

단일 원자와 공진기의 다양한 결합상수에 의한 상호작용 관측

Observation of atom-cavity interaction with cold single atoms with various coupling constants

최영운, 강성삼, 임수인, 김옥래, 이재형, 안경원
 서울대학교 물리천문학부 및 양자광 레이저 연구실
 kwan@phya.snu.ac.kr

이 준위 단일 원자와 공진기의 단일 모드 사이의 결맞은 상호작용은 공진기 양자전기역학 (QED)의 가장 기본적인 현상이다. 특히 진공 Rabi 진동에 의한 기준방식 갈라짐(normal mode splitting)은 원자와 공진기 모드의 결합에 의해 나타나는 현상으로 강결합(strong coupling) 조건에서 공진기의 투과 신호가 두 개의 peak을 보이는 특징을 갖는다.⁽¹⁾ 단일 원자와 공진기의 결합에 의한 기준 방식 갈라짐을 관측하기 위한 노력이 계속되어 왔으며 Kimble 그룹과 Rempe 그룹에서 최근 레이저 냉각 및 포획 기술을 이용하여 단일 원자와 공진기의 상호작용을 관측하는데 성공하였다.⁽²⁾⁽³⁾ 냉각된 원자는 공진기와의 상호작용 시간이 길어 강결합 조건에서 원자 한 개에 의한 공진기 투과 신호의 변화를 높은 정밀도로 측정할 수 있다. 본 실험에서는 냉각된 ⁸⁵Rb 원자의 여러 전이선을 이용하여 원자-공진기 결합상수를 선택적으로 바꾸면서 단일 원자와 공진기 모드의 상호작용을 관측하였다.

실험장치의 기본적인 모습은 그림 1과 같다. 먼저 광자기 포획(magneto optical trap)을 이용하여 공진기 위에 약 10⁴ 개의 원자를 포획하였

다. 공진기는 길이 155 μ m, 휘네스 2.5 \times 10⁴, 선폭은 2 κ = 38 MHz로 측정되었고 원자와의 결합상수는 $g = 16$ MHz로 강결합 조건($g > (\kappa - \gamma)/2$, 여기서 2 γ 는 원자 전이선의 선폭)을 만족한다. 공진기는 ⁸⁵Rb 원자의 D-2 전이선에 잠금 되어 원자와 공명을 유지한다. 공진기의 투과 신호는 APD (Avalanche photo diode)와 SPCM (single photon counting module)으로 동시에 측정하였다.

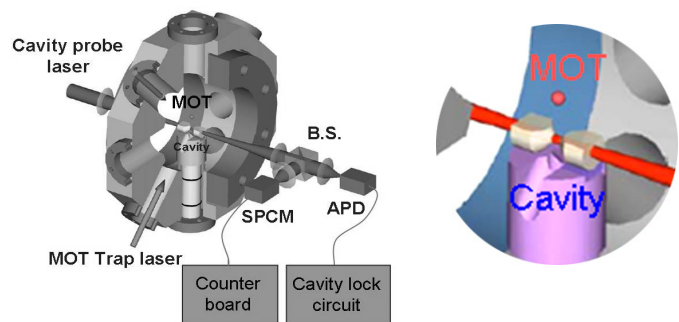


그림 1 실험장치의 전반적인 모습 및 MOT와 공진기 부분의 확대도.

원자를 포획한 후 포획 MOT를 끄면 원자는 중력에 의하여 공진기 거울 사이로 떨어지게 되고 모드와 결합하는 원자에 의한 투과 신호의 변화를 관측할 수 있다. 공명 조건에서 원자가 공진기 모드를 통과하면 투과 신호가 그림 2(a)와 같이 측정된다. 신호가 아래쪽으로 갑자기 떨어진 것들은 단일 원자가 공진기 모드와 결합하여 투과 신호를 크게 낮추었기 때문이다. 떨어지는 정도가 다른 것은 모드의 공간 분포에 따라 결합 상수가 달라지므로 원자가 모드의 어느 부분을 지나가느냐에 따라서 그 크기가 결정 되기 때문이다.

또, 기준 방식 갈라짐을 관측하기 위해서 그림 2(b) 와 같이 특정 시간 간격동안 공진기 조사광의 detuning을 바꾸어 공진기의 투과 신호를 관측하였다. 이 때 조사광의 detuning에 따라 원자에 의한 투과 신호의 변화가 아래로 또는 위로 일어난다.

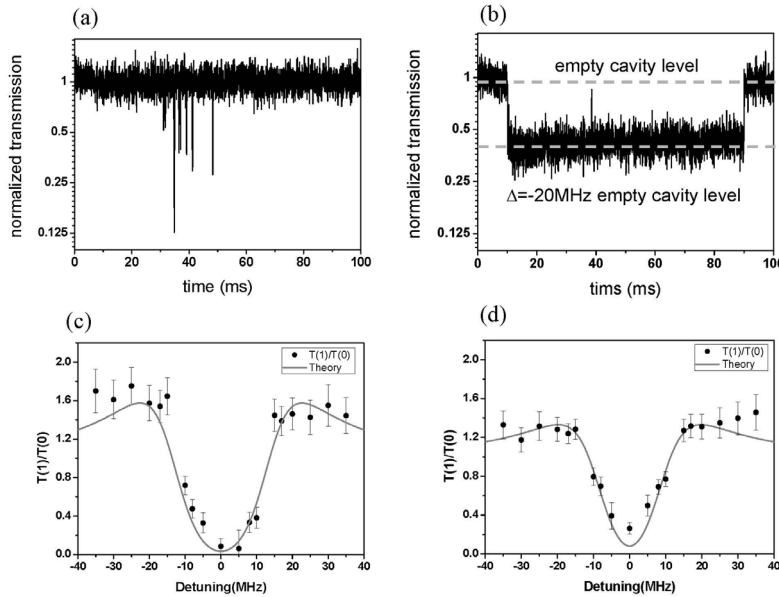


그림 2. (a) 공명 조건에서의 투과 신호 변화. 원자가 지나가면서 모드와 결합할 때 투과 신호가 크게 감소한다. (b) $\Delta = -20\text{MHz}$ 에서의 투과 신호 변화. 원자와 결합할 때 투과 신호가 오히려 증가한다. (c) σ^+ 조사광을 사용하였을 때의 투과신호. (d) π 조사광을 사용하였을 때의 투과신호. 원자가 한 개일 때의 투과 신호[T(1)]를 원자가 없을 때의 투과 신호[T(0)]로 규격화한 신호이다.

원자가 지나가는 모드의 부분뿐만 아니라 원자의 전이 방향에 따라서도 원자가 모드와 결합하는 결합 상수가 달라지게 된다. σ^+ 의 조사광을 사용하면 원자가 $|F=3, m_F=+3\rangle \rightarrow |F'=4, m_F=+4\rangle$ 전이에서 $g_{\text{max}}=16\text{ MHz}$ 의 결합 상수를 갖게 된다. σ^+ 조사광을 사용하여 실험한 결과는 그림 2(c)와 같다. 공명 조건을 중심으로 양쪽의 두 개의 봉우리를 관측할 수 있고 변수조정이 전혀 없는 이론과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 또, π 의 조사광을 사용하면 원자가 $|F=3, m_F=0\rangle \rightarrow |F'=4, m_F=0\rangle$ 전이에서 $g_{\text{max}}=0.76 \times 16\text{ MHz}$ 의 결합 상수를 갖게 되고 π 조사광을 사용한 실험 결과는 그림 2(d)와 같다. 역시 두 개의 봉우리를 관측할 수 있고 σ^+ 조사광을 사용할 때 보다 작은 결합상수로 인해 두 peak사이가가 가까워졌음을 확인할 수 있다. 앞으로, 원자의 다양한 전이선 외에 공진기의 다양한 고차 모드를 이용함으로써 결합상수의 변화범위를 더욱 넓힐 수 있을 것이며 나아가서는 원자-공진기 상호작용에 존재하는 예외점(exceptional point)의 관측이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

(1) *Cavity Quantum Electrodynamics*, Paul R. Berman Ed. (Academic Press, Inc., NY, 1993).
 (2) H. Mabuchi, Q. A. Turchette, M. S. Chapman, and H. J. Kimble, *Opt. Lett.* **21**, 1393 (1996).
 (3) P. Münstermann, T. Fischer, P. W. H. Pinkse, G. Rempe, *Opt. Comm.* **159**, 63 (1999).