

# 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

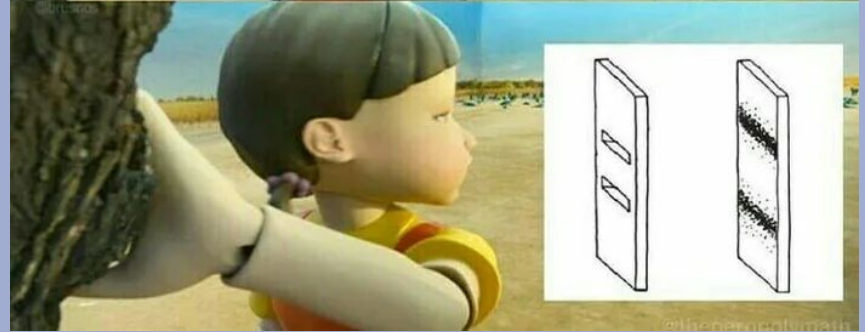
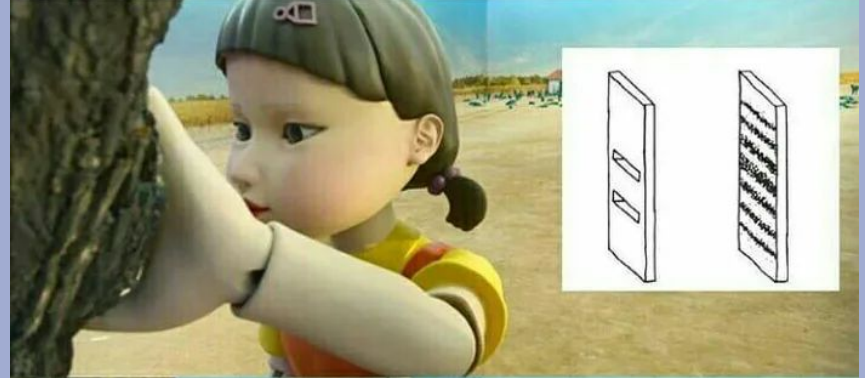
2026 대한민국과학교사큰모임

2026.7.25(토) ~ 7.26(일)

울산교육연수원

와우고등학교 김민성

<https://sites.google.com/view/kdbexperiment>



# 발표자 소개 : 김민성

경기도 물리교사 (2006년 ~ 현재)

관심 연구 분야 : 실험도구 개발, 실험수업, 교사 교육

- 재미있는 과학수업 만들기 운영위원(2019~현재) [sedu21.com](http://sedu21.com)
- “물리학 실험수업용 마이컬슨 간섭계 개발 및 활용 과정 탐색”  
국내박사학위논문 한국교원대학교 대학원, 2024
- 2015, 2022 개정교육과정 교과서 집필 (중학 과학, 물리학, 전자기와 양자)

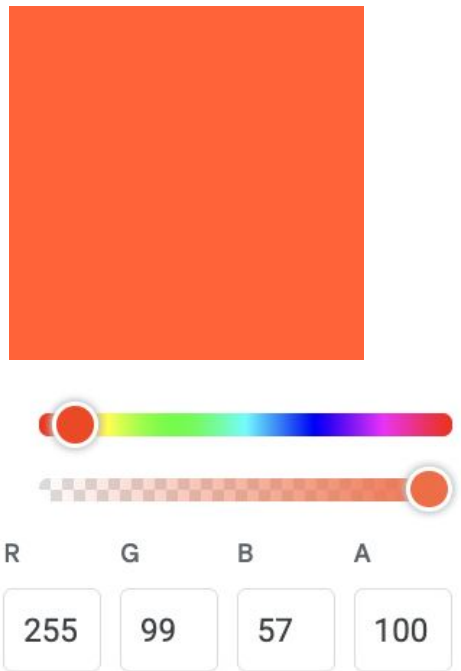
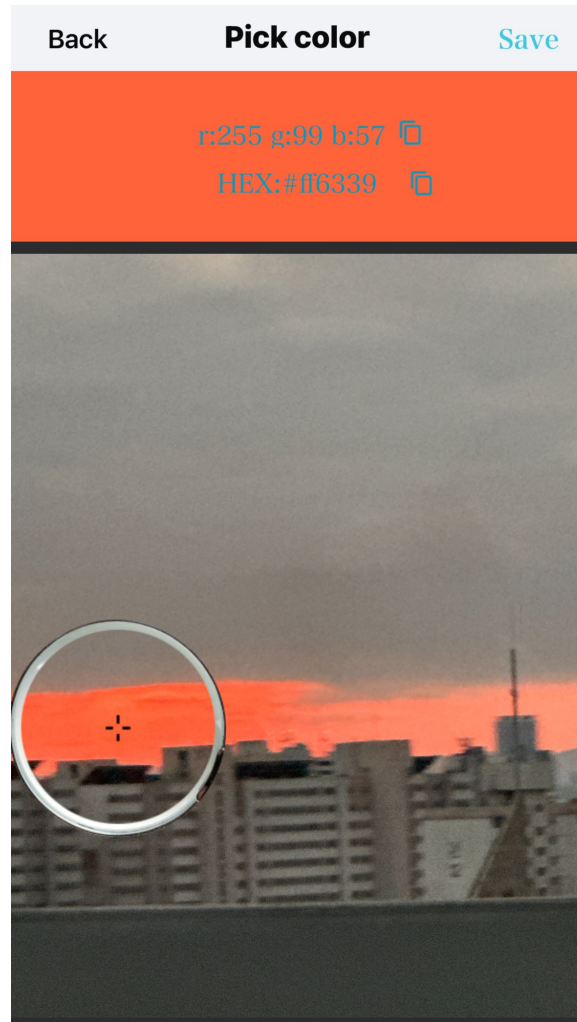
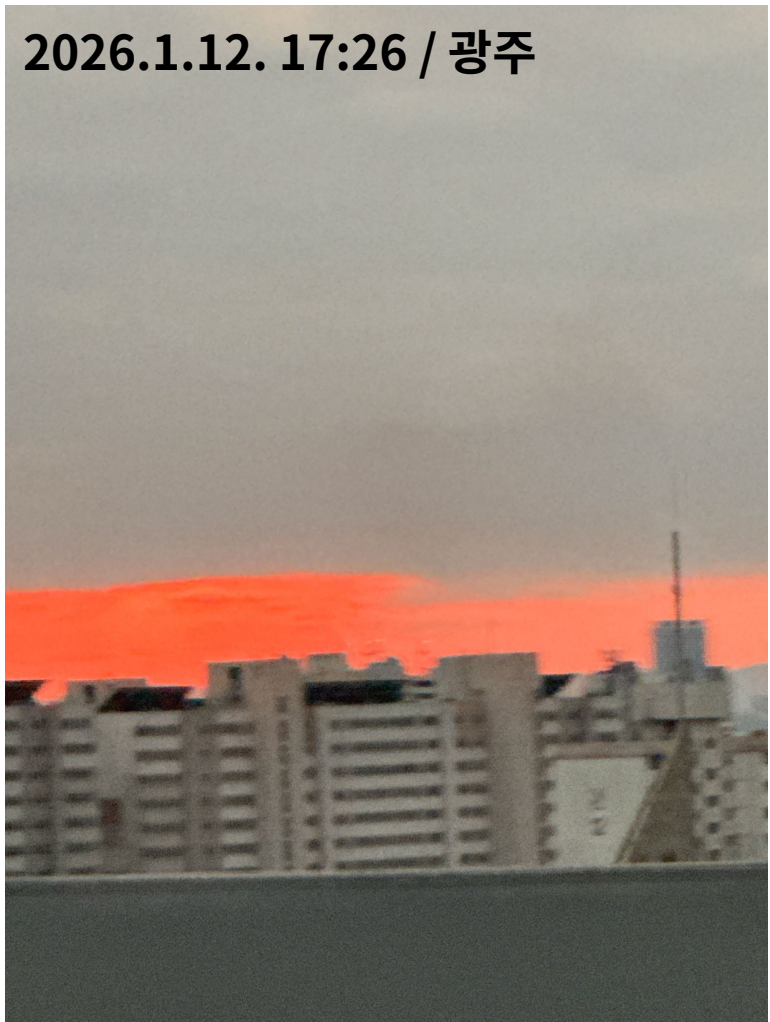
## 개발 실험 :

CD롬 빛파장 측정기, 피펫 비행선, 누드 망원경, 볼록거울 마이컬슨 간섭계,  
레이저 물방울 현미경 만들기, 블랙홀 메모 꽃이, 자외선으로 LED켜기,  
전자기파로 LED켜기

<https://sites.google.com/view/kdbexperiment>



2026.1.12. 17:26 / 광주



R	G	B	A
255	99	57	100

## ● 실재성(Realism) 문제

**“내가 본 노을과 카메라가 본 노을이 같은 노을일까?”**

- 측정 이전에도 물리량은 명확한 값을 가진다.
- 측정은 실재를 “만드는 것”이 아니라 “드러내는 것”이다.

**"자네는 정말로 자네가 쳐다보지 않으면 저 달이 저기에 없다고 믿는가?(아인슈타인)"**

《김상욱의 양자 공부》 - 김상욱

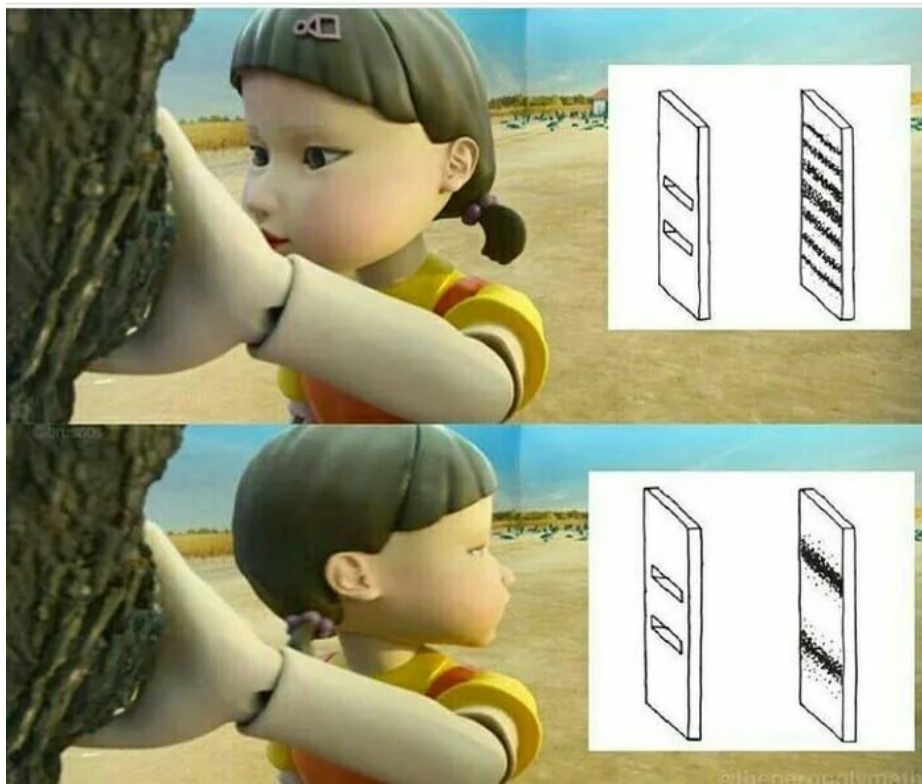
**"아무도 없는 숲에서 나무가 쓰러지면 소리가 나는가?"**

《나 없이는 존재하지 않는 세상》 - 카를로 로벨리

# ● 실재성(Realism) 문제



science\_humor  
Manhattan, New York



# 관계론적 존재론

우리가 발견한 바에 따르면, **실재**는 상호작용의 그물망을 짜는 사건들로 가장 잘 묘사될 수 있습니다. ‘개체’는 이 그물망의 일시적인 매듭에 불과합니다. **개체의 속성은 이러한 상호작용이 일어나는 순간에만 결정되며, 다른 것들과의 관계 속에서만 결정됩니다. 사물은 다른 사물 속에 비친 것일 뿐입니다.**

<나 없이 존재하지 않는 세상> 로베르트 베니니, 232쪽



# 발표의 맥락 소개 - 2022 개정교육과정 (양자 지우개 모델 실험)

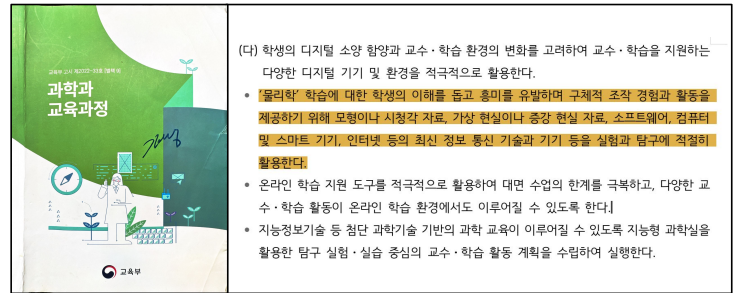
**“모델 실험”**: 구체적 조작 경험과 탐구 위한 모형 제공

구체적 조작 경험과 활동을 제공하기 위해 모형이나 시청각

자료, 가상 현실이나 증강 현실 자료, 소프트웨어, 컴퓨터 및

스마트 기기, 인터넷 등의 최신 정보 통신 기술과 기기 등을

실험과 탐구에 적절히 활용한다.



## 발표의 맥락 소개 - 2022 개정교육과정 (양자 지우개 모델 실험)

# “양자 중첩”, “확률 파동” <전자기와 양자>

[12전자03-01] 단일 양자 수준의 이중 슬릿 실험을 통해서 입자-파동 이중성을 확인하고, 단일 양자의 분포에 대한 실험 결과를 확률 파동의 간섭을 토대로 해석할 수 있다.

[12전자03-02] 중첩과 측정을 통한 확률적 상태 변화를 이해하고, 이를 이용한 양자컴퓨터, 양자암호 통신 등의 양자 기술이 일상생활과 미래 사회에 미칠 영향을 인식할 수 있다.

### 해설

[12전자03-01] 드브로이 관계식을 바탕으로 단일 전자나 광자 수준의 이중 슬릿 실험에서 나타나는 입자-파동 이중성의 기묘함을 학생들이 인식할 수 있도록 정성적으로 다룬다.

[12전자03-02] 양자 기술은 물리적 원리보다는 사회에 미치는 영향을 중심으로 다룬다.

# 양자역학의 기묘함

- **실재성(Realism) 문제**

- 측정 이전에도 물리량은 명확한 값을 가진다.
- 측정은 실재를 “만드는 것”이 아니라 “드러내는 것”이다.

↔ **단일 양자 이중슬릿 실험적 검증** (코펜하겐 해석, 양자 중첩)

- **국소성(Locality) 문제**

- 공간적으로 분리된 사건은 국소적 상호작용으로만 연결된다.
- 물리적 영향은 빛의 속도를 초과해 전달될 수 없다.

↔ **벨 부등식의 실험적 검증, 지연 선택 양자 지우개 실험** (양자 얽힘)

# 발표의 맥락 소개 - 2022 개정교육과정 (양자 지우개 모델 실험)

## 교과서는? (전자기와 양자): “양자 중첩”, “확률 파동”

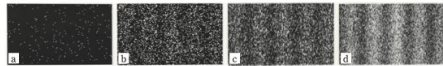
**2 이중 슬릿 실험 결과의 해석**

단일 전자를 이용한 이중 슬릿 실험

과학자들은 전자의 이중 슬릿 실험에서 스크린에 간섭무늬가 나타나는 것을 확인한 후, 이중 슬릿에 전자를 1개씩 입사시킬 때도 간섭무늬가 나타날 것인지에 대한 실험을 하였으나 그 결과를 이해하기가 어려웠다.

[실험 결과]

- 이중 슬릿에 전자 1개를 입사시키면, 스크린에 전자의 도착점이 1개 찍힌다.
- 많은 수의 전자가 입사된 후에 스크린에 나타난 도착점들은 빛의 이중 슬릿 실험에서와 같은 간섭무늬를 나타낸다.
- a에서 d까지 전자의 수가 늘어남에 따른 무늬 변화는 그림과 같다.



이제 **그림 III-5**와 같이 단일 전자를 이용한 이중 슬릿 실험의 결과를 확률 파동으로 해석해 보자. 1개의 전자는 확률 파동으로 진행하므로 2개의 슬릿을 동시에 지나는 것이 가능하다. 그리고 확률 파동이 스크린에 도달하는 순간 전자의 위치가 확률적으로 결정되어 하나의 점으로 나타난다. 이때 두 확률 파동의 간섭에 의해  $|\Psi|^2=0$ 인 지점에서는 전자가 발견되지 않는다.

전자보다 무거운 양성자 등으로 동일한 실험을 시행할 때에도 결과는 같게 나온다.

같은 현상은 빛을 이용한 이중 슬릿 실험에서도 나타난다. 이중 슬릿에 광자를 1개씩 입사시키면 **그림 III-6**과 같이 광자가 도달한 지점에 점이 1개씩 나타나며 간섭무늬는 보이지 않는다. 시간이 지나 스크린에 도달한 광자의 수가 많아지면 간섭무늬가 보이는데, 이때 광자가 도달하지 않은 지점은 확률 밀도 함수가 0인 지점으로 해석할 수 있다.

**물집파의 해석: 확률 파동**

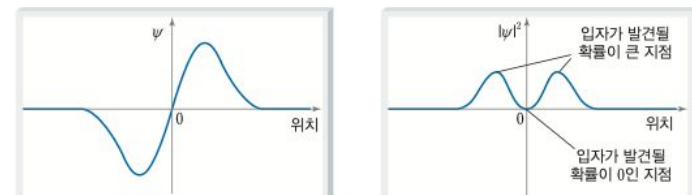
입자가 이동할 때 입자의 위치는 시간의 함수로, 파동이 진행할 때 매질의 변위는 시간과 위치의 함수로 나타낼 수 있다. 전자 등과 같은 작은 입자의 경우 입자의 이동은 이중성에 의해 물질파로 다를 수 있는데, 이때 물질파에서 변화하는 양을 시간과 위치의 함수로 나타낸 것을 **확률 파동**(또는 **파동 함수**)이라고 한다.

보른은 **그림 III-3**과 같이 입자의 진행을 나타내는 확률 파동( $\Psi$ )을 해석하면서, **그림 III-4**와 같이 확률 파동의 절댓값의 제곱( $|\Psi|^2$ )이 큰 지점에서는 입자가 발견될 확률이 크고,  $|\Psi|^2=0$ 인 지점에서 입자는 발견되지 않는다고 하였다.

연계 학습 · 110쪽  
물질파

보른(Born M, 1882-1970)  
독일의 물리학자이다. 파동 함수의 통계적 해석으로 1954년 노벨 물리학상을 수상하였다.

**확률 파동의 표현**  
주로  $\Psi$ (사이)를 사용한다.



**그림 III-3** 입자의 진행을 나타낸 확률 파동

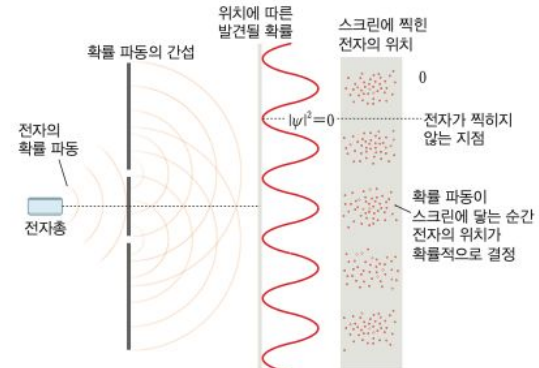
**그림 III-4** 입자가 발견될 확률

이제 **그림 III-5**와 같이 단일 전자를 이용한 이중 슬릿 실험의 결과를 확률 파동으로 해석해 보자. 1개의 전자는 확률 파동으로 진행하므로 2개의 슬릿을 동시에 지나는 것이 가능하다. 그리고 확률 파동이 스크린에 도달하는 순간 전자의 위치가 확률적으로 결정되어 하나의 점으로 나타난다. 이때 두 확률 파동의 간섭에 의해  $|\Psi|^2=0$ 인 지점에서는 전자가 발견되지 않는다.

전자보다 무거운 양성자 등으로 동일한 실험을 시행할 때에도 결과는 같게 나온다.

같은 현상은 빛을 이용한 이중 슬릿 실험에서도 나타난다. 이중 슬릿에 광자를 1개씩 입사시키면 **그림 III-6**과 같이 광자가 도달한 지점에 점이 1개씩 나타나며 간섭무늬는 보이지 않는다. 시간이 지나 스크린에 도달한 광자의 수가 많아지면 간섭무늬가 보이는데, 이때 광자가 도달하지 않은 지점은 확률 밀도 함수가 0인 지점으로 해석할 수 있다.

**그림 III-5** 이중 슬릿을 통과하는 단일 전자의 확률 파동



확률 파동의 간섭

위치에 따른 발견될 확률

스크린에 찍힌 전자의 위치

0

전자가 찍히지 않는 지점

확률 파동이 스크린에 닿는 순간 전자의 위치가 확률적으로 결정

전자의 확률 파동

전자총

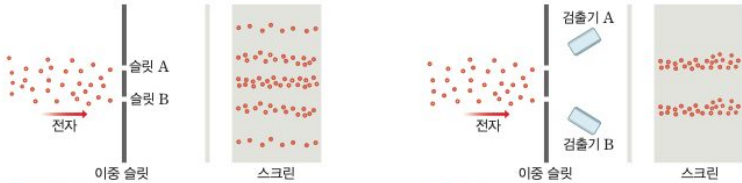
# 발표의 맥락 소개 - 2022 개정교육과정 (양자 지우개 모델 실험)

## 교과서는? (전자기와 양자): “측정을 통한 확률적 상태 변화”, “양자 기술”

### 1 중첩과 확률적 상태 변화 - 다시 생각해 보는 전자의 이중 슬릿 실험

**그림 III-7**은 전자의 이중 슬릿 실험 결과이다. 전자를 이중 슬릿에 하나씩 입사시키는 경우에도 동일한 결과를 얻을 수 있었는데, 이 결과를 확률 파동으로 해석하여 하나의 전자는 슬릿 A와 슬릿 B를 통과할 가능성을 동시에 갖는다고 말한다. 이와 같이 여러 개의 가능성을 동시에 갖는 상태를 **중첩 상태**라고 한다.

만약 **그림 III-8**과 같이 이중 슬릿 뒤쪽에 검출기를 설치하여 전자가 어느 슬릿을 통과하였는지를 측정하면 어떻게 될까? 이 경우에는 간섭에 의한 줄무늬가 나타나지 않고, 두 개의 슬릿을 통과한 입자처럼 두 개의 줄무늬만 나타난다.



**그림 III-7** 전자가 어느 슬릿을 통과하였는지 관측하지 않은 경우      **그림 III-8** 전자가 어느 슬릿을 통과하였는지 관측한 경우

**그림 III-7, III-8**과 같은 현상을 설명하기 위해서는 전자는 입자이면서 파동이라고 생각해야 한다. 전자는 발사된 직후에는 하나의 입자이지만, 그 이후에는 파동의 형태로 공간으로 퍼져 나간다. 즉, 이중 슬릿의 양쪽으로 통과할 가능성을 모두 가진 중첩된 상태로 진행하는 것이다. 그러다가 전자의 위치가 측정되는 순간 다른 곳에 존재할 확률은 없어지고, 그 위치에 하나의 입자로 나타나게 된다. 이와 같이 측정하기 전에는 여러 상태가 확률적으로 중첩되어 있다가 측정에 의해 하나의 상태로 결정되는 것을 **측정을 통한 확률적 상태 변화**라고 한다.

슬릿 하나만 통과할 가능성과 둘 다를 통과할 가능성을 동시에 갖는 상태가 있었나?

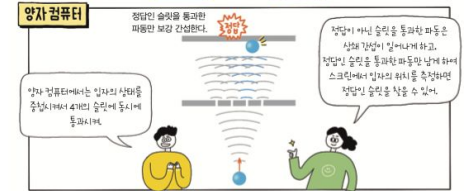
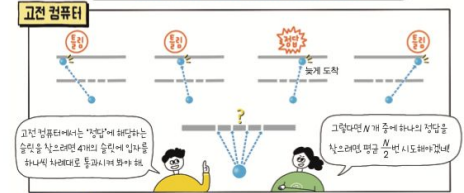
미시 세계에서 측정을 통한 확률적 상태 변화가 일어나는 것은 코펜하겐 해석에서 설명하는 방식을 따르며 다음과 같이 설명할 수 있다.

미시 세계에서 전자, 원자, 광자 등의 입자들은 확률 파동으로 진행하다 측정이 일어나는 순간 확률 파동에 의해 계산되는 확률로 그 위치에 하나의 입자로 나타난다.

### 2 양자 기술의 활용

#### \*고전 컴퓨터와 양자 컴퓨터

[해결하고자 하는 문제]  
4개의 슬릿 중에 '정답'에 해당하는 하나의 슬릿은 어느 것일까?  
정답에 해당하는 슬릿은 입자의 진행을 늦추는 성질이 있다.



고전 컴퓨터에서는 비트(bit)를 정보 처리의 단위로 활용하는 데 비해, 양자 컴퓨터에서는 큐비트(qubit)를 정보 처리의 단위로 사용한다. 큐비트도 비트와 같이 0과 1을 사용하지만, 0과 1 사이의 중첩 상태도 가능하며 이러한 상태를 연산에 활용한다. 예를 들어 2개의 비트가 있는 고전 컴퓨터는 00, 01, 10, 11의 네 가지 상태 중 하나만 표시할 수 있는데, 2개의 큐비트가 있는 양자 컴퓨터는 00, 01, 10, 11의 네 가지 상태를 모두 중첩해서 동시에 표시하고 처리할 수 있으므로 효율적인 문제 해결이 가능하다.

**코펜하겐 해석**  
역사적으로 양자 역학에 대한 다양한 해석이 존재하였는데, 중첩과 확률적 상태 변화는 코펜하겐 해석에서 설명하는 방식이다. 보어, 하이젠베르크, 보른 등에 의해 이루어졌고, 현재 가장 널리 받아들여지고 있는 해석이다.

**\*고전 컴퓨터**  
양자 컴퓨터에 대비되는 개념으로, 현재 우리가 사용하는 컴퓨터를 의미한다.

**비트(bit)**  
이진수 한 자리를 의미하며, 0 또는 1이 저장될 수 있는 단위이다. 컴퓨터는 이진수들로 이루어진 입력 신호들을 연산하여 처리하고 출력하는 장치라고 볼 수 있는데, 이를 위해 AND, OR, NOT과 같은 다양한 논리 회로를 조합하여 사용한다.

**큐비트(qubit)**  
양자 비트(quantum bit)를 줄여서 부르는 말이다. 실제 양자 컴퓨터에 사용되는 큐비트는 전자의 스핀, 원자의 에너지 준위, 초전도 소자 등 양자 역학적 중첩을 구현할 수 있는 것으로 활용한다.

# 발표의 맥락 소개 - 2022 개정교육과정 (양자 지우개 모델 실험)

## 교과서는? (전자기와 양자): “측정을 통한 확률적 상태 변화”, “양자 기술”

### 파동성의 결과

빛을 비추는 관측 행위에 의해 전자의 상태는 관측 전과 달라지며, 전자는 파동성을 잃는다. 전자가 파동성을 잃고 하나의 상태로 정해지는 것을 파동성의 붕괴라고 한다.

### ● 핵심 질문 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과했는지 확인할 수 있을까?

전자가 이중 슬릿을 통과할 때 파동성을 지닌 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과한 것인지 확인하려면 관측이 필요하다. 이때 비추는 빛의 파장은 전자의 크기 정도로 짧아야 한다.

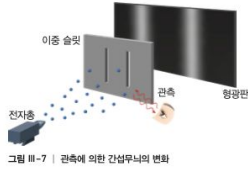


그림 III-7과 같이 관측을 하면 전자의 위치를 파악하려는 관측에 의해 전자의 파동성을 잃기 때문에 간섭무늬가 나타나지 않는다. 따라서 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과하는지를 알면서 동시에 간섭무늬까지 볼 수 있는 방법은 없다.

### ● 흥미로운 답 전자를 관측하면 전자는 파동성을 잃는다.

### ● 핵심 질문 물질파는 물리적으로 어떤 의미가 있을까?

물질파는 탄성파, 전자기파와 같은 실제 파동이 아니다. 물질파는 입자의 파동성을 설명하기 위한 개념으로, 특정 시간과 지점에서 입자가 발견될 확률의 정보를 포함하기 때문에 **확률 파동**이라고 부른다.

그림 III-8은 스크린상의 특정 지점에서 중첩된 물질파의 진폭과 해당 지점에서 전자가 발견될 확률의 상대적 크기를 나타낸 것이다. 간섭무늬의 밝은 지점은 전자의 물질파가 보강 간섭하는 지점이며, 전자가 도달할 확률이 가장 높은 지점에 해당한다. 반대로 어두운 지점은 물질파가 상쇄 간섭하는 지점이며, 전자가 도달할 확률이 가장 낮은 지점에 해당한다.

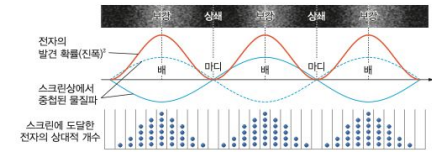


그림 III-8 | 물질파의 간섭 현상과 전자의 발견 확률

### ● 흥미로운 답 물질파는 실제 파동이 아닌 확률 파동이다.

### \*확률 파동

양자 물리학에서는 확률 파동인 물질파의 파동 함수를  $\psi(x, t)$ 로 표현하며, 진폭의 제곱  $|\psi|^2$ 이 해당 위치와 해당 시간에서 입자가 발견될 확률의 정보를 제공한다.  $\psi(x, t)$ 는 양자 역학에서의 에너지 보존 법칙에 해당 하는 슈뢰딩거 방정식의 해이다.

### 양자 컴퓨터

양자 컴퓨터는 양자 중첩과 같은 양자 역학적인 물리 현상을 활용하여 정보를 처리하는 컴퓨터이다. 기존 디지털 컴퓨터는 0 또는 1의 값만 갖는 비트를 기본 단위로 정보를 처리하지만, 양자 컴퓨터는 0과 1이 중첩된 상태인 큐비트를 기본 단위로 정보를 처리한다. 다시 말해, 디지털 컴퓨터는 비트 1개에 입력값 1개만 담을 수 있지만, 양자 컴퓨터는 큐비트 1개에 입력값 2개를 중첩시켜 담을 수 있다. 따라서 여러 개의 큐비트를 이용하여 여러 가지 수를 한 번에 입력할 수도 있다. 예를 들어, 그림 III-10은 2비트 디지털 컴퓨터와 큐비트가 2개인 양자 컴퓨터로 0부터 3을 입력할 때 입력하는 횟수를 나타낸 것이다.

기본 단위	입력	0	1	2	3	기본 단위	입력	0~3 중첩
비트 1		0	0	1	1	큐비트 1		0~3 중첩
비트 2		0	1	0	1	큐비트 2		0~3 중첩

(가) 2비트가 한번에 표현할 수 있는 상태는 1개이므로 0부터 3까지만 입력하려면 4개의 값을 차례로 입력해야 한다. (나) 큐비트 2개는 모든 상태를 한번에 표현할 수 있으므로 4개의 값을 한번에 입력할 수 있다.

그림 III-10 | 디지털 컴퓨터와 양자 컴퓨터의 숫자 입력 비교

디지털 컴퓨터는 값을 하나씩 바꾸어 가면서 순차적으로 계산을 한다면, 양자 컴퓨터는 큐비트를 이용하여 여러 계산을 동시에 처리할 수 있어 복잡한 문제를 효율적으로 해결하는 효과가 있다. 양자 컴퓨터는 디지털 컴퓨터보다 계산 효율이 매우 높는데, 이를 양자 우월성이라고 한다. 그러나 양자 컴퓨터로 디지털 컴퓨터나 스마트 기기로서 하는 인터넷 검색 문서 작업, 게임 등을 빠르게 할 수 있는 것은 아니므로, 아직은 양자 컴퓨터로 디지털 컴퓨터를 대체할 수 없다.

큐비트의 물리적 구현 방법 광자의 편광, 두 가지 에너지 준위를 가진 속박된 원자나 이온, 양자점의 에너지 준위, 초전도 제어 효로는 전류의 방향을 이용하여 큐비트를 구현할 수 있다.

양자 컴퓨터를 볼 수 있는 문제 양자 컴퓨터는 최단값 찾기 계산이나 알고리즘이 개발된 스핀 수분해인 같은 문제에 최적화되어 있다.

### 참고 사이트

앞으로 양자 컴퓨터가 더 발전하게 되면 어떤 문제들을 풀게 될 수 있을까?

### 양자 암호 통신

양자 현상은 통신 분야에도 이용된다. 양자 암호 통신은 중첩된 양자 상태를 측정하는 순간 확률적으로 어떤 한 상태로 결정되면서 처음의 양자 상태가 사라지는 성질을 이용한 통신 기술이다. 따라서 양자 역학적 특성상 도청이 어려워, 보안성이 매우 높다는 장점이 있다.

그림 III-11과 같이 송신자가 정보를 중첩된 양자 상태로 보내고, 정보가 전송되는 도중에 누군가 도청을 시도하면 양자 상태가 하나로 결정되거나 양자 상태가 교란된다. 따라서 수신자는 정보가 담긴 양자 상태를 받아서 측정할 때 도청 시도 후 달라진 양자 상태를 측정하므로 정보가 도청되었는지의 여부를 알 수 있다.



그림 III-11 | 양자 암호 통신의 원리 도청을 시도할 경우 암호가 파괴되고, 파괴된 암호로는 정보를 확인할 수 없다.

# 발표의 맥락 소개 - 학술 논문 출판(현장과학교육 19(6) PP. 627-642)

## 단순화된 재민 간섭계를 이용한 간섭무늬 탐구 및 양자 지우개 모델 실험

| 연구논문 |

현장과학교육 19(6) PP 627-642

### 단순화된 재민 간섭계를 이용한 간섭무늬 탐구 및 양자 지우개 모델 실험

김민성

와우고등학교, 화성시 18298

A Simplified Jamin Interferometer for Interference-Fringe  
Inquiry and a Quantum Eraser Analogue Demonstration

Min Seong Kim\*

Wawoo High school, Hwaseong-18298

#### 요 약

본 연구는 교육 현장에서 활용 가능한 단순화된 재민 간섭계(simplified Jamin interferometer)의 제작 방법과 이를 활용한 탐구 실험을 제안한다. 5 mW 반도체 레이저 모듈, 스위치 내장 건전지 케이스, 두께 5 mm의 일반 유리 거울, 문구용 메모 클립 등의 저가 부품을 사용하여 명확한 간섭무늬를 관찰할 수 있는 간섭계를 구성하였다. 제안된 탐구 실험은 다음 두 가지이다. 첫째, 재민 간섭계의 광경로 상에 가림막을 선택적으로 배치했을 때 나타나는 간섭무늬의 변화를 예상하고 설명하는 탐구 활동이다. 둘째, 재민 간섭계에 편광편을 추가로 배치하여 양자 지우개 실험을 고전적 유비로 통해 구현하는 탐구 활동이다. 본 연구에서 개발한 장치와 실험 방법은 학생 1인이 책상 위의 제한된 공간에서도 실시간으로 실험 결과를 확인할 수 있으며, 중고등학교 및 대학교 수업이나 동아리 활동에서 빛의 간섭과 양자 물리학의 파동-입자 이중성을 학습하는 데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어: 재민 간섭계, 양자 물리학, 양자 지우개, 간섭, 파동-입자 이중성

- 간단한 부품으로 **재민 간섭계를** 제작하는 방법 제시
- 광경로에 가림막을 배치하여 간섭무늬 변화를 예측·설명하는 **조작적 탐구 활동 방법 제안**
- 편광편을 추가해 **양자 지우개 실험을** 고전적 유비로 구현 방법 제안
- **책상 위 구성 1인 실험**, 간섭 원리 및 **파동-입자 이중성 학습에 활용 가능**

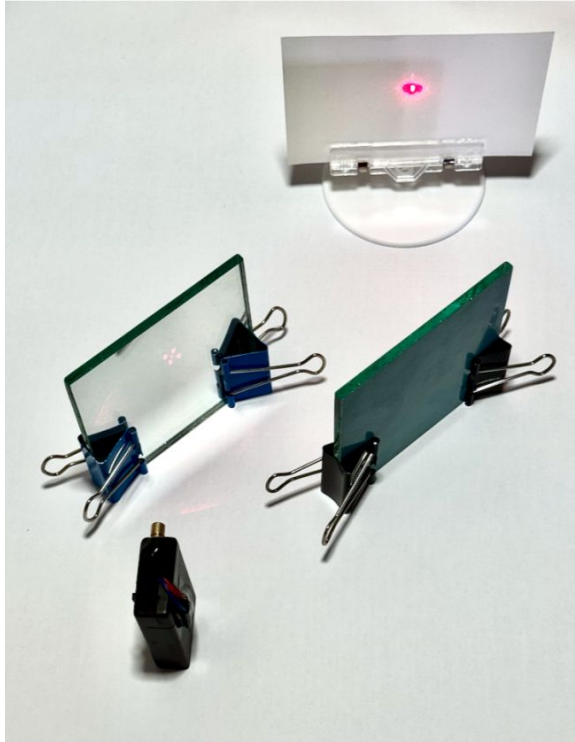
재민간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

## 발표의 세가지 질문

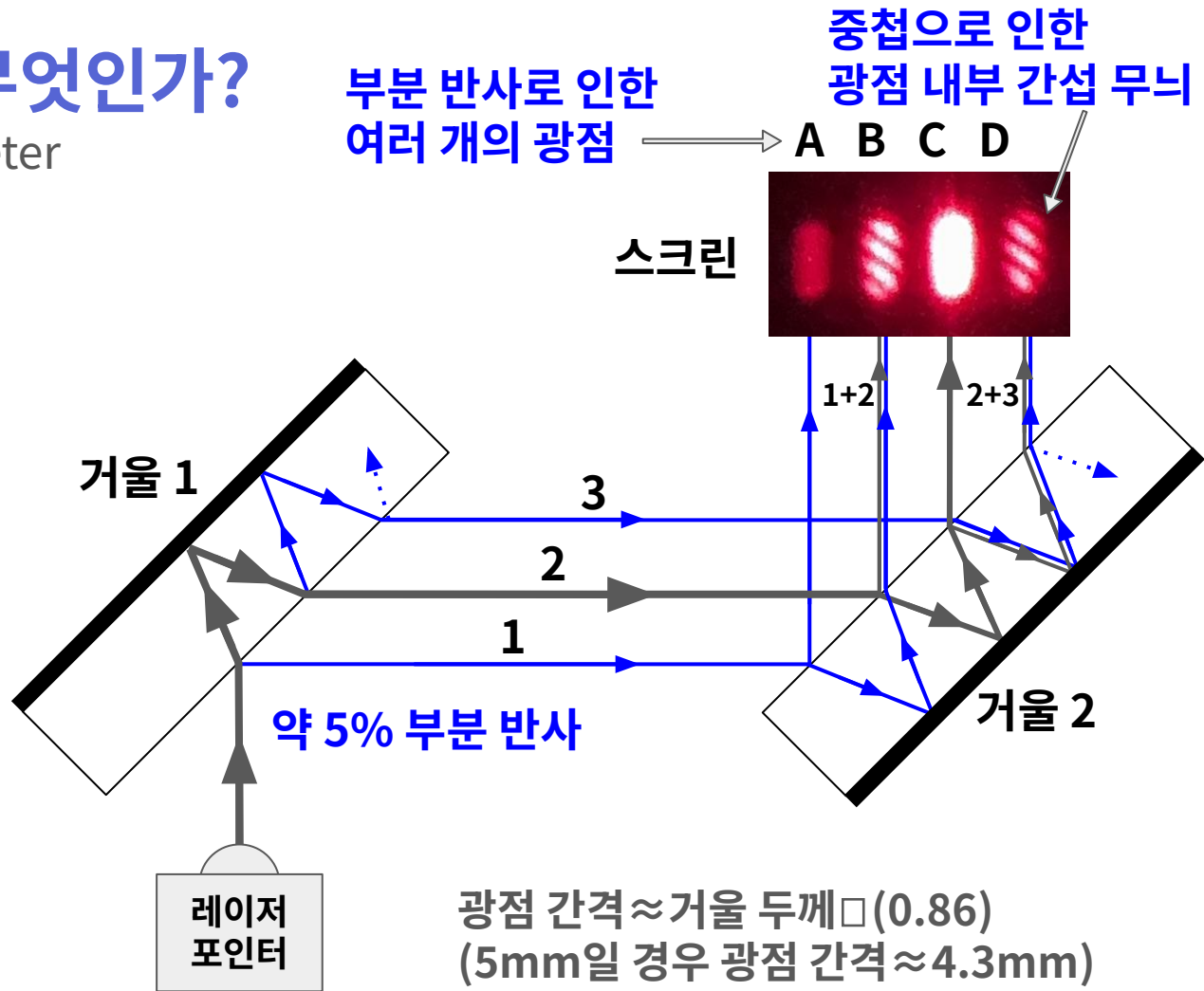
1. 재민 간섭계는 무엇인가?
2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?
3. 양자 지우개 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

Jamin Interferometer

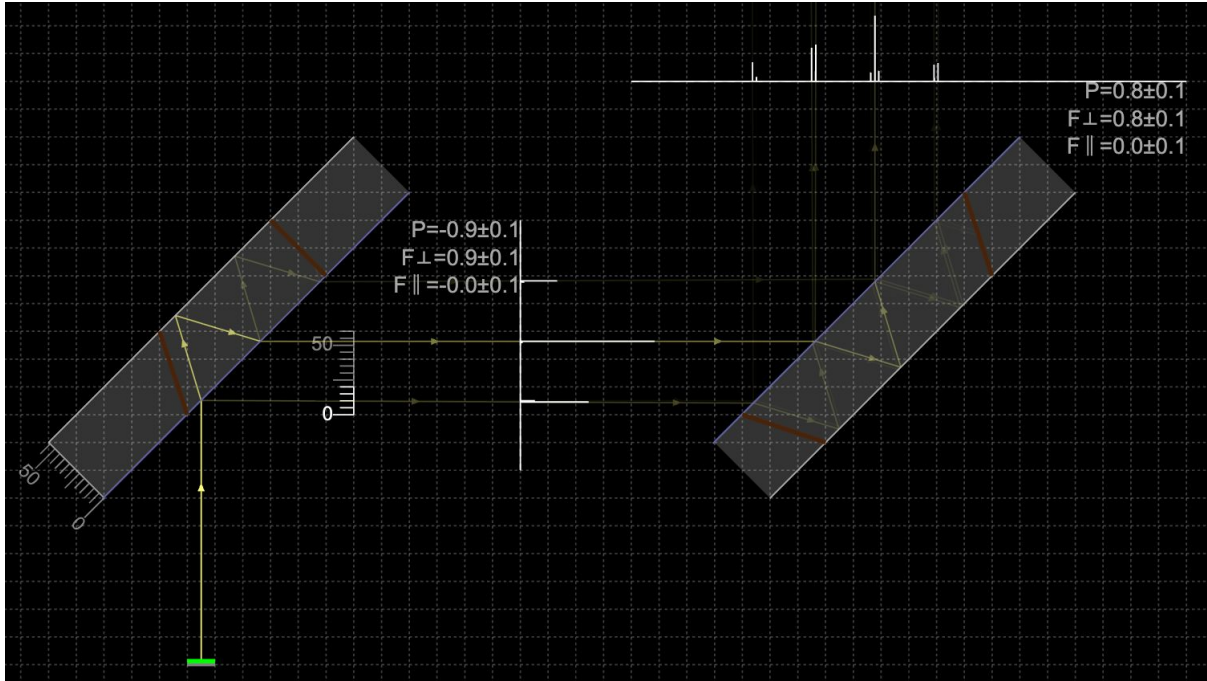


- 일반 거울(두께, 5mm)
- 반도체 레이저 포인터



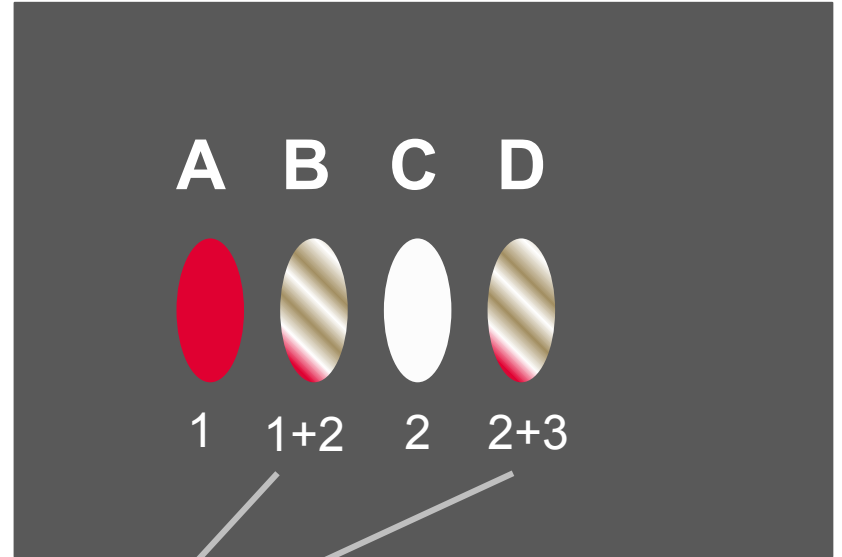
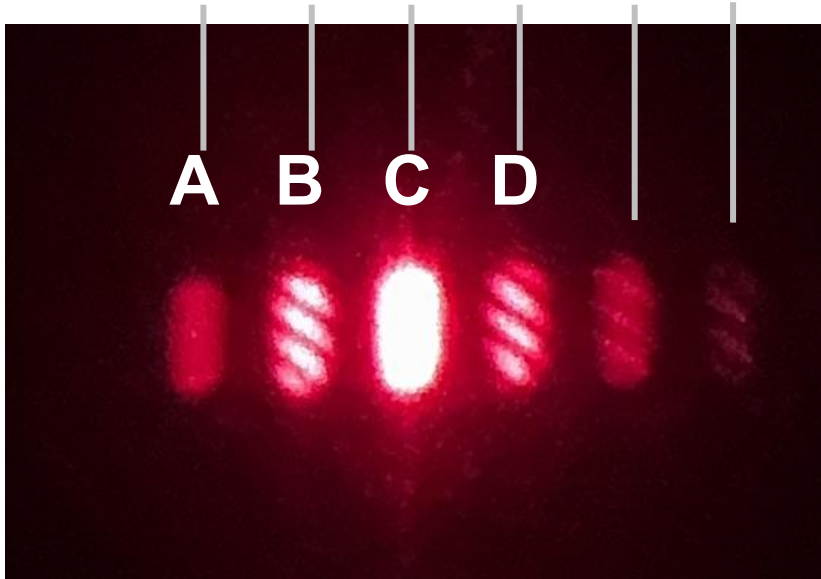
# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

## 기하광학 시뮬레이터(Optics simulator)



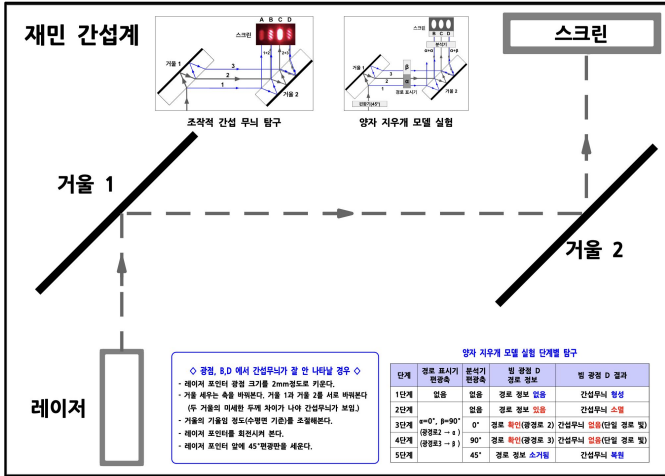
# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

거울 유리 표면의 부분 반사로 인해 나타난 여러 개의 광점: A,B,C,D...

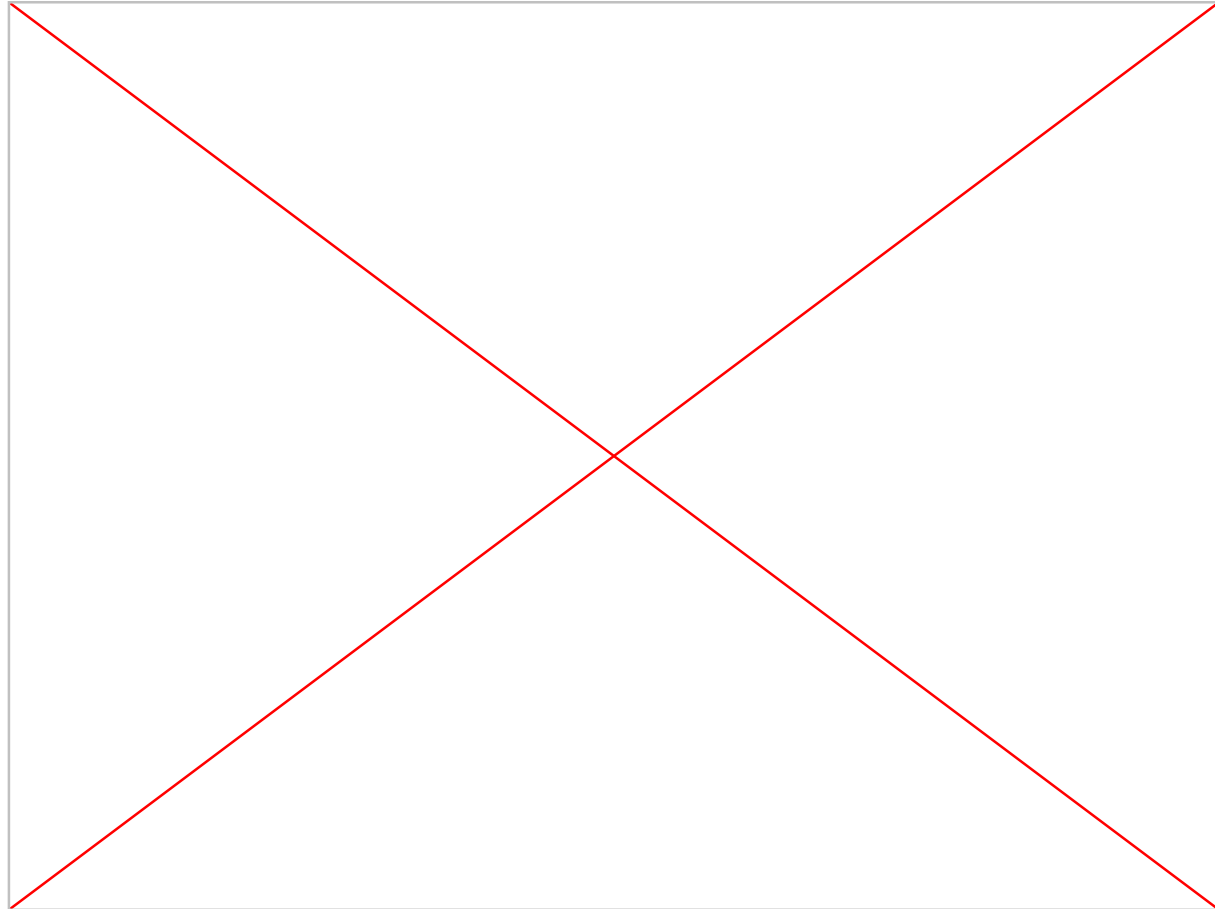


두 빛의 간섭으로 나타난 광점 (B,D) 안의 줄무늬  
간섭무늬

# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 먼저 관찰해 봅시다.

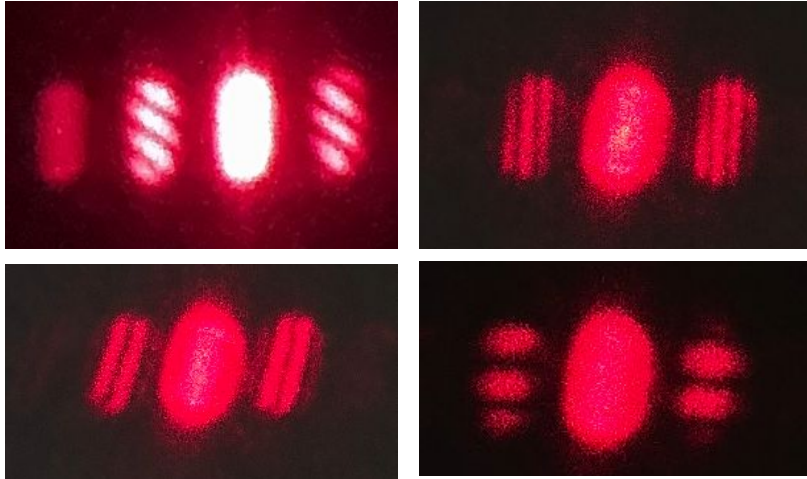


광학도구 배치판

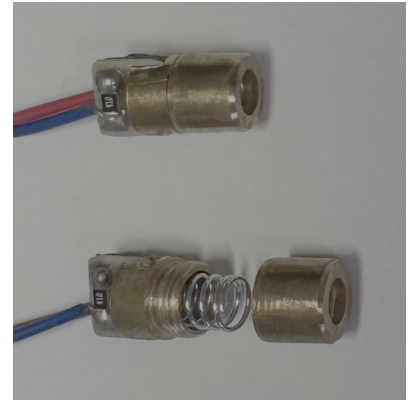
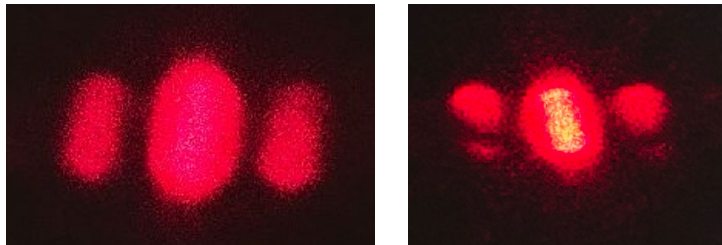


# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 실험 요령

## 간섭무늬가 나타난 사례



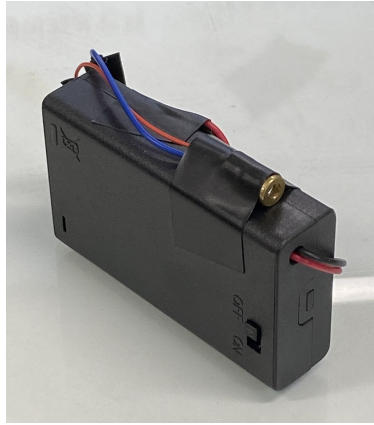
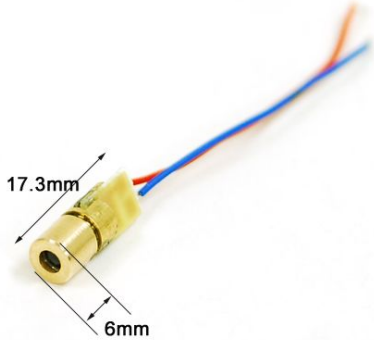
## 간섭무늬가 잘 나타나지 않은 사례



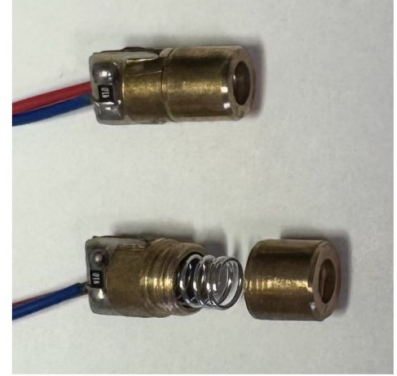
### ● 해결 방법

- 레이저 포인터 광점 크기를 2mm정도로 키운다.(레이저 덮개 조절)
- 거울 세우는 축을 바꿔본다.(두 거울의 미세한 두께 차이가 나와 간섭 무늬가 보임.)
- 거울 1과 거울 2를 서로 바꿔본다.
- 거울의 기울임 정도(바닥면 기준)를 조절해본다.

# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 실험도구(레이저 포인터)

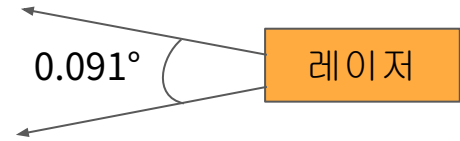


스크린 거리: 5m

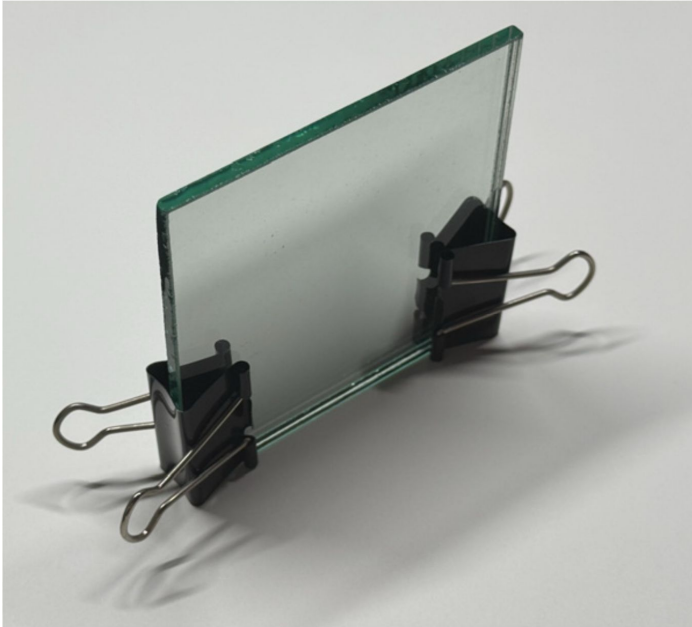


뒷개로 초점 조절 가능

- 반도체 레이저 + 스위치 달린 건전지 홀더(AAA,3개)
- 침두 파장: 650nm(빨간색) / 작동 전압, 출력: 5V-5mW
- 건전지 홀더가 레이저 받침대 역할을 함.
- 레이저 빛의 고유 광점 무늬(세로로 긴 모양) 있음. 구면파임. (발산각=약  $0.091^\circ$ )
- 광점의 크기를 레이저 포인터 뒷개를 이용해서 조절할 수 있음.
- 레이저 광은 선편광 되어 있음.



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 실험도구(거울, 메모클립)



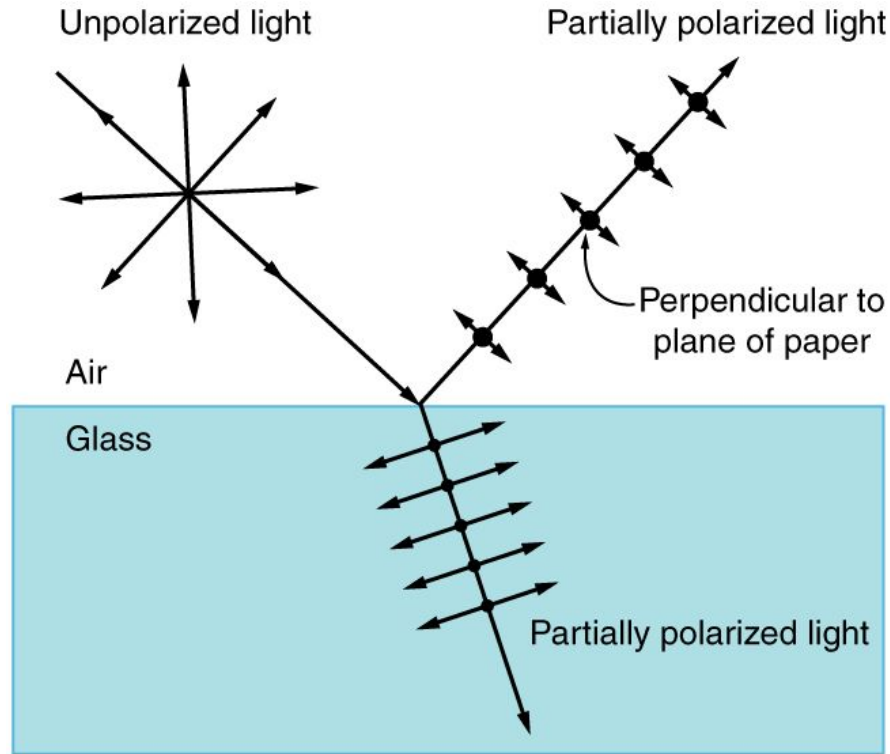
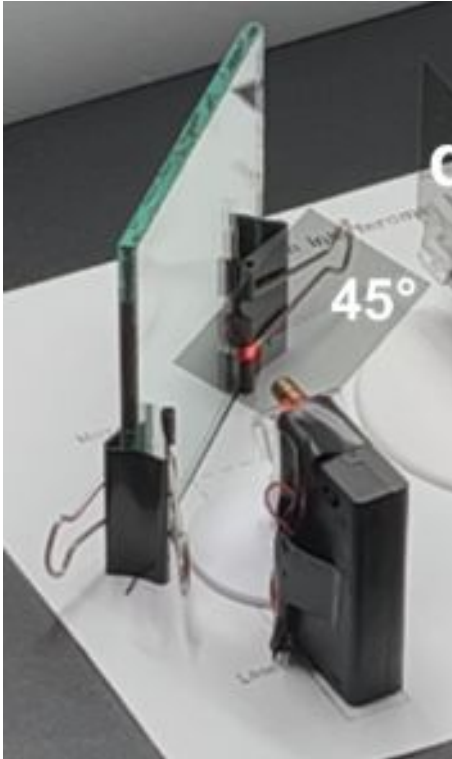
- 일반 거울 (두께, 5mm)
- 더블 클립 (수직 고정 오차)



- 폴라로이드 편광 필름(0.2mm)
- POP 가격표 메뉴판 쇼클립 꺾이는 부착형(소)

# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 실험도구(거울)

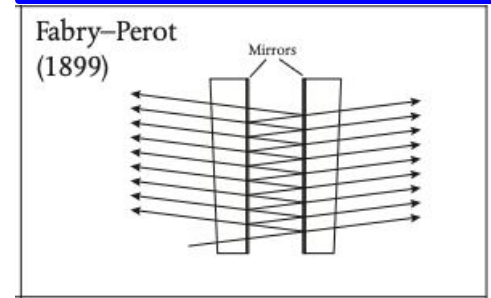
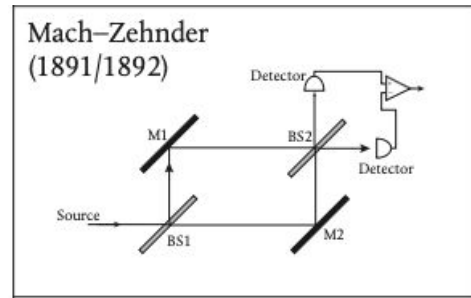
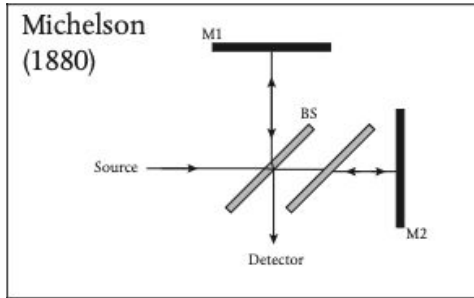
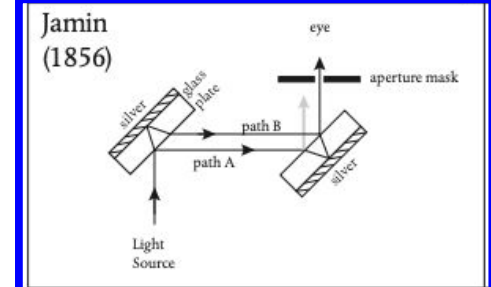
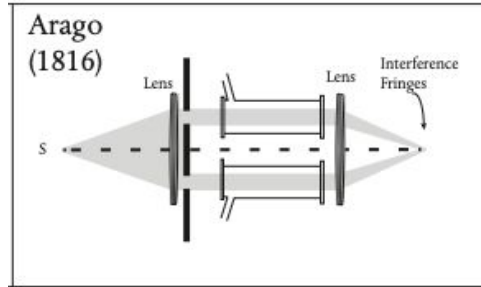
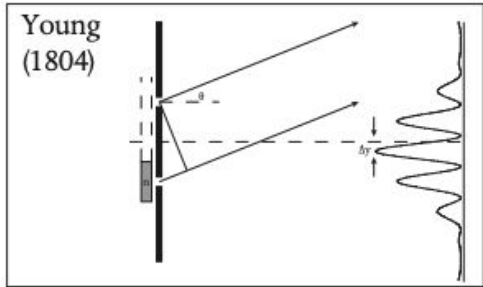
거울에서의 반사-투과에 의한 부분 편광 문제 :  $45^\circ$  편광판을 레이저 앞에 추가하면 개선됨.



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 과학사적 의미

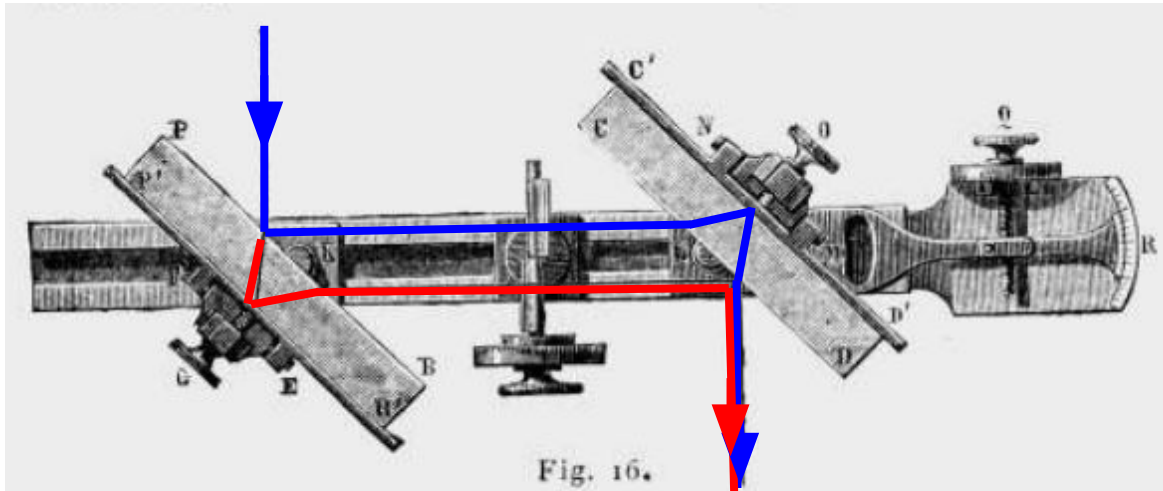
**간섭계(干涉計: interferometer)?**: '간섭'을 이용해 변위, 굴절률, 등을 측정하는 장치

- 파면 분리형(Wavefront Splitting): 파면을 공간적으로 분리(이중 슬릿,아라고)
- 진폭 분리형(Amplitude Splitting): 빛의 에너지(진폭)을 분리(재민, 마이컬슨, 마하젠더, 페브리 페로)



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 과학사적 의미

1. 쥘 자맹(Jules Célestin Jamin) 개발: 1856년
2. 유리 표면의 '부분 반사'로 빛을 분리, 재결합하여 간섭무늬 차이 이용 굴절률 측정 ("잡음의 신호화") : 역발상
3. 마이컬슨 간섭계 개발(1881)에 결정적 영향 줌.



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 과학사적 의미



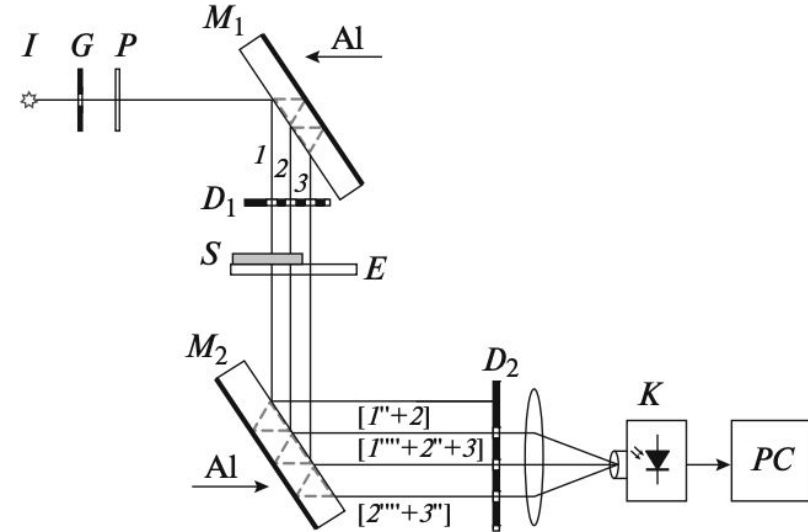
프랑스 혁명(1789) 100주년,

파리 만국 박람회(1889) 기념 탑

1789년~1889년 : 프랑스 **남자** 과학자 72명(18X4)

# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 과학적 유용성

## 정밀 측정을 위해 현대에도 쓰이는 재민 간섭계



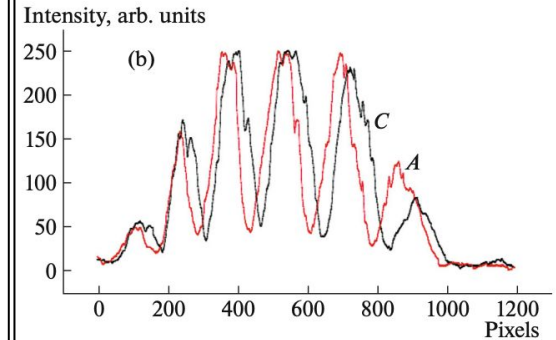
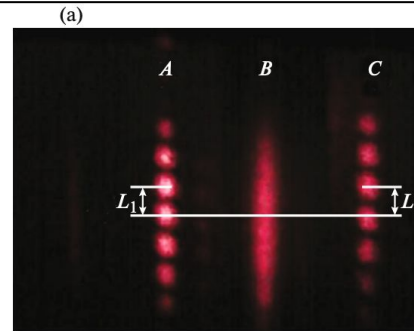
**Fig. 2.** The basic scheme of the interferometer. *I*, source of light; *G*, aperture; *P*, attenuator; *D*<sub>1</sub>, *D*<sub>2</sub>, diaphragms; *S*, sample; *E*, substrate; *K*, camera; *PC*, personal computer.

*ISSN 0020-4412, Instruments and Experimental Techniques, 2017, Vol. 60, No. 3, pp. 439–443. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017.  
Original Russian Text © A.S. Mukhtarov, M.A. Smirnov, T.A. Vakhonina, M.Yu. Balakina, 2017, published in Priroda i Tekhnika Eksperimenta, 2017, No. 3, pp. 140–144.*

LABORATORY  
TECHNIQUES

### Application of Jamin Interferometer for the Determination of Thin Transparent Polymer Films Thickness in the Visible Range<sup>1</sup>

A. S. Mukhtarov, M. A. Smirnov\*, T. A. Vakhonina,  
and M. Yu. Balakina



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 교육적 유용성

## 이중 슬릿 실험의 문제점


탐구 관찰

과학적 탐구력 | 과학적 문제 해결력

**이중 슬릿에 의한 빛의 간섭무늬 관찰하기**

**문제 인식**  
빛을 이중 슬릿에 통과시키면 스크린에 어떤 무늬가 나타날까?

**과정과 결과**





**목표**  
빛이 이중 슬릿을 통과하여 만드는 간섭무늬를 관찰할 수 있다.

**준비물**  
 이중 슬릿  
 레이저(적색, 청색)

**주의**  
레이저용 보안경을 꼭 착용한다.

**1** 슬릿꽃이에 이중 슬릿을 넣고 적색 레이저를 켜서 이중 슬릿을 지나도록 한다.  
**2** 이중 슬릿의 모양을 관찰하고 레이저 빛이 슬릿을 지나는 모습을 그려 보자.  
**3** 레이저 빛이 이중 슬릿을 통과하여 스크린에 나타날 것으로 예상되는 무늬를 그려 보자.

레이저 빛이 이중 슬릿을 지나는 모습	스크린에 나타날 것으로 예상되는 무늬
	

**4** 이중 슬릿을 통과한 빛이 스크린에 만드는 무늬를 관찰하고 예상한 무늬와 비교해 보자.  
**5** 레이저 빛을 녹색으로 바꾸고 과정 3, 4를 반복한다.

**질리**

**1** 과정 3에서 스크린에 나타나는 밝고 어두운 무늬는 어떤 원리로 생긴 것인지 설명해 보자.  
**2** 스크린에 나타난 무늬는 레이저 빛의 색깔에 따라 어떤 차이가 있는지 설명해 보자.  
**3** 빛이 파동임을 설명할 수 있는 특징은 무엇인지 토의해 보자.

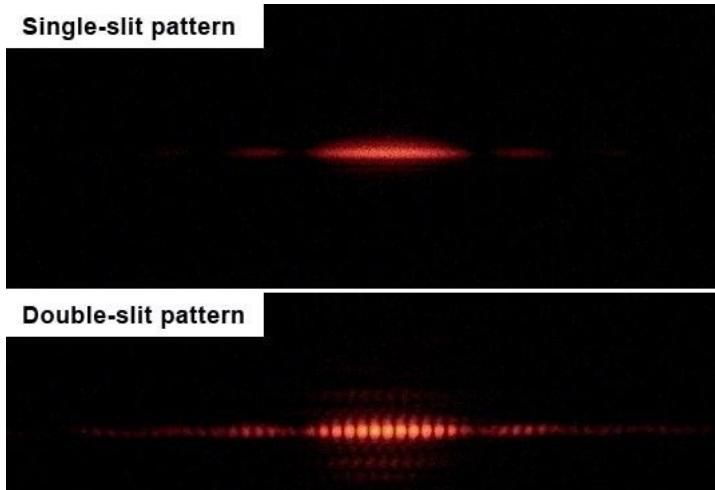
**스스로 평가하기**

**지식-이해** 빛의 간섭무늬를 파동의 성질로 설명하였는가?  
😊 😐 😞

**과정-기능** 레이저로 이중 슬릿 간섭 실험을 수행할 수 있는가?  
😊 😐 😞

**가치-태도** 간섭무늬의 모양을 관찰하고 호기심을 가지는가?  
😊 😐 😞

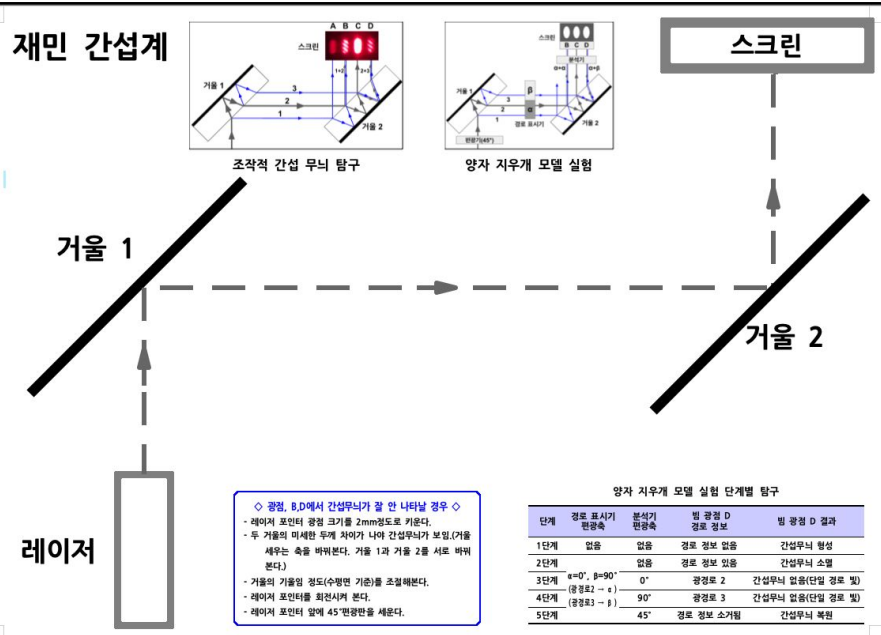
1. 회절무늬와 간섭무늬가 중첩됨.
2. 2m 이상 멀리 떨어져야 잘 보임.
3. 상호작용의 결과로 이해하기 어려움.  
(슬릿의 선택적 개폐로 인한 변화 실시간 관찰 어려움.)



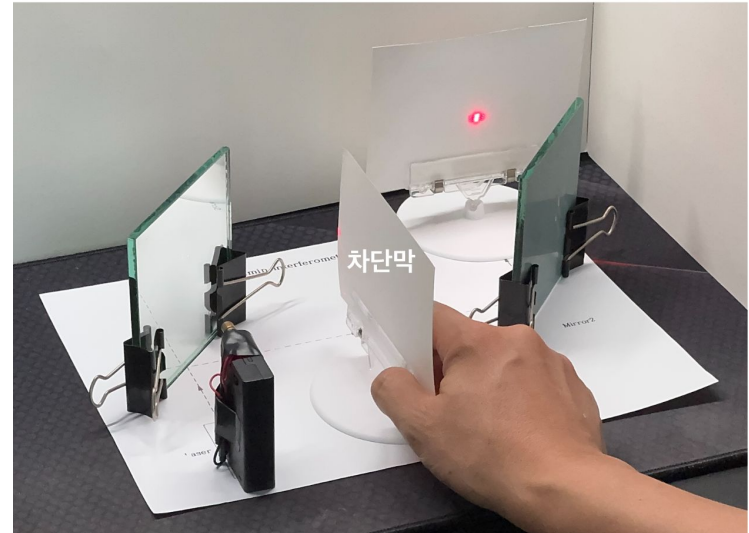
# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 교육적 유용성

## 재민 간섭계 실험의 장점

1. 학생 1인이 A4크기 책상 위에서 실험
2. 광경로의 선택적 조작적 탐구 가능
3. 밝은 곳에서 안정적인 간섭무늬 관찰

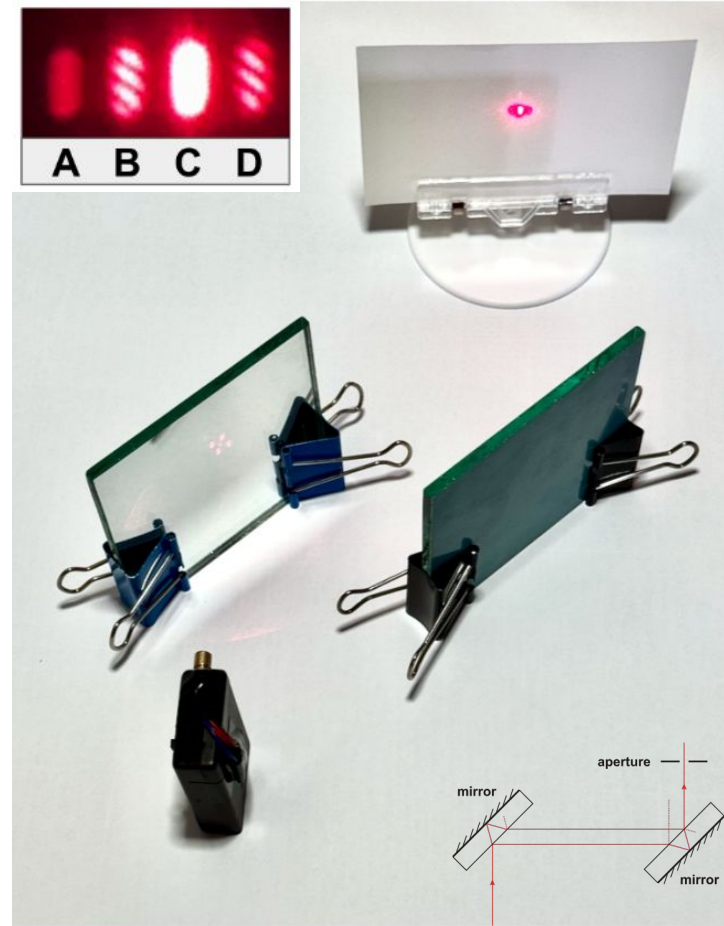


광학도구 배치판(A4크기)



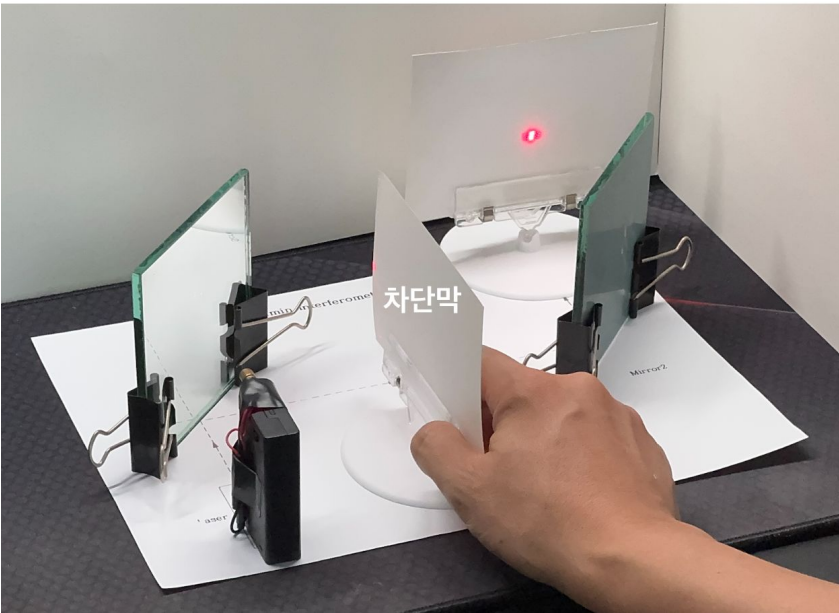
## 2. 재민 간섭계는 무엇인가?

1. 거울 2개의 '부분 반사'로 빛을 분리, 재결합하여 생기는 간섭무늬를 이용하여 측정하는 장치.
2. **역사적 의의** : 최초의 진폭 분할 간섭계(1856), 마이컬슨 간섭계 개발(1881)에 영향 줌.
3. **현대적 활용**: 원리를 응용 개조하여 정밀 계측에 활용 중
4. **교육적 유용성**: 간단함, 안정성이 높음, 좁은 공간에서 학생 1인이 조작적 관찰 가능

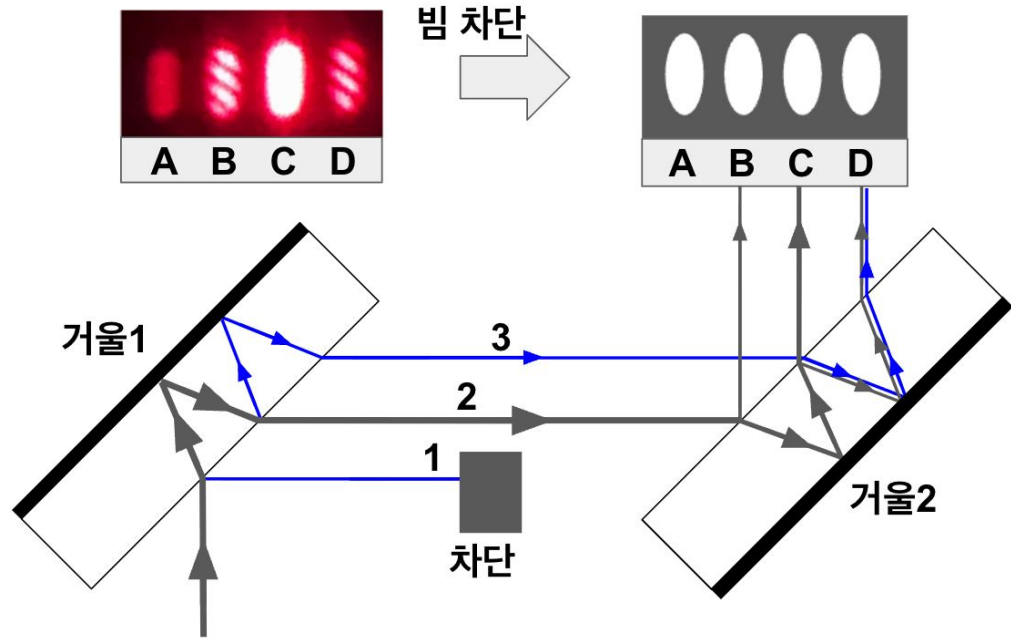


# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

## 조작적 간섭무늬 탐구

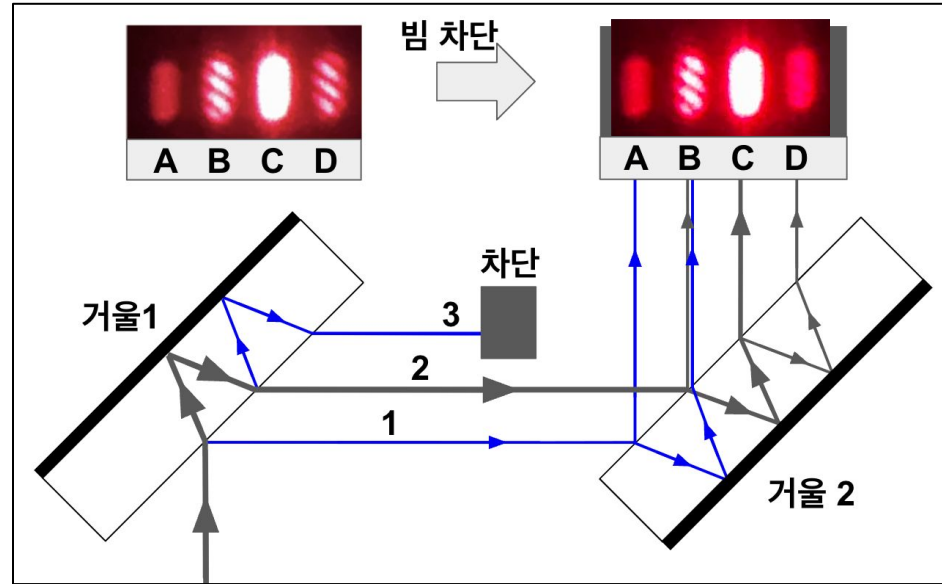
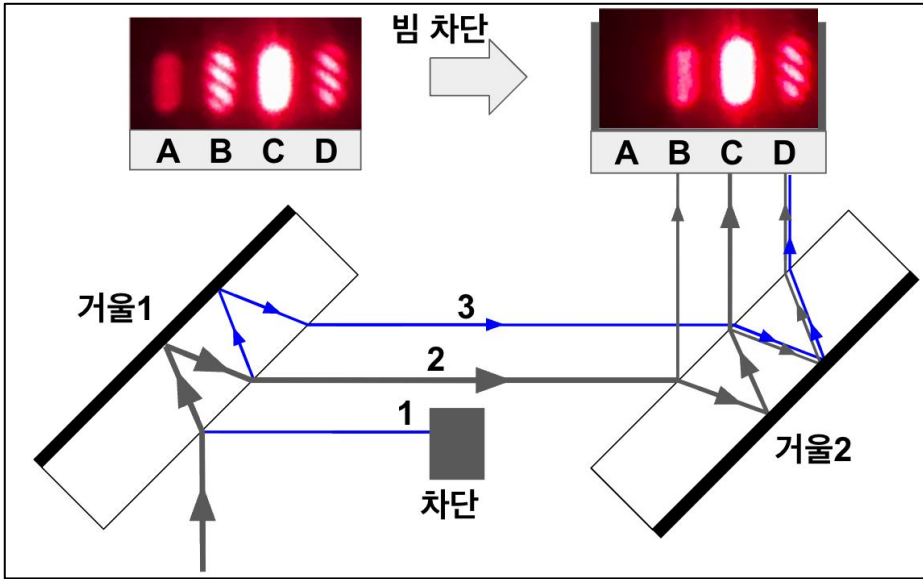


만약, 광경로 3을 가리면 빔 광점은 어떻게 변할까요?



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

**조작적 간섭무늬 탐구 : 광경로1, 3을 선택적으로 개폐하여 간섭모늬 변화 관찰**

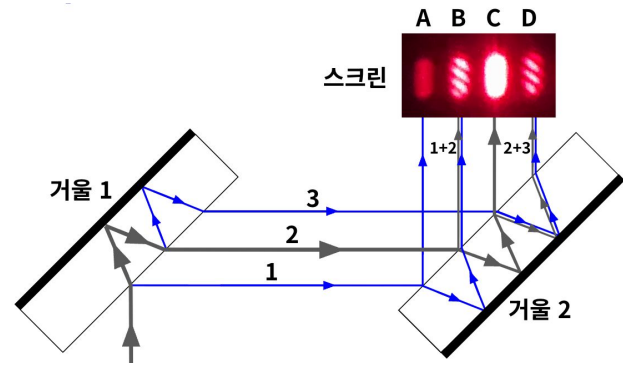


# 1. 재민 간섭계는 무엇인가? : 조작적 간섭무늬 탐구



# 1. 재민 간섭계는 무엇인가?

## 조작적 간섭무늬 탐구: 탐구 질문



구분	실험 중	실험 후
사실적 질문	스크린에서 레이저 빔 광점은 몇 개가 관찰되나요?	가림막으로 광경로 3을 차단할 경우 간섭무늬는 어떻게 변했는지 기억하나요?
개념적 질문	만약, 광경로 1을 가리면 빔 광점 B는 어떻게 변할까요?	빔 광점 A에서 간섭무늬가 나타나지 않는 이유는 무엇이었죠?
논쟁적 질문	재민간섭계에서 두꺼운 유리 거울을 이용하는 이유는 무엇이라고 생각하나요?	만약, 광경로 1에 투명 유리판을 추가할 경우 실험결과는 어떻게 될까요?

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

- **상보성 원리**: 입자적 행동을 보이는 지 파동적 행동을 보이는 지 경로 정보(path information)의 구별 여부에 의해 결정.(Bohr,1928)
- **양자 중첩**: 여러 개의 가능성을 동시에 갖는 상태
- **측정을 통한 확률적 상태 변화**: 양자 중첩 상태에서 측정에 의해 하나의 상태로 결정

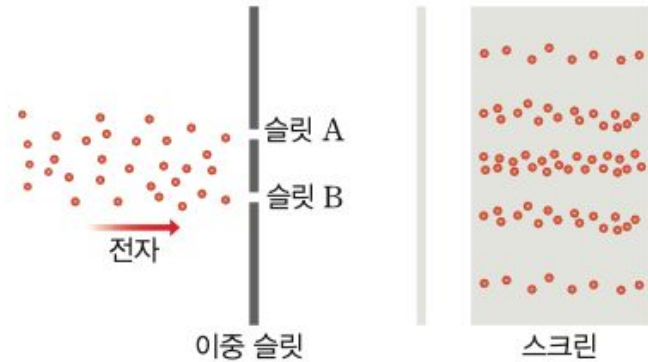


그림 III-7 전자가 어느 슬릿을 통과하였는지 관측하지 않은 경우

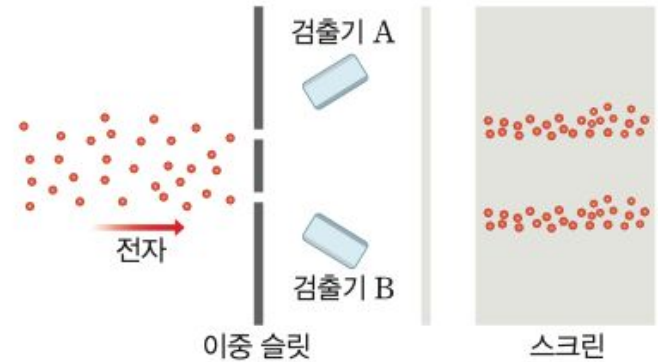
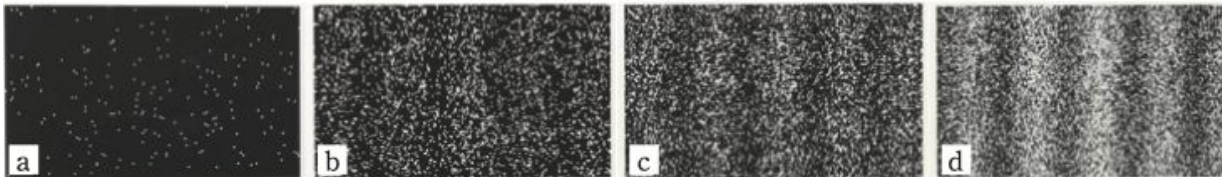


그림 III-8 전자가 어느 슬릿을 통과하였는지 관측한 경우



## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

- **상보성 원리**: 입자적 행동을 보이는 지 파동적 행동을 보이는 지 경로 정보(path information)의 구별 여부에 의해 결정.(Bohr,1928)
- **양자 중첩**: 여러 개의 가능성을 동시에 갖는 상태
- **측정을 통한 확률적 상태 변화**: 양자 중첩 상태에서 측정에 의해 하나의 상태로 결정

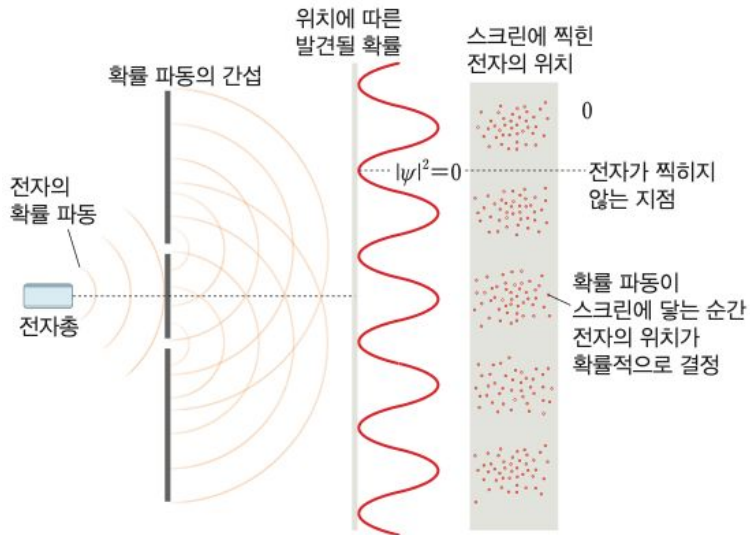


그림 III-5 이중 슬릿을 통과하는 단일 전자의 확률 파동

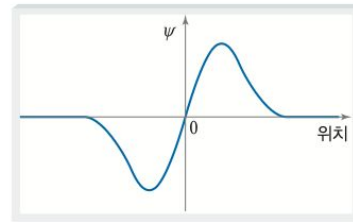


그림 III-3 입자의 진행을 나타낸 확률 파동

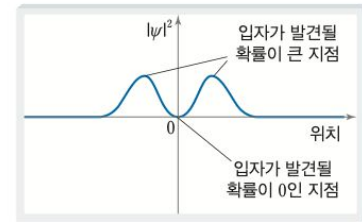


그림 III-4 입자가 발견될 확률

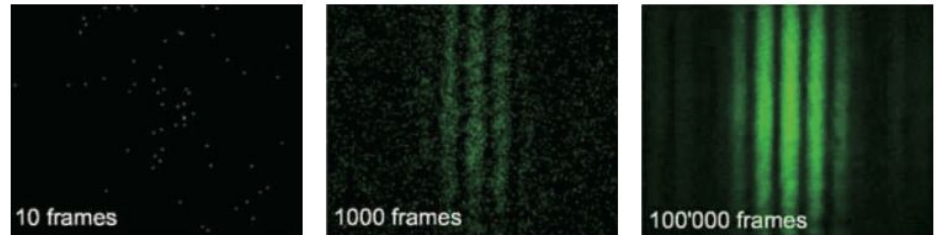


그림 III-6 빛을 이용한 이중 슬릿 실험의 결과

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

**양자 지우개(Quantum Eraser) 실험** : 양자 중첩과 경로 정보의 관계를 검증하기 위한 실험 중 하나로 1982년 제안되고(Scully & Drühl, 1982). 김윤호(1999) 등에 의해 실험으로 검증됨.

**핵심 질문: 이중 슬릿 통과 후 경로 정보를 지닌 광자가 스크린에 닿기 전에 그 정보를 지운다면?**

# 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

## 편광기 (단일) 양자 지우개(Quantum Eraser) 실험 :

Rueckner, W., & Peidle, J. (2013). Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser. *American Journal of Physics*, 81(12), 951-958.

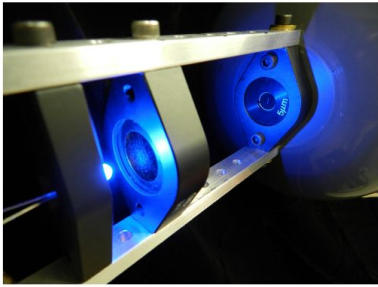


Fig. 2. The blue LED (left), linear polarizer (middle), and 5- $\mu\text{m}$  entrance slit (right) are all mounted in standard lens holders and the entire assembly is attached to the end-cap of the PVC pipe.

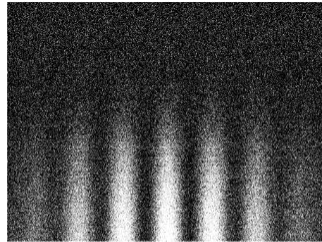
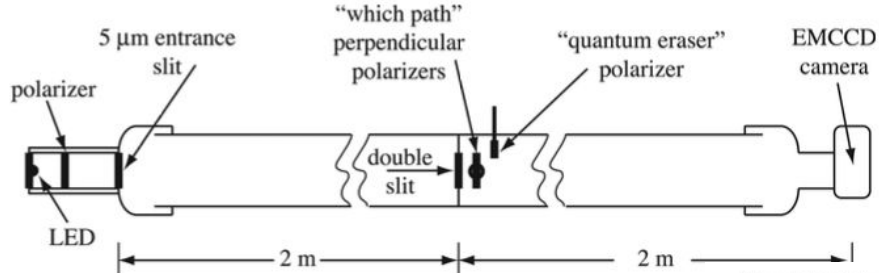


Fig. 7. The sum of 240 half-second exposures (120s accumulation time). The graph and image grayscale is 0-500 counts.

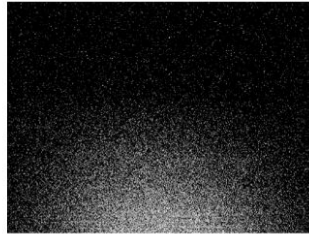


Fig. 9. With the marker in place, the double-slit interference disappears. The graph and image grayscale is 0-1000 counts. The image shows the sum of 240 half-second exposures for a total of 120s of accumulation time with  $2 \times 2$  binning.

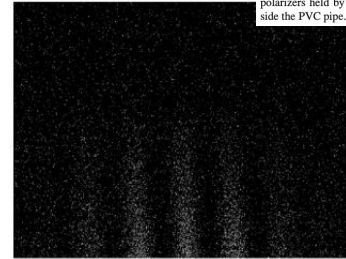


Fig. 10. With the quantum eraser in place, the double-slit interference is restored. The graph and image grayscale is 0-1000 counts.

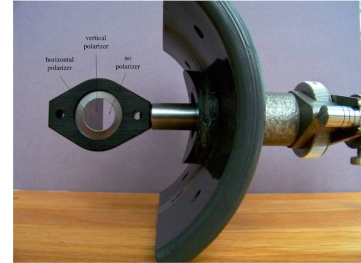


Fig. 3. The which-path marker (left) consists of vertical and horizontal polarizers held by a standard lens mount; its position is adjusted from outside the PVC pipe.

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

**양자 지우개 실험의 과학적 의의** : 중첩과 측정을 통한 확률적 상태 변화 및 경로 정보의 관계의 실험적 구현으로 양자 암호 통신, 양자 컴퓨터 연구의 기반이 되고 있음.

PHYSICAL REVIEW A **111**, 012610 (2025)

### Probing electron-photon entanglement using a quantum eraser

Jan-Wilke Henke<sup>1</sup>, Hao Jeng<sup>2</sup>, and Claus Ropers<sup>1\*</sup>

*Max Planck Institute for Multidisciplinary Sciences, 37077 Göttingen, Germany  
and 4th Physical Institute, University of Göttingen, 37077 Göttingen, Germany*

 (Received 18 April 2024; accepted 18 December 2024; published 9 January 2025)

We propose a tangible experimental scheme for demonstrating quantum entanglement between electrons and light, relying on coherent cathodoluminescence for electron generation and a quantum eraser setup for formation and verification. The experimental scheme with light is key to developing free-electron quantum computing. The experimental scheme with light is key to developing free-electron quantum sensing, novel photonic and electron state generation, and quantum information processing.

DOI: [10.1103/PhysRevA.111.012610](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.012610)

International Journal of Quantum Information | VOL. 22, NO. 07

 No Access

### Quantum key distribution based on the quantum eraser

Tarek A. Elsayed

<https://doi.org/10.1142/S0219749924500102>

[← Previous](#)

[Next >](#)

 Tools

[← Share](#)

*New J. Phys.* **27** (2025) 074503

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/ade90e>

## New Journal of Physics

The open access journal at the forefront of physics

Deutsche Physikalische Gesellschaft   
IOP Institute of Physics

Published in partnership with: Deutsche Physikalische Gesellschaft and the Institute of Physics

PAPER

### Demonstration of Scully–Drühl-type quantum erasers on quantum computers

Bo-Hung Chen<sup>1,2,3,4,7</sup>, Dah-Wei Chiou<sup>3,4,7</sup> and Hsiu-Chuan Hsu<sup>5,6,7,\*</sup>

for advanced undergraduate courses. Many of the quantum key distribution experiments and quantum encryption, are based on quantum entanglement. In this paper, we show that the quantum eraser experiment, can also serve as a generic platform for quantum key distribution to securely share random keys using the quantum eraser.

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

**양자 지우개 실험의 교육적 의의** : 중첩과 측정을 통한 확률적 상태 변화 및 경로 정보의 관계의 실험적 구현으로 양자 중첩의 기묘함 인식 도구, 양자 측정의 의미 이해.

“측정”이 단지, “물리적 방해”로 작용해 파동성(간섭)이 사라지는 것이 아님을 보여줌.

만약, 경로 표시 과정 자체가 광자를 교란시켜 간섭을 없앴다면, 경로 정보를 지운다고 해서 간섭이 돌아오지 않았을 것임.

관련 오개념: 양자 “측정”은 물리적 교란 행위이다.

파동성의 붕괴를 측정 과정에서의 물리적 교란으로 인한 것으로 판단하는 오개념.

핵심 질문 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과했는지 확인할 수 있을까?

파동성의 붕괴  
빛을 비추는 관측 행위에 의해 전자의 상태는 관측 전과 달라지며, 전자는 파동성을 잃는다. 전자가 파동성을 잃고 하나의 상태로 정해지는 것을 파동성의 붕괴라고 한다.

전자가 이중 슬릿을 통과할 때 파동성을 지닌 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과한 것인지를 확인하려면 관측이 필요하다. 이때 비추는 빛의 파장은 전자의 크기 정도로 짧아야 한다.

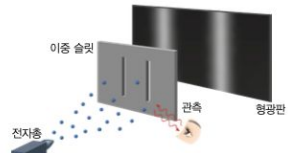


그림 III-7 | 관측에 의한 간섭무늬의 변화

그림 III-7과 같이 관측을 하면 전자의 위치를 파악하려는 관측에 의해 전자가 파동성을 잃기 때문에 간섭무늬가 나타나지 않는다. 따라서 전자가 어느 쪽 슬릿을 통과하는지를 알면서 동시에 간섭무늬까지 볼 수 있는 방법은 없다.


흥미로운 답 전자를 관측하면 전자는 파동성을 잃는다.

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

**편광을 이용한 양자 지우개 실험** : 편광기를 이용해 경로 정보를 부여·제거하는 도구로 사용하여 간섭무늬의 소멸과 복원을 통해 상보성 원리를 설명하는 실험.

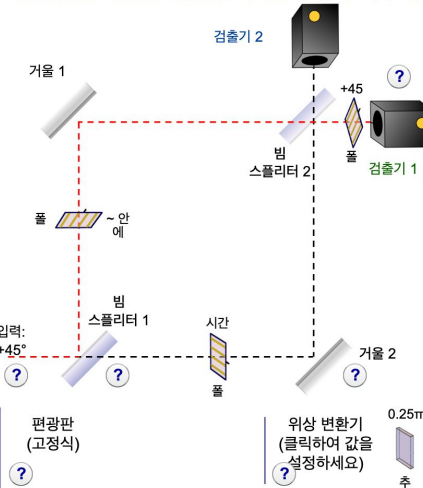
### Quantum Eraser Demonstration Kit

- Designed for Education, Demonstration, and Classroom Use
- Easy-to-Use Kits Include Components Plus Free Educational Materials



**EDU-OE1**  
Quantum Eraser Demonstration Kit

<https://www.thorlabs.com/quantum-eraser-demonstration-kit?pn=EDU-OE1/M&tabName=Overview>

광학표 1	광학표 2	도전 과제	QuVis
<b>편광판을 이용한 단일 광자 실험: 양자 지우개</b>			
<p>수직 및 수평 편광판을 빔 분할기 사이의 경로 각각에, 위상 변환기를 빔 분할기 사이의 경로 중 하나에, 그리고 +45도 편광판을 검출기 앞에 배치해 보세요. 이 구성을 양자 지우개라고 합니다. 위상 변환을 변경하여 그 이유를 알아보세요! 그런 다음 도전 과제 탭에서 계속 진행하세요.</p>			
<p><b>디스플레이 제어</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> 관찰된 확률</li> <li><input type="checkbox"/> 이론적 확률</li> <li><input type="checkbox"/> 다양한 지점에서의 양자 상태 (검은 점)</li> </ul>		 <p>입력: +45°</p> <p>편광판 (고정식)</p> <p>위상 변환기 (클릭하여 값을 설정하세요)</p> <p>0.25π</p>	<p><b>측정 결과</b></p> <p>총: <math>N_{\text{개}} = 0</math></p> <p>검출기 1: <math>N_1 = 0</math></p> <p>검출기 2: <math>N_2 = 0</math></p> <p>흡수됨: <math>N_{\text{abs}} = 0</math></p> <p>클리어 카운트</p> <p>더 많은 데이터를 수집하세요!</p>
<p><b>주요 제어</b></p> <p>화염 광자 100개의 광자를 빨리 감아보세요</p> <p>연속 사격 모든 요소를 교체하세요</p>			

[https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations\\_html5/sims/QuantumEraser/QuantumEraser.html](https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/QuantumEraser/QuantumEraser.html)

마하젠더 간섭계를 이용한 시범 실험 키트

마하젠더 간섭계를 이용한 시뮬레이션

## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

### 단일 광자와 편광기의 상호작용

1. "통과" 아니면 "차단"

2. 광자 통과와 확률적 결정

통과할 확률= $\cos^2\theta$  / 흡수될 확률= $\sin^2\theta$

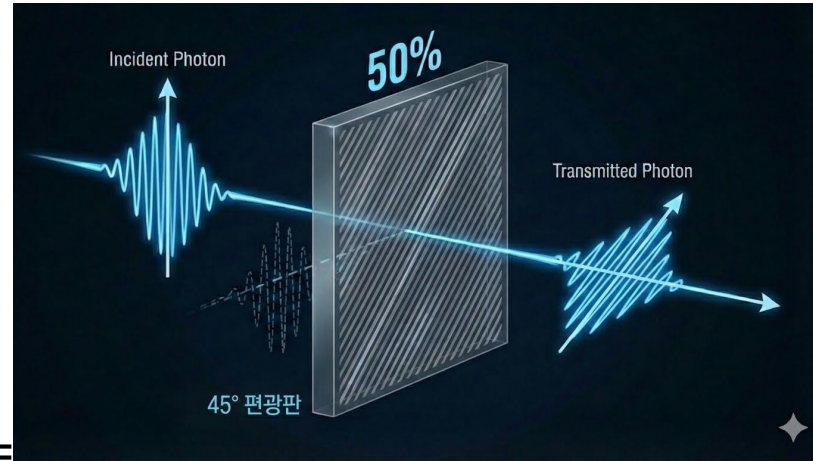
(광자의 편광 방향과 편광기의 축 사이의 각도= $\theta$ )

예) 수직 편광 광자가  $45^\circ$  편광기를 지날 때 :  $\cos^2(45^\circ) = 0.5$ , 즉, 50%의 확률로 통과함.

3. 상태의 붕괴와 측정

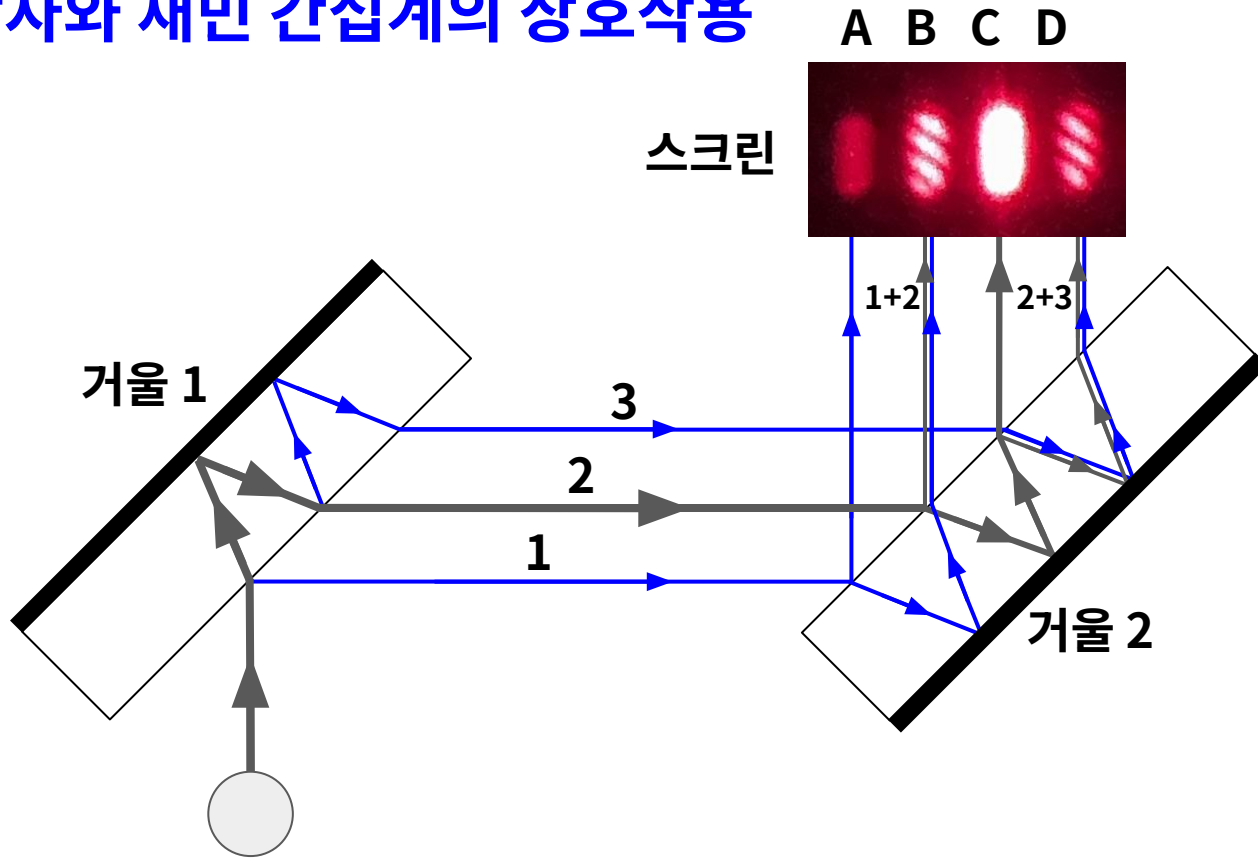
통과하는 순간, 광자는 이전에 가지고 있던 편광 기억을 모두 잃어버리고 편광기의 방향으로 상태가 바뀜(Collapse).: 측정

편광기가 일종의 '측정 장치' 역할을 하여 광자의 상태를 확정 지음.



## 2. 양자 지우개 실험은 무엇인가?

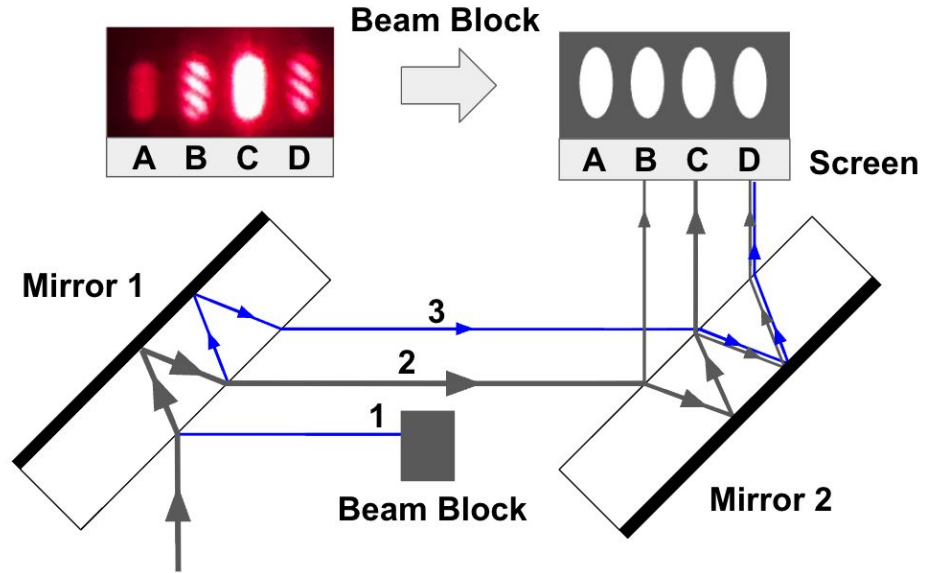
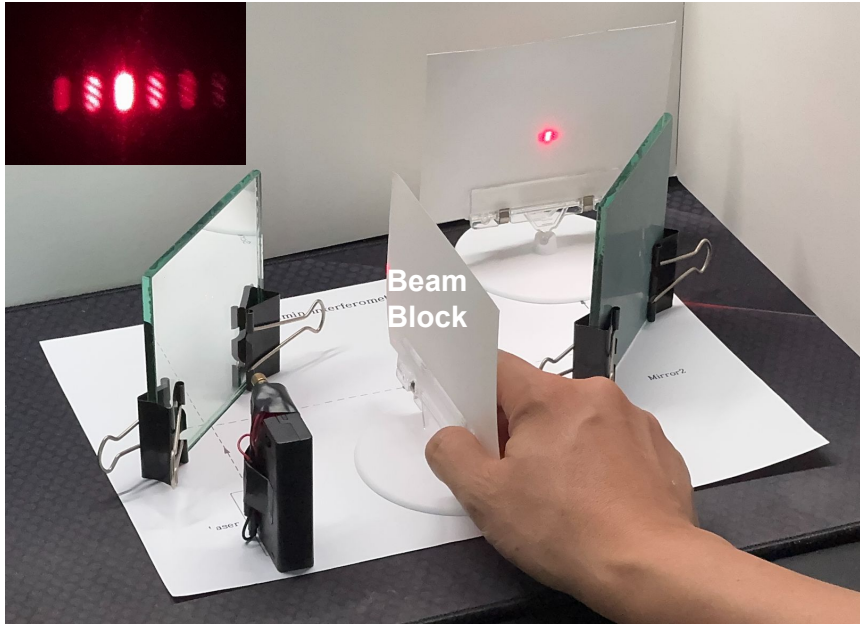
### 단일 광자와 재민 간섭계의 상호작용





# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

광경로 조작을 통한 간섭무늬 형성 과정 탐구



# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

## 간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

### 광경로 조작을 통한 간섭무늬 형성 과정 탐구

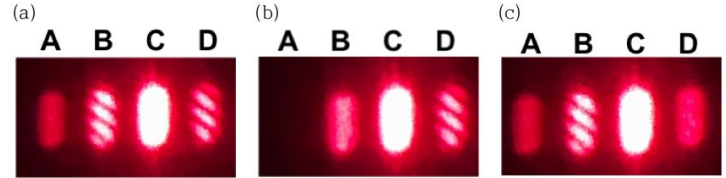
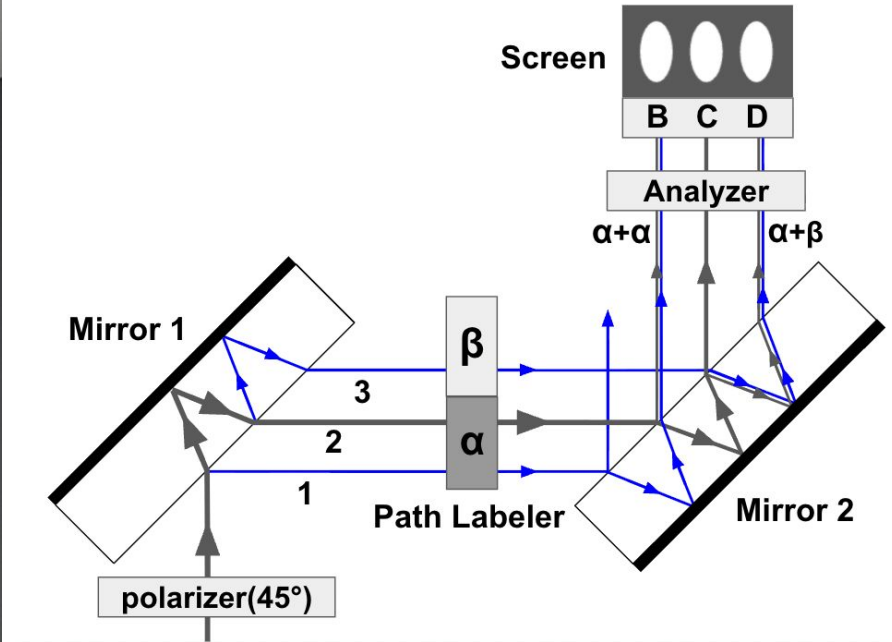
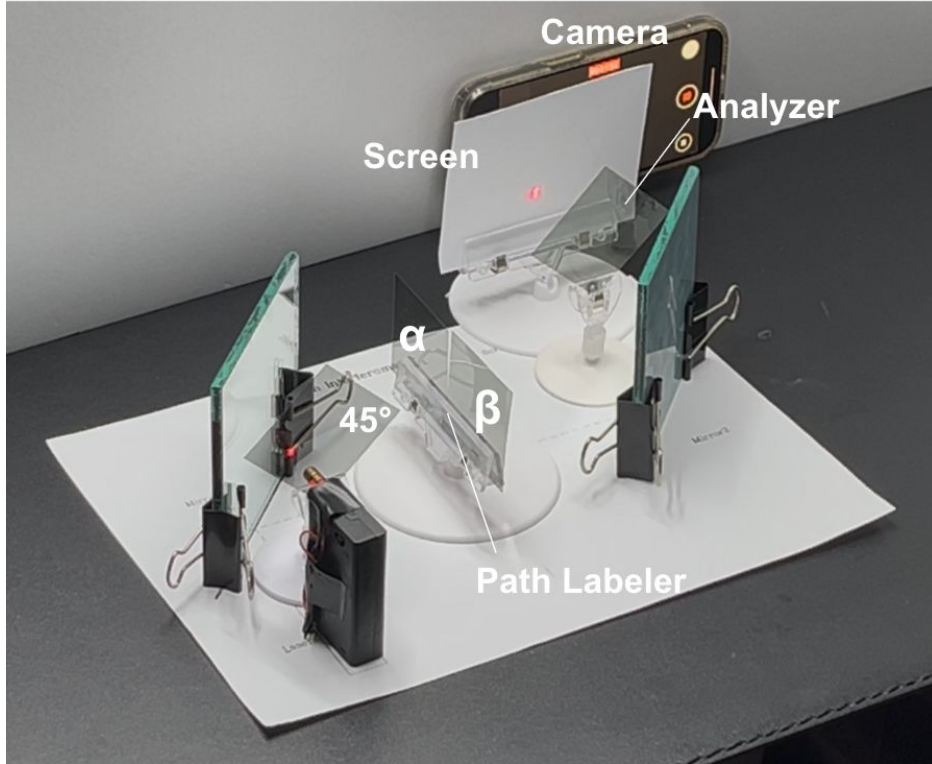


그림 6. 재민 간섭계 실험 결과 (a) 가림막이 없을 경우 (b) 광경로 1을 가림막으로 차단한 경우 (c) 광경로 3를 가림막으로 차단한 경우

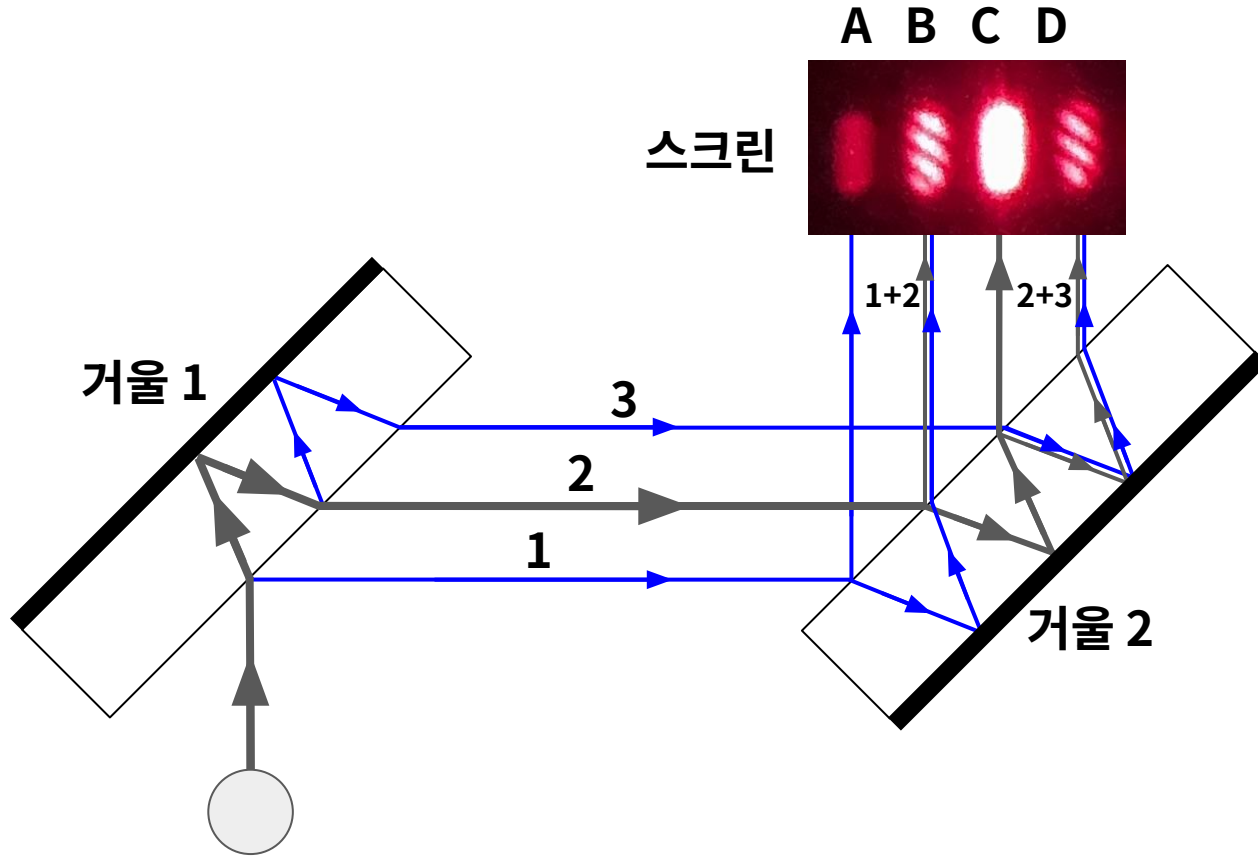
구분	실험 중	실험 후
사실적 질문	스크린에서 레이저 빔 광점은 몇 개가 관찰되나요? : 4개가 보였다. (더 많이 나타날 수 있음.)	가림막으로 광경로 3을 차단할 경우 간섭무늬는 어떻게 변했는지 기억하나요? : 빔 광점 D에서 간섭무늬가 사라졌다.
개념적 질문	만약, 광경로 1을 가리면 빔 광점 B는 어떻게 변할까요? : 광점 B의 간섭무늬가 사라진다.	빔 광점 A에서 간섭무늬가 나타나지 않는 이유는 무엇이었죠? : 하나의 빛만 반사되어 중첩되지 않기 때문이다.
논쟁적 질문	재민 간섭계에서 두꺼운 유리 거울을 이용하는 이유는 무엇이라고 생각하나요? : 유리 표면에서 부분반사가 일어나면서 두 갈래로 분해되고, 다시 중첩시켜 간섭무늬를 만들 수 있기 때문이다.	만약 광경로 1에 투명 유리판을 추가할 경우 실험결과는 어떻게 될까요? : 광경로 1과 광경로 2가 중첩되는 빔 광점 B의 간섭무늬가 변하게 될 것 같다.

# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

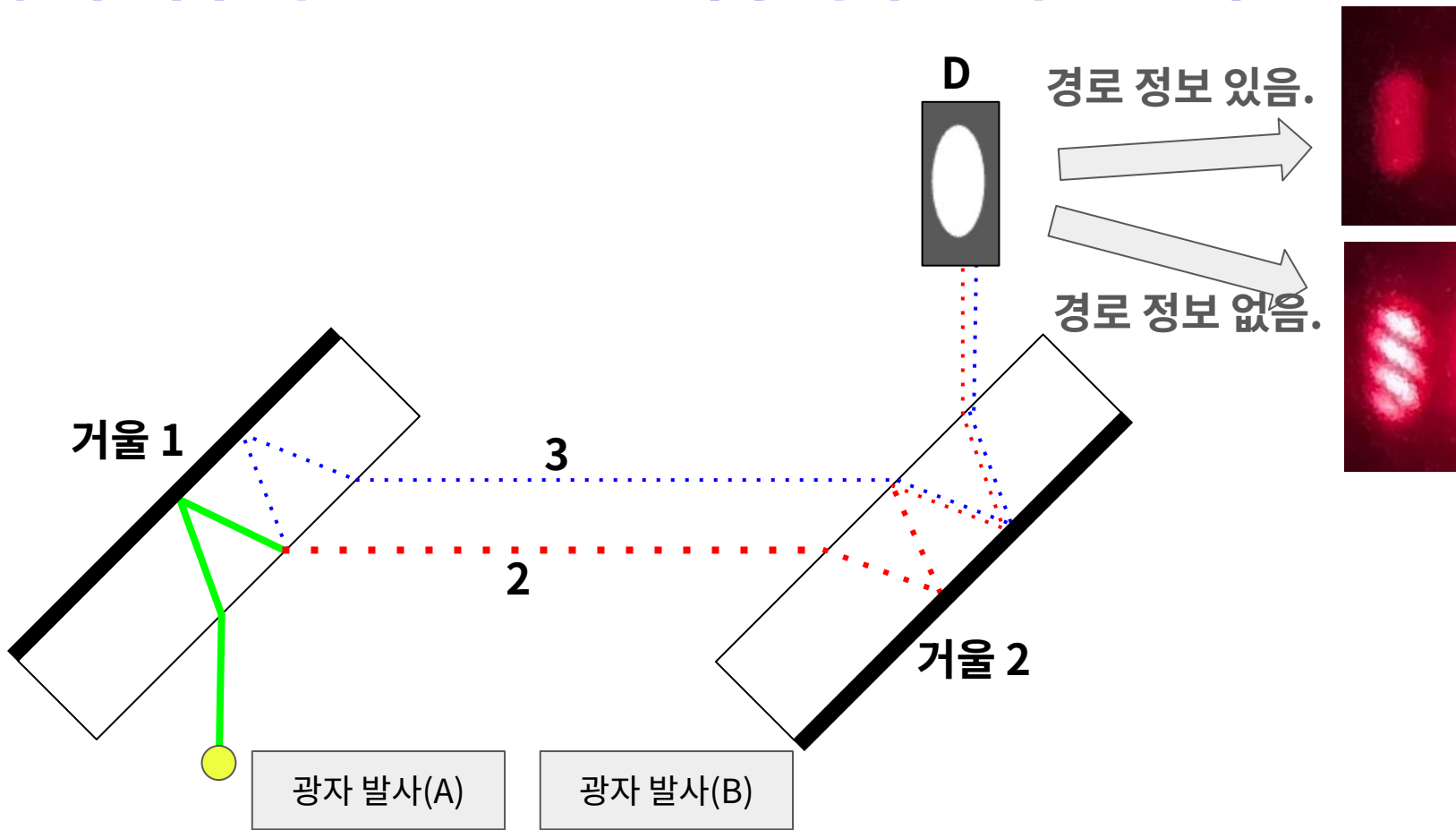
간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험



### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

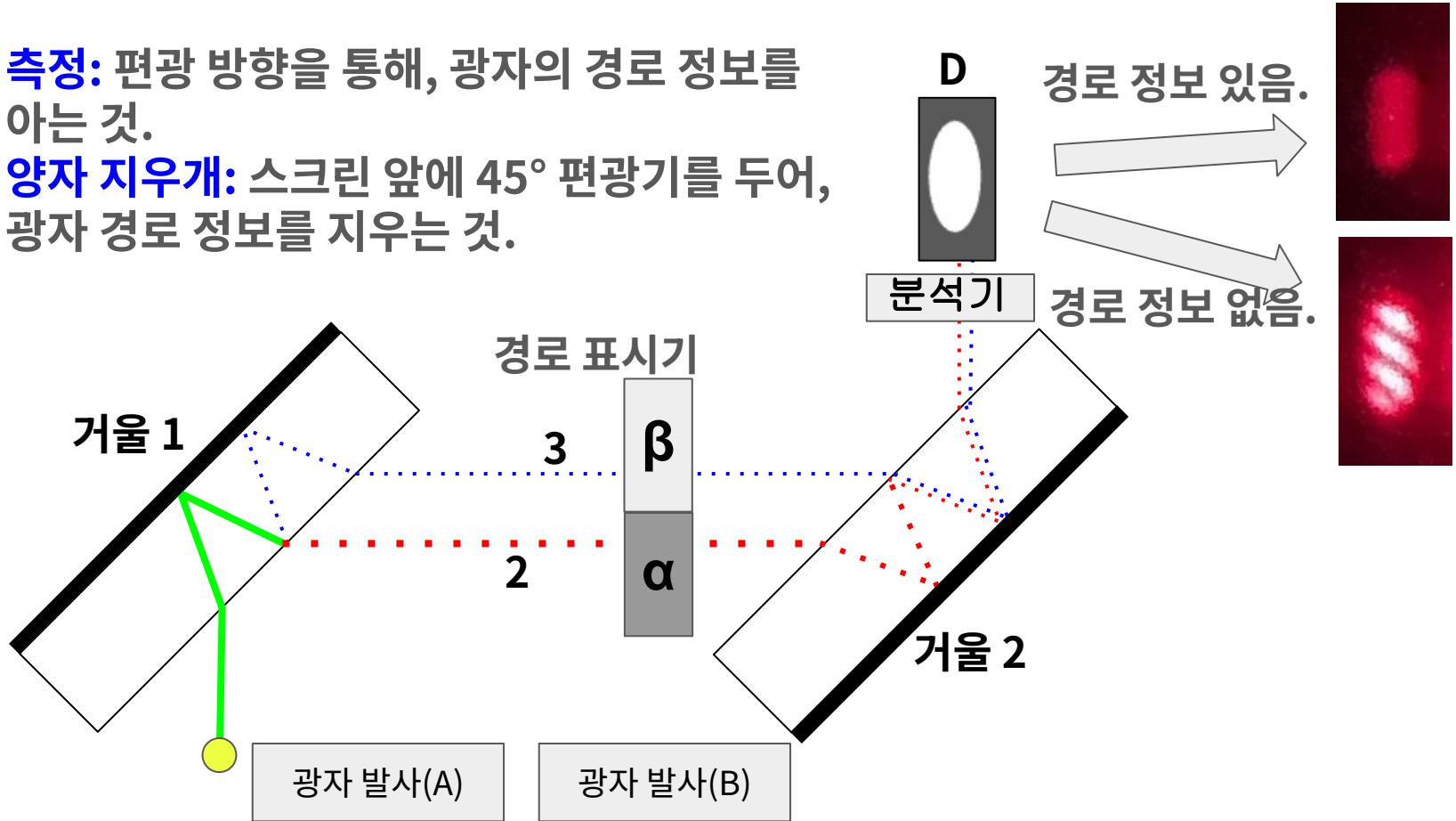


### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?



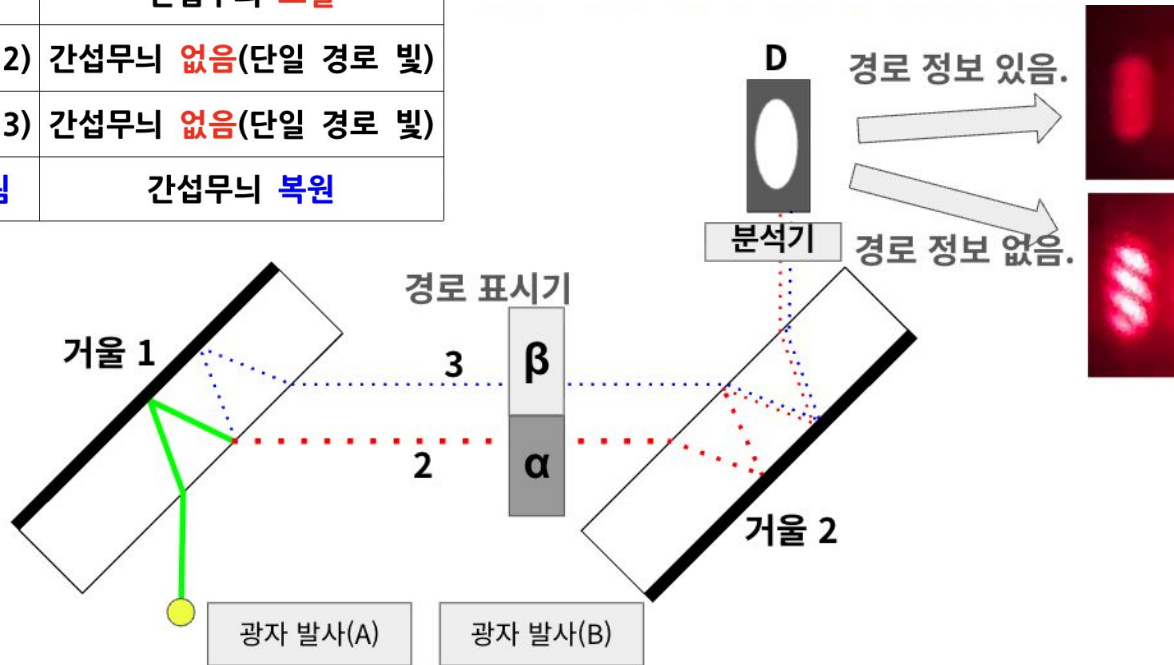
### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

- **측정:** 편광 방향을 통해, 광자의 경로 정보를 아는 것.
- **양자 지우개:** 스크린 앞에 45° 편광기를 두어, 광자 경로 정보를 지우는 것.

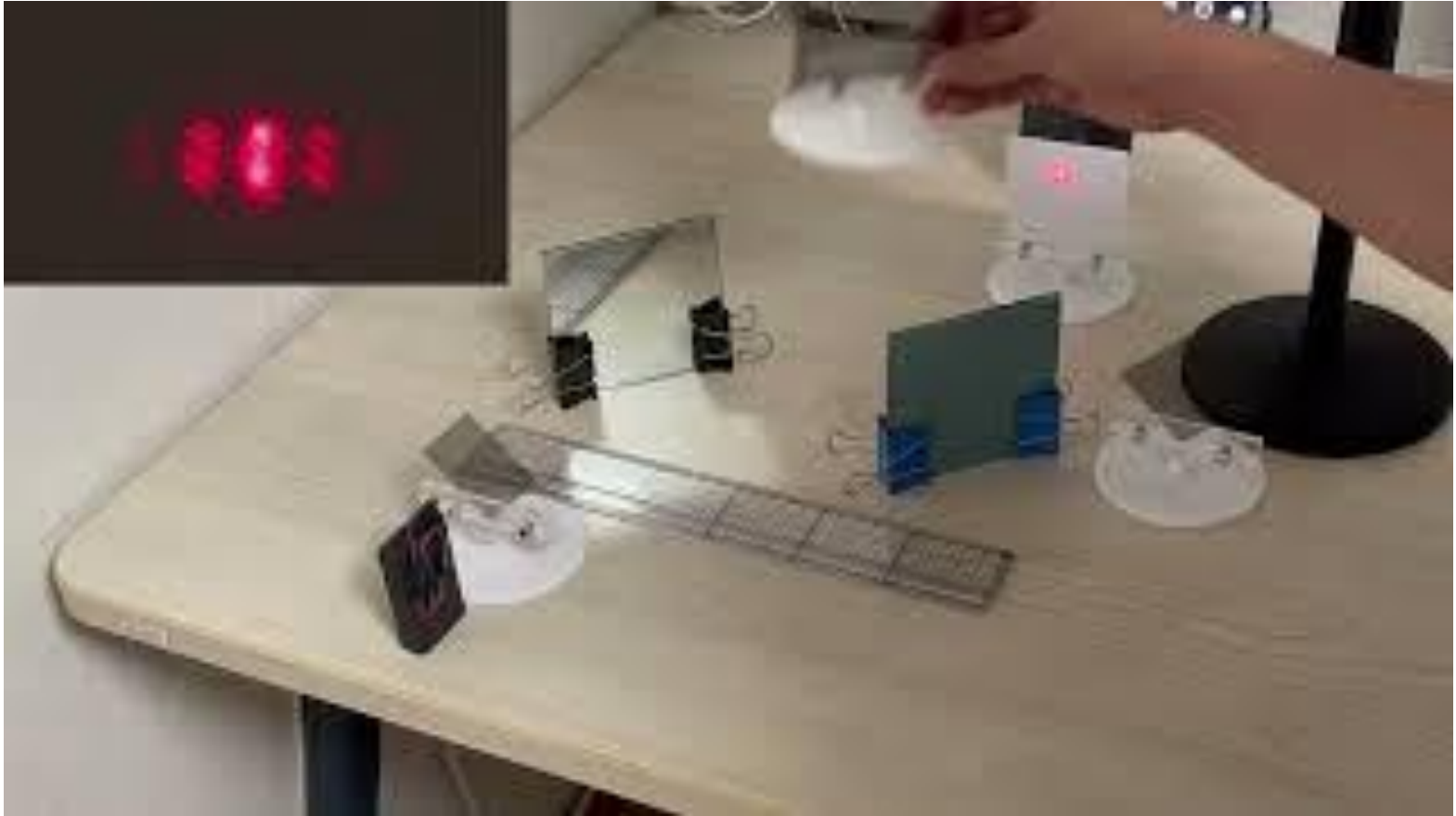


# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

단계	경로 표시기 편광축	분석기 편광축	빔 광점 D 경로 정보	빔 광점 D 결과
1단계	없음	없음	경로 정보 <b>없음</b>	간섭무늬 <b>형성</b>
2단계		없음	경로 정보 <b>있음</b>	간섭무늬 <b>소멸</b>
3단계	$\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$ (광경로2 $\rightarrow \alpha$ )	$0^\circ$	경로 <b>확인</b> (광경로 2)	간섭무늬 <b>없음</b> (단일 경로 빛)
4단계	(광경로3 $\rightarrow \beta$ )	$90^\circ$	경로 <b>확인</b> (광경로 3)	간섭무늬 <b>없음</b> (단일 경로 빛)
5단계		$45^\circ$	경로 정보 <b>소거됨</b>	간섭무늬 <b>복원</b>



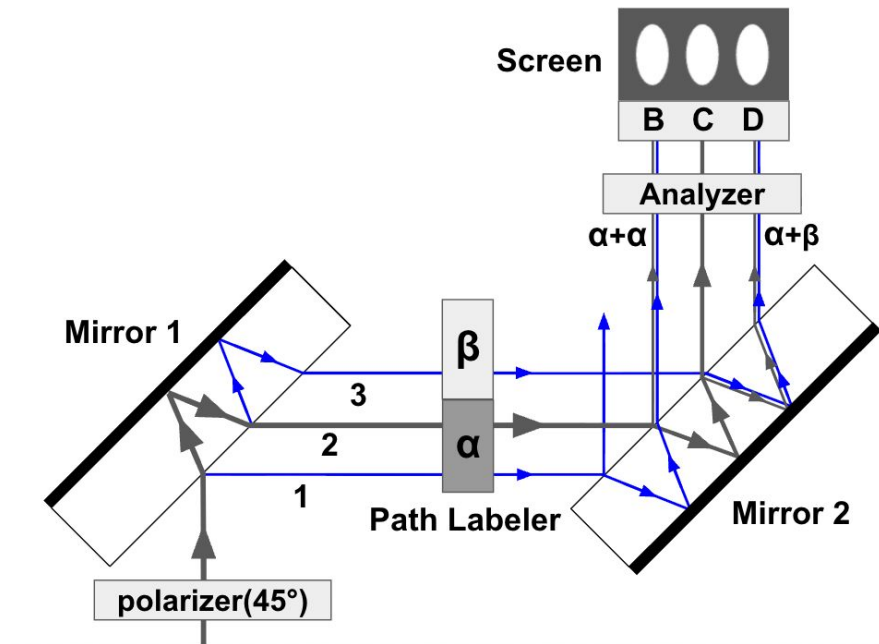
### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?



# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?


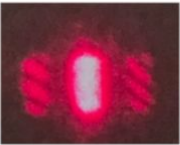
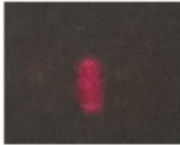

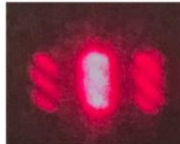

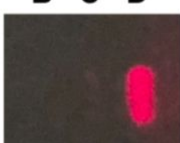


## 간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

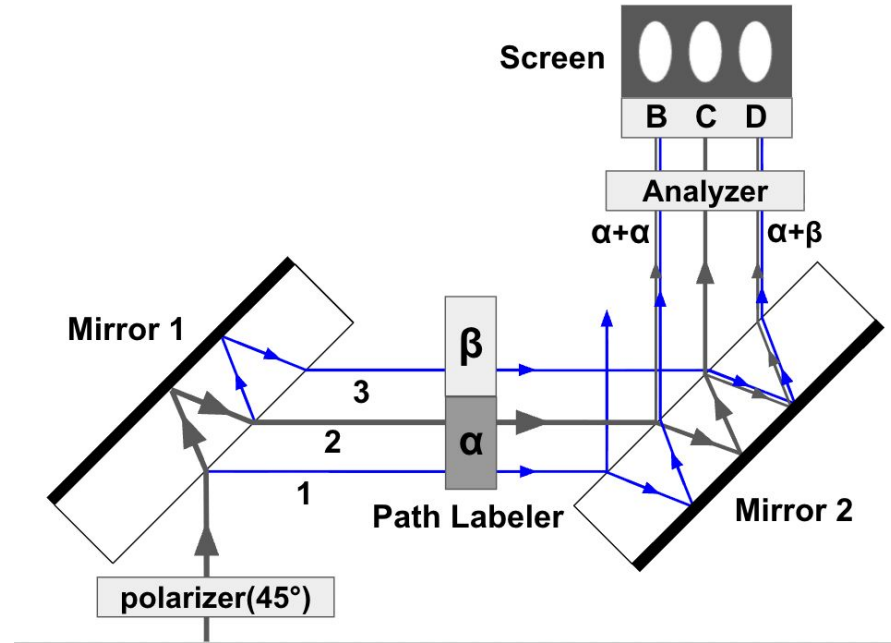
실험 단계	경로 표시기 편광축	분석기 편광축	경로 정보 상태	빔 광점 D
1단계	없음	없음	경로 정보 없음	간섭무늬 형성
2단계		없음	경로 정보 있음	간섭무늬 소멸
3단계	$\alpha=0^\circ, \beta=90^\circ$ (광경로 2 $\rightarrow$ $\alpha$ )	$0^\circ$	광경로 2	간섭무늬 없음 (단일 경로 빛)
4단계	(광경로 3 $\rightarrow$ $\beta$ )	$90^\circ$	광경로 3	간섭무늬 없음 (단일 경로 빛)
5단계		$45^\circ$	경로 정보 소거됨	간섭무늬 복원



# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

## 간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

분석기 경로 표시기	$0^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
$\alpha=0^\circ / \beta=0^\circ$			
B: $0^\circ+0^\circ$ D: $0^\circ+0^\circ$	(a)	(b)	(c)
$\alpha=0^\circ / \beta=90^\circ$			
B: $0^\circ+0^\circ$ D: $0^\circ+90^\circ$	(d)	(e)	(f)
$\alpha=90^\circ / \beta=0^\circ$			
B: $90^\circ+90^\circ$ D: $90^\circ+0^\circ$	(g)	(h)	(i)



# 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

## 간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험

구분	실험 중	실험 후
사실적 질문	편광기를 통과한 빛의 밝기는 어떻게 변하나요? : 밝기가 어두워 진다.	간섭무늬가 사라진 빔 광점 D에 45° 편광기를 두었을 때 간섭무늬는 어떻게 변했는 지 기억하나요? : 다시 간섭무늬가 나타났다.
개념적 질문	편광기가 광자의 이동경로를 표시하는 역할을 할 수 있는 이유는 무엇일까요? : 특정한 위치에 놓아둔 편광기의 편광축을 알고 있으면, 편광기를 통과한 광자는 편광기와 동일한 편광축을 가지고 있기 때문에 광자의 경로를 알 수 있다.	분석기의 편광축을 45°로 하면 간섭무늬가 다시 나타나는 이유는 무엇이었죠? : 분석기가 광자의 경로 정보를 지우는 역할을 했기 때문에 다시 파동적인 특징인 간섭무늬가 나타났다.
논쟁적 질문	수직 편광기와 수평 편광기를 통과한 빛이 완벽하게 어두워 보이지 않는 이유는 무엇일까요? : 편광기로 사용한 폴라로이드 편광필름이 편광시키는 정도가 완벽하지 않기 때문에 나타나는 오차이다.	만약 레이저의 밝기를 매우 약하게 하여 광자 1개씩 방출시킨다면 실험 결과는 달라질까요? : 실험 결과는 동일할 것이다.

### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

간단한 재민 간섭계를 이용한 양자 지우개 모델 실험 (학술 논문 1차 검토 의견)

1) 주요 수정 제안 (논문 1차 검토 의견)

고전적 파동 실험과 단일 광자 실험의 구분 명시: 본 실험은 레이저(다수 광자)를 사용하므로 엄밀한 의미의 양자 역학적 단일 광자 간섭 실험은 아닙니다. 실험 결과는 고전 전자기학(맥스웰 방정식)으로도 충분히 설명 가능하며, 포아송 분포를 따르는 결맞음 광의 통계적 특성에 따라 단일 광자의 간섭에 의한 직접적인 결과로 보기 어렵습니다. 따라서 교육 현장에서 학생들이 "이 실험 자체가 양자 역학의 증거"라고 오개념을 갖지 않도록, 이 실험이 '양자 현상을 설명하기 위한 고전적 유비(Analogy) 혹은 모델 실험'임을 수업 지도안이나 논문 본문에서 더욱 강조할 필요가 있습니다.

### 3. 양자 지우개 모델 실험을 어떻게 수업에 연결시킬 것인가?

#### 양자 지우개 “모델” 실험과 관련한 오개념과 교육적 의미

본 실험은 레이저(다수 광자)를 사용하므로 엄밀한 의미의 단일 광자를 활용한 양자 역학적 양자 지우개 실험은 아니며, 고전적 유비(classical analogue)로서의 실험이다. 즉, 양자 중첩 상태 (*quantum superposition state*) 및 경로 정보 유무에 따른 입자-파동 이중성을 학습하기 위한 모델 실험이라고 할 수 있다. 따라서 수업에서 학생들이 오개념을 갖지 않도록 실험 결과가 고전 파동이론으로도 설명 가능하므로 본 실험 결과로 양자 역학의 증거로 삼을 수 없음을 안내할 필요가 있다. 그러나 Schneider & LaPuma(2002)의 선행 연구에서 밝혀졌듯이, 레이저의 세기를 약하게 하여 단일 광자 조건을 만들면 편광기를 이용해서 동일한 실험 결과를 얻을 수 있으므로, 본 실험이 단순한 비유 실험이 아니며, 양자 역학적 해석도 유의미 함을 함께 안내할 수 있다. 현장과학교육 19(6) PP. 627-642

**어떤 이에게는 소음이, 어떤 이에게는 신호가 된다.**

- 에드워드 응 (NASA laboratory's information systems office)

**" One man's noise is another man's signal."**

- Edward Ng (NASA laboratory's information systems office, 1938-2018)