

Uncertainty-Limited Turnstile Transport in Deformed Microcavities

비대칭 양자점과 같은 중시계에서 전자의 수송현상은 고전적으로는 x-p 위상 공간에서 특정한 궤적을 따라 일어나며, 특히 회전문과 유사한 구조를 통하여 외부세계로 빠져나간다고 설명된다. 그러나 지금까지 이러한 현상의 실험적 증거가 제대로 제시된 적이 없었다. 본 연구에서는 변형도를 연속적으로 바꿀 수 있는 미소 공진기를 통해 회전문 수송 현상의 직접적인 증거를 찾아내었다.

공진기 내부의 빛살의 운동은 그 공진기에서 방출되는 출력광의 원장(far-field) 분포를 통해 예측할 수 있다. 본 연구팀에서는 반지름 15 μm의 미소공진기에서 발진하는 모드들의 원장분포를 그림 1과 같이 변형도의 증가에 따라 연속적으로 관측하였다. 실험 결과에서 방출된 빛은 크게 두 개의 봉우리 분포, 즉 30°~40°에서 나타나는 중심 분포와, 약 60° 근처의 곁 분포로 분리되는 양상을 보여준다. 이때, 곁 분포의 상대적 크기가 공진기의 변형도가 9%에서 10%, 12%, 16%로 증가함에 따라 점점 커지는 현상이 관측되었다.

이러한 현상은 그림 2와 같이 빛살의 운동을 위상공간상에서 고찰함으로써 더 명확하게 이해될 수 있다. 여기서 x축은 빛살이 공진기에 부딪칠 때의 위치에 대한 정보를, y축은 입사각에 대한 정보를 나타낸다. 그림에서 복잡하게 얽

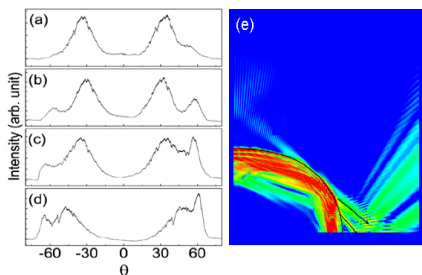


그림 1. (a-d) 실험으로 관측한 출력방향성. (e) 파동방정식으로부터 계산한 공진모드와 출력광의 모습.

힌 선 구조들은 불안정한 4각형 궤도(F1, F2, F3, F4) 근처에서의 빛살의 운동에 의해 형성되는 궤적으로, 다양체(manifold)라 불린다. y값 0.74에 해당하는 수평선은 빛의 전반사 조건에 해당하는 선으로 이 선을 경계로 선 아래에 분포하는 빛살은 굴절을 통해 공진기를 빠져나가게 된다.

혼돈 수송 이론에서는 다양체 구조상에서 빛다발들이 그림 2의 a,b,c,d,e,f와 같이 특정한 순서를 가지며 수송되어 간다고 알려져 있다. 또한, 이러한 다양체 구조는 크게 4영역(I, II, III, IV)으로 나누어지는데, 특히 영역 II나 IV의 경우 전반사 조건선 밑에 분포하고 있으므로, 공진기 내부를 순환하던 빛이 이러한 영역 I이나 III으로 들어가게 되면 다음 단계 II나 IV를 통해 공진기를 쉽게 빠져나가게 된다.

높은 품질값을 갖는 공진기 모드들은 위상공간에서 높은 위치(y값 0.9 이상)에 분포하므로, 이러한 빛이 공진기를 빠져나가기 위해서는 앞에서 설명한 것처럼 영역 I이나 III으로 수송되어야 한다. 특히 이것은 빛다발이 b에서 c로 이동하는 과정을 통해서만 발생할 수 있다. 즉, b에서는 영역 II 위에 존재하던 빛다발이 다음 과정 c로 이동하면서 영역 III 내부로 들어가게 되는데, 이렇게 다양체 벽을 통과하여 연결된 영역 내부로 빛이 수송되는 과정을 ‘회전문 수송’이라 부른다. 이때, 고전적으로는

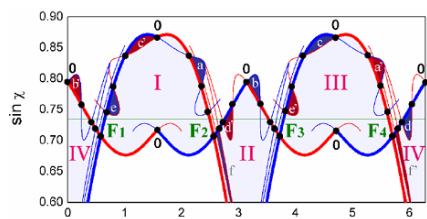


그림 2. 빛살 수송과 관련되는 위상공간에서의 다양체와 회전문 구조.

회전문의 크기(b, c의 면적)에 상관없이 빛다발이 이를 통과하여 나갈 수 있지만 파동역학적으로는 빛다발이 불확정성 원리에 의해 위상공간에서 유한한 면적을 갖게 되므로 그 크기가 회전문보다 작을 때에만 이를 거쳐 수송될 수 있다. 쉬운 비유로, 사람들이 건물을 빠져나가려고 할 때, 건물 입구의 회전문보다 뚱뚱한 사람은 회전문을 통과하지 못하고 건물내부에 남게 되지만, 회전문 크기보다 체격이 작은 사람은 쉽게 건물을 빠져나갈 수 있는 것과 같다. 다시 말해, 회전문 구조의 크기가 플랑크 상수보다 작을 때 ($\Delta x \Delta p < \hbar/2$)에는 불확정성 원리에 의하여 회전문 수송현상이 억제되는 것이다.

실험에서 변형도의 증가에 따라 곁 분포의 크기가 커지는 현상은 이러한 불확정성 원리에 따른 회전문 수송현상을 명확히 보여준다. 본 실험에서는 빛의 파동함수 분포의 크기는 고정된 채 회전문의 크기가 공진기의 변형도에 따라 변하게 되는데, 변형도가 작을 때는 회전문의 크기가 작아 빛이 이를 통과하지 못하여 방출된 빛의 곁 분포의 크기가 작지만, 변형도가 증가함에 따라 회전문의 크기가 함께 커지고, 따라서 회전문을 타고 나오는 빛의 양이 점점 많아져 곁 분포의 크기는 점차로 커지게 된다.

이러한 실험결과와 회전문 수송현상에 대한 최초의 실험적 증명일 뿐만 아니라, 변형된 공진기에서 빛의 방출과정을 구체적으로 보여주는 중요한 결과이다. 이 연구결과는 새로운 나노 및 미소 공진기 소자의 개발에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

Jeong-Bo Shim (Max-Planck Inst.), Sang-Bum Lee (SNU), Sang Wook Kim (PNU), Soo-Young Lee (SNU), Juhee Yang (SNU), Songky Moon (SNU), Jai-Hyung Lee (SNU), Kyungwon An (SNU), Phys. Rev. Lett. **100**, 174102 (2008).