[혁신도전형] 소재 혁신 양자시뮬레이터 개발사업

양자 시뮬레이션 결과 측정을 위한 이터븀 단원자 격자 분해능 이미징 기술 개발

한국표준과학연구원 문종철 박사

E jcmun@kriss.re.kr

분자 동역학 양자 시뮬레이션을 위해서 광격자 내에 원자 큐비트를 로딩하여 연산한다. 양자 시뮬레이션의 결과를 측정하기 위해서는 격자 단위의 단원자 분포 프로파일이 측정되어야 하며, 이를 위한 고해상도 단원자 측정 이미지 기술을 개발하였다.

연구 배경

양자 시뮬레이터는 과학적 난제 등의 특수한 문제를 해결할 것으로 기대되는 양자 컴퓨터이다. 최근 중성원자를 이용한 양자 시뮬레이터가 전 세계적으로 개발되고 있는데, 가장 최신의 핵심기술이 양자기체현미경이다. 양자기체현미경에서는 양자 상태의 초저온 원자 기체를 이용하여 분자 동역학 등의 다양한 물리 문제를 시뮬레이션 해볼 수 있다.

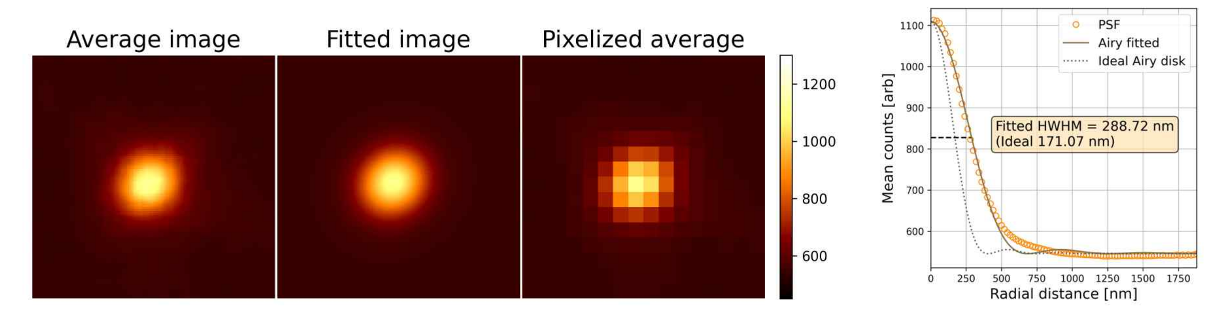
소재의 많은 특성은 소재를 구성하는 전자들의 동역학으로부터 알 수 있다. 소재 내의 전자들의 움직임을 모사하기 위하여 레이저 빛을 간섭시켜 광격자를 형성한 후, 원자 큐비트를 담아 연산한다. 연산 결과를 얻기 위해서는 개별 원자들의 분포를 대구경 광학계를 이용하여 격자 단위로 측정할 수 있어야 한다. 특히, 원자들이 측정 시 연산된 양자 상태에 그대로 있도록 잡음이 적은 레이저 시스템이 필수적이다.

이러한 상황에서 2015년 이터븀 원자에 대한 양자기체현미경 기술이 성공했으나, 난이도가 너무 높아 세계적인 선도그룹에서만 구현에 성공하였으며, 실제 이터븀 양자 기체현미경의 양자 연산을 통한 과학적 난제 해결은 아직 미진한 상태이다.

연구 내용

연구팀은 본 연구를 통해 세계에서 두 번째로 이터븀 단원자 격자 분해능 이미징이 가능하게 되었다. 이를 위해서는 크게 두 가지 성과가 필요하였다. 첫 번째로, 조용한 광격자 시스템을 개발하기 위해 광격자 레이저의 주파수 잡음과 양자 연산을 방해하는 주요 원인인 파워 잡음을 크게 개선하였다. 주파수 잡음의 경우 레이저 빛을 자유공간으로 전달하여 주파수 잡음을 크게 감소시켰다. 또한, 고해상도 단원자 측정을 위해서는 매우 넓은 범위의 레이저 빛의 세기(1~5000배)를 정밀하게 제어해야 하는데, bumpless PID 방법[1)]을 개발하여 이러한 넓은 범위 내에서 필요한 잡음 수준을 유지하는 데 성공하였다.

이터븀 격자 분해능 측정 결과



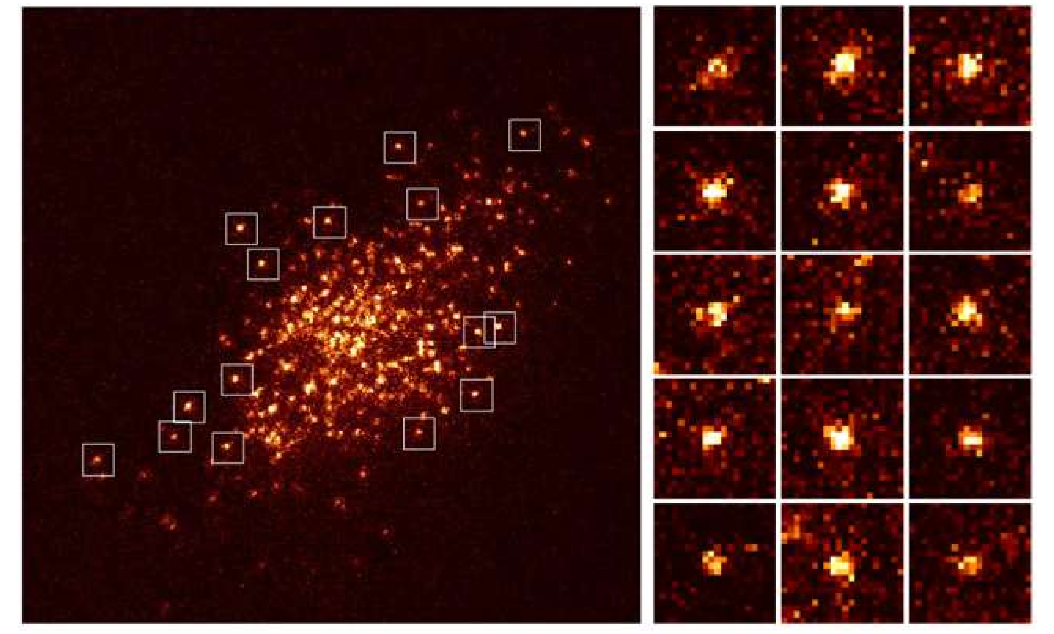
(좌측) 수백 개의 단원자 이미지를 평균 낸 이미지

(우측) 각 원자 큐비트의 이미지 크기를 측정한 값(airy 함수에 피팅한 값) 단원자 측정 이미지의 해상도를 의미함

두 번째는 긴 초점 거리의 대구경 광학계를 이용하여 진공 챔버 외부에서 필요한 광학계를 정밀하게 정렬하였다. 그 결과 이상적인 분해능(510nm)과 큰 차이가 없는 분해능(577nm)을 얻었으며, 이는 격자 간격(540nm)과 비슷한 수준의 단위격자로 이터븀 단원자를 이미징할 수 있게 되었다.

1) bumpless PID 방법 : 넓은 범위(1~5,000배가량)를 레이저 파워를 하나의 센서로 측정/제어하는데 한계가 있어 파워 범위 구간별로 작동하는 센서를 각기 다르게 사용해야 함. 이때, 센서1이 커버하는 범위#1에서 센서2가 커버하는 범위#2로 넘어갈 때, 일반적으로 측정/제어값의 덜컹거림(bump)가 발생하게 되는데, 이러한 덜컹거림은 잡음을 유도하게 됨. 이러한 잡음을 억제하여 제어하는 방식을 bumpless PID 방법이라고 함

실제 이터븀 단원자 격자 분해능 이미지



(좌측) 중성원자 양자 시뮬레이터의 결과 측정 이미지로, 격자 상의 원자 분포를 나타내는 그림. 격자 상의 원자의 움직임과 분포를 파악하여, 물질 내의 전자 동역학을 계산할 수 있음.

(우측) 몇몇 원자를 확대한 그림

차별성 및 우수성

연구팀이 개발한 새로운 단원자 격자 분해능 이미징 기술은 긴 초점 거리의 대구경 광학계를 이용하여 광학계 정렬 난이도를 개선하였고, 거대한 개수(~1,000)의 원자 큐비트 분포를 광격자에서 측정해 낼 수 있게 되었다. 또한, 기존의 이터븀 양자기체 현미경에서는 광격자 시스템이 편광판을 돌려 간섭계를 변화하는 방식으로 구동되어 연산에 빠른 제어를 할 수 없고(~100ms), 각각의 축이 연동되어 있어 불편하였다.

연구팀이 개발한 시스템은 빠르기와 자유도가 크게 개선된 광격자로 고속의 제어가 가능(~μs)하고, 각각의 축이 독립적으로 제어되어 실제 과학적 난제 해결에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

파급효과 및 활용계획

원자 큐비트의 격자 분해능 이미징을 달성하여 양자 연산이 가능하게 되었다. 분자 동역학, 비평형상태, 다체문제 등 고전 컴퓨터로는 해결할 수 없는 다양한 물리적 난제를 양자 연산하고 원리를 이해할 수 있다. 이를 응용하여 신소재 개발 등에 활용될 수 있다. 또한, 이터븀과 에너지 구조가 비슷한 이외의 알칼리토금속 원소들을 이용한 양자 시뮬레이터 개발 연구에도 활용될 수 있기에, 국내외 많은 연구그룹의 양자기체 현미경 연구를 촉진할 것으로 기대된다.