^{85}Rb D_1선에서 다중광자 상호작용을 고려한 포화 흡수 분광

Saturation spectroscopy based on multi-photon process in ^{85}Rb D_1 line

노종우, 강만일, 류지욱
공주대학교 물리학과
jwryu@kongju.ac.kr

포화 흡수 분광은 조사하려는 매질에 같은 주파수를 갖는 강한 펌프광과 약한 조사광을 서로 반대 방향으로 진행시켜, 조사광의 흡수 계수 변화를 측정하는 것이다. 펌프광이 바닥 준위에 있는 원자들을 들뜬준위로 여기 시켜 바닥준위에는 더 이상 광을 흡수하는 원자가 없는 포화 상태를 만들고, 조사광이 이러한 상태를 조사하게 된다.(1)

광펌핑 포화분광(saturation spectroscopy with optical pumping)에서는 공진에너지 준위의 하준위에 있던 원자들이 펌핑과 자발방출 과정을 통해 바닥 상태에 있는 다른 에너지 준위로 이동되어 포화분광에서의 포화와 같은 효과가 발생한다.(2) Nakayama는 알칼리금속 원소의 초미세 준위사이에서 발생하는 포화 흡수 신호의 크기와 부호를 계산하기 위하여, 하준위 2개와 상준위 2개로 구성된 4준위 원자모델에 약한 펌프광을 이용하여 초미세 준위에 축퇴되어 있는 Zeeman 부준위 사이에서의 흡수-자발 방출의 한 주기를 고려한 4준위 광펌핑 이론(3)을 제시하였다. Nakayama는 광펌핑의 한 주기만을 고려하기 위해서 펌프광의 세기가 충분히 작아서 펌프광에 의해서 여기된 원자는 유도방출은 하지 않고 자발방출만 가능하다는 가정을 하고, 4가지의 전이 형태를 고려하였다. 포화 흡수 분광을 이용하여 ^{87}Rb D_2선에 대하여 약한 자기장하에서 Zeeman 효과를 측정하고 실험결과를 Nakayama이론과 비교한 연구들이 있었고, 그 결과 실험과 이론에서 약간의 차이가 발생하였다.(4)

우리는 ^{85}Rb D_1선에서 광펌핑 포화분광을 이용하여 Zeeman 효과를 측정하였는데 그림1에서 보는 것과 같이 주공진선에서는 신호가 비교적 이론과 잘 일치하지만 교차공진선 에서는 Nakayama이론과 일치하지 않는다. 우리는 알칼리금속 원자의 초미세준위에 축퇴되어 있는 Zeeman 부준위사이에 펌프광과 조사광의 가능한 모든 자발 방출을 고려하여 상준위 2개와 하준위 5개로 이루어진 7준위 모델을 만들어 원자의 결맞음까지 고려한 포화흡수 현상을 설명할 수 있었다. 또한 Nakayama이론에서 설명하기 어려웠던 조사광과 결합광의 원자결맞음 효과, 출력에 의한 효과, 그리고 교차공진선에 대한 문제를 이 원자모델로 설명이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 약한 자기장하에서 ^{85}Rb D_1 전이선에 대한 주공진선과 교차공진선에서 신호의 크기를 7준위 원자에 대한 Rate Equation을 이용하여 구하였고 이를 실험결과와 비교하였다. 7준위 모델에서는 자발 방출과 충돌에 의한 완화 Hamiltonian과 원자와 전기장의 상호작용 Hamiltonian 그리고 원자셀에서 레이저 경로에 새로 들어오고 나가는 원자들을 고려한 replace 항과 V-Type에서는 원자결맞음 효과도 고려하였다. 이론적인 결과는 수학 프로그램인 Mathematica를 이용하여 Rate Equation을 수치적으로 계산하는 방법으로 얻을 수 있었다. 그리고 자기장내에서 에너지 준위 분리에 따른 공진 신호 위치의 이동은 총각운동량이 J = 1/2인 에너지 준위에서의 해석적인 해인 Breit-Rabi 공식(5)을 자기장

에 의한 Hamiltonian 변화로 Rate Equation에 포함시켜서 계산하였다.

이 7준위 모델의 이론적 타당성을 확인하기 위하여 Nakayama가 가정한 약한 펌프광과 조사광 하에서 7준위 모델과 Nakayama이론과 비교하였다. 그 결과 그림 2와 같이 주공진선에서는 완전히 일치하는 것을 볼 수 있고 교차공진선에서는 Nakayama이론 보다 7준위 모델이 더 실험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

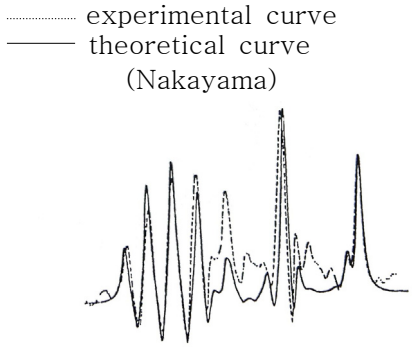

그림 1 자기장하에서 포화흡수 스펙트럼

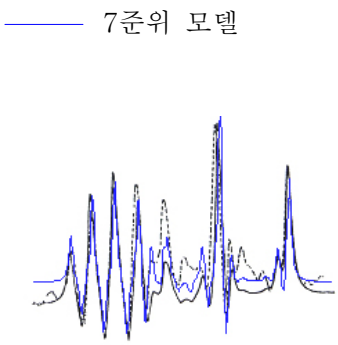

그림 2 자기장 100 G에서 Nakayama이론과 7준위 모델 실험결과의 스펙트럼 비교

우리는 7준위 모델이 이상적인 상태에서 Nakayama이론과 일치하는지 알아보았다. 약한 펌프광과 조사광에서는 그림3과 같이 두 이론이 서로 일치된다. 조사광을 증가시켜 가면 그림4와 같이 스펙트럼의 모양이 변화되는 것을 볼 수 있는데 이것은 Nakayama이론에서는 예측할 수 없는 것이다.

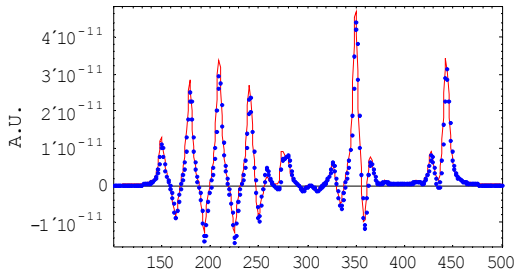

그림 3 Nakayama이론과 7준위 모델(point)의 스펙트럼비교

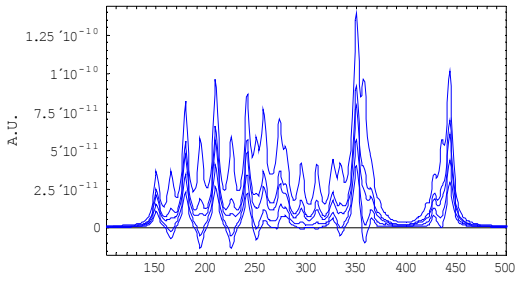

그림 4 7준위 모델에서 조사광을 증가시키면서 예측한 스펙트럼

참고문헌

[1] R. A. McFalane, W. R. Bennett, Jr., and W. E. Lamb, J. Appl. Lett. **2**, 189 (1963).

[2] S. Nakayama, G. W. Series, and W. Gawlik, Opt. Commun. **34**, 382 (1980).

[3] S. Nakayama, J. Opt. Sco. Am. B **2**, 1431 (1985).

[4] H. S. Lee, S. E. Park, J. D. Park, H. Cho, J. Opt. Soc. Am. B **11**, 5581 (1994).

[5] A. Corney, *Atomic and Laser Spectroscopy* (Claren Press, Oxford, 1977), Chap. 18.