

양자물성 연구를 위한 극저온 원자기체 실험기술

1. 서론

원자물리학은 20세기 초 수소 원자의 에너지 준위에 대한 분광학적 연구를 시작으로 양자물리의 이해와 활용을 증진시키는 방향으로 연구되어 왔다. 이를 통해 레이저, 원자시계 등과 같은 현대 산업의 중요한 기초 기술들을 제공하였고, 다양한 광기술 및 정밀측정기술을 가능하게 하였다. 현재 원자물리학 실험기술은 원자의 외부 움직임과 내부 상태를 정밀하게 측정, 제어하는 수준에 이르렀다. 2012년도 노벨 물리학상은 원자와 빛에 대한 실험적 제어 기술을 발전시킨 공로로 주어졌다. 원자물리학은 다양한 양자 시스템의 완벽한 제어를 목표로 꾸준히 발전하고 있다.

본 글에서는 원자물리학 분야에서 최근 활발한 연구가

입자로 구성된 다체계 시스템으로서, 낮은 온도에서 발현되는 양자물성을 연구할 수 있는 새로운 실험 방법을 제공한다. 다체계 양자물성 발현이란, 물리계를 구성하는 입자 개개의 움직임으로는 단순히 이해될 수 없는 물성들이 상호작용하는 많은 수의 입자들의 단체적인 효과로 나타남을 일컫는 말이다. 저온에서 관측된 마찰 없이 흐르는 초유체 현상과 저항없이 전류가 흐를 수 있는 초전도 현상이 그 대표적인 예들이다. 원자물리학의 정밀 측정 기술을 바탕으로 집단현상에 대한 정밀 실험연구가 가능하게 되었고, 이러한 연구 활동은 현재 응집물리학 실험의 한 형태로 받아들여지고 있다. 본 글에서는 극저온 양자기체 실험연구에서 개발된 주요 실험 기술과 이를 이용해 접근 가능했던 물리현상에 대해 간략히 소개한다.

특집 ■ 원자물리

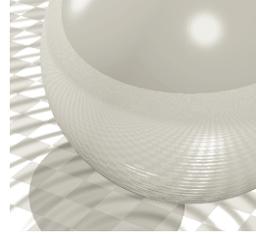
양자물성 연구를 위한 극저온 원자기체 실험기술

신용일*

이루어지고 있는 극저온 원자기체 실험연구를 소개한다. 극저온 원자기체는 수백 나노 켈빈의 온도까지 냉각된 원자기체이다. 수백 나노 켈빈을 원자의 속도로 환산하면 약 수 cm/s에 해당하는데, 이는 기체를 구성하는 원자들의 움직임이 철저하게 통제되어, 보다 조용하고 상세한 물리 현상 연구가 가능함을 의미한다. 이 때문에 극저온 원자기체는 기초 상수의 정밀 측정, 양자정보 기술 구현 등을 위한 새로운 시스템으로 현재 많은 관심을 받고 있다. 특히 원자기체는 많은 수의

본론으로 들어가지 전에 극저온 원자기체에 관한 중요한 사실 하나를 먼저 설명해야 하겠다. 왜 기체가 수백 나노 켈빈까지 냉각이 되었는데, 액체 혹은 고체로 상태변화를 일으키지 않는 것일까? 당연히 이렇게 낮은 온도에서 원자들은 고체 상태를 이루는 것이 가장 안정적이다. 그런데 원자들이 조밀하게 모여 액체나 고체를 형성하기 위해서는 적어도 세 개의 원자가 동시에 충돌하는 사건들이 자주 일어나야 한다. 왜냐하면, 두 개의 원자가 충돌하는 경우, 에너지 보존

* 서울대학교 물리천문학부



법칙에 의해 두 원자는 서로 붙어 있기가 어려운 반면, 세 개의 원자가 동시에 충돌하면 두 개의 원자는 서로 붙고 나머지 한 개의 원자가 잉여의 운동에너지를 갖고 달아나는 것이 가능하기 때문이다. 우리가 다루는 원자기체의 밀도는 1 cm^3 당 10^{15} 개 정도로 방안 공기의 밀도보다 100만 배 이상 낮다. 따라서 고체화를 위한 세 원자 충돌 사건은 매우 드물게 일어난다. 실제 실험에서 극저온 원자기체는 굉장히 낮은 밀도로 인해 준안정적인 기체 상태를 유지한다.

2. 나노 켈빈 냉각 기술

원자기체를 나노 켈빈의 극저온으로 냉각하기 위해, 레이저 냉각과 증발 냉각이라 불리는 기술들을 사용한다. 원자는 운동량을 갖는 광자를 흡수, 방출하면서 힘을 받게 되는데, 원자의 움직임과 반대방향으로 진행되는 광자를 선택적으로 잘 흡수하고 방출하도록 유도하여 원자의 움직임을 늦추는 것이 레이저 냉각 기술의 핵심이다. 마치 날아가는 야구공에 수만 개의 탁구공을 반대 방향으로 충돌시켜 야구공이 느려지도록 하는 것과 비슷하다. 방향에 대한 선택성은 도플러 효과로 얻어진다. 도로에서 구급차의 사이렌 소리가 구급차가 다가 올 때와 지나갈 때 다르게 들리듯이, 원자도 자신의 움직임에 따라 특정 방향의 레이저에 선택적으로 더 민감하게 반응할 수 있다. 이러한 레이저 냉각을 통해 원자 기체의 온도는 대략 수백 마이크로 켈빈까지 낮춰질 수 있다. 여기서 냉각 온도의 한계는 레이저를 구성하는 단일 광자의 유한한 운동량 크기에 기인한다.

원자기체가 양자 현상을 보이기 위해서는 수백 나노 켈빈까지 냉각되어야 한다. 나노 켈빈 영역으로 가기 위해 그 다음으로 증발 냉각 기술을 사용한다. 이는 원자기체를 구성하는 원자들 중 빠르게 움직이는 원자들만을 선택적으로 제거하여, 남아 있는 원자들의 평균 운동에너지를 줄이는 기술이다. 뜨거운 커피를 빨리 식히기 위해, 커피 잔 뚜껑을 열어 놓는 것과 같은 원리이다. 원자기체 냉각 실험은 진공 챔버 내에서 이루어지는데, 외부와의 물리적 접촉을 차단하기 위해, 원자기체는 레이저 나 자기장 포획 포텐셜에 잡혀있게

된다. 포획 포텐셜의 깊이를 서서히 줄이면 높은 운동에너지를 갖는 원자들은 트랩에서 빠져나가게 되는데, 이를 통해 증발냉각이 구현된다.

이러한 냉각기술을 바탕으로 1995년 보즈-아인슈타인 응집 현상이 원자기체에서 최초로 관측되었다. 보즈-아인슈타인 응집은 1920년도 양자역학 태동기에 아인슈타인에 의해 제시된 개념으로 많은 수의 보존 입자들이 낮은 온도에서 동일한 바닥 양자상태에 모이는 현상을 가리킨다. 독립된 두 개의 보즈-아인슈타인 응집체를 공간상에 겹치면, 물질과 간섭무늬가 형성된다. 이는 보즈-아인슈타인 응집체가 지닌 위상 결맞음성을 극명하게 보여준다. 두 개의 백열전등 빛을 스크린 상에 겹치면 간섭무늬가 생기지 않는 반면, 같은 색의 광자로만 이루어진 두 개의 레이저 빔을 스크린 상에 겹치면 간섭무늬가 생기는 것과 동일한 원리이다. 이 때문에 보즈-아인슈타인 응집체를 '원자 레이저'로 소개하기도 한다. 또한 보즈-아인슈타인 응집은 현재 관측된 대부분의 초유체 현상을 이해하는 기본적인 이론 틀을 제공한다.

3. 광격자 기술

최근 10년 동안 양자기체 실험기술은 비약적으로 발전하여, 그 연구의 범위가 확대되었다. 그 대표적인 예가 광격자(Optical Lattices) 기술이다. 원자는 빛의 세기에 비례하는 포텐셜 에너지를 갖는데, 만일 서로 다른 여러 개의 레이저 빔들이 겹쳐져 있는 공간에 원자가 위치한다면, 원자는 레이저 빔들이 만들어내는 간섭무늬로 인해 주기적인 격자 포텐셜을 느끼게 된다. 이를 광격자라고 한다. 광격자 기술은, 마치 전자들이 고체 결정 안에서 느끼는 환경과 비슷한 주기적인 격자 환경을 원자기체에 제공함으로써 고체 시료에서 연구되어 온 다양한 물리현상에 대한 연구를 가능하게 한다. 레이저 빔의 세기 및 편광의 배열에 따라 다양한 격자 구조가 만들어 질 수 있다. 최근에는 그래핀과 같은 이차원 벌집격자 구조도 구현되었다. 더욱이 광격자는 결합이 전혀 없고, 격자구조의 동적 제어가 가능하여 기존의 고체 실험에서 불가능했던 물리영역의 접근이 가능하다.

양자물성 연구를 위한 극저온 원자기체 실험기술

최근 광격자 실험에서 격자간 결합상수가 작아지면서 초유체 원자기체 시료가 절연체로 변하는 Mott 절연체 양자 상전이 현상이 관측되었다. 광격자의 세기가 커지면서 격자점 결합상수가 작아지면서 격자점 간 터널링이 어려워진다. 이 때, 입자 간 상호작용의 상대적이 세기가 커져 입자는 한 격자점에 국소화되려는 경향을 보이게 되고, 임계점 이상에서 시스템은 절연체로 상전이를 일으키게 된다. 이러한 Mott 절연 상전이는 산화물 계열의 고체 실험에서 전자간의 상관관계 형성을 연구하기 위한 허바드 모델을 바탕으로 활발하게 연구되어 왔다. 정밀한 광격자 실험을 통해 임계점에 대한 정량적인 정보들이 제공되었다.

4. 상호작용 조절 기술

양자기체 실험에서 주목할 만한 또 다른 핵심 기술은 입자간의 상호작용을 조절할 수 있는 기술이다. 양자물성 발현은 상호작용을 통한 입자들 간의 상관성에서 기인한다고 볼 수 있는데, 이 상호작용의 세기를 조절할 수 있다는 것은 체계적인 양자물성 연구를 가능하게 한다. 원자 간의 주된 상호작용은 반데르발스 상호작용으로, 이는 원자의 내부 상태에 영향을 받는다. 특히 원자가 가까이 위치하였을 때 갖는 분자 상태에 민감하게 의존한다. 원자들은 자기쌍극자 모멘트를 갖고 있어, 외부 자기장의 크기에 따라 가능한 분자상태의 에너지 준위가 변한다. 이러한 원리로 원자간의 상호작용은 외부 자기장으로 조절될 수 있다. 특별히 분자 상태의 에너지 준위가 입사 원자들의 에너지 준위와 같아질 때, 입자 간의 충돌 상수는 무한대로 발산하게 되는데, 이를 Feshbach 공명이라고 한다. 고체 시료를 이용한 실험에서 입자간의 상호작용의 크기를 조절하기 위해 새로운 시료를 만들거나 격자구조에 변형을 가해야 하는 반면, 양자기체 실험에서는 Feshbach 공명을 이용하여, 입자간의 상호작용을 영에서 무한대까지 자유롭게 조절할 수가 있다.

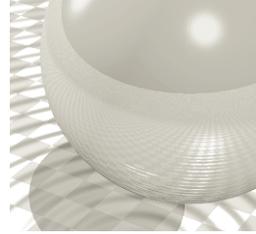
자연이 허락하는 최대치의 입자간 상호작용을 갖는 페르미 기체가 최근 실험적으로 구현되었다. 페르미 기체는 서로 잡아당기는 상호작용이 있을 경우, 낮은

온도에서 초유체로의 상전이를 일으키는 것이 알려져 있고, 이는 고전적인 초전도체의 상전이를 설명한다. 고체 내 전자들은 격자의 떨림을 매개로 유효 인력을 갖게 되고 이 때문에 임계온도 이하에서 초전도성을 띠게 된다. 여기서 흥미로운 질문은 입자간의 상호작용이 커질 때, 임계 온도가 얼마까지 올라갈 수 있는가이다. 강하게 상호작용하는 페르미 기체 실험을 통해, 초유체 상전이 임계 온도가 시스템의 페르미 온도의 15%까지 올라갈 수 있음이 정량적으로 확인되었다. 일반 고온 초전도체의 임계온도가 페르미 온도의 10% 미만임을 고려할 때, 원자기체에서 구현된 페르미 초유체는 분명 고온 초유체로 묘사될 수 있다. 강하게 상호작용하는 영역은 기존의 다체계 이론이 접근하기 어려운 영역이다. 이 페르미 기체 실험에서 측정된 임계점 정보는 개발되고 다체계 이론에 정량적인 시험 자료로서의 역할을 한다.

5. 유효 자기장 생성 기술

양자물성을 연구하기 위한 원자기체 실험의 한 가지 근본적인 한계는 원자가 중성입자라는 점이다. 이는 자기장 하에서 전자계가 보이는 다양한 현상들, 즉 양자 홀 효과 등의 연구가 제한됨을 의미한다. 최근 원자의 스핀 혹은 유사 스핀 구조를 이용하여 유효 자기장을 생성하는 기술이 개발되어 고자기장 현상을 연구할 수 있는 가능성이 제시되었다. 자기장은 벡터 포텐셜로부터 유도되는데, 이 벡터 포텐셜은 양자역학적으로 위치에 의존하는 위상분포를 제공하는 역할을 한다. 레이저 빔과 원자의 결합을 고려할 때, 공간상의 레이저 빔의 위상 변화로 인해 원자에게 유효 벡터 포텐셜이 생성된다. 이러한 기작을 이용한 유효 자기장 생성이 최근 중성원자 실험에서 확인되었다. 특별히 설계된 레이저 빔 환경 하에서 유효 고자기장과 특히 유효 스핀-궤도 결합 효과도 얻을 수 있음이 확인되었다.

이 밖에도 새로운 양자기체 실험기술이 계속해서 개발되고 있다. 특별히 원자를 다루던 기술이 분자를 다루는 기술로 확장되고 있다. 분자는 원자보다 훨씬 복잡한 전자구조를 갖고 있어, 분자 상태의 양자적 제어는 과거에는 상상조차 어려웠다. 최근 서로 다른



종류의 극저온 원자기체를 혼합하여 극저온 분자기체를 생성하는 방법이 소개되었고, 양자 축퇴된 분자기체의 생성이 곧 이루어질 것으로 기대되고 있다. 복잡한 분자의 내부구조는 이제 다양한 기술로의 활용을 위한 장점으로 인식된다. 분자간의 장거리 상호작용은 원자기체의 경우보다 월등히 강력하여 양자 정보 연구에 적극적으로 고려되고 있다. 극저온 분자 실험은 그 밖에 저온 양자화학, 보다 정밀한 기초 상수 측정 등 많은 가능성들을 그 앞에 두고 있다.

6. 결론

미래사회의 성장 동력 중 하나는 우수한 성능의 새로운 물질을 만들어내는데 있고, 이를 위해서는 다양한 물성에 대한 깊은 과학적 이해가 뒷받침되어야 한다. 고온 초전도체 및 양자 자성체 등의 양자물성들은 발견 초기부터 많은 관심을 받아왔으나, 여전히 현대물리학의 난제로서 아직까지 이에 대한 근본적인 이해가 얻어지지 않고 있다. 양자물성의 중심 원리를 찾기 위하여, 간단한 모형이론에 근거한 접근들이 많이 시도되어 왔다. 그러나 고체 시료를 이용한 실험 연구에서는 실험 변수들에 대한 통제가 제한적이고 또한 완벽히 깨끗한 시료를 만드는 것이 불가능하여, 이러한 모형 이론들에 대한 검증이 쉽지 않다. 더욱이, 아주 간단한 유효이론 모형조차도 그 해가 해석적으로나

수치적으로 존재하지 않는 경우가 많아, 기존의 실험연구는 더욱 어려워지고 있다. 극저온 양자기체를 이용한 양자물성 연구는 고도의 실험변수 통제가 가능한 원자기체 시료를 이용하여 모형이론이 제안하는 유효 물리계를 정확히 구현하고, 이에 대한 정밀한 측정을 통해 예견되는 물성들을 검증하는 연구이다. 이를 통해 얻어진 물리적인 통찰은 관측 현상의 이해를 넘어서서, 새로운 기능을 보유한 신물질을 설계하는데도 큰 도움을 줄 것이다. 더욱이 새로 개발되는 실험기술을 바탕으로 이제까지 접근하지 못 했던 새로운 물리영역의 탐험도 가능해 진다. 새로운 물리영역의 탐험에 대한 갈망은 실험 연구의 중심 원동력이다.

약 력



신용일

- 2011. 3 - 현재
서울대학교 조교수
- 2009. 9 - 2011. 2
서울대학교 WCU 초빙조교수
- 2008. 8 - 2009. 8
MIT RLE Research Scientist
- 2006. 1 - 2008. 7
MIT 박사후 연구원
- 2001. 8 - 2005. 12
MIT 물리학과 박사
- 2000. 3 - 2001. 6
서울대학교 근접장 광기술 연구단 연구원
- 1995. 3 - 2000. 2
서울대학교 물리학과 학사