

Zeeman 감속기를 사용하여 감속된 원자의 포획과 포획된 원자의 특성

고광훈* · 정도영 · 한재민 · 이종민

한국원자력 연구소 양자광학팀

⊕ 305-600 대전광역시 유성구 사서함 105

(2001년 2월 27일 받음, 2001년 8월 7일 수정본 받음)

Zeeman 감속기를 사용하여 감속한 나트륨 원자를 자기광학적 방법으로 포획하였다. 자기광학적 방법으로 포획된 원자의 개수와 온도를 측정하고, 포획이 가능한 포획광의 주파수 영역과 펄핑광의 주파수영역을 나타내었다. Zeeman 감속기로부터 유입하는 원자의 양을 조절한 경우에 원자 개수의 증가율과 감소율을 측정하고, 이들 차이로부터 N^2 에 비례하는 손실에 대하여 논의하였다.

분류코드 : SP.010, QO.010.

I. 서 론

빛을 이용하여 원자를 조작하는 기술이 소개된 이 후, 원자의 온도를 절대 0K에 가깝게 낮추는 기술이 개발되었다. 낮은 온도의 원자에서는 비균일 선폭 확대효과를 무시할 수 있기 때문에, 원자 냉각기술은 최근 고분해 분광에서 사용되며, ¹³¹ 속도 폭이 좁은 특성을 이용하여 원자빔 간섭계 제작에도 유용하게 사용된다.¹²¹

레이저광을 사용한 원자의 냉각은 1970년대에 처음 제안되어,¹³¹ 1980년대 이후에 원자의 냉각연구가 활발하게 진행되었다.¹⁴¹ W. Phillips는 비균일 자기장을 사용하여 원자의 감속으로 나타나는 도플러 이동의 변화를 보상하는 Zeeman 감속기를 사용하여 원자빔을 감속할 수 있었다. 1987년 자기장과 빛을 이용하여 나트륨 원자를 포획하는 실험에 이어 Cs, Rb, Yb 등 여러 원자에 대한 포획실험이 수행되었다.¹⁵¹ 나트륨은 루비듐과 세슘에 비하여 질량이 가볍기 때문에 자기광학적 방법으로 포획된 원자의 온도가 비교적 높다. 그러나 광자의 운동량 전달에 의한 속도 변화가 크기 때문에 원자간섭계에서는 신호의 감도를 증가시키는데 유리하다.

본 논문에서는 이미 보고된 Zeeman 감속기를 사용하여¹⁸⁻¹⁰¹ 포획깊이 이내로 감속한 원자빔을 비균일 자기장환경에서 여섯 방향의 레이저광을 사용하여 공간상의 한 점에 포획하는 실험과 포획된 원자의 특성에 대하여 보고한다. 포획광과 펄핑광의 주파수는 자기광학적 방법으로 포획된 원자의 온도 및 개수에 영향을 주기 때문에 포획광과 펄핑광의 주파수 변화에 대하여, 포획할 수 있는 주파수 범위를 나타내었고, 포획된 원자의 온도를 측정하였다. 또한, Zeeman 감속기를 사용한 방법에서는 감속광의 세기에 따라서 유입되는 원자의 양을 조절할 수 있고, 이를 이용하여 유입되는 원자의 양에 따라 원자의 증가율과 감소율이 차이가 나는 것을 보이고, 포획 원자 개수 (N)의 제곱에 비례하는 손실에서 비롯되는 포획원자의 증가율

과 감소율의 차이에 대하여 논의하였다.

II. 실 험

나트륨 원자는 그림 1의 에너지 구조를 가지고 있다. 기저준위는 $F_g=1, 2$ 의 초미세 구조로 이루어져 있고, 상위준위는 $F_g=0, 1, 2, 3$ 의 에너지 준위로 이루어져 있다. 실험에서는 그림 1에서와 같이 레이저광은 $F_g=2$ 에서부터 상위준위로의 전이에 사용되고, sideband는 $F_g=1$ 에서부터의 전이에 사용되었다.

실험장치는 그림 2에 나타내었다. 레이저 광원으로 파장 589.0 nm, 세기 약 400 mW의 단일 종모드 색소레이저를 사용하였고, 일부분(약 3%)은 주파수 안정화 장치와 기준 주파수를 표시하기 위한 나트륨 썰로 입사시켰다. 나머지 레이저광은 두 개의 레이저광으로 나누어 한쪽은 $\lambda/4$ 편광판을 사용하여 원편광으로 만든 다음, 빔 확대기를 거쳐 빔직경을 약 1.5 cm로 확대시킨 후 Zeeman 감속기로 입사시켜 감속광으로 사용하였다. 다른 한쪽은 EO(electro optic) 위상변조기를 통과

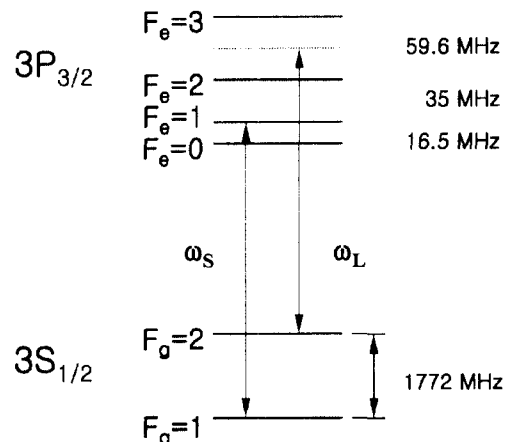


그림 1. 나트륨 원자의 에너지 준위도와 레이저광의 주파수. ω_L 은 레이저광의 주파수, ω_S 는 sideband의 주파수이다.

*E-mail: khko@kaeri.re.kr

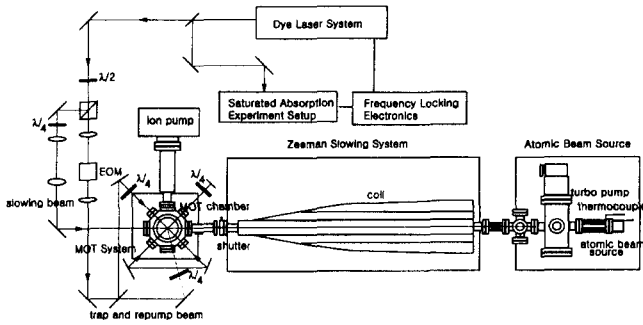


그림 2. 포획 실험장치. 진공챔버는 원자빔 발생장치와 Zeeman 감속기, 포획챔버로 구성되어 있으며, 주파수 안정화된 감속광은 나트륨 원자를 감속시키기 위하여 원자빔과 반대방향으로 입사하고 포획광은 포획챔버에 여섯 방향에서 입사된다.

시켜 sideband를 만들고, 빔 직경을 약 1 cm로 확대시킨 후, 다시 세 개의 빔으로 분리하였다. 각각의 레이저광은 $\lambda/4$ 편광판을 통하여 원편광으로 만들어 포획챔버로 입사시킨 후, 거울과 $\lambda/4$ 편광판을 사용하여 다시 되돌려주었고 $B=0$ 인 포획 위치에서 여섯 방향의 원편광된 레이저광이 교차하도록 만들어 주었다. 각각의 레이저광의 세기는 약 50 mW이었다. Anti-Helmholtz 코일을 사용하여 포획챔버 중앙에서 자기장의 기울기를 약 20 G/cm로 만들어주었다. EO 위상변조기를 사용하여 발생된 sideband의 세기는 약 10 mW이었고, 주파수는 1.6 GHz에서 1.8 GHz까지 가변하였다. 이 실험에서는 주파수가 큰 쪽의 sideband가 포획에 사용되었다.

III. 결과 및 토의

3.1. 나트륨 원자의 포획 영역

나트륨 원자의 포획은 포획광의 주파수에 따라 $F_g=2 \leftrightarrow F_e=3$ 의 전이선을 사용하는 type I 포획과 $F_g=1 \leftrightarrow F_e=1$ 의 전이선을 사용하는 type II 포획, 그리고 $F_g=1 \leftrightarrow F_e=2$ 의 전이선을 사용하는 type III 포획이 알려져 있다.^[11] Type I 포획의 경우에는 순환전이선을 이용하여 포획하고, 펌프광은 밀도를 $F_g=2$ 상태로 옮겨주는 역할을 한다. Type II 포획의 경우에는, 완전한 순환전이선을 이용하지 않기 때문에 type I 포획의 원자구름의 크기보다 크다. $F_g=1 \leftrightarrow F_e=1$ 전이가 순환전이가 아니더라도 밀도의 80% 정도가 $F_g=1$ 의 상태에 있는 준단한 전이를 이루는 것이 알려져 있다.^[11] Type III 포획에서는 밀도의 50~60% 만이 $F_g=1$ 에 있기 때문에 공급효율이 높은 경우에서만 관측되고 열적 평형상태에 있는 원자와의 충돌이 많은 경우에 포획이 어려운 것으로 알려져 있다.

실험에서는 sideband 주파수를 1712 MHz로 고정하고, 레이저광의 주파수를 변화시켰을 때 두 영역에서 포획할 수 있었다. 레이저광의 주파수가 높은 경우의 포획은, 감속광에 의하여 원자빔 발생기 방향으로 힘을 받아, 포획구름이 생성되는 위치가 변화했고, 레이저광의 주파수가 낮은 영역에서 이루어지는 포획은 감속광의 영향을 거의 받지 않는 것을 관측하였다. 이로부터, 레이저광의 주파수가 높은 영역에서 이루어지는 포획은 감속광과 포획광의 주파수가 같기 때문에 감속광에 의

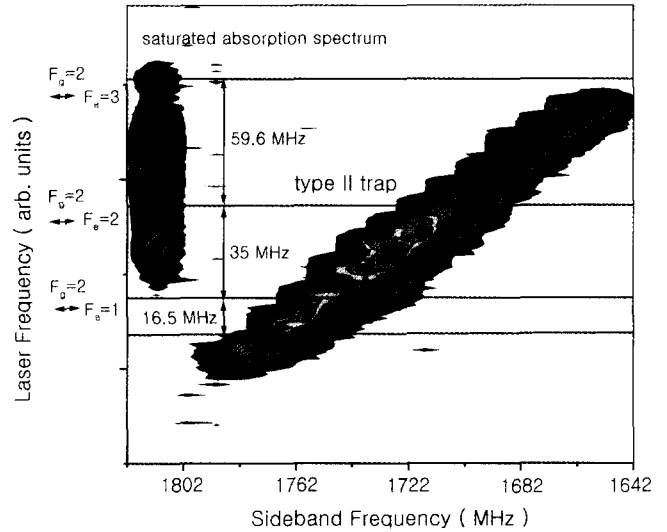


그림 3. 각각의 sideband 주파수에서 레이저 주파수에 대한 포획영역을 나타낸다. 감속광의 세기는 약 100 mW/cm²이고 펌프광의 세기는 약 50 mW/cm², 포획광의 세기는 약 10 mW/cm²으로 type II 포획 영역을 나타낸다. 등고선은 포획원자의 개수를 나타내며 레이저 주파수 약 -77 MHz ($F_g=2 \leftrightarrow F_e=3$ 로부터), sideband주파수 1725 MHz에서 원자 개수 $10^7 \sim 10^8$ 개가 포획되었다. 왼쪽 등고선은 포화흡수 분광신호의 세기를 나타내며, 레이저광의 주파수 위치를 나타낸다.

하여 힘을 받는 type I 포획인 것을 알 수가 있다. 주파수가 낮은 영역에서 이루어지는 포획은 sideband가 포획광으로 작용하여 펌프광과 주파수가 같은 감속광이 원자에 영향을 주지 않는 type II 포획이라는 결론을 얻을 수 있었다. 그러나 type III 포획은 관측되지 않았다. 감속효율을 증가시키기 위하여 감속광의 세기를 증가시키면 type I 포획은 펌프광에 의하여 힘을 받아 포획 영역 밖으로 밀려나고 type II 포획만이 관측된다. 감속광의 영향을 크게 받지 않는 type II 포획에 대하여 sideband 주파수와 레이저의 주파수를 변화시켰을 때, 포획구름에서 발생하는 형광을 측정하여 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때의 감속광의 세기는 100 mW이고, 펌프광의 세기는 각각 50 mW, 포획광의 세기는 각각 10 mW이었다. 등고선 모양은 포획원자의 개수를 나타내며 왼쪽에는 레이저 주파수의 위치를 알 수 있도록 포화흡수분광신호를 나타내었다. 레이저의 주파수가 $F_g=2 \leftrightarrow F_e=3$ 으로부터 붉은 색 방향으로 약 77 MHz의 주파수 벗어나기를 가지고 있고, sideband주파수가 약 1725 MHz일 때 $10^7 \sim 10^8$ 개의 포획된 원자를 얻었다. 원자 개수는 포획 구름으로부터 나오는 형광을 PMT로 측정하여 환산하였다. 그림의 주파수 영역으로부터 type II 포획은 포획광의 주파수가 $F_g=1 \leftrightarrow F_e=0$ 보다 약 20 MHz 정도 작은 주파수부터 $F_g=1 \leftrightarrow F_e=1$ 주파수까지 포획됨을 알 수 있고, 펌프광(레이저광)의 주파수는 그림과 같이 $F_g=2 \leftrightarrow F_e=1$ 보다 약 30 MHz 정도 작은 주파수에서 $F_g=2 \leftrightarrow F_e=3$ 아래쪽까지 이르고 있는 결과를 얻었다. 넓은 영역에서 포획된 것은 펌프광의 세기가 충분히 커서 비공명 전이가 가능하여 이루어진 것으로 해석된다.

Type I 포획은 감속광에 의하여 힘을 받아 포획이 되는 영역 밖으로 밀려나는데, 포획광의 세기를 증가시키고 감속광의 세기를 감소시켜 포획되는 원자의 개수를 최적화 할 수가 있다. 포획광의 세기가 약 50 mW 정도에서, 감속광의 세기를 약 10 mW로 감소시켰을 때 type I 포획에서 원자 개수가 최대가 되지만 효율적인 감속이 이루어지지 않아 포획원자 개수는 type II 포획에서의 개수보다 적었다. Type I 포획은 포획광의 주파수가 $F_g = 2 \leftrightarrow F_e = 2$ 와 $F_g = 2 \leftrightarrow F_e = 3$ 사이에 있는 경우에 포획이 되었다.

3.2. 포획된 나트륨 원자의 온도

원자의 온도는 원자의 운동 속도에 의해서 결정된다. 원자의 속도 측정 방법은 R&R(Release and Recapture) 방법과 TOF(time of flight) 방법 등 여러가지 방법이 알려져 있다.^[12] R&R 방법은 평형 상태에 있는 포획 원자에 대하여 포획광을 차단한 다음 t 시간 뒤에 다시 포획광을 입사시켜, 다시 포획되는 원자들의 양으로 온도를 측정하는 방법이다. 원자의 속도분포가 Boltzmann 분포를 따른다고 가정하고, 중력의 영향을 무시할 때, 다시 포획되는 원자의 비와 스위치 시간 t 와의 관계식은 다음과 같다.^[13]

$$f = \text{erf}\left(\frac{v}{v_{th}}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{v}{v_{th}}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{v_{th}}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기에서 $v = Lt$ 로써 L 은 레이저광의 반경이며 내부에 있는 원자들이 다시 포획이 된다. 또한 $v_{th} = \sqrt{2k_B T/m}$ 으로 온도 T 에서의 열평형 속도이다. 이 방법은 포획위치에서부터 일정한 거리에서 형광을 측정하여 원자의 속도를 측정하는 TOF 방법에 비하여 정확도가 떨어지지만, 비교적 쉽게 속도를 측정할 수 있는 방법으로 많이 이용된다.

감속광의 세기가 약 10 mW이고, 포획광의 세기가 각각 50 mW, 자기장의 기울기가 20 G/cm, sideband 주파수와 세기가 1712 MHz와 5 mW인 경우, 레이저의 주파수를 변화시켜 type I과 type II 포획을 할 수가 있다. 이 경우 R&R 방법으로 포획된 원자의 온도를 측정한 결과 type I 포획에서는 나트륨 원자의 온도가 약 208 μK 이었고 type II 포획에서는 약 440 μK 으로 type I 포획에서 원자구름 온도가 낮았다. type I과 type II 포획에 대하여 포획광 주파수의 미세한 변화에 대하여는 큰 차이가 없었다.

3.3. 포획원자의 증가율과 손실률

자기광학적으로 포획된 원자 개수는 Zeeman 감속기로부터 포획구역으로 유입되는 느린 원자의 양과 주위 원자와의 충돌에 의한 손실에 의하여 결정된다. 포획되는 원자의 개수(N)에 대한 비율 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N \quad (2)$$

여기서 R 은 유입되는 원자의 비율을 나타내고, γ 는 포획된 나트륨 원자와 Zeeman 감속기로부터 나오는 원자들과의 충돌, 챔버안의 다른 원자와의 충돌에 의하여 나타나는 손실률이다.

포획되는 양이 증가하면서, 포획된 원자사이의 충돌 현상도 커지게 되어 포획된 원자밀도의 제곱에 비례하는 손실을 고려해야 한다.^[14] 따라서, 식 (2)의 비율 방정식은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.^[15]

$$\frac{dN}{dt} = R - \gamma N - \beta \int n^2(\vec{r}) d^3\vec{r} \quad (3)$$

여기에서 오른쪽 세번째 항이 원자 밀도가 커지면서 나타나는 손실을 나타내고, β 는 원자의 구조와 특성에 관계된 상수이다. $n(\vec{r})$ 은 공간에 대한 포획원자의 밀도를 나타낸다. 포획된 원자 밀도가 공간적으로 균일하지 않기 때문에 적분형태로 나타내어야 한다. 밀도가 작은 경우에는 공간적으로 가우시안 분포를 이루지만, 포획되는 원자 개수가 많아지면서 밀도분포는 광간섭(radiation trapping)에 의하여 일정하게 된다. 이 경우, 밀도분포는 N 에 의존하는 분포 $g(\vec{r}, N)$ 를 사용하여 $n(\vec{r}, N) = n_{\max}g(\vec{r}, N)$ ($g(0; N) = 1$)으로 나타낼 수 있다. 여기서 n_{\max} 는 광간섭 현상에 의하여 나타나는 최대 밀도이다. 이 식을 식 (3)에 대입하여 정리하면 세번째 항은 $\beta n_{\max} f N$ ($f = \int g^2(\vec{r}, N) d^3\vec{r} / \int g(\vec{r}, N) d^3\vec{r}$)으로 나타낼 수 있다. f 는 N 에 약하게 의존하기 때문에, 정상 상태인 경우 원자 개수에서의 f 값 f_0 를 사용하면 간단히 다음과 같은 식으로 나타낼 수가 있다.

$$\frac{dN}{dt} = R - \Gamma(N\Gamma = \gamma + \beta n_{\max}) f_0 \quad (4)$$

이 식에서 $R \neq 0$ 인 경우에는 원자 개수가 $N(t) = N_0 (1 - \exp(-\Gamma t))$ 로 나타내어지고 $R = 0$ 인 경우에는 $N(t) = N_0 \exp(-\Gamma t)$ 로써, 포획된 원자 개수가 감소할 때와 증가할 때의 비율이 같다. 그러나 일반적으로 f 는 원자 개수의 함수이고, N 에 대하여 전개를 하여 아래 식과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\frac{dN}{dt} = R - \Gamma N + \zeta N^2 \quad (5)$$

이 식에서 ζ 는 $\beta n_{\max} f_1 (f_1 = df/dN)$ 을 나타낸다. 식 (5)와 같이 N 의 제곱에 비례하는 성분이 포함된 경우, 포획되는 원자의 증가와 감소 그래프는 달라지는 것을 예측할 수가 있다. $\zeta N, \zeta R \ll \Gamma$ 의 조건에서 원자의 유입이 없는 경우($R = 0$)의 포획 원자 개수는 다음과 같다.

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\zeta N_0}{\Gamma \zeta N_0 + \Gamma} \frac{\exp(-\Gamma t)}{\zeta \frac{\zeta N_0}{\zeta N_0 + \Gamma} \exp(-\Gamma t)} \quad (6)$$

분모의 두번째 항이 1보다 아주 작은 값인 경우에 다음과 같이 급수전개를 할 수 있다.

$$N(t) = -\frac{\Gamma}{\zeta} + \frac{\Gamma}{\zeta} \left(1 + \frac{\zeta N_0}{\zeta N_0 + \Gamma} \exp(-\Gamma t) + O(2) \right) \equiv \frac{\Gamma N_0}{\zeta N_0 + \Gamma} \exp(-\Gamma t) \quad (7)$$

마찬가지로 $R \neq 0$ 인 경우에 전개를 하면 포획 개수는 시간에

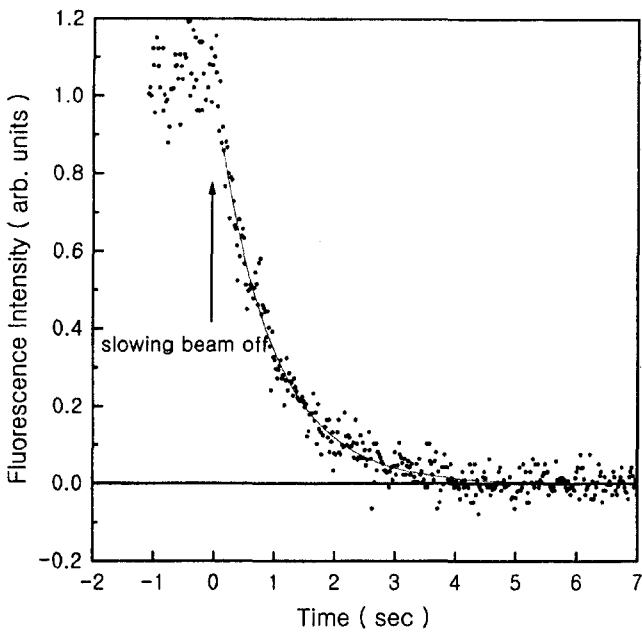


그림 4. Type II 포획에서 감속광을 차단하였을 때의 형광 감소를 (1.05(0.06) s⁻¹). 지수함수를 최소 자승법으로 맞추어 감소율과 오차를 측정하였다.

대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(t) \propto 1 - \exp\left(-\zeta \sqrt{\left(\frac{\Gamma}{\zeta}\right)^2 + 4\frac{R}{\zeta}} t\right) \approx 1 - \exp\left[-\sqrt{\Gamma + \frac{2R\zeta}{\Gamma}} t\right] \quad (8)$$

따라서, 손실률은 Γ 이고, 원자가 유입될 때의 포획원자의 증가율은 $\left(\Gamma + 2\frac{R\zeta}{\Gamma}\right)$ 로써, 서로 다른 비율로 증가 또는 감소하

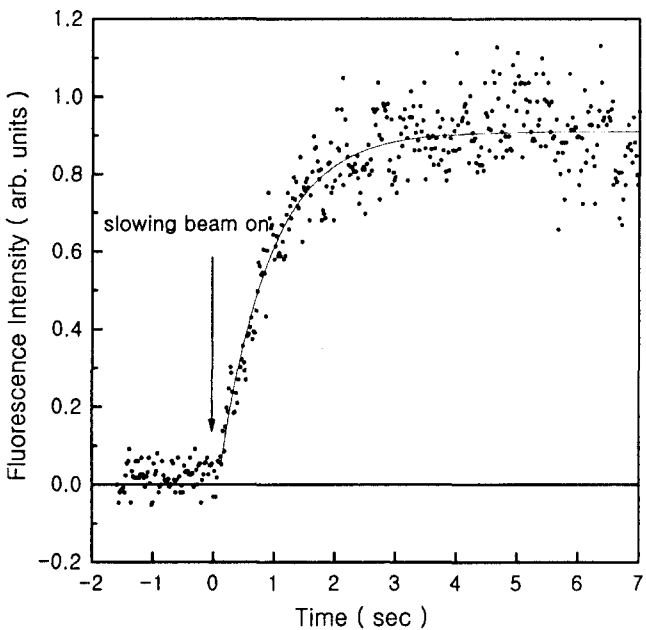


그림 5. Type II 포획에서 감속광에 의하여 감속이 시작되었을 때의 포획된 양의 증가율(1.25(0.03) s⁻¹). 지수함수를 최소 자승법으로 맞추어 증가율과 오차를 측정하였다.

는 것을 알 수 있다. 식 (8)은 N^2 항의 영향이 작은 경우에는 포획 원자 개수가 지수함수의 형태로 감소와 증가하며 N^2 의 영향을 비교적 쉽게 구할 수 있음을 보여준다.

실험에서는 감속 레이저광을 차단 또는 입사시켜서 유입되는 느린 원자의 양을 변화시켜 위의 실험을 수행할 수 있다. 감속광이 없는 경우, 포획깊이에 해당하는 원자가 적기 때문에 $R=0$ 으로 근사할 수 있다. 그림 4는 감속광을 차단하였을 때 포획되는 양이 감소하는 결과를 나타낸 결과이고, 그림 5는 감속광이 입사하였을 때의 결과이다. 그림에서 실선은 지수함수를 사용하여 최소자승법으로 맞추한 그림이다. 맞추한 감소율과 증가율은 각각 1.05 s⁻¹, 1.25 s⁻¹이고 맞춤 그림과의 오차는 95%의 신뢰구간에서 각각 0.06과 0.03으로써 감소율과 증가율이 차이를 보이고 있다. 따라서, 포획되었을 때의 원자밀도는 근사적으로 상수로 가정할 수는 있지만, N 의 제곱에 비례하는 항을 포함한다는 결론을 얻을 수가 있었다. 실험에서 $R(= \Gamma N_0)$ 의 근사값을 5×10^7 atoms/s이라고 하면, ζ 는 약 10-6 atoms-ls-1를 얻을 수 있다. 증가율과 손실률의 차이에서부터, 실험의 조건에서는 N 의 제곱항에 비례하는 손실은 약 20% 정도에 이르는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

이 논문에서는 Zeeman 감속기를 사용하여 나트륨 원자를 1차원 냉각하고, 냉각된 나트륨 원자를 자기광학적 방법으로 포획하여, 포획특성에 대하여 조사하였다. 감속된 원자는 감속기 끝단에서 포획깊이까지 냉각되어 포획실험이 가능하였다. 많은 원자를 포획하기 위하여 Zeeman 감속기를 사용할 경우에 포획깊이보다 속도가 작은 느린 원자 개수가 증가하여 10⁸개의 포획된 나트륨 원자를 얻을 수 있었다. 그러나 포획광과 주파수가 같은 감속광이 원자에 힘을 주어 감속광의 세기를 크게 하지 못하였고, 결과적으로 효율적인 감속이 일어나지 않아 type I 포획에서는 많은 양의 원자를 포획하지 못하는 단점이 있었다.

한편, Zeeman 감속기를 사용하면, 감속광의 세기 및 주파수에 따라 느린 원자의 유입양을 조절할 수가 있다. 이를 이용하면 포획에서 N^2 에 비례하는 원자의 손실을 쉽게 측정할 수가 있다. 본 실험에서는 감속광이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 나트륨 원자의 Type II 포획에서 약 20% 정도의 N^2 에 비례하는 손실효과를 측정하였다.

참고문헌

- [1] L. G. Marcassa, S. R. Muniz, G. D. Telles, S. C. Zilio, and V. S. Bagnato, "Measurement of Na ⁵S_{1/2} hyperfine splitting by ionization using a sample of cold atoms," *Opt. Commun.*, vol. 155, no. 1, pp. 38-42, 1998.
- [2] M. Kasevich and S. Chu, "Measurement of the gravitational acceleration of an atom with a light-pulse atom interferometer," *Appl. Phys. B*, vol. 54, no. 5, pp. 321-332, 1992.
- [3] T. Hansch and A. Schawlow, "Cooling of gases by laser radiation," *Opt. Commun.*, vol. 13, no. 1, pp. 68-69, 1975.

- [4] W. D. Phillips and H. Metcalf, "Laser deceleration of an atomic beam," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, no. 9, pp. 596-599, 1982.
- [5] E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable, S. Chu, and D. Pritchard, "Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 59, no. 23, pp. 2631-2634, 1987.
- [6] C. G. Townsend, N. H. Edwards, K. P. Zetie, C. J. Cooper, J. Rink, and C. J. Foot, "High-density trapping of cesium atoms in a dark magneto-optical trap," *Phys. Rev. A.*, vol. 53, no. 3, pp. 1702-1714, 1996.
- [7] K. Honda, Y. Takahashi, and T. Yabuzaki, "Magneto-optical trapping of Yb atoms and a limit on the branching ratio of the 1P_1 state," *Phys. Rev. A.*, vol. 59, no. 2, R934-R937, 1999.
- [8] K. H. Ko, D. Y. Jeong, J. Han, K. S. Lee, S. Rho, Y. J. Rhee, and J. Lee, "Reducing the velocity spread of an atomic beam by using a repump beam," *J. Kor. Phys. Soc.*, vol. 35, no. 3, pp. 239-243, 1999.
- [9] K. H. Ko, D. Y. Jeong, J. Han, K. S. Lee, S. Rho, Y. Rhee, and J. Lee, "Generation of slowed atomic beam for an atomic beam interferometer," in *6th Symposium on Laser Spectroscopy*, 한국원자력연구소, Taejon, Korea, 1998, pp. 352-356.
- [10] S. Rho, J. Han, K. H. Ko, K. S. Lee, D. Y. Jeong, S. Kim, and J. Lee, "The design of a Zeeman slower for laser cooling of Na atomic beam," in *6th Symposium on Laser Spectroscopy*, 한국원자력연구소, Taejon, Korea, 1998, pp. 318-323.
- [11] Z. T. Lu, *Laser Trapping of ^{21}Na Atoms* (Ph. D. Thesis, University of California at Berkeley, 1994) pp. 114-125.
- [12] P. D. Lett, R. N. Watts, C. I. Westbrook, W. D. Phillips, P. L. Gould, and H. J. Metcalf, "Observation of atoms laser cooled below the doppler limit," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 2, pp. 169-172, 1988.
- [13] 노홍렬, *Magneto-Optical Trapping of Rubidium Atoms: Isotope Separation and Cold Collisions* (박사학위논문, 서울대학교, 1997) p. 75.
- [14] M. Prentiss, A. Cable, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, "Atomic-density-dependent losses in an optical trap," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 6, pp. 452-454, 1988.
- [15] L. Marcassa, V. Bagnato, Y. Wang, C. Tsao, J. Weiner, O. Dulieu, Y. B. Band, and P. S. Julienne, "Collisional loss rate in a magneto-optical trap for sodium atoms: Light-intensity dependence," *Phys. Rev. A.*, vol. 47, no. 6, pp. R4563-R4566, 1993.

Magneto-optical trap of slowed sodium atoms by using a Zeeman slower and the characteristics of trapped atoms

Kwang-Hoon Ko[‡], Do-Young Jeong, Jaemin Han, and Jongmin Lee

Laboratory for Quantum Optics, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, KOREA

[‡]E-mail: khko@kaeri.re.kr

(Received February 27, 2001 ; revised manuscript received August 7, 2001)

The neutral sodium atoms have been slowed down to the trap depth by using a Zeeman slower and trapped by the magneto-optical method. The density and the temperature of the trapped atoms are measured, and the frequency region where the trap is available is represented. We controlled the flux of slowed atoms by varying the slowing beam intensity, and we measured the increasing and decreasing rate of trapped atoms. We show that the difference between the increasing and decreasing rate of trapped atoms result from the loss proportional to N^2 .

Classification codes : SP.010, QO.010.