

# 단일 광자: 개별적 광자 상태의 생성과 비파괴 측정\*

DOI: 10.3938/PhiT.21.049

김준기·안경원

## Generation and Nondestructive Detection of Individual Photon States

Junki KIM and Kyungwon AN

An overview of Serge Haroche's works, which led to the 2012 Nobel Prize in Physics, is presented. In particular, the generation and the nondestructive detection of the states of Schrödinger's cat and the recent quantum feedback experiment on photon number states are discussed. Other progress in cavity-QED(quantum electrodynamics) and in quantum optics experiments by other groups is also introduced along with the related activities in Korea.

## 서 론

1900년대 초 양자역학의 발견은 기존의 자연계에 대한 이해를 크게 변화시켰다. 양자상태와 그 측정을 확률적으로 이해하는 양자역학의 틀 안에서 고전역학에 존재하지 않았던 양자상태의 중첩(superposition)과 얹힘(entanglement)이라는 새로운 개념이 도입된다. 혁명적인 패러다임의 변화 이후 여러 실험 물리학자들이 고전역학으로 설명되지 않는 양자역학의 고유 현상을 실험적으로 발견하기 위해 애써왔고 많은 진전이 있었다. 그리고 2012년 이러한 노력의 성과가 인정되어 분야의 최전선에서 오랜 시간 연구를 해온 Serge

### 저자약력

김준기는 2009년 서울대학교 물리천문학부에서 학사졸업 후 동 대학원에서 박사과정에 재학 중이다. 현재 결맞은 상태의 원자로 여기되는 양자전기역학 미소레이저를 개발 중이다. (ckdori05@snu.ac.kr)

안경원 교수는 MIT에서 단원자 레이저 개발로 1995년 박사학위를 받고 MIT에서 연구원으로 있다가 1998년부터 2001년까지 KAIST 물리학과 교수로 재직하였고 2002년부터 서울대 물리천문학부 교수로 재직 중이다. (kwan@physa.snu.ac.kr)

Haroche 교수와 David J. Wineland 교수가 노벨 물리학상을 수상하게 되었다.

양자역학의 도입이 가져온 기존 자연계에 대한 이해는 새롭스럽게 강조하지 않아도 될 정도로 혁신적인 것이다. 1935년 슈뢰딩거가 제안한 ‘슈뢰딩거의 고양이’는 거시적인 중첩상태를 비유한 유명한 사고실험으로 양자역학과 고전역학에는 근본적인 관점의 차이가 있음을 보여주는 예시이다. 또한 두 개 이상의 양자 입자들의 얹힘에 대한 내용인 아인슈타인-포도스카-로젠 패러독스(EPR paradox)는 양자역학이 기존에 일반적으로 받아들여지던 국지성 실재성(local realism)을 위배할 수 있음을 지적하였고, 후속연구로 이어진 벨 부등식 테스트 등으로 국지성 실재성이 폐기되어야 함을 지지하는 실험 결과들이 나오고 있다.

뿐만 아니라 비교전적 양자상태는 그 응용에서도 수많은 가능성을 제시하고 있다. 일반적인 데이터 저장 단위인 비트와 달리 0과 1의 중첩상태를 가질 수 있는 큐비트(qubit, quantum과 bit의 합성어)를 기초로 한 양자컴퓨터는 소인수분해 등의 계산에서 훨씬 효율적인 성능을 낼 수 있음이 알려져 있다. 얹힘 상태의 입자를 이용한 양자 전송(quantum teleportation) 등 양자역학의 고유 성질을 이용하는 많은 아이디어들이 제안되었고, 그 중 일부는 최근에 실험적으로 구현되기도 하였다.

이론적으로 풍성한 예측이 있었음에도 불구하고 원하는 양자상태의 자유로운 생성과 비파괴적인 측정이 가능해진 것은 비교적 최근의 일이다. 측정에 의해 상태가 변화되는 양자역학의 기본 원리에 따라 비교전적인 양자상태는 주위 환경과의 상호작용에 극도로 취약하다. 따라서 이에 따른 양자상태 변화를 방지하기 위해서는 정교히 제어되는 보호장치가 필요하다. 이러한 실험장치가 개발되기에에는 오랜 시간이 걸렸고 마침내 Haroche 그룹은 초전도체 공진기를 이용한 마이크로

\* 이 글의 원제는 “개별적 광자 상태의 생성과 비파괴 측정”으로 독자들의 이해를 돋기 위해 편집자가 제목을 수정하였음.



과 광자 상자를, Wineland 그룹은 레이저로 냉각된 초저온 이온들을 이용해 주변환경과 격리된 실험장치를 얻어 각자 방법으로 양자상태를 생성 및 측정하였다.

이 글에서는 Serge Haroche 교수의 연구업적을 개관하면서 공진기 양자전기역학(quantum electrodynamics) 실험을 통해 얻어진 ‘슈뢰딩거의 고양이’ 상태와 최근의 양자피드백(quantum feedback) 실험을 소개하고 마지막으로 다른 양자광학 그룹의 사례와 국내의 사례를 소개하고자 한다.

## 본 론

양자역학의 초기 전개과정에서 가장 큰 역할을 했던 입자는 빛이다. 온도가 있는 물체에서 발생하는 복사현상을 설명한 플랑크 복사이론이 빛에 관한 내용이고 수소원자의 선스펙트럼은 양자역학이 예견한 원자의 구조와 정확하게 일치하는 결과를 보여주었다. 빛 혹은 광자는 가장 양자역학의 성질을 잘 보여주는 입자로 양자역학의 기초 실험에서 빠지지 않는 소재로 이용되었다.

이후 분광학의 발달과 함께 메이저/레이저가 개발되면서 원자의 전이와 공진기 내부 전자기장 모드의 상호작용이 새로운 물리현상을 만들 수 있음이 알려졌다. D. Kleppner는 한 쌍의 마주보는 도체판 사이에 위치한 원자가 자발방출이 저해되는 효과가 있음을 예견했고 이를 실험적으로 입증했다.<sup>[1]</sup> 또, 비슷한 시기에 S. Haroche는 높은 Q값을 갖는 공진기가 원자와 공명조건에 있을 때 반대로 자발방출을 강화할 수 있음을 입증했다.<sup>[2]</sup> 고 H. Walther는 공진기 크기를 줄여서 원자와 공진기의 상호작용을 강하게 하고 외부로의 손실을 줄임으로써 단원자 메이저를 최초로 구현하였고,<sup>[3]</sup> 이론적으로만 예측되었던 양자 라비(Rabi) 진동이나 라비 진동의 붕괴와 재생성 등을 실험적으로 입증해냈다.

이후 연구에서 Haroche 그룹이 다른 그룹과 차별적인 점이 있었다면 그들은 원자와 공진기가 비공명상태일 때의 물리현상에 주목하였다는 점이다. 기존의 실험은 주로 원자와 공진기의 고유진동수가 일치하는 공명조건에서 이루어졌다. 공명조건에서는 원자와 공진기가 결합상수에 따라 에너지를 주고받게 되며 이 현상을 라비 진동이라고 한다. 반면 원자와 공진기의 고유진동수에 차이가 생기면 양쪽의 에너지는 거의 교환되지 않고 상호작용 후 양자상태의 위상차이만 남기게 된다.

이는 마이크로파 실험의 한계와도 연결되어 있다. 당시에 마이크로파 광자를 직접적으로 측정할 수 있는 방법은 없었고 대부분의 마이크로파 공진기 양자전기역학 실험은 상호작용하는 원자를 이용하여 공진기 내부 장의 상태를 유추해내

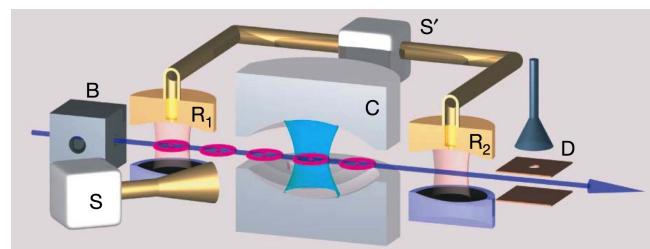


Fig. 1. Schematic of the experimental setup used by the S. Haroche group. An atom prepared in a circular Rydberg state (B) passes through a cavity (C) and interacts with it. A pair of Ramsey interferometers (R1, R2) and a state analyzer (D) are used to detect the atomic state. Excerpted from Ref. [8].

는 방식이었다. Haroche 그룹은 공진기 장에 대한 새로운 정보를 얻고자 비공명조건에서의 실험을 시도했던 것이다. 후술 하겠지만 이는 Haroche 그룹의 특장점이 되기도 한다.

비공명조건에서 공진기 양자전기역학을 잘 활용한 연구가 바로 빛의 슈뢰딩거 고양이 상태 생성과 측정 실험이다.<sup>[4]</sup> 공진기 내부에 매우 적은 광자수의 결맞은(coherent) 상태  $|\alpha\rangle$  가 존재하고 그 안을 원자가 지나갈 때, 원자의 양자상태에 따라 공진기 전기장은 다른 위상변화를 겪는다. 공진기 내부를 지나가는 원자가 여기상태  $|e\rangle$  와 바닥상태  $|g\rangle$  의 중첩상태로 존재한다면 공진기 전기장이 겪는 위상변화 역시 중첩되어 상호작용 후 다음과 같은 식으로 쓰이게 된다.

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|e, \alpha e^{i\phi}\rangle + |g, \alpha e^{-i\phi}\rangle)$$

고전역학의 해석으로는 서로 다른 위상을 가진 두 빛이 겹쳐지면 간섭현상이 생겨서 진폭이 커지거나 작아지지만 양자역학은 다르다. 양자역학적으로는 두 다른 위상을 가진 결맞은 상태가 중첩상태에 있을 수 있으며 측정되는 위상은 확률에 의해 결정된다. 이러한 상태는 빛의 고전적인 상태로 비유되는 결맞은 상태가 양자역학적 중첩상태를 이룬다고 하여 빛의 슈뢰딩거 고양이 상태로 비유된다.

이 실험에서는 원자가 공진기에 입사하기 전후에 램지(Ramsey) 간섭계를 이용하여 위상변화를 측정하고, 공진기의

## REFERENCES

- [1] R. G. Hulet, E. S. Hilfer and D. Kleppner, Phys. Rev. Lett. **55**, 2137 (1985).
- [2] P. P. Goy, J. M. Raimond, M. Gross and S. Haroche, Phys. Rev. Lett. **50**, 1903 (1983).
- [3] D. Meschede, H. Walther and G. Müller, Phys. Rev. Lett. **54**, 551 (1985).
- [4] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J. M. Raimond and S. Haroche, Phys. Rev. Lett. **77**, 4887 (1996).

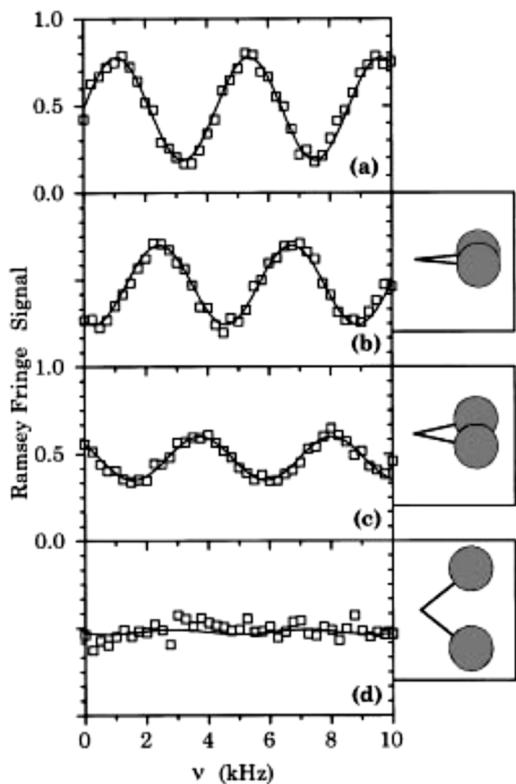


Fig. 2. State detection result of the Schrödinger's cat state of light. (a) No photons in the cavity. (b)-(d) The mean photon number of 9.5 with the atom-cavity detuning of 712, 347 and 104 kHz, respectively. The right panel illustrates the cavity field distributions showing the distance between two distribution peaks increases as the detuning decreases. Excerpted from Ref. [4].

고유진동수와의 차이를 변화시켜 가며 간섭계의 진폭을 관찰하였다(그림 1). 간섭신호의 진폭은 위 식에서 두 다른 위상의 빛의 겹침 정도인  $\langle \alpha e^{i\phi} | \alpha e^{-i\phi} \rangle$ 에 비례하며 위상  $\phi$ 는 원자공진기의 진동수 어긋남에 반비례한다. 진동수 차이가 작아짐에 따라 진폭이 감소하는 것은 공진기 전기장이 슈뢰딩거의 고양이 상태에 가까워짐을 의미한다(그림 2).

한 번 공진기 내부에 생성된 슈뢰딩거의 고양이 상태는 공진기 감쇠로 서서히 중첩상태가 파괴되고 결맞음이 사라진다. 이 과정을 살펴보기 위해 첫 번째 원자가 지나간 이후 두 번째 원자를 같은 방법으로 입사한 뒤 조건부 확률  $\eta = P(e_2/e_1) - P(e_2/g_1)$ 을 측정하였다. 이 상관값은 공진기 내부에 완벽한 고양이 상태가 있을 때는 0.5의 값을 가지며 중첩상태가 파괴되었을 때는 0의 값을 가진다. 시간에 따른 중첩상태의 모습을 보기 위하여 두 원자의 시간 간격을 조절하면서  $\eta$ 값을 측정하였고 그 결과 중첩되어있는 두 상태의 위상차가 클수록 결맞음이 빨리 사라지는 결과를 얻을 수 있었다.

이 실험은 양자역학적으로 예견된 거시적 중첩상태를 간접

적으로 관측했다는 점에서 의미하는 바가 컸다. 그리고 중첩상태의 결맞음 깨짐 현상을 실험적으로 연구한 점도 흥미로운 부분이었다. 비슷한 시기에 Wineland 그룹은 이온을 이용해서 조화 포텐셜 안에서 움직이는 원자의 슈뢰딩거 고양이 상태를 생성하는 실험을 발표하였다.<sup>[5]</sup>

실험 결과는 이론계산과 분명히 일치하였지만 공진기장을 직접적으로 측정할 수 없었던 점은 분명한 한계점이었고 이를 극복하기 위하여 후속 연구를 전개하게 된다. 가시광 영역에서 공진기 양자전기역학 실험은 공진기에서 감쇠되는 빛을 직접 측정할 수 있지만 Haroche의 경우와 같은 마이크로파 실험에서는 광자를 직접 측정할 방법이 없었다. Haroche 그룹은 대신 원자를 이용하여 공진기장을 변화시키지 않으면서 공진기장의 광자수를 측정하는 양자 비파괴측정법(QND, Quantum Non-Demolition measurement)을 고안했다.<sup>[6]</sup> 이 역시 비공명상태에서 원자가 느끼는 위상변화를 이용한 것으로, 에너지의 교환이 없기 때문에 공진기 내부 광자수에는 변화가 없으며 그는 이러한 방법으로 공진기 내부의 상태를 측정할 수 있을 것이라 생각했다.

양자 비파괴측정법의 개념은 양자역학의 기본원리와 관련이 있다. 양자역학에서 측정은 항상 기존 상태에 영향을 주게 된다. 가시광 영역에서 광자를 측정하는 경우, 일반적으로는 대상 광장을 잘 흡수하는 물질의 광전효과를 이용하여 측정하고자 하는 상태의 광자를 전기신호로 바꾸게 되는데 이때 필연적으로 측정하고자 하는 빛의 광자수가 줄어들게 된다. 만약 측정하고 싶은 대상이 광자수라면 이러한 측정방식으로는 시간에 따른 변화 등을 볼 수 없다. 양자 비파괴측정법은 직접 광자수를 측정하는 대신 다른 정보를 통해 간접적으로 대상의 상태를 알아낸다. 물론 상태를 완전히 변화시키지 않고 정보를 얻는 것은 불가능하기 때문에 최소한의 섭동만을 주고자 한다.

Haroche 그룹의 경우 원자가 공진기 모드와 상호작용할 때 원자의 위상이 변화하는 양이 공진기 내부 광자수와 관계가 있다는 점에 주목하였다. 그림 3에서 표현된 바와 같이 첫 번째 램지 공진기에서 여기상태와 바닥상태의 중첩상태로 준비된 원자는 공진기와 상호작용하면서 공진기의 광자수에 따른 위상변화를 겪는다. 만약 공진기 모드가 여러 광자수의 중첩상태에 있다면 원자 역시 다양한 위상의 중첩상태에 있게 된다. 상호작용 이후 두 번째 램지 공진기와 이온화 측정을

#### REFERENCES

- [5] C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King and D. J. Wineland, Science **272**, 1131 (1996).
- [6] M. Brune, S. Haroche, J. M Raimond, L. Davidovich and N. Zagury, Phys. Rev. A **45**, 5913 (1992).

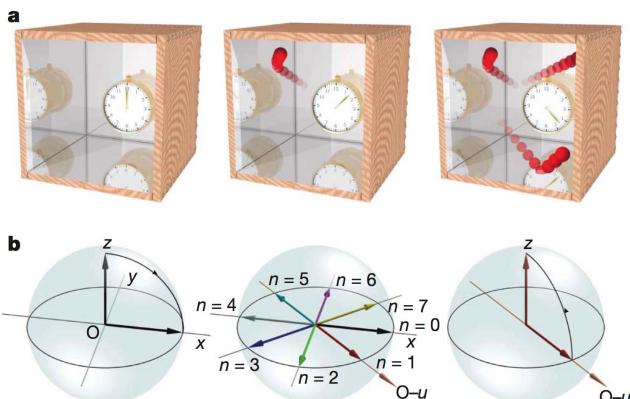


Fig. 3. a. The principle of the quantum non-demolition measurement is analogous to a clock running at a speed proportional to the photon number. The clock's arm rotates 45 degrees per photon, and conversely one can determine the photon number based on the amount of rotation. b. In the experiment, the atom going through the cavity acts as a clock. Excerpted from Ref. [7].

이용해 원자 상태 벡터의 원하는 방향(그림에서는 O-u)으로 사영값을 측정할 수 있으며 이를 통해 공진기 내부 광자수에 대한 정보를 얻을 수 있다. 광자수에 따른 원자의 상태 벡터들이 서로 수직이 아니기 때문에 한 번의 측정으로 광자수를 알 수는 없다. 원자를 연속적으로 입사시킨 후 결과를 측정하여 베이스(Bayes) 정리를 기초로 한 통계적인 분석으로 공진기 내부 상태를 유추해내는 것이 가능했다.<sup>[7]</sup>

Haroche 그룹은 이 개량된 공진기 측정법으로 앞에서 서술했던 빛의 슈뢰딩거 고양이 상태를 직접 단층촬영하였다. 단순히 광자수를 측정하는 것만으로는 양자상태의 밀도행렬의 대각 성분밖에 얻을 수 없기 때문에 공진기 상태를 위상 공간에서 옮겨가면서 밀도 행렬 전체를 구하는 방법을 사용했다. 그림 4의 결과로 볼 수 있듯이 간접적으로 확인했던 거시적 중첩상태의 양자 확률분포함수를 얻을 수 있었으며, 음의 확률분포함수 값을 갖는 양자역학 고유의 현상까지 관찰할 수 있었다.<sup>[8]</sup>

최근에는 연속적인 공진기 광자수의 측정을 토대로 한 되먹임을 이용하여 공진기장을 광자수자 상태로 안정화하는 논문을 발표하였다. 정확한 광자수를 갖는 숫자 상태(number state)는 빛을 입자로 해석하는 양자역학적인 관점에서 이해될 수 있으며 고전전자기학에 대응되는 상태가 없는 비고전적인 상태이다. 이러한 비고전적인 상태는 측정에 의한 상태변형 때문에 본래 상태를 유지하도록 되먹임을 하는 것이 매우 어려운데, 이 논문에서는 앞서 설명한 광자수 측정법을 통해 광자수를 실시간으로 측정하고 그 결과를 토대로 공진기에 되먹임을 하는 방법을 사용했다. 그림 5가 그 결과이며, 이러한 되먹임을 통해 공진기의 감쇠 시간보다 훨씬 긴 시간

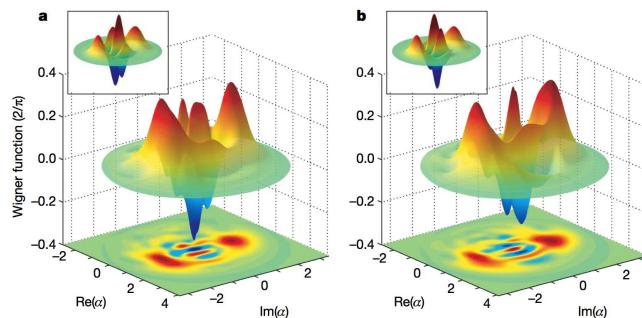


Fig. 4. Quantum probability distribution (Wigner function) of the Schrödinger's cat state obtained from atomic state detection. The quantum probability distribution, which has a negative value in contrast to the classical probability distributions, clearly shows the non-classical property of the Schrödinger's cat state. The cat state has an even photon number in a and an odd photon number in b. Excerpted from Ref. [8].

동안 공진기 내부 광자수를 일정하게 유지할 수 있음을 보였다.<sup>[9]</sup>

이상 설명한 Haroche 그룹의 연구들은 모두 공진기 양자역학 분야, 더 나아가 양자역학 실험 전반에 있어서 중요한 성과를 내어왔다. 양자역학에서 예견된 흥미로운 현상을 실험실에서 재현했으며 그 내용들이 이론과 잘 일치함을 입증했다. 단기적인 성과를 쫓기보다 하나의 주제를 심도있게 연구하고 개선을 거듭하여 단점을 극복하고 장점을 극대화하는 노력을 오랜 기간 지속해온 Haroche의 모습에서 우리는 진정한 연구자의 모습을 볼 수 있다고 생각한다.

## 다른 양자광학의 연구들

비록 노벨상의 영광은 Haroche 교수에게 돌아갔지만 지난 약 20년간 양자광학 실험분야는 놀랄 정도로 발전해왔고 그

## REFERENCES

- [7] C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, C. Sayrin, S. Gleyzes, S. Kuhr, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche, *Nature* **448**, 889 (2007).
- [8] S. Deléglise, I. Dotsenko, C. Sayrin, J. Bernu, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche, *Nature* **455**, 510 (2008).
- [9] C. Sayrin, I. Dotsenko, X. Zhou, B. Peaudecerf, T. Rybarczyk, S. Gleyzes, P. Rouchon, M. Mirrahimi, H. Amini, M. Brune, J. M. Raimond and S. Haroche, *Nature* **477**, 73 (2011).
- [10] K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari and M. S. Feld, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 3375 (1994).
- [11] J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, J. R. Buck and H. J. Kimble, *Nature* **425**, 268 (2003).
- [12] J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, R. Miller, J. R. Buck, A. Kuzmich and H. J. Kimble, *Science* **303**, 1992 (2004).

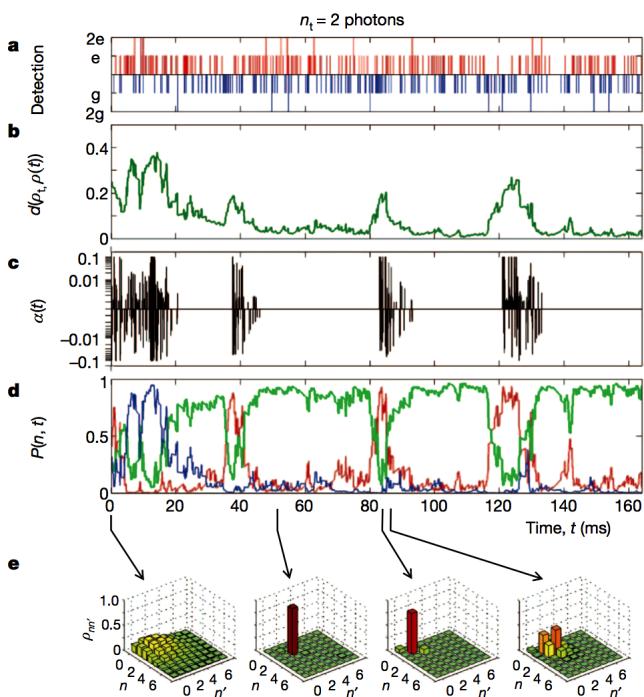


Fig. 5. Stabilization of the photon number by the quantum feedback. From the atomic state detection (a), the distance from the target photon number state is calculated (b), and based on this result the external microwave field is fed back to the cavity (c). The cavity field state is analyzed with the Bayes statistics (d) and the density matrix of the cavity field can be obtained (e). Excerpted from Ref. [9].

발전에는 수많은 공로자들이 있다. 공진기 양자전기역학 실험의 경우 앞서 언급한 마이크로파 영역의 연구 이외에도 공진기 기술의 발전 등에 힘입어 가시광 영역의 실험에 많은 진전이 있었다. MIT의 고 M. Feld와 필자(안경원)에 의해 고 H. Walther의 연구와 대비되는 단원자 레이저가 최초 개발되었으며,<sup>[10]</sup> 칼텍의 H. J. Kimble 그룹은 공진기 내부에 단원자를 포획하여 단원자를 이득물질로 하는 레이저<sup>[11]</sup>와 주문형 단일 광자 생성기를 만들어내었다.<sup>[12]</sup> 독일 Max Planck 연구소의 G. Rempe 역시 포획된 원자와 공진기의 상호작용을 연구하였으며 최근에는 한 쌍의 공진기 안에 포획된 원자들 사이에 양자 정보전송에 관한 실험연구를 발표하였다.<sup>[13]</sup> 그 밖에도 프랑스의 P. Grangier 그룹은 비선형광학을 이용하여 자유공간에서 이동하는 빛의 슈뢰딩거 고양이 상태를 생성하고 양자화률분포를 측정하였고,<sup>[14]</sup> 오스트리아 빈 대학

의 A. Zeilinger 그룹의 경우 편광이 중첩상태에 있는 광자를 이용하여 140 km의 먼 거리에서 양자 전송이 가능함을 보였다.<sup>[15]</sup>

국내 연구로는 필자가 있는 서울대 양자광 연구실에서 공진기 양자전기역학 미소 레이저를 연구하고 있으며 직접 측정이 가능한 가시광의 특성을 이용하여 출력광의 비고전 광통계<sup>[16]</sup>와 스펙트럼<sup>[17]</sup>을 측정한 바 있다. 또, 공진기와 상호작용하는 소수의 원자를 이용하여 주문형 단일 광자생성기<sup>[18]</sup>를 구현했으며 원자-공진기 시스템이 만드는 특이점(Exceptional point)을 보고한 바 있다.<sup>[19]</sup>

## 결 론

양자광학 분야는 지난 기간 많은 발전을 거듭해 왔고 양자역학의 기본적인 원리들에 대한 이해를 높이는 데에 많은 기여를 해왔다. 최근 연구들은 이에 멈추지 않고 기본 원리를 넘어선 여러 응용의 가능성을 보여주고 있다. 양자컴퓨터, 양자전송, 양자암호화 등 양자역학의 기본원리를 이용한 새로운 응용들이 연구되고 있으며 양자광학은 이를 연구의 밑바탕이 되고 있다. 이번 노벨상은 그 첫발을 디딘 개척자에게 수여하는 상이라고 생각한다. 아직 양자광학의 연구에는 많은 새로움과 즐거움이 남아있다.

## REFERENCES

- [13] S. Ritter, C. Nölleke, C. Hahn, A. Reiserer, A. Neuzner, M. Uphoff, M. Mücke, E. Figueroa, J. Bochmann and G. Rempe, *Nature* **484**, 195 (2012).
- [14] A. Ourjoumtsev, H. Jeong, R. Tualle-Brouri and P. Grangier, *Nature* **448**, 784 (2007).
- [15] X.-S. Ma, T. Herbst, T. Scheidl, D. Wang, S. Kropatschek, W. Naylor, B. Wittmann, A. Mech, J. Kofler, E. Anisimova, V. Makarov, T. Jennewein, R. Ursin and A. Zeilinger, *Nature* **489**, 269 (2012).
- [16] W. Choi, J. Lee, K. An, C. Fang-Yen, R. R. Dasari and M. S. Feld, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 093603 (2006).
- [17] H.-G. Hong, W. Seo, Y. Song, M. Lee, H. Jeong, Y. Shin, W. Choi, R. R. Dasari and K. An, *Phys. Rev. Lett.*, in press.
- [18] S. Kang, S. Lim, M. Hwang, W. Kim, J. Kim and K. An, *Optics Express* **19**, 2440 (2011).
- [19] Y. Choi, S. Kang, S. Lim, W. Kim, J.-R. Kim, J.-H. Lee and K. An, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 153601 (2010).