

## Coarsening Measurement References and the Quantum-to-Classical Transition

미시적 세계에서 나타나는 다양한 양자 현상들은 물리계가 거시적 규모에 접근함에 따라 사라지게 되는데 이를 양자-고전 전이라고 일컫는다. 예를 들어 미시적 세계에서 관측되는 양자 중첩 및 간섭 현상은 거시적 세계에서는 관측되지 않는다. 거시적 물리계는 고전 물리학의 법칙을 따르며 양자역학의 법칙들이 불필요한 것처럼 보인다. 그러나 양자 역학이 미시적 세계에서 잘 들어맞았다면 거시적 물리계에도 적용되어야 하기 때문에 왜 양자-고전 전이이 일어나는지에 대한 물리적 설명이 필요하다. 결어긋남(decoherence) 이론은 양자 상태가 환경과 상호작용을 통해 양자적 성질을 잃어버리게 된다는 설명으로 양자-고전 전이 현상에 대한 잘 알려진 이론이다. 거시적인 계일수록 상호작용하는 입자들이 많아지고 이를 통제하는 것이 불가능해지기 때문에 빠른 속도로 양자-고전 전이가 일어나게 된다.

최근 들어 양자 상태에 초점을 맞춘 결어긋남과는 달리 측정에 대한 분석을 시도한 연구들이 있었는데, 이에 따르면 측정의 모호함이 양자 법칙에서 고전 법칙으로의 전이를 가져온다는 것이다. 하지만 측정의 모호함이 매우 큰 경우에도 불구하고 양자적 성질을 보이는 예들이 발견됨에 따라 이는 불완전한 설명임이 밝혀졌다. 본 논문에서는 측정 눈금의 모호함이나 최종 측정의 효율과는 구별되는 측정 기준(measurement reference)의 모호함이 양자-고전 전이를 일으키는 핵심 요소임을 보였다.

물리계가 비고전적 양자 상태에 있는지를 확인하는 분명한 방법 중 하나는 벨(Bell)의 부등식 위배를 보이는 것이다.

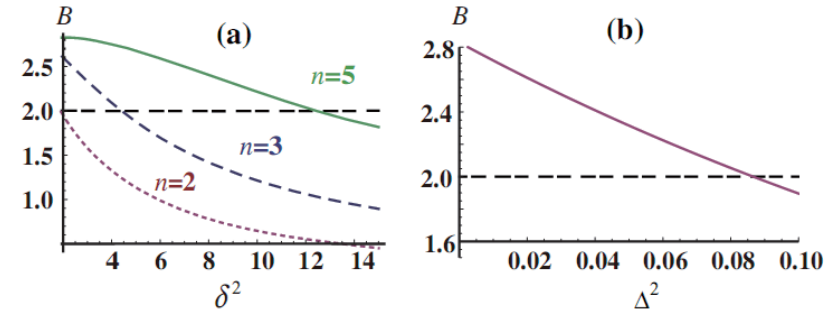


그림 1. 양자 얽힘의 크기 인자  $n$ 에 따른 최적화된 벨 함수  $B$  가로축은 (a) 최종 측정의 부정확도와 (b) 측정 기준의 부정확도를 나타낸다. (a)에서는 최종 측정이 모호해지더라도  $n$ 을 크게 하여 거시 양자 얽힘에 가깝게 하면 벨 부등식( $B \leq 2$ )의 위배를 볼 수 있는 반면, (b)의 경우 측정 기준이 모호해지면  $n$ 의 값에 관계없이 벨 함수의 값은 빠른 속도로 줄어들어 비고전적 성질을 잃어버리는 것을 확인할 수 있다.

벨의 부등식은 고전 물리학의 바탕이 되는 국소성(locality)과 실재론(realism)의 가정을 만족시키는 부등식이다. 따라서 어떤 물리계가 이 부등식을 만족하지 않는다면 주어진 계는 강한 비고전적 성질을 가진다고 할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 고려된 빛의 양자 얽힘 상태를 이용하여 최종 측정의 모호함과 측정 기준의 모호함을 고려했을 때 벨 함수를 비교한 그래프이다. 벨 함수의 크기가 2보다 크면 이는 벨의 부등식을 위배하는 것이다. 그림에서 양자 얽힘 상태의 크기 인자  $n$ 을 조절함에 따라 최종 측정의 모호함은 보완할 수 있는 데 반하여 측정 기준의 모호함은 그렇지 않음을 알 수 있다. 다시 말해 측정 기준이 부정확해지면 양자적 성질을 잃어버리는 양자-고전 전이 현상이 생기게 되고 양자 얽힘 상태의 크기를 증가시켜도 양자적 성질을 복원할 수는 없다는 것이다.

이와 같은 일반적인 아이디어를 스핀과 빛의 광자 수 등 여러 변수들을 사용한 상태들에 적용하여 일관된 결과를 얻을 수 있었다. 또한 벨의 부등식 외에도 시간 간격을 두고 여러 번 측정하여 시

간 상관함수를 계산하는 Leggett-Garg 부등식에 대해서도 같은 결론을 얻었다. 이때 측정 기준은 시간 간격이 되며 이 시간 기준이 모호해지면 마찬가지로 복원이 불가능한 양자-고전 전이 현상이 일어남을 확인하였다.

양자-고전 전이현상을 이해하는 데 있어서 결어긋남과 측정은 중요한 요소들로 여겨져 왔다. 이 연구를 통해 결어긋남 효과와 무관하게 측정의 시간이나 위치, 측정의 축과 같은 측정 기준의 부정확성이 일관성 있게 양자-고전 전이를 가져온다는 것을 밝혔고, 이를 통해 양자-고전 전이 메커니즘에 대한 새로운 관점을 제시할 수 있었다. 결어긋남 이론이 파동함수로 표현되는 양자 상태의 변화로 양자-고전 전이를 설명하려고 했다면, 이 논문을 통해 제시된 이론은 측정 제어(measurement control)의 부정확성이 양자 세계를 사라지게 하는데 결정적인 역할을 할 수 있음을 제안하였다고 할 수 있다.

정현석, 임영룡(서울대학교), 김명식(Imperial College London), Physical Review Letters **112**, 010402 (2014).