

## 레이저 광압력을 이용한 원자의 냉각과 포획 Cooling and Trapping of Atoms Using Laser Radiation Pressure Force

김진승

건국대학교 자연과학대학 물리학과

장수

한남대학교 이과대학 물리학과

레이저 광압력을 써서 나트륨 원자선다발을 감속시키고, 냉각시키며, 허공에 붙잡아두는 일과 관련된 이론과 실험에 관해 설명하였다.

### 1. 서론

1970년 A. Ashkin이 강하게 집속된 레이저의 광압력을 써서 작은 유전체공 (지름 약  $10\mu\text{m}$ )을 가속, 감속시키고 허공에 붙잡아 둘 수 있음을 실험을 통해 확인한 뒤보<sup>[1,2]</sup>, 같은 실험을 원자, 분자에 대해서도 할 수 있다는 이론적 바탕이 제시되었다<sup>[3,4,5,6]</sup>. 레이저 광압력을 써서 원자의 운동속도를 줄여 멈추게 하고, 허공에 가두어둘 수 있다면 고분해능 분광실험, 원자의 양자도약관찰, 보즈 응축제 (Bose condensate)나 축퇴된 페르미 액체 (degenerate Fermi liquid)의 생성, 원자의 충돌실험등 지금까지 이론적인 탐구대상이 있을뿐이던 여러 물리적 현상들을 실험실에서 실현시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 그러므로 1970년도 중반부터 레이저 광압력을 써서 원자의 운동속도를 변화시키고, 원자

기체를 냉각시키고, 허공중에 가두어두는 일에 관련하여 이론적 분석과 실험이 여러 곳에서 활발히 수행되었다. 그 결과 원자가 레이저 광압력을 흡수하고 방출하면서 그 반동으로 받는 광압력과 그에 뒤따르는 양자요동효과를 잘 이해할 수 있는 이론적인 틀이 마련되었다<sup>[7,8,9]</sup>. 이를 바탕으로 레이저 광압력을 써서 나트륨 원자선 속을 집속 또는 발산시키는 실험<sup>[10,11]</sup>; 가속 또는 감속시키는 실험<sup>[12]</sup>; 원자기체를 냉각시키는 실험<sup>[13]</sup>이 수행되었다. 그리고 1986년 벨연구소의 A. Ashkin이 이끄는 연구진이 허공에 레이저 덩을 만들어 나트륨 원자를 가두어 두는데 성공했다<sup>[14]</sup>. 이 때의 원자기체의 평균온도는  $240(+200, -60)\mu\text{K}$ 였다. 뒤이어 비슷한 실험을 표준기술연구소(미)의 W. D. Phillips가 이끄는 연구진에서 수행하여 나트륨

원자기체의 온도가 약 25 $\mu$ K까지 내려가는 것을 확인했다<sup>[15,16]</sup>.

이 글에서는 레이저 광압력을 써서 원자기체를 냉각시키고, 허공에 가두어 두는 일과 관련된 이론과, 그것을 실현하는 실험방법에 대해 설명하고자 한다. 제2절에서는 두 준위 원자모형을 써서 원자가 빛을 흡수하고 방출할 때 받는 광압력을 종류와 그 특성을 설명한다. 제3절에서는 광압력을 써서 나트륨 원자선다발의 진행속도를 줄이고, 원자기체를 냉각시키고, 허공중에 붙잡아 두는 실험방법에 대해 설명한다. 제4절에서는 최근의 실험결과와 보다 정교한 광압력 이론에 대해 설명한다.

2. 두 준위원자가 받는 광압력과 그 특성  
[8.9.101]

원자는 주위에 적당한 진동수의 빛이 있으면 그것을 흡수하여 들뜬 상태에 있다가 다시 빛을 방출하고 바닥상태로 내려오는 일을 되풀이하며, 이 때마다 빛에 실린 운동량만큼의 충격을 받으므로 광압력을 느끼게 된다. 여기서는 진동수  $\omega_L$  파동벡터  $k$  인 레이저 광속의 경로안에 있는 원자를 생각하여 원자가 레이저 광을 흡수하고 방출함으로써 받는 광압력의 특성을 설명한다. 원자의 내부상태는 바닥상태와 들뜬상태 두 준위로 이루어져 있고, 두 상태의 에너지 차이는  $\hbar\omega_0$ , 들뜬상태의 평균수명은  $\tau = 1/\gamma$ 이다.

레이저광의 진동수  $\omega_L$ 이 원자의 고유진동수 (공명흡수선의 진동수)  $\omega_0$ 와 크게 다르지 않으면

바닥상태의 원자는 레이저광을 흡수하여 들뜬 상태로 올라가고 (유도흡수), 들뜬상태의 원자는 스스로 진동수  $\omega_0$ 인 빛을 방출하고 바닥상태로 내려가거나 (자발방출), 또는 원자 주위의 빛에 이끌려 진동수와 편광상태 그리고 전파벡터가 그와 똑같은 빛을 방출하고 바닥상태로 내려간다 (유도방출). 유도흡수와 유도방출되는 정도는 원자의 고유진동수  $\omega_0$ 와 레이저 광의 진동수  $\omega_L$ 의 차이  $\delta = \omega_L - \omega_0$ 와 들뜬상태의 평균수명  $1/\gamma$ 에 따라 달라진다. 레이저광이 너무 세지 않아 포화효과를 무시할 수 있을 때는 유도흡수 및 유도방출율은 로렌츠함수

$$g(\omega_L) = \frac{(\gamma/2)}{(\omega_L - \omega_0)^2 + (\frac{\gamma}{2})^2} \quad (1)$$

에 비례한다. 그러므로 레이저광의 진동수가 원자의 고유진동수와 똑같지 않아도 유도흡수 및 유도방출은 일어나는데 다만 진동수차이가 클수록 효율이 떨어진다.

진동수  $\omega_L$ 인 빛은 에너지가  $\hbar\omega_L/c = \hbar k$  단위로 양자화되어 있다. 빛에 실린 운동량의 방향은 빛의 진행방향이다. 원자가 빛을 흡수하면 들뜬상태가 되면서 아울러 빛의 진행방향으로  $\hbar k$ 만큼의 운동량을 전달받는다. 들뜬상태의 원자가 빛을 방출하면 방출되는 빛이 가져가는 운동량만큼을 잃는다. 자발방출되는 빛의 진행방향은 매번 제멋대로 바뀌고, 여러차례에 걸쳐 평균하면 사방으로 고르게 퍼져간다. 따라서 여러차례의 자발방출을 통해 원자가 평균적으로 받

는 운동량변화는 없다. 그러므로 원자가 레이저 광속 안에서 레이저 광을 흡수하고 자발방출하는 과정을 여러번 되풀이하면 원자는 레이저 광의 진행방향으로 힘을 받는데 이것을 산란력(scattering force)이라 한다. 들뜬상태의 원자가 빛을 유도방출할 때는, 주위의 빛과 같은 방향으로 빛이 방출되므로 원자가 받는 운동량은 주위의 빛에 실린 운동량과 크기는 같고 방향이 반대이다. 원자주위의 빛이 평면파로 방향과 진동수가 모두 같으면 원자가 빛을 흡수하고 유도방출함으로써 얻는 알속 운동량 변화는 없다. 레이저광속은, 광속의 속도에 대해 수직인 평면에서 보면 진폭이 가우시안수포로 분포되는데, 이것은 진행방향과 진폭, 위상이 다른 여러 평면파가 겹쳐진 것이다. 여기서 원자가 흡수한 빛과 유도방출을 시키는 빛의 진행방향이 다를 수 있고, 이 과정이 여러번 되풀이되어 원자가 받는 힘을 쌍극자력(dipole force)이라 한다. 쌍극자력은 분산특성이 있어서 빛이 강하지 않을 때, 빛의 진동수가 원자의 공명진동수보다 작으면 ( $\delta < 0$  : 붉은색 同調 : red-tuning) 쌍극자력의 방향은 빛이 더 밝은 쪽으로 원자를 끌어당기고, 원자의 공명진동수보다 크면 ( $\delta > 0$  : 푸른색 同調 : blue-tuning) 빛이 더 어두운 쪽으로 원자를 밀어낸다.

3. 레이저 광압력을 이용한 나트륨 원자의

냉각과 포획 [17]

이 절에서는 레이저 광압력을 써서 나트륨

( $\text{Na}^{19}$ , Sodium) 원자를 허공에 붙잡아두는 실험에 대해 설명하겠다. 실험에서 나트륨 원자를 많이 쓰는 까닭은 i) 이것의 공명흡수선 ( $3S_{1/2} \rightarrow 3P_{3/2}$ ) 파장이 589nm로 충분한 밝기의 빛을 색소레이저로부터 얻을 수 있고 ii) 들뜬상태의 자연수명이 16 nsec로 비교적 짧아 광압력을 효율적으로 줄 수 있으며 iii) 비교적 낮은 온도(1000K)에서 원자선다발을 만들어낼 수 있기 때문이다. 나트륨 원자의 바닥상태와 들뜬상태의 에너지 준위는 그림 1과 같다.

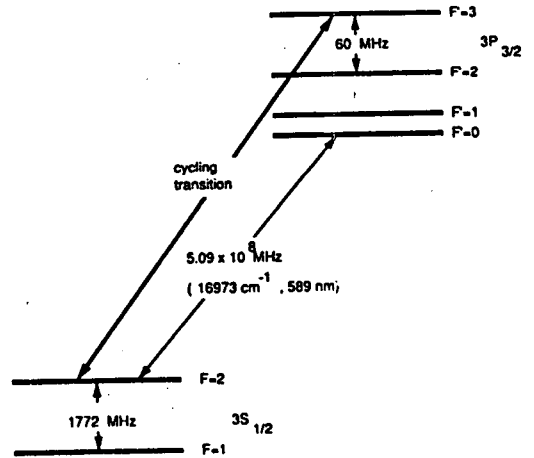


그림1. 나트륨( $\text{Na}^{19}$ ) 원자의 바닥상태( $3S_{1/2}$ )와 첫째 들뜬상태( $3P_{3/2}$ )의 미세구조와 에너지 준위

나트륨 원자를 허공에 붙잡아 두려면 먼저 진공상태에서 나트륨 금속을 녹여 끓여 원자선다발을 뽑아낸다. 이 뽑아낸 원자선다발의 진행

속력을 줄이고, 속력이 충분히 줄어들면 사방으로 흩어지는 열운동속도가 줄어들게 원자기체를 냉각시키며, 충분히 식은 원자들은 다른 곳으로 달아나지 못하게 허공에 붙잡아 두어야 하는데 이 모든 일들을 레이저 광압력을 써서 할 수 있다. 아래에서는 이 감속과 냉각 그리고 포획의 세가지 과정을 차례로 설명한다.

### 3.1 나트륨 원자선다발의 감속

나트륨 원자선다발을 만들려면 금속나트륨을 작은구멍 (지름 약  $100\mu\text{m}$ )이 난 밀폐된 그릇안에 넣고 진공에서 1000K 정도로 끓여 나트륨 증기가 그 구멍을 통해 가늘게 빠져나오게 한다. 구멍을 빠져나오는 원자들의 평균속력은  $v_0 = 1000\text{m/s}$ 이다. 이 원자선다발의 속력을 광압력을 써서 늦추려면, 원자선의 진행방향과 반대로 진행하는 레이저 광속을 원자선다발의 진행경로와 완전히 겹치도록 비추어준다. 나트륨 원자가 빛을 한번 공명흡수하고 자발방출하여 얻는 속도의 변화  $\Delta v = 3\text{cm/s}$  이므로 원자선다발의 운동이 거의 멈추게 되려면 각 원자  $N = v_0/\Delta v \approx 3 \times 10^4$ 개의 광양자를 산란시켜야 한다. 충분히 센 레이저 광속을 비추어주면 포화효과 때문에 원자가 바닥상태와 들뜬 상태에 있을 확률이 같아지므로 원자가 빛을 흡수한 뒤 빛을 자발방출하고 바닥상태로 되돌아 오는데 걸리는 시간은  $2\tau$ 가 된다. 그러므로 원자선 다발을 이루는 원자들이 산란력을 받아 거의 멈추게 되는데는 약 1msec가 걸리며, 원자들은 이동한 약 0.5m를 진행한다. 이동한

원자가 느끼는 평균가속도는  $a_{\text{max}} = 10^6\text{m/s}^2$ 에 이른다. 이 과정에서 원자선다발의 진행속도는 줄지만, 원자들이 빛을 자발방출할 때마다 진행 방향에 대해 수직방향의 속도성분은 커져서 진행속력이 없어질 때 쯤에는  $\delta v \approx \sqrt{N} \times \Delta v = 5\text{m/s}$ 에 이르므로 끝에가서는 원자들이 사방으로 느리게 퍼져간다.

원자선다발이 산란력을 받아 진행속력이 어둠에 따라서 원자들이 빛을 흡수하는 효율이 점점 떨어지는데, 그 까닭은 도플러 효과와 광펌핑 효과 때문이다.

도플러 효과 때문에 원자가 빛을 흡수하는 효율이 낮아지는 과정은 다음과 같다. 나트륨 원자의 흡수선폭은 10MHz이므로 원자가 느끼는 빛의 진동수가 공명흡수선에서 5MHz만 벗어나면 흡수효율은 반으로 줄어든다(식 1). 원자가 100개의 광양자를 산란시켜 진행속도가 3m/s만큼 변하면 도플러 이동은 5MHz 변하므로, 처음에는 원자가 공명흡수하던 빛이 그때는 흡수효율이 반으로 줄어든다. 원자가 빛을 산란시켜 진행속력이 줄어들수록 원자가 느끼는 빛의 진동수는 공명흡수선에서 더욱 멀어져 흡수효율은 더욱 낮아진다. 그러므로 원자선 다발의 진행속력의 변화가 10m/s도 안되어 원자는 산란력을 거의 받지 않게 된다.

광펌핑 효과는 나트륨원자의 바닥상태가 두겹으로 되어 1772MHz만큼 떨어져 있기 때문에 생긴다. 나트륨 원자의 흡수선폭은 10MHz이므로 바닥상태의 어느 하나에 있는 원자가 공명흡수되는

빛은 다른 하나에 있는 원자에는 거의 흡수되지 않는다. 보기를 들어 레이저 공속의 진동수를  $3S_{1/2}(F=2) \rightarrow 3P_{3/2}(F=3)$ 에 맞추어 두면 빛을 공명흡수하여 들뜬상태로 간 원자는 선택율  $\Delta F = \pm 1, 0$ 에 따라  $3S_{1/2}(F=2)$ 의 상태로 되돌아 오므로 다시 빛을 흡수·방출하여 산란력을 받을 수 있다. 그러나  $3S_{1/2}(F=2) \rightarrow 3P_{3/2}(F=2) \rightarrow 3S_{1/2}(F=1)$ 의 비공명흡수와 자발방출도 공명흡수의 수백분의 일의 비율로 생겨 원자들이 점점 더 많이  $3S_{1/2}(F=1)$ 상태에 모이게 되며, 이 원자들은 더 이상 빛을 흡수하지 않으므로 산란력을 받지 않는다.

원자선다발의 진행속력이 줄어들어 따라 도플러 이동이 변하여 빛을 흡수하는 효율이 낮아지는 것을 막는 방법으로 도플러 이동의 변화량만큼 레이저광의 진동수를 변화시키는 방법(Chirp cooling)과 제에만 효과 (Zeeman effect)를 써서 원자의 공명진동수를 바꾸어주는 방법 (Zeeman cooling)의 두가지가 있다.

Chirp cooling에서는 레이저광의 진동수 변화

율  $\frac{d\nu}{dt}$ 을 도플러 이동의 변화율에 맞추어야하므로

$$\frac{d\nu}{dt} = \frac{\nu}{c} \left( \frac{dv}{dt} \right) < a_{max} / \lambda = 1.55 \text{GHz/msec} \quad (2)$$

이다. 진동수 변화율이 1.55 GHz/msec보다 크면 원자의 진행속도 변화가 빛의 진동수변화를 따라가지 못하여 빛이 공명흡수되지 못한다. 진동수 변화율이 1.55GHz/msec 보다 작으면 원자의 감속율이 떨어진다.

Zeeman cooling에서는 도플러 이동의 변화량만큼 제에만 효과에 의해 원자의 공명진동수를 이동시켜야 하므로 원자선다발이 지나가는 경로에 불균일한 자기장을 걸어주어야 한다. 원자선다발의 진행속력을 일정한 비율  $a$ 로 감속시킨다면, 원자들의 도플러 이동의 변화량은 원자선다발의 경로상의 위치에 따라

$$\Delta\nu(z) = \frac{v(z)}{\lambda} = \frac{(v_0^2 - 2az)^{1/2}}{\lambda} = \frac{v_0}{\lambda} \left( 1 - \frac{2az}{v_0^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

이다. 제에만 효과는 자기장에 비례하므로 자기장의 분포  $B(z)$ 는

$$B(z) = B_0 \left( 1 - \frac{2az}{v_0^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

로 해주어야 한다. 여기서  $B_0$ 는 진행속도  $v_0$ 인 원자의 도플러 이동과 같은 크기로 제에만 효과에 의해 원자의 공명진동수를 키워주는 자기장에 세기이다.

Chirp cooling 법을 쓰면 장치가 덜 복잡해지지만, 냉각을 연속적으로 하지 못하고 레이저광의 진동수를 한번 변화시킬 때 한 뭉텅이씩만의 원자기체를 냉각시킬 수 있다. Zeeman cooling 법을 쓰면 원자냉각을 연속적으로 할 수 있으나 원자선다발이 나오는 경로 (약 50~100 cm)를 따라 자기장이 변화되도록 솔레노이드 코일을 준비해야 하는 거주장스러움이 있다.

광펌핑 효과를 막는 데는 두가지 방법이 있다. 하나는 진동수가 다른 두 레이저 광속을 함께 겹쳐 원자선 다발에 거슬러 보내는 방법이고 다른 하나는 원자의 상태가 바뀔 때 자기양자

수의 선택율을 따르는 것을 이용하는 방법이다.

진동수가 다른 두 레이저 광속을 함께 쓰는 방법의 이치는 아주 간단하다. 레이저 진동수를 하나는  $3S_{1/2}(F=2) \rightarrow 3P_{3/2}(F=3)$  천이진동수에 다른 하나는  $3S_{1/2}(F=1) \rightarrow 3P_{3/2}(F=2)$  천이진동수에 맞추어 두면 바닥상태의 나트륨 원자는 어느 미세준위에 있던 빛을 공명흡수하여 들뜬 상태로 올라간다.

자기양자수에 대한 선택율을 써서 광펌핑을 막으려면 원자선 다발의 진행방향에 나란히 자기장을 걸어주고(약 200 가우스정도)  $\sigma+$  원형편광된 레이저 광속을  $3S_{1/2}(F=2) \rightarrow 3P_{3/2}(F=3)$  천이진동수에 맞추어, 원자선 다발의 진행방향에 거슬러 비추어준다. 원자가 이 빛을 흡수하면 이 빛에 실린 각 운동량도 함께 전달받아 원자의 각 운동량이  $\hbar$  만큼 늘어난다. 따라서 원자는 빛을 흡수할 때는  $3S_{1/2}(F=2, m_F=2) \rightarrow 3P_{3/2}(F=3, m_F=3)$  천이만 하게 된다. 들뜬 상태의 원자가 빛을 방출하고 바닥상태로 내려오는데는  $\Delta m_F = \pm 1, 0$ 의 선택율에 따르므로  $3P_{3/2}(F=3, m_F=3) \rightarrow 3S_{1/2}(F=2, m_F=2)$ 의 천이만 이루어진다. 그러므로  $3S_{1/2}(F=2)$ 의 상태에 있던 나트륨 원자가 빛을 흡수, 방출하는 과정을 되풀이하여도  $3S_{1/2}(F=1)$  상태로는 펌핑되지 않는다.

### 3.2 나트륨 원자기체의 냉각

원자선 다발의 진행속력이 충분히 느려져, 진행방향에 수직인 속도성분의 크기와 비슷해지면 진

행속력을 더 줄이는 것은 별뜻이 없다. 이때는 모든 방향의 속도를 한꺼번에 줄여 원자기체를 냉각시켜야 하는데, 이것은 산탄력의 공명특성과 도플러 효과를 이용하여 이룰 수 있다. 이제 진동수  $\omega_L$ 이 원자의 공명흡수선  $\omega_0$  보다 조금 작은 ( $\delta < 0$ ) 레이저 광속 두 줄기가 왼쪽과 오른쪽으로 서로 반대방향으로 진행하여 완전히 겹쳐진다고 하자. 두 광속이 겹쳐진 공간 속에서 원자가 정지상태에 있다면 원자가 빛을 흡수하고 자발방출하는 정도는 두 빛 모두에 대해 같다. 따라서 원자가 두 레이저 광속으로부터 받는 산탄력의 크기는 같고 방향은 반대이므로 알속으로 받는 산탄력은 없다. 이 원자가 속력  $v$ 로 오른쪽으로 움직이면 도플러효과 때문에 원자가 느끼는 두 레이저 광속의 진동수가 달라진다. 왼쪽으로 진행하는 레이저 광의 진동수는 원자가 느끼기에는  $\omega_L + kv$ 가 되고, 오른쪽으로 진행하는 레이저 광의 진동수는 원자가 느끼기에는  $\omega_L - kv$ 가 된다.  $kv < |\delta|$ 이면 왼쪽으로 진행하는 레이저 광속은 원자의 흡수공명선에 더 가깝게 느껴지므로 원자가 정지해 있을 때 보다 더 잘 흡수되고, 오른쪽으로 진행하는 레이저 광속은 그 반대로 덜 흡수된다. 그러므로 원자의 운동에 거슬러 진행하는 레이저 광속의 산탄력이 나란히 진행하는 레이저 광속의 산탄력보다 더 세지고, 따라서 움직이는 원자는 운동방향에 반대방향으로 속도의 크기에 비례하는 저항력을 받아 속도가 줄어든다. 이것이 산탄력을 써서 원자기체의 열운동 속도를 줄이는 도플러 냉각법의 원리

이다. 세방향 속도성분 모두를 줄이려면, 원자 기체를 중심으로 여섯 줄기의 레이저 광속을 세 직교좌표축을 따라 서로 마주쳐 오도록 배열하고 레이저 광의 진동수는 원자의 공명흡수선 보다 조금 낮게 맞추어준다. 그러면 여섯줄기의 광속이 모두 겹치는 영역 안에 든 원자기체는 점점 열운동속도가 줄어 냉각된다.

들뜬상태의 원자가 빛을 자발방출하고 바닥상태로 내려올 때 빛이 방출되는 방향은 매번 제멋대로이다. 이 과정을 여러번 되풀이하는 원자가 받는 충격량의 평균값은 영이지만 매번 방향이 제멋대로 바뀌는 충격량을 받는 원자는 브라운 운동을 하여 시간이 지날수록 평균에너지가 점점 커진다. 다시말하면 원자가 빛을 자발방출하는 과정에서 원자의 운동량이 양자요동을 하여 원자기체가 점점 가열된다. 도플러 냉각법으로 원자기체를 냉각시킬 때 얻을 수 있는 가장 낮은 온도 (도플러 냉각 한계온도)는 바로 이 양자요동으로 생기는 가열과정과 도플러 냉각과정이 서로 균형을 이루는 점에서 다음과 같이 결정된다<sup>[8]</sup>.

$$k_B T_D \sim \frac{1}{2} \hbar \gamma \quad (5)$$

나트륨원자의 경우  $\gamma = 10\text{MHz}$ 이므로 도플러 냉각 한계온도( $T_D$ )는 약  $250\mu\text{K}$ 이고, 이때의 원자의 평균운동속도는  $60\text{cm/s}$ 이다.

### 3.3 레이저 광압력을 이용한 레이저 덫

충분히 냉각되어 느리게 움직이는 원자기체를

허공에 가두어 두는 방법에는 자기장을 쓰는 것<sup>[18]</sup>, 산탄력을 쓰는 것<sup>[19]</sup>, 쌍극자력을 쓰는 것<sup>[20]</sup> 등 여러가지가 있다. 이 가운데 가장 단순한 것은 쌍극자력을 쓰는 것이므로 이것을 설명하겠다.

2절에서 설명한 바와 같이 레이저 진동수를 원자의 공명흡수선보다 낮게 두면 쌍극자력은 빛이 더 밝은 쪽으로 원자를 끌어당긴다. 그러므로 한 줄기의 레이저광속을 그 초점이 냉각된 원자기체의 중심에 멧히도록 강하게 집중시키면, 쌍극자력에 의해 원자를 가두어둘 수 있는 덫이 초점부근에 만들어져 냉각된 원자들의 일부가 여기에 갇히게 된다. 그런데 이 덫에 갇힌 원자들은 빛을 흡수하고 방출할 때마다 운동량의 양자요동을 받아 운동에너지가 점차 커진다. 어느정도 시간이 지나 원자의 운동에너지가 덫을 이루는 포텐셜 장벽을 넘어서면 물이 끓어올라 그릇이 넘쳐나는것 처럼 덫을 빠져나간다. 양자요동에 의한 원자기체의 끓어오름을 줄이려면 레이저 덫을 이루는 빛을 원자가 덜 흡수하도록 하고, 아울러 양자요동을 받아 끓어오르는 원자기체를 계속 냉각시켜주어야 한다. 그러므로 레이저 덫은 기본적으로 두개의 구조 - 쌍극자력에 의해 원자를 가두어 두는 레이저덫과 끓어오르는 원자기체를 냉각시키는 레이저 광속들 - 로 이루어진다. 원자기체를 냉각시키는 데는 앞에서 설명한바와 같이 도플러 냉각법을 쓴다. 레이저 덫을 만드는 레이저 광속은 원자에 작용하는 쌍극자력은 충분히 크게하고, 산탄력은 될 수

있는데로 작게해야 하므로 아주 강하게 집중된, 출력이 높은(Na 원자에 대한 포화강도 10배이상) 레이저 광속을 쓰되 불필요한 산탄력과 양자요동을 줄이기 위해 빛의 진동수를 원자의 공명흡수선에서 멀리 벗어나게(Na 원자에 대해 약 650 GHz)한다.

#### 4. 최근의 실험과 이론

벨 연구소에서 나트륨 원자를 레이저 덩어리 가두어 두는데 성공한 뒤 표준기술연구소(미)에서도 비슷한 실험을 하여 측정된 나트륨 원자의 온도는 식(5)의 도플러 냉각 한계온도보다 훨씬 낮은 약 25 $\mu$ K이었다<sup>[15,16]</sup>. 또 이 온도는 원자를 냉각시키는 레이저의 출력과 편광상태에 따라 크게 달라졌다. 따라서 제2절에서 설명한 두 준위원자 모형을 쓴 광압력 이론이 불완전하며, 새로운 이론분석이 필요해졌다.

새 이론에서는 원자가 빛을 흡수하고 방출하는 과정을 좀더 정확히 분석하기 위해 다음과 같은 미묘한 점들을 고려하여 원자가 받는 광압력을 계산하였다<sup>[21,22]</sup>. 첫째 나트륨원자는 완전한 두 준위 원자로는 볼 수 없다. 특히 내부상태의 각 운동량 양자수에 따라 미세구조의 에너지준위가 조금씩 달라진다. 둘째 나트륨원자가 빛을 흡수·방출하며 미세구조 사이를 옮겨다니는 확률은 선택률( $\Delta m_j = 0, \pm 1$ )의 제한을 받으며, 빛의 편광상태에 따라 미세구조사이의 천이 확률이 달라진다. 셋째 레이저광이 아주 강한 곳에서는 빛의 전기장의 영향을 받아 원자의 에

너지 준위가 조금 변한다(dynamic Stark shift). 둘째 원자가 빛을 흡수하고 방출하여 내부상태가 바뀌는 데는 어느정도 시간이 걸린다(들뜬상태의 평균수명, 펌핑시간등...).

도플러 냉각법에서는 서로 반대로 진행되는 두 레이저 광속이 서로 간섭하여 정상파를 이루지 못하도록 그리고 바람직한 미세준위들 사이에만 천이가 이루어지도록 하기 위해 두 광속의 편광상태가 서로 직교하게( $\sigma+\sigma-$ )둔다. 그러면 두 광속이 간섭은 하지 않으므로 겹쳐진 곳의 밝기는 어느곳이든 같지만 편광상태는 파장을 주기로 하여 위치에 따라 달라진다. 이것을 편광구배(polarization gradient)가 생겼다고 한다. 이 편광구배때문에 원자의 내부상태의 미세준위는 각 운동량 양자수에 따라 dynamic Stark 이동량이 달라지고, 따라서 원자의 평형상태는 위치에 따라 달라진다. 원자의 내부상태가 바뀌려면 빛을 흡수하거나 방출해야 하므로 시간이 걸리며, 따라서 레이저 광속 안에서 움직이는 원자의 내부상태는 매 순간 원자가 있는 그 곳에서의 평형상태에서 벗어나 있다. 이 때문에 원자는 평형상태로 되돌아가려는 성향을 보이는데 이것을 非斷熱效果(nonadiabatic effect)라 한다. 편광구배와 비단열효과가 결합되어 원자의 열운동이 아주 효과적으로 감소되는 원자의 냉각과정을 편광구배냉각(polarization gradient cooling)과정이라 한다. 앞에서 말한 표준기술연구소(미)의 실험결과와는 이 냉각과정으로 정량적인 설명을 할 수 있다.



### 5. 맺음말

레이저 광압력을 써서 중성 원자의 운동속도를 조절하고 허공에 가두어 두는 일에 관한 이론과 실험방법에 대해 개괄적으로 설명하였다. 원자들을 거의 멈춰 있는채로 허공에 가두어 두면 우리는 원자들을 자유로운 상태에서 날날이 다룰 수 있다. 이 원자들을 이용하면 양자역학에서 가장 중요하고 기본적인 주제인 원자의 내부상태들의 에너지 준위들을 아주 정밀하게 잴 수 있을 것이고, 또 광양자를 흡수하고 방출하며 원자가 양자도약하는 것을 직접 볼 수 있을 것이다. 이러한 원자들을 많이 모아두면 극저온 기체의 여러 성질들도 알 수 있고, 원자들이 부딪칠 때 어떠한 내부상태의 변화가 일어나는지도 볼 수 있을 것이다. 이 실험에 관련된 이론적 바탕과 실험방법 및 기술들은 여러 물리학자들이 지난 20년간 노력한 결과 잘 정리되어 알려져 있다. 실험장치도 턱없이 복잡하거나 엄청난 비용이 드는것이 아니다. 우리도 가까운 시일안에 이일에 진지한 관심을 가진 사람들이 모여 이 실험을 수행하고, 새로운 현상을 밝혀내어 물리학계의 발전에 기여할 수 있게 되기를 바란다.

### 6. 참고문헌

1. A.Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, **24**, 156(1970)
2. A.Ashkin, J.M.Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.* **19**, 283 (1971).

3. T.Hansch, A.Schawlow, *Opt. Comm.* **13**, 68 (1975).
4. D.J.Wineland, H.Dehmelt, *Bull. Am. Phys. Soc.* **20**, 637 (1975).
5. A.Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 729 (1978).
6. A.Ashkin, J.P.Gordon, *Opt. Lett.* **4**, 16 (1979).
7. D.J.Winel, W.M.Itano, *Phys. Rev.* **A20**, 1521 (1979).
8. J.P.Gordon, A.Ashkin, *Phys. Rev.* **A21**, 1606 (1980).
9. R.J.Cook, *Phys. Rev. Lett* **A22**, 1078 (1980).
10. J. E. Bjorkholm, R.P.Freeman, A.Ashkin, D.B.Pearson, *Phys. Rev. Lett.* **41**, 1361 (1978).
11. D.B.Pearson, R.P.Freeman, J.E.Bjorkholm, A.Ashkin, *Appl. Phys. Lett.* **36**, 99(1980).
12. W. D.Phillips, H.J.Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 596 (1982).
13. S.Chu, L.Hollberg, J.E.Bjorkholm, A.Cable, A.Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 48 (1985).
14. S.Chu, J.E.Bjorkholm, A.Cable, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 314 (1986).
15. P. D. Lett, R.N.Watts, C.I.Westbrook, W.D.Phillips, P.L.Gould, H.J.Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 169 (1988).
16. P. D. Lett, W.D.Phillips, S.L.Rolston, C.E.Tanner, R.N.Watts, C.I.Westbrook, J.

- Opt. Soc. Am.* B6, 2084 (1989).
17. W. D. Phillips, J.V.Prodan, H.J.Metcalf,  
*J. Opt. Soc. Am.* B2, 1751 (1985).
18. A. Migdall, J. V.Prodan, W.D.Phillips,  
T.H.Bergman, H.J.Metcalf, *Phys. Rev. Lett.* 54, 2596 (1985).
19. E. L.Raab, M.Prentiss, A.Cable. S.Chu,  
D.E.Pritchard, *Phys. Rev. Lett.* 59, 2631  
(1987).
20. S.Chu, J.E.Bjorkholm, A.Ashkin, A.Cable,  
*Phys. Rev. Lett.* 57, 314 (1986).
21. J.Dalibard, C.Cohen-Tannoudju, *J. Opt. Soc. Am.* B2, 1707 (1985).
22. J.Dalibard, C.Cohen-Tannoudji, *J. Opt. Soc. Am.* B5, 2023 (1989).