

양자정보연구지원센터

Quantum Information Research Support Center

NEWSLETTER

<Research Trend>



※ 본 연구동향은 양자정보연구지원센터 뉴스레터의 내용입니다.

광격자 중성원자 시스템 연구동향

[작성: 한국과학기술원 최재운 교수]

극저온 중성원자로 구성된 광격자계는 양자 시뮬레이터의 대표적인 플랫폼으로서, 다양한 물리 변수를 넓은 범위에서 조작하는 것이 용이하여 복잡한 양자 다체 문제를 체계적으로 연구할 수 있습니다. 양자 기체 현미경은 광격자 시뮬레이터의 대표적인 양자 기술로, 광격자에 분포한 원자들을 단일 원자 및 단일 격자 수준으로 분해 하는 고 분해능 이미징 기술입니다. 원자들의 밀도 및 스핀 분포를 직접 관측함으로써 [1,2] 스핀 상관관계 함수와 같은 미시적인 물리량을 측정하는 것이 가능해졌을 뿐 아니라 [3-6], 역으로 원자들의 밀도 및 스핀 상태를 제어하는 방법도 개발이 되었습니다 [7]. 이는 임의의 초기상태를 준비할 수 있는 기반을 마련해주며, 비평형 양자 동역학의 실험적 구현 [8,9] 및 새로운 비평형 양자 다체상의 발견을 가능하게 해주었습니다 [10]. 이번 연구동향 기고문에서는 중성원자 광격자계 및 양자 기체 현미경 기술의 최신 연구 동향을 소개하고자 합니다.

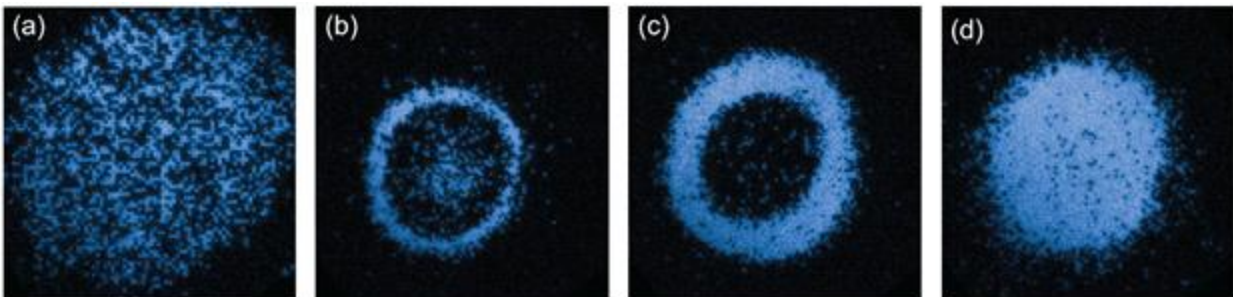


그림 1. 리튬-7 원자의 초유체 및 모트 절연체의 양자 기체 현미경 사진 [11]. (a) 초유체상의 경우 원자 밀도의 분포가 균일하지 않은 반면 (b-d) 모트 절연체의 경우 채움수가 정수로 고정된다. 외부 자기장을 변화 시켜주어 원자들의 상호작용을 강하게 하였으며 이로부터 트랩 중앙의 채움수가 (b) $n=3$, (c) $n=2$, (d) $n=1$ 로 변하는 것을 확인할 수 있다.

최신 연구의 주요 동향은 크게 세가지로 나눌 수 있습니다. 첫번째는 시스템을 구성하는 중성 원자의 종류를 확장하는 연구입니다. 각 원자마다 가지는 고유한 특성이 있기 때문에, 많은 연구진들은 기존의 원자(^{87}Rb , ^6Li , ^{40}K)외에 다양한 원자를 이용해 양자 기체 현미경 시스템을 구축하고자 노력하고 있습니다. 알칼리 원자의 대표적인 예는 자기공명을 이용하여 상호작용이 조절 가능한 보존 원자인 ^7Li [11] 과 ^{133}Cs [12] 원자입니다. 특히 리튬-7 원자의 경우 초미세 스핀 간의 상호작용을 조절하는 것이 가능하여, 스핀-1/2 XXZ 하이젠베르크 해밀토니안을 연구 할 수 있는 발판을 마련합니다 [13]. 알칼리 토금속 ^{174}Yb [14] 을 이용한 양자 기체 현미경 시스템도 큰 기대를 받고 있습니다. 해당 원자는 선 폭이 매우 좁은 광 전이 선을 통해 여기 가능한 준 안정적 상태가 존재하며, 빛의 stark shift를 느끼지 않는 마법 파장이 존재합니다. 이는 고체 시스템에서 일어나는 불순물현상의 양자 모사를 가능하게 합니다. 끝으로, 강한 쌍극자 자기 모멘트를 갖는 원자의 양자 기체 현미경 시스템도 개발 중에 있습니다 [15]. 대표적인 원자는 Erbium, Dysprosium 원자로 기존 원자에 비해 최대 10배 강한 쌍극자 모멘트를 갖고 있어 먼 거리 상호작용으로 인해 초고체와 같이 흥미로운 양자 다체상을 탐구할 수 있습니다 [16]. 광격자 및 양자 기체 현미경 시스템과 접목하여 확장된 허바드 모델 및 스핀궤도 결합을 통한 새로운 양자 다체상의 발견이 기대 됩니다.

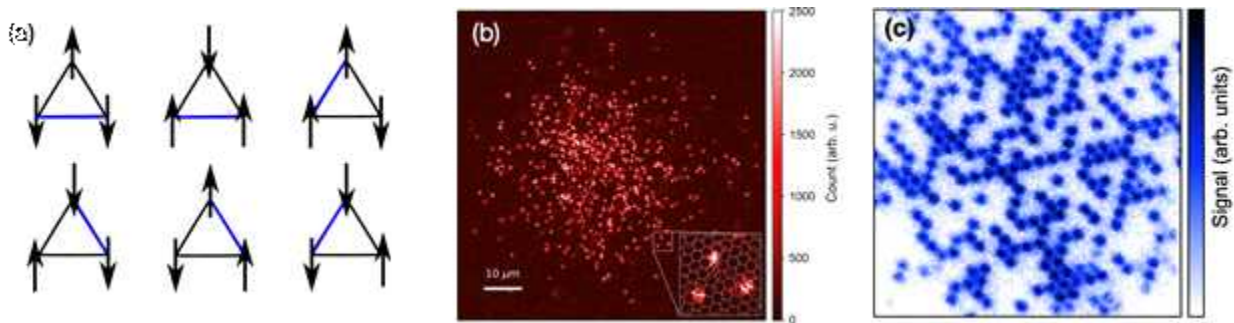


그림 2. (a) 삼각격자에서 서로 반강자성 상호작용을 하는 경우 바닥상태는 스핀 정렬이 일어나지 않게 된다. (b) ^{87}Rb (c) ^6Li 원자를 이용한 삼각 격자의 양자 기체 현미경 사진.

두번째 연구는 광격자의 기하학 구조 확장입니다. 기존의 연구가 사각격자에 치중되어 있었다면, 삼각격자 및 카고메 격자의 양자 기체 현미경 시스템을 개발 하는 연구가 진행중입니다. 일본의 RIKEN연구소와 미국의 Virginia 대학에서 각각 ^{87}Rb [17], ^6Li [18] 원자를 이용한 삼각격자의 양자 기체 현미경이 개발 되었습니다. 삼각격자의 경우 기대할 수 있는 대표적인 연구는 기하학적 찢찢땀 현상입니다.

즉, 반강자성 상호작용을 갖는 Ising스핀 모델의 경우, 삼각 격자는 사각 격자와 달리 스핀 정렬이 일어날 수 없는 특성이 있습니다 [그림2(a)]. 특히 카고메 격자의 경우 스핀-1/2 하이젠베르크 모델의 바닥 상태가 양자 스핀 액상으로 간주되고 있으며, 고온 초전도 현상 및 양자 컴퓨팅에도 활용이 가능하여 최근 응집 물질 물리 분야에서 활발한 연구가 진행중에 있습니다 [19]. 중성원자 양자 시뮬레이터는 스핀의 상대적인 비율, 자유 홀의 개수, 상호작용의 세기 및 터널링 에너지의 비등방성등 조작할 수 있는 물리 변수가 많기에 물성의 완전히 이해 및 신 물질 개발에 큰 역할을 할 것으로 기대가 됩니다.

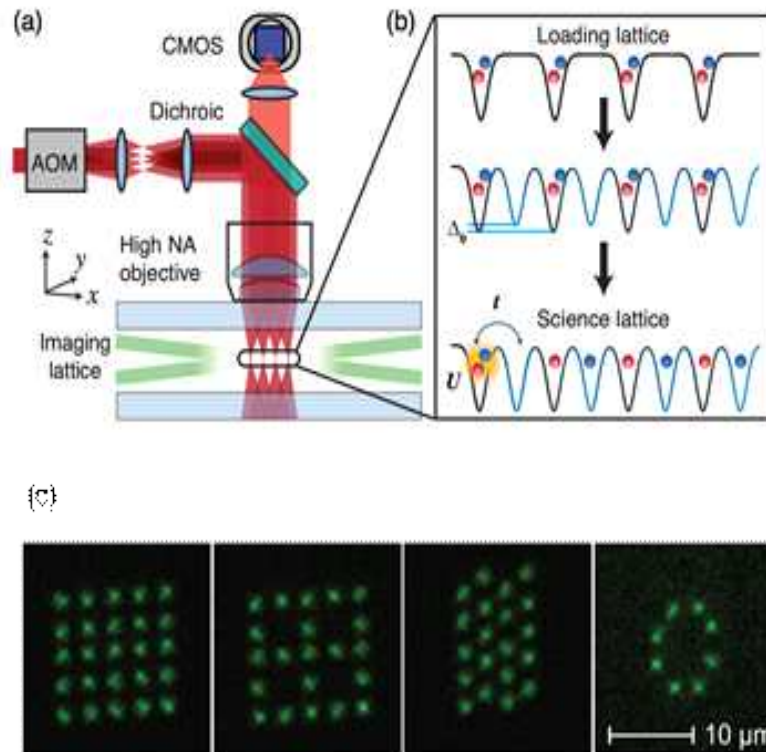


그림 3. (a) 광집계를 활용한 격자 구조 혼합 형성 시스템 (b) 광집계를 이용하여 원자들을 일차원으로 배열한 뒤 추가적인 광집계를 이용하여 터널링을 유도한다. 끝으로 기존의 광격자를 이용하여 원자들의 발광사진을 찍는다 (c) 이차원으로 확장한 광집계 격자 구조 시스템.

끝으로 프로그래밍 가능한 광집계 시스템과의 결합을 통해 보다 다양한 격자 구조를 형성하는 시도가 있습니다. 이미 리드버그 양자 컴퓨팅 플랫폼을 통해 선보인 것처럼 광집계 시스템은 임의의 원자 배열을 구성하는 것이 가능합니다 [20-22]. 해당 시스템이 갖는 장점을 광 격자 시스템에 접목하여, 간섭무늬만으로는 구성하기 어려운 광격자 시스템을 구축하는 연구가 진행되고 있습니다. Princeton연구진이 최근 선보인 시스템으로 광집계를 이용하여 작은 규모의 1차원 [23] 2차원 [24]원자 배열을 만들었으며, 반강자성 상관관계 관측을 통해 허바드 모델의 양자 시뮬레이션이 가능하다는 것을 보고하였습니다.

중성원자를 제어하는 광 포텐셜 조작 기술의 발전과 새로운 원자의 극저온 냉각 기술 개발로 인해 보다 다양한 형태의 양자 다체 문제를 연구할 수 있게 되었습니다. 이러한 연구를 바탕으로 양자 물질의 이해 및 신 물질 개발과 같이 우리 삶에 직접적인 변화를 주게 되길 기대해봅니다.

참고문헌

- [1] W. S. Bark et al., [Nature \(London\) 462, 74 \(2009\).](#)
- [2] J. F. Sherson et al., [Nature \(London\) 467, 68 \(2010\).](#)
- [3] M. Endres et al., [Science 334, 200\(2011\).](#)
- [4] M. F. Parsons et al., [Science 353, 1253 \(2016\).](#)
- [5] M. Boll et al., [Science 353, 1257 \(2016\).](#)
- [6] L. W. Cheuk et al., [Science 353, 1260 \(2016\).](#)
- [7] C. Weitenberg et al., [Nature \(London\) 471, 319 \(2011\).](#)
- [8] T. Fukuhara et al., [Nature Phys. 9, 235 \(2013\).](#)
- [9] T. Fukuhara et al., [Nature \(London\) 502, 76 \(2013\).](#)
- [10] J.-y. Choi et al., [Science 352, 1547 \(2016\).](#)
- [11] K. Kwon et al., [Phys. Rev. A 105, 033323 \(2022\).](#)
- [12] T.M. Klostermann. Ph.D Thesis Construction of a Caesium Quantum Gas Microscope.
- [13] P. N. Jepsen et al., [Nature \(London\) 588, 403 \(2020\).](#)
- [14] R. Yamamoto et al., [New Journal of Physics 18, 023016 \(2016\).](#)
- [15] G. Phelps, Ph.D Thesis. A dipolar quantum gas microscope.
- [16] M. A. Norcia et al., [Nature \(London\) 596, 357 \(2021\).](#)
- [17] R. Yamamoto et al., [New Journal of Physics 22, 123028 \(2020\).](#)
- [18] J Yang et al., [Phys. Rev. X Quantum 2, 020344 \(2021\).](#)
- [19] L. Savary and L. Balents, [Rep. Prog. Phys. 80, 016052 \(2017\).](#)
- [20] H. Kim et al., [Nature Communications 7, 13317 \(2016\)](#)
- [21] D. Barredo et al., [Science 354, 1021 \(2016\).](#)
- [22] M. Endres et al., [Science 354, 1024 \(2016\).](#)
- [23] Benjamin M. Spar et al., [Phys. Rev. Lett. 128, 223202 \(2022\).](#)
- [24] Zoe. Z. Yan et al., [arXiv:2203.15023.](#)