

새로운 연구결과 소개

Spectrum of the Cavity-QED Microlaser: Strong Coupling Effects in the Frequency Pulling at Off Resonance

공진기 양자전기역학(quantum electrodynamics; QED)의 발전은 소수의 발광체와 공진기 모드 간의 강한 상호작용을 이해하고 제어할 수 있게 해 주었다. 대표적인 실험 중 하나인 마이크로메이저(micromaser)는 빛의 비고전적 측면을 밝혀내었을 뿐 아니라 레이저 문턱, 광통계와 같은 레이저의 기본적인 성질에서 양자 효과를 찾아냄으로써 레이저 물리학의 발전에 공헌하였다. 이후 마이크로메이저를 가시광 영역에서 구현한 마이크로레이저(microlaser)를 비롯해 다양한 형태의 공진기 QED 기반 레이저가 개발되었으며 원자-공진기 강결합에 의한 양자 효과가 관측되었다.

그러나 기존의 연구는 대체로 광자셈에 기반한 레이저 세기 측정에 국한되어 있었으며 스펙트럼 측정은 많은 이론적 관심에도 불구하고 분광에 필요한 높은 민감도 때문에 측정이 어려웠다. 서울대의 안경원 교수팀은 광자셈에 기반한 2차 상관함수 분광법(Photon Counting-based Second-Order Correlation Spectroscopy; PCSOCS)을 이용하여 공진기 QED 마이크로레이저의 스펙트럼에서 주파수 당김 효과를 관찰하는데 성공했다.

PCSOCS에서 스펙트럼은 마이크로레이저 출력을 국소 진동자와 간섭시켜 맥놀이 신호를 발생시킨 후 그것의 2차 상관함수를 얻고 푸리에 변환하여 얻어진다. 공진기-원자 간 주파수 어긋남을 공명 조건 근처에서 바뀌가며 얻은 스펙트럼을 각각 살펴보면 레이저의 중심 주파수가 공진기 공명 주파수와 일치하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그 차이가 바로 주파수 당김에 해당하며 주파수 어긋남에 대하여 분산 곡선 모양을 보인다(그림 1a). 이와 같은 현상은 일반적인 레이저에서도 잘 알려져 있으나 주파수

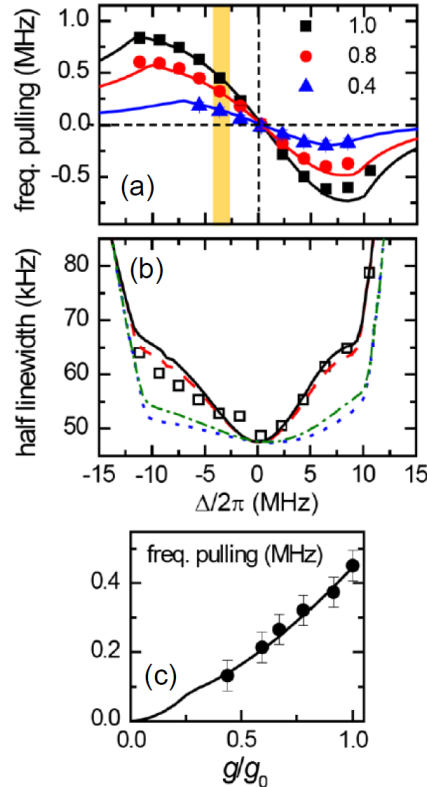


그림 1. 원자-공진기 주파수 어긋남에 따른 (a) 주파수 당김과 (b) 선포 (c) 고정된 주파수에서 결합 상수의 크기에 따른 주파수 당김의 증가.

수의 당김의 크기가 이득물질과 공진기 모드 개개의 공진 특성에만 관여될 뿐 그들 간의 결합 상수가 어떤 역할을 하는지 나타나지 않는다. 이는 개개의 원자가 겪는 결맞은 상호작용이 마구잡이로 평균(stochastic average)되었기 때문이다. 마이크로레이저의 주파수 당김에는 결맞은 효과가 평균되지 않은 채로 그대로 남아 있다.

본 실험에서는 원자-공진기 간 결합 상수의 크기를 공진기 횡모드 프로파일 내에서 원자빔이 지나가는 경로를 조절하여 변화시킬 수 있었다. 그 결과 주파수 당김의 크기가 결합상수의 제곱에 비례하여 증가함을 확인 할 수 있었다. (그림 1c) 또한 펌핑 계수로 사용되는 원자 플럭스(flux)를 증가시키기에 따라 주

파수 당김이 민감하게 증가하여 원자 한 개당 2.3 kHz 만큼의 주파수 이동이 관측되었다. 일반적인 레이저에서 이 값은 무시할 만큼 작다.

주파수 당김은 선포에도 영향을 미치는데 실험에 사용된 원자빔이 가지고 있는 원자수 요동이 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 즉, 포아송 형태의 원자수 분포에 의해서 비공명 조건에서 증가된 선포가 관측되었으며 광자수 분포에 의해서도 선포가 소폭 증가하는 것으로 예측된다(그림 1b). 이는 이제껏 알려진 레이저 선포의 발생 요인과는 전혀 다른 메커니즘이다.

또한 원자 플럭스를 계속 증가시키면 마이크로레이저 특유의 다중 문턱이 나타난다. 이는 강결합 조건 하에서 이득 물질의 상태가 결맞은 라비 진동을 겪기 때문인데, 라비 진동의 각도가 360도를 넘어서 원자 상태가 제자리로 돌아올 때마다 레이저 세기가 갑작스런 증가를 보이는 것이 알려져 있다. 주파수 당김 또한 주기적인 원자 상태의 변화에 의해 결정되며 다중 문턱을 지날 때마다 갑작스런 감소를 보인다. 다중 문턱 조건에서 스펙트럼을 얻어 보면 두 가지 크기의 주파수 당김이 공존하는 사실을 확인할 수 있다. 전체적으로는 원자수가 증가함에 따라 주파수 어긋남을 상쇄하는 방향으로 수렴한다. 이와 같이 강한 주파수 당김은 공진기의 주파수 어긋남을 스스로 상쇄시키는 메커니즘을 제공함으로써 원자시계와 같은 정밀 측정에 이용될 수 있을 것이다.

홍현규, 서원택, 송영훈, 이문주, 정현석, 신용일, (서울대), 최원식 (고려대), R. R. Dasari (MIT), 안경원 (서울대), Phys. Rev. Lett. **109**, 243601 (2012).