

양자얽힘과 광자의 편광

SPDC 실험과 벨 상태를 중심으로

최종덕(philonatu.com) 정리

1. SPDC(자발적 매개하향변환)

레이저 광자가 비선형 결정(BBO 등)을 통과하면 비선형 상호작용을 통해 두 개의 얽힌 광자가 생성될 수 있다.

흔히 '광자 하나가 둘로 쪼개진다'고 설명하지만, 엄밀하게는 비선형 매질 내부의 양자장 상호작용으로 두 개의 광자가 생성되는 과정이다.

생성된 두 광자는 에너지와 운동량 등의 보존법칙을 만족하면서 하나의 공동 양자상태를 이룬다.

SPDC: Spontaneous Parametric Down-Conversion

- 자발적 매개하향변환 개념 -

여기서 **자발적**이란 외부에서 인위적으로 조작하지 않아도 확률적으로 저절로 일어난다는 뜻이다.

매개란 BBO 결정이 변환을 일으켜 주지만, 자기 자신은 에너지를 거의 주거나 받지 않는다는 뜻이다.

Down-Conversion (**하향변환**)이란 쪼개지면서 나뉘진 광자는 원래 광자 에너지보다 낮다는 뜻이다. 하나가 둘로 쪼개지니 에너지 보존의 조건이라면 당연히 각각의 에너지는 낮아질 것이다. 예를 들어 입사광 532 nm(초록색)를 쏠 경우 두 개로 생성된 광자 하나는 810 nm 이 되고 다른 하나는 1550 nm처럼 더 긴 파장(더 낮은 에너지)의 두 광자가 생성될 것이다.

2. 에너지와 운동량 등의 보존법칙을 만족하는 하나의 공동 양자상태

예를 들어 녹색 레이저(파장 532 nm)를 BBO 결정에 쏘면, 결정 안에서 에너지가 높은 광자 1개(pump photon)가 에너지가 낮은 광자 2개(signal photon, idler photon)로 바뀌는 과정이 일어날 수 있다. 이런 과정을 직관적으로 "하나가 둘로 쪼개졌다."라고 설명하기도 한다.

그러나 광자는 구슬처럼 딱딱한 물체가 아니다. 광자는 전자기장의 양자(quantum)다.

즉 전자기장에 에너지 E 가 들어오면 결정 내부에서 E 는 $E_1 + E_2$ 로 재배치되는 양자과정이 일어난다.

그래서 광자 하나가 광자 둘로 된다고 말하지만, 실제로는 비선형 결정 내부에서 전자기장과 결정의 비선형 분극이 상호작용하여 새로운 두 개의 광자가 생성되는 것이다.

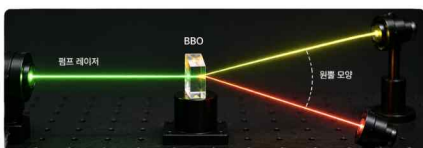
3. 공존상태에서 에너지와 운동량 등의 보존법칙의 의미

에너지는 어떻게 보존되는 사례로서 입사광이 3 eV 라면 생성된 두 광자는 1.4 eV 와 1.6 eV 로 되는 경우를 예로 들어보자. $3 = 1.4 + 1.6$ 이라서 에너지 보존이 된다고 할 수 있다.

마찬가지로 운동량도 보존된다. 입사광의 운동량이 p 라면 두 광자의 운동량은

$p_1 + p_2 = p$ 이다. 이 경우 두 광자는 서로 일정한 방향으로 날아갑니다.

실험 사진을 보면



처럼 두 갈래 원뿔(cone) 모양으로 방출되는 이유가 바로 운동량 보존 때문이다.

4. 그렇다면 정말 원래 광자가 남아 있는가?

원래 광자가 반으로 갈라지면 광자가 둘로 된다고 상상하지만 양자장론에서는 그런 상상이 적용되지 않는다. 오히려 입사광자가 소멸되고 새로운 두 광자가 생성되는 것이다. 원래 광자는 없어지고 새로운 두 광자가 만들어진다는 뜻이다.

그런데 왜 "쪼개진다"고 하는 이유는 생성된 두 광자의 총에너지, 총운동량, 그리고 생성 시점이 모두 원래 입사광자와 연결되어 있기 때문이다. 그래서 직관적으로 "한 광자가 두 개로 쪼개졌다."라고 할 수도 있다.

5. 편광 방향의 같을 수도 다를 수도 있다.

같은 편광 얽힘의 대표적인 상태 $(HH + VV) / \sqrt{2}$ 에서
H는 가로(Horizontal), V는 세로(Vertical) 편광이다.

측정 시 가로 편광이면 얽힌 광자도 가로 편광이고
측정 시 세로 편광이면 얽힌 광자도 세로 편광의 결과가 나온다
- 첫 번째 H → 두 번째 H
- 첫 번째 V → 두 번째 V

즉 항상 같은 편광이 측정된다는 뜻이다.

한편 반대 편광 얽힘도 가능하다.

$(HV + VH) / \sqrt{2}$ 의 경우

측정 시 가로 편광이면 얽힌 광자는 반드시 세로 편광이고
측정 시 세로 편광이면 얽힌 광자도 반드시 가로 편광의 결과로 나온다

- 첫 번째 H → 두 번째 V
- 첫 번째 V → 두 번째 H

즉 항상 서로 반대 편광이 측정된다.

이렇게 어떤 얽힘 상태가 생성되는지는 비선형 결정의 종류, 결정의 배향, 펄프 레이저의 편광, 광학계의 구성 등에 따라 얽힘 편광의 방향이 달라질 수 있다.

즉 '항상 같은 편광'인 경우도 있고 '항상 반대 편광'인 경우도 있다.

6. 네 가지 벨 상태

실제로는 두 가지 다양성만 있는 것이 아니라 4가지 경우수가 가능하다. 이런 경우를 실험한 조건이 바로 그 유명한 벨 상태다. 그 4 가지 상태는 다음과 같다.

- ① $(HH + VV)/\sqrt{2}$
- ② $(HH - VV)/\sqrt{2}$
- ③ $(HV + VH)/\sqrt{2}$
- ④ $(HV - VH)/\sqrt{2}$

이들은 양자정보학에서 가장 중요한 최대 얽힘 상태(Maximally Entangled States)이다.

7. 공동 양자상태(shared quantum state)

측정 전에 첫 번째 광자가 이미 H이고 두 번째가 이미 V로 정해져 있는 것은 아니다.

두 광자는 측정 전 하나의 공동 양자상태(shared quantum state)를 이루며, 측정 시 공동 상태에 대해 결과가 확정된다고 이해하는 것이 현대

양자역학의 표준적 설명이다.

결국 광자 얽힘은 항상 같은 편광일 수 있고 한편 항상 반대 편광일 수 있다. 광자의 편광 상관관계는 실험에서 어떤 얽힘 상태를 생성했는가에 따라 달라진다.

이 실험은 하나의 광자가 소멸되면서 두 개의 광자로 생성되는 과정이 전적으로 자발적이라는 데 의미있다. 즉 인간의 작용없이도 자연의 소멸 생성 과정은 일어난다.

자발성 과정은 디코히어런스가 생기는 과정과 마찬가지로 인간중심주의 자연학이 아니라는 점을 잘 보여준다.