

Quasi-Eigenstate Coalescence in an Atom-Cavity Quantum Composite

열린 양자역학적 시스템, 즉 에너지의 손실이 발생하는 시스템을 기술하는 해밀토니안은 non-Hermitian 형태를 갖는다. 이와 같은 시스템에서 해밀토니안을 구성하는 변수가 특정 조건을 만족시키는 경우 시스템의 고유상태가 하나로 합쳐져 오직 하나의 고유상태만을 갖게 된다. 이 특정 조건의 변수 쌍을 특이점(exceptional point, EP)이라고 부른다. EP는 고유상태의 융합(coalescence)뿐만 아니라 여러 독특한 현상을 특징으로 갖는다. 예를 들어 EP를 둘러싼 에너지 평면의 독특한 위상학적 형태, 상태함수의 4π 회전대칭, 고유상태의 교차회피(avoided crossing)에서 교차로의 전이 등이 그것이다. 이러한 성질 때문에 EP는 예전부터 이론적으로 다양한 시스템에서 그 성질이 논의되어 왔다. 실험적으로는 마이크로웨이브 공진기에서 관측되었고 우리 그룹에 의해 최근 변형된 미소 공진기에서 관측된 바 있다 (물리학과 첨단기술 2009년 11호에 소개됨).

지금까지의 실험은 고전적인 시스템에서 이루어졌으며 이것을 양자역학 시스템으로 확장하기 위해 원자-공진기 시스템은 매우 이상적이라고 할 수 있다. 공진기 양자역학의 이론과 실험 기술들이 매우 잘 발달되어 있어 정밀한 측정과 분석이 가능하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 지금까지 원자-공진기 시스템에서 EP를 관측하지 못한 이유는 실험적으로 조절 가능한 변수가 원자와 공진기의 주파수 어긋남밖에 없어서 EP를 관측하기 위해서 필요한 두 개의 실험 변수를 확보할 수 없기 때문이었다.

본 연구에서는 원자-공진기 시스템의 결합상수를 조절하는 방법을 개발하여 EP 관측에 필요한 두 개의 변수를 확보하고 최초로 양자역학적 시스템에서 EP를 둘러싼 고유상태의 변화와 EP에서

고유상태가 융합되는 것을 관측하였다.

단일 원자와 단일 공진기 모드 사이의 결합상수를 조절하기 위하여 본 연구에서는 타원편광을 사용하였다. 본 연구진은 실험에 앞서 여러 아준위(sublevel)를 갖는 단일 원자가 타원편광의 공진기 모드와 상호작용할 경우 원자의 모든 아준위들이 상호작용에 참여하여 결과적으로 마치 평균 결합상수를 갖는 이준위 원자처럼 작동하는 것을 양자역학적 이론으로 검증하였다. 이때 원자의 평균 결합상수는 타원편광의 타원각에 의해 결정되므로 타원각을 조절하여 결합상수를 조절할 수 있었다.

실험에서는 ^{85}Rb 원자를 두 개의 초거울로 구성된 공진기 위에 자기 광학적 방법으로 포획하고 떨어뜨려 공진기 모드로 지나가게 하였다. 원자그룹은 떨어

지면서 팽창하여 밀도가 낮아지므로 공진기의 모드를 지나갈 때는 원자가 하나씩 지나가며 공진기 모드와 상호작용하게 된다. 후 처리 과정을 거쳐 하나의 원자가 최대 결합상수로 상호작용하는 현상을 골라내 분석하여 단일 원자와 공진기 모드가 만드는 고유상태를 관측할 수 있었다. 앞서 서술한 타원편광을 이용한 결합상수 조절방법을 사용하여 EP를 포함한 여러 조건에서 실험을 수행하고 EP 주변에서의 고유상태를 관측하였다.

그림 1은 결합상수(g)와 원자-공진기 주파수 어긋남(Δ_{ca})을 바꾸어 가면서 시스템 고유에너지의 실수부와 허수부를 측정한 것이다. 그림 1(a)의 강결합(strong coupling) 조건에서 교차회피 현상을 보이던 고유상태는 그림 1(c)에서처럼 약결합 조건에서는 교차 현상을 보인다. 그리고 그림 1(b)의 EP 조건에서는 고유에너지의 실수부와 허수부가 모두 $\Delta_{ca} = 0$ 에서 하나의 값을 갖는 현상, 즉 고유상태의 융합을 관측하였다.

그림 1의 실수부와 허수부를 합쳐보면 고유에너지가 복소평면에 갖는 에너지 평면의 기하학적 형태를 확인할 수 있다. 그림 2는 실험적으로 관측한 고유에너지 평면의 독특한 형태이다.

A의 위치에서 출발한 고유상태는(g, Δ_{ca})로 구성되는 변수공간에서 사각형을 그리며 닫힌 폐곡선을 돌아오면 E의 위치, 즉 다른 고유상태로 돌아오게 된다. 한 바퀴의 닫힌 폐곡선을 더 돌아야 처음 상태인 A로 돌아오는 4π 회전대칭 현상을 보여주는데, 이는 피비우스피와 위상학적으로 동일한 성질이다. 이와 같은 EP를 둘러싼 독특한 현상들은 열린 양자역학 시스템에서 최초로 관측하였다는데 본 연구의 의의가 있다.

최영운, 강성삼, 임수인, 김옥래, 김정률, 이재형, 안경원 (SNU), Phys. Rev. Lett. **104**, 153601 (2010).

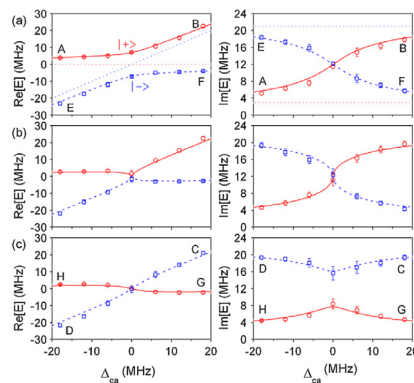


그림 1. 여러 가지 실험조건에서 고유 에너지의 실수부와 허수부. (a) 강결합, (b) EP, (c) 약결합 조건.

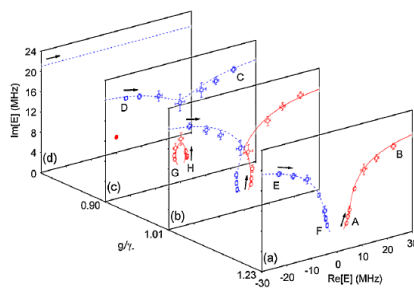


그림 2. 원자-공진기 시스템의 고유에너지 평면의 기하학적 형태.