

Single Photon Interference Experiment

변윤성

Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

E-mail: may670@snu.ac.kr

Abstract.

본 실험에서는 Photodiode와 PMT를 사용해 광자의 이중 슬릿 실험을 재현하고, 회절 무늬를 관찰하였다. 본 실험은 전자의 파동-입자 이중성을 확인하기 위해서, 광원이 레이저인 경우와 필터를 씌운 bulb인 경우에서 각각 관측하였다. 민감한 장비 특성상 U-Channel 내부를 닫은 상태에서 관측을 수행해야 했고, 때문에 Blocker의 위치를 사전에 정밀하게 측정한 뒤 실험을 진행하였다. 각 광원에 대하여 이중 슬릿과 단일 슬릿을 통과할 시 나타나는 회절 무늬를 관측하였고, 회귀분석을 통한 검정을 수행한 뒤, 얻어낸 결과를 바탕으로 레이저와 전구의 선폭을 얻어 결과를 비교하였다. 레이저로 얻어낸 결과가 프라운호퍼의 이론과 잘 일치하는지를 확인하였고, bulb로 얻어낸 결과를 통해 광자가 파동-입자 이중성을 가지는지 확인할 수 있었다. 일련의 실험 과정과 가설 검정 과정을 통해 기존의 이론을 직접적으로 관측할 수 있었고, 입자의 파동-입자 이중성이라는 예전에는 일반적이지 않았던 이론이 어떻게 발견되고 받아들여질 수 있었는지에 대해서 이해할 수 있었다.

(Dated: 24 April 2022)

1. Introduction

1.1. Wave - Particle Duality

파동-입자 이중성은 양자역학에서 모든 물질이 파동성과 입자성을 동시에 가진다고 하는 성질이다. 어느 상황에서는 한 가지 이론을, 다른 상황에서는 다른 한 가지를 사용해야 하는 것처럼 보이지만, 때로는 두 가지 상반되는 이론을 모두 사용해야 하는 경우가 있는데, 그것이 바로 파동-입자 이중성이다.[1] 토마스 영의 이중슬릿 실험으로 빛이 파동성을 가진다는 사실이 드러났고, 후에 아인슈타인의 광전효과 실험으로 인해 빛이 전자와 충돌할 때 입자와 같이 행동한다는 사실도 드러났다. 후에 여러 실험을 통해 많은 입자들이 파동성과 입자성을 동시에 가지고 있다는 사실이 관측되었으며, 사람들은 빛이 두 성질을 모두 가지고 있다고 받아들였다. 이 '이중성'의 미스터리는 무엇인지, 어째서 이러한 특성이 나타나는 것인지는 아직 논의 중에 있다. 본 실험은 빛이 이중성을 가진다는 사실을 아는 상태에서 여러 정밀한 관측을 통해 그 사실을 실험적으로 구현해보고자 설계되었다.

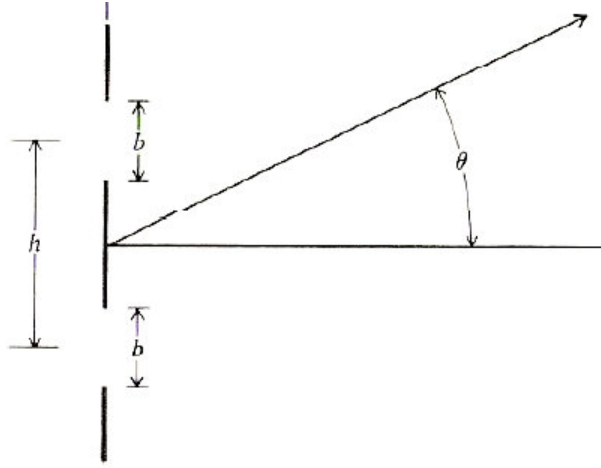


Figure 1: Fraunhofer's diffraction

1.2. Double Slit Diffraction Theory

영의 이중슬릿 실험은 물질의 입자성/파동성을 확인할 수 있는 가장 널리 알려진 실험이다. 이중슬릿 실험에서는 물질을 단일슬릿에 통과시켜 위상을 일치시킨 뒤, 이중슬릿에 통과시킨 뒤 나타나는 무늬를 관찰한다. 만약 물질이 파동이라면 회절이 발생해 간섭 무늬가 관찰되고, 입자라면 그렇지 않을 것이다.

프라운호퍼의 간섭 이론에 따르면, Figure 1와 같이 이중슬릿의 폭이 b , 슬릿끼리의 간격이 h 일 때, 빛의 파수가 k 인 빛을 슬릿에 통과시킨 뒤 측정장치에 도달하는 빛의 세기는 Equation 1과 같다.

$$I = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \gamma, \text{ where } \beta = \frac{1}{2} k b \sin \theta, \gamma = \frac{1}{2} k h \sin \theta \quad (1)$$

광원의 특성은 Equation 1에 의해 나타나는 fringe pattern에 있어서 빛의 세기인 I_0 정도인 것 같아 보이지만, 실제로는 아무리 레이저라고 하더라도 일정한 bandwidth를 가지게 되기 때문에 bandwidth도 fringe pattern에 영향을 주게 된다. 여기서 빛이 나뉠 단색광에 가까운 경우, 즉 bandwidth가 충분히 좁을 경우, Spectral Strength는 Lorentzian Form으로 근사할 수 있고, Equation 2과 같다.

$$g(\lambda) = I \frac{\Gamma^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \Gamma^2}, \quad 2\Gamma = \text{FWHM (Full Width Half Maximum)} \quad (2)$$

위 근사식을 넣어서 보정한 빛의 세기의 최종 식은 Equation 3, 4와 같다.

$$I(\lambda, \theta) = g_0(\lambda) \left(\frac{\sin \beta(\lambda, \theta)}{\beta(\lambda, \theta)} \right)^2 \cos^2 \gamma(\lambda, \theta) \quad (3)$$

$$= \alpha \int_0^\infty I_0 \frac{\Gamma^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \Gamma^2} \cdot \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos^2 \gamma d\lambda \quad (4)$$

위 식에서 α 는 Normalization factor이다. 또한, $\cos^2 \gamma$ 는 이중 슬릿의 효과로 인하여 나타나는 것이기 때문에, 단일 슬릿에 의한 효과는 Equation 5과 같이 나타난다.[2]

$$I = I_0(\lambda) \frac{\sin^2 \beta}{\beta} \quad (5)$$

본 실험을 진행하는 과정에서 얻어지는 슬릿의 여러 pattern은 위 식들을 모함수로 사용하여 회귀분석을 진행하였다.

2. Method & Result

2.1. Photodiode & PMT

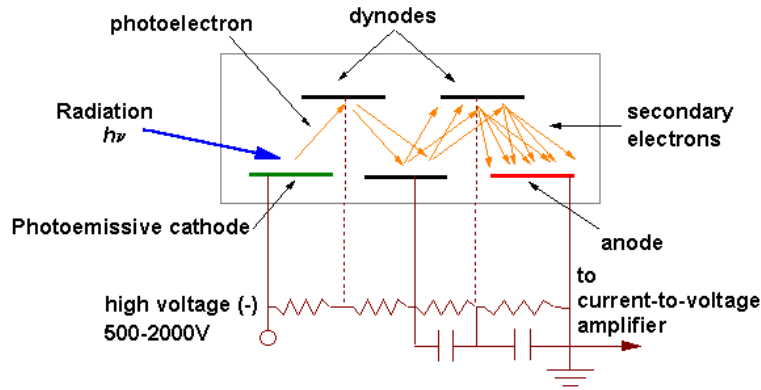


Figure 2: PMT의 내부 구조도.

본 실험에서는 이중 슬릿 실험을 위해서 Photodiode와 Photomultiplier(PMT)를 사용하였다. PMT는 매우 약한 빛의 신호를 검출하는 역할을 하는, 아주 미세한 장비이다. PMT 안에는 Figure 2와 같이 구성된 증폭기가 존재하여, 광전 효과에 의해 아주 적은 양의 빛도 우리가 인식할 수 있을 정도의 전류로 바뀌어서 데이터로 저장된다. 본 실험에서는 Photodiode를 사용하여 광원이 레이저인 경우를 관측하였고, PMT를 사용하여 광원이 single photon 수준인 경우를 관측하였다. 또한, PMT가 매우 예민한 장비인 만큼 PMT 센서로 너무 강한 빛이 새어들어가지 않도록 메뉴얼에 적힌 주의사항을 잘 숙지하여 실험을 진행하였다.

2.2. Experiment I : Interference with Laser

Experiment I에서는, 이중 슬릿 실험 장치를 구성한 뒤, 광원으로 파장이 $670 \pm 20 \text{ nm}$ 인 레이저와 Photodiode를 사용하여 회절 무늬를 관측하였다. 그 실험 설계 방법과 결과는 아래와 같다.

2.2.1. Method

이중 슬릿 실험에서 가장 기초적이면서도 중요한 것은 슬릿 간의 align 상태를 맞추는 것이다. 아주 미세한 어긋남에도 실험 결과가 매우 크게 달라질 수 있기 때문에, 모든 슬릿이 기울어지지 않고 광경로 상에 일렬로 정렬되는 것이 중요하다. 때문에 실험을 수행하기에 앞서, align이 제대로 되었는지 확인하는 과정을 거쳤다. align이 제대로 되었는지

확인하기 위해, 먼저 이중 슬릿의 fringe pattern의 개형에서, 최댓값의 양 옆 peak의 세기 정도를 비교하였고, 두 번째로는 최솟값과 최댓값의 비인 visibility를 확인하였다. 양 옆 peak의 세기가 5% 이내에서 일치하고, visibility가 30을 넘는다면 align이 올바르게 된 것임을 확인할 수 있다.

align을 확인한 뒤 덮개를 덮고 실험을 할 경우 blocker의 위치를 알 수 없기 때문에, 뚜껑을 덮기 전 미리 blocker의 위치를 기록한 후 간단한 계산을 통해 총 7가지의 blocker 위치를 알아낸 상태에서 실험을 진행하였다. blocker의 위치는 SM에 기록해 두었다. 기록된 blocker의 위치를 이용하여 레이저와 bulb, 두 가지 광원에 대하여 슬릿 회절무늬 관측 실험을 진행하였다.

2.2.2. Results

실험 진행에 앞선 align을 확인한 결과는 Table 1과 같다.

Slit	Peak Difference	Visibility (2σ uncertainty)
16	$2.12 \pm 0.026 \%$	$20.99 \pm 0.08 \%$
15	$3.89 \pm 0.034 \%$	$19.11 \pm 0.09 \%$
14	$4.07 \pm 0.018 \%$	$37.17 \pm 0.18 \%$

Table 1: 이중 슬릿들의 Peak difference & Visibility.

확인 결과, 양 옆 peak의 세기는 5% 이내에서 일치하는 것을 확인하였지만, 15번과 16번 슬릿의 경우 visibility가 20 수준에서 더 이상 올라가질 않아, 20으로 기록한 뒤 실험을 진행하였다.

No. 14 Slit

레이저를 이용한 No. 14 슬릿의 단일 슬릿/이중 슬릿 관측 결과는 Figure 3와 같다.

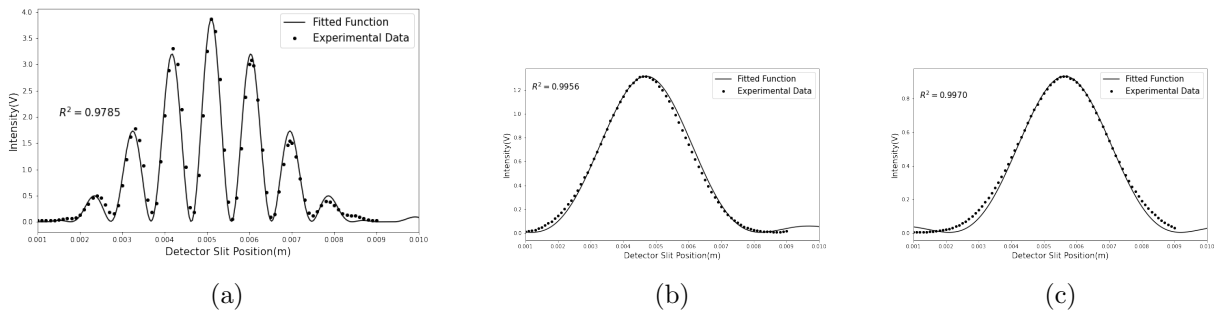


Figure 3: No. 14 슬릿의 관측 결과. (a)는 이중 슬릿의 결과이고, R^2 값은 0.9785이다. (b)와 (c)는 각각 왼쪽, 오른쪽 단일 슬릿의 결과이고, R^2 값은 각각 0.9956, 0.9970이다.

No. 14 Slit - asymmetric case

이중슬릿의 비대칭성에 의한 효과를 알아보기 위해, No. 14 슬릿의 한 쪽 슬릿을 점점 가려가면서 관측을 한 결과는 Figure 4와 같다.

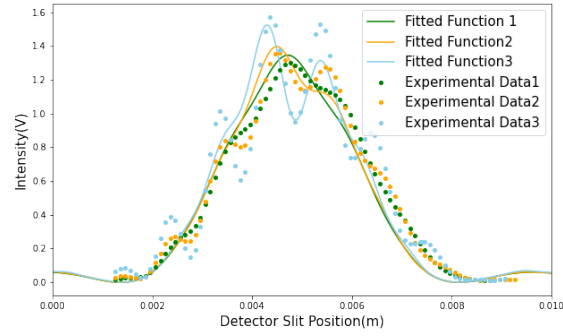
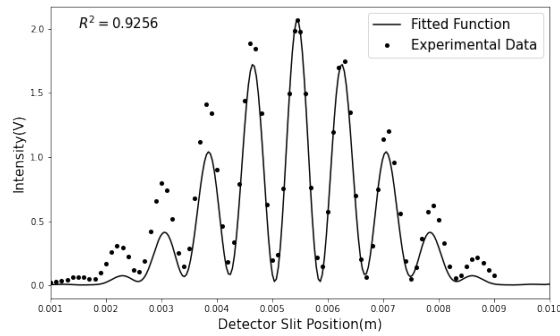


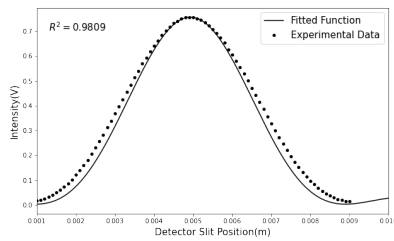
Figure 4: No. 14 슬릿의 asymmetric한 경우의 관측 결과. R^2 값은 1번부터 순서대로 0.9646, 0.9553, 0.9007이다.

No. 15 Slit

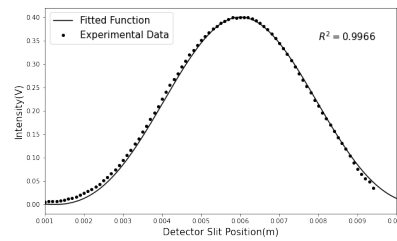
레이저를 이용한 No. 15 슬릿의 단일 슬릿/이중 슬릿 관측 결과는 Figure 5와 같다.



(a)



(b)



(c)

Figure 5: No. 15 슬릿의 관측 결과. (a)는 이중 슬릿의 결과이고, R^2 값은 0.9256이다. (b)와 (c)는 각각 왼쪽, 오른쪽 단일 슬릿의 결과이고, R^2 값은 각각 0.9809, 0.9966이다.

No. 16 Slit

레이저를 이용한 No. 16 슬릿의 단일 슬릿/이중 슬릿 관측 결과는 Figure 6와 같다.

위에서 얻어진 결과를 바탕으로 광원으로 사용한 레이저의 bandwidth를 역산할 수

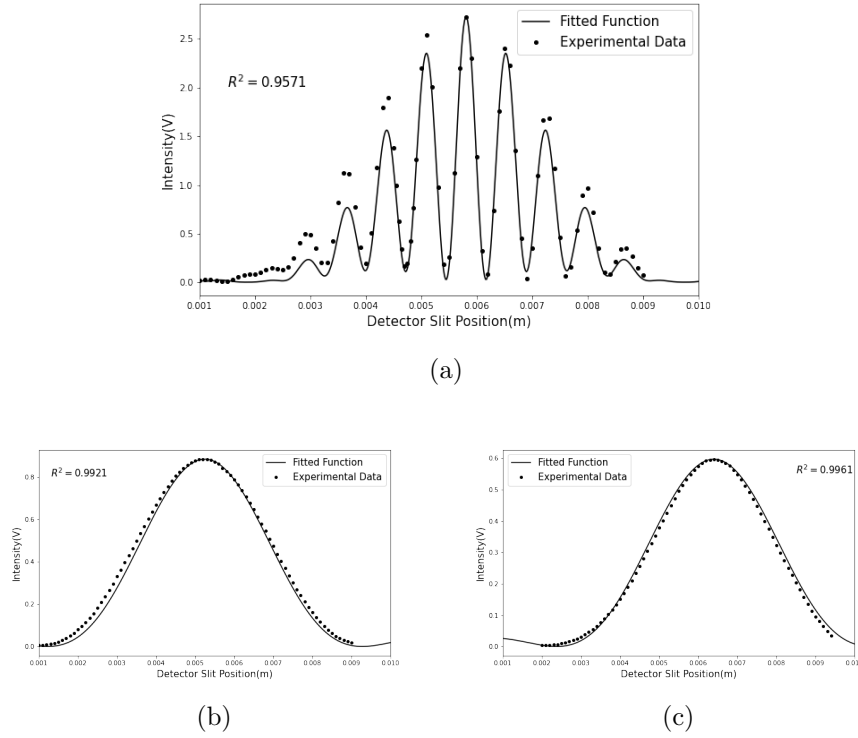


Figure 6: No. 16 슬릿의 관측 결과. (a)는 이중 슬릿의 결과이고, R^2 값은 0.9571이다. (b)와 (c)는 각각 왼쪽, 오른쪽 단일 슬릿의 결과이고, R^2 값은 각각 0.9921, 0.9961이다.

있었다. 레이저의 광원은 일반적인 광원에 비해 bandwidth가 충분히 작은, 나름 단색광에 가까운 빛이기 때문에 Spectral strength를 Lorentzian form으로 근사를 하였다. 또한, 이중 슬릿의 경우 회절에 의한 빛의 퍼짐과 Bandwidth에 의한 빛의 퍼짐의 효과가 다른 방향으로 나타나 단일 슬릿보다 정확하게 Bandwidth에 대한 정보를 얻을 수 있기 때문에, No. 14 슬릿의 양쪽의 단일 슬릿에는 각각 0.125, 이중 슬릿 3종에 대해서는 각각 0.25를 부여하여 계산하였으며, 그 결과는 $666.93 \pm 7.56 \text{ nm}$ (1σ)였다. 이는 알려진 값인 $670 \pm 20 \text{ nm}$ 와 오차범위 내에서 일치하는 Figure 7는 계산 결과를 그림으로 나타낸 것이다.

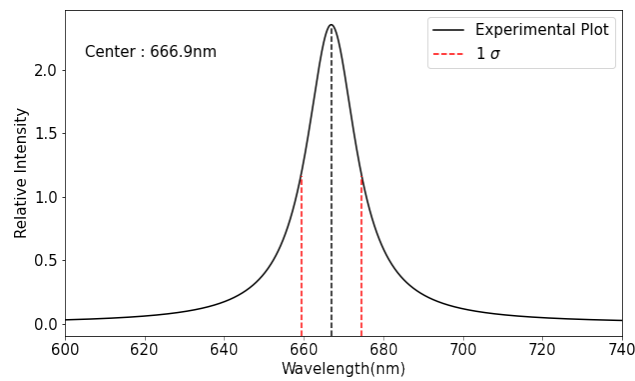


Figure 7: 레이저의 파장 역산 결과.

2.3. Experiment II : Interference with Light Bulb

레이저를 광원으로 하여 Photodiode로 관측하는 실험을 끝낸 뒤, Light bulb를 이용하여 Single Photon Limit 환경에서의 슬릿 회절을 PMT와 PCIT를 이용하여 관측하였다.

2.3.1. PMT Calibration

PMT는 Photodiode와 달리 매우 민감한 장비이기 때문에, 측정 전 구동전압의 범위에 관한 측정이 필요하다. 구동전압의 범위에서 벗어나는 전압을 이용할 경우, 노이즈가 너무 커서 광자와 노이즈를 구분할 수 없게 되거나, 반대로 빛이 있어도 광자를 검출할 수 없게 된다.

구동전압의 상한은 Dark rate fitting을 통해 빛이 없어도 노이즈가 갑자기 커져 카운팅이 급격히 증가하는 구간으로 설정하였고, 하한은 빛이 있는데도 신호가 찍히지 않는 구간으로 설정하였다. 두 경우 모두 카운팅이 지수적으로 증가/감소하기 때문에, semi-log 스케일에서 선형회귀를 통해 구한 X절편을 사용하였다. 회귀 결과는 하한은 441.0 ± 0.70 V, 상한은 545.0 ± 4.5 V로 도출되었으며, Fitting 결과를 그림으로 나타낸 것은 Figure 8와 같다.

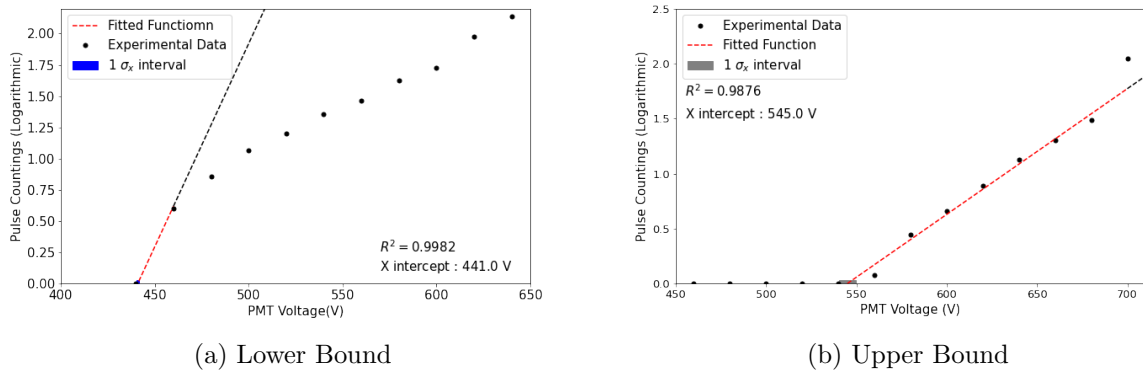


Figure 8: PMT의 상한과 하한의 계산 결과이다. (a)는 하한을 나타낸 것으로 R^2 값은 0.9982였고, (b)는 상한을 나타낸 것으로 R^2 값은 0.9876이다.

또한, PMT의 threshold Voltage를 찾기 위해 Oscilloscope를 사용하였고, 그 값은 0.7 ± 0.05 로 도출되었다. threshold를 찾는 과정의 스크린샷은 SM에 첨부하였다.

2.3.2. Bulb-Detector Calibration

실제 U-channel 내부에서는 Detector Slit과 Blocker의 위치에 따라 광자 검출효율이 달라질 수 있는데, 이는 간섭 효과를 무시하더라도 균일하지 않은 빛이 도달하고 입사 방향이 다르기 때문에 발생한다. 이 효과를 보정하기 위해, Detector Slit과 Blocker의 위치에 따른 출력의 세기를 측정하며 다음과 같은 Calibration 과정을 진행하였다.

우선, 이중 슬릿과 blocker를 제거한 뒤, Detector Slit의 위치에 따른 PMT의 출력을 확인한 결과는 Figure 9과 같았다. fitting 결과 데이터는 2차함수의 form을 따르는 것으로 나타났다. 결과를 사용해 구한 중심의 값은 $3.512 \pm 0.085[\text{mm}]$ (1σ)이었으며, 결정계수

R^2 값은 0.9808인 것으로 나타났다. 중심의 오차는 회귀계수의 오차 공식을 사용하여 계산하였다.[3]

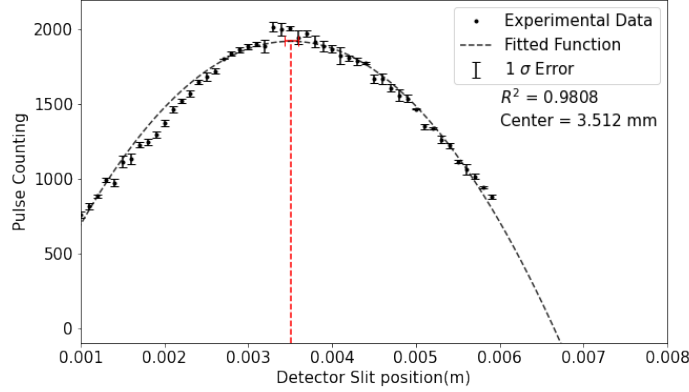


Figure 9: Detector Slit의 위치에 따른 Pulse Count의 그래프. R^2 값은 0.9808이다.

Detector Slit의 위치를 알아낸 후, Blocker의 위치를 알아내기 위해 Blocker의 위치를 바꿔가면서 확인한 결과는 Figure 10와 같다. PMT의 특성상 Blocker를 통과하는 광자의 수가 매우 작고 랜덤성을 가지고 통과하기 때문에 오차가 크게 나왔지만, 2차 함수로 fitting을 하여 중심의 위치를 찾아내었다. 그 결과, Blocker의 중심 위치는 $4.254 \pm 1.176[\text{mm}]$ (1σ)이었으며, 결정계수 R^2 값은 0.6026인 것으로 나타났다.

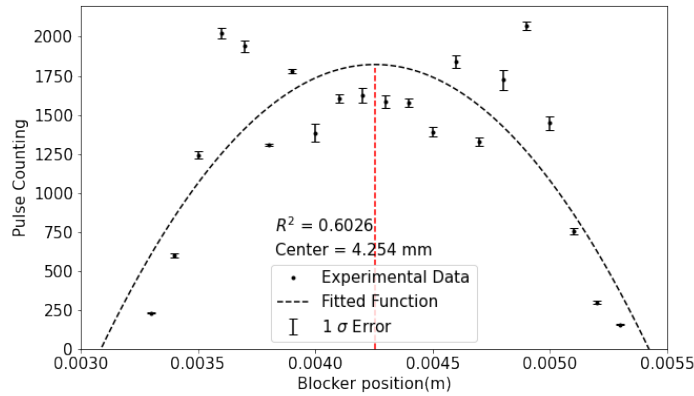


Figure 10: Blocker의 위치에 따른 Pulse Count의 그래프. R^2 값은 0.6026이다.

마지막으로, 앞에서 얻은 Detector Slit과 Blocker의 중심에서의 bulb의 세기에 따른 출력의 세기를 측정하였고, bulb의 세기를 1부터 5까지 변화시키며 측정한 결과는 Figure 11과 같았다. 회귀분석 결과 빛의 세기와 출력의 세기는 2차함수의 관계를 가지는 것으로 나타났으며, R^2 값은 0.8708으로 계산되었다.

2.3.3. Interference Experiment under Single-Photon Limit

위와 같은 실험 준비 과정을 거친 뒤, 이중 슬릿을 사용해 Fringe Pattern을 확인하는

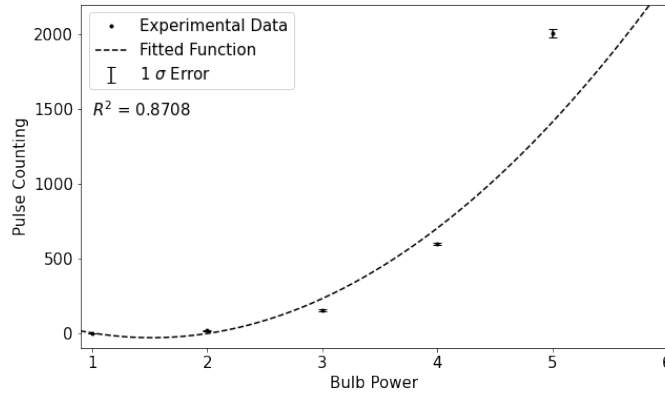
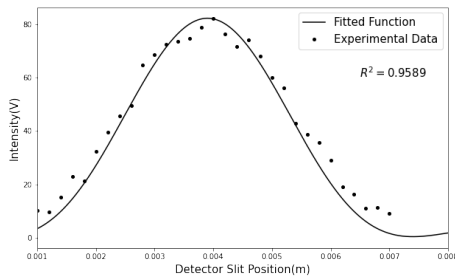


Figure 11: Bulb의 세기에 따른 출력의 세기. R^2 값은 0.8708이다.

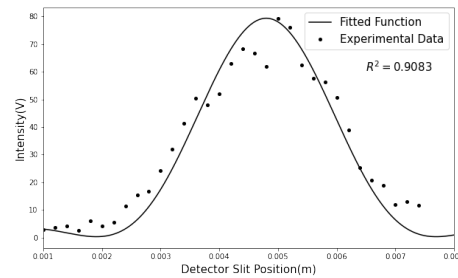
실험을 진행하였다. No. 14 슬릿을 이용하여 단일 슬릿 회절 실험과 빛의 세기를 바꿔가며 이중 슬릿의 회절 무늬를 관찰하는 실험을 진행한 뒤, NO. 15와 No.16을 포함한 3개의 슬릿에 대해서 Detector slit의 위치를 바꿔가면서 이중 슬릿 회절 무늬를 관찰하였다. 그 결과는 아래와 같다.

No. 14 Slit - Single Slit interference

No. 14 슬릿의 왼쪽과 오른쪽, 각각의 경우에 대하여 회절 무늬를 관측한 결과는 Figure 12와 같았다.



(a)



(b)

Figure 12: No. 14의 단일 슬릿 회절 무늬 관찰 결과. (a)는 왼쪽 단일 슬릿의 결과이고, R^2 값은 0.9589로 도출되었다. (b)는 오른쪽 단일 슬릿의 결과이고, R^2 값은 0.9083으로 도출되었다.

No. 14 Slit - Double Slit interference with changing bulb power

No. 14 슬릿에 대해서, 빛의 세기를 바꿔가며 이중 슬릿 회절 무늬를 관측한 결과는 Figure 13와 같았다.

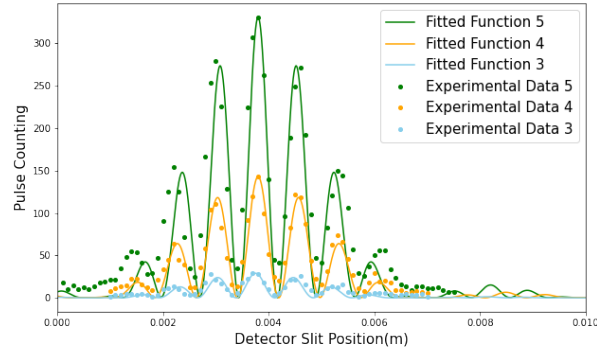


Figure 13: Bulb의 세기에 따른 이중 슬릿 회절 무늬 그래프. R^2 값은 Bulb의 세기 5, 4, 3에 대해 각각 0.7438, 0.8718, 0.8045이다.

Double Slit interference - All slit

모든 종류의 슬릿에 대하여 얻은 이중 슬릿 회절 무늬는 Figure 14와 같았다.

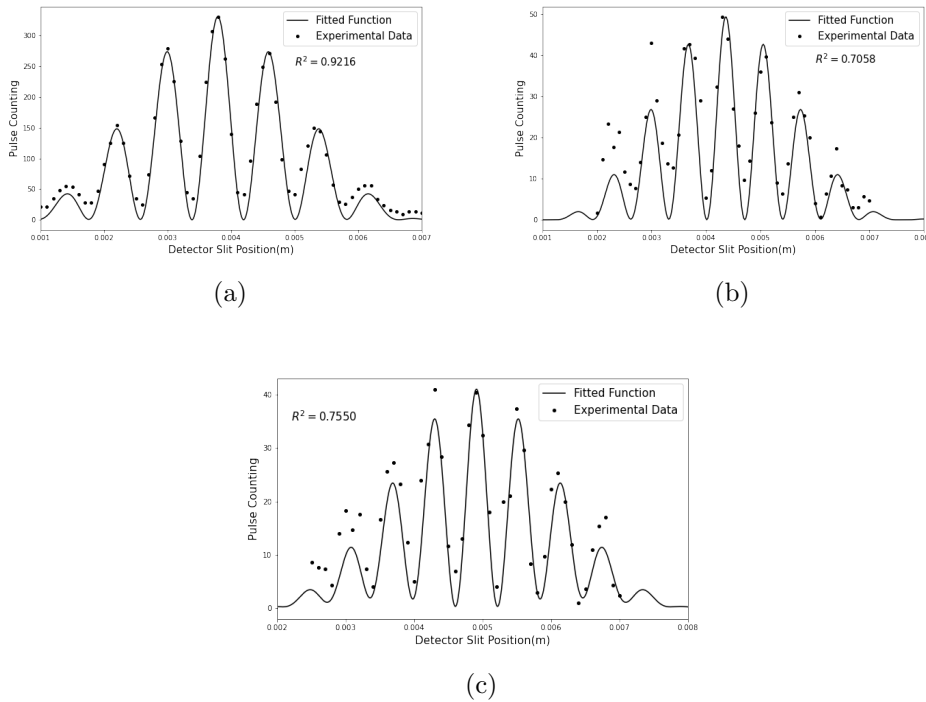


Figure 14: 모든 슬릿의 종류에 대한 이중 슬릿 회절 무늬 관찰 결과. (a)는 No. 14의 관측 결과로, R^2 값은 0.9216이다. (b)는 No. 15의 관측 결과로, R^2 값은 0.7058이다. (c)는 No. 16의 관측 결과로, R^2 값은 0.7550이다.

위에서 얻은 결과를 토대로 Light bulb의 bandwidth 또한 역산이 가능하였고, Figure 15에 그림으로 나타내었다.

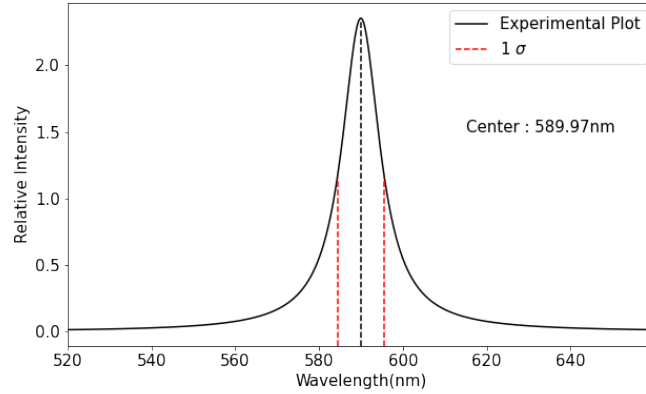


Figure 15: 역산된 Light Bulb의 Bandwidth.

Laser의 경우와 마찬가지로 Lorentzian fitting을 사용하였고, 단일 슬릿과 이중 슬릿 간의 가중 평균을 사용해 역산을 수행한 결과, Light bulb의 bandwidth는 589.97 ± 5.52 [nm] (1σ)로 도출되었다. 이 값은 이론값인 546 ± 10 [nm]와 오차범위 내에서 일치하지 않으며, 실험 과정 중에 오차가 존재했음을 알 수 있었다.

3. Discussion

3.1. Experiment I : Interference with Laser

3.1.1. Are the two slits the same width?

먼저, 레이저를 광원으로 사용한 실험의 데이터를 이용해 fitting 하는 과정에서, 슬릿의 폭을 변수로 입력하여 값을 찾은 결과는 Table 2과 같았다.

Slit	Left		Right	
	Width (mm)	1σ	Width (mm)	1σ
16	0.083	0.0011	0.083	0.0057
15	0.085	0.0035	0.0085	0.0037
14	0.096	0.0056	0.091	0.0043

Table 2: 각 슬릿의 폭의 추정치와 불확실도.

계수오차는 계수 간의 공분산 값들을 이용하여 계산된 계수오차의 1σ 를 사용하였으며, 이를 바탕으로 p-value를 계산하여 Table 3에 나타내었고, 그 값을 이용해 각 슬릿의 양측 슬릿의 폭이 동일한 지 양측 검정을 한 결과, 세 종류의 슬릿 모두 양측의 슬릿의 폭이 동일한 것으로 나타났다.

또한, 광원을 Laser를 사용한 경우 fitting 식은 평면파 근사에 기초한 프라운호퍼의 식을 사용하였는데, 실제로 이 이론과 실험의 결과가 잘 일치하는지를 확인해 보아야 한다. 또한, 광자가 이중슬릿을 혼자서 통과하는지를 확인하고, 자명하지만 이 경우 Multiphoton limit임을 확인하였다. 먼저, 불확정성 원리에 의하면 $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ 가 성립하

Slit	Width Difference (μm)	p-value
16	0.0	0
15	0.0	0
14	5.0	0.37

Table 3: 각 슬릿에서 왼쪽, 오른쪽 슬릿의 폭의 차이와 p-value 값.

는데, 광자의 경우 $\Delta E = h\Delta f = hc\Delta\frac{1}{\lambda} = hc\frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$ 이므로, $\Delta t \geq \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda}$ 가 성립한다. 1m의 Source-Detector 거리를 광자가 지나가는 데에는 3ns정도가 걸리고, 반면 실험을 통해 얻은 $\Delta\lambda = 7.56\text{nm}$, $\lambda = 666.93\text{nm}$ 을 식에 대입하면, $\Delta t \geq 1.96 \times 10^{-4}\text{ns}$ 가 도출된다. 또한, U-channel 안에 몇 개의 광자가 존재하는지를 살펴보자. $\frac{dE}{dt} = nhf$, $n = \frac{P\lambda_0}{hc}$ 이 성립하고, 레이저의 출력은 약 1mW이므로, 대입해서 계산하면 초당 광자 수 $n = 3.37 \times 10^{15}$ 가 도출된다. 역수를 취해서 구할 수 있는 광자 한개당 존재하는 시간은 $\frac{1}{n} = 2.96 \times 10^{-7}\text{ns}$ 이다.

위의 결과에 의해 본 경우는 Multiphoton Limit임을 알 수 있었고, 또한 Fraunhofer의 이론과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. Experiment II : Interference with Light Bulb

Light Bulb의 경우, 관측된 광자 수와 실제 U-channel의 광자 수와의 차이가 존재한다. 때문에, 몇 가지 비율을 곱해주어 실제 광자 수를 계산해주어야 정확한 Power를 계산할 수 있다. 슬릿을 통과한 광자와 관측된 광자의 비율, PMT의 효율(4%), 이중 슬릿 또는 단일 슬릿에 막힌 광자의 비율을 곱해 주면 Bulb가 방출한 광자의 수를 역산할 수 있다.

첫 번째 비율은, phasor technique를 이용하여 Bulb가 만드는 자기장의 크기를 적분하는 방법으로 계산할 수 있다. 실험 결과 $0.09I_0^2\text{mm}$ 에서 초당 331개의 photon이 관측되었고, 적분 결과는 $3.37I_0^2\text{mm}$ 이므로, 총 12394개의 photon이 관측된다고 할 수 있다. PMT의 효율은 4%이고, 세 번째와 네 번째의 비율은 각각 약 8000, 110이므로, 모두 곱해서 bulb가 방출한 광자 수를 계산해보면 bulb가 방출하는 광자의 수는 2.72×10^{11} 개임을 알 수 있다. $\frac{dE}{dt} = nhf = nh\frac{c}{\lambda}$ 이므로, bulb의 Power는 $9.18 \times 10^{-8}\text{W}$ 로 도출된다.

광원이 Light Bulb인 경우, Laser일 경우와는 달리 광원의 세기가 매우 약하다. 하지만, Laser의 경우와 동일하게 이중슬릿 실험에서 각 슬릿을 지나가는 빛의 세기가 같다는 가정을 하고 실험을 진행하였기 때문에, 빛의 세기가 매우 약하여 광자 단위로 빛이 검출되는 Light Bulb의 경우에도 양측에 들어오는 빛의 세기가 같은지 검정하는 과정을 거쳐야 한다. Light Bulb에서의 단일 슬릿 실험의 결과에 의하면, No. 14 슬릿의 왼쪽 슬릿에 들어오는 빛의 central maximum은 초당 $80 \pm 0.8[1\sigma]$ 개이고, 오른쪽 슬릿은 $81 \pm 0.3[1\sigma]$ 개이다. 양쪽의 Pulse counting의 차이인 1.0 ± 0.9 의 p-value는 0.25이고, 이를 통해 유의수준 5% 이내에서 양측의 빛의 세기가 일치한다는 결론을 내릴 수 있다.

또한, Bulb의 경우 single-photon limit의 환경이 맞는지를 검증하기 위해, Laser의 경우와 마찬가지로 불확정성 원리를 사용하여 Δt 의 값을 계산해 보았다. Bulb의 경우, $\Delta\lambda = 5.52\text{nm}$, $\lambda = 589.97\text{nm}$ 이므로, 이를 Laser에서 했던 것과 동일한 계산을 수행해 보면, 다음과 같은 결과가 도출된다.

$$\Delta t \geq 2.10 \times 10^{-4}, \frac{1}{n} = 3.67 \times 10^{-3} \quad (6)$$

1개의 광자가 존재하는 시간인 $\frac{1}{n}$ 이 Δt 보다 크기 때문에, Light bulb를 광원으로 사용하는 실험의 경우 Single-photon limit의 조건이 갖춰졌다고 말할 수 있고, 이는 광자들 간의 상호작용 없이 파도 현상의 실험결과를 나타낸다고 말할 수 있다.

3.3. Error Analysis

본 실험은 상당히 미세한 수준의 정밀도를 요구하는 실험이기 때문에, 실험실의 환경이 약간만 잘못되어도 큰 오차가 발생할 수 있다. 본 실험을 수행하기 전에 발생할 수 있는 중대한 오차 원인들은 사전에 제거를 한 뒤 실험을 진행하였지만, 그럼에도 불구하고 발생할 수 있는 여러 오차의 종류에는 다음과 같은 것들이 존재한다.

첫째로, 외부 광원에 의한 Pulse counting의 오차이다. PMT는 아주 민감한 장비이기 때문에, 아주 미세한 빛이 스며들더라도 검출하는 광자의 수가 크게 달라질 수 있다. 실험실에 암막 커튼을 설치하고, U-channel 위에도 검정색 옷을 올려놓아 빛을 차단하려고 최대한 노력했지만, 실험을 수행하는 시간이 낮이라는 점과 다른 조의 실험으로 인해 불이 켜져있는 실험실 특성상 카운팅하는 광자의 수에 random error가 발생할 수 있다.

둘째로, 정밀하지 못한 Align에 의해 발생한 오차가 존재한다. 실험을 수행하기 전, align을 맞추는 과정을 거치고 확인하는 과정에서 Peak difference는 5% 이내에서 일치함을 확인하였지만, Visibility는 No. 15, 16의 슬릿의 경우 30을 넘지 못하고, 약 20정도에 그친 것을 확인할 수 있었다. 이는 align을 최대한 일정하게 맞추고자 노력했음에도 불구하고 정밀도의 한계로 인해 발생한 틀어짐으로, Visibility가 충분히 높지 못한 탓에 실험 결과에 오차가 발생했음을 추측해 볼 수 있다.

셋째로, 광원의 선폭이 충분히 좁을 때, Lorentzian으로 근사하여 선폭을 계산해내었는데, 실제 광원의 선폭은 정확한 Lorentzian이 아니기 때문에 발생하는 오차도 존재할 수 있다.

마지막으로, 광원이 Light bulb인 경우 Blocker의 중심을 찾아내기 위해 Blocker를 옮겨가면서 Pulse counting을 세는 실험을 수행하였는데, Figure 10를 보면, 결과가 상당히 큰 random성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 Blocker에 의해 가려지는 효과가 관측되는 광자의 수에 비해 크기 때문에 발생한 것으로 보여지며, 충분히 긴 time interval를 가지고 관측을 수행한다면, 오차가 줄어들 것으로 추측된다. 다만, 실험 결과의 그래프 개형이 Blocker의 중심을 기준으로 좌우 대칭인 것을 보아, 중심에서 0.8mm가량 떨어진 지점에서 광자의 카운팅이 많아지는 것에 특별한 이유가 있지 않을까 생각해 보아야 할 것이다.

4. Conclusion

본 실험에서는, Laser과 Light bulb, 두 가지의 광원을 사용해 Multi-photon limit과 Single-photon limit 각각에서 이중슬릿 회절무늬를 관측하였다. 실험 결과, 광자가 서로 간의 상호작용을 하지 않는 sigle-photon limit의 환경에서도 광자가 만드는 무늬는 이중 슬릿의 회절간섭 무늬를 나타내는 것으로 확인되었으며, 이로 인해 광자가 가지고 있는 파동성이라는 특성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] Albert Einstein, Leopold Infeld (1938). The Evolution of Physics: The Growth of Ideas from Early Concepts to Relativity and Quanta. Cambridge University Press.
- [2] K. Sol, *Lock-in Detection and Hall Effect Manual*, 2021.
- [3] K. Sol, *Error Analysis for Experimental Physicists*, 2021.