

냉각과 포획으로 원자 길들이기

고전물리와 양자물리가 만나는 경계에서 벌어지는 일에 대한 새로운 이해

지금 우리가 있는 방을 채우고 있는 공기 중의 분자는 얼마나 빠르게 공간을 돌아다니고 있을까? 놀랍게도 대부분의 질소와 산소분자는 공기 중 소리의 진행보다도 빠르게 움직이고 있다. 원자나 분자를 자세히 연구하고자 하는 사람들에게 있어서 이는 큰 걸림돌이 아닐 수 없다. 정신없이 돌아다니는 원자를 차분히 들여다보고 연구하는 데에는 분명 한계가 있을 것이다. 물리학적으로는 이를 하이젠베르크(Heisenberg)의 불확정성의 원리로 설명한다. 불확정성의 원리에 따르면 원자의 분광학적 측정의 오차는 우리가 그 원자를 얼마나 오랫동안 들여다보았는가에 반비례한다.

절대온도 0도에 근접하면서 일어나는 흥미로운 일들

이런 한계를 극복하기 위해서 1980년대 중반부터 레이저 광선을 이용해서 원자를 아주 낮은 온도로 냉각하고 한 곳에 모아둘 수 있는 기술이 개발되었다. 이런 기술의 발달은 의도했던 대로 원자분광학 측정의 정밀도를 획기적으로 개선하는 결과를 가져왔다. 예를 들어 원자의 냉각과 포획기술을 응용한 오늘날의 원자시계는 10년 전의 원자시계에 비해서 100배 가까이 정밀하다. 이와 함께 원자 샘플의 온도가 절대 0도에 근접해 가면서 여러 가지 흥미로운 일들이 일어나기 시작했다. 원자는 더 이상 작은 부피와 질량을 가진 알갱이처럼 행동하지 않았으며, 원자의 파동성을 무시할 수 없게 되었다. 물론 이는 이미 20세기 초에 완성된 양자이론에 의해서 잘 알려진 바이지만, 원자처럼 커다란 입자의 집단적인 양자역학적 현상이 실험으로 보여진 것은 레이저 냉각 기술에 의해서이다. 극저온으로 냉각되어서 양자현상을 보이는 원자샘플을 이용한 새로운 연구는 원자간섭계 등으로 대표되는 원자광학분야를 열었다. 특히 이 방면 연구의 백미는 1995년에

미국 콜로라도 주립대학에서 성공한 냉각 및 포획된 알칼리 원자를 이용한 보즈 아인슈타인 응축 (Bose Einstein Condensation · BEC) 현상이다.

원자의 냉각과 포획에 대한 개념을 분명히 하고, 이와 관련된 기술을 개발한 공로로 1997년에 미국의 슈(Chu), 필립스(Phillips), 그리고 프랑스의 코엔 타노(Cohen Tannoudji)가 노벨 물리학상을 수상한 바 있으며, 2001년에는 BEC 연구 공로로 콜로라도 주립대학의 와이먼(Wieman), 코넬(Cornell), 그리고 MIT의 케테를레(Ketterle) 등이 노벨 물리학상을 수상했다.

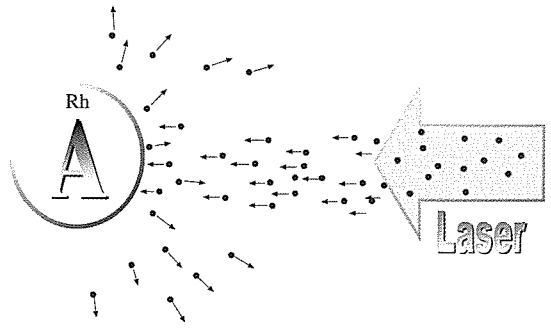
현재 이 분야의 연구는 원자물리학에 국한되지 않고, 저온물리학 · 고체물리학 등 물리학 전 분야에 큰 영향을 미치며 세계적으로 활발히 진행 중이다. 국내에서도 지난 10년 사이에 고려대학교, 서울대학교 등 대학과 한국표준과학연구원을 중심으로 이 분야의 연구가 활기를 띠고 있으며, 국제적인 수준의 연구결과들이 발표되기 시작했다. 이 글에서는 원자의 냉각 및 포획과 관련된 원자물리학 분야의 역사를 간단히 조명하고, 최근의 연구동향을 소개하고자 한다.

1900년대 초 현대물리학이 태동하던 때에는 원자를 대상으로 하는 연구가 과학의 최첨단 연구였다. 러더퍼드(Rutherford)의 알파입자 산란실험을 통해서 원자가 중앙에 있는 작지만 무거운 핵과 그 주위를 도는 전자로 구성되어 있음이 밝혀졌다. 가장 간단한 원자인 수소원자를 대상으로 한 라이먼(Lyman), 발머(Balmer) 등의 분광학적 연구는 수소원자가 내는 광선의 파장이 계열별로 정해진 규칙성을 가짐을 보였다. 보어(Bohr)는 당시 발견된 양자개념을 써서 이들의 관측결과를 정량적으로 설명할 수 있는 수소원자 모델을 제안했으며, 이는 양자역학의 초석이 되었다. 이와 같이 20세기 초 현대물리학의 혁명적인 발전 과정

에서 원자가 차지하던 중요성은 원자핵을 구성하는 핵자와 이보다 더 작고 근본적인 소립자들이 발견되면서 점차 감소한다. 그러나 2차 세계대전 기간 동안 레이더의 개발과정에서 발달한 마이크로파 기술이 원자분광학 연구에 적용되면서 원자물리학은 다시 중흥한다. 그전까지는 자세히 들여다 볼 수 없던 원자의 초미세구조를 정밀하게 연구할 수 있게 된 것이다. 이 연구 결과 중 가장 중요한 것이 램(Lamb) 이동이라고 알려진 수소원자의 두 에너지 준위간의 에너지 차이이다.

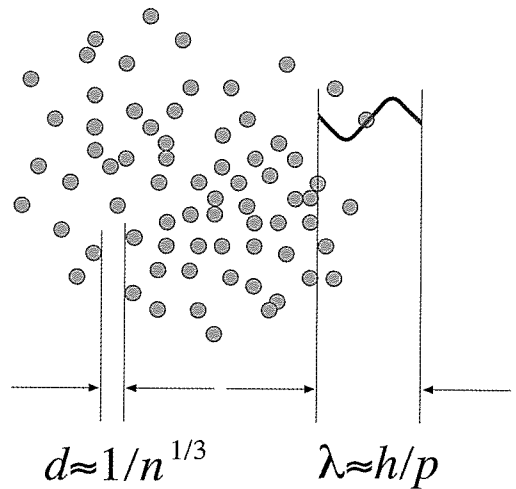
원자의 운동속도 조절과 내부 들여다보기

1927년에 영국인 물리학자 디랙(Dirac)에 의해 완성된 양자역학과 특수상대론을 통합한 이론에 의하면 이런 에너지 차이는 존재할 수 없었다. 수소원자는 첨단물리학의 가장 중요한 계로 다시 떠오르고, 이와 같은 이론과 측정의 불일치를 해결하는 과정에서 양자전기역학(quantum electrodynamics)이 완성된다. 양자전기역학 이론은 이제까지 한 가지의 예외도 없이 실험과 일치하며, 경우에 따라서는 유효숫자 10개 이상의 정밀한 실험 결과까지 정확히 예측한다. 램 이동측정 이후 사양길에 접어든 원자물리학이 다시 한번 르네상스를 맞는 계기를 제공한 것은 1960년대와 70년대에 걸친 다양한 레이저의 발명이다. 위에서 언급한 마이크로파 기술의 경우처럼 레이저라는 새로운 광원은 그전의 방전 램프로부터의 광원을 이용한 실험에서는 상상하지도 못하던 정밀한 측정을 가능케 하였다. 주파수와 출력 등에서 더 나은 사양을 갖는 레이저들이 지속적으로 개발되고, 이를 이용한 창의적인 측정방법들이 시도되면서 원자와 분자를 대상으로 한 레이저분광학은 물리학과 화학에서 중요한 분야로 자리잡는다. 이처럼 1980년대 초반까지 원자를 대상으로 한 연구의 주



광압

원자에 빛을 쬐어 주면 여러 가지 현상이 일어난다. 그중 가장 중요한 것이 흡수이다. 특히 입사한 광선의 진동수와 원자의 고유주파수가 들어맞으면 원자는 그 광선을 잘 흡수한다. 이 과정을 하나의 총동현상으로 볼 때, 광자의 에너지가 원자의 에너지로 바뀌며 에너지가 보존된다. 한편 광자는 에너지 뿐 아니라 선운동량도 갖고 있다. 광자를 흡수하여 흥분상태로 올라간 원자는 광자의 에너지와 함께 그 선운동량도 흡수한다. 흡수과정에서 겪는 운동량의 변화 때문에 원자는 레이저광선의 진행방향으로 힘을 받을 것이다. 이를 광압이라고 부른다. 원자의 내부구조를 적절히 이용하여 공진적인 상황을 연출함으로써, 광압이라는 기작을 통해서 광선이 갖는 운동량을 원자에 효과적으로 전달할 수 있는 것이다.



원자간섭계

스탠퍼드(Stanford) 대학의 슈는 냉각 및 포획된 원자를 이용한 분수형 원자빔을 만들고, 적절한 조건의 광선을 빔 스플리터(bean splitter)로 한 원자간섭계를 제작하였다. 레이저 광선을 이용해서 바닥준위의 원자가 들뜬준위로 "반쯤만 가도록" 한다면, 원자는 바닥준위이며 선운동량의 변화가 없는 상태와 들뜬준위이며 선운동량이 광자의 운동량만큼 변한 상태가 조합된 상태로 주어질 것이다. 즉, 빔 스플리팅(bean splitting)이 일어난다. 슈의 원자간섭계는 개념적으로는 마하-젠더(Mach-Zehnder) 형태를 보이며 중력에 의한 원자의 속도변화가 검색영역에서의 신호변화를 준다. 슈 등은 이 실험을 통해서 지구표면에서의 중력가속도 g 와, 높이에 따른 g 값의 변화 등을 정밀하게 측정할 수 있었다.

상온에서의 원자는 우리가 일상생활에서 경험하기 힘든 큰 속도로 돌아다닌다. 이들의 운동 속도를 줄이고 한 곳에 모아 둘 수 있는 가장 간단한 방법은 기체의 온도를 낮추어서 액체나 고체로 만드는 것이다. 레이저를 이용한 원자의 냉각과 포획 연구에서는 기체상태를 유지하면서 액체나 고체 상태에서 도달할 수 있는 것보다 훨씬 낮은 온도에 이르렀으며, 이 때 원자들은 전혀 새로운 현상을 보여 주었다.

목적은 원자의 구조를 이해하고, 이를 통해서 그런 구조를 가져 온 핵과 전자들 간의 상호작용을 알아내자는 것이었다. 러더퍼드가 금 박막에 알파입자를 쏜 것은 금 원자가 도대체 어떻게 생겼는지를 알기 위해서였고, 마이크로파와 레이저를 이용한 분광학에서도 에너지 준위를 파악해서 원자의 구조를 알고자 함이었다. 그러나 1980년대 중반부터 이와는 다른 방향의 연구가 시도되었다.

즉 원자의 내부를 들여다보기 보다는 원자의 운동을 조절하고자 하는 시도가 시작되었다. 광선을 이용해서 원자의 운동을 조절할 수 있다는 아이디어는 1970년대 중반에 제안되었다. 그러나 이 아이디어를 실제 실험에 적용하기 위해서는 단색이면서 좋은 방향성을 갖는 광원이 필요했으며 이들 연구는 레이저의 발명 없이는 불가능했다. 원자에 광선을 쬐어서 그 속도를 조절할 수 있음은 광자를 '광자'라는 작은 알갱이들의 흐름으로 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 이들 알갱이는 에너지와 함께 선운동량을 가지고 있기 때문에 광자가 원자와 충돌하면 힘을 가할 수 있다. (69쪽 위 그림 참조) 이와 같은 간단한 아이디어에서 출발해서 광선의 주파수, 편광, 세기 등의 변수를 조절하고, 여기에 전기장·자기장 등을 추가해서 원자의 운동을 조작할 수 있는 복잡하고 효율적인 여러 방법들이 개발되었다. 수십억 개에 달하는 원자를 수 mm 안에 모아놓을 수 있게 되었으며, 이들의 온도도 절대 0도에 점점 근접하며 수 마이크로 켈빈, 혹은 수백 나노 켈빈에 이르렀다. 낮은 온도의 원자샘플은 이미 언급한 바와 같이 분광학 측정의 정밀도를 한 단계 높이는 데에 기여했음은 물론이며, 원자와 원자의 충돌 연구에서도 냉각 충돌(cold collision, 극저온에서의 충돌)이라고 불리는 새로운 영역의 연구를 가져왔다. 알칼리 금속원자인 루비듐의 경우 10 마이크로 켈

빈의 온도에서 평균속력은 초속 3cm에 불과하다. 이런 느린 원자들 사이의 충돌을 관측하는 것은 마치 원자들의 운동을 슬로우 비디오로 보는 것과 같다.

느린 원자샘플을 이용한 흥미로운 연구 중 또 하나는 이들 원자가 보이는 파동성을 이용한 원자광학이다. 우리가 흔히 입자라고 알고 있는 덩어리들도 적절한 조건이 주어지면 수면위의 파동처럼 회절과 간섭을 할 수 있음은 이미 잘 알려져 있다.

양자물리학의 새로운 이해는 가능한가

대부분의 거시적인 덩어리의 경우 그 적절한 조건을 만족시키는 것이 거의 불가능하지만, 원자의 경우 레이저를 이용한 냉각에 의해서 그 조건을 만족시킬 수 있다. 이는 원자가 가지고 있는 파동성을 이용할 수 있는 길을 열어 놓았다. 기존의 광학에서 광선의 진행을 거울, 렌즈, 회절격자와 같은 물질을 써서 조절했다면, 원자광학에서는 원자가 보이는 물질파의 진행을 정지파나 소멸파 등의 광선을 써서 조절한다. 그 대표적인 도구가 원자간섭계이며, 이를 이용한 중력가속도의 정밀한 측정이 이루어지고 있다. (69쪽 아래 그림 참조) 레이저를 이용한 원자의 냉각과 포획의 주된 연구대상이 된 원자들은 알칼리 금속원자들이다. 안정된 알칼리 원자들의 원자핵은 대부분 짝수개의 중성자를 가지고 있다. 따라서 원자가 가지고 있는 기본입자의 수를 세어보면, 같은 수의 전자와 양성자에 중성자의 수를 합해서 짝수이다. 이처럼 짝수개의 기본입자로 구성된 원자를 보손(boson)이라고 한다. 페르미온(Fermion)인 전자가 파울리 금칙을 만족하는 것처럼, 보손들도 나름대로의 특별한 통계법칙을 만족한다.

특히 80여 년 전 아인슈타인과 인도인 물리학자 보즈(Bose)가 주장한 바에 의하면 이들 보손으로 된 샘플이 극저온 고밀도로 가



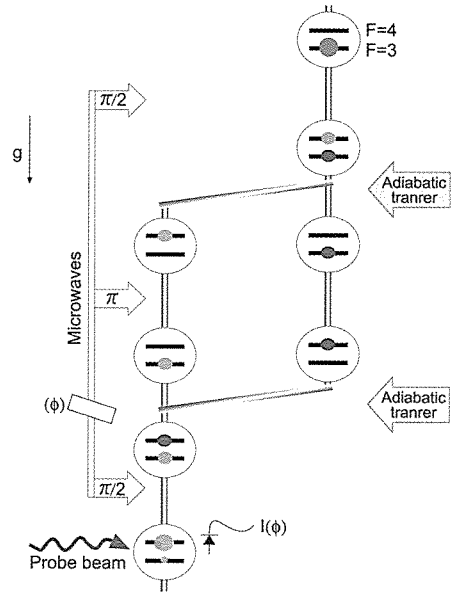
에릭 코넬(Eric A. Cornell) (왼쪽)이 스웨덴의 국왕 칼 구스타프 16세 국왕(Carl XVI Gustaf)으로부터 노벨 물리학상을 받고 있다.

면 특이한 형태의 상전이를 일으키도록 되어 있다. 이를 보즈 아인슈타인 응축이라고 하는데, 초전도·초유체 현상과 관련 있는 것으로 알려져 있다. (71쪽 아래 그림 참조) 이상기체 상태에 가까운 원자를 대상으로 한 BEC는 매우 흥미로운 상황이며, 1995년 와이먼 등에 의해서 루비듐 원자를 대상으로 최초로 이루어졌다.

BEC 상태에 있는 원자들이 특별한 것은 이들 원자의 물질파적 파동이 소위 결맞음 상태에 있기 때문이다. 이는 흔히 레이저 광선과 백열등의 차이로 설명되는데, 일반적인 기체상태가 백열등에 해당된다면 BEC 상태의 원자들은 레이저광선에 해당된다. 실험적으로 이루어진 BEC 샘플의 크기는 수 마이크로미터에 이르며 흔히 수백만 개의 원자로 되어 있다. 이 정도 크기는 육안으로 볼 수 없지만 간단한 확대경을 사용하면 쉽사리 들여다 볼 수 있다. 즉, BEC 상태의 원자들은 거시적이면서도 양자역학적으로만 기술되는 특별한 계이다. 이런 특성을 이용해서 그 동안 원자레이저가 만들어졌으며, 이미 이런 샘플을 소형화해서 원자 광학적 소자를 제작하는 일들이 진행되고 있다.

상온에서의 원자는 우리가 일상생활에서 경험하기 힘든 큰 속도로 돌아다닌다. 이들의 운동속도를 줄이고 한 곳에 모아 둘 수 있는 가장 간단한 방법은 기체의 온도를 낮추어서 액체나 고체로 만드는 것이다. 레이저를 이용한 원자의 냉각과 포획 연구에서는 기체상태를 유지하면서 액체나 고체 상태에서 도달할 수 있는 것보다 훨씬 낮은 온도에 이르렀으며, 이 때 원자들은 전혀 새로운 현상을 보여 주었다. 특히 이들은 거시적인 양자역학적인 샘플을 제공했으며, 이를 이용한 새로운 연구는 고전물리학과 양자물리학이 만나는 경계에서 일어나는 일들에 대한 새로운 이해로 이어질 것이다. ☞

글 조동현 | 고려대 물리학과 교수



보즈 아인슈타인 응축

보존으로 이루어진 계에서 그 밀도 n 이 커지면 보존 상호간의 거리 d 가 가까워진다. 한편 그 온도가 내려가면 개개 보존의 속도가 줄어들며 보존의 선운동량이 반비례하는 드브로이 파장 λ 는 길어진다. 이때 고밀도, 극저온의 한계에서 그림에 나타난 것처럼 물질파 파장 λ 가 보존 상호간의 거리 d 보다 더 커지면, 보존의 상태함수 간의 중첩이 일어나고 BEC로의 전이가 일어난다.