

Observation of an Exceptional Point in Chaotic Optical Microcavities

열린 양자역학적 시스템에서 해밀토니안이 두 개 이상의 변수의 함수로 주어지는 경우, 적절한 변수 값들에 대해 시스템의 고유상태함수가 하나로 융합(coalesce) 될 수 있다. 이와 같은 현상을 특이점(exceptional point, EP) 현상이라 하며, 이론적으로는 다양한 시스템에서 그 독특한 성질이 연구되어 왔다. 원으로부터 변형된 형태를 갖는 비대칭 유전체 미소 공진기에서 전기장은, 같은 형태의 포텐셜 우물에 갇힌 양자입자의 상태함수와 일대일 대응을 갖는다는 것이 잘 알려져 있기에, 비대칭 유전체 미소 공진기는 EP 현상을 직접 관측할 수 있는 시스템 중 하나로 지목되어 왔다. 본 연구에서는 비대칭 유전체 미소공진기에서 EP 현상을 분광학적 방법으로 처음 관측하고 EP 주변의 토폴로지를 규명하였다. 공진기의 비대칭 정도를 나타내는 변형도와 모드 수를 두 변수로 삼아 이들을 바꿔가면서 공진 모드의 주파수와 감쇠율을 체계적으로 측정함으로써 EP 조건을 만족시키는 변수쌍을 찾아 낼 수 있었다.

본 연구에서 사용한 변형된 공진기는 찌그러진 구멍으로부터 적절한 압력을 받아 분출된 액체기둥의 단면으로부터 만들어진 다. 이때 표면장력에 의해 액체가 진행함에 따라 표면파가 생성되는데, 표면파의 배가 위치하는 곳에서 액체기둥의 단면은 비대칭성을 가진 2차원 공진기 모양을 이룬다. 액체의 분출 압력을 조절하여 초기 변형도를 변화시킴으로 각 단면의 변형도를 연속적으로 바꿀 수가 있다. 여기서 액체는 색소를 녹인 에탄올(굴절률=1.361)로서 레이저의 이득물질 역할도 한다. 분출되는 액체의 평균 반경은 약 15 μm 이다. 이득물질을 펄핑하기 위해 아르곤 레이저를 사용하였다.

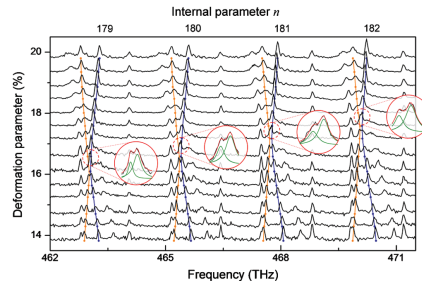


그림 1. 변형도 변화에 따른 공진 모드의 교차 회피(avoided crossing).

그림 1은 공진기 변형도의 연속적 변화에 따른 공진모드의 형광스펙트럼들이고 각 스펙트럼은 다른 모드 간격(FSR)을 갖는 다섯 개의 모드그룹들로 구성된다. 변형도의 변화에 따라 다른 모드 그룹에 속한 공진 모드들 사이에 교차 회피(avoided crossing) 현상이 보인다.

이러한 교차 회피 현상은 변형도뿐만 아니라 주파수 변화에 의해서도 관측 가능하다. 그림 2(a)는 변형도가 18.7%일 때 모드 스펙트럼으로, 기준 주파수(ν_{ref})에 대한 각 모드들의 상대주파수로 표현하면 그림 2(b)와 같이 그려진다. 여기서, 기준주파수는 FSR이 잘 정의되는 원형공진기에서 지름 양자수 $l=3$ 에 해당하는 속삭이는 회랑 모드(WGM)들을 사용했고, 내부변수(internal parameter)는 주기케도의 길이가 파장의 몇 배에 해당하는가를 나타내는 정수로서 모드수라고도 불린다. 내부변수는 외부적으로 변화 가능한 변형도, 즉 외부변수와 구별되는데, 이를 이용함으로써 고정된 변형도에서도 교차 회피현상과 같은 에너지 레벨 동역학이 관측 가능하다.

한편, 교차회피에 의한 두 모드 사이의 간격은 변형도가 작아질수록 점점 줄어들게 되는데, 교차회피에서 교차로 전이가 일어나는 지점(변형도 12%, 모드 수 170)이 특이점, 즉 EP에 해당한다. 그림 2(c)는 이러한 EP 주위에서의 변형도와 모드 수

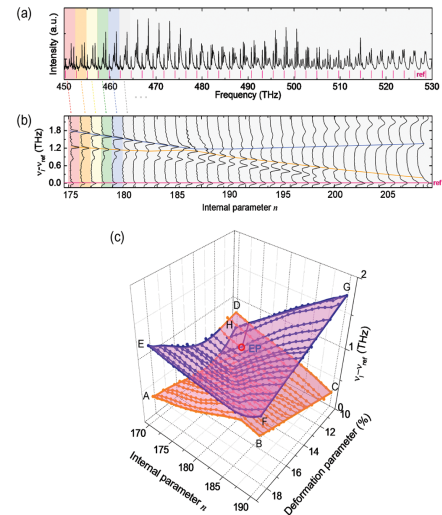


그림 2 (a) 변형도 18.7 %에서 공진모드들의 스펙트럼. (b) 내부 변수(모드 수)에 따른 공진 모드의 교차 회피. (c) 특이점 주위 에너지 레벨들의 topology.

에 따른 두 모드의 토폴로지를 나타낸다.

공진 주파수(에너지 레벨에 해당)를 변수공간에 투영할 경우, EP 주변의 토폴로지가 수학적으로 branch-point singularity와 동일하고, 따라서 EP 주위를 두 바퀴 돌아야만 원래 에너지 레벨로 돌아오는, 즉 피비우스의 띠와 같은 토폴로지를 보인다는 사실을 알 수 있다. 예를 들어 그림 2(c)에서 A 위치에 해당하는 모드를 출발점으로 해서 변수공간에서 사각형을 그리며 한 바퀴 돌면, A 모드는 E 모드로 바뀌게 되며, 한 바퀴 더 돌아야지만 A 모드로 다시 돌아오게 된다. 이러한 특이한 토폴로지 때문에 열린 양자시스템에서 양자수와 같은 양자표식이 근본적으로 불가능하다는 해석을 새롭게 제시하였다.

이상범(KRIS), 양주희(SNU), 문송기(SNU), 이수영(SNU), 심정보(Max-Planck Inst.), 김상욱(PNU), 이재형(SNU), 안경원(SNU), Phys. Rev. Lett. **103**, 134101 (2009).