

[6 주] 파동의 입자성 1 - 전자기파, 흑체 복사

<선수 학습 확인>

1. 연습 문제 풀이
2. 질량과 에너지
3. 에너지와 운동량
4. 일반 상대성 이론

<본 학습 개요 설명>

Chapter 2. Particle properties of Waves

(파동의 입자성)

2.1 Electromagnetic Wave(전자기파)

2.2 Black Body Radiation(흑체 복사)

2.3 Photoelectric Effect(광전 효과)

2.4 What is Light(빛이란 무엇인가)

2.5 X-ray(x-선)

2.6 X-Ray Diffraction(x-선 회절)

2.7 Compton Effect(Compton 효과)

2.8 Pair Production(쌍생성)

2.9 Photon and Gravity(광자와 중력)

Chapter 2. Particle properties of Waves

(파동의 입자성)

- 경험;

입자 ; 질량을 가진 알갱이

파동 ; [예]수면파- 에너지와 운동량을 전달

- 미시세계? (원자, 분자, 전자, 핵...)

[예] 전자; 입자- 전하, 질량, 운동상태 - 운동시 파동성

전자기파; 파동- 회절, 간섭, 편광 - 입자의 흐름으로 생각해야 될

경우도 있다.

- '특수 상대론' 과 함께 '파동-입자의 이중성' 또한 현대물리 이해에

중요!!

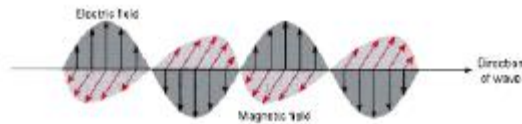
2.1 Electromagnetic Wave(전자기파)

광속으로 운동하고 전형적인 파동성을 보이는 결합된 전기자기 진동

(1) 1864년 Maxwell(영국) 발견:

- ‘가속된 전하는 결합된 전자기적 교란을 발생시키고, 이것이 공간으로 퍼져 나갈 수 있다’

- [그림2.1] 전자기파



- 변하는 자기장 → 유도 전류 발생 (Faraday 유도 법칙)

? (자기장) ← 변하는 전기장 (Maxwell)

즉, “대칭성”에 기초

- 전자기파의 속력; c

$$c = 1 / \epsilon_0 \mu_0$$

- 빛도 전자기파이다.

(2) 1888년, Hertz (독일)

- 전자기파 존재 실험
- Maxwell의 예상대로 행동
- 전자기파; 반사, 굴절, 회절 현상 등

[참고자료]

▶ 헤르츠(Heinrich Hertz, 1888년)

: 전자기파가 실제로 존재하며, 맥스웰이 예측한 바와 같은 성질을 갖고 있음을 실험적으로 증명.

▶ 모든 전자기 파동들은 동일한 기본적인 특성을 지니고 있지만, 물질과 상호작용할 때에는 진동수에 따라 서로 다른 특이한 성질을 나타냄.

(가시광선: 4.3×10^{14} Hz ~ 7.5×10^{14} Hz.

- 전자기파 스펙트럼 ; [그림 2.2]

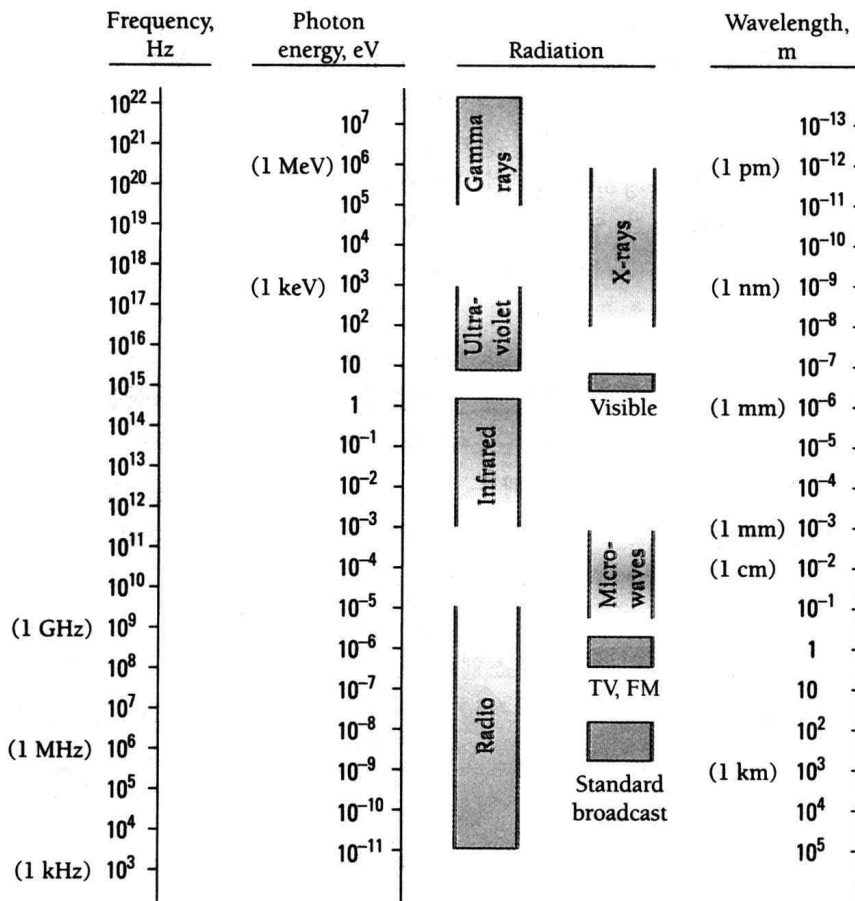


그림 2.2 전자기 복사의 스펙트럼.

(3) Principle of superposition(중첩의 원리);

- 두 파동이 만났을 때의 진폭은 두 파동의 진폭을 합한 것과 같다.
- 보강 간섭과 상쇄 간섭;

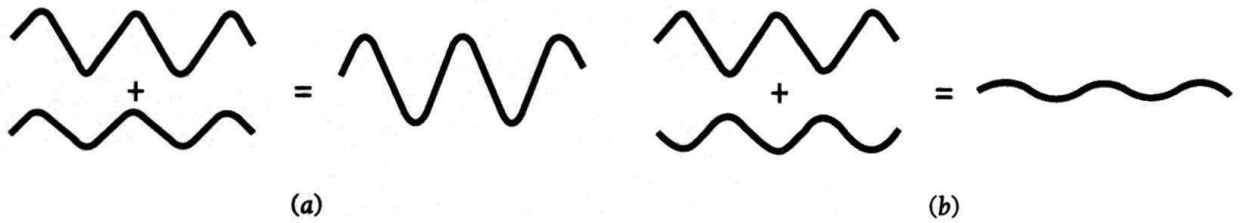
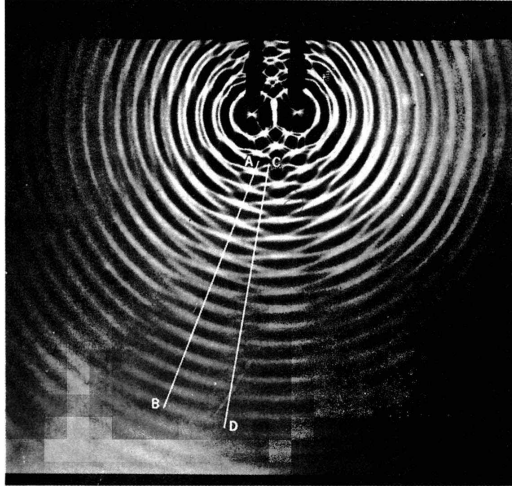


그림 2.3 (a) 보강간섭에서는 같은 위상으로 중첩된 파동들은 서로를 보강시켜 준다. (b) 감쇠 간섭에서는, 위상이 약간 혹은 180°만큼 다른 파동들이 중첩되어 서로를 감쇠시킨다.

- 물결파의 간섭 사진 참조



수면파들의 간섭. 보강간섭은 AB선 위치에서 일어나고, 감쇠간섭은 CD선 위치에서 일어난다.

(4) 1801년, Young의 이중 슬릿 실험; 빛의 파동성 증명, 파장 측정

- 밝은 무늬; 보강간섭- 빛의 경로차가 파장의 정수배 일 때

어두운 무늬; 소멸간섭; 빛의 경로차가 반파장의 정수 배 일 때

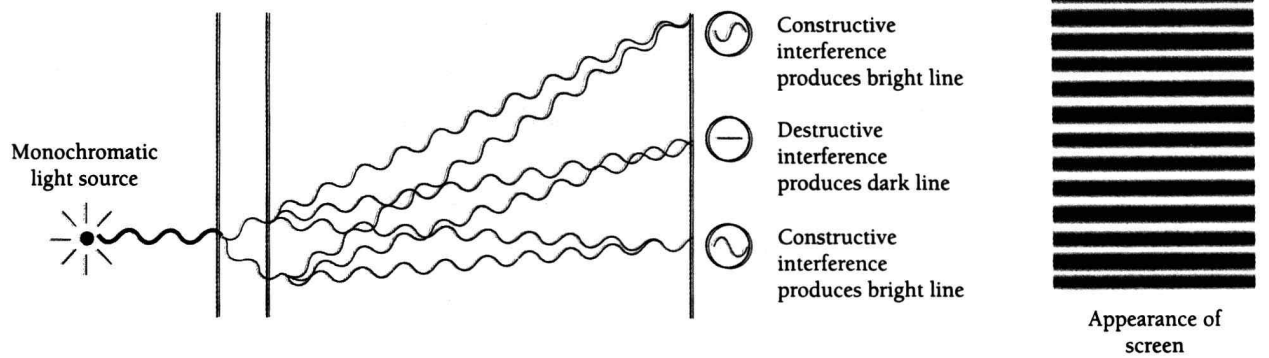


그림 2.4 영의 실험에서 간섭무늬의 생성과정. 보강간섭은 슬릿에서 스크린까지의 경로 길이의 차이가 $0, \lambda, 2\lambda, \dots$ 일 때 일어난다. 감쇠간섭은 이 경로 차이가 $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$ 일 때 일어난다.

2.2 Blackbody Radiation(흑체 복사)

빛의 양자 이론으로만 그 근원을 설명할 수 있다.

- Hertz 실험 이후 빛의 본성이 분명해지는 듯; ‘빛은 maxwell 이론을 따르는 전자기파’이다.

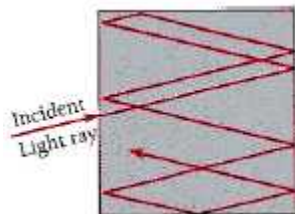
그러나, 12년 정도 후에 물체에서 방출되는 복사의 근원을 이해하려다가 새로운 문제 발견

- 즉, 금속 가열 - 빛의 발생; 빨강- 노랑- 백색

다른 파장의 빛도 발생; 적외선....

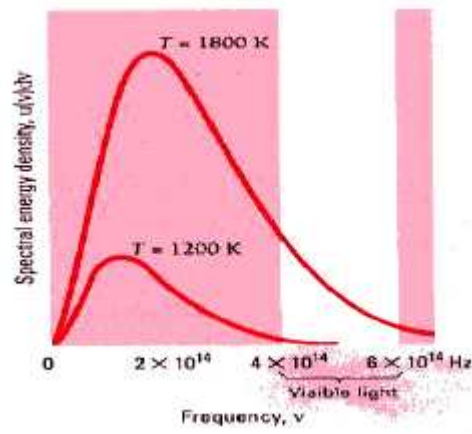
- 복사 능력은 흡수 능력과 관계가 크다.

- **Blackbody**; 모든 진동수의 빛을 흡수하는 이상체



- 쇠막대 가열; 검붉은 색- 밝은 오렌지 불은 색- 백색광

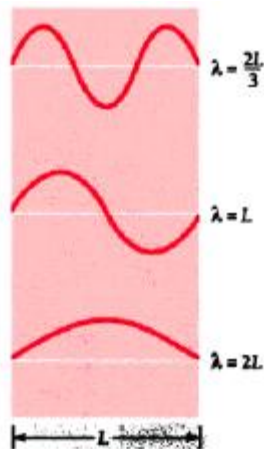
- [그림 2.6] 흑체 스펙트럼;



[1] The Ultraviolet Catastrophe(자외선 파탄)

(1) 흑체복사 스펙트럼 분포 설명 시도; 19세기 말 Rayleigh, Jeans

- 상세한 식; 9장
- 흑체 내에서 전자기파가 완전 반사, 즉, '정상전자기파'로 존재한다고 생각
- 반파장의 정수배로만 존재, 반사면이 node(마디)가 된다.



(2) 단위 부피 내 진동수 ν 와 $d\nu$ 사이 정상파의 개수는;

$$\text{Density of standing waves in cavity } G(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$$

- 공동의 형태에 무관

- 진동수가 클수록 파장이 짧아지고, 정상파의 수가 증가

(3) 정상파 하나의 에너지 찾기

- ‘에너지 등분배 이론’에 근거, 온도 T에서 한 자유도당 평균 에너지는 $(1/2)kT$

- k는 Boltzman's constant, $k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

- 그런데, 이상기체 분자는 세 자유도를 가지므로, 평균 총에너지는 $(3/2)kT$

- 공동 내에서 각 정상파는 electric charge의 진동 때문인데, 두 자유도를 가지므로 평균에너지는;

$$\bar{\epsilon} = 2 \left(\frac{1}{2} kT \right)$$

“정상파당 고전적 평균 에너지”

- 따라서 공동 내 단위 부피당 진동수 범위 ν 와 $\nu + d\nu$ 를 갖는 총에너지

지 $u(\nu)d\nu$ 는 ;

Rayleigh-Jeans formula

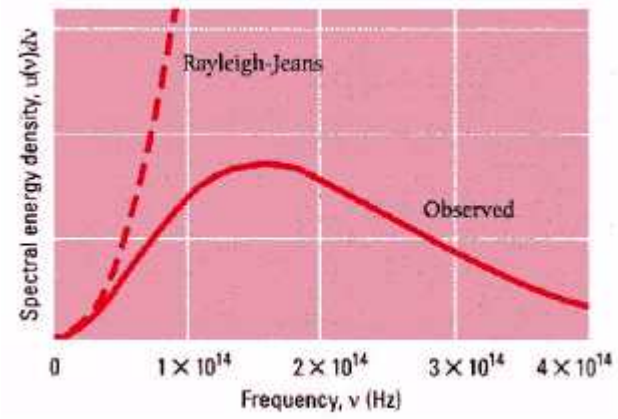
$$u(\nu)d\nu = \bar{\epsilon} G(\nu)d\nu = \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 d\nu$$

- 위 식에서 진동수 ν 가 증가 할수록 에너지 밀도가 ν^2 으로 증가해야, 또 ν 가 무한히 증가하면 $u(\nu)d\nu$ 도 무한히 증가

- 그러나 실제로는 $\nu \rightarrow \infty$ 일 때 에너지 밀도는 zero로 접근, 이 불일치를

고전 물리의 ‘자외선 파탄’이라 부른다.

- 무엇이 잘못된 것일까?



[2] Planck Radiation Formula(플랑크 복사 공식)

- 1900년 Max Planck(독일), lucky guesswork!

-

Planck Radiation Formula

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Planck's constant $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J-s

$$h\nu \gg kT \quad e^{h\nu/kT} \rightarrow \infty \quad u(\nu)d\nu \rightarrow 0$$

$$h\nu \ll kT \quad u(\nu)d\nu \approx \frac{8\pi kT}{c^3} \nu^2 d\nu$$

- 즉, 플랑크 공식은 낮은 진동수에서는 R-J 식과 일치!!

- **플랑크 복사 공식의 의미;**

* 공동 벽 내의 진동자는 연속 분포 에너지를 갖지 않고, 특정 에너지만 갖는다.

$$\text{진동자의 에너지; } \varepsilon_n = n h \nu \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

* $h\nu$: 양자, 에너지 덩어리

* 진동자의 평균 에너지는 kT 가 아니고,

$$\varepsilon = h\nu / \{ \exp(h\nu/kT) - 1 \}$$

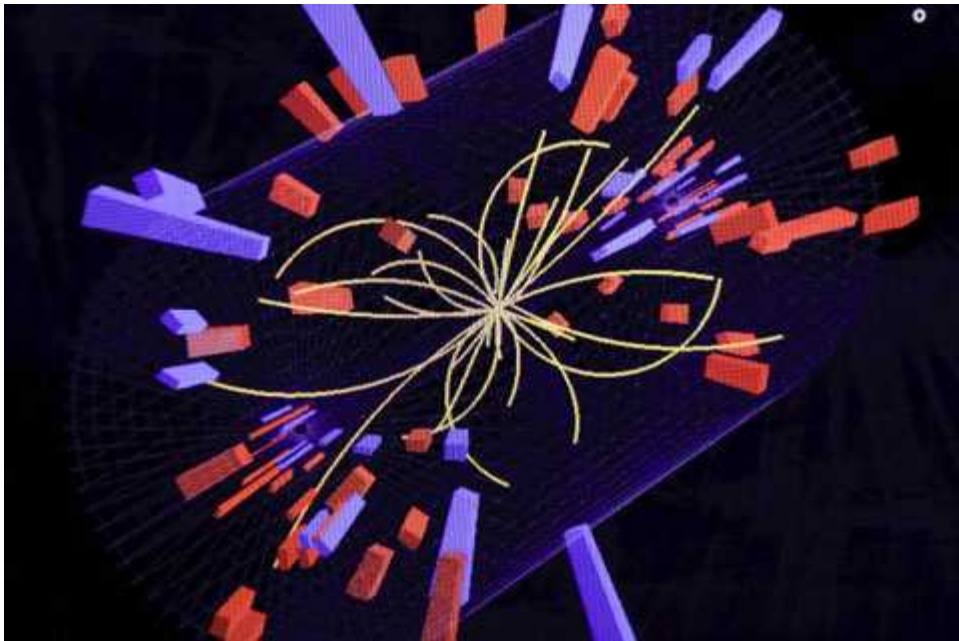
[예제 2.1] book 참조

[읽기자료] '빅뱅 실험' 성공

출처: 조선일보, 입력 : 2010.03.31 02:49

유럽입자물리연구 강입자가속기 이용, 사상 최고 속도로 양성자 충돌 시켜

유럽입자물리연구소(CERN)의 강입자가속기(LHC)가 30일 사상 최고의 속도로 두 개의 양성자를 충돌시키는 '빅뱅 실험'에 성공했다.



▲ 30일 사상 최고 속도의 양성자 충돌 실험에 성공한 CERN(유럽입자물리연구소)의 통제실 모니터에 비친 실험 데이터 화면. 충돌의 결과가 그래픽으로 표현돼 있다. / AFP연합뉴스

CERN은 이날 7 TeV(테라전자볼트)의 고에너지로 양성자 빔을 충돌시키는 데 성공했다고 밝혔다. 이는 기존의 다른 입자 가속기가 세운 최고 충돌 속도보다 3.5배 빠른 사상 최고 기록이라고 독일 DPA통신이 보도했다. CERN의 통제실에서 실험을 지켜보던 과학자들은 충돌이 성공하자 일제히 박수를 치며 환호했다. 이 실험을 진행한 올리버 부크뮐러(Buchmueller) 연구원은 "양성자 충

돌 실험은 우주가 탄생한 빅뱅과 같은 환경을 인공적으로 재현하려는 것"이라며 "우리는 인류가 가보지 못한 새 영역에 발을 내디뎠다"고 말했다.

2008년 완공된 세계 최대의 입자 가속기인 LHC는 우주 탄생의 비밀을 밝혀줄 것으로 기대됐으나 그동안 잦은 고장으로 제 성능을 내지 못했다. 이번 실험의 성공을 시작으로 본격적인 빅뱅 연구가 가능해질 전망이다.

- <과제 및 차시학습 안내> -

1. 과제; 연습 문제 풀이 1, 2

2. 차시 학습 ;

파동의 입자성 - 광전 효과

- 빛이란 무엇인가?

- X-선, 회절

- 콤프턴 효과, 쌍생성, 광자와 중력