

다원자 마이크로레이저에서 비고전적 광 통계 관측

Observation of nonclassical photon statistics in the cavity-QED microlaser

최원식, C. Fang-Yen^{*}, R. R. Dasari^{*}, M. S. Feld^{*}, 이재형, 안경원
서울대학교 물리학과, ^{*}메사추세츠 공대 G. R. Harrison Spectroscopy Laboratory.
dnjstlr@photon.snu.ac.kr

Photon antibunching과 sub-Poisson 광 통계는 고전적으로는 설명할 수 없는 비고전적 광원의 중요한 특성이다. 이 두 가지의 비고전적 광 통계는 항상 동시에 나타나지는 않으며, 그 근원과 응용성도 다르다. Sub-Poisson 광 통계를 보이는 광원은 고분해능 측정에서 shot-noise 한계를 극복할 수 있고, antibunching은 양자 정보 처리에서 중요한 단일 광자 stream을 확인하는 수단이 된다.

가장 잘 알려진 antibunching 광원으로는 단원자 공명 형광⁽¹⁾이 있는데, 원자가 광자를 발산하고 나서 다시 여기 되는데 걸리는 시간 지연이 그 원인이다. 최근에 발표된 포획된 단원자 레이저⁽²⁾도 antibunching 특성을 보이는데, 이는 기본적으로는 단원자 공명 형광과 비슷한 원리인데 단지 공진기와 원자의 강한 상호작용이 원자의 광자 발산을 공진기 모드로만 일어나게 하고 발산된 원자는 곧바로 공진기 거울을 통해서 빠져 나오게 된다. 게다가 그 평균 광자 수는 매우 작아서 광 통계를 이야기하는 것은 실용적으로 무의미하다.

마이크로메이저/마이크로레이저^(3,4)에서는 원자와 공진기의 상호작용 시간이 원자의 decay rate보다 훨씬 짧아서 원자의 가간섭성이 유지되며, 공진기의 decay rate가 원자의 입사율보다 훨씬 길어서 평균 광자의 개수가 많으며 stimulated process가 지배적이다.

본 연구에서는 마이크로 레이저에서 이차 상관관계 함수를 측정하였고, 그 결과 공진기 속의 원자수가 수백 개인 경우에도 sub-Poisson 광 통계를 보임을 관측하였다. 또한 원자의 수가 증가함에 따라 photon bunching에서 antibunching으로 전이됨을 관측하였다. 이것은 마이크로메이저/마이크로레이저에서 직접적으로 광자를 관측하여 측정된 최초의 sub-Poisson 광 통계이다.

그림 1 (a)는 공진기 속의 평균 원자수 변화에 따른 광자 수 변화를 측정된 결과이다. 원자 수가 증가함에 따라 광자 수가 증가하다가 200개 부근에서 포화상태에 이르고, 원자 수가 더 증가하면 양자도약현상을 보인다. 이는 원자와 공진기의 결맞음 상호작용이 보존될 경우에만 가능한 현상으로 고전적인 레이저에서는 볼 수 없는 현상이다.⁽⁵⁾ 원자의 개수에 따른 이차 상관관계함수를 측정하였다(그림 1 (b)). 원자의 개수가 포화영역에 다가갈수록 시간지연이 0일 때의 이차상관관계함수의 값이 1보다 작아지는 sub-Poisson 광 통계와 시간지연이 커질수록 함수 값이 증가하는 antibunching을 관측하였다.

측정된 이차상관관계함수로부터 만델Q 값을 구할 수 있는데(그림 2. (a)), 원자수가 증가함에 따라 super-Poisson에서 sub-Poisson으로 전이됨을 확인할 수 있다. 단원자 이론의 결과와 비교하면 sub-Poisson 영역에서 광자의 분포폭이 넓은데, 다원자 효과가 그 중요한 원인이다. 시스템의 회복시간을 나타내는 correlation time은 이차상관관계함수에서의 decay time과 같은데, 그 결과를 그림 2. (b)에 나타내었다. 평균 광자 수로만 설명하는 rate equation analysis와 광자 수 분포를 고려하여 계산한 양자 마이크로레이저 이론의 결과가 광자수가 많은 영역에서 잘 일치함을 보이고, 실험 결과와도 잘 맞는 것

을 확인할 수 있다.

결론적으로 본 연구에서는 다원자 마이크로레이저가 비고전적 광 통계를 보임을 관측하였다. 원자수가 증가 함에 따라 super-Poisson에서 sub-Poisson으로, bunching에서 antibunching으로 전이됨을 관측하였고, 특히 광자수 안정화 영역(또는 포화영역)에서 만델Q 값이 -0.13 이고 평균 광자 수가 600임을 관측하였다. number-phase 불확실성을 확인할 수 있는 다원자 마이크로레이저의 선폭측정 실험을 준비중에 있다.

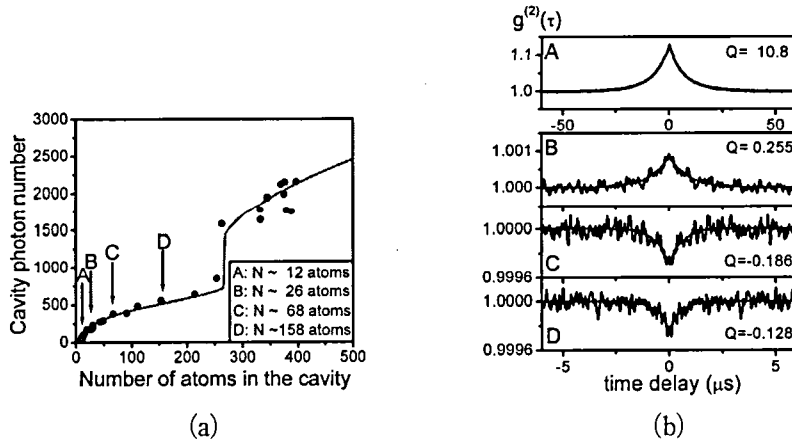


그림1. (a) 공진기 속의 원자 수에 대한 평균 광자 수. 선은 단원자 마이크로레이저 이론으로부터 계산된 결과. (b) 원자수 12, 26, 68, 158에서의 이차상관관계함수. 지수 감소함수로 fitting.

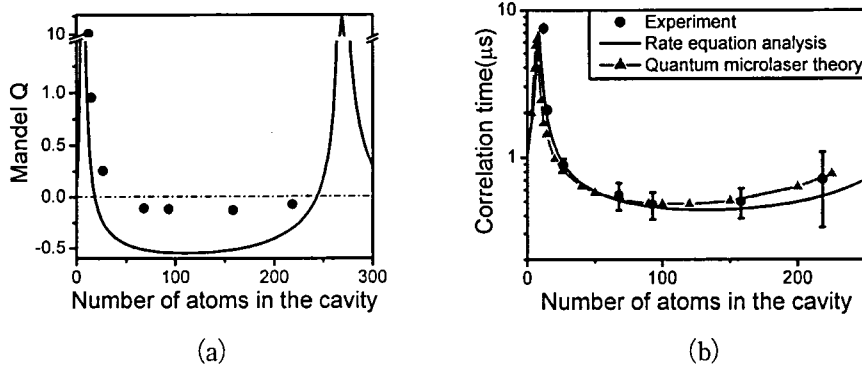


그림2. (a) 원자수의 변화에 따른 만델 Q 값. 선은 양자 마이크로레이저 이론 (b) 원자수 변화에 따른 correlation time의 변화.

참고문헌

1. H. J. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. **39**, 691(1977).
2. H-B. J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, J. R. Buck and H. J. Kimble, Nature **425**, 268(2003)
3. D. Meschede and H. Walther, Phys. Rev. Lett. **54**, 551(1985)
4. K. An, J. J. Childs, R. R. Dasari, and M. S. Feld, Phys. Rev. Lett. **73**, 3375(1994)
5. C. Fang-Yen, Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology(2002)