

1. 서론

20세기 초 물리학의 혁명을 이끌었던 양자역학의 태동은 두 방향에서 이루어졌다. 그 한 방향은 원자의 성질에 대한 연구에서 나타났다. 고전 전자기학과 원자의 행성 모델로는 설명하지 못한 수소원자의 선 스펙트럼을 보어는 기존의 행성 모델에 양자화된 궤도 각운동량이란 가설을 덧붙여서 성공적으로 설명하게 되었다. 이는 양자역학을 탄생시키는 계기가 되었고 또한 원자물리학 역사의 시작점이 되기도 한다. 이후에 수소원자에서 발견된 Lamb 편이를 설명하기 위한 이론적인 연구로 인해 양자전기역학이 정립되었다.

다른 한 방향은 역시 고전 전자기학으로 설명되지 않는 빛 현상 문제를 해결하려는 시도에서 이루어졌다. 이는

향에서 양자물리학의 탄생을 이끌었지만 사실 역사적으로나 물리적인 현상 측면에서나 빛과 원자에 대한 연구는 항상 밀접한 관계에 있어왔다. 원자의 상태 변화는 충돌의 경우를 제외하면 반드시 광자의 흡수나 방출을 동반한다. 이 과정에 대한 아인슈타인의 연구는 후에 발명될 레이저의 이론적 기초를 제공했다. 레이저의 우수한 시간적, 공간적 결맞음 특성은 광과학 분야의 눈부신 발전을 주도했다. 이에 맞물려 원자와 빛의 상호작용을 근원적인 수준에서 연구하는 것이 실험적으로 가능해졌는데, 그 대표적인 분야가 바로 공진기-QED(cavity quantum electrodynamics)이다.

공진기-QED에서는 대표적인 양자역학적 기본 입자인 원자와 광자를 공진기를 통해 결합하여 이 사이에서 일어나는 다양한 양자역학적인 현상을 연구한다. 지난

특집 ■ 원자물리

원자-공진기 시스템을 이용한 양자정보와 양자광원 연구

안경원*

바로 플랑크가 제안한 양자화 가설이다. 플랑크는 빛의 에너지가 불연속적으로 존재한다고 가정해야만 고전 전자기학에서는 설명하지 못하던 흑체복사의 스펙트럼이 비로소 이론적으로 설명될 수 있다고 주장했다. 얼마 후 아인슈타인이 역시 마찬가지로 고전 전자기학으로는 설명되지 못한 광전효과 현상을 설명하기 위해 플랑크의 양자화 가설을 채택하여 양자화된 에너지를 빛 자체의 성질로 받아들였다. 바로 광자의 개념이 태어난 순간이었다.

이처럼 원자와 빛의 성질에 대한 연구는 서로 다른 방

2~30년 동안 원자-공진기 시스템은 예전부터 이론적으로만 예측되어오던 수많은 양자광학적인 현상들을 실험적으로 증명하는 데에 큰 공헌을 했을 뿐만 아니라, 응용적인 측면에서도 많은 연구자들의 기대를 받고 있다. 2012년 공진기-양자전기역학 분야에서의 업적을 인정하여 S. Haroche가 노벨물리학상을 수상한 것은 (D. Wineland와 공동 수상) 그의 연구가 뛰어났기 때문이기도 하지만 이 분야 연구의 성과들이 그만큼 주목받고 있다는 증거이기도 하다.¹⁾ 본 글에서는 공진기-원자 시스

* 서울대학교 물리천문학부

원자-공진기 시스템을 이용한 양자정보와 양자광원 연구

템을 이용한 양자정보와 양자광원 연구라는 두 가지 주제를 중심으로 공진기-QED 분야의 최근 연구동향을 소개한다.

2. 양자정보 연구동향

양자정보라는 단어가 화제가 되기 시작한 것은 최근의 일이다. 양자정보에서는, 0과 1로 이루어지는 고전적인 비트 대신에, 원자나 스핀 등 미시양자시스템을 이용하여 양자 비트, 즉 큐비트(qubit, quantum bit의 약자)을 통해 정보처리 및 연산을 한다. 1994년 Shor의 알고리즘이 제안되면서 추상적으로 존재했던 양자컴퓨터에 대한 개념이 현실화 되었고, 그 이후 양자 순간이동(teleportation) 등 양자정보의 원리를 이용한 다양한 논의가 이어져왔다. 하지만 이론적으로 다방면으로 논의가 활발히 전개되어 온 것에 비해 실제 실험적으로는 미시양자시스템을 정확하게 제어하는 것이 쉽지 않은 일이었다.

양자 정보 기술을 실험적으로 구현하는 일에 있어 가장 어려운 문제는 결맞음 풀림(decoherence) 현상이다. 임의의 양자상태는 주변환경과 상호작용을 하면서 본래 가지고 있던 양자 결맞음을 잃어버리게 되는데, 이러한 현상은 결맞은 양자현상을 정보처리 및 연산을 하는데 충분한 시간동안 유지하는데 큰 걸림돌이 된다. 이를 극복하기 위해서는 결맞음 풀림 현상보다 더 강한 상호작용을 활용하여 양자 상태를 제어할 필요가 있으며, 이러한 필요조건을 만족시키는 시스템들 중 하나가 공진기-QED 시스템이다.

공진기-QED 시스템을 양자정보 연구에 접목시킨 대표적인 연구 그룹은 앞서 언급한 2012년도 노벨상 수상자 중 한 명인 프랑스 CNRS의 S. Haroche 교수의 그룹이 있다. 같은 해 공동수상한 D. Wineland 교수의 그룹이 빛을 이용하여 원자의 양자상태를 생성하고 측정했다면, Haroche 그룹은 원자를 이용하여 공진기장을 생성하고 측정하는 연구를 수행하였다. 이들은 리드버그 원자빔과 초전도체 마이크로파 공진기를 결합하여 강한 상호



그림 1. 2012년 노벨상 수상자인 D. Wineland 교수(좌)와 S. Haroche 교수(우). Wineland 그룹은 빛으로 원자의 양자상태를, Haroche 그룹은 원자로 빛의 양자상태를 제어하고 측정하는 공로를 인정받아 노벨상을 수상했다. (Bengt Nyman 사진)

작용을 만들어 냈다. 특히 이 상호작용을 이용하여 소위 슈뢰딩거 고양이 상태라 불리는 빛의 거시적 양자중첩상태의 생성에 성공했는데, 이러한 중첩상태는 양자 정보의 기본 틀이 되기에 큰 반향을 일으켰다.²⁾ 또, 이렇게 생성된 중첩상태에 대하여 공진기장의 양자 비파괴 측정(Quantum non-demolition measurement)을 수행하고 이를 통해 양자 단층분석(tomography)을 수행한 바 있다.³⁾

최근에는 공진기 장을 양자 되먹임을 이용하여 비고전적 상태로 제어하는 연구를 발표한 바 있다.⁴⁾ 양자역학의 기본 원리에 따르면 측정은 상태를 변화시키기 때문

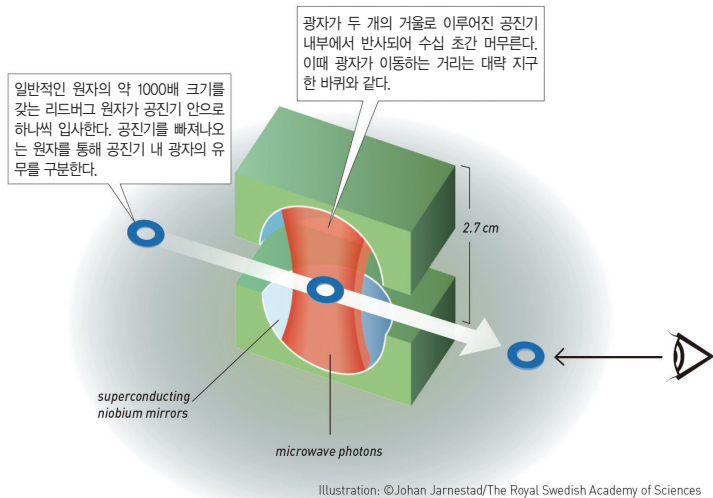


그림 2. Haroche 그룹의 원자-공진기 시스템의 개념도. 고품위 마이크로파 공진기와 리드버그 원자 빔을 결합하여 강한 상호작용을 하면서 결맞음 풀림에 둔감한 양자 시스템을 구축하였다.

그림 출처: 스웨덴 왕립 과학원, 글상자: 역주.

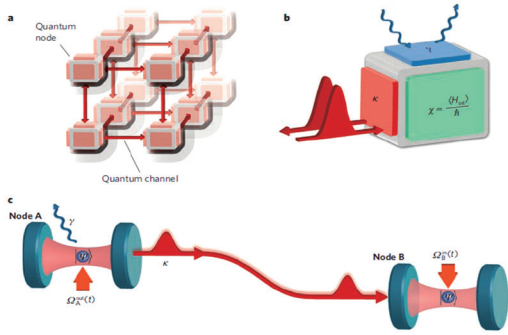
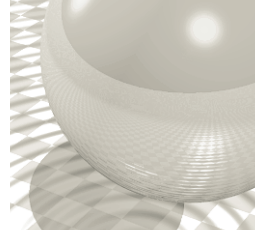


그림 3. 양자 네트워크의 개념도. a) 여러 양자 메모리(quantum node)들이 양자 채널들을 통해 양자 정보를 공유한다. b) 정보를 저장하는 물질과 전달하는 광자 사이의 양자 인터페이스가 개념도. c) Rempe 그룹과 같은 공진기-QED 시스템을 통한 기초적인 양자 네트워크의 모습.

그림 출처: H. J. Kimble, Nature 453, 1023 (2008).

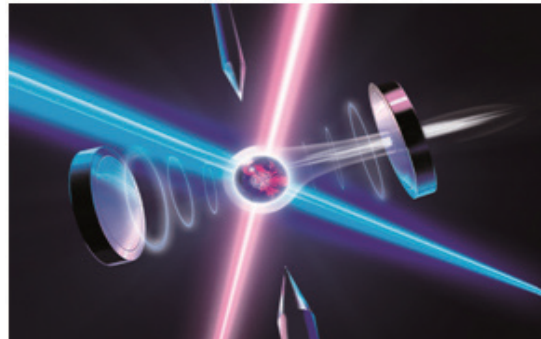


그림 4. R. Blatt 그룹의 이온-공진기 시스템의 개념도. 이온은 중성원자와 또 다른 특성을 가지고 있어 공진기와 결합했을 때 가능성이 풍부하다.

그림 출처: Innsbruck 대학 홍보자료,
<http://www.uibk.ac.at/public-relations/presse/archiv/2013/357/>

에 고전적인 되먹임으로 상태를 일정하게 유지시키는 것이 쉽지 않다. 이 연구에서는 공진기와 상호작용하는 원자들을 이용하되 비공진조건에서 원자 위상변화를 측정하여, 공진기 상태를 변화시키지 않으면서 측정하는 양자 비파괴 측정을 수행하였다. 이렇게 측정된 공진기 양자 상태를 토대로 공진기 상태가 특정 광자수에서 고정 되도록 공진기에 입사하는 원자의 상태를 조절하였다. 이렇게 양자 되먹임을 주는 방식으로 결맞음 풀림 현상과 공진기의 감쇄에도 불구하고 공진기 내부 광자수를 일정하게 유지할 수 있음을 입증했다.

막스 플랑크 양자 광학 연구소의 G. Rempe 교수 그룹은 공진기-QED 시스템을 이용하여 하나의 포획된 원자와 하나의 광자가 상호작용하는 양자 인터페이스를 구현하고 그 성질을 연구해왔다. 그들의 목적은 공진기에 포획된 원자의 긴 결맞음 시간을 이용하여 양자 정보를 저장하는 양자 메모리를 만들고, 이 정보들을 외부와 상호작용이 적은 매질인 광자에 전사하여 양자 메모리들 사이의 정보 교환에 활용하는 것이다. 그들은 공진기 안에 냉각 포획된 루비듐 원자와 얽힌 상태의 단광자를 발생시킨 후 이 단광자에 대한 투사 측정을 통하여 원하는 양자 정보를 원자에 저장하였다. 이렇게 원자에 저장된 양자 정보는 다시 단광자의 편광 정보로 전이되며, 광섬유로 연결된 다른 공진기 속 원자의 양자 상태로 저장된다. 그들은 또한 같은 시스템에서 광자를 매개로 하여 21m 떨어진 두 원자들의 얽힌 상태를 만들어내는데 성공하였다.⁵⁾ 나아가 같은 거리의 두 원자들 사이의 양자 원격 이동을 실험적으로 구현하였다. 두 광자 사이의 원격 이동

실험에 비해 멀리 떨어진 두 매질을 이용한 실험은 그들의 양자 상태와 얽힌 상태의 광자들의 벨 상태 측정을 필요로 한다. 그러므로 원자와 얽힌 상태를 가지는 광자의 수집 효율이 높은 원자-공진기 시스템은 이점을 가진다. 실제로 원자-공진기 시스템을 이용한 실험에서는 자유 공간에 포획된 이온 간의 양자 원격 이동 실험⁶⁾에 비해 10만 배 이상의 효율을 달성할 수 있었다.⁷⁾

한편, 앞서 언급한 Rempe 그룹과는 달리, Innsbruck 대학의 R. Blatt 그룹은 이온 원자를 이용하여 원자-공진기 정보교환을 달성하였다. 이온 포획의 역사는 원자 포획의 역사보다 오래되었지만 이온 포획이 갖는 전하유도 특성상 고품위 공진기와의 결합이 쉽지 않았다. 하지만 꾸준한 기술 개선을 통하여 이온과 공진기가 보다 강한 상호작용을 하는 공진기-QED 시스템을 구축하는 데 성공하였고⁸⁾ 이를 통하여 이온의 양자 상태를 공진기의 양자상태로 전송하는 실험에 성공한바 있다.⁹⁾

이들은 더 나아가 포획된 이온이 위치 제어에 유리하다는 강점을 이용하여 하나의 공진기 장에 두 개의 이온을 동시에 포획하는데 성공하였다. 그들은 이렇게 포획된 두 이온을 공진기 장을 매개로 하여 얽힌 상태로 제어하는 실험에 성공하였다.¹⁰⁾ 생성된 이온-이온의 얽힌 상태는 90%가 넘는 높은 충실도(fidelity)를 보여준다. 이 연구 결과는 멀리 떨어진 두 개의 원자-공진기 시스템을 이용하여 얽힌 상태를 만들어낸 앞선 Rempe 그룹의 실험과 비교하여 하나의 공진기 장만을 사용한다는 점에서 또 다른 응용 가능성을 점칠 수 있는 연구 결과로 평가된다.

원자-공진기 시스템을 이용한 양자정보와 양자광원 연구

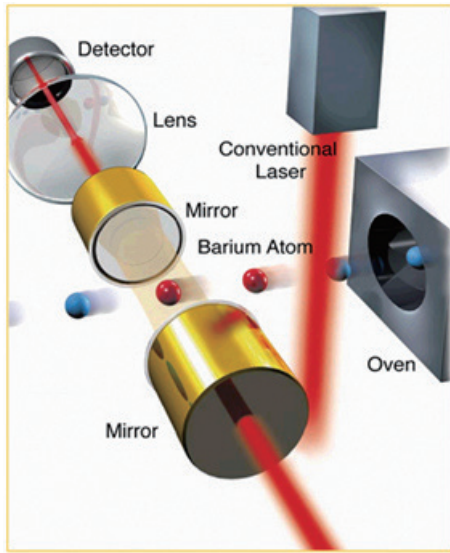


그림 5. 서울대학교 양자광 레이저 연구실의 공진기-QED 마이크로 레이저. 원자 빔은 공진기에 입사하기 전 레이저에 의해 들뜬 상태가 된다. 공진기 안에 들어간 원자 각각은 공진기장과 결맞은 상호작용을 한다. 그리하여 기존의 레이저에서는 사라지는 양자역학적 특성이 보존되어 양자광이 발생하게 된다.

그림 출처: M. S. Feld, and K. An, Scientific American 279, 56 (1998).

3. 양자광원 연구동향

비고전광 또는 양자광이란 고전적인 전자기학으로 기술되지 않고 양자역학을 적용해야만 이해될 수 있는 빛을 말한다. 지금부터 50년전에 개발된 레이저는 현재 산업현장과 연구실, 의료분야 등에서 다양하게 활용되고 있으며, 최근에는 아토초 레이저, 테라헤르츠 레이저 등 특수한 레이저들도 개발되고 있다. 그러나 이러한 모든 레이저들, 즉 일반적인 레이저들이 발생하는 빛의 특성은 고전 전자기학으로 설명될 수 있다. 하지만 sub-Poisson 빛 같은 양자광은 고전 전자기 이론으로는 설명되지 않는 특성을 갖고 있으며, 이러한 특성 덕에 기존의 레이저로는 불가능한 다양한 일을 할 수 있다. 지금부터는 원자-공진기 시스템을 이용한 양자광의 발생 및 응용을 소개한다. 또한 비록 양자광원은 아니지만 원자-공진기 시스템을 이용하여 원자시계의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 미세선평 레이저를 소개한다.

가. Sub-Poisson 광원

일반적인 레이저 광원은 진공요동에 의한 잡음, 즉 산

탄잡음(shot noise)을 갖고 있어서 측정에 있어 정확도의 근원적 한계가 있다. 이 한계를 극복하는 ‘고전적’인 방법은 광원의 세기를 크게 하는 것이다. 하지만 광원의 세기가 커지면 광학계를 구성하는 광학부품들의 열적인 변형을 가져올 수 있으며 방사압으로 인한 잡음의 증가가 발생한다. 따라서 단순히 레이저의 세기를 크게 하는 것으로는 측정의 정밀도를 높이는 데에 한계가 있다. 이런 한계를 극복하는 광원으로서 대표적인 것이 sub-Poisson 광원이다. Sub-Poisson 광원은 광자수 분포가 일반적인 레이저가 갖는 Poisson 분포에 비해 좁기 때문에, 같은 세기의 레이저에 비해 작은 세기 잡음을 보인다. 우리 연구실에서는 원자-공진기 시스템을 이용한 공진기-QED 마이크로 레이저에서 sub-Poisson 분포를 성공적으로 구현한 바 있다.^{11), 12)}

이 시스템에서는 여기된 상태의 바륨 원자빔을 공진기와 결합시키는데, 결합상수가 원자와 공진기의 감쇄율보다 크고 원자-공진기장의 상호작용 시간이 잘 정의되어 있기 때문에 원자들 각각이 결맞은 라비 진동을 겪게 된다. 일반적인 레이저의 광자수 안정화가 공진기의 감쇄에 의해서만 일어나는 것과는 달리, 공진기-QED 마이크로 레이저에서는 공진기 모드의 원자수가 일정량 이상이 되면 공진기를 지나는 원자가 광자수 안정화에 추가적으로 기여하게 된다. 이와 같은 원리에 의해 미소 레이저는 Poisson 광자수 분포보다 좁은 sub-Poisson 분포를 갖는다.

Sub-Poisson 빛과 같은 양자광은 초미세 측정에서 활용도가 높을 것으로 기대된다. 예를 들어, 최근에는 미소 공진기 센서를 이용한 단일분자운동측정¹³⁾ 이 분자생물예의 응용으로 기대를 받고 있는데, 이런 측정에서는 약한 빛으로도 대상의 상태가 쉽게 변할 수 있다는 어려움이 있다. Sub-Poisson 빛은 세기 잡음이 산탄잡음보다 작기 때문에 측정대상에 영향을 주지 않을 정도의 약한 세기로도 충분한 신호 대 잡음비를 가능하게 한다.

나. 단광자 광원

단광자 광원은 Poisson 분포를 가지는 일반적인 레이저 광원과 달리 한 번에 하나의 광자를 발생시킬 수 있는 광원이다. 높은 효율 및 반복률의 단광자 발생은 양자 통신 및 양자 연산, 양자 원격 이동 등의 실현에 필수적인

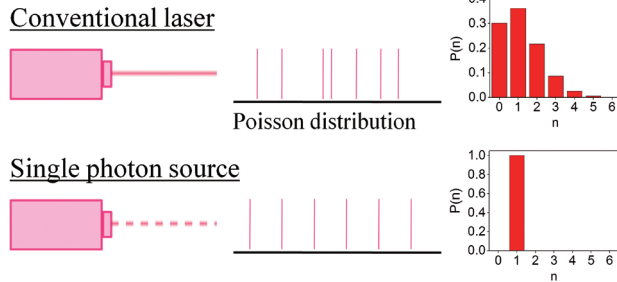
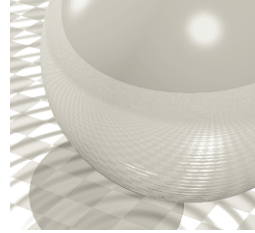


그림 6. 일반적인 레이저 광원과 단광자 광원의 광자 분포.

요소이기 때문에 다양한 시스템에서 연구되어 왔다. 매개 하향 변환(Parametric down conversion)은 단광자를 이용한 실험에 흔히 사용되어 왔지만 원하는 시간에 단광자를 얻을 수 없다는 한계를 가지고 있다. 하나의 원자, 이온, 또는 분자, 양자점, 다이아몬드 색깔 중심을 여기시킨 후 자발 방출을 통해 광자를 얻는 방법 또한 방출 방향을 제어할 수 없기에 효율성의 문제를 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 높은 세기의 레이저를 통해 방출되는 광자의 수를 늘리고 높은 개구수의 렌즈를 통해 집중하는 방법이 시도되나 시료의 안정성에 문제를 야기하기도 한다.¹⁴⁾

원자-공진기 시스템을 이용한 단광자 광원은 퍼셀 효과(Purcell effect)를 통해 공진기 모드 방향으로 자발 방출물을 증가시킴으로써 단광자들을 공간적으로 잘 정의된 모드를 통해 높은 수집 효율로 방출할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또 공진기와 결합한 단일 원자를 통해 광자를 원하는 시간에 발생시킬 수 있는 주문한 단광자 발생이 가능하다. 진공-유도 라만 단열 경로(Vacuum-stimulated Raman adiabatic passage) 방법을 적용하는 경우, 발생한 광자의 파형 또한 임의로 조절할 수 있다. 원자-공진기를 이용한 단광자 광원은 현재까지 9.6MHz의 반복률¹⁵⁾ 과 56%의 효율을 기록하고 있다.¹⁶⁾

다. 원자시계 안정화를 위한 미세선평 레이저

원자의 전이로 인해 방출되는 빛은 매우 정확한 진동자 역할을 한다. 이러한 원리를 이용한 원자시계는 현재 시간표준으로 이용되며, 정확한 거리측정을 가능하게 하여 GPS(Global Positioning System)에 이용되고 있다. 원자시계의 성능은 주로 원자의 온도와 전이 주파수, 전

이 선평으로 결정되는데, 이와 더불어 펄핑 레이저의 선평 또한 중요하다. 여기서는 광원자시계의 성능을 개선할 수 있는 두 가지 미세선평 레이저를 소개하려 한다.

첫 번째 미세선평 레이저는 초방사(superradiance) 레이저이다. 초방사란 파장 길이보다 훨씬 작은 간격 안에 집중된 원자집단이 단일 모드의 빛에 의해 유도방출할 때 원자의 이 중극자가 동기화된 안테나와 같이 행동하여 강한 빛이 방출되는 현상을 말한다. JILA에서는 초방사 현상을 이용한 레이저를 최근에 개발하였는데, 미세선평을 가능하게 한다는 점에서 그 결과가 주목 받고 있다.¹⁷⁾

일반 레이저에서는 품위값이 높은 공진기 안에 이득 매질을 두고, 들뜬 상태의 원자나 분자의 유도방출을 통해 공진기 안에 수많은 광자들을 복제해 내어 강한 세기의 방향성을 가진 빛을 만들어낸다. 이때 공진기의 기계적 혹은 열적 진동으로 공진기 주파수가 바뀌면서 레이저의 선평 또한 퍼지게 되는데, 통상적으로는 안정적인 참조 공진기에 공진기의 주파수를 고정하는 방법으로 주파수를 안정화 한다. 그동안 이 방법을 통해 얻어진 가장 좁은 레이저 선평은 sub-Hertz 수준이었다.¹⁸⁾ 이에 반해 초방사 레이저는 원자 앙상블의 동기화된 작용으로 품위값이 매우 낮은 공진기 안에서 광자수가 1개 미만인 상태에서도 효율적으로 원자 앙상블의 위상정보를 이끌어낼 수 있다. 광자수가 매우 적으므로 광자를 매개로 공진기의 진동이 원자에 주는 반작용이 무시할 정도로 작기 때문에 레이저의 주파수는 원자의 전이 주파수에 의해 결정되며, 레이저 선평은 일반 레이저에 비해

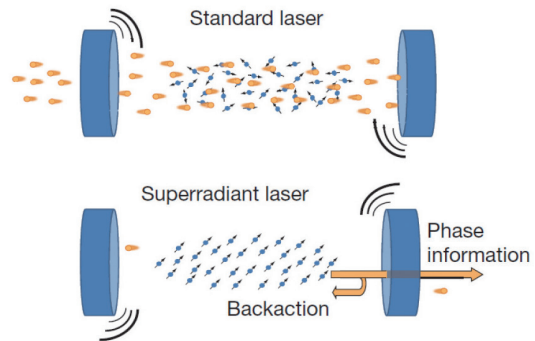


그림 7. 일반적인 레이저(위)와 초방사 레이저의 비교(아래).

그림 출처: 참고문헌 17번.

원자-공진기 시스템을 이용한 양자정보와 양자광원 연구

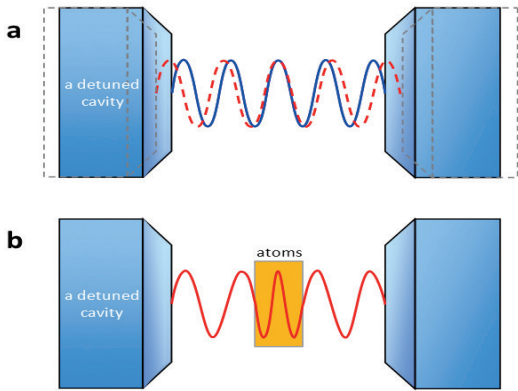


그림 8. (a) 일반 레이저에서 공진기의 주파수(파란색)가 원자의 주파수(빨간색)와 다른 경우, 레이저 주파수는 공진기를 쫓아간다. (b) 본 연구에서 관측된 양자 주파수 당김 현상을 이용하면 원자-공진기의 어긋난 주파수를 상쇄시켜 레이저 주파수가 원자의 주파수(빨간색)와 항상 같아지도록 만들 수 있다.

1/10,000수준으로 좁아질 수 있다.

두 번째로 소개할 미세선평 레이저는 양자 주파수 당김 (quantum frequency pulling) 레이저이다. 레이저에서 주파수 당김이란 공진기의 공진 주파수와 원자의 공진 주파수가 일치하지 않고 어긋나 있을 때 레이저의 발진주파수가 원자의 주파수 쪽으로 끌어당겨지는 현상을 말한다. 주파수 당김의 정도는 공진기와 이득물질의 선평으로 결정되는데 결맞은 상호작용의 효과가 사라지지 않은 공진기-QED 레이저에서는 이 효과가 다르게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

우리 연구실에서는 원자와 공진기가 강하게 결합하는 공진기-QED 미소 레이저에서 새로운 양자주파수 당김 현상을 이론적으로 예측하고¹⁹⁾ 실험적으로 입증하는데 성공하였다.²⁰⁾ 양자주파수 당김 현상에서는 주파수 당김이 원자의 수에 비례하여 커진다. 특히 강결합 조건에서 원자수를 광자수 보다 무척 크게 만들므로써 원자-공진기 주파수 어긋남을 완전히 상쇄시킬 수 있다. 따라서 기계적 진동 혹은 열적 변화에 의한 공진기-원자 주파수 어긋남을 제거하여 한층 더 좁아진 레이저 선평을 얻을 수 있다. JILA의 초방사 레이저가 품위값이 낮은 공진기 안에서의 초방사 현상을 이용, 적은 수의 광자로 거울 진동에 의한 반작용을 줄인 것이라면, 우리 연구실에서 찾아낸 방법은 이와 반대로 초고품위 공진기 안에서의 강한 상호작용을 적극 활용하는 방법이라는 점이 흥미롭다.

4. 국내 동향 및 향후 전망

국내에서는 필자의 연구실에서 원자-공진기 시스템을 이용한 다양한 양자현상을 연구하고 있다. 특히 정밀한 원자-공진기 시스템의 결합상수 제어²¹⁾ 와 원자의 나노미터 수준 위치 제어 기술을 이용하여 원자-공진기 시스템의 특이점 현상²²⁾ 이나 진공요동의 실험적 측정²³⁾ 등의 연구를 진행한 바 있다. 최근에는 이를 더욱 심화시켜 앞서 언급한 세기 압축률이 높은 sub-Poisson 광원과 미세선평 레이저를 포함하여, 고효율 고반복률 단광자 발생시스템,²⁴⁾ 원자-공진기의 결맞은 상호작용을 이용한 결맞게 펌핑된 쌍극자 레이저²⁵⁾ 등을 연구 중에 있다. 이러한 시스템은 양자정보 전반과 정밀 측정 등의 분야에 다양하게 활용될 수 있다.

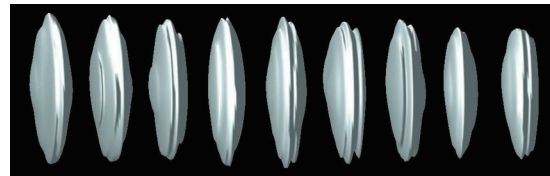


그림 9. 나노미터 수준으로 국소화된 원자를 이용하여 측정된 공진기 내 진공요동의 3차원 구조. 진공요동이란 입자와 반입자가 생성과 소멸을 반복하며 생기는 에너지 기저상태를 말한다. 중성원자를 이용하여 진공요동의 3차원 구조를 측정된 실험은 이 실험이 최초이다.

그림 출처: 참고문헌 23번.

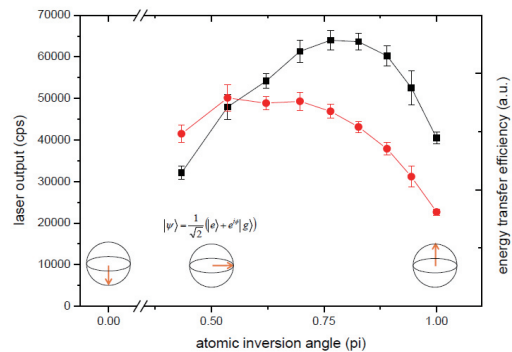
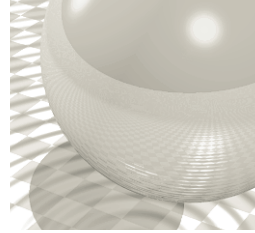


그림 10. 나노미터 수준 원자 국소화 기술을 응용하여 개발 중인 결맞게 펌핑된 쌍극자 레이저에서 관측한 출력과 에너지 변환 효율. 이득물질의 밀도반전에만 의존하는 기존 레이저에서와는 달리 이득물질의 위상을 결맞게 제어하여 레이저 출력을 극대화하고 에너지 변환효율도 향상시킬 수 있다. ■: 레이저 출력, ●: 에너지 변환효율. 에너지 변환효율은 Bloch 벡터가 Bloch sphere에서 적도를 가리킬 때 최대가 된다. 위 결과에서는 결맞지 않은 효과, 즉 밀도반전의 효과가 남아 있어서 최대 출력은 원자밀도반전 각도가 0.75π 근방일 때 발생하였다.

미출판 자료.



여태까지의 공진기-양자전기역학의 앞선 연구들이 양자역학의 근원적 성질의 확인과 간단한 양자현상의 확인들이었다면 향후 연구는 이를 이용한 양자 인터페이스와 기능성 양자광 발생에 초점이 맞춰질 것으로 예상된다. 앞서 소개한 시스템들은 물론, 보다 강한 원자-공진기 결합을 위하여 나노 단위의 미소공진기를 활용하거나²⁶⁾ 고차모드를 선택적으로 활용하기 위하여 임의로 고차모드의 축퇴를 제거하는²⁷⁾ 등의 심화된 연구가 진행 중에 있다. 이러한 보다 발전된 연구를 통하여 기초연구를 뛰어넘는 다양한 가능성을 보일 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] 김준기, 안경원, 물리학과 첨단기술 21권 12호, 3 (2012).
 [2] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maitre, A. Maali, C. Wunderlich, J.M. Raimond, and S. Haroche, Phys. Rev. Lett. 77, 4887 (1996).
 [3] S. Deleglise, I. Dotsenko, C. Sayrin, J. Bernu, M. Brune, J.M. Raimond, and S. Haroche, Nature 455, 510 (2008).
 [4] 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).
 [5] S. Ritter, C. Nolleke, C. Hahn, A. Reiserer, A. Neuzner, M. Uphoff, M. Mucke, E. Figueroa, J. Bochmann and G. Rempe, Nature 484, 195 (2012).
 [6] S. Olmschenk, D. N. Matsukevich, P. Maunz, D. Hayes, L.-M. Duan, and C. Monroe, Science 323, 486 (2009).
 [7] C. Nolleke, A. Neuzner, A. Reiserer, C. Hahn, G. Rempe, and S. Ritter, Phys. Rev. Lett. 110, 140403 (2013).
 [8] A. Stute, B. Casabone, B. Brandstatter, D. Habicher, H.G. Barros, P.O. Schmidt, T.E. Northup, and R. Blatt, Appl. Phys. B, 107, 1145 (2012).
 [9] A. Stute, B. Casabone, B. Brandstatter, K. Friebe, T.E. Northup, and R. Blatt, Nature Photonics 7, 219 (2013).
 [10] B. Casabone, A. Stute, K. Friebe, B. Brandstatter, K. Schuppert, R. Blatt, and T. E. Northup, Phys. Rev. Lett. 111, 100505 (2013).
 [11] W. Choi, J.-H. Lee, K. An, C. Fang-Yen, R. R. Dasari, and M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. 96, 093603 (2006).
 [12] 서원택, 홍현규, 이문주, 송영훈, 이재형, 조영탁, 안경원, 광학과 기술 13권 3호, 8-17 (2009).
 [13] A. M. Armani, R. P. Kulkarni, S. E. Fraser, R. C. Flagan, and K. J. Vahala, Science, 317, 783 (2007).
 [14] Y. Dumeige, F. Treussart, R. Alleaume, T. Gacoin, J.-F. Roch and P. Grangier, J. Lumin. 109 61 (2004).

[15] S. Kang, S. Lim, M. Hwang, W. Kim, J.-R. Kim and K. An, Opt. Express 19, 2440 (2011).
 [16] A. Reiserer, C. Nolleke, S. Ritter and G. Rempe, Phys. Rev. Lett. 110, 17, J. G. Bohnet, Z. Chen, J. M. Weiner, D. Meiser, M. J. Holland and J. K. Thompson, Nature, 484, 78 (2012).
 [18] B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano, and J. C. Bergquist, Phys. Rev. Lett. 82, 3799 (1999).
 [19] H.-G. Hong and K. An, Phys. Rev. A, 85, 023836 (2012).
 [20] H.-G. Hong, W. Seo, Y. Song, M. Lee, H. Jeong, Y. Shin, W. Choi, R. R. Dasari, and K. An, Phys. Rev. Lett. 109, 243601 (2013)
 21] S. Kang, Y. Choi, S. Lim, W. Kim, J.-R. Kim, J.-H. Lee, and K. An, Opts. Ex. 18, 9286 (2010).
 [22] Y. Choi, S. Kang, S. Lim, W. Kim, J.-R. Kim, J.-H. Lee, and K. An, Phys. Rev. Lett. 104, 153601 (2010).
 [23] M. Lee, J. Kim, W. Seo, H.-G. Hong, Y. Song, R. Dasari, and K. An, arXiv:1305.6020.
 [24] M. Hwang and K. An, J. Kor. Phys. Soc. 63, 922 (2013).
 [25] J. Kim, Y. Song and K. An, Coherently pumped cavity qed microlaser. In The 23rd International Conference on Atomic Physics (Palaiseau, France, 23-27, July, 2012).
 [26] J. D. Thompson, T. G Tiecke, N. P. de Leon, J. Feist, A.V. Akimov, M. Gullans, A. S. Zibrov, V. Vuletic, and M. D. Lukin, Science 340, 1202 (2013).
 [27] J. Kim, M. Lee, W. Seo, H.-G. Hong, Y. Song, and K. An, Opts. Lett. 37, 1457 (2012).

약력



안경원

- 2001년 12월-현재 서울대학교 물리천문학부 조교수, 부교수, 교수
- 1998년 3월-2001년 12월 한국과학기술원 물리학과 조교수
- 1995년 6월-1998년 2월 Postdoctoral Fellow, Research Scientist G. R. Harrison Spectroscopy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology
- 1986년 9월-1995년 5월 Ph. D. in Physics, Massachusetts Institute of Technology
- 1983년 3월-1985년 2월 서울대학교 물리학과 이학석사
- 1979년 3월-1983년 2월 서울대학교 물리학과 이학사

* 본 원고는 안경원 교수 연구실의 박사과정 김준기, 송영훈, 황명규의 도움을 받아 작성되었음.