

3 준위 원자계에서 주파수 변조 라만 레이저광에 의해 유도된 라만 결맞음 맥놀이

Raman Coherence Beats Induced by Frequency Modulated Raman Field in a Three-level Λ System

박성중, 권택용, 이호성, 박종대*, 조 혁**

한국표준과학연구원, *배재대학교 물리학과, **충남대학교 물리학과

goodtime@kriss.re.kr

원자가 전자기파와 상호작용할 때 원자 전이의 결맞음 여기 (coherent excitation of atomic transitions)는 일반적인 현상이다. 이 상호작용은 라비 진동 (Rabi oscillation), 자유 유도 감쇠 (free induction decay), 단열 밀도 이송 (adiabatic population transfer), 결맞음 과도 (coherent transients; CT) 등 다양한 결과를 가져온다. 특히, 전자기파의 주파수가 원자의 공진주파수를 중심으로 스위핑될 때 결맞음 과도 현상 (coherent transient phenomenon)은 밀도 반전 (population reversal)을 유도하기도 한다. 두 개의 바닥상태와 하나의 들뜬상태로 구성된 3 준위 원자가 마이크로파와 레이저광과 상호작용 하는 ladder 형 원자계와 두 개의 레이저광과 상호작용 하는 Λ 형 원자계는 이와 같은 현상을 관찰하기 위해 흔히 이용되는 원자계이다. Ladder 형 원자계에 대하여 Camparo 등은 루비듐-87 원자의 초미세 전이에서 ARP(adiabatic rapid passage) 현상에 대하여 보고하였는데⁽¹⁾, 그들은 바닥상태의 $0-0$ 초미세 전이에 대하여 마이크로파 스위핑에 따른 두 바닥상태간의 ($|F=1, m_F=0\rangle$ 상태에서 $|F=2, m_F=0\rangle$ 상태로의) 밀도 이송에 의한 레이저광의 투과신호를 관찰하였다. 그들은 마이크로파의 주파수를 빨리 스위핑할수록 흡수선의 모양이 비대칭적으로 변화할 뿐만 아니라 관찰되는 공진 피크의 위치도 이동되는 실험 결과를 보여주었다. 뿐만 아니라 그들은 이 원자계에서 순간적으로 마이크로파의 위상을 π 만큼 변화시켜 주었을 때 진동 감쇠하는 분광신호를 관찰하였다⁽²⁾. Λ 형 원자계에서 결맞음 밀도 포획 (coherence population trapping; CPT) 현상은 대표적인 원자와 레이저광의 결맞음 상호작용 결과이다. 좁은 선폭을 갖는 CPT 신호, CPT-maser⁽³⁾ 등은 특히 주파수 표준기로의 응용이 제시되고 있으며, 이에 따라 레이저광의 주파수 및 위상 변화에 따른 결맞음 과도 현상은 큰 관심의 대상이 되고 있다. 원자의 공진주파수를 측정하기 위해 레이저광 (혹은 마이크로파)의 주파수를 스위핑하거나, 분광스펙트럼을 이용하여 로컬 오실레이터를 주파수 잠금하기 위해, 레이저광(혹은 마이크로파)의 주파수를 변조(modulation)할 경우, 결맞음 과도 현상은 주파수 표준기로의 응용을 위해 해결해야 할 문제점으로 제시되고 있다⁽⁴⁻⁷⁾.

위에서 언급한 두 개의 원자계에서 결맞음 과도 현상은 두 바닥상태간의 결맞음에 의해 결정되는 공통점을 갖지만 다음과 같은 큰 차이점이 있다. Ladder 형 원자계에서 레이저광은 두 바닥상태간의 밀도차를 유도하고, 이 원자와 마이크로파의 상호작용 결과로부터 유도된 두 바닥상태들 사이의 밀도 변화를 레이저광의 흡수 변화를 통해 읽는다. 반면 Λ 형 원자계에서, 두 레이저광의 세기가 같은 경우, 두 바닥상태의 밀도차는 거의 변화가 없다. 이 원자계에서 원자들은 대부분 두 레이저광에 의해 유도된 두 바닥상태의 중첩상태들 중 레이저광과 상호작용하지 않는 CPT 상태로 광펌핑되는데, 레이저광의 주파

수, 레이저광의 위상, 외부 자기장 등의 영향에 의한 CPT 상태의 밀도 변화를 두 레이저광의 흡수 변화를 통해 읽는다.

본 발표에서는 Λ 형 원자계에서 라만 레이저의 주파수 변화에 따른 진동하는 CPT 신호(Raman coherence beats; RCB)의 특성에 대하여 논하고, 이를 이용한 원자 주파수 표준기로의 응용을 제시한다. 라만 레이저의 디튜닝 크기는 고정시키되 주기적으로 디튜닝의 부호를 변화시키면 디튜닝에 의존하는 진동신호를 관찰할 수 있다. RCB 신호 진동수의 레이저 디튜닝 의존성은 Ramsey 신호와 매우 밀접한 관계를 갖고 있다. 원자가 전자기파와 두 번 상호작용하여 매우 좁은 선폭의 간섭 스펙트럼을 얻는 Ramsey 방법은 원자계에 사용되는 중요한 기술인데, 두 번 상호작용하는 시간 간격이 길수록 스펙트럼의 선폭이 좁아지므로, 최근에는 원자 광학 기술의 발달로 이 시간 간격을 길게 연장시킨 원자 분수 시계가 개발되었다. 이와 같은 Ramsey 방법이 원자 셀에서 실현되면 부피가 매우 작은 주파수 표준기로 동작될 수 있기 때문에 큰 응용성을 갖게 된다. 원자빔을 이용할 경우 Ramsey 신호를 얻기 위해, 두 번의 마이크로파와의 상호작용 외에, 마이크로파와 상호작용하기 전에 원자를 광펌핑하고 다시 마이크로파와 상호작용 후의 밀도를 검출하기 위한 두 번의 레이저광과의 상호작용이 필요하다. 그러나 본 발표에서 소개하는 방법은 부피가 작은 원자 셀만을 사용하고 단순히 레이저 주파수를 주기적으로 변화에 따른 흡수변화를 관찰하기 때문에 부피가 매우 작고 동작원리도 간단할 뿐 아니라 높은 안정도를 얻을 수 있게 한다. 이와 같은 원자의 결맞음을 이용한 주파수 변조 방법은 단순히 분광신호의 미분신호(error signal)를 얻기 위한 주파수 변조 방법과 전혀 다른 방법으로, 신호대 잡음비를 개선할 뿐만 아니라 원자 공진주파수에 로컬 오실레이터를 주파수 잠금하기 위한 새로운 방법으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. J.C. Camparo and R.P. Frueholz, "Parameters of adiabatic rapid passage in the 0-0 hyperfine transition of 87Rb ", Phys. Rev. A 30, 803-811 (1984).
2. J.C. Camparo and R.P. Frueholz, "Observation of the Rabi-resonance spectrum", Phys. Rev. A 38, 6143-6150 (1988).
3. J. Vanier, A. Gordone, and F. Levi, "Coherent population trapping in cesium: Dark lines and coherent microwave emission", Phys. Rev. A 58, 2345-2358 (1998).
4. C. Audoin, V. Candelier, and N. Dimarcq, "A Limit to the Frequency Stability of Passive Frequency Standards Due to an Intermodulation Effect", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 40, 121-125 (1991).
5. J.C. Camparo and R.P. Frueholz, "Fundamental stability limits for the diode-laser-pumped rubidium atomic frequency standard", J. Appl. Phys. 59(10), 3313-3317 (1986).
6. S. Knappe, R. Wynands, J. Kitching, H.G. Robinson, and L. Hollberg, "Characterization of coherent population-trapping resonances as atomic frequency references", J. Opt. Soc. Am. B 18, 1545-1553 (2001).
7. J. Kitching, H.G. Robinson, L. Hollberg, S. Knappe, and R. Wynands, "Optical-pumping noise in laser-pumped, all-optical microwave frequency references", J. Opt. Soc. Am. B 18, 1676-1683 (2001).