

## Quantification of Macroscopic Quantum Superpositions in Phase Space

슈뢰딩거의 유명한 고양이 역설은 물리학자들에게 양자역학이 실제적으로 어느 정도 거시적인 영역에까지 적용될 수 있는가에 대한 의문을 가지게 했다. 미시적인 세계에서 잘 맞는다고 알려진 양자역학이 거시적인 세계에도 적용되는지를 실험적으로 명확히 밝히기 위해 물리학자들은 보다 큰 규모의 물리계를 양자 중첩상태로 만들려는 노력을 계속해 왔다. 이러한 상태는 흔히 거시적 양자 중첩상태라고 불린다.

전형적인 양자 간섭을 보이는 물리계보다 훨씬 큰 규모인 C70 분자를 이용하여 양자 간섭 효과를 보이는 실험이 수행된 바 있으며[Science NOW, 25 May 2001], 빛을 이용하여 거시적 양자 중첩의 성질을 가지는 상태가 구현되기도 했다[A. Ourjoumtsev *et al.*, Nature **448**, 784 (2007)]. 실험적으로 구현이 될 수 있을지는 미지수이지만, 이론적으로  $10^{14}$ 개 가량의 원자로 이루어진 작은 거울의 양자 중첩 구현 방법이 제안되어 있기도 하다[W. Marshall *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 130401 (2003)].

그러나 실험적으로 구현된 양자 중첩이 얼마나 많이 거시적 양자 중첩의 성질을 가지고 있는지를 수치적으로 정량화하는 것은 매우 어려운 문제로 여겨져 왔는데, 이는 양자 중첩의 물리적 “크기”와 함께 양자 중첩의 “정도”를 동시에 정량화하는 것이 쉽지 않기 때문이었다.

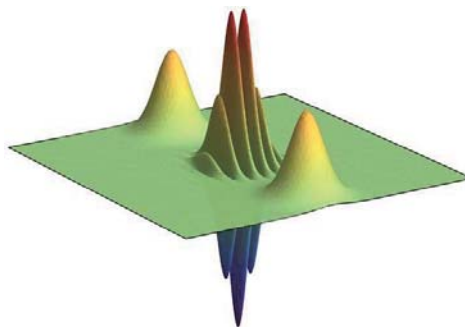
A. J. Leggett, J. I. Cirac, M. Reid를 포함한 여러 연구자들이 이러한 시도를 해 왔지만 그들이 제안한 척도들은 특정 형태의 상태에만 적용할 수 있는 등의 명백한 한계를 가지고 있었다. 2002년 Leggett이 지적한 대로 “무엇이 슈뢰딩거 고양이다움의 정확한 척도인

가?”(What is the correct measure of ‘Schrödinger’s-cattiness?’)라는 질문에 대한 대답은 오랫동안 일반화하기 어려운 “개인적 취향의 문제”(a matter of personal taste)로 남아 있었다.

Physical Review Letters에 발표된 논문에서 서울대학교 물리천문학부의 이창우 박사와 정현석 교수는 주어진 중첩상태가 양자역학적 위상 공간에서 나타내는 간섭 패턴을 수치화함으로써 양자 중첩의 크기와 정도를 동시에 효과적으로 정량화할 수 있음을 보였다.

양자역학적 위상공간은 양자역학의 불확정성 원리가 적용되는 추상적인 공간이다. 위상공간에서 양자상태들은 유사 확률분포 함수로 나타낼 수 있다. 거시적 양자 중첩상태들을 대표적인 유사 확률분포인 위그너 함수로 표현할 경우 미시적 중첩상태들의 위그너 함수에 비해 더 높은 진동수의 간섭 패턴을 보인다[그림]. 정현석 교수팀은 이 점에 착안하여 위상공간에서 나타나는 간섭패턴의 진동수와 진폭을 계산하여 양자 중첩의 크기를 일반적으로 정량화할 수 있음을 보이고 이를 양자 중첩의 일반적인 정량화 척도로 제안하였다.

이렇게 새롭게 제안된 간섭 기반 척



▲ 양자역학적 위상공간에서 위그너 함수로 표현된 양자 중첩상태의 예. 거시적 양자 중첩의 특징인 높은 진동수의 간섭 패턴이 나타난다.

도(Interference-based measure)는 순수한 상태와 혼합 상태, 다체계 상태 등 다양한 물리계에 공통적으로 적용될 수 있으므로 서로 다른 형태의 양자 중첩상태들을 정량적으로 비교하는 데 강력한 도구가 될 수 있다. 또한 이 척도는 Dür, Simon, Cirac이 제안한 Greenberger-Horne-Zeilinger 타입의 양자 중첩 혹은 얽힘 상태에 대한 거시 양자중첩의 정량화 척도[Dür *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89**, 210402 (2002)]를 포함하는 것으로 밝혀졌다.

흥미롭게도 정 교수팀의 간섭 기반 척도는 양자역학의 결계어짐 이론(decoherence theory)과 직접적인 연관성을 가진다. 즉, 간섭 기반 척도는 잘 알려진 결계어짐 모형에 의해 주어지는 순수도(purity)의 시간에 따른 감쇠율과 정확하게 일치한다. 바꾸어 말하면 주어진 상태의 순수도 감쇠율(purity decay rate)이 크면 클수록 거시적 양자 중첩의 성질을 강하게 가지고 있는 것이다. 이는 거시적 양자 중첩상태는 환경에 의해 민감하게 영향을 받아 양자적인 성질을 쉽게 잃어버린다는, 결계어짐 이론에 의해 잘 알려진 일반적 사실과도 정확하게 일치한다.

이번 연구 결과를 통해 물리학자들은 양자역학의 중요한 현상인 양자 중첩을 수치적으로 정량화할 수 있는 효율적 도구를 가지게 되었다. 이를 통해 서로 성질이 달라 보이는 다양한 양자 중첩을 정량적으로 비교할 수 있게 되었으며, 양자역학을 거시적 규모에서 엄밀하게 검증하려는 목표에 한 걸음 더 다가섰다고 할 수 있다.

이창우, 정현석(서울대학교 물리천문학부 거시양자 제어연구단), Phys. Rev. Lett. **106**, 220401 (2011).