

우리는 흔히 아직도 인간이 만드는 기계 시스템이 자연에서 동물이나 식물에서 발견할 수 있는 정교하고 조화로운 시스템에 따라가지 못한다고 경탄하곤 한다. 빛이라는 가장 근본적이고 단순해 보이는 존재를 연구하는 물리학자들은 아직도 빛은 수수께끼이고 그 특성을 다 이해하지 못한다고 말하곤 한다. 그러나 한편으론 재미있게도 인간이 만들어낸 인위적인 빛이 자연의 빛보다 어떤 면에선 우월한 그리고 유용한 특성을 갖기도 한다. 전형적인 예는 레이저인데, 1960년 초에 발명된 레이저는 자연에선 볼 수 없는 인위적인 광원으로, 레이저에서 나오는 빛은 뛰어난 결맞음성(coherence)을 갖는다. 레이저는 자연적인 광원과 워낙 결맞음성에서 큰 차이가 나고 또 엄청난 밝기를 갖고 퍼짐도 작은 성질 때문에 이전에는 지구에 존재하지 않던 전혀 새로운 광원으로 생각할 수 있다. 레

에 잘 맞는 이상적인 단일파장의 전자기파동에 가깝다. 이에 반대되는 입자개념 면에서 본다면 빛은 더 이상 나누어질 수 없는 기본 입자로 구성된 존재이다. 만약 1초에 한 개씩 정확하게 광자 1개를 내놓는 광원이 있거나 원하는 순간에 발사시키면 한 개의 광자를 방출하는 광원이 있다면 이를 광자총이라고 부를 수 있겠다. 광자총 역시 자연에서 볼 수 없는 매우 인위적이고 혁신적인 광원이다.[1]

흥미로운 점은 이런 광자총을 새로운 밀레니엄의 기술로 주목받는 양자정보기술 분야에서 요구한다는 점이다. 빠른 속도로 일정하게 한 방향으로 동일한 광자를 내놓는 광원이 있다면 이를 이용하여 양자암호(quantum cryptography), 양자컴퓨터, 양자전송(quantum teleportation) 등을 쉽게 할 수 있기 때문이다. 단일광자 광원이 있다면 그 밖에도 광학부품 등의 정밀 특성측정,

## 특집 ─ 양자광학 특집

# 단일광자 발생과 양자효과

노재우\*, 김기식\*

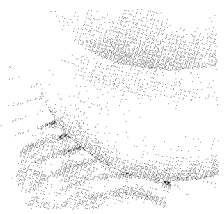
이저를 이용하여 우리들은 지난 60년간 광통신, 광정보처리, 의료기술, 레이저 가공 등 새로운 광학기술의 눈부신 발전을 이룩하였고 또 이전에는 가능하지 않던 레이저 정밀 측정을 통해 극한에 도전하는 실험과학의 발전을 경험하였다. 과학과 기술의 발전 속도를 볼 때 레이저의 발명 이후 60년이 지난 지금 새로운 광원을 요구하고 또 기대할 시기가 된 것인지도 모른다.

빛은 대폭발 이론에 의하면 우주 초기에 생겨난 가장 근본적이고 순수한 에너지 형태의 존재이다. 빛은 고전적인 관점에서 생각하는 파동과 입자의 서로 완전히 다른 두 가지 존재의 특성을 모두 보이는데, 레이저는 말하자면 두 가지 특성 중 파동의 특성을 잘 보여주는 빛이라고 할 수 있으며 맥스웰 방정식과 프레넬 공식 등의 고전광학 이론

절대적인 무작위성을 보증하는 양자난수발생기(quantum random number generator) 제작 등을 할 수 있다.[2]

단일광자 발생방법은 보통 두 가지로 나뉘는데 첫 번째 방법은 광자를 내놓을 수 있는 원자나 분자, 고체 내 결합, 양자점 등을 한 개만 분리해서 만들고 이를 들뜬 상태로 전이시켜서 곧 자발방출에 의해 광자를 하나 내놓게 하는 방법이다. 두 번째 방법은 광매개하향변환 방법을 이용하는 것인데 비선형결정 내에서 펌프광 광자 하나가 소멸하면서 에너지가 절반쯤 되는 두 개의 광자를 동시에 방출하는 것을 이용한다. 두 개의 쌍둥이 광자 중 하나를 검출하면 다른 광자가 한 개 존재한다는 것이 확인된다. 각 방법은 장점과 단점이 있다.

\* 인하대학교, 물리학과



단일광자광원의 조건으로는 첫째 2개나 3개가 아닌 정확한 1개의 광자를 발생해야 한다는 것: anti-bunching condition, 둘째 매번 광자방출 확률이 1에 가까워야 한다는 것: emission quantum efficiency, 셋째 광원이 동작하기 위해 매번 펌핑이 성공적으로 되어야 한다는 것: pumping efficiency 이다. 첫 번째 원자 등을 이용하는 방법은 광자의 단일성과 방출확률이 높다는 장점이 있으나 단일원자를 격리하여 준비한다든가 정확하게 펌핑한다든가 하는 것은 기술적인 난이도가 높은 편이다. 광매개하향변환 방식은 비교적 기술적인 난이도가 낮으나 시간당 광자발생률이 낮다는 결점이 있다.

위의 세 조건 외에도, 단일광자광원을 광자정보에 사용하기 위해서는 항상 동일한 광자가 동일한 방향으로 방출되어야 한다는 조건이 필요하다. 양자연산게이트가 동작하기 위해서는 광자사이의 간섭현상이 중요한 원리로 등장하고, 간섭이 일어나려면 광자를 구별할 수 없어야 하기 때문이다. 광매개하향변환의 경우 발생하는 두 광자 사이에 강한 상관관계가 존재하고 한 광자의 검출에 의해 다른 광자의 상태가 정해지기 때문에 항상 같은 형태의 광자를 발생할 수 있다는 상당한 이점이 있다. 원자 등을 이용하는 첫 번째 방법의 경우 공동(cavity)에 커플링시켜서 광자발생률과 방향성을 높이는 방법을 사용한다. 약한 커플링 영역에선 자발방출률을 높임으로써 단위시간당 광자 방출률을 높이기도 하고 강한 커플링 영역에선 adiabatic passage와 같은 방법을 사용하여 광자방출 양자효율을 높일 수 있다. 극복해야 할 문제로 충돌, 진동에 의한 dephasing 문제, 공동길이의 변화나 온도 등의 변화에 의한 spectral diffusion 문제, incoherent pumping에 의한 방출광자의 동일성 변화 문제 등이 존재한다.

양자정보에 응용하기 위해선 단일광자의 모습이 항상 동일해야 한다고 이미 언급하였다. 실제적으로, 모든 광원은 유한한 시간 동안에 광자를 방출하므로, 단일광자는 파속의 형태로 발생하며 단일광자파속의 시간적인 모습은 진동수 스펙트럼의 푸리에 변환으로 결정된다. 광자의 스펙트럼은 단일광자를 발생하는 광원의 구조와 물리적

특성에 의해 결정된다. 공동 안의 원자라면 방출 전이선의 선폭과 공동의 선폭 등이 제한 요소가 될 것이며 광매개하향변환의 경우는 펌프광의 스펙트럼과 결정의 길이를 포함한 위상정합 조건이 쌍둥이 광자의 스펙트럼을 결정한다. 쌍둥이 광자는 얽힌상태로 강한 상관관계를 갖는 스펙트럼을 공유한다. 두 광자 중 하나인 유동광자를 검출하면 검출기의 스펙트럼 반응도 등 검출 조건이 여기에 포함되어 신호광자(단일광자)의 스펙트럼 형태가 결정된다. 이에 대한 이론은 슈미트 모드 표현법에 의해 분석하는 것이 매우 편리하고 유용한데, 시험에 사용하는 대부분의 스펙트랄 필터 등이 가우시안 함수로 주어지기 때문이다. 간단히 말해서, 위상정합조건과 유동광 검출 조건이 결정되면 신호광 단일광자의 스펙트럼이 결정되어 항상 같은 형태의 단일광자를 얻을 수 있다.(3)

여기에서 반드시 짚고 넘어가야 할 점이 있는데, 단일광자 방출은 양자적인 특성을 무시하고 생각할 수 없다는 점이다. 고전적인 입자는 입자 발생기의 방출 조건에 따라 어떤 물리량을 갖고 나올 것인가가 미리 결정된다고 생각할 수 있다. 그러나 불확정성 원리에서 배우듯이 양자이론에서는 측정 이전에 미리 정확하게 결정된 물리량을 갖는 입자는 없다. 예를 들어, 들뜬상태로 펌핑된 원자가 있다고 하자. 아직 광자를 방출하지 않았다면 광자상태를 포함하여 양자적 상태는  $|e\rangle_{\text{원자}} \otimes |0\rangle_{\text{광자}} = |e,0\rangle$ 이고 광자를 방출하면 바닥상태로 돌아가므로  $|g,1_k\rangle$ 의 상태가 된다. 여기에서  $k$ 는 빛의 모드를 나타낸다. 일반적인 원자+빛의 상태는 따라서

$$|\psi(t)\rangle = C_e(t)|e,0\rangle + \sum_k C_k(t)|g,1_k\rangle \quad (1)$$

와 같이 주어지는데, 자발방출은 어느 모드로 일어날지 모르므로 양자상태는 위와 같은 여러 모드의 중첩상태가 된다. 들뜬상태의 수명을  $\tau$ 라고 하면 각 계수는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_k(t) = \frac{V_k/\hbar}{w_k - w_e + i\gamma} [1 - \exp\{-t/\tau - i(w_k - w_e)t\}] \quad (2)$$

$$C_e(t) = \exp(-t/\tau - iw_e t) \quad (3)$$

여기에서  $V_k$ 는 상호작용의 크기를 나타내고  $w_k$ 는 빛의 각 모드의 각진동수,  $w_e$ 는 원자의 전이진동수이다. 이 식은 광자방출이 연속추진과 같다는 것을 보여준다. 들뜬 상태에 있을 확률은 시간에 따라 줄어든다( $|C_e(t)|^2 = \exp(-2t/\tau)$ ). 잘 만들어진 단일광자총은 특정한  $k$ 값, 즉 특정한 모드의  $C_k$ 가 다른  $k$ 값의 계수들보다 크게 설계된 것이다. 그러나 원자와 빛의 양자상태를 들뜬상태와 바닥상태 및 여러 가능한 빛의 모드의 중첩상태로 생각해야 한다는 것은 광자총이 미리 결정된 광자를 방출하는 것이 아니라 광자의 검출에 의해 광자의 상태가 결정된다는 양자역학적 원리를 다시 생각하게 해준다. 물론 단일광자의 검출 방식에 의해 광자의 특성이 아무렇게나 변할 수 있다는 것은 아니다. 광자방출 스펙트럼의 제한 조건은 광자가 검출될 수 있는 스펙트럼 한계를 보여준다.

단일광자의 응용은 여러 가지 예전에 생각하지 못했던 가능성을 열어주며 비고전적인 효과를 일으키기도 한다. 한 곳에서 단일광자를 검출하면 동시에 다른 곳에서는 같은 광자를 검출할 수 없다는 단순한 이유 때문에 광자검출 확률의 변화와 광통계의 변화, 얽힘상태 발생이 일어나기도 한다. 먼저, 하나의 광자를 50:50 빛살가르개로 1번 모드 또는 2번 모드로 보내는 상황을 생각해보면, (그림 1 참조)

$$|\psi\rangle = |1\rangle_1 |0\rangle_2 + |0\rangle_1 |1\rangle_2 \quad (4)$$

의 일종의 중첩상태가 되는데, 이는 서로 독립적인 두 상태의 곱으로 나타낼 수 없기 때문에 양자적 얽힘상태가 된다. 얽힘상태는 양자전송, 양자네트워크 등 양자정보 기술을 구현하는데 중요한 요소이다. 한편 레이저광이 가장 가까운 형태인 고전적인 파동성이 잘 나타나는 결맞음 상태  $|\alpha\rangle$ 의 경우는

$$|\psi\rangle = |\alpha\rangle_1 |\alpha\rangle_2 \quad (5)$$

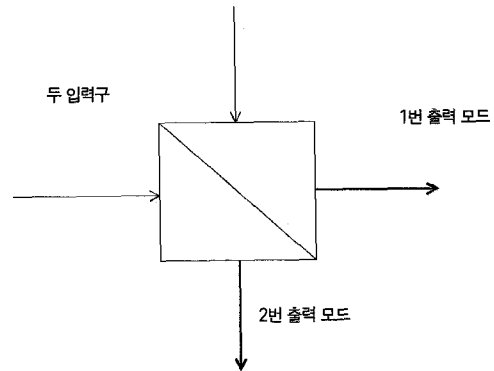


그림 1. 빛살가르개의 모형

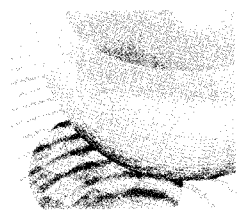
이 된다. 여기에서  $r$ 과  $t$ 는 빛살가르개의 투과계수와 반사계수이다. 즉 이 경우 1번모드와 2번모드의 출력광은 서로에게 무관한 독립적인 빛이 되며 따라서 양자상태는 두 상태의 곱으로 나타난다. 그렇다면, 단일광자상태와 결맞음상태를 합성한 양자상태를 만들면 어떨까? 최근에 실험적으로 만드는데 성공한 광자 더한 결맞음상태 (photon-added-coherent-state)가 좋은 예이다.[4] 한 개의 광자가 더해진 상태를  $|\alpha, 1\rangle$ 이라고 하고 이 상태를 빛살가르개로 나누면

$$|\psi\rangle = |t\alpha, 1\rangle_1 |r\alpha, 1\rangle_2 \quad (6)$$

의 얽힘상태 양자광을 만들 수 있다. 이러한 양자상태는 충분한 세기를 가지면서 고전적인 빛에 가까운 특성도 보이지만 비고전적인 빛의 특성을 잘 나타낸다. 이러한 비고전성과 얽힘상태를 이용하는 새로운 양자기술은 양자역학에 대한 발전된 이해와 응용에 의해 이루어질 전망이다.

### 결론

최근 물리학계에선 새로운 자연법칙의 발견이나 상대성 이론 같은 새로운 이론의 제창은 보기 힘들다. 그러나 과거에 우리가 충분히 이해하지 못하고 있던 미시세계 입자



들의 행동과 이를 설명하는 양자역학에 대한 새로운 이해가 거듭되고 있다. 기본입자나 나노입자 등 양자적인 대상을 한 개 씩 분리하여 실험적으로 다룰 수 없었던 과거 시대와 달리 현대에는 한 개의 양자적 대상에 대해 양자 이론이 맞는지 시험해볼 수 있으며 또 양자효과를 이용하여 새로운 기술을 발전시킬 수 있다. 과거에 EPR 파라독스라고 불리던 얽힘상태 양자시스템의 특성이 이젠 EPR 효과라고 불리며 이를 이용한 여러 응용분야가 발전하는 것이 좋은 예이다. 광자총의 개발과 비고전적인 특성을 이해하고 이용하는 것은 이와 같은 현대과학과 기술의 발전에 중요한 위치를 차지한다고 볼 수 있다.

## 참고문헌

1. Review article: Brahim Lounis and Michel Orrit, Rep. Prog. Phys. 68, 1129 (2005)
2. Review article: C. Monroe, Nature, 416, 28 (2002). Book: Quantum Computation and Quantum Information, by Michael A. Nielsen, Isaac L. Chuang, Cambridge University Press, Cambridge (2000)
3. J. Noh, J. Kor. Phys. Soc., 44, 271 (2004)
4. Zavatta A., Viciani S. and Bellini M., Science 306 (2004) 660



### 노재우

근무처  
인하대학교 물리화학부 (교수)

최종학력  
미국 로체스터 대학교 물리학과 (박사)

주요경력  
미국 질라(JILA) 연구소 박사후연구원  
미국 오레곤 대학교 연구 교수

e-mail : jnoh@inha.ac.kr



### 김기식

근무처  
인하대학교 물리화학부 (교수)

최종학력  
미국 로체스터 대학교 물리학과 (박사)

주요경력  
한국원자력연구소 선임연구원  
미국 오레곤 대학교 연구 교수

e-mail : kisik@inha.ac.kr