

5 보스-아인슈타인 응축

# 1990년대 초반 원자물리학의 성배(聖杯)

글\_ 조동현 고려대 물리학과 교수 cho@korea.ac.kr

등에 대해서 소개하고자 한다.

## 이 세상을 구성하는 물질은 '페르미온'과 '보손'

이 세상을 구성하는 입자는 그 스핀 값이  $\hbar/2$ 의 홀수 배인 페르미온(fermion)과 짝수 배인 보손(boson)으로 나눌 수 있다. 전자, 양성자 등이 페르미온에 속하고, 광자, 약력을 매개하는 W나 Z입자 등이 보손에 속한다. 주기율표에서 I족을 구성하는 수소원자와 알칼리 금속원자의 경우에도 대부분의 안정된 동위원소는 보손이다.

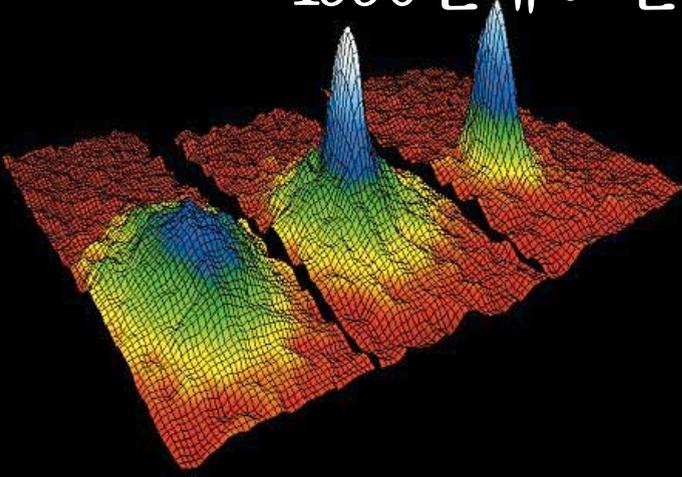
보손으로 이루어진 계에서 그 밀도  $n$ 이 커지면 보손 상호간의 거리  $d$ 가 가까워지며, 한편 그 온도가 내려가면 개개 보손의 속도가 줄어들며 보손의 운동량에 반비례하는 드브로이 파장  $\lambda$ 는 길어진다. 이때 고밀도, 극저온의 한계에서 물질파 파장  $\lambda$ 가 보손 상호간의 거리  $d$ 보다 더 커지면, 보손의 상태함수간의 중첩이 일어나고, 이 때 BEC로의 전이가 일어난다. 정량적 계산의 결과에 의하면 BEC 전이의 조건은 다음과 같다.

$$\rho = n\lambda^3 > 2.6$$

여기서  $\rho$ 를 주어진 보손 계의 위상공간에서의 밀도라고 한다.

이런 임계조건을 넘어서서 보손 계가 BEC로의 상전이를 이루면, 보손들은 이들을 구속하는 퍼텐셜 우물의 양자역학적 바닥상태로 급격히 몰려든다. 여기서 중요한 사실은 BEC 상태의 보손들이 동일한 양자역학적 준위, 즉 바닥상태에 있을 뿐 아니라 이들의 양자역학적 위상이 모두 같다는 사실이다. 즉, 이들은 결맞음상태를 유지하고 있는 양자계를 구성한다. 이런 점에서 BEC 상태의 원자들은 흔히 레이저광선 빔의 광자들에 비유되고, 일반적인 기체상태의 원자들은 백열등으로부터의 광자에 비유되기도 한다.

최근의 실험에서 만들어지는 BEC는 수백만 개의 원자로 이루어져 있고, 수십 $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지며, 간단한 렌즈를 써서 들어



1995년 여름 어느 날 아침, 미국 콜로라도 주립대학과 연방 표준기술연구원(NIST)의 공동연구소인 JILA(Joint Institute for Laboratory Astrophysics) 건물 2층에 위치한 실험실에서 박사 후 연구원 마크 앤더슨은 포획된 루비듐 원자들을 대상으로 증발냉각을 시도한 결과가 심상치 않음을 알아차렸다. 곧 연구실의 책임자인 에릭 코넬과 공동연구자인 칼 위먼에게 연락이 취해졌고, 수 시간 안에 이들은 7년여 전 위먼이 시작한 알칼리 기체원자를 대상으로 한 보스-아인슈타인 응축(BEC : Bose Einstein Condensation)을 향한 노력이 마침내 결실을 맺었음을 확인할 수 있었다. 이 공로로 이들은 당시 경쟁자였던 MIT의 볼프강 케테를레와 함께 노벨물리학상을 수상하는 영광을 안았다.

필자는 이들의 BEC를 향한 노력이 한창이던 1990년대 초반 위먼 교수의 다른 연구과제인 세슘원자를 대상으로 한 반전성 위배(parity violation) 측정 실험의 박사 후 연구원으로 일하면서, 당시 BEC 실험의 박사 후 연구원이던 코넬과 위먼의 노력을 지켜볼 기회가 있었다. 이 글에서는 1995년 JILA 실험에서 정점에 이른 알칼리 원자기체를 대상으로 한 BEC를 향해 당시 여러 실험그룹이 기울인 노력, 그 과정에서 제기된 어려움, 그리고 이런 어려움을 극복하기 위해서 동원된 아이디어와 실험방법

다 볼 수 있을 정도이다. 이렇게 ‘거시적’이면서 결맞음상태를 유지하고 있는 양자역학적 계는 이제까지 물리학자들이 흔히 다루어보지 않은 새로운 계이다. 금속원자 기체를 대상으로 한 BEC 연구에서는 다양한 원자에 대해서 그 밀도, 포획 퍼텐셜 우물의 모양, 전자기적 환경 등 실험조건을 바꾸어 가며 여러 가지 연구를 할 수 있다. 그리고 광학적 방법을 써서 BEC의 상태를 실시간으로 들여다 볼 수 있다는 것도 알칼리 원자기체를 대상으로 한 BEC 연구의 큰 장점으로 꼽힌다. 1995년 최초의 BEC 실험 후 이와 관련된 실험 및 이론연구의 논문 수는 이미 수천 편에 이르며, 이제 이 분야의 연구는 원자물리학의 범주를 벗어나 물리학계 일반의 큰 관심 속에 진행되고 있다.

JILA 실험에서 사용된 원소인 루비듐은 39°C에서 녹으며, 상온에서 약 10<sup>-8</sup> Torr 정도의 평형증기압을 갖는다. BEC를 향한 실험은 이 기체샘플로부터 시작되는데, 상온의 루비듐 평형증기가 갖는 위상공간밀도는 약 10<sup>20</sup>이다. 즉, BEC에 도달하기 위해서는 위상공간에서의 밀도를 10<sup>20</sup>배만큼 크게 해야 한다. 실제로 위상공간의 밀도를 증가시키는데 필요한 냉각의 대부분은 1980년대에 이미 개발된 레이저 냉각법에 의해서 이루어졌다. 1980년대 연구자들의 주된 연구 동기는 분광학의 정밀도를 높이기 위해서 원자를 한 곳에 가두어 두고 차분히 들여다 볼 수

있는 방법을 개발하는 것이었다. 상온의 루비듐 원자는 초속 수백 m의 속력으로 움직이며, 이런 원자를 대상으로 한 분광학에서는 불확정성의 원리로부터 관측시간의 한계가 분광학적 측정의 정밀도를 제한하는 큰 요소가 된다. 냉각 및 포획된 세슘원자를 이용한 분수형 원자시계는 기존의 원자빔을 이용한 원자시계보다 훨씬 뛰어난 정밀도를 보이며, 이미 기존의 원자시계들을 대체해 가고 있다. 1980년대 이 분야에서 활동하며, 연구를 주도했던 미국 스탠퍼드 대학의 스티븐 추, 프랑스 고등사범의 클로드 코앙 타누지, 그리고 미국 연방표준과학연구원의 윌리엄 필립스 등은 이미 이 연구에 대한 공로로 1997년에 노벨 물리학상을 공동 수상한바 있다.

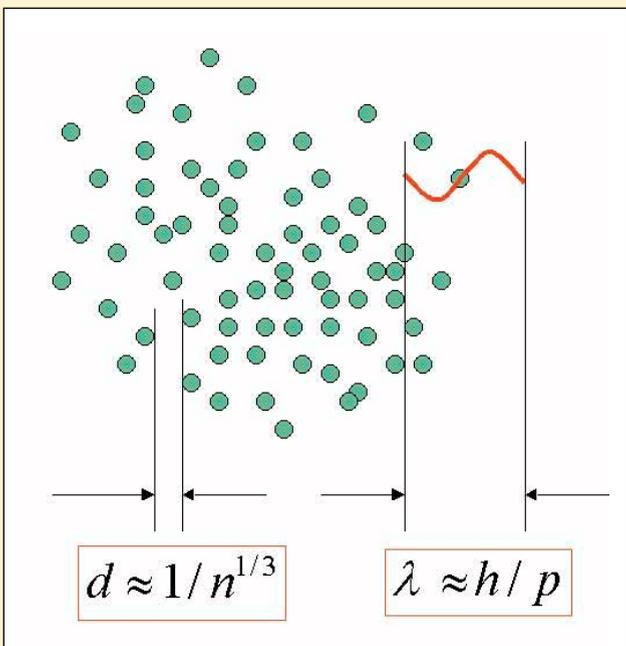
**1997년엔 냉각된 세슘원자 응용에 노벨상**

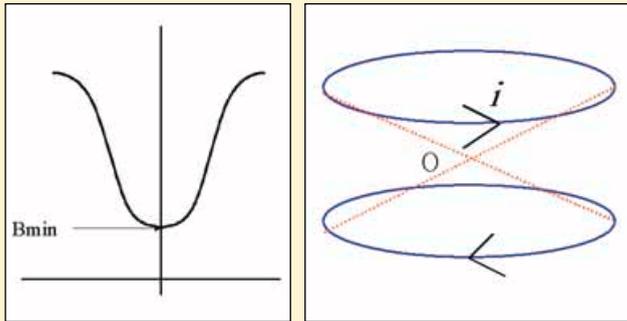
이들 노벨 물리학상 수상자를 비롯한 이 분야 연구자들이 원자의 운동을 조절해서 그 온도를 낮추고, 한 곳에 모으기 위해서 동원한 여러 요소 중 가장 중요한 것이 광압이다. 알칼리 금속원자의 경우 소위 D전이라고 알려진 편리한 파장대의 강력한 전이선이 있으며, 이에 맞추어진 광선이 원자에 미치는 가속도는 중력가속도의 수만 배에 이른다.

특히 양 방향에서 광선을 조사해 주며, 광선의 주파수와 편광 등을 적절히 조절하면 원자를 수백 μK 정도의 낮은 온도로 냉각하고 한 곳에 모을 수 있다. 이런 아이디어들이 집대성된 장치를 ‘자기광포획장치’라고 하며, 루비듐의 경우 자기광포획된 기체 샘플의 위상공간밀도는 약 10<sup>16</sup> 정도다. 즉, 자기광포획장치가 위상공간밀도의 10<sup>6</sup> 배의 증가를 담당하는 것이다.

1980년대 후반 위먼 등이 알칼리 금속원자 기체를 대상으로 한 BEC 연구의 가능성을 지적한 것도 이런 자기광포획장치의 성공에 근거하고 있었다. 그러나 자기광포획된 원자샘플을 이용한 BEC 연구는 위상공간 밀도를 증가시키는데 있어 자기광포획장치의 한계를 보여주었으며 위상공간밀도를 10<sup>6</sup>보다 더 크게 하기 위해서는 광압을 대신해서 원자들에 대해서 구속력과 냉각을 제공할 새로운 방법이 동원되어야 했다.

원자물리학의 다른 연구에서 그러했던 것처럼 알칼리 금속원자를 대상으로 한 BEC 연구가 시작되기 훨씬 전에 이미 수소원자를 대상으로 한 BEC 연구가 시작되었다. 1986년, 당시 MIT 수소원자 BEC 연구진의 박사 후 연구원으로 있었던 헤스는 수





소원자 기체를 포획하고 그 온도를 낮추고 밀도를 높일 수 있는 획기적인 방법을 제시했다.

헤스의 첫번째 아이디어는 자기장을 써서 수소원자들을 가두어 두자는 것이며, 두 번째 아이디어는 증발냉각이라는 냉각방식이다. 이는 컵에 담긴 커피가 식는 과정에 비유되기도 한다. 뜨거운 커피가 식는데는 전도와 대류 그리고 복사 등이 한몫을 할 것이다. 그러나 이와 함께 커피 컵 위로 피어오르는 김도 커피가 식는데 중요한 역할을 한다. 즉, 김이 되어 튀어나오는 물 분자는 일반적으로 커피 컵 안에 있는 물 분자 중 가장 큰 에너지를 가지고 있는 분자들이다. 큰 에너지를 갖는 물 분자의 탈출은 남아있는 분자들이 갖는 평균에너지의 감소를 가져오고, 이는 냉각을 의미한다. 비록 수소원자 BEC 연구는 알칼리 금속원자를 대상으로 한 BEC 연구에 추월당하지만, 수소원자 BEC 연구에서 개발된 자기장포획과 증발냉각 방식은 알칼리 금속원자 BEC의 성공에 결정적인 역할을 하게 된다.

1990년대 초반 몇몇 연구그룹이 알칼리 금속원자를 소위 ‘안티-헬름홀츠 코일’이라고 알려진 4극자 형태의 자기장으로 구성된 자기장에 포획하고, 이를 대상으로 증발냉각에 성공했음을 보고하기 시작했다. 이와 같은 자기장 포획과 증발냉각 아이디어의 성공적인 적용으로 알칼리 금속원자를 대상으로 한 BEC 노력은 자기장포획장치가 제공하는 위상공간밀도인  $10^{-6}$ 을 넘어서,  $10^{-4}$  이상으로 증가하였다. 그리고 적절한 진공조건과 증발냉각조건만 찾으면 단순히 BEC 임계점을 넘어서리라는 기대감이 퍼져있었다. 그러나 위상공간밀도  $10^{-4}$  정도에는 또 다른 복병이 기다리고 있었다. 원자가 자기장 포획장치에 머물러 있기 위해서는 그 자기쌍극자 모멘트의 방향이 원자가 위치한 곳에서의 자기장에 대해서 항상 반대방향이어야 한다. 한편, 증발냉각에 의해서 원자의 온도가 점점 내려가면, 원자들은 퍼

텐셜 에너지가 최소인 지점 근처에서 더 많은 시간을 보낸다. 문제는 그 지점에서는 자기장의 세기가 0이며, 그곳을 지나는 원자들에게 있어서는 자기쌍극자 모멘트의 방향이 자기장의 방향과 같은지 반대인지가 불분명해진다. 이는 점이다.

결과적으로 원자의 자기쌍극자 모멘트는 그 지점을 지나며 임의의 방향을 향하게 된다. 만약 이 과정에서 어떤 원자의 자기쌍극자 모멘트 방향이 바뀌면 그 원자는 자기장포획장치를 떠난다. 증발냉각이 진행되며 원자가 냉각되고, 자기장인 0인 지점 근처의 밀도가 높아지며, 이런 경향은 점점 심해지며 이것이 위상공간밀도가 증가하는 것을 막는 원인이 되었다. 자기장포획장치를 깔때기에 비유한다면, 이는 깔때기가 새는 상황이라고 이야기할 수 있을 것이다.

### 루비듐·리튬·세슘 이용한 연구 경쟁 치열

1995년 봄 미국물리학회와 원자분자물리 분과 학회에서는 당시 BEC를 향해서 경쟁하던 연구진들이 이 문제를 해결하기 위한 각각의 방안을 들고 나와 이야기했다. 당시 JILA의 위먼-코넬 연구진은 루비듐을, MIT의 케테를레는 소듐을, 라이스 대학의 홀릿은 리튬을, 그리고 스탠퍼드의 추와 카세비치는 세슘을 대상으로 BEC에 이르기 위한 노력을 기울이고 있었다. 학계에서는 이미 그 당시에도 어느 그룹이든 가장 먼저 BEC에 이르는 팀이 결국 노벨 물리학상을 탈 것이라는 사실이 당연히 여겨졌고, 그곳에 먼저 이르기 위한 경쟁은 매우 치열했다.

먼저 MIT 그룹의 아이디어는 비교적 간단했다. 깔때기가 새면 그것을 막자는 것이다. MIT 그룹에서는 깔때기를 막기 위해서 청색 편이된 강력한 레이저 광선을 이용했다. MIT 그룹은 아르곤 이온레이저로부터의 강력한 광선을 써서 소듐 원자들이 깔때기 구멍에 해당되는 지점으로 오는 것을 막고자 했다. 이런 노력은 어느 정도 성공을 거두었으나, 아르곤 이온레이저의 출력 광선이 가지고 있는 세기와 주파수 등에 실려 있는 잡음과 레이저 광선 진행방향의 떨림 등이 원자의 온도를 높여 BEC에 이르는 것을 방해했다.

한편 텍사스주 라이스 대학의 연구진은 자기장 포획장치에서 자기장의 최소 세기가 반드시 0일 필요는 없음을 주목했다. 위에서 설명한 안티-헬름홀츠 코일에 의한 자기장 포획장치에서는 자기장이 가장 약한 곳에서의 세기가 0이지만, 예를 들어 요

페 코일이라고 알려진 야구공의 껍데기 실 자국처럼 생긴 코일에 의한 자기장은 0이 아닌 최소 세기를 갖는다. 단, 이 경우 포획을 제공하는 퍼텐셜 우물의 밑바닥이 비교적 밋밋함을 의미한다. 이것은 깔때기가 새는 문제에 대해서는 좋은 해법이지만, 증발냉각이 진행되며 밑바닥에 쌓이는 원자의 밀도를 올리는데는 불리한 상황이다. 이런 노력에도 불구하고, 영구자석을 이용한 실험장치의 경직성과 리튬 원자가 갖는 물리적인 성질 때문에 라이스 대학의 연구진은 어려움을 겪는다. 초기 레이저 냉각 및 포획연구를 주도했고, 그 공로로 1997년에 노벨 물리학상을 수상한 추 역시 1990년대 초반부터 제자인 카세비치와 세슘원자를 대상으로 BEC 연구에 뛰어 들었다. 추 등은 처음부터 자기장 포획대신 광포획을 이용했다. 원자는 적색편이된 광선의 세기가 큰 곳으로 쌍극자힘을 받아 몰려드려는 경향이 있으며, 이를 이용해서 원자를 광선세기가 가장 센 곳에 가두어 두는 장치를 광포획이라고 한다. 광포획은 원자의 스핀상태에 관계없이 포획력을 제공하므로 깔때기가 새는 문제는 없다. 이들은 광선세기를 점차 줄여 퍼텐셜우물의 깊이를 조절하는 방법으로 수동적 증발냉각까지 성공했으나, BEC에 이르지 못했다. 이들이 BEC에 이르지 못한 데는 광포획을 구성하는 광선이 원자와 상호작용하며 원자를 데워주는 문제와 함께, 세슘원자가 갖는 물리적 성질이 문제였다. 시간의 표준이나, 자연법칙의 대칭성연구 등에서 차지하는 세슘원자의 중요성 때문에 세슘원자에 대한 BEC연구는 그 후 계속되었으며, 최근에 완성되었다.

**이온의 포획 · 냉각이 연구 성패의 열쇠**

결국 에릭 코넬의 아이디어가 이 경쟁의 승부를 가르는 계기가 되었다. 코넬은 MIT 박사과정에서 이온포획을 연구했다. 1980년대 원자의 냉각과 포획이 활발히 연구되기 훨씬 전, 이미 이온의 포획과 냉각에 대한 연구가 상당히 진행되어 있었다. 이온포획장치인 폴 트랩을 발명한 볼프강 폴과 이를 이용해서 전자의 회전자기비(gyromagnetic ratio)를 정밀하게 측정한 한스 데멜트에게 이미 1987년 노먼 램지와 함께 노벨 물리학상이 주어진다. 원자가 전기적으로 중성임에 반해, 이온은 전하를 가지고 있으므로 전기장을 써서 직접 쿨롱힘을 가할 수 있다. 즉, 전기퍼텐셜이 최대, 또는 최소인 곳에 이온을 가두어 둘 수 있다. 그러나 전기퍼텐셜은 3차원공간에서 최소나 최대값을 가

질 수 없음이 알려져 있다. 전기퍼텐셜은 소위 말안장과 같은 모양을 가질 뿐이며, 3차원 공간에서 한 지점에 이온을 가둘 수 있는 정전기 퍼텐셜은 존재하지 않는다. 이온을 포획하는 장치에서는 전기장에 시간에 따른 변화를 주어서 말안장을 돌려주는 것과 같은 상황을 연출해서 이 문제를 해결한다.

코넬이 원자의 자기장포획에서의 깔때기 문제를 해결하기 위해서 동원한 방법은 이런 이온포획에서의 아이디어의 자연스러운 연장이었다. 즉 새는 깔때기 문제를 해결하기 위해서 코넬은 깔때기를 살살 돌려주는 간단한 방법을 제안했다. 여기서 돌려주는 회전속도를 적절히 조절함으로써 코넬은 깔때기 문제해결과 뾰족한 밑바닥이라는 두 가지를 어느 정도씩 만족할 수 있는 상황을 만들어 낼 수 있었다. 코넬과 그의 연구진은 이런 포획장치를 써서 깔때기 문제없이 증발냉각을 계속할 수 있었으며, 1995년 여름 어느 날 아침 드디어 BEC 임계를 넘어설 수 있었다. 이들이 증발냉각의 결과 BEC에 도달했는지를 알기 위해서 사용한 측정방법은 냉각이 완료된 상태에서 포획력을 제공하는 자기장을 갑자기 꺼주고, 수 밀리 초 정도 기다린 후 루비듐 원자에 공진하는 검색광선을 한쪽에서 쏘아주고, 원자구름의 그림자를 카메라를 써서 기록하는 방법이다.

**1995년 여름, 'BEC의 연구 성공' 쏟아져**

트랩을 꺼주는 순간 개개 원자들은 그 순간에 각자가 가지고 있던 속도대로 날아가며, 그림자로부터 원래의 속도분포를 찾아낼 수 있다. BEC 임계점을 넘어섬에 따라 속도분포가 뚜렷한 모양을 갖춤을 알 수 있었다. 이 모양은 주어진 포획장치의 양자역학적 바닥상태의 상태함수를 그대로 보여준다. 즉, 이들은 레이저광선과 간단한 렌즈를 써서 양자역학적 상태함수의 사진을 찍을 수 있었다. 1995년 여름 JILA의 루비듐 BEC 실험의 성공이 발표된 후, 수개월내에 MIT 케테를레 그룹이 소듐 BEC의 성공을 발표했고, 이어서 홀릿의 리튬, 그리고 결국 MIT의 수소 원자 BEC도 이루어졌다. 이와 함께 BEC라는 새로운 물질의 상태를 이용한 여러 재미있는 실험과 그에 대한 이론적 연구들이 봇물을 이루었으며, 그 열기는 아직까지 이어지고 있다. 



글쓴이는 서울대 물리학과를 졸업 후, 예일대에서 석사·박사학위를 받았다.