

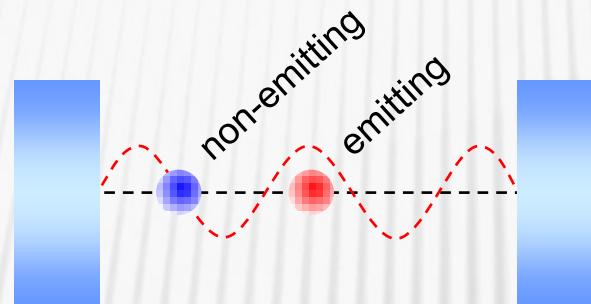
2014 대학원 연구입문

# Introduction to Quantum-Field Laser Laboratory

서울대학교 물리학과 및 양자광레이저 연구실  
교수 안경원

# An excited atom in a cavity

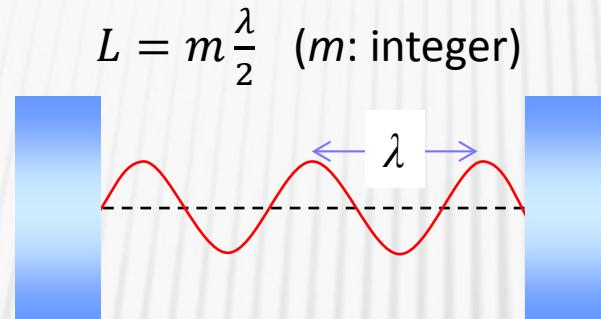
- **FACT:** An excited atom at an anti-node emits a photon much better than the atom at a node.



- **Question:** How does the atom know the presence of the nodes and anti-nodes (or the presence of the reflecting mirrors) even before emitting a photon?
- **Answer:** The cavity is not empty, but filled with vacuum fluctuations, the strength of which follows the mode structure.

# Vacuum fluctuations comes from the zero-point energy

- Light can be stored in a cavity if resonance condition is met.



- The energy stored in the EM fields is like that of an harmonic oscillator and increases as photon number  $n$ :

$$U = \frac{hc}{\lambda} (n + 1/2), \quad n = 0, 1, 2 \dots$$

- The energy is nonzero even when  $n = 0 \rightarrow U_0 = \frac{hc}{2\lambda}$ , zero-point energy

# Vacuum Field

- Since the zero-point energy is stored in the EM fields,

$$(\varepsilon_0 E^2)V = U_0 = \frac{hc}{2\lambda}$$

(energy density) x volume

there should a vacuum electric field with an rms magnitude

$$E_{\text{vac}} = \sqrt{\frac{hc}{2\varepsilon_0\lambda V}}$$

- We cannot observe the vacuum field  $E_{\text{vac}}$  directly (it is due to *virtual photons*).
- However, an excited atom *driven* by  $E_{\text{vac}}$  can emit a *real photon* (vacuum-stimulated emission=spontaneous emission)



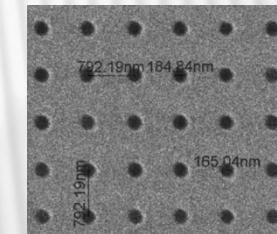
# Cavity QED and Quantum Chaos Approach to Quantum Information

## A. Cavity-QED Microlaser

Vacuum fluctuation imaging

Nonclassical radiation

Schrödinger-cat-like-state generation

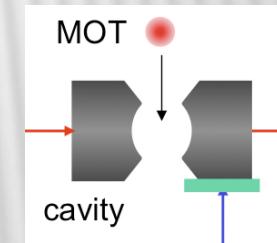


## B. Single-Atom Trap

Single photon (qubit) on demand

Quantum memory & repeater

Tunneling in optical lattice

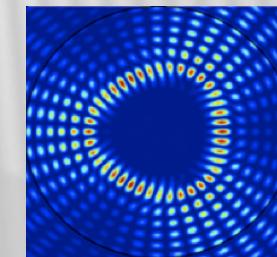


## C. Quantum Chaos

Dynamical tunneling

Petermann factor & thresholdless lasing

BEC quantum chaos



# “학회비 왜 안 내” 신입생 때린 선배

〈학과 학생회비〉

일부 대학, 학회비 강요로 갈등  
4년치 30여만원 일시불 요구  
부모에게 전화해 독촉까지  
장학금 못 받게 불이익 줘

지난 3일 A씨(55·서울)씨는 경기도 포천시 대진대 수학물리학부에 입학한 딸의 입학식에 갔다가 불쾌한 경험을 했다. 학과 학생회 간부들이 나눠준 학회비(학과 학생회비) 고지서 때문이었다. 고지서에는 “7일 까지 4년치 학회비 30만원을 학생회장 계좌로 입금하라”는 설명이 들어 있었다. A씨는 “등록금에 종합 학생회비 낸 지도 얼마 안 됐는데 4년치 학회비를 또 내라고 해 당황스러웠다”고 말했다.

대학 신입생과 학부모들이 학회비 문제로 마음고생을 하는 경우가 끊이지 않고 있다. 자율 납부라는 하지만 사실상 반강제적으로 내도록 돼 있는 데다 4년치를 한꺼번에 거두다보니 금액도 만만치 않다. 학교

비까지 부모님께 부담을 드려 죄송스러웠다”며 “어떤 학과는 부모님께 전화해 직접 계좌번호를 불러주는 곳도 있다”고 활당해했다. 흥의대 1학년 한모(19·여)씨도 “학회비 10여만원을 내지 않으면 사물함 이용이나 학과 행사 참여에 불이익이 있을 것이라는 통보를 받았다”며 분통을 터뜨렸다.

소위 ‘왕따’가 두려워 학회비를 내는 경우도 많다. 경북대 3학년 강모(22)씨는 “대부분 선배들의 압박과 소외되는 것에 대한 두려움 때문에 학회비를 낸다”며 “오리엔테이션 자리에서 미납자를 지목하며 말을 섞지 못하게 하거나 미납자의 기숙사에 들어가 한밤중에 다그치기도”하고 말했다. 실제로 경북대 삼주캠퍼스는 2012년 한 학과 학생회가 ‘학회비 미납자는 징학선 선발에서 제외되며 학생회 행사 참여에 불가능하다’는 내용을 고지서에 명시해 논란이 됐다.

학생회 측은 단체복 맞춤과 수련회, 신입생 오리엔테이션 준비 등을 이유로 내세운다. 종양대 공예학과

(안성캠퍼스) 학생회장 이재호(23)씨는 “학과 차원의 전시장 대관이나 전시용품 구매 등에 비용이 많이 들어가 학회비를 거두는 것”이라고 말했다. 대진대 물리학과 학생회장 유도준(24)씨도 “한꺼번에 4년치를 거두는 것이기 때문에 학생들을 위한 돈이라고 생각하면 30만원은 큰 부담이 아니다”고 말했다.

학회비 납부를 둘러싼 잡음은 올해만의 일이 아니다. 지난해 충남 천안의 한 대학에서는 학회비를 내지 않는다는 이유로 선배가 신입생을 때려 턱뼈가 부러졌다. 교육부 이정렬 학생장학과 사무관은 “매년 학회비 문제가 반복되고 있긴 하지만 대학 자율로 결정할 사안이기 때문에 제재할 방법이 없다”고 말했다. 경북대 최상훈 학생과 담당자는 “학회비는 공식 예산이 아니라 소모임 회비의 개념이라 학교도 간섭하기 어렵다”고 말했다. 참여연대 안진걸 협동사무처장은 “4년치 학회비를 한꺼번에 거두는 건 학칙을 고쳐서라도 금지해야 한다”고 지적했다.

신진 기자 jin@joongang.co.kr



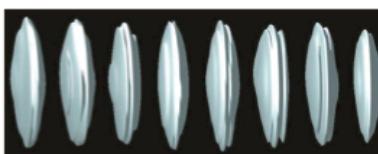
**소녀상에 스카프 감는 화교** 한국 거주 중국·대만인들의 단체인 중국재한교민협회총회와 한화중국평화동일추진연합총회는 10일 서울 주한 일본대사관 앞에서 ‘일본군국주의 부활 반대’ 기자회견을 열었다. 이날 시위에 참여한 회원 300여 명은 “일본의 야스쿠니 신사 참배는 1급 전쟁범죄를 심기는 것이고 1급 전쟁범죄를 심기는 것은 군국주의의 부활이다”라고 주장했다. 한 참석자가 소녀상에 스카프를 매아주고 있다. [뉴스1]

## 진공은 텅 빈 상태? 천만의 말씀

〈眞空〉

서울대 안경원 교수팀  
첨단 광학, 나노기술 이용  
진공에너지 분포 첫 시각화

진공(眞空)은 흔히 아무것도 없는 공간으로 알려져 있다. 그러나 1933년 노벨물리학상을 받은 영국의 물리학자 폴 디락은 전혀 다른 이론을 제시했다. 진공이 실제로 텅 빈 것 이 아니라 아주 얕은 ‘영점 에너지(zero-point energy)’로 채워져 있고 이 에너지에 의해 입자와 반(反) 입자가 끊임없이 만들어졌다 사라



두 거울 사이에 존재하는 진공에너지의 3차원 분포도. 마치 기타 줄이 진동하는 것과 비슷한 높낮이 패턴을 확인할 수 있다.  
[네이처 커뮤니케이션스]

지고 있다는 주장이다. 위낙 에너지가 작고 입자의 생성·소멸 속도가 빨라 관측하지 못할 뿐이라는 것이다.

그의 주장은 다양한 간접 실험을 통해 확인됐지만 진공에너지의 실제를 직접 눈으로 확인하지는 못했다. 측정기술의 한계 때문이었다.

그런데 한국 연구진이 이 같은 기

록을 깼다. 서울대 안경원(물리천문학부) 교수 연구팀은 10일 나노m( $1nm=10^{-9}m$ )의 1m 크기의 격자와 바륨(Ba) 원자를 이용해 진공에너지의 3차원 공간분포를 형상화하는데 성공했다고 밝혔다. 7일 네이처(Nature) 커뮤니케이션스 온라인판에 게재된 논문을 통해서다.

물리학자 디락의 기존 이론에 따르면 외부 자극을 받아 높은 에너지를 가진 원자는 진공에너지가 만들어 내는 전자기장을 만나면 빛(에너지)을 방출하며 낮은 에너지 상태로 돌아간다. 앞선 연구자들은 단순히 이 빛을 관측해 진공에너지의 존재를 확인하는 데 그쳤다.

반면 서울대 연구팀은 여기서 한 걸음 더 나가 빛이 나오는 위치를 일일이 확인하는 방법으로 진공에너지의 분포를 역추적했다. 직경 170nm짜리 구멍을 가로 72개, 세로 16개씩 뚫은 격자를 만든 뒤, 바륨을 가열해 만든 기체를 통과시켰다. 나노격자로 바륨 원자를 걸러 위치를 확인해 가며 광자(光子·빛·알갱이) 방출을 계속 추적한 것이다.

김한별 기자 idstar@joongang.co.kr

## 브리핑

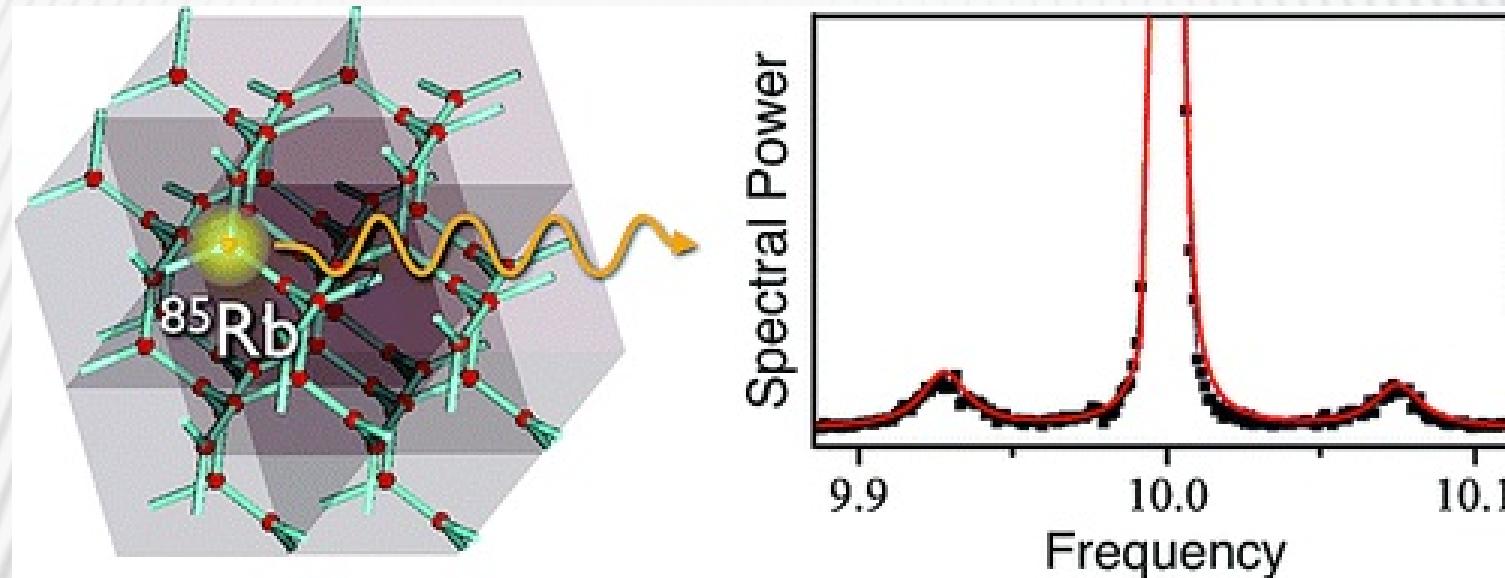
**북한 보위사령부 소속 간첩 구속** 서울중앙지검 공안1부는 10일 탈북자로 위장해 국내에 잠입을 시도한 혐의(국가보안법상 특수잠입 등)로 북한 보위사령부 소속 공작원 흉모(40·씨)를 구속기소했다. 흉모는 지난해 8월 탈북자 동향과 국정원 정보세력을 파악하라는 지령을 받고 탈북자로 위장해 국내에 잠입한 혐의다.

**정부, 3월까지 취약계층 특별조사** ‘서울 송파구 세 모녀 자살사건’을 계기로 정부가 복지 사각지대를 해소하기 위해 취약계층에 대한 특별 조사와 관리에 나서기로 했다. 안전행정부는 3월 말까지 전국의 복지 사각지대를 특별조사해 기초생활보장수급자를 발굴하기로 했다.

**평택 가축방역관 업무태만 조사** 경북 경주에서 9일 발병한 조류인플루엔자(AI)에 대해 농림축산식품부가 평택시 공무원의 업무태만 여부를 확인하기로 했다. 경주 농가의 닭이 평택에서 옮겨져 있는데, 평택시 가축방역관이 평택으로 “옮겨도 괜찮다”는 내용의 이동승인서를 발급했다는 의혹이 제기됐기 때문이다.

**경찰, 태평양제약 압수수색** 서울경찰청 광역수사대는 10일 병·의원에 의약품을 낭비하는 대가로 리비트를 제공한 혐의로 서울에 논현동 태평양제약 본사와 경기도 광주시의 지점을 압수수색했다. 경찰은 의약품 거래 내역 장부를 확보했으며, 곧 관계자들을 불러 조사할 방침이다.

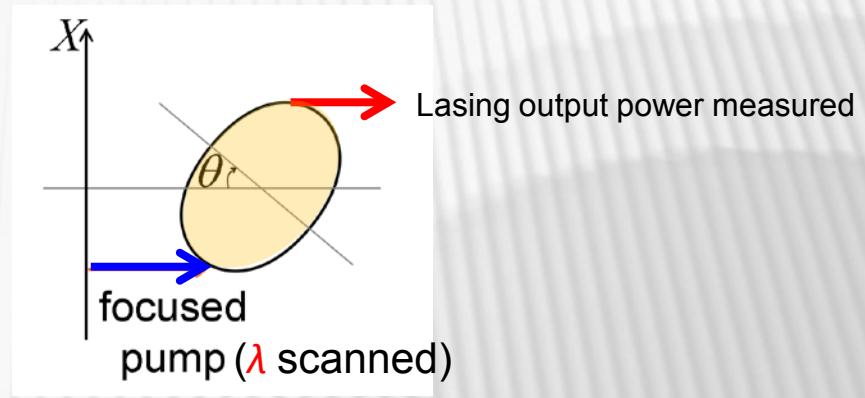
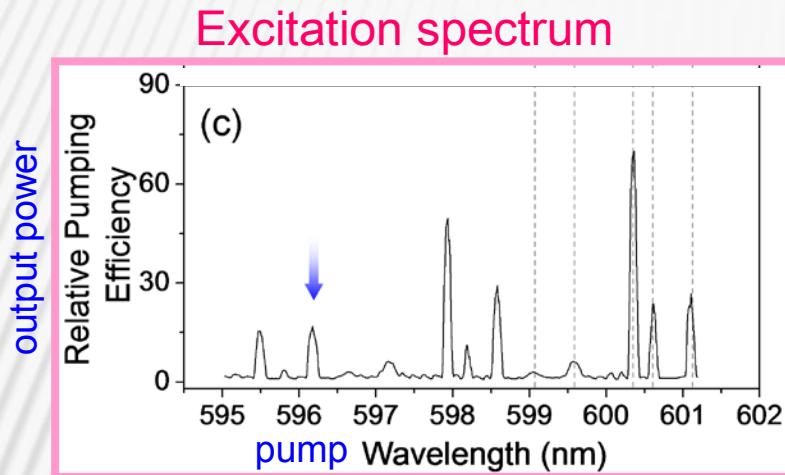
## B. 광격자에 포획된 단일원자의 스펙트럼 측정



W. Kim et al., Nano Letters 11, 729 (2011)

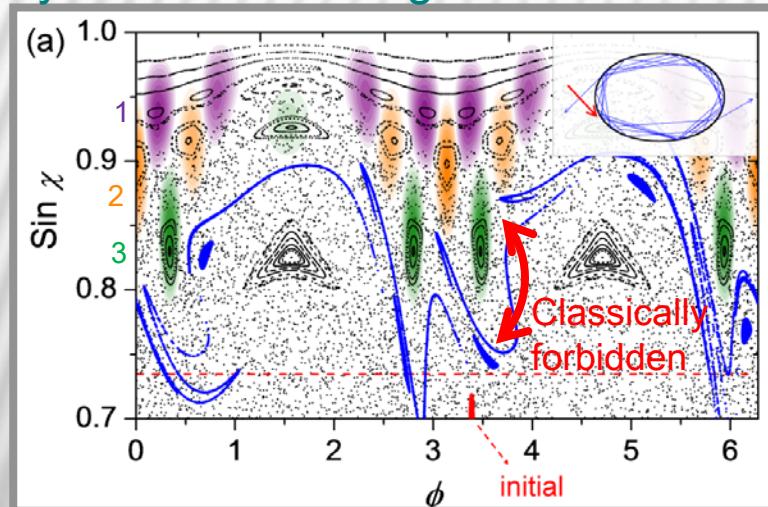
- 광격자에 원자를 포획하여 양자 메모리로 사용하려 함.
- 파장보다 작은 영역(격자점)에 단일 중성원자가 포획되면 Lamb-Dicke narrowing에 의해 Doppler broadening이 사라짐
- 물질파 터널링으로 단일 원자가 한 격자점에서 다른 격자점으로 이동  
→ 단일 원자의 스펙트럼에 터널링에 의한 수 kHz의 선폭이 발생함을 처음으로 관측

## C. 비대칭 공진기에서 동적 터널링을 이용한 초고효율 광펌핑



J. Yang et al., PRL 104, 243601 (2010)

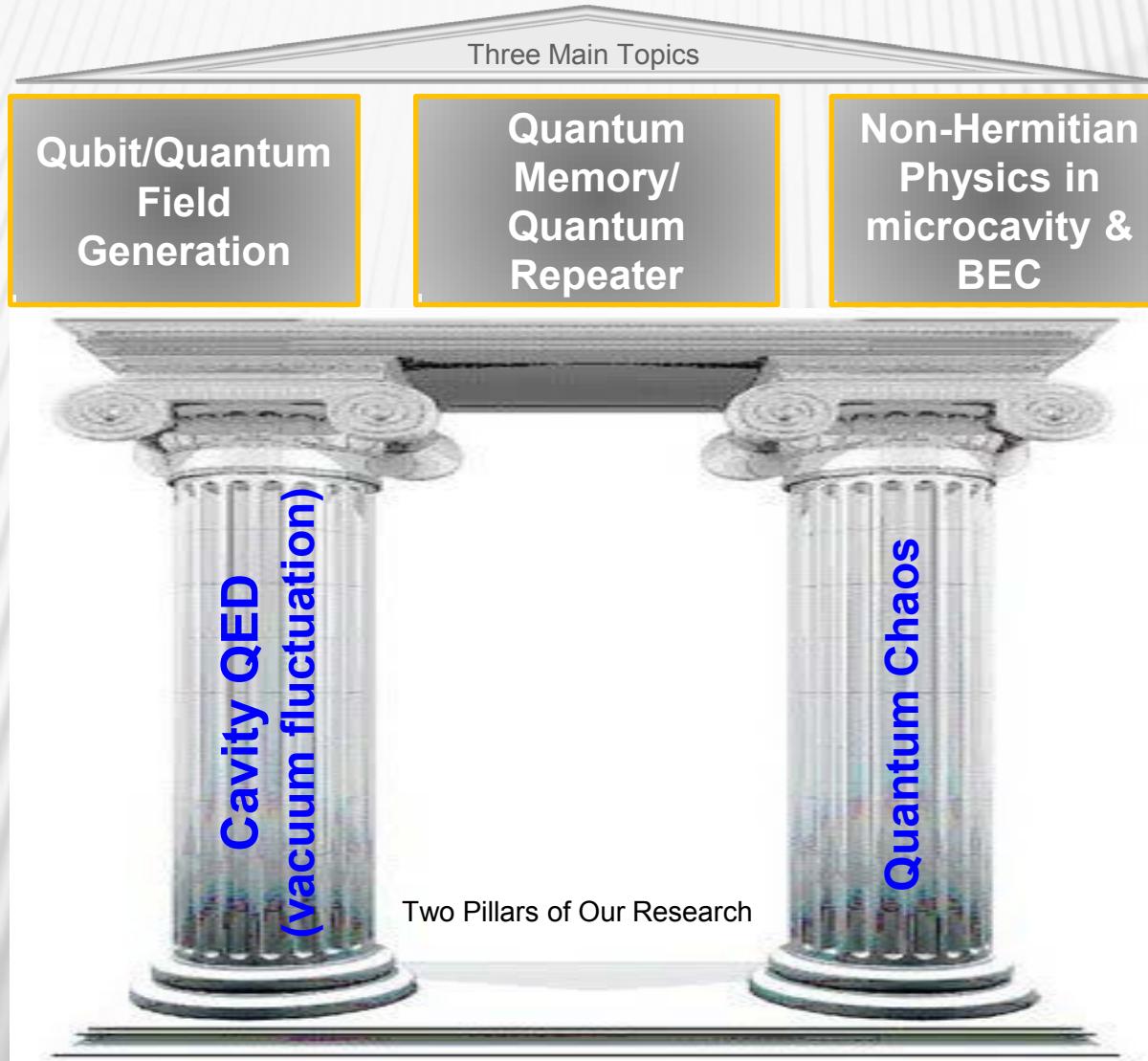
dynamical tunneling



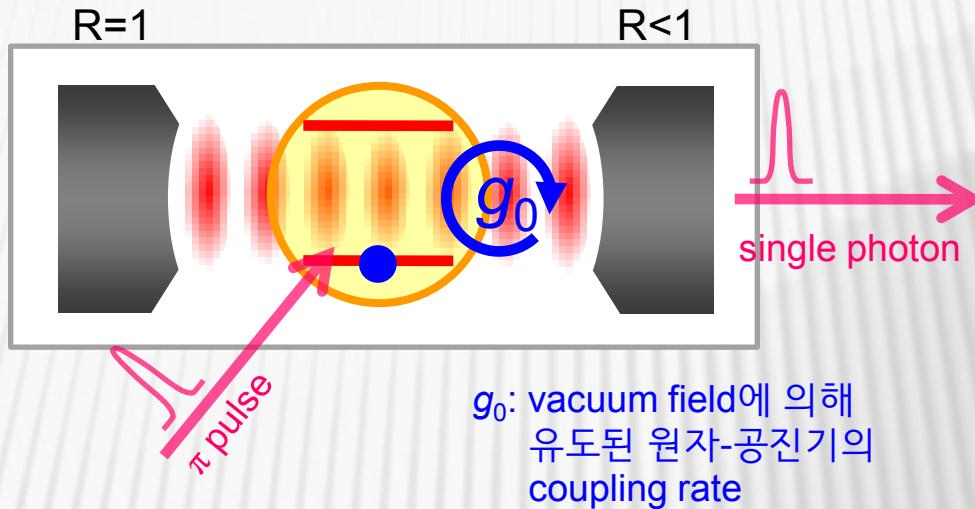
- 혼돈영역(점과 파란선)으로 주입된 펌프광이 동적 터널링에 의해 정칙영역 (섬 모양)에 존재하는 공진 모드로 전이가 일어남
- 광 펌핑 효율이 1000배 정도 향상됨
- 고효율 양자비트 발생에 응용될 수 있음
- 비대칭 공진기에서 빛살의 운동(입자성)과 모드들의 상호작용(파동성)을 통해 적분불가능 양자계를 연구할 수 있음.

# 향후 5년 연구방향

# 연구의 목표 및 주제



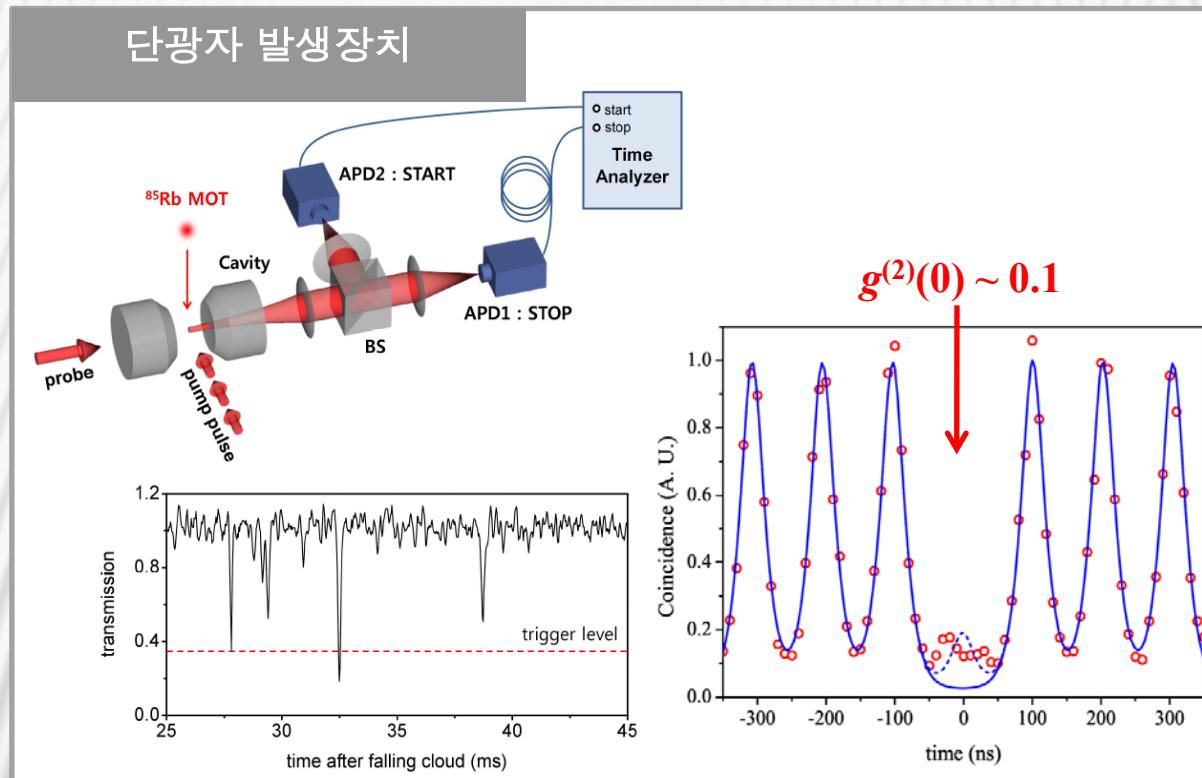
# 단일원자-공진기 계를 이용한 주문형 단광자 발생



## 특징

- Deterministic : 주문형 단광자 발생
- Efficient : 고품위 공진기에 의한 **고효율** 단광자 발생 가능.
- Coherent : 원자-공진기 간의 결맞은 상호작용에 의한 양자 얹힘 상태 구현 가능.
- Fast : 반복률 100 MHz 구현함

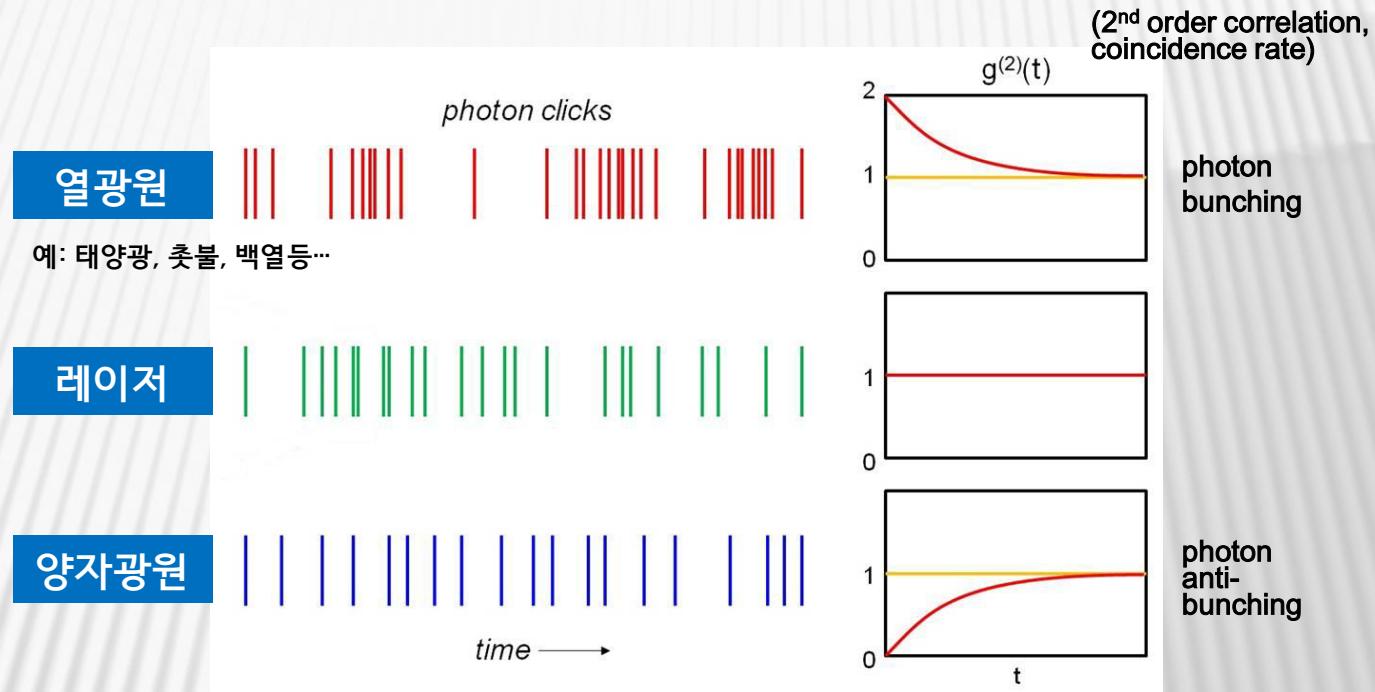
# 주문형 단광자 발생장치의 구현



Sungsam Kang et al., "Controlled generation of single photons in a coupled atom-cavity system at a fast repetition-rate", Optics Express **19**, 2440(2011)

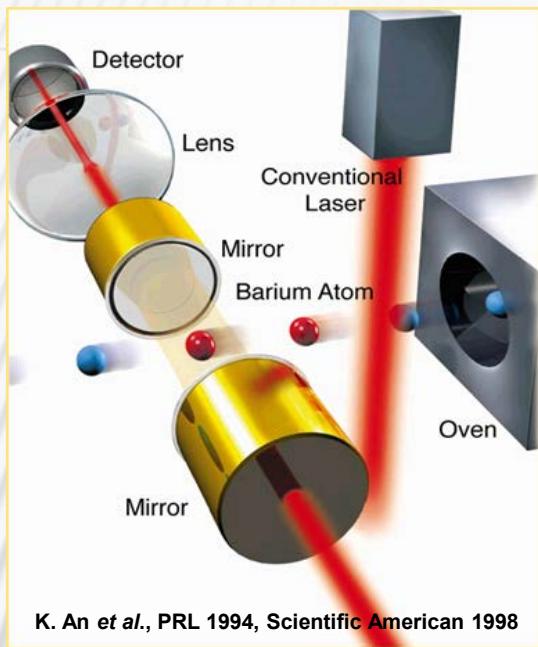
- Our **figure of merit** in single-photon generation (efficiency  $\times$  repetition rate) is  $1.7 \times 10^6$ , 30 times larger than the previous record in the atom-cavity system.

# CW 양자 광원



- 고전광원에 비해 규칙적인 광자들의 흐름
- 샷노이즈 이하의 잡음 대 신호비 → 매우 약한 정밀측정
- 광자수 및 편광에 양자 정보 인코딩 가능

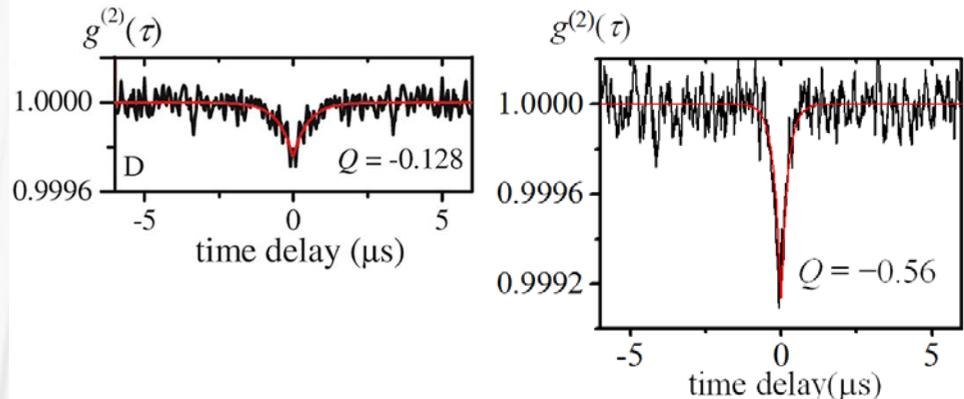
# Cavity-QED 마이크로 레이저를 통한 초저잡음 양자광 발생



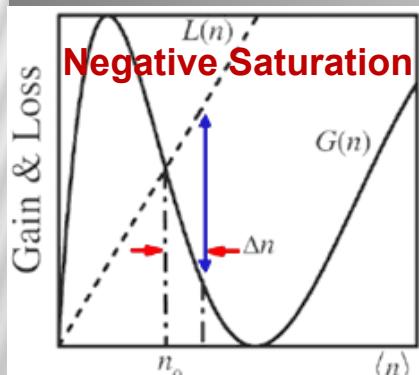
K. An et al., PRL 1994, Scientific American 1998

W. Choi et. al, Phys. Rev. Lett. 96, 093603 (2006)

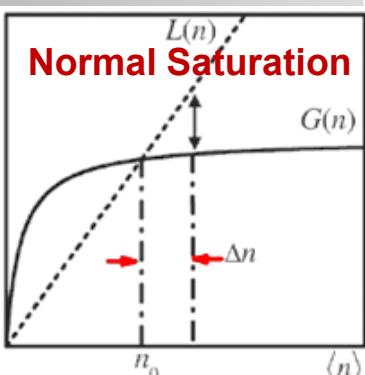
2014년 현재 (미출판 결과)



## 양자광 발생 원리



공진기-QED 마이크로 레이저



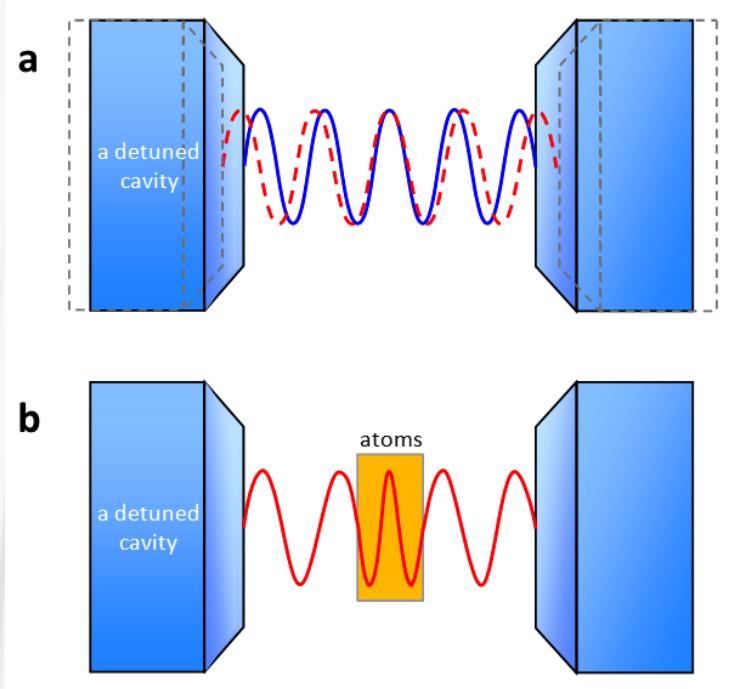
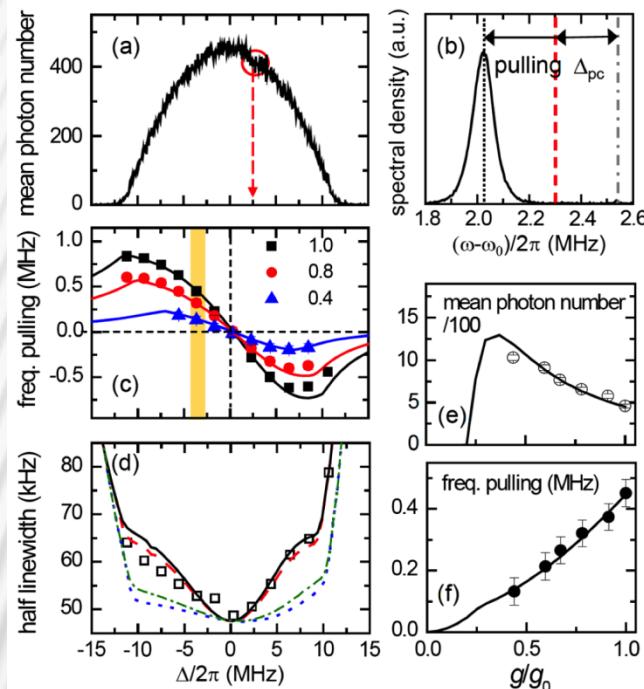
일반 레이저

- 마이크로레이저의 결맞는 상호작용
  - 음의 기울기를 갖는 이득함수  $G(n)$ , 광자수의 변동 억제
  - 잡음이 shot noise보다 작은 양자광 (세기 압축광) 발생.
- 최근 같은 세기의 레이저보다 광자수 분포가 35% 좁은 양자광 발생에 성공
  - 최초측정 보다 5.3배 개선
  - 마이크로레이저에서 이론적으로 예측된 한계까지 달성

H. Hong et. al., Opt. Exp. 17, 15455 (2009)

W. Seo et. al., Phys. Rev. A 81, 053824 (2010)

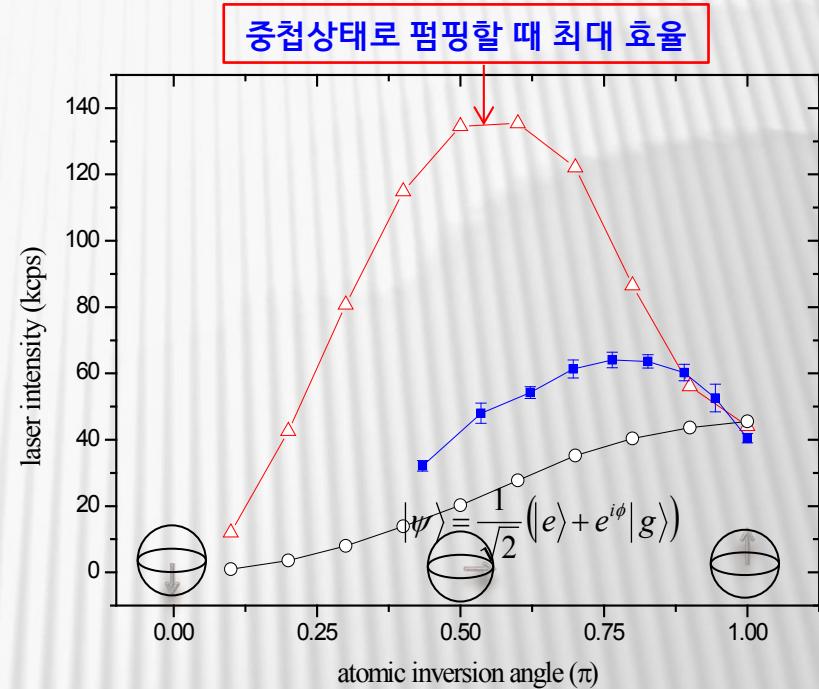
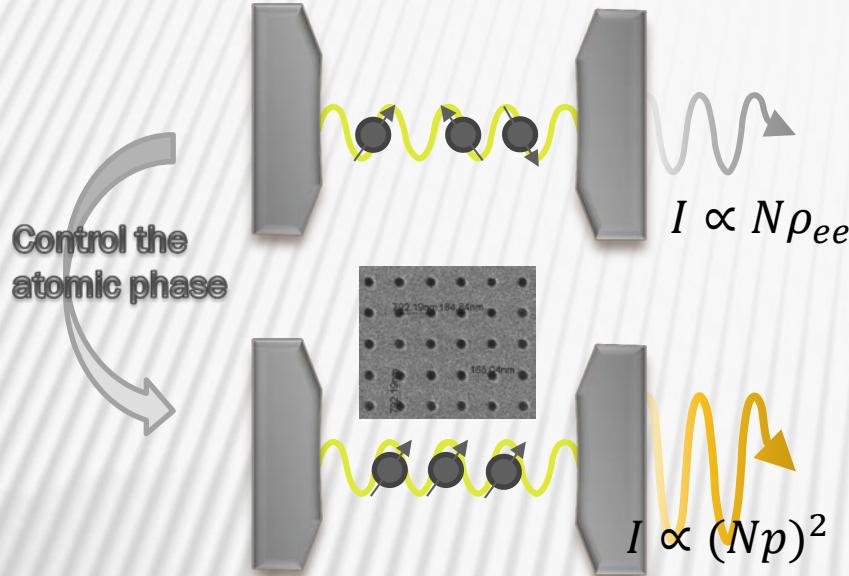
# Quantum Frequency Pulling



Hyun-Gue Hong *et al.*, "Spectrum of the Cavity-QED Microlaser: Strong Coupling Effects in the Frequency Pulling at Off Resonance", Phys. Rev. Lett. **109**, 243601 (2012).

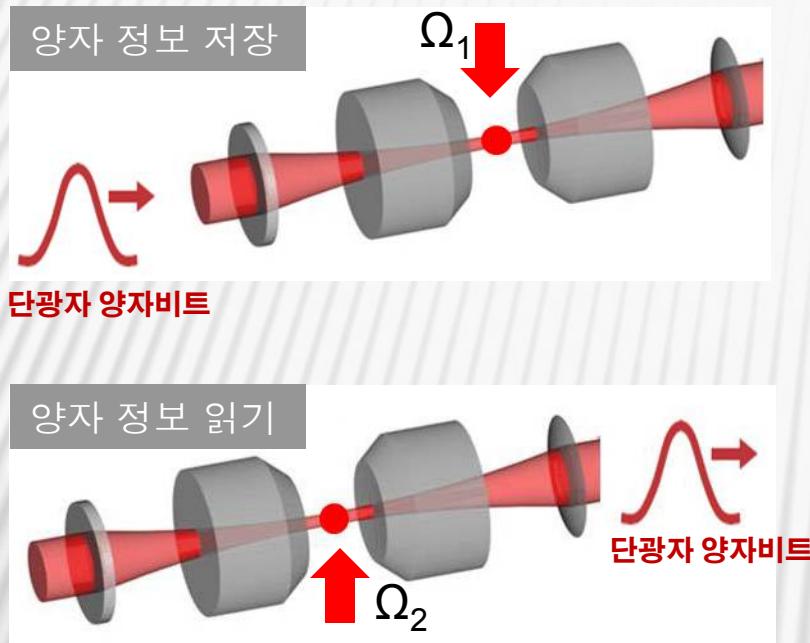
- 이론으로만 예측되던 마이크로 레이저/메이저의 스펙트럼을 최초로 측정 (양자광학의 숙원)
- 원자-공진기 강결합에 의해 양자 주파수 끌림 현상 강화 → 원자-공진기 주파수의 어긋남을 상쇄시킬 정도
- 레이저 주파수 오차 자동으로 상쇄 → 광학(원자)시계의 정밀도를 높이는데 이용될 수 있음

# 결맞게 펌핑된 Cavity-QED 마이크로레이저



- 이전까지의 레이저와 달리 공진기 내부 원자들의 위상이 결맞게 조절된 레이저 시스템
  - ✓ 나노격자와 원자물리의 융합
- 기존 레이저와 완전히 다른 특성을 갖는 신개념 레이저
  - ✓ (이득 분자 수  $\times$  쌍극자 모멘트)<sup>2</sup> 에 출력이 비례
  - ✓ 위상 전사 (phase imprinting) 가능
- 높은 에너지 효율, 양자 정보/통신 분야 응용 가능

# 원자-공진기 시스템으로 만드는 양자메모리



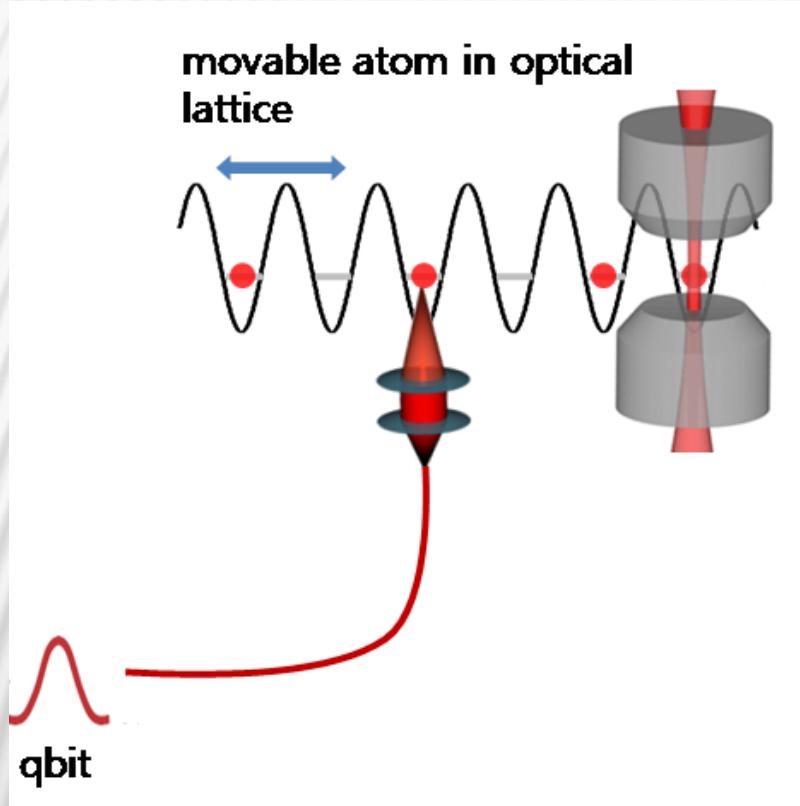
- 양자 메모리는 양자 비트에 각인된 양자 정보를 일정 시간 동안 저장한 후, 필요한 때에 읽어 내어 다시 양자 비트에 실어 보낸다.
- 결맞음 손실 없이 가역적 양자 정보 저장/읽기 과정의 구현이 필요하다.

$\Omega_1, \Omega_2$ : STIRAP pulse  
g: atom-cavity coupling

$$(c_1|0\rangle + c_2|1\rangle) \otimes |b\rangle \leftrightarrow |0\rangle \otimes (c_1|a\rangle + c_2|b\rangle)$$

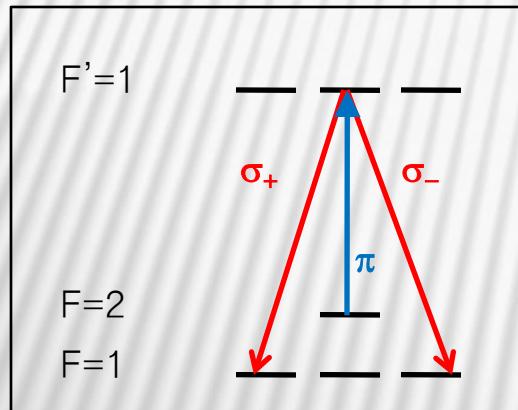
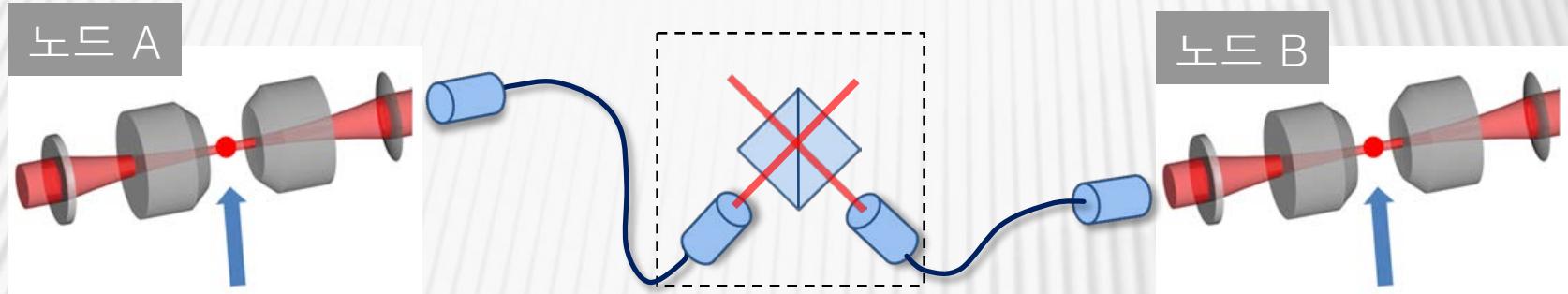
**저장할 양자 정보(광자)**       **$\Omega_1$  or  $\Omega_2$ 로  
가역적으로 조절**      **저장된 양자 정보(원자)**

# 광격자를 이용한 Multi-Qubit 양자 메모리



- 양자 정보를 광자에 실어 공진기에 입사시켜 내부 원자에 저장
- 저장된 양자 정보를 원하는 시간에 꺼내어 광자에 실어 보냄
- Multi-Qubit 양자 메모리: 켄베이어 벨트 타입의 1차원 광격자에 포획된 각각의 원자들에 qubit을 저장함. 같은 방식으로 Quantum Turing Machine (양자전산) 구현 가능.

# 단일원자-공진기 계를 통한 양자 중계기



1. 원자를 펌핑( $\pi$ ) → 각각의 노드에서 양자 얹힘 생성  

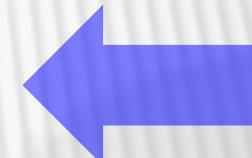
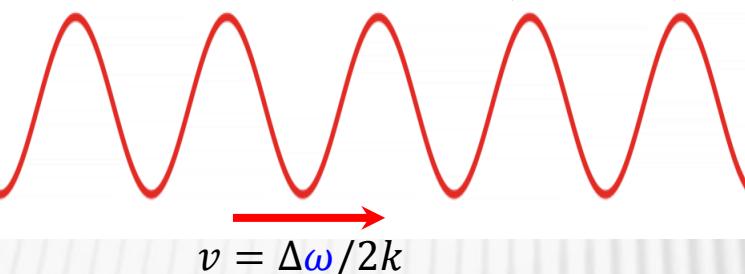
원자의 자기 부준위 상태 ( $m_F$ )  
양자 얹힘  
방출되는 광자의 편광( $\sigma_{\pm}$ )
2. 노드A와 노드 B에서 방출된 광자들에 벨 상태 측정 (편광 분석: $\sigma_{\pm}$ )
3. 얹힘 교환의 결과로 노드 A의 원자 상태( $m_F$ )와 노드 B의 원자 상태( $m_F$ )가 얹힘 → 양자 얹힘의 장거리 전송

# 움직이는 광격자에 포획된 극저온 단일원자 (ON GOING)

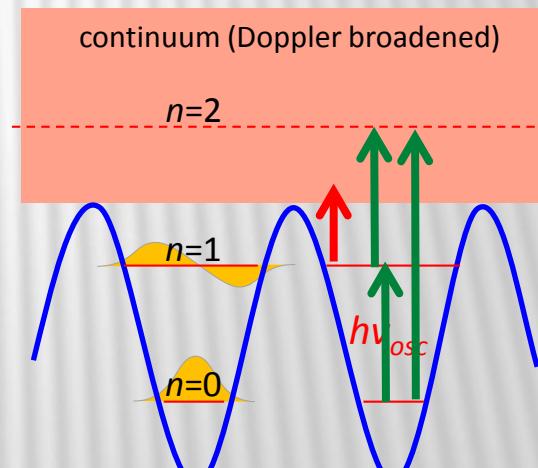
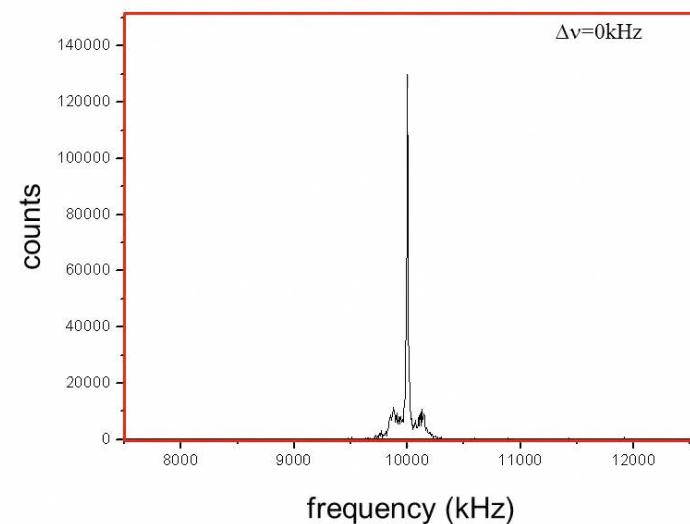
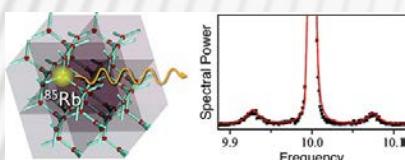
$$U_{\text{moving lattice}} \propto \cos^2 \left[ k \left( x + \frac{\Delta\omega}{2k} t \right) \right]$$



$$E_2 = E_0 \cos[kx + (\omega + \Delta\omega)t]$$

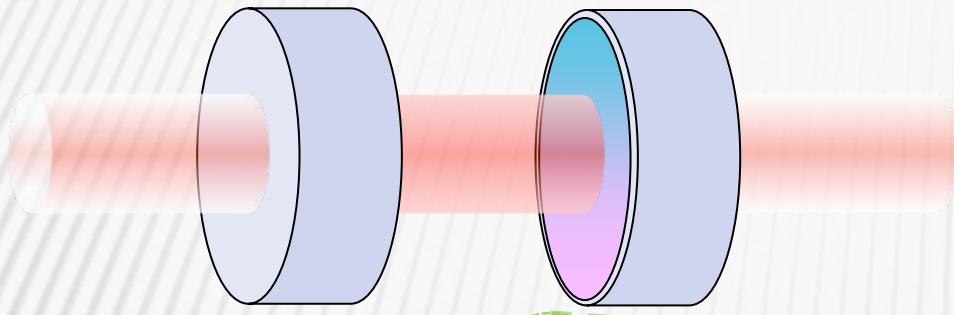


$$E_1 = E_0 \cos[kx - \omega t]$$



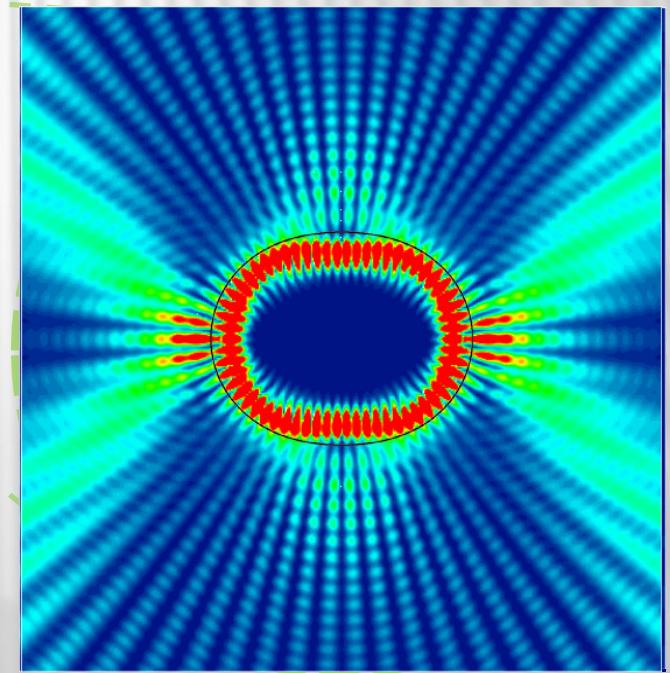
- Stepwise excitation to continuum
- The first observation of resonance assisted tunneling in mechanical systems?

# 양자비트, 양자 메모리를 위한 고효율 미소 공진기



일반 공진기

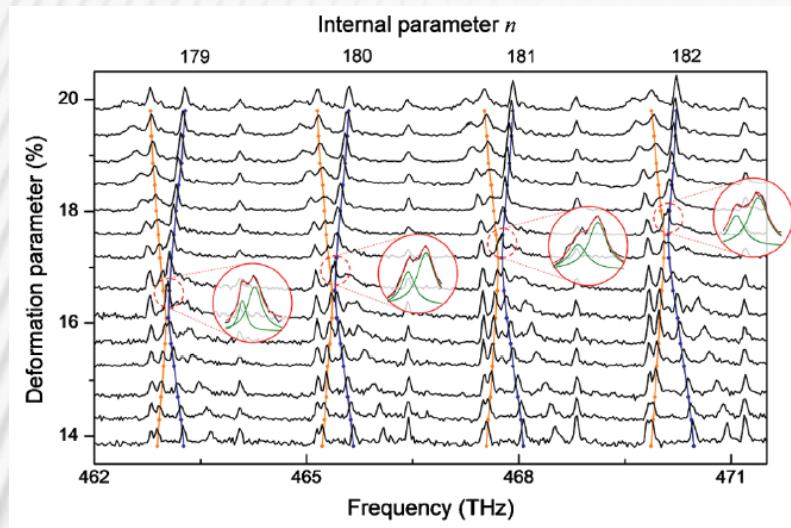
비대칭 공진기  
→ 방출 방향성 증가



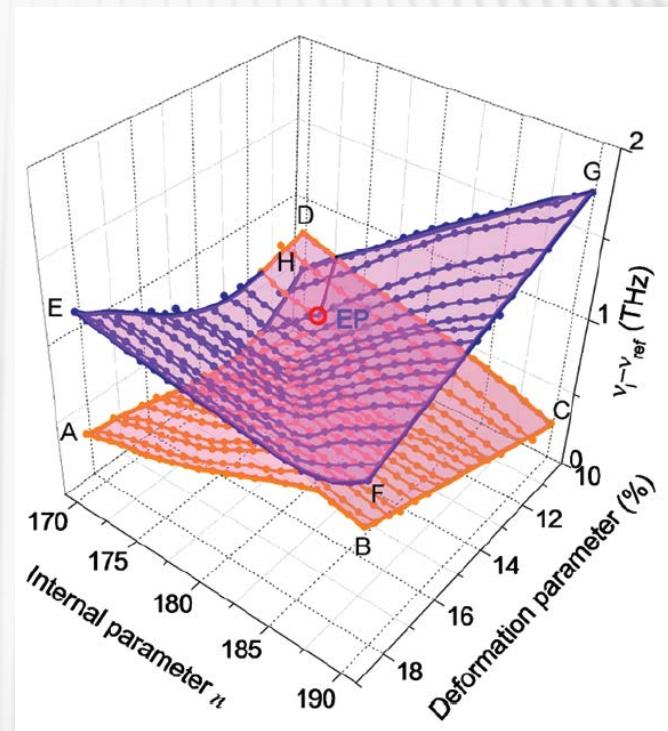
작은 mode 부피, 높은 품위값 ( $Q$ )  
→ 강한 진공요동에 의해 원자와  
공진기 사이의 강한 상호작용  
발생 (Purcell effect)

전반사 현상을 이용한 미소 공진기

# 고전 혼돈계에서 특이점 (Exceptional Point) 최초 관측

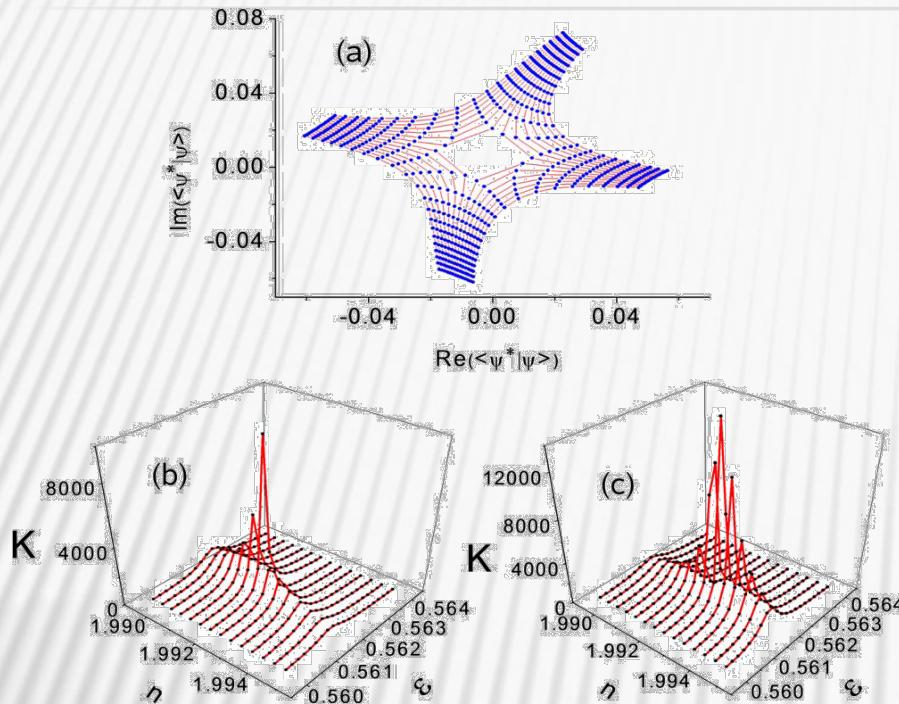


S.-B. Lee et al., PRL 103, 134101 (2009)



- 열려있는 비대칭 공진기에서 공진 모드들이 서로 상호작용 (non-Hermitian)
- 특정 조건에서 두개의 공진모드가 하나로 융합되는 특이점 현상이 발생할 수 있음
- 변수공간(parameter space)에서 특이점은  $\sqrt{z}$ 의 topology를 보임
- 변형된 미소공진기에서 특이점 현상 최초 관측

# 피터만 인자의 실체 규명과 초소형 미소공진기 개발

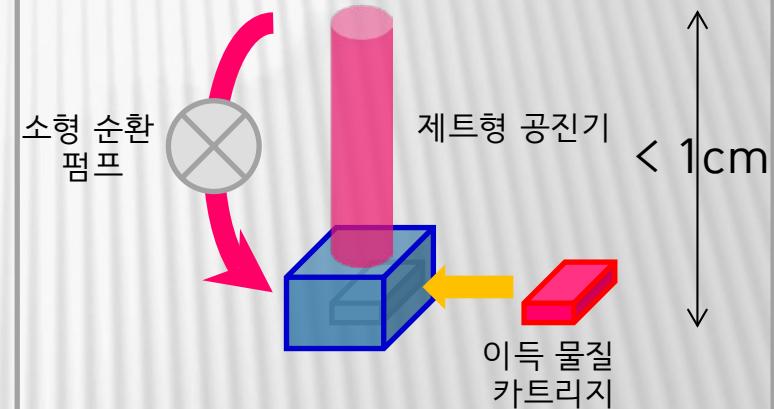


Soo-Young Lee et al., Phys. Rev. A. 78, 015805 (2008)

비대칭 공진기에서 모드간의 배-직교성(bi-orthogonality)

- ✓ 특이점(EP)에서 Petermann factor가 무한대로 발산 (자발방출률 발산)
- ✓ 레이저 발진 문턱값을 획기적으로 낮출 수 있는 가능성 존재

초소형 “칩 위의 실험실” 형  
미소공진기의 개념도

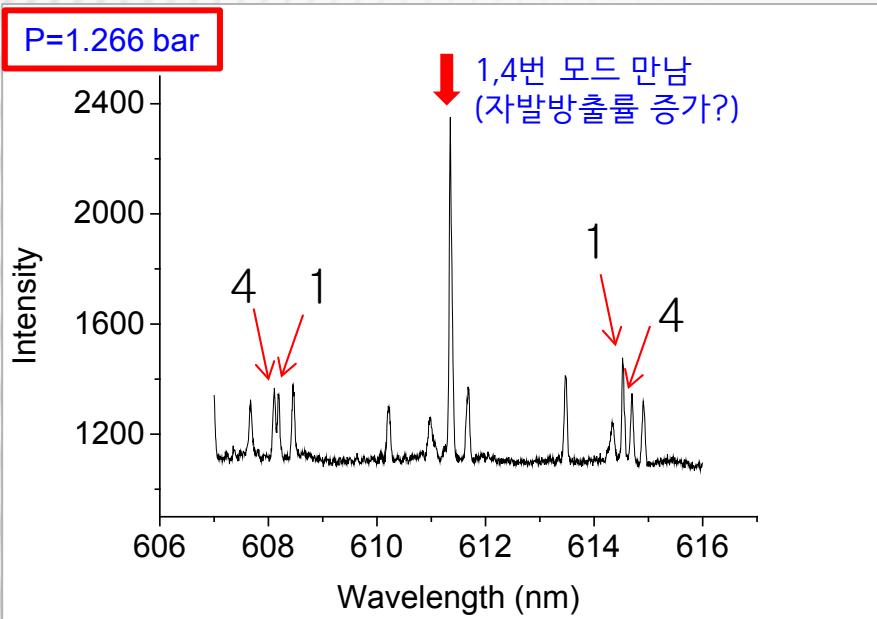


시스템의 소형화

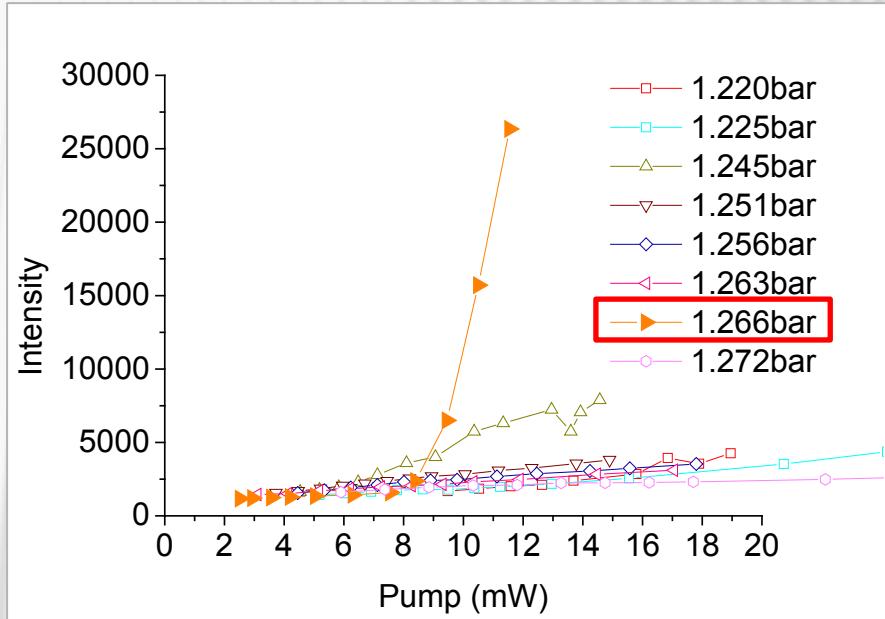
- 시스템 변수 조절이 쉬운 고품위 공진기를 소자로 이용 가능
- 광소자의 정확성, 안정성, 재현성 구현이 목표

# 예외점 주변에서 발산하는 피터만 인자 관측?

## 예외점 주변의 스펙트럼



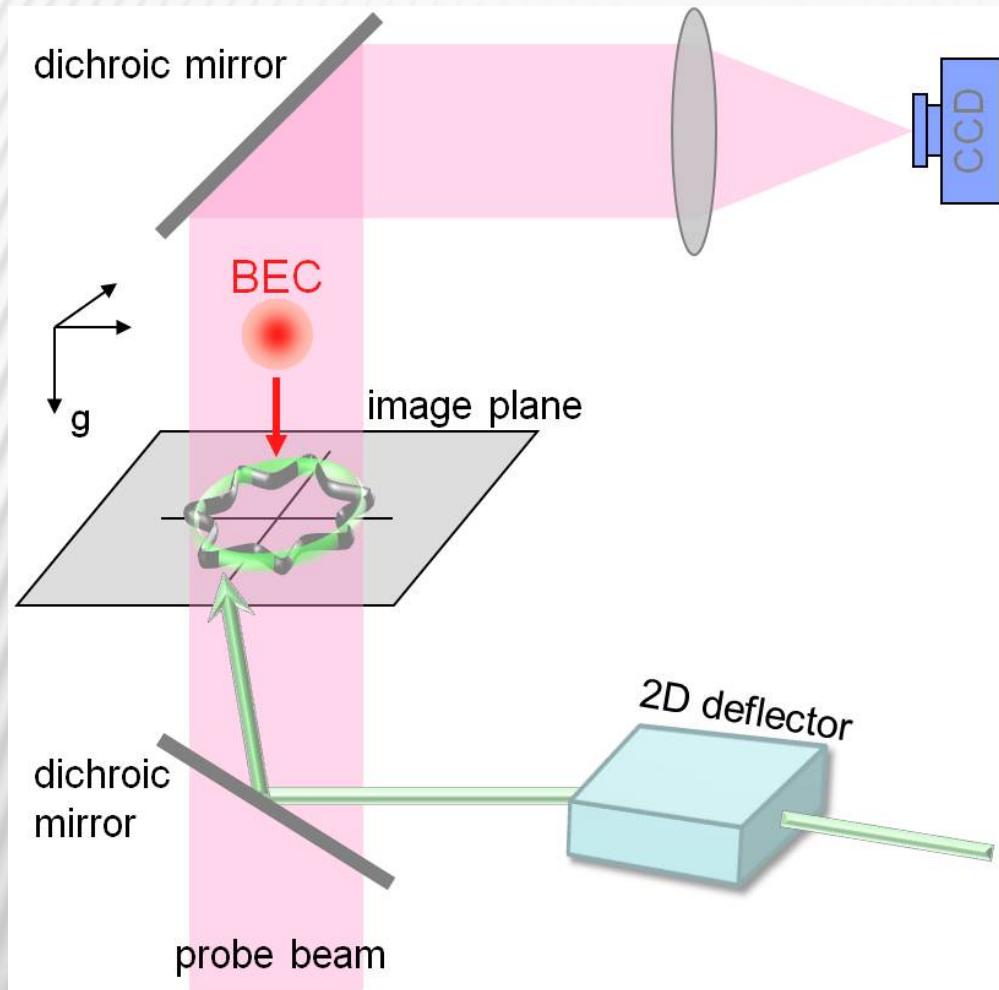
## 압력 변화에 따른 레이저 발진 양상



비대칭 공진기의 예외점(EP) 주변에서 고품위값 모드의 레이저 발진 변화 양상 관찰

- ✓ 특정 변형도, 즉 EP근방에서 레이저 발진이 잘 일어나며 (이론 예측과 일치), 재현 가능
- ✓ EP에서의 피터만 인자 발산을 관측했을 가능성 (같은 펌프파워에서 레이저가 더 잘 발진)
- ✓ 만약 사실이면 Ground-Breaking Result (Purcell factor 발견에 버금가는 엄청난 결과)

# 원자들의 속삭이는 회랑 (물질파 WGM)



- 쌍극자힘에 의한 원형  
포텐셜안에 BEC를  
가둠
- 물질파 간섭에 의해  
물질파의 속삭이는  
회랑 모드(WGM)가  
형성됨
- 원자 레이저의 고품위  
공진기로 사용될 수  
있고 양자흔돈 연구의  
도구로 활용될 수 있음

# BEC 원자간 상호작용에 의한 양자혼돈 효과

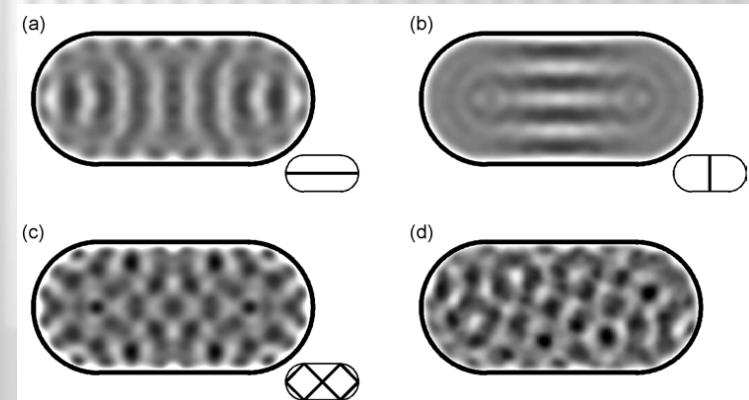
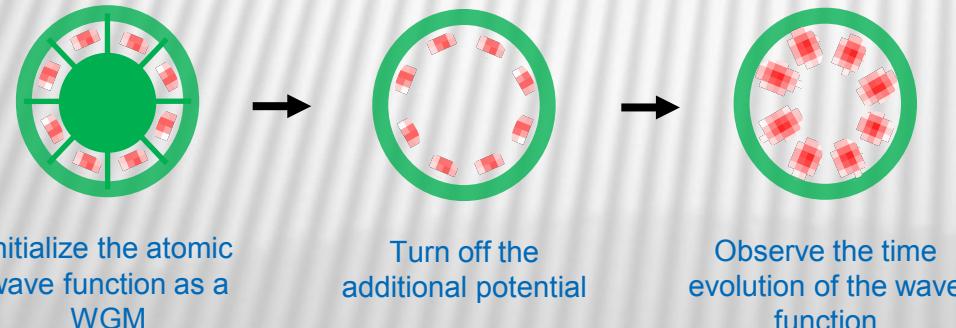
- BEC의 WGM

- ✓ BEC 전체가 하나의 양자역학적 파동함수로 기술되는 물질파, 원자간 상호작용이 없으면 WGM형성
- ✓ 보조 포텐셜 벽을 세워 최대한 원하는 WGM에 가깝게 BEC를 형성하고, 보조 포텐셜을 제거하여 원자간 상호작용이 WGM을 어떻게 변화시키는지를 관측하고자 함
- ✓ BEC sample에 가하는 자기장을 변화시킴으로써 원자간 상호작용 세기를 마음대로 조절 (Feshbach resonance 이용)
- ✓ 기존 양자혼돈 연구에 입자간 상호작용을 추가하는 새로운 시도

- BEC의 Scar Mode

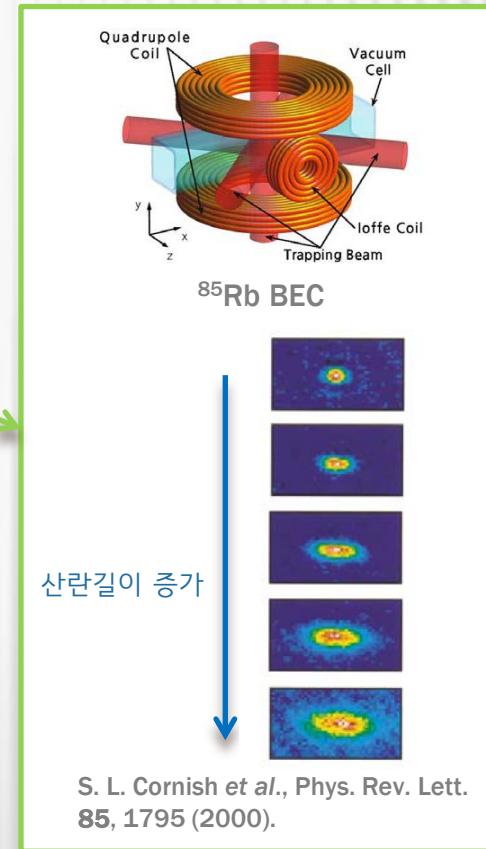
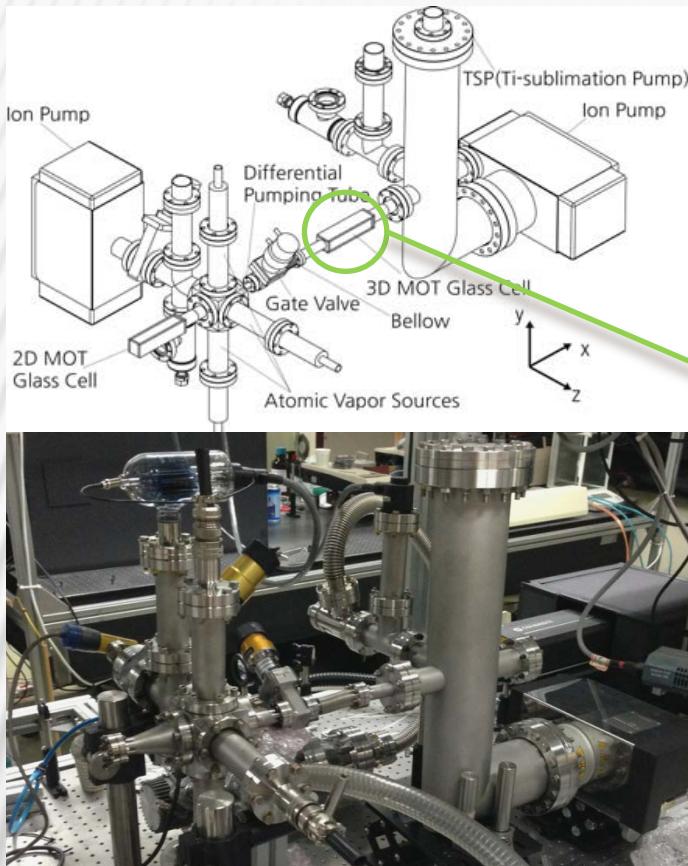
- BEC에서 특이점 현상?

- BEC에서 동적 터널링?



Nadav Kats et al., *New J. Phys.* **12**, 073020 (2010)

# $^{85}\text{Rb}$ BEC Machine for Quantum Chaos



- 산란길이를 조절하여 원자간 상호작용을 제어하기 위해 새로운 BEC 장치를 설계, 제작함
- 양자흔돈 실험의 새로운 패러다임을 구축할 것임

# 기대효과, 연구경험, 대학원생 실적

# 연구 활용방안 및 기대효과

- 고 압축률의 양자광은 초정밀 (저잡음) 및 극미소(단광자) 광측정 등에 활용
  - 원자-공진기 계에서의 양자얽힘을 이용하여 양자통신(실용적 활용). 양자역학의 근간인 비국소성을 실험적으로 검증할 수 있음 (학문적 활용)
  - 고반복률의 주문형 단광자 발생기술은 양자 암호 기술 (*secret key distribution*) 에 바로 응용됨
  - 피터만 인자 연구는 미소 레이저의 획기적 효율증대에 기여할 것임
- 
- ◆ 미래 신성장 동력으로서 양자정보 및 양자정보의 원천기술 확보
  - ◆ 10년-20년 뒤 국제 경쟁에서 유리한 고지 점거
  - ◆ 고효율 양자정보 및 양자통신 기술의 확보로 에너지 고갈에 대비, 지속적인 경제 성장의 기반 확보

# 연구 수행 경험 및 능력

- 지난 15년간 창의적 연구 진흥사업, 순수기초 연구그룹, 국가지정 연구실 사업, WCU 등 수행
- 국내에서 유일하게 **단일원자-공진기 상호작용** 연구 기반을 확보
- 2009-2014 기간(최근 5년) 중 SCI 상위 10% 저널에 20여편의 논문 발표:  
책임저자로서 Nature Communications(1편, IF~10), Nano Letters(1편, IF~12.2), Physical Review Letters(3편, IF>7.6), Optics Express(5편, IF~3.8), Optics Letters(1편, IF~3.3) 및 Physical Review A(6편, IF~2.9) 등 출판
- 연구에 필요한 단일 원자 포획 기술, 단일 광자 검출 기술, 초고감도 스펙트럼 측정 기술(단일원자 형광 수준) 및 양자광학 및 양자정보 전문 지식 및 기술을 보유하고 있음.
- 국제적으로 인정받고 있는 연구그룹 (국제학회 개최, 초청강연). 특히 마이크로 캐비티 분야는 선도그룹.

# 2010년 이후 대학원생 실적

SCI IF: Nature Comm. (10), Nano Lett. (12.2), Phys. Rev. Lett. (7.6).  
Opt. Exp. (3.8), Opt. Lett. (3.3), Phys. Rev. A (2.9)

## Cavity-QED Microlaser

- Moonjoo Lee *et al.*, Nature Communications **5**, 3441 (2014).
- Hyun-Gue Hong *et al.*, Phys. Rev. Lett. **109**, 243601 (2012).
- Junki Kim *et al.*, Opt. Lett. **37**, 1457 (2012).
- Hyun-Gue Hong and Kyungwon An, Phys. Rev. A **85**, 023836 (2012).
- Wontaek Seo *et al.*, Phys. Rev. A **84**, 037802 (2011).
- Wontaek Seo *et al.*, Phys. Rev. A **81**, 053824 (2010).
- Hyun-Gue Hong *et al.*, Opt. Express **18**, 7092 (2010).

## Single-Atom Trap

- Wookrae Kim *et al.*, Nano Letters **11**, 729 (2011).
- Sungsam Kang *et al.*, Opt. Express **19**, 2440 (2011).
- Sungsam Kang *et al.*, Opt. Express **18**, 9286 (2010).
- Youngwoon Choi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 153601 (2010).

## Chaotic Optical Microcavity

- Soo-Young Lee *et al.*, Phys. Rev. A **83**, 023827 (2011).
- Juhee Yang *et al.*, Opt. Express **18**, 26141 (2010).
- Juhee Yang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **104**, 243601 (2010).

## Presentations by graduate students at international conferences abroad

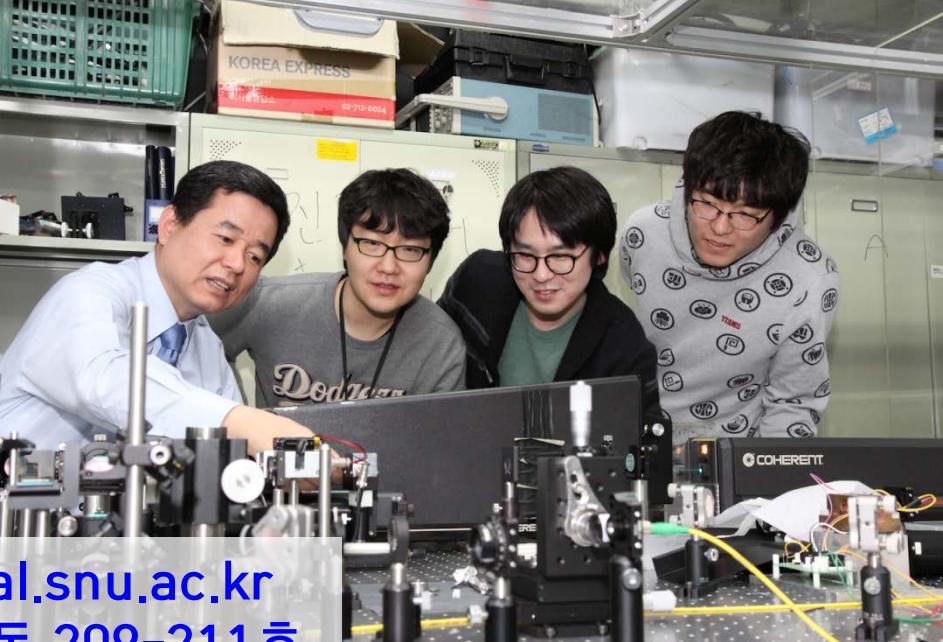
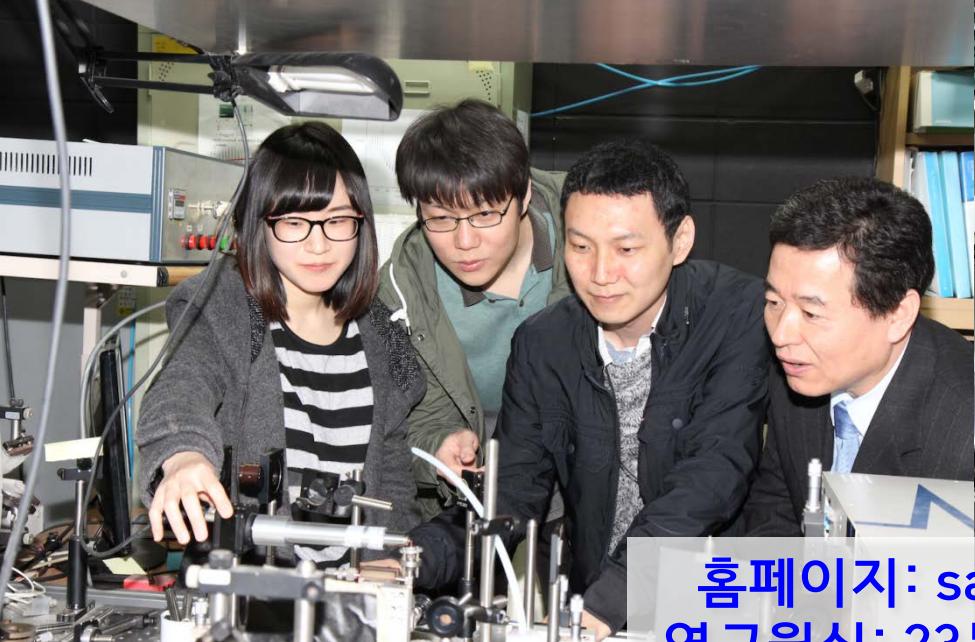
- 1 oral presentation (M. Lee *et al.*) at Gorden Research Conference, West Dover, USA, 26 June-1 July 2011.
- 1 poster (J. Kim *et al.*) at Coherence Control of Complex Quantum Systems, Okinawa, Japan, 13-18 April 2014.
- 3 posters (J. Kim *et al.*; Y. Song *et al.*; S. Hong *et al.*) at International Conference on Atomic Physics, Paris, France, 23-27 July 2012.
- 1 posters (H. Kwak *et al.*) at 13th International Conference on Transparent Optical Networks, Coventry, England, 2-5 June 2012.
- 2 posters (S. Lim *et al.*; J.-R. Kim *et al.*) at International Conference on Laser Spectroscopy, Hannover, Germany, 30 May - 3 June 2011.
- 2 posters (Y. Shin *et al.*; H. Kwak *et al.*) at 12th International Conference on Transparent Optical Networks, Stockholm, Sweden, 26-30 June 2011.
- 1 oral presentation and 10 poster presentations in 2010.

졸업생 진로:

2014-05-14

이상범 (2004년, 박사) 한국표준과학연구원 staff  
최원식 (2006년, 박사) 고려대학교 물리학과 교수  
윤석찬 (2007년, 박사) 독일 U. Bonn postdoc  
최영운 (2009년, 박사) MIT postdoc  
양주희 (2010년, 박사) 전기연구원(상암) staff  
홍현규 (2011년, 박사) 한국표준과학연구원 staff  
서원택 (2011년, 박사) 삼성종기원 staff  
김욱래 (2011년, 박사) 삼성생산기술연구소 staff  
이문주 (2011년, 박사) 스위스 ETH Zurich postdoc  
곽호정 (2013년, 박사) 삼성전자  
문송기 (2014년, 박사) 서울대 포스닥





홈페이지: [sal.snu.ac.kr](http://sal.snu.ac.kr)  
연구원실: 23동 209-211호  
실험실: 23동 212-214호

