

06

일반 상대성 이론

수록 구성

- 개념 기본 문제
- 개념 적용 문제
- 1등급 도전 문제
- 정답과 해설

일반 상대성 이론은 중력에 의해 빛의 경로가 휘어지고, 블랙홀이 존재하며, 중력이 클수록 시간이 느리게 흐르는 현상들을 모두 설명한다.

통합과학 연계

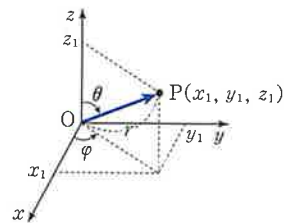
「관성」

통합과학에서는 물체가 운동 상태를 유지하려는 성질인 관성에 대해 배웠다. 역학과 에너지에서는 관성이 작용하는 좌표계와 관성이 작용하지 않는 좌표계에 대해 배운다.

기준틀

교실이나 방, 차 안이나 지표면, 엘리베이터 안과 같이 물체의 위치를 관찰하거나 측정하는 특정한 장소를 기준틀이라고 한다.

위치 표현



기준점을 O로 할 때, 점 P의 위치는 좌표나 좌표 (x_1, y_1, z_1) , (r, θ, φ) 등으로 나타낼 수 있다.

1 관성력과 등가 원리

정지해 있던 버스가 앞으로 출발하면 그 안의 승객들은 뒤로 밀리는 느낌을 받는다. 이렇게 느껴지는 가상의 힘을 관성력이라고 한다. 아인슈타인은 관성력과 중력은 서로 구분할 수 없는 동일한 힘이라는 등가 원리를 제시하였다.

1. 관성 좌표계와 가속 좌표계

물체의 운동을 기술하려면 시간과 물체의 위치를 측정하여야 한다. 이를 위해 관찰자는 물체의 위치를 표시할 기준틀을 정하고 좌표계를 설정한다. 좌표계는 관찰자가 물체의 위치를 측정하는 기준이므로, 관찰자의 운동 상태에 따라 달라진다.

- (1) 관성 좌표계(관성계): 정지해 있거나 등속도 운동을 하는 관찰자를 기준으로 하는 좌표계이다. 관성 좌표계에서는 뉴턴 운동 제1법칙(관성 법칙)이 성립한다.
- (2) 가속 좌표계(비관성 좌표계): 속도가 변하는 버스나 원운동을 하는 놀이 기구에 탄 관찰자처럼, 가속도 운동을 하는 관찰자를 기준으로 한 좌표계를 가속 좌표계라고 한다. 지면에 정지해 있는 물체를 가속도 운동을 하는 관찰자가 보면 물체가 자신과 반대 방향으로 가속되는 것으로 보인다. 이처럼 가속 좌표계에서는 물체에 아무런 힘이 작용하지 않아도 물체가 가속도를 가지는 것으로 관측되기도 하므로, 뉴턴 운동 제1법칙이 성립하지 않는다.

(3) 운동하는 버스에서 좌표계와 관성 법칙의 성립 여부

상황	일정한 속도 $\vec{v}$ 로 운동하는 버스	가속도 $\vec{a}$ 로 가속되는 버스
관찰자와 좌표계		
	• 관찰자: 승객 • 좌표계: 관성 좌표계	• 관찰자: 승객 • 좌표계: 가속 좌표계
승객이 창문 밖으로 본 나무의 운동	일정한 속도 $-\vec{v}$ 로 등속도 운동을 한다.	반대 방향으로 가속도 $-\vec{a}$ 로 가속된다.
관성 법칙의 성립 여부	버스의 바닥에 구슬을 가만히 놓으면 구슬이 정지해 있다. → 관성 법칙이 성립한다.	버스의 바닥에 구슬을 가만히 놓으면 구슬은 버스의 가속도 방향과 반대로 이동하는 가속 운동을 한다. → 관성 법칙이 성립하지 않는다.

개념 기본 문제

01 좌표계에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 관성 좌표계에서는 관성 법칙이 성립한다.
- ㄴ. 가속 좌표계에 있는 관찰자는 중력과 관성력을 구별할 수 있다.
- ㄷ. 관성 좌표계에서 뉴턴 운동 법칙이 성립하려면 관성력을 고려해야 한다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

02 관성력에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

- ㄱ. 작용 반작용 법칙을 만족한다.
- ㄴ. 중력과 구별될 수 없는 힘이다.
- ㄷ. 가속도 운동을 하는 좌표계에서 나타난다.
- ㄹ. 등속 원운동을 하는 좌표계에서 나타나는 원심력은 관성력이다.

03 그림과 같이 지구에서 엘리베이터 안 관찰자가 손에 공을 들고 저울로 몸무게를 측정하였다니 저울 눈금이 0을 가리켰다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

- ㄱ. 관찰자가 볼 때 관찰자에 작용하는 중력과 관성력이 힘의 평형을 이룬다.
- ㄴ. 엘리베이터는 중력 가속도의 크기와 같은 가속도의 크기로 등가속도 운동한다.
- ㄷ. 위 상황에서 관찰자가 공을 가만히 놓으면 공은 관찰자가 볼 때 가속 운동한다.

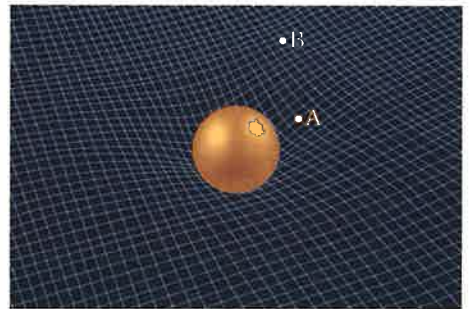
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

04 그림은 관찰자가 고층 건물의 엘리베이터를 타고 저울 위에 서서 연직 위로 올라가고 있는 것을 나타낸 것이다.



엘리베이터의 속력이 빨라질 때 저울에서 측정되는 값 w_1 , 속력이 느려질 때 저울에서 측정되는 값 w_2 , 속력이 일정할 때 저울에서 측정되는 값 w_3 의 크기를 등호 또는 부등호로 비교하시오.

05 그림은 천체 주위의 시공간이 휘어진 모습을 모식적으로 나타낸 것이다. A는 천체에 가까운 점이고 B는 천체에서 먼 지점이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 천체의 질량에 의해 시공간이 휘어졌다.
- ㄴ. 시공간이 휘어진 정도는 A가 B보다 크다.
- ㄷ. 빛이 A를 지나는 동안 빛의 경로는 휘어지지 않는다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

06 다음은 질량의 두 가지 개념에 대한 설명이다.

물체에 작용하는 중력을 중력 가속도 g 로 나누어 구한 질량을 (㉠) 질량이라고 하고, 물체에 작용한 알짜힘을 가속도로 나누어 구한 질량을 (㉡) 질량이라고 한다. 중력과 관성력을 구별할 수 없다는 원리를 (㉢)라고 한다.

㉠~㉢에 들어갈 알맞은 말을 각각 쓰시오.

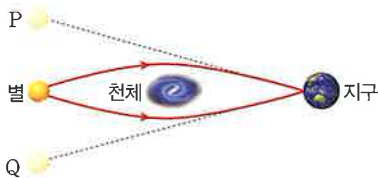
07 그림은 우주선 안의 우주인이 볼 때 광원에서 점 P를 향해 방출된 빛이 P보다 $-y$ 방향에 있는 점 Q에 도달하는 경로를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.



보기

- ㄱ. 우주선이 중력이 없는 우주에서 $+y$ 방향으로 가속 운동할 때 일어날 수 있는 현상이다.
- ㄴ. 우주선이 중력 가속도가 $-y$ 방향인 천체 표면에 정지해 있을 때 일어날 수 있는 현상이다.
- ㄷ. 우주선이 중력이 없는 우주에서 운동하고 있다면 우주인은 $-y$ 방향으로 관성력을 느낀다.

08 그림은 별에서 방출된 빛이 천체를 지나 지구에 도달하는 경로를 나타낸 것이다. 점 P, Q는 지구 근처를 지나는 빛의 경로를 연장한 선 위에 있는 점이다.

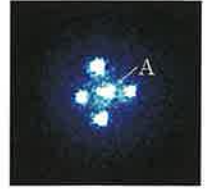


이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

- ㄱ. 빛의 경로가 중력에 의해 휘어졌다.
- ㄴ. 이 현상을 중력 렌즈 효과라고 한다.
- ㄷ. 지구에서 볼 때 별이 P, Q에 있는 것처럼 관측된다.

09 그림은 1985년에 관측한 '아인슈타인 십자가'를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

- ㄱ. 실제 존재하는 5개의 천체 사진이다.
- ㄴ. 특수 상대성 이론으로 설명되는 현상이다.
- ㄷ. A의 질량이 클수록 A 주변을 지나는 빛은 더 많이 휘어진다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

10 블랙홀에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

- ㄱ. 블랙홀에서 탈출 속도는 빛의 속도보다 크다.
- ㄴ. 블랙홀의 질량이 클수록 탈출 속도는 작아진다.
- ㄷ. 블랙홀의 질량이 클수록 블랙홀 주변의 시공간이 더 많이 휘어진다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

11 블랙홀과 블랙홀로 빨려 들어가는 주변 물질들에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

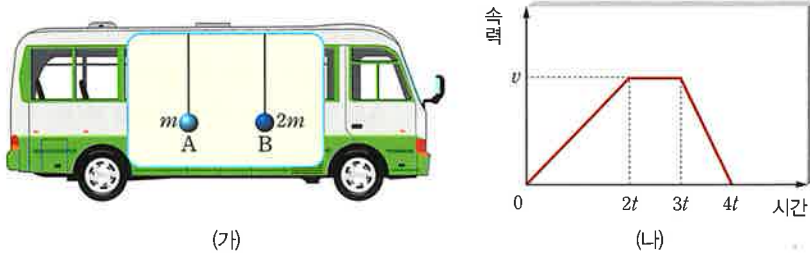
- ㄱ. 블랙홀에 가까울수록 시간이 천천히 흐른다.
- ㄴ. 블랙홀로 빨려 들어가는 물질은 높은 온도로 가열되면서 전자기파를 방출한다.
- ㄷ. 블랙홀의 사건의 지평선 내부에서 물질은 빠져나올 수 없지만 빛은 빠져나올 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 적용 문제

➤ 관성력

- 01** 그림 (가)는 정지해 있는 버스 천장에 질량이 $m, 2m$ 인 물체 A, B가 매달려 있는 것을, 그림 (나)는 이 버스가 오른쪽으로 운동하는 동안 버스의 속력을 시간에 따라 나타낸 것이다.



➤ 관성력의 방향은 좌표계의 가속도 방향의 반대이고, 관성력의 크기는 질량과 좌표계의 가속도를 곱한 값이다.

버스 안에서 관찰한 A, B의 운동에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

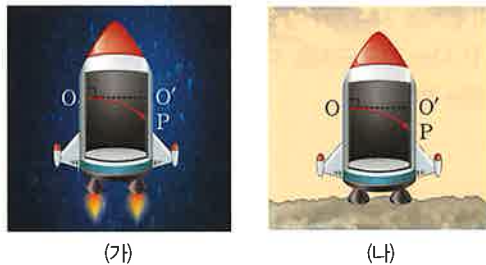
보기

- ㄱ. 시간 t 일 때 A에 작용하는 관성력의 방향은 오른쪽이다.
- ㄴ. 시간 t 일 때 A와 B를 매단 줄이 기울어진 각도는 동일하다.
- ㄷ. 시간 t 일 때 B에 작용하는 관성력의 크기와 시간 $3.5t$ 일 때 A에 작용하는 관성력의 크기는 서로 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 등가 원리와 빛의 휘어짐

- 02** 그림 (가)는 중력이 작용하지 않는 공간의 우주선 안에서 레이저 빛을 점 O에서 점 O'를 향해 비추었더니 빛의 경로가 휘어져 점 P에 도달하는 모습을 나타낸 것이고, 그림 (나)는 중력 가속도의 크기가 a 인 행성 표면에 정지한 우주선 안에서 (가)와 동일하게 레이저 빛을 비추었을 때 빛의 경로가 휘어져 점 P에 도달하는 모습을 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



➤ 중력이 작용할 때 빛의 경로가 휘어진다.

보기

- ㄱ. (가)에서 우주선의 가속도 크기는 a 이다.
- ㄴ. (가)에서 우주선 밖의 관성 좌표계에서 관찰해도 빛의 경로가 휘어져 보인다.
- ㄷ. (나)에서 빛의 경로가 휘어지는 것은 빛이 질량을 가지고 있기 때문이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▶ 빛의 휘어짐

- 03 그림은 에딩턴이 관측한 별의 위치 변화를 나타낸 것으로, 한밤중에 촬영한 별의 위치는 화살표의 시작점 A이고, 일식 때 촬영한 별의 위치는 화살표의 끝점 B이다.



▶ 별빛이 태양의 중력에 의해 휘어져 지구에 도달하는데, 지구의 관찰자는 별빛의 경로가 직진하는 것으로 인식한다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

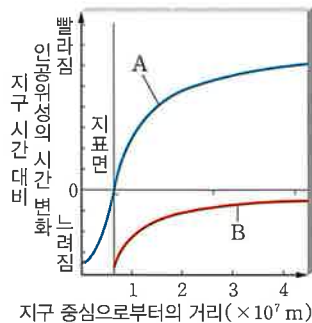
보기

- ㄱ. 중력에 의해 빛의 경로가 휘어진다는 증거이다.
- ㄴ. 아인슈타인의 일반 상대성 이론에 의해 설명된다.
- ㄷ. 태양에 가까울수록 시공간이 더 많이 휘어짐을 알 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▶ 중력 시간 지연

- 04 그림은 GPS 위성 내부에 있는 시계의 시간을 지표면에 있는 시계의 시간과 비교하여 그 차이를 지구 중심으로부터의 거리에 따라 나타낸 것이다. A와 B는 특수 상대성 이론과 일반 상대성 이론에 의한 효과를 순서 없이 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▶ 특수 상대성 이론에 따르면 물체의 속력이 빠를수록 시간이 느리게 흐르고, 일반 상대성 이론에 따르면 중력이 작을수록 시간이 빠르게 흐른다.

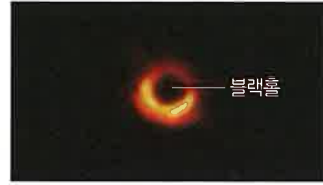
보기

- ㄱ. 일반 상대성 이론에 의한 효과를 나타내는 그래프는 A이다.
- ㄴ. 인공위성에서 보낸 정보를 분석할 때 시간 보정을 하여야 한다.
- ㄷ. 특수 상대성 이론에 따르면 인공위성이 빠르게 움직이므로 인공위성에 있는 시계는 지표면의 시계보다 느리게 간다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 블랙홀

- 05** 그림은 세계 여러 곳의 전파 망원경으로 관측하여 시각화한 블랙홀을 나타낸 것으로, 밝은 고리 안의 검은 부분은 블랙홀과 블랙홀의 그림자이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



➤ 블랙홀 주변은 시공간이 극도로 휘어져 있으므로 블랙홀 근처를 지나는 빛의 경로는 크게 휘어진다.

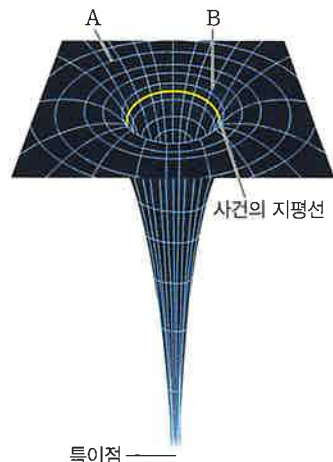
보기

- ㄱ. 블랙홀의 사건의 지평선 내부에서는 빛이 빠져나오지 못한다.
- ㄴ. 블랙홀 주변의 밝은 고리는 중력에 의해 경로가 휘어진 빛이 모여 나타난 것이다.
- ㄷ. 태양보다 질량이 작은 별도 질량 변화 없이 극도로 압축되어 블랙홀이 될 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 블랙홀

- 06** 그림은 블랙홀에 의해 휘어진 시공간을 2차원 평면 위에 무거운 질량을 올려 둔 상황에 비유한 것을 나타낸 것이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



➤ 블랙홀에서 빛조차 빠져나올 수 없는 경계를 사건의 지평선이라고 한다.

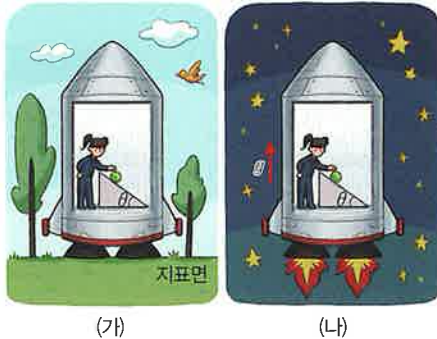
보기

- ㄱ. A에서의 시간이 B에서의 시간보다 느리게 간다.
- ㄴ. 외부의 멀리 있는 관찰자가 볼 때 사건의 지평선에서는 시간이 멈추는 것처럼 보인다.
- ㄷ. 사건의 지평선을 지나 블랙홀로 빨려 들어가는 물질에서 방출되는 X선을 관측할 수 있다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 등가 원리

- 07 그림 (가)는 지구에 정지한 우주선 내부에서, 그림 (나)는 중력이 없는 우주 공간에 위쪽 방향으로 일정한 가속도 g 로 운동하는 우주선 내부에서 경사각이 θ 인 빗면에 물체를 가만히 놓은 모습을 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 지표면의 중력 가속도는 g 이고, 모든 마찰은 무시하며 우주선 내부 관찰자는 우주선 밖 상황을 알 수 없다.)



➤ 등가 원리에 의하면 중력과 관성력은 구별할 수 없다.

보기

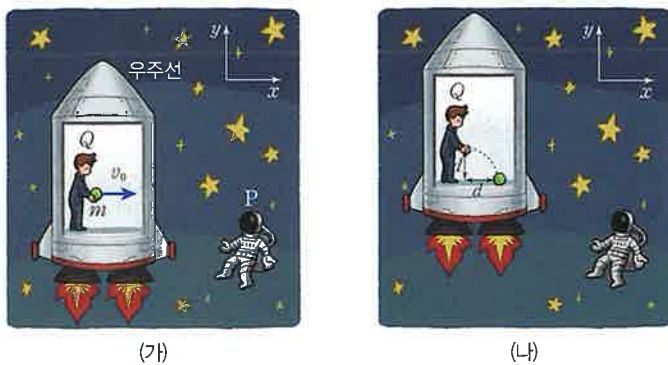
- ㄱ. (가)에서 관찰자가 보았을 때 물체는 가속도 크기가 $g \sin \theta$ 인 등가속도 운동을 한다.
 ㄴ. (가)와 (나)에서 관찰자가 보았을 때 물체에 작용하는 알짜힘의 크기는 같다.
 ㄷ. (나)에서 관찰자는 물체에 작용하는 힘이 중력인지 관성력인지 알 수 없다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 등가 원리

- 08 그림 (가)와 같이 같이 텅 빈 우주 공간에 정지한 관찰자 P에 대해 우주선이 $+y$ 방향으로 등가속도 직선 운동을 할 때 우주선 안의 관찰자 Q가 질량이 m 인 물체를 $+x$ 방향으로 v_0 의 속력으로 던지니 그림 (나)와 같이 물체가 $+x$ 방향으로 거리 d , $-y$ 방향으로 거리 d 만큼 이동하였다.

➤ 관성력은 가속 좌표계에 있는 관찰자나 물체에서 나타나는 힘이다.



Q가 물체를 던진 순간부터 바닥에 도달할 때까지에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 물체의 크기는 무시한다.)

보기

- ㄱ. P가 관측할 때 Q에는 $-y$ 방향으로 관성력이 작용한다.
 ㄴ. P가 관측할 때 물체는 등속 직선 운동을 한다.
 ㄷ. Q가 관측할 때 물체에 작용하는 관성력의 크기는 $\frac{2mv_0^2}{d}$ 이다.

- ① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

ㄷ. 인공위성에 작용하는 구심력은 중력이므로 A에 작용하는 중력의 크기는 $G\frac{Mm}{r^2}$, B에 작용하는 중력의 크기는 $G\frac{(2Mm)}{(2r)^2} = G\frac{Mm}{2r^2}$ 이다. 따라서 인공위성에 작용하는 구심력의 크기는 A가 B의 2배이다.

[바로알기] ㄴ. 인공위성에 작용하는 중력이 구심력이므로 $\frac{mv^2}{r} = G\frac{Mm}{r^2}$ 이고, 운동 에너지 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 이다. 따라서 $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = G\frac{Mm}{2r}$ 에서 $E_k \propto \frac{m}{r}$ 이다. B의 질량과 반지름이 모두 A의 2배이므로 운동 에너지는 A와 B가 서로 같다.

07 ㄱ, ㄴ. 중력은 두 물체의 질량의 곱에 비례하고, 두 물체 사이 거리의 제곱에 반비례한다. 행성으로부터 떨어진 거리가 r_0 로 같을 때 중력의 비가 4:9이므로 질량의 비도 4:9이다. A에 작용하는 행성의 중력이 $4F_0$ 일 때 거리가 r_0 이고 B에 작용하는 행성의 중력이 $4F_0$ 일 때 거리가 x 이므로 행성의 질량을 M , A의 질량 $m_1 = 4m$, B의 질량 $m_2 = 9m$ 이라고 하면 $4F_0 = \frac{4GMm}{r_0^2} = \frac{9GMm}{x^2}$ 에서 $x = \frac{3}{2}r_0$ 이다.

ㄷ. 중력은 두 물체 사이 거리의 제곱에 반비례한다. A가 행성에서 가장 멀 때 A의 중력의 크기 F_0 은 행성에서 가장 가까울 때의 중력의 크기의 $\frac{1}{4}$ 이므로 행성에서 A까지의 거리는 $2r_0$ 이 된다. 마찬가지로 B가 행성에서 가장 멀 때 중력의 크기는 가장 가까울 때의 $\frac{1}{9}$ 이므로, 행성에서 B까지의 가장 먼 거리는 r_0 의 3배인 $3r_0$ 이다.

A의 긴반지름은 $\frac{r_0 + 2r_0}{2} = \frac{3}{2}r_0$,

B의 긴반지름은 $\frac{r_0 + 3r_0}{2} = 2r_0$ 으로, 긴반지름은 B가 A의 $\frac{4}{3}$ 배이다. 따라서 조화 법칙에 의해 공전 주기를 비교하면 $\frac{T_B^2}{T_A^2} = \left(\frac{4}{3}\right)^3$ 에서 $T_B = \left(\frac{4}{3}\right)^{\frac{3}{2}} T_A$ 이므로 공전 주기는 B가 A의 $\left(\frac{4}{3}\right)^{\frac{3}{2}} = \frac{8\sqrt{3}}{9}$ 배이다.

08 ㄱ. B가 공전하는 동안 면적 속도가 일정하고 행성에서 p까지 거리는 $2R$, 행성에서 q까지 거리는 $6R$ 이므로 B의 속력은 p에서 q에서의 3배이다.
ㄴ. 조화 법칙에 따라 $T^2 \propto r^3$ 이고, A의 반지름은 R , B의

긴반지름은 $4R$ 이므로 B의 공전 주기는 T 의 $\sqrt{4^3} = 8$ 배인 $8T$ 이다. B가 q에서 r까지 가는 데 걸린 시간이 r에서 p까지 가는 데 걸린 시간과 같고 q에서 r를 거쳐 p까지 가는 데 걸린 시간이 전체 주기의 $\frac{1}{2}$ 이므로 q에서 r까지 가는 데 걸린 시간은 주기의 $\frac{1}{4}$ 인 $8T \times \frac{1}{4} = 2T$ 이다.

[바로알기] ㄷ. 면적 속도가 일정하므로 B와 행성을 잇는 선이 q에서 r까지 쓸고 간 면적은 r에서 p까지 쓸고 간 면적과 같다. 따라서 색칠한 부분의 면적은 타원 전체 면적의 $\frac{1}{4}$ 이다. 타원의 중심에서 초점까지 거리를 c , 긴반지름을 a , 짧은반지름을 b 라고 하면 타원 전체 면적은 πab 이며, $c^2 = a^2 - b^2$ 이다. 따라서 $(2R)^2 = (4R)^2 - b^2$ 이므로 B의 타원 궤도의 짧은반지름 $b = 2\sqrt{3}R$ 이고, 색칠한 부분의 면적은 $\frac{1}{4} \times (\pi \times 4R \times 2\sqrt{3}R) = 2\sqrt{3}\pi R^2$ 이다.

05 탈출 속도

중요 개념 체크

- 1 $-G\frac{Mm}{r}$ 2 $-G\frac{Mm}{2r}$ 3 큰
4 (1) × (2) ○ (3) ○ (4) ×

66쪽

기본 문제

68쪽~69쪽

- 01 ⑤ 02 ③ 03 ④ 04 ②
05 $\sqrt{3} : \sqrt{20} (= \sqrt{3} : 2\sqrt{5})$ 06 ⑤ 07 1.1v
08 ③ 09 ①

01 ㄱ. 탈출 속도는 물체가 행성이 작용하는 중력의 영향으로부터 벗어날 수 있는 행성 표면에서의 최소 속력이다.
ㄴ. 물체가 행성 표면을 탈출 속도로 출발한 후 행성에서 무한히 먼 지점에 위치했을 때 물체의 속력과 중력에 의한 위치 에너지가 모두 0이 되므로 역학적 에너지도 0이 된다.
ㄷ. 중력 상수가 G , 질량이 M , 반지름이 R 인 행성의 탈출 속도는 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 으로, 물체의 질량 m 과는 무관하다.

- 02 ㄱ. 중력의 크기 $F=G\frac{Mm}{r^2}$ (G : 중력 상수)이므로 거리의 제곱에 반비례한다. 따라서 중력의 크기는 지표면에서 가장 크다.

ㄴ. 거리·힘 그래프에서 그래프 아래 면적은 일과 같고 한 일만큼 중력에 의한 위치 에너지가 변하므로, 색깔한 부분의 면적은 두 지점 사이의 중력에 의한 위치 에너지의 차이를 나타낸다.

[바로알기] ㄴ. 중력은 지구 중심으로부터의 거리의 제곱에 반비례하므로 지구 중심으로부터의 거리가 2배 멀어지면 중력의 크기는 $\frac{1}{4}$ 배가 된다.

- 03 ㄱ. 운동 에너지 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 이고, 중력이 구심력이므로 $\frac{mv^2}{r}=G\frac{Mm}{r^2}$ 에서 $\frac{1}{2}mv^2=G\frac{Mm}{2r}$ 이다. 따라서

$$E_{kA}=\frac{GMm}{2r}, E_{kB}=\frac{GMm}{6r} \text{이므로 } E_{kA}=3E_{kB} \text{이다.}$$

ㄴ. 중력에 의한 위치 에너지 $E_p=-\frac{GMm}{r}$ 이다. 따라서

$$E_{pA}=-\frac{GMm}{r}, E_{pB}=-\frac{GMm}{3r} \text{이므로 } E_{pB} \text{는}$$

$$E_{pA} \text{보다 } \frac{2GMm}{3r} \text{만큼 크다.}$$

[바로알기] ㄴ. $E_A=E_{kA}+E_{pA}=\frac{GMm}{2r}-\frac{GMm}{r}=-\frac{GMm}{2r}$ 이고, $E_B=E_{kB}+E_{pB}=\frac{GMm}{6r}-\frac{GMm}{3r}=-\frac{GMm}{6r}$ 이므로 E_B 는 E_A 보다 $\frac{GMm}{3r}$ 만큼 크다.

- 04 ㄴ. B가 행성 중력을 벗어나지 못하고 다시 행성으로 되돌아오므로 무한히 먼 곳을 기준으로 잡으면 행성의 중력장 내에서 운동하는 B가 행성 표면에서 발사되는 순간 역학적 에너지는 (-)값을 갖는다.

[바로알기] ㄱ. A가 행성에서 멀어질 때 중력만 작용하므로 A의 역학적 에너지는 일정하다.

ㄴ. A가 행성의 중력을 벗어나 먼 우주로 날아가므로 행성 표면에서 발사되는 순간 A의 속력은 행성의 탈출 속도인 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 보다 크거나 같아야 한다.

- 05 A의 탈출 속도는 $v_A=\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이고, B의 탈출 속도는

$$v_B=\sqrt{\frac{40GM}{3R}} \text{이므로}$$

$$v_A:v_B=\sqrt{2}:\sqrt{\frac{40}{3}}=\sqrt{3}:\sqrt{20} \text{이다.}$$

- 06 ㄱ. A에 작용하는 중력은 $G\frac{Mm}{4R^2}$, 가속도는 $\frac{GM}{4R^2}$ 이다.

B에 작용하는 중력은 $G\frac{Mm}{9R^2}$, 가속도는 $\frac{GM}{9R^2}$ 이다.

따라서 가속도 크기는 A가 B의 $\frac{9}{4}$ 배이다.

ㄴ. 운동 에너지 $E_k=\frac{1}{2}mv^2$ 이고, 중력이 구심력이므로

$$\frac{mv^2}{r}=G\frac{Mm}{r^2} \text{에서 } E_k=\frac{GMm}{2r} \text{이다. 따라서 A의 원}$$

궤도 반지름이 $2R$ 이므로 A의 운동 에너지는 $\frac{GMm}{4R}$ 이고,

B의 원 궤도 반지름이 $3R$ 이므로 B의 운동 에너지는 $\frac{GMm}{6R}$ 이다. 즉, 운동 에너지는 A가 B의 $\frac{3}{2}$ 배이다.

ㄴ. 중력에 의한 위치 에너지 $E_p=-\frac{GMm}{r}$ 이다. 따라서

A의 원 궤도 반지름이 $2R$ 이므로 A의 중력에 의한 위치 에너지는 $-\frac{GMm}{2R}$, B의 원 궤도 반지름이 $3R$ 이므로 B

의 중력에 의한 위치 에너지는 $-\frac{GMm}{3R}$ 이다. 즉, 중력에

의한 위치 에너지는 B가 A보다 $\frac{GMm}{6R}$ 만큼 크다.

- 07 로켓과 연료통이 분리되기 전후 운동량은 보존된다. 속도가 v 인 로켓에 대한 분리 후 연료통의 상대 속도가 반대 방향으로 $0.4v$ 이므로 분리 후 연료통의 속력은 $0.6v$ 이다. 따라서 $Mv=0.2M \times 0.6v + 0.8MV$ 에서 $V=1.1v$ 이다.

- 08 ㄱ. 로켓이 연소 가스를 빠른 속력으로 뒤로 분사하면 그 반작용으로 힘을 받아 추진력을 얻어 가속 운동을 한다.

ㄴ. 연소 가스를 분사하는 동안 로켓의 속력이 증가하고 지구로부터 멀어지므로 역학적 에너지는 증가한다.

[바로알기] ㄴ. 연소 가스를 분사하면 로켓이 운동 방향으로 힘을 받아 속력이 증가하므로 운동량도 증가한다.

- 09 ㄴ. 질소가 A 대기의 성분이 된 것은 질소 분자의 속력이 A의 탈출 속도보다 작아 A를 벗어나지 못하기 때문이다.

[바로알기] ㄱ. 탈출 속도는 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이므로 A와 B의 탈

출 속도의 비는 $\sqrt{\frac{2 \times G \times 1}{1}}:\sqrt{\frac{2 \times G \times 319}{11}}$ 이다. 따라서

B의 탈출 속도가 A의 탈출 속도보다 크다.

ㄴ. B의 대기 성분에 수소가 있으므로 수소 분자의 속력은 B의 탈출 속도보다 작다.

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

01 ㄴ. 중력에 의한 위치 에너지가 (-)값을 갖는 것은 물체가 지구 중력에 속박되어 있음을 나타낸다.

ㄷ. 지표면에서 물체의 운동 에너지가 $\frac{GMm}{R}$ 보다 크면 물체의 역학적 에너지가 (+)값을 가지므로 물체는 지구 중력을 벗어나 무한히 먼 우주로 날아갈 수 있다.

[바로알기] ㄱ. 지구 중심에서 멀어질수록 중력에 의한 위치 에너지는 증가한다.

02 ㄴ. A는 행성의 중력에 의해 원운동을 하고 B는 먼 우주로 날아가므로 p에서 B의 속력은 p에서 A의 속력보다 크다.

ㄷ. 중력에 의한 위치 에너지는 행성에서 멀어질수록 크므로 B의 중력에 의한 위치 에너지는 q에서가 p에서보다 크다.

[바로알기] ㄱ. B가 행성의 중력을 벗어나 먼 우주로 날아가므로 B의 역학적 에너지는 (+)값을 갖는다.

[별해] ㄴ. 행성과 A 사이의 거리를 r , 행성의 질량을 M , 중력 상수를 G , A의 질량을 m_A , p에서 A의 속력을 v_A , B의 질량을 m_B , p에서 B의 속력을 v_B 라고 할 때 원운동을 하는 A의 경우 $\frac{m_A v_A^2}{r} = G \frac{M m_A}{r^2}$ 에서 $v_A^2 = \frac{GM}{r}$ 이다. 행성에서 무한히 먼 우주로 날아가는 B의 경우 역학적 에너지 $E > 0$ 이므로

$$E = E_k + U = \frac{1}{2} m_B v_B^2 - \frac{GM m_B}{r} > 0 \text{에서}$$

$$v_B^2 > \frac{2GM}{r} \text{이다. 따라서 } v_B > v_A \text{이다.}$$

03 ㄱ. 위성이 타원 궤도를 따라 운동하는 동안 면적 속도가 일정하고, p에서 행성까지의 거리는 R , q에서 행성까지의 거리가 $3R$ 이므로 위성의 속력은 p에서가 q에서의 3배이다.

ㄴ. 위성의 중력에 의한 위치 에너지는 행성에서 멀어질수록 증가하므로 p에서가 q에서보다 작다.

[바로알기] ㄷ. 위성의 속력은 p에서가 q에서의 3배이므로 p에서 위성의 속력을 v 라고 하면 q에서 속력은 $\frac{v}{3}$ 이다. 위성이 운동하는 동안 역학적 에너지가 보존되므로 위성의 질량을 m 이라고 하면

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{GMm}{R} = \frac{1}{2} m \left(\frac{v}{3} \right)^2 - \frac{GMm}{3R} \text{에서}$$

$$v = \sqrt{\frac{3GM}{2R}} \text{이다.}$$

04 ㄱ. (가)의 행성 표면의 탈출 속도는 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$, (나)의 행성 표면의 탈출 속도는 $\sqrt{\frac{8GM}{2R}} = \sqrt{\frac{4GM}{R}}$ 이므로 (가)에서보다 (나)에서가 크다.

[바로알기] ㄴ. 등속 원운동을 하는 위성에 작용하는 중력이 구심력이므로 A, B의 속력을 v_A , v_B 라고 하면

$$\frac{m v_A^2}{r} = G \frac{M m}{r^2} \text{에서 } v_A = \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

$$\frac{2m v_B^2}{r} = G \frac{4M \cdot 2m}{r^2} \text{에서 } v_B = 2 \sqrt{\frac{GM}{r}} \text{이다. 따라서}$$

A의 속력은 B의 속력의 $\frac{1}{2}$ 배이다.

$$\text{ㄷ. A의 역학적 에너지는 } E_A = \frac{1}{2} m v_A^2 - \frac{GMm}{r} =$$

$$\frac{GMm}{2r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2r} \text{이고, B의 역학적 에너지는}$$

$$E_B = \frac{1}{2} \times 2m v_B^2 - \frac{G \cdot 4M \cdot 2m}{r} =$$

$$\frac{4GMm}{r} - \frac{8GMm}{r} = -\frac{4GMm}{r} \text{이다. 따라서}$$

$$E_B - E_A = -\frac{4GMm}{r} - \left(-\frac{GMm}{2r} \right) = -\frac{7GMm}{2r}$$

이므로 B의 역학적 에너지는 A보다 $\frac{7GMm}{2r}$ 만큼 작다.

05 ㄱ. 기체 분자의 운동 에너지가 기체의 온도에 비례하므로 기체의 온도가 같으면 운동 에너지도 같다. 운동 에너지가 같을 때 분자의 속도가 클수록 분자량이 작으므로 분자량은 A가 B보다 작다.

ㄷ. 행성 표면의 탈출 속도는 $\sqrt{\frac{2GM}{R}}$ 이다. 따라서 p의 탈출 속도가 q의 탈출 속도보다 작으므로 행성의 반지름이 같다면 p의 질량이 q의 질량보다 작다.

[바로알기] ㄴ. p의 표면 온도에서 탈출 속도와 비교할 때 A의 평균 속도보다 B의 평균 속도가 훨씬 작으므로 A와 B 중 p의 대기를 구성할 확률이 높은 것은 B이다.

06 ㄱ. 매우 짧은 시간 Δt 동안 분사된 연소 가스의 질량은 Δm 이고 분사 속도는 v 로 일정하므로 분사된 연소 가스의 운동량의 크기는 $v \Delta m$ 이다.

ㄴ. 연소 가스가 분사되는 동안 연소 가스는 운동량의 변화량인 $v \Delta m$ 만큼 충격량을 받는다. 이 반작용으로 로켓에도

같은 크기의 충격량이 작용하므로, 로켓에 작용한 알짜힘의 크기를 F 라고 하면 $F \Delta t = v \Delta m$ 에서 $F = \frac{v \Delta m}{\Delta t}$ 이다.

[바로알기] ㄷ. 연소 가스를 분사하는 동안 연소 가스와 로켓 사이에서만 힘이 작용하므로 연소 가스와 로켓의 운동량의 합은 보존된다. 로켓이 정지해 있다가 연소 가스를 분사하므로 연소 가스와 로켓의 운동량의 합은 0이다. 분사된 연소 가스의 질량은 Δm , 속도는 v 이고, 연소 가스를 분사한 후 로켓의 속력을 V 라고 하면

$$-v \Delta m + (M - \Delta m)V = 0 \text{에서 } V = \frac{v \Delta m}{M - \Delta m} \text{이다.}$$

07 ㄴ. A가 반지름이 $\frac{r}{2}$ 인 원을 따라 등속 원운동을 하므로

구심력은 $\frac{mv^2}{\left(\frac{r}{2}\right)}$ 이고, ㄱ의 설명에서 A에 작용하는 중력은

$G \frac{m^2}{r^2}$ 이므로 $\frac{2mv^2}{r} = G \frac{m^2}{r^2}$ 에서 A의 운동 에너지

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{Gm^2}{4r} \text{이다.}$$

ㄷ. A의 중력장에서 B가 A로부터 거리 r 만큼 떨어져 있으므로 B의 중력에 의한 위치 에너지는 $-G \frac{m^2}{r}$ 이다.

[바로알기] ㄱ. A에 작용하는 중력이 구심력이므로 구심력의 크기는 $G \frac{m^2}{r^2}$ 이다.

08 ㄱ. 우주선이 (가)에서 등속 원운동을 할 때 중력이 구심력이므로 $\frac{mv_0^2}{r} = \frac{GMm}{r^2}$ 에서 $v_0 = \sqrt{\frac{GM}{r}}$ 이다. 우주선이

(나)에서 타원 궤도를 돌 때 가장 가까운 거리에서 속력이 v 면 면적 속도 일정 법칙에 따라 가장 먼 거리에서 속력이 $\frac{v}{2}$ 가 되고 우주선이 타원 운동을 하는 동안 역학적 에너지가 보존되므로

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2 - \frac{GMm}{2r}$$

에서 $v = \sqrt{\frac{4GM}{3r}}$ 이다. 따라서 $v_0 : v = \sqrt{3} : 2$ 이다.

ㄴ. 우주선이 등속 원운동을 할 때 물체의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{GMm}{2r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2r}$ 이다.

ㄷ. 우주선이 타원 궤도를 돌 때 물체의 역학적 에너지는 $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = \frac{1}{2}m \times \frac{4GM}{3r} - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{3r}$ 이다.

06 일반 상대성 이론

중요 개념 체크

80쪽

- 1 가속 좌표계 2 등가 원리 3 중력 렌즈 효과
4 블랙홀 5 (1) × (2) ○ (3) × (4) ○

개념 기본 문제

82쪽~83쪽

- 01 ① 02 ㄴ, ㄷ, ㄹ 03 ④
04 $w_1 > w_3 > w_2$ 05 ③
06 ㉠ 중력, ㉡ 관성, ㉢ 등가 원리 07 ㄱ, ㄴ, ㄷ
08 ㄱ, ㄴ, ㄷ 09 ② 10 ④ 11 ③

01 ㄱ. 관성 좌표계는 정지해 있거나 등속도 운동을 하는 좌표계이다. 따라서 관성 좌표계에서는 관성 법칙이 성립한다.

[바로알기] ㄴ. 가속 좌표계에서는 관성력을 고려해야 한다. 가속 좌표계에 있는 관찰자가 가속 운동을 하는 물체를 볼 때 물체에 작용하는 중력과 관성력을 구분할 수 없다.

ㄷ. 뉴턴 운동 법칙이 성립하기 위해 관성력을 고려해야 하는 좌표계는 가속 좌표계이다.

02 ㄴ. 관성력은 중력과 구별할 수 없다. 이를 등가 원리라고 한다.

ㄷ. 관성력은 가속 좌표계에서 나타난다.

ㄹ. 등속 원운동을 하는 좌표계는 가속 좌표계이므로, 등속 원운동에서 나타나는 원심력은 관성력이다.

[바로알기] ㄱ. 관성력은 가속 좌표계 내의 관찰자가 느끼는 가상의 힘이다. 따라서 두 물체 사이의 상호작용이 아니므로 관성력에 대한 반작용은 존재하지 않는다.

03 ㄱ. 관찰자가 볼 때 몸무게가 0이므로 관찰자에 작용하는 중력과 관성력이 힘의 평형을 이루고 있음을 알 수 있다.

ㄴ. 관성력은 가속도 방향과 반대 방향으로 작용하고 관성력이 중력과 힘의 평형을 이루므로, 엘리베이터는 중력 가속도와 크기와 방향이 모두 같은 가속도로 등가속도 운동을 한다.

[바로알기] ㄷ. 저울 눈금이 0인 상태에서 관찰자가 공을 가만히 놓으면 공도 관성력을 받으므로 관찰자가 볼 때 공은 그 자리에 정지해 있다.