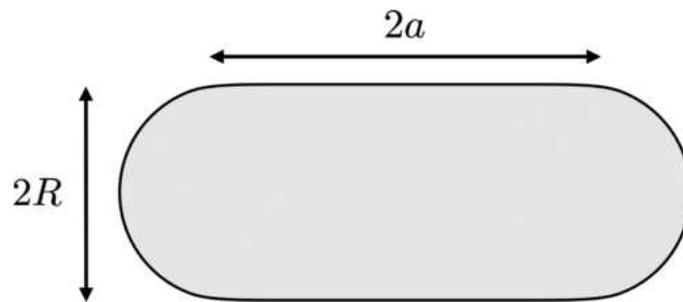


고전역학에서 '혼돈(chaos)'은 물체의 초기 조건이 아주 조금만 달라져도 그 물체의 경로가 대단히 크게 변하는 것을 의미한다. 고전 혼돈의 가장 유명한 예인 '나비 효과(Butterfly effect)'는 나비의 날갯짓이 만드는 미세한 바람이 폭풍우와 같은 추후 예상하지 못한 거대한 변화로 이어지게 되는 현상을 말한다.

고전역학적 혼돈에 대응하는 양자역학적 혼돈이 무엇인가 하는 질문은 물리학의 근본적인 문제이나, 아직 완전하게 이해되지 않은 난제 중 하나이다.

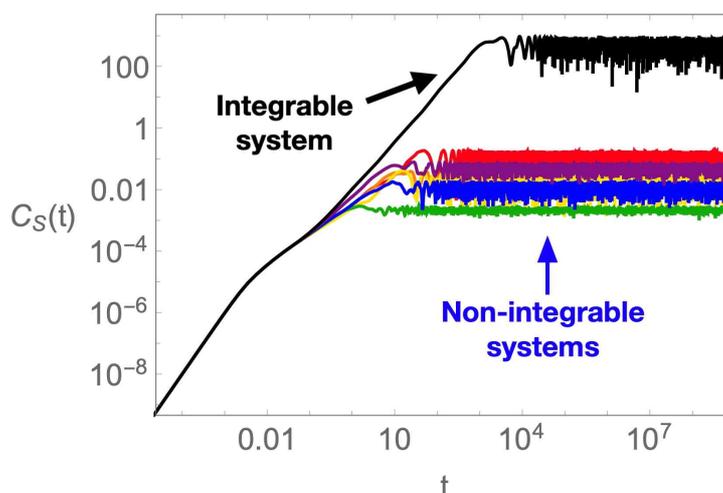
이 문제에 대한 부분적인 답을 제시하기 위해 양자역학계의 에너지 준위 사이 간격의 특정한 통계적 분포를 이용하여 양자 혼돈을 설명하려는 시도가 있었다. 그러나 이러한 방식은 시간에 따라 변하는 동적인 현상을 다룰 수 없고, 특정한 양자 상태에 따라 변하는 혼돈 현상을 설명하는 데 한계가 있다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 스펙트럴 복잡도를 이용하여 경기장 모양의 당구대에 존재하는 당구공의 양자역학적 동역학을 분석하였다.



▲ 경기장 모양 당구장: $R = a$ 이면 경기장은 원형이 되고 당구장의 고전적 운동은 혼돈 상태에 있지 않다. $R \neq a$ 이면 당구장의 고전적 운동은 혼돈 상태에 있다.

고전역학적인 당구공의 경우 당구대의 모양이 원형이면($R = a$) 혼돈 현상이 없으며, 원형이 아니면($R \neq a$) 혼돈 현상이 일어난다. 이에 대응하여 양자역학적인 당구공의 경우 당구대의 모양이 원형이면($R = a$) 스펙트럴 복잡도가 크며(검정), 원형이 아니면($R \neq a$) 스펙트럴 복잡도가 작다(다양한 색). 이러한 방식으로 스펙트럴 복잡도가 양자 혼돈을 판정하는 방법으로 사용될 수 있다.



▲ **스펙트럴 복잡도**: 가적분계(Integrable system, 검정)에서는 스펙트럴 복잡도가 크다. 혼돈계(Non-integrable system, 다양한 색)에서는 스펙트럴 복잡도가 작다.

김근영 교수는 “이번 연구 성과를 통해 **양자 혼돈을 정의하고 그 본질을 명확하게 파악할 수 있다는 가능성을 확인했다**”며 “향후 이를 통해 양자역학적 열평형 현상을 이해하게 되면 **양자 소자 및 양자 컴퓨터의 개발에도 응용할 수 있으며**, 양자 블랙홀에서의 양자 혼돈 연구를 통해 **양자 중력과 우주 초기의 현상을 더 깊게 이해할 수 있을 것**으로 기대된다”고 말했다.

GIST 물리·광학과 김근영 교수, Hugo Camargo 박사, Viktor Jahnke 박사, 스페인 마드리드 자치대학교(Universidad Autónoma de Madrid) 정현식 박사, 아시아태평양이론물리센터(APCTP)의 Mitsuhiro Nishida 박사가 수행한 이번 연구는 한국연구재단 중견연구사업, 양자정보과학 인적기반 조성사업, GIST AI기반 융합인재 양성 지원사업의 지원을 받았으며 물리학 분야의 권위 있는 국제학술지 **‘피지컬 리뷰 D(Physical Review D)’에 에디터 추천 논문(Editor’s suggestion)으로 선정**되어 2024년 2월 27일 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Physical Review D (IF: 5, 2022년 기준)
- 논문명 : Spectral and Krylov complexity in billiard systems
- 저자 정보 : Hugo Camargo (공동 제1저자, GIST), Viktor Jahnke (공동 제1저자, GIST), 정현식 박사 (공동 제1저자, 마드리드 대학), Mitsuhiro Nishida (공동 제1저자, APCTP), 김근영 (교신저자, GIST)