

빛: 입자인가 파동인가?

백호정

매릴랜드 대학 물리학 교수 및 재미 한인 물리학자 협회 회장
(2005년 10월 12일, 미주 한국일보 Washington DC 판에 게재)

일부 사람들이 빛에 대하여 오해하고 있는 또 한가지는 “과학자들은 빛이 입자인지 파동인지 아직도 모른다”는 것이다. 이것 역시 사실이 아니다. 1905년에 아인슈타인이 밝힌 바와 같이, 빛은 전자 만큼이나 분명히 입자이다. 그것이 서로 간섭 효과를 나타낸다는 의미에서 파동의 성질을 나타내는데, 양자 역학이라는 현대 물리학에 의하면, 모든 입자들이 때로는 파동의 성질을 나타낸다.

“빛이 입자인가 파동인가?” 하는 논쟁은 아인슈타인 이전에 여러 세기 계속되었다. 17세기에 호이겐스는 파동설을 기초로 빛의 반사와 굴절을 분명하게 설명하였다. 그러나 뉴턴은 입자설을 주장하였고, 뉴턴의 권위 때문에 빛의 파동설은 백년 이상이나 빛을 보지 못하였다. 그러다가 19세기 초에 영(Young)이 두 개의 틈새를 통과한 빛이 서로 간섭한다는 것을 발견하여, 빛이 파동이라는 것이 실험적으로 “증명”되었다 (도표 참조). 그 후 1864년에 맥스웰은 빛이 전자장의 진동이 퍼져나가는 전자파라는 이론을 완성하였다.

그러나 20세기 들어서면서 이 이론으로 설명할 수 없는 빛의 새로운 성질이 발견되었다. 1902년에 레나드는 금속에 빛을 쬐이면 전자가 튀어나오는 소위 “광전 효과”를 발견하였다. 맥스웰의 이론에 의하면, 빛의 주파수(색깔)에 관계 없이 강도가 커지면 금속 안에 갇혀 있던 전자가 충분히 큰 에너지를 받아 튀어나와야 한다. 그러나 레나드는 주파수가 낮은 붉은 빛을 아무리 강하게 쬐여 주어도 전자가 나오지 않는 반면, 초록색이나 그보다 주파수가 더 높은 빛을 쬐어 주면 강도가 약하더라도 전자가 방출되는 것을 발견하였다.

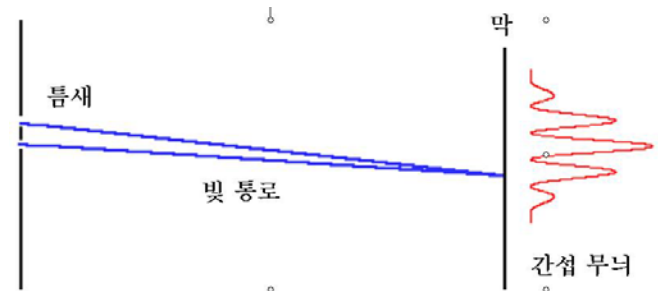
1905년에 아인슈타인은, 그 해에 발표한 그의 첫번째 논문에서, 빛이 주파수(f)에 비례하는 에너지($E = hf$, h : 플랑크 상수)를 가진 입자, 즉 “광자”들의 집합체라고 하여 이 문제를 설명하였다. 빛의 주파수가 너무 낮으면 (붉은 빛), 전자가 금속의 장벽을 뛰어넘기 위해 필요한 최소한의 에너지를 광자가 공급할 수 없으므로 전자가 튀어나올 수 없다. 주파수가 어느 값에 도달하면 (초록 빛) 전자가 나오기 시작하고, 주파수가 더 높아지면 (푸른 빛) 튀어나오는 전자의 에너지도 더 높아진다.

아인슈타인은 맥스웰의 전자기 이론을 철저히 받아들였고 석달 후에 그 이론을 기초로 한 특수상대성 이론을 발표한 것으로 보아, 그가 맥스웰의 이론과 모순되는 것처럼 보이는 입자설을 다시 주장한 것은 놀라운 일이며 물리법칙에 대한 그의 비상한 통찰력을 보여준다. 광전 효과에 대한 아인슈타인의 이론은 양자역학이 발전하는 길을 열어 주었고 1921년에 그는 이 업적으로 노벨상을 받았다.

그러면 영이 “증명”하고 맥스웰이 체계화한 빛의 파동설은 어떻게 되었는가? 1924년에 드브로이는 빛만이 아니라 전자와 같은 다른 입자들도 파동의 성질을 나타낸다고 제안하였고, 몇 년 후에 두 개의 틈새로 전자 하나만을 보내더라도 막에 간섭 효과가 나타난다는 것이 증명되었다. 전자가 더 이상 쪼갤 수 없는 기본 입자라면, 하나의 전자는 위든 아래든 하나의 틈새로만 지나가야 한다. 그러면 그것이 무엇과 간섭한다는 말인가? 이것을 설명하는 것이 바로 양자역학이다.

양자역학에 의하면, 하나의 입자가 어느 때에 어디에 있을 것인가(“상태”)는 확률적으로만 예측할 수 있으며, 이 확률을 기술하는 함수(“파동함수”)가 파동 방정식을 만족시킨다. 그러므로 하나의 전자는 위 틈새로 지나갈 확률과 아랫 틈새로 지나갈 확률을 동시에 가지고 있으며, 우리가 그것이 어느 쪽으로 지나가는지 관찰하지 않으면, 이 두 확률이 함께 작용하여 간섭 효과를 일으킨다. (도표 참조) 그러나 우리가 그 전자가 어느 쪽으로 지나가는지 관찰하면, 한쪽 확률은 없어져서 간섭 효과도 사라진다. 물론 어느 경우이든지 한번에 전자 하나씩만 막에 도착한다.

빛도 마찬가지이다. 하나의 광자가 위 틈새로 지나가거나 아랫 틈새로 지나갈 두 가지 확률을 가지고 있다. 우리가 그것이 어느 틈새로 지나가는지 관찰하지 않으면, 이 두 확률이 서로 간섭하여 막에 밝은 부분과 어두운 부분이 생긴다. 그러나 그럴 경우에도 막에는 한번에 하나의 광자만이 도착한다. 그러므로 빛은 주파수에 비례하는 에너지를 가진 광자들의 집합체이다. 빛이 어느 때에 어디를 지나갈 지 그 확률을 결정해 주는 함수가 파동 방정식을 만족시키며, 확률이 높은 곳에 광자가 많이 모여 밝아지고 확률이 적은 곳에 광자가 적게 모여 어두워지는 것이다.



두 개의 틈새로 들어온 물의 파동이 간섭을 일으키듯이, 두 개의 틈새로 들어온 빛 역시 간섭을 일으킨다. 막에 다다랐을 때까지의 통로의 길이의 차이에 따라, 두 빛줄기의 진폭이 서로 합쳐져 밝게 되기도 하고 서로 상쇄하여 어두어지기도 한다. 빛 대신 전자를 쬐어도 비슷한 간섭 효과가 일어난다.