

MOT에 포획된 루비듐 원자의 공간 분포

Spatial Distributions of Rubidium Atoms in MOT

박성중, 조혁, 박종대*, 양성훈**, 이호성**

충남대학교 물리학과, *배재대학교 물리학과, **한국표준과학연구원 전자기 표준부
time00@chollian.net

최근 중성 원자의 포획 및 냉각 기술은 이론 및 실험적으로 활발히 연구되고 있다⁽¹⁾. 중성원자의 포획법으로 가장 효과적인 방법은 광-자기 포획 (Magneto-optical trap ; MOT)으로 1987년 Rabb 등에 의해 처음 실험적으로 구현되었는데, 레이저 빔의 크기, 레이저 세기, 레이저 디튜닝, 자기장 기울기에 따른 포획된 원자의 수와 밀도에 대한 연구가 이루어졌다.

MOT에 포획된 원자 구름의 분포는 원자 포획에 사용되는 포획광의 어긋난 정렬에 의해 다양한 형태를 가지게 된다. Walker, Sesko⁽¹⁾, 등은 세슘(Cs) 원자를 포획하였을 때 고리형, 가운데 구를 갖는 고리형의 원자구름 분포를 관찰하였고, 이 결과를 해석하기 위해 소용돌이힘을 고려한 모델을 제안하였다. 그들은 현상적으로 나타나는 소용돌이힘과 포획된 원자수가 증가함에 따라 재방출에 의한 복사 포획력 (radiation trapping force)을 고려하여 원계도 원자구름 분포를 설명하였다. 즉, 포획 원자의 개수를 N' 이라고 할 때 고리형 원자 구름의 반지름은 $(N')^{1/3}$ 에 비례함을 보여 주었다. 그러나 상대적으로 적은 수의 원자 ($N \approx 10^5$)로 형성된 고리형 원자 구름이 관찰되었고, 이 때 고리의 반지름은 포획된 원자의 개수와 관계없음이 보고되었다⁽²⁾. 이것은 고리형 원자 구름 분포를 설명할 때 복사 포획력의 효과는 무시될 수 있다는 것을 의미하며 이를 설명하기 위해 Bagnato 등은 좌표의존 소용돌이힘 (coordinate-dependent vortex force ; CDVF)에 바탕을 둔 모델을 제안하였다⁽²⁾.

서로 다른 두 설명에 대하여 최근 Guedes 등⁽³⁾은 이상기체에 대한 간단한 2 준위계 모델을 사용하여 고리 반지름은 소용돌이힘에만 의존하지만 많은 원자들 ($N > 10^7$)에 대해서는 복사 포획 메카니즘 (radiation trapping mechanism)이 우세해져서 포획된 원자의 수에도 의존한다고 설명하였다. Gudes 등⁽³⁾은 Sesko 등⁽¹⁾이 사용한 식에서 원자에 가해지는 힘의 표현을 수정하여 안정적인 원계도에 대한 해석을 하였다.

본 연구에서는 레이저빔의 어긋난 정렬에 의한 다양한 형태의 원자 구름 분포를 관찰하였다(그림 1). 그림 1. (a)는 MOT에 구형으로 포획된 일반적인 원자구름 분포를 보여주고 있다. 그림 1. (b), (c)는 포획광의 어긋난 정렬에 의해 소용돌이힘이 작용하여 고리형, 가운데 구를 포함한 고리형으로 포획된 원자 구름 분포를 보여주고 있다. 원자를 포획하기 위해 x, y, z축 방향에 대해 서로 마주보고 진행하고 서로 반대인 원편광을 갖는 포획광이 사용되는데, 한 축에 대하여 포획광의 편광을 원편광으로부터 선편광으로 바꾸어 주면 그 축에 대하여 복원력이 작용하지 않아 원자들이 포획되지 않게 되지만 포획광의 어긋난 정렬에 의한 소용돌이힘은 복원력 역할을 하여 막대형으로 원자들이 포획된다(그림 1. (d)). 포획광의 세기 분포를 가우시안 형태로부터 변화를 주면 공간적으로 복잡한 형태의 소용돌이힘이 작용하게 되고 그 결과 2중 포획이 가능하게 된다. 그림 1. (e), (f)는 구-구형으로 포획된 원자 구름 분포를 보여주고 있다. 그림 1. (g)-(i)는 구-고리 형태로 2중 포획된 원자구름 분포로 포획광의 어긋난 정렬 변화에 따라 공간적으로 작용되는 소용돌이힘이 변화하여 고리형 원자구름과 구형 원자구름의 분포가 변

shows error rates of E and B as a function of the number of users in noise cryptographic systems using the coherent multiplexing channels. The dashed line refers to Babe's error rate with a threshold of $\theta = \sqrt{E}$, and the dotted line does to $\theta = 3\sqrt{E}$ where a data rate $R=1GHz$ and $RIN=-100dB/Hz$.

This classical cryptosystem based on any physical noise has a broad range of implementations including wireless communications by exploiting uncorrelated background noises. The implementation is easier and requires simpler processings at error correction and private amplification⁽³⁾ stages than quantum cryptography. Moreover, it allows signal amplification, whereas the inability of signal amplification is a main drawback in implementing quantum cryptography in long haul communications. With potential advantages, the noise cryptographic systems are expected to outperform the quantum cryptosystems in real system implementation.

REFERENCES

1. P. W. Shor, in Proc. 35 Ann. Symp. Found. Comp. Sci., ed. S. Goldwasser (IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, Ca.), 124 (1994).
2. S. Wiesner, SIGACT News, 15, 78 (1983).
3. C. H. Bennett, F. Bessette, G. Brassard, L. Salvail, and J. Smolin, J. Cryptology 5, 3 (1992).
4. H. L. Van Trees, Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part1, Wiley (1968).

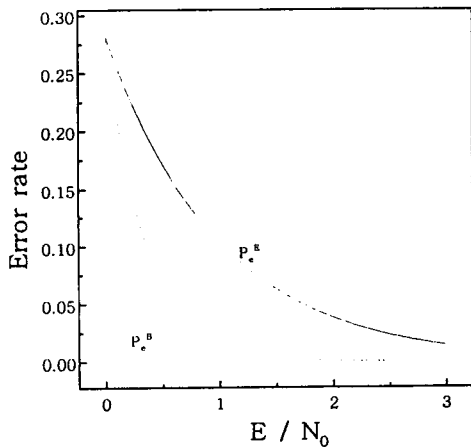


Fig.1. Error rates P_e^E and P_e^B in noise cryptographic systems with detector's AWGN

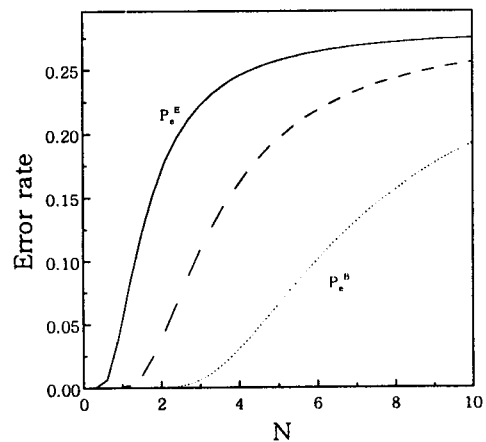


Fig.2. Error rates P_e^E and P_e^B in noise cryptographic systems using coherent multiplexing channels.

화하는 것을 보여주고 있다. CDVF 모델을 바탕으로 실험상황에 따른 운동방정식을 풀어 원자의 궤도와 원자구름 분포를 살펴 보았으며, 그 결과로 다양한 원자 구름 분포를 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D. W. Sesko, T. G. Walker, and C. E. Wieman, J. Opt. Soc. Am. B 8, 946 (1991).
2. V. S. Bagnato, L. G. Marcassa, M. Oriá, G. I. Surdutovich, R. Vitlina, and S. C. Zilio, Phys. Rev A 48, 3771 (1993).
3. I. Guedes, H. F. Silva Filho, and F. D. Nunes, Phys. Rev. A 55, 561 (1997).

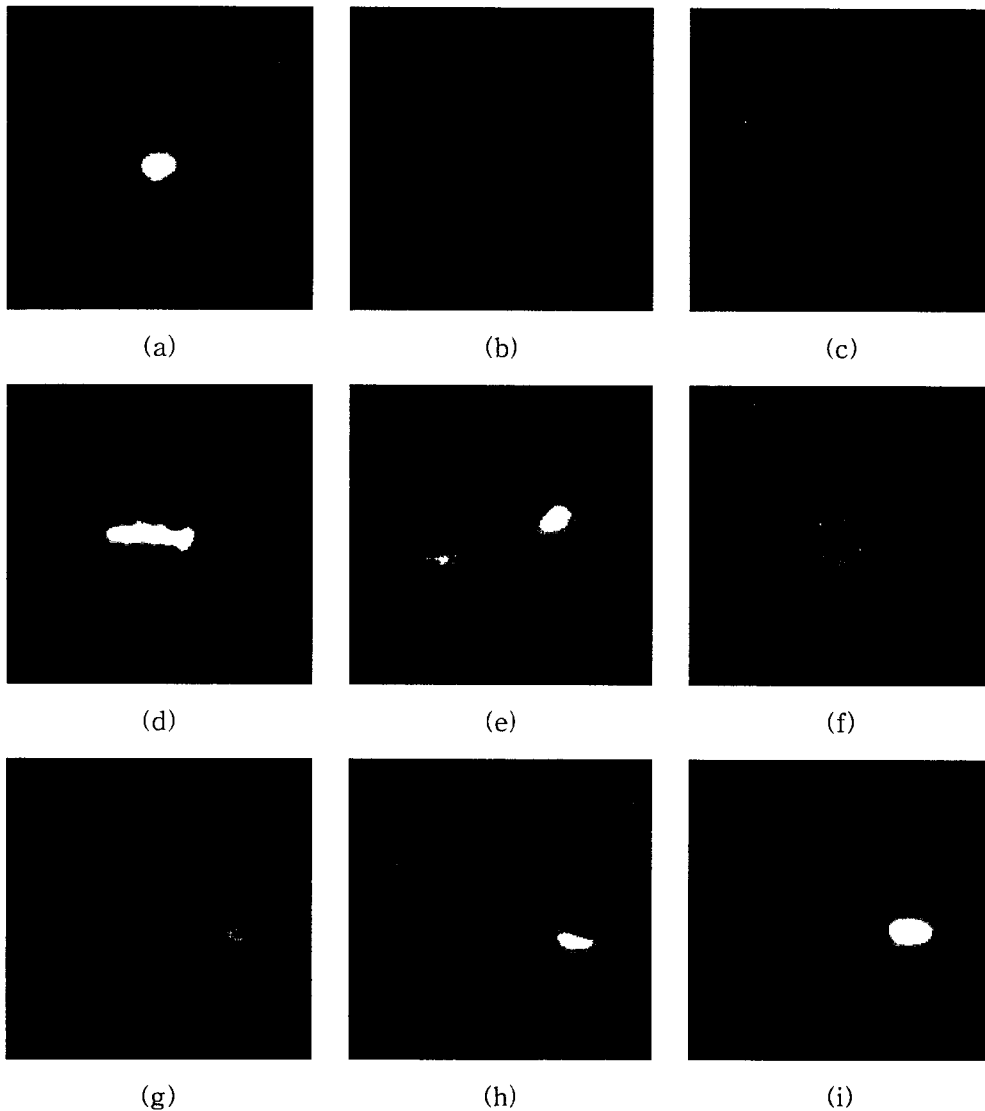


그림 1. 다양한 형태로 포획된 원자구름 : (a) 구형, (b) 고리형, (c) 가운데 구를 포함한 고리형, (d) 막대형, (e)-(f) 2중 포획형 ; 구-구, (g)-(i) 2중 포획형 ; 구-고리.

