

Pump-Induced Dynamical Tunneling in a Deformed Microcavity Laser

일반적인 해밀토니안 시스템은 정칙 운동(regular dynamics)과 혼돈 운동(chaotic dynamics)이 섞여있는 혼합된 위상공간(mixed phase space)을 가진다. 이러한 위상공간상의 정칙영역과 혼돈영역은 고전 역학적으로 완전히 분리되어 있어 두 영역 사이에 전이가 불가능하다. 그러나 양자역학적으로는 두 영역 사이에 전이 확률이 존재할 수 있다. 이를 동적 터널링(dynamical tunneling)이라 한다. 이러한 동적 터널링 현상은 양자혼돈 이론 분야에서 큰 관심을 가지고 활발히 연구되어 왔으나 실험적 접근의 어려움으로 소수의 실험적 증거만이 제시되어 왔다.

이차원 사중극자 모양으로 변형된 비대칭 미소 공진기 내부에서 빛살의 운동은 혼합된 위상공간으로 기술된다. 또한 빛살과 파동의 운동은 각각 고전역학의 입자와 양자역학의 파동 운동에 대응된다. 따라서 비대칭 미소 공진기 시스템은 동적 터널링 현상과 같은 양자혼돈을 연구하기에 적합하다.

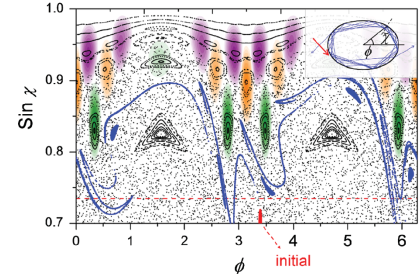
서울대의 안경원 교수팀은 반지름이 15 μm 정도인 액체줄기의 한 단면을

이용하여 변형도가 19%인 비대칭 미소 공진기 레이저를 만들고, 여기 레이저 분광학(excitation laser spectroscopy) 측정방법을 통하여 미소공진기에서 동적 터널링 현상을 직접적으로 관측하였다. 이들은 결합상수를 정량적으로 분석하였을 뿐 아니라, 동적 터널링을 활용하여 미소 공진기 레이저의 발진 문턱을 획기적으로 낮출 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구에 사용된 비대칭 미소공진기에는 그림 1(a)의 스펙트럼처럼 다양한 공진기 모드들이 존재하며 그림 1(b)에 표시된 것과 같이 5개의 모드 그룹으로 식별된다. 파장이 가변되는 색소 레이저(dye laser)를 펌프 광으로 사용하여 펌프 파장(600 nm 근방)에 따른 고품위(high-Q) 발진모드(660 nm 근방)의 문턱세기를 측정함으로써 그림 1(c)와 같은 결과를 얻었다. 펌프의 파장이 공진기 모드와 공명조건일 경우 발진 모드의 레이징 문턱이 1000배 정도 낮아지는 현상이 관측되었다. 이는 혼돈모드를 채운 펌프 빛살이 동적 터널링 현상에 의해 정칙영역의 공진기 모드로 전이되었기 때문에 발생한 것이다.

우측 상단 그림의 붉은색 원(initial이라 표시된 것)은 실제 실험에서 펌프 레이저 빔으로 공진기를 펌핑한 조건(펌핑 각도와 위치)을 위상공간상에 표시한 것이다. 이러한 초기조건에서 공진기 내부로 굴절하여 들어간 펌프 빛살은 파란색 선으로 표시된 혼돈 영역에만 존재하게 된다. 그러나 공진 모드 1, 2, 3은 각각 보라색, 주황색, 초록색 분포로 표현된 파동분포를 갖고 정칙영역에만 머무르기 때문에 고전 역학적으로는 펌프 빛살이 도달할 수 없다. 펌프 빛살이 공진 모드로 전이되어 들어갈 수 있는 유일한 과정은 동적 터널링 현상뿐이다.

펌프 빛살이 공명조건이 맞는 공진기



▲ 정칙영역에 머무르는 공진 모드 1, 2, 3 (보라, 주황, 초록색 분포)과 혼돈 영역에만 머무르는 펌프 레이저(파란색 선) 간의 전이는 고전 역학적으로는 금지되어 있으며 오직 동적 터널링에 의해서만 가능하다.

모드로 전이되어 들어가면 그 공진기 모드의 생명시간만큼 오랫동안 공진기에 머무를 수 있다. 따라서 전이된 모드와 실제로 레이저 발진이 일어나는 모드와 공간적 겹침이 클 경우 레이징 문턱이 획기적으로 낮아지는 - 펌핑 효율이 높아지는 - 현상이 발생하게 된다.

이와 같은 동적 터널링 현상을 모드 간 상호작용(mode-mode coupling) 모델을 통해 설명할 수 있다. 이 모델에서는 혼돈 영역의 빛살들을 무수히 많은 저품질(low-Q) 모드들로 간주한다. 펌프 레이저에 의해 저품질 모드들이 먼저 여기되고, 저품질 모드들이 정칙영역의 고품위 모드와 상호작용함으로써 동적 터널링이 일어난다고 본다. 모드 간 상호작용 모델을 이용하여 결합된 모드 방정식(coupled mode equation)을 만들고 정상상태에 대해 풀어서 실험에서 측정된 펌핑 효율 및 동적 터널링 결합상수를 정량적으로 구해낼 수 있었다. 이렇게 얻은 동적 터널링 결합상수는 모드 순서가 낮을수록 큰 값을 보였는데, 이는 위상공간상의 정칙 모드와 혼돈 영역 사이의 접근성으로 잘 이해된다.

양주희(서울대), 이상범(표준연구소), 문송기, 이수영(서울대), 김상욱(부산대), Truong Thi Anh Dao, 이재형, 안경원(서울대), Phys. Rev. Lett. **104**, 243601 (2010).

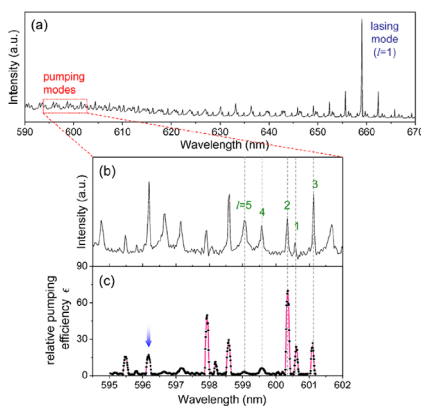


그림 1. 펌프 레이저의 파장이 공진 모드 1, 2, 3과 일치할 경우 펌핑 효율이 획기적으로 높아짐이 관측되었다. 이 현상은 혼돈 영역에서 정칙 영역으로의 동적 터널링에 대한 직접적 증거이다.