빛의 양자역학적 행동

빛의 양자화(1)

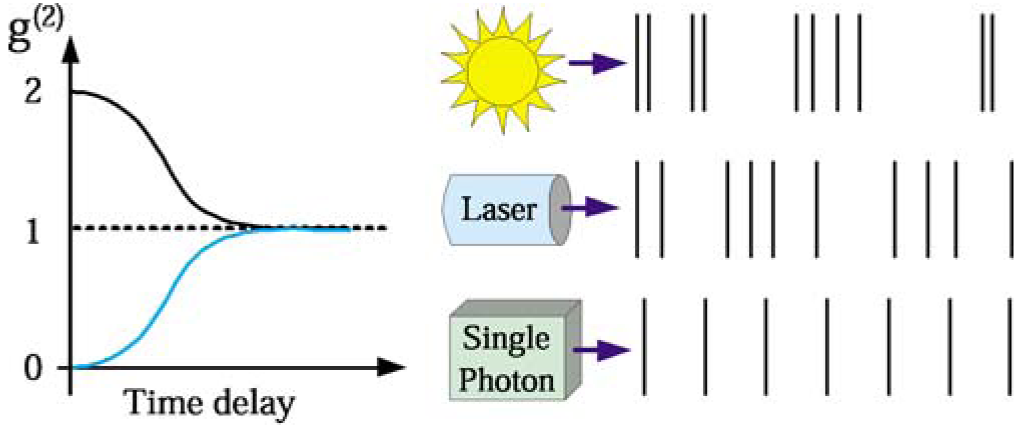
- Newton의 입자론, Hooke의 파동론 (17세기)
- Young의 간섭실험, Maxwell Equation (19세기)
- Planck, Bohr, Einstein: 에너지 덩어리 $(n\hbar\omega)$
  - 원자는 양자화 빛은 불연속적 에너지를 갖는 전자기파로 간주
- Dirac, 1927: quantum theory of radiation 발표

빛의 양자화(2)

- Semi-classical theory로도 대부분의 현상 기술 가능

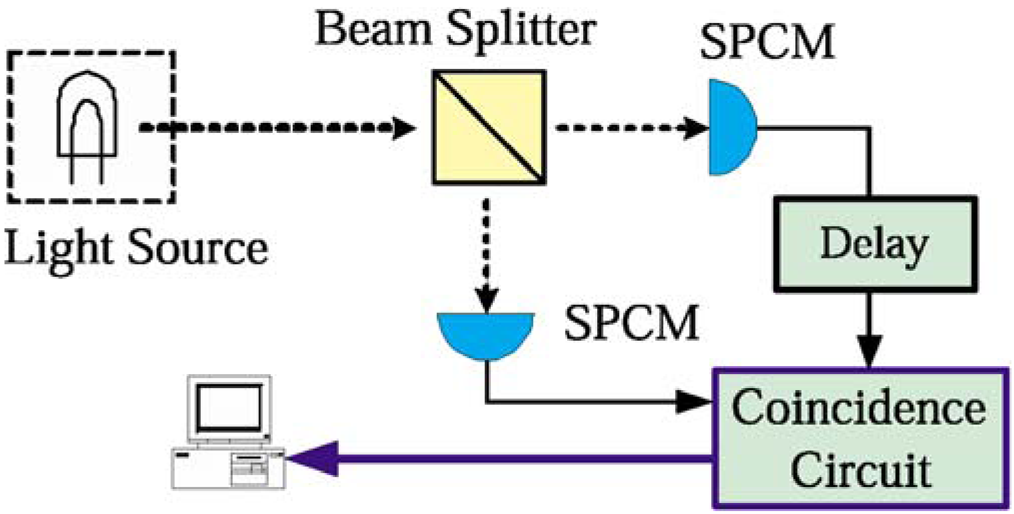
- Nonclassical light
  - 단광자상태
  - 광자간 양자얽힘
  - 다광자 간섭현상
  - 양자지우개

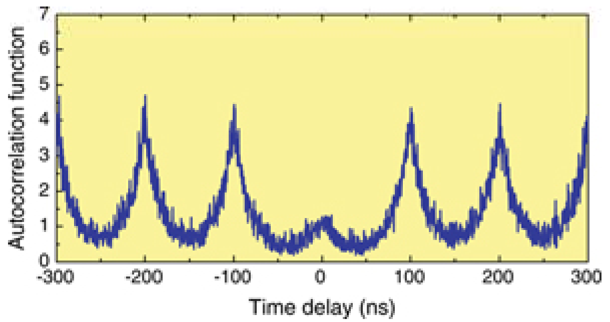
광원의 특성



- 열광원은 빛이 뭉쳐 나온다. (Bunching)
- 레이저는 랜덤하게 나온다.
- 단일광원은 photon이 한 순간에 한 개씩 나온다. (anti-bunching)

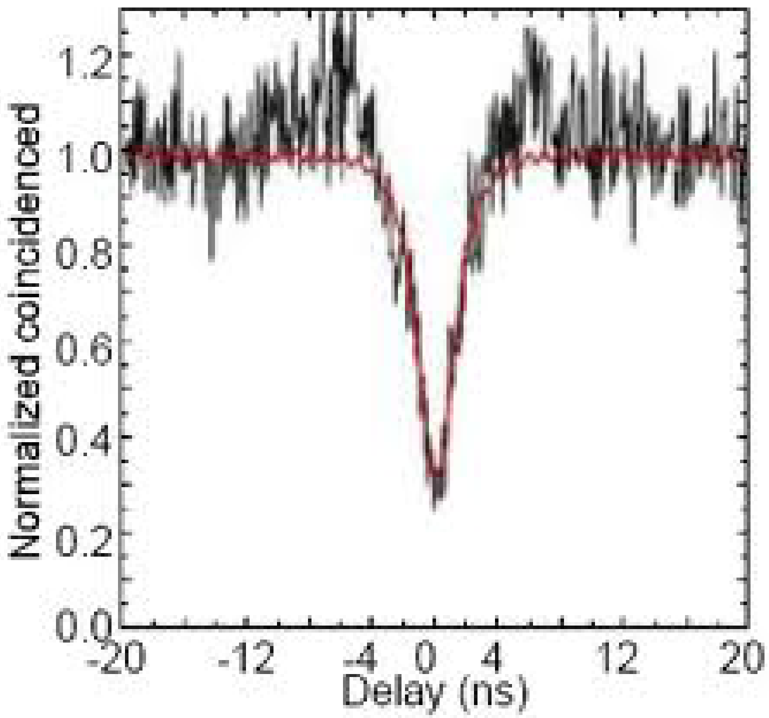
단일광자 측정

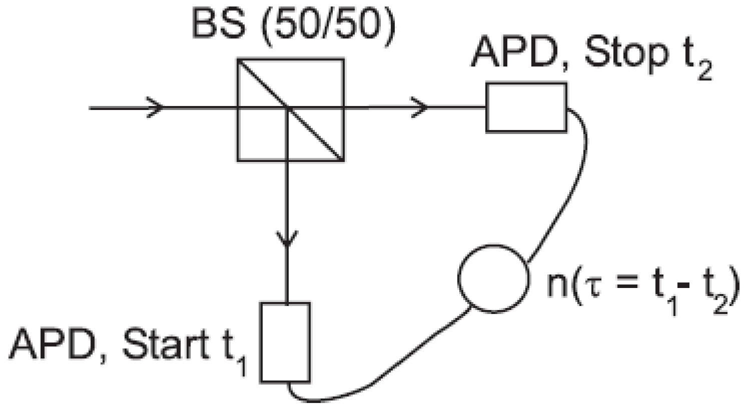




- Hanbury Brown-Twiss 실험장치
- 두 detector에서 동시에 빛이 감지되면 측정
- Delay가 0 일 때는? 단일 광원이라면 확률이 “0”

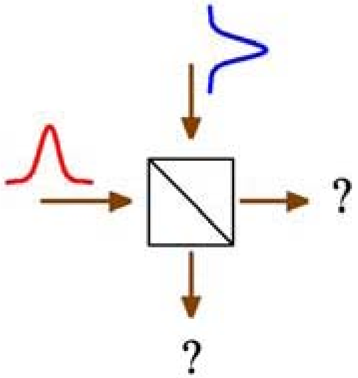
Quantum of Light

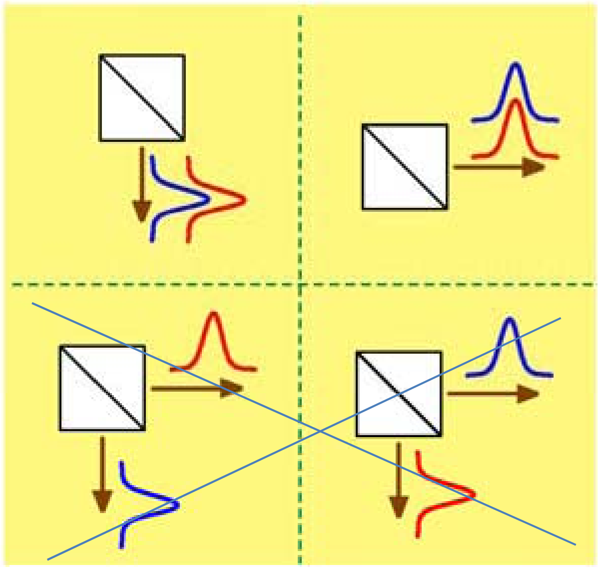


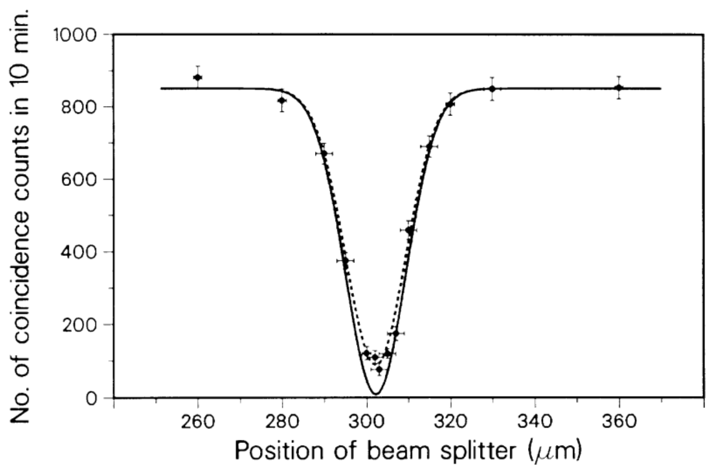


- Photon 개념을 생각하지 않고는 나올 수 없는 결과

양자간섭 (2차 간섭성)







- 빛에 대한 고전 이론으로 설명할 수 없는 현상

빛의 양자화(3)

- 전기장과 자기장은 쿨롱게이지 $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 에서 벡터 퍼텐셜로 $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$, $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 와 같이 결정된다.

- 자유공간에서 3차원 가상상자를 가정하면

$$\begin{aligned}\overrightarrow{A}(\vec{r}, t) &= \sum_k \overrightarrow{A}_{\vec{k}}(\vec{r}, t) \\ &= \sum_k \overrightarrow{A}_{\vec{k}} e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega_k t)} + \overrightarrow{A}^*_{\vec{k}} e^{-i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega_k t)}\end{aligned}$$

이때 전기장모드의 위치와 운동량을 아래와 같이 정리

$$\overrightarrow{A}_{\vec{k}} = \frac{\hat{e}_\rho}{\sqrt{4 \epsilon_0 V \omega^2_{\vec{k}}}} (\omega_k q_{\vec{k}} + i\, p_{\vec{k}})$$

빛의 양자화(4)

- 전자기모드의 평균에너지

$$
\begin{aligned}
\bar{\varepsilon}_{\vec{k}} &= \frac{1}{2}\int_V \left(\epsilon_0 (\vec{E}(\vec{r},t))^2 + \frac{1}{\mu_0}(\vec{B}(\vec{r},t))^2\right) dV \\
&= \frac{1}{2}\int_V \left(\epsilon_0 \left(\frac{\partial \vec{A}_{\vec{k}}(\vec{r},t)}{\partial t}\right)^2 + \frac{1}{\mu_0}(\vec{\nabla} \times \vec{A}_{\vec{k}}(\vec{r},t))^2\right) dV \\
&= \frac{1}{2}(\omega_k^2 q_{\vec{k}}^2 + p_{\vec{k}}^2)
\end{aligned}
$$

$$
\hat{\vec{A}}(\vec{r},t) = \sum_k \vec{\epsilon}_{\vec{k}} \sqrt{\frac{\hbar}{2\epsilon_0 \omega_k V}} \left(\hat{a}_{\vec{k}}\, e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega_k t)} + \hat{a}_{\vec{k}}^{\dagger}\, e^{-i(\vec{k}\cdot\vec{r} - \omega_k t)} \right)
$$

$$
\hat{H} = \sum_k \hbar\,\omega_k \left(\hat{a}_{\vec{k}}^{\dagger}\hat{a}_{\vec{k}} + \frac{1}{2}\right)
$$