

완자 · 역학과 에너지

내신만점 · 실력UP 집중

I 시공간과 운동
2 중력의 작용과 등가 원리

03

일반 상대성 이론

내신만점 · 실력UP

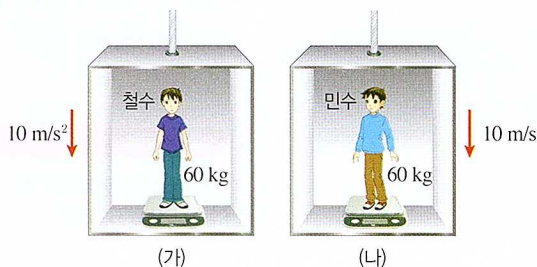
I-2-03 일반 상대성 이론



내신 만점 문제

A 가속 좌표계와 관성력

중요 01 그림 (가), (나)와 같이 지표면 근처에서 엘리베이터가 운동하고 있다. (가)의 철수는 아래 방향으로 10 m/s^2 의 일정한 가속도로 운동하는 엘리베이터 안에서, (나)의 민수는 아래 방향으로 10 m/s 의 일정한 속도로 운동하는 엘리베이터 안에서 각각 체중계에 올라가 있다. 철수와 민수의 질량은 60 kg 으로 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 가속도는 10 m/s^2 이다.)

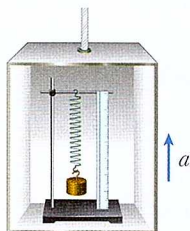
[보기]

- ㄱ. (가)에서 철수에 작용하는 관성력의 크기는 (나)에서 민수에 작용하는 관성력의 크기와 같다.
- ㄴ. (가)에서 체중계의 눈금은 0을 나타낸다.
- ㄷ. (나)에서 엘리베이터가 5 m/s 의 일정한 속도로 운동하면 체중계에 측정되는 민수의 몸무게는 증가한다.

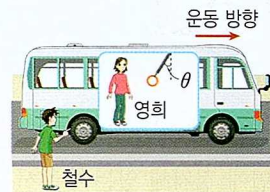
- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

서술형

02 그림과 같이 지표면 근처에서 정지해 있는 엘리베이터의 안의 용수철에 추를 매달아 놓았다. 엘리베이터가 위 방향으로 일정한 가속도로 올라가는 동안 용수철의 길이가 어떻게 되는지를 그 까닭과 함께 서술하시오.



[03~04] 그림과 같이 오른 쪽으로 운동하는 버스 안에서 연직 방향과 일정한 각 θ 만큼 왼쪽으로 기울어진 손잡이를 버스 안에서는 영희가, 지면에서는 철수가 관찰하고 있다. 이 순간 버스의 속력은 v 이다.



중요 03 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. 영희가 관찰할 때, 손잡이에 작용하는 알짜힘은 0이다.
- ㄴ. 영희가 관찰할 때, 손잡이에 작용하는 관성력의 방향은 왼쪽이다.
- ㄷ. 철수가 관찰할 때, 버스의 속력은 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04 버스의 손잡이가 왼쪽으로 각 θ 보다 더 크게 기울어질 수 있는 경우로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. 버스의 가속도의 크기가 증가할 때
- ㄴ. 버스의 가속도의 방향이 반대일 때
- ㄷ. 버스가 $2v$ 의 속력으로 등속도 운동할 때

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중요 05 그림 (가)~(다)와 같이 철수가 엘리베이터를 타고 올라가고 있다. 지표면에서 철수의 몸무게는 w 이다.

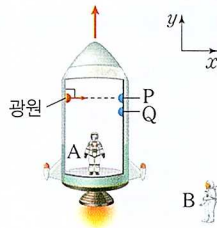


(가) 지표면에서 가속도 g 로 올라갈 때 (나) 지표면에서 등속도로 올라갈 때 (다) 중력이 작용하지 않는 공간에서 가속도 g 로 운동할 때

(가)~(다)의 엘리베이터 안에서 측정된 철수의 몸무게를 각각 쓰시오. (단, 중력 가속도는 g 이다.)

B 등가 원리

06 그림과 같이 텅 빈 우주 공간에서 정지한 관찰자 B에 대해 관찰자 A가 탄 우주선이 y 축과 나란한 방향으로 등가속도 직선 운동을 하고 있다. A가 관찰할 때, 우주선 내부의 광원에서 검출기 P를 향해 발사된 빛은 휘어져 검출기 Q에 도달한다.



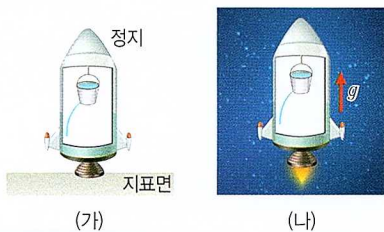
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. A가 관찰할 때, A에 작용하는 관성력의 방향은 $-y$ 방향이다.
- ㄴ. B가 관찰할 때, 우주선의 속력은 증가한다.
- ㄷ. A가 관찰할 때, 빛이 휘어지는 까닭을 중력 때문인지 관성력 때문인지 구별할 수 없다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중요 07 그림 (가)는 지표면에 정지한 우주선 내부의 물통에서 물이 떨어지는 모습을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)의 우주선이 중력이 작용하지 않는 우주에서 g 의 가속도로 운동할 때 물통에서 (가)와 같이 물이 떨어지는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 가속도는 g 이다.)

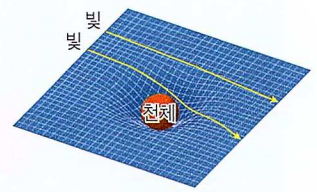
[보기]

- ㄱ. (나)에서 물에 작용하는 관성력의 방향은 운동 방향과 반대 방향이다.
- ㄴ. (나)의 우주선 안에 있는 사람은 물이 떨어지는 까닭이 중력 때문인지 관성력 때문인지 구별할 수 없다.
- ㄷ. 우주선 안의 시간은 (가)에서가 (나)에서보다 느리게 흐른다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

C 중력 렌즈 효과

08 그림은 질량이 큰 천체 근처에서 휘어진 공간을 따라 빛이 진행하는 모습을 나타낸 것이다.



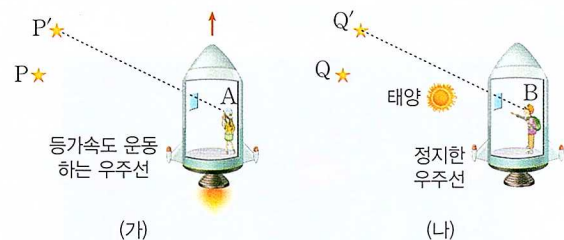
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. 천체의 질량이 클수록 공간이 휘어진 정도가 크다.
- ㄴ. 천체에 가까울수록 공간이 휘어진 정도가 크다.
- ㄷ. 천체의 중력에 의해 공간이 휘어지는 현상은 일반 상대성 이론으로 설명할 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중요 09 그림 (가)는 텅 빈 우주 공간에서 등가속도 운동을 하는 우주선 안의 관찰자 A가 별빛을 관찰하는 모습을, (나)는 정지한 우주선 안의 관찰자 B가 태양 근처를 지나온 별빛을 관찰하는 모습을 나타낸 것이다. A는 P에 있는 별을 P'에 있는 것으로, B는 Q에 있는 별을 Q'에 있는 것으로 관찰한다.



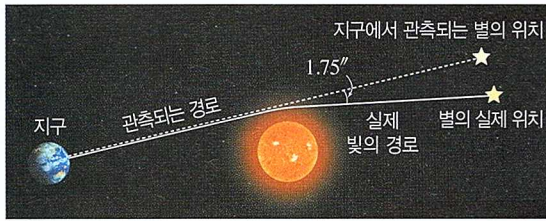
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. (가)에서 우주선의 가속도가 증가하면 P와 P'의 거리 차이가 증가한다.
- ㄴ. (나)에서 태양의 중력은 Q에서 오는 별빛을 휘게 한다.
- ㄷ. (나)에서 태양의 질량만이 증가하면 Q와 Q'의 거리 차이도 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중요 10 그림은 태양 근처를 지나는 별빛의 경로를 나타낸 것이다.



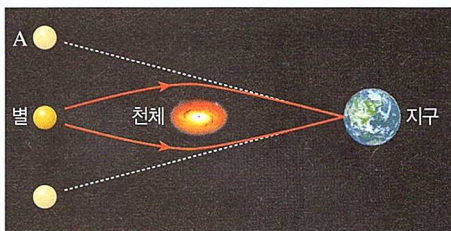
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 태양 주변의 공간은 휘어져 있다.
- ㄴ. 태양보다 질량이 큰 천체의 주변을 지날 때, 별빛은 더 많이 휘어질 것이다.
- ㄷ. 태양보다 질량이 작은 천체 주변을 지날 때, 별빛은 직진한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

11 그림은 중력 렌즈 효과를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 질량이 큰 천체 근처에서 빛이 휘어진다.
- ㄴ. 지구에서 볼 때, 별은 A에 있는 것처럼 보인다.
- ㄷ. 천체의 질량이 증가할수록 별과 A 사이의 거리는 감소한다.

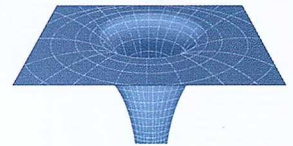
- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

D 블랙홀

12 블랙홀에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?

- ① 블랙홀에 접근할수록 시공간의 휘어짐이 증가한다.
- ② 블랙홀 내부의 탈출 속도는 빛의 속도보다 작다.
- ③ 질량이 매우 큰 별이 붕괴하여 수축하면서 블랙홀이 형성된다.
- ④ 블랙홀에 접근할수록 시간이 더 느리게 흐른다.
- ⑤ 간접적으로 블랙홀의 위치를 확인할 수 있다.

중요 13 그림은 블랙홀 주위의 시공간을 나타낸 것이다.



블랙홀에 가까워질수록 나타나는 현상에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 중력이 더 커진다.
- ㄴ. 시공간이 더 많이 휘어져 있다.
- ㄷ. 시간이 더 느리게 흐른다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

14 그림은 블랙홀의 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

보기

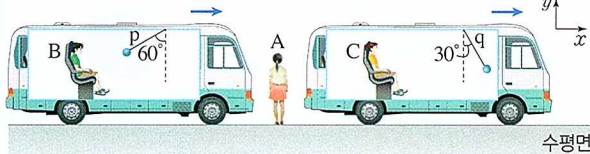
- ㄱ. 블랙홀의 질량이 클수록 블랙홀 주변의 시공간이 더 많이 휘어진다.
- ㄴ. 블랙홀 내부에서는 빛조차 벗어날 수 없다.
- ㄷ. 블랙홀끼리 충돌하면 질량의 공간적 분포에 큰 변화가 생겨 주위 시공간의 변화가 일어날 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ



실력UP 문제

01 그림과 같이 수평면에 정지해 있는 관찰자 A에 대해 관찰자 B, C가 탄 버스가 $+x$ 방향으로 수평면과 나란하게 직선 운동한다. 동일한 물체가 각각 실 p, q에 연결되어 버스 천장에 매달려 있고, p, q가 연직선과 이루는 각은 각각 60° , 30° 로 일정하다. p, q가 물체에 작용하는 힘의 크기는 각각 F_p , F_q 이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 실의 질량은 무시한다.)

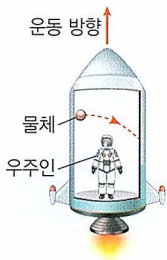
[보기]

- ㄱ. A가 관찰할 때, B, C가 각각 탄 버스의 가속도의 방향은 서로 반대 방향이다.
- ㄴ. C가 관찰할 때, q에 매달린 물체에 작용하는 관성력의 방향은 $+x$ 방향이다.
- ㄷ. $F_p = \sqrt{3}F_q$ 이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02 다음은 우주 공간에서 일어나는 현상에 대한 설명이다.

- 그림과 같이 [가] 운동을 하는 우주선에 탄 우주인이 관찰할 때, 우주선 안에서 던진 물체는 지표면에서 던진 것처럼 포물선 운동을 한다.
- 우주선에 탄 우주인은 물체의 운동이 우주선의 [가] 운동에 의한 관성력 때문인지, 중력에 의한 것인지 구별할 수 없는데, 이를 [나] 라고 한다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, 모든 마찰과 공기 저항은 무시한다.)

[보기]

- ㄱ. (가)는 '가속도'이다. ㄴ. (나)는 '등가 원리'이다.
- ㄷ. 우주선에 탄 우주인에 작용하는 관성력의 크기는 우주선의 가속도의 크기에 비례한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

03 그림은 학생이 일반 상대성 이론에 대해 설명하는 모습을 나타낸 것이다.



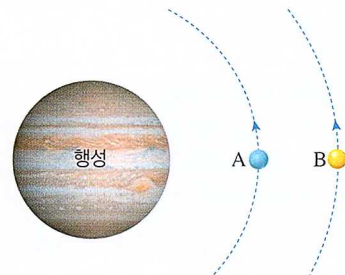
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은?

[보기]

- ㄱ. ①은 중력 렌즈 효과에 의한 현상이다.
- ㄴ. ②으로 블랙홀을 설명할 수 있다.
- ㄷ. 태양의 질량만이 증가하면 밤일 때와 일식이 일어날 때의 별들의 거리 차이가 감소한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04 그림은 행성 주위를 원운동하고 있는 위성 A와 B를 나타낸 것이다. 행성으로부터 위성까지의 거리는 A가 B보다 작다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 [보기]에서 있는 대로 고른 것은? (단, A, B의 질량은 같다.)

[보기]

- ㄱ. 위성의 공전 주기는 A와 B가 같다.
- ㄴ. 행성에 의한 시공간의 휘어짐은 A에서가 B에서보다 크다.
- ㄷ. 행성에서 관찰할 때, B의 시간은 A의 시간보다 느리게 흐른다.

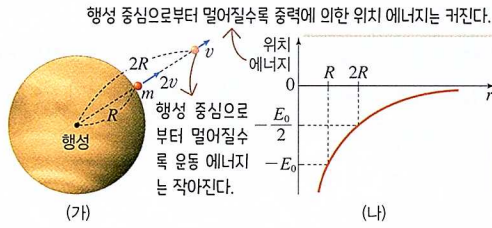
① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

정답 및 해설

내신만점문제 · 실력UP문제
일반 상대성 이론

바로알기 ㄱ. 중력 상수를 G , 행성의 질량을 M , A, B의 질량을 m , A, B의 속력을 각각 v_A, v_B 라고 하면, 물체에 작용하는 중력과 구심력은 같으므로 $G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv_A^2}{r}$ 에서 $v_A = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 이고, $G \frac{Mm}{4r^2} = \frac{mv_B^2}{2r}$ 에서 $v_B = \sqrt{\frac{GM}{2r}}$ 이다. 따라서 속력은 A가 B의 $\sqrt{2}$ 배이다.

02 - 꼼꼼 문제 분석



역학적 에너지가 보존되므로

$$\begin{aligned} \text{행성 중심으로부터 } R \text{인 곳에서의 역학적 에너지} & \left(\frac{1}{2} m (2v)^2 - E_0 \right) \\ = \text{행성 중심으로부터 } 2R \text{인 곳에서의 역학적 에너지} & \left(\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} E_0 \right) \end{aligned}$$

㉓ 물체의 역학적 에너지는 보존되므로 $\frac{1}{2} m (2v)^2 - E_0 = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} E_0$ 에서 $v = \sqrt{\frac{E_0}{3m}}$ 이다. 행성의 탈출 속도를 v_0 이라고 하면, $\frac{1}{2} m v_0^2 - E_0 = 0$ 에서 $v_0 = \sqrt{\frac{2E_0}{m}} = \sqrt{6}v$ 이다.

03 ㄱ. A는 등속 원운동을 하므로 행성의 중심으로부터 A까지의 거리는 일정하다. 따라서 A의 가속도 크기는 일정하다.
 ㄴ. A의 속력은 v_0 이고, p에서 B의 속력은 v_0 보다 작다. 질량은 A가 B보다 크므로 운동 에너지는 A가 B보다 크다.
 ㄷ. A는 v_0 의 속력으로 등속 원운동을 하므로 A는 행성에서 탈출할 수 없다. 행성의 표면에서 v_0 의 속력으로 발사된 물체가 A의 원 궤도를 통과할 때의 속력은 v_0 보다 작으므로 B 또한 탈출할 수 없다. 따라서 행성의 탈출 속도는 v_0 보다 크다.

04 (가)에서 로켓의 운동량 크기는 $3mv$ 이다. (나)에서 로켓과 1단 로켓의 속력을 각각 v_A, v_B 라고 하면, 1단 로켓에 대해 로켓이 v 의 속력으로 운동하므로 $v_A - v_B = v$ 에서 $v_B = v_A - v$ 이다. (나)에서 로켓과 1단 로켓의 운동 방향은 같으므로 운동량 보존 법칙을 적용하면, $3mv = mv_B + 2mv_A$ 에서 $3mv = mv_A - mv + 2mv_A$ 이다. 따라서 $v_A = \frac{4}{3}v$ 이다.

03 / 일반 상대성 이론

개념 확인문제

70쪽

- ① 가속 좌표계 ② 관성력 ③ 관성 ④ 원심력 ⑤ 반대 ⑥ 등가 원리 ⑦ 중력

- 1 (1) ○ (2) × (3) ○ (4) ○ 2 (1) B (2) A (3) A (4) B
 3 (1) ㄱ, ㄴ (2) ㄷ, ㄹ (3) ㄴ, ㄹ 4 (1) ○ (2) ○ (3) ○

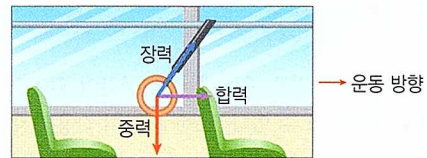
1 (1) 관성력은 가속 좌표계의 가속도 방향과 반대 방향으로 나타난다.

(2) 가속도가 $\vec{a}$ 인 가속 좌표계에 있는 질량이 m 인 물체에 나타나는 관성력의 크기는 가속도의 크기와 질량에 비례하고, 방향은 가속도의 방향과 반대 방향이므로 관성력은 $-m\vec{a}$ 이다.

(3) 구심력은 관성 좌표계 안에서 등속 원운동을 하는 물체에 작용하는 힘이다.

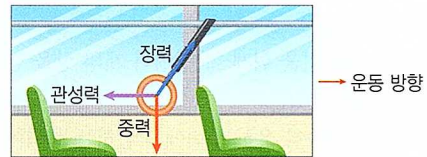
(4) 원심력은 가속 좌표계 안에서 등속 원운동을 하는 관찰자가 느끼는 관성력이다.

2 (1), (4) 지면에 정지해 있는 관찰자가 가속도 운동하는 버스를 관찰하면, 버스 안의 손잡이에는 중력과 줄의 장력이 작용하여 오른쪽 방향으로 가속도 운동을 하는 것으로 보인다.



⦿ 지면에 정지한 관찰자가 볼 때

(2), (3) 버스 안의 관찰자가 볼 때, 버스 안의 손잡이에는 중력과 줄의 장력, 가속 방향과 반대 방향으로 관성력이 작용하여 손잡이가 정지해 있는 것으로 보인다.



⦿ 버스 안의 관찰자가 볼 때

3 관성력은 가속 좌표계에서 작용하며, 가속 좌표계의 가속도 방향과 반대 방향으로 나타난다.

(1) 엘리베이터를 탄 사람에게 중력과 같은 방향으로 관성력이 작용할 때 몸무게가 증가하여 측정된다. 따라서 가속도의 방향은 연직 위 방향이므로 엘리베이터가 위로 출발할 때와 아래로 내려가다 멈출 때가 해당한다.

(2) 엘리베이터를 탄 사람에게 중력과 반대 방향으로 관성력이 작용할 때 몸무게가 감소하여 측정된다. 따라서 가속도의 방향은 연직 아래 방향이므로 엘리베이터가 위로 올라가다 멈출 때와 아래로 출발할 때가 해당한다.

(3) 관성력이 작용하지 않을 때 엘리베이터를 탄 사람의 몸무게가 동일하게 측정된다. 따라서 엘리베이터가 정지해 있거나 등속도 운동할 때 엘리베이터를 탄 사람의 몸무게가 동일하게 측정된다.

4 (1) 등가 원리에 따라 중력과 관성력은 구별할 수 없다.

(2) 등가 원리에 따라 중력과 관성력은 구별할 수 없으므로 중력 질량과 관성 질량은 서로 같다.

(3) 중력장에서 자유 낙하를 하는 엘리베이터에 탄 사람은 중력과 같은 크기의 관성력이 중력과 반대 방향으로 작용하므로 중력을 느끼지 못한다.

개념확인문제

73쪽

① 중력 ② 중력 렌즈 ③ 볼록 ④ 느리게 ⑤ 블랙홀

1 중력이 작용하는 경우, 우주선이 위로 가속 운동하는 경우

2 (1) ○ (2) ○ (3) ○ 3 (1) × (2) ○ (3) × 4 E 5 ㉠ 빛,

㉡ 느리게 6 (1) ○ (2) ×

1 중력이 작용하는 경우 중력에 의해 공간이 휘어져 (나)와 같이 빛의 경로가 관찰될 수 있다. 또한 중력이 작용하지 않는 공간에서 우주선이 위로 가속 운동하는 경우 관성력이 아래로 작용하여 등가 원리에 따라 (나)와 같이 빛의 경로가 관찰될 수 있다.

2 (1) 무거운 천체 주변은 중력에 의해 공간이 휘어져 있다. 따라서 무거운 천체 주변을 지나는 빛은 시공간의 휘어짐에 따라 휘어서 진행한다.

(2) 중력이 렌즈처럼 빛을 휘게 하여 여러 개의 상을 만드는 것을 중력 렌즈 효과라고 한다.

(3) 은하의 질량이 클수록 은하 주변에 작용하는 중력이 커지므로 빛이 휘어지는 정도가 커진다. 따라서 관찰된 별의 위치와 실제 위치의 거리 차이가 더 많이 난다.

3 (1) 중력이 클수록 시공간이 많이 휘어지므로 시간이 느리게 흐른다.

(2) 행성에 가까워질수록 중력이 증가하므로 시간이 느리게 흐른다.

(3) 등가 원리에 따라 관성력에 의해서도 빛이 휘어질 수 있다.

4 지구에서 가장 가까운 천체는 중력 렌즈 역할을 한 사진 중앙의 은하단인 E이다.

5 중력이 매우 커서 시공간이 극단적으로 휘어져 탈출 속도가 빛의 속도보다 큰 천체를 블랙홀이라고 한다. 블랙홀에 가까이 갈수록 중력이 커지므로 시간이 느리게 가며, 블랙홀의 탈출 속도가 빛의 속도보다 크므로 블랙홀에서는 빛조차 빠져나가지 못한다.

6 (1) 중력이 큰 곳일수록 빛이 더 많이 휘어지므로 중력에 의한 시간 지연이 더 크게 나타난다.

(2) 시계에 작용하는 중력이 지표면에서가 인공위성에서보다 크므로 일반 상대성 이론에 따라 시간은 지표면에서가 인공위성에서보다 느리게 흐른다.

대표자료분석 1

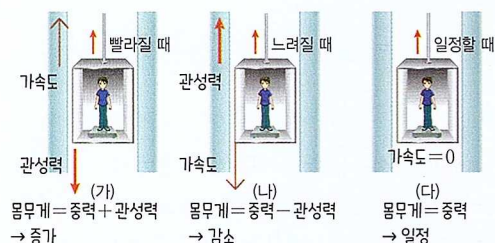
74쪽

1 (가) 증가한다. (나) 감소한다. (다) 변하지 않는다. 2 증가한다.

3 변하지 않는다. 4 (1) 가속 좌표계 (2) 비례한다 (3) 비례한다

5 (1) × (2) × (3) × (4) ○ (5) ○

꼼꼼 문제 분석



1 • (가)에서 엘리베이터는 위로 가속하므로 관성력이 중력과 같은 방향으로 작용한다. 따라서 (가)의 엘리베이터 안에서 측정한 철수의 몸무게는 중력과 관성력의 합이므로 증가한다.

• (나)에서 엘리베이터는 아래로 가속하므로 관성력이 중력과 반대 방향으로 작용한다. 따라서 (나)의 엘리베이터 안에서 측정한 철수의 몸무게는 중력과 관성력의 차이이므로 감소한다.

• (다)에서 엘리베이터의 가속도가 0이므로 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 (다)의 엘리베이터 안에서 측정한 철수의 몸무게는 변하지 않는다.

2 (가)에서 엘리베이터의 가속도가 증가하면 관성력이 증가하므로 철수의 몸무게는 증가한다.

3 (다)에서 엘리베이터의 속력이 증가하여도 가속도는 0이므로 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 철수의 몸무게는 변하지 않는다.

4 (1) 관성력은 가속 좌표계에서 관찰자가 느끼는 가상적인 힘이다.

(2), (3) 관성력의 크기는 가속 좌표계의 가속도의 크기와 물체의 질량에 비례한다.

5 (1) 관성력은 가속 좌표계에서 작용하는 가상적인 힘이다.

(2), (3) 관성력은 가속도의 방향과 반대 방향으로 작용하므로 중력과 항상 반대 방향인 것은 아니다.

(4) (가)에서 엘리베이터가 가속 운동하므로 철수에 작용하는 힘은 중력과 관성력이다.

(5) (다)에서 엘리베이터가 등속도 운동을 하므로 (다)의 엘리베이터는 관성 좌표계이다.

4 (나)에서 행성의 중력이 증가하면 공의 낙하 시간은 감소한다.

5 (1) 관성력의 크기는 가속 좌표계의 가속도의 크기에 비례한다.

(2) 등가 원리에 따라 가속 좌표계에서 나타나는 관성력을 중력과 구별할 수 없다.

(3) 아인슈타인은 관성력과 중력을 구별할 수 없는 등가 원리를 바탕으로 일반 상대성 이론을 발전시켰다.

6 (1) 등가 원리에 따라 우주선 안의 사람은 관성력과 중력을 구별할 수 없다.

(2) $a=g$ 일 때, 공에 작용하는 관성력과 중력이 같으므로 같은 높이에서 공이 낙하하는 데 걸리는 시간은 (가)에서와 (나)에서가 같다.

(3) (가)에서 우주선 안의 사람이 볼 때 공은 관성력을 받아 가속도 운동을 한다.

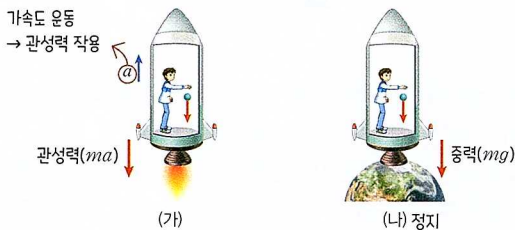
(4) $a=g$ 일 때, 관성력과 중력이 같으므로 사람이 우주선 바닥을 누르는 힘은 (가)에서와 (나)에서가 같다.

대표자료 분석 2

75쪽

1 등가 원리 2 (가) 관성력, (나) 중력 3 감소한다. 4 감소한다. 5 (1) 비례한다 (2) 없다 (3) 일반 상대성 이론 6 (1) ○ (2) ○ (3) × (4) ○

꼼꼼 문제 분석



1 (가), (나)에서 공은 동일하게 아래로 낙하한다. 따라서 등가 원리에 따라 우주선 안의 사람은 (가), (나)를 구별할 수 없다.

2 (가)에서는 가속도의 방향과 반대 방향으로 관성력이 작용하므로 공이 관성력을 받아 낙하한다. (나)에서 우주선은 지표면에 있으므로 중력에 의해 물체가 낙하한다.

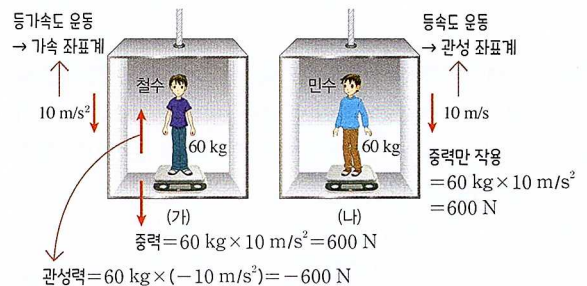
3 (가)에서 우주선의 가속도의 크기가 증가하면 공에 작용하는 관성력의 크기가 증가하므로 공의 낙하 시간은 감소한다.

나신만점문제

76쪽~78쪽

01 ② 02 해설 참조 03 ⑤ 04 ①
05 (가) $2w$, (나) w , (다) w 06 ⑤ 07 ③ 08 ⑤
09 ⑤ 10 ③ 11 ③ 12 ② 13 ⑤ 14 ⑤

01 꼼꼼 문제 분석



나. (가)에서 엘리베이터가 아래로 가속하므로 철수에 작용하는 관성력은 중력과 반대 방향으로 600 N이다. 따라서 (가)에서 철수에 작용하는 합력이 0이므로 체중계의 눈금은 0을 나타낸다.

바로알기 ㄱ. (가)에서 철수에 작용하는 관성력의 크기는 600 N 이고, (나)에서 민수에 작용하는 관성력의 크기는 0이므로 철수에 작용하는 관성력의 크기가 크다.

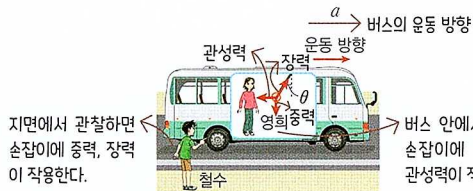
ㄷ. 일정한 속도로 운동하는 좌표계에서는 관성력이 작용하지 않으므로 체중계에 측정되는 민수의 몸무게는 변하지 않는다.

02 정지한 엘리베이터가 위로 올라가려면 가속도의 방향은 연직 위 방향이다. 따라서 관성력은 가속도의 방향과 반대 방향인 연직 아래 방향으로 작용한다.

모범 답안 엘리베이터 안의 추에는 가속도의 방향과 반대 방향인 연직 아래 방향으로 관성력이 작용한다. 따라서 추에는 관성력과 중력이 연직 아래 방향으로 작용하므로 용수철의 길이는 엘리베이터가 정지했을 때보다 늘어난다.

채점 기준	배점
관성력과 중력을 이용하여 용수철의 길이가 정지했을 때보다 늘어남을 옳게 서술한 경우	100 %
용수철의 길이가 정지했을 때보다 늘어남만을 서술한 경우	50 %

03 — 찰칵 문제 분석



ㄱ. 영희가 관찰할 때, 버스의 손잡이는 일정한 각도로 기울어져 있으므로 손잡이에 작용하는 알짜힘은 0이다.

ㄴ. 영희가 관찰할 때, 장력과 중력의 합력의 방향이 오른쪽이므로 손잡이에 작용하는 관성력의 방향은 왼쪽이다.

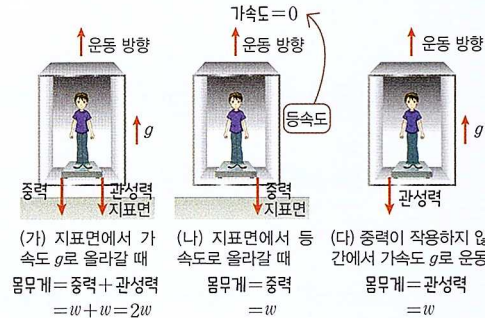
ㄷ. 철수가 관찰할 때, 손잡이에 작용하는 힘은 장력과 중력이고, 버스 손잡이가 일정한 각도로 기울어져 있으므로 합력의 크기는 일정하다. 따라서 철수가 관찰할 때, 버스의 속력은 증가한다.

04 ㄱ. 버스의 손잡이가 왼쪽으로 더 크게 기울어지려면 왼쪽으로 작용하는 힘이 증가하여야 한다. 버스의 가속도의 크기가 증가하면 관성력의 크기가 증가하므로 버스의 손잡이는 왼쪽으로 더 크게 기울어진다.

바로알기 ㄴ. 버스의 가속도의 방향이 왼쪽이면, 버스 안의 손잡이에 작용하는 관성력의 방향은 오른쪽이다. 따라서 버스의 손잡이가 오른쪽으로 기울어진다.

ㄷ. 관성력은 가속 좌표계에서만 작용하므로 버스가 등속도 운동을 하면 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 더 빠른 속력으로 등속도 운동을 하여도 버스의 손잡이는 기울어지지 않는다.

05 — 찰칵 문제 분석

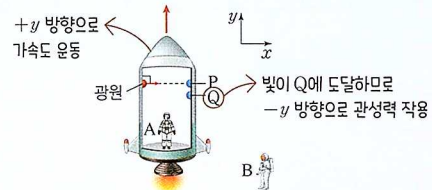


• (가) 중력에 의한 철수의 몸무게가 w 이고, 관성력의 크기와 중력의 크기가 같으므로 관성력은 w 의 크기로 아래 방향으로 작용한다. 따라서 철수의 몸무게는 $2w$ 로 측정된다.

• (나) 지표면에서 등속도로 운동하므로 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 철수에게는 중력만 작용하므로 철수의 몸무게는 w 로 측정된다.

• (다) 중력이 작용하지 않는 공간이므로 관성력만 작용하고, 운동 방향으로 가속하므로 관성력은 w 의 크기로 운동 방향과 반대 방향으로 작용한다. 따라서 철수의 몸무게는 w 로 측정된다.

06 — 찰칵 문제 분석



ㄱ. A가 관찰할 때, P를 향해 발사된 빛이 Q에 도달하므로 A에 작용하는 관성력의 방향은 $-y$ 방향이다.

ㄴ. A에 작용하는 관성력의 방향이 $-y$ 방향이므로, B가 관찰할 때 우주선의 가속도의 방향은 $+y$ 방향이다. 따라서 B가 관찰할 때, 우주선의 속력은 증가한다.

ㄷ. 등가 원리에 따라 A가 관찰할 때, 빛이 휘어지는 까닭이 중력 때문인지 관성력 때문인지 구별할 수 없다.

07 ㄱ. (나)에서 우주선은 운동 방향으로 가속도 운동을 하므로 우주선 안의 물에 작용하는 관성력의 방향은 운동 방향과 반대 방향이다.

ㄴ. 등가 원리에 따라 (나)의 우주선 안에 있는 사람은 물이 떨어지는 까닭이 중력 때문인지 관성력 때문인지 구별할 수 없다.

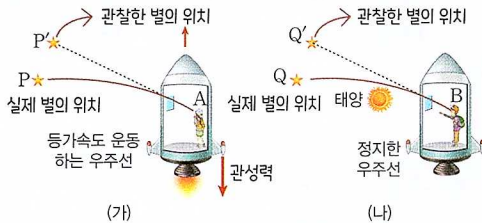
바로알기 ㄷ. 등가 원리에 따라 우주선 안에서는 관성력과 중력을 구별할 수 없고, (나)에서 우주선의 가속도가 g 이므로 (가)에서

중력의 크기와 (나)에서 관성력의 크기가 같다. 따라서 우주선 안에서의 시간은 (가)에서와 (나)에서가 동일하게 흐른다.

08 ㄱ. 천체의 질량이 클수록 중력이 크므로 공간이 더 크게 휘어진다.

- ㄴ. 천체에 가까울수록 중력이 크므로 공간이 더 크게 휘어진다.
 ㄷ. 천체의 중력에 의한 공간의 휘어짐은 일반 상대성 이론으로 설명할 수 있다.

09 ← **꼼꼼 문제 분석**



- ㄱ. 우주선의 가속도가 증가하면 관성력의 크기도 증가한다. 따라서 (가)에서 우주선의 가속도가 증가하면 P와 P'의 거리 차이가 증가한다.
 ㄴ. 태양의 중력에 의해 태양 주변의 공간의 휘어지므로 (나)에서 태양의 중력은 Q에서 오는 별빛을 휘어지게 한다.
 ㄷ. (나)에서 태양의 질량이 증가하면 태양 주변의 공간이 더 크게 휘어진다. 따라서 Q와 Q'의 거리 차이도 증가한다.

10 ㄱ. 태양 주변의 공간은 중력에 의해 휘어져 있다.

ㄴ. 태양보다 질량이 큰 천체의 주변에 작용하는 중력의 크기는 태양 주변보다 크다. 따라서 태양보다 질량이 큰 천체의 주변을 지날 때, 별빛은 더 많이 휘어진다.

[바로알기] ㄷ. 태양보다 질량이 작은 천체 주변에 작용하는 중력의 크기는 태양 주변보다 작다. 따라서 태양보다 질량이 작은 천체 주변을 지날 때 별빛은 태양 주변에 비해 조금 휘어져 진행하고, 직진하지 않는다.

11 ㄱ. 질량이 큰 천체 주변의 공간은 중력에 의해 휘어진다. 따라서 질량이 큰 천체 근처에서 빛이 휘어진다.

ㄴ. 천체 근처에서 빛이 휘어지므로 지구에서 볼 때 별은 별의 실제 위치와는 다른 A에 있는 것처럼 보인다.

[바로알기] ㄷ. 천체의 질량이 증가하면 천체 주변의 공간에 작용하는 중력의 크기가 증가한다. 따라서 천체 주변에서 빛이 더 많이 휘어지므로 천체의 질량이 증가할수록 별과 A 사이의 거리는 증가한다.

12 ①, ④ 블랙홀에 접근할수록 중력이 커지므로 시공간의 휘어짐이 증가하고, 시간이 더 느리게 흐른다.

③ 질량이 매우 큰 별이 붕괴하여 중력에 의해 수축하면서 블랙홀이 형성된다.

⑤ 블랙홀에 가까이 있는 물질이 블랙홀로 빨려 들어갈 때 방출하는 빛을 통해 간접적으로 블랙홀의 위치를 확인할 수 있다.

[바로알기] ② 블랙홀 내부의 탈출 속도는 빛의 속도보다 크다.

13 ㄱ. 블랙홀에 가까워질수록 거리가 감소하므로 중력이 증가한다.

ㄴ, ㄷ. 블랙홀에 가까워질수록 중력이 증가하므로 시공간이 더 많이 휘어지고, 시간이 더 느리게 흐른다.

14 ㄱ. 블랙홀의 질량이 클수록 블랙홀이 주변에 작용하는 중력이 커지므로 블랙홀 주변의 시공간이 더 많이 휘어진다.

ㄴ. 블랙홀의 탈출 속도는 빛의 속도보다 크므로 블랙홀 내부에서는 빛조차 벗어날 수 없다.

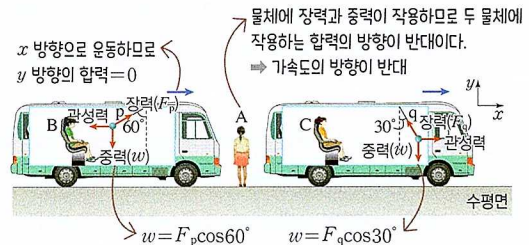
ㄷ. 중력파는 중력이 큰 물체들이 서로 상호작용하여 움직이면 그 주위의 시공간의 휘어짐에 변화가 생겨 시공간의 변화가 사방으로 퍼져나가는 현상이다. 따라서 중력이 큰 블랙홀끼리 충돌하면 질량의 공간적 분포에 큰 변화가 생겨 중력파가 발생하여 주위 시공간의 변화가 일어날 수 있다.

실력 UP 문제

79쪽

01 ⑤ **02** ⑤ **03** ③ **04** ①

01 ← **꼼꼼 문제 분석**



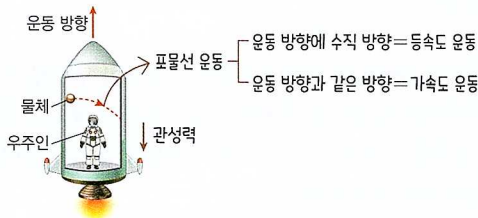
ㄱ. B가 탄 버스에서는 물체가 $-x$ 방향으로 기울어져 있고, C가 탄 버스에서는 물체가 $+x$ 방향으로 기울어져 있다. 따라서 A가 관찰할 때, B, C가 탄 버스의 가속도의 방향은 서로 반대 방향이다.

ㄴ. C가 탄 버스에서 물체가 $+x$ 방향으로 기울어져 있으므로 C가 관찰할 때, q에 매달린 물체에 작용하는 관성력의 방향은 $+x$ 방향이다.

ㄷ. A가 관찰할 때 버스는 x 방향으로만 운동하므로 물체에 y 방향으로 작용하는 합력은 0이다. 따라서 물체의 무게를 w 라 하면, p에서 $w = F_p \cos 60^\circ$, q에서 $w = F_q \cos 30^\circ$ 가 성립한다. 이를 정리하면 $F_p \cos 60^\circ = F_q \cos 30^\circ$ 에서 $F_p = \sqrt{3}F_q$ 이다.

02 ———— 꼼꼼 문제 분석

우주선 밖을 볼 수 없다면 중력과 관성력을 구분할 수 없다. $\Rightarrow$ 등가 원리



ㄱ. 물체가 포물선 운동을 하므로 물체는 우주선의 운동 방향으로 수직 방향으로는 등속도 운동을, 우주선의 운동 방향으로 가속도 운동을 한다. 따라서 (가)는 가속도이다.

ㄴ. 등가 원리에 따라 관성력과 중력을 구분할 수 없으므로 (나)는 등가 원리이다.

ㄷ. 가속 좌표계에서 작용하는 관성력의 크기는 가속도의 크기와 물체의 질량에 각각 비례한다.

03 ㄱ. 중력 렌즈 효과에 의해 별들의 상대적인 위치가 밤일 때와 일식이 일어날 때가 다르게 보인다.

ㄴ. 일반 상대성 이론으로 시공간이 극단적으로 휘어져 있는 블랙홀을 설명할 수 있다.

바로알기 ㄷ. 태양의 질량만이 증가하면 태양 주변에 작용하는 중력이 커지므로 시공간이 더 많이 휘어진다. 따라서 밤일 때와 일식이 일어날 때의 별들의 거리 차이가 증가한다.

04 ㄴ. 행성이 작용하는 중력의 크기는 A가 B보다 크므로 행성에 의한 시공간의 휘어짐은 A에서 B에서보다 크다.

바로알기 ㄱ. 케플러 제3법칙에 따라 같은 행성을 공전하는 위성의 거리가 클수록 공전 주기가 증가한다. 따라서 위성의 공전 주기는 A가 B보다 작다.

ㄷ. 위성에 작용하는 중력이 클수록 시간이 느리게 흐른다. 따라서 행성에서 관찰할 때, 행성에 더 가까이 있는 A의 시간이 B의 시간보다 느리게 흐른다.

중단원 핵심 정리

80쪽~81쪽

- | | | | | | |
|--------|--------|---------|---------|--------|----------------------|
| 1 태양 | 2 빨라 | 3 느려 | 4 긴반지름 | 5 반비례 | 6 $\frac{2\pi r}{T}$ |
| 7 구심력 | 8 세제곱 | 9 탈출 속도 | 10 작으면 | 11 지구형 | |
| 12 목성형 | 13 클수록 | 14 빠를수록 | 15 여러 단 | 16 가속도 | |
| 17 반대 | 18 관성력 | 19 중력 | 20 느리게 | | |

중단원 마무리 문제

82쪽~85쪽

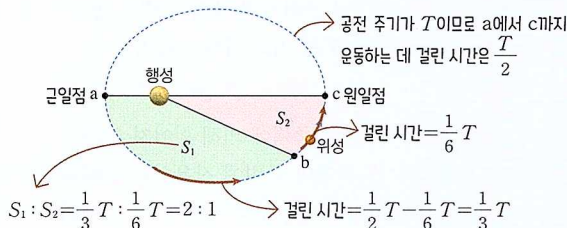
- | | | | | | |
|----------|------|----------|------|----------|------|
| 01 ① | 02 ③ | 03 ② | 04 ③ | 05 ③ | 06 ① |
| 07 ③ | 08 ② | 09 ③ | 10 ③ | 11 ⑤ | 12 ⑤ |
| 13 ① | 14 ⑤ | 15 해설 참조 | | 16 해설 참조 | |
| 17 해설 참조 | | | | | |

01 ㄱ. 케플러 제1법칙에 따라 행성은 태양을 한 초점으로 하는 타원 궤도를 따라 공전한다.

바로알기 ㄴ. 태양으로부터 거리가 멀수록 행성의 속력은 작다. 따라서 지구의 속력은 원일점에서가 근일점에서보다 작다.

ㄷ. 행성의 공전 주기의 제곱은 타원 궤도의 긴반지름의 세제곱에 비례한다. 따라서 ㉠은 제곱이고, ㉡은 세제곱이다.

02 ———— 꼼꼼 문제 분석



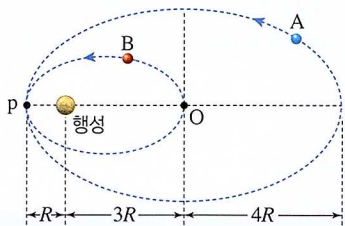
ㄱ. 위성이 타원 궤도를 한 바퀴 공전하는 동안 행성과 위성을 연결한 선분이 휩쓸고 지나간 면적을 S 라고 하면, 위성이 a에서 c까지 운동하는 동안 행성과 위성을 연결한 선분이 휩쓸고 지나간 면적은 $\frac{1}{2}S$ 이다. 위성의 공전 주기는 T 이므로 위성이 a에서 c까지 운동하는 데 걸린 시간은 $\frac{1}{2}T$ 이다.

ㄴ. 위성이 a에서 b까지 운동하는 데 걸린 시간은 $\frac{1}{2}T - \frac{1}{6}T = \frac{1}{3}T$ 이다. b에서 c까지 위성이 운동하는 데 걸린 시간은 $\frac{1}{6}T$ 이므로 위성이 a에서 b까지 운동하는 데 걸린 시간은 b에서 c까지 운동하는 데 걸린 시간의 2배이다. 따라서 $S_1 = 2S_2$ 이다.

바로알기 ㄷ. 행성으로부터의 거리는 a에서 c에서보다 작으므로 위성에 작용하는 중력의 크기는 a에서 c에서보다 크다.

03 ㄴ. p에서 행성으로부터의 거리는 A와 B가 같다. 따라서 p에서 가속도의 크기는 A와 B가 같다.

바로알기 ㄱ. p에서 행성까지의 거리를 R 이라고 하면, p에서 B에 작용하는 중력의 크기는 최대이고, O에서 B에 작용하는 중력의 크기는 최소이다. B에 작용하는 중력의 크기의 최댓값은 최소값의 9배이므로 행성에서 O까지의 거리는 $3R$ 이다. A가 행성으로부터 가장 먼 지점까지의 거리는 $7R$ 이므로 A에 작용하는 중력의 크기의 최댓값은 최소값의 49배이다.



ㄷ. A의 공전 궤도의 긴반지름은 $4R$ 이고, B의 공전 궤도의 긴반지름은 $2R$ 이다. 공전 궤도의 긴반지름은 A가 B의 2배이므로 공전 주기는 A가 B의 $2\sqrt{2}$ 배이다.

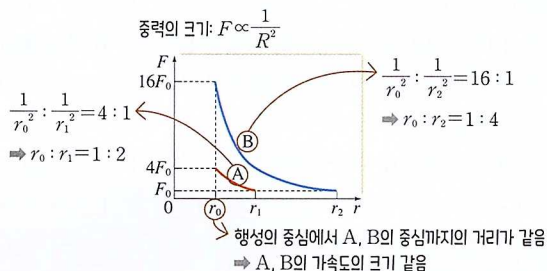
04 ㄱ. 운동 에너지는 A가 B의 4배이다. 질량은 A가 B의 2배이므로 속력은 A가 B의 $\sqrt{2}$ 배이다.

ㄴ. A, B의 속력을 각각 v_A, v_B 라 하면, A에 작용하는 구심력의 크기는 $\frac{(2m)v_A^2}{r_A} = G\frac{M(2m)}{r_A^2}$ 에서 $v_A = \sqrt{\frac{GM}{r_A}}$ 이고, B에 작용하는 구심력의 크기는 $\frac{mv_B^2}{r_B} = G\frac{Mm}{r_B^2}$ 에서 $v_B = \sqrt{\frac{GM}{r_B}}$ 이다.

인공위성의 속력은 A가 B의 $\sqrt{2}$ 배이므로 $\sqrt{\frac{GM}{r_A}} = \sqrt{\frac{2GM}{r_B}}$ 에서 $r_B = 2r_A$ 이다. 따라서 인공위성에 작용하는 중력의 크기는 A가 B의 8배이다.

바로알기 ㄷ. 공전 주기의 제곱은 원 궤도 반지름의 세제곱에 비례한다. 원 궤도의 반지름은 B가 A의 2배이므로 공전 주기는 B가 A의 $2\sqrt{2}$ 배이다.

05 — **꼭꼭 문제 분석**



ㄱ. $r=r_0$ 에서 행성으로부터 거리는 A와 B가 같으므로 가속도의 크기는 A와 B가 같다.

ㄴ. A에 작용하는 중력의 최댓값은 최소값의 4배이므로 $r_1 = 2r_0$ 이다. B에 작용하는 중력의 최댓값은 최소값의 16배이므로 $r_2 = 4r_0$ 이다. 따라서 $r_2 = 2r_1$ 이다.

바로알기 ㄷ. $r=r_0$ 에서 위성에 작용하는 중력의 크기는 B가 A의 4배이므로 질량은 B가 A의 4배이다.

06 ㄱ. 인공위성에 작용하는 중력은 구심력과 같다. 지구의 질량을 M , A의 속력을 v 라고 하면 $G\frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$ 에서 $v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 이다. B의 원 궤도 반지름은 $4r$ 이므로 B의 속력은 $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{GM}{r}} = \frac{1}{2}v$ 이다. 따라서 속력은 A가 B의 2배이다.

바로알기 ㄴ. A의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G\frac{Mm}{r}$ 이고,

B의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G\frac{M(\frac{m}{2})}{4r}$ 이다. 따라서 중력에 의한 위치 에너지는 B가 A보다 $\frac{7GMm}{8r}$ 만큼 크다.

ㄷ. A의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{r}\right) - G\frac{Mm}{r} = -G\frac{Mm}{2r}$ 이고, B의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{GM}{4r}\right) - G\frac{M(\frac{m}{2})}{4r} = -G\frac{Mm}{16r}$ 이다. 따라서 역학적 에너지는 B가 A보다 $\frac{7GMm}{16r}$ 만큼 크다.

07 ㄱ. 인공위성에 작용하는 지구에 의한 중력은 인공위성에 작용하는 구심력과 같다. 지구의 질량을 M , A의 속력을 v 라고 하면, $G\frac{Mm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$ 에서 $v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ 이다. 즉, 원 궤도의 반지름이 클수록 속력은 작다. 원 궤도의 반지름은 A가 B보다 작으므로 속력은 A가 B보다 크다.

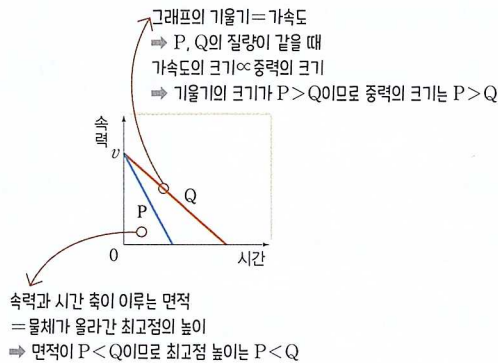
ㄴ. 지구 중심으로부터 거리가 멀어질수록 중력에 의한 위치 에너지가 크다. 따라서 중력에 의한 위치 에너지는 A가 B보다 작다.

바로알기 ㄷ. A의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{R}\right) - G\frac{Mm}{R} = -G\frac{Mm}{2R}$ 이고, B의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{3R}\right) - G\frac{Mm}{3R} = -G\frac{Mm}{6R}$ 이다. 따라서 역학적 에너지는 A가 B보다 $G\frac{Mm}{3R}$ 만큼 작다.

08 ㄴ. 위성의 역학적 에너지는 보존된다. 위성의 중력에 의한 위치 에너지는 p에서 q에서보다 작으므로, 위성의 운동 에너지는 p에서 q에서보다 크다.

바로알기 ㄱ. 위성의 가속도 방향은 위성에 작용하는 중력의 방향과 같다. 위성에 작용하는 중력의 방향은 행성의 중심을 향하는 방향이므로 위성의 가속도 방향은 p에서와 q에서가 같지 않다.
 ㄷ. 중력 상수를 G , 행성의 질량을 M , 위성의 질량을 m 이라고 하면 $E_0 = G \frac{Mm}{r_0}$ 이다. 따라서 q에서 위성에 작용하는 중력의 크기는 $G \frac{Mm}{4r_0^2} = \frac{E_0}{4r_0}$ 이다.

09 — 꼼꼼 문제 분석



ㄱ. 최고점에서 물체의 속력은 0이다. P, Q의 속력이 0이 될 때까지 속력과 시간 축이 이루는 면적은 행성의 표면에서부터 물체가 올라간 최고점의 높이이다. 따라서 행성의 표면에서부터 물체가 올라가는 최고점까지의 높이는 A에서 B에서보다 작다.
 ㄴ. 물체가 올라가는 동안 물체의 가속도의 크기는 P가 Q보다 크다. 물체에는 행성에 의한 중력만 작용하므로 행성의 표면에서 물체에 작용하는 중력의 크기는 P가 Q보다 크다.

바로알기 ㄷ. 질량은 P와 Q가 같고, 행성의 표면에서 물체에 작용하는 중력의 크기는 P가 Q보다 크므로 행성의 질량은 A가 B보다 크다. 반지름은 A와 B가 같으므로 탈출 속도는 A가 B보다 크다.

10 ㄷ. 질량은 A와 B가 같고, 반지름은 A가 B보다 작으므로 행성의 표면에서 물체에 작용하는 중력의 크기는 A에서 B에서보다 크다.

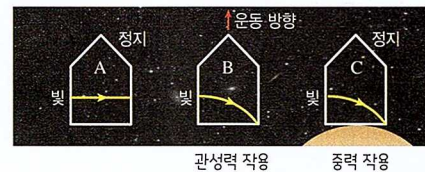
바로알기 ㄱ. (가)에서 물체는 A로 되돌아왔으므로 v 는 A의 탈출 속도보다 작다.
 ㄴ. B에서 물체는 먼 우주로 날아갔으므로 v 는 B의 탈출 속도보다 크다. 따라서 탈출 속도는 A가 B보다 크다. 질량은 A와 B가 같으므로 행성의 반지름은 A가 B보다 작다.

11 ㄱ. 엘리베이터가 연직 위 방향으로 움직일 때, 관성력은 연직 아래 방향으로 작용한다. 따라서 철수에게 작용하는 관성력은 연직 아래 방향으로 60 N이므로 저울의 눈금은 $600 + 60 = 660(N)$ 을 가리킨다.

ㄴ. 관성력은 가속 좌표계에서만 작용하므로 일정한 속도로 움직일 때는 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 저울의 눈금은 600 N을 가리킨다.

ㄷ. 엘리베이터가 자유 낙하를 하는 경우, 관성력은 연직 위 방향으로 600 N이 작용한다. 따라서 철수에 작용하는 관성력과 중력의 크기가 같고 방향이 반대이므로 저울의 눈금은 0을 가리킨다.

12 — 꼼꼼 문제 분석



- B에서는 운동 방향과 같은 방향으로 가속도 운동을 하므로 관성력은 운동 방향과 반대 방향으로 작용한다. 따라서 빛이 우주선의 운동 방향과 반대 방향으로 휘어진다.
- C에서는 중력이 작용하므로 중력에 의해 시공간이 휘어진다. 따라서 빛이 휘어진 공간을 따라 움직이므로 빛이 휘어진다.

ㄱ. 중력이 작용하지 않는 공간에서는 시공간이 휘어지지 않고, 등속도 운동을 하는 경우 관성력이 작용하지 않는다. 따라서 중력이 작용하지 않는 공간에서 등속도 운동을 할 경우 빛은 직진한다.
 ㄴ. B에서는 운동 방향과 반대 방향으로 관성력이 작용하므로 빛이 우주선의 운동 방향과 반대 방향으로 휘어진다.
 ㄷ. 등가 원리에 따라 우주선 내부의 우주인은 중력과 관성력을 구별할 수 없다.

13 ㄱ. A가 관찰한 (가)의 빛과 C가 관찰한 (다)의 빛의 경로가 같으므로 A의 중력의 크기와 C의 관성력의 크기가 같다. 따라서 $2a = g$ 이므로 a 의 크기는 g 의 크기보다 작다.

바로알기 ㄴ. $2a = g$ 이고 (나)에서 우주선의 가속도는 a 이므로 (나)에서 B에 작용하는 관성력의 크기는 (가)에서 A에 작용하는 중력의 크기보다 작다. 따라서 저울에 측정된 힘의 크기는 (가)에서 (나)에서보다 크다.

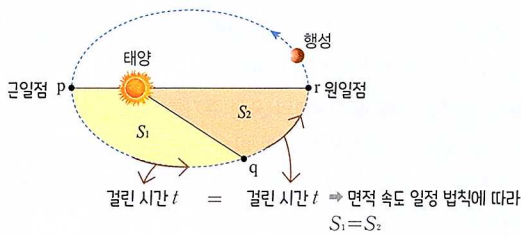
ㄷ. (나)와 (다)에서 우주선에 작용하는 가속도의 방향은 같고, 가속도의 크기는 (다)에서 (나)에서보다 크다. 등가 원리에 따라 관성력의 크기가 클수록 빛이 많이 휘어지므로 C가 관찰한 (다)의 빛이 더 많이 휘어진다.

14 ㄱ. 질량이 매우 크고 지름이 매우 작아 중력이 매우 커서 탈출 속도가 빛의 속도보다 큰 천체를 블랙홀이라고 한다.

ㄴ. 천체 주변은 중력에 의해 시공간이 휘어 있으므로 별에서 나온 빛이 천체 주변을 지나면 빛이 휘어져 별이 여러 개의 상으로 보일 수 있다. 이러한 현상을 중력 렌즈 효과라고 한다.

ㄷ. 블랙홀과 중력 렌즈 효과는 일반 상대성 이론으로 설명할 수 있다.

15 ◆ 꼼꼼 문제 분석



(1) p에서 q까지, q에서 r까지 운동하는 데 걸린 시간이 같으므로 면적 속도 일정 법칙에 따라 태양과 행성을 연결한 선분이 휩쓸고 지나간 면적은 같다.

(2) 공전 주기는 행성이 근일점 p에서 원일점 r까지 운동하는 데 걸린 시간의 2배이다.

모범 답안 (1) $S_1=S_2$

(2) 근일점 p에서 원일점 r까지 운동하는 데 걸린 시간이 $2t$ 이므로 공전 주기는 $4t$ 이다.

채점 기준	배점
(1) 크기를 옳게 비교한 경우	30 %
(2) 풀이 과정과 함께 답을 옳게 구한 경우	70 %
답만 옳게 쓴 경우	30 %

16 질량이 있는 천체 주변에는 중력이 작용하고, 중력에 의해 시공간이 휘어진다.

모범 답안 태양의 질량에 의해 태양 주변에 중력이 작용하고, 중력에 의해 태양 주변의 시공간이 휘어진다. 따라서 태양 주변을 지나는 빛은 휘어진 시공간을 따라 진행하므로 빛이 휘어진다.

채점 기준	배점
별빛이 휘어지는 까닭을 중력에 의한 빛의 휘어짐으로 옳게 서술한 경우	100 %
태양의 중력 때문이라고만 서술한 경우	50 %

17 블랙홀은 중력이 매우 커서 시공간이 극단적으로 휘어져 있어 빛조차도 탈출할 수 없다.

모범 답안 블랙홀이 주변의 물질을 흡수하는 과정에서 방출하는 빛을 관찰하거나, 블랙홀 주변에서 휘어지는 빛을 관찰하여 존재를 확인할 수 있다.

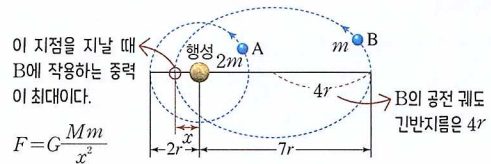
채점 기준	배점
블랙홀을 확인할 수 있는 방법 두 가지를 모두 옳게 서술한 경우	100 %
블랙홀을 확인할 수 있는 방법 한 가지를 옳게 서술한 경우	50 %

중단원 고난도 문제

86쪽~87쪽

01 ①	02 ④	03 ⑤	04 ③	05 ⑤	06 ④
07 ④	08 ③				

01 ◆ 꼼꼼 문제 분석



선택지 분석

- ☒ A. A의 가속도의 방향은 일정하다. **변한다**
- ☒ B. B의 가속도 크기의 최댓값은 A의 가속도 크기의 4배이다.
- ☒ C. B의 공전 주기는 $8\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$ 이다. $16\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$

전략적 풀이 ① 원 궤도를 따라 운동하는 위성의 가속도를 비교할 수 있다.

ㄱ. A는 등속 원운동을 하므로 A의 가속도의 방향은 행성의 중심을 향하는 방향이다. 따라서 A의 가속도의 방향은 계속 변한다.

② 행성에 작용하는 중력의 크기를 구하여 가속도의 크기를 비교할 수 있다.

ㄴ. 행성으로부터 B의 최소 거리를 x 라 하고, A의 질량을 $2m$ 이라고 하면, B의 질량은 m 이다. A에 작용하는 중력의 크기는 $G\frac{M(2m)}{4r^2}$ 이고, B에 작용하는 중력의 최댓값은 $G\frac{Mm}{x^2}$ 이다.

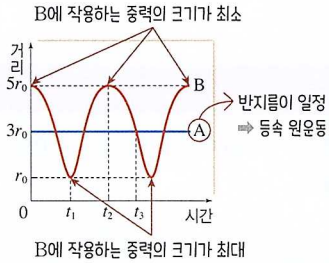
B에 작용하는 중력 크기의 최댓값은 A에 작용하는 중력 크기의 2배이므로 $G\frac{Mm}{x^2}=2\times G\frac{Mm}{2r^2}$ 에서 $x=r$ 이다. A의 가속도의 크기는 $\frac{GM}{4r^2}$ 이고, B의 가속도 크기의 최댓값은 $\frac{GM}{r^2}$ 이다.

따라서 B의 가속도 크기의 최댓값은 A의 가속도 크기의 4배이다.

㉓ 케플러 법칙을 적용하여 A와 B의 주기의 관계를 구할 수 있다.

ㄷ. A의 공전 주기를 T_A 라고 하자. 따라서 A에 작용하는 중력의 크기는 $G \frac{Mm}{(2r)^2} = m(2r) \left(\frac{2\pi}{T_A} \right)^2$ 이므로 $T_A = 4\pi \sqrt{\frac{2r^3}{GM}}$ 이다. B의 공전 궤도의 긴반지름은 $4r$ 이고 A의 원 궤도 반지름은 $2r$ 이므로 공전 궤도는 B가 A의 $2\sqrt{2}$ 배이다. 따라서 B의 공전 주기는 $2\sqrt{2}T_A = 2\sqrt{2} \times 4\pi \sqrt{\frac{2r^3}{GM}} = 16\pi \sqrt{\frac{r^3}{GM}}$ 이다.

02 — 꼼꼼 문제 분석



선택지 분석

- ㄱ B의 속력은 t_1 일 때가 t_2 일 때보다 크다.
~~ㄴ~~ 공전 주기는 B가 A의 $2\sqrt{2}$ 배이다. **같다**
 ㄷ t_3 일 때, 가속도의 크기는 A와 B가 같다.

전략적 풀이 ① 행성으로부터 떨어진 거리에 따라 위성의 속력 변화를 설명할 수 있다.

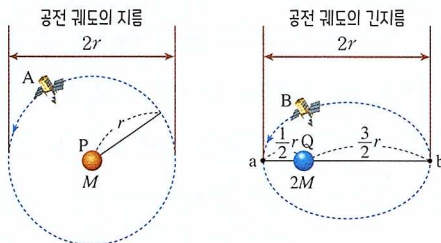
ㄱ. P로부터의 거리가 작을수록 B의 속력이 크다. 따라서 B의 속력은 t_1 일 때가 t_2 일 때보다 크다.

② 그래프를 분석하여 A와 B의 궤도의 특징을 알아낼 수 있다.

ㄴ. A의 원 궤도의 반지름은 $3r_0$ 이다. B의 타원 궤도의 긴반지름은 $\frac{r_0+5r_0}{2} = 3r_0$ 이다. 따라서 B의 타원 궤도의 긴반지름은 A의 원 궤도의 반지름과 같으므로 공전 주기는 A와 B가 같다.

ㄷ. t_3 일 때, P로부터의 거리는 A와 B가 같다. 따라서 t_3 일 때, 가속도의 크기는 A와 B가 같다.

03 — 꼼꼼 문제 분석



- A의 원 궤도의 반지름과 B의 타원 궤도의 긴반지름은 r 으로 같다.
 ⇒ 공전 주기는 행성의 질량이 작을수록 크다.

선택지 분석

- ㄱ B의 속력은 a에서가 b에서보다 크다.
 ㄴ B의 가속도의 크기는 a에서가 b에서의 9배이다.
 ㄷ 공전 주기는 A가 B보다 크다.

전략적 풀이 ① 행성으로부터의 거리에 따라 행성의 속력 변화와 가속도의 크기를 구할 수 있다.

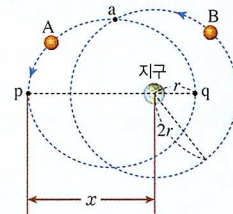
ㄱ. Q로부터의 거리는 a에서가 b에서보다 작으므로 B의 속력은 a에서가 b에서보다 크다.

ㄴ. 위성의 가속도의 크기는 행성으로부터 거리의 제곱에 반비례한다. Q로부터의 거리는 b에서가 a에서의 3배이므로 B의 가속도의 크기는 a에서가 b에서의 9배이다.

② 케플러 법칙을 적용하여 행성의 공전 주기를 비교할 수 있다.

ㄷ. A의 원 궤도의 반지름과 B의 타원 궤도의 긴반지름은 r 으로 같다. 행성의 질량은 P가 Q보다 작으므로 공전 주기는 A가 B보다 크다.

04 — 꼼꼼 문제 분석



- 공전 주기는 A와 B가 같다.
 ⇒ A의 타원 궤도의 긴반지름과 B의 원 궤도 반지름은 같다.
 ⇒ p에서 지구까지의 거리를 x 라고 하면 $\frac{x+r}{2} = 2r$ 에서 $x = 3r$ 이다.

선택지 분석

- ㄱ a에서 가속도의 크기는 A와 B가 같다.
 ㄴ p, q에서 A의 운동 에너지의 차이는 $\frac{2}{3}E_0$ 이다.
~~ㄷ~~ B의 역학적 에너지는 $-\frac{3}{8}E_0$ 이다. $-\frac{1}{4}E_0$

전략적 풀이 ① 행성으로부터 떨어진 거리에 따라 위성에 작용하는 중력의 크기와 가속도의 크기를 구할 수 있다.

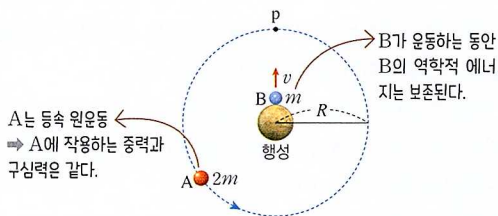
ㄱ. a에서 지구로부터의 거리는 A와 B가 같으므로 a에서 가속도의 크기는 A와 B가 같다.

② 위성의 중력에 의한 위치 에너지, 운동 에너지, 역학적 에너지를 구할 수 있다.

ㄴ. 주기는 A와 B가 같으므로 A의 타원 궤도의 긴반지름은 $2r$ 이다. 따라서 지구에서 p까지의 거리는 $3r$ 이다. 중력 상수를 G , 지구의 질량을 M , A의 질량을 m 이라고 하면, q에서 A의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G\frac{Mm}{r} = -E_0$ 이다. p, q에서 A의 운동 에너지를 각각 K_p , K_q 라고 하면 A의 역학적 에너지는 보존되므로 $K_p - G\frac{Mm}{3r} = K_q - G\frac{Mm}{r}$ 이다. 따라서 $K_q - K_p = \frac{2GMm}{3r} = \frac{2}{3}E_0$ 이다.

ㄷ. 질량은 A와 B가 같으므로 B의 질량을 m , B의 속력을 v 라고 하면, B는 원 궤도의 반지름이 $2r$ 인 등속 원운동을 하므로 $G\frac{Mm}{4r^2} = \frac{mv^2}{2r}$ 에서 $v = \sqrt{\frac{GM}{2r}}$ 이다. 따라서 B의 역학적 에너지는 $-G\frac{Mm}{2r} + \frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{2r}\right) = -G\frac{Mm}{4r} = -\frac{1}{4}E_0$ 이다.

05 - **품평 문제 분석**



선택지 분석

- ㉠ A에 작용하는 중력의 크기는 $\frac{E_0}{R}$ 이다.
- ㉡ B의 역학적 에너지는 $-\frac{2}{5}E_0$ 이다. $-\frac{3}{8}E_0$
- ㉢ v 는 행성의 탈출 속도보다 작다.

전략적 풀이 ① 행성의 중심으로부터 떨어진 거리에 따라 물체에 작용하는 중력의 크기를 구할 수 있다.

ㄱ. 중력 상수를 G , 행성의 질량을 M 이라고 하자. A의 질량을 $2m$ 이라고 하면 B의 질량은 m 이다. A의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G\frac{M(2m)}{R} = -E_0$ 이므로 $E_0 = \frac{2GMm}{R}$ 이다. A에 작용하는 중력의 크기는 $G\frac{M(2m)}{R^2} = \frac{E_0}{R}$ 이다.

② 중력에 의한 위치 에너지를 통해 역학적 에너지를 구할 수 있다.

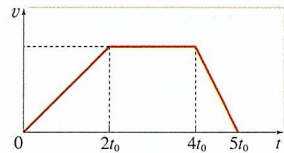
ㄴ. A의 속력을 v_A 라고 하면, $G\frac{M(2m)}{R^2} = \frac{(2m)v_A^2}{R}$ 에서 $v_A = \sqrt{\frac{GM}{R}}$ 이다. p에서 B의 속력을 v_B 라고 하면, B가 p를

지나는 순간의 속력은 A가 B의 $\sqrt{2}$ 배이므로 $v_B = \frac{1}{\sqrt{2}}v_A = \sqrt{\frac{GM}{2R}}$ 이다. p에서 B의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G\frac{Mm}{R}$ 이고, B의 운동 에너지는 $\frac{1}{2}m\left(\frac{GM}{2R}\right) = G\frac{Mm}{4R}$ 이다. 따라서 p에서 B의 역학적 에너지는 $-G\frac{Mm}{R} + G\frac{Mm}{4R} = -\frac{3GMm}{4R} = -\frac{3}{8}E_0$ 이다. B가 행성의 표면에서 발사된 이후 B의 역학적 에너지는 보존되므로 B의 역학적 에너지는 $-\frac{3}{8}E_0$ 이다.

③ 행성의 탈출 속도의 의미를 이해할 수 있다.

ㄷ. B의 역학적 에너지는 0보다 작으므로 행성에 의한 중력에 구속되어 있다. 즉, 행성의 표면에서 속력 v 로 발사된 B는 행성의 중력을 벗어날 수가 없다. 따라서 v 는 행성의 탈출 속도보다 작다.

06 - **품평 문제 분석**



- 단위 시간당 속도의 변화량의 크기가 $0 \sim 2t_0$ 일 때가 $4t_0 \sim 5t_0$ 일 때의 $\frac{1}{2}$ 배이므로 가속도의 크기도 $0 \sim 2t_0$ 일 때가 $4t_0 \sim 5t_0$ 일 때의 $\frac{1}{2}$ 배이다. 따라서 관성력의 크기는 $0 \sim 2t_0$ 일 때가 $4t_0 \sim 5t_0$ 의 $\frac{1}{2}$ 배이다.
- $0 \sim 2t_0$ 일 때는 연직 위 방향으로 속도가 증가하므로 관성력의 방향은 연직 아래 방향이고, $4t_0 \sim 5t_0$ 일 때는 연직 위 방향으로 속도가 감소하므로 관성력의 방향은 연직 위 방향이다.

선택지 분석

- ㉠ 관성력의 크기는 $t=3t_0$ 일 때 최대이다. 0이다.
- ㉡ 관성력의 크기는 $t=t_0$ 일 때가 $t=4.5t_0$ 일 때의 $\frac{1}{2}$ 배이다.
- ㉢ 관성력의 방향은 $t=t_0$ 일 때와 $t=4.5t_0$ 일 때가 서로 반대 방향이다.

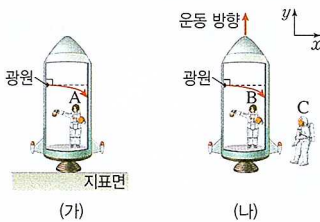
전략적 풀이 ① (나)에서 단위 시간당 속도의 변화량 또는 그래프의 기울기를 이용하여 가속도의 크기 및 방향을 이해하여 관성력을 구할 수 있다.

ㄱ. $t=3t_0$ 일 때, 엘리베이터는 등속도 운동을 하므로 관성력이 작용하지 않는다.

ㄴ. 관성력의 크기는 가속도의 크기에 비례하고, 가속도의 크기가 $t=t_0$ 일 때가 $t=4.5t_0$ 일 때의 $\frac{1}{2}$ 배이므로 관성력의 크기는 $t=t_0$ 일 때가 $t=4.5t_0$ 일 때의 $\frac{1}{2}$ 배이다.

ㄷ. $0 \sim 2t_0$ 일 때는 속도가 증가하고, $4t_0 \sim 5t_0$ 일 때는 속도가 감소하므로 가속도의 방향은 서로 반대 방향이다. 따라서 관성력의 방향은 가속도의 방향과 반대 방향이므로 $t=t_0$ 일 때와 $t=4.5t_0$ 일 때가 서로 반대 방향이다.

07 - 꼼꼼 문제 분석



- (가)에서는 우주선이 지표면에 정지해 있으므로 빛은 중력에 의해 휘어진 시공간을 따라 아래로 휘어진다.
- (나)에서는 우주선이 $+y$ 방향으로 등가속도 직선 운동을 하므로 빛은 관성력에 의해 $-y$ 방향으로 휘어진다.
- 빛의 휘어진 정도는 A가 관찰할 때가 B가 관찰할 때보다 크므로 (나)에서 작용하는 관성력의 크기는 (가)의 중력의 크기보다 작다.

선택지 분석

- ㉠ 우주선 안의 관찰자는 관성력과 중력을 구별할 수 없다.
- ㉡ B가 관찰할 때, 물체에 작용하는 관성력의 방향은 $+y$ 방향이다. $-y$ 방향
- ㉢ (나)의 우주선의 가속도의 크기는 중력 가속도의 크기보다 작다.

전략적 풀이 ① 등가 원리에 따라 관성력과 중력을 구별할 수 없음을 이용한다.

ㄱ. 등가 원리에 따라 우주선 안의 관찰자는 관성력과 중력을 구별할 수 없다.

② 물체의 가속도의 방향을 이용하여 관성력의 방향을 알아낼 수 있다.

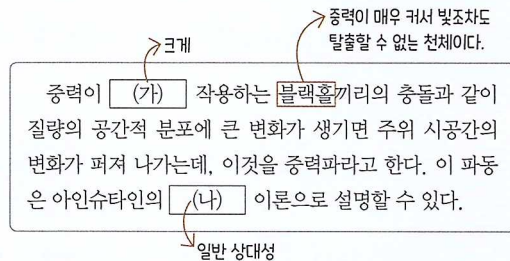
ㄴ. (나)에서 우주선은 $+y$ 방향으로 등가속도 직선 운동을 하므로 B가 관찰할 때 물체에 작용하는 관성력의 방향은 $-y$ 방향이다.

③ 빛의 휘어진 정도를 이용하여 관성력과 중력의 크기를 비교할 수 있다.

ㄷ. 빛의 휘어진 정도가 A가 관찰할 때가 B가 관찰할 때보다 크므로 (가)에서 중력의 크기는 (나)에서 관성력의 크기보다 크다.

따라서 (나)에서 우주선의 가속도의 크기는 중력 가속도의 크기보다 작다.

08 - 꼼꼼 문제 분석



선택지 분석

- ㉠ (가)는 '크게'이다.
- ㉡ (나)는 '일반 상대성'이다.
- ㉢ 블랙홀 주위에서 방출되는 빛으로 블랙홀을 직접적으로 관찰할 수 있다. 간접적으로

전략적 풀이 ① 블랙홀은 중력이 크게 작용하는 천체이며, 2개의 블랙홀이 합쳐질 때 중력파가 발생함을 이해할 수 있다.

ㄱ. 블랙홀과 같이 중력이 큰 물체들 사이의 상호작용으로 질량의 공간적 분포에 큰 변화가 생겨 주위의 시공간에 변화가 퍼져 나가는 현상을 중력파라고 한다.

② 아인슈타인이 일반 상대성 이론을 발표하여 시공간에 대한 새로운 개념을 확립하였음을 안다.

ㄴ. 중력파는 아인슈타인의 일반 상대성 이론으로 설명할 수 있다.

③ 블랙홀에서는 빛도 빠져나오지 못하므로 직접 관찰할 수 없음을 이해할 수 있다.

ㄷ. 블랙홀의 탈출 속도는 빛의 속도보다 크므로 빛도 빠져나올 수 없다. 따라서 블랙홀은 주변의 물질을 흡수하는 과정에서 방출하는 빛을 관찰하거나, 블랙홀 주변에서 휘어지는 빛을 관찰하는 간접적인 방법으로 확인할 수 있다.

