

# 01

## 양자의 기묘한 세계

**학습 목표** 전자의 이중 슬릿 실험을 통해 파동 입자 이중성을 확인하고, 실험 결과를 확률 파동의 간섭을 바탕으로 하여 해석할 수 있다.

그림자를 이용한 예술 작품은 빛을 어떻게 비추는지에 따라 전혀 다른 모습으로 보인다. 미시세계의 입자인 전자에도 다른 모습이 있을까?



### 전자의 발견과 특성

영국의 과학자 크룩스(Crookes, W., 1832~1919)는 그림 III-1과 같이 진공 상태의 크룩스관을 만들어 전류를 흘려 보내는 실험을 한 결과, (-)극에서 (+)극으로 움직이는 광선을 발견했다. 과학자들은 전류의 반대 방향으로 움직이는 이 광선을 음극선이라고 불렀다.

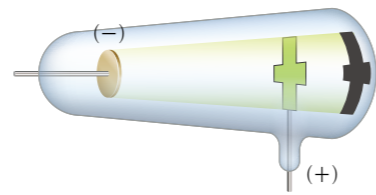
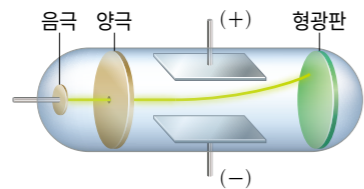


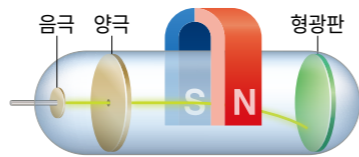
그림 III-1 음극선의 발견

이후 톰슨은 음극선의 정체를 밝히기 위해 크룩스관으로 다양한 실험을 수행했다. 톰슨은 그림 III-2와 같이 음극선이 전기장과 자기장에 의해 휘는 것을 발견했고, 이를 근거로 음극선의 실체가 음의 전하를 띤 입자의 흐름이라고 주장했다. 이 입자가 전자이다.



음극선의 진행 경로에 전기장을 걸어 주면 음극선이 전기장과 반대 방향으로 휘다.

그림 III-2 톰슨의 음극선 실험



음극선의 진행 경로에 자기장을 걸어 주면 음극선이 자기력에 의해 아래로 휘다.

전자가 이중 슬릿을 통과해 스크린에 도달하면 어떠한 무늬가 나타날까? 다음 모의실험을 하면서 알아보자.

**톰슨**  
(Thomson, J. J., 1856~1940)  
영국의 물리학자. 전자의 존재를 실험적으로 증명하고 전자의 질량을 측정했으며 원자 모형을 고안했다. 톰슨은 1906년 노벨 물리학상을 수상했다.

## 탐구

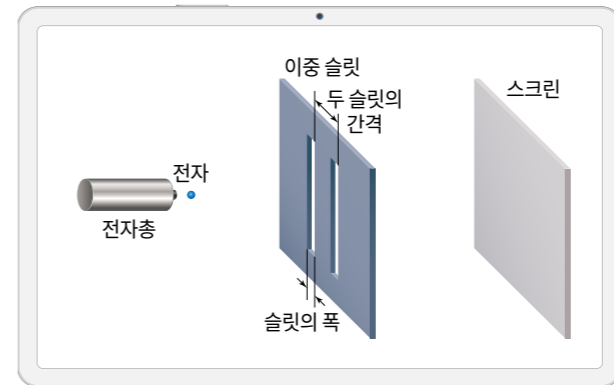
증거에 근거한 추론

### 목표

단일 전자의 이중 슬릿 모의실험을 통해 파동 입자 이중성을 확인할 수 있다.

### 과정

1. 인터넷에서 전자의 이중 슬릿 모의실험을 제공하는 누리집을 찾아 모의실험을 실행한다.



2. 전자가 2 개의 슬릿을 모두 통과할 수 있도록 설정한 뒤, 슬릿의 폭과 두 슬릿의 간격, 슬릿에 입사하는 전자의 수를 설정한다. 시간이 지남에 따라 이중 슬릿을 통과하는 전자의 무늬가 스크린에 어떻게 나타나는지 관찰한다.

### 결과 및 정리

1. 전자가 검출되는 주요 위치와 특징을 기록하고, 빛의 이중 슬릿에 의한 간섭과 비교해 보자.

2. 공유 전자의 기묘한 특징에 대해 생각해 보고, 공유 플랫폼에 공유해 보자.

### 스스로 평가

- | 지식·이해 | 전자의 이중 슬릿 실험 결과를 파동 입자 이중성으로 설명했는가? ☆☆☆
- | 과정·기능 | 실험하는 변수를 조절하면서 나타나는 결과를 세심하게 관찰하고 기록했는가? ☆☆☆
- | 가치·태도 | 과학적 호기심을 가지고 모의실험에 적극적으로 참여했는가? ☆☆☆

### 탐구 후기

이중 슬릿에 의한 빛의 간섭무늬를 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

탐구 능력 | 의사 결정 능력

모의실험



준비물  
스마트 기기

탐구 길잡이  
아래의 누리집에 접속하면 단일 전자 이중 슬릿 모의실험을 할 수 있다.  
<https://www.compadre.org/osp/EJSS/4176/197.htm>

### 연계 물리학

이중 슬릿에 의한 빛의 간섭무늬를 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

연계 **물리학**

물질이 빛과 마찬가지로 파동성과 입자성을 가진다는 물질의 이중성을 '빛과 물질' 단원에서 배웠다.

이중 슬릿을 통과하는 전자를 입자로 생각하면, 전자는 두 슬릿 중 하나를 통과해 직진하므로 그림 III-3의 (가)와 같이 스크린에 2 개의 줄무늬가 나타나야 한다. 그런데 실제 실험을 수행하면 스크린에는 그림 (나)와 같이 여러 개의 줄무늬가 나타난다. 이는 이중 슬릿에 의한 빛의 간섭 실험 결과와 비슷하므로 전자가 파동의 성질을 지닌다는 것을 알 수 있다.

빛의 이중 슬릿 간섭무늬

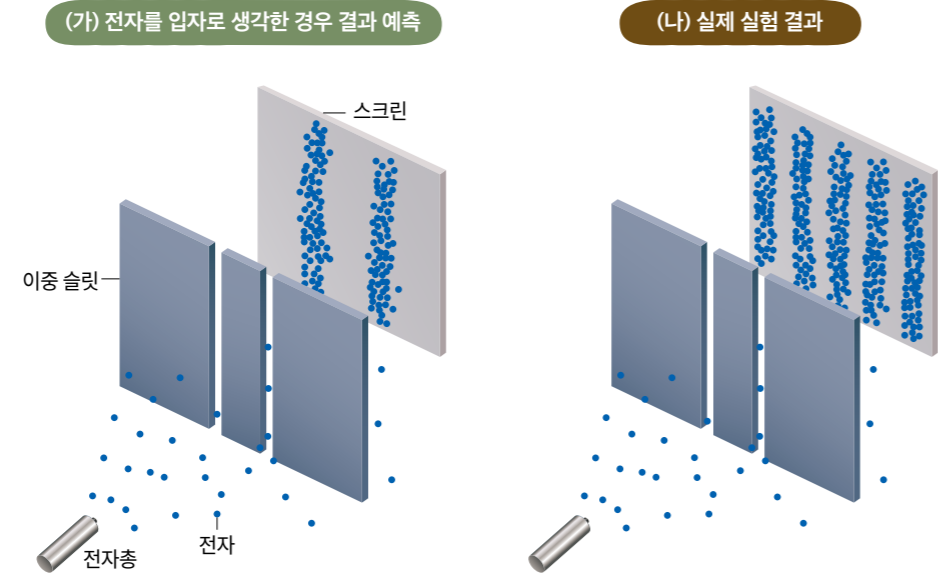


그림 III-3 이중 슬릿을 통과한 전자의 간섭무늬

20 세기 초반 과학자들은 입자인 전자가 파동성을 나타내는 것을 실험으로 확인했다. 그림 III-4와 같이 금속박에 전자를 쪼였을 때, X선 회절 무늬와 매우 비슷한 무늬가 나타났다.

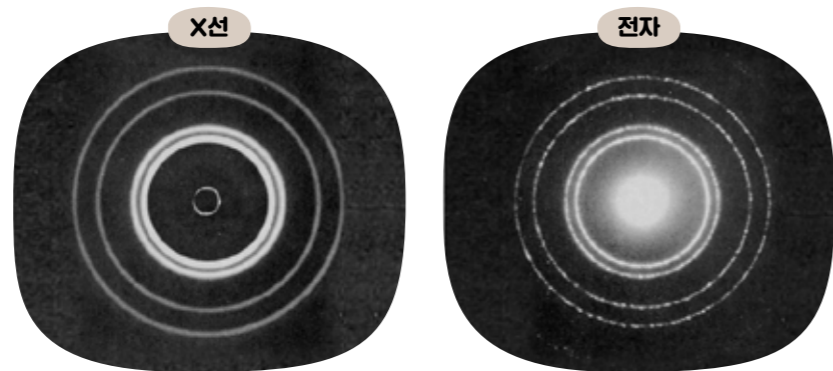


그림 III-4 X선의 회절 실험 결과와 전자의 회절 실험 결과 비교

여러 실험 결과를 바탕으로 하여 과학자들은 물질도 빛처럼 입자의 성질과 파동의 성질을 모두 지닌다는 사실을 점차 받아들였다. 이와 같이 물질이 입자와 파동의 성질을 모두 지니는 것을 **파동 입자 이중성**이라고 한다.

**드브로이 관계식과 물질파**

파동 입자 이중성이 실험으로 증명되기 전인 1924년에 드브로이는 물질도 빛과 마찬가지로 입자와 파동의 이중성을 갖는다는 가설을 발표했다. 드브로이는 이 가설에서 전자와 같은 입자가 파동의 성질을 나타낼 때 이 파동을 **물질파**라고 하고, 입자의 물질파를 표현하는 수식을 유도했다. 질량이  $m$ 인 입자가 속도  $v$ 로 운동할 때, 그 입자의 물질파 파장  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

이 파장  $\lambda$ 를 **드브로이 파장**이라고 한다. 입자의 질량과 속력을 알면 드브로이 파장을 구할 수 있다. 질량이 약  $9.11 \times 10^{-31}$  kg인 전자가  $10^3$  m/s의 속력으로 움직이고 있다고 할 때, 이 전자의 드브로이 파장은  $\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 10^3 \text{ m/s}} \approx 728 \text{ nm}$ 이다.

모든 물질이 파동의 성질을 가지고 있다면 그림 III-5의 날아가는 야구공이나 달리는 자동차와 같은 물체에서는 왜 파동의 성질을 발견하기 어려울까? 우리가 보는 사물들은 운동량이 매우 커서 물질파 파장이 현재의 관측 장비로 측정할 수 없을 만큼 짧다. 즉, 파장이 매우 짧기 때문에 사물의 파동적 특징을 발견하기 어렵다. 반면에 미시세계의 입자인 전자는 질량이 매우 작으므로 드브로이 파장이 길어, 전자의 파동성을 관찰할 수 있다.

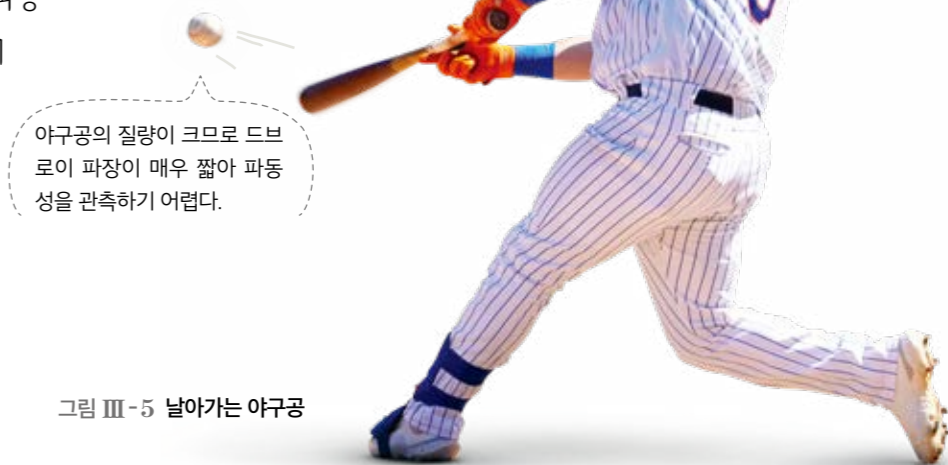


그림 III-5 날아가는 야구공

**드브로이**  
(de Broglie, L. V., 1892~1987)  
프랑스의 물리학자. 전자도 파동이라는 것을 밝혀낸 물질파 이론으로 1929년 노벨 물리학상을 수상했다. 움직이는 물체를 파동으로 표현할 수 있다는 드브로이의 발상은 양자 역학의 발전에 큰 영향을 미쳤다.

**잠깐 활동**  
120 km/h의 속력으로 날아가는 질량 140 g인 야구공의 드브로이 파장을 구해 보자.

**스스로 확인**

- 1 드브로이의 관계식을 통해 얻는 파장의 길이는 입자가 파동의 성질을 띠는 것을 설명할 수 있으며 이러한 파장을 ( )이라고 한다.
- 2 파동 입자 이중성에 따르면 사람도 파동의 성질을 지니지만 운동량이 너무 커서 파동의 성질이 관측되지 않는다. ( O, X )

### 단일 전자의 간섭과 확률적 해석

전자를 파동으로 보면 하나의 광원으로부터 방출되는 빛처럼 생각할 수 있으므로, 전자의 이중 슬릿 실험 결과를 빛의 이중 슬릿 실험과 비교해 볼 수 있다. 이중 슬릿을 통과한 빛이 보강 간섭을 하면 밝은 무늬가 나타나는 것처럼 그림 III-6에서 전자가 스크린에 찍혀 나타난 밝은 무늬는 파동으로서의 전자가 서로 같은 위상으로 만나 진폭이 커지면서 전자를 발견할 수 있는 확률이 높아진 것으로 볼 수 있다. 전자가 서로 반대 위상으로 만나 진폭이 작아지는 상쇄 간섭을 하면 스크린에는 어두운 무늬가 나타나며, 여기서는 전자를 발견할 수 있는 확률이 낮아진다. 즉, 중첩된 파동에서 진폭의 크기는 전자를 발견할 수 있는 확률과 관련이 있다.

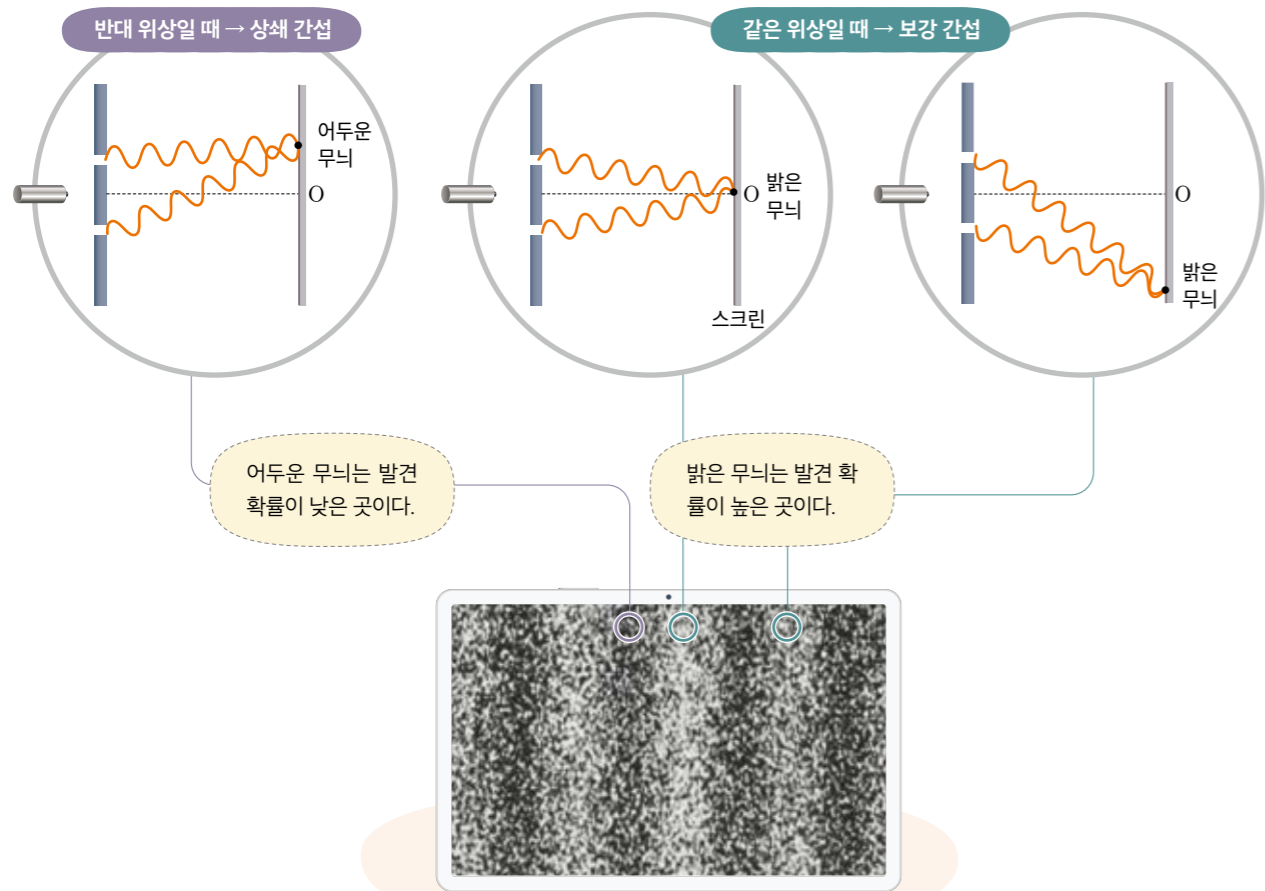


그림 III-6 전자의 이중 슬릿 간섭무늬와 전자 검출 확률

1 개의 전자가 이중 슬릿으로 입사할 때 이 전자가 스크린의 어느 지점에서 검출될지 정확한 위치는 예측할 수 없지만, 어느 영역에 나타날 확률이 높은지를 알 수 있고 이 확률은 전자가 나타내는 파동에 따라 결정된다.

그림 III-7의 (가)에서 전자총으로부터 방사되어 스크린에 도달한 하나의 전자는 2 개의 슬릿 중 어느 하나를 통과하므로 전자가 슬릿 S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>를 통과할 확률은 각각  $\frac{1}{2}$ 이다. 즉, 하나의 전자는 2 개의 슬릿을 각각  $\frac{1}{2}$ 의 확률로 통과하는 2 개의 파동으로 나뉘고, 이 두 파동이 서로 겹쳐 전자의 간섭무늬가 나타난다. 이는 하나의 전자가 서로 다른 상태를 갖는 파동으로 구성되고, 이 파동이 중첩되어 간섭 현상이 일어남을 뜻한다.

그림 (나)와 같이 이중 슬릿 중 하나를 막으면 전자는 한쪽 슬릿만을 통과하므로 이러한 특성이 사라진다.

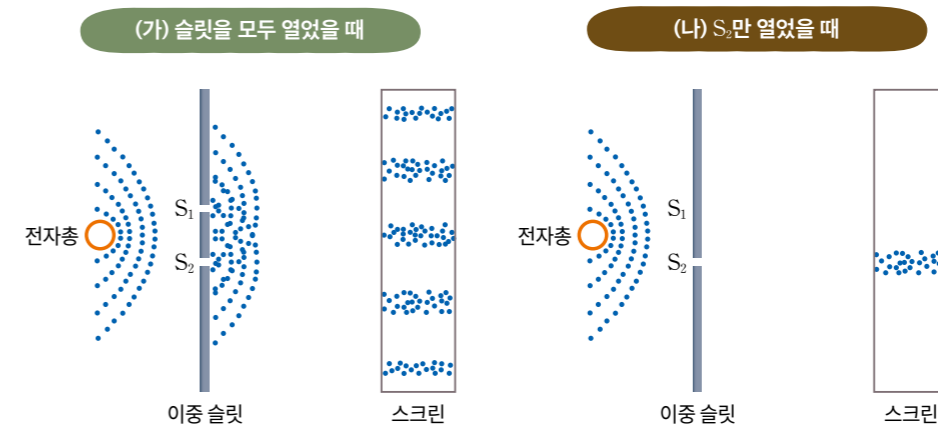


그림 III-7 이중 슬릿에서 전자의 간섭과 확률적 해석

이와 같이 전자 수준의 미시세계에서는 우리가 일상에서 경험하는 것과 전혀 다른 기묘한 일들이 일어난다.

미시세계에서 일어나는 이러한 현상들은 양자 역학으로 설명할 수 있다. 양자 역학은 고전 물리학이 풀지 못한 자연 현상을 설명하기 위해 탄생한 학문으로, 오늘날 다양한 첨단 과학기술에 활용되고 있다.

#### 스스로 확인

- 1 매우 많은 전자를 이중 슬릿에 통과시킬 때 밝고 어두운 부분이 번갈아 나타나는 데 이것은 전자의 입자성 때문이다. (○, ×)
- 2 서로 다른 파동이 중첩되면서 ( ) 간섭이 일어나는 곳에서는 전자가 검출될 확률이 낮아진다.

#### 스스로 정리

**공유** 전자가 갖는 파동 입자 이중성처럼 하나의 물질이 이중적인 모습을 보이는 사례를 우리 주변에서 찾아 공유 플랫폼에 공유해 보자.