람다형 3준위 원자계에 대한 2준위 원자계 근사
Two-level Approximation of a Λ-type Three-level Atomic System

박종대, 조창호, 박성종*, 조혁*, 권택용**, 이호성**
배재대학교 전산전자물리학과, *충남대학교 물리학과, **한국표준과학연구원
jdpark@pcu.ac.kr

최근 3-준위 원자계에서 원자 결맞음에 관련된 현상에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 전자기 유도 투과, 전자기 유도 흡수, 밀도 반전 없는 레이저 발진, 선폭이 좁은 공진에 의한 큰 굴절률의 실현, 저광속, 초광속, 초저온 원자 냉각 현상들은 원자 결맞음과 관련된 현상들이다. 3준위 원자계는 계단형, V 형, Λ 형으로 분류할 수 있는데, Λ 형의 3준위 원자계는 바닥상태간의 간섭성이 오래 지속될 수 있으므로 Λ 형의 3준위 원자계가 실질적으로 많이 연구 되고 있다. 3준위 원자계와 빛과의 상호작용은 밀도행렬방정식 또는 슈뢰딩거 방정식을 사용하여 이론적으로 연구할 수 있는데, 대부분 수치적 계산 방법에 의존하게 된다. 만일 Λ 형 원자계에서 여기상태의 밀도가 아주 작아서 여기상태를 무시할 수 있는 경우라면 3준위 원자계를 2준위 원자계로 근사할 수 있는데, 결합광의 세기에 비해 조사광이 작은 경우와 비공진 조건에서 근사가 많이 연구되어 왔다. Λ 형 원자계에서 여기상태를 고려하지 않는 것은 한 바닥상태에서 다른 바닥상태로의 2광자 천이만 고려하는 것을 의미하는데 유효 전기장으로 2광자 천이를 기술하게 된다. 그러나 2광자 천이와 단일광자 천이는 본질적으로 다른 주파수 특성을 갖고 있으므로 2광자 천이를 유효전기장에 의한 1 광자 천이로 근사하는 것은 문제가 있다. 본 논문에서는 2광자 천이의 주파수 특성을 잘 나타내는 근사에 대해 기술하고자 한다. 본 논문의 결과는 다중 주파수 레이저에 의한 바닥상태간의 라만 천이를 기술하는데 유용하게 이용될 수 있다.

그림 1 에서와 같이 Λ형 에너지 준위를 가지고 있는 원자가 라비 주파수가 Ω_1, $\Omega_2^{(1)}$ 인 레이저빔과 상호작용을 하고 있다고 하고, 여기준위의 밀도 감쇠율(2γ)에 규격화된 detuning을 δ_1, δ_2라고 하자.

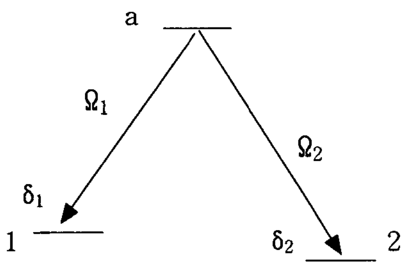


그림 1 Λ형 에너지 준위계

이런 원자계의 해밀토니안은 |a>, |1>, |2> 상태 벡터로 구성된 힐버트 공간에서 다음과 같이 기술된다.

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_1 & -\Omega_2 \\ -\Omega_1 & 0 & 0 \\ -\Omega_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1}$$

주파수 detuning과 자발 방출과 바닥상태간의 충돌 등의 결맞음성 감소(γ_{12})에 의한 밀도행렬의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)_{decay}=\begin{bmatrix}-2\gamma\rho_{aa} & -(\gamma-i\delta_1)\rho_{a1} & -(\gamma-i\delta_2)\rho_{a2}\\ -(\gamma+i\delta_1)\rho_{1a} & \gamma\rho_{aa} & -(\gamma_{12}-i(\delta_2-\delta_1))\rho_{12}\\ -(\gamma+i\delta_2)\rho_{2a} & -(\gamma_{12}+i(\delta_2-\delta_1))\rho_{21} & \gamma\rho_{aa}\end{bmatrix} \quad (2)$$

밀도행렬성분의 변화는 다음 방정식을 풀어 알아낼 수 있다.

$$i\hbar\frac{\partial\rho}{\partial t}=H_3\rho-\rho H_3+i\hbar\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)_{decay} \quad (3)$$

식(1)-(3)으로 기술되는 3준위 원자계를 여기상태를 제외한 2 준위 원자계로 근사하였을때 올바른 근사가 될려면 행렬 요소 성분에 관한 방정식은 불변해야 한다. 실제적으로 여기상태로의 천이 때문에 근사된 2준위계의 해밀토니안은 Hermitian 이 될 필요는 없다. 2준위 원자계로 근사한 해밀토니안은

$$H_2=\begin{pmatrix}0 & -\dfrac{i\Omega_1\Omega_2}{\gamma-i\delta_2}\\ -\dfrac{i\Omega_1\Omega_2}{\gamma-i\delta_1} & 0\end{pmatrix} \quad (4)$$

이고, 밀도행렬 방정식 및 밀도행렬 요소의 감쇠를 나타내는 행렬은 다음과 같다.

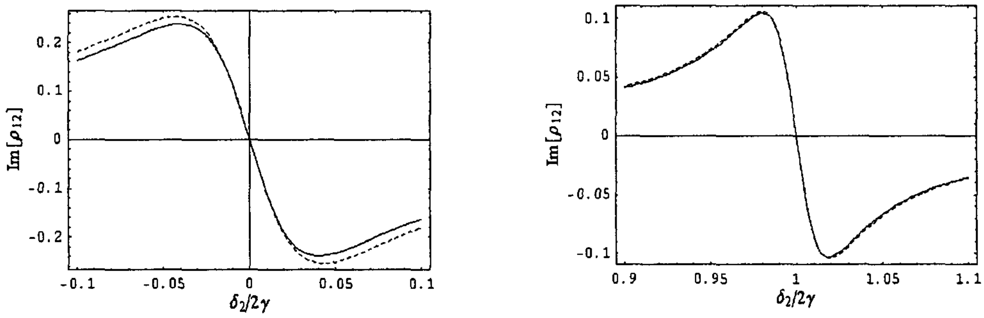
$$i\hbar\frac{\partial\rho}{\partial t}=H_2\rho-\rho H_2^{+}+i\hbar\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)_{decay}, \qquad \left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)_{decay}=\begin{pmatrix}\lambda_{11} & \lambda_{12}\\ \lambda_{21} & \lambda_{22}\end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$\lambda_{11}=-\frac{\gamma\Omega_1^2}{\gamma^2+\delta_1^2}\rho_{11}+\frac{\gamma\Omega_2^2}{\gamma^2+\delta_2^2}\rho_{22}+\ldots,\qquad \lambda_{22}=\frac{\gamma\Omega_1^2}{\gamma^2+\delta_1^2}\rho_{11}-\frac{\gamma\Omega_2^2}{\gamma^2+\delta_2^2}\rho_{22}+\ldots$$

$$\lambda_{12}=-(\gamma_{12}-i(\delta_2-\delta_1)+\frac{\Omega_1^2}{\gamma-i\delta_2}+\frac{\Omega_2^2}{\gamma+i\delta_1})\rho_{12},\qquad \lambda_{21}=\lambda_{12}^{+} \quad (6)$$

이다. 여기서 대각성분의 감쇠항은 원자들이 여기상태로 천이한 후 바닥상태로 자발 방출하는 효과를 나타낸다. 그림 2의 실선은 바닥상태간의 밀도 행렬 요소의 허수 부분을 식 (1)-(3)을 사용하여 구한 것이고 점선은 식 (4)-(6)을 사용하여 구한 것이다. $\delta_1=0$ 일때(그림 2(a)) 두 계산의 차이가 약간 존재하는데 이는 근사식에서 여기상태의 밀도를 무시하였기 때문이다. δ_1=1 (그림 2(b)) 이상 되면 계산 결과는 잘 일치 한다.



(a) (b)

그림 2 바닥상태간의 밀도행렬성분의 허수 부분. 실선: 3 준위계에 대한 계산, 점선: 근사식을 사용한 계산, $2\gamma=1$, $\gamma_{12}=0.001$, $\Omega_1=\Omega_2=0.1$, (a) $\delta_1=0$ (b) $\delta_1=1$.

1. 본 논문에 사용된 라비 주파수는 $\mu E/2\hbar$ 이고, 여기준위의 밀도 감쇠율(2γ)에 규격화 되었음.

☆ 본 연구는 배재대학교 교내 연구비의 지원을 받아 수행되었음.