이득 매질을 이용한 비고전적인 정도 측정

Measurement of Nonnclassical Measure by Using the Gain Medium

김영철*, 윤태현**
광주파수제어연구단, 한국표준과학연구원, 대전광역시 유성구 도룡동 1번지
* yckim@kriss.re.kr, ** thyoon@kriss.re.kr

쥠, 저프아송 광통계와 같이 고전 파동 이론으로 설명할 수 없는 성질을 빛의 비고전성이라 하고, 이런 성질을 가진 빛을 비고전적인 빛이라 한다. 빛의 비고전성은 열적 평형 상태에서 발생되는 빛(열 빛)이 섞이면 그 성질이 훼손되는데, 비고전성을 완전히 잃게 하는 열 빛의 평균 광자 수를 비고전성의 비고전적인 정도라 한다. 지금 까지 비고전적인 정도는 실험적으로 측정될 수 없는 값으로 여겨져 왔다. 본 논문에서는 비고전적인 정도와 측정가능한 양과의 관계식을 얻어 비고전적인 정도가 간접적으로 측정될 수 있음을 논의한다.

Resonant한 빛이 열적 평형 상태에 있는 두 준위 원자들의 집합체인 이득 매질에 입사하여 one-photon 상호 작용에 의해 증폭되는 상황을 고려해 보자. 입사 빛의 밀도연산자의 운동 방정식은

$$\frac{d\hat{\rho}(t)}{dt}=\beta n_2(-\hat{a}\,\hat{a}^{\dagger}\,\hat{\rho}+2\,\hat{a}^{\dagger}\,\hat{\rho}\,\hat{a}-\hat{\rho}\,\hat{a}\,\hat{a}^{\dagger})+\beta n_1(-\,\hat{a}^{\dagger}\,\hat{a}\,\hat{\rho}+2\,\hat{a}\,\hat{\rho}\,\hat{a}^{\dagger}-\hat{\rho}\,\hat{a}^{\dagger}\,\hat{a}) \tag{1}$$

이다. 여기서 β는 입사 빛과 원자의 결합 상수이고, n_2와 n_1은 각각 매질 속의 들뜬 준위에 있는 원자 수와 기저 상태에 있는 원자 수이다. 미분 방정식의 일반적인 해는 Carussoto에 의해 알려 졌다[1]. 즉 밀도 연산자의 결맞음 상태 대각 표현[2]

$$\hat{\rho}(t)=\int \phi(v,t)|v\rangle\langle v|d^2v$$

에서, 매질을 지나는 동안 P-함수 $\phi(v,t)$는

$$\phi(v,t)=\int \phi_0(v')\frac{1}{\pi m(t)}\exp[-|v-v'G(t)|^2/m(t)]d^2v' \tag{2}$$

이다[1,3]. 여기서 $m(t)$는

$$m(t)=\frac{n_2}{n_2-n_1}(|G(t)|^2-1)$$

으로 자발 방출에 의한 빛의 평균 광자 수이고 $|G(t)|^2=\exp[2(n_2-n_1)\beta t]$로 유도 방출에 의한 매질의 이득이다. P-함수 $\phi(v)$는 음의 함수이거나 델타 함수 보다 더 특이할 수 있고 이에 해당하는 빛은 비고전적인 빛이다. 그러나 P-함수는 Gaussian 함수와의 convolution 적분에 의하여 양의 함수가 되고 특이성을 잃게 된다. 즉 R-함수[4-5]

$$R(v,\tau)=\frac{1}{\pi\tau}\int \phi_0(v')\exp[-|v-v'|^2/\tau]d^2v' \tag{3}$$

은 매개 변수 τ가 증가함에 따라 점점 고전적인 확률 밀도 함수가 된다. 열 빛의 P-함수는 Gaussian 함수이므로, R-함수는 주어진 빛에 열 빛이 중첩된 빛의 P-함수로 해석할 수 있고, 매개 변수 τ는 중첩되는 열 빛의 평균 광자 수를 의미한다. 식 (2)와 식 (3)을 비교하여 τ와 $|G(t)|$의 관계식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\tau(t)=\frac{m(t)}{|G(t)|^2}=\frac{n_2}{n_2-n_1}\left(1-\frac{1}{|G(t)|^2}\right), \tag{4}$$

여기서 매질의 이득 $|G(t)|$는 측정 가능한 값이므로, 식 (4)로 부터 τ를 간접적으로 측정할 수 있다. 따라서 입사 빛의 비고전적인 정도 τ_m이 알려 졌다면 매질에서 비고전성을 완전히 잃게될 때의 $|G(t)|$를 구할 수 있고, 그 역도 성립한다.

예로 쥠이 있는 빛이 이득 매질에 입사하는 경우를 고려해 보자. $|G(t)|^2>2 \quad (n_1=0)$ 조건에서 1차 쥠[3]과 2차 쥠[6]이 사라진다는 것이 밝혀졌다. 이 조건하에서 식 (3)으로부터 쥠이 사라 질 때의 τ, τ_m 을 계산해 보면

$$\tau_m=\frac{1}{2} \quad (|G(t)|^2=2, \quad n_1=0) \tag{5}$$

이다. 이 것은 K. Kim의 1차 쥠의 비고전적 정도 계산 결과[7]와 일치한다. 또한 저프아송 광통계의 비고전적인 정도가 역시 1/2임이 알려 졌다[7]. 따라서 $|G(t)|^2>2(n_1=0)$인 조건에서 저프아송 광통계를 잃게 됨을 알 수 있다. 또한 고차 쥠의 비고전적인 정도를 계산하여 이 성질이 사라질 $|G(t)|$ 조건을 논의한다.

참고 문헌

1. S. Carussoto, Phys. Rev. A 11, 1629 (1975).
2. R. J. Glauber, Phys. Rev. 131, 2766 (1963).
3. C. K. Hong, S. Friberg, and L. Mandel, J. Opt. Soc. Am. B 2, 494 (1985)
4. K. E. Cahill and R. J. Glauber, Phys. Rev. 177, 1882 (1969); 177, 1857 (1969)
5. C. T. Lee, Phys. Rev. A 45, 6586 (1992); 44, R2755 (1991).
6. M. Hillery and D. Yu, Phys. Rev. A 45, 1860 (1992)
7. K. Kim, Phys. Rev. A 59, 1566 (1999).