

광펌핑 세슘원자시계에서 레이저빔
입사각도에 의한 원자빔의 속도분포 변화

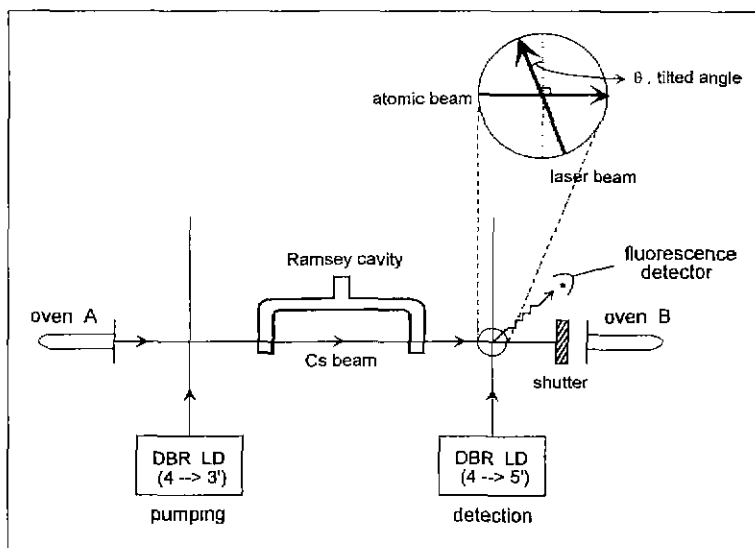
Variation of Atomic Velocity Distribution in an Optically
Pumped Cesium Atomic Clock by a Tilted Laser Beam

백광재, 이호성, 권택용, 양성훈
한국표준과학연구원
kwang@kriss.re.kr

광펌핑 세슘원자시계(KRISS-1)에서 얻은 Ramsey 신호를 Fourier 변환하여 원자빔의 속도분포를 구하였다. 그리고 마이크로파의 세기와 세슘 오븐의 온도에 따라 제2차 도플러 편이를 측정하여 이론치와 비교하였다. 실험적으로 얻은 제2차 도플러 편이는 항상 이론치보다 다소 작은 값을 나타내었는데, 이 현상은 레이저 빔과 원자빔이 완전히 수직이 아닌 경우, 즉 제1차 도플러 효과가 남아있을 때 발생하는 속도선택 효과로 설명할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 속도선택 효과를 정량적으로 분석하고, 실험적으로 검증하였다.

[그림 1]은 광펌핑 세슘원자시계에서 원자빔 튜브의 구조도를 나타낸 것이다. 원자빔에 대해 레이저빔이 수직으로 입사할 때는 모든 속도의 원자들이 레이저의 주파수를 공진 주파수로 느끼게 된다. 그러나 레이저빔이 임의의 각도로 비스듬히 입사하면 원자들의 속도에 따라 도플러 편이가 달라진다. 이 효과는 레이저의 선폭이 넓을 때에는 무시할 수 있지만, 좁은 선폭의 레이저를 사용할 경우에는 경사각에 따라 매우 민감하게 변한다.

파장 λ 를 갖는 레이저빔이 원자빔의 수직방향에 대해 경사진 각을 θ 라 하면, 속도 v 를 갖는 원자들이 느끼는 레이저 주파수의 도플러 편이는 $(\nu - \nu_0) = v \cdot \sin\theta / \lambda$ 로 주어진다. 이 때 원자가 느끼는 도플러 편이가 레이저의 선폭보다 작은 경우에만 원자와 레이저가 상호작용할 수 있다. 예를 들어 5



[그림 1] KRISS-1에서 원자빔과 레이저의 상호작용

MHz 선폭의 레이저가 $\theta=1^\circ$ 의 경사각으로 입사할 때, 약 250 m/s 이상의 속도를 갖는 원자들은 레이저와 상호작용을 거의 하지 못한다. 본 실험에 사용한 레이저는 4 mW/cm^2 의 세기와 3 MHz의 선폭을 갖는 DBR 반도체 레이저이다.

분석을 위해 레이저는 gaussian profile을 갖는다고 가정하고, 원자빔의 속도분포는 $1/v$ 의 가중치를 고려한 Maxwell 분포를 갖는다고 가정하였다.

$$g(\nu) \propto \exp[-(\nu-\nu_0)/2\delta\nu^2] \quad ; \quad \text{laser frequency profile}$$

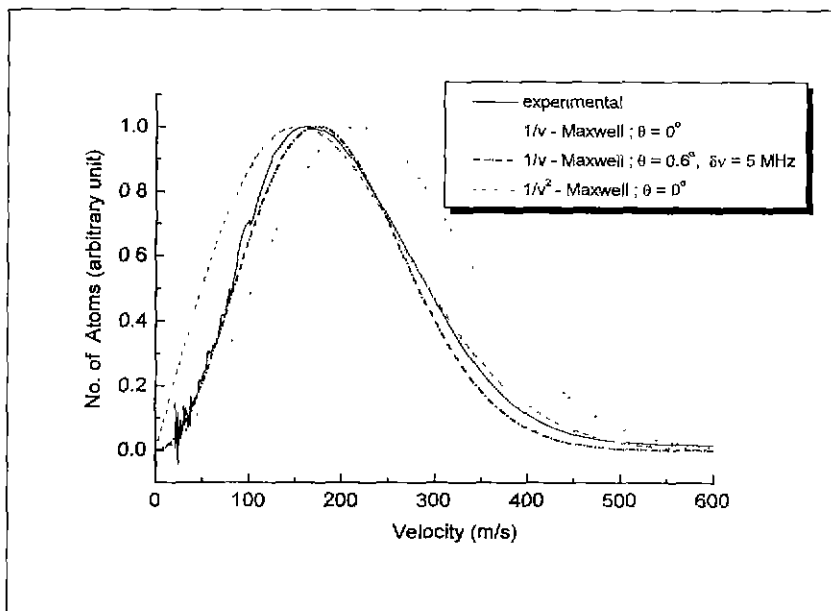
$$\rho(v) \propto v^2 \exp[-v^2/a^2] \quad ; \quad 1/v\text{-weighted Maxwell distribution}$$

단, $\delta\nu$ 는 레이저의 반치폭, a 는 원자의 최확속도이다. 이 때, 레이저의 주파수는 원자의 속도와 경사각에 의존한 편이를 갖게 된다. 도플러 효과를 고려한 effective velocity distribution $I(v)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$g(v) \propto \exp[-v^2/(\frac{\sin\theta}{\lambda \cdot \delta\nu})^2]$$

$$I(v) \propto g(v) \cdot \rho(v) \quad ; \quad \text{effective velocity distribution}$$

[그림 2]는 실험적으로 얻은 속도분포(실선)와 이론적으로 구한 세 가지 속도분포곡선(점선)을 비교한 것이다. 실험 결과가 $1/v$ 의 가중치를 고려한 Maxwell 분포($\theta=0^\circ$)보다 폭도 좁고, 전체적으로 낮은 속도 쪽으로 편이된 것을 볼 수 있다. 도플러 효과를 고려한 속도분포와 비교해보면, 5 MHz 선폭의 레이저가 약 0.6° 의 경사각으로 입사한 경우와 가장 유사한 분포를 보인다. 이와 같이 레이저의 선폭이 좁은 경우에는, 경사각이 아주 작아도 도플러 효과에 의한 속도선택 효과가 현저하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 레이저 선폭이 좁은 경우에는 레이저빔의 정렬에 세심한 주의를 기울여야 한다.



[그림 2] 실험적으로 얻은 속도분포(실선)와 이론적으로 계산한 분포곡선(점선)