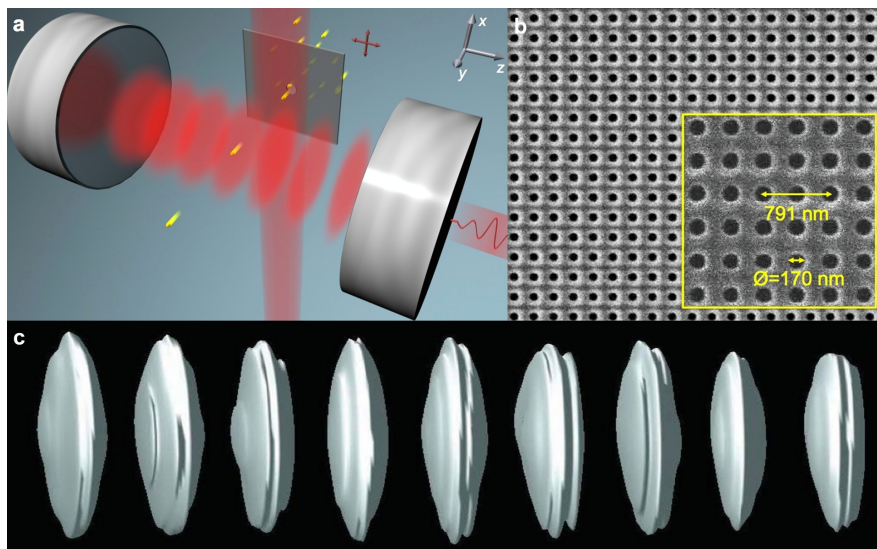


Three-dimensional Imaging of Cavity Vacuum with Single Atoms Localized by a Nanohole Array

양자 역학에 따르면 진공은 완전히 비어있지 않고 영점에너지에 의해 입자와 반입자가 끊임없이 순간적으로 생성되고 소멸되는 진공요동의 상태에 있다. 진공을 채우고 있는 영점에너지, 즉 진공에너지는 물리학에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 예를 들어 우주의 팽창속도는 아인슈타인의 일반상대론에 나오는 우주상수에 의해 결정되는데, 이 우주상수가 다름 아닌 진공 에너지의 밀도에 해당한다. 또 가깝게 마주보고 있는 두 금속판 사이에 작용하는 캐시미어 힘도 진공 에너지 때문에 발생한다. 1927년 Dirac은 진공 에너지가 만드는 전자기장에 의해 원자의 자발 방출이 일어난다고 제안하였다. 진공 전자기장이 작은 모드 볼륨을 가진 공진기 내부에서는 매우 증폭되어 원자와 공진기 상호작용의 효율을 높인다는 것이 공진기 양자전기역학의 기본 원리이다.

공진기 안에서 진공에너지의 분포는 맥스웰 방정식을 따를 것이라고 예측되어 왔지만, 공진기 내에서 원자의 위치를 정확히 제어하는 일이 사실상 불가능하였기 때문에 직접적으로 측정된 적이 없었다. 원자 이온을 사용하여 진공 전자기장을 측정하려는 시도가 있었지만 공진기 표면에 유도되는 전하 때문에 측정에 한계가 있었다.

본 연구에서는 공진기 내부에서 원자의 위치 제어를 위해 75 나노미터 두께의 실리콘 나이트라이드 평판에 직경 170 나노미터의 구멍을 격자 모양으로 뚫은 나노구멍격자를 사용하였다. 여기에 800 m/s의 속도로 바륨 원자 빔을 입사시켜서 모든 구멍을 통해 최대 원자 한 개 정도가 빠져나올 수 있게 하였다. 실제로 공진기 내부의 광자수는 1보다 매우 작은 상태로 유지되어, 나노 구멍을 통해 들어온 원자가 공진기를 지날 때



▲ a. 실험장치도. 단일 바륨원자와 나노구멍격자를 사용하여 진공에너지 분포를 측정한다. b. 실리콘 나이트라이드 평판에 집속이온빔으로 직경 170나노미터 구멍을 뚫어 만든 나노구멍격자. c. 공진기 안에 형성된 진공에너지의 3차원 분포 이미지.

오로지 진공 요동에 의해 빛을 방출하는 조건이 만족되었다. L형으로 가공된 휘도 100만의 Fabry-Perot 공진기 앞에 나노 구멍 격자를 400 마이크로미터까지 접근시킨 후 위치를 스캔하는 방법으로 공진기 안에 들어가는 원자의 위치를 제어하였다. 나노 구멍 격자를 통과한 원자는 예측된 궤적을 따라 공진기 사이를 지나면서 그 궤적을 따라 존재하는 진공 에너지 밀도에 따라 광자를 방출하는 확률이 결정된다. 나노 구멍 격자의 위치를 원자 진행 방향에 대하여 수직인 평면(그림 a에서 xz 평면)에서 스캔하면서 공진기 출력을 측정하면 그 평면으로 투영된 진공 요동의 분포를 얻게 된다. 원자 진행 방향(y 방향)에 따라 변하는 진공 요동은 원자가 방출한 광자의 스펙트럼에 그 정보를 남긴다. 이들 정보를 종합하여 진공에너지의 3차원 분포도를 얻을 수 있었다.

진공 전자기장의 세기는 레이저 발진 효율을 결정한다. 공진기 안에 들어가는 원자수가 평균 1개 정도가 되면 레이저 발

진이 일어나는데 이때의 레이저 발진 특성으로부터 공진기 배 위치에서 진공 전자기장의 크기가 0.92 ± 0.07 V/cm임을 알아낼 수 있었다.

본 연구는 임의의 진공 요동의 분포, 예를 들어 광격자, 표면 플라즈몬 공진기 등의 진공 전자기장의 분포를 측정하는데 응용될 수 있다. 또한 원자의 위치를 고품위 미소 공진기 안에서 정확히 제어할 수 있기 때문에 양자 정보 처리 연구에 도움이 된다. 나노 구멍 격자 기술을 사용하면 다수의 원자를 동일한 위상을 갖는 중첩상태로 만들 수 있고, 이렇게 준비된 원자들은 공진기와 상호작용하여 그 위상 정보를 공진기장에 전달할 수 있다. 그 반대 과정도 가능하므로 양자물질과 빛 사이의 가역적 정보교환이 가능해진다.

이문주, 김준기, 서원택, 홍현규, 송영훈 (서울대), R. R. Dasari (MIT), 안경원 (서울대), Nat. Commun. **5**, 3441 (2014).