

서울대학교 양자광 레이저 연구실

안 경 원

연구실 개요

빛의 흡수 및 방출을 인류가 원하는 방식으로 제어하게 된 것은 양자역학이 정립된 20세기 중후반의 일로 그 대표적인 것이 레이저이다. 빛이 물질의 상태를 바꾸고 또 물질이 빛의 상태를 바꾸는 현상, 즉 빛-물질의 상호작용을 이해함으로써 다양한 기술적 응용이 이루어졌다. 지금까지의 연구를 통하여 빛과 물질의 상호작용을 강화하는 두 근본원리가 밝혀졌다. 하나는 퍼셀(Purcell) 효과이고 다른 하나는 피터만(Petermann) 효과이다. 퍼셀 효과는 진공 전기장의 세기 강화에 기반을 두고 있으며 공진기-QED라는 분야로 정리된다. 2012년 S. Haroche에게 수여된 노벨상 분야가 바로 공진기-QED 분야이다. 비교적 덜 알려진 피터만 효과는 바-허미션 계에서 공진 모드의 배-직교성(bi-orthogonality)에 의해 빛-물질의 결합이 증가하는 현상이다. 주로 불안정 공진기에서 과잉잡음(excess noise) 등으로 연구되어 왔다.

본 연구실은 이 두 원리에 기반을 두고 빛-물질 상호작용을 가장 기본적인 수준에서 탐구하는 연구를 수행하고 있다(그림 1). 원자-공진기 계, 단원자 포획, 광격자 등을 이용하여 양자광학, 양자정보를 연구하고 있고, 비대칭 미소공진기에서 모드 간 상호작용, 동적 터널링 등의 양자혼돈현상 연구, 이득물질과 배-직교하는 모드와의 상호작용을 연구한다. 이러한 탐구연구를 통해 새로운 현상을 발견하고 이를 고효율 양자광원, 양자정보처리 등에 응용하고자 한다.

주요 연구 분야

1. 진공전기장 강화를 통한 양자광 발생

P. A. M. Dirac은 원자의 자발방출을 설명하기 위해 진공에너지에 의한 진공전기장을 제안하였다. 즉 자발방출이란 진공전기장(진공요동)에 의한 유도되는 광자의 방출현상이라는 것이다. 진공에너지와 진공요동은 우주상수, 캐시미어(Casimir) 힘, 램

저자약력

안경원 교수는 1983년에 서울대학교 물리학과를 졸업하여 동대학원에서 석사학위를 받은 후 1995년에 미국 MIT(Massachusetts Institute of Technology)에서 박사학위를 받았다. MIT G. R. Harrison Spectroscopy Laboratory의 연구원을 거쳐 1998년부터 2001년까지 KAIST에서 조교수/부교수로 있다가 2001년부터 서울대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. (ulzeean@snu.ac.kr)

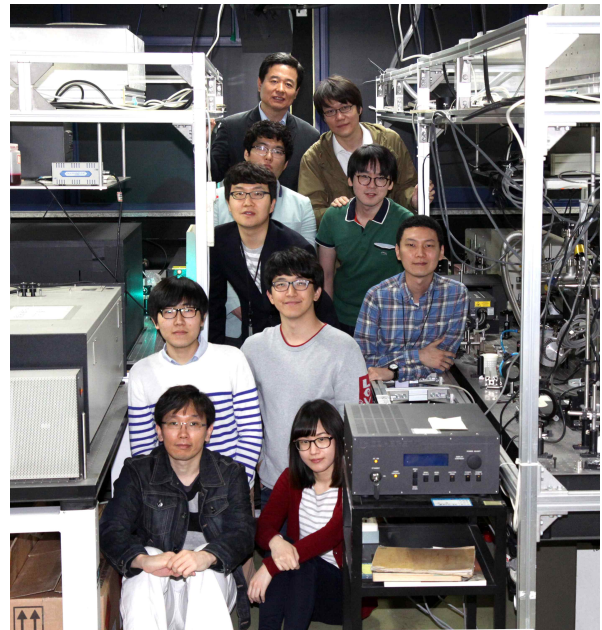


그림 1. 거시양자광 레이저 연구실 구성원 (자세한 것은 연구실 홈페이지 참조: <http://sal.snu.ac.kr>).

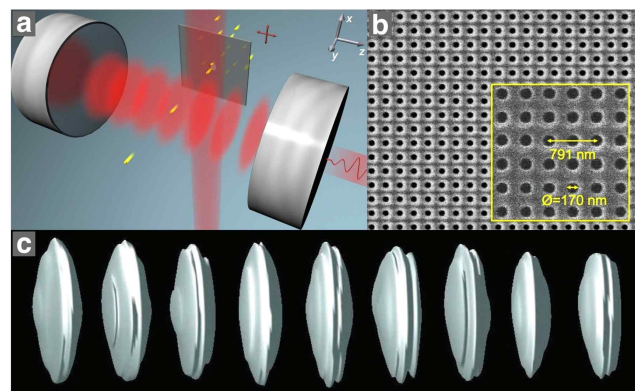


그림 2. (a) 단일 바륨원자와 나노구멍격자를 사용하여 진공에너지 분포를 측정한다. (b) 실리콘 나이트라이드 평판에 집속이온빔으로 직경 170나노미터 구멍을 뚫어 만든 나노구멍격자. (c) 공진기 안에 형성된 진공에너지가 최대값의 20%가 되는 등가면. [그림 출처: M. Lee et al., Nat. Commun. **5**, 3441 (2014)].

(Lamb) 이동 등의 원인으로 이해된다. 공진기 내부에서 강화된 진공요동의 구조는 공진기의 기하학적 구조에 의해 결정된다고 알려져 있으나 간접적인 방법으로도 그 구조의 일부가 관측되어 왔다. 본 연구실은 나노격자(nanohole array)를 이용한 원자의 위치 국소화를 통해 공진기 내부에서 강화된 진공요동의 3차원

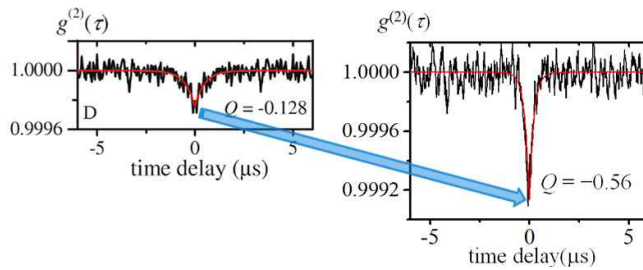


그림 3. 광자수 분포를 보기 위해 측정된 이차상관함수. 시간 0에서 함수 값이 1보다 작아지는 정도가 (Mandel Q)/(광자수)로 주어진다. 최근 실험에서 광자 수는 약 600 정도이고 결맞은 빛보다 광자수 불확도가 34% 감소한 결과를 얻었다. 왼쪽이 2006년 결과 [W. Choi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, 093603 (2006)], 오른쪽이 최근(2014년) 결과이다.

구조를 직접 형상화할 수 있었다(그림 2). 이 연구에서는 원자의 자발방출률이 진공요동의 세기에 비례하는 원리가 사용되었다. 또 나노격자를 이용한 원자의 위치/위상 제어기능은 다수의 원자와 공진기장 사이에 위상이 결맞은 상호작용을 가능하게 한다. 이를 통해 기존 마이크로레이저보다 더욱 비고전적인 특성이 살아있는 새로운 양자광원을 구현하는 연구를 수행 중이다.

강화된 진공전기장에 의한 원자-공진기의 결맞은 상호작용을 이용하면 세기압축광(intensity-squeezed light)을 발생할 수 있다. 특히 원자와 공진기의 감쇄작용이 거의 무시될 수 있는 경우, 원자수가 수백 개가 되어도 결맞은 라비진동이 유지된다. 따라서 라비진동에 의해 유도되는 광자수 안정화를 통해 결맞은 빛보다 광자수 분포가 좁으면서 강한 세기의 cw 세기압축광을 발생시킬 수 있는 것이다. 세기압축광은 결맞은 빛보다 잡음이 적으므로 정밀측정 및 고효율 저잡음 광통신 등에 유용하다. 세기압축정도를 Mandel Q 지표로 나타내는데, Q가 -1(Fock 상태)과 0(결맞은 상태) 사이이면 압축광을 의미한다. 본 연구실은 최근 연구에서 Mandel Q값이 -0.6에 근접하는 압축광 발생에 성공하였다(그림 3). 이것은 cw 세기압축광으로는 지금까지 구현된 가장 낮은 Mandel Q 값에 해당하는 우수한 결과이다.

원자-공진기의 강한 결합은 레이저 주파수당김(frequency pulling)현상도 강화할 것으로 예측되어 왔다. 본 연구실은 실험을 통해 원자수와 결합상수의 제곱에 비례하여 강화되는 양자주파수당김 현상을 최초 관측하였다 [H.-G. Hong *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 243601 (2012)]. 양자주파수당김 현상을 이용하면 이득물질과 공진기 주파수의 어긋남을 상쇄시킬 수 있기 때문에 안정된 광학시계를 만드는데 이용될 수 있다.

2. 빛-원자 양자 인터페이스

양자정보처리에서는 하나의 양자 계로 모든 기능을 구현하는 것이 어렵기 때문에 다양한 양자계(광자, 원자, 이온, 양자점, 조셉슨 접합 등) 사이의 양자 인터페이스가 중요해지고 있다. 본

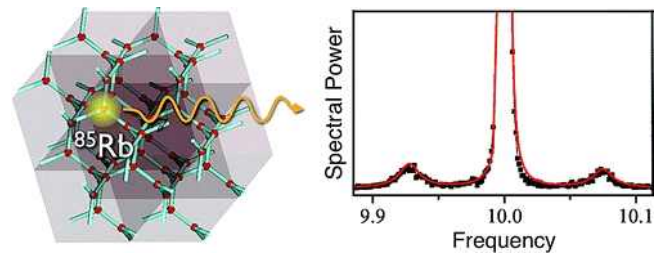


그림 4. 광격자에 포획된 단일 루비듐 원자와 그 형광 스펙트럼. Rayleigh 산란 봉우리 좌우로 Stokes, anti-Stokes 봉우리가 나타난다. 중심의 Rayleigh 봉우리 선평(수 kHz)으로부터 격자점 간 물질파 터널링률을 구할 수 있다. [출처: W. Kim *et al.*, Nano Letters **11**, 729 (2011)]

연구실은 원자-공진기 계를 기반으로 하는 광자-원자의 양자 인터페이스에 초점을 맞추고 있다. 우선 주운동 단광자 발생의 효율을 높이는 연구를 진행 중이다. 단광자는 이상적인 양자 정보 전달 매체로 양자 통신, 양자 연산 등의 양자 정보 과학 및 양자 광학 연구에서 핵심적인 역할을 한다. 단원자-공진기 계는 높은 효율로 광자들을 공진기 모드로 방출한다는 장점을 갖고 있다. 본 연구실은 파브리-페로 형태의 공진기 내부에 하나의 루비듐 원자를 포획하여 단원자-공진기 계를 구현하고, 10 MHz 주기의 나노초 π -펄스로 원자를 여기시켰다. 그 결과 원자-공진기 시스템을 이용한 단광자 발생장치 중 가장 높은 반복률(초당 1.7×10^6 회)을 달성하였다 [S. Kang *et al.*, Opt. Express **19**, 2440 (2010)]. 단광자 발생효율은 펄스 펄스 당 단광자가 방출되는 확률로 정의되며 본 실험에서 약 17%가 구현되었는데, 현재 단광자 발생효율을 50% 이상으로 높이는 연구 진행 중에 있다.

단원자-공진기 계는 단일 qubit 양자 메모리를 구현하는데 사용된다. 만약 단일 원자를 공진기 안에 포획하는 대신 다수의 원자를 1차원 광격자의 퍼텐셜에 각각 가두고, 광격자를 움직여서 원자 하나하나를 선택적으로 공진기와 결합하도록 한다면 multi-qubit 양자 메모리를 구현할 수 있을 것이다. 이 경우 원자를 광격자 퍼텐셜의 바닥에 포획한 상태로 광격자를 빨리 이동시킬 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 연구실은 움직이는 광격자 안에서 원자의 운동 상태 변화를 연구하고 있다. 저온 원자의 공명형광 스펙트럼에는 원자의 온도나 양자역학적 운동 상태 대한 정보가 들어있다. 소수원자의 형광스펙트럼은 본 연구실이 개발한 광자수셈 2차상관계수 분광학(photon-counting second-order-correlation spectroscopy) 방법으로 측정한다. PCSOCS를 이용하면 펨토와트 수준으로 약한 빛의 스펙트럼 측정도 가능하다. 선행연구로서 본 연구팀은 광자기 포획 중심에 생성된 미소 광격자 퍼텐셜에서 단일 원자의 공명형광 스펙트럼을 PCSOCS 방법으로 측정하였다(그림 4). 원자가 광격자에 포획된 경우 형광스펙트럼은 Lamb-Dicke 효과에 의해 3개의 좁은 봉우리를 갖는다. 광격자의 속도를 증가시키면 움직이면 좁은 봉우리들이 작아지면서 대신 넓은 봉우리가 나타난다. 이는 광격자 퍼텐

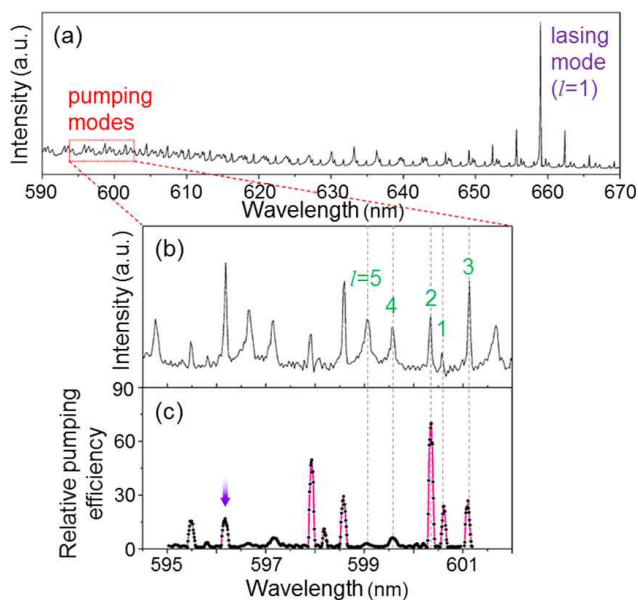


그림 5. (a) 비대칭 공진기의 스펙트럼. (b) 펌프 영역의 스펙트럼. (c) 펌프 파장에 따른 펌프 효율. 동적터널링에 의해 기존 대비 100배의 효율증대가 이루어졌다. [출처: J. Yang et. al., Phys. Rev. Lett. **104**, 243601 (2010)]

설의 바닥에 포획되지 않은 원자들에 의한 것이다. 현재 두 원자 그룹들의 비율에 대한 이론적 분석을 진행 중이다.

3. 비대칭 공진기에서의 양자 혼돈

위상공간상에 동적으로 분리되어있는 고전적 운동궤적 사이에서 일어나는 양자역학적 터널링 현상을 동적 터널링이라 한다. 본 연구팀은 색소분자가 포함된 액체제트 비대칭공진기 레이저에서 동적 터널링 현상을 직접적으로 관측할 수 있었다(그림 5). 실험에서는 펌프빔이 위상공간상 혼돈(chaotic) 영역으로 주입되었기 때문에 동적 터널링을 통해서만 정칙(regular) 영역에 존재하는 공진기 모드로 전이할 수 있다. 본 연구팀은 혼돈영역과 정칙영역 간 동적터널링을 활용하여 레이저 펌프효율을 기존 대비 100배까지 높일 수 있었다.

최근에는 작은 변형도를 갖는 비대칭 미소공진기에서 공진보조 터널링(Resonance Assisted Tunneling) 현상을 실험적으로 관측하는데 성공하였다. RAT는 동적 터널링의 한 유형으로 고전적인 공명에 의해 매개가 된다. RAT는 quantum map 등에서 이론적으로 연구되었을 뿐 실제 시스템에서 검증된 바는 없었다. 본 연구팀은 실험을 통해 RAT에 의한 모드 간 상호작용의 크기가 상호작용을 매개하는 공진사슬구조 면적의 제곱에 비례함을 입증하였다. 이 연구결과는 실제 비적분계에서 준-고전적인 방법만으로 양자역학적인 모드 간 상호작용을 예측할 수 있는 길을 제시해주고 있다.

바-허미션 계는 변수공간상에 에너지 연산자(Hamiltonian)의 고유함수들이 하나로 융합되는 예외점(exceptional point, EP)이 존재한다고 알려져 있다. 비대칭 미소공진기는 공진모드들의 감쇠현상 때문에 바-허미션 계가 된다. 본 연구실에서는 액체 제트

로 만들어진 비대칭 미소 공진기의 고유 함수들을 관측하여 EP의 존재를 실험적으로 입증한 바 있다[S.-B. Lee et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 134101 (2009)]. 원자-공진기계도 원자 및 공진기의 감쇠현상 때문에 바-허미션 계가 된다. 본 연구실은 원자-공진기 결합상수를 바꿔가면서 EP를 양자계에서 처음으로 관측하였다[Y. Choi et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 153601 (2010)]. 또 EP에서 레이저 선폭확대와 관련된 피터만 인자가 발산한다는 것이 여러 이론연구를 통해 알려져 있다. 본 연구팀은 스타디움 형태의 비대칭 미소공진기에서 피터만 인자가 발산함을 이론적으로 확인하였다[S.-Y. Lee et al., Phys. Rev. A **78**, 015805 (2008)]. 현재 액체제트 비대칭 미소공진기를 사용하여 EP 근방에서 피터만 인자의 변화를 실험을 통해 관측하는 연구를 진행 중이다.

향후 전망

나노격자를 사용하여 공진기장에 입사하는 원자가 모두 같은 위상을 갖는 양자중첩상태에 있도록 제어함으로써 결맞게 펌핑된 쌍극자 레이저를 구현할 수 있다. 이와 같은 양자광 레이저는 고효율(원자 수와 쌍극자 모멘트의 제곱에 출력광이 비례)과 문턱조건이 없는 신개념 레이저로서 높은 응용성을 가지고 있다. 아울러 원자-공진기장 간의 위상전사가 이루어지기 때문에 양자 정보에도 응용 가능하다. 입사하는 원자의 위상을 두 개 이상으로 하면 빛의 슈뢰딩거 고양이 상태와 같은 거시적 양자중첩상태 생성도 가능할 것으로 보인다.

기존의 양자혼돈 연구에서 입자간 상호작용은 무시된다. 그러나 실제 물리계에서는 입자간 상호작용이 존재한다. BEC는 원자들이 모두 바닥상태로 응집하는 현상으로 원자간 상호작용이 중요하고 위상 결맞음을 가지며 하나의 파동함수로 기술된다. 극저온 원자의 BEC는 퍼텐셜이나 원자간 상호작용을 정교히 제어할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구팀은 BEC를 기반으로 하는 양자혼돈계를 구현하는 연구를 추진하고 있다. 앞으로 원자간 상호작용의 제어를 통해 기존 시스템에선 관찰할 수 없던 새로운 양자혼돈현상을 발견할 수 있을 것으로 기대된다.

바-허미션 계의 또 다른 특징 중의 하나는 과잉잡음이다. 과잉잡음은 바-허미션 계의 고유 함수들이 직교집합을 이루지 못하고 배직교하기 때문에 발생한다. 레이저 선폭과 관련된 피터만 인자와 과잉잡음은 같은 물리현상으로 이해되고 있다. 따라서 EP에서 피터만 인자가 발산한다는 사실은 EP 근처에서 문턱없는(thresholdless) 레이저가 가능하다는 것을 의미한다. 이는 기존의 문턱있는 레이저의 원리인 퍼셀 효과와는 전혀 다른 원리이다. 피터만 효과에 의한 레이저 문턱 감소가 입증된다면 포토닉스 분야에 큰 영향을 줄 것이다.

이와 같이 본 연구실은 빛-물질 상호작용의 두 근간, 퍼셀효과와 피터만 효과의 근본적 탐구를 진행하고 있으며 앞으로도 다양한 물리현상 발견과 응용을 도출하는데 주력할 것이다.