



## 1. 서론 : 중성원자의 레이저 냉각 및 포획

원자물리학에서 원자를 들여다보기 위해서 사용하는 샘플은 전통적으로 다양한 형태의 셀에 담겨진 평형증기나 오븐에서 만들어진 원자 빔이었다. 이들 샘플이 갖는 문제점은 물론, 원자들이 가만히 있지 않고 정신없이 돌아다닌다는 점이다. 원자의 운동이 측정에 미치는 영향은 크게 두 가지이다. 하나는 운동속도에 따른 도플러 이동이고, 다른 하나는 측정시간이 제한된다는 점이다. 원자들이 모두 같은 속도로 움직이는 것이 아니기 때문에 도플러 이동은 각각의 원자가 모두 다른 공진주파수를 가짐을 의미하고, 제한된 측정시간은 불확정성의 원리에 의해서 분광학적 측정의 정밀성을 제한한다. 더 나아가 원자시계에서와 같이 극도의 정밀성과 정확성을 요하는 경우에는 원자의 운동에 따른 상대론적 시간지연이 문제가 되기도 한다.

속도를 낮추는 연구가 시도되었으나, 여기서 얻어진 경험들은 곧 원자를 냉각하고 포획하는 아이디어로 이어졌다. 즉, x, y, z 축을 따라 서로 반대방향으로 진행되는 세 쌍의 적색편이된 광선을 이용하면, 도플러 효과에 의해서 원자가 항상 운동에 반대되는 방향으로 힘을 받도록 해 줄 수 있다. 이를 광학적 당밀이라고 하며, 마치 송진 속의 개미가 어느 방향으로 이동하더라도 끈적끈적한 송진 때문에 그 운동이 방해받는 것과 비슷한 상황이다. 여기에 적절한 형태의 자기장 기울기를 주고, 세 쌍의 적색편이된 광선의 편광을 조절하면, 원자의 속도에 반대 방향으로 작용하는 힘과 함께, 원자의 위치에 의존하는 힘을 구현할 수 있다. 즉, 냉각과 포획을 동시에 이룰 수 있다. 이런 장치를 자기광 포획 장치라고 하면, 원자의 냉각과 포획에서 가장 중요한 도구로 자리 잡았다. 그림 1a에는 자기광 포획 장치에서 자기장과 빛의 편광 배치도를 보여주며 원자는 그림

# 특집 | 양자광학 특집

## 포획된 원자에서 양자 중첩을 이용한 양자광학 연구

윤태현\*, 조동현\*

이런 문제점을 극복하고, 정지 상태에서 한곳에 오래 머물러 있는 원자샘플을 구현하고자 하는 노력이 80년대 중반부터 시작되었다. 즉, 원자를 냉각하고 포획하려는 연구가 시작되었다. 원자를 냉각하고 포획하려면 결국 원자에 힘을 가해야 하며, 이때 사용되는 도구는 전기장, 자기장 혹은 빛이다. 이중 빛의 흡수와 자발방출 과정에서 원자에 전달되는 광압은 가장 효과적으로 힘을 전달하는 방법이다. 특히 원자의 공진조건을 만족하는 빛을 이용하면, 중력가속도의 수만 배에 해당하는 가속도로 원자를 정지시킬 수 있다. 이는 웬만한 원자의 경우, 수 cm의 짧은 거리에서 원자를 정지시킬 수 있음을 의미한다. 처음에는 오븐에서 나오는 원자빔에 광선을 맞조사함으로써 원자빔의

1(b)에서 볼 수 있듯이 장치의 중심에 포획된다[1,2,3].

한편 원자가 전기장 혹은 자기장 안에 있을 때에는 각각 Stark 효과와 Zeeman 효과에 의한 에너지 이동을 겪는다. 전자기파인 빛을 쬐어주면 진동하는 전기장이 소위 ac Stark 효과를 주며, 빛의 주파수가 원자의 공진주파수에 가까우면 이 효과는 매우 커질 수 있다. 혹은 원자물리학자들이 가장 많이 연구하는 알칼리금속원자는 한 개의 부대전자를 가지고 있으며, Bohr magneton에 해당하는 정도의 자기쌍극자 모멘트를 갖는다. 자기장과 이 모멘트의 상호작용이 비교적 큰 Zeeman 이동을 준다. 만약 이와 같은 Stark 혹은 Zeeman 이동을 주는 빛이나 자기장의 세기가 공간적으로 변한다면, 그 에너지 이동이 공간적으로

\* 고려대학교 물리학과

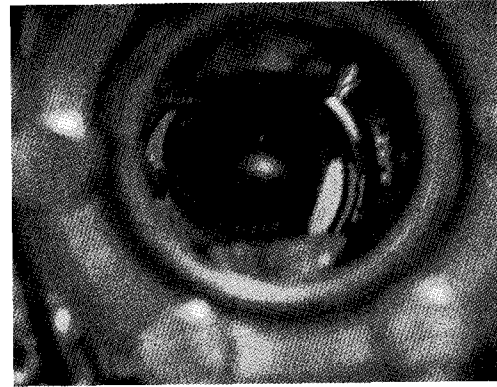
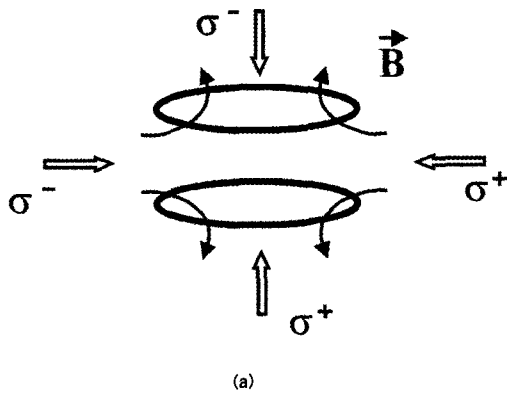


그림 1. (a) 원자의 자기광 포획 장치에서 자기장과 빛의 편광 배치도. (b) 자기광 포획된  $10^6$ 개의 이터비움 원자에서 발생하는 형광 사진 (4).

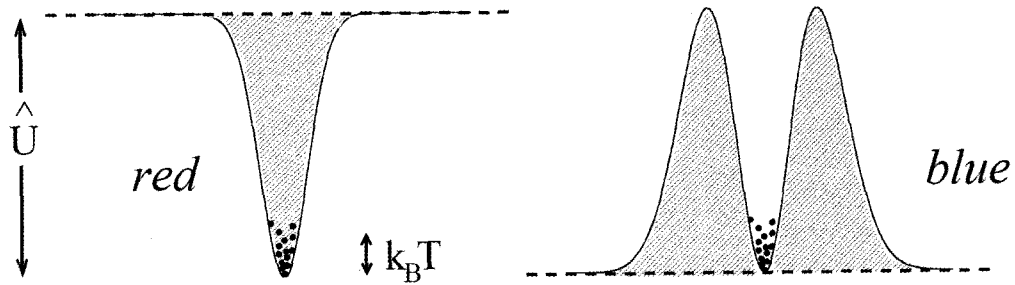


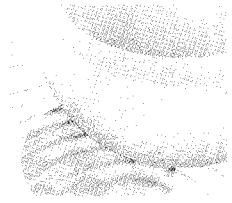
그림 2. 적색 편이된 광 포텐셜 우물과 청색 편이된 광 포텐셜 우물에 포획되는 원자들 (5).

변하며, 원자들은 이동된 에너지가 최소가 되는 곳으로 힘을 받을 것이다. 이를 이용한 것이 광포획과 자기장포획이다. 특히 광포획에서는 공진주파수에서 기급적 멀리 떨어진 주파수의 광선을 이용함으로써, 실제 광자의 흡수를 제한한 상태에서 그림 2와 같이 거의 보존적인 퍼텐셜우물을 제공할 수 있다. 이는 포획된 원자를 이용한 분광학이나 원자광학 연구에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 우리는 원자를 한 곳에 가두어 두기 위해서 뭔가 힘을 가해야 하지만, 그 힘 때문에 원자의 기본성질이 많이 훼손된다면, 이 또한 문제가 될 것이기 때문이다. 한편 자기장 기술을 이용한 자기장 포획은, 비록 분광학을 위한 샘플을 제공하기에는 적절하지 못하지만, 광선 없이 원자를 포획할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 광선의 존재는 처음 원자의 운동을 길들일 때에는 효과적이지만, 일단 낮은 온도로 냉각되고 높은 밀도로 포획된 원자샘플에는 섭동으로 작용한다. 이런 장점 때문에 원자를 이용한 보즈-아인슈타인 응집현상은 자기장 포획에서 처음 실현되었다.

이상에서 정리한 원자의 냉각 및 포획연구는 원자물리학과 인접학문 분야에 새로운 방법론, 샘플 및 개념을 제공하면서 지대한 영향을 미쳤다. 1997년에 S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, 그리고 W. Phillips 세 사람이 원자의 냉각 및 포획의 연구를 개척한 공로로 노벨 물리학상을 받았으며(1,2,3), 2001년에는 1995년 실현된 보즈-아인슈타인 응집 연구로 E. Cornell, W. Ketterle, 그리고 C. Wieman이 노벨 물리학상을 수상했다(6,7). 이제 이 분야의 연구는 이들이 제공한 샘플을 이용한 초정밀분광학, 양자광학 연구 그리고 분자를 대상으로 하는 연구로 그 지평을 넓혀가고 있다.

## 2. 극저온 원자를 이용한 양자광학 연구

원자의 냉각과 포획연구의 가장 중요한 동기가 분광학 측정의 정밀성 제고임은 이미 이야기했다. 냉각된 원자 샘플



풀이 구현되면서 다양한 형태의 새로운 분광학적 시도가 이루어 졌다. 가장 대표적인 예는 분수형 원자시계이다. 시간의 표준은 세슘원자 바닥상태의 9.2 GHz 초미세구조 전이주파수에 의해서 제공되며, 기존의 원자빔 형태의 원자시계가 냉각 및 포획된 원자를 이용한 분수형으로 개선되면서, 그 정밀도가 10배 이상 개선되었다. 이와 함께 광주파수 표준을 위한 새로운 시도들이 진행되고 있으며, 이에 대한 논의는 다음 절에서 자세히 하겠다. 그러나 냉각되고 포획된 원자 샘플의 응용이 정밀 분광학 측정에만 국한된 것은 아니다. 원자와 광자의 상호작용을 근본적인 수준에서 연구하는 양자광학, 원자의 양자적 간섭현상을 이용한 광선의 속도, 편광 조절연구, 그리고 최근에는 보즈-아인슈타인 응집된 원자를 이용한 원자물리학과 응집물리학의 경계분야에서의 연구 등이 모두 극저온 원자를 효과적으로 이용하고 있다.

양자광학에서 가장 기본 되는 시스템은 한 개의 이준위 원자와 이와 공진적으로 상호작용하는 단일모드의 광자이다. 이준위 원자는 알칼리금속원자의 사이클링 전이선과 같은 적절한 상황을 선택해서 구현할 수 있으며, 단일모드의 광자는 페브리-페로 공진기와 같은 광공진기에 의해서 정의된다. 공진기 내부에서 일어나는 전자기적 현상이기 때문에 이 분야의 연구를 cavity quantum electrodynamics라고 부르기도 한다. 이 분야의 연구자들은 그 동안 이를 이용해서 단원자 메이저 및 레이저 등 여러 근본적인 시스템을 연구해 왔다. 기존 연구에서는 단원자 상태를 이루기 위해서 매우 약한 원자빔을 공진기를 향해서 보내 줌으로써, 평균적으로 단 한 개의 원자가 공진기 내부

에 머무르도록 했다. 원자의 냉각과 포획기술을 이용하면, 한 개의 원자를 공진기 내부에 포획한 상태에서 오랜 동안 관측할 수 있으며, 이는 이 분야 연구에 새로운 활력을 불어 넣었다.

양자광학 분야에서 또 하나의 중요한 연구방향은 레이저 광선이 가지고 있는 결맞음성을 원자에 실어줌으로써, 원자로 구성된 매질 전체가 양자적 간섭성을 갖는 흥미로운 상황을 들여다보는 것이다. 이 분야의 연구는 electromagnetically induced transparency(EIT)라는 이름으로 알려져 있다. 원자 매질에서는 공진주파수 근처에서 심한 분산효과와 함께 여러 가지 흥미로운 일들이 일어난다. 문제는 공진주파수 근처에서는 광선의 흡수 또한 최고조에 달해, 이런 흥미로운 현상을 이용하거나 관측할 수 없다는 점이다. EIT 현상을 이용하면, 공진상태 광선의 투과도를 거의 100 %까지 끌어올리거나, 매질을 통과하는 광선의 속도를 획기적으로 낮추거나, 아예 정지시킬 수 있으며, 밀도반전 없이 레이저를 만들 수 있는 가능성이 있다. 이 분야 연구에서는 주로 평형증기압 형태의 증기셀을 샘플로 이용해 왔으나, 극저온 고밀도의 원자샘플을 이용함으로써 보다 이상적인 상황에서 흥미로운 현상들을 연구할 수 있게 되었다. 대표적인 예 중 하나가, 보즈-아인슈타인 응집된 소듐 원자를 이용한 광선의 정지실험이다. 이들 실험에서 중요한 변수는 굴절률에 매질의 길이를 곱한 양이다. 굴절률은 원자의 밀도에 비례하기 때문에 보즈-아인슈타인 응집된 원자샘플이 비록 비교적 작은 수의 원자를 품고 있지만, 높은 밀도 때문에 그 효과는 매우 뚜렷하다. 그리고 원자들이 정지 상태에 있으며, 결맞음성을 깬

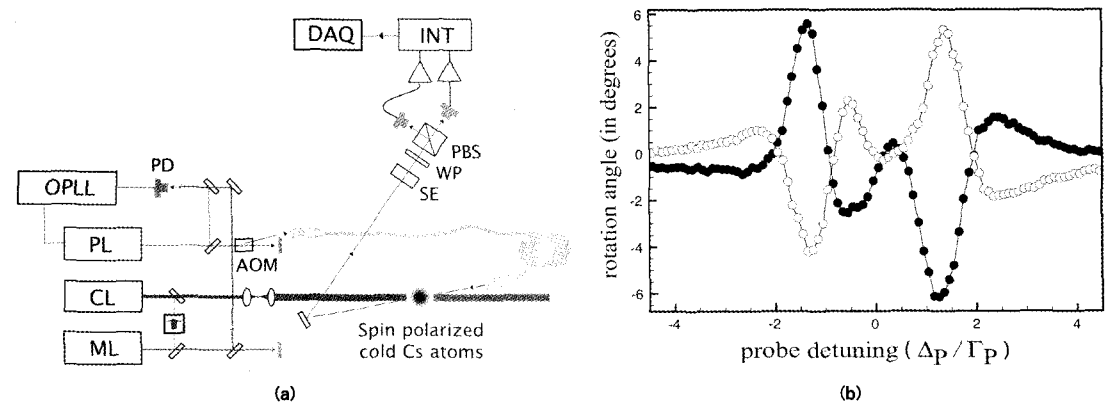


그림 3. (a) 레이저 분광학 연구실에서 연구한 스핀 편광된 저온 세슘 원자를 이용한 광 페러데이 효과 발생 실험 장치 및 (b) 결합광 편광에 따른 조사광의 편광 회전각도 (9).

수 있는 원자 간의 충돌이 억제되어 있는 상황이 실험의 성공에 결정적인 역할을 했다. 이와 관련해서 고려대학교 레이저분광학 연구실에서는 최근 냉각 및 포획된 원자 샘플에 광펌핑을 가해 정지 상태이며 스핀이 정렬된 샘플을 구현해, 이런 매질에서 진행광선의 편광이 매질의 가간섭성으로부터 어떤 영향을 받는가에 대한 일련의 연구를 수행한 바 있다(8,9).

보즈-아인슈타인 응집된 원자 샘플은 극저온, 고밀도이면서 또한 물질과의 결맞음성을 가지고 있는 새로운 매질로, 지난 10년동안 여러 새로운 현상을 구현하는 흥미로운 재료가 되었다. 회전 운동하는 샘플에서 와동현상이 관측됨으로써 초유체임이 확인되었고, 원자의 물질파적 파동간의 비선형 상호작용 현상이 관측되기도 했다. 최근에 들어서는 이들 샘플을 간섭광선에 의해 만들어진 광격자에 담음으로써, 응집물질의 결정구조와 같은 상황을 인위적으로 만들 수 있게 되었다. 예를 들어 광격자를 구성하는 광선의 세기를 조절함으로써, 원자의 구속정도를 조절할 수 있으며, 이런 조절을 통해서 원자 샘플의 초유체에서 Mott 부도체로의 상전이 현상을 관측할 수 있었다. 이와 같은 광격자가 갖는 특성은 결함이 없는 완벽한 격자이며, 그 물리적 변수를 비교적 자유로이 변화시킬 수 있다는 점이다. 이런 계를 이용한 다양한 연구가 진행되면서, 원자물리학과 응집물리간의 경계에 위치한 새로운 학문분야가 열리고 있다(6,7).

### 3. 펨토초 모드락 레이저 위상 동기 된 광주파수 빔

2절과는 약간 다른 각도에서 고려대학교 레이저물리 연구실에서 진행 중인 양자광학 연구를 소개하고자 한다. 2005년도 노벨 물리학상은 양자광학 특히 양자역학적 원리에 기반 한 빛의 양자상태와 단일 광자 수준에서 양자측정 원리를 정립한 미국의 클라우버 교수 이외에 양자광학이 제한하는 양자측정 한계까지 빛(광)의 주파수를 정밀 측정하는 데 공헌한 2명의 물리학자들에게 돌아갔다. 이들은 미국 질라(JILA) 연구소의 존 홀 교수와 독일 막스 플랑크 양자광학연구소(MPQ)의 테오도어 헨취 교수이며, 이들은 레이저를 이용한 고분해 레이저 분광법, 특히 광주파수를 양자잡음 한계까지 측정할 수 있는 광주파수

빔의 원리와 장치를 개발하였다. 이제 광주파수의 절대 값은 현대 과학의 모든 측정기술 중에서 가장 높은 측정 분해능과 측정 정확도 때문에 기초 물리학은 물론 국제 측정 표준의 핵심 결정체인 국제단위계의 발전에 가장 중추적 역할을 하고 있다. 이러한 광주파수의 응용 기술은 레이저가 개발된 1960년 이래로 좁은 선폭을 가지며 주파수를 연속적으로 가변시킬 수 있는 가시광 레이저의 탄생과 이를 이용한 고분해 레이저 분광학의 지속적인 발전을 가져왔다. 최근에는  $5 \times 10^4$  Hz 정도의 주파수를 가지는 가시광선 레이저의 주파수를 1 Hz 이하로 안정화시켜서 대략  $10^5$  오더의 동적 분해능을 가지게 되었다. 이들의 노력에 의해 현재 도플러 확대가 제거된 포획된 원자의 2준위 흡수선의 중앙에 레이저의 주파수를  $10^{15}$  이상의 안정도로 안정화할 수 있게 되었다.

위에서 언급한 광주파수 표준기 연구에서 남은 한 가지 과제는 과연 수백 THz의 높은 주파수를 가지는 광주파수, 즉 원자 전이선의 중심 주파수 값에 안정화된 레이저 주파수의 실시간 절대 측정에 있었다. 이 문제는 2005년도에 노벨 물리학상이 주어진 것에서 알 수 있듯이 가장 어려운 물리학 실험의 난제 중의 하나가 해결되었음을 의미한다. 이것은 물리학에서 에너지-시간 불확정성 원리에 의해 완전히 다른 분야로 인식되어 독립적으로 발전했던 초고분해 레이저 분광학 기술과 극초단 펄스 레이저 발생 기술이 하나로 융합된 광주파수 빔 기술에 의해 가능하게 되었다.

만약, 펨토초 모드락 레이저에서 레이저 펄스의 공진기 왕복시간  $\tau$  보다 수 펨토초 폭을 갖는 레이저 펄스 열을 발생시킨다면, 푸리에 변환에 의해 주파수 공간에서는 펄스폭의 역수로 주어지는 광대역 스펙트럼 내에 일정한 주파수 간격  $f_r = 1/\tau$ 을 가지는 불연속 스펙트럼, 즉 광주파수 빔 스펙트럼을 갖게 된다. 여기서 연속적으로 발생하는 주기적인 펄스 간격은 주파수 공간에서 주기적인 광주파수 빔의 주파수 간격을 결정하고 단일 펄스폭은 대략 발생한 광주파수 빔의 전체 스펙트럼 폭을 결정한다. 그러나 이때, 레이저 펄스폭이 펨토초에 가까이 되면 각 펄스의 세기 포락선(그림 4의 아래 그림에서 점선)안에 전자기파의 진동이 대략 10개 이하로 되기 때문에 진폭을 결정하는 펄스모양과 실제 전자기파의 진동위상이 각 펄스마다 다르게 된다. 이는 공진기 내에서 진행되는 광 펄스의 위상 속도와 그룹속도가 다르기 때문이다. 이러한 영향은 그림 4의 아래 그림에서 알 수 있는 것과 같이 인접한 펄스 간

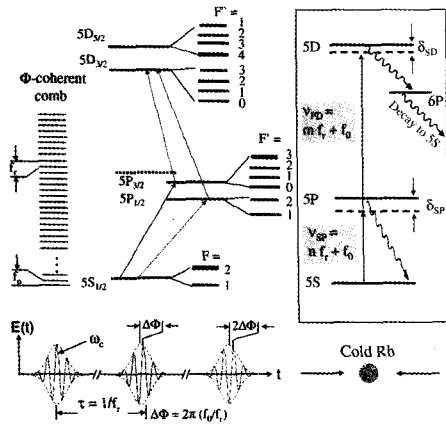


그림 4. (위) 5S-5D 이 광자 전이에 참여하는 포획된 <sup>87</sup>Rb 원자의 에너지 준위 구조와 주파수 공간에서의 광주파수 빛 스펙트럼. (아래) 펄스 간격  $\tau = 1/f_i$  및 펄스 간 위상차  $\Delta\phi = 2\pi(f_0/f_i)$ 를 가진 모드록 레이저 펄스의 시간 공간에서의 표현. (오른쪽) 직접 광주파수 빛 분광법에서 광주파수 빛에 의한 이 광자 전이의 구체적 모델. [12,13]

의 위상 차  $\Delta\phi$ 를 발생시키게 된다. 반면, 주파수 공간에서는 그림 4의 왼쪽 그림과 같이 펄스간의 위상차가 모든 광주파수 빛 성분의 주파수 편이  $f_0$ 를 공통적으로 주게 되는데, 이때  $\Delta\phi = 2\pi f_i/f_0$ 의 관계가 성립한다. 이러한 간단한 이론 관계식에서 우리는 어떻게 주파수 공간에서  $f_i$ 과  $f_0$ 를 측정하고 제어함으로써 광주파수 빛의 모든 광주파수 성분을 제어할 수 있고, 반대로 동시에 시간 공간에서 펄스 간격 와 위상 편이를 제어할 수 있는지 이해할 수 있다. 이러한 홀과 헨시의 광주파수 빛 방법에서 중요한 것은 주파수 공간에서  $f_i$ 과  $f_0$  모두 현재 가장 발달한 전자기술로 측정과 제어가 가능한 마이크로파 영역의 (수백 MHz) 주파수 값을 가지므로  $f_i$ 과  $f_0$ 를 세습 주파수 표준기를 이용

하여 쉽게 안정화시킬 수 있다는 점이다. 이렇게 함으로써 펄스 초 모드록 레이저에서 발생한 모든 광주파수 빛 성분의 주파수를 간단히 세습 주파수 표준기에 위상 잠금(안정화)시킬 수 있으며, 수백 THz의 주파수를 가지는 광주파수 빛의 n번째 성분의 주파수는  $f_n = nf_i + f_0$  (n은 정수로 대략  $10^6$ )의 간단한 식으로 표현됨을 알 수 있다. 따라서 시간 공간에서는  $f_i$ 가 안정됨으로써 펄스 간격이 안정화되고,  $f_0$ 가 안정화됨으로써 펄스간의 위상차가 안정화됨을 알 수 있다. 이로써 위상 안정화된 펄스초 모드록 레이저는 시간 공간 및 주파수 공간에서 절대적인 “시간 및 주파수 측정용 자”로 쓰일 수 있게 되었다. [10,11]

#### 4. 원자의 양자 중첩을 이용한 광격자 시계

앞으로 새로운 광주파수 빛 기술을 이용하면 현재 가장 정확한 주파수 측정 표준기인 세습 원자시계보다 약 100 배 더 정확하고 광주파수 영역에서 동작하는 광격자 시계를 개발할 수 있을 것이다. 따라서 앞으로는 국제 단위계에서 길이 및 시간 단위의 실현을 더 높은 정확도를 가진 하나의 광시계로부터 구현 할 수 있을 것으로 예상하고 있다. 레이저 물리 연구실에서는 이터비움 원자의 578 nm  $^1S_0 - ^3P_0$  2준위 원자 간섭 신호를 Stark 편이 없는 759.2 nm 광격자에 포획한 후 광격자 시계를 개발하는 연구를 진행하고 있다. 그림 5(a)는 레이저 물리 연구실에서 제작한 Zeeman 감속기를 이용한 이터비움 원자의 중속도 조절장치를 보여주며, (b)에서는 Yb 원자빔에서 관측된

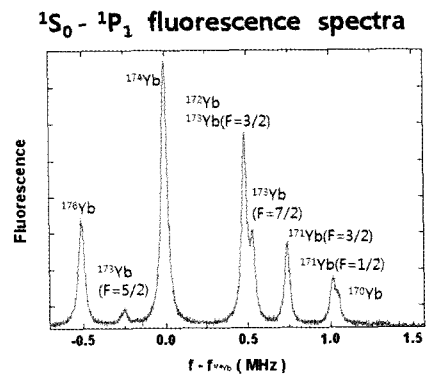
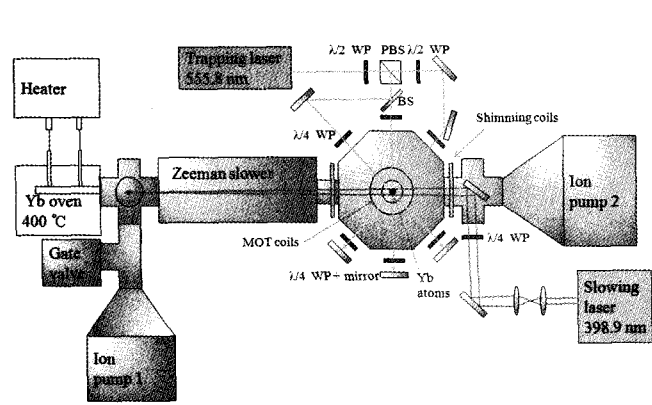


그림 5. (a) 레이저 물리 연구실에서 Yb 광격자 시계 연구를 위한 Yb 원자 감속기 및 2차 포획장치와 (b) Yb 원자빔에서 관측된 388.9 nm Yb 원자의  $^1S_0 - ^3P_1$  형광신호.

398.9 nm Yb 원자의  $^1S_0 - ^1P_1$  형광신호를 보여준다. 이러한 새로운 광격자 시계를 개발하기 위해서는 원자 간섭을 이용하여 이터비움 원자의 578 nm  $^1S_0 - ^3P_0$  2준위 원자 간섭 신호를 검출하고 펄토초 모드룩 레이저를 이용하여 마이크로파와 위상 가간섭적으로 연결이 되어야 한다.

고분해 레이저 분광학은 2절에서 설명하였듯이 원자의 속도를 절대적으로 줄여서 레이저 냉각 및 포획된 원자 샘플을 만들고 긴 시간동안 원자와 빛과의 상호작용 시킴으로써 가능하게 되며 양자광학의 발달에 지대한 영향을 미치고 있다. 그런데 이러한 고분해 레이저를 이용해 원자의 좁은 흡수 또는 형광 분광신호를 검출하기 위해서는 스펙트럼 선폰이 매우 작고 (기술적으로 1 Hz 정도의 선폰 축소가 현재의 한계임) 수 Hz의 주파수 분해능을 가지고 주파수를 변화시킬 수 있는 레이저가 필수적으로 요구된다. 따라서 극초단 펄스 레이저는 에너지-시간 불확정성 원리에 의해 넓은 스펙트럼을 가지고 있으므로 고분해 레이저 분광학에 응용할 수 없었다. 그러나 3절에서 소개한 위상 안정화된 불연속 스펙트럼을 갖는 펄토초 모드룩 레이저를 이용하면 극초단 펄스 레이저만을 이용하여 초고분해 레이저 분광 신호를 검출할 수 있다. 특히, 이 방법으로 측정된 분광선의 중심 주파수의 절대 주파수 값을 세습 주파수 표준기로 분광신호 검출과 동시에 측정 가능하여 "광주파수 빔 직접 분광법"이라는 새로운 고분해 분광법이 최근에 대두되었다. 그 기본 원리는 그림 4에 설명되어 있는 것처럼 Yoon 등이 2000년도 발표한 논문에서 처음 제안하였고[12], 2004년도에 포획된 루비듐 원자를 이용한 실험 결과가 처음으로 발표 되어 직접 주파수 빔 분광법이 널리 사용할 수 있게 검증되었다.[13]

그림 4에는 참고 문헌[12,13]의 실험에 사용한 직접 주파수 빔 분광법의 원리를 보여준다. 그림 4의 왼쪽 및 오른쪽 그림에서 알 수 있는 것처럼, 위상 안정화된 펄토초 모드룩 레이저는 가시광 영역에서 불연속적인 스펙트럼 빔을 가지고 있으며, 각 광주파수 빔의 주파수 선폰은 주파수 안정화된 연속 발진 레이저와 같이 3절의 위상 안정화 법으로 수 Hz 이내로 만들 수 있다. 또한 레이저의 반복을  $f_0$ 를 가변시켜 광범위하게 광주파수를 변화시킬 수 있고,  $f_0$ 를 변화시켜 좁은 영역에서 미세 가변 할 수 있다. 즉, 직접 주파수 빔 분광법에서는  $f_0$ 와  $f_0$ 가 세습 주파수 표준기로 주파수와 위상이 안정화 되고 이들을 외부 신호 발생기를 이용하여 각각 독립적으로 정밀하게 가변 할 수 있

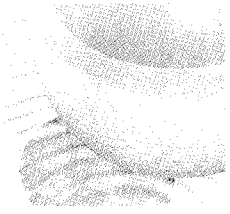
다. 따라서 n번째 광주파수  $f_n = nf_0 + f_0$ 를 우리가 분광하려는 원자의 단 광자 전이선 또는 그림 4처럼 이 광자 전이선의 공명주파수 근처에서 정밀하게 변화시켜 연속 발진 레이저와 같은 수준의 고분해 분광 신호를 검출 할 수 있다. 특히, 이 광자 전이의 경우 이 서로 다른 결맞음 성을 가진 여러 가지 광주파수 빔 성분들이 에너지 보존 법칙을 만족하면서 이 광자전이에 참여하게 되어 높은 신호 감도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 여기서 연속 발진 레이저에서와 같이 1 Hz의 주파수 분해능을 얻기 위해서 1초 정도의 상호작용 시간을 필요로 한다. 한편 직접 광주파수 빔 분광법에서는 모든 광주파수 빔들의 주파수를 실시간 적으로 알 수 있기 때문에 기존의 어떤 고분해 레이저 분광법보다 광주파수 절대 측정에 있어서 뛰어난 장점을 가지고 있다고 하겠다. 이러한 새로운 직접 광주파수 빔 분광법은 앞으로 기본 국제단위계 중에서 가장 실현 정확도가 높은 미터와 시간 주파수 표준기로 사용할 수 있는 광시계의 개발이나, 수소 원자를 이용한 리드베리 상수, 미세구조 상수 측정등과 같은 정밀 광주파수 측정에 있어서 높은 측정 정확도의 향상을 가져올 것으로 기대를 모으고 있다.

## 5. 앞으로의 전망

이상에서 우리는 고려대학교 물리학과 레이저 분광학 실험실과 레이저 물리 실험실에서 진행 중인 포획된 원자에서 양자 중첩을 이용한 양자광학 연구를 살펴보았다. 우리가 관심 있는 2준위 원자의 양자 중첩 상태는 다음과 같이 일반적으로 쓸 수 있다.

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + e^{i\phi}|1\rangle),$$

여기에서  $|0\rangle$ 과  $|1\rangle$ 은 각각 바닥 상태와 여기상태를 나타내는 데 이들의 에너지는 알칼리 원자의 경우 수 GHz, 이터비움 원자의 경우 수백 THz 떨어져 있다. 포획된 원자에서는 두 원자 상태  $|0\rangle$ 과  $|1\rangle$ 의 가간섭 시간을 수 초 ~ 수십 초 까지 유지할 수 있게 되었으며, 양자 간섭을 일으키는 레이저 또한 수초의 가간섭 시간을 갖도록 만들 수 있게 되었다. 또한 원자의 양자 중첩상태 위상  $\phi$ 를 간섭성이 뛰어난 레이저를 이용하여 조절함으로써 다양한 양자광학 실험을 포획된 중성 원자를 가지고 할 수 있게 되



었다. 현재 두 실험실에서는 포획된 중성 원자와 양자 중첩 상태를 이용한 양자광학 연구의 일환으로 포획된 세슘 원자, 루비듐 원자 및 이터비움 원자를 이용해서 마이크로 파 및 가시광 영역에서 양자광학 원리를 따르는 능동 오실레이터를 만드는 실험이 진행 중이다.

## 참고문헌

- (1) S. Chu, The manipulation of neutral particles, Rev. Mod. Phys. 70, 685(1998).
- (2) C. N. Cohen-Tannoudji, Manipulating atoms with photons, Rev. Mod. Phys. 70, 707(1998).
- (3) W. D. Phillips, Laser cooling and trapping of neutral atoms, Rev. Mod. Phys. 70, 721(1998).
- (4) C. Y. Park and T. H. Toon, Efficient magneto-optical trapping of Yb atoms with a violet laser diode, Phys. Rev. A 68, 055401(2003).
- (5) R. Grimm and M. Weidemüller, Optical dipole traps for neutral atoms, Adv. At. Mol. Opt. Phys. 42, 95(2000).
- (6) E. A. Cornell and C. E. Wieman, Bose-Einstein condensation in a dilute gas, the first 70 years and some recent experiments, Rev. Mod. Phys. 74, 875(1998).
- (7) W. Ketterle, When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser, 74, 1131(1998).
- (8) S. K. Lee, J. J. Kim, and D. Cho, Transformable optical dipole trap using a phase-modulated standing wave, Phys. Rev. A 74, 063401(2006).
- (9) J. M. Choi, J. M. Kim, Q-H. Park, and D. Cho, Optically induced Faraday effect in a configuration of spin-polarized cold cesium atoms, Phys. Rev. 75, 013815(2007).
- (10) J. L. Hall, Defining and measuring optical frequencies, Rev. Mod. Phys. 78, 1279(2006).
- (11) T. Hänsch, Passion for precision, Rev. Mod. Phys. 78, 1297(2006).
- (12) T. H. Yoon, A. Marian, J. L. Hall, and J. Ye, Phase-coherent multilevel two-photon transitions in cold Rb atoms: Ultrahigh-resolution spectroscopy via frequency-stabilized femtosecond laser, Phys. Rev. A 63, 011402(R)(2001).
- (13) A. Marian, M. C. Stowe, J. R. Lawall, D. Felinto, J. Ye, United Time-Frequency Spectroscopy for Dynamics and Global Structure, Science 306, 2063(2004).

## 약 력

### 윤태현

#### 경력

1999년 양자광학 전공으로 KAIST에서 박사학위를 받고 2000~2001년 미국 질라(JILA)연구소에서 박사후연구원으로 일하면서 홀 교수와 함께 광주파수 빔을 이용한 레이저 주파수 절대 측정을 공동 연구했다. 귀국 후 한국표준과학연구원 책임연구원으로 일하면서 과학기술부 창의사업단 '광주파수 제어 연구단' 단장으로 이터비움 광 격자 시계 연구를 수행하였다. 2005년 3월부터는 고려대 물리학과 조교수로 부임해 양자광학, 고분해 원자 분광학, 이터비움 광 격자 시계, 자발 수동 모드 록된 반도체 레이저를 연구하고 있다.

### 조동현

#### 경력

1990년 원자물리학 실험으로 미국 Yale대학교에서 박사학위를 받고, 3년간 미국 JILA 연구소에서 박사후 연구원으로 일했으며, 1994년부터 고려대학교 물리학과에 재직 중이다.