

[혁신도전형] 소재 혁신 양자시뮬레이터 개발사업

아날로그 양자 시뮬레이터를 이용한 비평형 동역학의 물리법칙 검증

한국과학기술원 최재윤 교수

E jaeyoon.choi@kaist.ac.kr

극저온으로 냉각된 중성원자를 이용하여 시스템이 갖는 대칭성에 따라 비평형 동역학의 보편성 분류가 가능함을 보여주었다. 양자 다체계의 복잡한 비평형 동역학을 이해하기 위한 통합 체계를 구축하는데 이바지하였다.

연구 배경

비평형이란 평형에서 벗어난 상태를 뜻하는 것으로, 자연계에서 쉽게 마주할 수 있는 현상이다. Cafe latte를 만들 때 에스프레소와 우유를 섞는 과정 역시 비평형상태가 평형을 찾아가는 과정으로, 이 복잡한 과정이 어떠한 물리법칙에 의해 지배되고 있는지가 활발히 연구되고 있다.

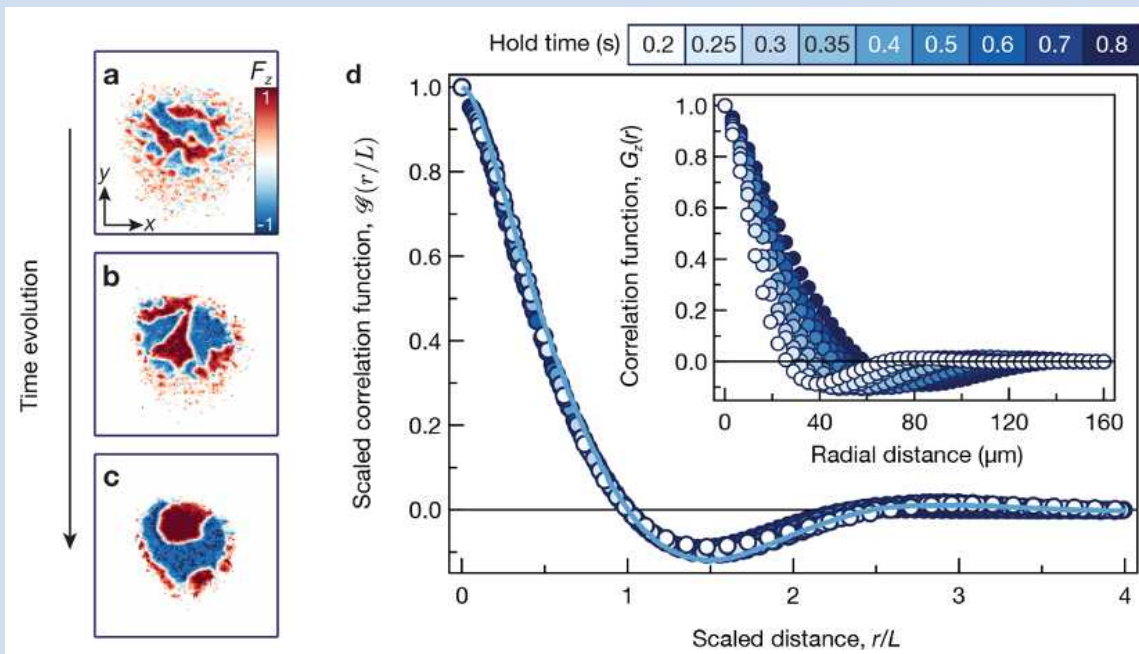
특히 양자계의 경우 동역학적 기술 방법이 고전 역학과 다름에도 불구하고, 고전 시스템에서 활용되었던 물리적 개념들을 적용할 수 있음이 지난 10년 동안 제안되어 왔다. 대표적인 개념은 스케일 불변성(scale invariance)으로, 임의의 시공간적 물리량이 어떤 보편적인 함수에 스케일링으로 기술되는 것을 지칭한다. 공간적인 스케일링을 잘 보여주는 예시는 프랙탈(fractal) 구조로, 어떤 부분을 확대해도 다시 동일한 패턴이 나타나게 된다. 평형 상태의 경우, 상전이 근처에서 바로 이러한 공간적인 스케일적 불변성이 나타난다.

비평형 동역학의 경우 시공간적 스케일 불변성이 나타나는데, 나중 시간의 동역학이 이전 시간에서의 형태를 확대/축소한 것과 동일함을 의미한다. 이때 스케일을 관여하는 임계지수에 따라 보편성을 분류하는데, 과연 양자계에서도 이러한 보편성 분류가 가능할지, 가능하다면 어떠한 기준으로 우리가 분류할 수 있을지에 대한 질문이 남아있다.

연구 내용

연구팀은 극저온으로 냉각된 중성원자계(스피너 보즈-아인슈타인 응집체¹⁾)를 활용하여 자기 도메인의 조대화 동역학²⁾을 연구하였으며, 시스템이 갖고 있는 대칭성과 이에 따라 수반되는 위상학적 여기 모드(domain wall, quantum vortex 등)들이 동역학적 보편성을 분류할 수 있음을 실험적으로 보여주었다.

비평형 스피너 응집체의 조대화 동역학



- a-c. 담금질 이후에 일어나는 자기 도메인들의 조대화 동역학. 초기에 생성된 자기 도메인들은 시간이 지남에 따라(위에서부터 아래 방향), 크기가 점점 커지는 것을 확인할 수 있다.
- b. 스핀 상관 함수를 자기 도메인의 길이 L 로 나누어주면, 서로 다른 시간대의 스핀 상관 함수가 하나의 곡선으로 포개어지는 것을 확인할 수 있다. 실선은 이론 계산을 의미한다.

1) **스피너 보즈-아인슈타인 응집체** : 스핀 자유도가 있는 보즈-아인슈타인 응집체(Bose-Einstein condensate)로, 서로 다른 스핀들이 서로 충돌하며 상호작용을 하는 양자 유체이다. 보즈-아인슈타인 응집체란, 계를 구성하는 입자들이 동일한 파동함수를 나타내는 상태로 상호작용이 있는 경우 초유체가 된다.

2) **조대화 동역학** : 스핀 1/-1 등의 서로 다른 자기 도메인(magnetic domain)들이 서로 합해지면서 각 자기 영역들의 크기가 커지는 동역학을 말한다.

비평형 동역학은 초기에 스핀-0 상태로 편극된 응집체에 자기에너지를 급격하게 바꿔줌으로써 시작되었는데, 마지막 자기 에너지값에 따라 ① 스핀1/-1의 미러 형태의 대칭을 갖고 있을 경우와 ② 스핀 방향이 임의의 방향을 향할 수 있는 회전 대칭을 갖는 경우에 대해 연구를 수행하였다. 연구팀은 스핀상관함수가 시공간적 스케일링을 잘 만족함을 보여주었으며, 이때 스케일링 지수가 서로 다른 것을 확인하였다. 더욱이, ② 회전 대칭이 있는 경우, 스핀 소용돌이(spin vortex)가 생성되며 이로 인해 조대화 동역학의 보편성 부류가 확산(diffusive)에 속함을 확인하였다.

논문 Universality class of a spinor Bose-Einstein condensate far from equilibrium
(Nature Physics, 2024, 3월호 표지논문 선정)

[논문 보기](#)

차별성 및 우수성

자기 도메인의 보편적 조대화 동역학의 경우, 도메인 길이가 멱 법칙(power-law)을 따라 커지는 성질을 갖고 있어 1000번 이상의 스핀 충돌이 필요하다. 보통의 알칼리 원자들의 경우 단일 스핀 충돌 시간이 길어(약 100ms) 보편적 동역학 관측을 위해서는 수십 초 동안의 관측 시간이 필요하고, 이 시간 동안 원자 손실 및 외부 자기 노이즈 영향 등에 의해 조대화 동역학이 왜곡된다.

연구팀은 리튬-7 원자를 이용하여 극저온 양자 샘플을 제작하였는데, 이 원자의 경우 기존의 다른 알칼리 원자에 비해 최대 100배 빠르게 충돌하게 되어 기존에 탐색하지 못했던 매우 긴 시간 동안(약 2,000번의 스핀 충돌)의 동역학을 탐구할 수 있었다.

특히 연구팀은 회전 대칭이 있는 상태의 동역학에서는 스핀 소용돌이(spin vortex)가 발현됨과 이들의 동역학이 조대화 동역학과 연관있음을 보여주어 시스템의 대칭성뿐 아니라 위상 여기체(topological excitation)의 동역학이 보편성 분류에 중요한 요소임을 실험적으로 검증하였다.

파급효과 및 활용계획

해당 연구는 비평형 양자 동역학을 통합적으로 이해하기 위한 발판을 마련하였으며, 여러 가지 후속 연구로 확장 가능하다. 예를 들어, 본 실험의 경우 즉각적인 자기에너지 담금질(quenching)을 통해 보편적인 동역학을 연구하였으나, 담금질 시간에 따라 조대화 동역학을 조사하게 되면 Kibble-Zurek 메카니즘³⁾과의 연관성을 탐색할 수 있다. 그 외에도 Percolation 이론⁴⁾과의 연관성 및 비선형 동역학에 의한 Rogue wave⁵⁾ 형성과의 관계성 등 고전 시스템에서 나타나는 동역학적 스케일링 현상과의 연관성을 조사할 수 있다.

-
- 3) **Kibble-Zurek 메카니즘** : 위상학적 결함(defect)이 생성되는 원리를 설명하는 보편적인 이론으로, 상전이가 일어나는 임계점을 지나는 속도가 결함의 개수가 결정함을 제안한다.
 - 4) **Percolation 이론** : 유체가 다공성 매질을 통과할 때 시작점에서 끝점까지 통과할 수 있을지에 대한 통계학적인 이론으로 화학, 수학, 재료공학 등 일반적인 수송문제에 활용된다. 담금질된 스피너 응집체의 경우 자기 도메인 벽이 형성하는 네트워크의 임계값 및 도메인들의 분포 등이 percolation 이론과 유사함이 최근 보고되었다.
 - 5) **Rogue wave 형성** : 예측하기 어려운 매우 큰 표면파로 바다를 항해하는 선박 및 등대에 큰 위협이 된다. 비평형 양자 동역학에서도 여기 모드(excitation mode)들 간의 비선형적인 상호작용에 의해 rogue wave 형성이 이뤄지며, 그 결과 위상적 결함(topological defect)들이 생성될 수 있음이 최근 보고되었다.