

**The true beauty of science is in finding a
simple theory that can explain diverse phenomena.**

Murray Gell-Mann

WorkBook

일반 상대성 이론

04 일반 상대성 이론

① 가속 좌표계와 관성력

(1) 가속 좌표계

- ① 관성 좌표계: 정지 또는 등속도 운동을 하는 관찰자를 기준으로 하는 좌표계
- ② 가속 좌표계: 가속도 운동을 하는 관찰자를 기준으로 하는 좌표계

(2) 관성력

- ① 가속 좌표계에서 뉴턴 운동 제2법칙을 만족하기 위한 가상의 힘
- ② 가속도가 $\vec{a}$ 인 가속 좌표계에서 질량이 m 인 물체에 작용하는 관성력 $\vec{F}_{\text{관}}$ 의 크기는 ma 이고 방향은 계의 가속도와 반대 방향이다.

$$\vec{F}_{\text{관}} = -m\vec{a}$$

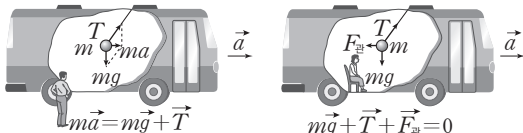
(3) 관성력의 예

① 지면에 대해 가속도 $\vec{a}$ 로 가속도 운동을 하는 버스

- 버스 밖의 정지 상태인 관찰자: 그림 (가)에서 추에 작용하는 알짜힘은 $m\vec{a}$ 이고 추에는 중력 $m\vec{g}$ 와 줄이 추를 당기는 힘 $\vec{T}$ 가 작용한다고 관측한다.

$$m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a}$$

- 버스 안의 정지 상태인 관찰자: 그림 (나)에서 추에는 중력 $m\vec{g}$, 줄이 추를 당기는 힘 $\vec{T}$, 관성력 $\vec{F}_{\text{관}}$ 이 작용한다고 관측한다.



(가) 지면에 서 있는 사람이 본 추에 작용하는 힘

(나) 버스 안에 정지한 사람이 본 추에 작용하는 힘

② 원운동을 하는 버스

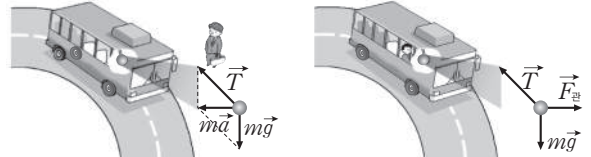
- 버스 밖의 정지 상태인 관찰자: 그림 (가)에서 추에 작용하는 알짜힘은 $m\vec{a}$, 추에는 중력 $m\vec{g}$ 와 줄이 추를 당기는 힘 $\vec{T}$ 가 작용한다고 관측한다.

$$m\vec{g} + \vec{T} = m\vec{a}$$

- 버스 안의 정지 상태인 관찰자: 그림 (나)에서 추에 작용하는 알짜힘은 0이고, 추에는 중력 $m\vec{g}$, 줄이 추를 당기는 힘 $\vec{T}$, 관성력 $\vec{F}_{\text{관}}$ 이 작용한다고 관측한다.

$$m\vec{g} + \vec{T} + \vec{F}_{\text{관}} = 0$$

- 원심력: 원운동을 하는 좌표계에서 중심에서 멀어지는 방향으로 나타나는 관성력



(가) 지면에 정지해 있는 사람이 본 추에 작용하는 힘

(나) 버스 안에 정지한 사람이 본 추에 작용하는 힘의 평형

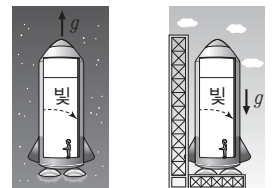
② 등가 원리와 일반 상대성 이론

(1) 등가 원리

- ① 등가 원리: 관성력과 중력은 근본적으로 구분할 수 없다는 원리이다.

- ② 우주선 밖을 볼 수 없는 우주선 안의 관찰자는 포물선 경로를 따라 운동하는 물체의 운동이 중력 때문인지 관성력 때문인지 구분할 수 없다.

- ③ 우주선의 한쪽 벽면에서 방출된 빛은 그림 (가)와 같이 가속도 운동을 하는 우주선 안의 관찰자가 볼 때 휘어져 진행하며, 등가 원리에 의해 (나)와 같이 지구 표면에 정지해 있는 우주선 안의 관찰자가 볼 때도 휘어져 진행한다.



(가)

(나)

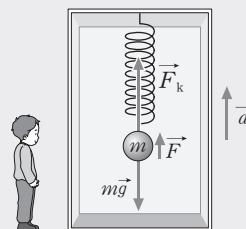
(2) 관성 질량과 중력 질량

- ① 관성 질량: 운동 법칙 $F = ma$ 의 관계에서 나타나는 질량
- ② 중력 질량: 중력 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 의 관계에서 나타나는 질량
- ③ 중력 질량과 관성 질량은 같다.

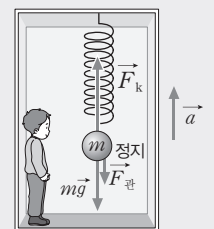
더 알기

가속도 운동을 하는 엘리베이터

- 엘리베이터 밖의 관찰자: 그림 (가)에서 관찰자는 용수철의 탄성력 $\vec{F}_k$ 과 중력 $m\vec{g}$ 의 합력 $\vec{F}$ 에 의해 추가 엘리베이터와 같은 가속도 $\vec{a}$ 로 운동을 하는 것으로 관측한다. $\Rightarrow m\vec{g} + \vec{F}_k = \vec{F} = m\vec{a}$
- 엘리베이터 안의 관찰자: 그림 (나)에서 관찰자는 용수철의 탄성력 $\vec{F}_k$, 중력 $m\vec{g}$, 엘리베이터의 가속 운동에 의한 관성력 $\vec{F}_{\text{관}}$ 이 평형을 이루어 추가 정지한 것으로 관측한다. $\Rightarrow m\vec{g} + \vec{F}_k + \vec{F}_{\text{관}} = 0$



(가) 엘리베이터 밖에 정지한 사람이 본 추의 가속도 운동



(나) 엘리베이터 안에 정지한 사람이 본 힘의 평형

(3) 일반 상대성 이론

- ① 1915년 아인슈타인은 등가 원리를 바탕으로 새로운 중력 이론인 일반 상대성 이론을 완성하였다.
- ② 시공간의 휘어짐: 질량에 의해 시공간이 휘어진다.
- ③ 시간 지연: 시공간이 많이 휘어질수록 시간이 느리게 간다.
- ④ 중력파: 초신성 폭발과 같은 현상으로 시공간이 요동을 치게 되어 파동의 형태로 퍼져 나가는 것을 중력파라고 한다.

③ 일반 상대성 이론의 증거

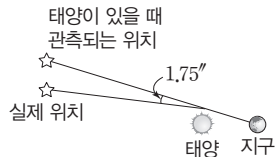
(1) 수성의 세차 운동 설명

- ① 수성의 세차 운동: 뉴턴 중력 법칙을 적용하면 수성의 근일점 세차 운동의 예측값과 관측값이 100년에 약 43"의 오차가 나타난다.
 - ② 태양의 질량에 의해 시공간이 휘어져 있다는 일반 상대성 이론을 적용하여 오차를 설명할 수 있다.
- (2) GPS 위성의 시간 보정: 지표면보다 위성이 있는 곳의 중력이 작아 시간이 빠르게 가기 때문에 시간의 차이를 보정해 주어야 한다.

(3) 시공간의 휘어짐

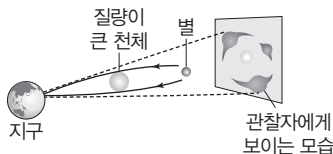
- ① 태양 주위의 시공간이 휘어져 있다면 태양 근처를 지나는 빛도 휘어진다.

➡ 1919년 영국의 과학자 에딩턴은 일식이 일어날 때 태양 주위에서 관측한 별의 위치와 실제 위치에 차이가 있음을 발견하여 일반 상대성 이론의 예측이 옳음을 증명하였다.



- ② 중력 렌즈 효과: 먼 곳에 있는 밝은 별에서 나온 빛이 지구에 도달할 때 중간에 질량이 매우 큰 천체가 있으면 빛이 휘어져 별의 상이 여러 개로 보일 수 있다. 이처럼 중력이 렌즈처럼 빛을 휘게 하는 것을 중력 렌즈라고 한다.

예) 아인슈타인의 십자가, 아인슈타인의 고리



④ 블랙홀

(1) 탈출 속력

- ① 탈출 속력: 물체가 천체의 중력을 벗어나 무한히 먼 곳까지 가기 위한 최소한의 속력
- ② 질량이 M 이고 반지름이 R 인 천체 표면에서의 탈출 속력은 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ (G : 중력 상수)이다.
- ③ 탈출 속력이 빛의 속력보다 큰 천체에서는 빛조차 천체의 중력을 벗어날 수 없다.

(2) 블랙홀

- ① 블랙홀: 질량이 아주 큰 별이 진화의 마지막 단계에서 자체 중력이 매우 커서 스스로 붕괴되어 빛조차도 탈출할 수 없는 천체를 블랙홀이라고 한다.
- ② 사건의 지평선: 중력이 클수록 시간이 느리게 가며, 블랙홀의 어떤 경계에서는 시간이 멈춘 것처럼 보인다.
- ③ 항성의 밀도에 따른 시공간의 휘어짐: 일반 상대성 이론에 따르면 질량이 큰 천체일수록 주변의 시공간을 휘게 하는 정도가 크며, 중력에 의한 수축으로 극도로 밀도가 큰 천체는 시공간을 극단적으로 휘게 만든다.



- ④ 별의 질량에 따른 블랙홀의 형성: 태양 정도의 별이 붕괴하면 백색 왜성이 되고, 별이 핵융합 과정을 끝내고 초신성 폭발 이후 남은 질량이 태양 질량의 1.4배보다 큰 별은 중성자별이 되며, 태양 질량의 3배보다 큰 별은 블랙홀이 될 수 있다.
- ⑤ 블랙홀의 발견: 블랙홀 주변의 물질이 블랙홀로 빨려 들어갈 때 매우 높은 온도로 가열되어 X선을 방출하는데, 이 X선을 관측하여 블랙홀을 발견할 수 있다.

더 알기

탈출 속력

- 천체로부터 무한히 먼 곳에서 물체의 중력 퍼텐셜 에너지

$$U=0$$

- 반지름이 R , 질량이 M 인 천체의 중심에서 r 만큼 떨어진 곳에 있는 질량이 m 인 물체의 퍼텐셜 에너지

$$U=-G\frac{Mm}{r}$$

- 천체 중심으로부터 r 만큼 떨어진 곳에서 속력 v 로 운동하는 물체의 역학적 에너지

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv^2-G\frac{Mm}{r}$$

- 천체 표면에서 속력 v_0 로 발사된 물체의 역학적 에너지

$$E=K+U=\frac{1}{2}mv_0^2-G\frac{Mm}{R}$$

- 물체가 천체로부터 탈출하기 위해서는 역학적 에너지가 $E \geq 0$ 가 되어야 한다.

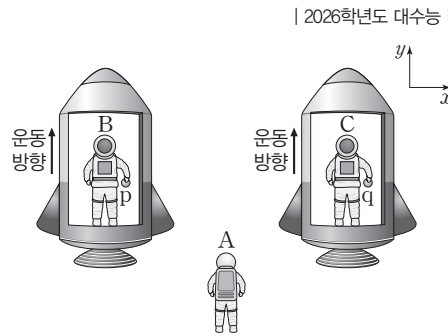
- 천체 표면에서 발사된 물체의 역학적 에너지가 $E=0$ 이 되도록 하는 물체의 발사 속도의 크기를 탈출 속력이라고 한다.

- 탈출 속력(v_e)

$$E=\frac{1}{2}mv_e^2-G\frac{Mm}{R}=0, v_e=\sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

테마 대표 문제

그림과 같이 텅 빈 우주 공간에서 정지한 관찰자 A에 대해 관찰자 B, C가 탄 우주선이 각각 일정한 가속도로 $+y$ 방향으로 직선 운동을 한다. B가 관찰할 때 가만히 놓은 물체 p와 C가 관찰할 때 가만히 놓은 물체 q는 각각 $-y$ 방향으로 운동하며, B가 관찰할 때 p가 거리 h 만큼 이동하는 데 걸리는 시간이 C가 관찰할 때 q가 h 만큼 이동하는 데 걸리는 시간보다 작다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 물체의 크기는 무시한다.)



| 2026학년도 대수능 |

접근 전략

$+y$ 방향으로 가속되는 우주선 안의 물체와 사람에게 $-y$ 방향으로 관성력이 작용한다.

간략 풀이

물체가 같은 거리를 낙하할 때 가속도가 클수록 낙하 시간이 작다. 따라서 B가 관찰할 때 p의 가속도의 크기는 C가 관찰할 때 q의 가속도의 크기보다 크다.

㉠ B가 관찰할 때 p가 $-y$ 방향으로 운동하므로 우주선의 가속도의 방향은 $+y$ 방향이다. 따라서 A가 관찰할 때 B의 가속도 방향은 $+y$ 방향이다.

㉡ 우주선 안에 있는 B, C의 가속도의 크기는 관성 좌표계에서 관찰한 우주선의 가속도의 크기와 같다. 따라서 A가 관찰할 때, 가속도의 크기는 B가 C보다 크다.

㉢ A가 관찰할 때 B가 탄 우주선이 $+y$ 방향으로 가속되므로 B가 관찰할 때 p에 작용하는 관성력의 방향은 $-y$ 방향이다.

정답 | ⑤

보기

- ㉠. A가 관찰할 때, B의 가속도 방향은 $+y$ 방향이다.
- ㉡. A가 관찰할 때, 가속도의 크기는 B가 C보다 크다.
- ㉢. B가 관찰할 때, p에 작용하는 관성력의 방향은 $-y$ 방향이다.

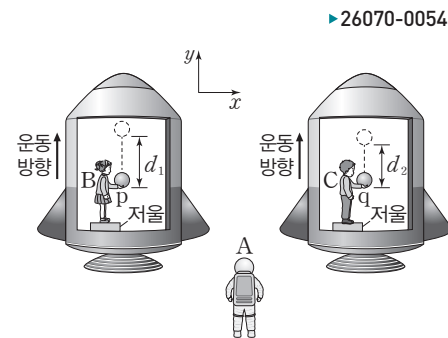
- ① ㉠ ② ㉡ ③ ㉠, ㉡ ④ ㉡, ㉢ ⑤ ㉠, ㉡, ㉢

짧은 풀이 문제로 유형 익히기

정답과 해설 11쪽

그림과 같이 텅 빈 우주 공간에서 정지한 관찰자 A에 대해 관찰자 B, C가 탄 우주선이 각각 일정한 가속도로 $+y$ 방향으로 직선 운동을 한다. B, C는 질량이 같은 물체 p, q를 각각 같은 속력으로 $+y$ 방향으로 던졌다가 받았다. B, C가 관찰할 때 p, q는 각각 등가속도 운동을 하여 던진 위치로부터 각각 거리 d_1, d_2 만큼 떨어진 최고점까지 도달했다가 던진 위치로 되돌아왔다. B, C의 질량은 같고 $d_1 > d_2$ 이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 물체의 크기는 무시한다.)



▶ 26070-0054

유사점과 차이점

가속되는 좌표계에서 운동하는 물체의 운동을 분석해야 하는 점에서 대표 문제와 유사하지만 관성력의 크기를 분석해야 하는 점에서 대표 문제와 다르다.

배경 지식

가속 좌표계에서 관찰할 때, 가속 좌표계에 있는 물체에는 좌표계 가속도 방향의 반대 방향으로 관성력이 작용한다.

보기

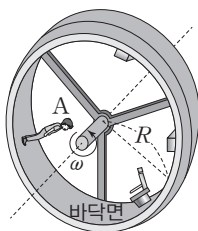
- ㉠. B가 관찰할 때, p가 $+y$ 방향으로 운동하는 동안 p에 작용하는 관성력의 방향은 $+y$ 방향이다.
- ㉡. p, q가 각각 최고점에 도달했을 때 저울에 측정된 힘의 크기는 B가 C보다 크다.
- ㉢. B가 관찰할 때 p가 최고점까지 도달하는 데 걸린 시간은 C가 관찰할 때 q가 최고점에 도달하는 데 걸린 시간보다 크다.

- ① ㉠ ② ㉡ ③ ㉢ ④ ㉠, ㉡ ⑤ ㉡, ㉢

01

▶26070-0055

그림은 텅 빈 우주 공간에서 일정한 크기의 각속도 ω 로 자전하는 원형의 우주 정거장을 모식적으로 나타낸 것이다. 우주 정거장에서 있는 우주인 A는 반지름이 R 인 등속 원운동을 하고, 우주 정거장의 바닥면이 A에 우주 정거장의 중심 방향으로 작용하는 힘의 크기는 지구 표면에서 A에 작용하는 중력의 크기와 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 지구 표면에서 중력 가속도는 g 이고, A의 크기는 무시한다.)

보기

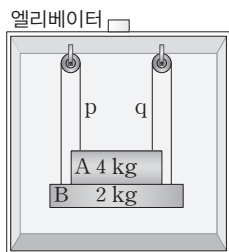
- ㄱ. A의 좌표계에서 A에 작용하는 관성력의 방향은 우주 정거장의 중심 방향이다.
- ㄴ. $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$ 이다.
- ㄷ. ω 가 증가하면 A의 좌표계에서 A에 작용하는 원심력의 크기는 증가한다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

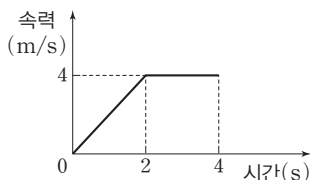
02

▶26070-0056

그림 (가)는 엘리베이터의 천장에 고정된 도르래를 통해 실 p, q로 연결된 물체 A, B가 지표면에 고정된 좌표계에 대해 엘리베이터와 함께 정지해 있는 것을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)의 엘리베이터가 연직 위 방향으로 운동할 때 지표면에 고정된 좌표계에서 측정한 A의 속력을 시간에 따라 나타낸 것이다. A, B의 질량은 각각 4 kg, 2 kg이다. p, q가 A에 작용하는 힘의 크기는 같다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 가속도는 10 m/s^2 이고, p, q는 서로 평행하고 A, B는 엘리베이터의 바닥면과 나란하며, 실의 질량, 모든 마찰은 무시한다.)

보기

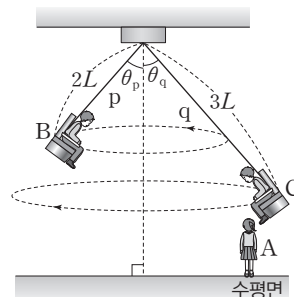
- ㄱ. 1초일 때 A에 작용하는 관성력의 방향은 엘리베이터의 운동 방향과 같다.
- ㄴ. 1초일 때 p가 A를 당기는 힘의 크기는 18 N이다.
- ㄷ. A가 B에 연직 방향으로 작용하는 힘의 크기는 1초일 때가 3초일 때보다 2 N만큼 크다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

03

▶26070-0057

그림과 같이 수평면에 정지한 관찰자 A에 대해 질량이 같은 사람 B, C가 길이가 각각 $2L$, $3L$ 인 줄 p, q에 연결된 동일한 높이기구의 의자에 앉아 수평면과 나란하게 등속 원운동을 하고 있다. p, q가 연직선과 이루는 각은 각각 θ_p , θ_q 로 일정하고, B, C의 각속도의 크기는 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 사람과 의자의 크기, 의자와 줄의 질량, 모든 마찰과 공기 저항은 무시한다.)

보기

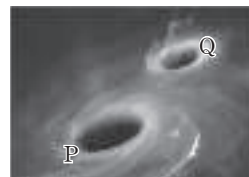
- ㄱ. $\theta_p < \theta_q$ 이다.
- ㄴ. A의 좌표계에서 B에 작용하는 알짜힘의 방향과 B의 좌표계에서 B에 작용하는 관성력의 방향은 서로 반대이다.
- ㄷ. B의 좌표계에서 B에 작용하는 관성력의 크기는 C의 좌표계에서 C에 작용하는 관성력의 크기보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04

▶26070-0058

그림은 질량이 각각 태양의 85배, 태양의 65배인 블랙홀 P, Q가 회전하면서 접근하는 모습을 보며 학생 A, B, C가 대화하고 있는 모습을 나타낸 것이다. P, Q가 서로 가까워져 충돌하면 급격한 질량 변화가 일어난다.



시공간을 휘게 하는 정도는 P가 Q보다 커.

P와 Q의 충돌 과정에서 질량 변화에 의해 시공간의 뒤틀림으로 중력파가 발생해.

P의 중심에 가까이가 갈수록 시간은 느리게 가.



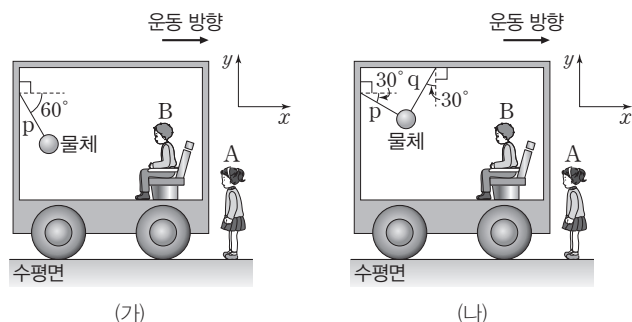
제시한 내용이 옳은 학생만을 있는 대로 고른 것은?

- ① A ② B ③ A, C ④ B, C ⑤ A, B, C

05

▶26070-0059

그림 (가)와 같이 수평면에 정지한 관찰자 A에 대해 관찰자 B가 탄 수레가 $+x$ 방향으로 등가속도 운동을 하고 있다. 수레의 벽에는 물체가 실 p에 매달려 있다. p가 수평 방향과 이루는 각은 60° 로 일정하다. 그림 (나)는 (가)에서 실 q를 추가로 천장에 연결하여 물체에 매달았을 때 p는 수평 방향과, q는 연직 방향과 각각 30° 의 일정한 각을 이루는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 물체의 크기, 실의 질량과 모든 마찰은 무시한다.)

【 보기 】

- ㄱ. A의 좌표계에서 수레의 가속도의 방향은 $-x$ 방향이다.
- ㄴ. (나)에서 q가 물체에 작용하는 힘의 크기는 물체에 작용하는 중력의 크기와 같다.
- ㄷ. (나)에서 p, q를 동시에 끊으면 B의 좌표계에서 물체는 포물선 운동을 한다.

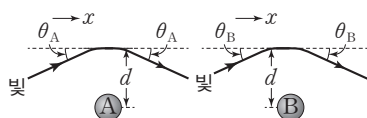
- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

06

▶26070-0060

표는 천체 A, B의 질량, 반지름, 탈출 속력을 나타낸 것이고, 그림은 A, B 주변에서 $+x$ 방향에 대해 각 θ_A, θ_B 로 입사한 빛이 A, B에 의해 $+x$ 방향에 대해 각 θ_A, θ_B 를 이루며 휘는 모습을 나타낸 것이다.

천체	질량	반지름	탈출 속력
A	M	R	v_0
B	$\ominus$	R	$2v_0$



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

【 보기 】

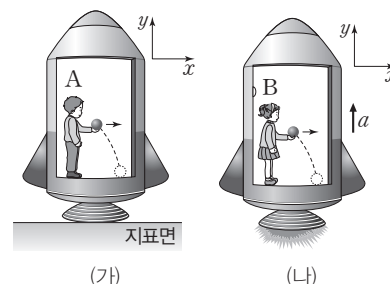
- ㄱ. $\ominus$ 은 $4M$ 이다.
- ㄴ. B의 표면에서 속력 v_0 으로 연직 위로 발사된 물체는 B의 중력에 의해 B의 표면으로 되돌아온다.
- ㄷ. $\theta_A < \theta_B$ 이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

07

▶26070-0061

그림 (가)는 학생 A가 탄 우주선이 지표면에 정지해 있는 모습을, (나)는 학생 B가 탄 우주선이 텅 빈 우주 공간에서 $+y$ 방향으로 크기가 a 인 가속도로 운동하는 모습을 나타낸 것이다.



A, B가 우주선의 바닥으로부터 같은 높이에서 동일한 물체를 $+x$ 방향으로 던졌더니 물체가 각각 포물선 운동을 하여 바닥에 도달하였다. 던진 순간부터 바닥에 도달할 때까지 물체의 수평 이동 거리는 A의 좌표계에서 B의 좌표계에서보다 크고, 걸린 시간은 A의 좌표계에서와 B의 좌표계에서가 같다.

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

【 보기 】

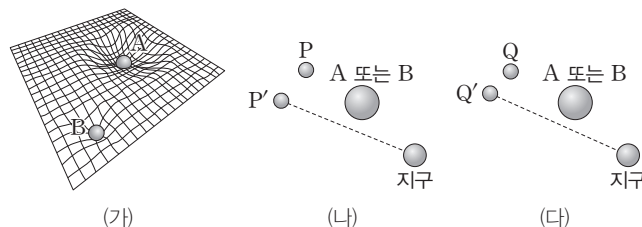
- ㄱ. (나)에서 $a=g$ 이다.
- ㄴ. (나)에서 B는 물체의 운동이 중력에 의한 것인지 관성력에 의한 것인지 구별할 수 없다.
- ㄷ. 바닥에 도달한 순간 물체의 운동 에너지는 A의 좌표계에서와 B의 좌표계에서가 같다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

08

▶26070-0062

그림 (가)는 반지름이 같은 구형의 두 천체 A, B에 의해 시공간이 휘어진 것을 모식적으로 나타낸 것이고, (나), (다)는 각각 별 P, Q에서 방출된 빛이 A 또는 B에 의해 휘어진 시공간을 진행하여, 각각 P', Q'에 위치한 것으로 지구에서 관측되는 모습을 나타낸 것이다. (나), (다)에서 천체와 별 사이의 거리는 각각 같고 지구에 대한 천체와 별의 위치도 같다. P와 P' 사이의 거리는 Q와 Q' 사이의 거리보다 크다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?
(단, 별과 천체의 운동은 무시하고, 천체의 밀도는 균일하다.)

【 보기 】

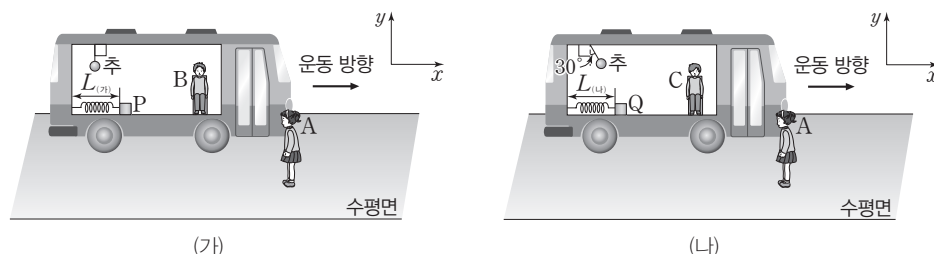
- ㄱ. (나)는 A에 의해 관측되는 모습이다.
- ㄴ. 시간은 A의 표면에서보다 B의 표면에서 느리게 간다.
- ㄷ. (다)에서 Q가 Q'에 위치한 것으로 관측되는 것은 중력 렌즈 효과로 설명할 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

01

▶26070-0063

그림 (가), (나)와 같이 수평면에 정지한 관찰자 A에 대해 관찰자 B, C가 탄 버스가 $+x$ 방향으로 직선 운동을 하고 있다. 버스의 천장에는 추가 각각 실에 매달려 있고, 동일한 용수철에 물체 P, Q가 연결되어 버스의 수평한 바닥에서 B, C에 대해 각각 정지해 있다. (가)에서 추는 실에 연직 방향으로 연결되어 있고, (나)에서 추에 연결된 실과 연직선이 이루는 각은 30° 로 일정하다. 용수철의 원래 길이는 L_0 이고, (가), (나)에서 용수철의 길이는 각각 $L_{(가)}$, $L_{(나)}$ 로 일정하다. 추와 P, Q의 질량은 모두 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 실과 용수철의 질량, 모든 마찰은 무시한다.)

보기

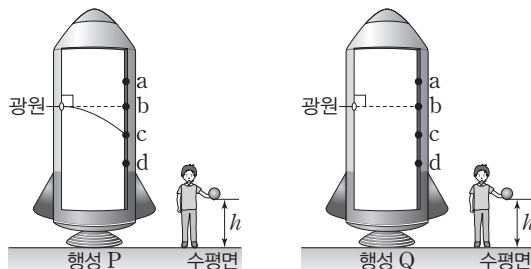
- ㄱ. A의 좌표계에서 추에 작용하는 알짜힘은 (가)에서와 (나)에서가 같다.
- ㄴ. C의 좌표계에서 Q에 작용하는 관성력의 크기는 Q에 작용하는 중력의 크기보다 작다.
- ㄷ. $L_{(가)} = L_0 > L_{(나)}$ 이다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

02

▶26070-0064

그림은 반지름이 같고 밀도가 균일한 행성 P, Q의 표면에 정지해 있는 관측자가 P, Q의 표면에 정지해 있는 동일한 우주선 내부의 광원에서 방출된 빛의 경로를 관측하는 것을 나타낸 것이다. P의 표면의 우주선의 광원에서 맞은편 벽의 점 b를 향해 수평면과 나란하게 발사된 빛은 점 c에 도달한다. P, Q의 표면인 수평면으로부터 높이 h 인 곳에서 질량이 같은 물체를 각각 가만히 놓았을 때 물체가 표면에 도달할 때까지 걸린 시간은 P에서가 Q에서의 $\sqrt{2}$ 배이다. Q의 표면의 우주선의 광원에서 b를 향해 수평면과 나란하게 발사된 빛은 맞은 편 벽의 점 a, b, c, d 중 한 점에 도달한다. a, b, c, d의 간격은 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 물체의 크기와 공기 저항은 무시한다.)

보기

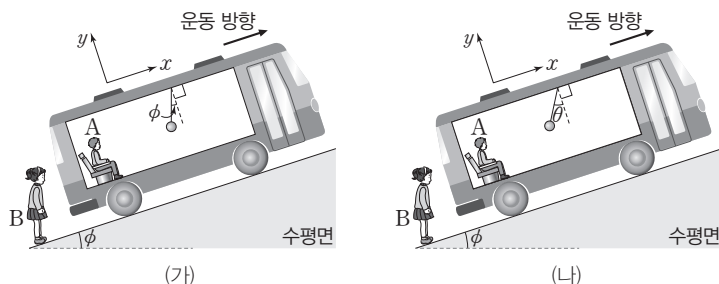
- ㄱ. 행성의 질량은 P가 Q보다 크다.
- ㄴ. 행성 표면에서의 탈출 속력은 Q에서가 P에서의 $\sqrt{2}$ 배이다.
- ㄷ. Q의 표면의 우주선의 광원에서 b를 향해 수평면과 나란하게 발사된 빛은 d에 도달한다.

- ① ㄴ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

03

▶ 26070-0065

그림 (가), (나)와 같이 관찰자 A가 탄 버스가 수평면과 이루는 각이 ϕ 인 빗면에 정지한 관찰자 B에 대해 빗면 위에서 $+x$ 방향으로 각각 직선 운동을 하고 있다. 버스의 천장에는 물체가 실로 매달려 있고, 실이 버스 천장에 대해 수직인 y 축과 이루는 각은 각각 ϕ , θ 로 일정하다. (가), (나)에서 실이 물체에 작용하는 힘의 크기는 각각 T_1 , T_2 이고, $\theta > \phi$ 이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 버스의 천장과 빗면은 평행하며, 물체의 크기, 실의 질량과 모든 마찰은 무시한다.)

보기

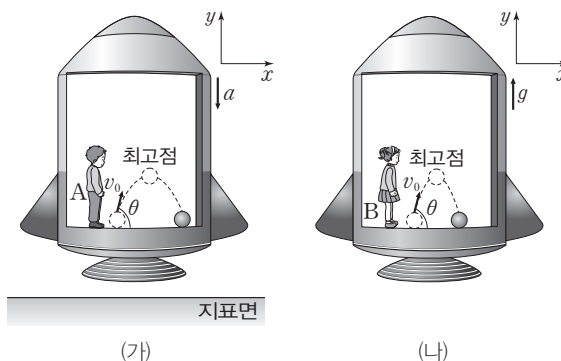
- ㄱ. B의 좌표계에서 (가)의 물체에 작용하는 알짜힘은 0이다.
- ㄴ. A의 좌표계에서 (나)의 물체에 작용하는 관성력의 방향은 $+x$ 방향이다.
- ㄷ. $T_1 : T_2 = \cos\theta : \cos\phi$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

04

▶ 26070-0066

그림 (가)는 지표면 근처에서 연직 아래로 크기가 일정한 가속도 a 로 운동하는 우주선의 모습을, (나)는 텅 빈 우주 공간에서 $+y$ 방향으로 크기가 g 인 일정한 가속도로 운동하는 우주선의 모습을 나타낸 것이다. (가), (나)의 우주선 바닥에서 x 축과 θ 의 각을 이루며 속력 v_0 으로 던져진 물체는 각각 우주선 안의 관찰자 A, B의 좌표계에서 포물선 운동을 하고, 물체가 최고점에 도달할 때까지 수평 방향으로 이동한 거리는 A의 좌표계에서가 B의 좌표계에서의 $\frac{3}{2}$ 배이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 중력 가속도는 g 이고, 물체의 크기와 공기 저항은 무시한다.)

보기

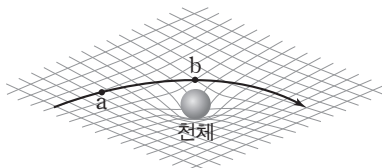
- ㄱ. $a = \frac{1}{3}g$ 이다.
- ㄴ. 우주선 바닥에서 물체의 최고점까지의 높이는 A의 좌표계에서가 B의 좌표계에서의 $\frac{3}{2}$ 배이다.
- ㄷ. (가)에서 가속도의 크기가 g 가 되면 A의 좌표계에서 물체는 등속 직선 운동을 한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

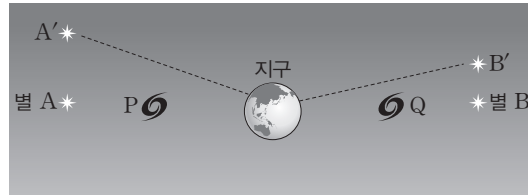
05

▶26070-0067

그림 (가)는 질량이 큰 천체 주위의 시공간을 지나는 빛의 경로를 나타낸 것으로 a , b 는 빛의 경로상의 점이고 천체의 중심으로부터의 거리는 a 가 b 보다 크다. 그림 (나)는 지구에서 멀리 떨어져 있는 밝은 별 A, B가 은하 P, Q에 의해 휘어져 각각 A', B'에 있는 것처럼 보이는 것을 나타낸 것이다. 지구와 P, Q 사이의 거리는 같고, 지구와 P, Q, A, B는 일직선상에 위치한다. P와 A 사이의 거리는 Q와 B 사이의 거리와 같고, A와 A' 사이의 거리는 B와 B' 사이의 거리보다 크다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

보기

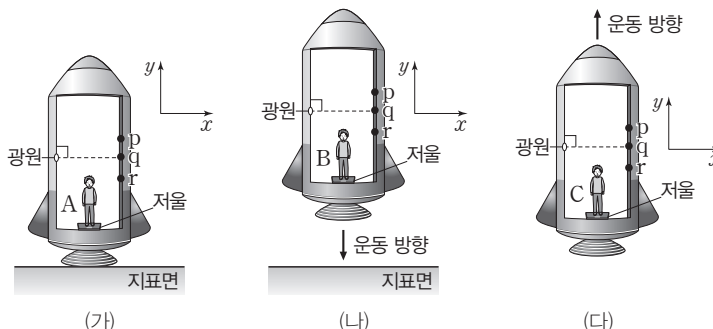
- ㄱ. (가)에서 시간은 a 에서 b 에서보다 느리게 간다.
- ㄴ. 질량은 Q가 P보다 크다.
- ㄷ. 은하 주변의 시공간을 휘게 하는 정도는 P가 Q보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄱ, ㄷ

06

▶26070-0068

그림 (가)는 학생 A가 탄 우주선이 지표면에 정지해 있는 것을, (나)는 학생 B가 탄 우주선이 지표면 근처에서 $-y$ 방향으로 등가속도 직선 운동을 하고 있는 것을 나타낸 것이다. 그림 (다)는 텅 빈 우주 공간에서 학생 C가 탄 우주선이 $+y$ 방향으로 등가속도 직선 운동을 하는 것을 나타낸 것이다. A, B, C의 질량은 같다. A, C가 탄 우주선에서 저울에 측정된 힘의 크기는 같고, B가 탄 우주선에서 저울에 측정된 힘은 0이다. (가)에서 우주선의 광원에서 발사된 빛은 우주선에 고정된 점 q 에 도달하고, (나), (다)에서 우주선의 광원에서 발사된 빛은 각각 p , q , r 중 한 점에 도달한다. (가), (나), (다)의 우주선은 동일하고 p , q , r 의 간격은 같다. (가), (나), (다)의 A, B, C가 관찰할 때 우주선의 광원에서 발사된 빛의 방향은 같고, 우주선에서 우주선의 바닥으로부터 광원과 q 의 높이는 같다.



(가)

(나)

(다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. (가)에서 A가 관찰할 때 q 에 도달하는 빛은 광원에서 $+x$ 방향으로 발사된 빛이다.
- ㄴ. (나)에서 B가 관찰할 때 광원에서 발사된 빛은 등속 직선 운동을 하여 p 에 도달한다.
- ㄷ. (다)에서 C가 관찰할 때 광원에서 발사된 빛은 q 에 도달한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㉔ 질량이 A가 B의 2배이므로 p에서 위성에 작용하는 중력의 크기는 A가 B의 2배이다.

05 케플러 법칙

위성에 작용하는 중력의 크기는 위성의 질량에 비례하고, 행성의 중심으로부터 떨어진 거리의 제곱에 반비례한다.

- ㉕ B에 작용하는 중력의 크기는 q에서 r에서의 9배이므로 행성의 중심에서 q까지의 거리를 d 라 하면, 행성의 중심에서 r까지의 거리는 $3d$ 이다. 따라서 B의 긴반지름은 $2d$ 이고, A의 긴반지름은 $4d$ 이므로 위성의 공전 주기는 A가 B의 $2\sqrt{2}$ 배이다.

✕ r에서 위성의 속력이 클수록 긴반지름이 긴 궤도를 따라 운동한다. 따라서 r를 지나는 순간 위성의 속력은 A가 B보다 크다.

- ㉖ 행성의 중심에서 p까지의 거리는 $d+4d=5d$ 이다. 따라서 A와 B의 질량이 같으므로 q에서 B에 작용하는 중력의 크기는 p에서 A에 작용하는 중력의 크기의 25배이다.

06 케플러 법칙

위성에 작용하는 중력의 크기는 위성의 질량에 비례하고, 행성의 중심으로부터 떨어진 거리의 제곱에 반비례한다.

- ㉗ 행성의 중심으로부터의 거리는 p가 q보다 작으므로 A의 속력은 p에서 q에서보다 크다.

- ㉘ p에서 A에 작용하는 중력의 크기와 B에 작용하는 중력의 크기가 같으므로 행성의 중심에서 p까지의 거리는 $2R$ 이다. 따라서 A의 긴반지름은 $3R$ 이고, B의 반지름은 R 이므로 위성의 공전 주기는 A가 B의 $3\sqrt{3}$ 배이다.

- ㉙ 행성의 중심에서 p까지의 거리는 $2R$ 이고, 행성의 중심에서 q까지의 거리는 $R+3R=4R$ 이므로 A의 가속도의 크기는 p에서 q에서의 4배이다.

04

일반 상대성 이론

짧은 풀 문제로 유형 익히기

본문 31쪽

정답 ③

가속 좌표계에서 관찰할 때, 가속 좌표계에 작용하는 관성력의 크기는 물체의 질량과 가속 좌표계의 가속도 크기를 곱한 값과 같다.

✕ 가속 좌표계에서 관찰할 때, 가속 좌표계에 있는 물체에는 좌표계 가속도 방향의 반대 방향으로 관성력이 작용한다. B가 관찰할 때 p가 다시 던진 위치로 되돌아오므로 p가 +y방향으로 운동하는 동안 p에 작용하는 관성력의 방향은 -y방향이다.

✕ A가 관찰할 때, B, C가 탄 우주선의 가속도의 크기를 각각 a_1 , a_2 라 하고, p, q를 속력 v_0 으로 +y방향으로 던져 올렸다고 하면, $d_1 = \frac{v_0^2}{2a_1}$ 이고, $d_2 = \frac{v_0^2}{2a_2}$ 이다. 따라서 $d_1 > d_2$ 이므로 $a_1 < a_2$ 이다.

B, C의 질량이 같으므로 관찰자에 작용하는 관성력의 크기는 C가 B보다 크다. 따라서 저울에 측정된 힘의 크기는 C가 B보다 크다.

- ㉔ 물체를 던져 올린 속력이 같을 때 물체가 최고점까지 도달하는 데 걸린 시간은 가속도의 크기에 반비례한다. 따라서 최고점까지 도달하는 데 걸린 시간은 p가 q보다 크다.

수능 2점 테스트

본문 32~33쪽

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

01 관성력과 가속 좌표계

등속 원운동은 속도의 크기는 일정하지만 속도의 방향이 계속 변하는 가속도 운동이므로 A의 좌표계는 가속 좌표계이다.

✕ 원운동하는 가속 좌표계에서 나타나는 관성력인 원심력의 방향은 원의 중심 방향과 반대 방향이다.

- ㉕ 우주 정거장 밖에서 정지한 관찰자가 볼 때 우주 정거장의 바닥면이 우주 정거장의 중심 방향으로 A에 작용하는 힘은 구심력이다. 원심력은 구심력과 크기가 같고 방향만 반대이므로 질량 M 인 A에 작용하는 원심력의 크기는 $MR\omega^2$ 이고 A에 작용하는 중력과 크기가 같으므로 $MR\omega^2 = Mg$ 가 성립한다. 따라서 $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}}$ 이다.

- ㉖ 원심력의 크기는 각속도의 크기의 제곱에 비례하므로 ω 가 증가하면 A의 좌표계에서 A에 작용하는 원심력의 크기는 증가한다.

02 관성력

가속도의 크기가 a 인 가속 좌표계에서 관성력의 방향은 가속도의 방향과 반대이고 크기는 a 에 비례한다.

✕ 속도-시간 그래프에서 기울기는 가속도를 의미한다. 1초일 때 엘리베이터의 속력이 증가하고 있으므로 가속도의 방향은 운동 방향

과 같은 연직 위 방향이다. 따라서 관성력의 방향은 엘리베이터의 운동 방향과 반대 방향인 연직 아래 방향이다.

㉠. 1초일 때 엘리베이터의 가속도의 크기는 2 m/s^2 이므로 A와 B에 작용하는 관성력의 크기는 각각 8 N , 4 N 이다. 1초일 때 p, q가 A, B를 당기는 힘의 크기를 T 라고 할 때, $4T = (4+2) \times 10 + 12$ 이므로 $T = 18 \text{ N}$ 이다. 따라서 1초일 때 p가 A를 당기는 힘의 크기는 18 N 이다.

㉡. 3초일 때 엘리베이터가 등속도 운동을 하므로 관성 좌표계에서 A에 작용하는 알짜힘은 0이다. 실이 A를 당기는 힘의 크기는 15 N 이므로 B가 A에 연직 위 방향으로 작용하는 힘의 크기를 F_3 이라 하면 $30 + F_3 - 40 = 0$ 이 성립하므로 $F_3 = 10 \text{ N}$ 이다. 1초일 때 실이 A를 당기는 힘과 A에 작용하는 관성력의 크기는 각각 18 N , 8 N 이므로 B가 A에 연직 위 방향으로 작용하는 힘의 크기를 F_1 이라 하면 $36 + F_1 - 40 - 8 = 0$ 이 성립하므로 $F_1 = 12 \text{ N}$ 이다. 따라서 A가 B에 연직 방향으로 작용하는 힘의 크기는 1초일 때가 3초일 때보다 2 N 만큼 크다.

03 관성력과 가속 좌표계

B, C의 질량이 같고 가속도의 크기가 같으므로 구심력의 크기는 원 궤도의 반지름에 비례한다. 가속 좌표계에서 원심력의 크기는 구심력의 크기와 같다.

㉠. 연직선과 실이 이룬 각이 θ 이고, 중력의 크기를 W , 원심력의 크기를 F 라고 할 때, $F = W \tan \theta$ 가 성립한다. B와 C의 중력의 크기는 같고, 원심력의 크기는 C가 B보다 크다. 따라서 $\theta_p < \theta_q$ 이다.

㉡. 관성 좌표계인 A의 좌표계에서 B에 작용하는 알짜힘의 방향은 원의 중심 방향이고, B의 좌표계에서 B에 작용하는 관성력인 원심력의 방향은 구심력의 방향과 반대이다. 따라서 A의 좌표계에서 B에 작용하는 알짜힘의 방향과 B의 좌표계에서 B에 작용하는 관성력의 방향은 서로 반대이다.

✕. A의 좌표계에서 C에 작용하는 구심력의 크기는 B에 작용하는 구심력의 크기보다 크다. 따라서 B의 좌표계에서 B에 작용하는 관성력의 크기는 C의 좌표계에서 C에 작용하는 관성력의 크기보다 작다.

04 블랙홀과 중력파

별이 핵융합 과정을 끝내고 초신성 폭발 이후 남은 질량이 태양 질량의 수 배에서 수십 배 이상이 되면 별은 계속 붕괴하여 밀도가 극도로 커지며 결국 블랙홀이 된다.

㉠. 일반 상대성 이론에 따르면 질량이 큰 천체일수록 주변의 시공간을 휘게 하는 정도가 크다. 질량은 P가 Q보다 크므로 시공간을 휘게 하는 정도는 P가 Q보다 크다.

㉡. 블랙홀 주위의 시공간은 극단적으로 휘어져 있어 근처를 지나는 빛조차도 탈출할 수 없게 된다. 블랙홀의 충돌처럼 무거운 천체의 질량이 짧은 시간 동안에 급격히 변화하면 시공간이 일그러져 빛의 속도로 파동처럼 퍼져 나가고 이때 퍼져 나가는 파동을 중력파라고 한다.

㉢. 아인슈타인의 일반 상대성 이론에 따르면 시공간이 많이 휘어진 곳일수록 시간이 느리게 간다. P의 중심에 가까이 갈수록 시공간이 휘어지는 정도가 커지므로 P의 중심에 가까이 갈수록 시간은 느리게 간다.

05 관성력과 가속 좌표계

크기가 a 인 가속도로 가속되는 좌표계에서 질량 m 인 물체에 작용하는 관성력의 크기는 ma 이다.

㉠. B의 좌표계에서 물체는 정지해 있으므로 B에 작용하는 관성력의 방향은 $+x$ 방향이다. 관성력의 방향은 가속 좌표계의 가속도의 방향과 반대이므로 A의 좌표계에서 수레의 가속도의 방향은 $-x$ 방향이다.

✕. (가)에서 수레의 가속도의 크기를 a , 물체의 질량을 m , 중력 가속도를 g 라 하면 $ma = mg \tan 30^\circ = \frac{mg}{\sqrt{3}}$ 이다. (나)에서 p, q가 물체에 작용하는 힘을 각각 T_1 , T_2 라 하면 $T_1 \sin 30^\circ + T_2 \cos 30^\circ = mg$, $T_1 \cos 30^\circ = T_2 \sin 30^\circ + ma$ 가 성립한다. 즉, $\frac{1}{2}T_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}T_2 = mg$, $\frac{\sqrt{3}}{2}T_1 = \frac{1}{2}T_2 + \frac{1}{\sqrt{3}}mg$ 이고 두 식을 연립하여 정리하면, $T_1 = mg$, $T_2 = \frac{1}{\sqrt{3}}mg$ 이다. 따라서 (나)에서 q가 물체에 작용하는 힘의 크기는 물체에 작용하는 중력의 크기의 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 배이다.

✕. p, q를 동시에 끊었을 때 B의 좌표계에서 물체에는 일정한 크기의 관성력과 중력이 작용하므로 물체는 등가속도 직선 운동을 한다.

06 탈출 속력과 시공간의 휘어짐

천체의 질량이 M , 반지름이 R 일 때 천체의 표면에서 탈출 속력은 $\sqrt{\frac{M}{R}}$ 에 비례한다.

㉠. 탈출 속력은 B가 A의 2배이므로 질량은 B가 A의 4배이다. 따라서 ㉠은 $4M$ 이다.

㉡. 물체의 속력이 탈출 속력보다 크면 물체는 천체를 벗어난다. 물체를 탈출 속력보다 작은 속력으로 던졌을 때 물체가 천체의 표면에서 멀어질수록 중력 퍼텐셜 에너지가 증가하고 운동 에너지가 감소한다. 운동 에너지가 0이 되는 지점에서 물체는 다시 낙하하여 천체의 표면으로 되돌아온다. v_0 은 B의 탈출 속력보다 작으므로 B의 표면에서 속력 v_0 으로 연직 위로 발사된 물체는 B의 중력에 의해 B의 표면으로 되돌아온다.

㉢. 일반 상대성 이론에 따르면 질량을 가진 천체 주위의 시공간은 휘어지고 따라서 천체 주변에서 빛도 휘어져 진행한다. 천체의 반지름이 같을 때 질량이 클수록 시공간의 휘어짐과 빛의 휘어짐이 모두 커진다. B의 질량이 A의 질량보다 크기 때문에 빛은 B에 의해서가 A에 의해서보다 더 많이 휘어진다. 따라서 $\theta_A < \theta_B$ 이다.

07 등가 원리

등가 원리에 따르면 관성력과 중력은 근본적으로 구분할 수 없다.

㉠. (가), (나)에서 바닥으로부터 같은 높이에서 수평 방향으로 던져진 물체가 바닥에 도달한 시간이 같으므로 (나)에서 우주선의 가속도는 지표면에서 중력 가속도와 같다. 따라서 $a = g$ 이다.

㉡. (나)에서 물체의 낙하 운동의 가속도가 중력 가속도와 같으므로 B는 물체의 낙하 운동이 중력에 의한 것인지 관성력에 의한 것인지 구별할 수 없다.

✕. 물체가 바닥에 도달할 때까지 걸린 시간이 같고 수평 이동 거리는 (가)에서가 (나)에서보다 크기 때문에 바닥에 도달하는 순간 속도의 수평 성분의 크기는 (가)에서가 (나)에서보다 크고 연직 방향 성분의 크기는 (가)에서와 (나)에서가 같다. 따라서 바닥에 도달하는 순간 물체의 속력은 (가)에서가 (나)에서보다 크기 때문에 바닥에 도달한 순간 물체의 운동 에너지는 (가)에서가 (나)에서보다 크다.

08 중력 렌즈 효과

질량이 큰 천체의 중력에 의해 시공간이 휘어지고 빛도 휘어져 진행한다. 이로 인해 별의 위치가 실제 위치와 다르게 관측되는 중력 렌즈 효과가 나타난다.

㉠. A 주변의 시공간이 B 주변의 시공간보다 많이 휘어져 있으므로 질량은 A가 B보다 크다. 질량이 더 큰 천체 주변에서 빛이 더 많이 휘어져 진행하므로 실제 별의 위치와 관측된 별의 위치 차이가 커진다. 따라서 (나)는 A에 의해 관측된 모습이고, (다)는 B에 의해 관측된 모습이다.

✕. 질량이 큰 천체 주변에 시공간이 더 많이 휘어지고 시간도 더 느리게 간다. 따라서 시간은 A의 표면에서가 B의 표면에서보다 느리게 간다.

㉡. 별이 실제 위치와 다른 위치에서 관측되는 것은 휘어진 시공간을 따라 진행한 빛에 의한 중력 렌즈 효과로 설명할 수 있다.

수능 3점 테스트

본문 34~36쪽

01 ①

02 ⑤

03 ③

04 ⑤

05 ③

06 ④

01 관성력과 가속 좌표계

(나)에서 C의 좌표계에서 버스 안의 추에는 중력, 실이 추를 당기는 힘, 관성력이 작용하여 추가 정지해 있는 것으로 관찰된다. 반면 A의 좌표계에서는 중력과 실이 추를 당기는 힘의 합력에 의해 추가 버스와 같은 크기의 가속도로 등가속도 운동하는 것으로 관찰된다.

✕. (가)에서 버스는 운동하고 있으나 실이 추를 당기는 힘과 중력이 평형을 이루어 추는 실에 연직 방향으로 연결되어 있다. 즉, (가)에서 버스는 등속도 운동을 하므로 A의 좌표계에서 추에 작용하는 알짜힘은 0이다. (나)에서 버스는 운동 방향의 반대 방향으로 가속되고 있으므로 (나)에서 버스의 가속도의 크기를 a , 추의 질량을 m 이라 하면 A의 좌표계에서 추에 작용하는 알짜힘의 크기는 ma 이다. 따라서 A의 좌표계에서 추에 작용하는 알짜힘의 크기는 (나)에서가 (가)에서보다 크다.

㉠. 연직선과 추에 연결된 실이 이룬 각이 θ 이고, 추의 중력의 크기를 W , 관성력의 크기를 F 라고 할 때, $F = W \tan \theta = W \tan 30^\circ = \frac{W}{\sqrt{3}}$ 이다. 추의 질량과 Q의 질량이 같으므로 C의 좌표계에서 Q에 작용하는 관성력의 크기는 Q에 작용하는 중력의 크기보다 작다.

✕. (가)에서 버스는 등속도 운동을 하므로 P에 연결된 용수철은 길이가 변형되지 않는다. (나)에서 Q에는 $+x$ 방향으로 관성력이 작용하므로 용수철이 물체를 당기는 힘과 관성력이 같아질 때까지 용수철이 늘어난다. 따라서 $L_{(가)} = L_0 < L_{(나)}$ 이다.

02 탈출 속력과 등가 원리

행성 표면에 정지해 있는 우주선의 한쪽 벽면에서 방출된 빛은 행성의 질량에 의해 휘어진 시공간을 따라 진행한다.

✕. 반지름이 같을 때 행성 표면에서 물체의 가속도의 크기는 행성의 질량에 비례한다. 표면으로부터 같은 높이에서 자유 낙하시킨 물체의 도달 시간이 t , 행성 표면의 중력 가속도가 g 일 때 $t \propto \frac{1}{\sqrt{g}}$ 이고 물체가 자유 낙하 하는 데 걸린 시간이 P에서가 Q에서의 $\sqrt{2}$ 배이므로 중력 가속도는 Q에서가 P에서의 2배이고, 행성의 질량은 Q가 P의 2배이다.

㉠. 행성의 질량이 M , 반지름이 R 일 때 행성의 표면에서 탈출 속력은 $\sqrt{\frac{M}{R}}$ 에 비례한다. 질량은 Q가 P의 2배이므로 행성 표면에서의 탈출 속력은 Q에서가 P에서의 $\sqrt{2}$ 배이다.

㉡. 행성 표면에서 중력이 클수록 광원에서 발사된 빛의 휘어짐은 커진다. 행성 표면에서 중력이 Q에서가 P에서보다 크기 때문에 Q 표면의 우주선의 광원에서 b 를 향해 발사된 빛은 d 에 도달한다.

03 관성력과 가속 좌표계

B의 좌표계에서 등속도 운동하는 버스 안의 물체에는 실이 물체를 당기는 힘과 중력의 합력이 0이 되어 물체는 평형 상태를 유지한다. A의 좌표계에서 가속도 운동하는 버스 안의 물체에 실이 물체를 당기는 힘과 중력, 관성력이 작용하여 물체가 정지한 것으로 관찰된다.

㉠. (가)에서 빗면의 경사각과 실이 y 축과 이루는 각이 같으므로 실이 물체를 당기는 힘의 크기(T_1)는 중력의 크기(W)와 같다($T_1 = W$). 따라서 B의 좌표계에서 (가)의 물체에 작용하는 알짜힘은 0이다.

✕. (나)에서 실이 물체를 당기는 힘의 크기와 중력의 x 축 방향 성분의 크기를 비교해 보면 $T_2 \sin \theta > W \sin \phi$ 이다. A의 좌표계에서 물체가 정지해 있으므로 관성력의 크기를 F 라 하면,

$T_2 \sin \theta = W \sin \phi + F$ 가 성립해야 한다. 따라서 관성력은 $-x$ 방향으로 작용한다.

㉡. (나)에서 중력과 실이 물체를 당기는 힘의 y 축 방향 성분은 평형을 이루므로 $T_2 \cos \theta = W \cos \phi$ 이고 $T_1 = W$ 이므로

$T_1 : T_2 = \cos \theta : \cos \phi$ 이다.

04 관성력과 가속 좌표계

A, B의 좌표계에서 물체가 최고점에 도달할 때 우주선 바닥에 수직인 방향의 속력이 0이므로 최고점까지 올라가는 데 걸린 시간은 물체의 가속도의 크기에 반비례한다.

㉠. (가)와 (나)에서 물체를 던진 속도의 수평 성분의 크기는 $v_0 \cos \theta$ 로 같으므로 물체가 최고점까지 운동하는 데 걸린 시간은 A의 좌표계에서가 B의 좌표계에서의 $\frac{3}{2}$ 배이다. 따라서 $\frac{1}{g-a} : \frac{1}{g} = 3 : 2$ 이므로 $a = \frac{1}{3}g$ 이다.

㉔. A, B의 좌표계에서 물체의 가속도의 크기는 각각 $\frac{2}{3}g$, g 이고, 던진 속도의 수직 성분의 크기가 같으므로 물체가 도달하는 최고점의 높이는 가속도의 크기에 반비례한다. 따라서 우주선 바닥에서 물체의 최고점까지의 높이는 A의 좌표계에서 B의 좌표계에서의 $\frac{3}{2}$ 배이다.

㉕. (가)에서 $a=g$ 이면 A의 좌표계에서 관성력의 크기는 중력의 크기와 같다. 따라서 물체는 우주선 바닥과 θ 를 이루는 방향으로 v_0 의 속력으로 등속 직선 운동을 한다.

05 시공간의 휘어짐과 중력 렌즈

아인슈타인은 중력을 힘으로 간주하지 않고 시공간의 휘어짐과 관련이 있다고 제안하였는데 질량이 큰 천체에 가까울수록 시공간이 휘어진 정도는 커진다.

✕. 일반 상대성 이론에 따르면 질량이 큰 천체 주위에서 시공간이 휘어지는데 시공간이 많이 휘어진 곳일수록 시간이 느리게 간다. 시공간이 휘어진 정도는 b에서 a에서보다 크기 때문에 시간은 b에서 a에서보다 느리게 간다.

✕. 은하 P, Q의 중력에 의해 시공간이 휘어지고 빛도 휘어져 진행하여 별의 위치가 실제 위치와 다르게 관측되는 중력 렌즈 효과가 나타난다. 은하의 질량이 클수록 빛이 휘어지는 정도가 커져 별의 실제 위치와 관측 위치의 차이가 커진다. A와 A'의 차이가 B와 B'의 차이보다 크므로 은하의 질량은 P가 Q보다 크다.

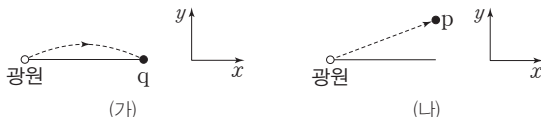
㉔. 질량이 큰 천체일수록 시공간을 휘게 하는 정도가 크다. 따라서 시공간을 휘게 하는 정도는 P가 Q보다 크다.

06 가속 좌표계와 등가 원리

가속도 운동을 하는 우주선의 내부에서는 빛의 진행 경로가 휘어진다.

✕. 지표면의 우주선에서는 지구의 중력에 의해 빛의 진행 경로가 휘어진다. (가)에서 광원에서 발사된 빛이 같은 높이의 q에 도달했으므로 빛의 진행 경로는 그림 (가)와 같다. 따라서 (가)에서 A가 관찰할 때 q에 도달한 빛은 광원에서 q보다 위쪽 지점을 향해 발사된 빛이다.

㉔. (나)에서 B가 탄 우주선에서 저울에 측정된 힘이 0이므로 관성력의 방향은 중력의 방향과 반대이고 관성력의 크기는 중력의 크기와 같다. 따라서 빛은 그림 (나)와 같이 진행한다. 즉, (나)에서 B가 관찰할 때 광원에서 발사된 빛은 등속 직선 운동을 하여 p에 도달한다.



㉕. (다)에서 C가 탄 우주선에서 저울에 측정된 힘의 크기가 (가)에서 A가 탄 우주선에서와 같으므로 (다)의 우주선의 가속도의 크기는 g 이고 연직 아래 방향으로 관성력이 작용한다. 따라서 (다)에서 C가 관찰한 빛의 진행 경로는 (가)에서 A가 관찰한 빛의 진행 경로와 같다. 즉, (다)에서 C가 관찰할 때 광원에서 발사된 빛은 q에 도달한다.

테마
05

일과 에너지

많은 풀 문제로 유형 익히기

본문 39쪽

정답 ④

중력 가속도가 g , 실의 길이가 l 일 때 B가 처음으로 s에 도달할 때까지 걸린 시간은 단진동의 주기의 $\frac{1}{2}$ 배인 $\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 이다.

㉔. A가 수평면에 도달할 때까지 걸린 시간은 $2\sqrt{\frac{l}{g}}$ 이므로 B가 처음으로 s에 도달할 때까지 걸린 시간은 A가 수평면에 도달할 때까지 걸린 시간보다 크다.

㉕. A를 놓은 순간부터 수평면에 도달할 때까지 A의 역학적 에너지는 보존되고, 단진동하는 B의 역학적 에너지도 보존된다. A, B의 질량을 각각 m_1 , m_2 라 할 때, A에 대해서는 $\frac{1}{2}m_1v_1^2 = m_1gl$ 이 성립하므로 $v_1 = \sqrt{2gl}$ 이고, B에 대해서는 $\frac{1}{2}m_2v_2^2 = m_2g\left(\frac{l}{20}\right)$ 이 성립하므로 $v_2 = \sqrt{\frac{gl}{10}}$ 이다. 따라서 $\frac{v_1}{v_2} = 2\sqrt{5}$ 이다.

✕. B가 q에서 r까지 운동하는 동안 B의 중력 퍼텐셜 에너지 감소량은 운동 에너지 증가량과 같다. 따라서 B의 역학적 에너지는 q에서와 r에서가 같다.

수능 2점 테스트

본문 40~42쪽

01 ⑤	02 ④	03 ③	04 ⑤	05 ④
06 ⑤	07 ②	08 ①	09 ⑤	10 ⑤
11 ②	12 ①			

01 일과 운동 에너지

물체는 x 축 방향으로 등속도 운동을, y 축 방향으로 등가속도 운동을 한다.

✕. 물체에 작용하는 알짜힘은 y 축 방향으로 작용하며, 0초부터 2초까지 속력이 감소하므로 1초일 때 물체에 작용하는 힘의 방향은 운동 방향과 같지 않다.

㉔. 4초일 때 속도의 y 성분의 크기를 v_y 라 하면 2초일 때 속도의 y 성분은 0이므로 2초부터 4초까지 평균 속도의 y 성분의 크기는 $\frac{v_y}{2}$ 이고 2초부터 4초까지 변위의 y 성분의 크기는 10m이므로 $v_y = 10$ m/s이다. 알짜힘이 한 일은 운동 에너지의 변화량과 같고 물체의 질량은 2kg이므로 2초부터 4초까지 물체에 작용하는 알짜힘이 한 일은 $\frac{1}{2} \times 2 \times 10^2 = 100$ (J)이다.

㉕. 물체 속도의 x 성분의 크기는 5 m/s이고 4초일 때 속도의 y 성분의 크기는 10 m/s이므로 물체의 운동 에너지는 $\frac{1}{2} \times 2 \times (\sqrt{5^2 + 10^2})^2 = 125$ (J)이다.