. Rev. Lett.* vol. 87, no. 12, pp. 3602-3605, 2001
- [6] Milena D'Angelo, Yoon-Ho Kim, Sergei P. Kulik, and Yanhua Shih, "Identifying Entanglement Using Quantum Ghost Interference and Imaging", *Phys. Rev. Lett.* vol. 92, no. 23, pp. 3601-3604, 2004.

Ghost Imaging With Classically Correlated Beams

Samyong Bae and Sun-Hyun Youn[†]

*Department of Physics,
Chonnam National University, Gwangju, 500-757*

[†]*E-mail: sunyoun@chonnam.ac.kr*

(Received September 5, 2005, Revised manuscript November 23, 2005)

Quantum ghost imaging uses quantum mechanically entangled photons to form an image of an object. The quantum ghost image is also obtained by means of classical coincidence measurements with a classically correlated light source[1,2]. In this work we performed classical coincidence imaging experiments with classically correlated beams in their direction of propagation. We observed the ghost interference patterns which were usually made by quantum mechanically entangled states and we also analyze in detail the mechanism of the ghost imaging with classically correlated lights. We made? the classically correlated source with an Ar laser and controlled the direction of the light by a mirror? mounted on a small speaker.

OCIS Codes : 030.0030, 050.0050, 270.0270.