

빛의 양자성과 응용

김윤호 · 홍정기

서론: 빛이란 무엇인가?

성경에 의하면 ‘빛’은 창조의 첫째 날에 만들어졌다.^[1] 이 ‘빛’이 정확히 무엇을 의미하는지를 알 수 없듯이 ‘빛이란 무엇인가?’라는 오래된 질문은 쉽게 답할 수 있는 성질의 것이 아니어서 아직도 만족할만한 해답은 찾지 못했다고 보는 견해가 지배적이다.^[2]

일상생활에서 빛이 있다 또는 없다는 것은 무엇을 볼 수 있다 또는 없다는 것과 직접적으로 관련이 있기 때문에 빛의 조작에 관한 연구는 지금부터 수천 년을 거슬러 올라간다. 예를 들어 우리 주변에서 가장 흔히 볼 수 있는 거울은 BC 1900년경에 이미 사용되고 있었다는 것이 이집트에서 발견된 유물로 확인되었다. 그리고 빛의 반사에 관한 법칙, 불을 만드는 유리 (렌즈) 등은 BC 400~BC 300년경의 그리스 문서에 언급되어 있다.^[3]

빛이 무엇인가에 대한 최초의 물리적인 이론은 17세기 Issac Newton의 입자론(corpuscular theory) 및 Robert Hooke의 파동이론(wave theory)이다. 하지만 19세기 초 Thomas Young이 빛의 간섭을 실험적으로 보임에 의해 빛이 파동현상이라는 제안이 추진력을 얻기 시작했다. 그리고 19세기 말 James Clerk Maxwell이 제안한 빛의 전자기파(electromagnetic wave) 이론이 Heinrich Rudolf Hertz에 의해 실험적으로 검증되면서 빛이 전자기 파동현상이라는 것은 부정할 수 없는 사실로 받아들여지게 되었다.

하지만 20세기 초 빛의 전자기파 이론과 고전적인 원자모델로는 설명이 불가능한 새로운 관측결과들이 보고되기 시작

했다. 가열된 물체에서 나오는 빛 즉, 흑체복사의 스펙트럼이 빛의 전자기파 이론과 에너지 등분배 원칙을 이용한 계산과 맞지 않음이 밝혀졌고 수소 원자에서 나오는 빛을 관측한 결과 스펙트럼이 연속적이지 않다는 것이 보고되었다. 또 광전 효과(photo-electric effect)에 관한 실험은 빛의 전자기파 이론으로 완벽히 설명할 수 없는 등 여러 가지 문제점이 나타나기 시작했다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 노력에서부터 20세기 초 양자역학이 나타나게 되었다. Max Planck는 빛의 에너지가 $h\nu$ 의 정수배로만 방출된다는 가설로 흑체복사의 문제를 해결하였으며 Niels Bohr는 수소원자의 전자궤도를 양자화함으로써 수소원자의 불연속 스펙트럼을 설명할 수 있게 되었다. 또 Albert Einstein은 빛이 $h\nu$ 의 에너지를 갖는 광자(lightquanten)들로 구성되어 있다는 가설을 이용해 광전효과를 설명할 수 있었다. 재미있는 것은 빛의 에너지 양자화를 제안한 Planck나 Einstein 모두 처음에는 이를 단순한 수학적 가설 또는 이해를 돕기 위한 가설의 하나로 생각했다는 것이다. 하지만 1923년 Arthur Compton의 실험에 의해 빛의 양자(quantum of radiation)가 운동량과 에너지를 가진다는 것이 보여지면서 빛의 입자론이 다시 등장하게 된다.

이러한 일련의 실험적인 발견들을 통해서 우리는 빛이 어떤 때는 파동같이, 어떤 때는 입자같이 행동한다는 사실을 알게 되었다. 질량이 국소적으로 존재하는 ‘입자’와 에너지가 시공간에 퍼져서 존재하는 ‘파동’은 공존할 수 없는 전혀 다른 두 가지 물리적인 상태이므로 하나의 물체(object)가 서로 전

저자약력

김윤호 박사는 University of Maryland, Baltimore County(UMBC)에서 양자광학 실험으로 박사학위(2001)를 취득하였다. 이후 Oak Ridge National Laboratory에서 Post-doctoral Researcher(2001-2002) 및 Eugene P. Wigner Fellow(2002-2004)로 근무하였으며 현재 포항공과대학교 물리학과에 재직 중이다. (yoonyho@postech.ac.kr)

홍정기 박사는 University of Rochester 물리학 박사(1988)로서 1990년부터 포항공과대학교 물리학과 교수로 재직 중이다.

참고문헌

- [1] 창세기 1장 3~4절: “하나님이 가라사대 빛이 있으라 하시매 빛이 있었고 그 빛이 하나님의 보시기에 좋았더라 (And God said, Let there be light: and there was light. And God saw the light, that it was good:).”
- [2] The Nature of Light: What is a photon?, OPN Trends, Vol. 3, October 2003.
- [3] www.wikipedia.com

혀 다른 두 가지의 상태를 보인다는 것은 물론 이해하기 쉽지 않다.

지금은 양자역학이 막 발생하던 20세기 초에 비해 엄청난 기술적인 발전이 있었고 대부분의 사람들이 빛을 이용하는 장치를 매일 사용한다. 글을 쓰고 있는 필자의 책상에는 LCD monitor와 광마우스가 놓여 있으며 필자의 컴퓨터에는 DVD와 CD를 기록할 수 있는 장치가 설치되어 있다. Beam projector와 레이저 포인터가 없는 세미나실은 생각할 수 없고 또 광통신망을 이용해 전화를 하고 레이저를 이용해서 수술도 할 수 있게 되어있다. 지난 수십 년의 연구를 통해서 우리는 빛을 이용하는 방법에 대해 많이 알게 되었다. 그러면 빛이 무엇인가라는 질문에 대한 대답은 잘 할 수 있을까? 많은 교과서에서 빛은 광자(photon)라는 입자로 구성되어 있고 또 파동-입자의 이중성(wave-particle duality)에 의해 파동현상이 생긴다고 설명한다. 하지만 역사적으로 양자역학의 대가들조차도 이 질문에 대한 대답은 가급적 피하려고 하였다. Richard Feynman은 빛(광자)의 간섭현상에 대해서 “Nobody knows, and it’s best if you try not to think about it”^[5] 이라고 했으며, Albert Einstein 조차도 다음과 같이 이야기했다고 한다^[6]: “All those fifty years of conscience brooding have brought me no closer to the answer to the question: what are light quanta? Nowadays every Tom, Dick and Harry thinks he knows it, but he is mistaken.”

그렇다면 양자역학의 태동을 가져온 위에 언급된 현상들은 빛의 파동론으로는 정말 설명이 불가능할까? 흥미롭게도, 비록 많이 알려지지는 않았지만, 20세기 초에 빛의 입자성의 증거로 여겨지던 모든 현상들은 빛의 전자기파 이론으로 설명할 수 있음이 이미 보여졌다. (물질을 양자화하고 빛을 고전적인 파동으로 취급하는 이론을 semi-classical theory라고 한다.)^[4]

그럼에도 불구하고 전자기 파동이 아닌 광자개념이 반드시 필요한 이유는 비고전적인 빛(nonclassical light)이 존재하기 때문이다. 이러한 양자광학적인 현상의 몇 가지 예를 들자면, 단광자 상태(single-photon state), 광자간의 양자얽힘(quantum entanglement), 다광자 간섭현상(multi-photon interference), 양자지우개(quantum eraser) 등을 말할 수 있다. 그러면 빛의 양자화가 무엇을 의미하는지에 대해 간략히 살펴보도록 하자.

빛의 양자화

Planck, Bohr, Einstein 등에 의해 빛이 물질에 흡수 및

방출될 때 에너지가 어떤 기본량의 정수배로 주어지는 덩어리로 작용한다는 가설로 빛의 입자설이 물리학에 다시 도입되기는 하였지만 빛의 입자가 어떻게 간섭현상을 보이는지는 설명할 수가 없었다. 1927년 Paul Adrien Maurice Dirac은 빛의 양자이론(quantum theory of radiation)을 발표하였는데, 이로써 비로소 빛의 양면성을 동시에 설명할 수 있게 되었다.^[7,8] 여기서 주의할 점은 빛의 양자화(light quantization)가 Newton이 제안한 것과 같은 빛의 입자(corpuscles)로써의 광자를 의미하지 않는다는 것이다.

Dirac에 의해 제안된 빛의 양자화를 아주 간단히 설명하자면 다음과 같다. 빛, 즉, 전자기장의 모드(electromagnetic mode)를 조화진동자(simple harmonic oscillator)와 같이 취급하여 각 모드에 있는 광자의 생성(creation operator) 및 소멸 연산자(annihilation operator)로 전자기장의 에너지 연산자(즉 Hamiltonian operator)를 나타낸다. 이때 양자화된 전자기장의 Hamiltonian은 다음과 같이 표현된다:

$$\begin{aligned} \mathcal{H} &= \frac{1}{2} \int_V (\epsilon_0 |E|^2 + \mu_0 |H|^2) dV \\ &= \hbar \sum_j \omega_j \left(a_j^\dagger a_j + \frac{1}{2} \right). \end{aligned}$$

여기서 E 와 H 는 각각 빛의 전기장과 자기장을 나타내며 $\hbar\omega_j$ 는 모드 j 에 속하는 광자로서 생성연산자 a_j^\dagger 에 의해 생성된다. 이 Hamiltonian의 고유상태는 $|n_1, n_2, \dots, n_j\rangle$ 로 주어지는데, $|n_j\rangle$ 는 j 번째 모드에 N 개의 광자가 존재하는 광자의 수 상태(photon number state) 또는 Fock state를 나타낸다. (주목할 것은 이 모드에 광자가 하나도 없다고 하더라도 $\frac{1}{2}\hbar\omega_j$ 만큼의 에너지 고유치가 존재하는데 이는 잘 알려진 진공의 zero-point 에너지이다.) Fock state는 전자기장이 양자화되었을 때 나타나는 대표적인 현상 중의 하나이며 특히 $n=1$ 인 상태를 단광자 상태(single-photon state)라고 한다. 단광자 상태를 만드는 것은 매우 어려워 실험적인 관측은 1970년대 말에 들어서야 보고되기 시작했는데, 양자암호의 구현에 효과적으로 사용될 수 있다는 것이 보여진 후 최근 들어 더욱 활발히 연구되고 있다.

참고문헌

- [4] 한 가지 예로 다음의 논문을 들 수 있다: J.P. Dowling, Foundations of Physics **28**, 855 (1998).
- [5] R.P. Feynman, *QED, The strange theory of light and matter* (Princeton Univ. Press, 1985).
- [6] 1954년도에 한 말이라고 전해짐.
- [7] P.A.M. Dirac, Proc. Roy. Soc. **A114**, 243 (1927).
- [8] E. Fermi, Rev. Mod. Phys. **4**, 87 (1932).

현대 양자광학의 시작

1920년대 후반 Dirac에 의해 빛의 양자화가 제안되었지만, 많은 사람들은 현대 양자광학의 실질적인 시작점을 Robert Hanbury Brown과 Richard Q. Twiss의 실험(1956년~1957년)으로 본다.^[9,10] Hanbury Brown과 Twiss의 주 관심사는 멀리 떨어져 있는 별의 각지름(angular diameter)의 정확한 측정이었다. Michelson 천체 간섭계(stellar interferometer)를 이용하여 약간의 각도를 가지고 먼 별에서 오는 두 빛을 간섭시키면 별의 각지름의 측정이 가능하지만 이 두 빛은 서로 다른 경로를 지나오면서 진폭과 위상이 불규칙적으로 바뀌게 된다. 따라서 두 빛 사이에 상대위상이 일정하지 않아서 간섭무늬가 안정적이지 않게 되므로 정확한 각지름의 측정이 어렵거나 불가능해진다. Hanbury Brown과 Twiss는 두 개의 광검출기(photo-detector)를 이용해 두 곳에서 빛을 따로 측정한 다음 각 광검출기에서 나오는 전류(photo-current)의 상관관계를 측정함으로써 간섭무늬의 불안정성을 없앨 수 있다는 제안을 하였다. 이를 빛의 강도 간섭계(intensity interferometer)라고 한다.

이 실험이 가능하려면 별과 같은 열광원(thermal light source)에서 오는 빛 즉 광자들이 결맞음 시간(coherence time)내에 광검출기에 도달할 때 이 광자들간의 도착시간에는 시간적인 상관관계(temporal correlation)가 있어야만 한다. 1956년 Hanbury Brown과 Twiss는 그림 1과 같은 실험장치를 이용해서 광자의 도착시간에 상관관계가 존재함을 발표하였다.^[9] 열광원을 이용한 Hanbury Brown-Twiss 실험은 고전적인 전자기파 이론으로 어느 정도 설명은 가능하였다. 하지만 빛의 결맞음(optical coherence)에 관한 파동의 개념으로는 광자를 하나하나 측정하는 이러한 새로운 형태의 실험 결과를 완전히 설명하기에는 불충분 하였다.^[10]

이러한 관측결과들을 기반으로 하여 1963년 Roy Glauber는 빛의 결맞음에 관한 양자이론을 발표하였다.^[11] 이 논문에서 Glauber는 빛의 결맞음을 N 차수의(N -th order) 양자역학적 상관관계 함수(correlation function)와 연결시켰는데, 이 N 차수의 상관관계 함수를 특정 빛의 상태에 대해서 계산을 하면 N 차수의 결맞음 또는 간섭현상을 예측할 수 있다.

먼저 Glauber의 상관관계 함수가 어떤 식으로 정의되는지 간단히 살펴보자. Maxwell 방정식에서 나타나는 전기장은 시공간에서 진동하기 때문에 $E = E_0 \alpha \sin(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 α 는 차원이 없는 진폭을 나타낸다. 수학적으로 \sin 함수를 복소수로 나타내면 계산이 간단해지기 때문에 전기장을 다음과 같이 나타내는 경우가 많다:

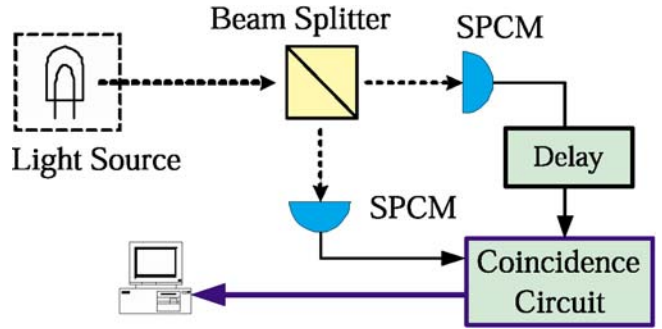


그림 1. Hanbury Brown-Twiss 실험장치. 광원에서 오는 빛을 50:50 beam splitter로 나눈 다음 각각의 빛을 광검출기(SPCM)로 측정한다. Delay에 따른 단위시간당 두 SPCM이 동시에 광자를 측정하는 횟수를 coincidence circuit을 이용해 PC에 기록한다.

$$E = E_0 \alpha \exp\left(i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)\right) + c.c. = E^{(+)} + E^{(-)}.$$

여기서 $c.c.$ 는 복소공액(complex conjugate)을 말한다. 고전 광학에서 이와 같이 양의 주파수 부분($E^{(+)}$)과 음의 주파수 부분($E^{(-)}$)을 나누어서 표시하는 것은 순전히 수학적 간단함을 위한 것이다. 하지만 양자광학에서는 차원이 없는 진폭을 나타내는 α 가 양자화되어 연산자로 바뀌게 된다. 즉, $\alpha \rightarrow a$ (소멸 연산자) 및 $\alpha^* \rightarrow a^\dagger$ (생성 연산자)로 바뀌게 된다. 따라서 양자광학에서 양의 주파수 부분($E^{(+)}$)은 광자의 소멸과 관련이 있는 연산자가 되고 음의 주파수 부분($E^{(-)}$)은 광자의 생성과 관련이 있는 연산자가 되므로 어느 부분도 물리적으로 무시할 수 없게 된다.

이러한 연산자를 이용하여 특정상태의 빛에서 광자 하나가 광검출기에 흡수될 확률을 계산할 수 있다. Glauber는 이러한 확률을 일반화하여 다음과 같은 1차 상관관계함수(1st-order correlation function)를 정의하였다:

$$G^{(1)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2; t_1, t_2) = \langle E^{(-)}(\vec{r}_1, t_1) E^{(+)}(\vec{r}_2, t_2) \rangle.$$

여기서 $\langle \dots \rangle$ 은 특정 양자상태에 대한 기대치를 의미하고, 따라서 특정 위치 \vec{r} 에 놓인 광검출기에 광자 하나가 시간 t 에 측정될 확률은 곧 $G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t, t)$ 에 비례하게 된다. 이 1차 상관관계 함수로부터 1차 결맞음 정도(1st-order degree of coherence)를 다음과 같이 정의할 수 있다:

참고문헌

- [9] R. Hanbury Brown and R.Q. Twiss, Nature **177**, 272 (1956); R. Hanbury-Brown and R.Q. Twiss, Nature **178**, 1046 (1956).
- [10] R. Hanbury-Brown and R. Q. Twiss, Proc. of the Royal Society of London A, **242**, 300 (1957); R. Hanbury-Brown and R. Q. Twiss, Proc of the Royal Society of London A, **243**, 291 (1958).
- [11] R.J. Glauber, Phys. Rev. **130**, 2529 (1963).

$$g^{(1)}(\vec{r}, \tau) = \frac{G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t, t + \tau)}{\sqrt{G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t, t)G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t + \tau, t + \tau)}}.$$

이 $g^{(1)}(\vec{r}, \tau)$ 함수는 결국 하나의 광검출기에 광자가 시간 t 에 도착할 확률과 시간 $t + \tau$ 에 도착할 확률사이의 상관관계를 적절히 정규화(normalization) 한 것이다. 따라서 고전광학에서 사용되는 모든 간섭계의 (즉 광검출기 하나를 사용하여 간섭현상을 측정하는 간섭계) 출력신호는 $g^{(1)}(\vec{r}, \tau)$ 함수로 완벽히 설명이 가능하다.

그렇다면 Hanbury Brown-Twiss의 실험에서와 같이 광검출기가 두 개 사용되었을 경우는 어떻게 할까? 이 경우 두 개의 광검출기에서 각각 광자가 하나씩 측정될 확률을 계산하여야 하는데, 이를 일반화 하면 다음과 같은 2차 상관관계 함수(2nd order correlation function)를 정의할 수 있다.

$$G^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \vec{r}_3, \vec{r}_4; t_1, t_2, t_3, t_4) = \langle E^{(-)}(\vec{r}_1, t_1)E^{(-)}(\vec{r}_2, t_2)E^{(+)}(\vec{r}_3, t_3)E^{(+)}(\vec{r}_4, t_4) \rangle.$$

Hanbury Brown-Twiss 실험처럼 beam splitter 뒤에 놓인 두 개의 광검출기 및 coincidence circuit 전체가 마치 하나의 광검출기가 두 개의 광자를 일정한 시간 간격을 두고 측정하는 것과 같은 효과를 보일 경우, 적절히 규격화된 2차 결맞음 정도(2nd-order degree of coherence)를 다음과 같이 정의한다:

$$g^{(2)}(\vec{r}, \tau) = \frac{G^{(2)}(\vec{r}, \vec{r}, \vec{r}, \vec{r}; t, t + \tau, t, t + \tau)}{G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t, t)G^{(1)}(\vec{r}, \vec{r}; t + \tau, t + \tau)}.$$

이 2차 결맞음 정도, 즉 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$ 를 측정함으로써 고전적인 전자기파 이론으로는 예측 불가능한 빛의 양자역학적 특성을 알 수 있게 된다. 그림 2(왼쪽)에는 세 가지 광원에 대한 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$ 를 나타내었다. 열광원의 경우 광자 두 개를 측정할 확률이 두 광자가 측정될 시간 간격이 짧아질수록 커짐을 보여준다. 레이저 광의 경우 광자 사이의 시간에 관계없이 광자 두 개를 측정할 확률이 일정함을 보여주고 단광자 광원의 경우 광자 두 개를 같이 측정할 확률이 전혀 없음을 나타낸다. 그림 2(오른쪽)에는 2차 결맞음 정도의 측정에서 얻어진 광원에 따른 광자의 시간에 대한 분포상태를 그림으로 나타내었다.

열광원 및 레이저 광원에 대한 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$ 측정은 1960년대 후반 처음 보고되었고 이후 많은 실험이 발표되었다.^[13] 특히 photon bunching은 열광원의 중요한 특징 중의 하나이며 최근 이러한 열광원에 존재하는 photon bunching을 이용하여 고해상도의 비국소적 영상(multi-photon non-local

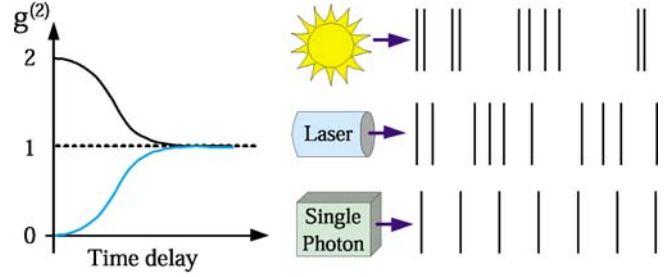


그림 2. 왼쪽: 열광원(검은색 선), 레이저(점선), 단광자 광원(파란색 선)에 대한 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$. 오른쪽: 열광원에서 나오는 광자는 서로 붙어서 나오는 경향이 있는데 이를 photon bunching이라고 한다. 레이저에서 나오는 광자는 시간에 대해 완전히 임의로 나온다. 단광자 광원(single-photon source)에서 나오는 광자는 한 번에 하나씩 나오게 되는데 이를 photon antibunching이라고 한다.

imaging)을 얻으려는 노력이 진행되고 있다.^[12] 레이저 광의 경우 광자들이 시간에 대해 완전히 무작위로 분포하기 때문에 규격화된 2차 결맞음 정도는 시간에 관계없이 항상 1이 된다.

2차 결맞음 정도가 1 이상인 경우는 빛의 전자기 파동이론으로 설명이 가능하다. 하지만 이 값이 1 미만인 경우는 빛의 양자화가 이루어지지 않고서는 설명을 할 수가 없다. 즉 빛의 기본단위로써 광자라는 개념의 도입이 필요하게 되는데, 광자 하나는 더 이상 쪼개어질 수 없기 때문에 Hanbury Brown-Twiss 실험에서 두 광검출기가 동시에 두 개의 광자를 측정할 확률이 사라지게 된다. 이와 같이 2차 결맞음 정도가 1 미만이 되는 빛을 통틀어서 비고전광(nonclassical light)이라고 하기도 한다.

이러한 비고전광의 가장 대표적인 경우가 단광자 광원이다. 단광자 광원에 대한 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$ 측정은 L. Mandel 등에 의해 처음 보고되었다.^[14] 그리고 1980년대 중반 단광자 광원을 이용한 양자암호 프로토콜이 발표된 후 많은 연구자들이 효율이 좋고 사용하기 쉬운 단광자 광원을 만들려고 노력하고 있다. 특히 최근에는 매개하향변환(spontaneous parametric down-conversion), 양자점(quantum dot) 등을 이용해서 안

참고문헌

- [12] A. Valencia, G. Scarcelli, M. D'Angelo, and Y. Shih, Phys. Rev. Lett. **94**, 063601 (2005).
- [13] F.T. Arrechi, E. Gatti, and A. Sona, Phys. Lett. **20**, 27 (1966); B.L. Morgan and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **16**, 1012 (1966); D.B. Scarl, Phys. Rev. **175**, 1661 (1968).
- [14] H.J. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **39**, 691 (1977).
- [15] C.K. Hong and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **56**, 58 (1986); Y.-H. Kim, Phys. Rev. A **67**, 040301 (2003); C. Santori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 1502 (2001).

정적으로 동작하는 단광자 광원을 만들려는 노력이 많이 진행되고 있다.^[15]

광자의 성질

지금까지는 빛의 양자화가 어떻게 수학적으로 표현되고 또 Glauber의 상관관계 함수를 통해 이러한 빛을 어떻게 측정할 수 있는지 알아보았다. 특히 Hanbury Brown-Twiss 실험을 통한 Glauber의 $g^{(2)}(\vec{r}, \tau)$ 함수의 측정은 고전적인 빛과 비고전적인 빛을 구분하는 중요한 도구가 됨도 알아보았다. 이외에도 빛의 양자성을 보여주는 많은 실험이 존재하는데, 이 글에서는 필자들과 관련이 있는 두 가지 실험을 예로 하여 광자의 성질에 대해 설명하기로 하겠다.

1. 서로 다른 광자는 간섭하는가?

간섭(interference)은 파동현상의 중요한 결과 중의 하나이므로 빛의 간섭은 곧 빛의 파동성을 나타냄을 의미한다. 하지만 위의 예에서 보았듯이 빛이 양자역학적으로 설명되어야 한다는 것은 피할 수 없는 사실이다. 그렇다면 빛의 기본단위인 광자는 어떻게 간섭을 할까?

양자역학적으로, 단광자의 간섭은 광자의 확률진폭이 beam splitter에서 반반씩 갈라지는 것으로 설명을 한다. 즉, 측정을 통해 어느 쪽에 광자가 존재하는지 알기 전에는 광자가 양쪽 길에 존재할 확률이 같으므로, 광자는 간섭계의 양쪽 길을 동시에 지나가는 것으로 설명될 수 있다. 이러한 관점에서, Dirac은 “광자는 자기 자신과만 간섭한다. 두 개의 광자 간의 간섭은 절대 생기지 않는다(Each photon then inter-

feres only with itself. Interference between two different photons never occurs)”라고 말했다.^[16] Dirac의 이 말은 양자간섭 현상의 본질에 관한 많은 논의를 일으켰으며 이러한 논의는 아직도 진행 중이다.

그렇다면 그림 3에서와 같이 광자 두 개가 beam splitter에서 만날 때 어떠한 일이 생길지 생각해보자. 이 두 개의 광자 사이에는 고정된 위상차를 정의할 수 없기 때문에 우리가 일상적으로 생각하는 간섭현상은 관측되지 않는다. 즉 이 두 개의 광자 사이에는 1차 결맞음이 0이 된다. 하지만 이 두 개의 광자 사이에는 2차 결맞음이 발견되는데, 이는 Glauber의 $G^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t, \tau)$ 로 설명이 가능하다.

두 개의 광자를 beam splitter의 서로 다른 입력구로 보내면, 그림 3의 오른쪽에 보인 바와 같이 광자들이 beam splitter에서 나올 수 있는 네 가지의 경우가 존재한다. 이 경우 2차 양자간섭(2nd-order quantum interference) 현상에 의해 아래쪽의 두 경우는 서로 상쇄된다는 것을 쉽게 보일 수 있다. 따라서 두 개의 광자는 항상 beam splitter의 오른쪽 또는 아래쪽 출력구로 동시에 나타나게 된다. 그리고 이 두 가지 확률진폭은 서로 2차 결맞음(2nd-order coherence)이 있기 때문에, 출력되는 광자들의 상태는 다음과 같이 나타내어진다^[17]:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|2\rangle_{\text{오른쪽}} |0\rangle_{\text{아래쪽}} + |0\rangle_{\text{오른쪽}} |2\rangle_{\text{아래쪽}}).$$

즉, beam splitter의 출력상태는 광자수(photon number)와 경로(path)의 얽힘상태(entangled state)가 된다.

그러면 고전적인 빛의 전자기 파동이론으로는 어떠한 결과를 예측할 수 있을까? 전자기 파동이론으로 이 결과를 계산하면 그림 3(오른쪽)의 아래쪽 두 확률이 서로 완전히 상쇄가 되지 않는다. 결국 고전적인 예측과 양자광학적인 예측이 서로 다르므로 빛의 양자화가 필요한지 아닌지를 실험적으로 검증할 수 있는 좋은 도구가 된다.

이러한 실험은 C.K. Hong, Z.Y. Ou, L. Mandel에 의해 처음 발표되었는데, 실험 결과는 양자광학의 예측을 완벽히 재현하였다.^[17] (이 실험은 흔히 Hong-Ou-Mandel 또는 HOM 실험으로 알려져 있다.) HOM 현상은 두 개의 단광자가 양자간섭현상을 통해 서로 영향을 줄 수 있다는 것을 보여주는 좋은 예이며 이 효과는 광자를 이용한 양자정보처리에 있어

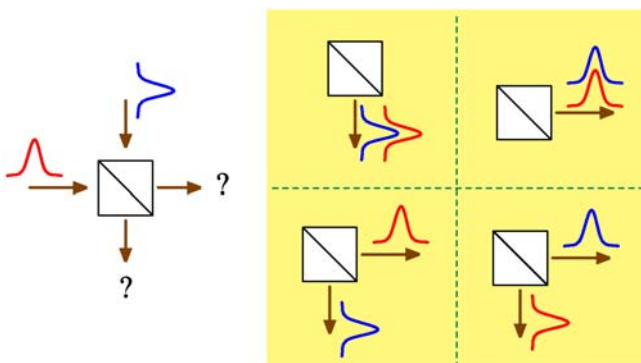


그림 3. 두 개의 광자가 beam splitter에서 같이 만나게 되면 오른쪽과 같은 네 가지의 경우가 생길 수 있다. 2차 양자간섭(2nd-order quantum interference) 현상에 의해 아래의 두 가지 확률진폭(probability amplitude)은 서로 상쇄된다. 결과적으로 광자 두 개가 항상 서로 붙어서 나타나게 된다.

참고문헌

- [16] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4th Edition (Oxford University Press, Oxford, 1958), p. 9.
- [17] C.K. Hong, Z.Y. Ou, and L. Mandel, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 2044 (1987).

서 필수적인 양자게이트를 만드는 데 사용될 수 있어서 그 응용가능성이 최근 많이 연구되고 있다.

2. 입자-파동의 상보성은 어떻게 나타나는가?

상보성(complementarity)은 전자, 광자 등이 입자 및 파동성을 모두 보이는 현상을 설명하기 위해 Bohr에 의해 처음 도입되었다. 그렇다면 전자, 광자 등은 언제 입자같이, 언제 파동같이 표현될까? 위에 잠시 언급한 바와 같이 광자가 간섭계의 어느 경로를 지나는지를 알 수 있게 되면 광자의 파동성은 사라지고 입자성이 나타나게 된다. 따라서 which-path(경로)에 대한 정보가 있고 없고에 따라서 입자 및 파동성이 결정된다. 이러한 which-path 정보를 알기 위해서는 측정을 해야 하는데 모든 직접측정(direct measurement)은 항상 불확정성 원리(uncertainty principle)에 지배를 받게 되므로 상보성은 마치 불확정성 원리에 의해 생겨나는 부수적인 효과같이 나타나게 된다.

그렇다면 입자-파동성의 상보성은 불확정성 원리에 의해서 생길까? 이에 대해 1982년 M.O. Scully와 K. Drühl은 그렇지 않다고 주장하면서 양자지우개(quantum eraser)라는 사고실험(gedankenexperiment)을 제안했다.^[18] 이 사고실험에서 Scully와 Drühl은 광자(또는 전자)의 which-path 정보는 간접측정(indirect measurement)을 통해 불확정성 원리에 영향을 받지 않으면서 얻을 수 있다고 제안했다.

이 양자지우개 사고실험을 J.A. Wheeler의 delayed choice 사고실험과 결합하면 광자(또는 전자)의 입자 또는 파동성을 그 입자가 이미 측정된 이후에도 결정지을 수 있음을 보일 수 있다.^[19] 이 새로운 양자지우개 사고실험의 원리는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 먼저 A 또는 B에서 하나의 광자쌍이 발생하게 만든다. (A와 B에서 동시에 두 쌍의 광자가 생

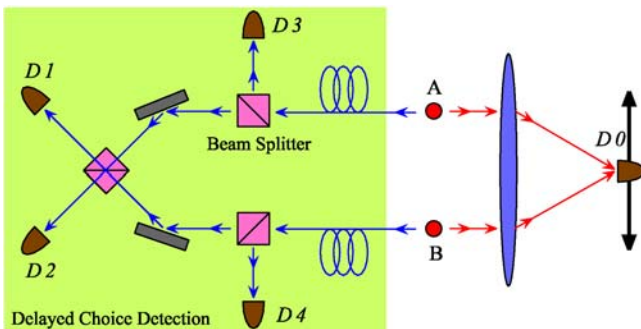


그림 4. 얽힘상태 광자를 이용한 양자지우개(quantum eraser) 실험. 한 쌍의 광자가 A 또는 B에서 생성되어 하나는 왼쪽으로, 다른 하나는 오른쪽으로 진행한다. 왼쪽으로 진행하는 광자가 어떻게 측정되었는지에 따라 오른쪽으로 진행하는 광자의 파동성(간섭이 나타남) 또는 입자성(간섭이 없어짐)이 보여진다.

성되는 것이 아님.) 그리고 하나의 광자는 왼쪽으로, 다른 하나의 광자는 오른쪽으로 진행한다. 오른쪽으로 진행하는 광자는 광검출기 D0에 의해 측정되고 D0를 아래 위로 움직여서 간섭무늬의 존재를 알아볼 수 있다. 왼쪽으로 진행하는 광자는 왼쪽에 위치한 네 개의 광검출기 중에 하나에 측정된다. 여기서 주의할 것은 왼쪽 광자가 오른쪽 광자보다 훨씬 늦게 측정(delayed choice)된다는 점이다.

먼저 광검출기 D3에 광자 하나가 측정된 경우를 고려해 보자. 이 경우, 측정된 광자는 반드시 A에서 생성되었어야 한다. 그렇다면 D0에 측정된 광자는 반드시 A에서 왔다는 결론이 된다. 그러므로 왼쪽으로 진행해서 D3에 측정된 광자는 오른쪽으로 진행하며 D0에 이미 측정된 광자의 which-path 정보를 우리에게 주게 된다. 따라서 D3 측정은 이미 D0에 의해 측정되어 사라진 광자의 입자성을 우리에게 보여준다.

만약 D1에 광자 하나가 측정되었다면 재미있는 상황이 발생한다. 광자는 beam splitter를 통해서 D1에 도착했으므로 A에서 왔는지 B에서 왔는지 알 수 없게 된다. 그러므로 D1 측정은 오른쪽으로 진행하여 이미 D0에 이미 측정된 광자가 어디서 생성되었는지에 대한 which-path 정보를 지우는 양자지우개(quantum eraser) 역할을 한다. 이 경우 D0에는 간섭무늬가 관찰된다.

이 delayed choice quantum eraser 실험은 Y.-H. Kim 등에 의해 Physical Review Letters 2000년 제 1호 첫 번째 장에 발표되었는데, 양자광학적으로 예측된 결과와 실험결과는 잘 일치하였다.^[20] 이러한 실험으로부터 우리는 양자역학에서 측정(quantum measurement)이 가지는 역할에 대해 많은 것을 알 수 있다. 즉, 고전역학과는 달리 양자역학에서는 관측량(observable)의 측정 이전에는 어떠한 값 또는 성질도 결정지어져 있지 않다. 따라서 양자역학에서의 측정(quantum measurement)은 단지 어떤 숨겨진 값을 관측자에게 나타내 보여주는 것이 아니라, 측정하는 그 행위 자체가 어떠한 값을 ‘만들어 내는’ 능동적인 역할을 하게 된다. 양자역학 또는 양자광학에서 측정이 가지는 중요성은 최근 양자정보를 어떻게 다루고 또 측정해야 하는가에 대한 문제로 확장되어 연구되고 있다.

여기에 언급된 양자지우개 실험은 광자 두 개 사이의 2차

참고문헌

- [18] M.O. Scully and K. Drühl, Phys. Rev. A **25**, 2208 (1982).
- [19] J.A. Wheeler, "Law without law" in *Quantum Theory and Measurement*, edited by J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton University Press, Princeton, NJ, 1983).
- [20] Y.-H. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 1 (2000).
- [21] R.J. Glauber *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **38**, S521 (2005).

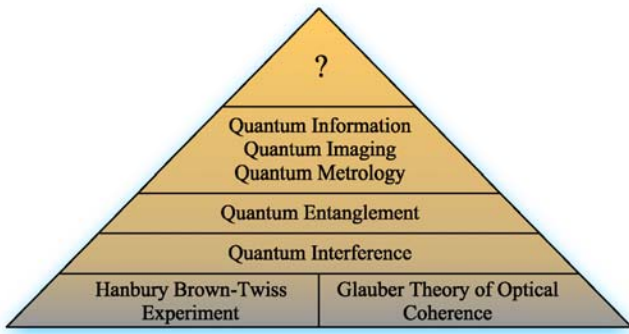


그림 5. 양자광학의 개략적인 연구동향. Hanbury Brown-Twiss 실험 및 Glauber의 빛의 결맞음에 대한 양자이론은 현대 양자광학의 시발점이 되었다 해도 과언이 아니다.

상관관계 함수를 이용하여 여러 핵심적인 요소를 설명할 수도 있는데, Glauber에 의한 이런 분석은 Ref. [21]에 자세히 나타나 있다.

양자얽힘 및 양자간섭의 응용

위에서 간략히 언급했듯이 두 개의 광자 간의 양자간섭현상은 2차 상관관계함수를 통해 기술할 수 있고 이 간섭현상의 결과로 인해 양자얽힘상태가 만들어진다. N 개의 광자를 N 개의 광검출기로 각각 따로 측정해야 하는 실험에서는 Glauber의 N 차 상관관계함수가 이들 광자 간의 N 차 결맞음(N -th order coherence)을 적절히 설명할 수 있다. 따라서 Glauber의 상관관계함수는 N 개 광자 간의 양자간섭현상 또 이에 의해 생기는 N -광자 얽힘상태(N -photon entangled state)와 연관된 여러 현상들을 기술하는 데 있어서 아주 적합한 도구가 된다.

1990년대 이후부터 광자를 이용한 양자암호(quantum cryptography), 양자전송(quantum teleportation), 양자 리소그래피(quantum lithography), 양자 이미징(quantum imaging) 등의 가능성을 보이는 실험(proof-of-principle experiment)들이 나타나기 시작했고 최근 급속한 발전을 보이고 있다. 특히 양자암호의 경우 특정 프로토콜의 상용화 연구를 하는 회사도 나타나기 시작했다. 이러한 양자정보(quantum information) 및 양자 계측학(quantum metrology) 분야의 연구들은 결국 광자의 양자간섭 및 양자얽힘 현상들을 기초로 하고 있으므로 양자 결맞음(quantum coherence)의 정확한 이해의 중요성은 갈수록 커지고 있으며 Glauber의 상관관계함수는 이러한 이해를 돕는 발판의 역할을 하고 있다.

그림 5에는 현대 양자광학이 발전해 온 방향을 개략적으로 나타내었다. 광자를 이용한 양자정보처리, 양자통신 등 위에

언급된 여러 연구의 실험적인 기반은 Hanbury Brown과 Twiss에 의해 실험적으로 처음 관측된 photon bunching, 그리고 Glauber에 의해 연구된 결맞음에 관한 양자이론에 그 기반을 두고 발전해 왔다고 해도 과언이 아니다.

그렇다면 언제쯤 양자광학적 현상들을 이용한 장치들이 우리 생활에 영향을 주기 시작할까? 빛을 이용한 장치들이 우리 주변에 많이 있지만, 빛의 양자적 성질을 이용하는 장치는 아직 하나도 없다. 광자를 이용한 양자통신, 양자전송, 양자정보, 양자이미징 등의 분야들은 아직 기초연구단계에 있다. 또 우리는 아직도 양자간섭 현상이나 양자얽힘상태 등을 어떻게 원하는 대로 만들고 또 제어하는지 등에 대해 모르는 것이 너무 많다. 하지만 선진국들을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있기 때문에 머지않은 장래에 간단한 시제품의 구현은 가능하지 않을까 하는 생각이다. (미국에서는 주로 국방부 지원으로 많은 연구가 이루어지고 있고 유럽, 일본 등지에서도 정부지원을 통한 대학교에서의 연구와 함께 NEC, NTT, Toshiba 등 대기업 연구소에서의 연구도 활발히 이루어지고 있다.) 현재, 양자암호의 경우 최근 몇몇 회사가 시제품을 제작해서 시험해 보는 수준에 이르렀다. 아마 양자암호가 빛의 양자적 성질을 이용하는 가장 첫 번째 상용화된 기술이 되지 않을까 한다.

맺음말

이 글에서 우리는 1950년대 말에서 1960년대 중반에 시작된 빛의 결맞음에 관한 양자역학적 이해에 대한 연구가 어떻게 빛의 간섭 및 상보성 등에 대한 현대적 이해를 가져다주었는지에 대해 몇 가지 실험을 예로 들어 간략히 서술하였다. 빛의 양자 즉 광자에 대한 이러한 연구들은 결국 여러 광자 간의 양자간섭 및 양자얽힘 등에 대한 연구 등으로 확장되었다. 이는 또 최근 활발히 연구되는 양자정보, 양자암호, 양자통신, 양자이미징 등에 관한 연구의 기반이 되고 있다.

양자광학의 이러한 역사를 보면 물리학에서 기초연구의 중요성을 다시 한 번 느낄 수 있게 된다. 응용연구, 즉 궁극적으로 좋은 상품을 개발하려는 연구의 중요성은 강조되어야 한다. (이러한 연구는 research보다는 development의 성격이 강하다.) 하지만 기초연구가 지금 당장 응용성이 부족하다는 이유로 더 이상 뒤로 미루어져서는 안 된다. 한 나라의 장기적인 연구개발 능력은 그 나라에 살고 있는 과학자 및 공학자들의 다양성에 의해서 결정된다고 생각한다. 선택과 집중이라는 이름으로 다양성을 없애버리는 일이 생겨서는 절대로 안 될 것이라고 생각하면서 이 글을 마친다.