

# 사마륨 원자에서 레이저-원자빔 분광법을 이용한 초미세 구조 및 동위원소 편이의 측정

## Measurement of Hyperfine Structures and Isotope Shifts in $4f^55d6s^2$ and $4f^66s6p$ of Sm I

오명규, 최원식, 전진호, 이문주, 이재형, 안경원  
서울대학교 물리학과  
omk@photon.snu.ac.kr

희토류족(rare earth)에서 6번째 원소인 사마륨(Sm)은 가시광 영역에서 세기가 강한 전이선을 많이 가지고 있기 때문에 광학적인 응용뿐만 아니라 기초 연구에서도 중요한 재료가 될 수 있다. 특히, 최근 들어 원자와 빛의 결맞음 상호작용에 관한 연구들이 활발히 진행되면서 원자의 초미세 구조(hyperfine structure) 및 동위원소 편이(isotope shift) 등에 대한 정보가 더욱 필요하게 되었다. Sm 원자(Sm I)에 대해서 지금까지 많은 분광학 연구가 있었지만<sup>(1-3)</sup>, 아직도 연구되어야 할 전이선들이 존재한다. 본 연구는 아직까지 밝혀지지 않은 새로운 에너지 준위들(fine structures)의 초미세구조 및 준위들 간 전이에서의 동위원소 편이를 고분해능 분광법인 레이저-원자빔 분광법(laser-atomic beam spectroscopy)을 이용하여 측정, 분석하였다.

레이저-원자빔 공명 형광 분광법은 고분해능 분광 연구에서 가장 널리 쓰이는 방법으로서<sup>(1)</sup> 주파수 선폰이 매우 좁은 레이저 광원과 도플러 효과가 거의 없는 속도가 정렬된 원자빔을 사용하게 된다. 본 연구에서는 아르곤-이온 레이저(Coherent INNOVA 310)를 펄스광으로 하는 cw 링-타입 색소 레이저(Coherent CR699-21)를 사용하여 원자를 여기 시켰다. 이 레이저의 짧은 시간 선폰은 1MHz 이내이며, 주파수 스캔 범위는 최대 30GHz, 스캔의 선형성은 2% 에러 범위 내에서 보장되며, Rhodamine 110 색소를 이득매질로 사용하였기 때문에 발진 파장은 540 - 560nm 범위이었다. 원자빔을 만들기 위해서 kanthal 열선을 이용한 비접촉형 히터(Mellen model 12-320)로 가열되는 오븐을 사용하였다. 최대 사용온도는 1200°C이고, 보통 900°C에서 실험하였다. 최대 20g까지 시료를 장전할 수 있는 체임버는 Inconel로 만들어져 있으며 한쪽 벽 가운데에는 지름 1mm의 노즐을 만들어 놓아 이를 통해 증기화된 Sm 원자들이 일정하게 분출해 나가게 하였다. 이 노즐 밖으로 분사되어 나가는 원자들은 먼저 9cm 떨어진 지름 8mm의 aperture에 의하여 걸러지게 되며, 이 aperture로부터 8.5cm 떨어진 1.5mm × 10mm 크기의 직사각형 aperture에 의해서 다시 한번 걸러지게 되어서 결국 기다란 직사각형의 단면을 갖는 원자빔을 이루게 된다[그림. 1]. 레이저빔을 확대하여 원자빔에 수직하게(짧은 변의 방향으로) 입사시키면, 동시에 많은 원자들을 여기 시킬 수 있으면서도 도플러 효과는 거의 없앨 수 있는데, 위의 장치에서 잔여 도플러 선폰은 약 8MHz이었다. 원자빔이 존재하는 공간은 기압이  $10^{-6}$  torr 이하인 진공 체임버로 둘러싸여 있었다. 지름이( $\omega_0$ ) 약 5cm인 레이저빔으로 여기된 원자들로부터 발산되는 형광은 초점거리 5cm, 지름 5.1cm인 볼록렌즈 쌍을 이용하여 집속하고 PMT(Hamamatsu R647)로 측정하였다.

이와 같이, 본 실험에서는 540 - 560 nm 파장영역에서 Sm I의 18개의 전이선에서 초미세 구조와 동위원소 편이를 측정하였다. 그림. 2는 바닥상태의 J=3인 준위에서  $4f^55d6s^2 \ ^7F^0$  의 J=3인 준위로의 전이인 555.04 nm 파장의 전이선을 관측한 결과이다. 자연계에는 안정한 Sm 동위원소가 7가지가 존재하는데, 그 중 질량수가 154,

152, 150, 148, 144 등의 짝수인 동위원소들은 핵스핀, I 가 0이므로 초미세구조가 존재하지 않고, 147, 149 등과 같은 홀수 동위원소들은  $I = 7/2$  이므로 전체 각운동량,  $F = |I-J|, |I-J|+1, \dots, I+J$  인 초미세구조를 갖게 된다. 초미세구조 사이의 전이는 역시 선택률을 따르는데,  $\Delta F = \pm 1, 0$ 을 만족하는 전이만 가능하며 그림. 2와 같은 경우에는 147, 149가 각각 19개의 초미세구조 전이선을 갖게 된다. 그림. 2에서와 같이 이 모든 초미세구조 전이선이 관측되었지만, 각 전이의 선평이 약 10MHz이므로 이보다 더 근접해 있는 전이선들은 실험적으로는 정확히 구분해 내기가 힘들었다. 관측된 선평 10MHz는 해당 전이선의 자연선평보다 훨씬 큰 값인데, 이는 주로 원자빔의 잔여 도플러 효과와 포화세기보다 몇 배 큰 탐색 레이저광에 의한 power broadening의 결과이다.

$^{147}\text{Sm}$ ,  $^{149}\text{Sm}$ 의 초미세구조를 정량적으로 분석하기 위해 일반적으로 least square fitting 방법이 이용되는데, 우리는 자체 개발한 fitting 알고리즘을 이용하여 여기상태의 초미세구조 상수를 구하고, 홀수 동위원소의 동위원소 편이를 구하였다. 그리고, fitting에 의해 구한 홀수 동위원소 편이와 그림. 2와 같이 직접 드러난 짝수 동위원소 편이들을 스펙트럼으로부터 측정하여 동위원소 쌍들 사이의 동위원소 편이를 구하였다. 또한, 잘 알려진 King plot 분석법을 이용하여 얻은 동위원소 편이들로부터 normal mass shift, specific mass shift, 그리고 field shift 들을 구해내었다<sup>(3,4)</sup>. 이러한 분석을 통하여 540 nm - 560nm의 범위에서 관측한 18개 전이선 모두에 대해 동위원소 편이를 구하고, 해당한 15개의 여기상태에 대한(바닥상태에 대해서는 이미 잘 알려져 있으므로<sup>(1)</sup>) 초미세 구조상수를 구하였다. 이들 여기상태는  $4f^5d6s^2$ 와  $4f^6s6p$ 에 존재하는 미세구조 준위들이다.

1. W. J. Childs and L. S. Goodman, Phys. Rev. A 6, 2011 (1972)
2. H. Brand, B. Nottbeck, H. H. Schulz and A. Steudel, J. Phys. B 11, L99 (1978)
3. H. Brand, B. Seibert and A. Steudel, Z. Phys. A 296, 281 (1980)
4. W. H. King, "Isotope Shifts in Atomic Spectra, Plenum Press" (1984)

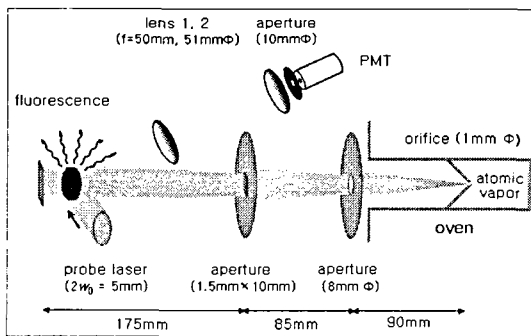


그림.1 실험 장치. 탐색광이 원자빔에 대하여 수직으로 입사한다. 원자로부터 발산되는 형광은 렌즈들을 이용하여 PMT로 집속된다.

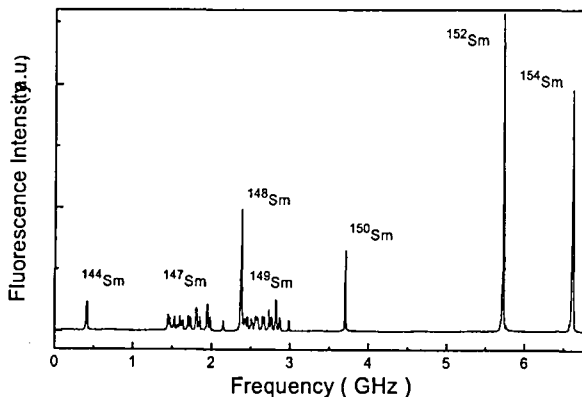


그림.2 555.04nm 전이선( $J_g=3, J_e=3$ )의 초미세구조 및 동위원소 편이 스펙트럼. 짝수 동위원소의 전이선의 높이는 자연계의 성분비에 비례한다.