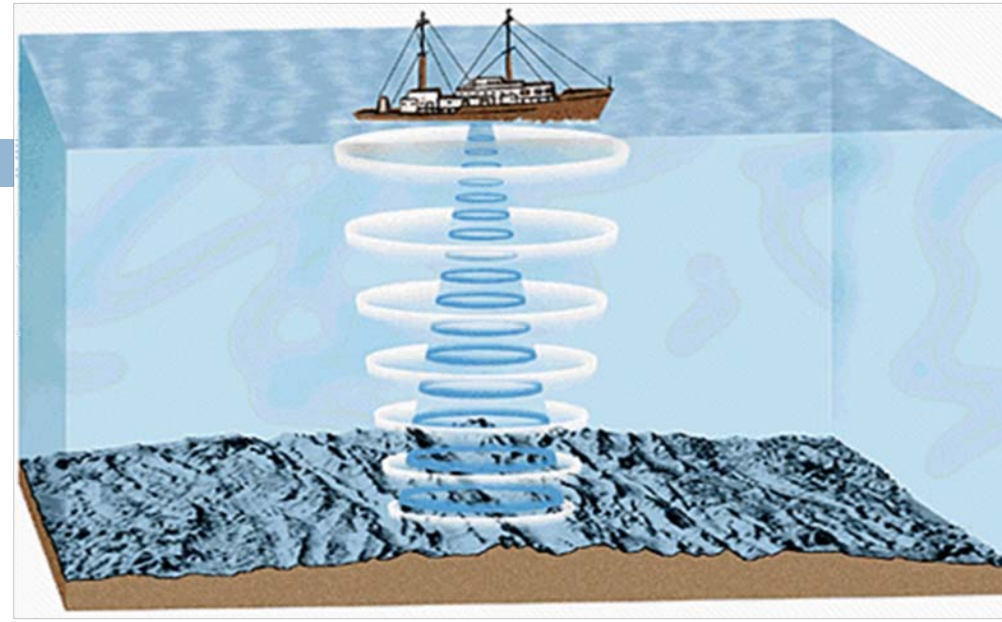
4.이중슬릿 실험

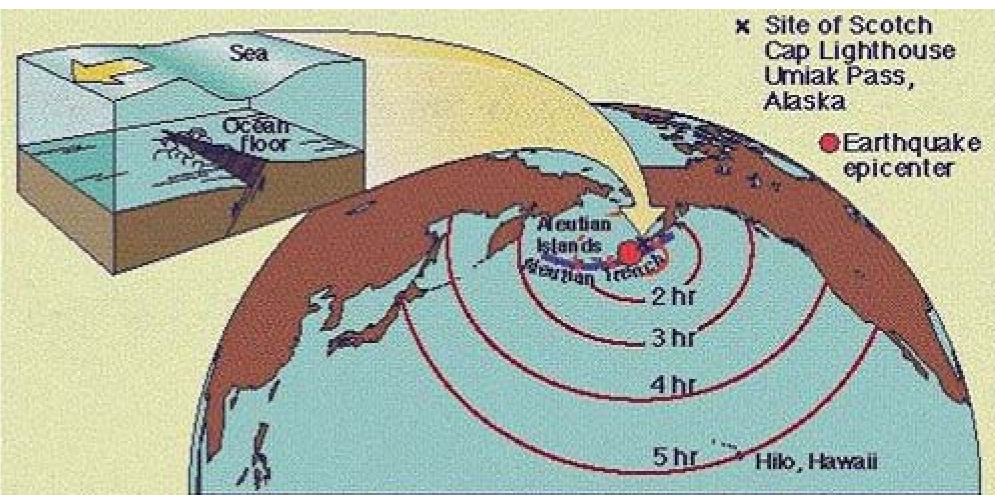
화공과 김영훈 교수

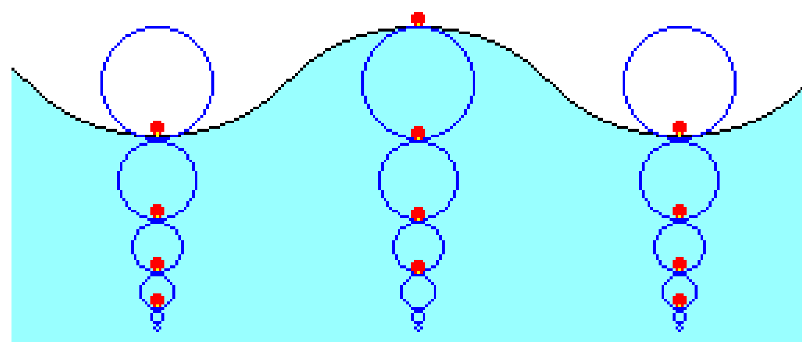
korea1@kw.ac.kr

파(wave)

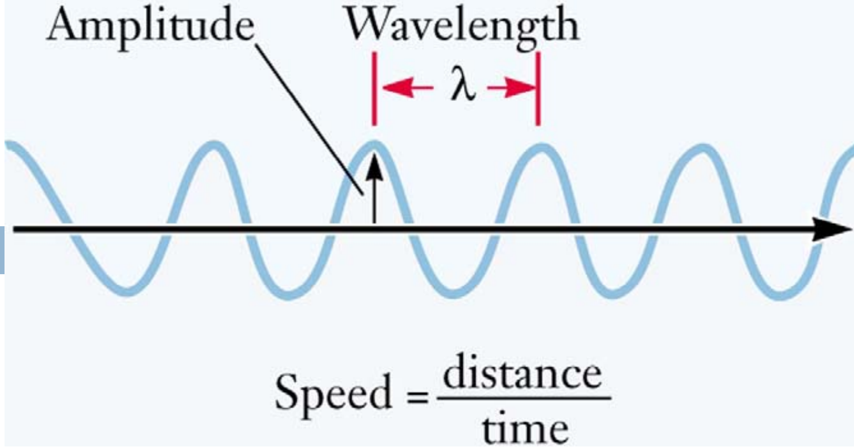


- 파동
  - 지진, 물결, 음파
- 빛은 파동인가?

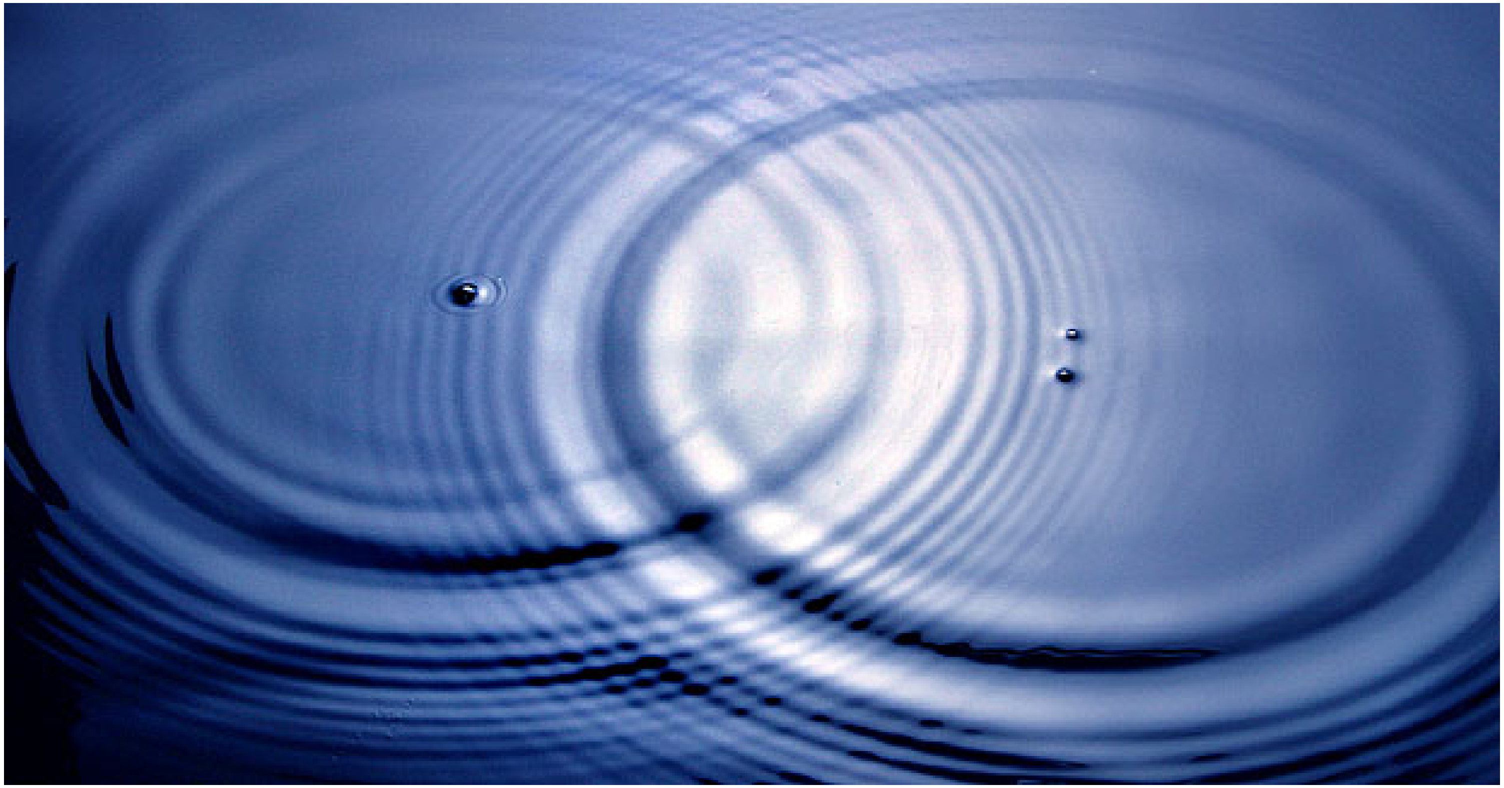




파의 특징

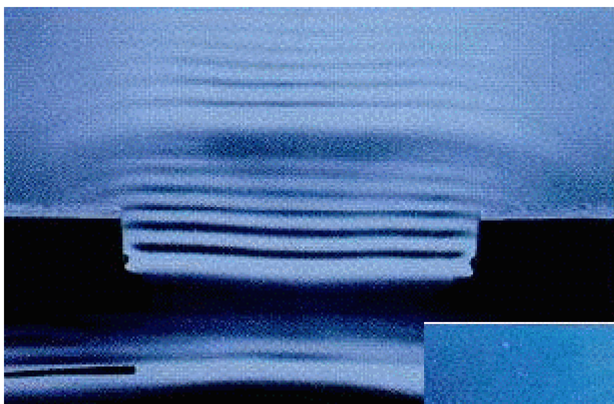


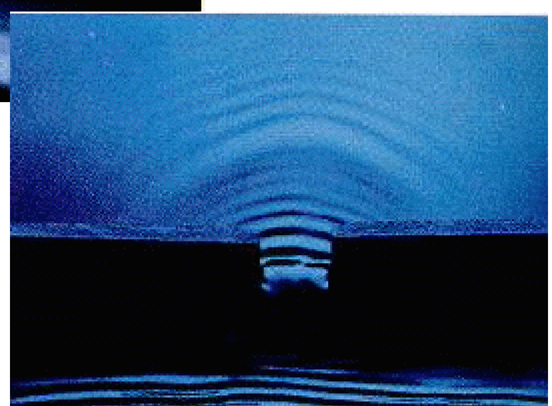
- 파동의 특성
  - 중첩, 회절과 간섭(보강, 상쇄), 반사

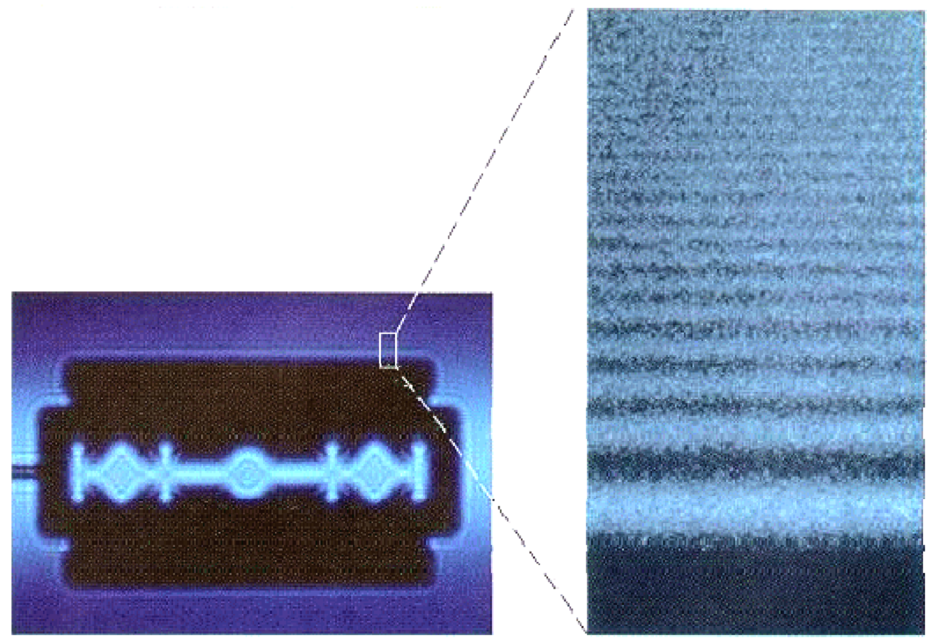


파동의 회절

- 영상 이미지
- 방파제 수면파
- 좁은 통로 통과시

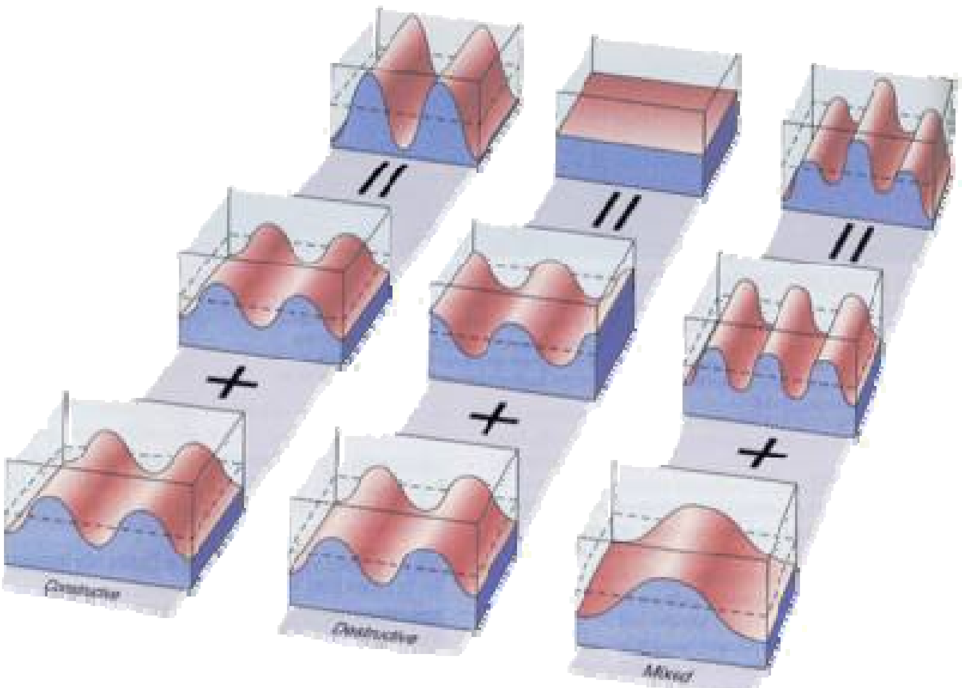


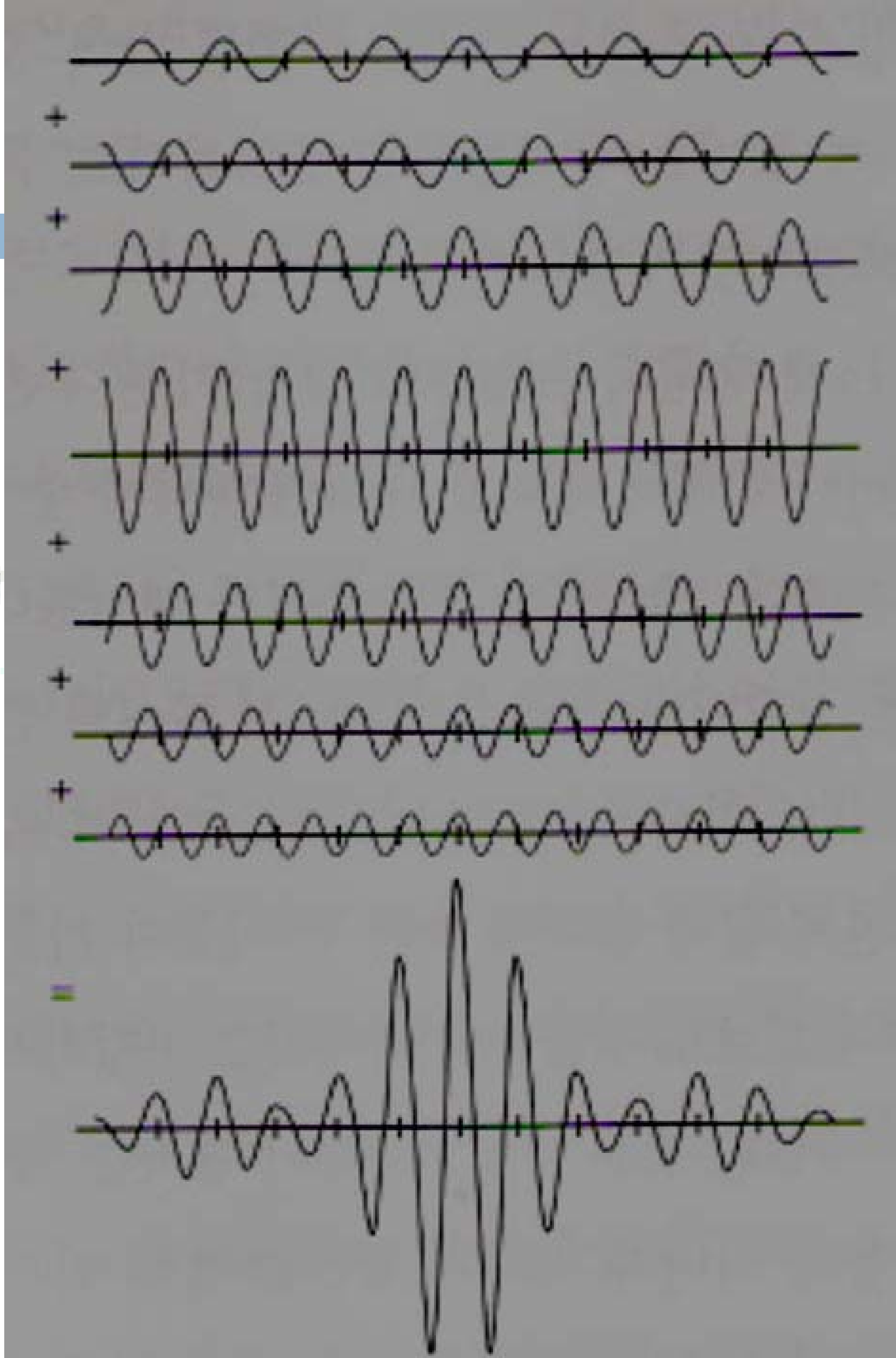




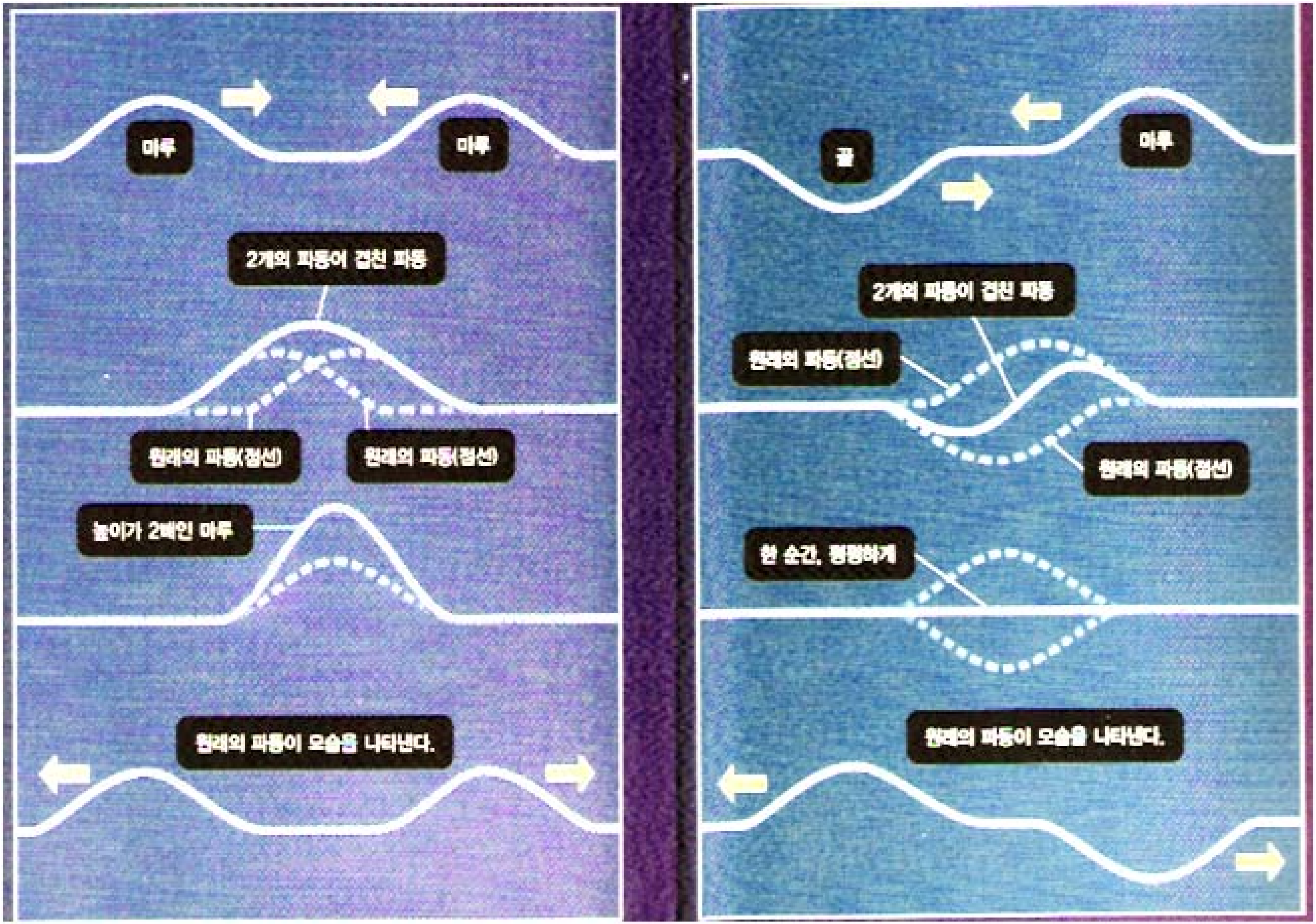
파의 중첩

- Wave superposition





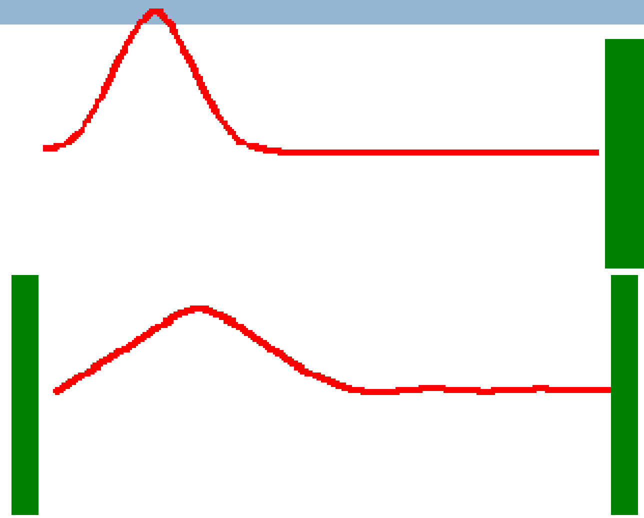
두개의 파가 부딪치면

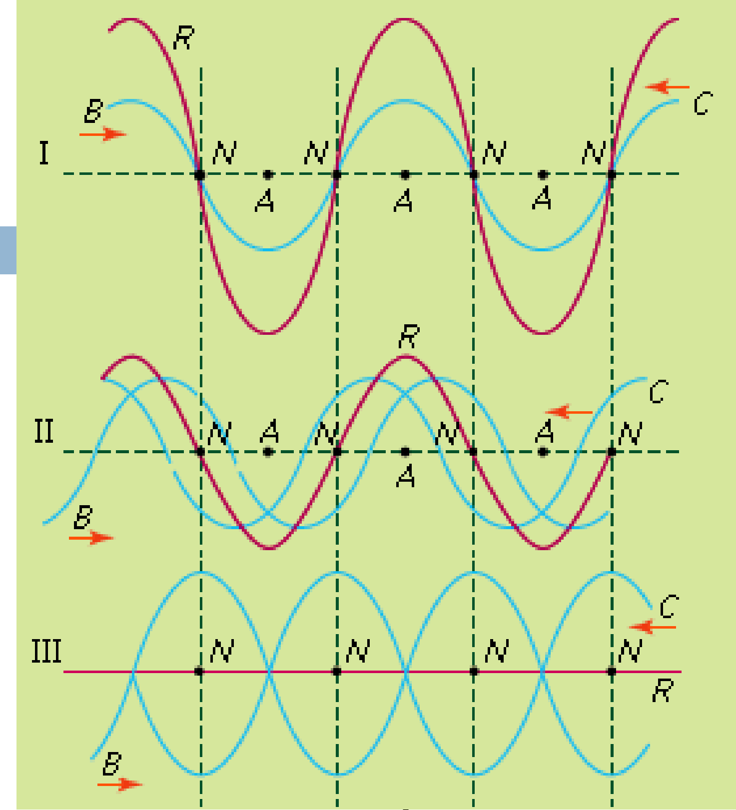


마루
마루
2개의 파동이 겹친 파동
원래의 파동(점선)
원래의 파동(점선)
높이가 2배인 마루
원래의 파동이 모습을 나타낸다.
골
마루
2개의 파동이 겹친 파동
원래의 파동(점선)
원래의 파동(점선)
한 순간, 평평하게
원래의 파동이 모습을 나타낸다.

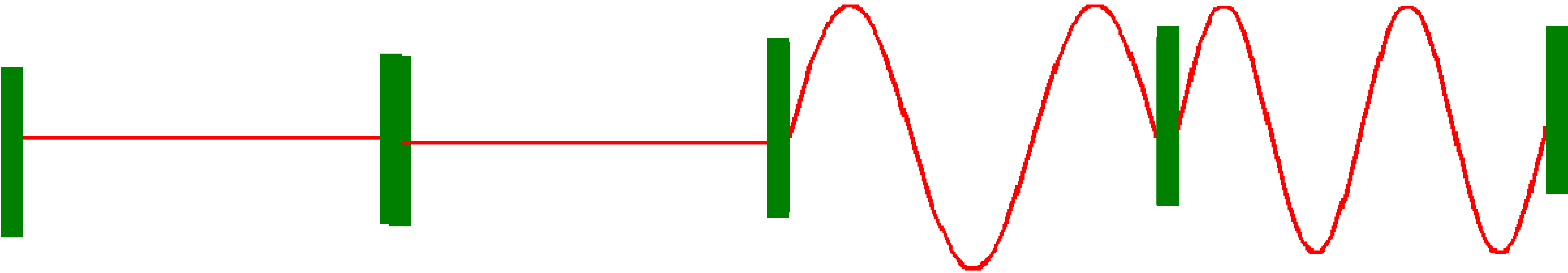
반사파와 정상파

- 반사파
  - 1개파





- 정상파(standing wave=stationary wave)
  - 동일 A와 λ를 지니며 서로 반대방향으로 진행하는 2개의 파동 조합 → 보강/소멸 간섭의 결과



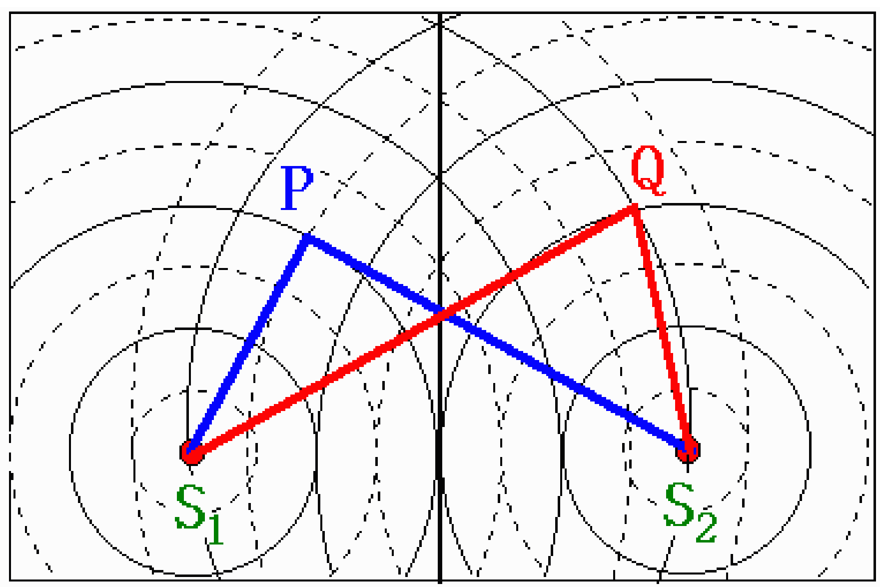
파동의 보강과 상쇄

- 보강, 상쇄 간섭
  - 보강: 두 파원에서의 경로차가 짝수배일 때

$$|S_1P - S_2P| = \frac{\lambda}{2}(2m) \quad (m = 0, 1, 2, 3, \cdots)$$

  - 상쇄: 두 파원에서의 경로차가 홀수배일 때

$$|S_1Q - S_2Q| = \frac{\lambda}{2}(2m+1) \quad (m = 0, 1, 2, 3, \cdots)$$



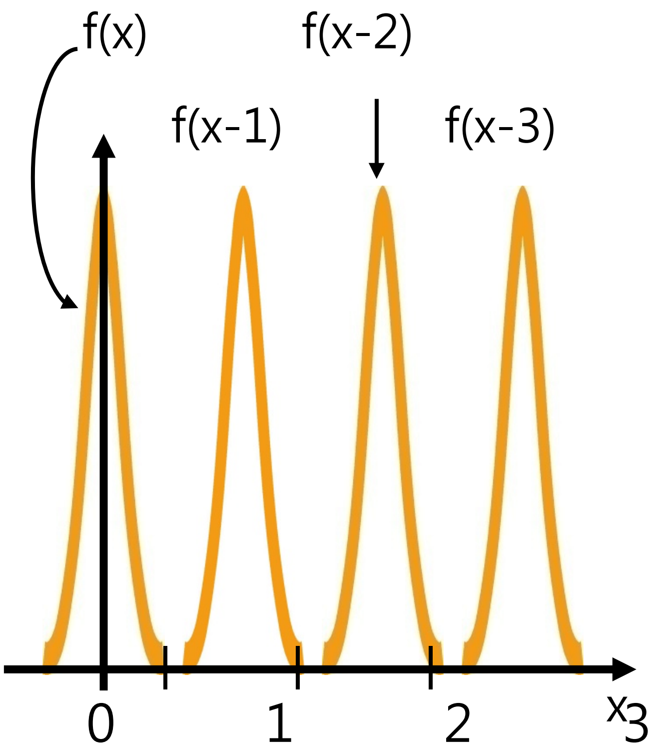
파동방정식

- Wave equation
  - Forward [f(x-vt)] and backward [f(x+vt)] propagating waves
  - 1차원 파동방정식(v=광속)

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{1}{\mathrm{v}^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$$

  - 단순해

$$f(x,t) = f(x \pm \mathrm{v}t)$$



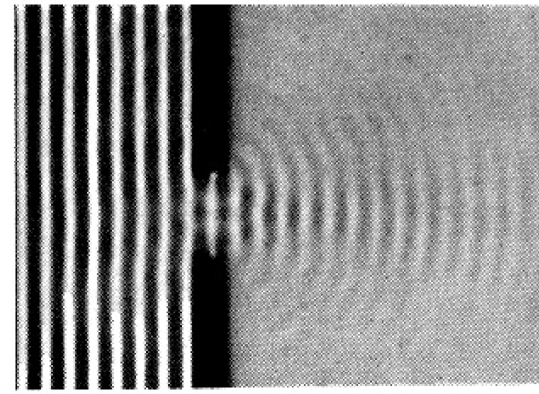
파동방정식 해 증명

- Let f(x±vt)=f(u)

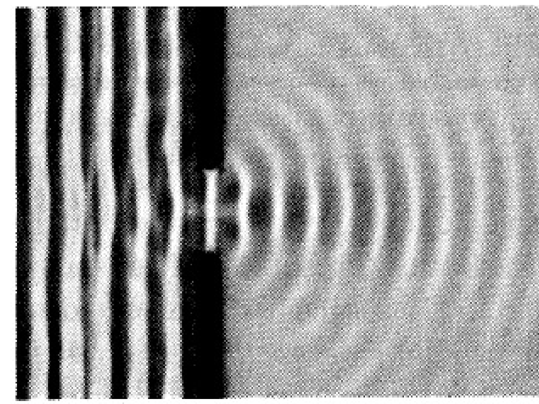
- → $$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{1}{\text{v}^2}\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} - \frac{1}{\text{v}^2}\left\{\text{v}^2\frac{\partial^2 f}{\partial u^2}\right\} = 0$$

단일슬릿의 회절

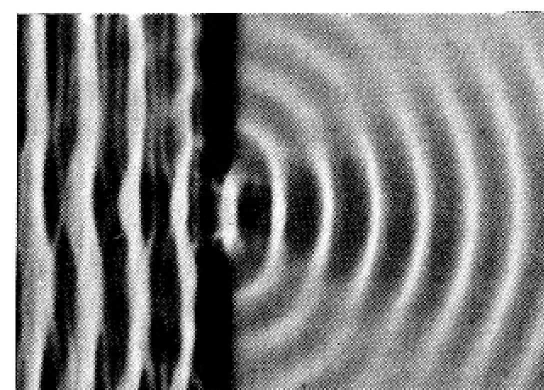
- 단일슬릿을 통과하는 수면파와 대기중의 전자기 복사 (radiation)
  - 회절(diffraction) 현상 발생
  - 무간섭(non-interference)
  - 회절 세기=f(슬릿과 파장 크기)



$\lambda =$ slit size (a)



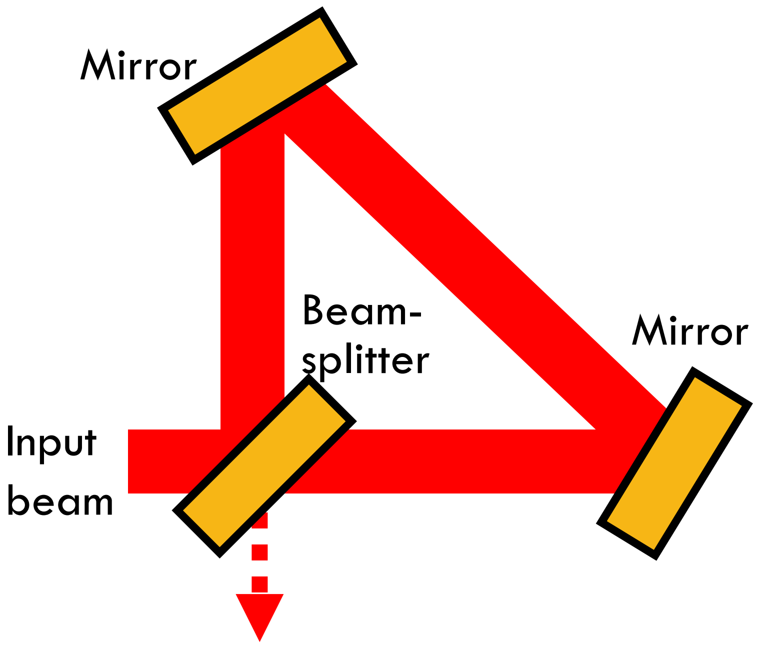
$\lambda <$ slit size (b)

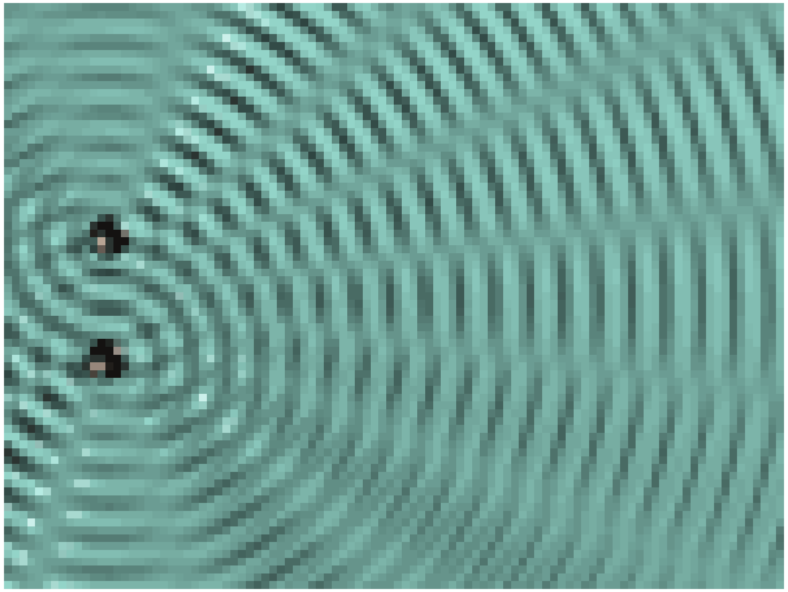


$\lambda \approx$ slit size

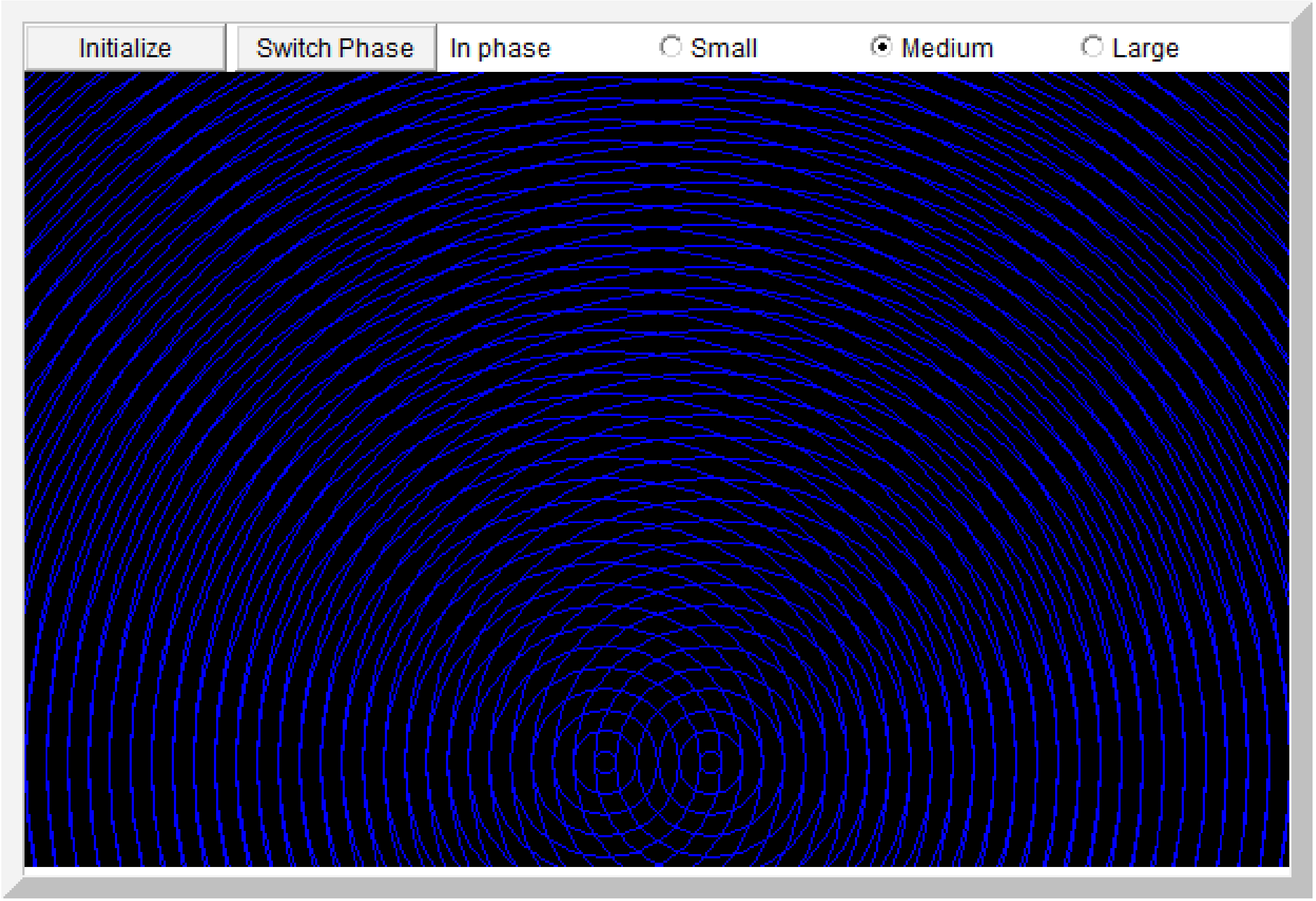
이중광원에 의한 간섭

- Beam-splitter로 광 분배
  - 광위치에 따른 회절+간섭





Two source interference pattern

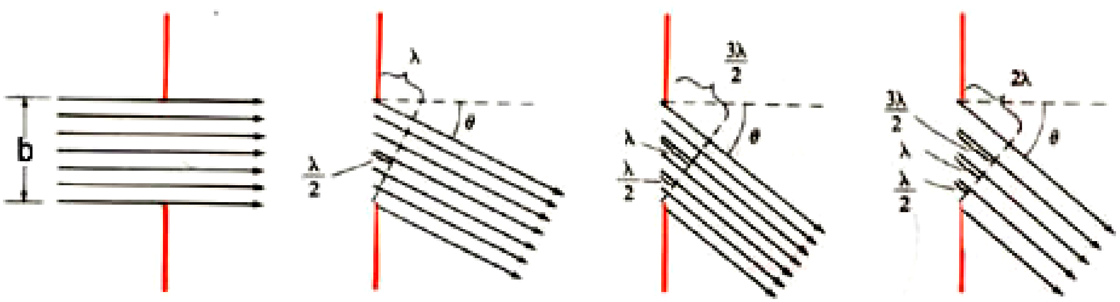


뉴턴(입자성) vs. 호이겐스(파동성)

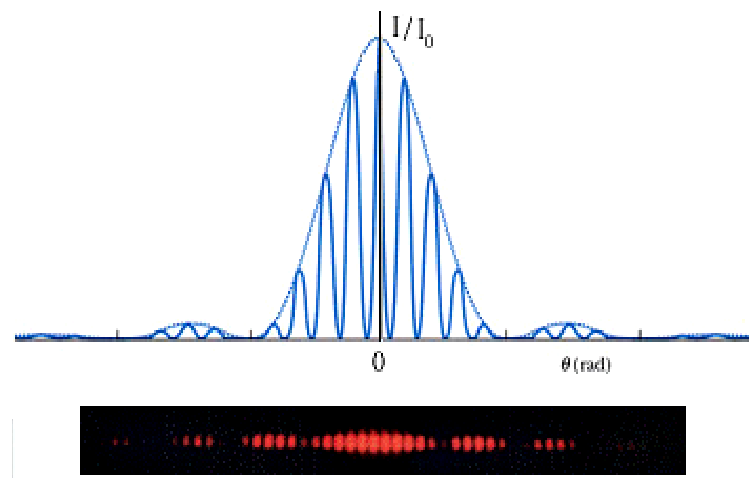
- Christaan Huygens
  - 뉴턴, 입자성 문제
    - 그림자 형성 이유 설명 가능
    - 수면으로 굴절시 속도 증가, 두 빛 줄기 충돌시 문제
  - 빛을 수면파와 같은 파동으로 간주
- 단일슬릿에 의한 회절 실험
  - 굴절현상 해석

호이겐스 단일슬릿 실험

- 단일슬릿 실험시 조사각에 따른 줄무늬 발생
  - bsinθ=λ → 극소점, 어두움 (bsinθ=nλ)
  - bsinθ=3λ/2 → 극대점, 밝음 [bsinθ=(n+1)λ/2]



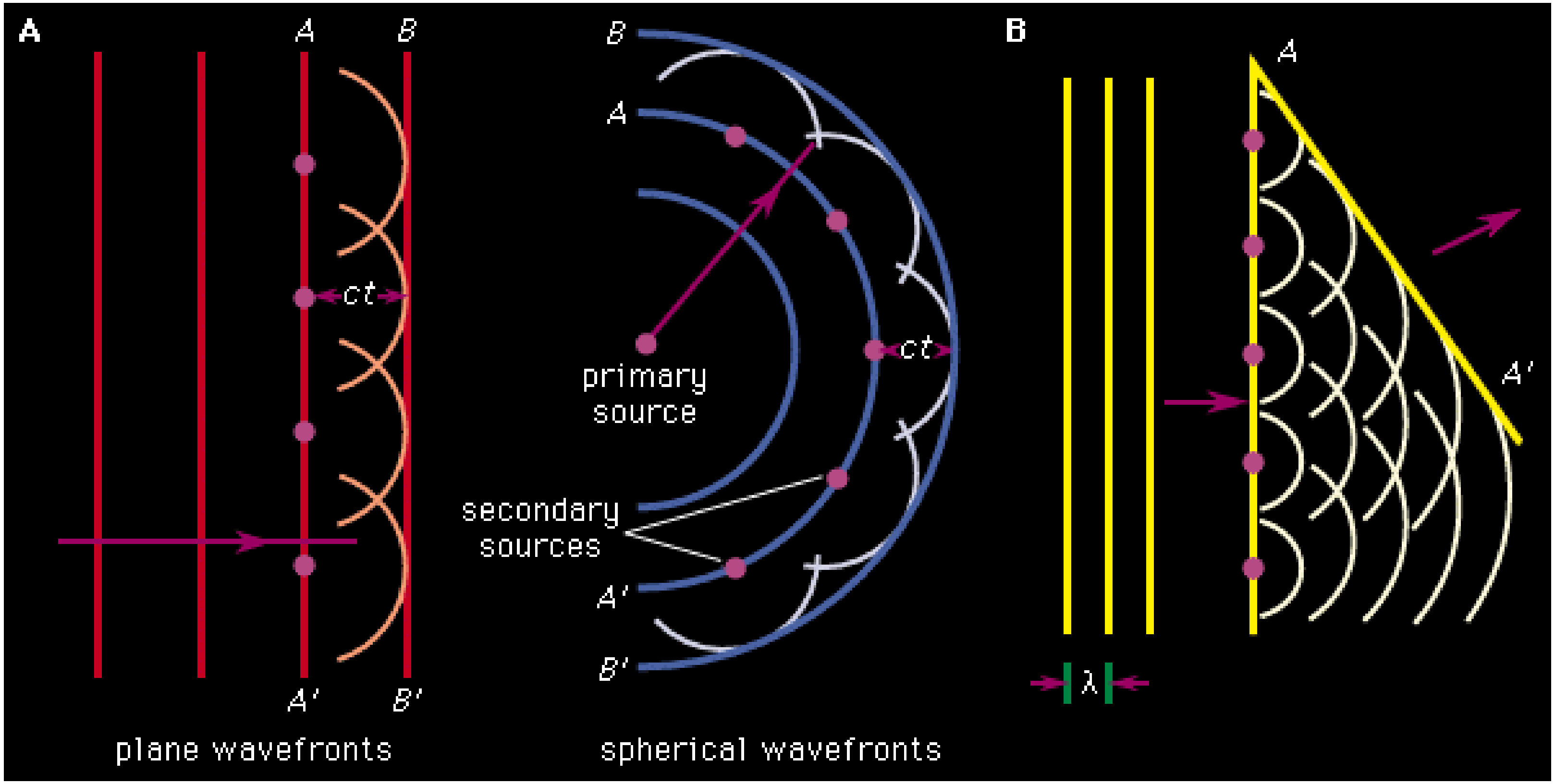
(a) $\theta = 0$ 밝음 (b) $\sin\theta = \frac{\lambda}{b}$ 어두움 (c) $\sin\theta = \frac{3\lambda}{2b}$ 밝음 (d) $\sin\theta = \frac{2\lambda}{b}$ 어두움



Double Slit Pattern (b=0.08mm, d=0.50mm)

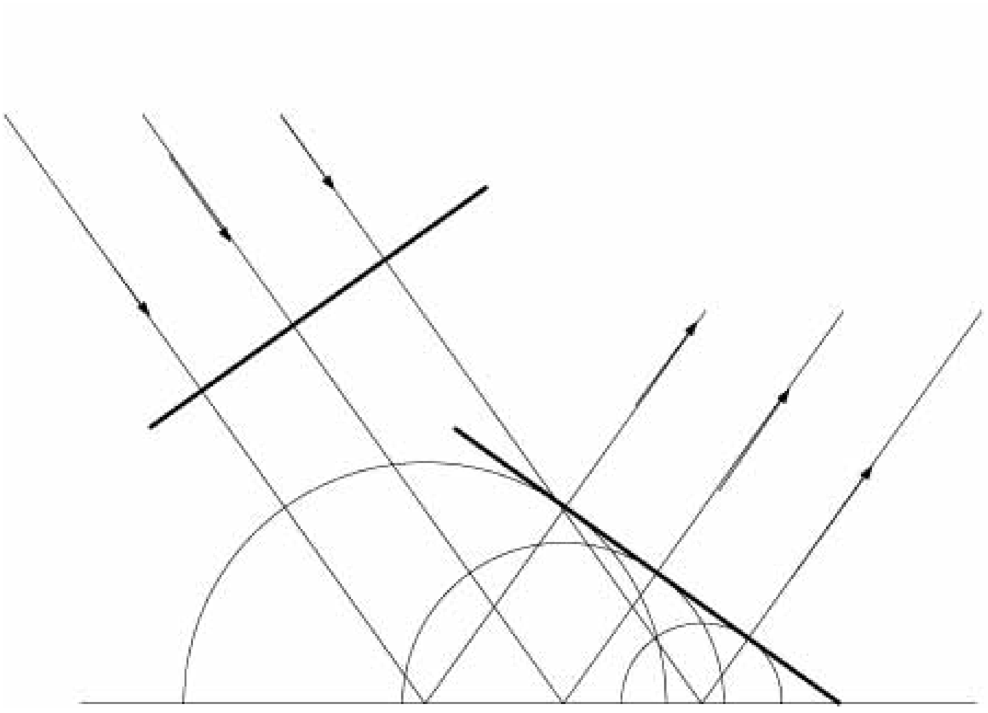
호이겐스의 원리

- "파면상의 모든 점"을 "파원"으로 간주
  - 파원에서 발생된 파의 접선=파면

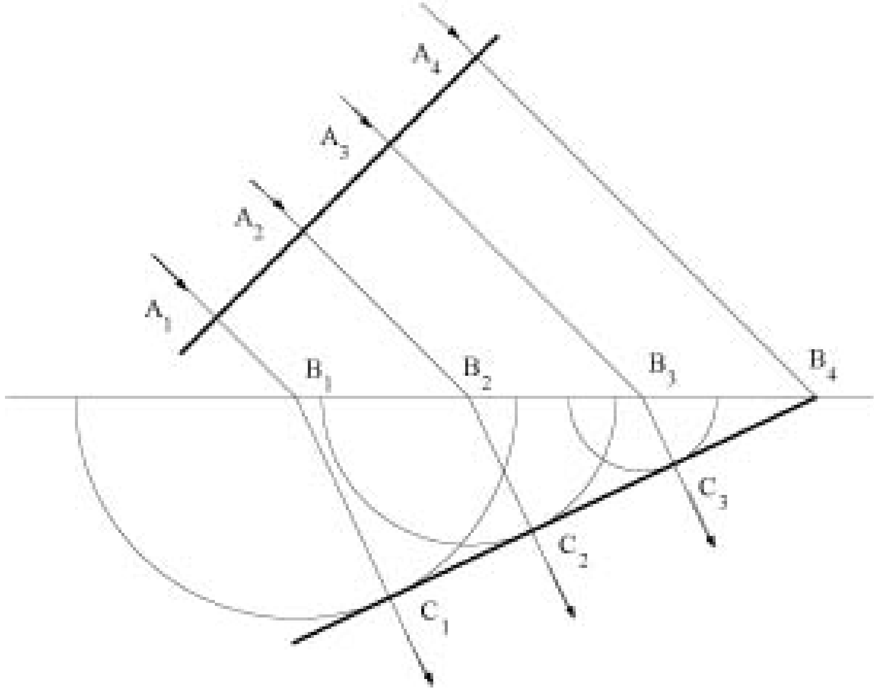


호이겐스파 작도법(반사, 굴절)

- 반사작도

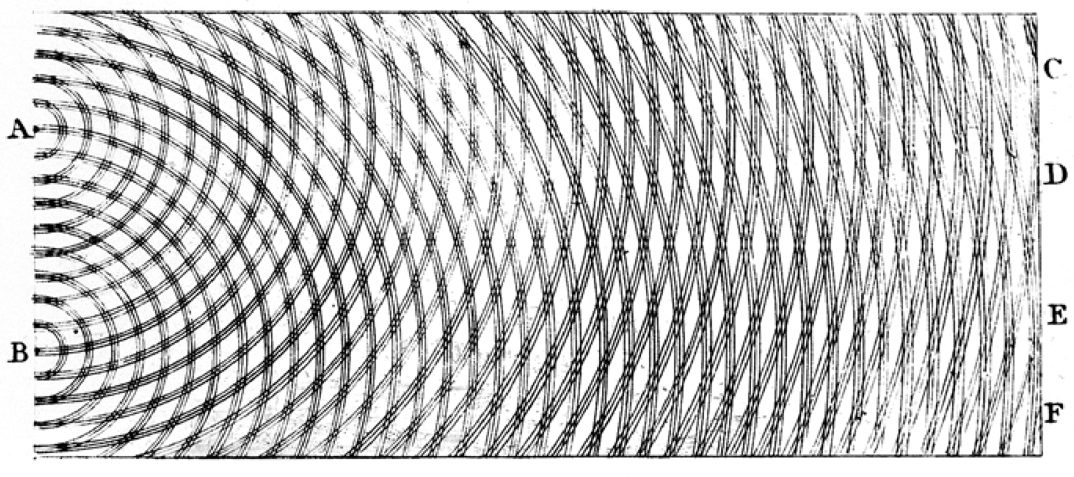


굴절작도



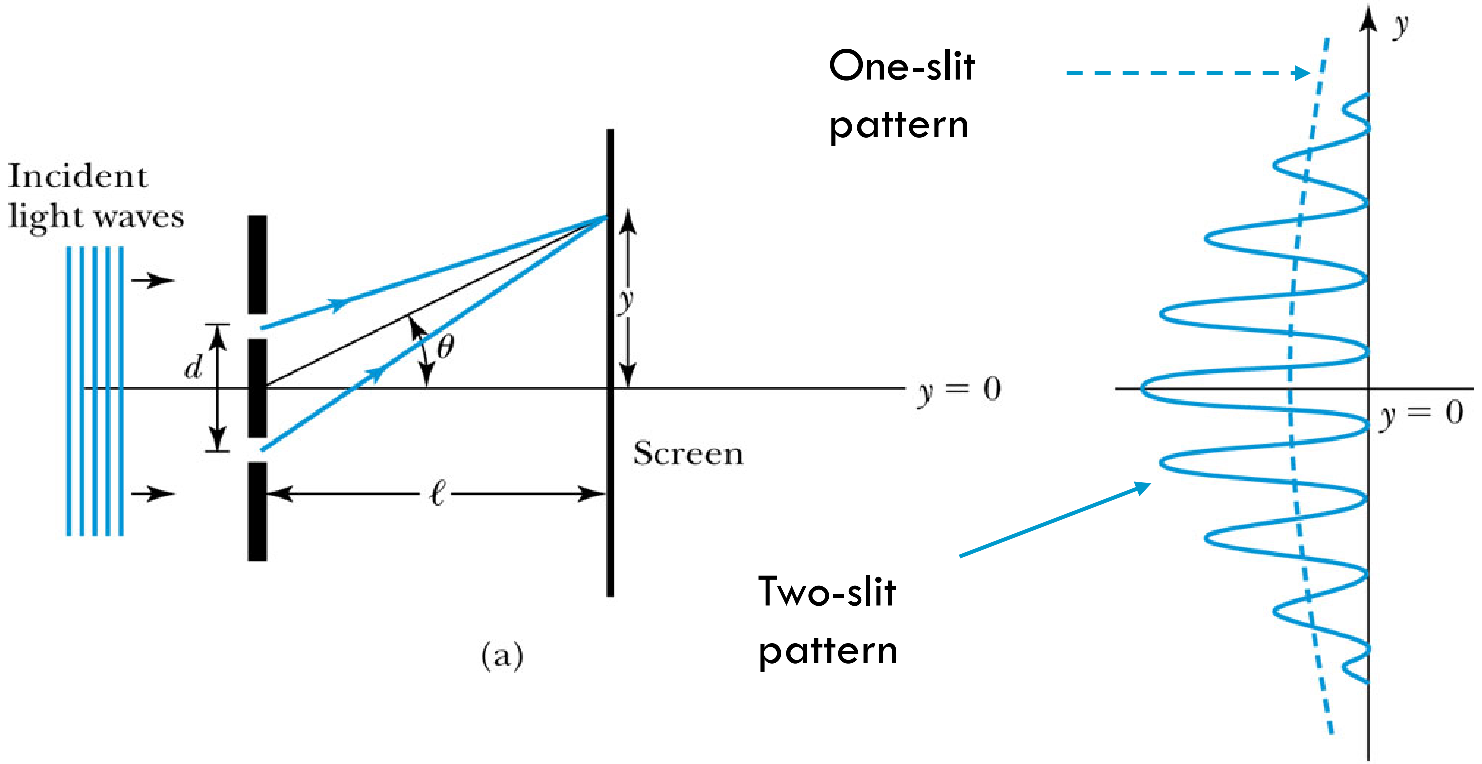
Young의 출현

- Thomas Young
  - 1807년, 이중슬릿 실험
  - 빛의 파동성 확인
  - 맥스웰에 의한 "빛=전자기파=파동" 확립
  - 1990년 흑체복사("빛=입자") 문제 대두전까지 "빛=파동" 정설화

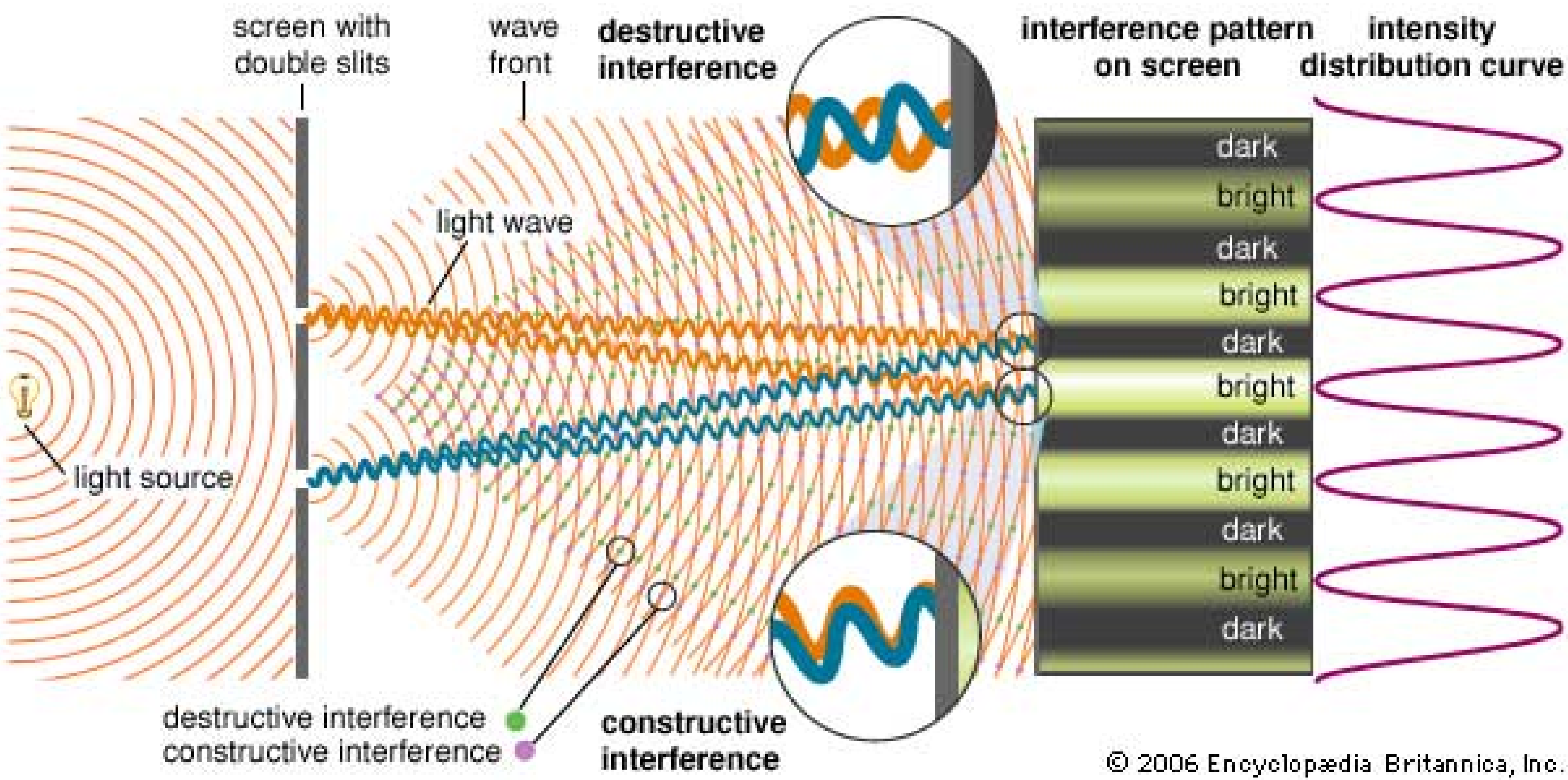


단일 vs. 이중슬릿

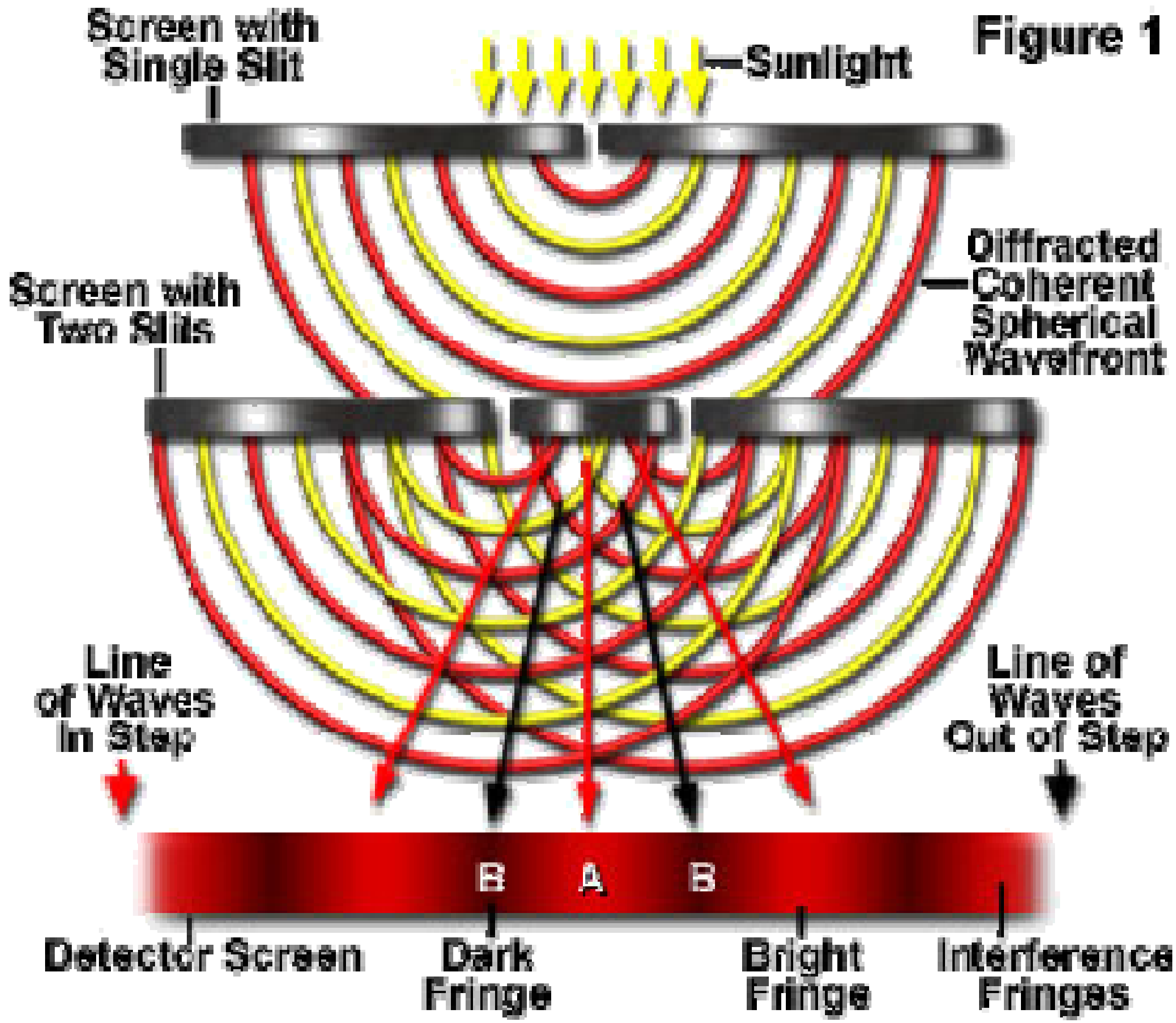
- 단일슬롯: 입자+파동 설명, single Gaussian
- 이중슬롯: 파동 설명, Fourier summation



이중슬릿 실험에서의 간섭: 빛=파동

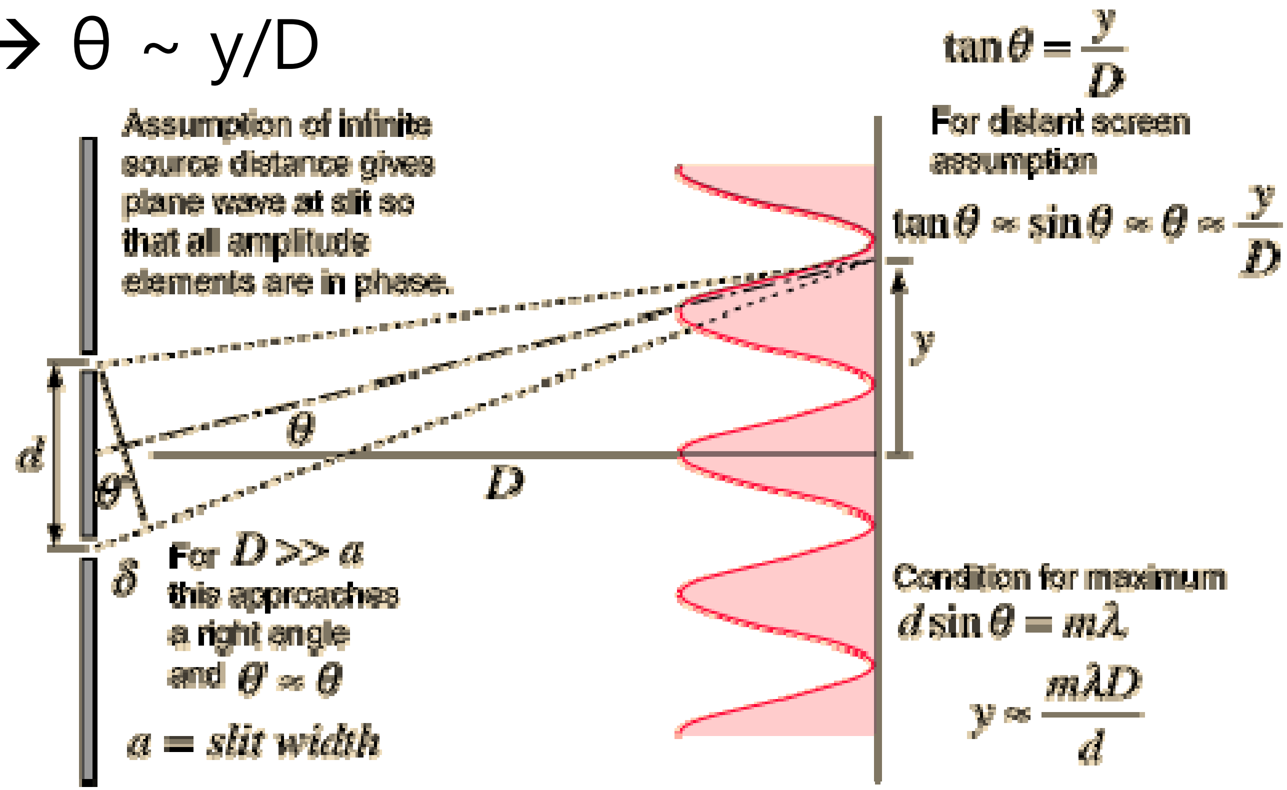


이중슬릿 실험: 홀수/짝수 파면 관점

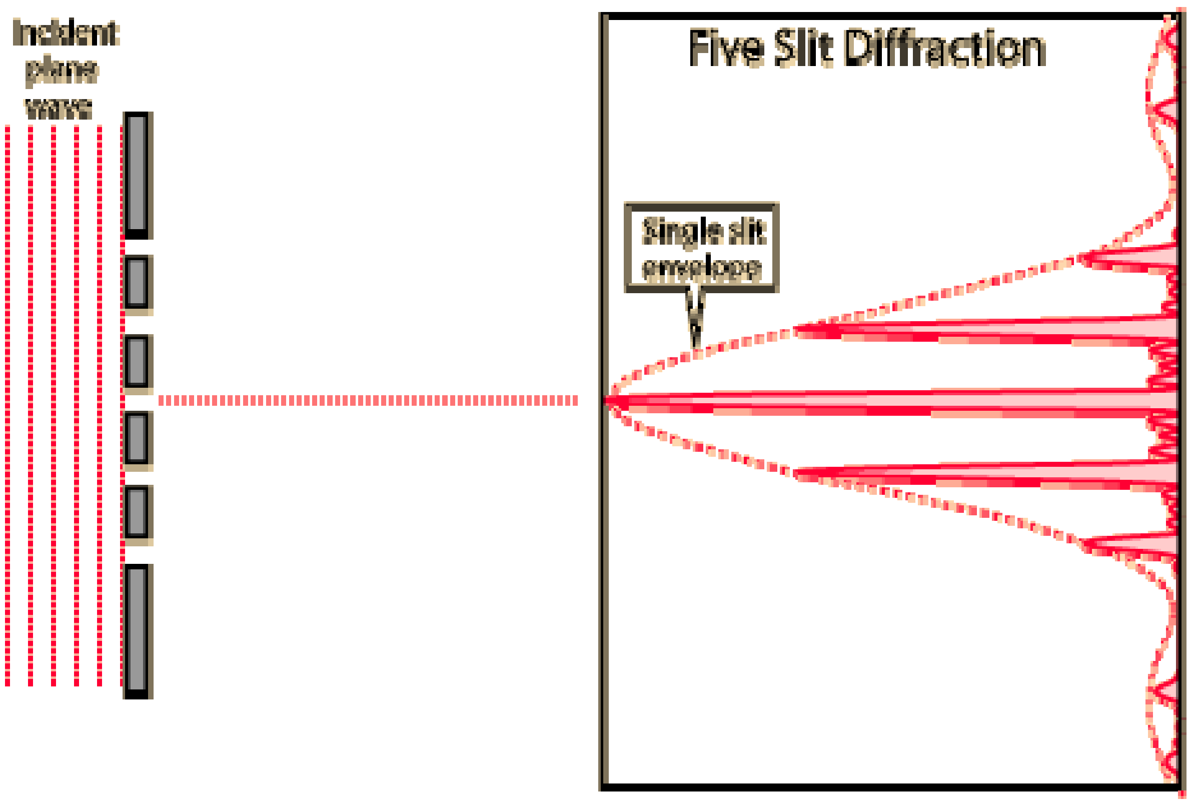


간섭파 계산 (Bright fringe)

- 최대 간섭파 사이 거리, 간섭 각도
  - 중심으로부터 거리=m번째 산x파장x슬릿과 스크린 거리/슬릿간 거리→ y=mλD/d
  - 해당각도 → θ ~ y/D

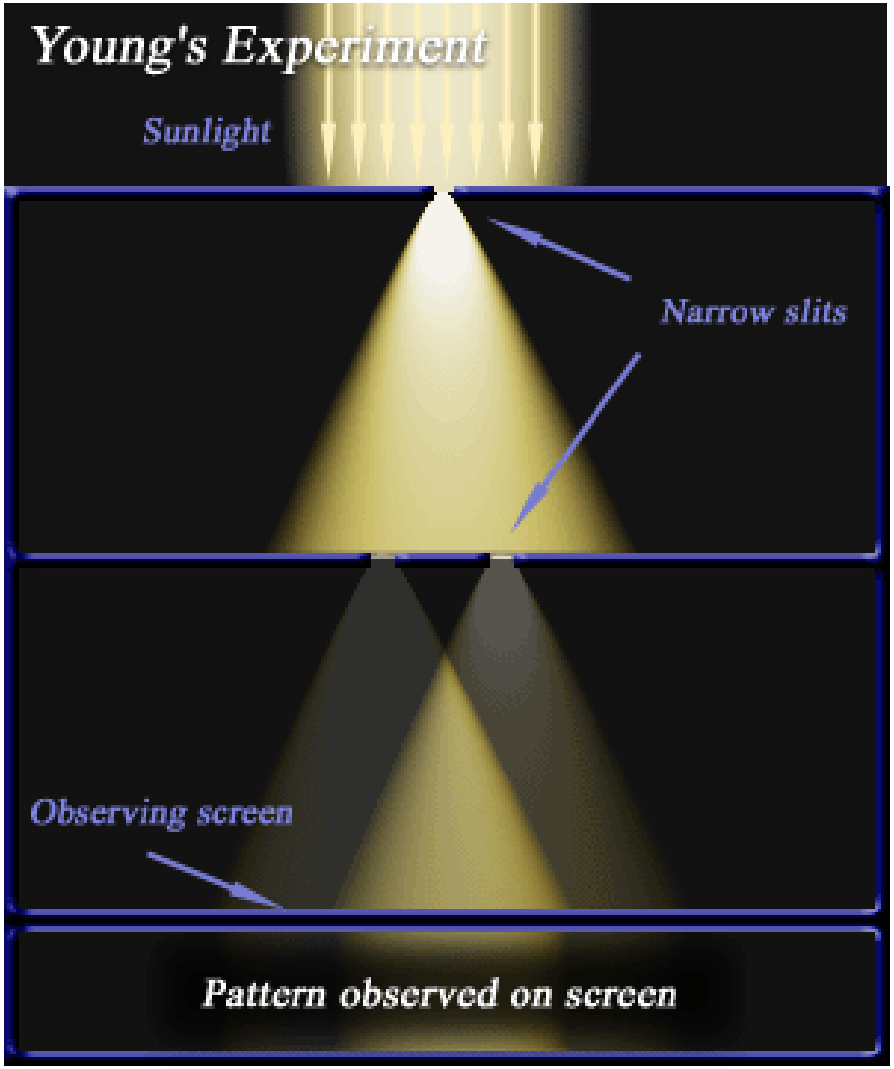


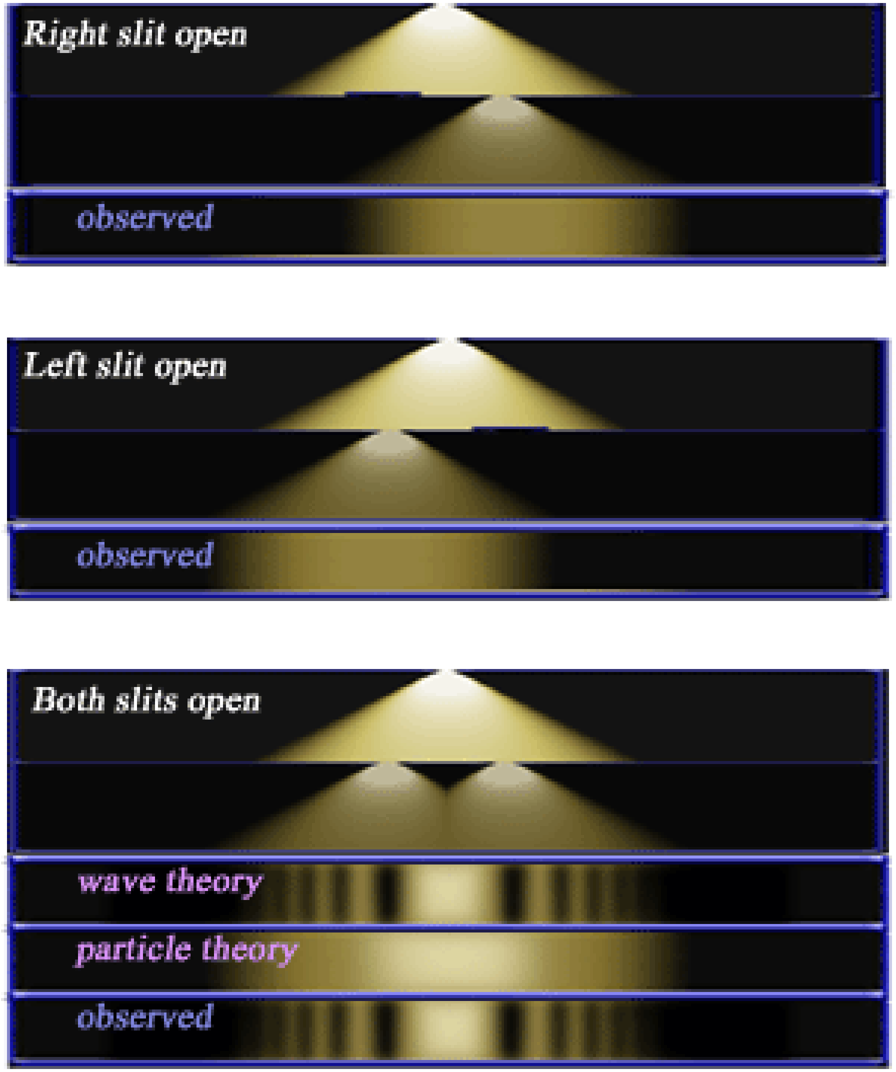
슬릿 개수별 회절 vs. 간섭+회절



- Five slit
- Diffraction
- Interference

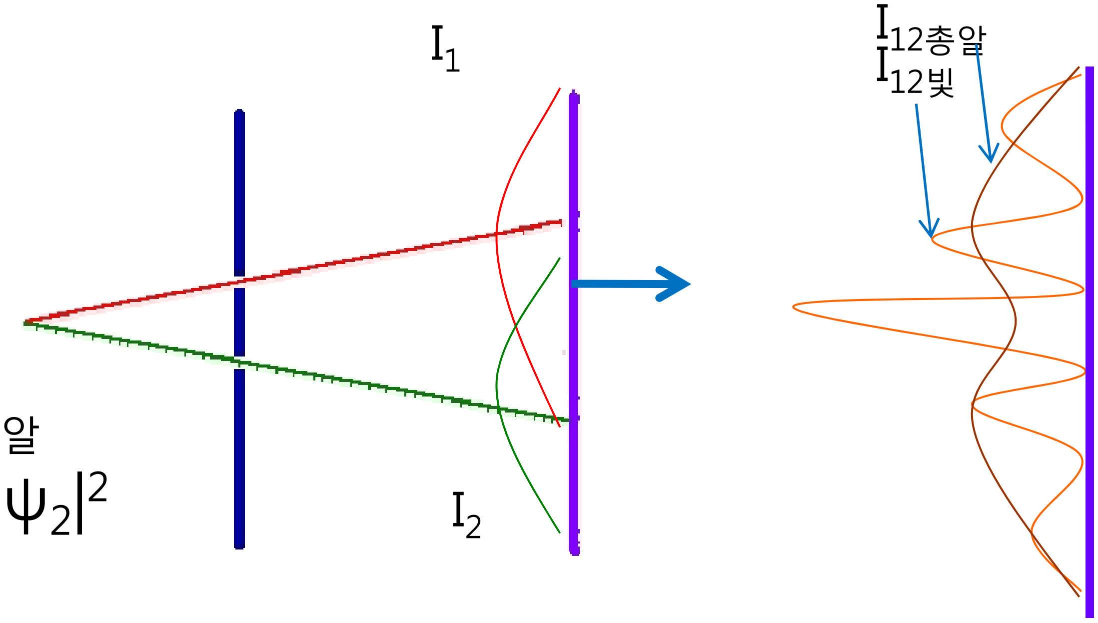
영의 이중슬릿 실험: 파동성 or 입자성



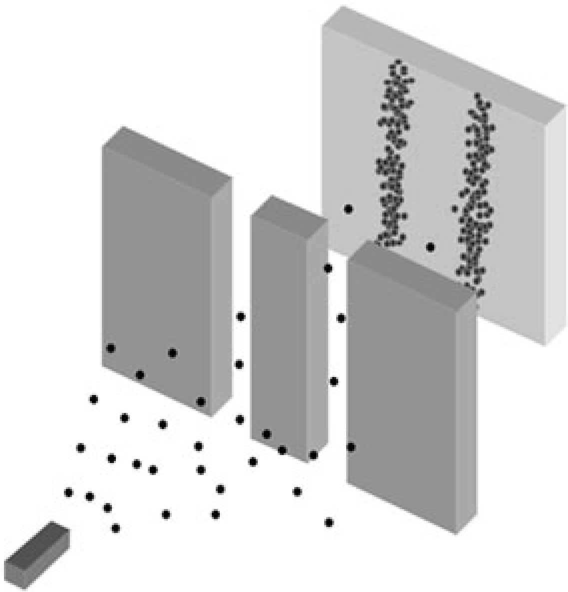


슬릿에서 빛=입자 or 파동

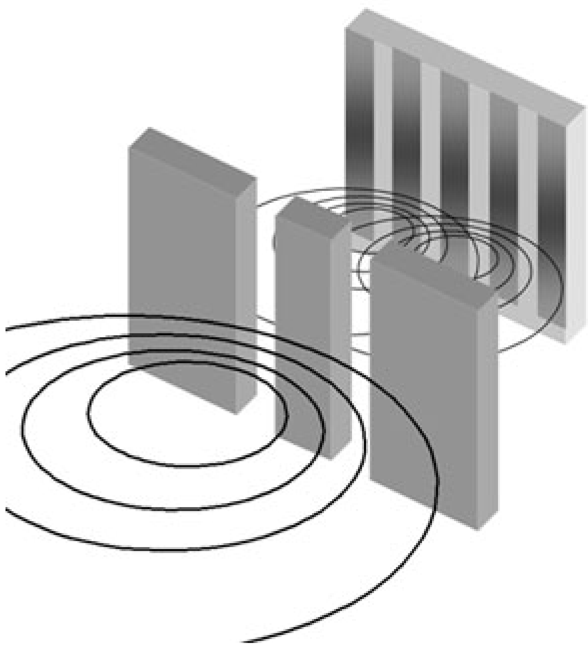
- 분포 세기의 합
  - 총알의 분포
    - $I_1+I_2=I_{12총알}$
    - $I_1=|\psi_1|^2$, $I_2=|\psi_2|^2$, $I_{12총알}=|\psi_1|^2+|\psi_2|^2$
  - 광자의 분포
    - $I_1+I_2=I_{12광자}\neq I_{12총알}$
    - $|\psi_1|^2+|\psi_2|^2=|\psi_1+\psi_2|^2$



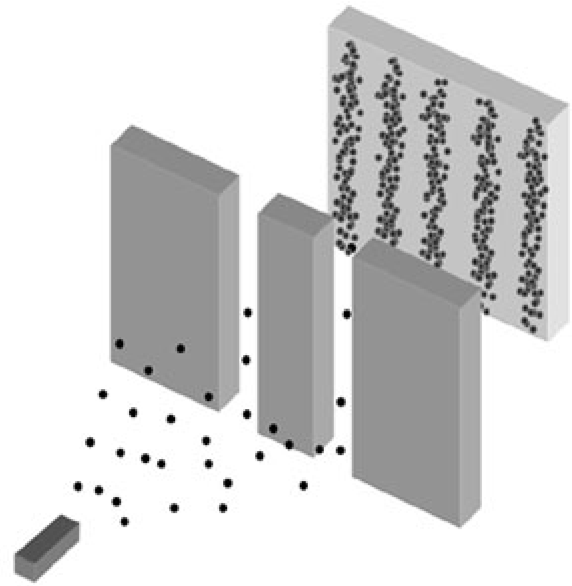
입자 vs. 파동 vs. 전자



Particles (총알)



Waves (수면파)

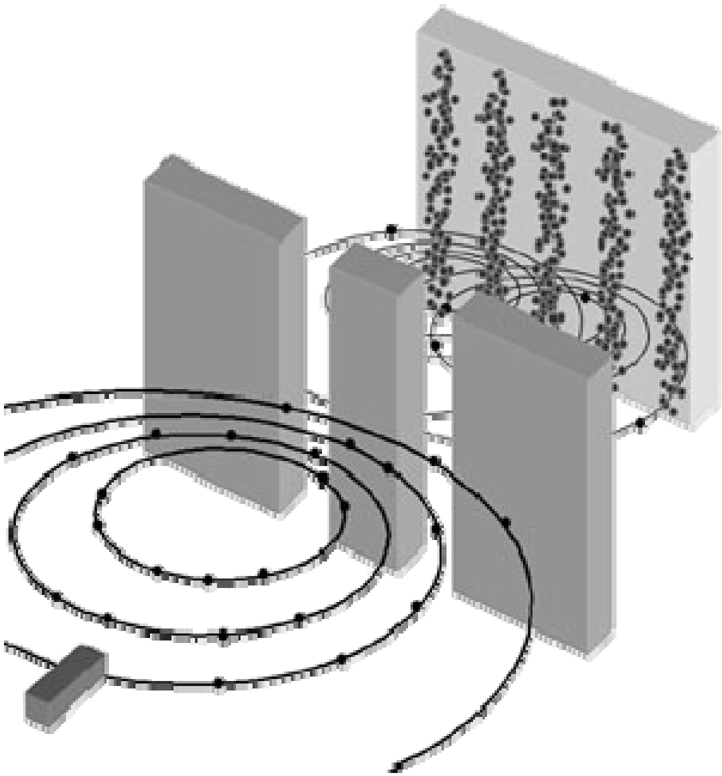


Electrons (전자)

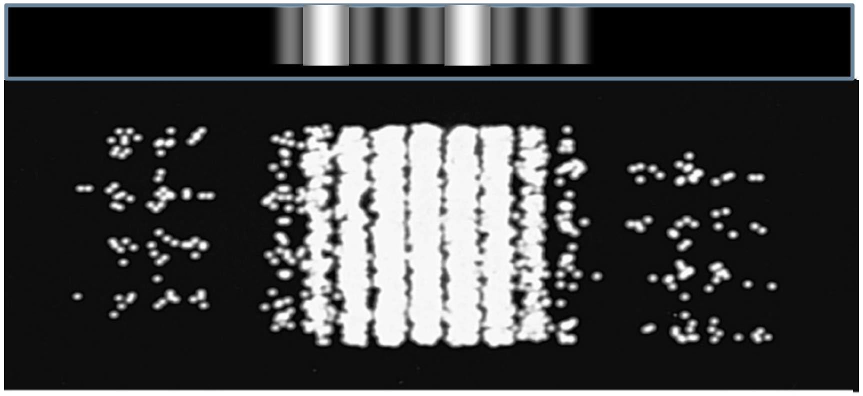
입자-파동 이중성

- Wave-particle duality
  - 하이젠베르그: 불확정성의 원리

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$



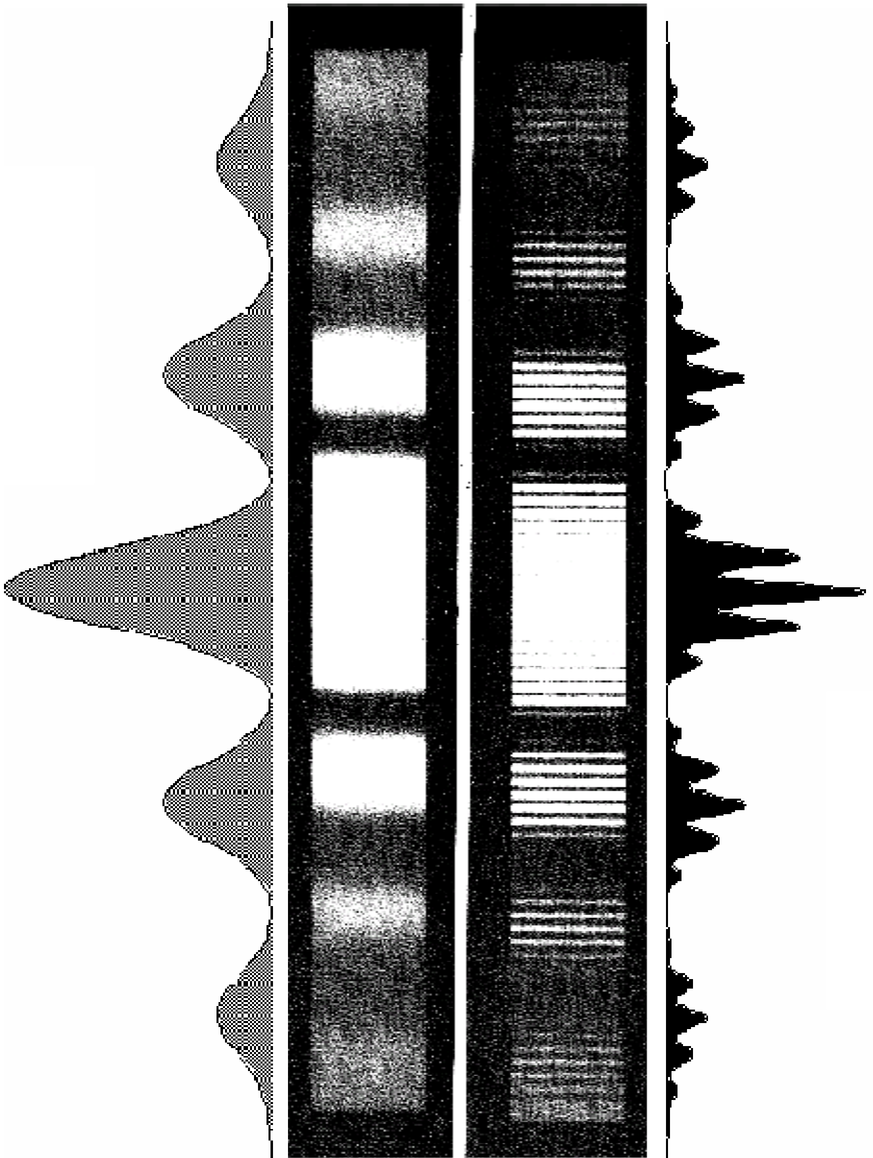
Wave-Particles (광자)



(d) ~4000 counts

Fyenman의 해석(입자론자)

Each photon
passes through
only one slit



Each photon
passes through
double slit