2025학년도 대학 신입학생 수시모집 일반전형

면접 및 구술고사

물리학

문항 · 제시문 · 예시 답안

문제 1. 이중 슬릿 간섭 — 매질·굴절률의 변화와 도플러 효과
문제 2. n차원 우주의 중력·전자기력 — 궤도·보어 모형·화학 결합

서울대학교

※ 예시 답안은 자체 풀이·검산 결과이며 학습용 참고 자료입니다.

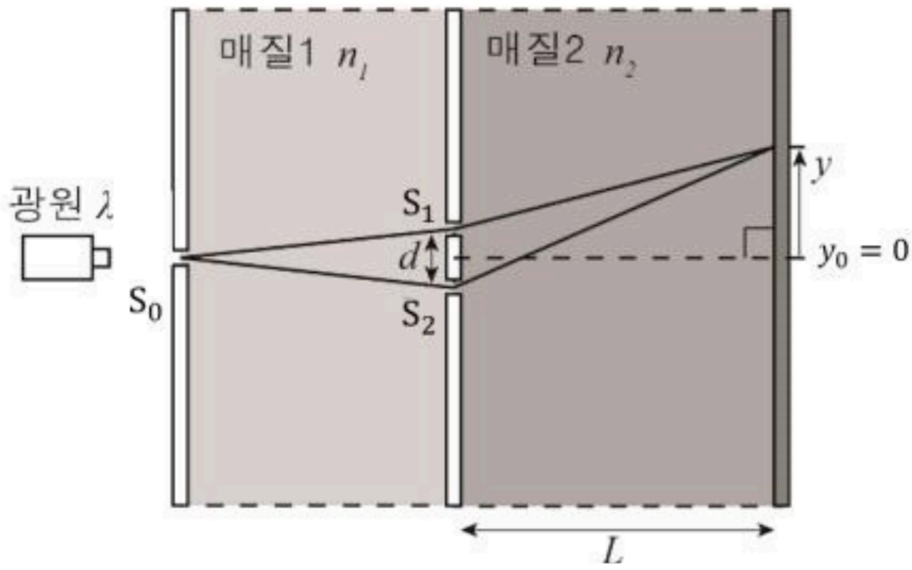
문제 1. 이중 슬릿 간섭 — 매질·굴절률의 변화와 도플러 효과

문항 및 제시문

슬릿 사이의 거리가 d 인 이중 슬릿에서 L 만큼 떨어진 곳에 스크린이 있다. (단, L 이 d 보다 충분히 크다고 가정하고 각 슬릿의 폭은 무시한다. 스크린 중앙은 $y_b = 0$ 이며, d 는 스크린 중앙을 기준으로 한다.)

1-1.

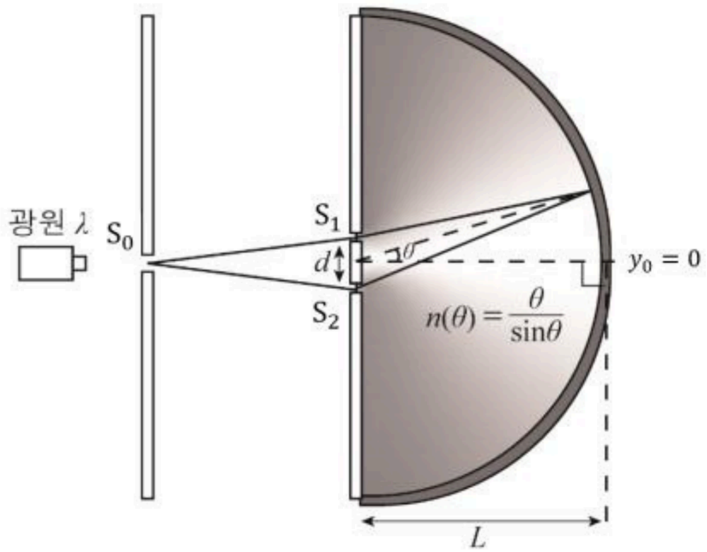
[그림 1]과 같이 진공에서 파장 λ 인 빛을 방출하는 광원을 단일 슬릿 S_0 과 이중 슬릿 S_1, S_2 앞에 놓았더니 스크린에 간섭무늬가 나타났다. 단일 슬릿 S_0 과 이중 슬릿 S_1, S_2 사이는 굴절률이 n_1 인, 이중 슬릿 S_1, S_2 과 스크린 사이는 굴절률이 n_2 인 매질로 채워져 있다. (단, $n_1 < n_2$.) 스크린에 나타나는 인접한 보강 간섭 무늬 사이의 거리 Δy 와 인접한 상쇄 간섭 무늬 사이의 거리 $\Delta y'$ 를 문제에 제시된 문자로 나타내시오.



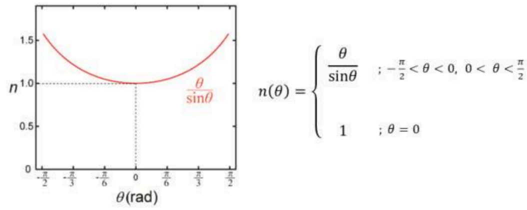
[그림 1] 매질 1(굴절률 n_1)·매질 2(굴절률 n_2)로 채워진 이중 슬릿

1–2.

[그림 2]와 같이 θ 에 따라 변하는 굴절률 $n(\theta)$ 을 지닌 가상의 매질이 있다. 광원에서 나온 파장이 λ 인 빛이 단일 슬릿 S_0 과 이중 슬릿 S_1, S_2 을 지나 가상의 매질을 통과한 후 반원 형태의 스크린에 도달한다. θ 에 따른 $n(\theta)$ 의 그래프는 [그림 3]과 같다. 스크린에 나타나는 밝은 무늬 패턴의 개수를 모두 구하시오. (단, $\lambda = \frac{\pi}{20}d$ 이고, $\theta = \pm\frac{\pi}{2}$ 에서의 무늬는 무시한다.)



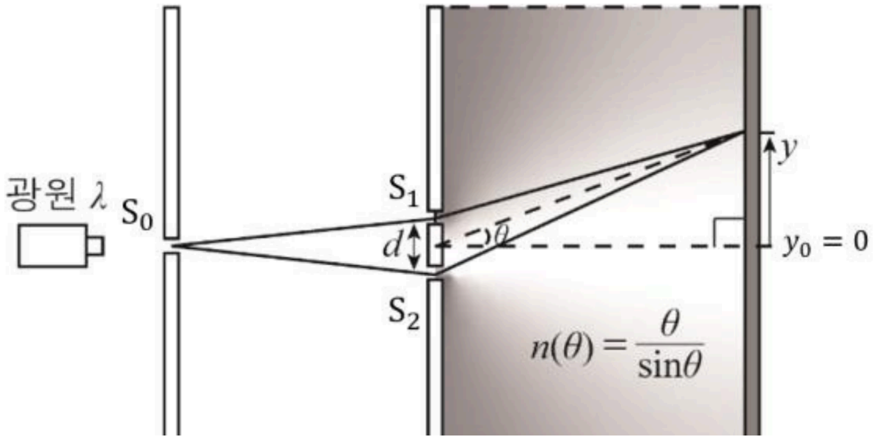
[그림 2] 반원 스크린과 각도에 따라 변하는 굴절률 $n(\theta)$



[그림 3] $n(\theta) = \theta/\sin\theta$ 의 그래프

1–3.

[문제 1-2]에서 [그림 2]의 반원 형태 스크린을 [그림 4]와 같이 평면 스크린으로 바꾸었다. 인접한 밝은 무늬의 중심 사이 거리를 $\Delta y_n = y_n - y_{n-1}$ 이라 할 때, 다음 물음에 답하시오. (단, $\lambda = \frac{\pi}{20}d$ 이고, y_n 은 스크린 중앙으로부터 n 번째 밝은 무늬의 중심이다. n 은 1 이상의 정수이다.)

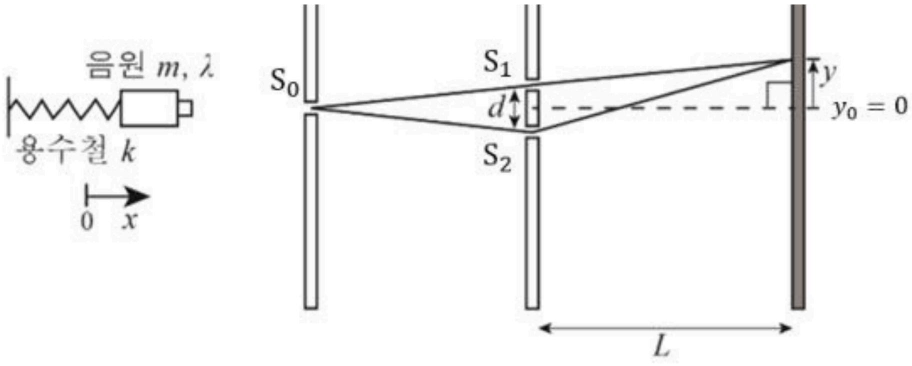


[그림 4] 반원 스크린을 평면 스크린으로 바꾼 경우

(1) Δy_n 을 문제에 제시된 문자로 나타내시오.
(2) 인접한 밝은 무늬의 중심 사이의 거리 Δy_n 는 스크린의 중앙에서 멀어질수록 어떻게 변하는지 설명하시오.

1-4.

[그림 5]와 같이 정지한 공기 중에서 파장 λ 인 음파를 발생시키는 음원이 용수철 상수 k 인 용수철에 매달려 있다. 음원의 질량은 m 이며, 주기 $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, 진폭 A 로 단진동을 하고 있으며 시간 t 에 따른 x좌표는 $x(t) = A\sin\left(\sqrt{k/m}\cdot t\right)$ 이다. 스크린 위에서 소리가 크게 들리는 인접한 극대점 사이의 거리를 Δy 라 할 때, 다음 물음에 답하시오. (단, 중력과 공기저항에 의한 효과는 무시하며, 음속은 v 로 일정하다. 소리가 스크린에 도달하기까지 걸리는 시간 τ 는 T 에 비해 훨씬 작아 무시할 수 있다고 가정한다.)

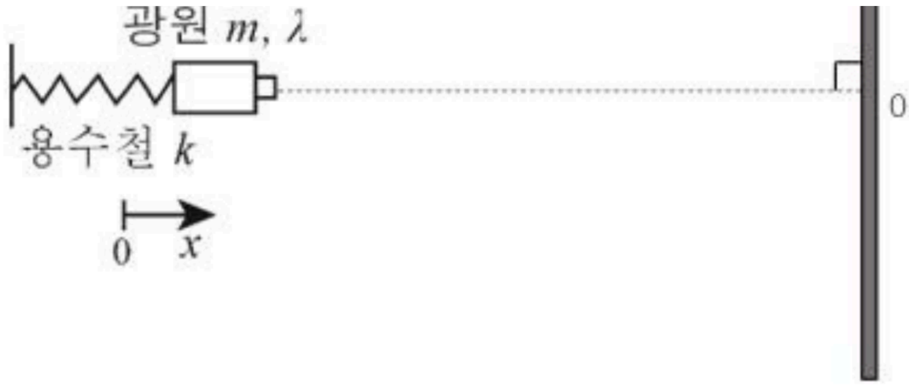


[그림 5] 용수철에 매달려 단진동하는 음원과 이중 슬릿·스크린

(1) 음원의 속도를 t 에 대한 함수로 나타내시오.
(2) Δy 를 t 에 대한 함수로 나타내시오.
(3) Δy 이 단진동의 한 주기 내에서 어떻게 변하는지 설명하시오.

1–5.

[그림 6]과 같이 진공에서 파장이 λ 인 광원의 빛이 금속 스크린에 입사한다. 이때 질량 m 인 광원은 용수철 상수 k 인 용수철에 매달려 주기 $T = 2\pi\sqrt{m/k}$, 진폭 A 로 단진동을 한다. 이 광원의 시간 t 에 따른 x좌표는 $x(t) = A\sin\left(\sqrt{k/m}\cdot t\right)$ 이며 $A\sqrt{k/m} = c/\left(2\sqrt{2}\right)$ 이다. 광원과 금속 스크린 사이에서 금속 스크린으로부터 튀어나온 광자가 아닌 입자를 검출한다. $t = 0$ 에서 입자가 검출되다가 $t = T/4$ 에서 검출되지 않았다. (단, 중력에 대한 효과는 무시하며, c 는 진공에서의 빛의 속도이다. 입자는 모두 금속 표면으로부터 튀어나온다고 가정한다. 광원의 최대 속도는 광속보다 충분히 작다고 가정한다. 빛의 속도는 c 인 음파처럼 다룰 수 있다.)



[그림 6] 단진동하는 광원과 금속 스크린 (광전 효과)

(1) 검출되는 입자는 무엇인지 말하고, 입자가 검출되다 검출되지 않는 이유를 설명하시오.
(2) 입자가 $t = T/4$ 부터 검출되지 않다가 어느 순간 입자가 다시 검출되기 시작한다고 할 때, 그 시간을 구하시오. (단, $0 \le t \le T$)
(3) 검출되는 입자의 최대 운동 에너지를 구하시오.

예시 답안 — 문제 1

1–1.

매질 2(굴절률 n_2) 속에서 빛의 파장은 λ/n_2 로 짧아진다. 이중 슬릿 간섭에서 인접한 보강(및 상쇄) 무늬의 간격은 (스크린 쪽 매질에서의 파장)$\cdot$ L/d 이므로

$$\boxed{\Delta y = \Delta y' = \frac{\lambda}{n_2 d}L = \frac{\lambda L}{n_2 d}}$$

보강 무늬 간격과 상쇄 무늬 간격은 서로 같다.

1–2.

반지름 L 인 반원 스크린 위 각 θ 방향의 점까지 두 슬릿에서의 경로차는 $d\sin\theta$, 굴절률을 반영한 광학적 경로차는 $n(\theta)\cdot d\sin\theta$ 이다. 보강(밝은 무늬) 조건은

$$n(\theta)\cdot d\sin\theta = m\lambda \quad (m \text{ 은 정수})$$

$n(\theta) = \theta/\sin\theta$ 를 대입하면

$$\frac{\theta}{\sin}\theta\cdot d\sin\theta = \theta d = m\lambda = m\frac{\pi}{20}d \quad \Rightarrow \quad \theta = m\frac{\pi}{20}$$

정의역은 $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$ 이고 $\theta = \pm\frac{\pi}{2}$ 는 무시하므로 $-10 < m < 10$, 즉 $m = -9, -8, ..., -1, 0, 1, ..., 9$ 이다.

$$\boxed{\text{밝은 무늬 패턴의 개수} = 19 \text{ 개}}$$

1–3.

평면 스크린으로 바꾸어도 보강 조건은 그대로 $\theta_n = n\pi/20$ 이다. 슬릿 중심에서 각 θ_n 방향으로 나아간 빛은 거리 L 떨어진 평면 스크린의 $y_n = L\tan\theta_n$ 위치에 밝은 무늬를 만든다.

(1)

$$\Delta y_n = y_n - y_{n-1} = L\left[\tan\left(n\frac{\pi}{20}\right) - \tan\left((n-1)\frac{\pi}{20}\right)\right]$$

(2) $\tan\theta$ 는 θ 가 커질수록 기울기가 급격히 증가하는(위로 볼록한) 함수이므로, 같은 각 간격 $\pi/20$ 에 대응하는 $\tan$ 값의 차이는 n 이 커질수록 커진다. 따라서 스크린 중앙에서 멀어질수록 무늬 간격 Δy_n 은 넓어진다.

1–4.

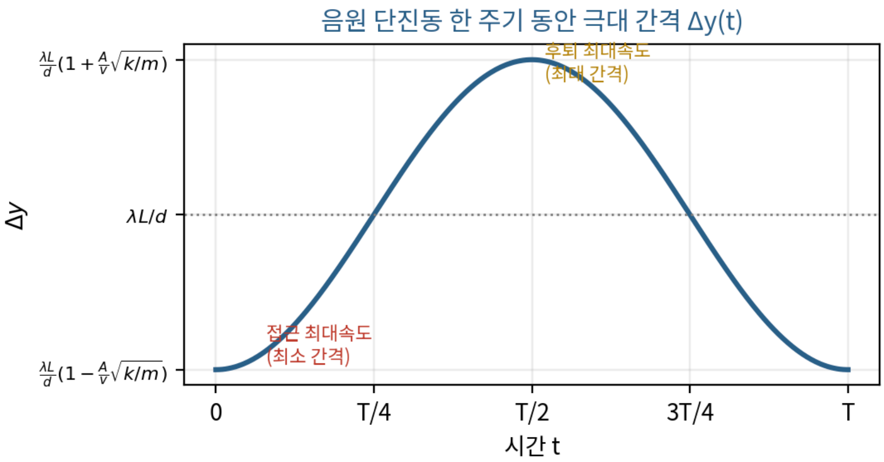
(1)

$$v_s(t) = \frac{dx}{dt} = A\sqrt{\frac{k}{m}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\cdot t\right)$$

(2) 음원이 스크린 쪽($+x$)으로 속력 v_s 로 다가갈 때 앞쪽으로 방출되는 파장은 도플러 효과로 $\lambda' = \lambda(1 - v_s/v)$ 가 된다. 이 파장이 이중 슬릿을 지나 만드는 극대 간격은 $\Delta y = \lambda' L/d$ 이므로

$$\Delta y(t) = \frac{\lambda L}{d}\left[1 - \frac{A}{v}\sqrt{\frac{k}{m}}\cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}\cdot t\right)\right]$$

(3) 한 주기 동안 $\cos\left(\sqrt{k/mt}\right)$ 는 $+1 \to 0 \to -1 \to 0 \to +1$ 로 변한다. 따라서 Δy 는 $t = 0$ (접근 최대 속도)에서 최솟값 $(\lambda L/d)\left(1 - (A/v)\sqrt{k/m}\right)$, $t = T/2$ (후퇴 최대 속도)에서 최댓값 $(\lambda L/d)\left(1 + (A/v)\sqrt{k/m}\right)$ 을 갖는 코사인 모양으로 진동한다.



예시 그래프 — 한 주기 동안 극대 간격 $\Delta y(t)$ 의 변화

1–5.

(1) 검출되는 입자는 광전자(전자) 이다. 금속에 입사하는 빛의 진동수가 문턱(일함수) 진동수보다 클 때에만 전자가 튀어나온다. 음원이 스크린으로 접근할 때는 도플러 청색편이로 진동수가 커져 문턱을 넘어 전자가 검출되고, 음원이 정지·후퇴하면 진동수가 문턱 이하로 낮아져 검출되지 않는다. $t = 0$ 에서 검출되고 $t = T/4$ (정지 순간)에서 검출되지 않았으므로, 정지 시의 진동수(광원의 정지 진동수 $f = c/\lambda$)가 곧 문턱 진동수와 같다.

(2) 검출 조건은 접근($v_s > 0$)이다. $v_s = A\sqrt{k/m}\cos\left(\sqrt{k/m}t\right) > 0$ 인 구간은 $0 \le t < T/4$ 와 $3T/4 < t \le T$ 이다. 따라서 $t = T/4$ 부터 검출되지 않다가

$$\boxed{t = \frac{3}{4}T}$$

에서 다시 검출되기 시작한다.

(3) 도플러 편이가 최대인 $t = 0$ 에서 $v_{s0} = A\sqrt{k/m} = c/\left(2\sqrt{2}\right)$. 음파형 도플러로 접근하는 음원의 진동수는 $f' = f \cdot c/(c - v_{s0})$. 문턱 진동수가 f 이므로 최대 운동 에너지는

$$K_{\max} = h(f' - f) = hf \cdot \frac{v_{s0}}{c - v_{s0}} = \frac{hf}{2\sqrt{2}-1} = hf \cdot \frac{2\sqrt{2}+1}{7}$$

$$= \frac{hc}{\lambda} \cdot \frac{2\sqrt{2}+1}{7}$$

문제 2. n차원 우주의 중력·전자기력 — 궤도·보어 모형·화학 결합

문항 및 제시문

우리가 살고 있는 3차원 공간의 우주 U 에는 중요한 힘이 있는데 중력과 전기력이다. 뉴턴의 중력 법칙에 따르면, 질량이 각각 M, m 인 두 물체가 거리 r 만큼 떨어져 있을 때, 두 물체 사이에 작용하는 중력의 크기는 아래와 같다.

$$F_{\text{중력}} = G\frac{Mm}{r^2} \quad (G \text{ 는 3차원 중력 상수})$$

또한, 쿨롱 법칙에 따르면, 전하량이 각각 q_1, q_2 인 두 점전하가 거리 r 만큼 떨어져 있을 때, 두 점전하 사이에 작용하는 전기력의 크기는 아래와 같다.

$$F_{\text{전기}} = k\frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (k \text{ 는 3차원 쿨롱 상수})$$

가상의 2차원 공간 우주 U′ 에서는 뉴턴의 중력 법칙과 쿨롱 법칙이 각각 아래와 같이 변한다고 가정한다.

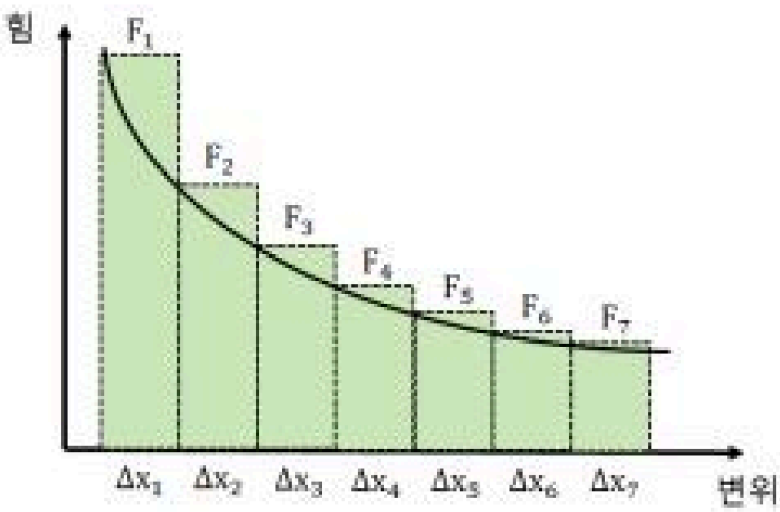
$$F'_{\text{중력}} = G'\frac{Mm}{r} \quad (G' \text{ 은 2차원 중력 상수})$$

$$F'_{\text{전기}} = k'\frac{|q_1 q_2|}{r} \quad (k' \text{ 은 2차원 쿨롱 상수})$$

우주 U′ 에서 플랑크 상수 h, 양성자와 전자의 전하량 $\pm e$, 전자의 질량 m_e, 광속 c 는 우주 U 에서와 같다고 가정한다.

[토막글 1] 퍼텐셜 에너지 함수와 힘이 일정하지 않을 때의 일

중력·전기력의 크기와 같고 방향이 반대인 힘 $F_{\text{외부}}$ 로 위치 r_A 에서 r_B 까지 해 준 일을 그 위치에서의 중력·전기력에 의한 퍼텐셜 에너지의 변화량으로 정의한다. 힘이 해 준 일의 크기는 힘–변위 그래프 아래의 넓이(정적분)로 구할 수 있다. [그림 1]처럼 작은 사각형들의 넓이 합으로 근사하며, 사각형 폭을 잘게 나눌수록 정확해진다.



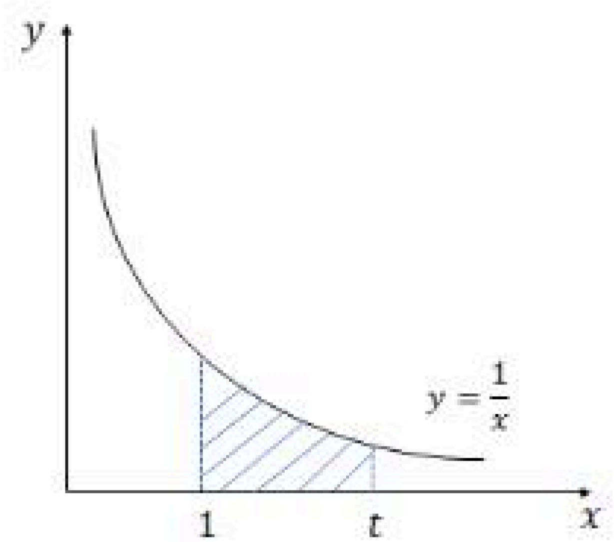
[그림 1] 힘–변위 그래프 아래의 넓이(정적분) 근사

[토막글 2] $y = \dfrac{1}{x}$ 함수 그래프 아래의 면적

[그림 2]에서 함수 $y = 1/x$ 와 $x = 1$, $x = t$, x축으로 둘러싸인 영역의 넓이는

$$\int_1^t \frac{1}{x}dx = \log_e t = \ln t$$

로 주어진다. $\log_e$ 의 밑 e 는 어떤 무리수 $(2.718...)$ 이다.



[그림 2] $y = 1/x$ 그래프 아래의 넓이 $= \ln t$

2-1.

우주 U 에서 같은 질량 m 을 갖는 행성 1과 행성 2가 질량 M 인 항성을 중심으로 각각 반지름 R 과 $10R$ 인 등속 원운동을 하고 있다고 하자. (단, M 은 m 에 비해 매우 크고, 행성 1과 행성 2 사이의 중력은 무시한다.)

(1) 행성 1과 행성 2의 운동 에너지의 차이를 구하시오.

(2) 행성 1과 행성 2의 중력 퍼텐셜 에너지의 차이를 구하시오.

우주 U′ 에서 같은 상황을 가정하였을 때,

(3) 행성 1과 행성 2의 운동 에너지의 차이를 구하시오.

(4) 행성 1과 행성 2의 중력 퍼텐셜 에너지의 차이를 구하시오.

2-2.

우주 U′ 에서는 케플러 제3법칙이 어떻게 변할지 설명하시오. (단, 행성의 운동은 원운동으로 가정한다.)

2-3.

우주 U 의 수소 원자에서 양자수 n 인 전자의 반지름 r_n 은 $r_n = n^2 a_0$ 이고, 에너지 E_n 은 $E_n = -\left|E_1\right| / n^2$ 인 관계를 만족한다. (단, a_0 는 보어 반지름이다.)

(1) 우주 U′ 에서 우주 U 에서와 같은 보어 양자가설을 적용할 수 있을 때, 우주 U′ 의 가상 수소 원자에서 양자수 n 인 전자의 반지름 r_n' 과 에너지 E_n' 을 구하시오. (단, 중력에 의한 효과는 무시한다.)

(2) 우주 U′ 에서 전자가 양자수 n_2 상태에서 n_1 상태로 전이할 때 방출되는 빛의 파장을 구하시오. (단, $n_2 > n_1$)

2-4.

[문제 2-3 (1)]의 결과를 참조하여 다음 질문에 답하시오.

(1) 우주 U′ 에서 가상 수소 원자의 바닥 상태$(n = 1)$에 있던 전자가 수소 원자로부터 완전히 벗어나는 데 필요한 에너지를 구하시오.

(2) 수소 원자가 다른 원자와 결합하는 관점에서 우주 U 과 우주 U′ 이 어떤 차이가 있을지 설명하시오.

2-5.

[문제 2-3]과 [문제 2-4]에서 확인했듯이 3차원 공간 우주 U 와 2차원 공간 우주 U′ 는 미시 세계에서 아주 다른 결과를 만들어내는데, 이 근본적인 원인을 퍼텐셜 에너지 함수의 개형을 기반으로 설명하시오.

2-6.

제시문에서 3차원 공간 우주 U 와 달리 2차원 공간 우주 U′ 에서는 전기력의 크기가 거리에 반비례함을 제시하였다. 정전하에서 전기력선의 분포를 고려하여 이를 설명하시오.

예시 답안 — 문제 2

2–1.

우주 U (역제곱 힘). 등속 원운동에서 $GMm/r^2 = mv^2/r$ 이므로 $v^2 = GM/r$, 운동 에너지 $K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{2r}$. 중력 퍼텐셜 에너지는 $U = -GMm/r$.

(1)

$$K_1 - K_2 = \frac{GMm}{2R} - \frac{GMm}{2 \cdot 10R} = \frac{9}{20}\frac{GMm}{R}$$

(2)

$$U_1 - U_2 = -\frac{GMm}{R} + \frac{GMm}{10R} = -\frac{9}{10}\frac{GMm}{R}$$

우주 U′ ($F' = G'Mm/r$). 원운동 $G'Mm/r = mv^2/r$ 이므로 $v^2 = G'M$ (r 에 무관), $K' = \frac{1}{2}G'Mm$ (반지름과 무관하게 일정).

(3)

$$K_1' - K_2' = \frac{1}{2}G'Mm - \frac{1}{2}G'Mm = 0$$

(4) $F' = -dU'/dr$ 에서 $U'(r) = G'Mm\ln r + C$ (토막글 2의 $\int(1/r)dr = \ln r$ 이용). 따라서

$$U_1' - U_2' = G'Mm(\ln R - \ln 10R) = -G'Mm\ln 10$$

2–2.

우주 U′ 에서 $v = \sqrt{G'M}$ 로 반지름과 무관하게 일정하다. 주기 $T = 2\pi r/v = 2\pi r/\sqrt{G'M}$ 이므로 $T \propto r$, 즉

$$\boxed{T^2 \propto r^2 \quad \left(\frac{T^2}{r^2} = \frac{4\pi^2}{G'M}\right)}$$

우주 U 의 케플러 제3법칙 $T^2 \propto r^3$ 이 우주 U′ 에서는 $T^2 \propto r^2$ 로 바뀐다.

2–3.

보어 양자화 조건: $m_e vr = n\frac{h}{2\pi} = nh/(2\pi)$.

(1) 우주 U′ 의 쿨롱력 $F' = k'e^2/r$. 원운동 $k'e^2/r = m_e v^2/r$ 에서 $v^2 = k'e^2/m_e$, 즉 $v = e\sqrt{k'/m_e}$ (n 에 무관). 양자화 조건에서 반지름은

$$r_n' = \frac{n\frac{h}{2\pi}}{m_e v} = \frac{n\frac{h}{2\pi}}{e\sqrt{k'm_e}} = \frac{nh}{2\pi e\sqrt{k'm_e}} \quad (\propto n)$$

운동 에너지는 $K = \frac{1}{2}k'e^2$ (모든 n 에서 일정), 퍼텐셜 에너지는 $U' = k'e^2\ln r + C$ 이므로 에너지는

$$E_n' = \frac{1}{2}k'e^2 + k'e^2\ln r_n' + C = k'e^2\ln n + \text{상수}$$

(n 이 커질수록 로그로 증가한다.)

(2) 방출 광자의 에너지는 $E_{n_2}' - E_{n_1}' = k'e^2\ln(n_2/n_1)$. 따라서 파장은

$$\lambda = \frac{hc}{E_{n_2}' - E_{n_1}'} = \frac{hc}{k'e^2\ln(n_2/n_1)}$$

2–4.

(1) 전자를 완전히 떼어내려면 $n \to \infty$ 이어야 한다. $E_\infty' - E_1' = k'e^2(\ln\infty - \ln 1) = \infty$. 즉

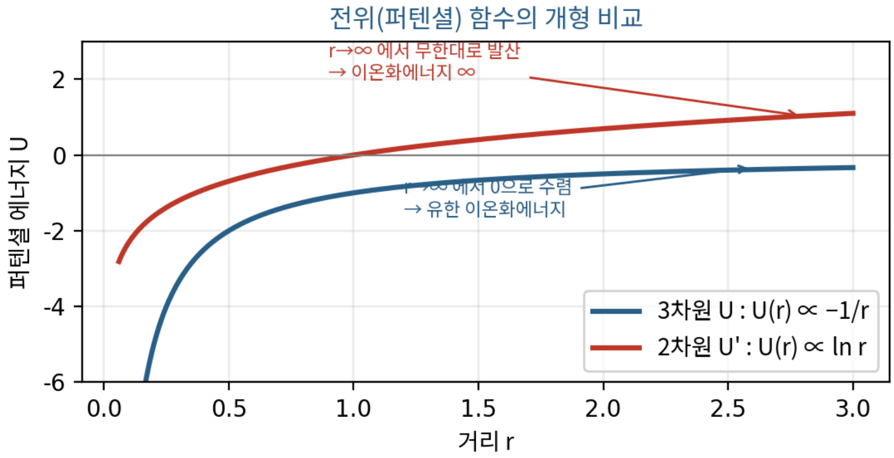
$$\boxed{\text{필요한 에너지} = \infty \ (\text{무한대})}$$

유한한 에너지로는 전자를 떼어낼 수 없다.

(2) 우주 U 에서는 이온화 에너지가 유한하여 전자를 잃거나 공유할 수 있으므로 원자들이 서로 결합(이온·공유 결합)하여 분자를 만들 수 있다. 반면 우주 U′ 에서는 이온화 에너지가 무한대여서 전자를 원자로부터 떼어낼 수 없으므로 원자들이 다른 원자와 결합할 수 없다. 즉 우주 U′ 에서는 화학 결합·분자가 성립하지 않는다.

2–5.

근본적인 차이는 퍼텐셜 에너지 함수의 개형에 있다. 3차원 우주 U 에서는 $U \propto -1/r$ 로, $r \to \infty$ 에서 0 으로 수렴한다(우물의 깊이가 유한). 따라서 유한한 에너지로 전자를 무한히 떼어낼 수 있다. 반면 2차원 우주 U′ 에서는 $U \propto \ln r$ 로, $r \to \infty$ 에서 무한대로 발산하는 가둠(confining) 퍼텐셜이다. 따라서 전자를 떼어내는 데 무한한 에너지가 필요하여 전자가 원자에 영구히 속박된다. 이 퍼텐셜 개형의 차이가 두 우주의 미시 세계 결과를 근본적으로 다르게 만든다.



예시 그래프 — 3차원($-1/r$) 대 2차원($\ln r$) 퍼텐셜 개형 비교

2–6.

전기력선 관점에서 설명할 수 있다. 정전하에서 나오는 전기력선의 총 개수는 전하량에 비례하며, 어떤 닫힌 경계를 지나든 보존된다.

3차원 공간에서는 전하를 둘러싼 구의 겉넓이가 $4\pi r^2 \propto r^2$ 이므로 단위 넓이를 지나는 력선의 밀도(전기장)는 $\propto 1/r^2$ 이고, 따라서 힘이 $\propto 1/r^2$ 이다.

2차원 공간에서는 전하를 둘러싼 원의 둘레가 $2\pi r \propto r$ 이므로 단위 길이를 지나는 력선의 밀도(전기장)는 $\propto 1/r$ 이고, 따라서 힘이 거리에 반비례($\propto 1/r$)한다. 같은 이유로 중력도 2차원에서 $1/r$ 을 따른다.