

Tunneling-Induced Spectral Broadening of a Single Atom in a Three-Dimensional Optical Lattice

단일 입자 분광 기술은 포획된 입자가 상호 작용하는 주변 환경에 대하여 물리/화학/생물학적으로 가장 직접적인 정보를 제공하며, 이러한 이유로 단일 분자/원자, 단일 이온, 양자점 등에서 공명형광 특성 측정 및 분광 측정에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 이 중에서도 특히 중성 원자의 경우, 포획 자체가 어렵고 원자로부터 방출되는 광자수가 적다는 이유 등으로 인해 실험적 접근이 어려웠다. 이로 인해 대부분의 실험이 다수 원자를 이용할 수밖에 없었는데, 이 경우 높은 밀도의 원자에 의한 형광 재산란, 원자간 충돌에 의한 선평 넓어짐 등의 원치 않는 효과가 발생함이 보고되었다. 한편 근래의 저온 원자 포획 기술의 발전과 함께, 레이저로 구성된 광격자 포텐셜에서의 중성 원자 포획이 많은 그룹들에 의해 이루어져 왔다. 최근의 실험에서는 원자를 광격자 포텐셜 내에 국소적으로 포획할 수 있음이 알려졌고, 사용된 레이저의 파장보다 좁은 영역으로의 포획도 실험적으로 구현되었다. 또한 포획에 사용된 레이저의 상호 위상을 조절함으로써 간섭에 의해 생성된 포텐셜을 시간에 따라 안정화시키는 방식을 이용하여, 자기광학적 포획장치에 포획된 저온 원자 또한 매우 좁은 국소 영역에 포획될 수 있음이 알려졌다.

서울대의 안경원 교수 팀은 단 하나의 루비듐 원자를 위의 원리를 이용하여 자기광학적 포획의 국소영역에 포획한 후, 그로부터 나오는 공명 형광 스펙트럼을 측정하였다. 단일 원자로부터 나오는 광자의 수는 극히 적기 때문에 일반적인 분광기로는 측정이 불가능하므로, 광자 수 헤아림 방식의 2차 상관관계함수분광법(PCSOCS, Photon-counting-based Second-order Correlation

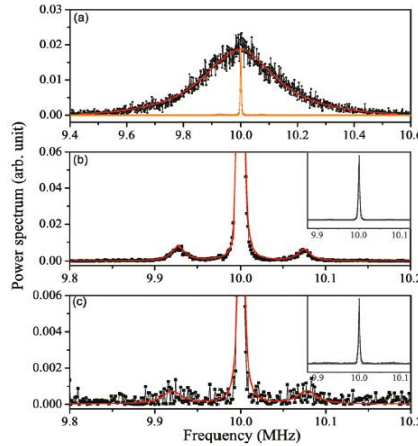


그림 1. 포획한 원자의 온도가 충분히 낮아질 경우 스펙트럼은 더 이상 도플러 선평 넓어짐을 겪지 않고 Lamb-Dicke 효과를 보이게 된다.

Spectroscopy)을 사용하였다. 원자로부터 나오는 형광신호는 10 MHz 주파수 차이가 나는 별도의 국소 진동자 레이저(Local Oscillator)와 합쳐지고 이들이 일으키는 맥놀이 신호를 PCSOCS 방법으로 측정하며, 이렇게 측정된 2차 상관관계 함수는 푸리에 변환을 통하여 최종적인 광학 스펙트럼으로 변환되었다. 스펙트럼 측정 중 자기광학적 포획장치 내에 한 개의 원자수를 유지하기 위하여 동 연구실에서 기존에 개발한 능동적 원자 수 제어 기술을 이용하였으며, 원하는 원자수가 포획 영역 안에 있을 때에만 측정이 이루어졌다. 원자의 온도가 높을 경우 원자는 미소 광격자 포텐셜을 느끼지 못하기 때문에, 측정된 결과에서는 도플러 선평을 가지는 가우시안 형태의 스펙트럼을 볼 수 있다(그림 1(a)). 그러나 원자의 온도가 낮을 경우, 원자는 미소 광격자 포텐셜을 느끼게 되며 결국 레이저 파장보다 작은 영역에 국소적으로 포획되어 스펙트럼의 중심의 Rayleigh 선평이 좁아지는 Lamb-Dicke 현상을 보인다(그림 1(b)). 또한 포텐셜 내에 형성된 이웃한 진동 상태(vibrational state) 사이의 전이에 의해

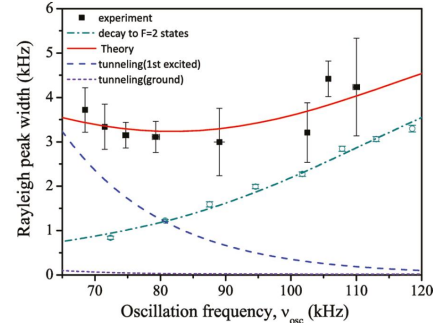


그림 2. 관측된 단일 원자의 Rayleigh 선평이 포텐셜 격자점간의 터널링에 의하여 넓어진 것임을 에너지 띠 구조 계산을 통하여 이론적으로 확인하였다.

Stokes 및 Anti-Stokes 결까지 또한 관측할 수 있었다. 이렇게 관측된 결가지들로부터 원자의 온도 및 진동 상태 내의 밀도 등을 알아낼 수 있다. 단일원자 스펙트럼의 경우, 앞에서 언급한 것처럼 높은 밀도에 의한 스펙트럼의 왜곡이 없으며, 단일원자의 공명형광 이론과 직접 비교할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 다양한 조건에서의 단일 원자스펙트럼이 측정되었고, 이때 측정된 Rayleigh 선평에 대한 정량적 분석을 위해 관련된 원자 초미세구조의 lifetime 효과 측정, 포텐셜 내에서의 인접한 포텐셜 국소 지점 사이의 원자의 터널링에 대한 이론적 계산을 수행하였다. 원자의 진동 상태 밀도, lifetime 효과, 그리고 원자의 터널링 주기 등이 고려된 이론적 모델을 제시하였고, 실험 결과와 이론이 잘 일치함을 확인하였다. 본 연구는 광격자 내에서의 중성 단일 원자의 터널링 현상을 측정/분석한 실험이며, 본 연구에 이용된 기술은 매우 약한 세기의 형광을 발생하는 단일 입자의 스펙트럼 측정 등에 활용될 전망이다.

김옥래, 박창원, 김정률, 최영운, 강성삼, 임수인, 이예리, 임지순, 안경원(서울대), Nano Letters 11, 729 (2011).