HIGH TOP

3권

지구 과학

STRUCTURE

HIGH TOP의 구성과 특징

4종 교과서를 완벽 분석한 "과학의 바이블"

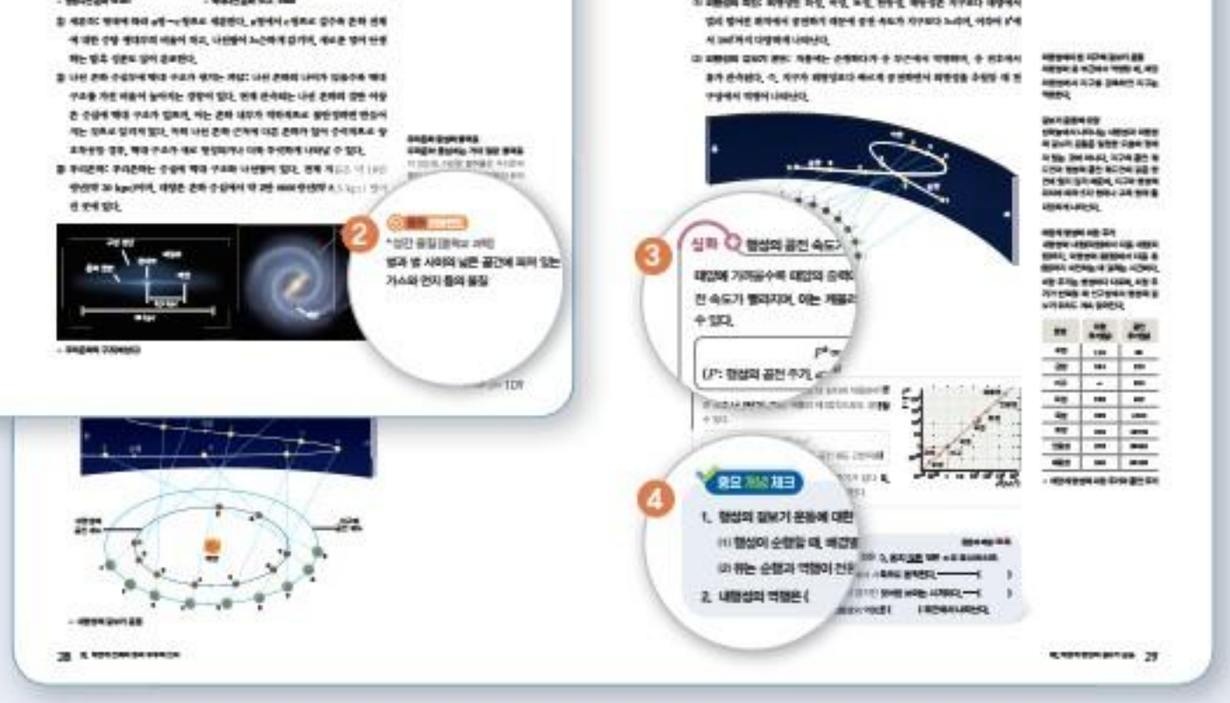
1 체계적인 개념 이해의 틀

교과서에서 다루는 내용을 체계적으로 정리하여 개념을 확실하게 이해할 수 있습니다.



❶ **핵심 내용 미리 보기** 본 학습에 들어가기에 앞서 이 소단원의 핵심 내용을 미리 확인할 수 있습니다.

❷ **용어 리마인드** 중학교 과학이나 통합과학에서 학습한 용어를 다시 한 번 확인할 수 있습니다.



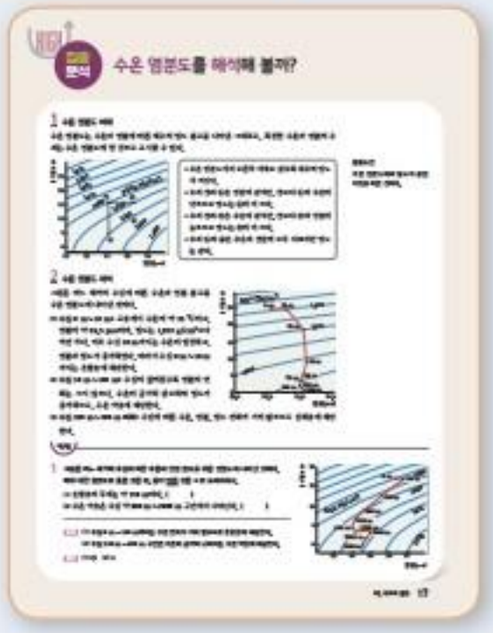
❸ **분석+ / 심화+** 핵심 자료 분석과 심화 자료를 통해 실력의 차이를 만들 수 있습니다.

❹ **중요 개념 체크** 주제별 핵심 내용을 잘 이해했는지 간단한 문제로 확인할 수 있습니다.

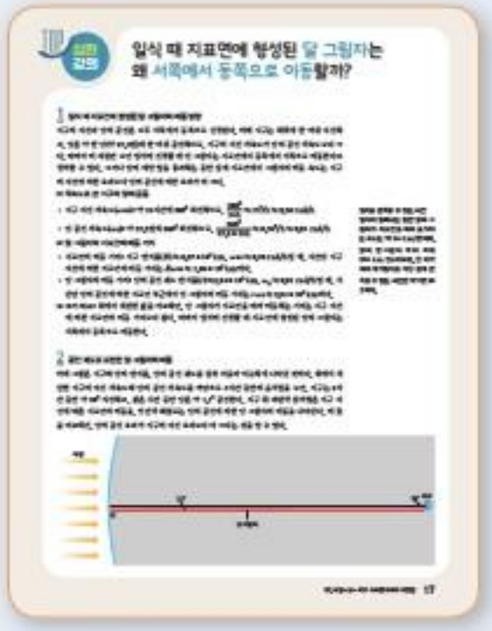
2 원리 이해를 위한 풍부한 자료



탐구 분석 교과서에 수록된 필수 탐구의 과정과 결과를 정리하고, 탐구 문제로 확인할 수 있습니다.



집중 분석 중요 주제를 집중 분석하고, 예제와 유제로 실전에 대비할 수 있습니다.

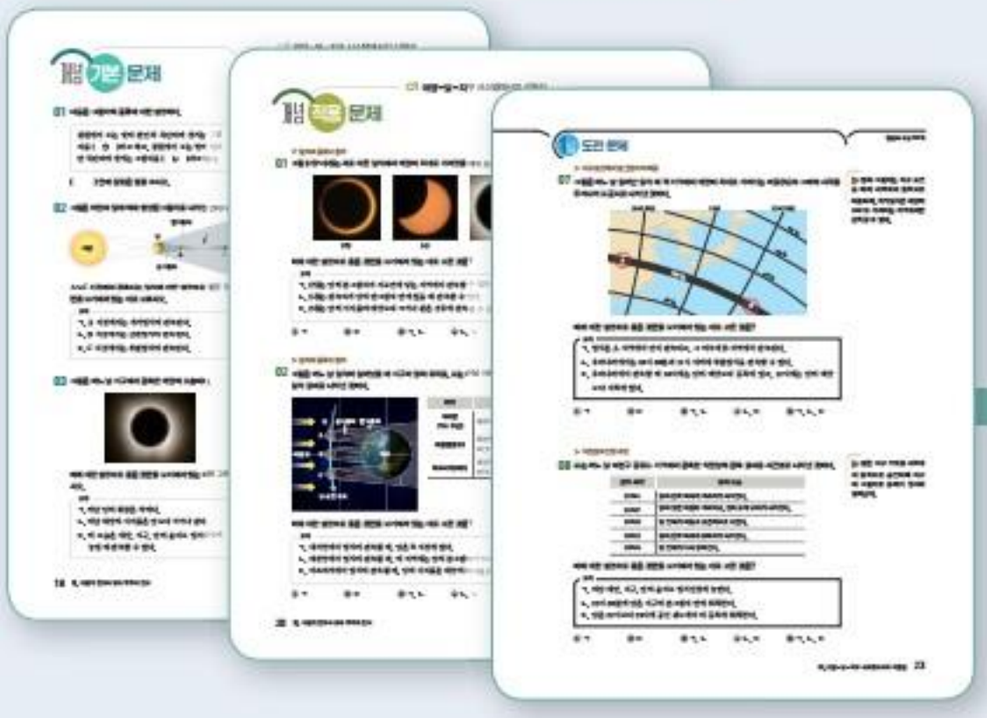


심화 강의 교과서 너머의 폭넓은 내용으로 핵심 주제를 깊이 있게 이해하고, 실력의 격차를 만들 수 있습니다.



수능 분석 통합과학에서 학습한 내용을 연계하여 비교하고, 대표 예제와 실전 문제로 수능까지 대비할 수 있습니다.

3 다양한 유형의 단계별 문제



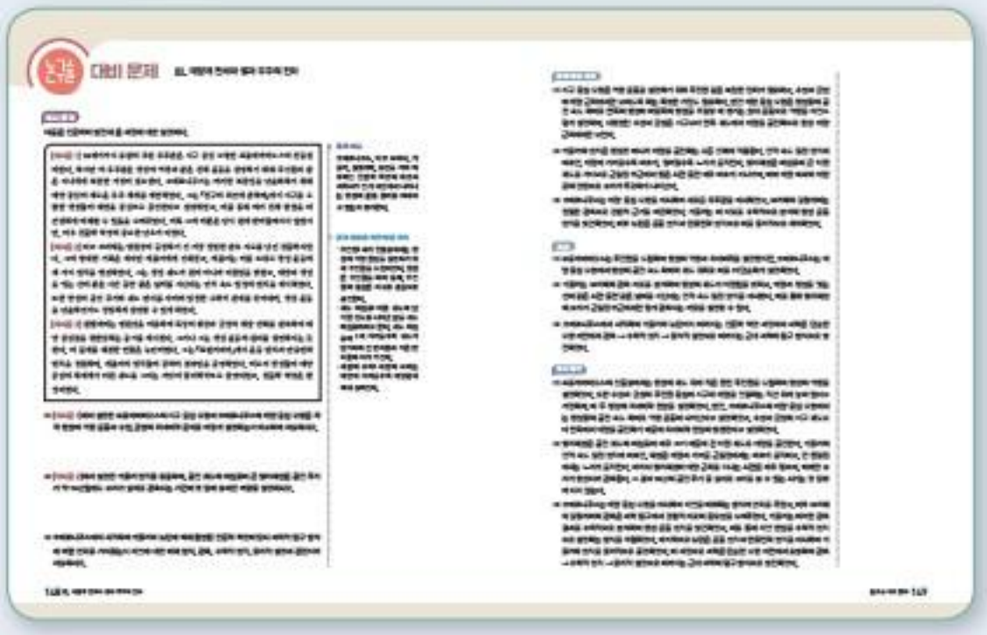
개념 기본 문제 / 개념 적용 문제 교과서 문제와 학교 시험 기출 문제를 변형한 다양한 문제들로 소단원의 핵심 내용을 정확히 이해했는지 점검할 수 있습니다.



중단원 핵심 정리 중단원의 핵심 내용을 요약하여 개념을 확실하게 다질 수 있습니다.

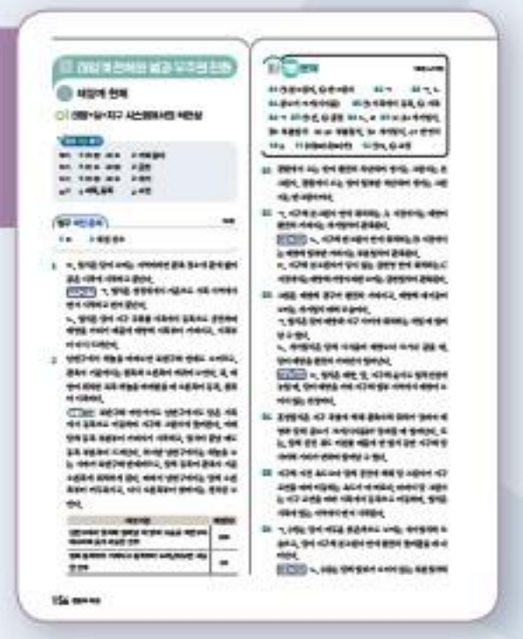


통합 실전 문제 / 최상위 문제 / 사고력 확장 문제 중단원별 개념을 통합한 문제로 실전에 대비하고, 문제 해결력 및 창의력 등 높은 수준의 사고력을 요구하는 문제들로 실력을 완성할 수 있습니다.



논구술 대비 문제 논구술 시험에 출제되었거나, 출제 가능성이 높은 예상 문제로 구성하여 실전에 대비할 수 있습니다.

4 이해하기 쉽고 자세한 정답과 해설



HIGH TOP 지구과학 차례

CONTENTS

1권

Ⅰ 대기와 해양의 상호작용

1. 해수의 성질과 순환
01 해수의 성질 10
02 해수의 순환 26

2. 날씨의 변화와 악기상
01 날씨의 변화 52
02 태풍과 악기상 68

3. 대기와 해양의 상호작용
01 엘니뇨 남방진동 96
02 지구의 기후 변화 112

논구술 대비 문제 138
정답과 해설 146

2권

Ⅱ 지구의 역사와 한반도의 암석

1. 지구의 역사
01 지층의 생성 순서와 나이 10
02 퇴적 구조와 퇴적 환경 24
03 지질시대의 환경과 생물 36

2. 한반도의 암석
01 변동대와 화성암 68
02 변성 작용과 변성암 88
03 우리나라의 지질공원 108

논구술 대비 문제 134
정답과 해설 142

3권

III

태양계 천체와 별과 우주의 진화

1. 태양계 천체

01 태양-달-지구 시스템에서의 식현상 10

02 태양계 행성의 겉보기 운동 24

2. 별의 특성과 진화

01 별의 특성과 분류 52

02 별의 진화 72

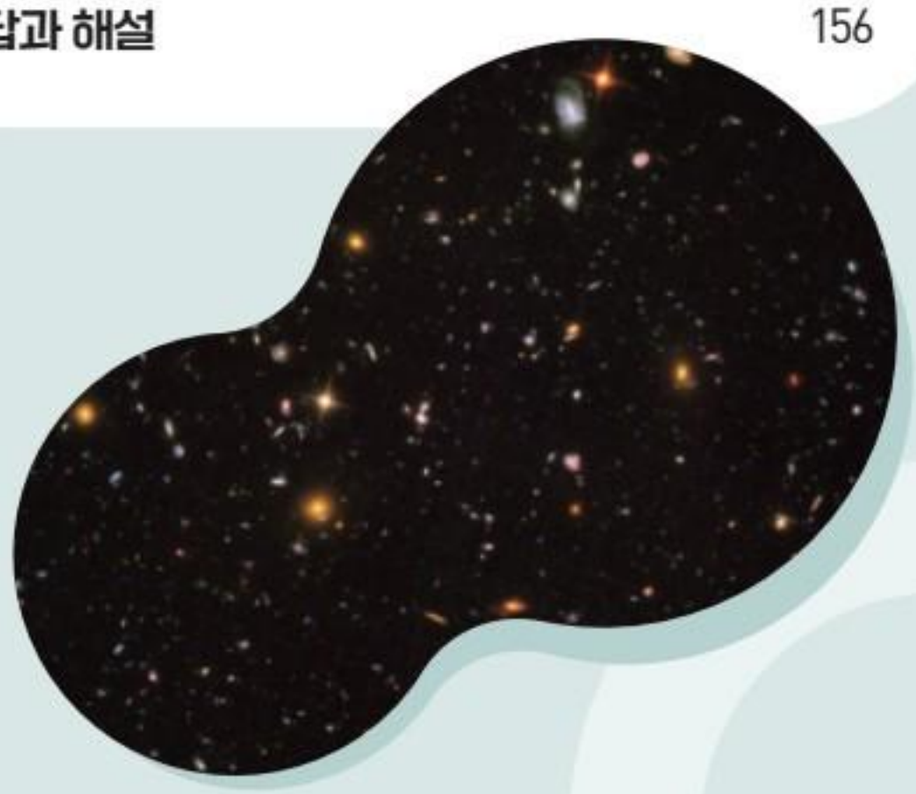
3. 은하와 우주

01 외부 은하 108

02 우주의 팽창과 진화 120

논구술 대비 문제 148

정답과 해설 156



III

태양계 천체와 별과 우주의 진화



태양계 천체의 운동으로 식현상, 행성의 겉보기 운동과 같은 다양한 천문 현상이 나타난다. 별을 관측하여 여러 가지 물리량을 알아낼 수 있고, 별은 질량에 따라 여러 가지 경로로 진화한다. 우주에는 수많은 외부 은하가 있으며, 우주는 현재 팽창하며 진화하고 있다.

1. 태양계 천체

2. 별의 특성과 진화

3. 은하와 우주



이전에 배웠어요

중학교 과학 태양계, 별과 우주

- 지구와 달의 운동으로 일어나는 일식과 월식을 배웠어요.
- 별의 여러 가지 특성과 우주의 팽창을 배웠어요.

통합과학 물질과 규칙성

- 우주가 탄생하여 진화하는 과정에서 다양한 원소가 만들어진다는 것을 배웠어요.

이 단원에서 배워요

지구과학 태양계 천체

- 식현상과 태양계 행성의 겉보기 운동이 일어나는 원리를 배워요.

지구과학 별의 특성과 진화

- 별의 여러 가지 물리량과 H−R도, 질량에 따른 별의 진화 과정을 배워요.

지구과학 은하와 우주

- 외부 은하의 특징과 우주론의 변천 과정을 배워요.

이후에 배울 수 있어요

행성우주과학 우주 탐사와 행성계

- 우주 탐사, 우주 위험 감시의 중요성 및 행성계의 특징을 배울 수 있어요.

행성우주과학 태양과 별의 관측

- 태양과 별의 관측으로 알 수 있는 여러 가지 특징을 배울 수 있어요.

행성우주과학 은하와 우주

- 은하를 구성하는 물질과 은하의 분포 특징을 배울 수 있어요.

단원 Preview

이 단원에서 배우는 핵심 개념으로 단원 내용을 미리 살펴봅시다.

태양-달-지구 시스템에서의 식현상

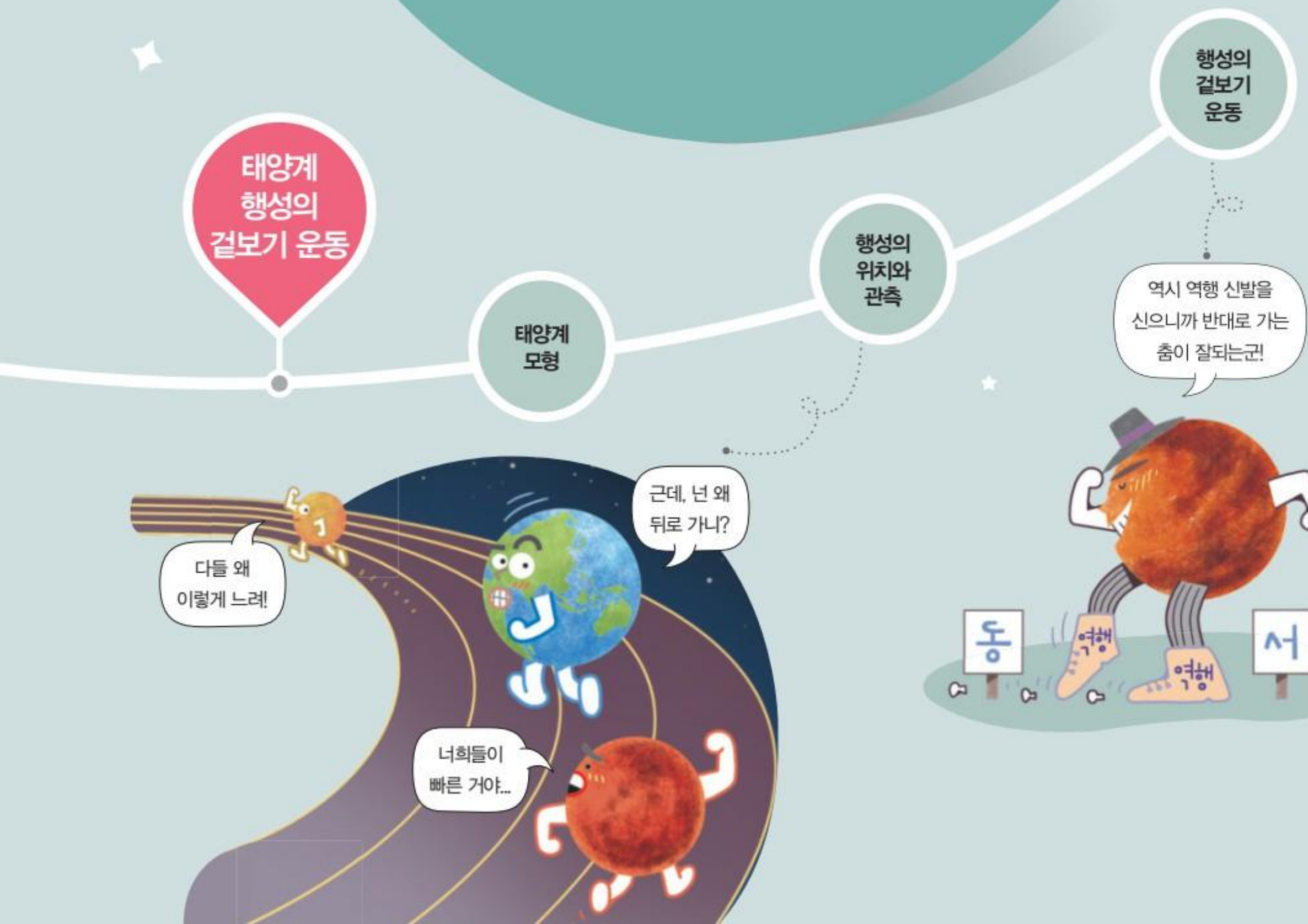
- 그림자와 시지름
- 일식
- 월식
- 일식과 월식의 진행

1 태양계 천체

태양계 천체의 운동으로 식현상과 행성의 겉보기 운동이 일어난다.

1 태양-달-지구 시스템에서의 식현상

2 태양계 행성의 겉보기 운동



01 태양-달-지구 시스템에서의 식현상

핵심 내용 미리보기

"태양-달-지구 시스템의 운동으로 그림자가 생기고, 그림자에 천체가 가려지면서 다양한 식현상이 일어난다."

1 그림자와 시지름

식현상은 한 천체가 다른 천체의 그림자에 들어가거나 가려지는 현상으로, 그림자와 시지름에 대해 알면 식현상이 일어나는 원리도 쉽게 파악할 수 있다.

1. 그림자의 종류와 특징

천문 현상이나 광학 실험에서 관찰되는 그림자는 광원, 차단 물체, 스크린(또는 관측 위치)의 상대적인 위치와 광원의 크기에 따라 달라진다.

본그림자 (Umbra)	광원에서 오는 빛이 완전히 차단되어 생기는 영역이다. 물체가 광원 전체를 가려 광원이 보이지 않는다. 이 영역은 그림자의 중심부에 해당하며, 경계가 뚜렷하다.
반그림자 (Penumbra)	광원에서 오는 빛이 일부만 차단되어 생기는 영역이다. 물체에 가려지지 않은 광원의 일부가 보인다. 이 영역은 그림자의 가장자리에 해당하며, 본그림자보다 밝고 경계가 흐릿하다.
금환영 (Antumbra)	광원에서 오는 빛이 중심만 차단되고 가장자리는 차단되지 않아 생기는 영역이다. 이 영역에서는 물체가 광원의 중심을 가리지만 가장자리는 그대로 드러나기 때문에, 광원은 밝은 테두리만 남은 고리 모양으로 보인다.

2. 태양과 달의 시지름

(1) **시지름의 크기:** 태양은 달보다 지구에서 약 400배 더 멀리 있으며, 크기도 달보다 약 400배 크다. 이처럼 지구에서 태양과 달까지의 거리 비율과 두 천체의 크기 비율이 거의 동일하므로, 지구에서 본 태양과 달의 시지름은 약 0.5°로 거의 같다.

(2) **시지름의 변화:** 지구와 달의 공전 궤도는 이심률을 가진 타원형이므로, 태양-지구-달 사이의 거리 변화로 지구에서 본 태양과 달의 시지름은 일정하지 않다. 태양의 시지름은 약 31′31″~32′33″, 달의 시지름은 약 29′24″~33′3″ 사이에서 변한다. 이러한 시지름의 변화는 일식의 유형을 결정하는 중요한 요인이 된다.

중요 개념 체크

정답과 해설 156쪽

1. **그림자의 종류와 특징에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.**
   (1) 본그림자는 광원의 빛이 모두 차단되어 생기는 영역이다. ——— ( )
   (2) 반그림자 안에서는 광원이 전혀 보이지 않는다. ——— ( )
2. **지구에서 관측한 태양과 달의 시지름은 (큰 차이가 난다, 거의 같다).**

그림자의 종류



그림자의 특징에 영향을 주는 요인
광원의 크기가 클수록 반그림자 영역이 넓어지며, 관측자의 위치에 따라 그림자의 길이와 방향이 다르게 관측된다.

시지름(시직경)의 단위
시지름은 지구에서 관측한 천체의 겉보기 크기로, 각의 단위인 도(°), 분(′), 초(″)로 나타낸다.

지구에서 태양과 달까지의 평균 거리
지구에서 태양까지의 평균 거리는 약 1.5×10^8 km, 달까지의 평균 거리는 약 3.8×10^5 km이다.

태양과 달의 지름
태양의 지름은 약 1.39×10^6 km, 달의 지름은 약 3475 km이다.

2 일식

달이 태양을 가리는 현상을 일식이라고 한다. 일식은 천체의 겉보기 크기, 천체 사이의 거리, 그림자의 형태 등과 밀접하게 관련되어 있다.

1. 일식

태양, 달, 지구의 순서로 일직선상에 놓일 때, 달이 태양을 가려 지구의 일부 지역에서 태양이 보이지 않는 현상이다. 달이 삭에 위치할 때 일어날 수 있다.

2. 일식의 종류와 원리

(1) **개기일식:** 달의 시지름이 태양의 시지름보다 크거나 같을 때, 달이 태양을 완전히 가리는 현상이다. 이때 관측자는 달의 본그림자 안에 위치한다.

① 발생 조건: 달이 근지점 부근에 있을 때는 달의 시지름이 커져 개기일식이 일어날 수 있다.

② 특징: 개기일식이 일어나면 채층과 코로나 같은 태양의 대기층을 볼 수 있다.

(2) **부분일식:** 달이 태양의 일부분만 가리는 현상이다. 이때, 관측자는 달의 반그림자 안에 위치한다.

① 발생 조건: 지표면에 형성되는 반그림자 영역은 본그림자 영역에 비해 넓게 나타나며, 이 반그림자 안에 있는 지역에서는 부분일식이 관측된다.

② 특징: 부분일식은 독립적으로 일어나기도 하며, 개기일식이나 금환일식이 일어나기 전후에도 관측된다.

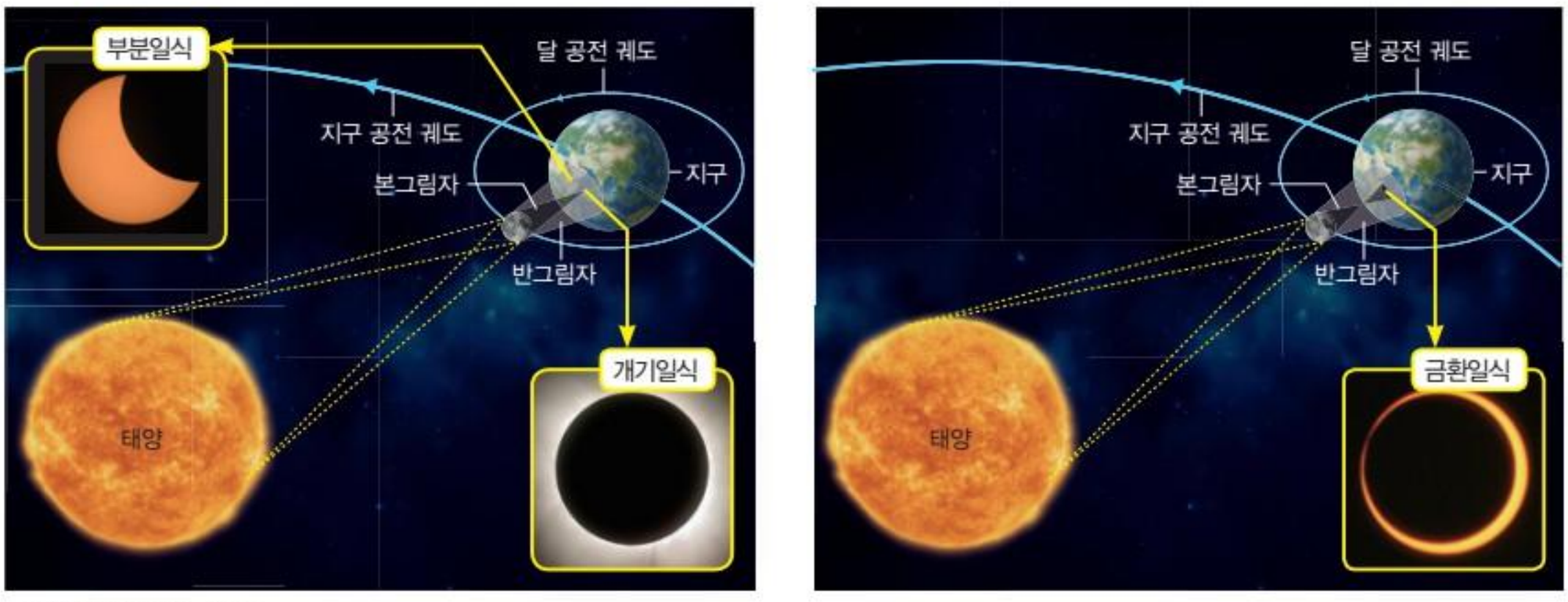
(3) **금환일식:** 달의 시지름이 태양의 시지름보다 작을 때, 달이 태양의 가장자리를 가리지 못하는 현상이다. 이때 관측자는 금환영 안에 위치한다.

① 발생 조건: 달이 원지점 부근에 있을 때는 달의 시지름이 작아져 달의 본그림자가 지구 표면에 도달하지 않아 금환일식이 일어날 수 있다.

② 특징: 금환일식이 일어나면 태양의 가장자리가 밝게 남아 고리 형태로 보인다.

개기일식의 관측 가능성
달의 본그림자가 지구 표면에 드리우는 폭은 최대 약 270 km로 매우 좁다. 따라서 개기일식은 특정 지역에서만 짧은 시간 동안 관측할 수 있는 천문 현상이다.

지구와 달 사이의 거리에 따른 달의 크기 변화
지구와 달 사이의 거리는 약 36만 km(근지점)에서 40만 km(원지점) 사이로 변화한다. 이때, 달이 근지점에 위치하면 원지점에 있을 때보다 지구에서 보름달이 더 크고 밝게 보여 '슈퍼문'이라 부른다.

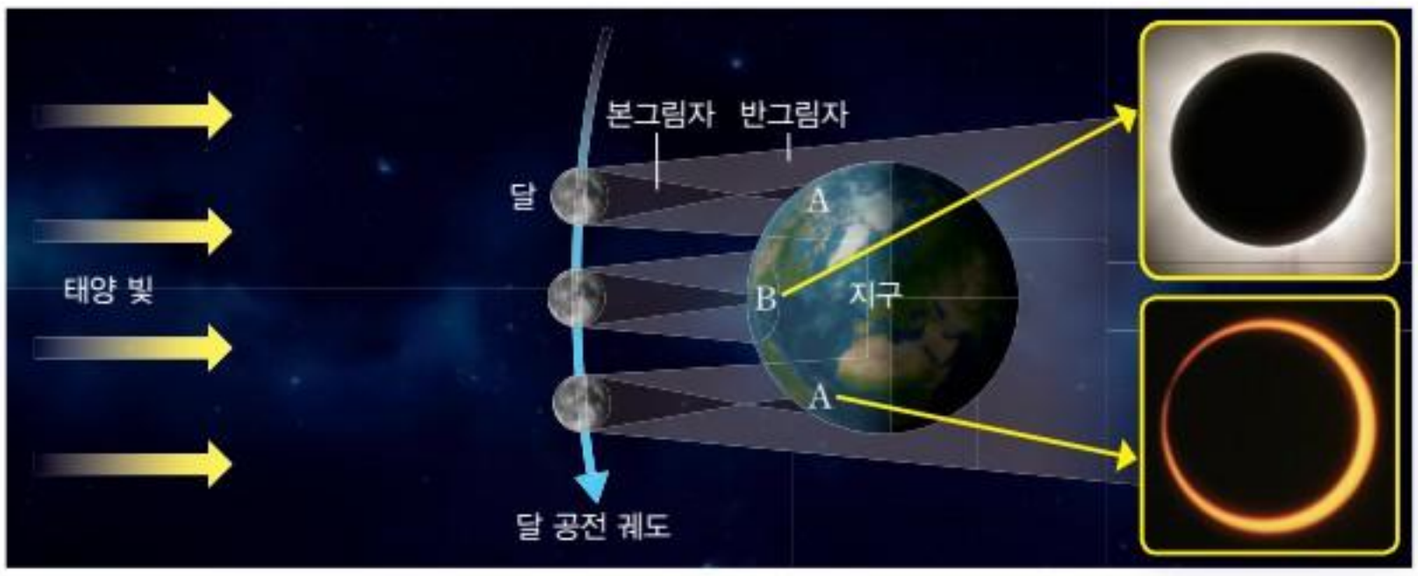


▲ 일식이 일어나는 원리

(4) **혼성일식:** 태양과 달의 시지름이 거의 같을 때, 한 일식 동안 지역에 따라 개기일식과 금환일식이 동시에 일어나는 현상이다.

① 발생 조건: 지구 곡률에 의해 관측자의 위치가 달라져 태양과 달의 겉보기 크기가 달라질 때 일어난다. 또는, 달의 공전 궤도 이심률 때문에 한 일식 동안 지구와 달 사이의 거리가 변하여 일어날 수 있다.

② 특징: A 지역에서는 지구와 달 사이의 거리가 멀어 금환일식이 관측되며, B 지역에서는 지구와 달 사이의 거리가 가까워 개기일식이 관측된다.

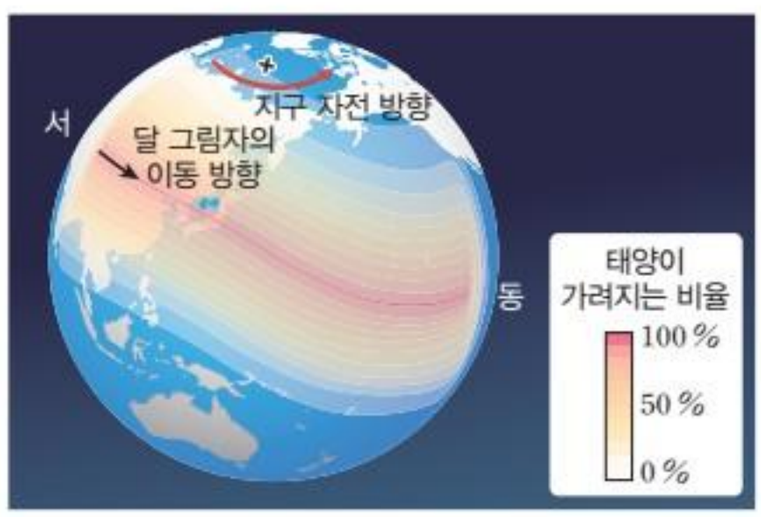


▲ 혼성일식이 일어나는 원리

3. 지구 표면에서 달 그림자의 이동

심화 강의 17쪽

지구의 자전과 달의 공전은 모두 서쪽에서 동쪽으로 진행된다. 이때, 지구의 자전 속도보다 달의 공전으로 달 그림자가 지구 표면을 따라 이동하는 속도가 더 빠르다. 따라서 달 그림자는 지구 표면을 따라 서쪽에서 동쪽으로 이동하며, 서쪽에 있는 지역이 동쪽에 있는 지역보다 먼저 일식이 시작된다. 달 그림자가 지구 표면을 이동하는 속도는 매우 빠르므로, 일식은 전 지구적으로 짧은 시간 동안만 관측된다. 또한, 달 그림자의 이동 경로는 지구의 곡률과 천체의 공전 궤도 등에 따라 달라지므로, 일식은 매번 같은 지역에서 관측되지는 않는다.



▲ 달 그림자의 이동 방향(2035년 9월 2일)

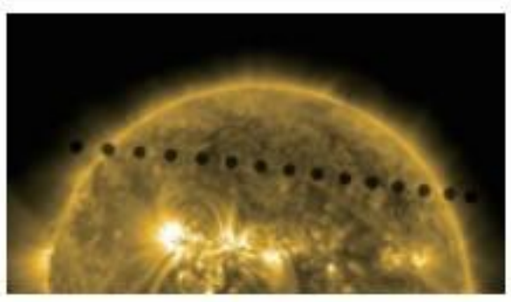
심화 **일식의 종류에 따른 발생 횟수**

기원전 1999년부터 기원후 3000년까지 일어나는 일식의 종류에 따른 발생 횟수(최대식 기준)를 보면, 혼성일식은 전체 일식의 약 5 %로 매우 희귀한 천문 현상이다.

종류	횟수	비율(%)
개기일식	3173	26.7
부분일식	4200	35.3
금환일식	3956	33.2
혼성일식	569	4.8
합계	11898	100

내행성의 태양면 통과

태양, 내행성, 지구 순으로 일직선상에 위치하면 내행성이 태양면을 통과하는 현상이 일어날 수 있다. 하지만, 수성과 금성은 지구로부터의 거리가 멀어 겉보기 크기가 각각 시지름으로 약 10″와 약 1′에 불과하여 태양면의 아주 작은 부분만 가릴 수 있다. 또한 지구와 행성의 공전 궤도면의 교선이 태양을 향할 때, 내합에 위치해야 태양면 통과가 일어나므로 일식보다 발생 확률이 낮다.



▲ 금성의 태양면 통과

중요 개념 체크

정답과 해설 156쪽

1. **일식의 원리와 특징에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.**
   (1) 일식은 태양–지구–달 순서로 놓일 때 일어날 수 있다. ——— ( )
   (2) 혼성일식은 한 일식에서 개기일식과 금환일식이 모두 보이는 현상이다. — ( )
2. **달의 시지름이 태양보다 작을 때, 지구에서 (개기, 금환)일식이 일어날 수 있다.**

3 월식

달이 지구의 그림자에 들어가 가려지는 현상을 월식이라고 한다. 월식은 달이 지구 그림자의 어느 부분에 들어가는지에 따라 다양한 형태로 관측된다.

1. 월식

태양, 지구, 달의 순서로 일직선상에 놓일 때, 달이 지구의 그림자 안으로 들어가 가려지는 현상이다. 이때 달이 지구의 그림자에 가려져 일시적으로 전체 또는 일부가 어둡게 보인다. 달이 망에 위치할 때 일어날 수 있다.

2. 월식의 종류와 원리

(1) **개기월식:** 달 전체가 지구의 본그림자 안으로 들어가 일어나는 현상이다.

① 발생 조건: 태양, 지구, 달의 순서로 정확히 일직선상에 놓일 때 개기월식이 일어난다.

② 특징: 달이 지구의 본그림자에 완전히 들어갔지만, 달의 표면은 사라지지 않고 어두운 붉은색으로 보인다.

(2) **부분월식:** 달의 일부가 지구의 본그림자 안으로 들어가 일어나는 현상이다.

① 발생 조건: 태양, 지구, 달의 순서로 정확히 일직선상에 놓이지 않거나 개기월식이 일어나기 전과 후에 달의 일부만 본그림자에 들어갈 때 부분월식이 일어난다.

② 특징: 본그림자 안에 들어간 부분은 어둡게 보이고, 나머지 부분은 밝은 상태로 남아 있다. 따라서 달의 한쪽이 사라진 듯한 모습으로 보인다.

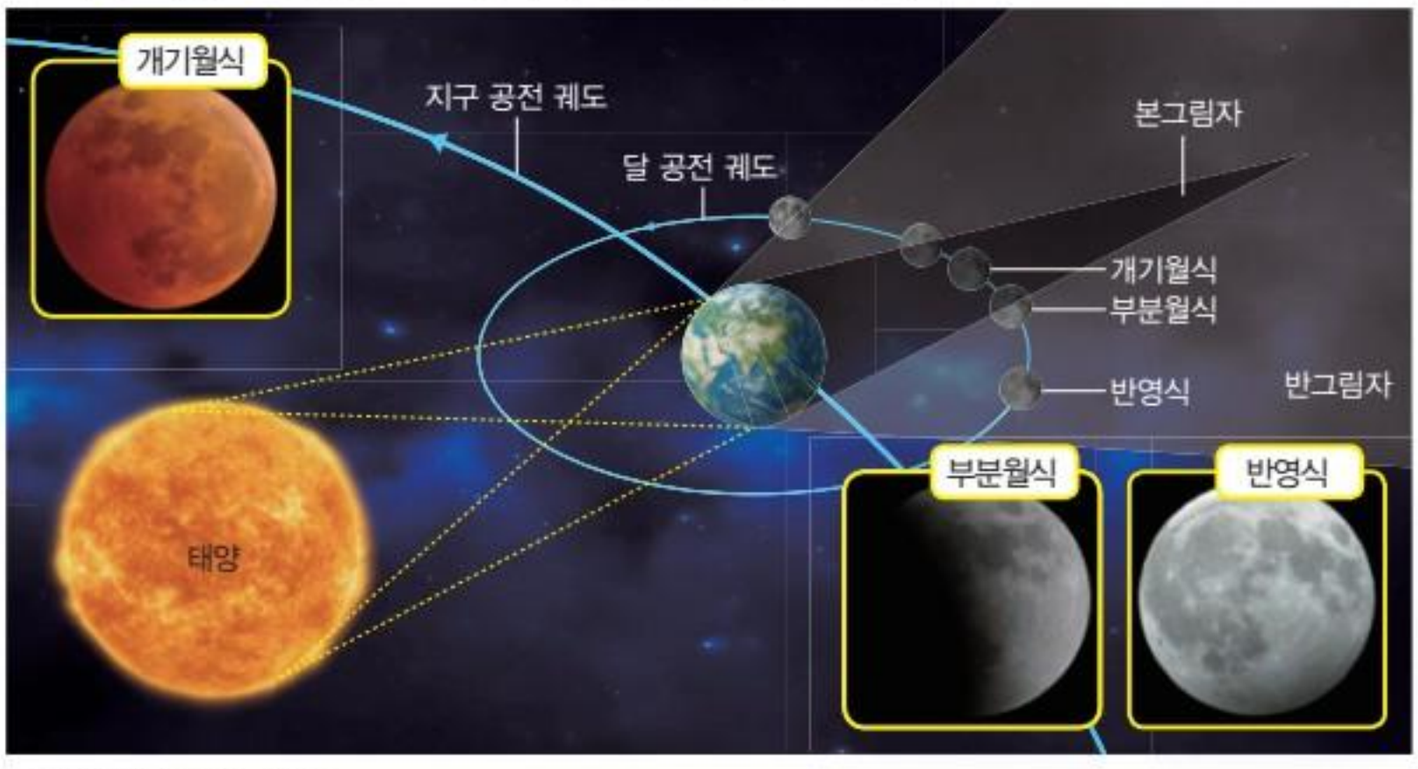
(3) **반영식:** 달이 지구의 반그림자 안으로 들어가 일어나는 현상이다.

① 발생 조건: 지구 그림자의 중심인 본그림자 주변에는 반그림자가 형성되며, 달이 이 반그림자 안에 들어오면 반영식이 일어난다.

② 특징: 지구의 반그림자에 들어간 달은 평소보다 밝기가 조금 감소하지만, 육안으로는 거의 구별되지 않으며 어두운 부분이 뚜렷하게 보이지 않는다. 이로 인해 관측이 어렵고 식현상으로 인식되지 않는 경우도 있다.

지역에 따른 월식의 관측

월식은 일식처럼 지역에 따라 관측 결과가 달라지지 않는다. 달이 지구의 그림자를 통과하는 동안, 지구에서 밤이 되는 지역 전체에서 같은 종류의 월식을 관측할 수 있다.

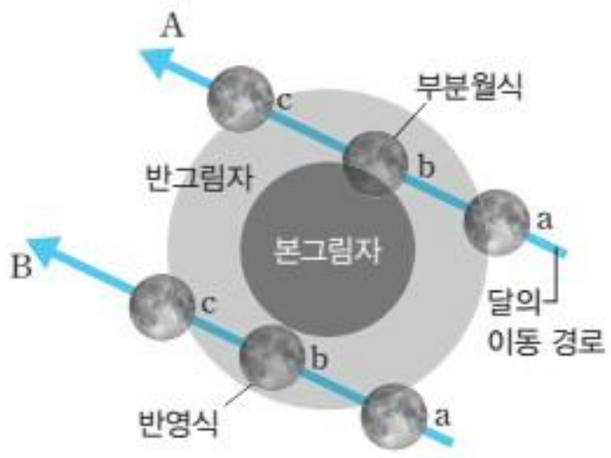


▲ 월식이 일어나는 원리

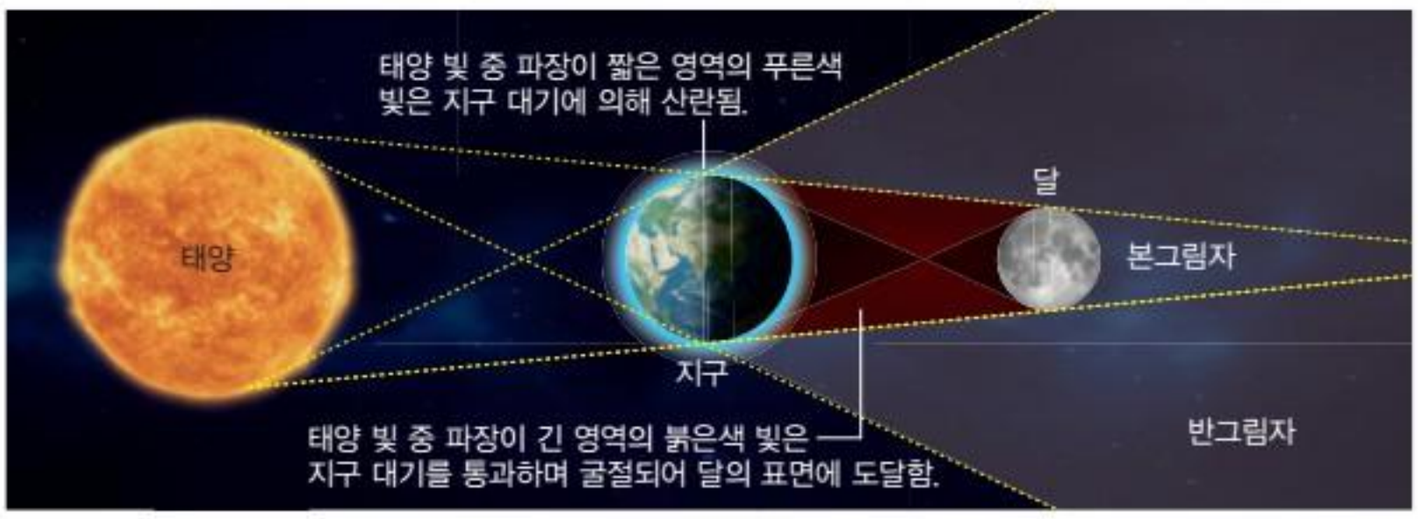
심화 ✚ 달의 이동 경로에 따른 월식의 종류

월식이 일어날 때, 달이 항상 지구의 본그림자에 들어가는 것은 아니다. 달의 이동 경로에 따라서 부분월식과 반영식만 일어나거나, 반영식만 일어나기도 한다.

- A 경로: a일 때는 반영식, b일 때는 부분월식, c일 때는 다시 반영식이 일어난다.
- B 경로: a, b, c 모두 반영식만 일어난다.



(4) 개기월식 때 달의 표면이 붉게 보이는 까닭: 태양 빛이 지구의 대기를 통과할 때, 파장이 짧은 푸른색 빛에 비해 파장이 긴 붉은색 빛은 상대적으로 적게 산란한다. 이후 이 빛은 지구의 대기에서 굴절하여 달의 표면에 도달하며, 달은 붉게 보인다.



▲ 개기월식 때 달이 붉게 보이는 원리

빛의 파장에 따른 굴절률

개기월식 때 달이 붉게 보이는 까닭을 붉은색 빛의 굴절률이 더 크기 때문이라고 생각할 수도 있다. 하지만 실제로는 빛이 매질을 통과할 때 파장이 짧을수록 굴절률이 크기 때문에, 푸른색 빛이 붉은색 빛보다 더 많이 굴절된다.

심화 ✚ 월식의 지속 시간

달에서 관측한 지구의 시지름은 약 1.37°로, 달에서 관측한 태양의 시지름인 약 0.5°에 비해 훨씬 커서 지구의 그림자도 크게 형성된다. 달 궤도 근처까지의 거리에서 만들어지는 지구의 본그림자 지름은 약 9200 km로, 이는 달의 지름인 약 3475 km 보다 약 2.6배 크다. 따라서 달이 가려지는 현상은 상대적으로 자주 일어난다. 월식의 전체 지속 시간은 약 6시간이며, 이 중 개기월식은 최대 1.7시간 정도로 개기일식보다 훨씬 긴 시간 동안 지속된다.



중요 개념 체크

정답과 해설 156쪽

1. 월식의 원리와 특징에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 월식은 태양–지구–달 순서로 놓일 때 일어날 수 있다. ——— ( )

(2) 달이 지구의 반그림자 안으로 들어가면 부분월식이 일어난다. ——— ( )

2. 개기월식 때 달이 붉게 보이는 까닭은 지구의 ( )에서 태양 빛이 산란 · 굴절되어 달에 도달하기 때문이다.

4 일식과 월식의 진행

일식과 월식은 모두 달이 공전하면서 일어나지만, 천체의 운동 방향과 관측자의 위치에 따라 진행 과정이 달라지는 복합적인 과정이다.

1. 식현상의 진행 과정

탐구 분석 16쪽

달은 지구 주위를 서쪽에서 동쪽으로 공전한다. 이러한 공전 방향 때문에 식현상이 일어날 때 태양과 달이 가려지는 위치와 순서가 정해진다.

(1) **북반구에서 일식의 진행 과정:** 태양의 서쪽(오른쪽)부터 가려지기 시작하고, 끝날 때는 태양의 서쪽부터 드러나며 끝난다.

(2) **북반구에서 월식의 진행 과정:** 달의 동쪽(왼쪽)부터 지구의 그림자로 들어가 어두워지기 시작하고, 끝날 때는 달의 동쪽부터 밝아지며 끝난다.

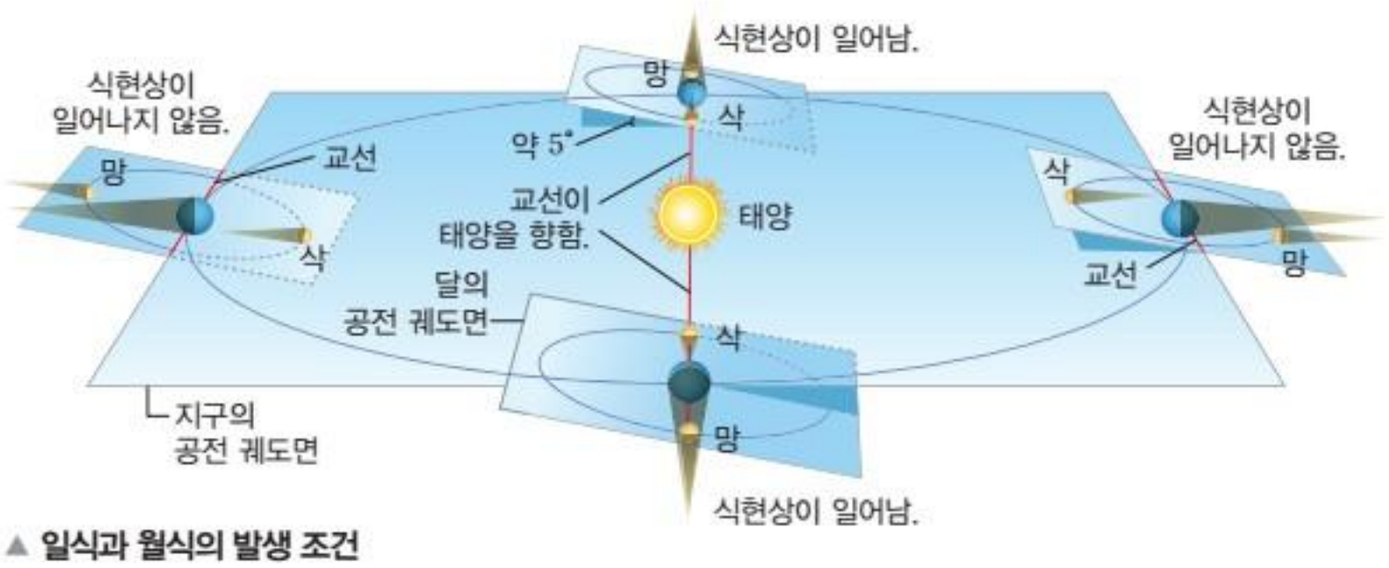
북반구 하늘에서의 방향
북반구에서는 태양이 있는 남쪽 하늘을 바라봤을 때 오른쪽이 서쪽, 왼쪽이 동쪽이다.



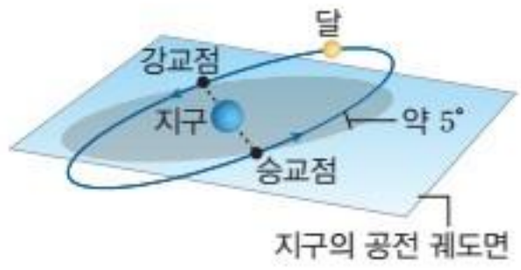
2. 매달 식현상이 일어나지 않는 까닭

달의 공전 궤도면은 지구의 공전 궤도면에 대해 약 5° 기울어져 있어, 달이 삭이나 망일 때 교점 근처에 위치해야만 식이 일어난다. 그렇지 않으면 달의 그림자가 지구를 벗어나거나, 달이 지구의 그림자를 벗어나 식현상이 일어나지 않는다.

교점
천구상에서 백도와 황도가 만나는 두 지점이 교점이다. 교점은 고정된 것이 아니며, 약 18.6년을 주기로 360° 이동한다.
- 승교점: 황도면 남쪽에서 북쪽으로 올라가며 통과하는 점
- 강교점: 황도면 북쪽에서 남쪽으로 내려가며 통과하는 점



▲ 일식과 월식의 발생 조건



중요 개념 체크

정답과 해설 156쪽

1. 일식이 시작될 때는 태양의 (동쪽, 서쪽)부터 가려지고, 월식이 시작될 때는 달의 (동쪽, 서쪽)부터 가려진다.
2. 식현상이 일어나기 위해서는 달이 삭이나 망일 때 ( ) 근처에 위치해야 한다.

HIGH 탐구 분석

천체 관측 프로그램으로 식현상 시뮬레이션하기

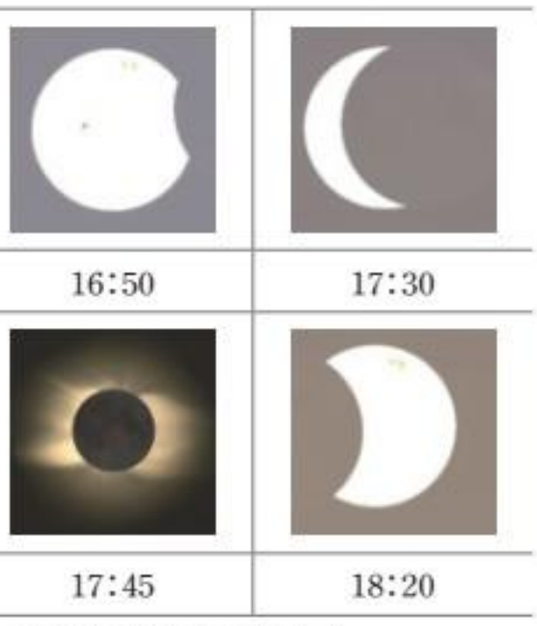
천체 관측 프로그램을 이용하여 식현상을 시뮬레이션할 수 있다.

과정

❶ 식현상이 일어나는 날짜와 시각, 관측할 수 있는 장소를 조사한다.
❷ 천체 관측 프로그램을 실행하고 ❶에서 정한 날짜와 장소로 설정한다.
❸ 천체 관측 프로그램의 시간을 변경하면서 식현상이 진행되는 과정을 관찰한다.

결과

1. 일식과 월식이 일어날 때 태양이나 달의 모습은 어떻게 변하는가?



16:50	17:30	17:45	18:20

▲ 일식의 진행 모습(북반구)



00:00	02:20	02:32	04:40

▲ 월식의 진행 모습(북반구)

2. 일식과 월식이 진행되는 시간은 관측 장소에 따라 어떻게 변하는가?
➜ 협정세계시 기준으로 일식은 서쪽 지역에서 식현상이 먼저 시작하고 먼저 끝나며, 월식은 같은 시각에 시작하고 같은 시각에 끝난다.

정리

- **일식**이 일어날 때는 **달이 지구 주위를 서쪽에서 동쪽으로 공전**하며 태양을 가리기 때문에 **태양의 서쪽**부터 가려지고 드러난다.
- **월식**이 일어날 때는 **달이 지구 주위를 서쪽에서 동쪽으로 공전**하며 지구의 그림자로 들어가기 때문에 **달의 동쪽**부터 가려지고 드러난다.
- **일식**은 **관측 장소에 따라** 시작과 종료 시각이 **다르지만**, **월식**은 달이 보이는 지역이라면 **관측 장소에 관계 없이 같은 시각에 진행**된다.

한국천문연구원 천문우주지식정보
전 세계에서 일식과 월식이 일어나는 날짜, 장소, 식 종류 등의 정보를 찾아볼 수 있다.

협정세계시와 표준시
날짜와 시간을 기록할 때, 협정세계시와 관측 장소의 표준시를 구분할 수 있도록 한다. 협정세계시를 이용하면 관측 장소와 상관없이 식현상이 일어나는 시각을 알 수 있고, 표준시를 이용하면 관측 장소에 따른 식현상의 진행 시각을 알고 태양이나 달의 방향을 유추하는 데 유리하다.

탐구 확인 문제

정답과 해설 156 쪽

1 위 탐구에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기
ㄱ. 일식은 협정세계시 기준으로 동쪽 지역에서 먼저 시작된다.
ㄴ. 일식이 일어날 때는 태양의 동쪽부터 가려지고, 동쪽부터 다시 드러난다.
ㄷ. 월식은 협정세계시 기준으로 지구 어느 지역에서나 같은 시각에 시작되고 같은 시각에 끝난다.

2 천체 관측 프로그램에서 관측 장소를 남반구로 설정한 뒤, 월식을 시뮬레이션하였다. 달의 모습이 변하는 과정을 북반구와 비교하여 서술하시오.

TOP 심화 강의

일식 때 지표면에 형성된 달 그림자는 왜 서쪽에서 동쪽으로 이동할까?

1 일식 때 지표면에 형성된 달 그림자의 이동 방향

지구의 자전과 달의 공전은 모두 서쪽에서 동쪽으로 진행된다. 이때 지구는 하루에 한 바퀴 자전하고, 달은 약 한 달(약 27.3일)에 한 바퀴 공전하므로, 지구의 자전 각속도가 달의 공전 각속도보다 크다. 따라서 이 사실만 보면 일식이 진행될 때 달 그림자는 지표면에서 동쪽에서 서쪽으로 이동한다고 생각할 수 있다. 그러나 달이 태양 앞을 통과하는 동안 실제 지표면에서 그림자의 이동 속도는 지구의 자전에 의한 효과보다 달의 공전에 의한 효과가 더 크다.

(1) 각속도로 본 지구와 달의 운동

- 지구 자전 각속도($\omega_{지구}$): 약 24시간에 360° 회전하므로, $\frac{360^\circ}{24\text{h}} \fallingdotseq 15^\circ/\text{h} \fallingdotseq 0.26\ \text{rad/h}$
- 달 공전 각속도($\omega_{달}$): 약 27.3일에 360° 회전하므로, $\frac{360^\circ}{27.3\times 24\text{h}} \fallingdotseq 0.55^\circ/\text{h} \fallingdotseq 0.01\ \text{rad/h}$

(2) 달 그림자와 지표면의 이동 거리

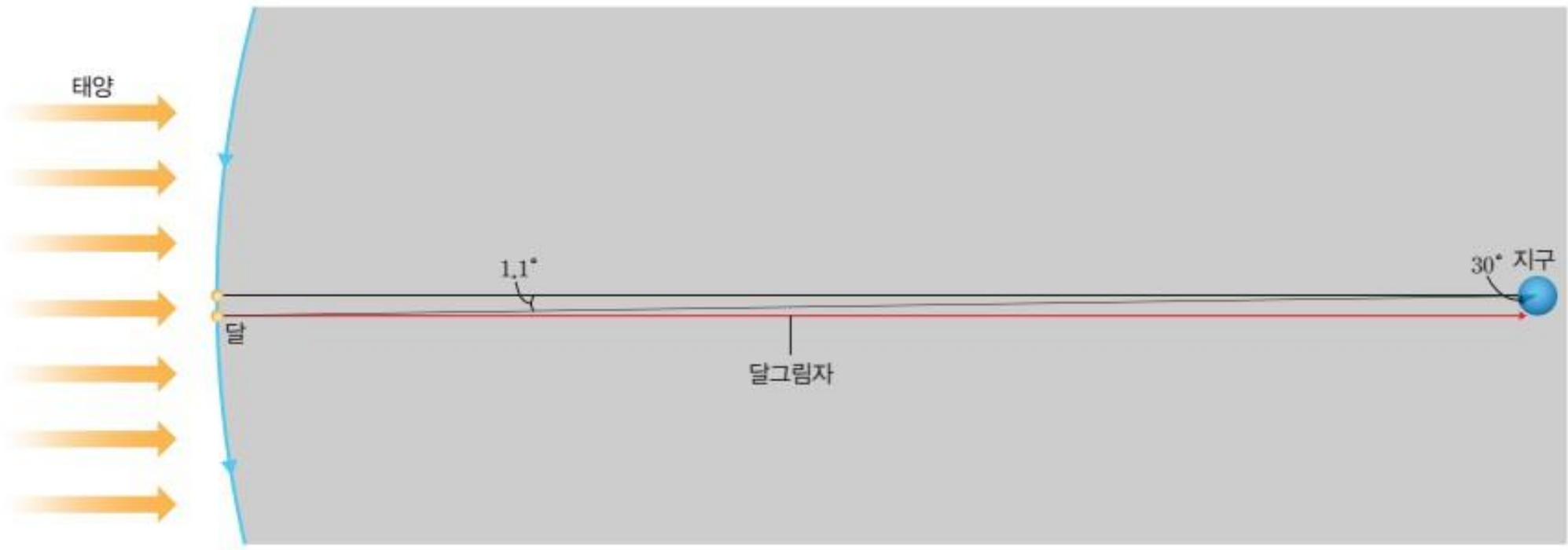
- 지표면의 이동 거리: 지구 반지름(R) $\fallingdotseq 6.37\times10^3$ km, $\omega_{지구} \fallingdotseq 0.26$ rad/h일 때, 시간당 지구 자전에 의한 지표면의 이동 거리는 $R\omega_{지구} \fallingdotseq 1.66\times10^3$ km이다.
- 달 그림자의 이동 거리: 달의 공전 궤도 반지름(r) $\fallingdotseq 3.84\times10^5$ km, $\omega_{달} \fallingdotseq 0.01$ rad/h일 때, 시간당 달의 공전에 의한 지표면 부근에서 달 그림자의 이동 거리는 $r\omega_{달} \fallingdotseq 3.84\times10^3$ km이다.

(3) 크기 비교: 위에서 계산한 값을 비교하면, 달 그림자가 지표면을 따라 이동하는 거리는 지구 자전에 의한 지표면의 이동 거리보다 길다. 따라서 일식이 진행될 때 지표면에 형성된 달의 그림자는 서쪽에서 동쪽으로 이동한다.

일식을 관측할 수 있는 시간
일식이 일어나는 동안 달의 그림자가 지표면을 따라 움직이는 속도는 약 36 km/분이며, 달의 본그림자 폭이 최대 270 km 정도이므로, 한 지역에서 개기일식을 가장 길게 관측할 수 있는 시간은 약 7분 30초이다.

2 공전 궤도로 표현한 달 그림자의 이동

아래 그림은 지구와 달의 반지름, 달의 공전 궤도를 실제 비율과 비슷하게 나타낸 것이다. 위에서 계산한 지구의 자전 각속도와 달의 공전 각속도를 바탕으로 2시간 동안의 움직임을 보면, 지구는 2시간 동안 약 30° 자전하고, 같은 시간 동안 달은 약 1.1° 공전한다. 지구 위 파란색 삼각형은 지구 자전에 따른 지표면의 이동을, 빨간색 화살표는 달의 공전에 의한 달 그림자의 이동을 나타낸다. 이 둘을 비교하면, 달의 공전 효과가 지구의 자전 효과보다 더 크다는 것을 알 수 있다.



개념 기본 문제

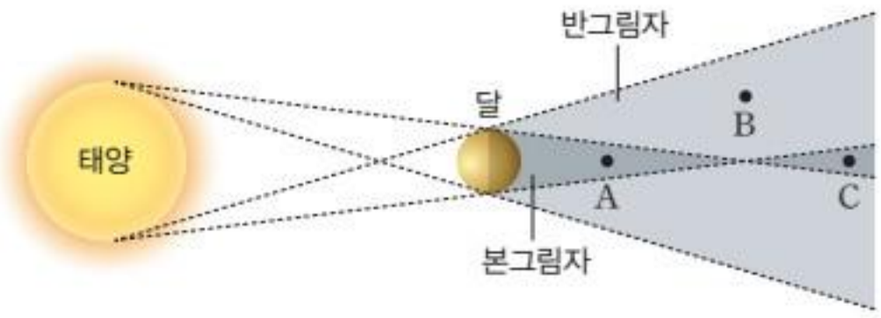
01 태양-달-지구 시스템에서의 식현상

01 다음은 그림자의 종류에 대한 설명이다.

> 광원에서 오는 빛이 완전히 차단되어 생기는 그림자를 (㉠)라고 하고, 광원에서 오는 빛이 일부만 차단되어 생기는 그림자를 (㉡)라고 한다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

02 그림은 태양과 달에 의해 형성된 그림자를 나타낸 것이다.



A~C 지점에서 관측되는 일식에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. A 지점에서는 개기일식이 관측된다.
ㄴ. B 지점에서는 금환일식이 관측된다.
ㄷ. C 지점에서는 부분일식이 관측된다.

03 그림은 어느 날 지구에서 관측한 태양의 모습이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 이날 달의 위상은 삭이다.
ㄴ. 이날 태양의 시지름은 달보다 작거나 같다.
ㄷ. 이 모습은 태양, 지구, 달의 순서로 일직선상에 놓일 때 관측할 수 있다.

04 다음은 혼성일식에 대한 설명이다.

> 혼성일식은 한 일식 동안 지역에 따라 개기일식과 금환일식이 동시에 일어나는 현상이다. 이러한 현상은 지구의 표면이 구형이라 지역에 따라 태양과 달의 ( )가 달라지기 때문에 일어난다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

05 다음은 달 그림자의 이동 방향에 대한 설명이다.

> 일식이 일어날 때, 달의 그림자는 지구 표면을 따라 ㉠(서쪽에서 동쪽, 동쪽에서 서쪽)으로 이동한다. 따라서 일식은 ㉡(서쪽, 동쪽)에 있는 지역에서 먼저 시작된다.

( ) 안에 알맞은 말을 고르시오.

06 그림 (가)~(다)는 서로 다른 월식에서 식이 최대로 진행되었을 때의 모습을 나타낸 것이다.



(가) (나) (다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. (가)는 달이 지구의 본그림자에 완전히 들어갔을 때 나타나는 모습이다.
ㄴ. (나)는 달이 지구의 반그림자에 일부만 들어가 있을 때 나타나는 모습이다.
ㄷ. (다)는 달이 지구의 본그림자에 일부만 들어가 있을 때 나타나는 모습이다.

07 다음은 개기월식 때 관측되는 달의 모습에 대한 설명이다.

> 개기월식이 일어날 때, 달이 완전히 어두워지지 않는 까닭은 태양 빛 중 파장이 ㉠(긴, 짧은) 붉은색 빛이 지구의 대기에서 ㉡(산란, 굴절)하여 달의 표면에 도달하기 때문이다.

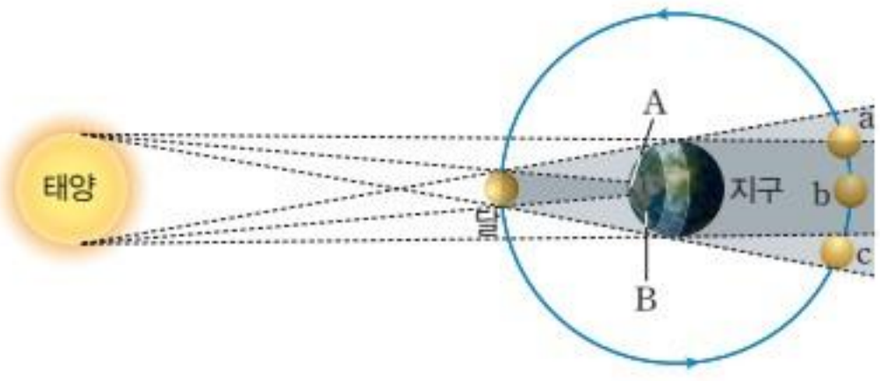
( ) 안에 알맞은 말을 고르시오.

08 일식과 월식에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 일식이 일어날 때 달의 위상은 망이다.
ㄴ. 월식은 음력 15일경에 일어날 수 있다.
ㄷ. 일식은 달이 지구의 그림자 안으로 들어가 가려질 때 일어난다.
ㄹ. 월식은 태양, 지구, 달의 순서로 일직선상에 놓일 때 일어난다.

09 그림은 태양, 지구, 달의 상대적인 위치를 나타낸 것이다. 이때, A와 B는 지구상의 관측 지점이다.



(1) A와 B에 있는 관측자가 관측할 수 있는 식현상을 각각 쓰시오.

(2) 달이 a~c에 있을 때 지구에서 관측할 수 있는 식현상을 각각 쓰시오.

10 그림은 어느 날 북반구에서 관측한 일식의 진행 과정을 나타낸 것이다.



a와 b 중 일식이 진행되는 순서로 옳은 것을 쓰시오.

11 그림은 어느 날 북반구에서 관측한 월식의 모습을 순서 없이 나타낸 것이다.



(가) (나) (다)

월식이 진행되는 순서대로 나열하시오.

12 다음은 식현상이 일어나는 조건에 대한 설명이다.

> 달의 공전 궤도면은 지구의 공전 궤도면에 대해 약 (㉠)° 기울어져 있어 식현상은 매달 일어나지 않는다. 달이 삭이나 망일 때 (㉡) 근처에 위치해야만 식현상이 일어난다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

개념 적용 문제

➤ 일식의 종류와 원리

01 그림 (가)~(다)는 서로 다른 일식에서 태양이 최대로 가려졌을 때의 모습을 나타낸 것이다.



(가)



(나)



(다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

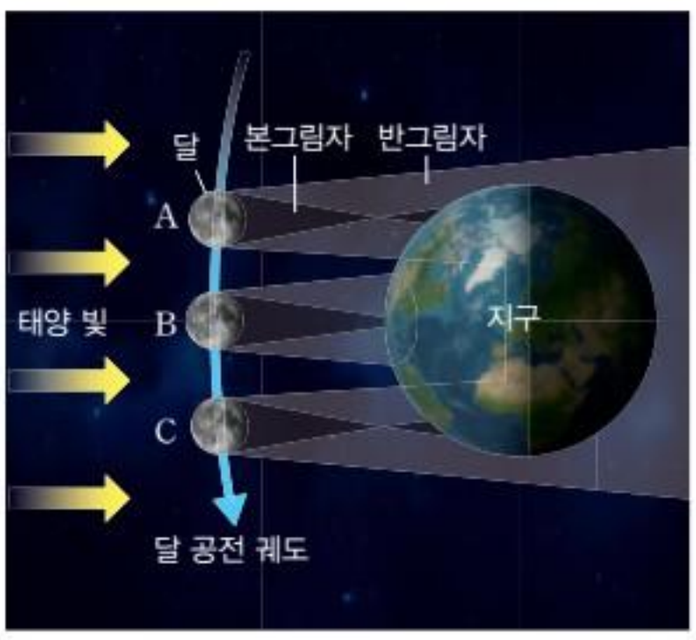
ㄱ. (가)는 달의 본그림자가 지표면에 닿는 지역에서 관측할 수 있다.
ㄴ. (나)는 관측자가 달의 반그림자 안에 있을 때 관측할 수 있다.
ㄷ. (다)는 달의 시지름이 태양보다 크거나 같은 경우에 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

관측자가 달의 본그림자 안에 있으면, 달의 시지름이 태양의 시지름보다 크거나 같게 관측된다.

➤ 일식의 종류와 원리

02 그림은 어느 날 일식이 일어났을 때 지구와 달의 위치를, 표는 이날 서로 다른 지역에서 관측한 일식 결과를 나타낸 것이다.



지역	관측 결과
대서양 (적도 부근)	태양의 광구가 완전히 가려졌다.
태평양(중부)	태양의 가장자리가 고리 형태로 보인다.
아프리카(서부)	태양의 가장자리가 고리 형태로 보인다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 대서양에서 일식이 관측될 때, 달은 B 지점에 있다.
ㄴ. 태평양에서 일식이 관측될 때, 이 지역에는 달의 본그림자가 드리운다.
ㄷ. 아프리카에서 일식이 관측될 때, 달의 시지름은 태양의 시지름보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

혼성일식은 한 일식 동안 지역에 따라 개기일식과 금환일식이 동시에 일어나는 현상이다.

➤ 지구 표면에서 달 그림자의 이동

03 그림 (가)~(다)는 어느 날 개기일식이 일어났을 때, 달의 그림자가 지구 표면을 지나가는 모습을 순서 없이 나타낸 것이다.



(가) (나) (다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

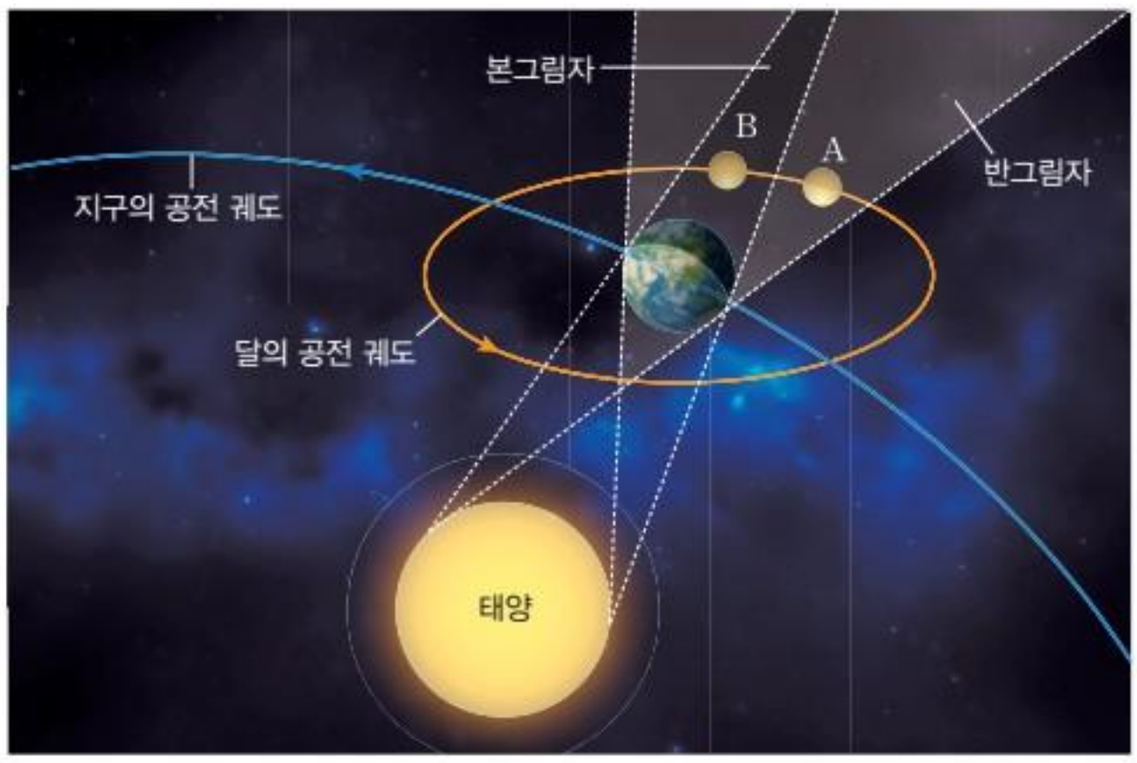
ㄱ. 이날 달은 태양과 지구 사이에 있다.
ㄴ. 이날 일식이 진행된 순서는 (가) → (나) → (다)이다.
ㄷ. 이날 우리나라에서는 개기일식과 부분일식을 모두 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 지구의 자전 속도보다 달의 공전에 의해 달의 그림자가 지구 표면을 따라 이동하는 속도가 더 빠르다.

➤ 월식의 종류와 원리

04 그림은 월식이 일어나는 원리를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

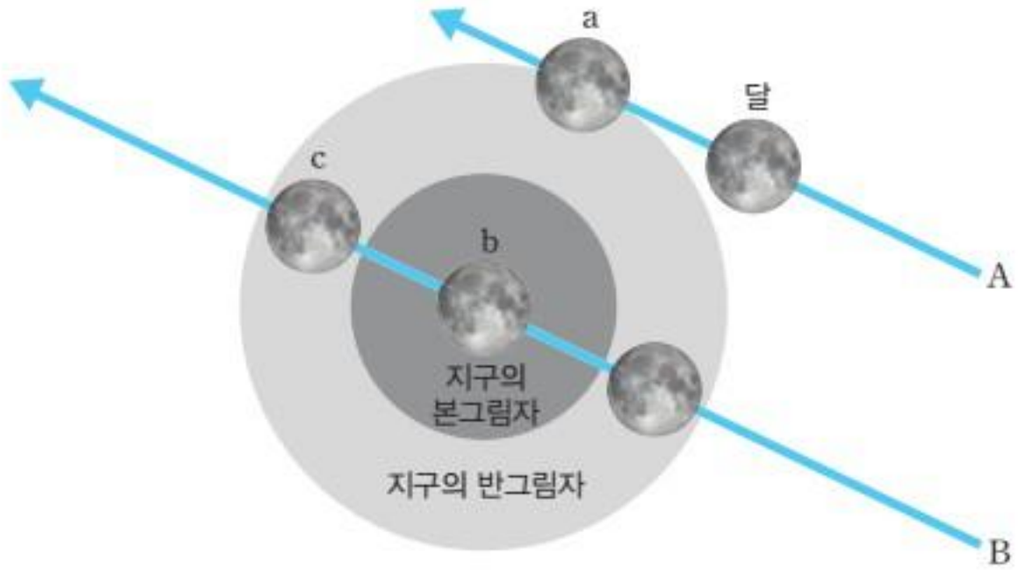
ㄱ. 달이 A에 위치할 때, 달의 일부분이 보이지 않는다.
ㄴ. 달이 B에 위치할 때, 달의 모든 부분이 보이지 않는다.
ㄷ. 달이 B를 통과하는 동안 밤이 되는 지역이라면 모두 월식을 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 달이 지구의 본그림자에 완전히 들어가면 개기월식이 일어나고, 지구의 본그림자에 걸쳐 있으면 부분월식이 일어난다.

➤ 월식의 종류와 원리

05 그림은 달의 이동 경로 A, B와 이때 형성된 지구의 본그림자와 반그림자의 범위를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

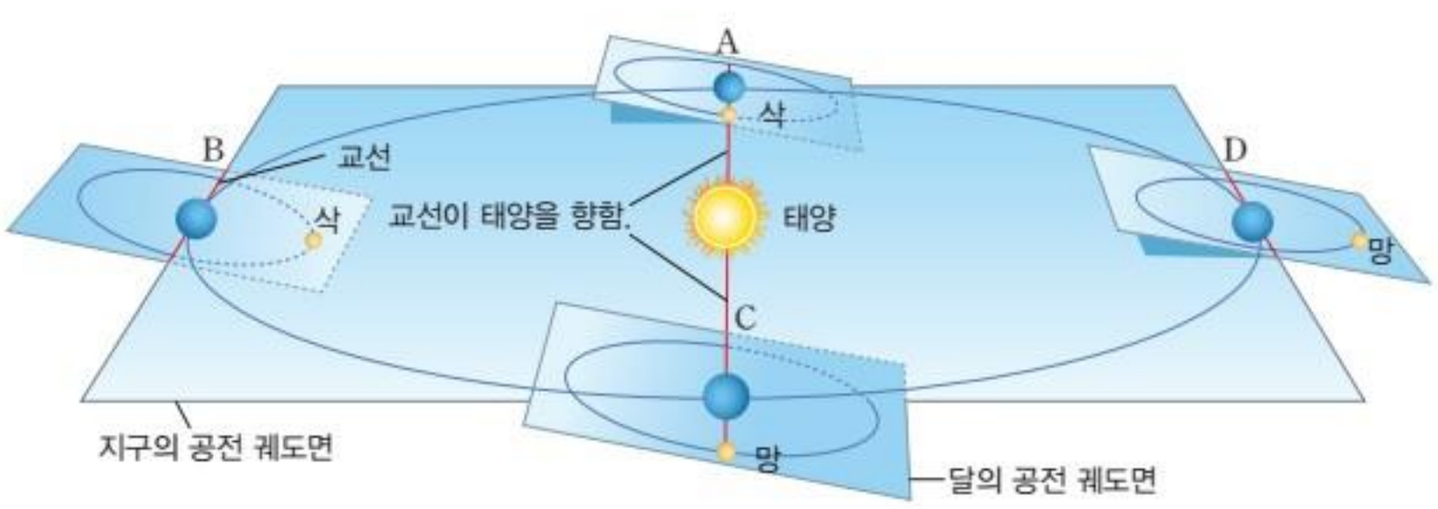
ㄱ. 달이 a에 위치할 때, 지구에서는 부분월식이 관측된다.
ㄴ. 달이 b에 위치할 때, 지구에서는 개기월식이 관측된다.
ㄷ. 달이 c에 위치할 때, 지구에서는 달 전체가 붉게 보인다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 달이 지구의 반그림자 안에만 들어가 있으면, 가려지는 부분 없이 평소보다 밝기만 약간 감소한다.

➤ 매달 식현상이 일어나지 않는 까닭

06 그림은 지구와 달의 위치 A~D를 지구와 달의 공전 궤도면에 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 지구와 달의 위치가 A와 B일 때, 지구에서는 일식을 관측할 수 있다.
ㄴ. 지구와 달의 위치가 C일 때, 지구에서는 개기월식을 관측할 수 있다.
ㄷ. 지구와 달의 위치가 D일 때, 달은 지구의 본그림자 안에 위치할 수 있다.

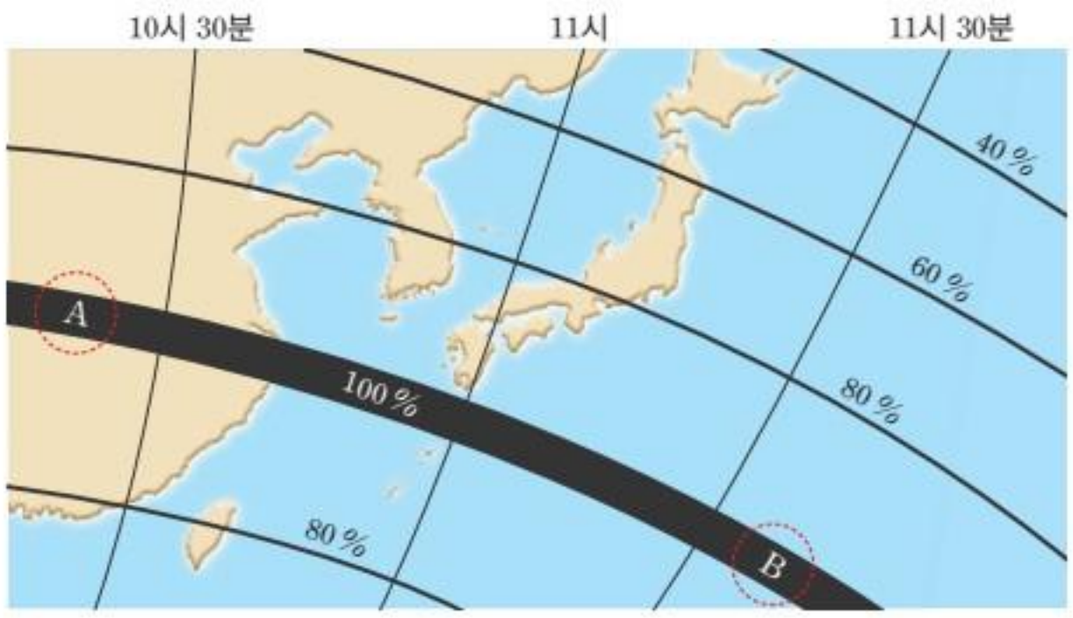
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 달의 위상이 삭이나 망일 때 교점 근처에 위치해야 식현상이 일어난다.

1등급 도전 문제

➤ 지구 표면에서 달 그림자의 이동

07 그림은 어느 날 일어난 일식 때 각 지역에서 태양이 최대로 가려지는 비율(%)과 그때의 시각을 우리나라 표준시로 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 일식은 A 지역에서 먼저 관측되고, 그 이후에 B 지역에서 관측된다.
ㄴ. 우리나라에서는 10시 30분과 11시 사이에 부분일식을 관측할 수 있다.
ㄷ. 우리나라에서 관측할 때 10시에는 달이 태양보다 동쪽에 있고, 12시에는 달이 태양보다 서쪽에 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ 달의 그림자는 지구 표면을 따라 서쪽에서 동쪽으로 이동하며, 개기일식은 태양이 100 % 가려지는 지역에서만 관측할 수 있다.

➤ 식현상의 진행 과정

08 표는 어느 날 북반구 중위도 지역에서 관측한 식현상의 관측 결과를 시간별로 나타낸 것이다.

관측 시각	달의 모습
21:04	달의 왼쪽 아래가 가려지기 시작한다.
21:57	달의 절반 이상이 가려지고, 점차 붉게 보이기 시작한다.
22:23	달 전체가 어둡고 붉은색으로 보인다.
23:12	달의 왼쪽 아래가 밝아지기 시작한다.
23:59	달 전체가 다시 밝아진다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 이날 태양, 지구, 달의 순서로 일직선상에 놓인다.
ㄴ. 22시 30분에 달은 지구의 본그림자 안에 위치한다.
ㄷ. 달은 22시보다 23시에 공전 궤도에서 더 동쪽에 위치한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ 달은 지구 주위를 서쪽에서 동쪽으로 공전하며 지구의 그림자로 들어가 월식이 일어난다.

02 태양계 행성의 겉보기 운동

핵심 내용 미리보기

"태양계 행성은 **공전 속도**가 달라 지구와 행성 사이의 **상대적인 위치 변화**가 발생하며, 이로 인해 **겉보기 운동**이 관측된다."

1 태양계 모형

태양계를 구성하는 천체들의 크기나 거리는 실제 비율로 표현하기 어렵기 때문에, 이를 단순화하여 태양계 모형으로 표현한다.

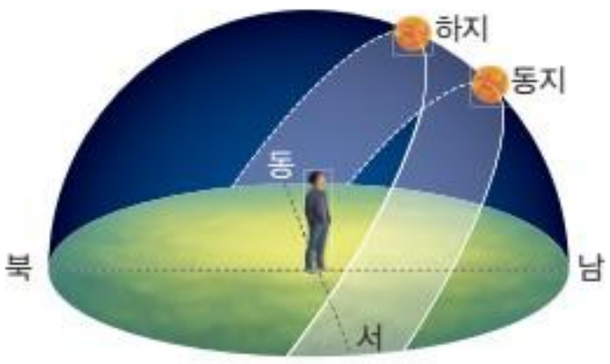
1. 우주관의 변천

(1) **고대의 우주관과 지구 중심 우주론:** 고대인들은 우주를 신의 영역으로 생각하였고, 모든 천체가 지구를 중심으로 돌고 있다고 여겼다. 이 이론은 수천 년 동안 우주의 구조를 설명하는 이론으로 사용되었다.

(2) **근대 과학과 태양 중심 우주론 등장:** 근대에 들어서면서 관측 기술의 발달과 함께 코페르니쿠스는 태양이 우주의 중심에 있고, 지구를 포함한 행성이 태양 주위를 공전한다고 주장했다. 이후 이 이론은 갈릴레이와 케플러에 의해 점차 확립되었다.

2. 행성의 관측과 태양계 모형

(1) **행성이 보이는 영역과 황도:** 우리나라(위도 약 36.5°N)에서 태양의 남중 고도는 춘분과 추분에는 약 53.5°, 하지에는 약 77°, 동지에는 약 30°이다. 따라서 황도는 하지와 동지 때의 태양 남중 고도 사이에 있으며, 행성 역시 이 부근에서 보인다.



▲ 우리나라에서 행성이 보이는 영역

(2) **천구상의 천체 이동 방향:** 북반구에서 남쪽을 바라보는 관측자에게 태양의 왼쪽은 동쪽, 오른쪽은 서쪽이다. 이러한 기준을 바탕으로 천구상의 천체 이동 방향은 일반적으로 왼쪽을 동쪽, 오른쪽을 서쪽으로 설명한다.

(3) **태양계 모형:** 태양계를 구성하는 천체의 크기나 거리를 실제 비율로 나타내기는 어렵기 때문에, 이를 단순화한 태양계 모형으로 나타낸다. 태양계 모형에서는 행성의 움직임을 북극 위에서 내려다본 모습으로 나타내며, 이각과 방향을 이용하여 행성의 위치 관계를 표현한다.

천구와 황도



천구는 관측자를 중심으로 하는 무한히 넓은 가상의 구면으로, 천체는 천구의 표면에 있는 것처럼 보인다. 황도는 천구에서 태양이 이동하는 경로로, 지구 자전축의 기울기가 반영되어 천구의 적도에서 약 23.5° 기울어져 있다.

이각

지구를 중심으로 태양과 천체가 이루는 각이다.



중요 개념 체크

정답과 해설 158쪽

1. 북반구에서 남쪽을 바라보는 관측자에게 태양의 왼쪽은 (서쪽, 동쪽)이다.
2. 태양계 모형에서 행성의 위치 관계는 ( )과 방향을 이용하여 표현한다.

2 행성의 위치와 관측

행성은 태양과 지구와의 상대적인 위치에 따라 겉보기 크기 및 위상의 변화가 일어나며, 지구와 행성의 공전 속도 차이로 위치 관계의 변화가 일어난다.

1. 내행성의 관측

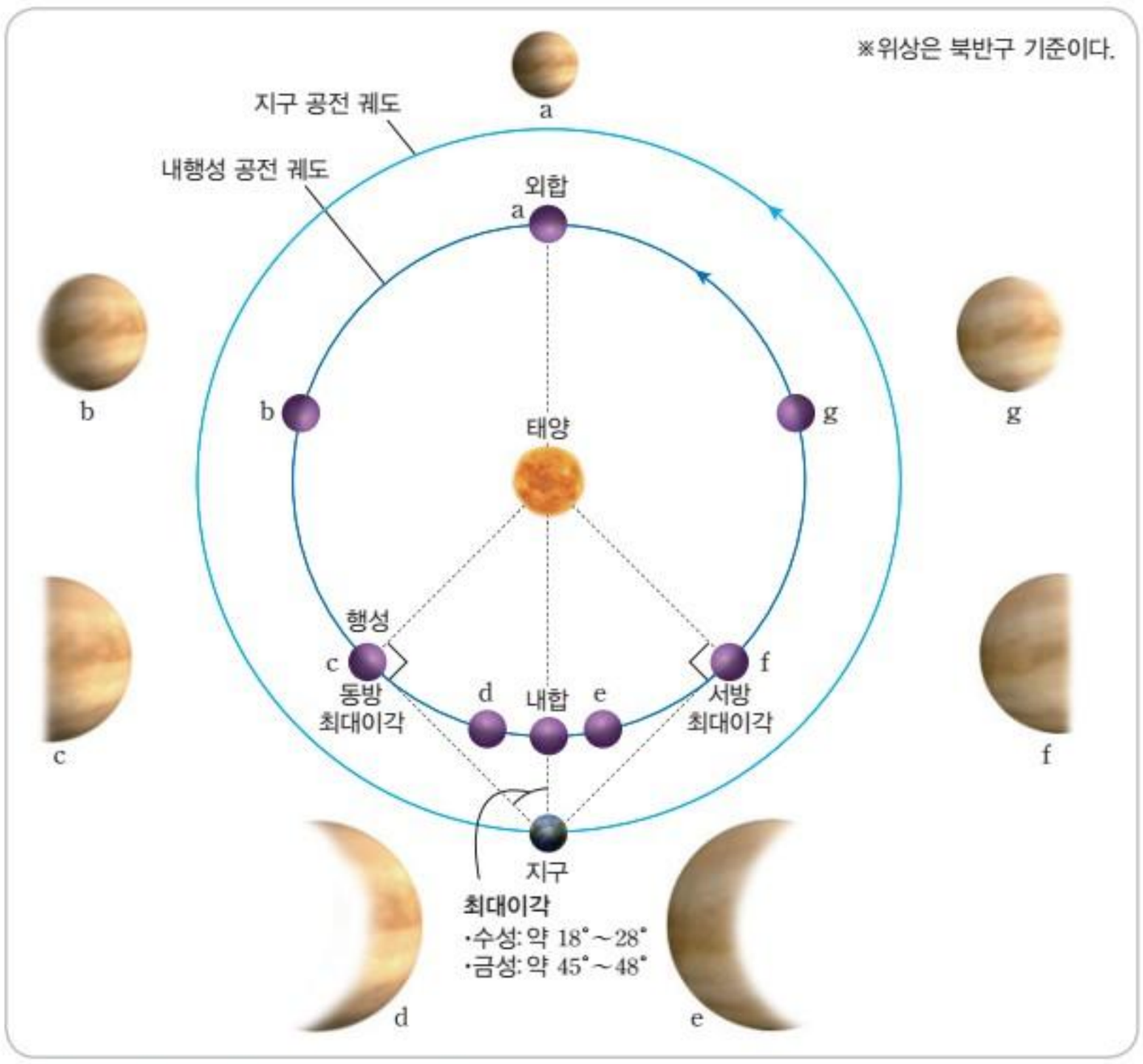
(1) **내행성의 공전 위치 및 이각:** 내행성은 지구보다 공전 궤도의 크기가 작기 때문에, 지구에서 관측할 때 이각이 일정 범위 내에서 변한다.

(2) **내행성의 위치 관계**

① 합: 태양－내행성－지구의 순서로 같은 방향에 위치할 때를 내합, 내행성－태양－지구의 순서로 같은 방향에 위치할 때를 외합이라고 한다. 이때, 내행성의 이각은 0°이다.

② 최대이각: 이각이 가장 클 때의 위치를 최대이각이라 하며, 태양의 동쪽으로 이각이 가장 클 때인 동방 최대이각과 서쪽으로 이각이 가장 클 때인 서방 최대이각으로 구분한다.

(3) **내행성의 겉보기 크기 및 위상 변화:** 내행성의 겉보기 크기는 내합에 가까울수록 크고, 외합에 가까울수록 작다. 내행성은 지구에서 관측할 때 태양과의 상대적인 위치에 따라 태양의 동쪽에서는 보름달에서 초승달 모양 사이, 태양의 서쪽에서는 그믐달에서 보름달 모양 사이의 위상 변화가 나타난다.



▲ 내행성의 위치 관계와 위상 및 겉보기 크기

위치에 따른 행성의 분류
태양계 행성은 공전하는 위치에 따라 지구의 공전 궤도보다 안쪽에서 공전하는 내행성, 바깥쪽에서 공전하는 외행성으로 구분할 수 있다.

수성과 금성의 최대이각
수성은 이심률이 큰 타원 궤도를 따라 공전하므로, 최대이각의 범위가 약 18°～28°로 변화가 크다. 반면, 금성은 거의 원에 가까운 궤도를 따라 공전하므로, 최대이각의 범위가 약 45°～48°로 변화가 작다.

달의 관측 시기와 위치
달은 매일 약 50분씩 늦게 뜨기 때문에, 위상에 따라 관측할 수 있는 시간과 위치가 다르다. 초승달은 초저녁 서쪽 하늘에서, 그믐달은 새벽 동쪽 하늘에서 짧은 시간 관측할 수 있다.

(4) **내행성의 공전 속도와 위치 변화:** 내행성은 지구보다 공전 속도가 빠르므로, 지구와의 위치 관계가 시계 반대 방향인 외합 → 동방 최대이각 → 내합 → 서방 최대이각 → 외합 순으로 변한다.

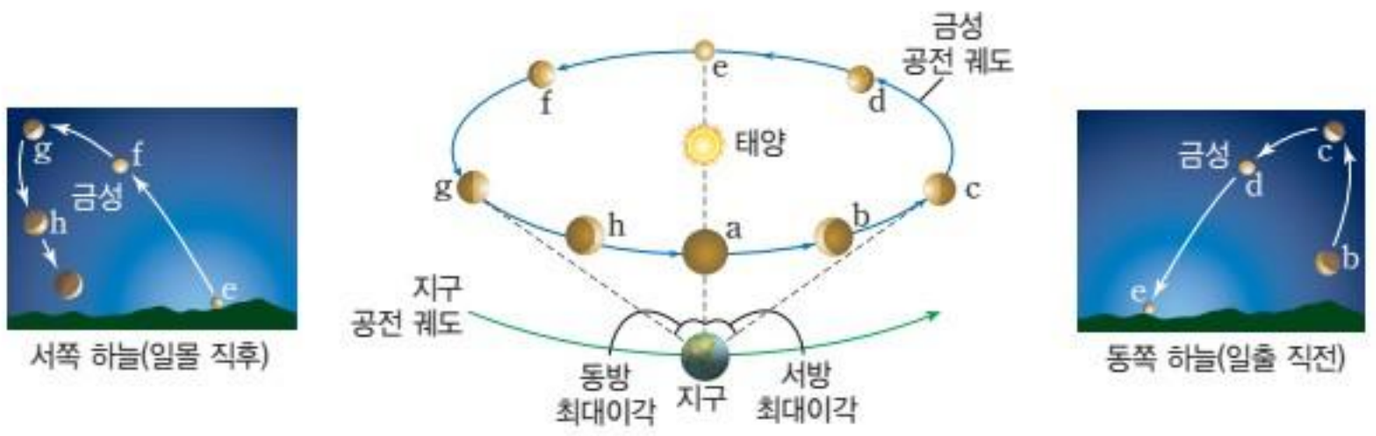
(5) **내행성의 관측 시기와 위치**

① 내행성이 내합과 외합에 있을 때는 태양과 같은 방향에 위치하여 태양과 함께 뜨고 지므로, 관측하기 어렵다.

② 내행성이 태양보다 동쪽에 있을 때는 초저녁에 서쪽 하늘에서, 태양보다 서쪽에 있을 때는 새벽에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다. 특히, 내행성이 최대이각에 있을 때는 태양으로부터 가장 멀리 떨어져 있으므로 가장 긴 시간 관측할 수 있다.

심화 밤하늘에서 여러 날 동안 관측되는 내행성의 모습

밤하늘에서 일출과 일몰의 위치가 고정되었다고 가정했을 때, 내행성이 합(a, e)에 위치할 때는 태양과 함께 뜨고 지므로 관측하기 어렵다. 내합 부근(b, h)에서는 행성이 초승달이나 그믐달 모양으로 관측되며 지구에서 가까워 시지름이 크다. 최대이각(c, g)에 위치할 때는 행성이 반달 모양으로 관측되며, 외합 부근(d, f)에서는 행성이 보름달 모양으로 관측되며 지구에서 멀어 시지름이 작다.



내행성의 최대이각과 관측 시간
행성의 이각이 클수록 태양과의 각거리가 커 관측할 수 있는 시간이 길어진다. 따라서 내행성은 최대이각에 위치할 때 관측 가능 시간이 가장 길다. 지구는 1시간에 약 15° 자전하므로, 수성이 최대이각에 위치할 때는 약 1시간~2시간, 금성이 최대이각에 위치할 때는 약 3시간 관측이 가능하다.

내행성을 한밤중에는 관측할 수 없는 까닭
내행성은 지구보다 안쪽 궤도를 공전하므로, 이각이 일정 범위 내에 있어 항상 태양 근처에 위치한다. 따라서 한밤중에는 관측할 수 없다.

심화 지구에서 관측한 내행성의 밝기 변화

지구에서 관측한 내행성의 밝기는 주로 대기의 유무와 반사율 차이에 의해 결정된다. 수성은 대기가 거의 없어 위상이 밝기에 큰 영향을 주기 때문에, 지구와 가까운 내합 부근에서 가장 어둡게 관측되고, 지구와 먼 외합 부근에서 가장 밝게 관측된다. 반면, 금성은 두꺼운 대기층이 있어 내합 부근에서도 대기의 반사 효과로 밝기가 크게 줄어들지 않으며, 내합과 최대이각 사이에서 가장 밝게 보인다.

2. 외행성의 관측

(1) **외행성의 공전 위치 및 이각:** 외행성은 지구보다 공전 궤도의 크기가 크기 때문에, 지구에서 관측할 때 이각이 0°에서 180°까지 나타날 수 있다.

(2) **외행성의 위치 관계**

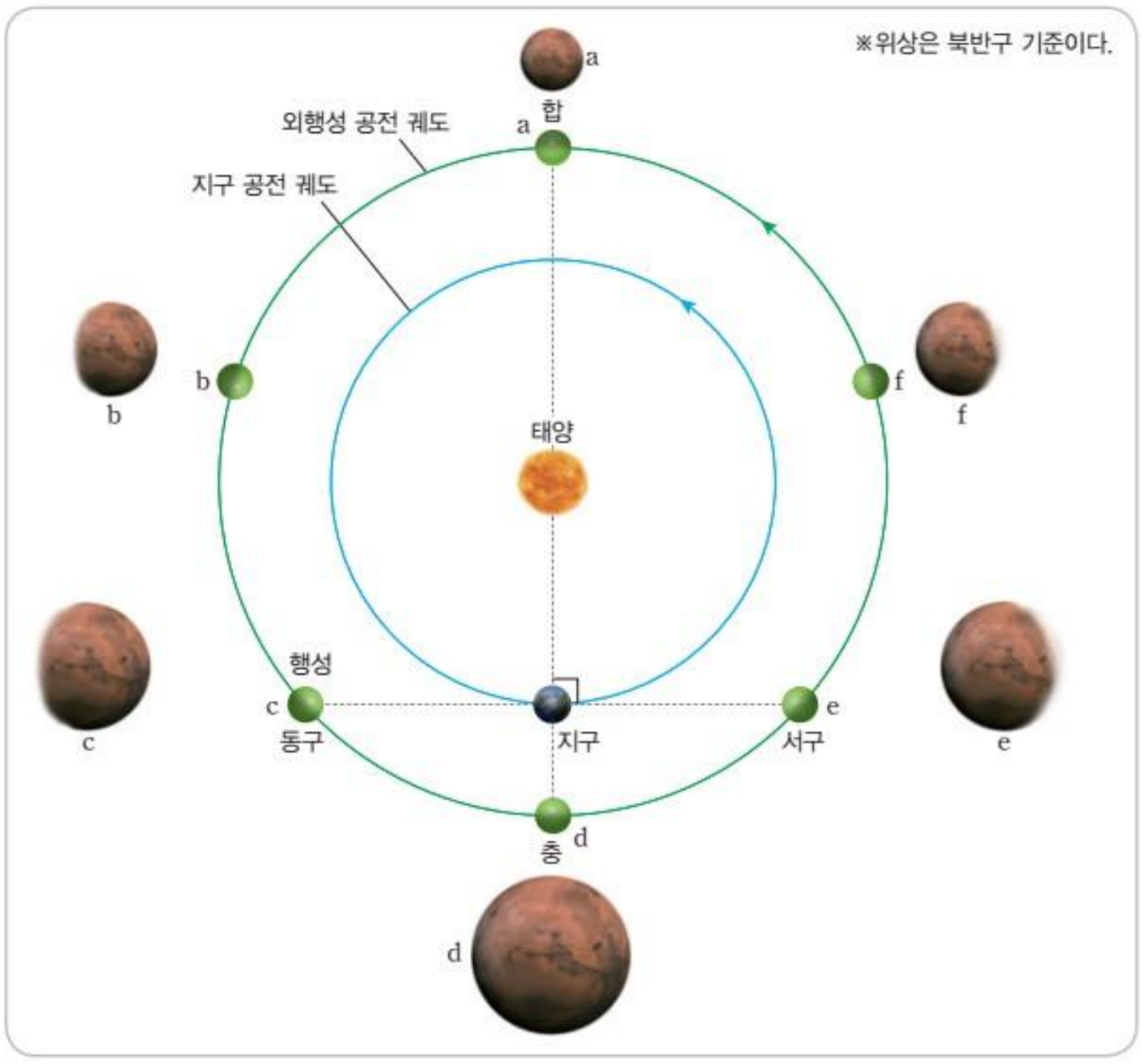
① 합: 외행성–태양–지구의 순서로 같은 방향에 위치할 때를 합이라고 한다. 이때, 외행성의 이각은 0°이다.

② 구: 외행성이 태양과 직각 방향에 위치할 때를 구라고 하며, 태양의 동쪽으로 직각 방향인 동구와 서쪽으로 직각 방향인 서구로 구분한다.

③ 충: 태양–지구–외행성의 순서로 같은 방향에 위치할 때를 충이라고 한다. 이때, 외행성의 이각은 약 180°이다.

(3) **외행성의 겉보기 크기 및 위상 변화:** 외행성의 겉보기 크기는 합에 가까울수록 작고, 충에 가까울수록 크다. 외행성은 지구에서 관측할 때 태양과의 상대적인 위치에 따라 태양의 동쪽에서는 상현달에서 보름달 사이, 태양의 서쪽에서는 보름달에서 하현달 사이의 위상 변화가 나타난다.

외행성의 위상과 크기 변화
화성을 제외한 외행성은 지구로부터의 거리가 너무 멀어 위상과 크기 변화가 잘 구분되지 않는다.



▲ 외행성의 위치 관계와 위상 및 겉보기 크기

(4) 외행성의 공전 속도와 위치 변화: 외행성은 지구보다 공전 속도가 느리므로, 지구와의 위치 관계가 시계 방향인 합 → 서구 → 충 → 동구 → 합 순으로 변한다.

(5) 외행성의 관측 시기와 위치

① 외행성이 합에 있을 때는 태양과 같은 방향에 위치하여 태양과 함께 뜨고 지므로, 관측하기 어렵다.

② 외행성이 합과 동구 사이에 있을 때는 초저녁에 관측하기 쉽고, 합과 서구 사이에 있을 때는 새벽에 관측하기 쉽다. 동구에 위치할 때 초저녁부터 자정까지 약 6시간, 서구에 위치할 때 자정부터 새벽까지 약 6시간 관측이 가능하다.

③ 외행성이 충에 있을 때는 태양의 반대편에 위치하므로 초저녁에 동쪽에서 떠서 자정에 남중하고 새벽에 서쪽으로 진다. 따라서 밤중에 계속 관측이 가능하다.

지구에서 관측한 외행성의 밝기 변화

지구에서 관측한 외행성의 밝기는 주로 지구와의 상대적 거리에 따라 달라진다. 외행성이 충에 있을 때는 지구와 가장 가까워 밝기가 최대가 된다. 반면, 합에 있을 때는 지구와 가장 멀리 떨어져 있으며 태양과 같은 방향에 위치하므로 어둡고 관측하기 어렵다.

중요 개념 체크

정답과 해설 158쪽

1. 내행성의 위치 관계에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 내행성은 지구에서 한밤중에 관측할 수 없다. ——— ( )

(2) 내행성의 최대이각은 90°보다 크다. ——— ( )

2. 외행성의 이각이 180°일 때의 위치는 ( )이다.

3 행성의 겉보기 운동

밤하늘을 여러 날 동안 같은 시각에 관측하면 행성이 별자리 사이를 움직이는 모습을 볼 수 있으며, 이러한 행성의 운동은 지구와 행성의 공전 속도 차이로 설명할 수 있다.

1. 행성의 겉보기 운동

행성의 실제 운동이 아닌 지구와 행성의 상대적인 위치 변화로 관측되는 운동을 행성의 겉보기 운동이라고 한다.

2. 겉보기 운동의 유형

행성의 겉보기 운동은 순행 → 유 → 역행 → 유 → 순행의 주기로 반복된다.

(1) **순행:** 행성이 배경이 되는 별자리를 기준으로 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 겉보기 운동으로, 행성에서 보통 나타나는 기본적인 운동 방향이다. 태양의 연주 운동 방향과 같은 방향이다.

(2) **역행:** 행성이 배경이 되는 별자리를 기준으로 동쪽에서 서쪽으로 이동하는 겉보기 운동으로, 일정한 시기에만 나타나는 운동 방향이다. 태양의 연주 운동 방향과 반대 방향이다.

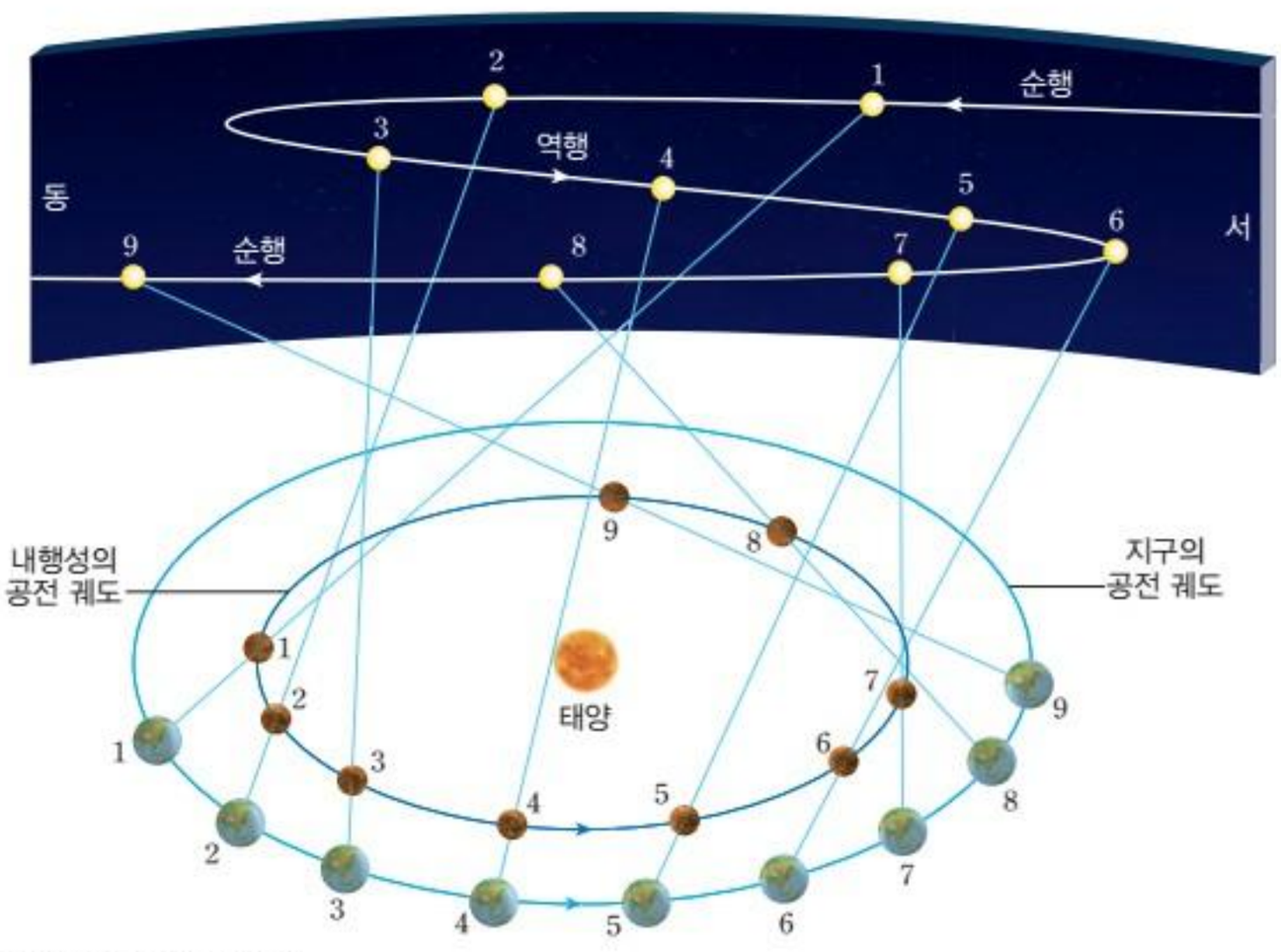
(3) **유:** 순행과 역행이 전환될 때, 행성이 정지한 것처럼 보이는 시기이다.

3. 내행성의 겉보기 운동

탐구 분석 30쪽

(1) **내행성의 특징:** 내행성인 수성, 금성은 지구보다 태양에 가까운 위치에서 공전하기 때문에 공전 속도가 지구보다 빠르며, 이각이 최대이각 이상으로 커질 수 없다.

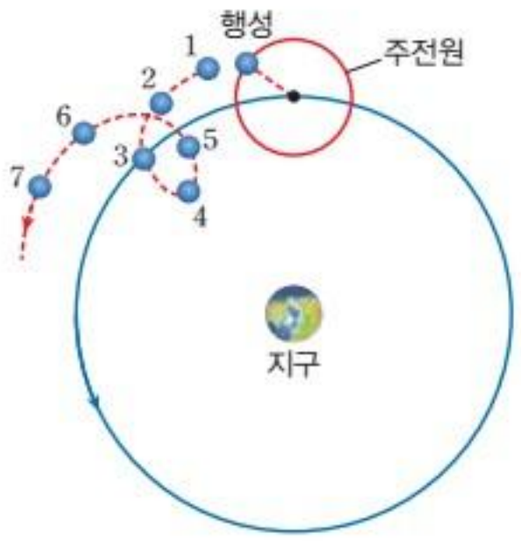
(2) **내행성의 겉보기 운동:** 처음에는 순행하다가 내합 부근에서 역행하며, 내합 전후에서 유가 관측된다. 즉, 내행성이 지구보다 빠르게 공전하면서 지구를 추월할 때 천구상에서 역행이 나타난다.



▲ 내행성의 겉보기 운동

행성의 겉보기 운동과 일주 운동
행성의 겉보기 운동은 여러 날에 걸쳐 관찰해야 나타나는 현상으로, 천체가 하루 동안 동쪽에서 서쪽으로 움직이는 일주 운동과 다르다.

주전원
과거 천동설에서는 지구와 행성의 공전 속도 차이에 의해 발생하는 역행 현상을 설명하기 위하여 주전원을 도입하였다. 행성이 주전원을 따라 돌면서 주전원 중심이 지구를 공전하며, 이때 행성의 역행(3~5 사이)이 일어난다.



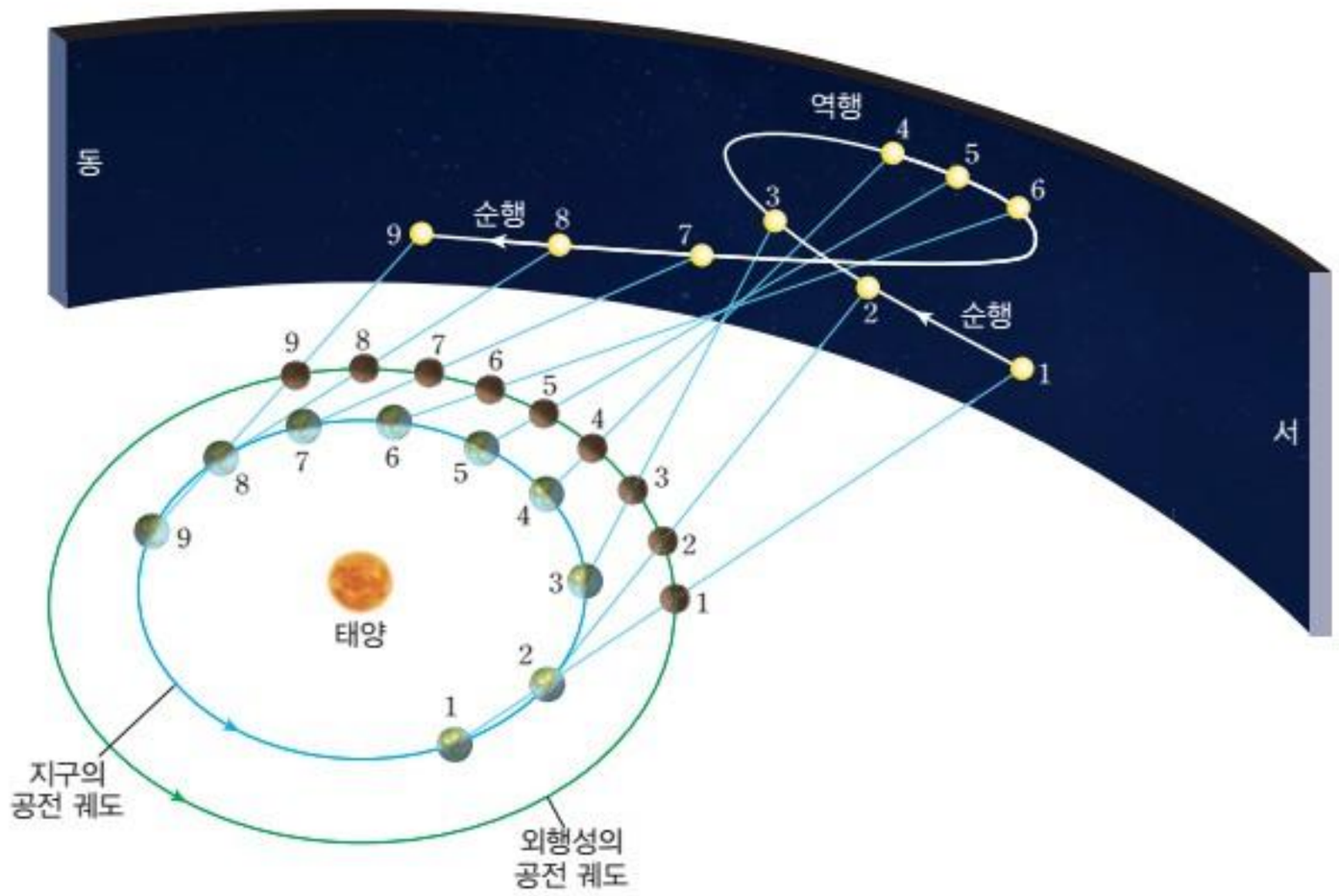
내행성에서 본 지구의 겉보기 운동
내행성이 내합 부근에서 역행할 때, 해당 내행성에서 지구를 관측하면 지구는 역행한다.

4. 외행성의 겉보기 운동

탐구 분석 30쪽

(1) **외행성의 특징:** 외행성인 화성, 목성, 토성, 천왕성, 해왕성은 지구보다 태양에서 멀리 떨어진 위치에서 공전하기 때문에 공전 속도가 지구보다 느리며, 이각이 0°에서 180°까지 다양하게 나타난다.

(2) **외행성의 겉보기 운동:** 처음에는 순행하다가 충 부근에서 역행하며, 충 전후에서 유가 관측된다. 즉, 지구가 외행성보다 빠르게 공전하면서 외행성을 추월할 때 천구상에서 역행이 나타난다.



▲ 외행성의 겉보기 운동

외행성에서 본 지구의 겉보기 운동
외행성이 충 부근에서 역행할 때, 해당 외행성에서 지구를 관측하면 지구는 역행한다.

겉보기 운동의 모양
밤하늘에서 나타나는 내행성과 외행성의 겉보기 운동은 일정한 모습이 정해져 있는 것이 아니다. 지구의 공전 궤도면과 행성의 공전 궤도면이 같은 평면에 있지 않기 때문에, 지구와 행성의 위치에 따라 S자 형태나 고리 형태 등 다양하게 나타난다.

태양계 행성의 회합 주기
내행성이 내합(외합)에서 다음 내합(외합)까지, 외행성이 충(합)에서 다음 충(합)까지 회전하는 데 걸리는 시간이다. 회합 주기는 행성마다 다르며, 회합 주기가 반복될 때 천구상에서 행성의 겉보기 위치도 계속 달라진다.

행성	회합 주기(일)	공전 주기(일)
수성	116	88
금성	584	225
지구	-	365
화성	780	687
목성	399	4333
토성	378	10759
천왕성	370	30685
해왕성	368	60188

▲ 태양계 행성의 회합 주기와 공전 주기

심화 행성의 공전 속도가 다른 까닭

태양에 가까울수록 태양의 중력이 더 강하게 작용하여 공전 속도가 빨라지며, 이는 케플러 제3법칙으로도 설명할 수 있다.

$$P^2 \propto a^3$$

(P: 행성의 공전 주기, a: 행성의 공전 궤도 긴반지름)

태양에서 멀리 떨어진 행성일수록 공전 주기가 길다. 즉, 공전 궤도 반지름이 클수록 공전 속도가 느려진다.



중요 개념 체크

정답과 해설 158쪽

1. 행성의 겉보기 운동에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 행성이 순행할 때, 배경별에 대해 동쪽에서 서쪽으로 움직인다. ——— ( )

(2) 유는 순행과 역행이 전환될 때 행성이 정지한 것처럼 보이는 시기이다. — ( )

2. 내행성의 역행은 ( ) 부근, 외행성의 역행은 ( ) 부근에서 나타난다.

HIGH 탐구 분석

천체 관측 프로그램으로 행성의 운동 시뮬레이션하기

천체 관측 프로그램을 이용하여 행성의 운동을 시뮬레이션하고, 행성의 순행과 역행이 나타나는 위치를 확인할 수 있다.

과정

❶ 내행성 중 하나의 행성을 정하여 천체 관측 프로그램에서 선택한다.
❷ 시각은 고정하고 날짜를 하루 단위로 변경하면서 행성이 별자리를 기준으로 움직이는 방향을 기록한 뒤, 순행인지 역행인지 구분한다.
❸ 행성의 유가 일어날 때의 이각을 기록하고, 행성이 역행하는 구간의 이각 범위를 태양계 모형에 표시한다.
❹ 외행성 중 하나의 행성을 정하여 ❷~❸을 반복한다.

결과

1. **역행이 나타나는 기간에 행성은 태양계 모형에서 어디에 위치하는가?**
→ 내행성은 내합 부근, 외행성은 충 부근에 위치한다.



2. **행성의 역행이 나타나는 이각의 범위는 어떠한가?**

행성	내행성		외행성				
	수성	금성	화성	목성	토성	천왕성	해왕성
이각	약 20°	약 30°	약 130°	약 115°	약 110°	약 100°	약 100°

정리

- **내행성**은 동방 최대이각을 지나 서방 최대이각에 이르기 전인 **내합 부근에서 역행**이 관측된다. **외행성**은 서구를 지나 동구에 이르기 전인 **충 부근에서 역행**이 관측된다.
- 행성마다 **공전 속도가 달라 역행이 나타나는 시기와 이각의 범위가 다르다.** 행성의 공전 속도가 빠를수록 역행하는 기간이 짧아진다.

천체 관측 프로그램 활용법

- 메뉴에서 별자리 선을 나타나게 하는 기능을 선택하여 별자리를 더 알아보기 쉽게 할 수 있다.
- 행성의 궤도상 위치와 관측 시각에 따라 행성이 지면 아래에 위치할 때가 있다. 이때는 메뉴에서 지면을 보이지 않게 하는 기능을 선택하도록 한다.
- 천체 관측 프로그램을 활용하면 행성의 관측 가능 시각, 날짜별 관측되는 모양도 확인할 수 있다.

탐구 확인 문제

정답과 해설 158쪽

1 위 탐구에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기
ㄱ. 내행성은 외합 부근에 위치할 때 역행이 나타난다.
ㄴ. 외행성은 충 부근에 위치할 때 역행이 나타난다.
ㄷ. 행성의 공전 속도가 빠를수록 역행하는 기간이 길어진다.

2 지구에서 내행성과 외행성의 역행을 관측할 수 있는 시간을 서술하시오.

정답과 해설 159쪽

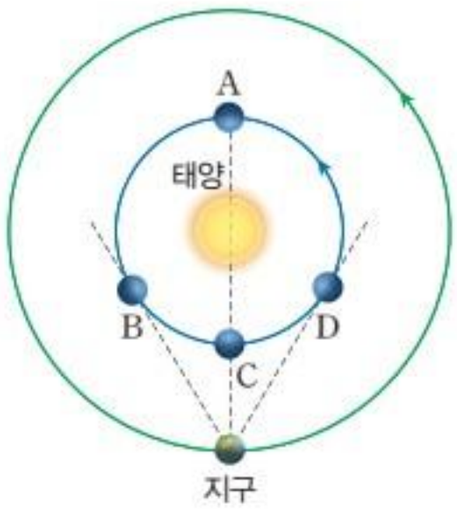
개념 기본 문제

01 내행성의 위치 관계에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 내행성이 외합에 위치할 때, 이각은 0°이다.
ㄴ. 내행성이 내합 부근에 위치할 때, 보름달 모양으로 관측된다.
ㄷ. 내행성이 동방 최대이각에 위치할 때, 새벽에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

02 그림은 내행성과 지구의 상대적인 위치 관계를 나타낸 것이다.



A~D 중 북반구에서 내행성의 위상이 상현달 모양으로 관측되는 위치를 쓰시오.

03 다음은 내행성의 위치 변화에 대한 설명이다.

내행성은 지구보다 공전 속도가 ㉠(느려, 빨라), 지구와의 위치 관계가 외합 → ㉡(동방, 서방) 최대이각 → 내합 → ㉢(동방, 서방) 최대이각 순으로 변한다.

( ) 안에 알맞은 말을 고르시오.

04 외행성의 위치 관계에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

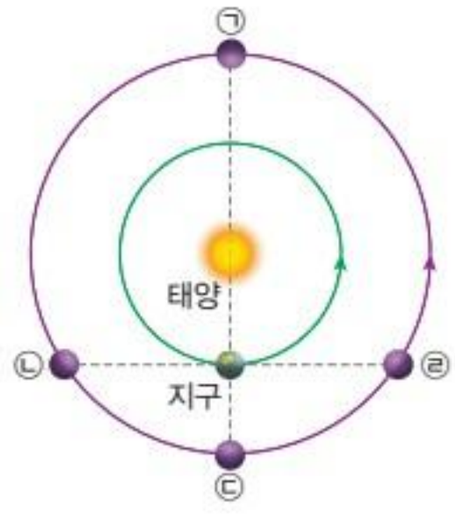
ㄱ. 외행성이 서구에 위치할 때, 이각은 90°이다.
ㄴ. 외행성이 충에 위치할 때, 한밤중에 관측이 가능하다.
ㄷ. 외행성이 합과 동구 사이에 위치할 때, 초승달 모양으로 관측된다.

05 다음은 외행성의 위상 변화에 대한 설명이다.

외행성은 지구에서 관측할 때, 태양보다 동쪽에 위치할 때는 (㉠)에서 망, 서쪽에 위치할 때는 망에서 (㉡) 사이의 위상 변화가 나타난다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

06 그림은 외행성과 지구의 상대적인 위치 관계를 나타낸 것이다.



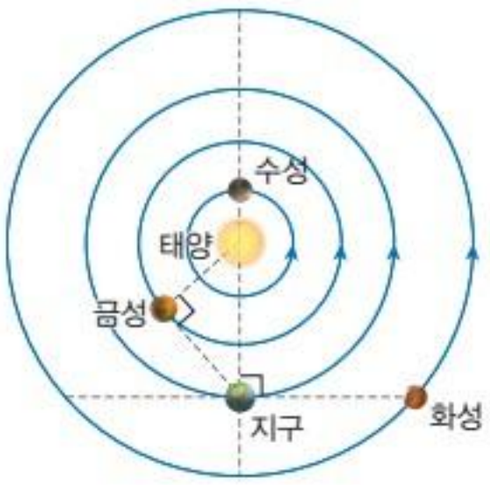
외행성의 위치 관계가 변하는 순서를 ㉠부터 순서대로 쓰시오.

07 행성의 이각과 겉보기 크기에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

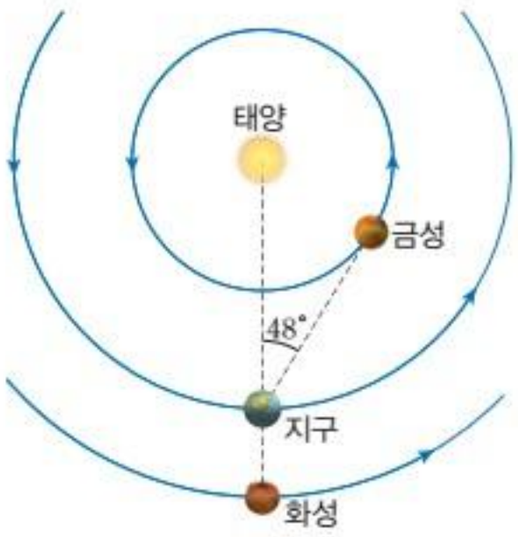
ㄱ. 이각의 최댓값은 내행성이 외행성보다 크다.
ㄴ. 내행성은 내합에 가까울수록 겉보기 크기가 커진다.
ㄷ. 외행성은 충에 위치할 때 겉보기 크기가 가장 크다.

08 그림은 어느 날 태양과 수성, 금성, 지구, 화성의 상대적인 위치 관계를 나타낸 것이다.



지구에서 관측할 때 수성, 금성, 화성은 행성의 위치 관계 중 어느 위치에 있는지 각각 쓰시오.

09 그림은 어느 날 태양과 금성, 지구, 화성의 상대적인 위치 관계를 나타낸 것이다.



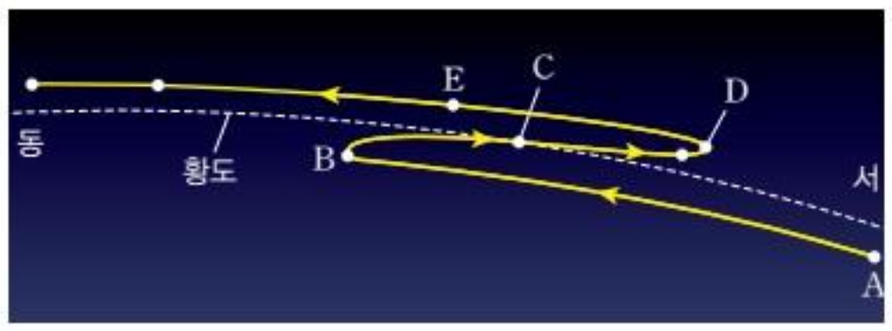
이날 금성과 화성 중 관측 가능 시간이 더 긴 행성은 무엇인지 쓰시오.

10 겉보기 운동의 유형에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 행성은 순행할 때 배경별에 대해 서쪽에서 동쪽으로 움직인다.
ㄴ. 행성은 일반적으로 순행하는 기간보다 역행하는 기간이 더 길다.
ㄷ. 행성의 겉보기 운동은 순행 → 유 → 역행 → 유 → 순행 순으로 나타난다.

11 그림은 어느 해 외행성의 겉보기 운동을 나타낸 것이다.



(1) 역행이 일어난 구간을 기호로 쓰시오.

(2) 유가 일어나는 위치는 어디인지 기호로 쓰시오.

12 다음은 내행성과 외행성의 역행이 일어나는 위치에 대한 설명이다.

행성의 역행은 지구와 행성의 공전 속도 차이 때문에 나타난다. 내행성의 역행은 (㉠) 부근에서 내행성이 지구를 추월할 때 나타나며, 외행성의 역행은 (㉡) 부근에서 지구가 외행성을 추월할 때 나타난다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

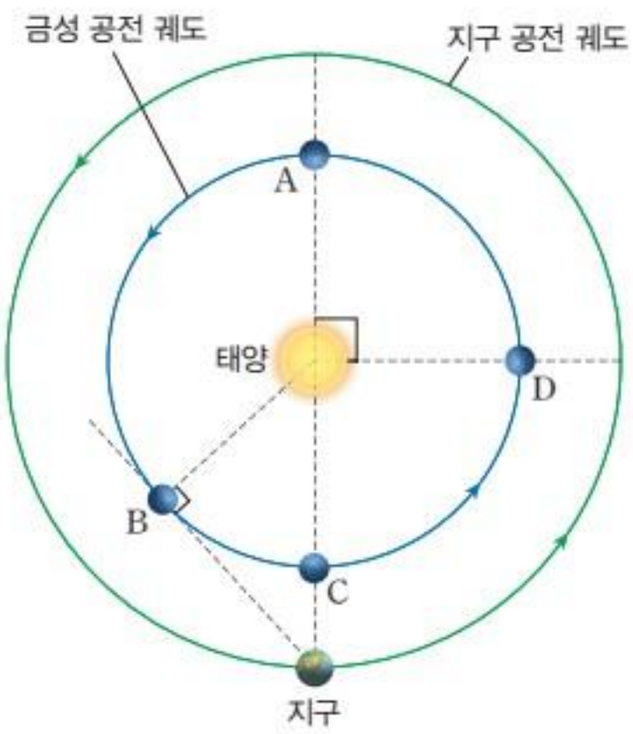
정답과 해설 160쪽

개념 적용 문제

➤ 내행성의 관측

01 그림은 금성과 지구의 상대적인 위치 변화를 나타낸 것이다.

A~D에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

ㄱ. 금성의 겉보기 크기는 A에 위치할 때 가장 크다.

ㄴ. 금성의 위치 관계는 A → D → C → B 순으로 변한다.

ㄷ. 금성이 B에 위치할 때, 초저녁 서쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성이 태양보다 동쪽에 있을 때는 초저녁에 서쪽 하늘, 태양보다 서쪽에 있을 때는 새벽에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

➤ 내행성의 관측

02 다음은 20일간 하늘에서 금성의 위치 변화를 관측한 결과에 대한 설명이다.

20일간 해가 진 직후 서쪽 하늘에서 금성을 관측하였다. 관측 14일 차까지 금성은 매일 점점 높은 곳에서 관측됐고, 관측 15일 차에 가장 높은 곳에서 관측됐다. 이후 금성은 매일 점점 낮은 곳에서 관측됐다.

이 기간에 금성에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 관측 14일 차까지 금성의 관측 시간은 점점 짧아진다.

ㄴ. 관측 15일 차에 금성은 동방 최대이각 근처에 위치한다.

ㄷ. 관측 15일 차 이후 금성의 위치는 점점 내합에 가까워진다.

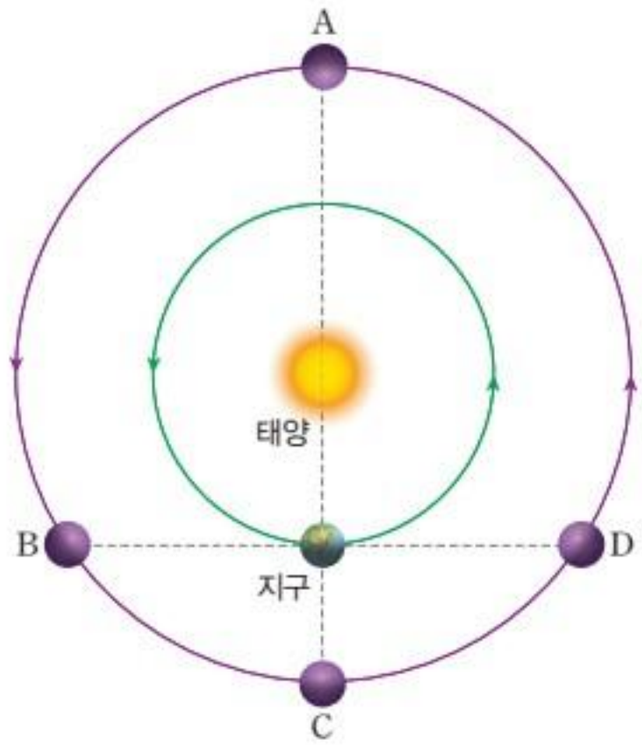
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성은 지구보다 공전 속도가 빠르므로, 지구와의 위치 관계는 외합 → 동방 최대이각 → 내합 → 서방 최대이각 → 외합 순으로 변한다.

➤ 외행성의 관측

03 그림은 지구와 화성의 상대적인 위치 변화를 나타낸 것이다.

A~D에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▷ 외행성의 이각은 합일 때 0°, 구일 때 90°, 충일 때 약 180°이다.

보기

ㄱ. 화성의 이각 크기는 A일 때 가장 크다.

ㄴ. 화성이 D에 위치할 때, 새벽에 관측할 수 있다.

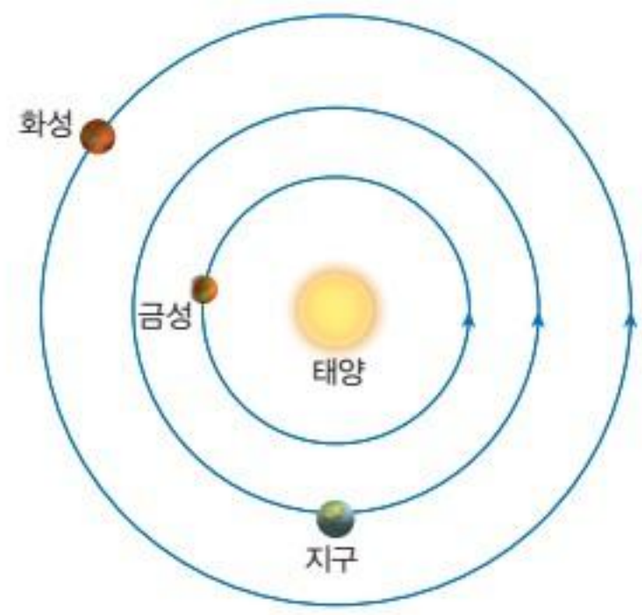
ㄷ. 화성의 위치는 A → B → C → D 순으로 변한다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 행성의 위치와 관측

04 그림은 어느 날 태양계 행성들의 상대적인 위치를 나타낸 것이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▷ 외행성은 지구보다 공전 속도가 느리므로, 지구와의 위치 관계는 합 → 서구 → 충 → 동구 → 합 순으로 변한다.

보기

ㄱ. 이날 금성의 위상은 반달로 보인다.

ㄴ. 이날 화성은 초저녁부터 자정까지 약 6시간 관측이 가능하다.

ㄷ. 다음날 금성은 내합, 화성은 합에 더 가까워진다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 행성의 위치와 관측

05 그림은 어느 날 우리나라 동쪽 하늘에서 관측된 행성의 위치를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 이날 행성들은 황도 근처에 있다.)



▻ 행성이 태양보다 서쪽에 있을 때는 새벽에 동쪽 하늘에서 관측하기 쉽다.

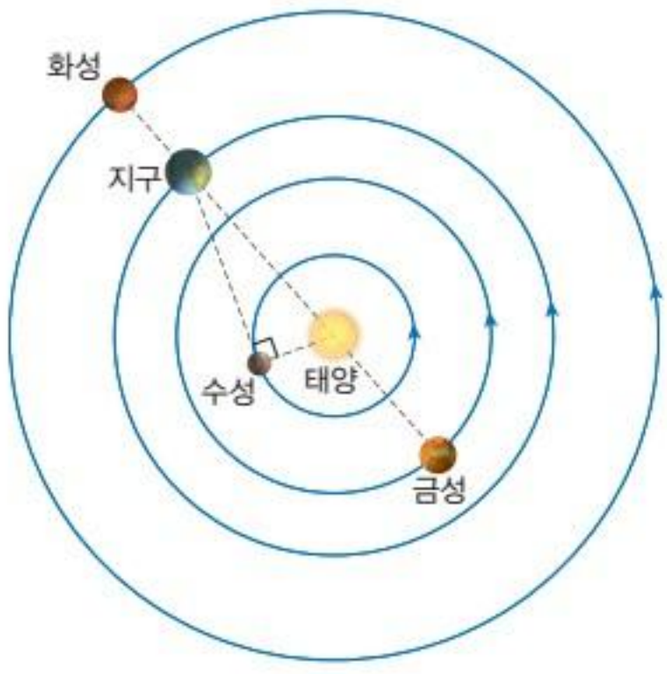
보기

ㄱ. 화성은 서구와 합 사이에 위치한다.
ㄴ. 금성의 위상은 상현달 모양에 가깝다.
ㄷ. 수성은 동방 최대이각 부근에 위치한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 행성의 위치와 관측

06 그림은 어느 날 태양계 행성들의 상대적인 위치를 나타낸 것이다. 각 행성의 관측에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▻ 행성의 이각이 클수록 태양과의 각거리가 커 관측할 수 있는 시간이 길어진다.

보기

ㄱ. 다음날 수성의 관측 가능 시간은 더 짧아진다.
ㄴ. 금성과 화성은 모두 이날 해가 진 뒤에 관측할 수 있다.
ㄷ. 다음날 수성, 금성, 화성의 이각은 모두 더 작아진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 내행성의 겉보기 운동

07 그림은 어느 날 우리나라 서쪽 하늘에서 약 15일 간격으로 관측된 태양과 내행성 A, B의 상대적인 위치를 나타낸 것이다. 이 기간에 A와 B는 모두 이각이 증가하였다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

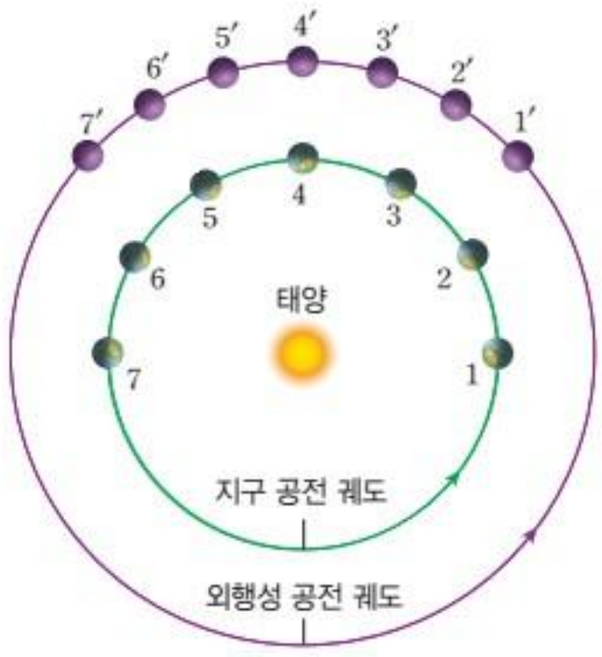
ㄱ. A의 공전 속도는 B보다 느리다.
ㄴ. B는 이 기간에 태양의 동쪽에 위치한다.
ㄷ. A와 B는 모두 이 기간에 역행하였다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 내행성은 내합 부근에서 내행성이 지구를 추월할 때 역행이 나타난다.

➤ 외행성의 겉보기 운동

08 그림은 어느 기간 지구와 외행성의 상대적인 위치 변화를 나타낸 것이다.
이 기간에 관측되는 현상에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

ㄱ. 지점 1~4 사이에 외행성의 이각은 증가한다.
ㄴ. 지점 3~5 사이에 외행성의 역행이 관측된다.
ㄷ. 이 기간에 외행성의 겉보기 운동에서는 유가 2번 관측된다.

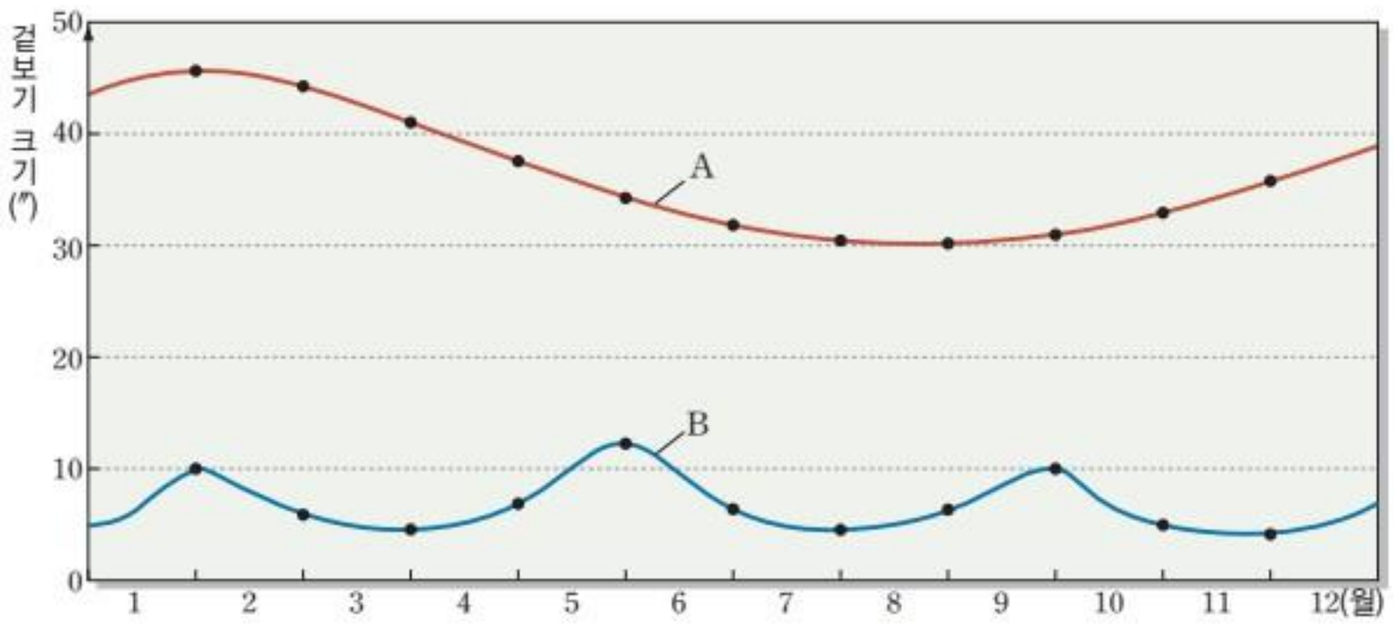
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 외행성은 충 부근에서 지구가 외행성을 추월할 때 역행이 나타난다.

1등급 도전 문제

➤ 행성의 위치와 관측

09 그림은 어느 한 해 동안 수성과 목성의 겉보기 크기 변화를 A와 B로 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. A는 목성, B는 수성이다.

ㄴ. B는 5월 말~6월 초에 태양과 같은 방향에 위치하는 시기가 있다.

ㄷ. B는 10월에 서쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 내행성의 겉보기 크기는 내합에 가까울수록 크고, 외행성의 겉보기 크기는 충에 가까울수록 크다.

➤ 행성의 위치와 관측

10 표는 어느 해 수성과 목성을 관측한 결과를 나타낸 것이다.

날짜	행성	현상
2월 7일	수성	서방 최대이각(26°)
3월 8일	목성	충
4월 18일	수성	동방 최대이각(20°)
9월 26일	목성	합

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 수성은 2월 7일에서 4월 18일 사이에 외합을 지난다.

ㄴ. 목성은 3월 8일에서 9월 26일 사이에 서구를 지난다.

ㄷ. 수성과 태양 사이의 거리는 2월 7일보다 4월 18일에 더 가깝다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 내행성의 최대이각이 작을수록 태양과 행성 사이의 거리가 가깝다.

중단원 핵/심/정/리 1. 태양계 천체

01 태양-달-지구 시스템에서의 식현상

1 그림자와 시지름
▸ 10쪽

1. 그림자의 종류와 특징

본그림자	광원에서 오는 빛이 완전히 차단되어 생기는 영역으로, 광원 전체가 보이지 않는다.
반그림자	광원에서 오는 빛이 일부만 차단되어 생기는 영역으로, 가려지지 않은 광원의 일부가 보인다.
(1)	광원에서 오는 빛이 중심만 차단되고 가장자리는 차단되지 않아 생기는 영역으로, 광원은 테두리만 남은 고리 모양으로 보인다.

2. 태양과 달의 시지름 지구에서 태양과 달까지의 거리 비율과 태양과 달의 크기 비율이 거의 같아, 지구에서 본 태양과 달의 시지름은 약 (2)°로 거의 같다. 하지만, 지구와 달의 공전 궤도는 타원형이므로, 지구에서 본 태양과 달의 시지름은 일정하지 않다.

2 일식
▸ 11쪽~12쪽

1. 일식 태양, 달, 지구의 순서로 일직선상에 놓일 때, 달이 태양을 가리는 현상

2. 일식의 종류와 원리

개기일식	달의 시지름이 태양의 시지름보다 크거나 같을 때, 달이 태양을 완전히 가리는 현상
부분일식	달이 태양의 일부분만 가리는 현상
금환일식	달의 시지름이 태양의 시지름보다 작을 때, 달이 태양의 가장자리를 가리지 못하는 현상
(3)	한 일식 동안 지역에 따라 개기일식과 금환일식이 동시에 일어나는 현상

3. 지구 표면에서 달 그림자의 이동 지구의 자전 속도보다 달 그림자가 지구 표면을 따라 이동하는 속도가 더 빠르므로, 달 그림자는 (4)쪽에서 (5)쪽으로 이동한다.

3 월식
▸ 13쪽~14쪽

1. 월식 태양, 지구, 달의 순서로 일직선상에 놓일 때, 달이 지구의 그림자에 가려지는 현상

2. 월식의 종류와 원리

개기월식	달 전체가 지구의 본그림자 안으로 들어가 어두운 붉은색으로 보이는 현상
부분월식	달의 일부가 지구의 본그림자 안으로 들어가 일부만 어둡게 보이는 현상
(6)	달이 지구의 반그림자 안으로 들어가 평소보다 밝기만 조금 감소하는 현상

3. 개기월식 때 달의 표면이 붉게 보이는 까닭 태양 빛이 지구의 대기를 통과할 때, 파장이 짧은 푸른색 빛에 비해 파장이 긴 붉은색 빛은 상대적으로 적게 산란한다. 이후 이 빛은 지구의 대기에서 굴절하여 달의 표면에 도달하며, 달은 이 빛을 반사하여 붉게 보인다.

4 일식과 월식의 진행
▸ 15쪽

1. 달의 공전 방향과 식현상의 진행 과정 북반구에서 일식은 태양의 (7)쪽(오른쪽)부터 가려지기 시작하고, 월식은 달의 (8)쪽(왼쪽)부터 어두워지기 시작한다.

2. 매달 식현상이 일어나지 않는 까닭 달의 공전 궤도면은 지구의 공전 궤도면에 대해 약 5° 기울어져 있어, 달이 삭이나 망일 때 (9) 근처에 위치해야만 식이 일어난다.

정답과 해설 161쪽

02 태양계 행성의 겉보기 운동

1 태양계 모형

▸24쪽

1. **우주관의 변천** 고대의 지구 중심 우주론에서 근대 이후 태양 중심 우주론으로 변화했다.
2. **행성의 관측과 태양계 모형**

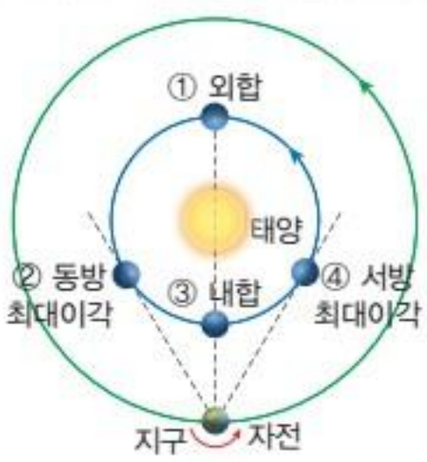
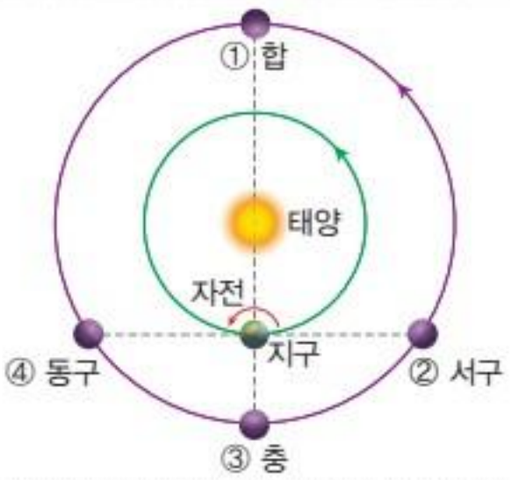
(1) 행성이 보이는 영역과 황도: 행성이 보이는 영역은 황도 부근이다.

(2) 천구상의 천체 이동 방향: 북반구에서 남쪽을 볼 때 태양의 왼쪽이 (10)쪽, 오른쪽이 (11)쪽이며, 천체의 이동 방향도 이 기준을 따른다.

(3) 태양계 모형: 행성의 움직임을 북극 위에서 내려다본 모습으로 나타내며, (12)과 방향을 이용하여 행성의 위치 관계를 표현한다.

2 행성의 위치와 관측

▸25쪽~27쪽

구분	내행성의 관측	외행성의 관측
공전 특성과 겉보기 특징	• 이각: 일정한 범위 안에서 변화 • 겉보기 크기: (13)에 가까울수록 큼. • 위상: 위치에 따라 달처럼 모든 위상	• 이각: 0°~180°까지 다양하게 변화 • 겉보기 크기: (14)에 가까울수록 큼. • 위상: 위치에 따라 반달~보름달 사이 위상
위치 관계의 변화		
지구에서 관측 가능한 시기	• 내합, 외합: 태양과 겹쳐 관측이 어려움. • 동방 최대이각: 초저녁 (15)쪽 하늘에서 가장 길게 관측 • 서방 최대이각: 새벽 (16)쪽 하늘에서 가장 길게 관측	• 합: 태양과 겹쳐 관측이 어려움. • 동구: 초저녁부터 자정까지 약 6시간 관측 • 서구: 자정부터 새벽까지 약 6시간 관측 • 충: 초저녁에서 새벽까지 약 12시간 관측

3 행성의 겉보기 운동

▸28쪽~29쪽

1. **행성의 겉보기 운동** 행성의 실제 운동이 아닌 지구와의 상대적인 위치 변화로 관측되는 운동
2. **겉보기 운동의 유형** 배경별을 기준으로 서쪽에서 동쪽으로 이동하는 (17), 동쪽에서 서쪽으로 이동하는 (18), 순행과 역행이 전환될 때 정지한 것처럼 보이는 유가 있다.
3. **내행성과 외행성의 겉보기 운동**

구분	내행성의 겉보기 운동	외행성의 겉보기 운동
공전 속도와 이각 범위	공전 속도가 지구보다 빠르며, 이각이 최대이각 이상으로 커질 수 없다.	공전 속도가 지구보다 느리며, 이각이 0°에서 180°까지 나타난다.
나타나는 모습	처음에는 순행하다가 (19) 부근에서 내행성이 지구를 추월하여 역행이 나타나며, 전후에 유가 관측된다.	처음에는 순행하다가 (20) 부근에서 지구가 외행성을 추월하여 역행이 나타나며, 전후에 유가 관측된다.

통합 실전 문제

일식의 종류와 원리

01 표는 일식이 일어난 어느 두 날에 태양과 달의 시지름을 비교하여 나타낸 것이다.

날짜	태양의 시지름	달의 시지름
2023년 4월 20일	31′48″	31′36″
2024년 4월 8일	31′36″	33′24″

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

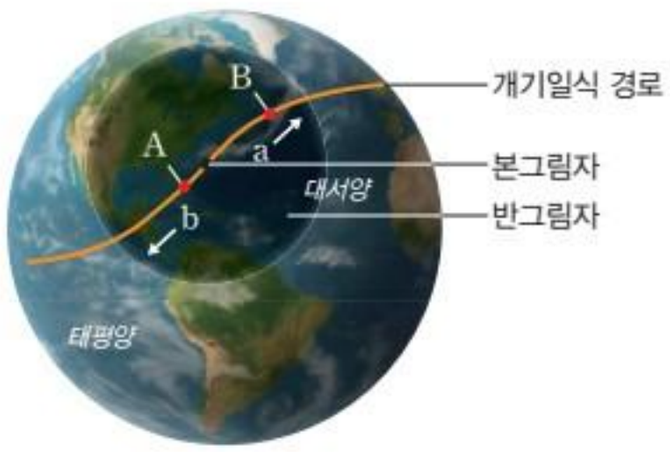
보기

ㄱ. 2023년 4월 20일에는 개기일식이 일어날 수 있다.
ㄴ. 2024년 4월 8일에는 금환일식이 일어날 수 있다.
ㄷ. 혼성일식은 2023년 4월 20일이 2024년 4월 8일보다 일어날 확률이 더 높다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

지구 표면에서 달 그림자의 이동

02 그림은 일식이 진행되는 어느 날 특정 시각에 달 그림자의 위치를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 달 그림자는 a 방향으로 이동한다.
ㄴ. 현재 A 지점에서는 태양의 오른쪽이 가려져 있다.
ㄷ. 현재 태양이 가려진 면적은 A 지점보다 B 지점에서 더 넓다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

월식의 종류와 원리

03 표는 어느 날 북반구에서 관측한 월식의 진행 과정을 시간 순서대로 나타낸 것이다.

시각	월식의 상태
20시 12분	부분월식 시작
21시 17분	개기월식 시작
22시 00분	개기월식 종료
23시 06분	부분월식 종료

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 20시 30분에 달은 지구의 반그림자 안에만 들어가 있다.
ㄴ. 22시 30분에 달은 지구의 본그림자를 빠져나오고 있다.
ㄷ. 이날 달이 지구의 본그림자 안에 완전히 들어가 있던 시간은 약 43분이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

식현상의 진행 과정

04 그림 (가)~(다)는 어느 날 북반구에서 관측한 월식의 진행 과정 중 일부를 순서 없이 나타낸 것이다.



(가) (나) (다)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 월식은 (다) → (가) → (나) 순으로 진행되었다.
ㄴ. 달은 (나) 시기보다 (다) 시기에 지구의 본그림자에 더 많이 들어가 있다.
ㄷ. 이날 남반구에서 이 월식을 관측했다면, 달은 각 시기에 북반구와 같은 모습으로 보인다.

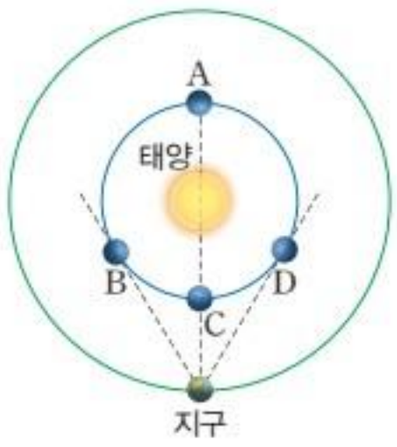
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측

05 그림 (가)는 어느 날 우리나라에서 관측한 달과 금성의 모습을, (나)는 금성과 지구의 상대적인 위치 관계를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

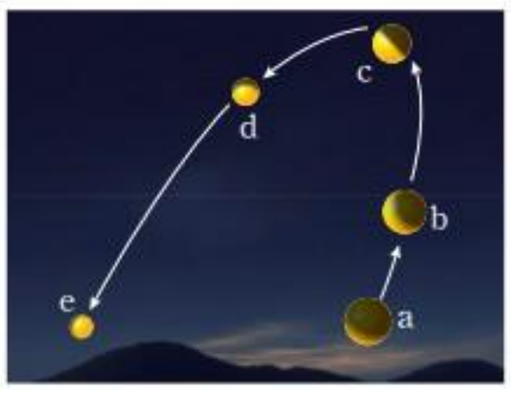
보기

ㄱ. 이날 금성은 A~D 중 D에 있다.
ㄴ. 이날 금성의 위상과 달의 위상은 같다.
ㄷ. 이날 이후 금성의 이각은 점점 작아진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측

06 그림은 우리나라에서 일정한 날짜 간격으로 관측한 금성의 위치와 위상 변화를 나타낸 것이다.



이 기간에 관측한 금성에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

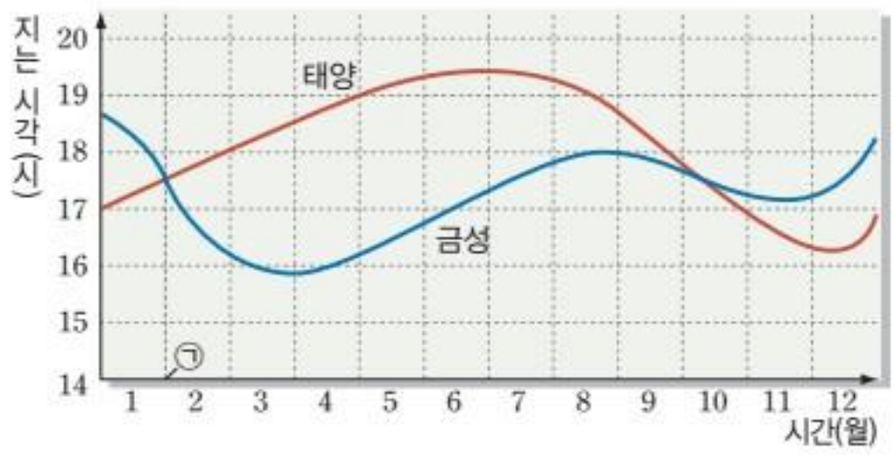
보기

ㄱ. a~c는 새벽에, d~e는 초저녁에 관측된다.
ㄴ. a에서 c로 이동할수록 관측할 수 있는 시간이 길어진다.
ㄷ. d에서 e로 이동할수록 이각은 점점 작아진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측

07 그림은 어느 해 태양과 금성이 지는 시각을 그래프로 나타낸 것이다.



이 기간에 금성의 위치와 관측에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. ㉠ 시기에 금성은 내합에 있다.
ㄴ. 2월에서 9월 사이에 금성은 태양의 서쪽에 있다.
ㄷ. 11월에서 12월까지 금성은 새벽에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

외행성의 관측

08 그림은 어느 날 지구와 화성의 상대적인 위치를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

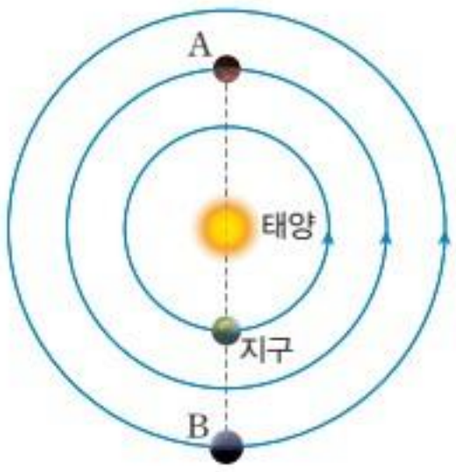
보기

ㄱ. 다음날 화성의 겉보기 크기는 커진다.
ㄴ. 다음날 화성을 관측할 수 있는 시간은 길어진다.
ㄷ. 이날 화성에서 지구를 관측하면, 지구는 화성의 새벽에 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

외행성의 관측

09 그림은 어느 날 지구와 외행성 A, B의 상대적인 위치를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

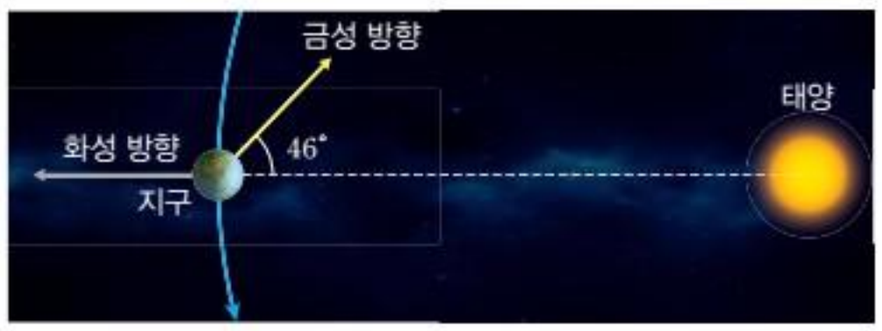
보기

ㄱ. 다음날 A의 이각은 커진다.
ㄴ. 다음날 B의 시지름은 커진다.
ㄷ. 다음날 A와 B는 같은 방향에서 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측 + 외행성의 관측

10 그림은 어느 날 공전 궤도상 지구에서 바라본 금성과 화성의 방향을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 금성은 이날 새벽에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다.
ㄴ. 화성은 이날 지구로부터의 거리가 가장 가깝다.
ㄷ. 화성은 이날 초저녁에 동쪽 하늘에서 관측할 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측 + 외행성의 관측

11 그림은 어느 날 우리나라에서 달, 금성, 목성이 함께 보이는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?(단, 이날 세 천체는 황도 근처에 있다.)

보기

ㄱ. 서쪽 하늘을 관측한 모습이다.
ㄴ. 목성은 이날 합과 동구 사이에 있다.
ㄷ. 금성은 다음날 겉보기 크기가 더 커진다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측 + 외행성의 관측

12 표는 어느 해 9월에서 10월 사이에 일어난 천체 현상의 일부를 나타낸 것이다.

날짜	천체 현상
9월 3일	수성(내합)
9월 20일	수성(최대이각)
9월 21일	목성(충)
10월 17일	수성(외합)
10월 29일	금성(내합)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

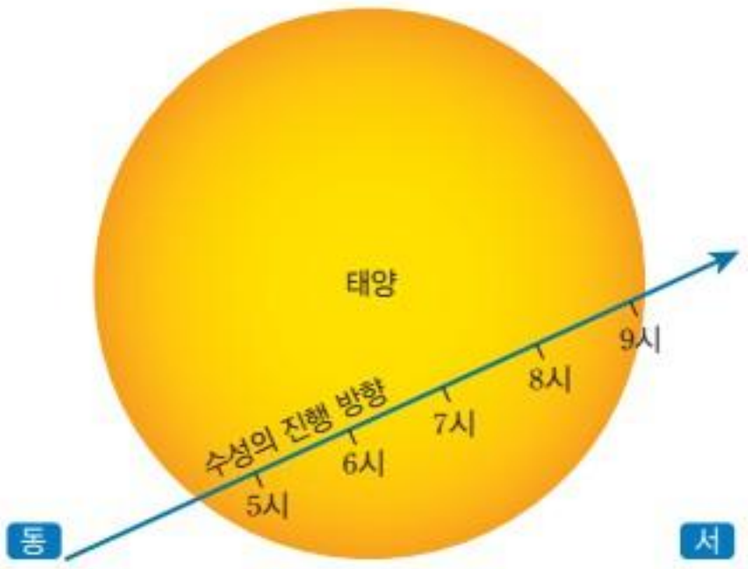
보기

ㄱ. 9월 20일 수성은 상현달 모양으로 관측된다.
ㄴ. 9월 21일 이후 목성의 겉보기 크기는 점점 작아진다.
ㄷ. 10월 20일 수성과 금성은 서쪽 하늘에서 관측된다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 관측 + 내행성의 겉보기 운동

13 그림은 어느 날 수성이 태양 앞면을 통과하는 경로를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

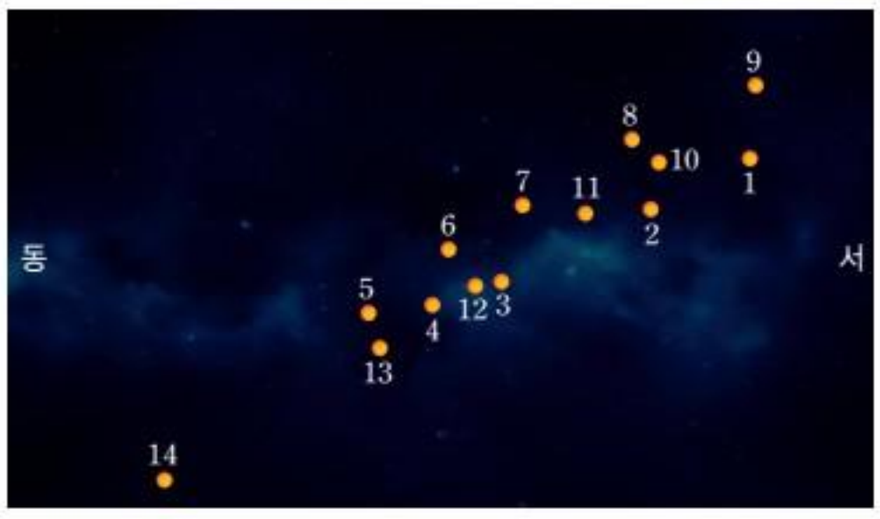
보기

ㄱ. 이날 수성은 역행하고 있다.
ㄴ. 수성의 겉보기 크기는 이날 가장 작다.
ㄷ. 수성은 이날 이후 일정 기간 점점 뜨는 시각이 빨라진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

외행성의 관측 + 외행성의 겉보기 운동

14 그림은 일정 기간 관측한 화성의 겉보기 운동을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

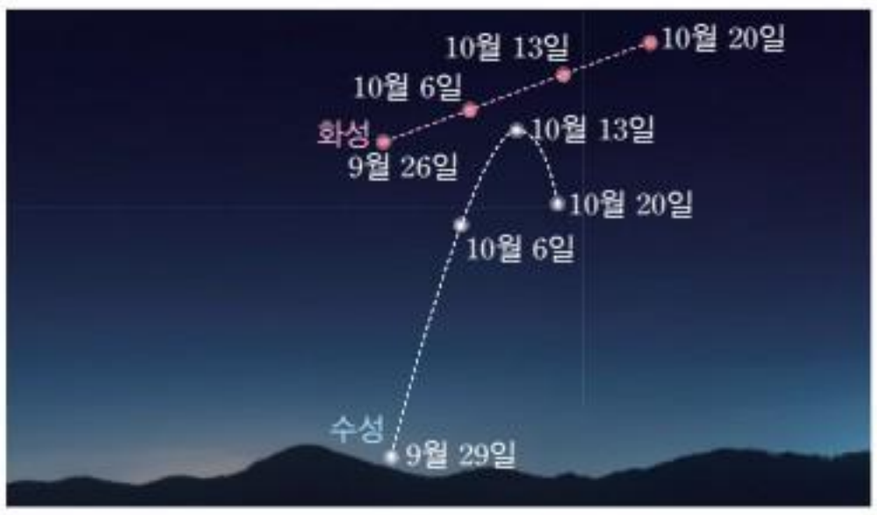
보기

ㄱ. 화성이 5 부근에 있을 때, 지구에서 가장 멀리 떨어져 있다.
ㄴ. 화성이 7 부근에 있을 때, 지구에서 관측한 겉보기 크기가 최대가 된다.
ㄷ. 화성의 이각은 9에서 14 사이에 점점 증가한다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

내행성의 겉보기 운동 + 외행성의 겉보기 운동

15 그림은 어느 해 우리나라에서 해 뜨기 직전에 관측한 수성과 화성의 위치를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?(단, 이 기간에 두 행성은 황도 근처에 있다.)

보기

ㄱ. 9월 29일에서 10월 13일까지 수성을 관측할 수 있는 시간은 점점 길어진다.
ㄴ. 10월 13일에 수성은 하현달 모양이다.
ㄷ. 10월 6일에서 10월 13일 사이에 화성은 충을 지난다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

HIGH TOP 최상위 문제

1 그림 (가)는 어느 날 개기월식이 진행되는 동안 우리나라에서 관측한 달의 위치를 나타낸 것이고, (나)는 이날 관측한 월식의 모습 중 하나이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

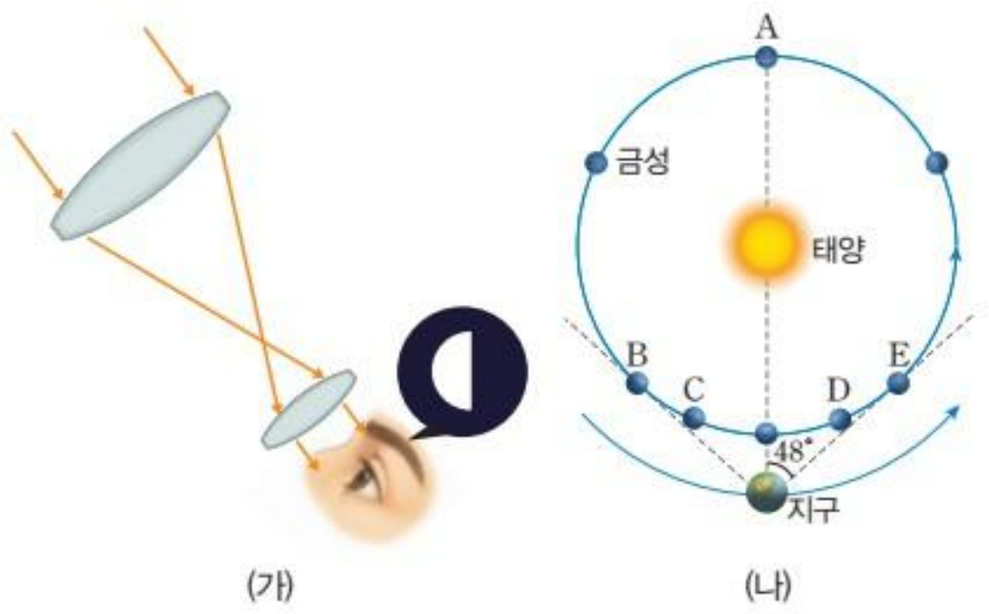
ㄱ. 이날 부분월식은 초저녁에 시작됐다.
ㄴ. A와 B 시기 사이에 달은 공전 궤도에서 더 서쪽으로 이동한다.
ㄷ. (나)는 (가)의 B 시기 이후에 관측한 모습이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

달은 동쪽 하늘에서 떠올라 남쪽 하늘로 이동하면서 점점 고도가 높아진다.

2 그림 (가)는 어느 날 케플러식 천체 망원경을 이용하여 금성을 관측한 모습을, (나)는 금성의 위치 관계를 나타낸 것이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 이날 금성은 B에 위치한다.
ㄴ. 다음날 금성의 이각은 더 작아진다.
ㄷ. 다음날 금성의 모습은 초승달에 가까워진다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

케플러식 천체 망원경을 이용하여 천체를 관측하면, 천체의 상하좌우가 바뀐 모양으로 관측된다.

정답과 해설 164쪽

3 다음은 어느 해 일어난 천문 현상의 일부를 나타낸 것이다.

날짜	행성	천문 현상
1월 22일	수성	동방 최대이각
2월 24일	토성	충
3월 3일	수성	서방 최대이각
6월 9일	금성	외합

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 1월 22일에서 3월 3일 사이에 수성의 이각은 계속 커진다.
ㄴ. 밤하늘에서 2월 24일 토성의 이동 방향과 6월 9일 금성의 이동 방향은 같다.
ㄷ. 6월 15일에 금성은 초저녁에 관측된다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

수성과 금성은 지구보다 공전 속도가 빠르며, 토성은 지구보다 공전 속도가 느리다.

4 그림은 우리나라에서 어느 해 5월에서 11월까지 관측한 행성 A와 B의 겉보기 운동 방향을 기록한 것이다. A와 B는 각각 내행성과 외행성 중 하나이다.



이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. A는 내행성, B는 외행성이다.
ㄴ. A는 8월에 공전 궤도상에서 지구를 추월한다.
ㄷ. B는 9월에서 11월까지 겉보기 크기가 점점 작아진다.

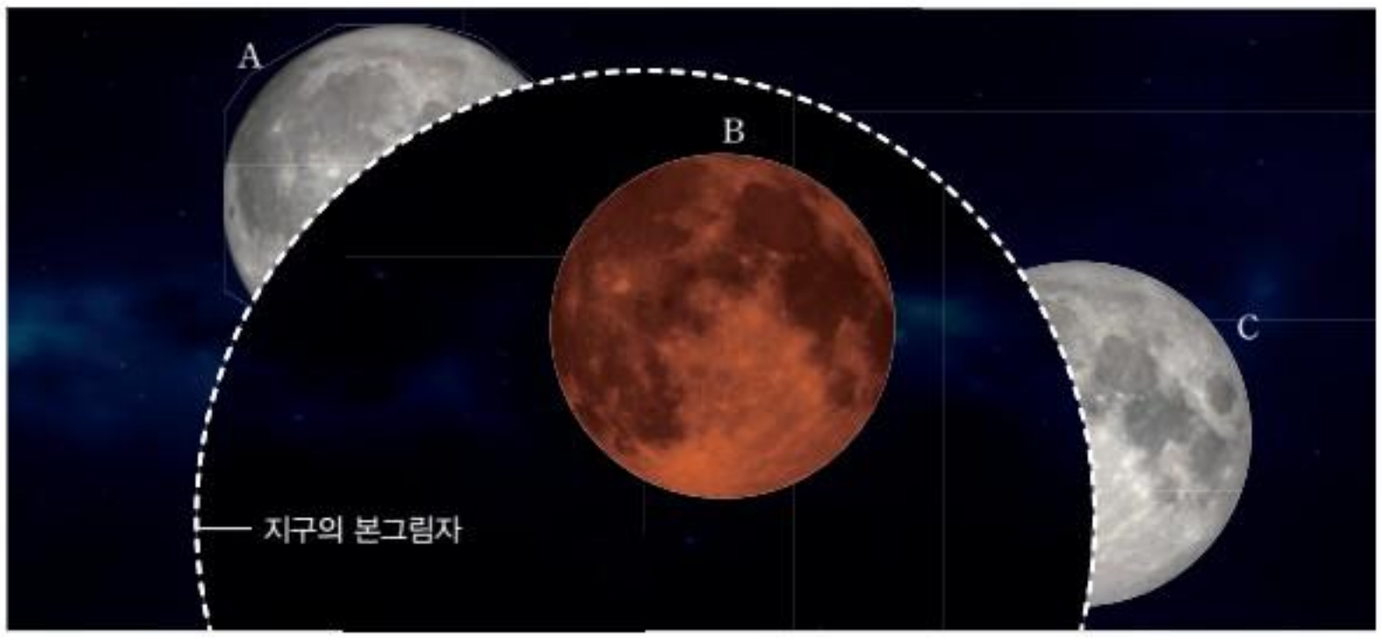
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

안쪽 궤도를 공전하는 행성이 바깥쪽 궤도를 공전하는 행성을 추월할 때 역행이 관측된다.

사고력 확장 문제

1 그림은 어느 날 우리나라에서 관측된 개기월식의 진행 과정을 나타낸 것이다.



(1) 이 월식은 어느 순서대로 진행됐는지 달의 공전 방향을 중심으로 서술하시오.

(2) 개기월식 때 지구에서는 붉은 달의 모습을 관측할 수 있다. 이러한 현상이 일어나는 까닭을 지구 대기와 빛의 성질을 중심으로 서술하시오.

KeyWord
(1) • 달의 공전 방향
(2) • 빛의 산란과 굴절

Solution Tip
태양 빛 중 파장이 긴 붉은색 빛은 지구의 대기에서 상대적으로 산란이 적게 일어난다.

2 다음은 조선시대 화가 신윤복의 작품 『월하정인』과 이 그림에 적혀 있는 시의 내용을 나타낸 것이다.



월침침야삼경(月沈沈夜三更)
달이 기운 깊은 밤 삼경에

양인심사양인지(兩人心事兩人知)
두 사람의 마음은 둘만이 알겠지.

※ 삼경(三更): 23시~다음날 01시

시의 내용을 토대로 그림 속의 달이 월식 때 관측되었다고 추정할 수 있는 근거를 서술하시오.

KeyWord
• 삼경(23시~01시)
• 상현달
• 남중

Solution Tip
상현달은 해가 질 무렵 남쪽 하늘에 있고, 자정 무렵에 서쪽으로 진다. 한편, 월식은 보름달일 때 달이 지구의 그림자 안으로 들어가 일어난다.

정답과 해설 165쪽

3 표는 어느 해 일정 기간 수성과 금성의 천문 현상 일부를 나타낸 것이고, 그림은 이 기간 중 어느 날 우리나라에서 관측한 모습을 나타낸 것이다.

날짜	행성	천문 현상
1월 18일	수성	외합
2월 17일	수성	동방 최대이각
3월 4일	수성	내합
3월 29일	금성	외합
4월 1일	수성	서방 최대이각
5월 12일	수성	외합
6월 13일	수성	동방 최대이각

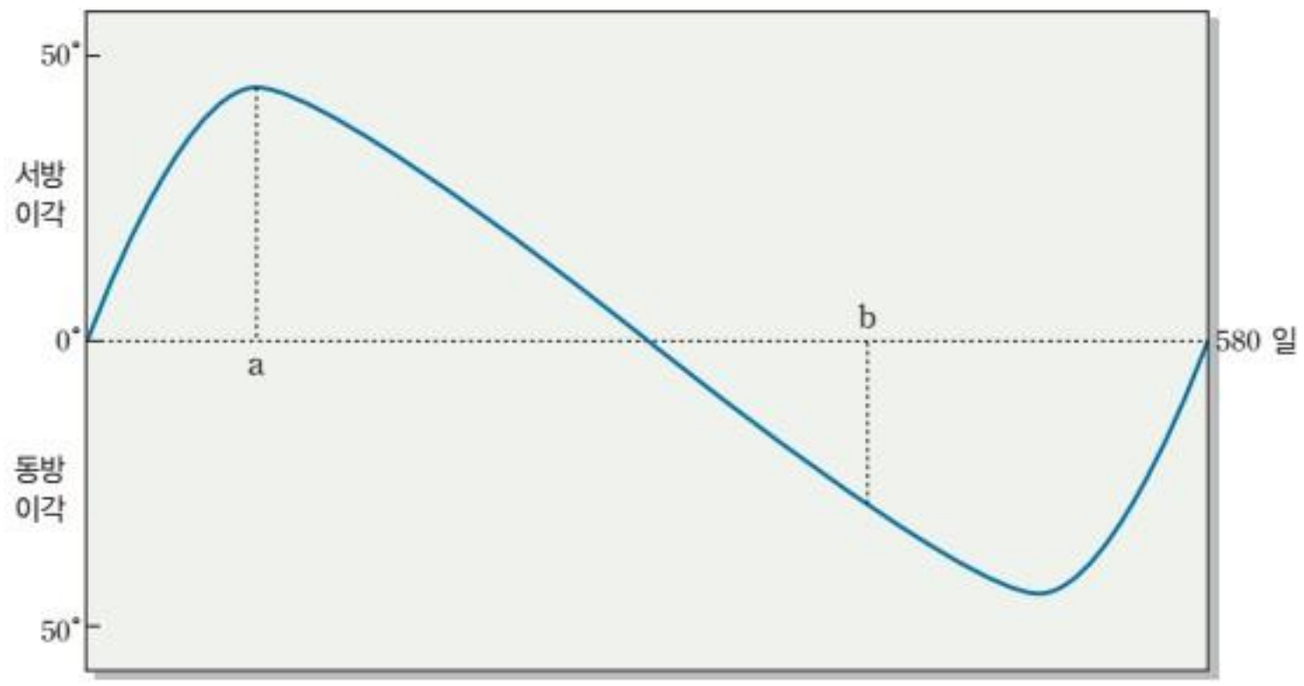


표의 날짜 중 그림과 같은 모습을 관측할 수 있는 날을 추정하고, 그 까닭을 수성과 금성의 공전 위치 변화를 중심으로 서술하시오.

KeyWord
• 내행성의 위치 관계 변화

Solution Tip
수성과 금성은 모두 내행성이며, 행성의 이각이 크면 태양으로부터 멀리 떨어져 보인다.

4 그림은 어느 행성의 이각을 지구에서 관측하여 그래프로 나타낸 것이다.



(1) 이 행성이 내행성과 외행성 중 무엇인지 판단하고, 그 까닭을 이각의 변화를 중심으로 서술하시오.

(2) a와 b 시기에 행성의 겉보기 크기를 지구와 행성 사이의 거리와 관련지어 비교하시오.

KeyWord
(1) • 이각의 범위
(2) • 최대이각
• 외합

Solution Tip
내행성의 겉보기 크기는 내합에 가까울수록 크고, 외행성의 겉보기 크기는 충에 가까울수록 크다.

5 다음은 어느 해 우리나라에서 일어난 천문 현상에 대한 설명이다.

- 6월 30일 해가 진 직후 서쪽 하늘에서 금성과 목성이 각거리 약 0.25°까지 근접했다.
- 10월 26일 해가 뜨기 전 금성과 목성은 다시 각거리 약 1°까지 근접했다.

(1) 6월 30일과 10월 26일 금성과 목성이 공전 궤도에서 어디에 위치하는지 서술하시오.

(2) 6월 30일과 10월 26일 사이에 금성은 내합, 목성은 합을 통과했다고 추정할 수 있다. 그 까닭을 각 행성의 위치 관계 변화를 중심으로 서술하시오.

KeyWord

(1) • 초저녁
• 서쪽 하늘
• 새벽
• 동쪽 하늘
(2) • 내행성
• 외행성
• 시계 반대 방향
• 시계 방향

Solution Tip

내행성은 지구보다 공전 속도가 빠르고, 외행성은 지구보다 공전 속도가 느리다.

6 그림은 어느 날 우리나라에서 관측한 하늘의 모습을 나타낸 것이다.



(1) 이 그림이 하루 중 어느 시각에, 어떤 방향을 관측한 모습인지 추정하고, 그 까닭을 서술하시오.

(2) 금성의 위상은 어떤 모양인지 추정하고, 그 까닭을 공전 위치를 바탕으로 서술하시오.

(3) 화성은 공전 궤도에서 어디에 위치하는지 추정하고, 그 까닭을 서술하시오.

KeyWord

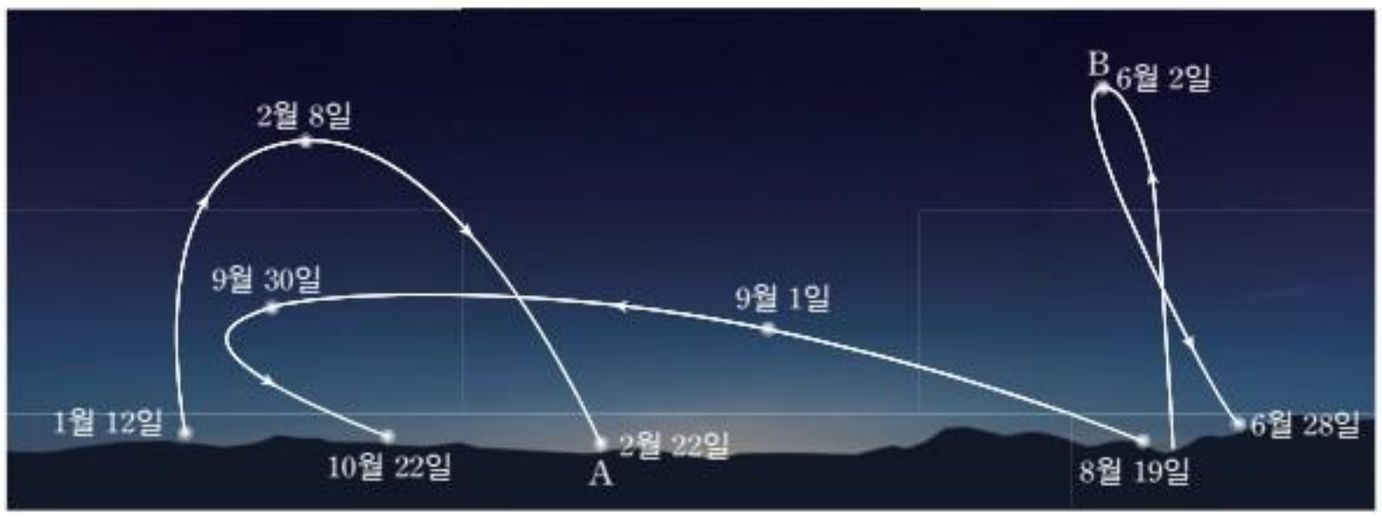
(1) 초승달
(2) 공전 궤도, 동쪽
(3) 합, 동구

Solution Tip

초승달은 해가 진 직후 서쪽 하늘에서 보인다. 해가 진 직후 서쪽 하늘에서 관측되는 외행성은 합과 동구 사이에 위치한다. 내행성이 동방 이각에 있으면, 태양보다 동쪽에 있어 초저녁 서쪽 하늘에서 보인다.

정답과 해설 165쪽

7 그림은 어느 해 우리나라에서 해가 진 직후에 관측된 수성의 겉보기 운동을 나타낸 것이다.



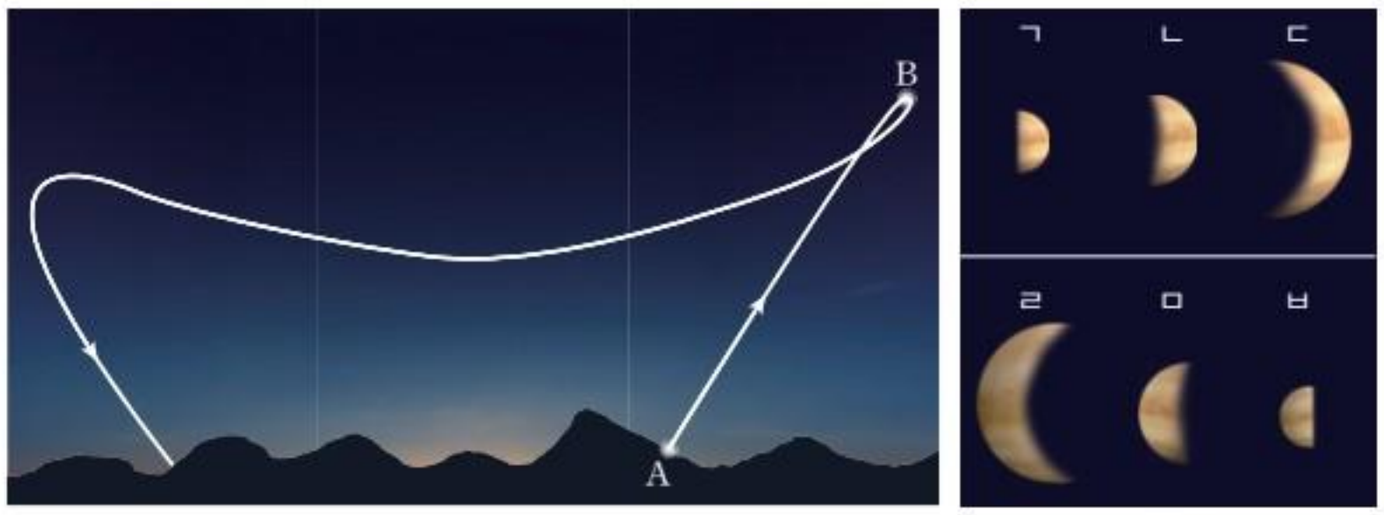
(1) A와 B 지점에서 수성과 지구와의 상대적인 위치를 각각 판단하고, 그 근거를 서술하시오.

(2) 2월 22일경 수성은 배경별에 대해 어느 방향으로 이동하고 있는지 판단하고, 그 까닭을 수성과 지구의 상대적인 운동을 중심으로 서술하시오.

KeyWord
(1) • 내합
• 최대이각
(2) • 내합
• 역행

Solution Tip
내행성은 내합에 있을 때 태양과 거의 같은 방향에 있어 관측하기 어려우며, 최대이각에 있을 때 태양으로부터 가장 멀리 떨어져 있다.

8 그림 (가)는 어느 해 일정 기간 우리나라에서 매일 해뜨기 직전 관측한 금성의 겉보기 운동을, (나)는 금성의 위상 변화를 나타낸 것이다.



(가) (나)

(1) (가)에서 금성이 A에서 B 지점까지 이동하는 동안 금성과 지구와의 상대적인 위치와 그 까닭을 서술하시오.

(2) (가)에서 금성이 A에서 B 지점까지 이동하는 동안 금성의 위상 변화를 (나)에서 골라 순서대로 나열하고, 그 까닭을 서술하시오.

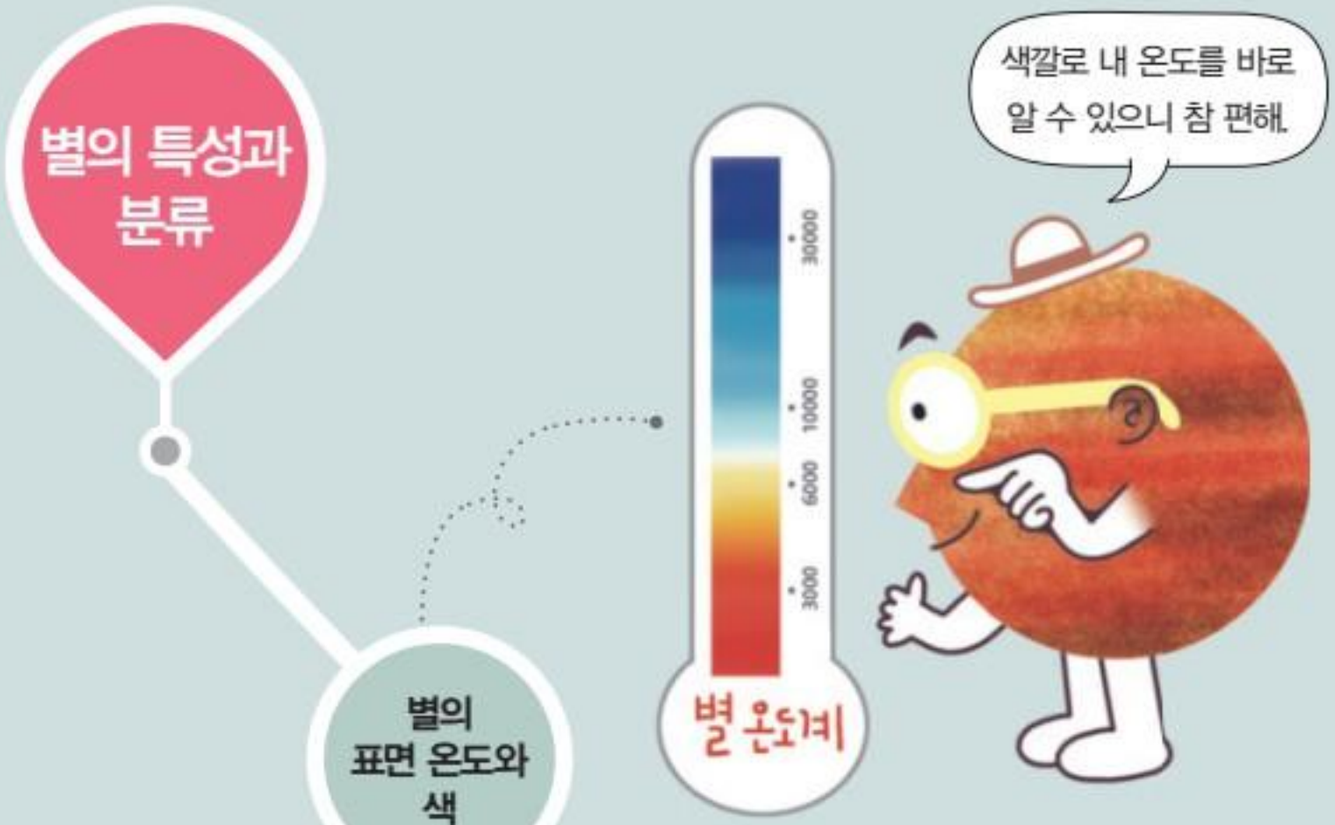
KeyWord
(1) • 내합
• 최대이각
(2) • 하현달
• 그믐달

Solution Tip
내행성은 내합 부근에서 서방 최대이각으로 이동하며 점점 그믐달 모양에서 하현달 모양으로 변한다.

단원 Preview

이 단원에서 배우는 핵심 개념으로 단원 내용을 미리 살펴봅시다.









- 별의 특성과 분류
  - 별의 표면 온도와 색
  - 별의 분광형
  - 별의 광도와 크기
  - H-R도와 별의 종류

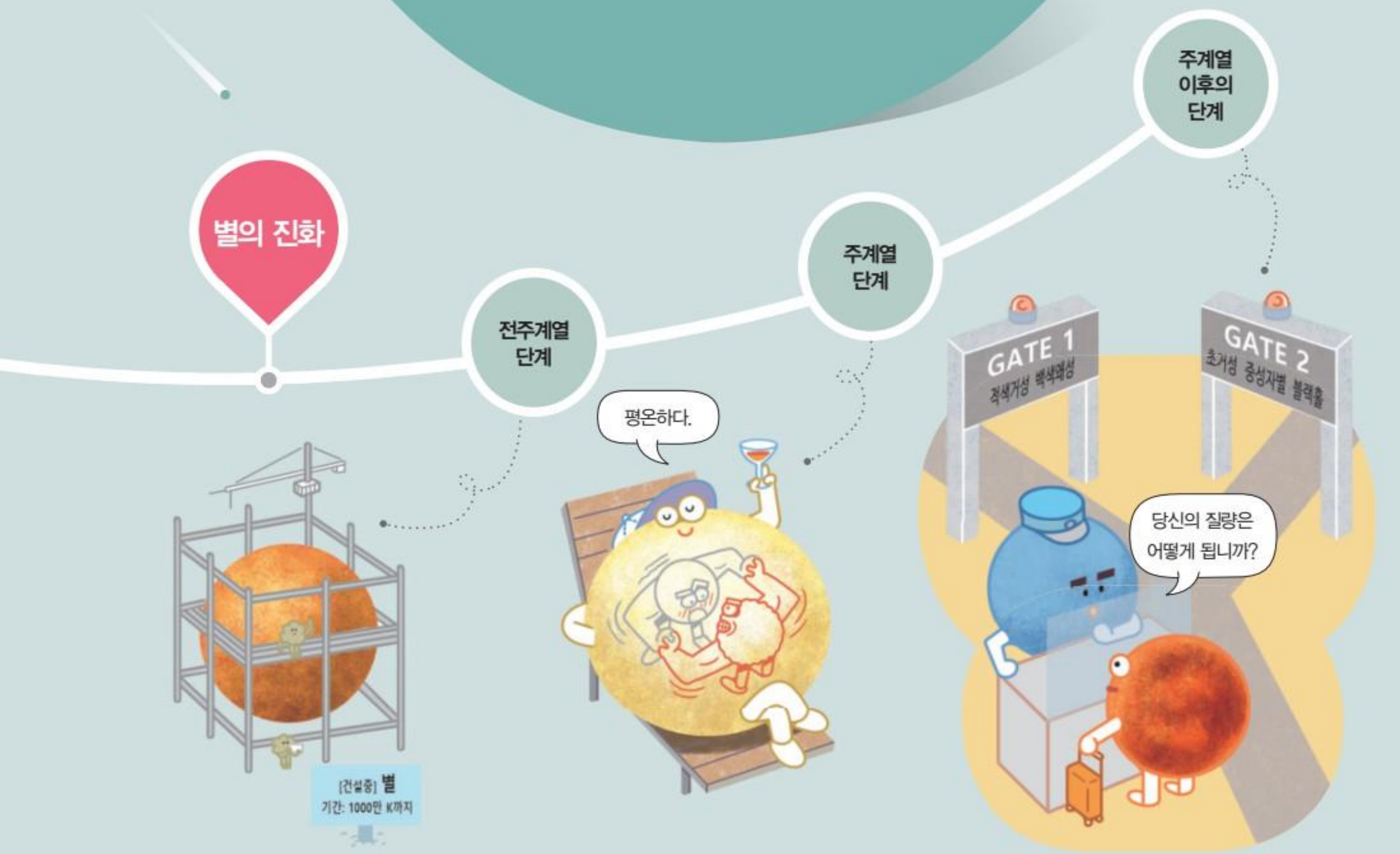
2

별의 특성과 진화

별은 여러 가지 특성을 가지며, 그에 따라 분류할 수 있다.
또한, 별은 질량에 따라 여러 가지 경로로 진화한다.

01 별의 특성과 분류

02 별의 진화



01 별의 특성과 분류

핵심 내용 미리보기

"별의 **물리적 특성**을 이용하여 **H-R도**를 작성할 수 있으며, 별을 크게 **네 종류**로 나눌 수 있다."

1 별의 표면 온도와 색

별마다 색이 서로 다른 까닭은 별의 표면 온도가 다르기 때문이다. 그리고 별의 색과 표면 온도의 관계는 별이 흑체의 성질을 가지고 있다는 것으로 설명할 수 있다.

1. 흑체

입사하는 복사 에너지를 모두 흡수하고, 흡수한 에너지를 모두 복사의 형태로 방출하는 가상의 물체이다.

(1) **흑체 복사:** 흑체 복사는 연속적인 스펙트럼으로 나타나며, 물체의 표면 온도에 따라 방출되는 복사 에너지의 파장별 세기가 달라진다.

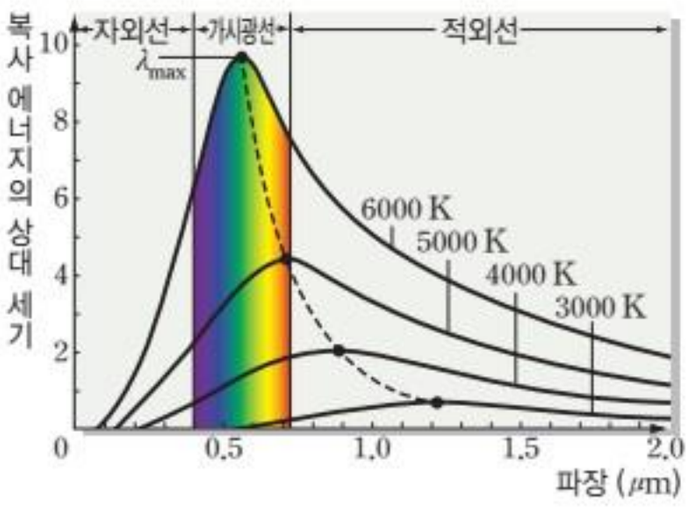
(2) **흑체와 별:** 별은 흑체와 매우 유사한 성질을 가지고 있다. 따라서 별을 연구할 때는 별이 흑체라고 가정하고 별의 물리량을 추론한다.

흑체라는 이름의 유래

흑체는 영어의 '검다(Black)'라는 단어에서 유래하였으나, 실제로는 전자기파를 방출하기 때문에 완전히 검은 것은 아니다.

2. 흑체 복사 법칙

(1) **플랑크 법칙:** 표면 온도가 T인 흑체가 방출하는 모든 파장 λ에 대한 복사 에너지 분포를 설명하는 법칙으로, 복사 에너지의 세기는 표면 온도에 의해서만 결정된다. 표면 온도가 높을수록, 모든 파장대에서 방출하는 복사 에너지의 양이 증가한다. 이러한 변화는 플랑크 곡선으로 나타낼 수 있다.



▲ **플랑크 곡선** 흑체가 방출하는 복사 에너지의 파장에 따른 에너지 세기 분포를 나타낸 곡선이다.

플랑크 법칙의 수식 표현

흑체가 단위넓이, 단위시간, 단위파장, 단위입체각에서 방출하는 에너지(B)는 다음과 같다.

$$B(\lambda, T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

- λ: 파장
- T: 흑체의 온도
- h: 플랑크 상수
- c: 빛의 속도
- k: 볼츠만 상수

(2) **슈테판·볼츠만 법칙:** 흑체가 단위시간 동안 단위넓이에서 방출하는 복사 에너지의 총량(E)은 표면 온도(T)의 네제곱에 비례한다.

$$E=\sigma T^4 (\sigma\text{: 슈테판 · 볼츠만 상수} = 5.670\times10^{-8}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}})$$

플랑크 곡선과 슈테판·볼츠만 법칙의 관계

슈테판·볼츠만 법칙의 복사 에너지 총량(E)은 플랑크 곡선 아래의 넓이(전체 파장에 대한 적분값)와 같다.

(3) **빈의 변위 법칙:** 흑체의 표면 온도가 높을수록 최대 복사 에너지를 방출하는 파장(λ_{max})은 짧아진다.

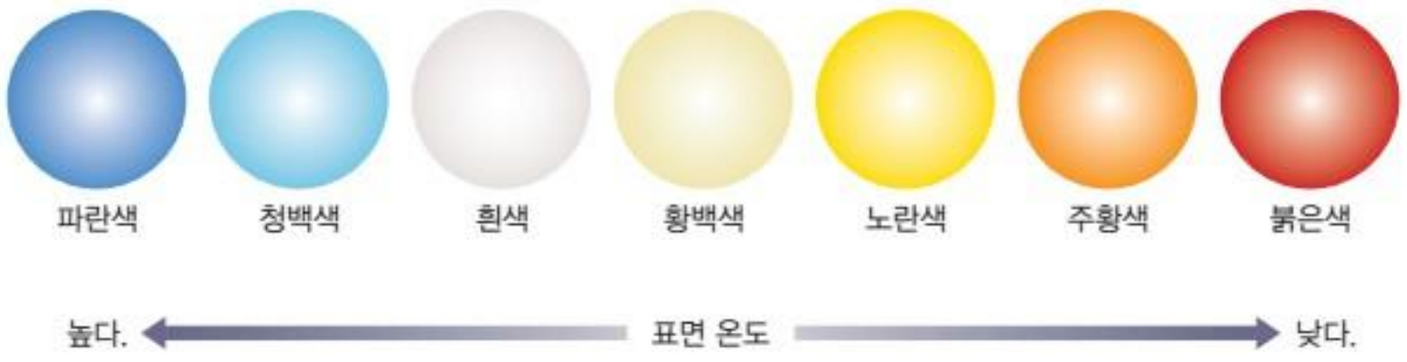
$$\lambda_{max}=\frac{a}{T}(a=2.898\times10^3\ \mu\mathrm{m\cdot K})$$

플랑크 곡선과 빈의 변위 법칙의 관계

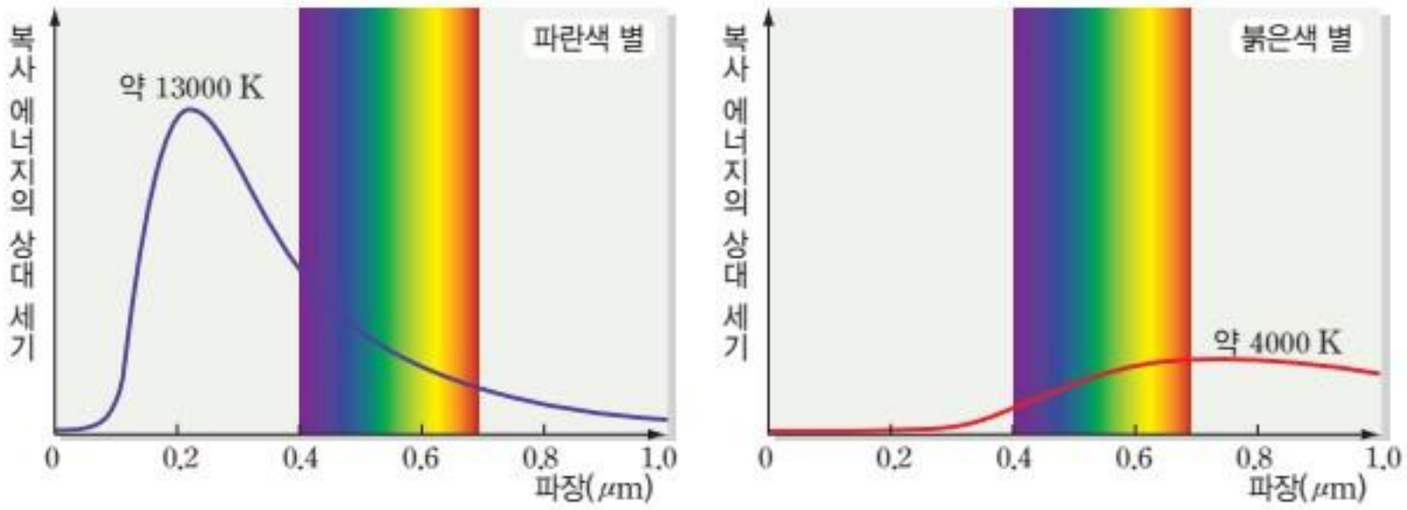
플랑크 곡선의 최댓값이 나타나는 파장에 대한 수식이 빈의 변위 법칙이다.

3. 별의 표면 온도와 색

빈의 변위 법칙에 따르면 별의 표면 온도가 높을수록 짧은 파장의 복사 에너지를 더 많이 방출하여 파란색을 띠고, 표면 온도가 낮을수록 긴 파장의 복사 에너지를 더 많이 방출하여 붉은색을 띤다.



▲ **별의 표면 온도와 색**

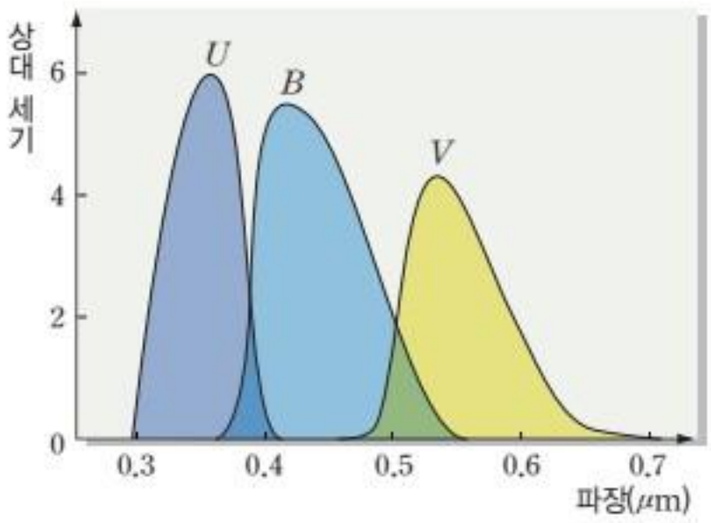


▲ **파란색 별과 붉은색 별의 파장에 따른 에너지의 세기** 표면 온도가 높을수록 최대 에너지를 방출하는 파장이 짧아져 파란색 빛이 우세하여 파란색을 띤다.

표면 온도가 높은 별과 낮은 별의 예
표면 온도가 약 12000 K인 리겔과 약 9900 K인 시리우스는 각각 청색과 청백색으로 보인다. 반면, 표면 온도가 약 3400 K인 베텔게우스와 약 3500 K인 안타레스는 모두 붉은색 계열로 보인다.

심화 색지수

색지수는 별의 색을 정량적으로 나타내는 척도로, 맨눈으로 본 밝기인 안시 등급(m_V)과 사진으로 측정한 사진 등급(m_P)의 차이인 ($m_P - m_V$)를 사용한다. 우리 눈은 파장 약 $0.54\ \mu\text{m}$ 부근의 노란색 빛에 민감하지만, 사진 건판은 파장 약 $0.42\ \mu\text{m}$ 부근의 파란색 빛에 더 민감하다. 따라서 안시 등급과 사진 등급은 서로 다르게 나타난다. 한편, 더 정확한 측정을 위해 U(자외선, 파장 $0.36\ \mu\text{m}$ 부근), B(파란색, 파장 $0.42\ \mu\text{m}$ 부근), V(노란색, 파장 $0.54\ \mu\text{m}$ 부근) 필터를 사용한 등급의 차인 ($U-B$) 색지수와 ($B-V$) 색지수가 사용되기도 하는데, ($U-B$) 색지수보다 ($B-V$) 색지수가 더 널리 활용된다.



▲ U, B, V **필터의 측정 파장**

($U-B$) 색지수보다 ($B-V$) 색지수가 더 널리 활용되는 까닭
자외선 영역은 지구 대기의 오존층에서 흡수되기 때문에 관측 조건에 따라 관측 결과의 변화가 심하다. 반면, 가시광선 영역은 대기 투과율이 높아 관측 결과가 안정적이다. 따라서 ($B-V$) 색지수가 더 널리 활용된다.

색지수의 크기
색지수는 표면 온도가 높은 별일수록 (−)값, 낮은 별일수록 (+)값이 된다.

중요 개념 체크

정답과 해설 168쪽

1. 플랑크 곡선에서 복사 에너지가 최대가 되는 파장은 흑체의 (　　)에 의해 결정된다.
2. 별의 표면 온도가 높을수록 (긴, 짧은) 파장의 복사 에너지를 더 많이 방출하여 (붉은, 파란)색을 띤다.

2 별의 분광형

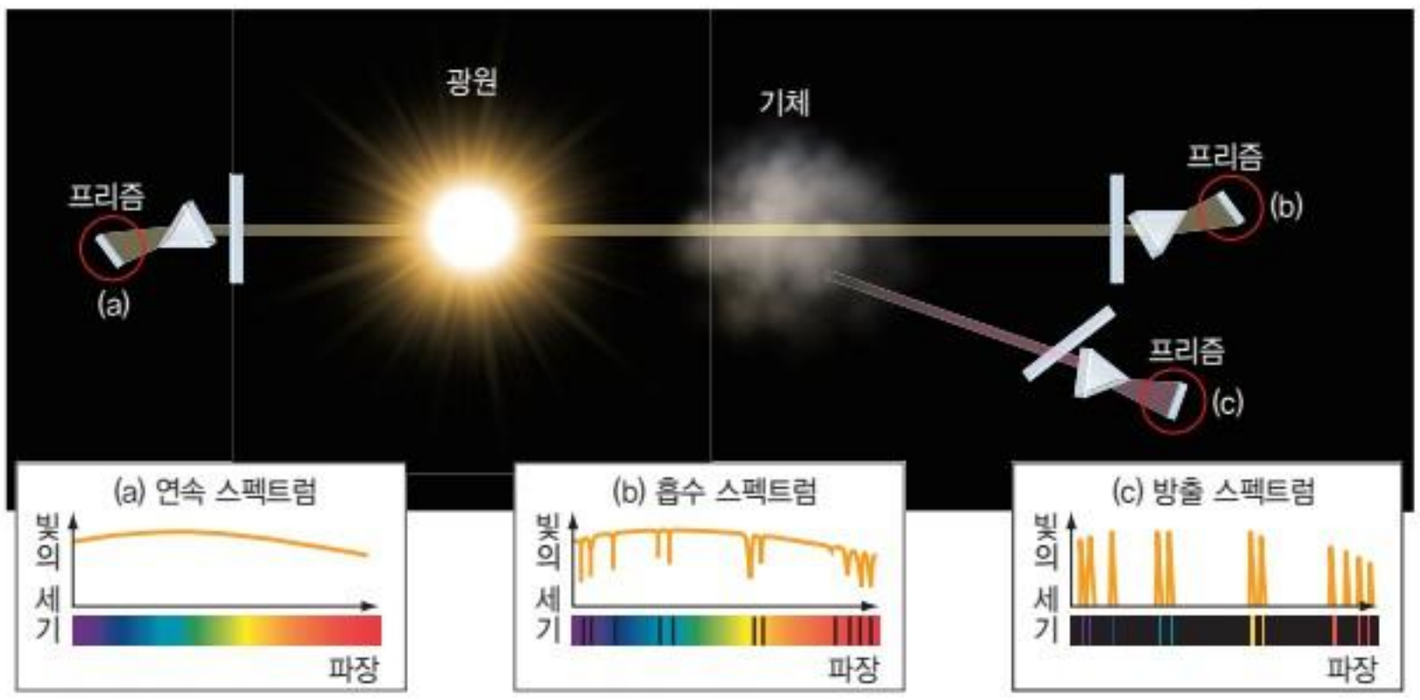
분광기를 통과한 빛은 파장에 따라 나뉘어 여러 색의 띠를 형성하며, 이를 스펙트럼이라고 한다. 별빛의 스펙트럼을 분석하면 분광형을 비롯한 별의 여러 가지 특성을 알 수 있다.

1. *스펙트럼의 종류

(1) **연속 스펙트럼:** 모든 파장에 걸쳐 연속적으로 나타나는 스펙트럼으로, 고온·고밀도의 광원에서 방출된 빛에서 나타난다.

(2) **방출 스펙트럼:** 특정 파장 영역에서만 밝은 방출선이 나타나는 스펙트럼으로, 고온의 기체에서 에너지 준위가 높은 전자가 특정 파장의 빛을 방출하여 나타난다.

(3) **흡수 스펙트럼:** 특정 파장 영역에서만 어두운 흡수선이 나타나는 스펙트럼으로, 빛이 저온의 기체를 통과할 때 특정 파장의 빛이 기체에 흡수되어 나타난다.



▲ 스펙트럼의 종류

2. 별빛의 스펙트럼 분석

(1) **흡수선 생성:** 별 내부에서 방출된 연속 스펙트럼의 빛은 별의 대기를 통과하면서, 특정 파장의 빛이 대기 중 물질에 흡수되어 흡수선이 나타난다. 흡수선의 세기가 강하다는 것은 그 파장의 빛이 별의 대기에서 많이 흡수되었음을 의미한다.

(2) **태양의 스펙트럼과 프라운호퍼선:** 프라운호퍼는 태양을 관찰하여 약 500개 이상의 검은 선을 관찰하였다. 이후 이 검은 선들은 태양을 구성하는 원소에 의한 것임이 밝혀졌고, 발견자의 이름을 따서 프라운호퍼선이라고 이름 붙여졌다.

3. 별의 분광형과 표면 온도

(1) **분광형(스펙트럼형):** 별의 표면 온도에 따라 스펙트럼에 나타나는 흡수선의 종류와 세기를 기준으로 별을 분류한 것이다.

(2) **하버드 분광 분류법:** 20세기 초 미국 하버드 천문대의 피커링과 캐넌에 의해 개발되었다. 초기에는 수소 흡수선의 종류와 세기를 기준으로 A~P형까지 알파벳 순서로 분류하였으나, 이후 캐넌이 H, He I, He Ⅱ, Ca Ⅱ 등의 흡수선을 기준으로 O, B, A, F, G, K, M형의 7개로 재구성하였다.

분광 관측
분광 관측은 분광 장치를 이용하여 별빛의 스펙트럼을 관측하고 분석하는 것이다. 분광 관측은 별의 표면 온도, 크기, 구성 원소 등을 분석하는 데 유용하다.

스펙트럼의 유래
17세기 뉴턴은 프리즘을 통과한 햇빛이 여러 색으로 나뉘는 현상을 관찰하고, 이를 스펙트럼이라 이름 붙였다.

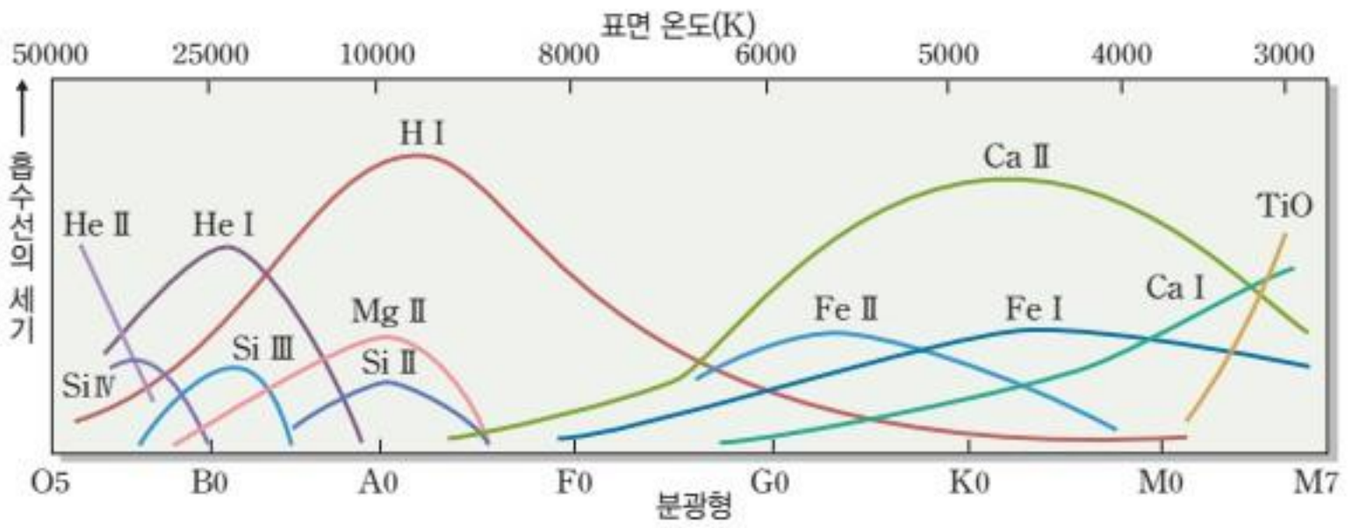
흡수선과 별의 물리량
별의 스펙트럼을 분석하면 흡수선의 위치와 세기를 통해 별의 대기 구성 성분, 표면 온도, 이온화 정도, 들뜸 상태 등의 정보를 파악할 수 있다. 단, 흡수선의 세기는 원소의 양 이외에도 온도, 이온화 상태, 들뜬 원자 비율 등 여러 요인의 영향을 받기 때문에, 흡수선이 강하다고 해서 반드시 해당 원소의 양이 많은 것은 아니다.

용어 리마인드

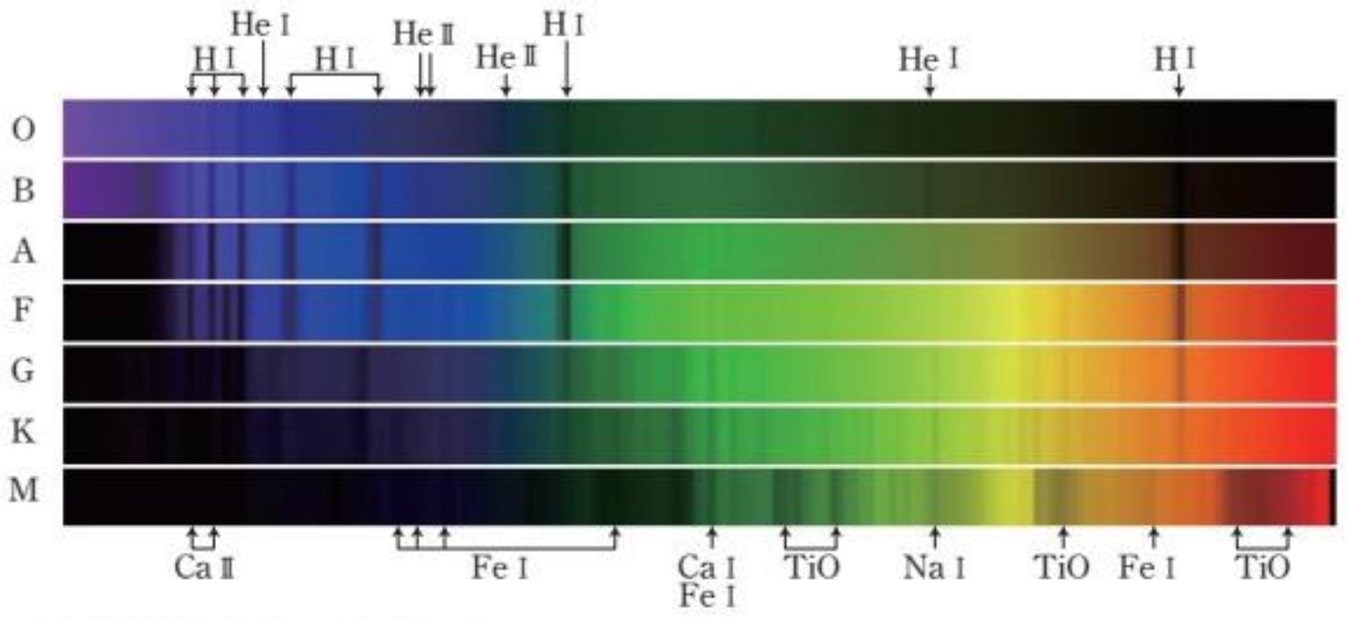
***스펙트럼** [통합과학1]
분광기로 빛을 분해하면 나타나는 여러 가지 색의 띠

(3) **분광형과 표면 온도의 관계:** 별의 분광형은 표면 온도에 따라 O>B>A>F>G>K>M의 순서를 따르며, 각 분광형은 다시 고온인 0부터 저온인 9까지 10등급으로 세분화된다.

분석 + 별의 분광형에 따른 흡수선의 종류 및 세기



▲ 별의 분광형에 따른 흡수선의 종류 및 세기



▲ 별의 분광형에 따른 스펙트럼 모습

분광형	색	표면 온도	흡수선 특징
O	파란색	>30000	He Ⅱ 흡수선이 나타나며, He Ⅰ 흡수선이 강해진다.
B	청백색	10000~30000	B형 별에서 He Ⅰ의 흡수선이 나타난다. H Ⅰ 흡수선이 강하게 나타나며, A형에서 가장 뚜렷하다.
A	흰색	7500~10000	
F	황백색	6000~7500	금속 원소의 중성선(Fe Ⅰ)과 이온선(Fe Ⅱ, Ca Ⅱ)이 강하게 나타난다.
G	노란색	5000~6000	
K	주황색	3500~5000	Ca Ⅱ 흡수선과 분자 흡수선이 나타나며, M형 별에서는 TiO의 흡수선이 뚜렷하다.
M	붉은색	<3500	

중요 개념 체크

정답과 해설 168쪽

1. 별의 분광형에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 분광형은 흡수선의 종류와 세기로 구분하며, 표면 온도와 관련이 있다. — (　　)

(2) O형에서 M형으로 갈수록 별의 색은 붉어지고, 표면 온도는 높아진다. — (　　)

태양의 분광형

태양의 경우 표면 온도가 약 5800 K이므로, 분광형은 G2형이다.

기타 분광형

O−B−A−F−G−K−M−L−T
　　S
　　C

O형~M형까지의 분광형 이외에도 C형과 S형은 표면의 화학 조성에 따라 분류된 온도가 낮은 적색거성을 의미한다. 한편, L형과 T형은 별로 진화하지 못한 저온의 천체인 갈색왜성을 의미한다.

흡수선과 표면 온도

별의 스펙트럼은 주로 별의 대기 온도에 의해 결정되며, 온도에 따라 스펙트럼에 영향을 주는 원소와 이온화 상태가 달라진다. 고온의 기체에서는 이온의 흡수선, 중간 온도에서는 중성 원자의 흡수선, 저온에서는 분자 흡수선이 강하게 나타난다.

이온화 상태 표시

흡수선을 나타낼 때 사용하는 로마 숫자 Ⅰ은 중성 상태를 뜻하고, Ⅱ는 1가로 이온화된 상태를 뜻하며, Ⅲ은 2가로 이온화된 상태를 뜻한다. 예를 들어, He Ⅰ은 중성 헬륨(He)을 나타내고, H Ⅱ는 이온화된 수소(H^+)를 나타내며, Si Ⅲ은 Si^{2+}를 나타낸다.

태양의 스펙트럼

태양은 분광형이 G2형이므로, 이온화된 칼슘(Ca Ⅱ) 흡수선이 가장 강하게 나타난다.

3 별의 광도와 크기

별의 표면 온도와 광도를 알면 별의 크기를 구할 수 있다. 별의 표면 온도는 별빛의 스펙트럼 관측으로 알 수 있고, 별의 광도는 절대 등급으로 알 수 있다.

1. 별의 밝기

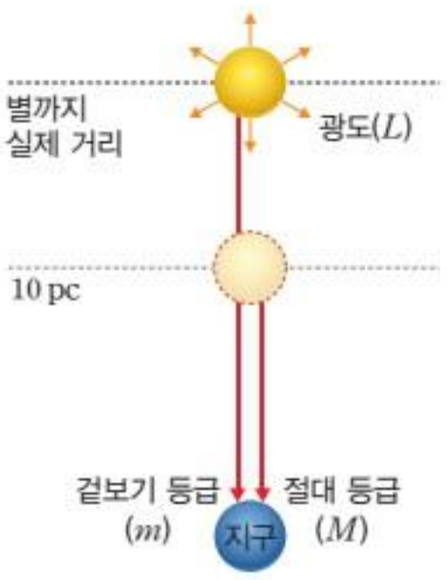
심화 강의 63쪽

밝기는 별의 중요한 물리적 특성 중 하나로 *겉보기 등급, *절대 등급, 광도로 표현할 수 있다.

(1) **겉보기 등급(m):** 지구에서 관측한 별의 상대적인 밝기를 등급으로 나타낸 것으로, 별까지의 거리와 대기 조건에 따라 달라진다.

(2) **절대 등급(M):** 별이 10 pc(약 32.6 광년) 떨어진 위치에 있다고 가정했을 때의 겉보기 등급으로, 별의 고유 밝기를 나타낸다.

(3) **광도(L):** 별이 단위시간 동안 방출하는 총 에너지량으로, 별까지의 거리와는 무관한 별의 실제 밝기이다.



▲ 별의 밝기

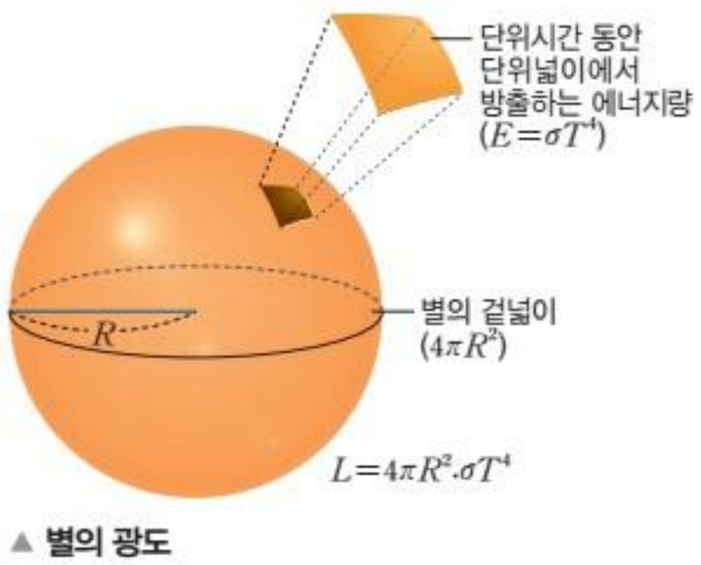
별의 색, 표면 온도, 광도, 반지름의 관계
별의 색은 표면 온도에 따라 달라지며, 이는 빈의 변위 법칙으로 설명할 수 있다. 별의 광도는 표면 온도와 겉넓이에 따라 결정되며, 슈테판·볼츠만 법칙으로 수식화된다. 광도를 알고 있고, 표면 온도를 분광형으로 알 수 있다면, 별의 크기(반지름)도 추론할 수 있다. 따라서 별의 색, 표면 온도, 광도, 반지름은 모두 밀접한 관계가 있으며, 이들 특성을 통해 별의 상태를 종합적으로 이해할 수 있다.

2. 별의 광도

심화 강의 63쪽

별의 광도 L은 별이 단위시간 동안 단위넓이에서 방출한 에너지(σT^4)에 겉넓이($4\pi R^2$)를 곱한 값이다. 따라서 별의 광도는 반지름이 클수록, 표면 온도가 높을수록 커진다.

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$$



▲ 별의 광도

3. 별의 크기

별의 광도 L과 별의 표면 온도 T를 알면 별의 반지름 R을 구할 수 있다.

$$L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4 \Rightarrow R = \frac{1}{2T^2}\sqrt{\frac{L}{\pi\sigma}}$$

태양을 제외한 별은 지구로부터의 거리가 너무 멀어 크기를 직접적인 방법으로 측정하기 어렵다. 따라서 상대적으로 측정하기 쉬운 별의 광도와 표면 온도를 구한 뒤, 이를 이용하여 별의 크기를 추정할 수 있다.

중요 개념 체크

정답과 해설 168쪽

1. 별의 반지름이 (크고, 작고) 표면 온도가 (높을수록, 낮을수록) 별의 광도는 증가한다.
2. 별의 광도가 같을 때 표면 온도가 (높을수록, 낮을수록) 별의 크기는 크다.

용어 리마인드

*겉보기 등급 [중학교 과학]
지구에서 보이는 천체의 밝기를 비교하여 등급으로 나타낸 것

*절대 등급 [중학교 과학]
별이 10 pc 거리에 있다고 가정할 때의 밝기를 나타낸 등급

4 H−R도와 별의 종류

별의 분광형과 절대 등급은 별의 대표적인 물리량이다. 따라서 두 물리량을 축으로 하는 H-R도를 작성하면 별들을 특성이 비슷한 종류로 구분할 수 있으며, 이들의 다양한 물리적 특성(표면 온도, 광도, 반지름 등)을 쉽게 파악할 수 있다.

1. H−R도

별의 절대 등급(또는 광도)과 분광형(또는 표면 온도) 사이의 관계를 2차원으로 나타낸 그래프로, 헤르츠스프룽과 러셀이 각각 독립적으로 제작하였다. 이후 두 사람의 이름을 따 헤르츠스프룽−러셀도(H−R도)라 부르게 되었다.

(1) **헤르츠스프룽의 연구:** 헤르츠스프룽은 플레이아데스성단과 히아데스성단의 별들을 관측하여 별의 겉보기 밝기와 색깔의 관계를 분석하였다. 별들이 도표에서 특정 위치에 뭉쳐 분포하는 것을 통해 주계열성의 존재를 확인하였다.

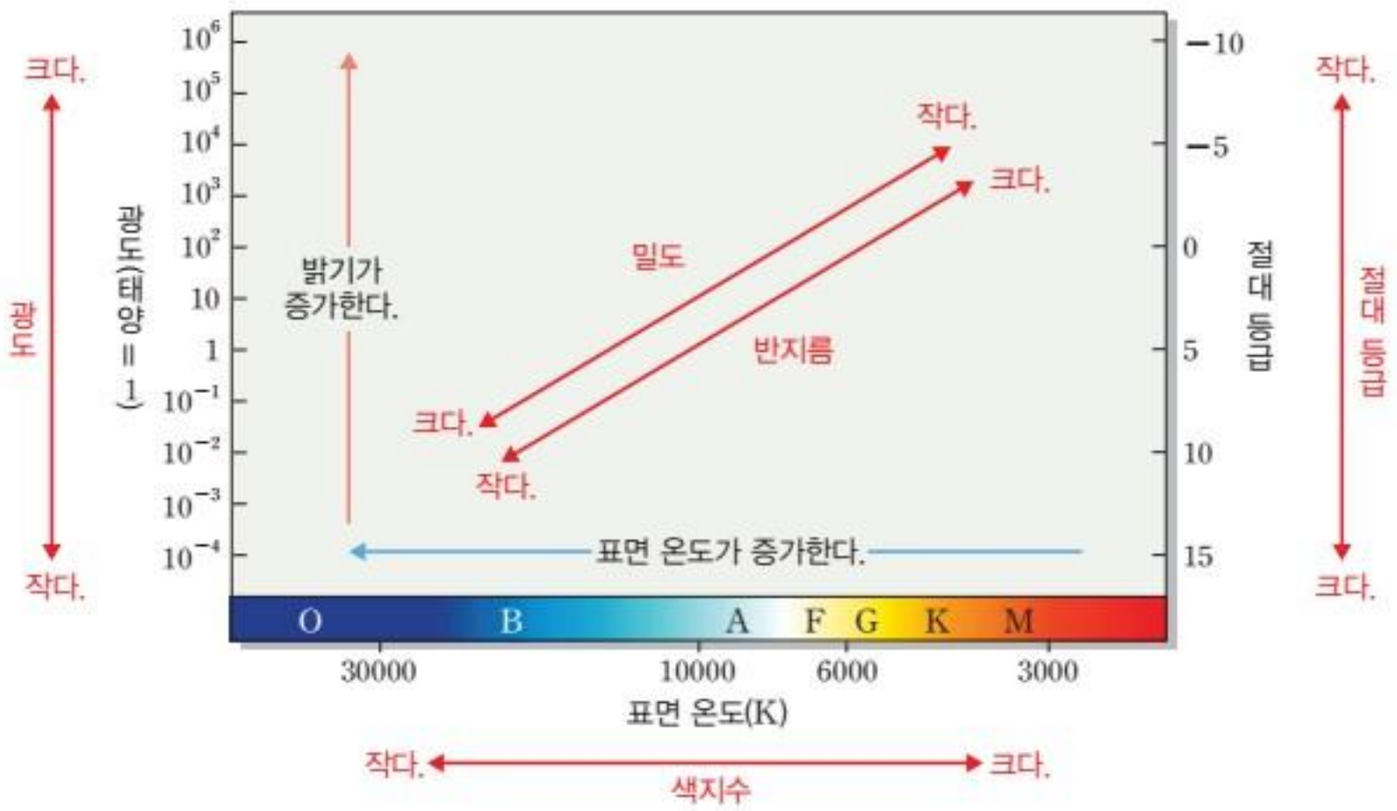
(2) **러셀의 연구:** 러셀은 연주시차로 측정한 별들의 거리와 분광형 자료를 이용하여 절대 등급을 계산하고, 이를 바탕으로 별들을 도표로 나타냈다. 이 도표에서 별의 분광형과 절대 등급 사이에 일정한 관계가 있다는 사실을 확인하였다.

헤르츠스프룽(Hertzsprung, E., 1873~1967)
덴마크의 천문학자로, 별의 색, 절대 등급, 고유 운동, 시차, 변광성, 쌍성, 성단 등 여러 분야를 연구하였다. 특히 세페이드 변광성을 이용하여 마젤란은하까지의 거리를 결정하고, 별의 등급과 표면 온도 및 분광형과의 관계를 나타내는 H−R도를 작성하는 등 중요한 공헌을 하였다.

러셀(Russell, H. N., 1877~1957)
미국의 천문학자로, 1913년에 별의 분광형과 절대 등급 사이에 일정한 관계가 있음을 도표로 나타내었다. 또한 이 도표를 통하여 항성의 진화 단계를 추정하고, 천체 물리학의 기초를 마련하였다.

2. H−R도의 특징

H−R도의 가로축은 별의 표면 온도 또는 분광형이나 색지수로 나타내며, 왼쪽으로 갈수록 표면 온도가 증가한다. H−R도의 세로축은 별의 광도 또는 절대 등급으로 나타내며, 위로 갈수록 광도가 커지고 절대 등급은 작아진다.



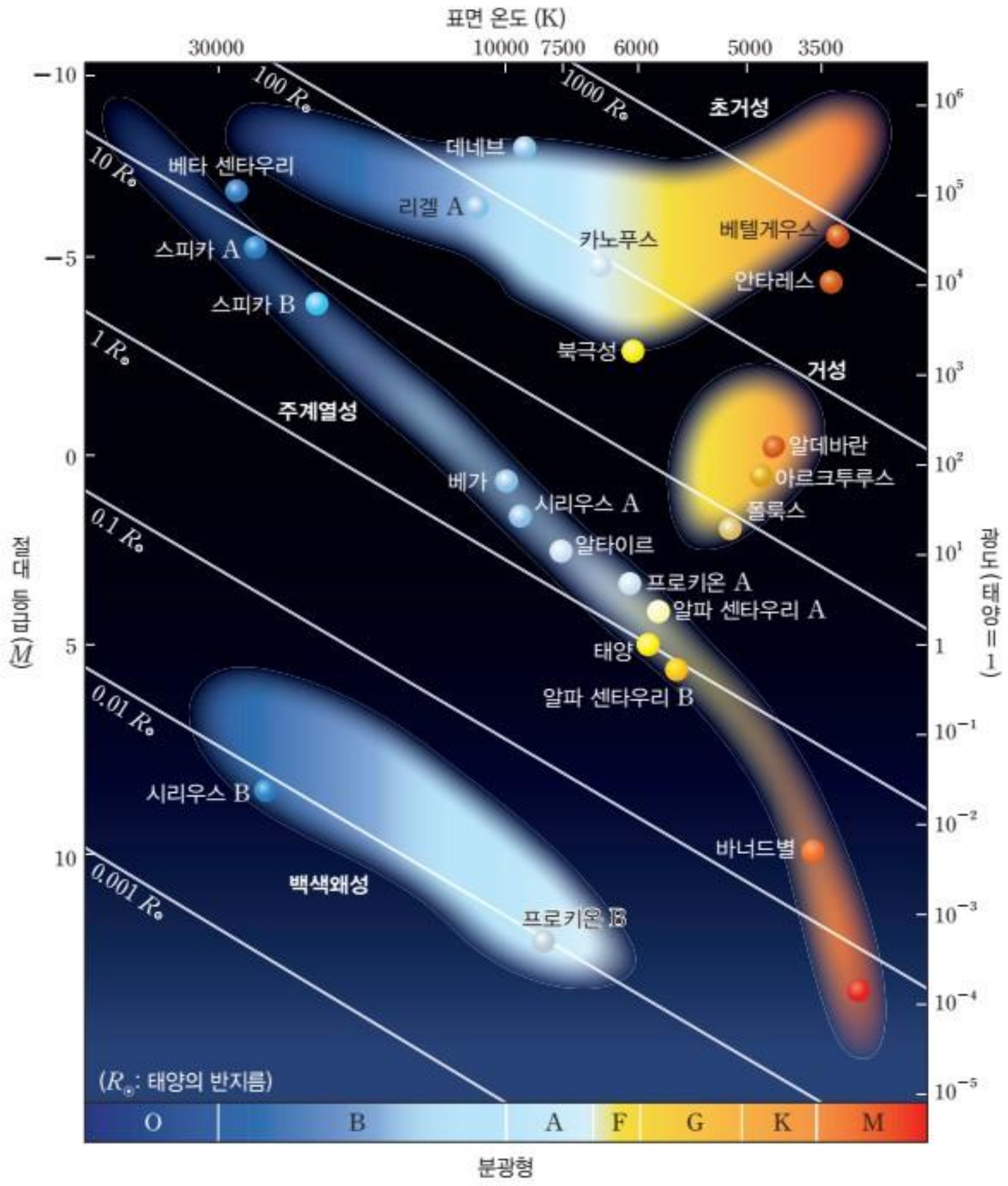
▲ H−R도의 물리량

(1) **H−R도의 해석:** 별들은 H−R도의 특정 영역에서 집단을 이루며 분포하고, 왼쪽 아래에서 오른쪽 위로 갈수록 반지름은 커지고 밀도는 작아진다.

(2) **H−R도의 활용:** H−R도를 이용하여 분광형이 알려진 별의 절대 등급을 추정할 수 있고, 겉보기 등급을 관측하여 별까지의 거리를 구할 수 있다. 또한, 별의 물리적 성질뿐만 아니라 별의 진화 등을 연구하는 데도 중요한 역할을 한다.

3. H−R도에서 별의 분포와 종류

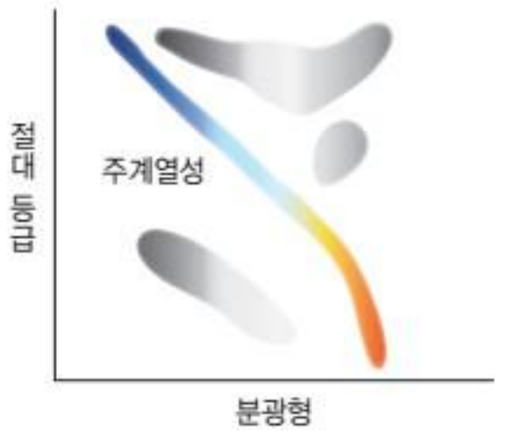
탐구 분석 62쪽



H−R도와 별의 진화

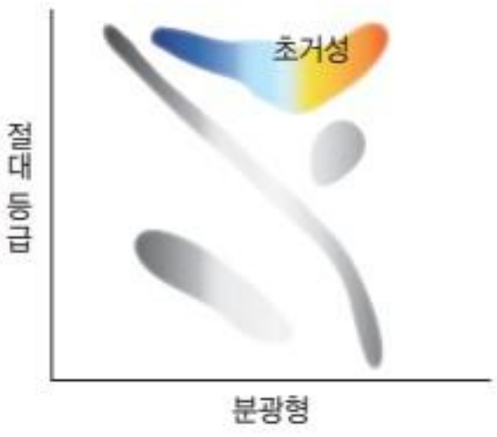
하버드 분광 분류에 따르면 O형 별은 M형 별보다 일반적으로 더 밝고 뜨거운 경향이 있으며, 관측 결과 O형 별이 M형 별보다 무겁다는 사실도 밝혀졌다. 이로부터 별이 고온, 고광도의 O형으로 시작해 점차 M형으로 진화한다고 생각되기도 하였다. 하지만, 현대 천문학에 따르면 별은 탄생할 때의 질량에 따라 분광형과 일생이 결정된다. 즉, O형에서 M형까지 순차적으로 진화하는 것이 아니다.

주계열성	H−R도에서 왼쪽 위부터 오른쪽 아래로 이어지는 대각선 띠에 분포하며, 별 전체의 약 80 %~90 %가 주계열성에 해당한다. 주계열성은 중심핵에서 수소 핵융합 반응으로 에너지를 생성하며, 별은 일생의 대부분을 주계열성으로 보낸다. 일반적으로 질량이 클수록 반지름, 표면 온도, 광도가 커 H−R도의 왼쪽 위에 분포한다. 대표적인 주계열성에는 태양, 시리우스 A, 스피카, 베가 등이 있다.
거성	H−R도에서 주계열의 오른쪽 위에 분포하며, 중심핵의 수소를 모두 소진한 뒤 수소 껍질의 연소가 일어나면서 바깥층이 팽창한 별이다. 이로 인해 반지름은 태양의 수십 배, 광도는 태양의 수백~수천 배이다. 하지만, 표면 온도가 낮아 붉은색으로 보이며, 밀도가 작다. 대표적인 거성에는 아르크투루스, 알데바란, 폴룩스 등이 있다.



주계열성으로서의 태양

태양은 다른 별들에 비해 지구와 매우 가까워서, 태양을 매우 밝고 질량이 큰 별이라고 생각하기 쉽다. 하지만, 실제로 표면 온도와 광도는 상대적으로 다른 별들에 비해 크지 않다. 태양의 표면 온도는 약 5800 K이고, 겉보기 등급은 −26.7, 절대 등급은 4.8이다.

초거성	H−R도에서 가장 위쪽에 분포하며, 질량이 매우 큰 별의 진화 과정에서 나타난다. 반지름은 태양의 수백~수천 배, 광도는 태양의 수만~수십만 배로, 거성보다 더 밝고 크기가 크지만 밀도는 작다. 표면 온도는 다양하게 분포하는데, 고온의 초거성은 상대적으로 작고 파란색이며, 저온의 초거성은 상대적으로 매우 크고 붉은색이다. 대표적인 초거성에는 베텔게우스, 안타레스, 리겔 A, 데네브 등이 있다.	
백색왜성	H−R도에서 주계열의 왼쪽 아래에 분포하며, 핵융합 반응을 모두 마친 뒤 남은 중심핵이 식으며 빛을 내는 상태의 별이다. 반지름은 지구 정도로 작지만, 질량은 태양과 비슷하여 밀도가 매우 크다. 표면 온도는 높지만, 반지름이 작아 광도는 작다. 분광형은 주로 B형~A형에 분포하며, 스펙트럼의 흡수선이 넓게 나타난다. 대표적인 백색왜성에는 시리우스 B, 프로키온 B 등이 있다.	

별의 반지름과 평균 밀도 비교

거성과 초거성은 질량에 비해 반지름이 매우 커서 평균 밀도가 작으며, 백색왜성은 질량에 비해 반지름이 매우 작아서 평균 밀도가 크다.

- 평균 반지름: 백색왜성 < 주계열성 < 거성 < 초거성
- 평균 밀도: 백색왜성 > 주계열성 > 거성 > 초거성

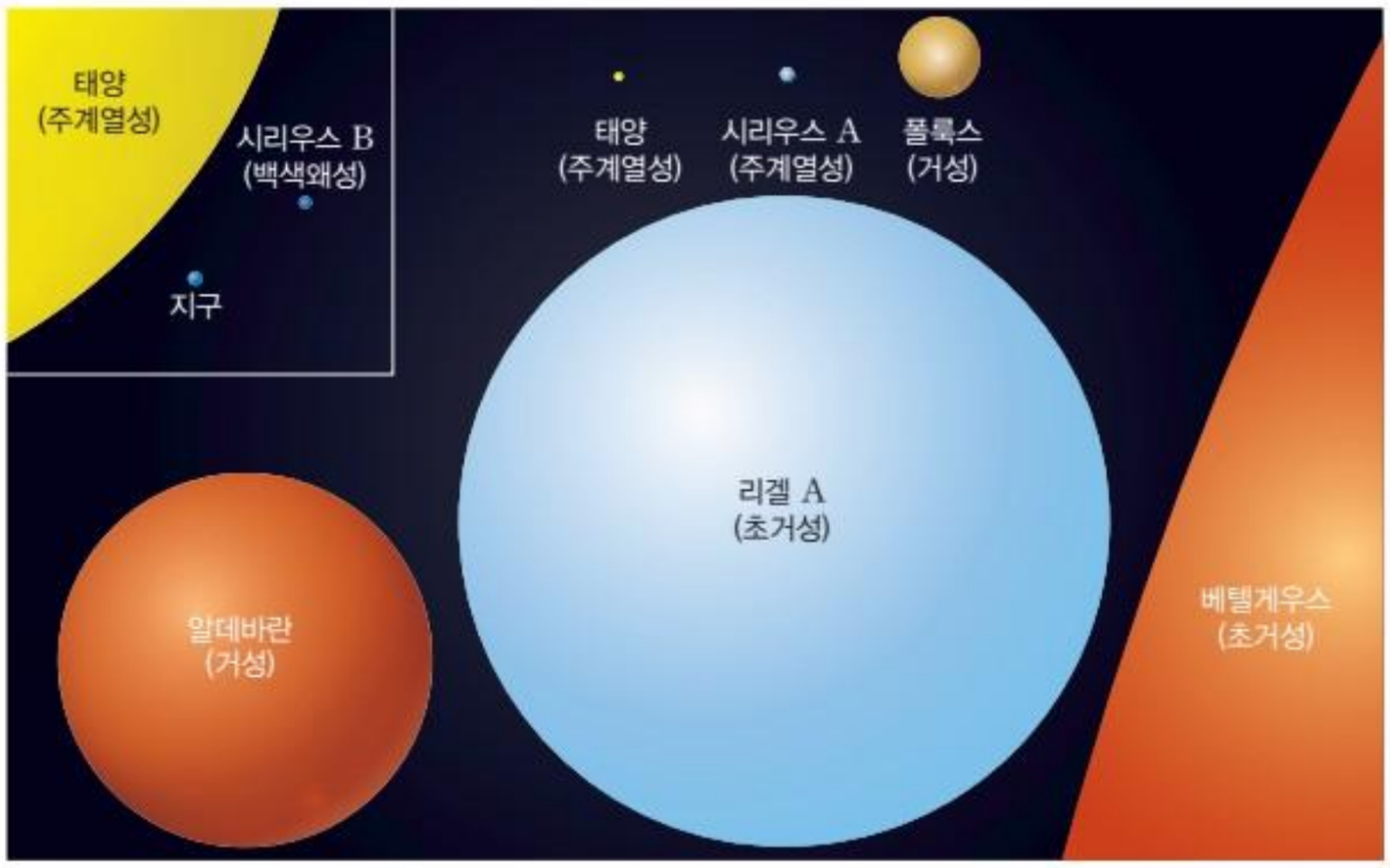
4. 별의 종류와 상대적인 크기

(1) **주계열성:** 질량에 따라 반지름이 태양의 약 0.1배(M형 적색왜성)부터 약 10배(O형)까지 다양하다. 예 태양($R_\odot$), 시리우스 A(약 1.7 $R_\odot$), 스피카 B(약 7 $R_\odot$)

(2) **거성:** 일반적으로 반지름이 태양의 수십 배 정도이다. 예 폴룩스(약 9 $R_\odot$), 알데바란(약 45 $R_\odot$)

(3) **초거성:** 질량이 매우 큰 별이 팽창한 상태로, 반지름이 태양의 수백~수천 배 정도이다. 예 리겔 A(약 79 $R_\odot$), 베텔게우스(약 900 $R_\odot$)

(4) **백색왜성:** 질량은 태양과 비슷하지만, 반지름은 지구와 비슷하거나 태양의 약 $\frac{1}{100}$ 정도로 작다. 예 시리우스 B(약 0.008 $R_\odot$)



▲ 다양한 별의 종류와 상대적인 크기

초거성의 크기 비교

초거성의 광도는 매우 크기 때문에, 온도가 낮으면 비슷한 광도를 유지하기 위해 반지름이 커야 한다. 따라서 적색 초거성은 청색 초거성보다 훨씬 크다.

5. 광도 계급

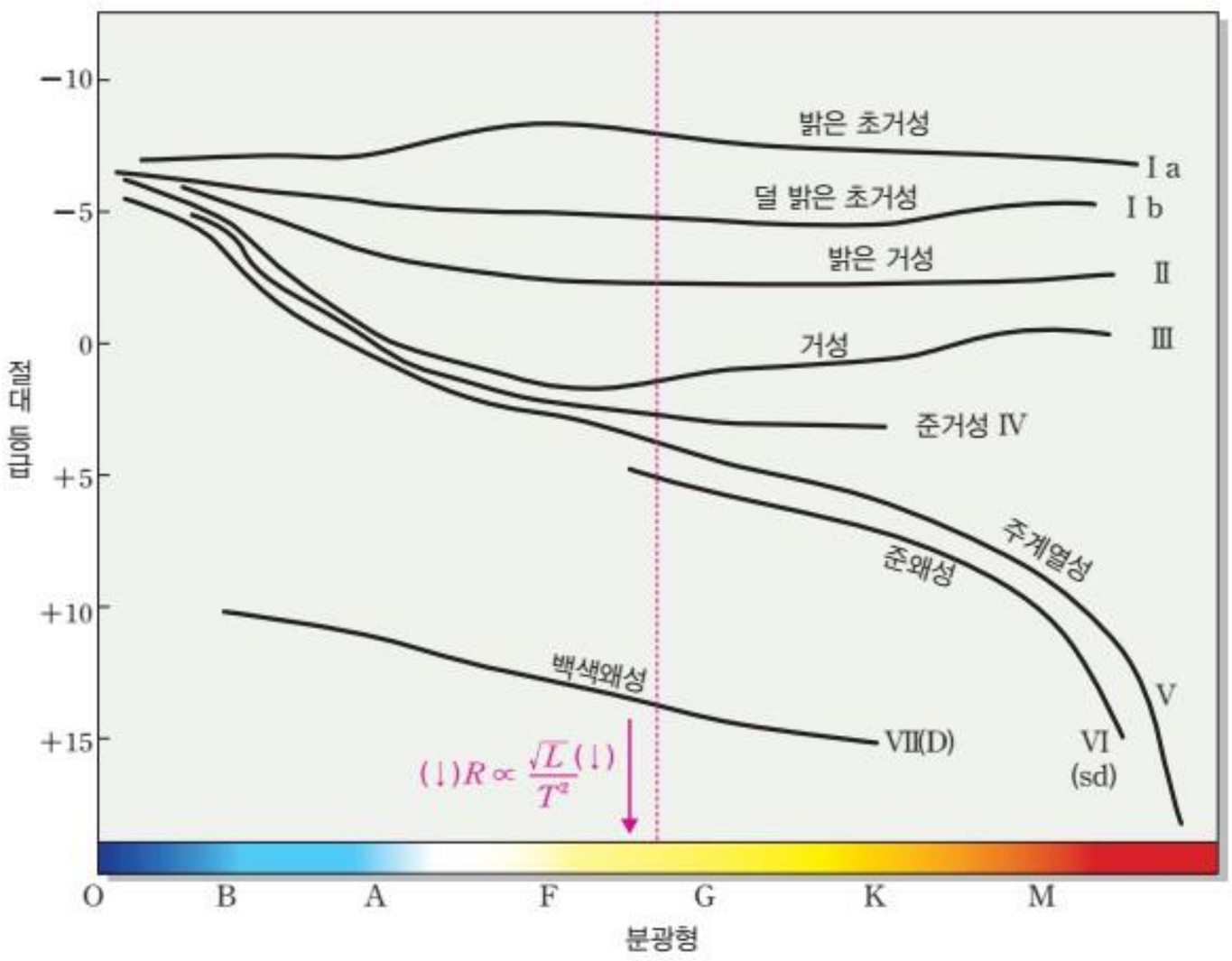
분광형이 같은 별이라도, 스펙트럼에 나타나는 흡수선의 폭은 서로 다르게 나타나는 경우가 있다. 천문학자들은 이러한 차이가 별의 광도와 관련이 있다는 사실을 밝혀내고, 흡수선의 폭을 기준으로 별의 광도를 구분하는 분류 체계인 광도 계급을 도입하였다.

(1) **광도 계급의 분류:** 광도 계급은 별의 표면 중력과 밀도에 따라 나타나는 스펙트럼의 특징을 기준으로 분류되며, 일반적으로 광도가 큰 별부터 작은 별 순서로 Ⅰ~Ⅶ까지의 7단계로 나뉜다. 밀도가 낮고 반지름이 큰 초거성은 표면 중력이 작아 흡수선의 폭이 좁다. 반면, 밀도가 높고 반지름이 작은 백색왜성은 표면 중력이 커 흡수선의 폭이 넓다.

광도 계급	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
별의 종류	초거성	밝은 거성	거성	준거성	주계열성	준왜성	백색왜성
반지름	← 크다.						작다. →

(2) **광도 계급의 표기:** 광도 계급은 분광형 뒤에 로마 숫자로 표기된다. 예를 들어 태양은 G2V로 표시되며, 이는 태양이 분광형 G2에 해당하며, 광도 계급 Ⅴ인 주계열성임을 의미한다.

심화 H-R도와 별의 광도 계급



- Ⅵ의 준왜성은 subdwarfs의 앞글자를 따서 sd로 표현하기도 하고, Ⅶ의 백색왜성은 D로 표현하기도 한다.
- 분광형이 같은 경우, 광도 계급이 클수록 광도가 작아지므로, 반지름이 작다.

MKK 분류법
광도 계급은 미국 여키스 천문대의 모건(Morgan), 키넌(Keenan), 켈먼(Kellman)에 의해 고안되었으며, 여키스 분류법(Yerkes classification) 또는 MKK 분류법이라고 불린다. 이들은 기존의 하버드 분광형 분류 방법에 광도 계급을 결합하여, 별의 온도와 광도를 동시에 반영할 수 있는 보다 정밀한 분류 체계를 완성하였다.

표면 중력과 흡수선의 폭
별의 질량이 M이고 반지름이 R일 때, 별의 표면 중력 $g \propto \frac{M}{R^2}$이고, 별의 밀도 $\rho \propto \frac{M}{R^3}$이다. 따라서 별의 반지름이 클수록 별의 밀도와 표면 중력이 작아지며, 별 외기권의 입자 밀도가 낮아져 입자 충돌이 적어지므로 스펙트럼 흡수선의 폭이 좁게 나타난다.

광도 계급의 사용
광도 계급은 Ⅰ~Ⅶ까지 7개의 계급이 있지만, 현재 Ⅵ~Ⅶ은 잘 사용하지 않는다.

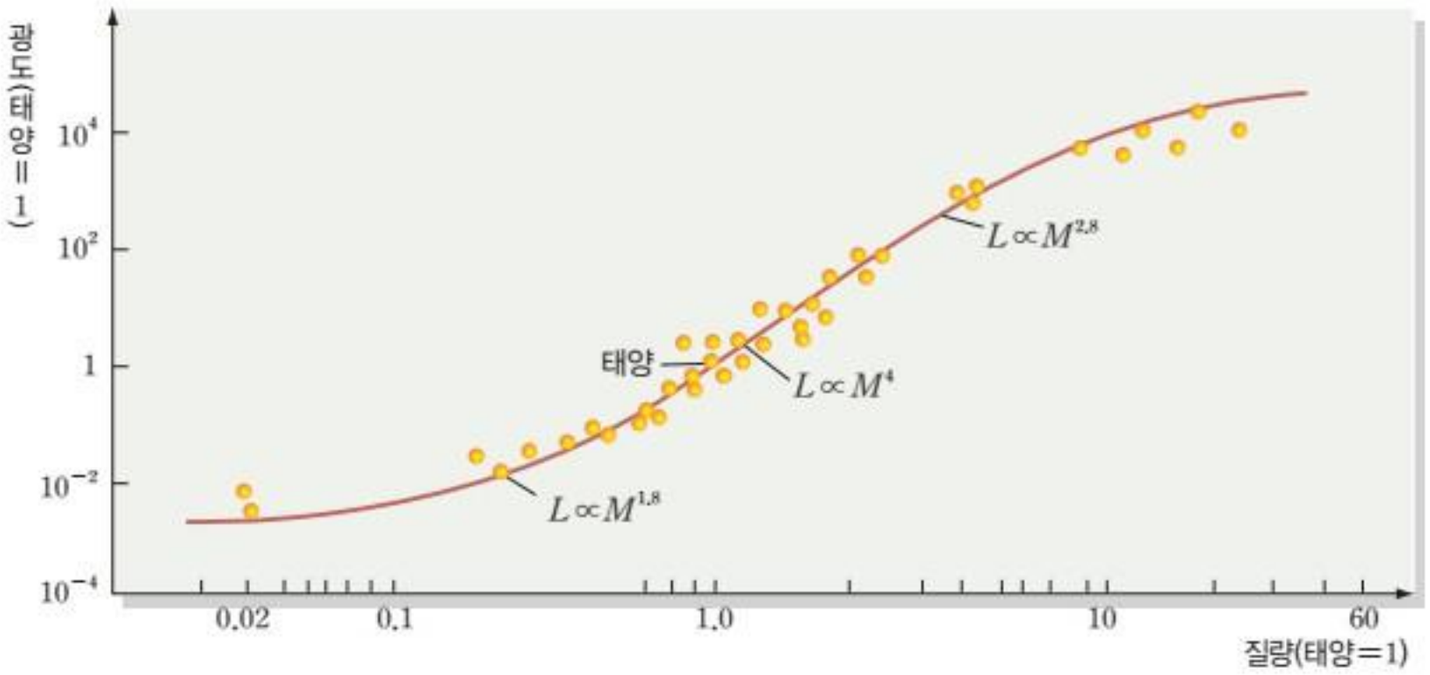
6. 주계열성의 물리량 관계

(1) **주계열성의 질량과 반지름 관계:** 주계열성의 반지름 R과 질량 M은 대체로 $R \propto M^{0.8}$의 관계가 있다. 즉, 주계열성의 질량이 클수록 반지름이 크다.

(2) **주계열성의 질량과 광도 관계:** 주계열성의 질량이 클수록 중심부 온도가 높으므로 광도가 크다. 주계열성의 광도 L과 질량 M은 대체로 $L \propto M^{1.8\sim4}$의 관계가 있다.

(3) **주계열성의 질량과 수명 관계:** 주계열성의 질량이 클수록 에너지를 빠르게 소모하므로 수명이 짧아진다.

주계열성의 질량과 색지수 관계
주계열성은 질량이 클수록 표면 온도가 높기 때문에, 짧은 파장 영역에서 복사 에너지를 더 많이 방출한다. 따라서 질량이 큰 주계열성일수록 색지수는 작아진다.



▲ **주계열성의 질량과 광도 관계** 주계열성의 광도는 질량에 비례한다.

분광형	표면 온도(K)	반지름(태양=1)	질량(태양=1)	광도(태양=1)
O	40000	10	50	100000
B	20000	5	10	1000
A	8500	1.7	2.0	20
F	6500	1.3	1.5	4
G	5800	1.0	1.0	1.0
K	4500	0.8	0.7	0.2
M	3200	0.3	0.2	0.01

▲ 주계열성의 물리량 비교

중요 개념 체크

정답과 해설 168쪽

1. **H−R도에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.**
   (1) H−R도의 오른쪽 아래에 위치한 별은 상대적으로 표면 온도가 높고 광도가 큰 별이다. ——( )
   (2) H−R도의 왼쪽 위에서 오른쪽 아래로 이어지는 대각선 띠에 분포하는 별은 주계열성이다. ——( )
2. **광도 계급 V는 별의 종류 중 ( )을 나타낸다.**
3. **주계열성은 질량이 클수록 반지름이 (크고, 작고), 광도가 (크며, 작으며), 수명이 (길다, 짧다).**

HIGH 탐구 분석

별의 분광형과 광도 자료를 분석하여 H-R도 작성하기

H-R도를 작성하고, 별의 물리적 성질을 비교하여 설명할 수 있다.

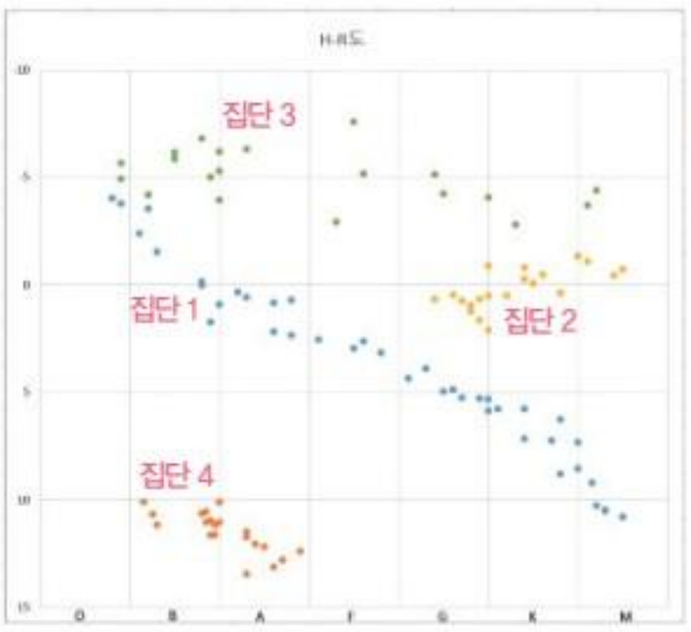
과정

❶ 여러 별의 분광형과 절대 등급을 조사하고, 분광형은 분광형 변환 숫자로 변환한다.
❷ 스프레드시트 프로그램에 별의 분광형, 분광형 변환 숫자, 절대 등급을 입력한다.
❸ 분광형 변환 숫자와 절대 등급의 자료를 선택한 뒤, 분산형 그래프를 그린다.
❹ 그래프의 세로축 값(절대 등급)을 거꾸로 표시하고, 가로축 값에는 텍스트 상자를 사용하여 분광형을 표시한다.
❺ H-R도에 표시된 별을 몇 개의 집단으로 분류하고, 각 집단의 분광형과 절대 등급의 분포를 바탕으로 각 집단에서 나타나는 별의 물리적 성질을 추론한다.

분광형 변환 숫자
문자 데이터인 분광형을 그래프로 표현하기 위해 표면 온도가 높은 별부터 순서에 따라 부여한 숫자이다.
• O형: 0번대 • B형: 10번대
• A형: 20번대 • F형: 30번대
• G형: 40번대 • K형: 50번대
• M형: 60번대

결과

1. 각 집단의 분광형과 절대 등급의 분포는 어떠한가?



특징 / 집단	분광형	절대 등급
집단 1	O형~M형	−5등급~12등급
집단 2	G형, K형, M형	−2등급~2등급
집단 3	O형~M형	−8등급~−2등급
집단 4	B형, A형	10등급~14등급

이렇게도 할 수 있어요!
스프레드시트 프로그램의 활용이 어려운 경우, 모눈종이에 직접 별을 표시하여 H-R도를 그릴 수도 있다.

별의 물리량 추론
별의 표면 온도와 광도는 각각 분광형과 절대 등급으로 추론할 수 있으며, 별의 크기는 표면 온도와 광도를 이용하여 추론할 수 있다.

정리

- **집단 1**은 **표면 온도와 광도, 크기가 다양**하게 분포하며, **표면 온도가 높을수록 광도와 크기가 크다.**
- **집단 2**는 **표면 온도가 낮지만, 광도와 크기가 크다.**
- **집단 3**은 **표면 온도가 다양**하게 분포하며, **광도가 매우 크다.** 대체로 **크기가 매우 큰 편**이며, 표면 온도가 낮은 별들은 크기가 더 크다.
- **집단 4**는 **표면 온도가 높지만, 광도와 크기가 작다.**

탐구 확인 문제

정답과 해설 168쪽

1 위 탐구에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기
ㄱ. 집단 1은 O형에서 M형으로 갈수록 광도가 작아진다.
ㄴ. 집단 2는 다른 집단에 비해 표면 온도가 높다.
ㄷ. 집단 4는 다른 집단에 비해 광도가 크다.

2 위 탐구 결과를 바탕으로 집단 1과 집단 3의 별들이 가지는 물리적 성질의 공통점과 차이점을 서술하시오.

TOP 심화 강의

별의 광도는 어떻게 구할까?

1 별의 밝기

(1) **겉보기 등급**: 지구에서 별을 관측했을 때 눈에 보이는 밝기를 수치로 나타낸 것으로, 등급이 작을수록 더 밝게 보인다. 포그슨은 1등급 별이 6등급 별보다 약 100배 밝고, 1등급마다 밝기가 약 $100^{\frac{1}{5}}$배(약 2.5배) 차이 난다는 것을 알아내었다. 이후 두 별의 밝기와 등급 사이의 관계를 정리하여 다음과 같이 표현했는데, 이를 포그슨 공식이라고 한다.

> 두 별의 겉보기 등급이 각각 m_1, m_2, 겉보기 밝기를 각각 l_1, l_2라고 할 때,
> $$100^{\frac{1}{5}(m_2-m_1)}=10^{\frac{2}{5}(m_2-m_1)}=\frac{l_1}{l_2}\rightarrow m_2-m_1=-2.5\log\left(\frac{l_2}{l_1}\right)$$

(2) **절대 등급**: 별이 10 pc 떨어져 있다고 가정할 때의 밝기 등급이다.

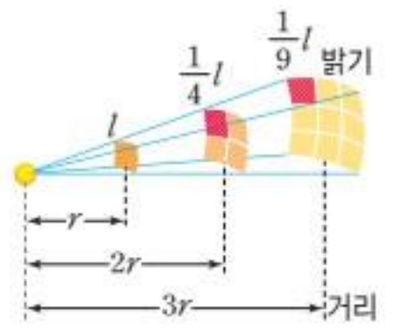
- 거리가 r(pc)인 별의 겉보기 밝기를 l, 겉보기 등급을 m, 그 별이 10 pc 거리에 있을 때 밝기를 L, 절대 등급을 M이라고 할 때, 포그슨 공식을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m-M=-2.5\log\frac{l}{L}$$

- 별의 밝기 l과 거리 r 사이의 관계는 $l\propto\frac{1}{r^2}$의 관계가 성립하므로, $\frac{l}{L}$ 대신에 $\frac{10^2}{r^2}$을 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 이때, 별의 겉보기 등급(m)을 알고, 천체까지의 거리(r)를 파섹 단위로 알고 있다면, 절대 등급(M)을 계산할 수 있다.

$$m-M=5\log r-5$$

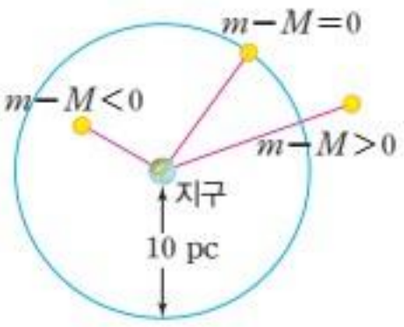
별의 밝기와 거리의 관계



별까지의 거리가 2배, 3배로 멀어지면, 별빛이 퍼지는 넓이는 2^2배, 3^2배로 넓어진다. 따라서 밝기 l과 거리 r은 $l\propto\frac{1}{r^2}$의 관계가 성립한다.

거리지수

겉보기 등급과 절대 등급의 차를 이용하여 별까지의 거리를 구할 수 있으며, 이때 $m-M$을 거리지수라고 한다.



▲ 거리지수와 별의 거리

2 별의 광도(L) 구하기

별의 광도는 절대 등급을 이용하여 나타낼 수 있으며, 일반적으로 태양의 광도와 비교하여 표현한다. 이때, 절대 등급과 광도의 관계는 포그슨 공식으로 정리할 수 있다.

$$M-M_\odot=-2.5\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right)$$

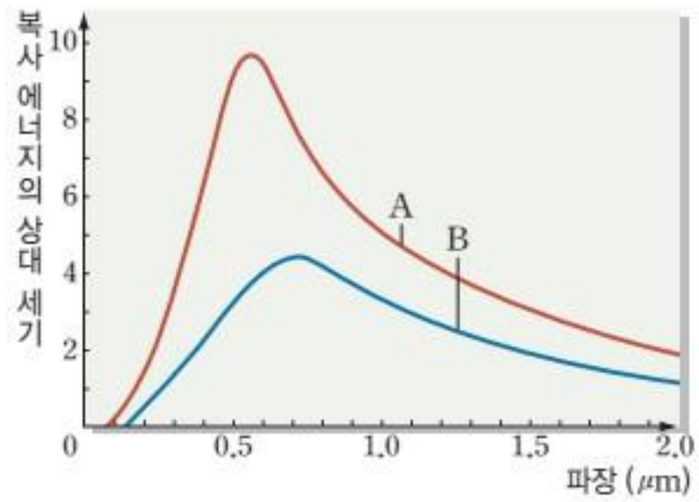
(M: 별의 절대 등급, $M_\odot$: 태양의 절대 등급, L: 별의 광도, $L_\odot$: 태양의 광도)

태양의 절대 등급 $M_\odot$은 약 4.8이며, 태양의 광도 $L_\odot$은 약 3.9×10^{26} W이므로, 별의 절대 등급 M을 알면 포그슨 공식을 이용하여 별의 광도 L을 구할 수 있다.

$$\frac{L}{L_\odot}=10^{(M_\odot-M)/2.5}\rightarrow L=L_\odot\times10^{(M_\odot-M)/2.5}$$
$$\therefore\ L=(3.9\times10^{26})\times10^{(4.8-M)/2.5}\ \text{W}$$

개념 기본 문제

01 그림은 별 A와 B의 플랑크 곡선을 나타낸 것이다.

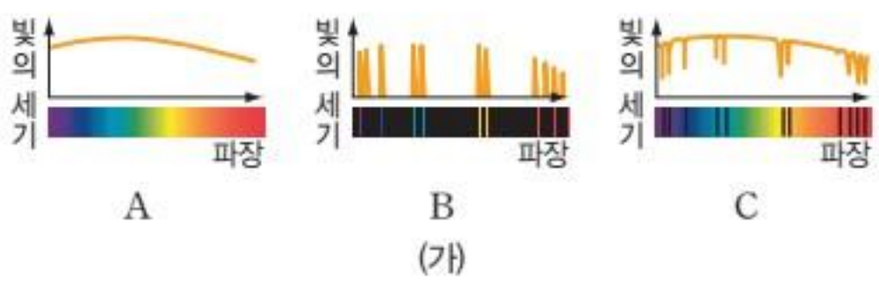


(1) A와 B 중 표면 온도가 더 높은 별을 쓰시오.

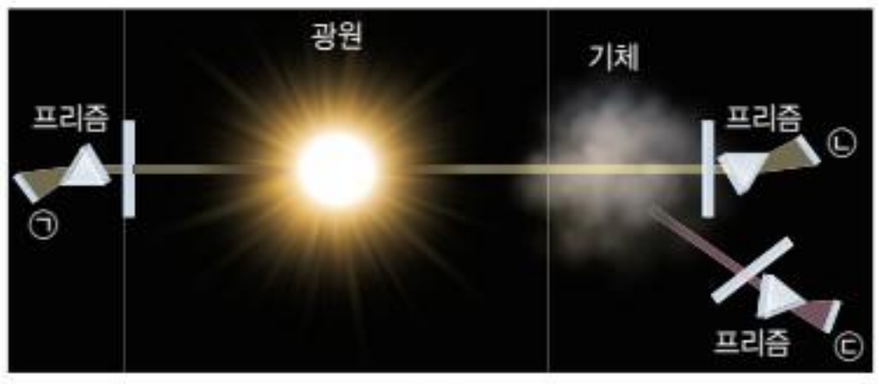
(2) A와 B 중 더 붉은색을 띠는 별을 쓰시오.

(3) A와 B 중 단위시간 동안 단위넓이에서 방출하는 복사 에너지의 총량이 더 많은 별을 쓰시오.

02 그림 (가)는 서로 다른 종류의 스펙트럼을, (나)는 광원에서 오는 빛을 서로 다른 세 지점에서 프리즘을 이용하여 관측하는 모습을 나타낸 것이다.



(가)



(나)

(1) (가)에서 A~C의 스펙트럼 종류를 쓰시오.

(2) (나)의 ㉠~㉢에서 관측되는 스펙트럼을 (가)에서 골라 쓰시오.

03 별의 분광형에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

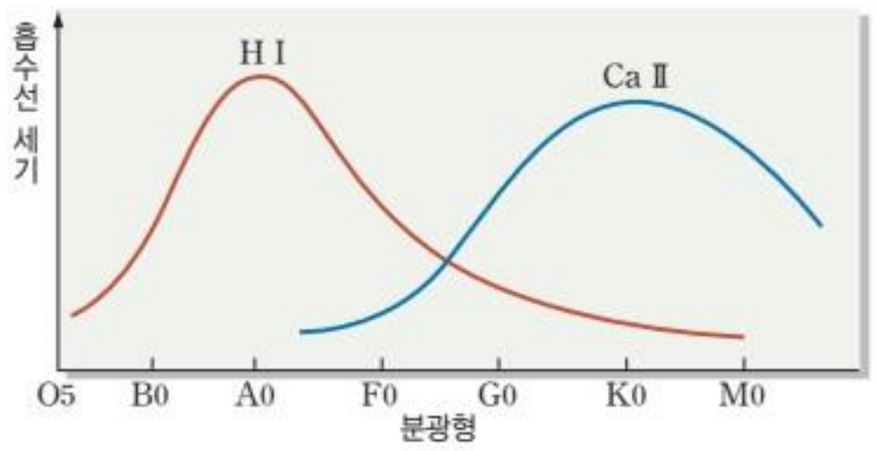
보기

ㄱ. 분광형은 스펙트럼에 나타나는 방출선의 종류와 세기를 기준으로 분류한다.

ㄴ. 분광형이 O형인 별에서 M형인 별로 갈수록 표면 온도가 낮아진다.

ㄷ. 각 분광형을 0~9로 세분화할 때 숫자의 크기가 작을수록 별의 표면 온도가 높다.

04 그림은 별의 분광형에 따른 수소(HⅠ)와 이온화된 칼슘(CaⅡ)의 흡수선 세기를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

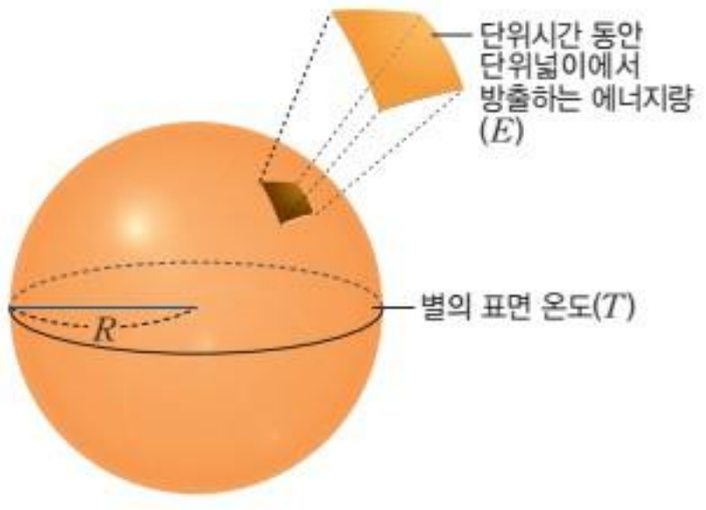
보기

ㄱ. HⅠ 흡수선은 A0형 별에서 가장 강하다.

ㄴ. B0형 별에서는 CaⅡ 흡수선이 나타난다.

ㄷ. G0형 별에서는 CaⅡ 흡수선보다 HⅠ 흡수선이 더 강하게 나타난다.

05 그림은 반지름이 R이고, 표면 온도가 T인 어느 별을 나타낸 것이다.



별이 단위시간 동안 방출하는 총 에너지량을 구하시오.

정답과 해설 168쪽

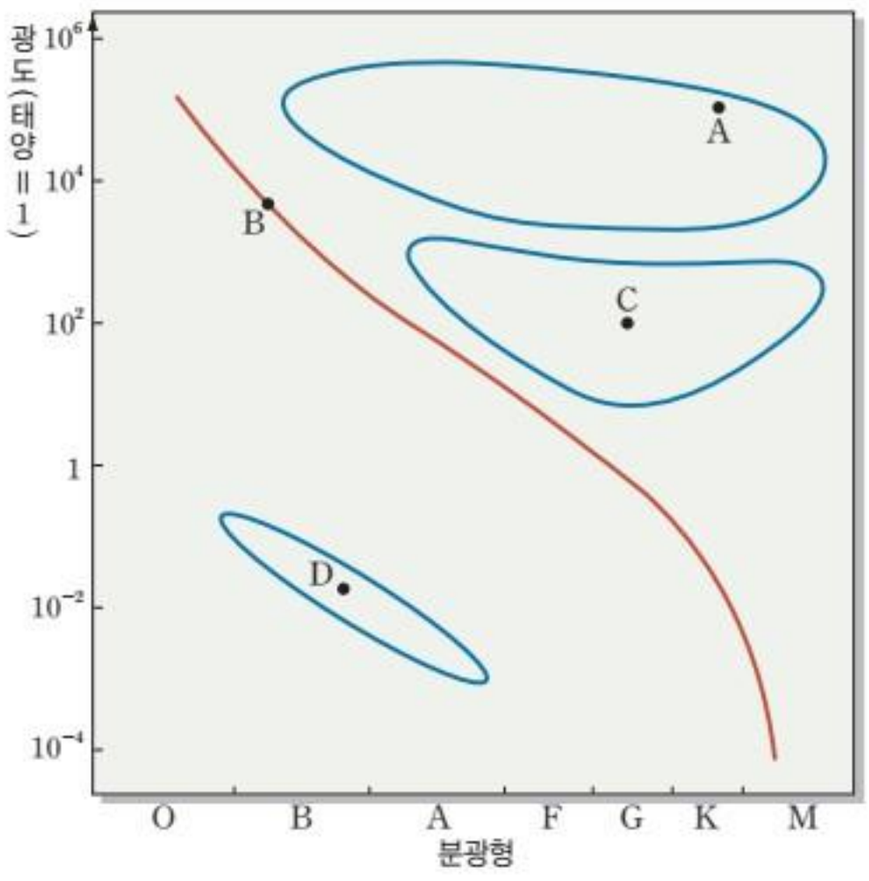
06 다음은 별의 여러 가지 물리량을 나열한 것이다.

(가) 질량	(나) 광도
(다) 분광형	(라) 반지름
(마) 평균 밀도	(바) 표면 온도
(사) 절대 등급	

(1) (가)~(사) 중 H−R도의 가로축 물리량으로 적합한 것을 모두 쓰시오.

(2) (가)~(사) 중 H−R도의 세로축 물리량으로 적합한 것을 모두 쓰시오.

07 그림은 H−R도에 별 A~D를 나타낸 것이다.

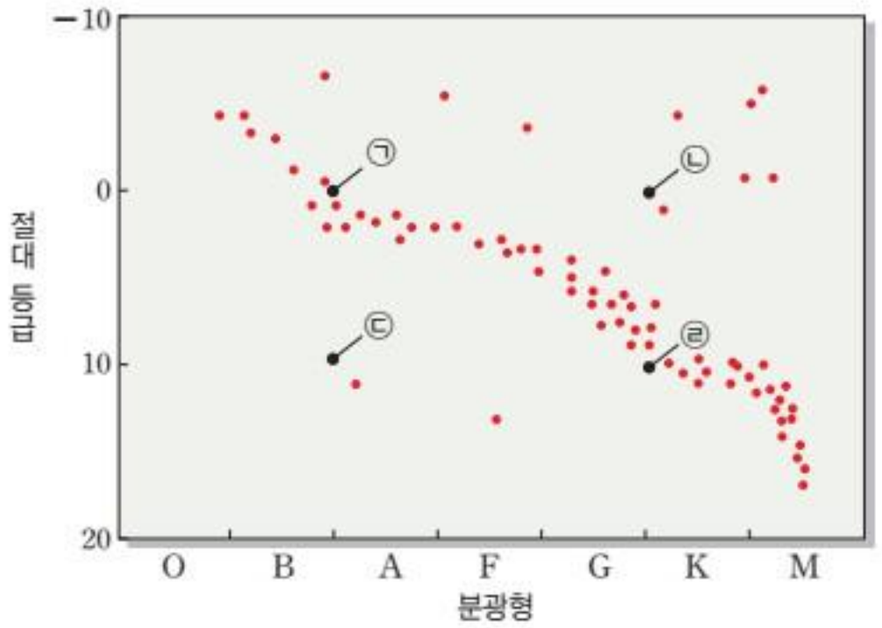


(1) A~D는 각각 어떤 종류의 별인지 쓰시오.

(2) A~D를 표면 온도가 높은 것부터 순서대로 쓰시오.

(3) A~D를 절대 등급이 작은 것부터 순서대로 쓰시오.

[08~09] 그림은 H−R도에 별 ㉠~㉣을 나타낸 것이다.



08 별 ㉠~㉣에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. ㉠은 ㉣보다 질량이 크다.

ㄴ. ㉡은 ㉢보다 반지름이 작다.

ㄷ. ㉠은 ㉣보다 표면 온도가 높다.

09 별 (가)와 (나)는 ㉠~㉣ 중 어느 것에 해당하는지 쓰시오.

별 \ 물리량	분광형	광도 계급
(가)	A0	Ⅶ
(나)	K0	Ⅴ

10 주계열성의 물리량 관계에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 질량이 클수록 수명이 길다.

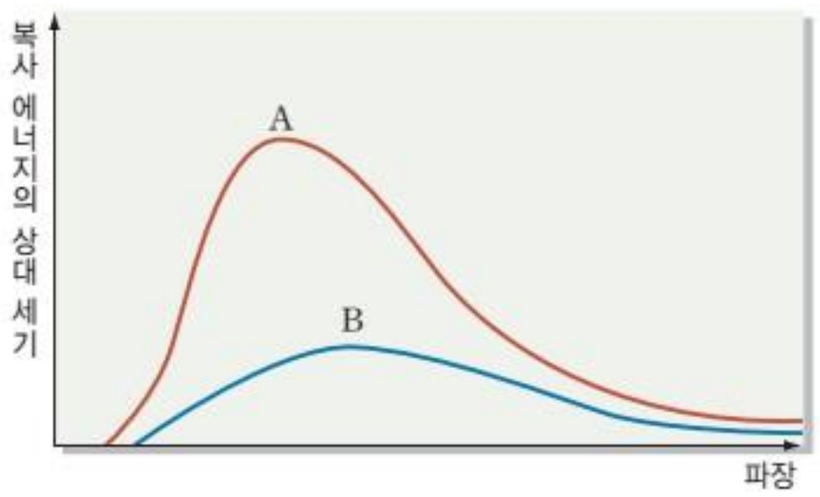
ㄴ. 질량이 클수록 반지름이 크다.

ㄷ. 질량이 클수록 중심부 온도가 높다.

개념 적용 문제

➤ 흑체 복사 법칙

01 그림은 두 별 A와 B가 단위시간 동안 단위넓이에서 방출하는 복사 에너지의 상대 세기를 파장에 따라 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▷ 별의 표면 온도가 높을수록 최대 에너지를 방출하는 파장이 짧아져 파란색을 띠며, 모든 파장대에서 방출하는 복사 에너지의 양이 증가한다.

보기

ㄱ. 별의 색은 A가 B보다 더 붉은색을 띤다.

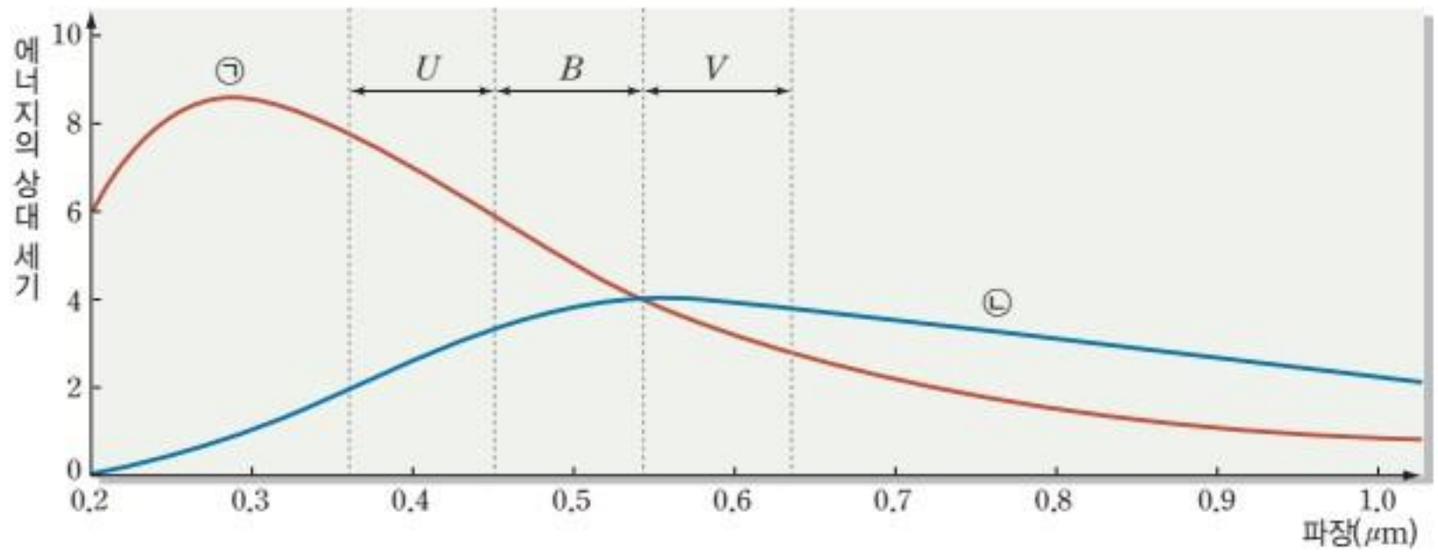
ㄴ. 최대 복사 에너지를 방출하는 파장은 A가 B보다 짧다.

ㄷ. 단위시간 동안 단위넓이에서 방출하는 복사 에너지의 총량은 A가 B보다 많다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 별의 표면 온도와 색

02 그림은 두 별 ㉠과 ㉡의 파장에 따른 에너지의 상대 세기와 U, B, V 필터를 투과하는 파장 영역을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

▷ U, B, V 필터를 사용한 등급의 차인 $(U-B)$ 또는 $(B-V)$를 색지수로 사용한다. 에너지의 상대 세기가 클수록 측정한 등급은 작아진다.

보기

ㄱ. ㉠은 ㉡보다 표면 온도가 높다.

ㄴ. ㉠은 B 등급보다 V 등급이 크다.

ㄷ. ㉠은 ㉡보다 $(U-B)$ 색지수의 값이 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 별의 분광형과 표면 온도

03 표는 별 (가)~(라)의 분광형과 스펙트럼을 나타낸 것이다. 각 별의 분광형은 A, B, G, M형 중 하나이다.

별	분광형	스펙트럼
(가)	( )	
(나)	( )	
(다)	( )	
(라)	( )	

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

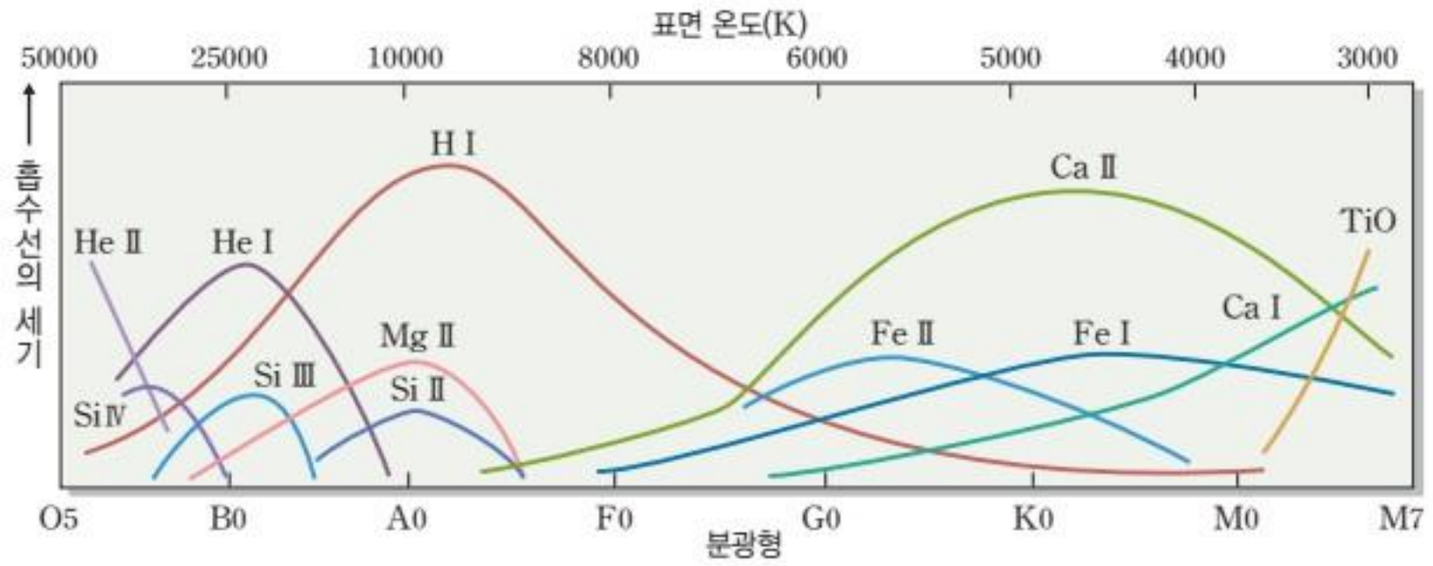
ㄱ. (가)는 (라)보다 더 붉은색을 띤다.
ㄴ. 표면 온도가 가장 높은 별은 (나)이다.
ㄷ. 태양과 가장 유사한 스펙트럼을 가진 별은 (다)이다.

① ㄱ　② ㄷ　③ ㄱ, ㄴ　④ ㄴ, ㄷ　⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 별의 표면 온도가 낮을수록 더 붉은색을 띤다. 태양의 분광형은 G2형이다.

➤ 별의 분광형과 표면 온도

04 그림은 분광형에 따른 흡수선의 종류 및 세기를 나타낸 것이다.



이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 표면 온도가 낮을수록 H I 흡수선의 세기가 강해진다.
ㄴ. 표면 온도가 높을수록 분자 흡수선의 세기가 강해진다.
ㄷ. He I 흡수선이 가장 강한 별이 Fe Ⅱ 흡수선이 가장 강한 별보다 표면 온도가 더 높다.

① ㄱ　② ㄷ　③ ㄱ, ㄴ　④ ㄴ, ㄷ　⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ O형과 B형 별에서는 헬륨 흡수선이 강하게 나타나며, M형 별에서는 산화 타이타늄 흡수선이 뚜렷하다.

➤ 별의 광도와 크기

05 표는 별 (가)~(다)의 절대 등급, 분광형, 표면 온도를 나타낸 것이다.

별	절대 등급	분광형	표면 온도(K)
(가)	0	K4	4500
(나)	12	M5	3200
(다)	1	A0	10000

별 (가)~(다)에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

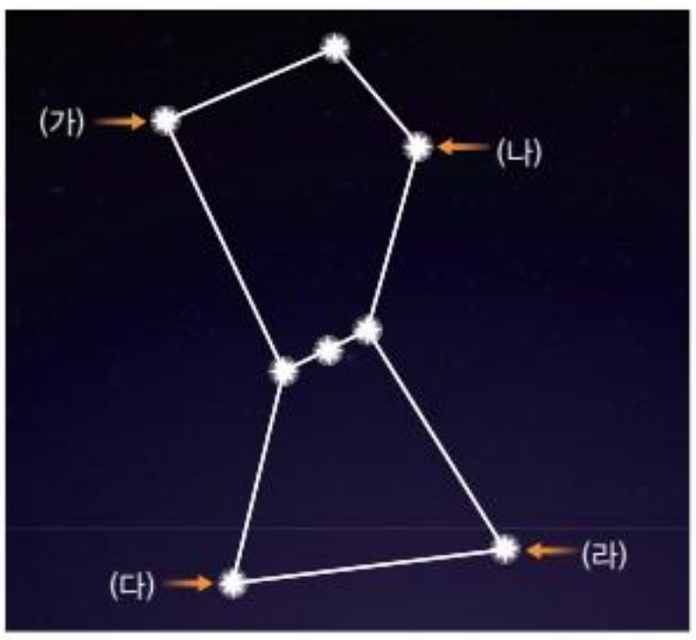
ㄱ. 단위시간 동안 방출하는 총 에너지량은 (가)가 가장 많다.
ㄴ. 단위넓이에서 단위시간 동안 방출하는 에너지량은 (나)가 가장 많다.
ㄷ. 별의 크기는 (다)가 (가)보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 절대 등급이 작은 별일수록 광도가 크며, 별의 반지름은 광도와 표면 온도로 구할 수 있다.

➤ 별의 광도와 크기

06 그림은 오리온자리를, 표는 이 별자리를 구성하는 별 (가)~(라)의 물리량을 나타낸 것이다.



별	절대 등급	분광형
(가)	−5.1	M2
(나)	−2.7	B2
(다)	−4.7	B0
(라)	−6.7	B8

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

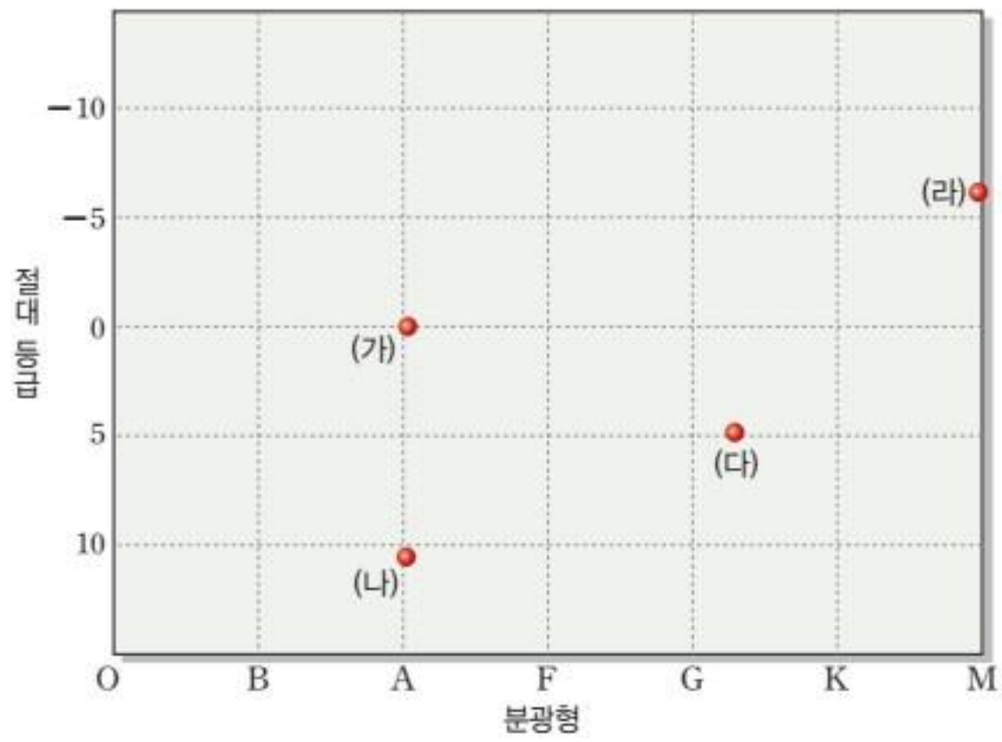
ㄱ. 별의 크기는 (가)가 (다)보다 크다.
ㄴ. 별의 표면 온도는 (다)가 (가)보다 높다.
ㄷ. 최대 복사 에너지를 방출하는 파장은 (나)가 (라)보다 길다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 별의 분광형은 표면 온도에 따라 O>B>A>F>G>K>M의 순서를 따른다. 각 분광형은 다시 고온인 0부터 저온인 9까지 10등급으로 세분화된다.

➤ H-R도의 특징

07 그림은 별 (가)~(라)를 H-R도에 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

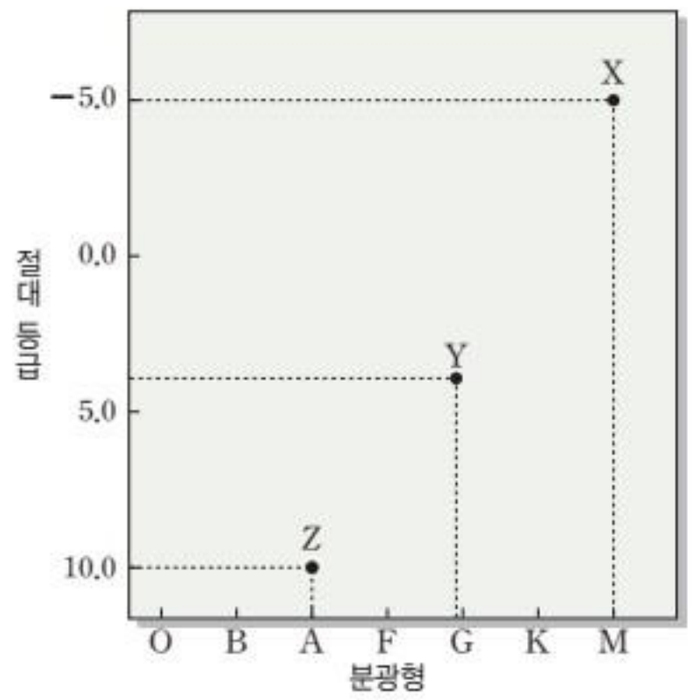
ㄱ. 별의 크기는 (가)가 (나)보다 크다.
ㄴ. 별의 밀도는 (다)가 (라)보다 크다.
ㄷ. 별의 색지수는 (가)가 (다)보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ H−R도에서 오른쪽 위로 갈수록 밀도는 작아지고, 반지름은 커진다. 표면 온도가 같은 별이라도, 반지름이 크면 광도도 커진다.

➤ H-R도에서 별의 분포와 종류

08 그림은 H-R도에 별 X~Z를 나타낸 것이다. X~Z는 각각 주계열성, 초거성, 백색왜성 중 하나이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

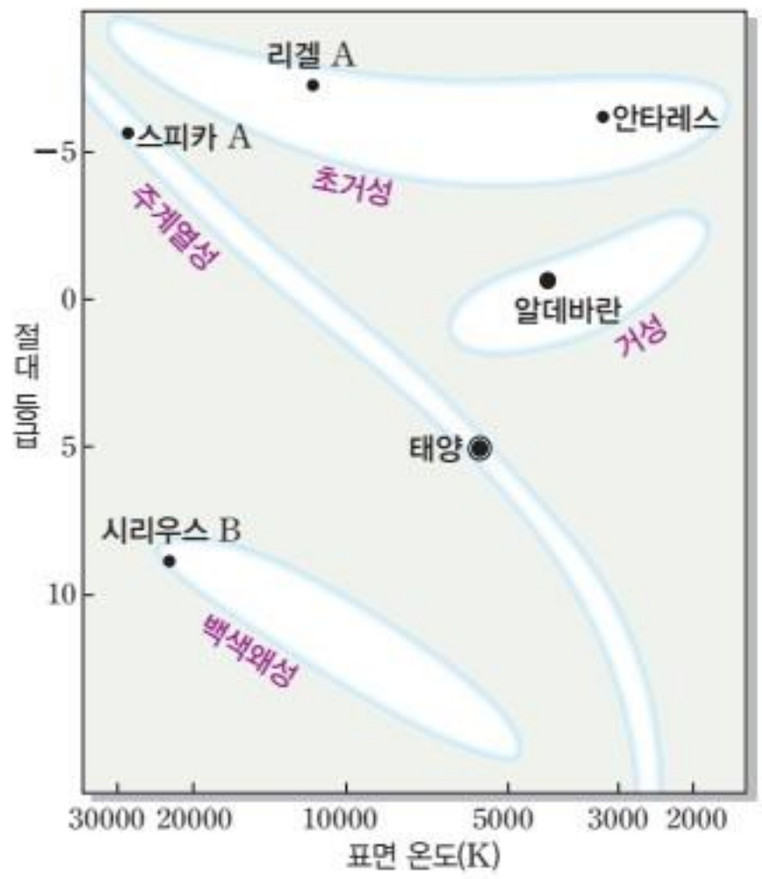
ㄱ. 별의 광도를 비교하면 X>Y>Z이다.
ㄴ. 별의 표면 온도를 비교하면 Z>Y>X이다.
ㄷ. X는 초거성, Y는 주계열성, Z는 백색왜성이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ 별의 반지름을 비교하면 초거성>주계열성>백색왜성이다.

➤ H-R도에서 별의 분포와 종류

09 그림은 여러 별을 H-R도에 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▷ 표면 온도가 높을수록 색지수가 작아진다. 주계열성은 질량이 클수록 에너지를 빠르게 소모한다.

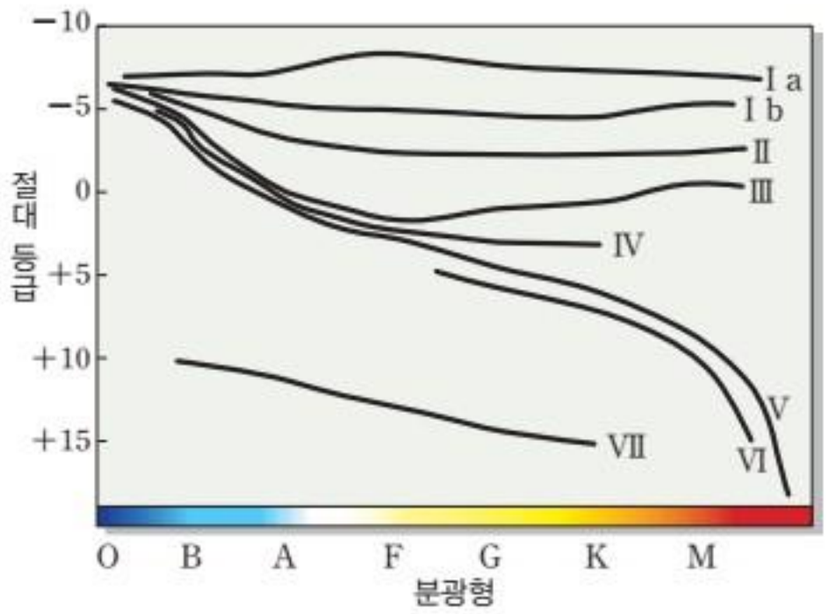
보기

ㄱ. 수명은 스피카 A가 태양보다 길다.
ㄴ. 반지름은 리겔 A가 안타레스보다 작다.
ㄷ. 색지수는 시리우스 B가 알데바란보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 광도 계급

10 다음은 별을 7개의 계급으로 구분하는 광도 계급을 나타낸 것이다.



광도 계급	별의 종류
Ⅰ	초거성
Ⅱ	밝은 거성
Ⅲ	거성
Ⅳ	준거성
Ⅴ	주계열성
Ⅵ	준왜성
Ⅶ	백색왜성

▷ 밀도가 낮고 반지름이 큰 초거성은 표면 중력이 작아 흡수선의 폭이 좁다. 반면, 밀도가 높고 반지름이 작은 백색왜성은 표면 중력이 커 흡수선의 폭이 넓다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

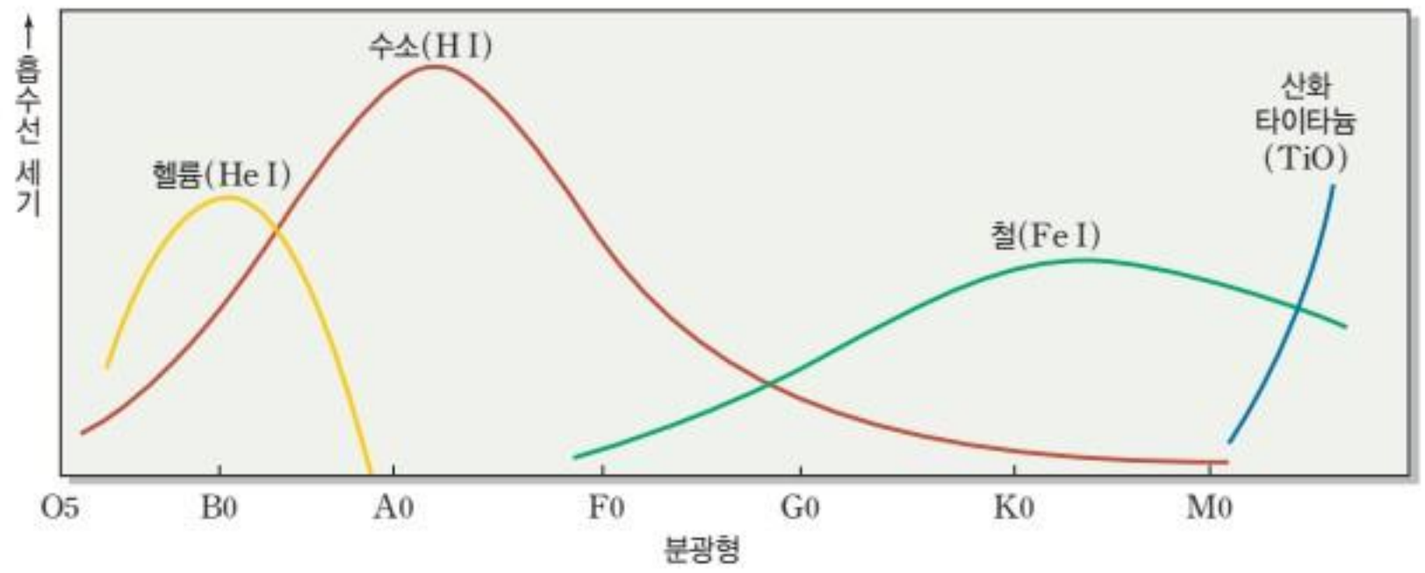
ㄱ. 광도 계급이 Ⅰ인 별보다 Ⅶ인 별이 스펙트럼 흡수선의 폭이 넓다.
ㄴ. 별의 분광형이 같을 때, 광도 계급이 높을수록 별의 광도는 커진다.
ㄷ. 별의 분광형이 같을 때, 광도 계급이 낮을수록 별의 반지름은 커진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

1등급 도전 문제

➤ 별의 분광형과 표면 온도

11 그림은 별의 분광형에 따른 스펙트럼 흡수선의 상대적인 세기를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

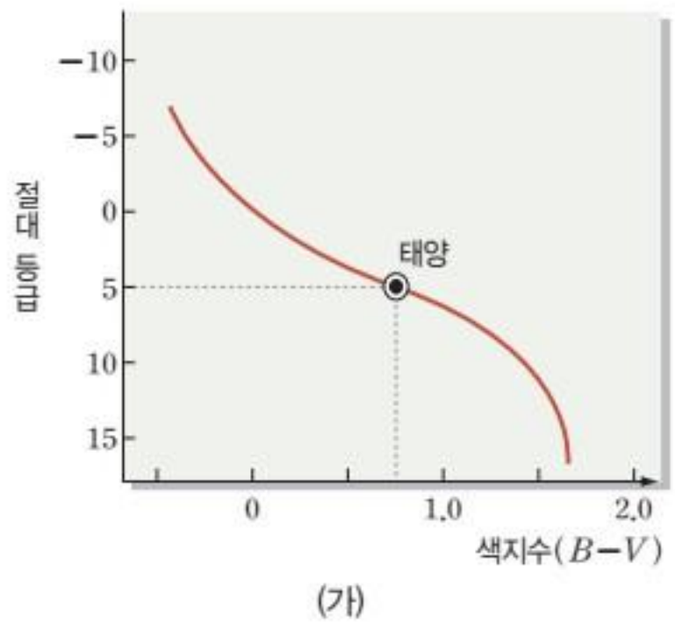
ㄱ. 색지수가 작은 별일수록 분자 흡수선이 잘 나타난다.
ㄴ. 태양에서는 철 흡수선보다 수소 흡수선이 강하게 나타난다.
ㄷ. B0형 별에서의 헬륨 흡수선 세기는 K0형 별에서의 철 흡수선 세기보다 강하다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

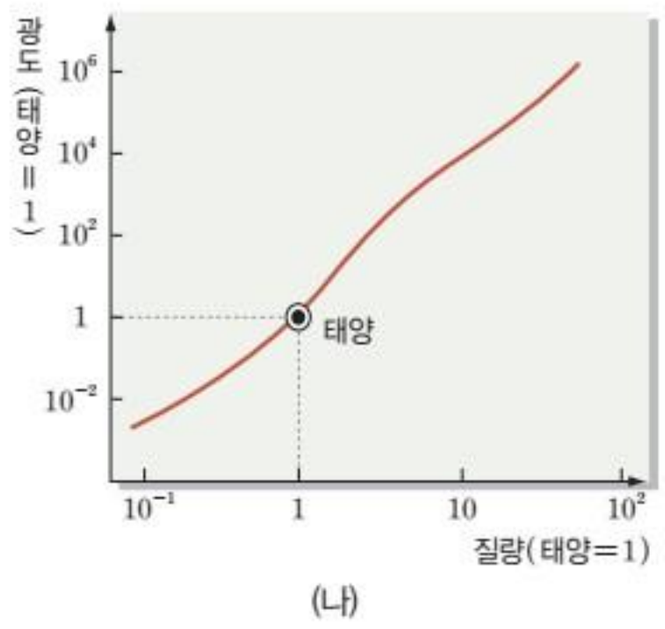
▷ 표면 온도가 높은 O형 별과 B형 별의 스펙트럼에서는 헬륨 흡수선이 강하고, A형 별에서는 수소 흡수선이 강하다. 표면 온도가 낮은 M형 별에서는 산화 타이타늄 흡수선이 강하게 나타난다.

➤ 주계열성의 물리량 관계

12 그림 (가)는 주계열성의 색지수와 절대 등급과의 관계를, (나)는 주계열성의 질량과 광도와의 관계를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

주계열성에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 색지수가 클수록 질량이 커진다.
ㄴ. 질량이 클수록 수명이 짧아진다.
ㄷ. 표면 온도가 높을수록 반지름이 커진다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 표면 온도가 높을수록 색지수가 작아진다. 주계열성의 질량이 클수록 반지름이 크다.

02 별의 진화

핵심 내용 미리보기

"별은 **질량**에 따라 **진화 과정**이 달라지며, 진화 과정에 따라 **내부 구조**도 계속 달라진다."

1 전주계열 단계

별은 성운에서 중력 수축에 의해 형성이 시작되며, 전주계열 단계를 거치면서 중심부 온도가 점차 상승한다. 이후 중심부 온도가 약 1000만 K에 도달하면 수소 핵융합이 시작되고, 별은 주계열성이 된다.

1. 전주계열 단계

(1) **원시별의 탄생 조건:** 별은 주로 분자 상태의 수소로 이루어진 성운 내부의 먼지와 기체가 중력에 의해 응집되며 형성된다. 이러한 별 생성 지역은 절대 온도 10 K 정도의 온도가 매우 낮고 밀도가 높은 곳으로, 지구에서 보면 보통 암흑 성운으로 관측된다.

(2) **원시별의 탄생과 성장**

1단계	성운 내 밀도가 높은 곳에서 중력 수축이 시작되며, 구심점 역할을 하는 구상체가 만들어진다. 이후 중력에 의해 주변의 먼지와 기체가 끌려와 덩어리에 유입되며 덩어리는 빠르게 커진다. 이때, 감소한 위치 에너지의 일부가 열에너지로 전환되며, 성운의 내부 에너지가 증가한다. 하지만 수축 초기에는 성운의 밀도가 낮아 생성된 열이 복사 에너지 형태로 쉽게 빠져나가 성운은 온도를 거의 유지한 채 수축을 계속한다. 이 시기 성운은 파장이 긴 적외선 복사를 방출하며 냉각된다.
2단계	성운의 밀도가 높아지면 불투명도가 증가하여 복사 에너지가 외부로 쉽게 빠져나가지 못하며, 이로 인해 성운의 내부 온도는 점차 상승한다. 이때, 성운 중심부에 형성된 고온·고밀도의 기체 덩어리를 원시별이라고 한다. 원시별은 외형이 뚜렷해지면서 주변의 기체를 방출하거나 흡수하여 별로서의 구조를 갖추기 시작한다.
3단계	원시별의 질량이 충분히 커지면 자체 중력에 의한 수축이 본격적으로 일어난다. 이 과정에서 위치 에너지는 중력 수축 에너지로 전환되어 내부를 더욱 가열한다. 이후 내부 온도와 압력이 증가하며 핵융합 반응을 위한 조건에 서서히 접근한다.

(3) **전주계열 단계의 특징**

① 전주계열 단계는 별이 주계열에 도달하기 전까지의 물리적 진화 과정으로, 이 단계의 별은 중심부에서 수소 핵융합 반응을 하지 않는다. 이 시기의 광도는 중력 수축으로 발생한 에너지로 유지된다.

② 전주계열 단계의 별은 형성 초기에는 성운 속 먼지와 기체에 가려져 관측이 어렵지만, 주변 물질이 흩어지면 가시광선 영역에서 관측할 수 있고, 이때부터 H−R도에 위치를 표시할 수 있다. 이 단계의 별은 상대적으로 표면 온도가 낮기 때문에, H−R도에서 오른쪽에 위치한다.

용골자리 성운



별이 생성되는 지역에서 흰색의 제트류가 관측된다.

구상체
암흑 성운 내부에 있는 수천 AU~수만 AU 크기의 기체 및 먼지의 집합체로, 시간이 지나면서 수축하여 원시별이 된다.

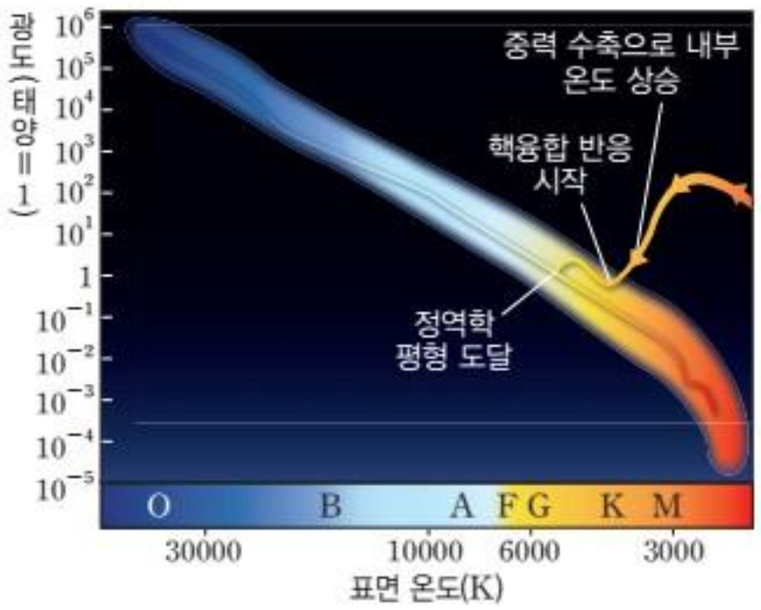
별의 자전과 행성의 공전 방향
먼지와 기체 덩어리는 처음 만들어질 때부터 회전하는 원반을 형성한다. 큰 기체 덩어리는 원반의 형태를 유지하며 점점 수축하면서 회전 속도가 빨라지고, 원반의 중심부에서는 온도가 올라가 별이 만들어진다. 이때, 바깥쪽의 기체는 밖으로 빠져 나가거나 행성이 된다. 이러한 까닭으로 행성은 주로 중심별이 자전하는 방향으로 공전한다.

원시별과 전주계열성
원시별을 둘러싸고 있던 물질이 흩어지면 별은 가시광선 영역에서도 관측된다. 이 시기의 별을 전주계열성이라고 한다.

2. 전주계열 단계에서 주계열 단계로의 진화

(1) **영년 주계열 진입:** 별의 중심부 온도가 약 1000만 K에 도달하면, 중심부에서 수소 핵융합 반응이 시작되며 별은 주계열성이 된다. 이 시점을 영년 주계열(Zero-age Main Sequence) 단계라 하며, 이때부터 별의 나이를 계산한다.

(2) **전주계열성의 진화:** H−R도에서 전주계열성의 진화 경로는 하야시 경로와 헤니에이 경로가 있다. 하야시 경로에서는 반지름이 작아지지만, 표면 온도는 거의 일정하여 광도가 감소한다. 이후 헤니에이 경로에서는 중심부 온도가 상승함에 따라 별 내부의 투명도가 높아지고 에너지가 외부로 쉽게 전달되어 광도가 다시 증가하며 주계열 단계에 도달한다.



▲ **전주계열성의 진화 경로**

전주계열 단계와 H−R도
별이 전주계열 단계에 머무는 시간은 상대적으로 짧아, H−R도에서 전주계열 단계의 별은 많이 나타나지 않는다.

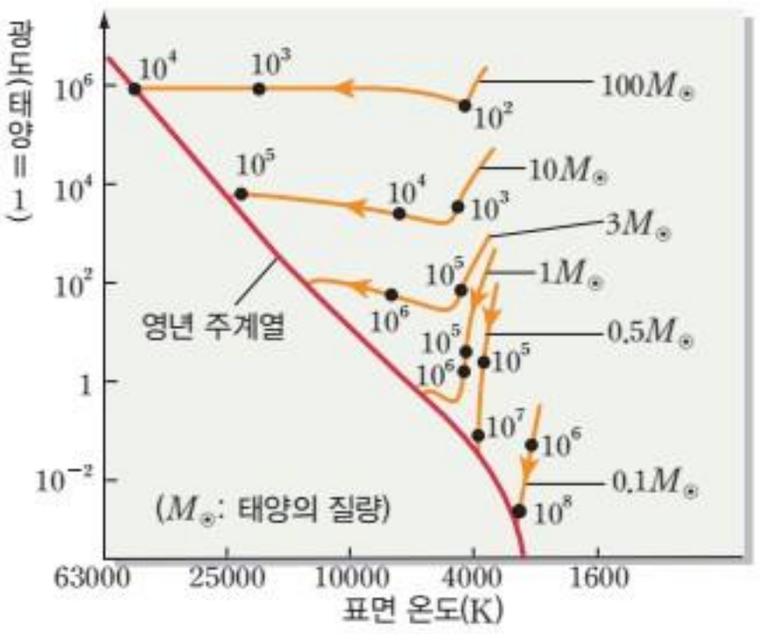
전주계열성의 진화 속도
태양과 질량이 비슷한 별이 전주계열성일 때, 별 중심부는 거의 정역학 평형 상태이므로 원시별 때처럼 빠르게 수축하지 못한다. 따라서 전주계열성은 중력 수축이 느리게 진행되며, 진화 속도도 원시별 때보다 느리다.

(3) 질량에 따른 전주계열성의 진화 경로

① 태양보다 질량이 큰 별: 중심부 온도의 상승 폭이 크고, 반지름의 감소는 작아 광도가 거의 일정하게 유지되며 주계열의 왼쪽 위에 도달한다.

② 태양과 질량이 비슷한 별: 처음에는 광도가 크게 감소하고, 이후 표면 온도가 상승하면서 주계열에 도달한다.

③ 태양보다 질량이 작은 별: 광도가 크게 감소하여 왼쪽 아래로 이동하다가 주계열에 도달한다.



▲ **질량에 따라 전주계열성이 주계열에 도달하는 데 걸리는 시간(년)과 진화 경로**

태양 질량의 0.08배 이하인 별의 진화
태양 질량의 0.08배 이하인 별은 중심부 온도가 핵융합이 가능한 약 1000만 K에 도달하지 못해 주계열성이 되지 못하며, 오랫동안 수축만 계속하여 밀도가 매우 높은 갈색왜성이 된다.

질량에 따른 전주계열성의 진화 경로 차이
별의 질량에 따라 하야시 경로만 거쳐 주계열에 도달하기도 하고, 하야시 경로 이후 헤니에이 경로를 거쳐 주계열에 도달하기도 한다.

(4) **원시별에서 주계열까지 걸리는 시간:** 질량이 클수록 내부 압력과 온도 상승이 빠르므로 진화 속도도 빠르다. 태양 질량 정도의 별은 수천만 년이 걸리는 반면, 질량이 큰 별은 백만 년 이내에 주계열에 도달한다.

중요 개념 체크

정답과 해설 171쪽

1. 전주계열 단계에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 전주계열성은 중심부에서 수소 핵융합 반응이 일어난다. ——— ( )

(2) 질량이 클수록 원시별에서 주계열성까지 진화하는 속도가 느리다. ——— ( )

2. 별이 주계열 단계에 처음 진입하는 시점을 ( ) 단계라고 한다.

2 주계열 단계

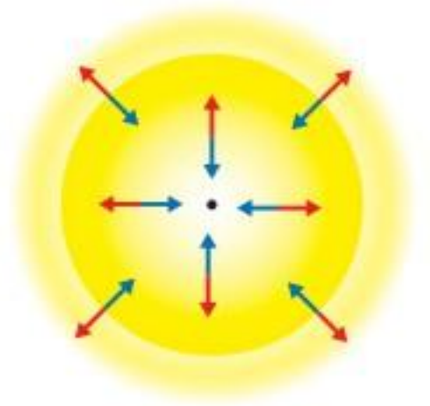
주계열 단계의 별은 중심부의 수소 핵융합 반응으로 안정적인 상태를 유지한다. 별의 질량에 따라 중심부에서 우세하게 일어나는 수소 핵융합 반응이 다르며, 에너지 전달 방식과 내부 구조도 다른 모습을 보인다.

1. 주계열 단계

(1) **주계열성:** 중심부에서 수소 핵융합 반응으로 에너지를 생산하며, 이 에너지에 의해 내부 압력과 중력이 평형을 이루는 정역학 평형 상태에 도달한 별이다.

(2) **주계열성의 내부 구조와 정역학 평형**

① 정역학 평형 상태: 별의 중심쪽으로 수축하려는 힘인 중력과 핵융합 반응으로 내부 온도가 상승하여 바깥쪽으로 팽창하려는 기체 압력이 평형을 이룬 상태이다. 이러한 평형 상태가 유지되는 동안 별은 일정한 크기를 유지한다. 정역학 평형 상태에서는 별의 중심부로 갈수록 온도가 높아져 기체 압력이 증가하므로, 안쪽에서 바깥쪽으로 압력 차에 의한 힘(기압 경도력)이 발생한다.



▲ 정역학 평형 상태

② 주계열성의 내부 구조: 별 전체가 정역학 평형 상태에 도달하면 별 내부는 매우 안정적인 구조가 되며, 반지름이 급격히 커지거나 작아지는 변화 없이 거의 일정한 상태를 유지한다. 이러한 안정적인 내부 구조는 별의 광도를 일정하게 유지한다.

(3) **주계열성의 광도와 온도**

① 별의 중심부 온도가 높을수록 핵융합 반응이 활발하게 일어나 더 많은 에너지를 방출하며, 별의 광도가 커지고 표면 온도가 높아진다.

② 별의 질량이 클수록 광도와 표면 온도가 증가하여 H−R도의 왼쪽 위에 위치한다.

(4) **주계열 단계에 머무는 기간:** 질량이 작을수록 수소 핵융합 반응이 느리고 에너지 소비량이 적어 긴 시간 동안 주계열 단계에 머무른다. 반면, 질량이 큰 별은 수소를 빠르게 소모하기 때문에 주계열 단계가 짧다.

분광형	표면 온도(K)	질량(태양 = 1)	주계열 단계에 머무는 기간(년)
O5	54000	40	100만
B0	29200	16	1000만
A0	9600	3.3	5억
F0	7350	1.7	27억
G0	6050	1.1	90억
K0	5240	0.8	140억
M0	3750	0.4	2000억

▲ 별의 질량에 따른 주계열성 수명

별의 수명과 주계열 단계

별은 일생의 대부분을 주계열 단계에 머물기 때문에 주계열 단계의 기간이 별의 수명을 결정한다.

태양의 수명

태양(G2형)은 약 100억 년 동안 주계열 단계에 머무르며, 현재 태양의 나이는 약 50억 년이므로, 앞으로 약 50억 년 더 주계열 단계에 머무른다.

2. 주계열성의 에너지원

심화 강의 82쪽

(1) 핵융합 반응

① 핵융합은 원자핵이 결합할 때 발생하는 반응으로, 결합 시 에너지가 방출되기 때문에 결합된 원자핵은 결합 전에 비해 안정한 상태가 된다. 별의 질량에 따라 어떤 종류의 핵융합 반응이 일어날지 결정되며, 질량이 작고 중심부 온도가 낮은 별일수록 핵융합 효율이 떨어진다.

② 핵융합 반응은 수소 핵융합 반응에서 시작하여 온도가 높을수록 여러 단계의 핵융합 반응을 차례로 거치면서 $H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow O \rightarrow Ne \rightarrow \cdots \rightarrow Fe$과 같이 점점 무거운 원소를 만들어낸다.

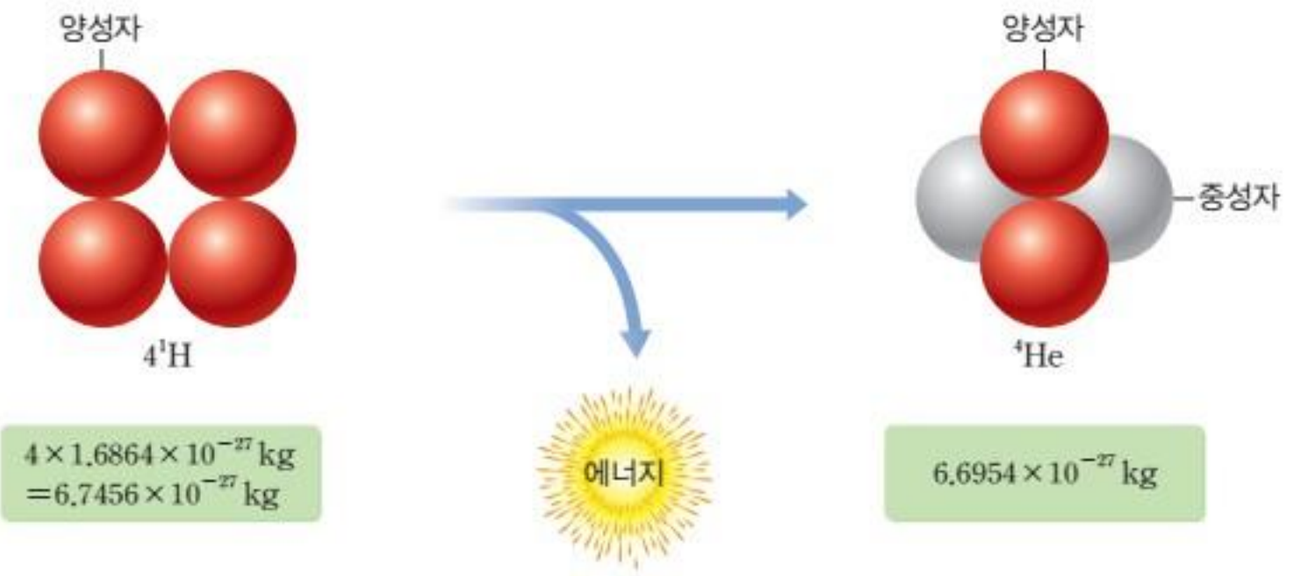
(2) **수소 핵융합 반응:** 주계열성의 중심부에서는 네 개의 수소 원자핵이 융합하여 하나의 헬륨 원자핵을 형성하는 수소 핵융합 반응이 일어난다.

① 수소 핵융합 반응은 주계열성의 중심부 온도가 약 1000만 K 이상일 때 일어난다.

② 수소 핵융합 반응은 주계열성의 주된 에너지원이며, 별 내부의 압력과 온도를 일정하게 유지한다.

(3) **질량−에너지 등가 원리:** 수소 핵융합 반응에서 생성된 헬륨 원자핵의 질량은 반응에 참여한 수소 원자핵 4개의 질량을 합한 값보다 약 0.7 % 작다. 이 질량 결손은 아인슈타인의 질량−에너지 등가 원리에 따라 에너지로 전환되어 빛과 열의 형태로 방출되며, 별의 광도와 내부 에너지를 유지하는 데 사용된다.

심화 수소 핵융합 반응



❶ 수소 핵융합 반응에서 수소 원자핵 4개가 융합하여 헬륨 원자핵 1개를 생성한다. 이 과정에서 약 0.7 %만큼의 질량이 감소한다.

- 질량 감소량: $(6.7456 - 6.6954) \times 10^{-27} = 5.02 \times 10^{-29}\,kg$
- 질량 감소 비율: $\frac{5.02 \times 10^{-29}}{6.7456 \times 10^{-27}} \approx 0.7\,\%$

❷ 감소한 질량은 질량−에너지 등가 원리에 따라 에너지로 변환되며, 이 에너지는 복사 에너지 형태로 외부로 방출된다.

❸ 주계열성의 중심부에서 일어나는 수소 핵융합 반응은 별의 에너지원이며, 질량 결손으로 생성된 에너지가 별의 내부 구조를 안정시키고 외부로 복사되어 관측 가능한 빛으로 나타난다.

핵융합 반응이 별 중심부에서만 일어나는 까닭

핵융합은 양성자들이 전기적 반발력을 극복하고 서로 충분히 가까워져야 일어나는데, 이를 위해서는 약 1000만 K 이상의 고온과 강한 압력이 필요하다. 이러한 조건을 만족하는 영역은 별 내부에서도 중심부에 한정되며, 바깥쪽으로 갈수록 온도와 압력이 낮아져 핵융합 반응이 일어나지 않는다. 중심부에서 생성된 에너지는 복사와 대류를 통해 외부로 전달된다.

질량−에너지 등가 원리

질량−에너지 등가 원리는 질량과 에너지가 서로 전환될 수 있다는 의미이다. 핵융합 반응으로 만들어지는 에너지 E는 감소한 질량 Δm에 빛의 속도 c의 제곱을 곱한 값이다.

$$E = \Delta mc^2$$

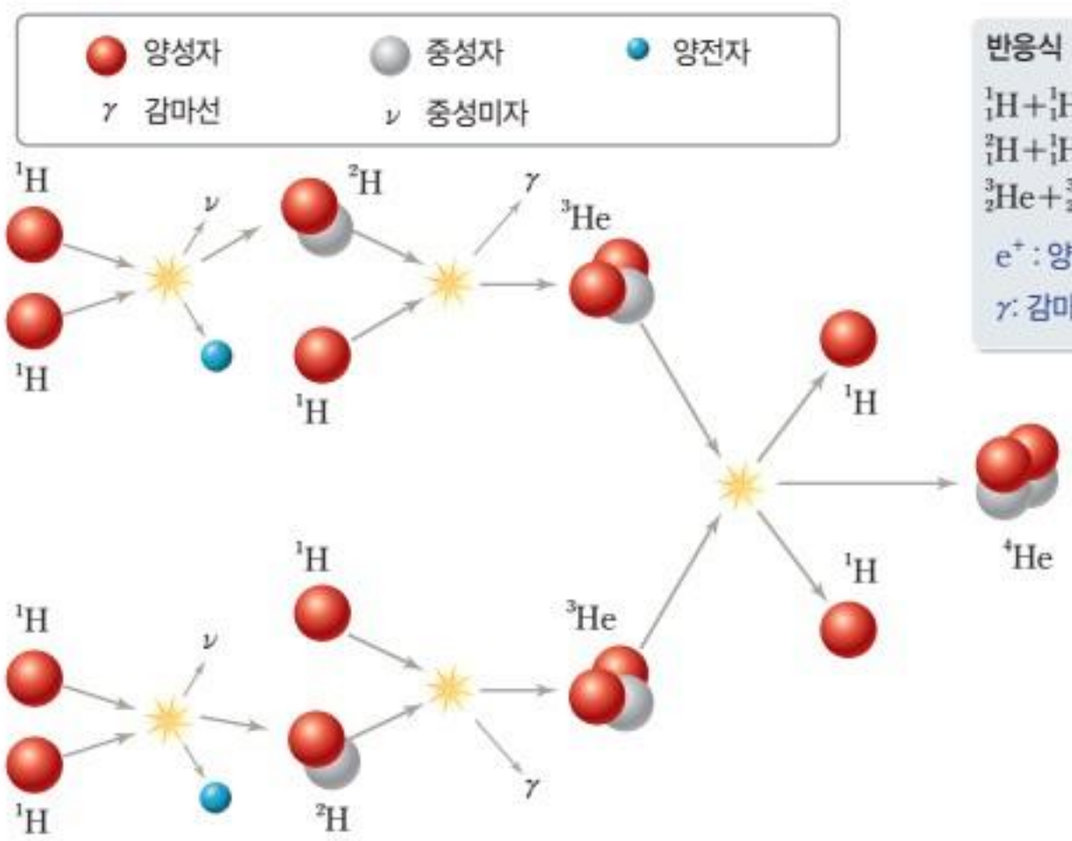
수소 핵융합과 원자력 발전의 차이

수소 핵융합은 가벼운 수소 원자핵이 결합하여 헬륨을 생성하면서 에너지를 방출하는 반응이고, 원자력 발전은 무거운 원자핵인 우라늄 등이 분열되어 더 가벼운 원자핵과 함께 에너지를 방출하는 반응이다. 두 반응 모두 질량 결손에 따른 에너지 방출이라는 공통점을 가지지만, 핵융합은 핵분열보다 훨씬 많은 에너지를 생성하며, 방사능 폐기물이 거의 없어 더 깨끗한 에너지원으로 평가된다. 이에 과학자들은 핵융합 발전을 실용화하여 미래의 에너지원으로 사용하기 위해 노력하고 있다.

3. 수소 핵융합 반응의 종류

(1) **양성자·양성자 연쇄 반응(P−P 반응):** 중심부 온도가 약 1800만 K 이하인 별에서 우세하게 일어나는 반응이다. 총 6개의 수소 원자핵(양성자)이 차례로 반응하여 최종적으로 1개의 헬륨 원자핵(^4He)과 2개의 수소 원자핵, 에너지(감마선, 중성미자, 양전자 포함)를 생성하는 과정이다.

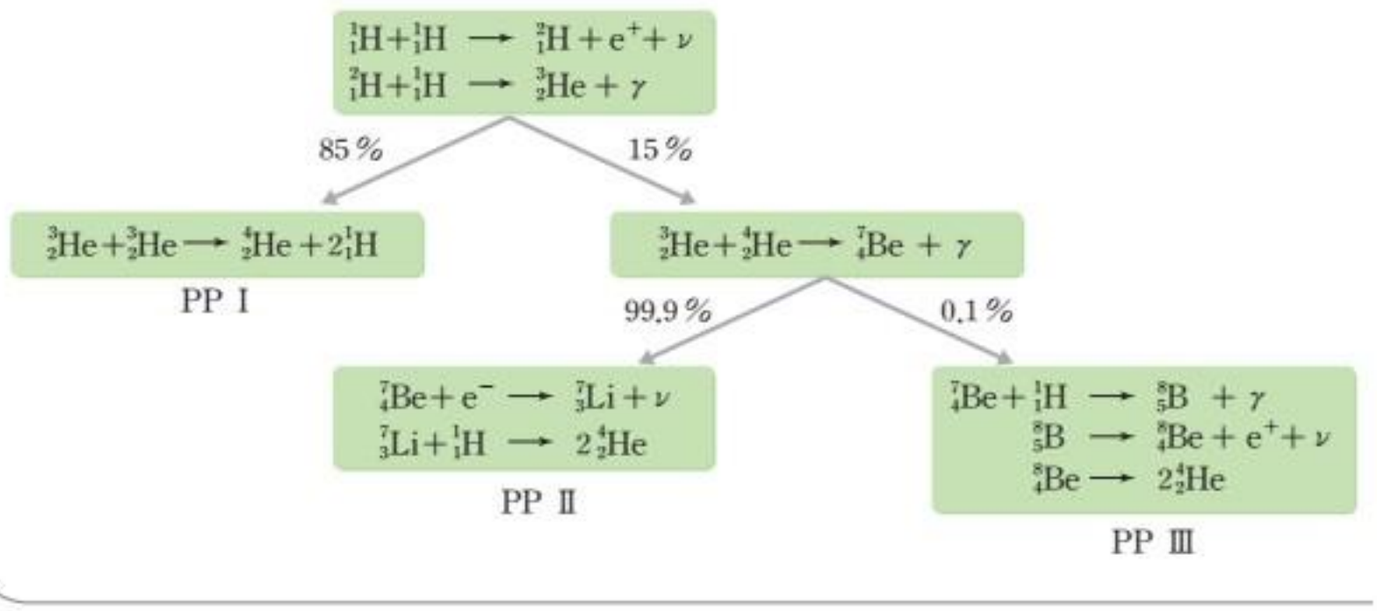
1단계	2개의 수소 원자핵(양성자)이 결합하여 1개의 중수소핵(^2H)을 생성하며, 이때 양전자(e^+)와 중성미자(ν)도 함께 방출된다.
2단계	생성된 중수소핵(^2H)은 다시 1개의 수소 원자핵과 결합하여 헬륨−3 원자핵(^3He)을 생성하고 감마선(γ)을 방출한다.
3단계	헬륨−3 원자핵 2개가 결합하여 헬륨−4 원자핵(^4He)을 만들고, 2개의 수소 원자핵이 다시 방출된다.



▲ 양성자·양성자 연쇄 반응(P−P 반응)

심화 헬륨이 생성되는 세 가지 경로

양성자·양성자 연쇄 반응으로 헬륨이 생성되는 과정에는 PP Ⅰ, PP Ⅱ, PP Ⅲ이 있다. 태양에서는 주로 PP Ⅰ이 발생하고, 다음으로는 PP Ⅱ가 많이 발생하며, PP Ⅲ은 매우 드물게 일어난다. 각 경로의 발생 확률과 중심부 온도에 따라 별 내부에서 우세하게 일어나는 반응이 달라진다.



중성미자를 통한 에너지 방출

수소 핵융합 반응 중 하나인 P−P 반응에서는 양성자들이 결합하면서 중성미자(ν)가 생성된다. 중성미자는 질량이 매우 작고 전기적으로 중성이며, 다른 물질과 거의 상호작용하지 않기 때문에 별 내부 물질에 방해받지 않고 빠르게 외부로 빠져나갈 수 있다. 이 과정에서 중성미자는 일부의 에너지를 함께 운반하며, 태양의 경우 전체 에너지 생성량 중 약 2 %가 중성미자를 통해 우주로 빠져나간다. 중성미자는 지구에서도 검출 가능하며, 이를 통해 태양 내부에서 실제로 핵융합 반응이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

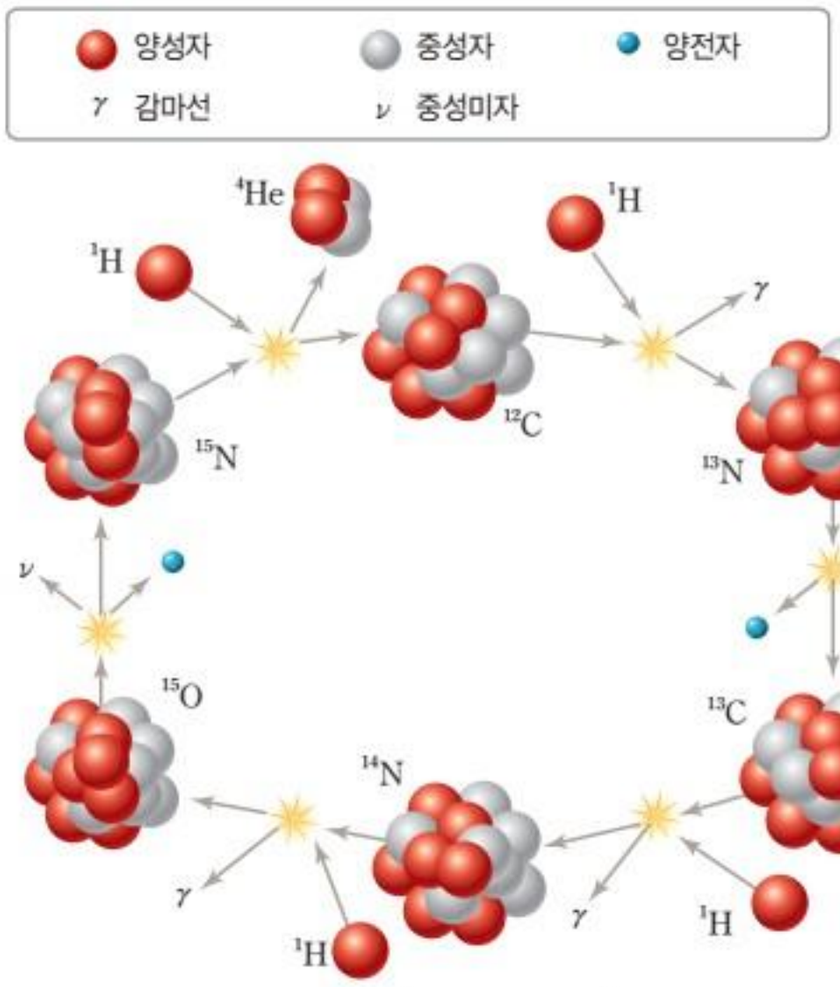
양전자를 통한 물질−반물질 소멸과 에너지 방출

P−P 반응의 첫 번째 단계에서 수소 원자핵 2개가 결합하여 중수소핵을 형성할 때, 양전자(e^+)가 함께 생성된다. 양전자는 전자의 반입자로 양의 전하를 가졌으며, 생성 직후 주변에 있는 전자(e^-)와 만나면 물질과 반물질의 소멸 반응이 일어난다. 이 소멸 과정에서 2개의 감마선이 방출되며, 이는 별 내부 에너지의 일부가 된다. 양전자는 매우 짧은 시간 동안만 존재하지만, 그 소멸 반응은 별의 복사 에너지 생성에 중요한 역할을 한다. 이러한 반물질 소멸은 우주에서 물질이 에너지로 전환되는 대표적인 예이다.

(2) **탄소·질소·산소 순환 반응(CNO 순환 반응):** 중심부 온도가 약 1800만 K보다 높은 별에서 우세하게 일어나는 반응이다. 4개의 수소 원자핵이 결합하여 1개의 헬륨 원자핵을 생성하는 과정으로 탄소, 질소, 산소가 촉매 역할을 한다.

① 반응에 참여하는 물질은 양성자 4개이며, 핵융합으로 헬륨 원자핵 1개가 만들어진다. 탄소는 반응 전후 동일하게 존재하므로 촉매 역할을 하며, 반응이 반복되는 동안 계속 순환한다.

② 반응의 중간 단계에서는 탄소, 질소, 산소 원자핵이 연속적으로 변환되며, 반응 과정에서 감마선, 중성미자, 양성자 등이 방출되어 별에 에너지를 공급한다.



▲ 탄소·질소·산소 순환 반응(CNO 순환 반응)

반응식

$^{12}_{6}C + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{13}_{7}N + \gamma$

$^{13}_{7}N \longrightarrow {}^{13}_{6}C + e^{+} + \nu$

$^{13}_{6}C + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{14}_{7}N + \gamma$

$^{14}_{7}N + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{15}_{8}O + \gamma$

$^{15}_{8}O \longrightarrow {}^{15}_{7}N + e^{+} + \nu$

$^{15}_{7}N + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{4}_{2}He$

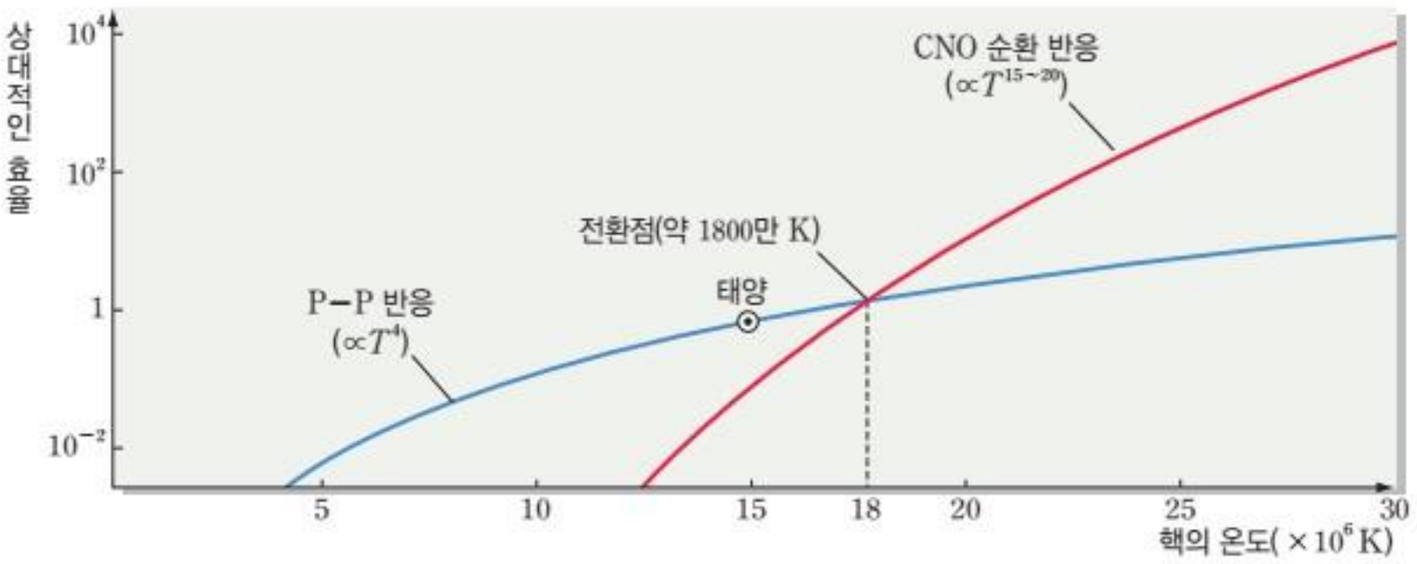
P-P 반응과 CNO 순환 반응의 비교

CNO 순환 반응에서 탄소 원자핵, 질소 원자핵, 산소 원자핵은 촉매 역할을 하므로, 핵융합 반응에 의해 최종적으로 생성되는 원자핵의 종류는 P-P 반응과 같이 헬륨 원자핵이다.

4. 수소 핵융합 반응의 효율

(1) 태양 질량의 약 1.5배 이하인 주계열 하단부의 별은 중심부 온도가 약 1800만 K 이하로, P-P 반응이 우세하게 일어난다.

(2) 태양 질량의 약 1.5배 이상인 주계열 상단부의 별은 중심부 온도가 약 1800만 K 이상으로, CNO 순환 반응이 우세하게 일어난다.



▲ 별 중심부의 온도에 따른 수소 핵융합 반응의 효율

CNO 순환 반응이 높은 온도에서 나타나는 까닭

CNO 순환 반응은 탄소, 질소, 산소와 같은 무거운 원자핵을 이용하는 핵융합 반응이다. 이 과정에서 무거운 원자핵과 양성자가 결합해야 하므로 강한 전기적 반발력인 쿨롱 장벽을 극복해야 한다. 이를 위해서는 별 중심부의 온도가 약 1800만 K 이상이어야 하며, 이는 태양보다 질량이 큰 별에서 가능하다. 반면 P-P 반응은 양성자끼리의 충돌로, 쿨롱 장벽이 낮아 1000만 K 정도에서도 충분히 일어난다.

5. 주계열성의 내부 구조와 에너지 전달

(1) **태양 질량의 약 1.5배 이하인 주계열성:** 중심부에서는 복사, 바깥층에서는 대류를 통해 에너지를 전달한다.

① 중심핵(복사핵): 주로 양성자·양성자 연쇄 반응에 의한 수소 핵융합 반응이 일어나며, 대류보다 복사가 우세하다.

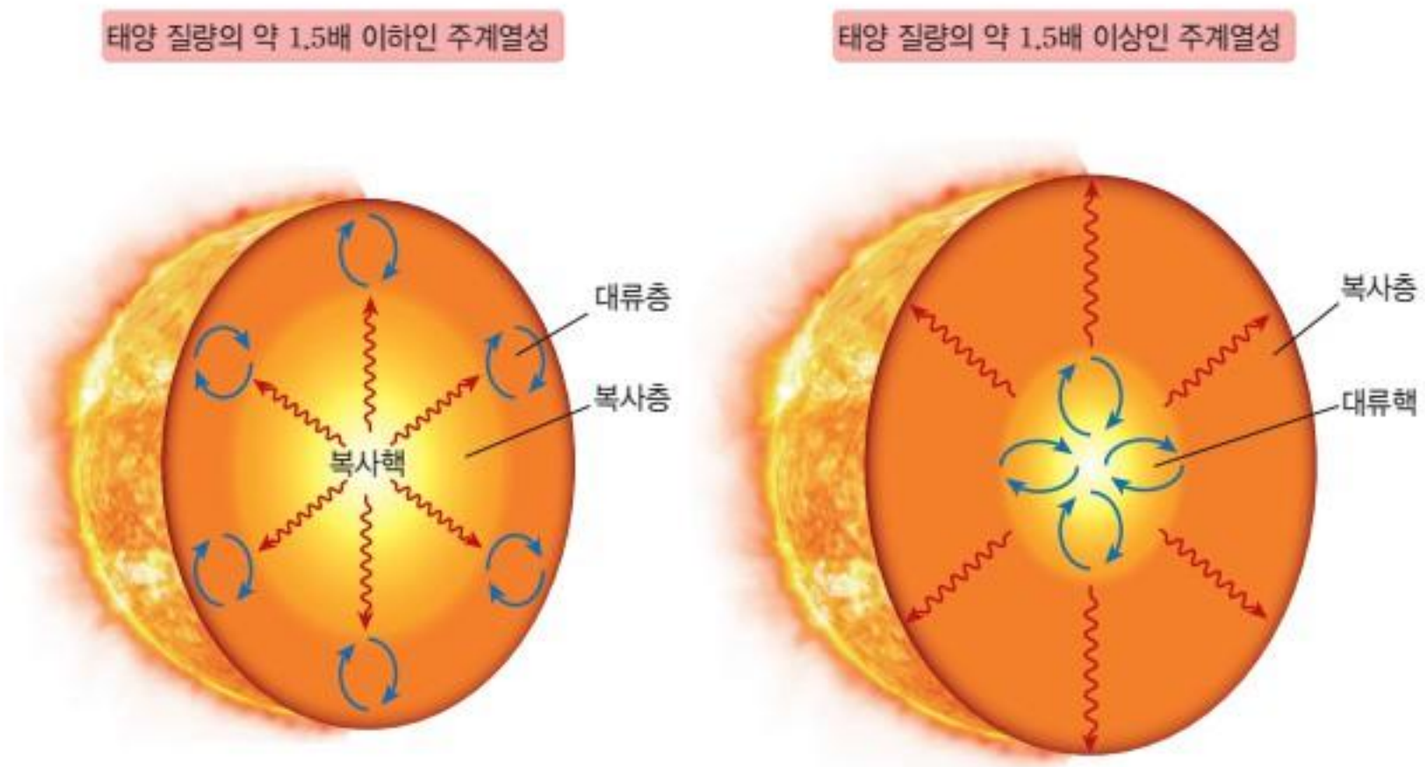
② 복사층: 중심부에서 생성된 에너지가 주로 복사의 형태로 전달되는 영역으로, 별의 중심으로부터 별 반지름의 약 70 %까지 복사층에 해당한다.

③ 대류층: 별의 표면에 가까워짐에 따라 온도가 급격하게 낮아지는 영역이며, 대류에 의한 에너지 전달이 우세하다.

(2) **태양 질량의 약 1.5배 이상인 주계열성:** 중심부에서는 대류, 바깥층에서는 복사를 통해 에너지를 전달한다.

① 중심핵(대류핵): 주로 탄소·질소·산소 순환 반응에 의한 수소 핵융합 반응이 일어나며, 중심부로 갈수록 에너지 생산량이 급격하게 높아져 깊이에 따른 온도 차가 커 대류에 의한 에너지 전달이 우세하다.

② 복사층: 중심부에서 생성된 에너지가 주로 복사의 형태로 전달되는 영역이다. 질량이 작은 별에 비해 별 내부의 온도가 높아 복사에 의한 에너지 전달이 우세하다.



▲ 주계열성의 질량에 따른 내부에서의 에너지 전달 방식

복사와 대류에 의한 에너지 전달 방식 비교

별 내부에서의 복사는 고온에서 생성된 광자가 주변 물질에 흡수되고 다시 방출되는 과정을 반복하면서 에너지를 전달하는 방식으로, 물질 자체는 이동하지 않는다. 반면 대류는 온도 차에 의해 밀도가 달라진 기체가 실제로 이동하며 에너지를 전달하는 방식이다. 대류는 깊이에 따른 온도 변화가 크고, 광자의 이동이 자주 방해받는 불투명한 환경에서 우세하게 나타난다. 반대로 깊이에 따른 온도 변화가 작거나 물질이 빛에 대해 상대적으로 투명할수록 광자는 산란과 흡수가 적어 멀리 이동할 수 있으므로, 복사에 의한 에너지 전달이 더 효율적이다.

대류에 의한 에너지 전달의 예

태양은 광구 부근의 바깥층에서 깊이에 따른 온도 변화가 크기 때문에, 대류에 의한 에너지 전달이 우세하여 대류층인 쌀알 무늬가 나타난다.

질량이 매우 작은 별의 내부 구조

태양 질량의 약 0.26배 이하인 별은 중심부 온도가 낮아 복사 효율이 낮고, 불투명도가 크기 때문에 별 전체가 대류층으로 구성된다.

중요 개념 체크

정답과 해설 171쪽

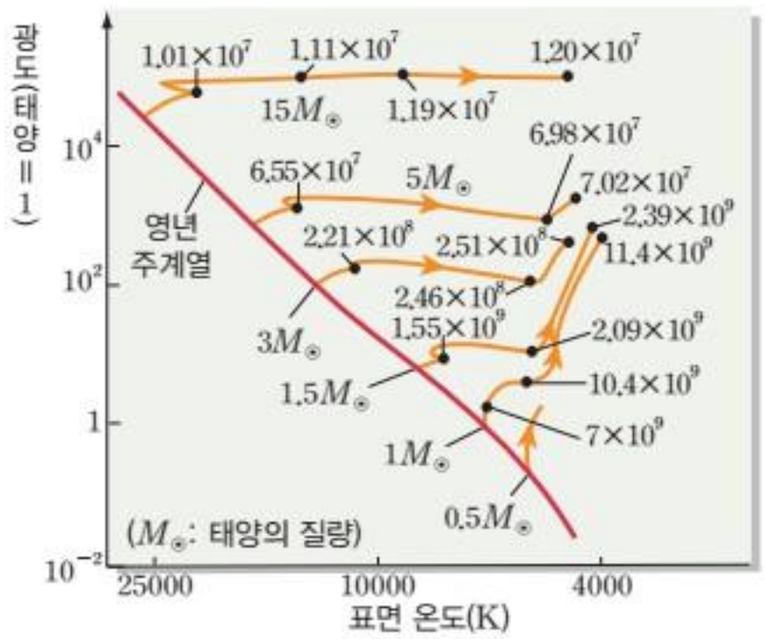
1. 주계열 단계에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.
   (1) 주계열성은 내부 기체 압력과 중력이 평형을 이루고 있다. ——— ( )
   (2) 별의 질량이 클수록 주계열 단계에 머무는 기간이 길다. ——— ( )
2. 태양 질량의 약 1.5배 이상인 별에서는 주로 (P−P, CNO 순환) 반응이 일어난다.
3. 태양 질량의 약 1.5배 이상인 별의 중심에서는 주로 (대류, 복사)로, 바깥층에서는 주로 (대류, 복사)로 에너지를 전달한다.

3 주계열 이후의 단계

별은 중심핵의 수소가 고갈되면 주계열을 벗어나 새로운 경로를 따라 이동한다. 이때부터의 변화를 후주계열 단계라 하며, 별의 질량에 따라 진화 경로가 달라진다.

1. 거성 단계

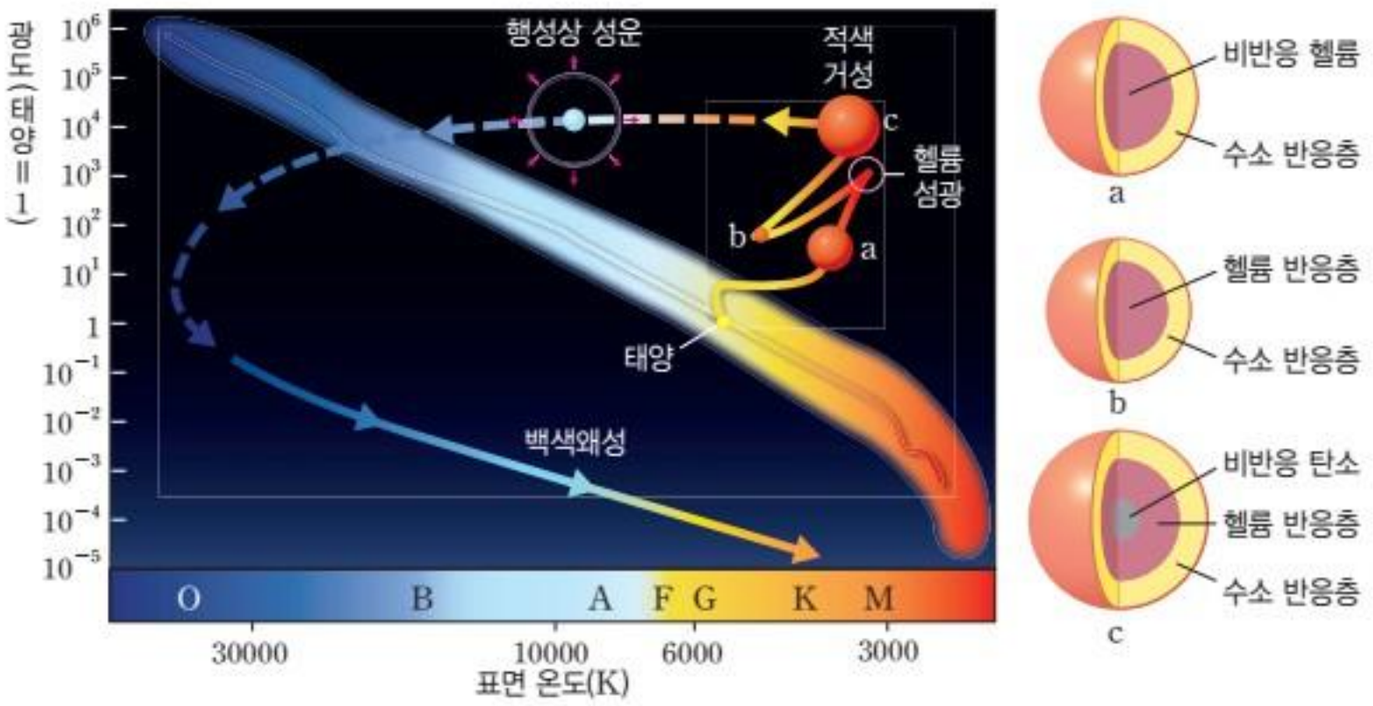
(1) **적색거성과 초거성:** 중심핵에서 수소 핵융합 반응이 끝나면, 내부 압력이 감소하여 별은 중력에 의해 다시 수축하여 에너지가 발생한다. 이 에너지에 의해 헬륨 중심핵 주위에 남아 있던 수소 껍질의 온도가 상승하여 핵융합 반응이 시작된다. 이에 따라 별의 바깥층이 크게 팽창하여 반지름이 커지고 광도가 증가하지만, 표면 온도는 낮아져 거성이 된다. 이때, 태양과 질량이 비슷한 별은 적색거성이 되며, 태양보다 질량이 매우 큰 별은 적색거성보다 더 크고 밝은 초거성이 된다.



▲ **질량에 따라 주계열성이 거성이 되는 데 걸리는 시간(년)과 진화 경로** 질량이 클수록 진화 속도가 빠르다.

(2) **헬륨 핵융합 반응:** 헬륨으로 이루어진 중심핵은 계속 중력 수축하며 온도가 상승한다. 이후 중심부 온도가 약 1억 K 이상이 되면, 헬륨이 탄소와 산소를 형성하는 헬륨 핵융합 반응이 시작되어 에너지가 방출되며, 광도가 다시 안정된다.

(3) **헬륨 섬광:** 태양 질량의 0.5배~2.25배 정도인 별에서는 중심핵이 전자 축퇴 상태에 있어 온도만 급격히 상승하다가, 헬륨 핵융합 반응이 갑자기 시작되는 헬륨 섬광이 발생한다. 이때 생성된 에너지는 중심핵을 팽창시키는 데 사용되며, 수소 껍질의 핵융합은 약해져 별의 광도가 일시적으로 감소한다. 동시에 별의 바깥층은 수축하고, 표면 온도는 상승하여 H−R도에서 약간 왼쪽 아래로 이동한다.



▲ **태양과 질량이 비슷한 별의 진화 단계별 중심부의 내부 구조**

질량이 매우 작은 별의 진화
태양 질량의 0.1배 정도의 매우 작은 별은 중심부 온도가 충분히 상승하지 못하고, 수소 껍질의 연소 단계를 거치지 않기 때문에 적색거성으로 진화하지 않는다. 이 별은 수소가 고갈되면 서서히 식어가며 어두워진다.

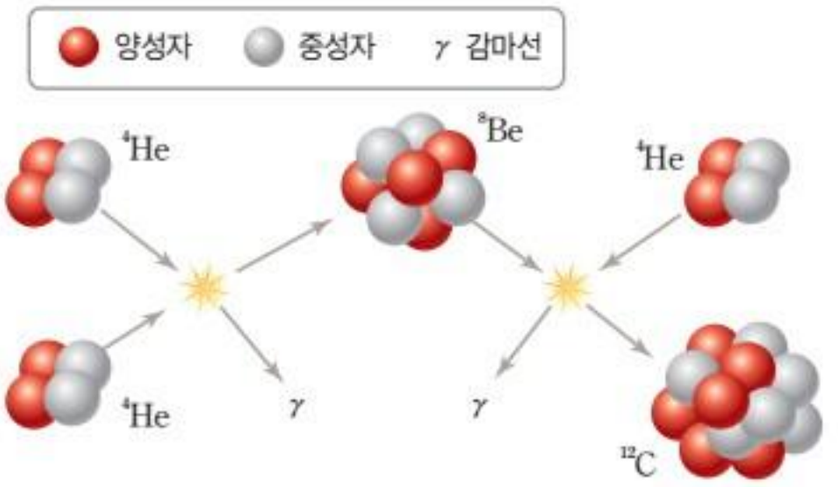
거성의 크기
오리온자리의 초거성인 베텔게우스가 태양의 위치에 있다면, 그 크기는 목성의 공전 궤도까지 이를 수 있다.



전자 축퇴 상태
물질이 극도로 높은 밀도에 도달했을 때, 전자들이 양자역학적인 성질 때문에 더 이상 좁은 공간으로 압축되지 않으려는 상태이다. 질량이 큰 별에서는 중심핵이 수축하면서 높은 온도와 밀도에 도달하더라도, 그 내부가 전자 축퇴 상태가 되지 않기 때문에 헬륨 섬광이 일어나지 않는다.

심화 헬륨 핵융합 반응

❶ 헬륨 원자핵 2개가 반응하여 베릴륨-8을 형성한다. 하지만 이 입자는 매우 불안정하여 곧 헬륨 원자핵 2개로 다시 분리된다. 그러나 거성 단계의 중심부는 헬륨이 많고 온도가 높아, 베릴륨이 다른 헬륨 원자핵과 빠르게 반응하여 탄소-12를 만들 수 있다.



반응식

$^4_2He + ^4_2He \longrightarrow ^8_4Be + \gamma$

$^8_4Be + ^4_2He \longrightarrow (^{12}_6C) + \gamma$

$(^{12}_6C) \longrightarrow ^{12}_6C$

($^{12}_6C$)은 들뜬상태의 탄소 원자핵

❷ 별 중심부 온도가 충분히 고온이 되면 헬륨 핵융합 반응이 활발하게 일어나며, 탄소가 생성된 이후에도 탄소 원자핵이 다시 헬륨 원자핵과 반응하여 산소-16이 만들어질 수도 있다. 태양과 질량이 비슷한 별은 중심부에서 헬륨 핵융합 반응을 통해 탄소와 산소까지 생성할 수 있다.

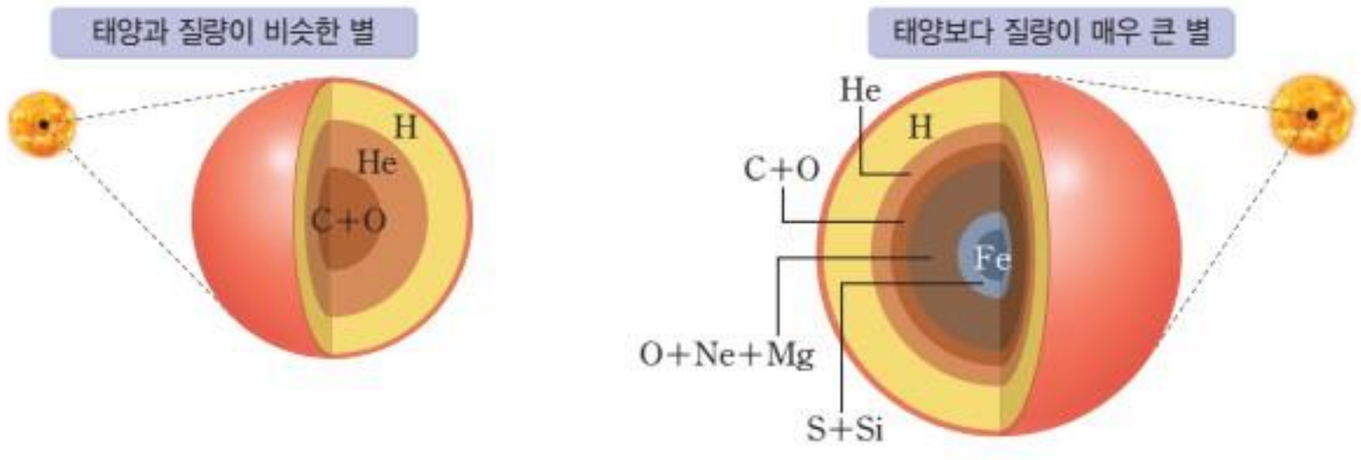
$$^{12}_6C + ^4_2He \rightarrow ^{16}_8O$$

별의 내부에서 일어나는 핵융합 반응과 주요 생성물

핵융합 반응	주요 생성물
수소	헬륨
헬륨	탄소, 산소
탄소	산소, 네온, 나트륨, 마그네슘
네온	산소, 마그네슘
산소	마그네슘, 황, 규소
규소	니켈, 철

2. 거성 이후의 단계

심화 강의 83쪽



▲ 별의 질량에 따른 주계열 단계 이후 내부 구조

(1) 태양과 질량이 비슷한 별

① 맥동 변광성: 헬륨 핵융합 이후 별의 중심부 온도는 탄소 핵융합 반응이 일어날 정도로 상승하지는 못한다. 따라서 별은 수축과 팽창을 반복하는 불안정한 상태가 되며, 반지름과 광도가 주기적으로 변하는 맥동 변광성이 된다.

② 행성상 성운과 백색왜성: 수축과 팽창의 반복으로 별의 바깥층 물질이 우주 공간으로 방출되어 행성상 성운이 형성되고, 중심부는 탄소와 산소로 이루어진 크기가 작고 밀도가 높은 백색왜성이 된다.

행성상 성운

행성상 성운은 과거 관측 기술이 발달하기 전에는 기체로 된 행성처럼 보였기 때문에 붙여진 이름이다. 행성상 성운은 일반적으로 초당 20 km~30 km 정도의 속도로 팽창하며, 약 1만~2만 년 정도 유지되는 것으로 알려져 있다.

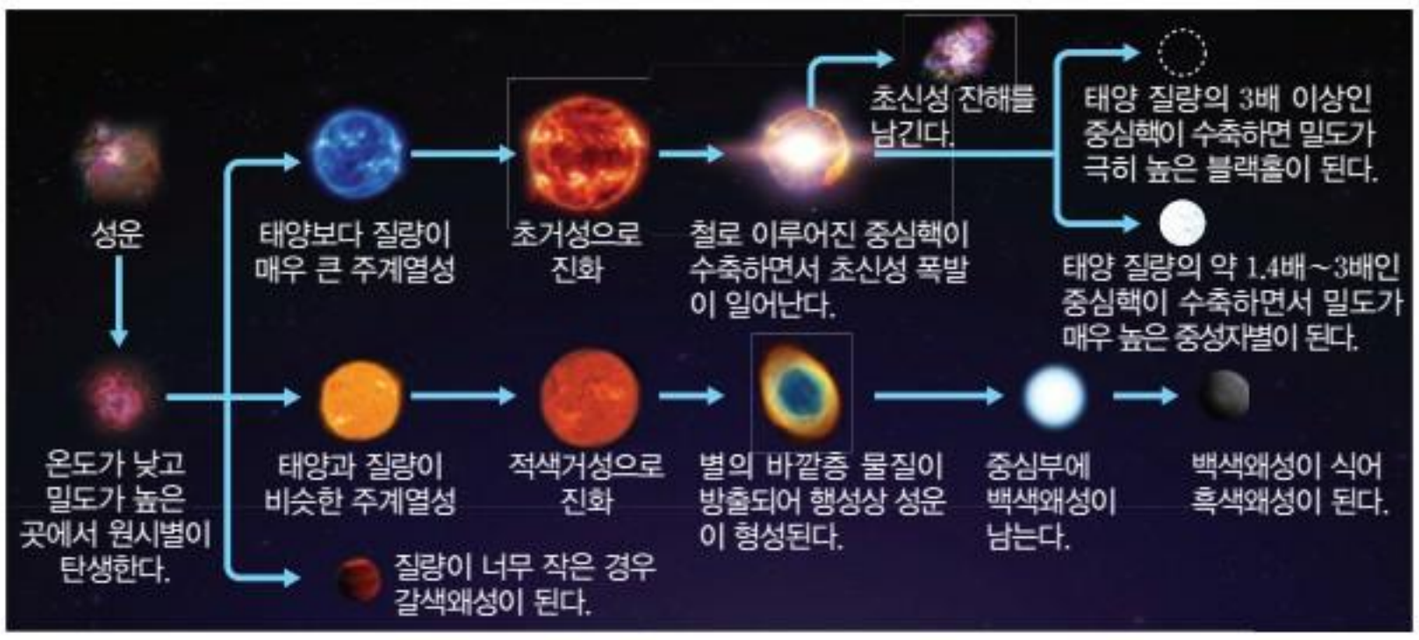
(2) 태양보다 질량이 매우 큰 별

① 무거운 원소의 핵융합: 헬륨 핵융합 이후 별의 중심부 온도가 계속 상승하여 탄소, 네온, 산소, 규소의 핵융합 반응이 차례로 일어나며, 이 반응은 점점 빠르게 진행된다. 이때 별 내부는 바깥쪽부터 수소, 헬륨, 탄소, 산소 등의 층이 겹겹이 쌓인 양파껍질과 같은 구조를 가지고, 중심부에는 철로 된 핵이 남는다.

② 초신성 폭발: 철은 핵융합 반응을 하지 않기 때문에 중심부는 중력 수축으로 온도가 빠르게 상승한다. 이로 인해 바깥층에서 짧은 시간에 연쇄적인 핵융합 반응이 폭발적으로 일어나고, 결국 별은 초신성 폭발을 일으킨다. 이 과정에서 철보다 무거운 원소가 만들어지며, 많은 양의 에너지와 무거운 원소가 우주 공간으로 흩어져 초신성 잔해를 남긴다. 이후 중심부는 심하게 수축하면서 중성자로 이루어진 중성자별이 된다. 만약 중심부의 질량이 이보다 훨씬 더 크면 중력이 매우 커서 빛도 빠져나올 수 없는 블랙홀이 된다.

초기 질량(태양 질량 = 1)	최종 진화 단계
< 0.01	행성
0.01 ~ 0.08	갈색왜성
0.08 ~ 0.25	대부분 헬륨으로 이루어진 백색왜성
0.25 ~ 8	대부분 탄소와 산소로 이루어진 백색왜성
8 ~ 10	산소, 네온, 마그네슘으로 이루어진 백색왜성
10 ~ 40	초신성 폭발 뒤 중성자별
> 40	초신성 폭발 뒤 블랙홀

▲ 별의 초기 질량에 따른 최종 진화 단계



▲ 별의 초기 질량에 따른 진화 과정

3. 물질의 순환

별이 진화하면서 생성한 물질은 행성상 성운이나 초신성 폭발을 통해 우주 공간으로 방출되며, 이후 다른 별의 탄생에 사용되는 순환 과정을 거친다.

중요 개념 체크

정답과 해설 171쪽

1. 별은 거성 단계에서 수소 껍질의 핵융합 반응으로 반지름이 (커진다, 작아진다).
2. 주계열 이후의 단계에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.
   (1) 중심핵의 온도가 약 1억 K 이상이 되면 헬륨 핵융합 반응이 시작된다. ── ( )
   (2) 주계열 단계 이후 별의 중심핵에서는 철보다 무거운 원소가 생성된다. ── ( )
   (3) 태양보다 질량이 매우 큰 별은 진화의 최종 단계에서 백색왜성이 된다. ── ( )

초신성
초신성은 순간적으로 매우 밝은 빛을 내며, 이 과정에서 우리 눈에는 마치 새로운 별이 나타난 것처럼 관측되어 초신성이라 이름 붙여졌다.

찬드라세카르 한계
별이 백색왜성이 되기 위해서는 중심부의 질량이 태양 질량의 약 1.4배보다 작아야 하며, 이를 찬드라세카르 한계라고 한다. 별 중심부의 질량이 태양 질량의 약 1.4배 ~ 3배이면 중성자별, 태양 질량의 약 3배보다 크면 블랙홀이 된다.

백색왜성, 중성자별, 블랙홀의 밀도 비교
별의 질량이 클수록 진화 과정에서 중력 수축이 더욱 강하게 일어나며, 물질을 지탱하는 압력의 한계에 따라 최종적으로 형성되는 천체의 밀도가 달라진다. 전자 축퇴압으로 지탱되는 백색왜성은 상대적으로 밀도가 낮은 편이지만, 중성자 축퇴압으로 유지되는 중성자별은 훨씬 더 높은 밀도를 갖는다. 블랙홀은 축퇴압마저 극복한 채 물질이 한 점으로 수렴하기 때문에, 이론적으로는 무한대에 가까운 밀도를 가진다.

흑색왜성
흑색왜성은 백색왜성이 복사 에너지를 거의 다 잃어 표면 온도가 주변의 우주 온도와 비슷해진 천체이다. 백색왜성 상태가 유지되는 기간은 대략 수백 억 ~ 수백 조 년 이상일 것으로 예상되므로, 흑색왜성은 현재 이론상으로만 존재하는 천체이다.

TOP 심화 강의

태양 에너지의 근원은 무엇이며, 앞으로 얼마나 더 빛날 수 있을까?

1 태양 에너지의 근원에 대한 인식의 변화

(1) **석탄 덩어리**: 19세기 사람들은 태양이 석탄 덩어리라고 생각하고 태양의 수명을 계산하였다.

- 석탄과 같은 물질이 연소로 방출하는 에너지 밀도는 약 $3\times10^{7}\ \mathrm{J/kg}$이다.
- 태양이 석탄과 같은 화학 연료라고 가정하고, 태양의 질량 $2\times10^{30}\ \mathrm{kg}$이 방출할 수 있는 에너지는 $(2\times10^{30}\ \mathrm{kg})\times(3\times10^{7}\ \mathrm{J/kg})=6\times10^{37}\ \mathrm{J}$이다. 태양의 광도를 $3.9\times10^{26}\ \mathrm{W}$라고 할 때, 태양이 이 에너지를 모두 방출하는 데 걸리는 시간(t)은 다음과 같다.

$$t=\frac{6\times10^{37}\ \mathrm{J}}{3.9\times10^{26}\ \mathrm{W}}\approx1.54\times10^{11}\ \mathrm{s}\approx4.88\times10^{3}\ \mathrm{year}$$

이 외에도 연소에 필요한 산소를 고려하는 등 다양한 연구를 통한 계산 결과 태양의 수명은 2000년~5000년 정도로, 당시 알려진 지구의 나이보다도 적었다.

(2) **중력 수축 에너지**: 19세기에 열역학과 관련한 연구가 활발해지면서 헬름홀츠와 켈빈은 중력 수축 에너지가 태양 에너지의 근원이라고 설명하였다. 태양의 반지름 $7\times10^{8}\ \mathrm{m}$와 중력 상수 G를 이용하여 계산한 태양의 수명(t)은 다음과 같다.

$$E=\frac{3}{5}\frac{GM^{2}}{R}=\frac{3}{5}\frac{(6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^{2}kg^{-2}})(2\times10^{30}\ \mathrm{kg})^{2}}{7\times10^{8}\ \mathrm{m}}\approx2.29\times10^{41}\ \mathrm{J}$$

$$t=\frac{2.29\times10^{41}\ \mathrm{J}}{3.9\times10^{26}\ \mathrm{W}}\approx5.87\times10^{14}\ \mathrm{s}\approx1.86\times10^{7}\ \mathrm{year}$$

계산 결과 태양의 수명은 수천만 년 정도로 길어졌지만, 방사성 원소를 이용하여 계산한 지구의 나이가 수십억 년이라는 것이 밝혀지면서 중력 수축 에너지로는 태양 에너지의 근원을 설명할 수 없게 되었다.

중력 수축 에너지

별의 질량을 M, 별의 반지름을 R, 중력 상수를 G라고 할 때, 중력 수축 에너지는 다음과 같다.

$$E=\frac{3}{5}\frac{GM^{2}}{R}$$

단, 이 식은 균일한 밀도의 구형 천체가 수축을 통해 별의 형태를 갖추고 중심까지 수축이 완료되었을 때 방출하는 중력 수축 에너지를 근사한 식이다.

2 태양의 에너지원과 앞으로 남은 수명

아인슈타인은 질량-에너지 등가 원리를 통해 질량이 에너지로 전환될 수 있음을 밝혀내었고, 이후 수소 핵융합 반응이 태양 에너지의 근원이라는 이론이 정립되었다.

(1) 수소 핵융합 반응을 통한 질량 결손은 수소 질량의 약 0.7 %이다. 또한, 별 중심부에서만 핵융합 반응이 일어날 정도로 온도가 높으므로, 태양 질량의 약 10 %만 핵융합 반응에 사용된다. 따라서 태양이 수소로만 이루어져 있다고 가정하면 태양 전체에서 일어나는 수소의 질량 결손은 $(2\times10^{30}\ \mathrm{kg})\times0.1\times0.007=1.4\times10^{27}\ \mathrm{kg}$이다.

(2) 빛의 속도를 $3\times10^{8}\ \mathrm{m/s}$라고 할 때, 태양의 수명($t$)은 질량-에너지 등가 원리로 계산할 수 있다.

$$E=\Delta mc^{2}=(1.4\times10^{27}\ \mathrm{kg})\times(3\times10^{8}\ \mathrm{m/s})^{2}=1.26\times10^{44}\ \mathrm{J}$$

$$t=\frac{1.26\times10^{44}\ \mathrm{J}}{3.9\times10^{26}\ \mathrm{W}}\approx3.23\times10^{17}\ \mathrm{s}\approx1.0\times10^{10}\ \mathrm{year}$$

(3) 태양은 약 100억 년 동안 현재의 광도를 유지할 수 있으므로, 앞으로 태양은 주계열 단계에서 약 50억 년 동안 현재와 같은 에너지를 방출할 수 있다.

TOP 심화 강의

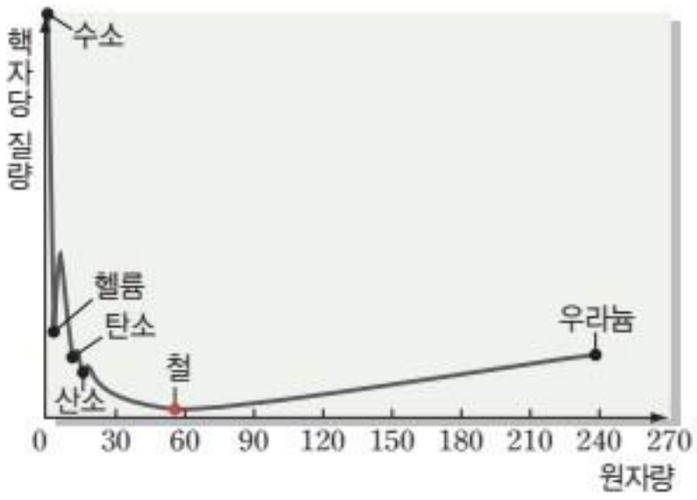
철보다 무거운 원소는 어떻게 만들어질까?

1 핵반응의 종류

원자핵을 변환시키는 핵반응에는 가벼운 원소가 융합하여 무거운 원소가 되는 핵융합 반응, 무거운 원소가 분열하여 가벼운 원소가 되는 핵분열 반응이 있다. 두 과정 모두 반응 중 질량 결손이 일어나 에너지를 방출하며, 반응 후에 더 안정된 원자핵이 생성된다.

2 별 내부의 핵융합 반응이 철을 생성하는 단계까지만 일어나는 까닭

(1) **철까지의 핵융합 과정:** 핵융합 반응으로 생성된 원자의 핵자당 질량은 반응 전 원자의 핵자당 질량보다 작기 때문에 반응 과정에서 에너지가 발생한다. 즉, 핵융합 반응은 줄어든 질량만큼 에너지를 방출하는 발열 반응이다. 핵자당 질량은 수소부터 철까지 감소하며, 이 과정에서 가벼운 원소가 융합하며 에너지를 방출한다.



▲ 핵자당 질량의 상대 비교

(2) **철 원자핵의 특성과 에너지 한계:** 철 원자핵은 모든 원자핵 중에서 핵자당 질량이 가장 작고, 결속이 가장 강하기 때문에 융합 또는 분열을 통해 에너지를 만들 수 없다. 철 이후부터는 무거운 원소가 가벼운 원소로 분열하며 에너지를 방출하므로, 철보다 무거운 원자핵이 있다고 해도 핵분열을 통해 다시 철로 돌아간다. 즉, 철 원자핵보다 더 무거운 원자핵을 만들기 위해서는 에너지를 더해 주어야 하는 흡열 반응이 일어나야 한다.

3 초신성 폭발과 에너지 방출

철 중심핵은 다른 원소로 핵융합하지 못하므로, 질량이 큰 별 내부에서는 중력 수축이 계속되어 온도가 급격히 상승한다. 이때 중력을 견디지 못한 전자는 양성자와 결합하여 중성자를 만들고, 중성미자를 방출한다. 이 반응으로 생성된 중성미자가 에너지와 함께 밖으로 빠져나가면 내부가 냉각되어 중심핵의 수축이 더욱 빨라지고, 중심핵 바로 바깥쪽 층에서도 급격한 수축이 일어난다. 이때, 바깥층에 아직 핵융합이 가능한 원자핵이 남아 있으므로 핵융합이 폭발적으로 일어나 별의 바깥층을 날려 버리는데, 이를 초신성 폭발이라고 한다.

4 철보다 무거운 원소의 생성

초신성 폭발 과정에서 방출된 막대한 양의 에너지 중 일부는 철보다 무거운 원자핵을 만드는 데 쓰인다. 철보다 무거운 원소의 생성 과정으로는 r−과정, p−과정 등이 있다.

(1) **r−과정(급속 중성자 포획):** 초신성 폭발이나 중성자별 병합과 같이 중성자가 매우 많은 환경에서, 짧은 시간에 다량의 중성자를 빠르게 흡수하여 무거운 원소를 생성하는 과정이다. 예 우라늄, 금, 백금 등

(2) **p−과정(양성자 포획 또는 광붕괴 과정):** 매우 높은 온도에서 양성자가 원자핵에 포획되거나, 감마(γ)선에 의해 기존의 중성자를 잃고 새로운 양성자를 포획해 무거운 원소를 생성하는 과정이다. 예 몰리브데넘, 루테늄 등

핵자당 질량
원자핵을 구성하는 양성자와 중성자를 핵자(核子)라고 한다. 이때, 원자핵의 질량을 핵자의 개수로 나눈 값을 핵자당 질량이라고 한다.

별 내부에서의 s−과정
철보다 무거운 원소 중 일부는 s−과정을 통해 초신성 폭발 없이 질량이 큰 별의 진화 마지막 단계에서 생성될 수 있다. 철보다 무거운 원소가 별의 내부에서 만들어질 수 없다는 것의 일반적인 의미는 별의 중심부에서 핵융합을 통해 철보다 무거운 원소가 생성되지 않는다는 것을 의미한다. s−과정은 핵융합이 아닌 중성자 포획 등의 과정을 통해 스트론튬, 바륨 등의 무거운 원소를 생성하는 과정이다. 다만, 더 무거운 원소인 금, 우라늄 등은 초신성 폭발이나 중성자별 병합과 같은 극한 조건에서만 만들어진다.

개념 기본 문제

01 성운에서 원시별이 생성되는 과정에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 성운의 내부 중 온도와 밀도가 낮은 곳에서 원시별이 생성된다.

ㄴ. 성운의 밀도가 높아져 복사 에너지가 쉽게 빠져나가지 못하면 내부 온도가 상승한다.

ㄷ. 원시별의 질량이 충분히 커지면, 자체 중력에 의한 수축으로 위치 에너지가 중력 수축 에너지로 전환된다.

02 전주계열성의 진화에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 질량이 클수록 진화 속도가 느리다.

ㄴ. 질량이 클수록 H−R도에서 주계열의 왼쪽 위에 도달한다.

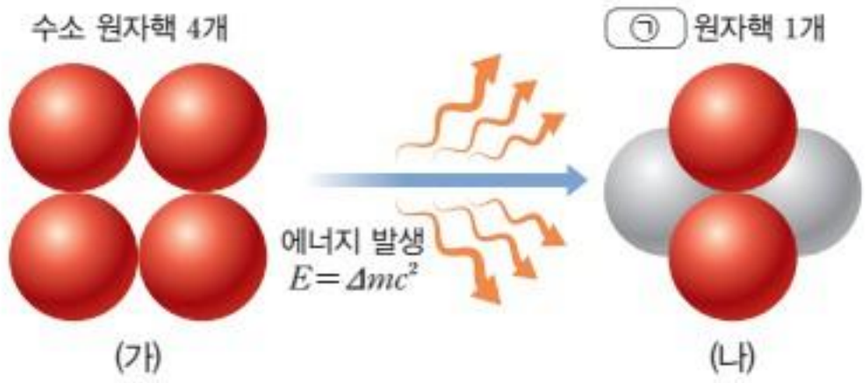
ㄷ. 중심부 온도가 약 1000만 K에 도달하면 중력 수축이 멈춘다.

03 다음은 주계열 단계의 특징에 대한 설명이다.

주계열성은 별의 중심으로 수축하려는 힘인 중력과 바깥쪽으로 팽창하려는 기체 압력이 평형을 이룬 (　　) 상태에 있다.

(　　) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

04 그림은 수소 핵융합 반응을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

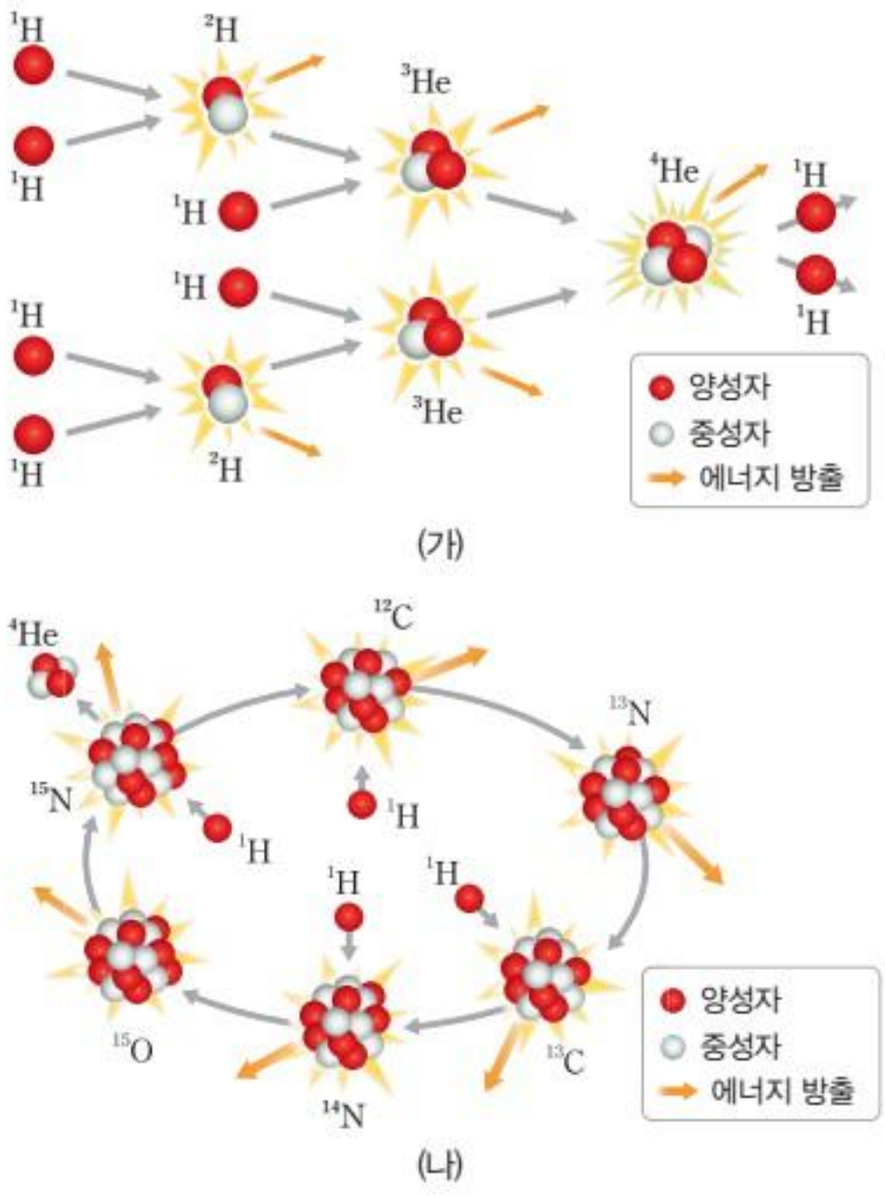
보기

ㄱ. ㉠은 헬륨이다.

ㄴ. (가)는 (나)보다 질량이 크다.

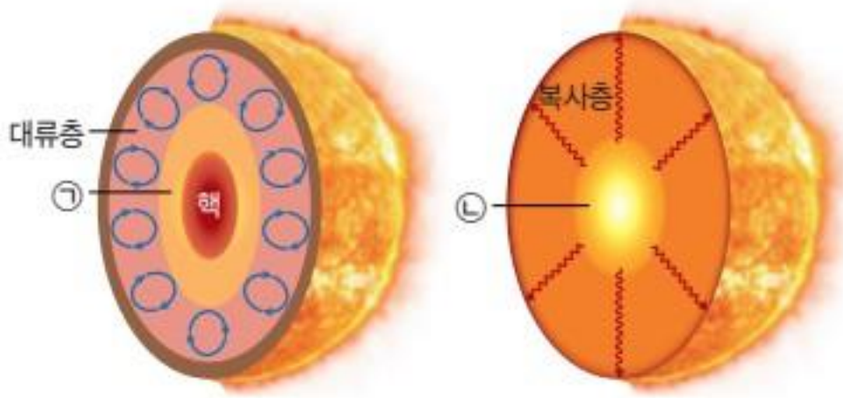
ㄷ. 이 반응은 주계열성의 에너지원에 해당한다.

05 그림 (가)와 (나)는 수소 핵융합 반응의 종류를 나타낸 것이다.



(가)와 (나) 반응이 각각 우세하게 일어나는 온도의 경계를 쓰시오.

06 그림 (가)와 (나)는 질량이 서로 다른 주계열성의 내부 구조와 에너지 전달 방법을 나타낸 것이다.



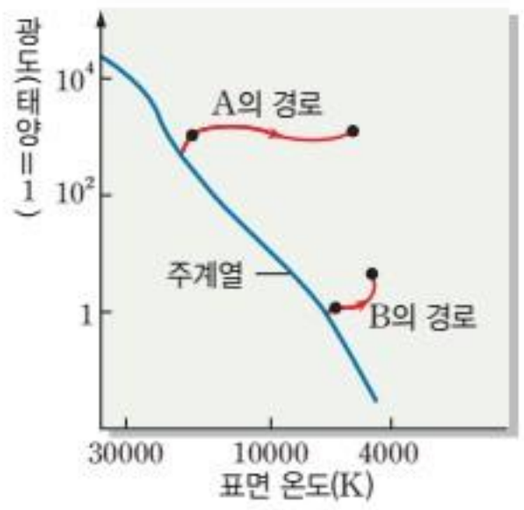
(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. (가)는 (나)보다 질량이 작다.
ㄴ. 태양은 (나)의 방식으로 에너지를 전달한다.
ㄷ. ㉠과 ㉡ 중 복사에 의한 에너지 전달이 우세하게 일어나는 층은 ㉠이다.

07 그림은 별 A와 B가 주계열 단계 이후에 진화하는 경로를 나타낸 것이다.



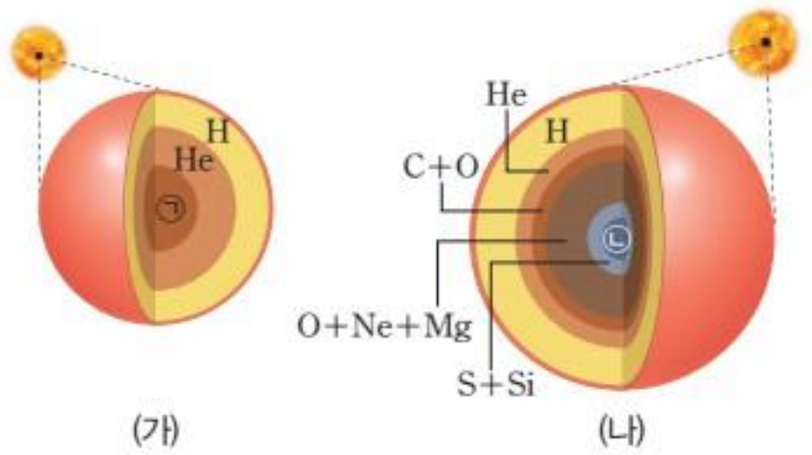
A와 B 중 질량이 더 큰 별은 무엇인지 쓰시오.

08 다음은 주계열 이후 단계에 대한 설명이다.

중심핵에서 수소 핵융합 반응이 끝나면, 내부 압력이 감소하여 별은 중력에 의해 다시 수축한다. 이때 발생한 에너지에 의해 중심핵 주위의 (　　) 껍질에서 핵융합 반응이 시작된다.

(　　) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

09 그림 (가)와 (나)는 질량이 서로 다른 두 별의 거성 마지막 단계에서의 내부 구조를 나타낸 것이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

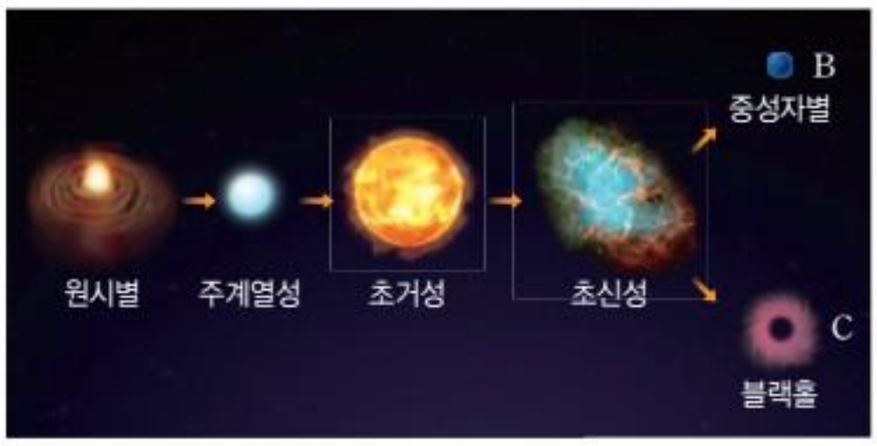
보기

ㄱ. ㉠은 탄소와 산소, ㉡은 철이다.
ㄴ. 중심부 온도는 (가)가 (나)보다 높다.
ㄷ. (나)는 이후 초신성 폭발을 일으킨다.

10 그림 (가)와 (나)는 질량이 서로 다른 별의 진화 경로를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

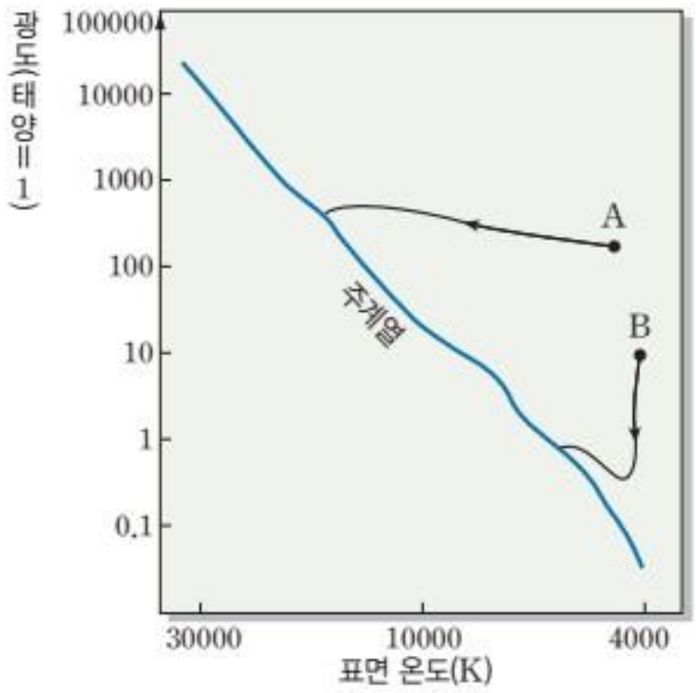
보기

ㄱ. 진화 속도는 (가)가 (나)보다 더 빠르다.
ㄴ. 주계열성의 질량은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄷ. 최종 진화 단계에서 밀도는 C>B>A이다.

개념 적용 문제

➤ 전주계열 단계에서 주계열 단계로의 진화

01 그림은 질량이 다른 두 별 A와 B가 전주계열 단계에서 주계열 단계로 진화하는 경로를 나타낸 것이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▻ 별의 질량이 클수록 전주계열 단계에서 내부 압력이 크고 온도 상승이 빠르므로 진화 속도도 빠르다.

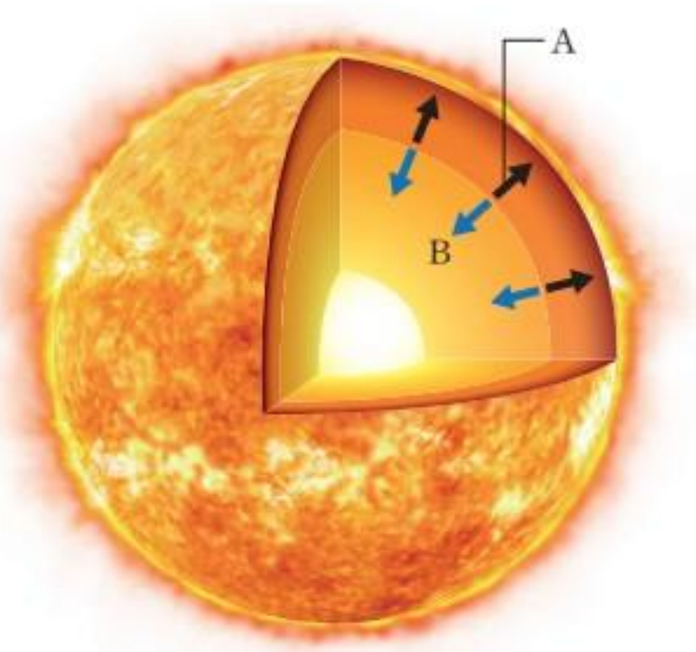
보기

ㄱ. 별의 질량은 A가 B보다 크다.
ㄴ. 주계열 단계로 진화하는 속도는 A가 B보다 빠르다.
ㄷ. A와 B의 반지름은 진화 전보다 진화 후가 더 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 주계열 단계

02 그림은 어느 주계열성 내부에서 작용하는 두 힘 A와 B를 나타낸 것이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



▻ 별은 주계열 단계에 머무르는 동안 정역학 평형 상태를 유지한다.

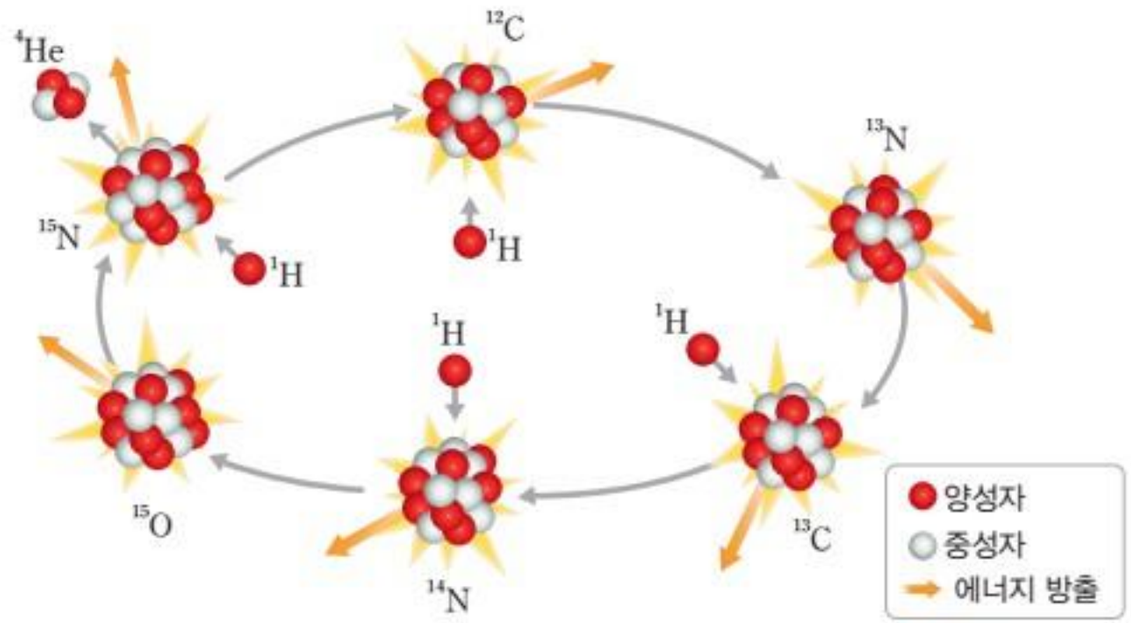
보기

ㄱ. A는 핵융합 반응으로 생기는 힘이다.
ㄴ. 이 별의 내부에서는 A가 B보다 작다.
ㄷ. 이 별은 크기가 거의 일정하게 유지된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 수소 핵융합 반응의 종류

03 그림은 어느 별의 중심에서 일어나는 핵융합 반응의 과정을 나타낸 것이다.



이 반응에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

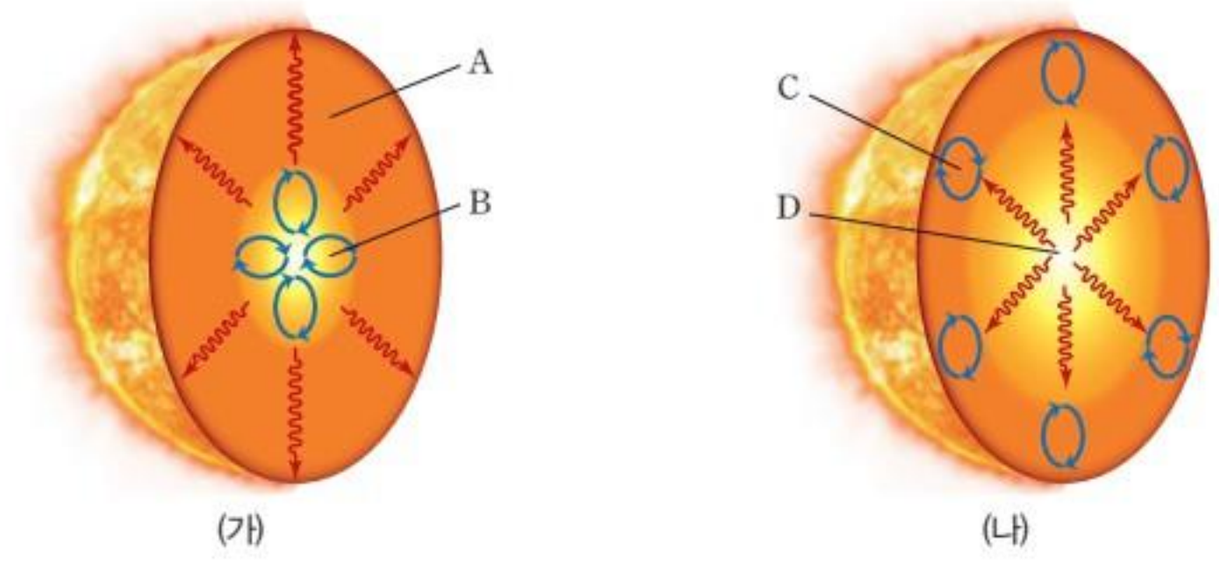
보기

ㄱ. 태양의 중심부에서는 이 반응이 우세하게 일어난다.
ㄴ. 최종적으로 헬륨 원자핵과 탄소 원자핵이 만들어진다.
ㄷ. 중심부 온도가 약 1800만 K 이상인 별에서 우세하게 일어난다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 주계열성의 내부 구조와 에너지 전달

04 그림 (가)와 (나)는 질량이 다른 두 주계열성 내부의 에너지 전달 방식을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 그림의 크기는 별의 실제 크기와는 관계없다.)

보기

ㄱ. A 영역은 C 영역보다 깊이에 따른 온도 변화가 크다.
ㄴ. B 영역에서는 P−P 반응, D 영역에서는 CNO 순환 반응이 우세하다.
ㄷ. 태양의 쌀알 무늬는 C 영역과 같은 원리로 발생한다.

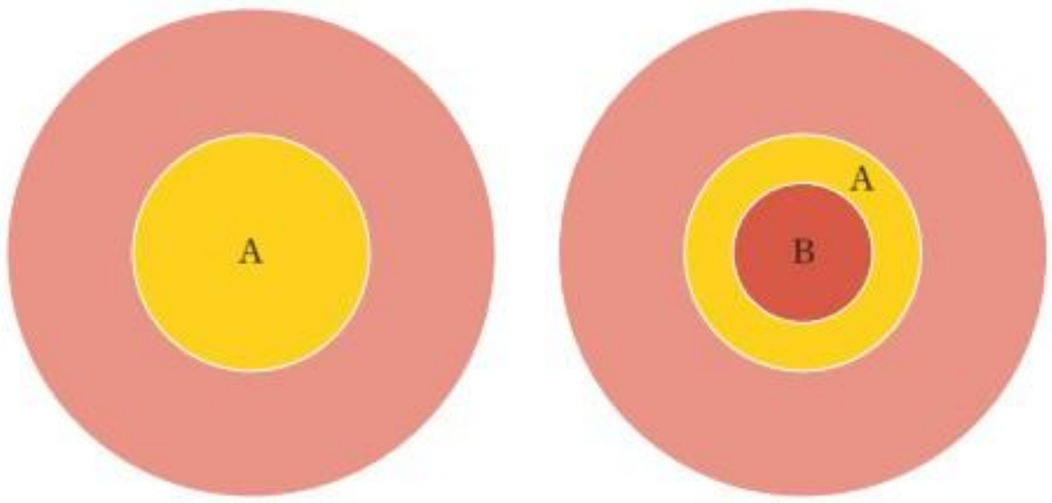
① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 태양 질량의 약 1.5배 이하인 별은 중심부 온도가 약 1800만 K 이하로, 양성자·양성자 연쇄 반응이 우세하다. 반면, 태양 질량의 약 1.5배 이상인 별은 중심부 온도가 약 1800만 K 이상으로, 탄소·질소·산소 순환 반응이 우세하다.

➤ 깊이에 따른 온도 차가 클수록 대류에 의한 에너지 전달이 우세하다.

➤ 거성 단계

05 그림 (가)와 (나)는 태양과 질량이 비슷한 별의 주계열 단계와 적색거성 단계에서의 내부 구조를 순서 없이 나타낸 것이다. A와 B는 각각 다른 원소의 핵융합 반응이 일어나는 영역이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 그림의 크기는 별의 실제 크기와는 관계없다.)

보기

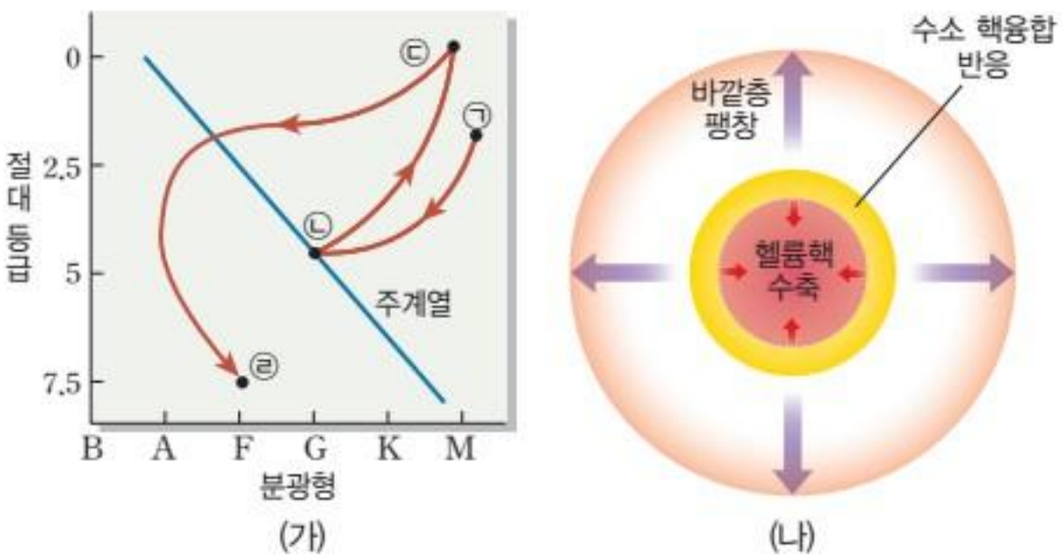
ㄱ. 이 별은 (가) 단계에서 더 오래 머무른다.
ㄴ. (가)와 (나) 모두 별의 중심부에서 중력 수축이 일어난다.
ㄷ. 핵융합 반응으로 생성되는 원소의 질량은 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 별은 주계열 단계에서는 수소 핵융합 반응을 하며, 정역학 평형 상태를 유지한다. 이후 적색거성 단계에서는 중심부에서 헬륨 핵융합 반응이 일어난다.

➤ 거성 단계

06 그림 (가)는 태양과 질량이 비슷한 별의 진화 과정을, (나)는 이 별의 진화 과정 중 어느 단계에서의 내부 구조를 나타낸 것이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

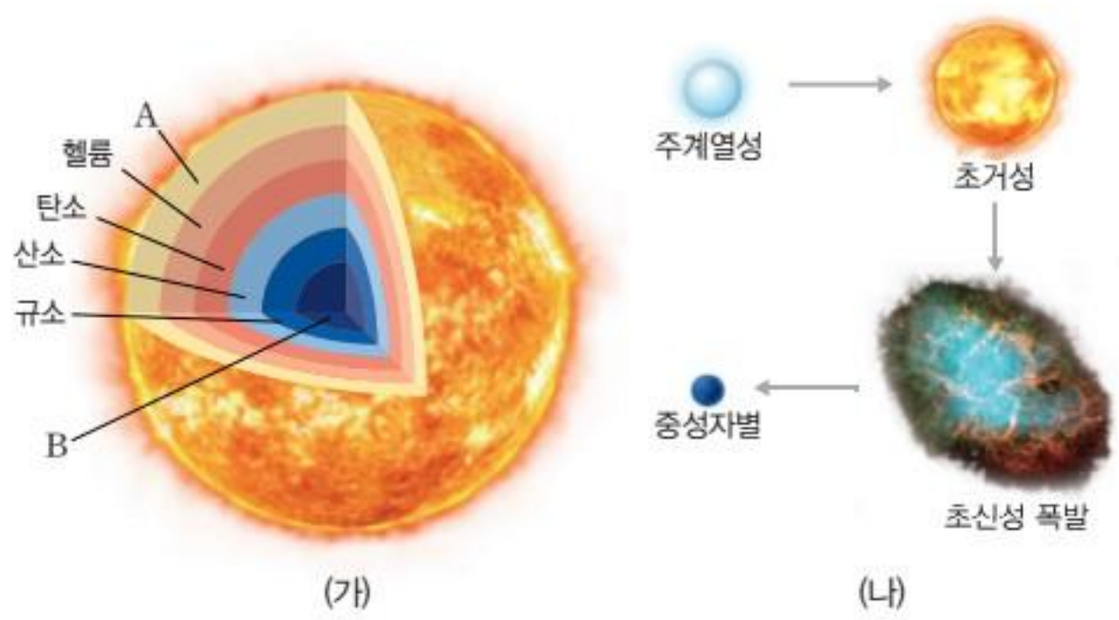
ㄱ. ㉠~㉣ 중 핵융합 반응이 일어나는 단계는 ㉠과 ㉡이다.
ㄴ. (나)와 같은 내부 구조는 ㉡과 ㉢ 사이에서 나타난다.
ㄷ. ㉠~㉣ 중 별 중심부의 밀도는 ㉣에서 가장 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▷ 전주계열성의 중심부에서 핵융합 반응이 시작되면서 주계열성이 된다. 이후 주계열성의 중심부에서 수소 핵융합 반응이 끝나면 내부 압력이 감소한다.

➤ 거성 이후의 단계

07 그림 (가)는 어느 별의 진화 과정에서의 내부 구조를, (나)는 이 별의 진화 과정 중 일부를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

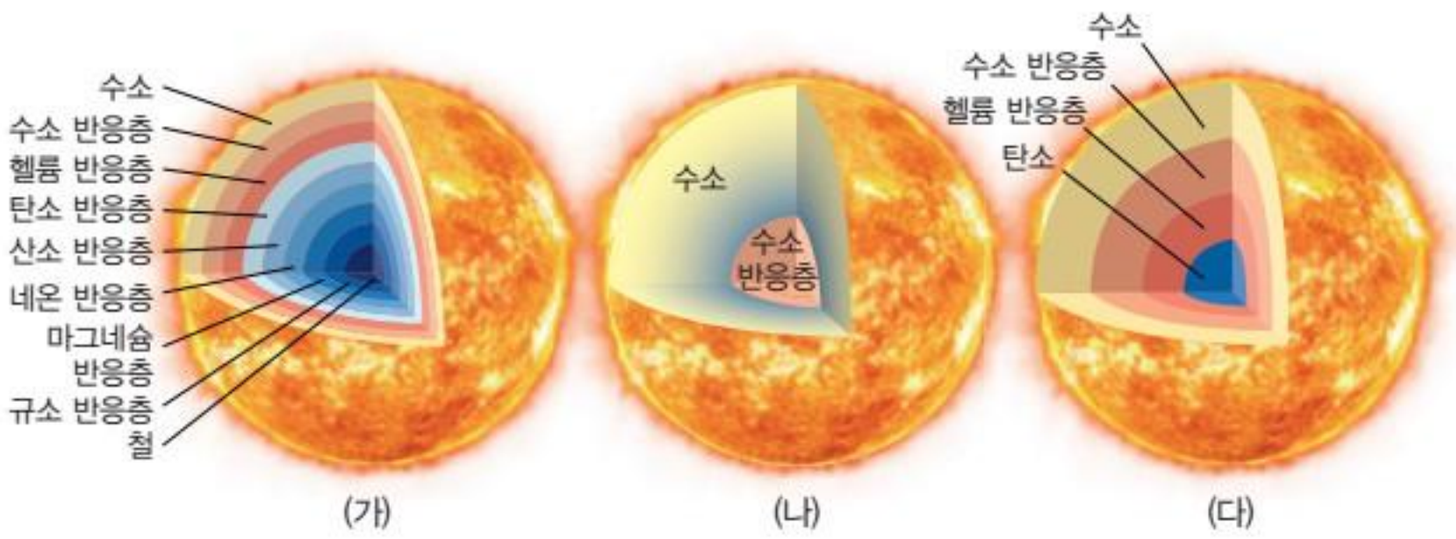
ㄱ. A는 주계열 단계에서 생성된다.
ㄴ. B보다 무거운 원소는 초거성 단계에서 생성된다.
ㄷ. (가)와 같은 내부 구조는 초거성 단계에서 볼 수 있다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 태양보다 질량이 매우 큰 별의 진화 과정에서 별 내부에서는 헬륨부터 철까지 생성된다.

➤ 거성 이후의 단계

08 그림 (가)~(다)는 어느 별이 진화하는 동안 각 단계별 내부 구조를 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 그림의 크기는 별의 실제 크기와는 관계없다.)

보기

ㄱ. (가)~(다) 중 반지름은 (나)가 가장 작다.
ㄴ. 중심부의 온도는 (가)>(다)>(나)이다.
ㄷ. 이 별은 태양보다 질량이 매우 큰 별이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➢ 주계열성의 중심부에서는 수소 핵융합 반응이 일어나고, 거성으로 진화함에 따라 헬륨 핵융합이 시작된다.

➤ 거성 이후의 단계

09 그림은 질량이 서로 다른 두 별 A와 B의 진화 과정을 단계별로 나타낸 것이다. A와 B는 태양과 질량이 비슷한 별과 태양보다 질량이 매우 큰 별 중 하나이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. Ⅰ단계에서 표면 온도는 B가 A보다 높다.
ㄴ. Ⅱ단계에서 최종적으로 생성되는 원소의 질량은 B가 A보다 크다.
ㄷ. Ⅲ단계에서 형성된 (가)는 (나)보다 반지름이 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

태양과 질량이 비슷한 별은 진화의 최종 단계에서 백색왜성이 되고, 태양보다 질량이 매우 큰 별은 중성자별이나 블랙홀이 된다.

➤ 거성 이후의 단계

10 그림 (가)와 (나)는 질량이 서로 다른 두 별의 진화 단계에서 나타나는 모습이다.

(가) 행성상 성운

(나) 초신성 잔해

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. (가)의 중심부에는 백색왜성이 존재한다.
ㄴ. (나)가 생성되는 과정에서 철보다 무거운 원소가 생성된다.
ㄷ. 태양의 진화 단계에서 (나)와 같은 모습이 나타난다.

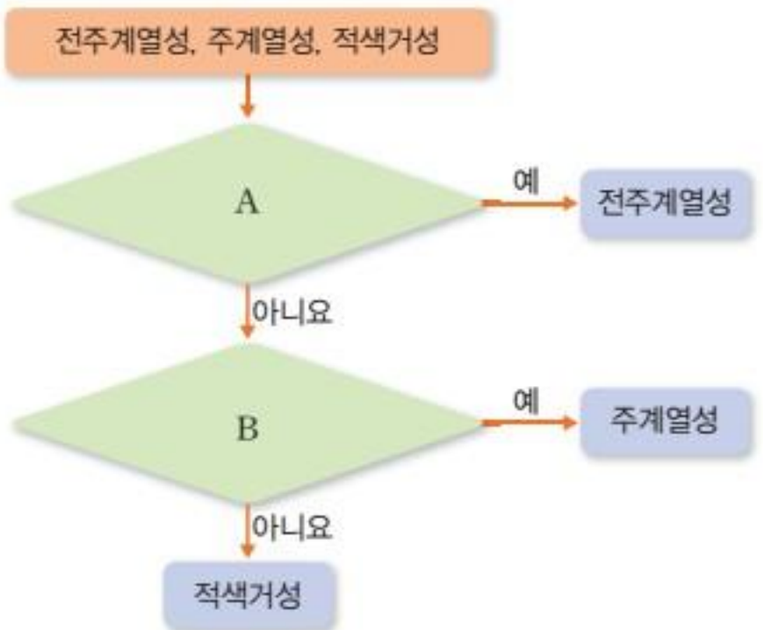
① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

적색거성 단계에서 별의 바깥쪽 물질이 우주 공간으로 방출되면 고리 모양의 행성상 성운이 형성된다. 초거성 단계에서 철로 이루어진 중심핵이 급격하게 수축하면 강력한 초신성 폭발이 일어나고, 초신성 잔해가 형성된다.

1등급 도전 문제

➤ 주계열성의 에너지원

11 그림은 조건에 따라 별을 분류하는 과정을 나타낸 것이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 적색거성의 중심부는 정역학 평형 상태이다.)



전주계열성은 중력 수축으로 에너지를 생성하며, 주계열성은 중심부에서 일어나는 수소 핵융합 반응으로 에너지를 생성한다. 거성 단계에서는 수소보다 무거운 원소의 핵융합 반응이 일어난다.

보기

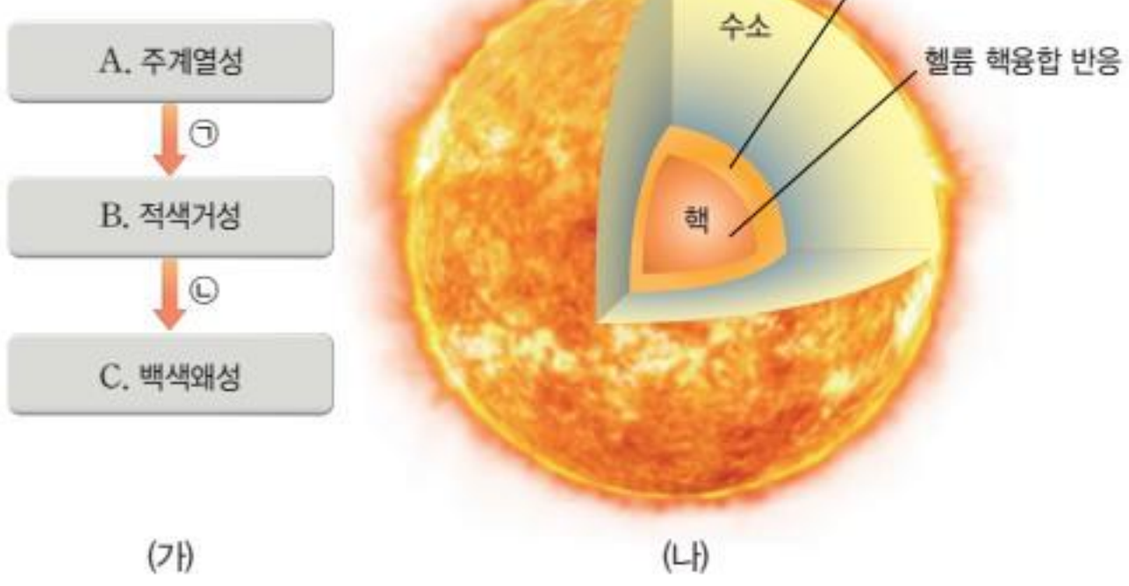
ㄱ. '별의 중심부에서 핵융합 반응이 일어나는가?'는 A에 들어갈 수 있다.
ㄴ. '별 전체에서 한 가지 핵융합 반응만 일어나는가?'는 B에 들어갈 수 있다.
ㄷ. '별의 중심부에서 핵융합 반응으로 탄소가 형성되는가?'는 B에 들어갈 수 있다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 주계열 이후의 단계

12 그림 (가)는 어느 별의 진화 과정을, (나)는 (가)의 A~C 중 한 단계에서의 내부 구조를 나타낸 것이다.

적색거성이 수축과 팽창을 반복하는 불안정한 상태가 되면 행성상 성운이 만들어진다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. (나)는 (가)의 A 단계에 해당한다.
ㄴ. ㉠ 단계에서 별의 크기는 커지고, 표면 온도는 낮아진다.
ㄷ. ㉡ 단계에서 별의 바깥쪽 물질이 우주 공간으로 방출된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

통합과학 연계

수능 TO 분석

별 내부에서의 원소 생성

연계 Point 별 내부에서의 원소 생성과 관련된 내용을 지구과학에서는 별의 진화 과정과 함께 설명한다. 수능에는 별의 질량에 따른 내부 구조의 차이를 비교하고, 원소가 어떻게 형성되는지를 물어볼 수 있다. 또한, 내부 구조에 따른 원소 종류를 알고, 각 원소의 주기율표상에서의 특징과 연계하는 문제가 출제될 수 있다.

❶ 주계열 단계

주계열성의 중심부에서는 수소 원자핵 4개가 융합되어 헬륨 원자핵 1개가 만들어지는 수소 핵융합 반응이 일어난다.

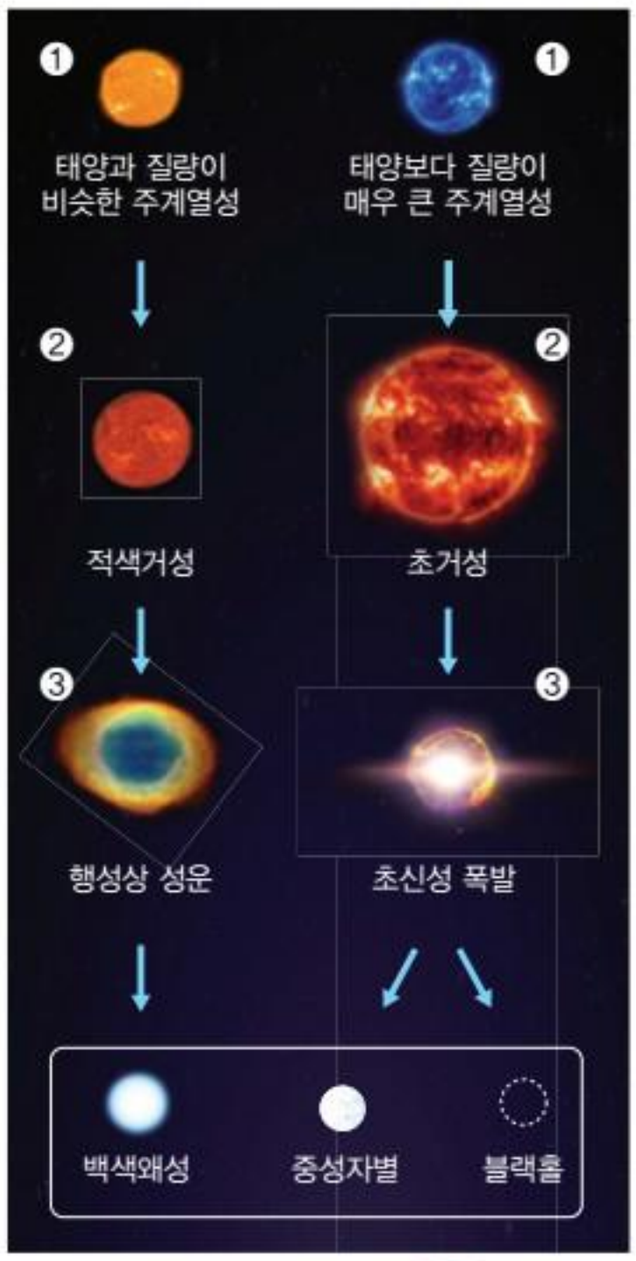
❷ 적색거성 단계

중심핵의 수소가 고갈되면 내부 압력이 감소하고, 별은 다시 중력 수축을 시작한다. 이로 인해 중심부 온도가 상승하여 중심부 바깥의 수소 껍질에서는 수소 핵융합 반응이 시작되며, 별은 팽창하여 적색거성이 된다. 중심부 온도가 약 1억 K에 이르면 헬륨 핵융합 반응이 시작되어 탄소를 형성한다. 이후 일부 탄소는 헬륨과 반응하여 산소를 형성한다.



❸ 생성된 원소의 방출

중심부에서 탄소와 산소의 생성이 끝나면 핵융합 반응이 멈춘다. 따라서 별 바깥층은 중력에 의해 붙잡히지 못하고 우주로 방출되며, 행성상 성운을 형성한다.



❷ 초거성 단계

태양보다 질량이 매우 큰 별은 중심부 온도가 매우 높아 헬륨 핵융합 반응 이후에도 탄소, 네온, 산소, 규소 등이 차례로 핵융합 반응을 하며, 중심부는 점점 더 무거운 원소로 채워진다. 이후 최종적으로 철까지 생성된다.



❸ 철보다 무거운 원소의 생성

철 중심핵은 급격히 수축하며, 이때 온도가 상승한다. 이 과정에서 바깥층에 있던 원소들이 폭발적으로 핵융합을 일으키며, 결국 별은 별 내부의 원소와 막대한 에너지를 방출하는 초신성 폭발을 일으킨다. 이 과정에서 구리, 은, 금, 우라늄 등 철보다 무거운 원소들이 생성된다.

통합과학 원소의 형성

별 중심부의 수소가 모두 헬륨으로 변할 때까지 수소 핵융합 반응이 일어난다. 이후 별 중심부의 수소가 모두 헬륨으로 바뀌면 중심부가 수축하면서 온도가 상승하고, 다시 핵융합 반응을 시작하여 철까지 생성된다. 이후 질량이 큰 별의 초신성 폭발로 철보다 무거운 원소가 생성된다.

핵심 point 별 내부의 핵융합 반응으로 헬륨부터 철까지 형성된다. 이후 초신성 폭발로 철보다 무거운 원소가 생성된다.

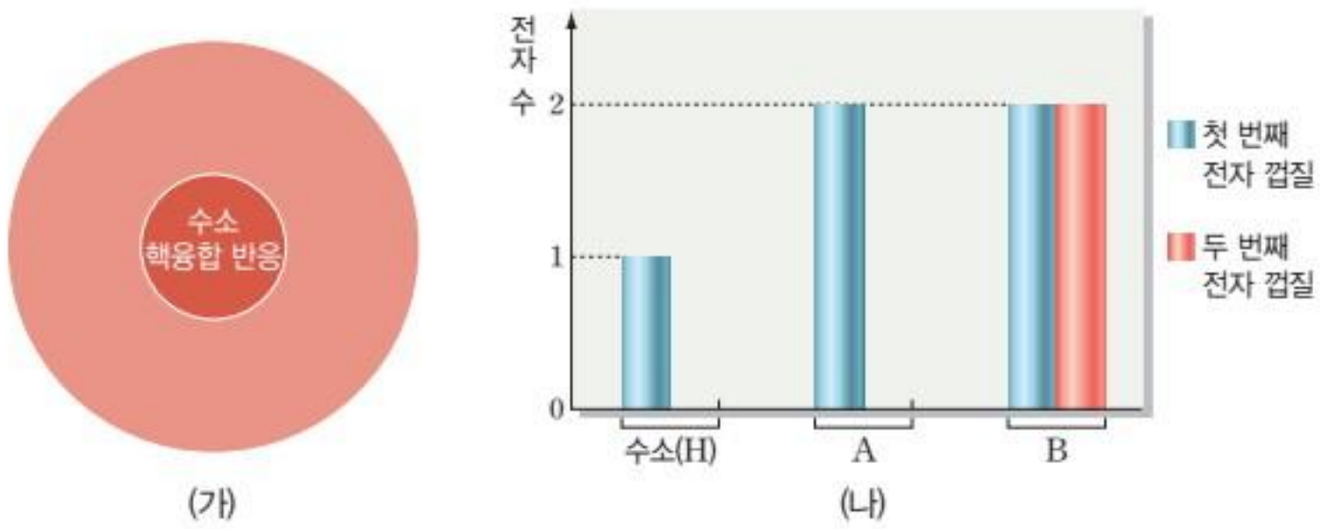
지구과학 별의 진화 과정

주계열성 중심부에서는 수소 핵융합 반응이 일어나 헬륨 원자핵이 생성된다. 이후 별 중심부의 수소가 다 반응하여 주계열 이후의 단계에 들어서면 별은 질량에 따라 적색거성 또는 초거성 단계를 거치며, 이 과정에서 핵융합 반응으로 철까지 생성된다. 이후 태양보다 질량이 매우 큰 별의 초신성 폭발로 철보다 무거운 원소가 생성된다.

핵심 point 별 내부의 핵융합 반응으로 주계열성에서는 헬륨이 생성되고, 주계열 이후의 단계에서는 탄소부터 철까지 생성된다. 이후 초신성 폭발로 철보다 무거운 원소가 생성된다.

대표 예제 살펴보기

그림 (가)는 태양과 질량이 비슷한 별의 내부 구조를, (나)는 수소(H) 원자와 원자 A, B의 첫 번째 전자 껍질과 두 번째 전자 껍질에 들어 있는 전자 수를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, A와 B는 임의의 원소 기호이고, 전자는 원자핵에 가까운 전자 껍질부터 차례로 배치된다.)

보기

ㄱ. (가)의 중심부에서 A의 원자핵이 생성된다.
ㄴ. (가)의 중심부에서 핵융합 반응을 통해 B 원자핵이 생성된다.
ㄷ. (가)의 중심부에서 핵융합 반응으로 만들어지는 가장 무거운 원소는 철(Fe)이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

풀이

(가)에서 **별의 중심부는 수소 핵융합 반응**이 일어나고 있으므로, 이 별은 **주계열 단계**에 있다. (나)에서 A, B는 원자이므로 양성자와 전자의 개수가 같다. 따라서 A는 전자 개수가 2개이므로 헬륨(He)이고, B는 전자 개수가 4개이므로 베릴륨(Be)이다.

ㄱ. **주계열 단계의 별 중심부**에서는 **수소 핵융합 반응**으로 **헬륨 원자핵이 생성**된다.

ㄴ. **주계열 단계**에서는 **수소 핵융합 반응만** 일어난다.

ㄷ. **철(Fe)**은 **태양보다 질량이 매우 큰 별의 초거성 단계**에서 생성된다.

정답 ①

실전 문제 풀어보기

정답과 해설 173쪽

그림은 제임스 웹 우주 망원경과 관련된 신문 기사의 일부를 나타낸 것이다.

> ㉠ **초신성 폭발의 비밀을 풀어줄 관측 이미지 공개**
>
> 미국항공우주국(NASA)이 제임스 웹 우주망원경(JWST)의 근적외선 카메라로 관측한 초신성 폭발 잔해의 이미지를 공개했다. 진화 과정에서 ㉡ 초신성 폭발이 일어난 이 별은 우리은하의 중심부에 위치하며... (후략)



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. ㉠ 과정에서 철보다 무거운 원소가 생성된다.
ㄴ. ㉠ 과정을 통해 무거운 원소가 우주로 방출된다.
ㄷ. ㉡ 내부에 있는 원소 중 가장 무거운 원소는 탄소이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중단원 핵/심/정/리 2. 별의 특성과 진화

01 별의 특성과 분류

1 별의 표면 온도와 색

▸ 52쪽~53쪽

1. **흑체** 입사하는 복사 에너지를 모두 흡수하고, 흡수한 에너지를 모두 복사의 형태로 방출하는 가상의 물체로, 별은 흑체라고 가정하고 별의 물리량을 추론한다.
2. **흑체 복사 법칙** 흑체 복사 법칙은 표면 온도 T에 의해서만 결정된다.

(1) (1) 법칙: 표면 온도 T인 흑체가 방출하는 모든 파장 λ에 대한 복사 에너지 분포를 설명하는 법칙이다.

(2) (2) 법칙: 흑체가 단위시간 동안 단위넓이에서 방출하는 복사 에너지의 총량(E)은 표면 온도(T)의 네제곱에 비례한다. ➜ $E = \sigma T^4 (\sigma = 5.670 \times 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}})$

(3) (3) 법칙: 흑체의 표면 온도가 높을수록 최대 복사 에너지를 방출하는 파장(λ_{max})은 짧아진다. ➜ $\lambda_{max} = \frac{a}{T} (a = 2.898 \times 10^3\ \mu\mathrm{m \cdot K})$

3. **별의 표면 온도와 색** 별의 표면 온도가 높을수록 짧은 파장의 복사 에너지를 많이 방출하여 (4)색을 띠고, 표면 온도가 낮을수록 긴 파장의 복사 에너지를 많이 방출하여 (5) 색을 띤다.

2 별의 분광형

▸ 54쪽~55쪽

1. **스펙트럼의 종류**

연속 스펙트럼	모든 파장에 걸쳐 연속적으로 나타나며, 고온·고밀도의 광원에서 방출된 빛에서 나타난다.
방출 스펙트럼	특정 파장 영역에서만 밝은 방출선이 나타나며, 고온의 기체에서 방출된 빛에서 나타난다.
흡수 스펙트럼	특정 파장 영역에서만 어두운 흡수선이 나타나며, 빛이 저온의 기체를 통과할 때 나타난다.

2. **별빛의 스펙트럼 분석** 별 내부에서 방출된 연속 스펙트럼의 빛이 별의 대기를 통과하면서 특정 파장의 빛이 대기 중 물질에 흡수되어 (6)선이 나타나며, 세기가 강할수록 그 파장의 빛이 별의 대기에서 많이 흡수되었음을 의미한다.
3. **별의 분광형과 표면 온도** 스펙트럼에서 나타나는 흡수선의 종류와 세기를 기준으로 O, B, A, F, G, K, M형으로 별을 분류한 것으로, 표면 온도는 (7)형에서 (8)형으로 갈수록 낮아진다. 각 분광형은 다시 고온인 0부터 저온인 9까지 10등급으로 세분화된다.

3 별의 광도와 크기

▸ 56쪽

1. **별의 밝기**

겉보기 등급(m)	지구에서 관측한 별의 상대적인 밝기
절대 등급(M)	별이 10 pc 떨어진 위치에 있다고 가정했을 때의 겉보기 등급
광도(L)	별이 단위시간 동안 방출하는 총 에너지량

2. **별의 광도** 별의 반지름이 클수록, 표면 온도가 높을수록 (9)진다. ➜ $L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$
3. **별의 크기** 별의 광도와 표면 온도를 알면 별의 반지름을 구할 수 있다. ➜ $R = \frac{1}{2T^2}\sqrt{\frac{L}{\pi\sigma}}$

정답과 해설 174쪽

4 H−R도와 별의 종류
▸57쪽~61쪽

1. **H−R도의 특징** 가로축은 별의 표면 온도(분광형, 색지수)로 나타내며, 왼쪽으로 갈수록 표면 온도가 증가한다. 세로축은 별의 광도(절대 등급)로 나타내며, 위로 갈수록 광도가 커진다. 왼쪽 아래에서 오른쪽 위로 갈수록 (10)은 커지고 (11)는 작아진다.
2. **H−R도에서 별의 분포와 종류** H−R도에서 별은 왼쪽 위부터 오른쪽 아래로 이어지는 대각선 띠에 분포하는 (12), 주계열의 오른쪽 위에 분포하는 (13), 가장 위쪽에 분포하는 (14), 주계열의 왼쪽 아래에 분포하는 (15)으로 분류된다.
3. **별의 종류와 상대적인 크기** 일반적으로 초거성>거성>주계열성>백색왜성 순이다.
4. **광도 계급** 별의 표면 중력과 밀도에 따라 나타나는 스펙트럼의 특징을 기준으로, 일반적으로 광도가 큰 별부터 작은 별 순서로 Ⅰ~Ⅶ까지의 7단계로 나뉜다. 예 태양: G2Ⅴ
5. **주계열성의 물리량 관계** 주계열성의 질량이 클수록 반지름과 광도가 크고, 수명이 짧다.

02 별의 진화

1 전주계열 단계
▸72쪽~73쪽

1. **전주계열 단계** 성운 내부의 온도가 낮고 밀도가 높은 지역에서 물질이 응집되어 (16)이 형성되며, 이후 계속 수축하며 중심부 온도가 상승한다. 성운 속 먼지와 가스가 흩어지면 가시광선으로 관측할 수 있는 (17)이 된다.
2. **전주계열 단계에서 주계열 단계로의 진화** 중심부 온도가 약 (18) K에 도달하면 수소 핵융합이 시작되며, 이 시점을 영년 주계열 단계라 한다. 질량이 클수록 진화 속도가 빠르다.

2 주계열 단계
▸74쪽~78쪽

1. **주계열 단계** 수소 핵융합 반응으로 에너지를 생산하며, (19) 상태에 있다.
2. **주계열성의 에너지원** 수소 핵융합 반응에서 결손된 질량이 에너지로 전환된다.
3. **수소 핵융합 반응의 종류** 중심부 온도가 약 (20) K 이하인 별에서는 양성자·양성자 연쇄 반응, 약 (20) K보다 높은 별에서는 탄소·질소·산소 순환 반응이 우세하다.
4. **수소 핵융합 반응의 효율** 태양 질량의 약 (21)배 이하인 별에서는 양성자·양성자 연쇄 반응, 약 (21)배 이상인 별에서는 탄소·질소·산소 순환 반응이 우세하게 일어난다.
5. **주계열성의 내부 구조와 에너지 전달** 태양 질량의 약 (22)배 이하인 별은 복사핵−복사층−대류층, 약 (22)배 이상인 별은 대류핵−복사층의 구조로 이루어져 있다.

3 주계열 이후의 단계
▸79쪽~81쪽

1. **거성 단계** 수소 핵융합 반응이 끝나면 내부 압력이 감소해 중력 수축이 일어나고, (23) 껍질에서 핵융합 반응이 일어나 바깥층이 팽창한다. 이후 중심부 온도가 약 1억 K 이상이 되면 (24) 핵융합이 시작된다.
2. **거성 이후의 단계**

(1) 태양과 질량이 비슷한 별: 적색거성의 중심부 온도가 낮아 (25) 핵융합 불가 → 맥동 변광성 단계를 거쳐 바깥층 방출 → 행성상 성운 형성 → 중심에 (26)

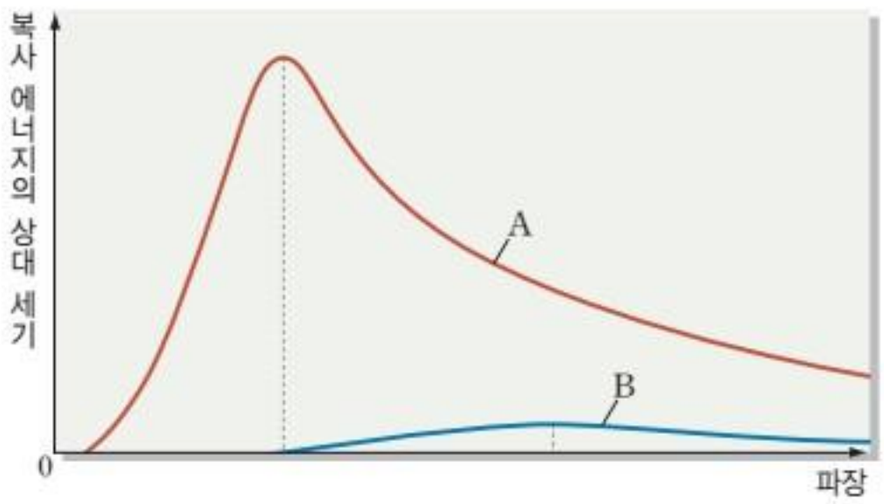
(2) 태양보다 질량이 매우 큰 별: 초거성의 중심부 온도가 높아 핵융합으로 (27) 핵까지 형성 → 초신성 폭발 → 중심에 중성자별 또는 블랙홀

3. **물질의 순환** 별에서 생성된 물질은 우주 공간으로 방출되며, 다른 별의 탄생에 사용된다.

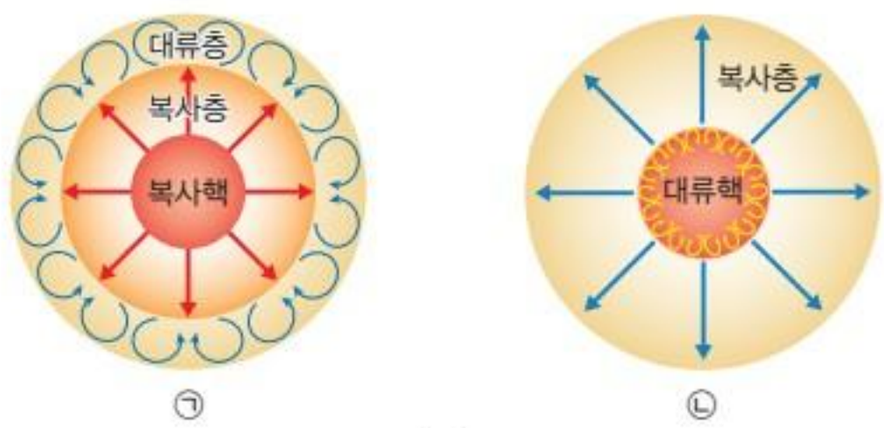
통합 실전 문제

흑체 복사 법칙 + 별의 내부 구조와 에너지 전달

01 그림 (가)는 주계열성 A와 B의 파장에 따른 복사 에너지의 상대 세기를, (나)는 A와 B의 내부 구조를 순서 없이 나타낸 것이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. A의 내부 구조는 ㉠이다.

ㄴ. $\frac{\text{CNO 순환 반응에 의한 에너지 생성량}}{\text{P-P 반응에 의한 에너지 생성량}}$은 A가 B보다 작다.

ㄷ. 수소 핵융합 반응이 끝난 이후부터 헬륨 핵융합 반응이 일어나기 전까지의 광도 변화 폭은 A가 B보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

흑체 복사 법칙 + 별의 분광형과 표면 온도

02 표는 서로 다른 별 (가)~(다)의 스펙트럼을 나타낸 것이다. (가)~(다)의 분광형은 각각 A, G, M형 중 하나이다.

별	스펙트럼
(가)	
(나)	
(다)	

(가)~(다)에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 최대 복사 에너지를 방출하는 파장은 (가)가 가장 길다.

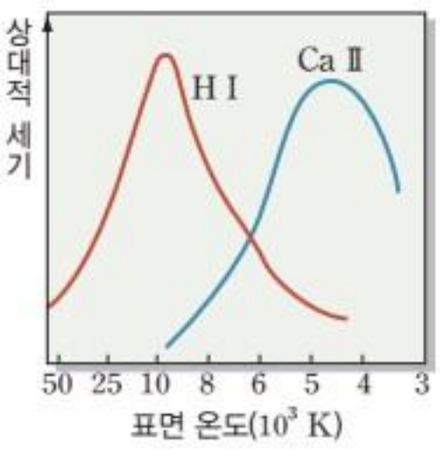
ㄴ. 스펙트럼에서 금속선은 (나)에서 가장 강하게 나타난다.

ㄷ. 만약 (가)~(다)의 광도가 같다면, 반지름은 (다)가 가장 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

별의 분광형과 표면 온도

03 그림은 별의 표면 온도에 따른 HI과 CaⅡ 흡수선의 상대적 세기를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. HI 흡수선의 세기는 O형 별에서 가장 강하게 나타난다.

ㄴ. CaⅡ 흡수선의 세기는 A형 별보다 K형 별에서 강하게 나타난다.

ㄷ. 태양에서는 HI 흡수선보다 CaⅡ 흡수선이 강하게 나타난다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

흑체 복사 법칙 + 별의 광도와 크기

04 표는 별 (가)~(라)의 광도와 분광형을 나타낸 것이다.

별	광도(태양=1)	분광형
(가)	10^3	B5
(나)	10^3	K5
(다)	10^{-3}	F0
(라)	10^{-3}	A0

별 (가)~(라)에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

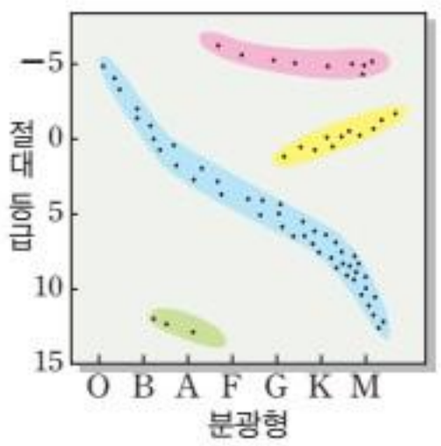
보기

ㄱ. 반지름은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄴ. 최대 복사 에너지를 방출하는 파장은 (다)가 (라)보다 길다.
ㄷ. 단위시간 동안 단위넓이에서 방출되는 에너지량은 (가)가 가장 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

H-R도에서 별의 분포와 종류 + 주계열 이후의 단계

05 그림은 H-R도에서 나타나는 별의 집단을, 표는 별 (가)와 (나)의 물리량을 나타낸 것이다.



별	절대 등급	분광형
(가)	+12.5	B5
(나)	−0.05	K2

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

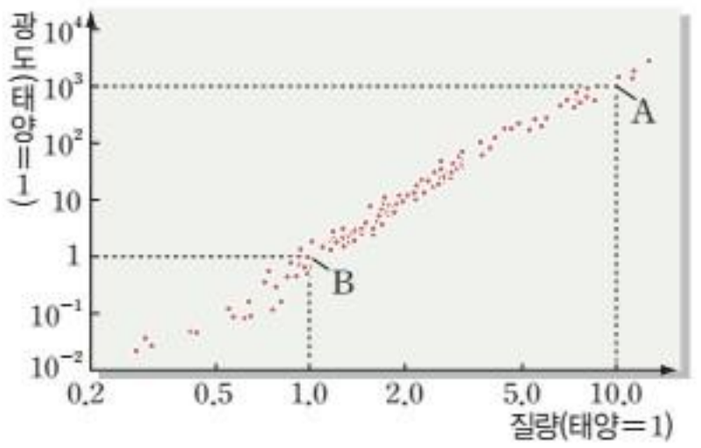
보기

ㄱ. 밀도는 (가)가 (나)보다 크다.
ㄴ. 반지름은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄷ. 태양과 질량이 비슷한 별은 진화 과정에서 (가)가 속한 그룹보다 (나)가 속한 그룹을 먼저 거친다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

주계열성의 물리량 관계 + 수소 핵융합 반응의 효율

06 그림은 주계열성의 질량과 광도 사이의 관계를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

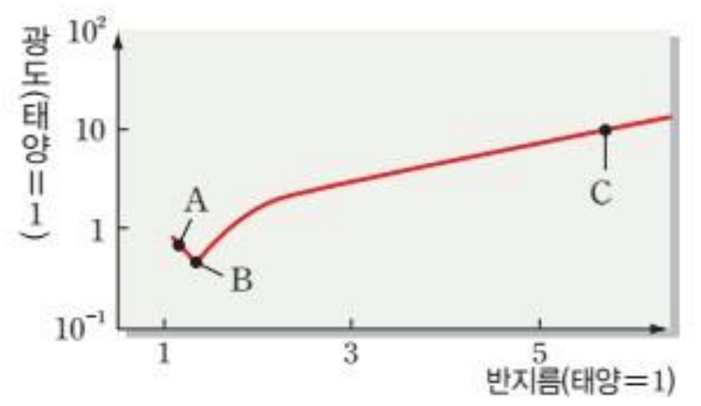
보기

ㄱ. 색지수는 A가 B보다 작다.
ㄴ. 별 전체의 에너지 소모량은 A가 B보다 크다.
ㄷ. 중심부에서 CNO 순환 반응이 일어나는 비율은 A가 B보다 높다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

전주계열 단계

07 그림은 질량이 태양 정도인 별이 원시별에서 주계열성으로 진화하는 동안의 반지름과 광도 변화를 나타낸 것이다. A~C는 각각 서로 다른 시기이다.



이 원시별에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

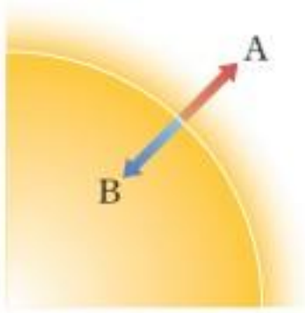
보기

ㄱ. 중심부 온도는 A가 C보다 높다.
ㄴ. 표면에서 기체 압력은 B가 C보다 작다.
ㄷ. 이 별의 진화는 C → B → A 순으로 진행된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

전주계열 단계 + 주계열 단계

08 그림은 별의 내부에서 작용하는 힘 A와 B를 나타낸 것이고, 표는 별의 진화 단계별로 A와 B의 크기 비교를 나타낸 것이다. (가)와 (나)는 각각 전주계열성과 주계열성 중 하나이다.



진화 단계	크기 비교
(가)	A<B
(나)	A=B

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

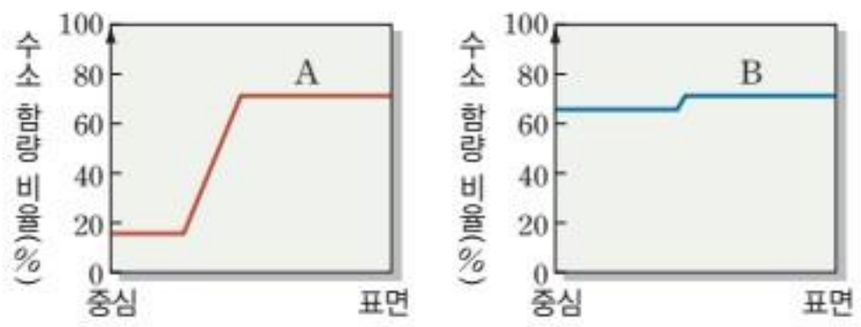
보기

ㄱ. 별의 반지름은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄴ. A를 만드는 에너지원은 (가)와 (나)가 같다.
ㄷ. 시간에 따른 광도의 변화 비율은 (가)가 (나)보다 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

주계열성의 에너지원

09 그림은 질량이 같은 주계열성 A와 B의 중심으로부터 거리에 따른 수소 함량 비율을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

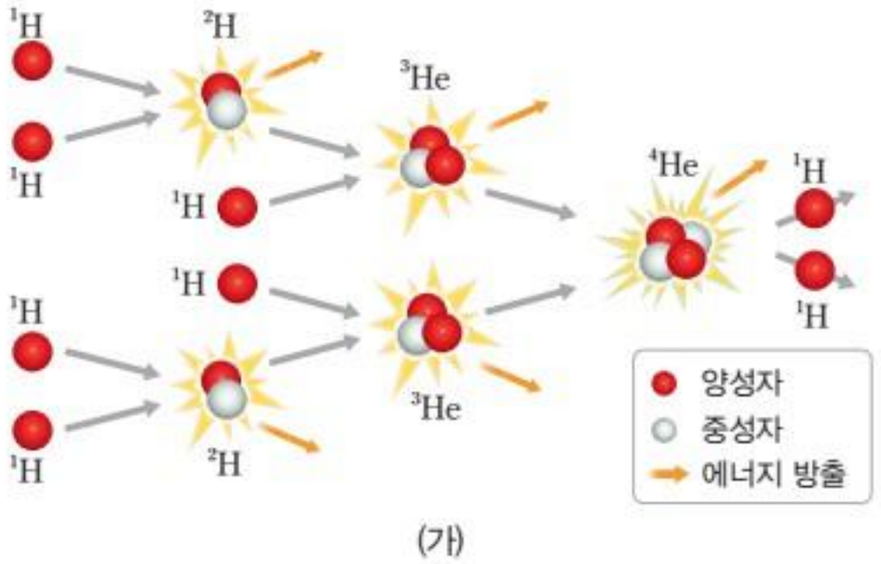
보기

ㄱ. 중심부에서 $\frac{\text{헬륨의 양}}{\text{수소의 양}}$은 A가 B보다 작다.
ㄴ. 이 시점까지 주계열 단계에 머문 시간은 A가 B보다 길다.
ㄷ. 이후 A는 B보다 먼저 거성 단계로 진화한다.

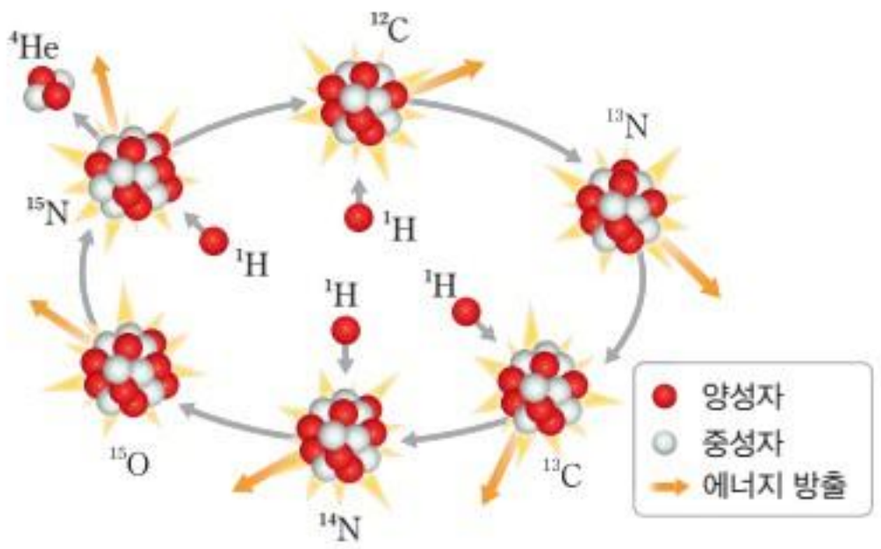
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

수소 핵융합 반응의 종류 + 주계열 이후의 단계

10 그림 (가)와 (나)는 각각 주계열성 A와 B의 중심부에서 우세하게 일어나는 수소 핵융합 반응을 나타낸 것이다. A와 B는 각각 태양 질량의 1배와 15배 중 하나이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

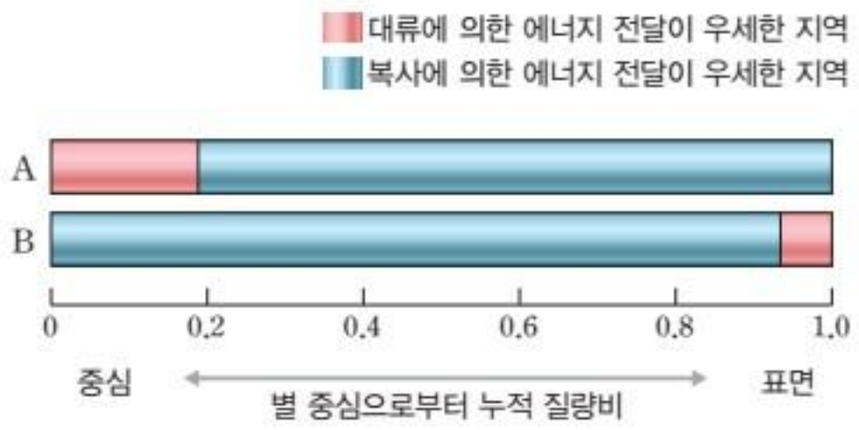
보기

ㄱ. 별의 표면에서 대류가 우세하게 일어나는 부분까지의 거리는 A가 B보다 짧다.
ㄴ. 이후 거성 단계에서 반지름은 A가 B보다 크다.
ㄷ. 진화 마지막 단계에서 최종적으로 생성되는 물질의 질량은 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

수소 핵융합 반응의 효율 + 주계열성의 내부 구조와 에너지 전달

11 그림은 주계열성 A와 B의 내부에서 대류와 복사에 의한 에너지 전달이 우세한 영역을 별 중심으로부터 누적 질량비에 따라 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

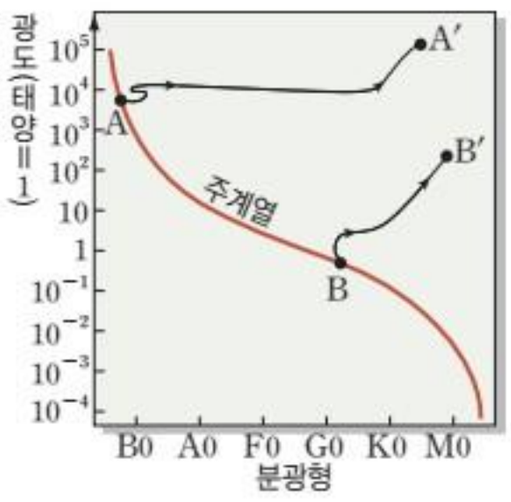
보기

ㄱ. 별의 질량은 A가 B보다 크다.
ㄴ. 중심부에서 깊이에 따른 온도 차는 A가 B보다 크다.
ㄷ. $\frac{\text{P-P 반응에 의한 에너지 생성량}}{\text{별 전체의 에너지 생성량}}$은 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

거성 단계

12 그림은 주계열성 A와 B의 진화 경로 중 일부를 H-R도에 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



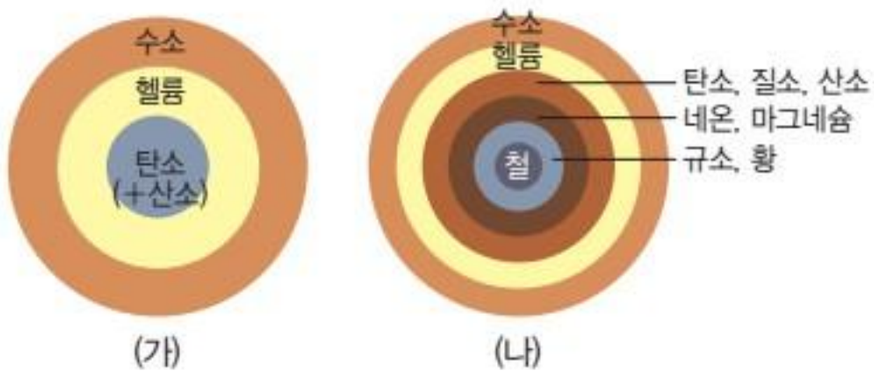
보기

ㄱ. 진화 속도는 A가 B보다 빠르다.
ㄴ. 진화 과정에서 절대 등급의 변화 폭은 A가 B보다 크다.
ㄷ. 진화 과정에서 표면 온도의 변화 폭은 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

전주계열 단계 + 주계열 이후의 단계

13 그림 (가)와 (나)는 질량이 다른 두 별의 중심부에서 핵융합 반응이 끝났을 때의 내부 구조를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 진화 속도는 (가)가 (나)보다 빠르다.
ㄴ. 원시별 상태였을 때 질량은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄷ. 주계열성에서 현재 상태까지의 진화 과정에서 표면 온도의 변화 폭은 (가)가 (나)보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

전주계열 단계 + 주계열 단계 + 주계열 이후의 단계

14 그림은 태양과 질량이 비슷한 별의 진화 과정을 나타낸 것이다. A~D에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

ㄱ. 별의 평균 밀도는 A에서 가장 크다.
ㄴ. $\frac{\text{수소의 총 질량}}{\text{별의 총 질량}}$은 B가 C보다 크다.
ㄷ. $\frac{\text{B의 반지름}}{\text{C의 반지름}} > \frac{\text{C의 반지름}}{\text{D의 반지름}}$이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

HIGH TOP 최상위 문제

1 표는 주계열성 X~Z를 관측한 자료이다. X~Z의 분광형은 각각 O형, A형, G형 중 하나이다.

별	대표 흡수선	흡수선 세기	표면 온도(K)	분광형
X	( )	강함	35000	( )
Y	HI	가장 강함	( )	( )
Z	CaⅡ	강함	5200	( )

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

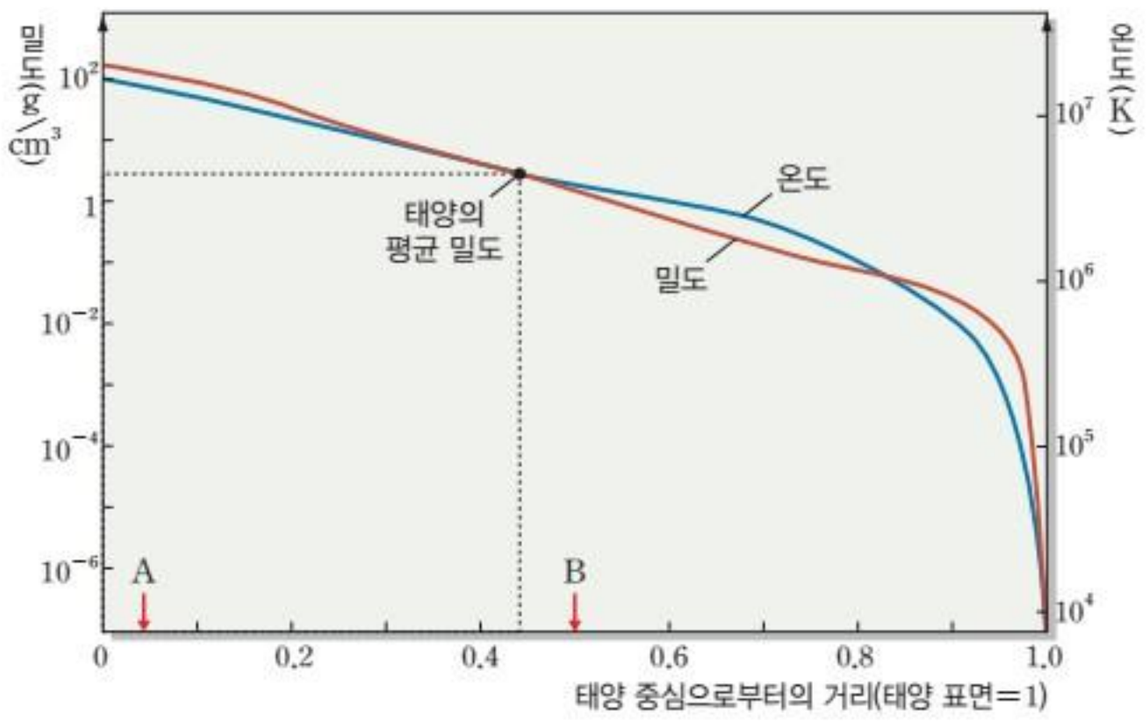
ㄱ. X의 스펙트럼에서는 HeⅡ 흡수선이 강하게 나타난다.
ㄴ. Y의 표면 온도는 X보다 낮고, Z보다 높다.
ㄷ. Z의 중심핵에서 에너지 전달은 주로 대류에 의해 일어난다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

O형 별에서는 HeⅡ의 흡수선이 강하게 나타나며, A0형 별에서는 HI의 흡수선이 가장 강하게 나타난다.

2 그림은 태양 중심으로부터의 거리에 따른 밀도와 온도의 변화를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

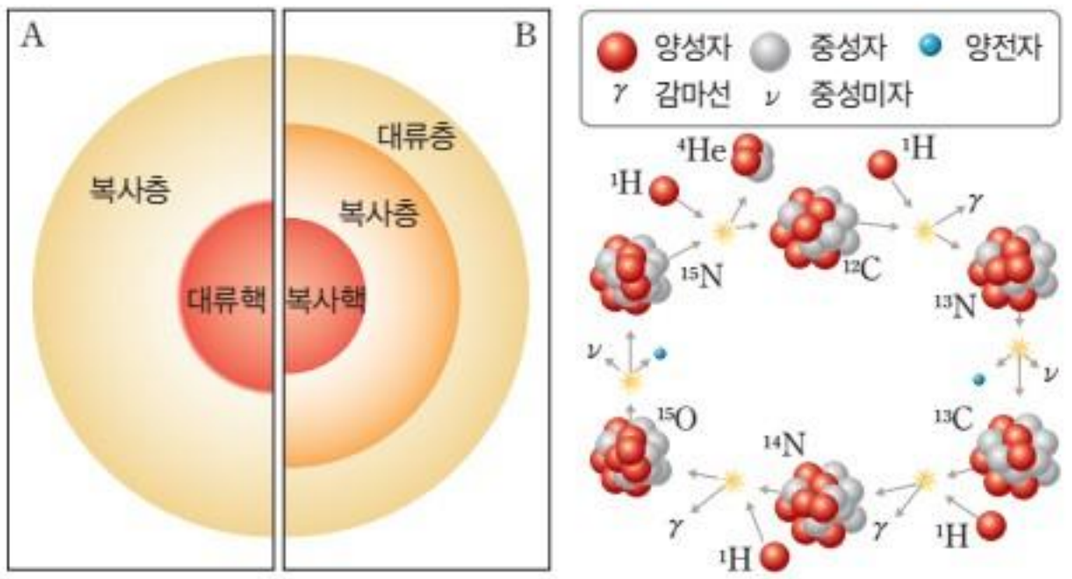
ㄱ. A 지점에서 $\frac{\text{P-P 반응에 의한 에너지 생성량}}{\text{CNO 순환 반응에 의한 에너지 생성량}}$은 1보다 크다.
ㄴ. B 지점에서의 에너지 전달은 주로 대류에 의해 일어난다.
ㄷ. 수소 핵융합 반응은 A와 B 지점에서 모두 일어난다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

태양 질량의 약 1.5배 이하인 별에서는 P-P 반응이 우세하게 일어나며, 별의 중심에서 별 반지름의 약 70 %까지 복사층에 해당한다.

3 그림 (가)는 주계열성 A와 B의 내부 구조를, (나)는 수소 핵융합 반응 중 한 가지를 나타낸 것이다. A와 B의 질량은 각각 태양 질량의 1배와 10배 중 하나이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 별의 질량은 A가 B보다 크다.

ㄴ. (나) 과정에서 최종적으로 탄소, 질소, 산소가 생성된다.

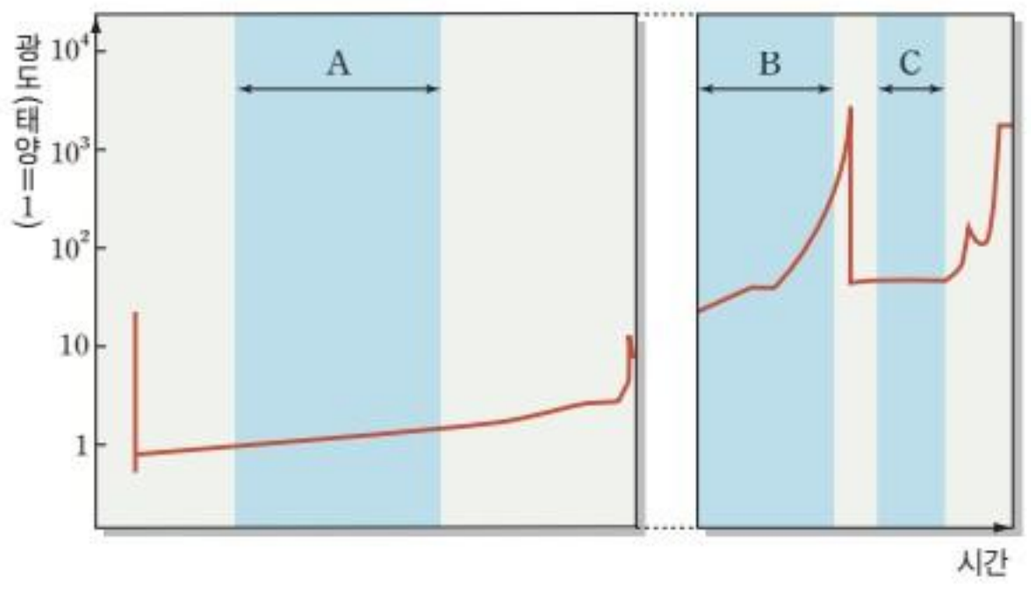
ㄷ. $\frac{\text{(나) 과정으로 생성되는 에너지}}{\text{전체 수소 핵융합 반응으로 생성되는 에너지}}$는 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

태양 질량의 약 1.5배 이하인 별에서는 P−P 반응, 약 1.5배 이상인 별에서는 CNO 순환 반응이 우세하게 일어난다.

4 그림은 태양과 질량이 비슷한 별의 시간에 따른 광도 변화를 나타낸 것이다.



이 별에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 복사 에너지를 최대로 방출하는 파장의 평균값은 A 시기보다 B 시기가 길다.

ㄴ. $\frac{\text{수소 핵융합 반응에 의한 에너지 생성량}}{\text{전체 핵융합 반응에 의한 에너지 생성량}}$은 A 시기보다 C 시기가 크다.

ㄷ. B 시기와 C 시기에는 헬륨 핵융합 반응이 일어난다.

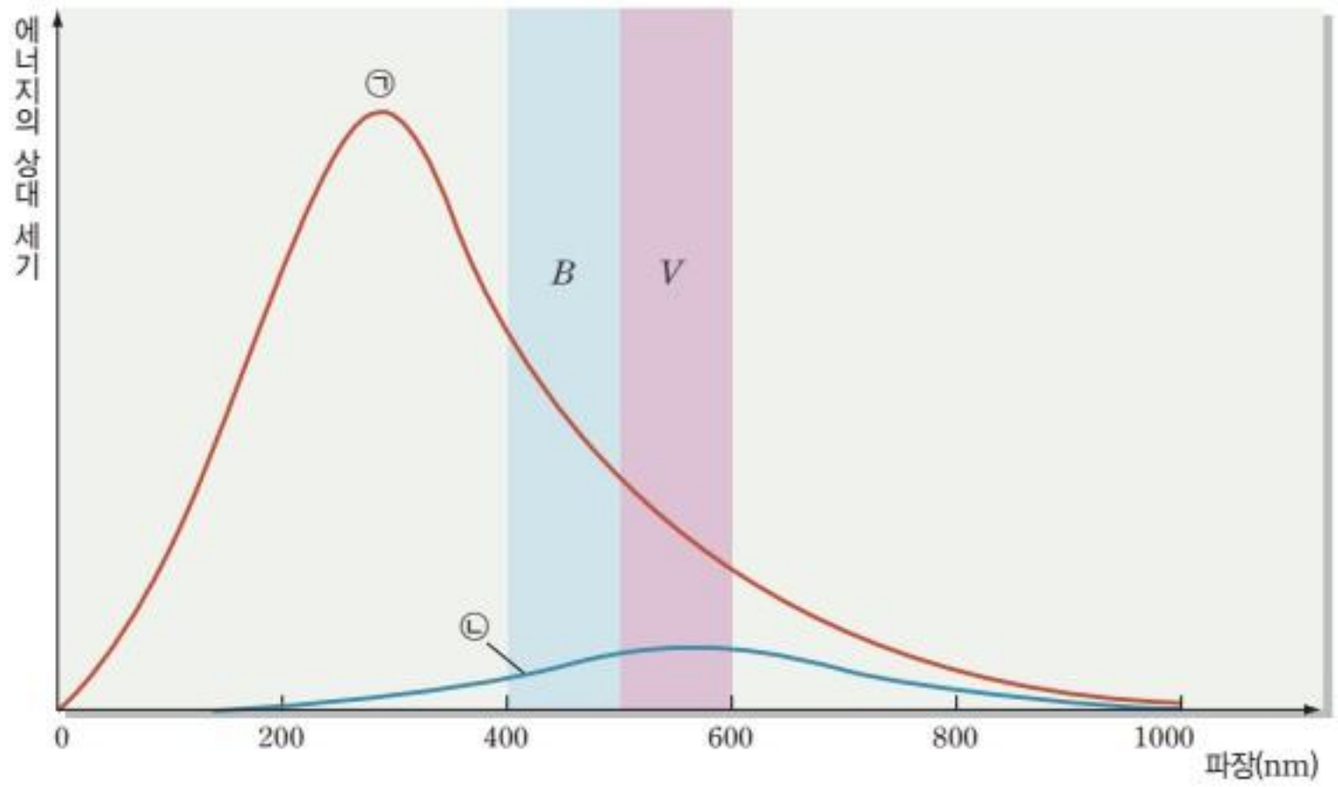
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

주계열 단계 이후 별의 중심부는 수축하면서 온도가 상승하며, 이때 수소 껍질에서 핵융합 반응이 일어난다. 이후 중심부 온도가 약 1억 K 이상이 되면 중심부에서 헬륨 핵융합 반응이 시작된다.

사고력 확장 문제

1 그림은 별 ㉠과 ㉡의 파장에 따른 복사 에너지의 상대 세기를 나타낸 것이다.



(1) ㉠과 ㉡의 표면 온도를 최대 복사 에너지를 방출하는 파장과 관련지어 비교하시오.

(2) ㉠과 ㉡의 $(B-V)$ 색지수 크기를 복사 에너지의 상대적인 세기와 관련지어 비교하시오.

KeyWord
(1) • 빈의 변위 법칙
(2) • B 필터
• V 필터
• 복사 에너지

Solution Tip
별의 표면 온도가 높을수록 최대 복사 에너지를 방출하는 파장은 짧아지고, 짧은 파장의 복사 에너지를 더 많이 방출한다.

2 표는 별 A~C의 절대 등급, 반지름, 분광형을 나타낸 것이다. A~C는 각각 백색왜성, 주계열성, 적색거성 중 하나이다.

별	절대 등급	반지름(태양=1)	분광형
A	5.0	1	G2
B	−2.0	100	( )
C	10.0	0.01	( )

(1) A~C는 어떤 종류의 별인지 쓰고, 그 까닭을 서술하시오.

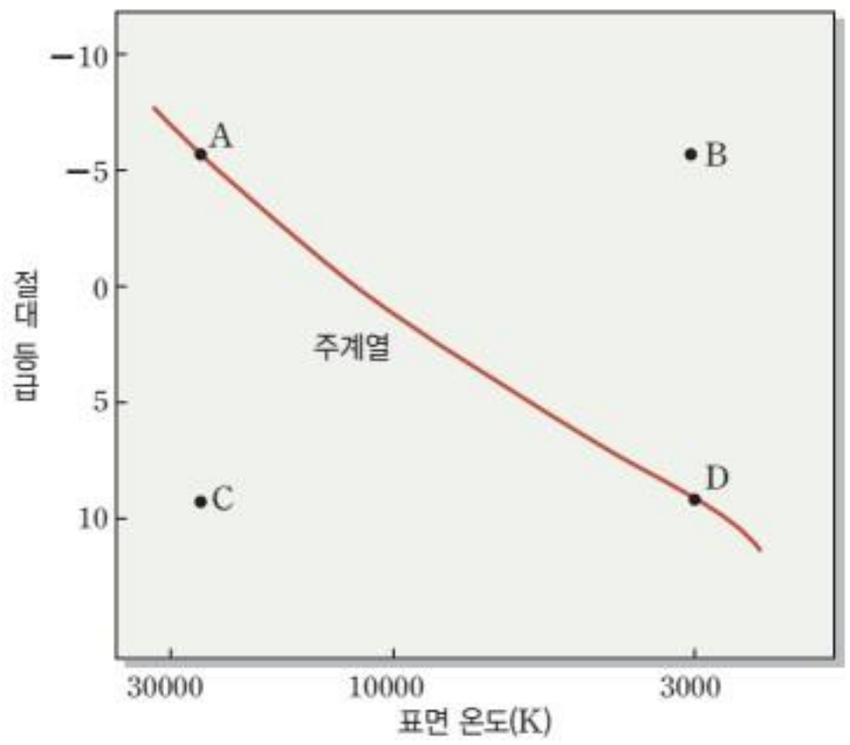
(2) A~C 중 스펙트럼에서 분자 흡수선이 가장 강하게 나타나는 별을 쓰고, 그 까닭을 서술하시오.

KeyWord
(1) • 절대 등급
• 반지름
(2) • 표면 온도

Solution Tip
별의 스펙트럼에서 분자 흡수선은 표면 온도가 낮은 별에서 강하게 나타난다.

정답과 해설 178쪽

3 그림은 별 A~D를 H-R도에 나타낸 것이다. A~D는 모두 중심부가 안정적인 상태이다.



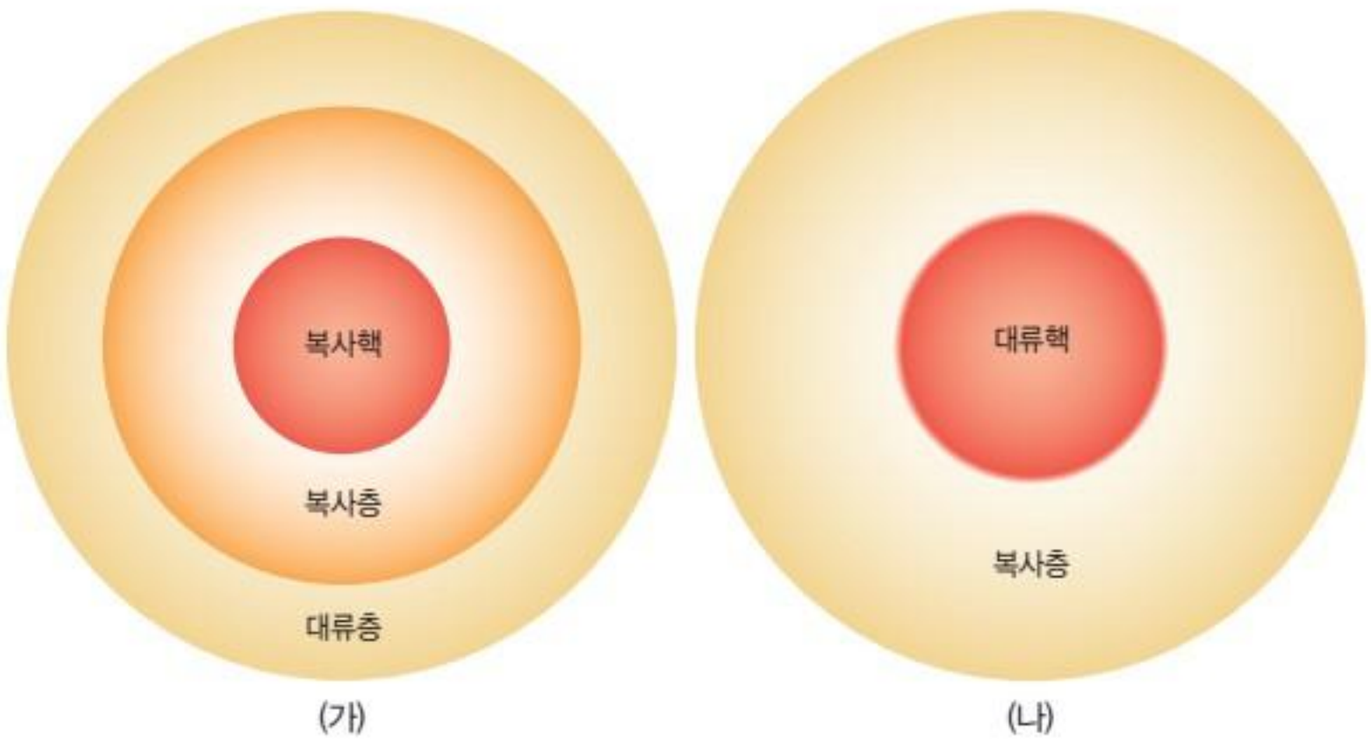
A~D의 중심부에서 일어나는 핵융합 반응의 종류를 비교하시오.

KeyWord
- 주계열성
- 초거성
- 백색왜성

Solution Tip

주계열성의 중심부에서 핵융합 반응이 끝나면 중심부가 수축하면서 온도가 올라가고, 일정 온도 이상이 되면 다시 다른 원소의 핵융합 반응이 시작된다.

4 그림은 주계열성 (가)와 (나)의 내부 구조를 나타낸 것이다. (가)와 (나)의 질량은 각각 태양 질량의 1배와 15배 중 하나이다.



(가) (나)

(1) (가)와 (나)의 중심부에서 우세하게 일어나는 수소 핵융합 반응의 종류를 별의 질량과 관련지어 비교하시오.

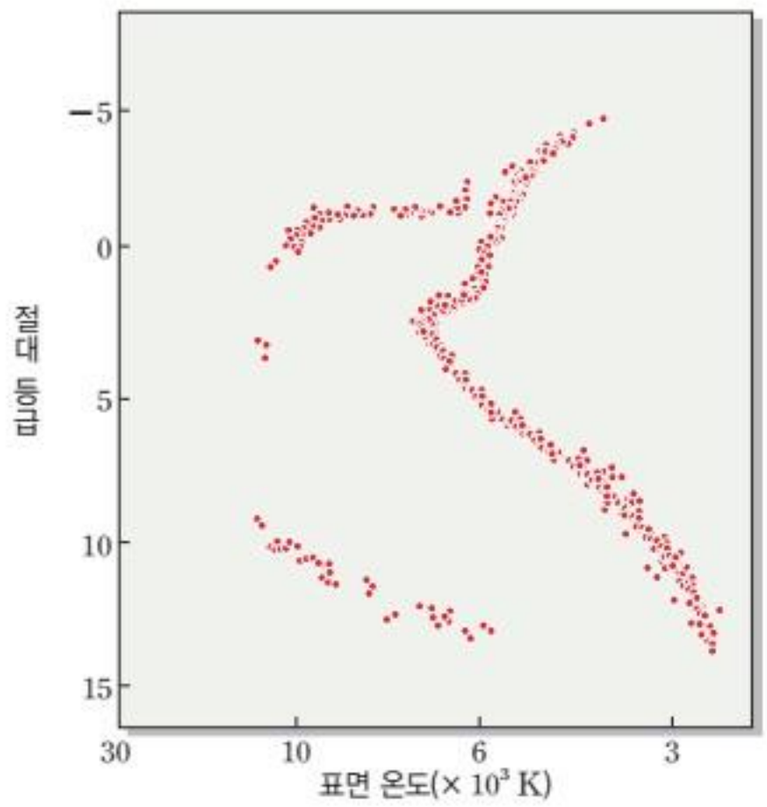
(2) (가)와 (나)의 주계열 이후 단계에서 중심부의 핵융합 반응이 모두 끝났을 때, 가장 안쪽에 있는 원소의 종류를 비교하시오.

KeyWord
(1) • 내부 구조
• 질량
(2) • 헬륨 핵융합 반응

Solution Tip

주계열성의 질량에 따라 중심부 온도가 다르므로, 우세하게 일어나는 수소 핵융합 반응의 종류가 달라진다. 또한 진화 마지막에 형성되는 원소도 별의 질량에 따라 결정된다.

5 그림은 어느 성단을 이루고 있는 별들을 H−R도에 나타낸 것이다. (단, 이 성단의 별들은 거의 동시에 만들어졌다.)



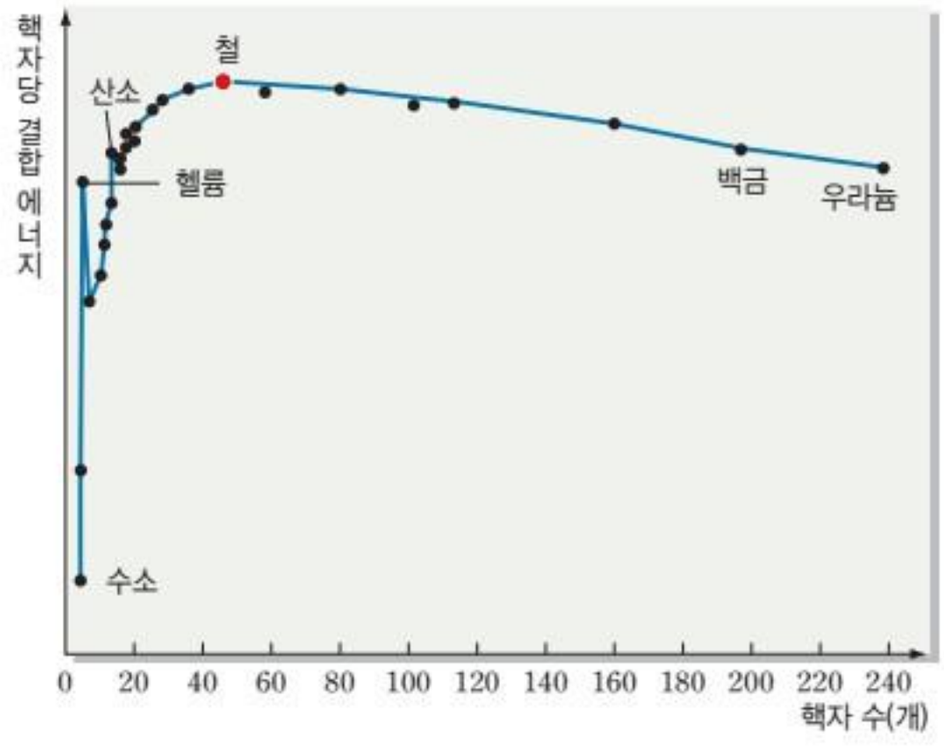
H−R도의 위쪽에서 주계열을 벗어난 별들이 나타나는 까닭을 서술하시오.

KeyWord
- 중심부
- 수소
- 거성

Solution Tip

성단을 이루는 별들이 동시에 만들어져도, 별의 질량에 따라 진화 속도가 다르다.

6 다음은 원자량에 따른 핵자당 결합 에너지와 핵자 수의 특징을 나타낸 것이다.



- 핵자당 결합 에너지가 클수록 더 안정한 원자핵이다.
- 핵자 수가 50 정도인 원자핵이 상대적으로 가장 안정하다.
- 핵자 수가 적으면 핵융합하려는 경향이 있고, 핵자 수가 많으면 핵분열하려는 경향이 있다.

위 내용을 바탕으로 별 내부에서는 철 원자핵까지만 생성되는 까닭을 서술하시오.

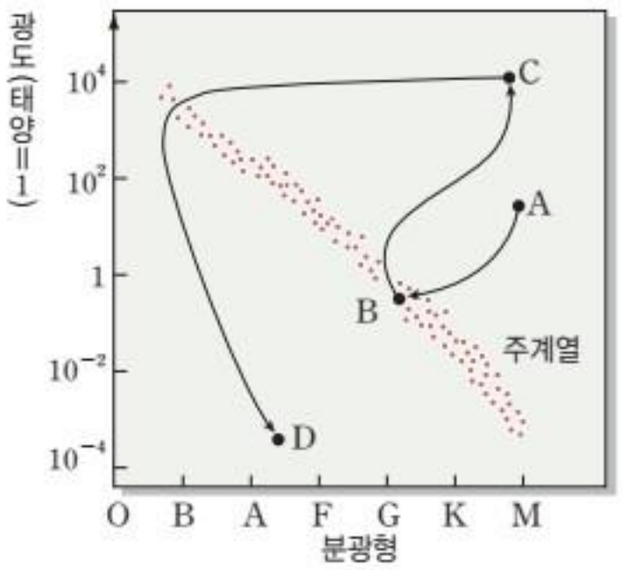
KeyWord
- 핵자당 결합 에너지

Solution Tip

철(Fe) 부근에서 핵자당 결합 에너지가 최대이다. 철보다 가벼운 원자핵은 핵융합으로, 무거운 원자핵은 핵분열로 안정성을 높인다.

정답과 해설 178쪽

7 그림 (가)는 태양과 질량이 비슷한 별의 진화 경로를 나타낸 것이며, (나)는 이 별의 진화 과정 중 나타나는 천체의 모습이다.



(가)



(나)

(1) (가)의 진화 단계 중 (나)와 같은 천체를 볼 수 있는 단계는 어디인지 쓰시오.

(2) (나)와 같은 천체가 만들어지는 과정을 핵융합 반응과 관련지어 서술하시오.

KeyWord

(2) • 탄소 핵융합
• 바깥층 물질
• 방출

Solution Tip

태양과 질량이 비슷한 별은 중심부 온도가 탄소 핵융합 반응이 일어날 정도로 상승하지는 못하여 수축과 팽창을 반복한다.

8 그림 (가)와 (나)는 질량이 다른 두 별의 진화 과정에서 나타나는 모습이다.



(가)



(나)

(1) (가)와 (나)의 중심에 있는 천체가 무엇인지 쓰고, 두 천체의 밀도를 비교하여 서술하시오.

(2) (가)와 (나)에서 방출된 물질은 우주 공간에서 어떤 역할을 하게 되는지 서술하시오.

KeyWord

(1) • 백색왜성
• 중성자별
• 블랙홀
(2) • 별의 생성

Solution Tip

태양과 질량이 비슷한 별은 중심핵이 백색왜성이 되고, 방출된 바깥층 물질이 행성상 성운을 형성한다. 태양보다 질량이 매우 큰 별은 초신성 폭발 후 중심핵이 중성자별이나 블랙홀이 되고, 방출된 가스와 먼지가 초신성 잔해가 된다.

단원 Preview

이 단원에서 배우는 핵심 개념으로 단원 내용을 미리 살펴봅시다.

외부 은하

외부 은하의 분류

나선 은하 마을

멋있는 팔을 가진 우리 마을이 최고!

타원 은하 마을

조용한 우리 마을이 최고!

불규칙 은하 마을

역시 자유분방한 우리 마을이 최고!

특이 은하

전파 장풍을 받아라!

작지만 누구보다 강한 나!

허허허. 괜찮습니다.

화가 난다! 난 속이 좁다고!

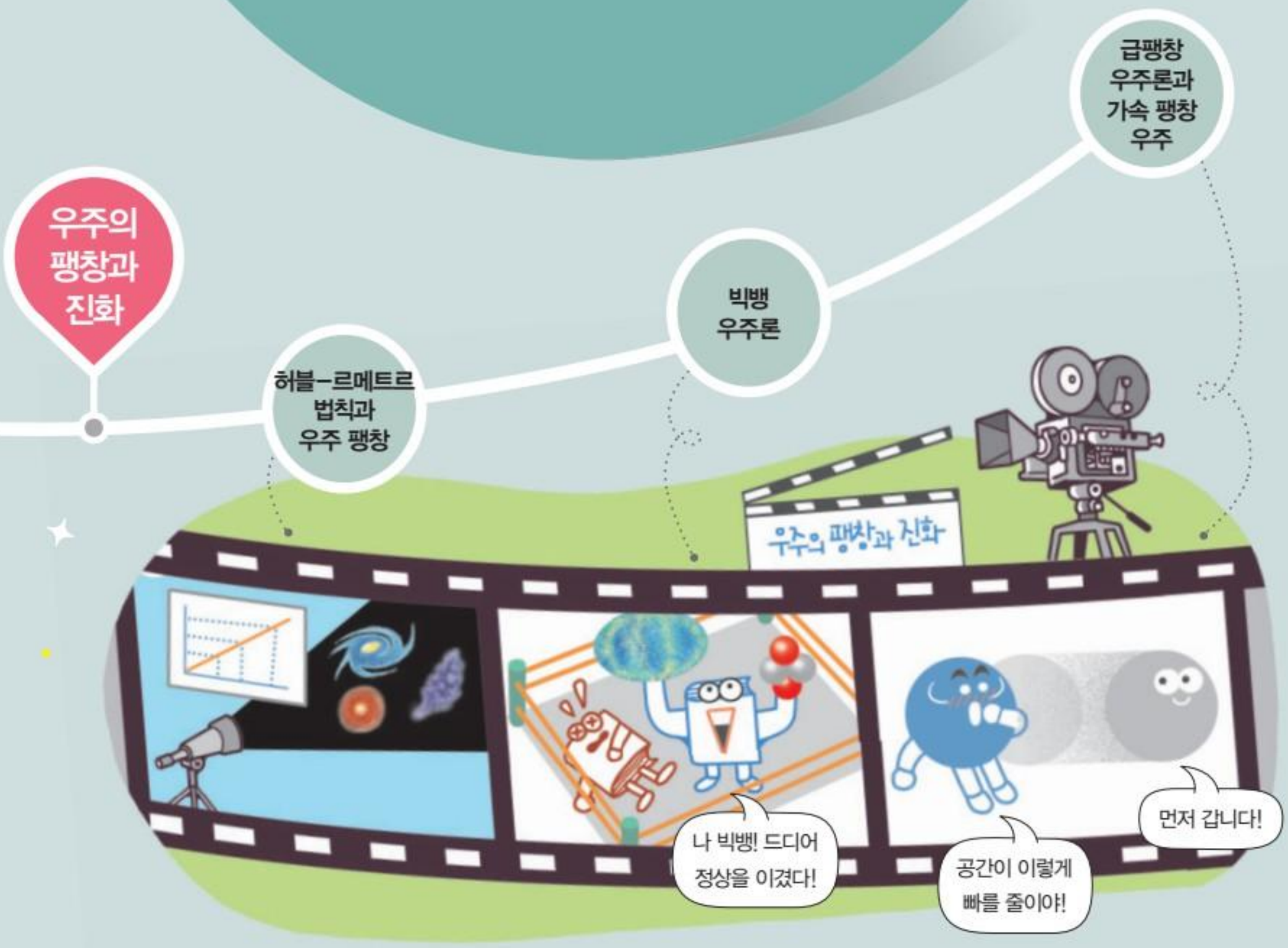
3

은하와 우주

우주에는 여러 가지 모양과 특징을 가진 수많은 외부 은하가 존재하며,
외부 은하의 관측으로 우주의 팽창과 진화를 이해할 수 있다.

01 외부 은하

02 우주의 팽창과 진화



01 외부 은하

핵심 내용 미리보기

외부 은하는 **모양**에 따라 **타원 은하, 나선 은하, 불규칙 은하**로 분류할 수 있으며, 모양에 따라 분류하기 어려운 **특이 은하**도 있다.

1 외부 은하의 분류

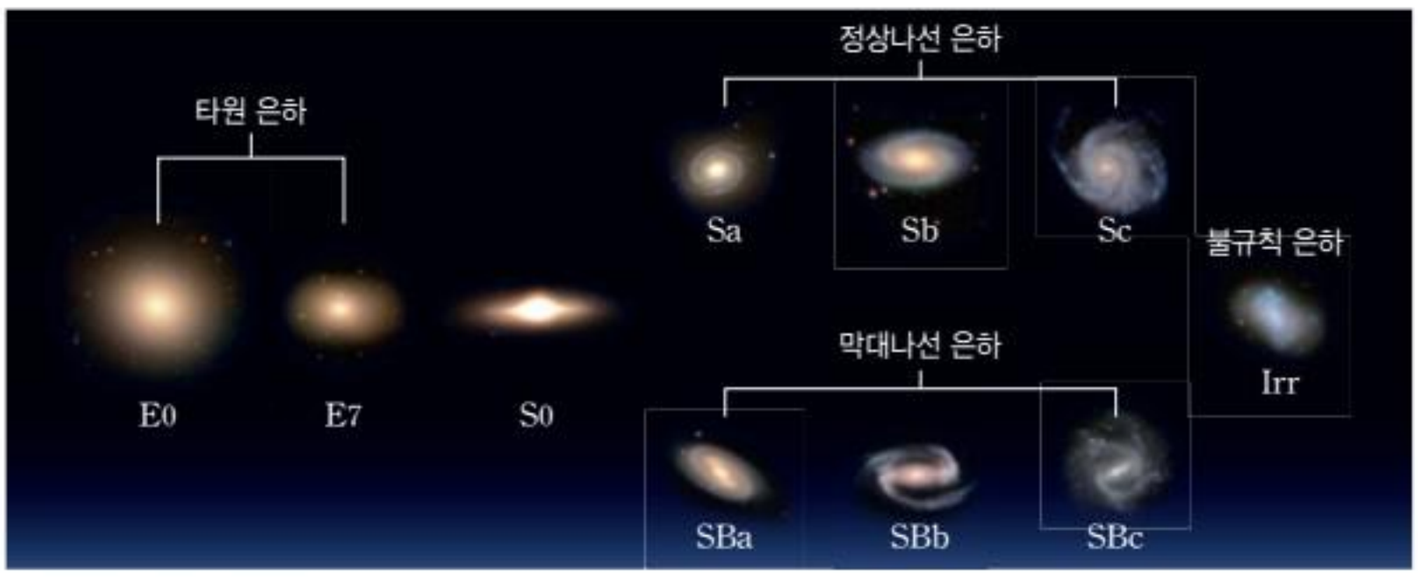
우주 망원경으로 우주를 촬영하면 우리은하 바깥에 있는 외부 은하들이 많이 나타난다. 이렇게 우주를 구성하는 기본 단위인 은하는 형태에 따라 분류할 수 있다.

1. 외부 은하의 발견

허블은 안드로메다은하에 있는 세페이드 변광성까지의 거리가 우리은하의 지름보다 크다는 것을 밝혀내어 외부 은하의 존재를 처음으로 증명하였다.

2. 허블의 은하 분류

허블은 다양한 외부 은하를 가시광선 영역에서 관측되는 형태학적 특징에 따라 크게 타원 은하, 나선 은하, 불규칙 은하로 분류하였다.



▲ 허블의 은하 분류 체계

(1) **타원 은하(E):** 나선팔이 없는 타원 모양의 은하이다. *성간 물질이 매우 적어 별의 형성이 거의 일어나지 않으며, 주로 나이가 많은 붉은색 별들로 이루어져 있다.



▲ 타원 은하 M49



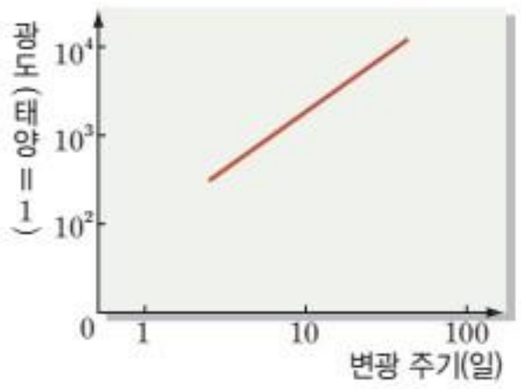
▲ 왜소 타원 은하 M110



▲ 거대 타원 은하 ESO 325-G004

세페이드 변광성

세페이드 변광성은 별의 진화 단계 중 거성 단계에서 팽창과 수축을 반복하면서 밝기가 주기적으로 변하는 별이다. 미국의 천문학자인 리비트는 변광성의 변광 주기가 길수록 광도가 커지는 주기 광도 관계를 발견하였다.



▲ 변광성의 주기 광도 관계

은하를 분류할 때 사용하는 약자

은하를 분류할 때 사용하는 약자는 Elliptical(타원), Spiral(정상나선), Spiral-Bar(막대나선), Irregular(불규칙)의 앞 글자를 따서 각각 E, S, SB, Irr을 사용한다.

렌즈형 은하(S0)

렌즈형 은하는 타원 은하와 나선 은하의 중간 형태로, 은하 원반이 있으나 나선팔이 없다.

용어 리마인드

*성간 물질 [중학교 과학]
별과 별 사이의 넓은 공간에 퍼져 있는 가스와 먼지 등의 물질

① 세분화: 편평도에 따라 E0~E7로 세분한다. E0은 거의 구형이며, E7로 갈수록 점점 납작해진다.

② 크기: 지름이 수천 광년밖에 되지 않는 왜소 타원 은하부터 지름이 수백만 광년에 이르는 거대 타원 은하까지 크기가 매우 다양하다.

(2) **나선 은하(S, SB):** 납작한 원반 구조를 가지며, 중앙 팽대부를 중심으로 나선팔이 감긴 모양의 은하이다. 중앙 구조에 따라 둥근 중심부를 가진 정상나선 은하(S)와 중앙에 막대 구조를 가진 막대나선 은하(SB)로 분류한다. 중앙 팽대부에는 나이가 많은 붉은색 별과 구상 성단이 주로 분포하고, 나선팔에는 나이가 적은 푸른색 별과 성간 물질 및 산개 성단이 많이 분포한다.



▲ 정상나선 은하 M101

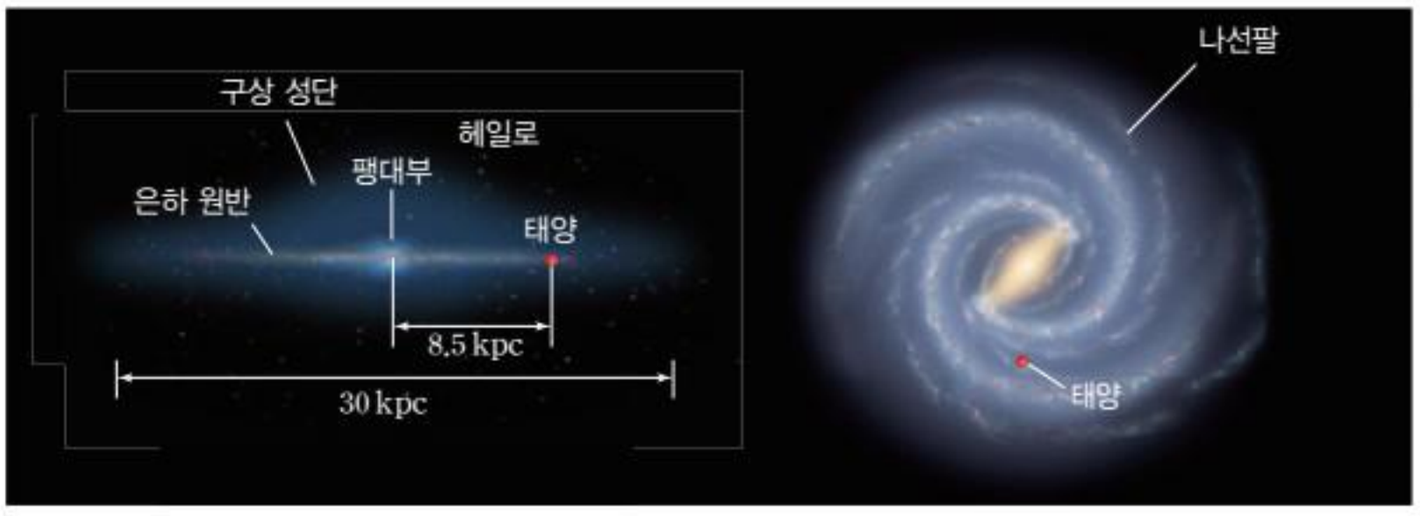


▲ 막대나선 은하 NGC 1300

① 세분화: 형태에 따라 a형~c형으로 세분한다. a형에서 c형으로 갈수록 은하 전체에 대한 중앙 팽대부의 비율이 작고, 나선팔이 느슨하게 감기며, 새로운 별이 탄생하는 암흑 성운도 많이 분포한다.

② 나선 은하 중심부에 막대 구조가 생기는 까닭: 나선 은하의 나이가 많을수록 막대 구조를 가진 비율이 높아지는 경향이 있다. 현재 관측되는 나선 은하의 절반 이상은 중심에 막대 구조가 있으며, 이는 은하 내부가 역학적으로 불안정하면 만들어지는 것으로 알려져 있다. 특히 나선 은하 근처에 다른 은하가 있어 중력적으로 상호작용할 경우, 막대 구조가 새로 형성되거나 더욱 뚜렷하게 나타날 수 있다.

③ 우리은하: 우리은하는 중심에 막대 구조와 나선팔이 있다. 전체 지름은 약 10만 광년(약 30 kpc)이며, 태양은 은하 중심에서 약 2만 8000광년(약 8.5 kpc) 떨어진 곳에 있다.

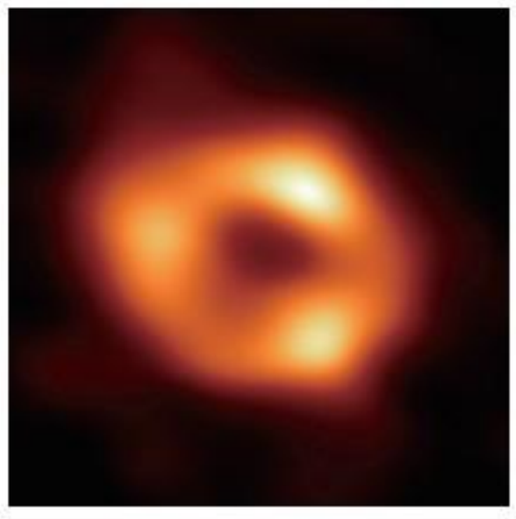


▲ 우리은하의 구조(예상도)

편평도
타원체의 모양이 얼마나 납작한지를 수치로 나타낸 물리량으로, 은하에서는 은하의 긴반지름과 짧은반지름의 차이를 기준으로 정의한다.

나선 은하의 예
안드로메다은하는 대표적인 Sb형 정상 나선 은하이며, 우리은하는 연구 결과 중심에 막대 구조가 있다는 것이 밝혀져 SBbc형 막대나선 은하로 분류한다.

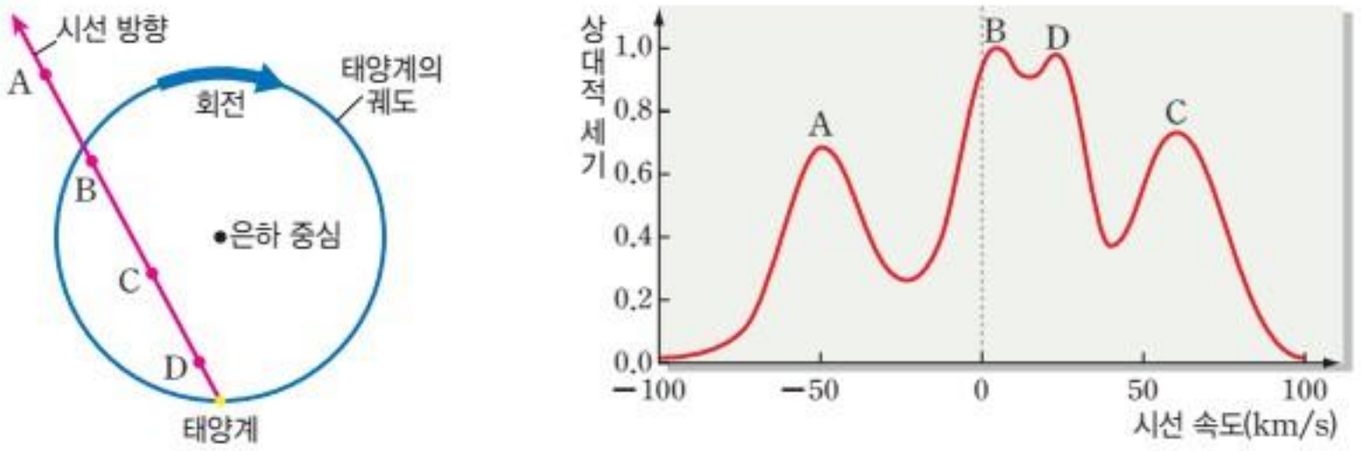
우리은하 중심의 블랙홀
우리은하 중심에는 거대 질량 블랙홀이 있는데, 이러한 블랙홀은 우리은하뿐만 아니라 질량이 큰 대부분의 은하 중심에 있을 것으로 추정되고 있다.



▲ 우리은하 중심부에 있는 거대 질량 블랙홀 궁수자리(Sagittarius) A*를 관측한 모습

심화 우리은하의 나선팔 구조 확인

- 중성 수소 원자는 양성자와 전자의 스핀 방향에 따라 에너지가 다른 두 상태를 가진다. 이때 에너지가 높은 상태에서 낮은 상태로 바뀌면 파장이 약 21 cm인 전파가 방출된다. 이 21 cm 수소선은 상대적으로 파장이 길어 성간 물질을 통과할 때 산란이 적게 일어난다.
- 우리은하 원반에 분포하는 중성 수소 구름은 은하 중심을 기준으로 회전하므로, 21 cm 수소선의 도플러 효과를 이용하여 시선 속도를 측정하면 은하 중심으로부터 중성 수소 구름의 상대적 위치를 추정할 수 있다. 관측 결과, 은하 중심을 기준으로 중성 수소가 밀집된 영역(A ~ D)이 반복적으로 나타났으며, 이를 통해 우리은하에 나선팔 구조가 존재한다는 사실이 밝혀졌다.



▲ 21 cm 수소선의 시선 속도와 전파의 상대적 세기

(3) **불규칙 은하(Irr):** 규칙적인 형태가 없고, 중앙 팽대부나 나선팔이 명확하지 않은 은하이다. 나이가 적은 푸른색 별이 많으나 나이가 많은 붉은색 별도 포함하고 있으며, 성간 물질이 많아 새로운 별의 생성이 활발하다. 대부분 규모가 작으며, 일부는 과거 나선 은하나 타원 은하였으나 중력에 의해 변형된 것으로 추정된다.



▲ 불규칙 은하 IC 10



▲ 불규칙 은하 IC 3583



▲ 소마젤란은하

(4) **허블 분류의 의의:** 허블 분류는 은하의 진화와는 관련이 없으며, 다른 파장 영역에서는 은하의 모습이 바뀔 수 있다. 하지만 허블 분류는 구분이 단순하고 명확하며, 여러 물리적 특징과도 밀접한 연관이 있어 현재에도 널리 사용된다.

우리은하의 나선팔 종류

우리은하는 2개의 큰 주 나선팔과 여러 개의 작은 지류 나선팔을 가지고 있다고 알려져 있다. 다만, 관측 파장에 따라 나선팔의 구조와 개수는 다르게 보일 수 있다. 주 나선팔 및 태양계가 속한 나선팔은 다음과 같다.

- 페르세우스 팔: 우리은하의 대표적인 바깥쪽 주 나선팔
- 방패–센타우루스 팔: 은하 중심 근처에서 시작되는 주 나선팔
- 오리온 팔: 태양계가 포함된 나선팔

불규칙 은하의 세분

불규칙 은하는 Irr – Ⅰ형, Irr – Ⅱ형으로 세분할 수 있다. Irr – Ⅰ형은 구조적 특징이 일부 나타나지만, 허블 분류 체계(타원 은하 또는 나선 은하)로 분류하기에는 충분하지 못한 은하이다. Irr – Ⅱ형은 어떠한 구조적 특징도 나타나지 않는 은하이다.

중요 개념 체크

정답과 해설 180쪽

1. 허블의 은하 분류에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 타원 은하에는 상대적으로 나이가 많은 별보다 나이가 적은 별이 더 많다. – ( )

(2) 나선 은하의 나선팔에는 산개 성단 및 성간 물질이 많이 분포한다. ——— ( )

(3) 불규칙 은하에서는 새로운 별의 생성이 거의 일어나지 않는다. ——— ( )

2 특이 은하

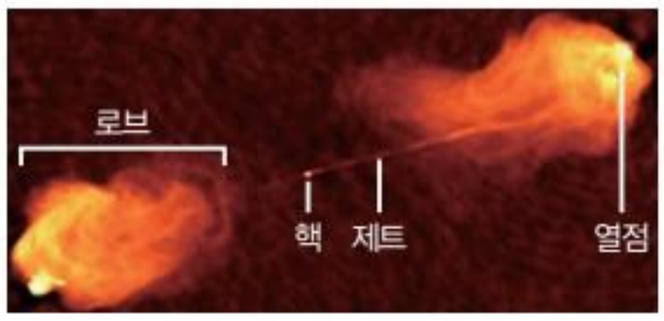
우주에는 다양한 파장에서 관측했을 때 기존의 분류 체계로는 설명하기 어려운 특이 은하가 있다. 이들은 일반 은하와는 구별되는 독특한 특징을 지닌다.

외부 은하 중에는 허블의 분류 체계로 분류하기 어려운 은하들이 있다. 이들 중 특히 은하핵이 밝은 은하를 특이 은하 또는 활동 은하라고 하며, 이러한 특이 은하의 중심부에는 거대 질량의 블랙홀이 있을 것으로 추정한다.

1. 전파 은하

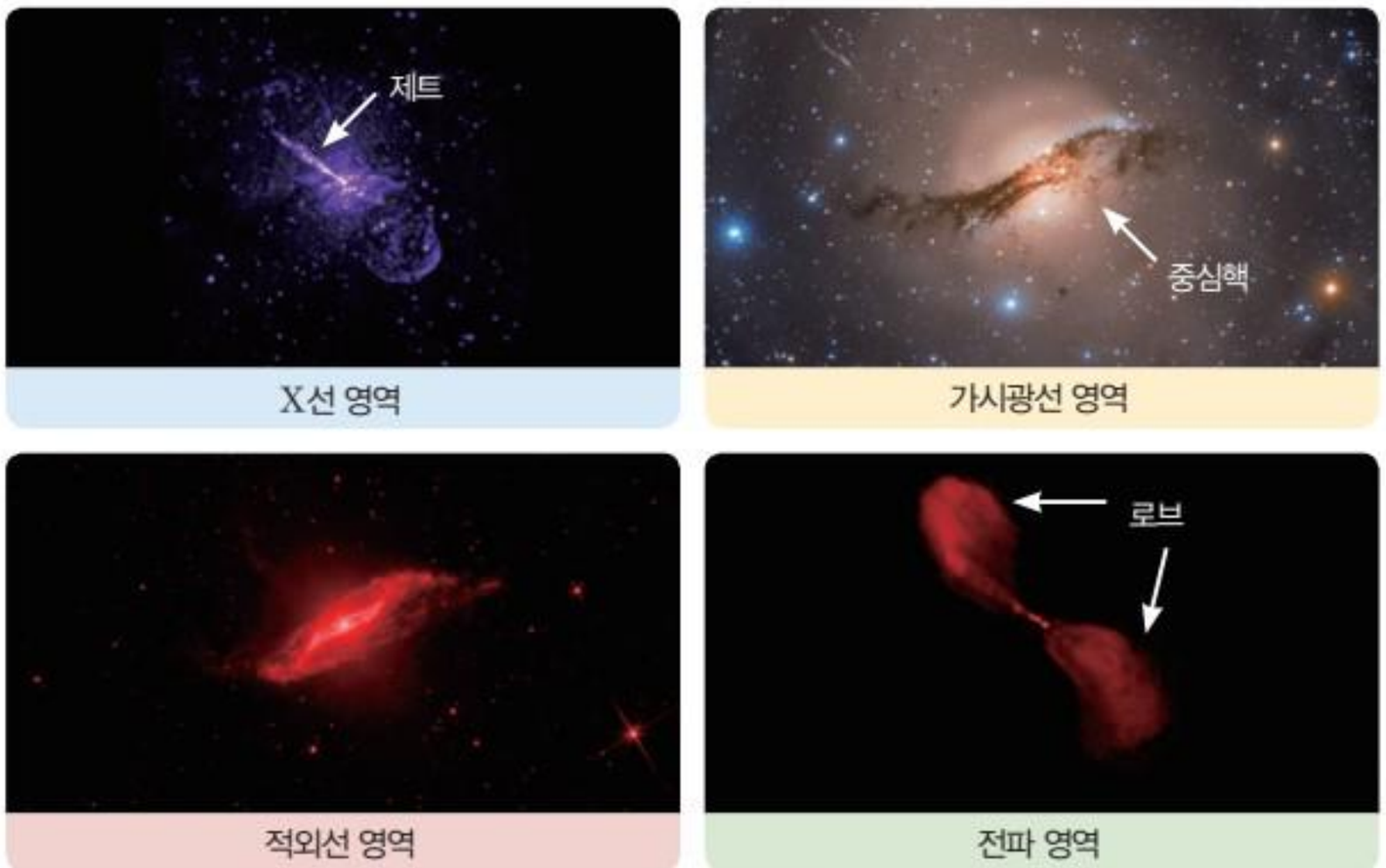
전파 망원경의 발달로 강한 전파를 방출하는 은하들이 발견되었는데, 이를 전파 은하라고 한다. 전파 은하에서 방출되는 에너지는 우리은하가 방출하는 에너지의 수백 배~수백만 배에 이른다. 일반 은하에서 방출되는 전파는 주로 별에서 나오지만, 전파 은하에서는 성간 물질에서 나온다고 알려져 있다.

(1) **전파 은하의 구조:** 전파 은하는 가시광선 영역으로 관측했을 때는 주로 거대 타원 은하로 보이지만, 전파 영역으로 관측하면 훨씬 크게 보인다. 중심에는 핵이 있고, 핵 양쪽에 제트(Jet)로 연결된 거대한 전파 방출 영역인 로브(Lobe)가 있다. 로브의 크기는 은하 전체보다 몇 배 이상 클 때도 있다. 한편, 관측자의 시선 방향에 따라 핵, 로브, 관측자가 일직선을 이루는 방향에서 관측할 때는 로브가 보이지 않고 핵만 뚜렷하게 보인다.



▲ 전파 은하 3C 405

(2) **제트의 특징:** 제트는 중심핵에서 양쪽으로 방출되는 좁은 선 모양의 물질 흐름으로, 은하 중심부의 거대 질량 블랙홀에서 생성된 것으로 추정된다. 제트는 강력한 자기장에서 형성된 복사 에너지 때문에 X선 영역에서도 관측된다.



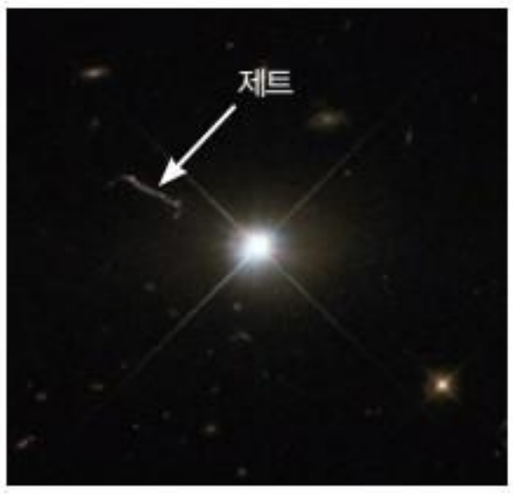
▲ 전파 은하인 센타우루스 A 은하를 여러 영역에서 관측한 모습

활동성 은하핵에 대한 통합 모형
최근에는 전파 은하, 퀘이사, 세이퍼트 은하 등과 같은 다양한 특이 은하를 하나의 공통된 구조로 설명하는 활동성 은하핵 모형이 제안되고 있다. 이 통합 모형에서는 모든 활동성 은하의 중심에는 거대 질량의 블랙홀이 있으며, 그 주위를 빠르게 회전하는 원반에서 발생하는 에너지가 강한 방사 에너지의 근원이라고 추정한다.

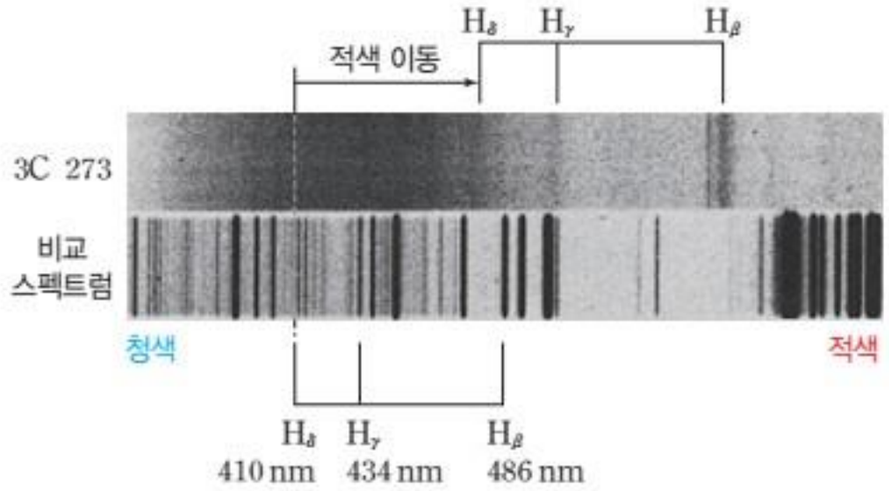
싱크로트론
고속으로 움직이는 전자가 자기장을 따라 운동하면서 복사를 방출하는 현상이다. 로브에서의 전파 방출은 싱크로트론 과정에 의한 것으로, 이때 로브 내의 고속으로 가속된 전자는 매우 높은 에너지를 가진다.

2. 퀘이사(Quasar)

발견 당시 별처럼 보이는 천체인 준성이 전파를 방출한다고 하여 준성 전파원(Quasi-Stellar Radio Source), 줄여서 퀘이사(Quasar)라고 불렀다. 현재는 모든 퀘이사가 전파 방출원은 아닌 것으로 알려져 정식 명칭은 준항성체(Quasi-Stellar Object, QSO)이지만, 통상적으로 퀘이사라고 계속 부르고 있다.



▲ 퀘이사 3C 273



▲ 퀘이사의 스펙트럼

(1) **퀘이사까지의 거리와 시공간적 의미:** 퀘이사에서는 매우 큰 적색 이동이 나타난다. 이는 퀘이사가 지구로부터 매우 멀리 떨어져 있으며, 동시에 아주 빠른 속도로 멀어지고 있음을 의미한다. 이러한 특성은 퀘이사의 빛이 아주 오래전에 방출된 것임을 보여주며, 퀘이사는 우주의 역사 초기부터 있었던 천체임을 알 수 있다.

(2) **퀘이사의 에너지:** 퀘이사의 크기는 태양계 정도로 작지만, 방출하는 에너지는 우리 은하의 수백 배~수천 배에 이른다. 이러한 막대한 에너지는 퀘이사 중심부에 있는 것으로 여겨지는 거대 질량 블랙홀에 퀘이사 주변의 물질이 끌려 들어가는 과정에서, 물질의 중력 에너지가 빛에너지로 전환되며 방출되는 것으로 추정된다.

(3) **퀘이사의 스펙트럼:** 퀘이사의 스펙트럼에는 넓고 강한 방출선이 보이고, 일반적인 별에서 나타나는 흡수선이 잘 보이지 않는다.

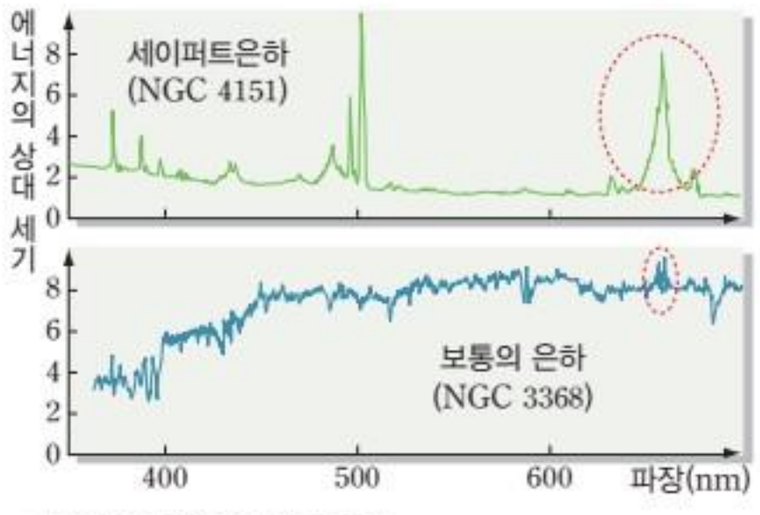
3. 세이퍼트 은하

심화 강의 114쪽~115쪽

가시광선 영역에서는 대부분 나선 은하로 관측되며, 은하의 중심부가 주변부에 비해 비정상적으로 밝고 크기가 작다. 세이퍼트 은하는 일반 은하에 비해 방출선의 폭이 매우 넓게 나타나는데, 이것은 은하 중심에 있다고 추정되는 거대 질량 블랙홀의 영향으로 성간 물질이 매우 빠른 속도로 움직이고 있다는 것을 의미한다.



▲ 세이퍼트 은하 NGC 4151



▲ 세이퍼트 은하의 스펙트럼

퀘이사가 먼 곳에서 발견되는 까닭

은하가 형성되던 초기에는 중심의 거대 블랙홀 주변에 물질이 풍부하게 있었다. 이 물질이 블랙홀로 끌려 들어가며 막대한 에너지가 방출되고, 이러한 은하는 퀘이사로 관측될 수 있었다. 하지만, 시간이 지나면서 블랙홀 주변의 물질이 점차 적어지며 에너지 방출량이 감소했고, 결국 일반적인 은하가 되었을 가능성이 크다. 따라서 퀘이사는 주로 멀리 떨어진 초기 우주의 은하에서 관측된다.

가장 먼 거리의 퀘이사 발견

여러 퀘이사 가운데 약 132억 광년 떨어진 퀘이사가 발견되었는데, 이는 우주의 나이가 약 6억~7억 년인 무렵에 만들어진 것으로 추정된다. 이 퀘이사는 우주 초기의 천체 형성과 블랙홀 성장 과정을 이해하는 데 중요한 단서를 제공한다.

퀘이사와 세이퍼트 은하

퀘이사와 세이퍼트 은하는 모두 전자기파 전 영역에서 강한 방출선이 나타난다. 그러나 퀘이사는 세이퍼트 은하보다 중심핵의 광도가 훨씬 커서, 중심핵 이외에 다른 은하 구조는 잘 관측되지 않는다.

4. 충돌 은하

(1) **은하의 충돌:** 은하는 집단을 이루어 분포하며, 집단 내 은하들은 상대적으로 서로 가까워 충돌하는 현상이 일어나기도 한다. 이렇게 은하와 은하가 충돌하여 형성된 은하를 충돌 은하라고 한다. 은하가 서로 충돌하더라도 별의 크기보다 별 사이의 공간이 훨씬 크기 때문에 은하 내부의 별들이 서로 충돌하는 현상은 거의 일어나지 않는다. 그러나 은하 안의 거대한 분자 구름이 서로 충돌하고 압축되면서 별의 생성을 촉진하거나 활동성이 강한 은하가 만들어지기도 한다. 우리은하 역시 작은 은하들과 합쳐진 흔적들이 있으며, 이러한 충돌 과정을 거친 것으로 추정된다.



▲ **충돌 은하** 왼쪽의 NGC 2444와 오른쪽의 NGC 2445가 충돌하고 있다.

조석력과 꼬리 구조 형성

두 은하가 서로 가까워질 때, 각 은하의 중력장이 상대 은하에 비대칭적으로 작용하여 별과 가스의 운동에 변화를 일으키는데, 이를 조석력(Tidal force)이라고 한다. 이 조석력은 주로 은하 바깥쪽에서 강하게 작용하며, 물질을 바깥 방향으로 끌어내거나 길게 늘어뜨리는 구조를 만든다. 이 과정에서 형성된 구조를 조석 꼬리(Tidal tail)라 하며, 충돌 은하에서는 양쪽 은하에서 이러한 꼬리가 길게 뻗은 모습이 자주 관측된다.



▲ **Arp 273**

(2) **우리은하의 충돌:** 우리은하와 가장 가까운 안드로메다은하는 약 250만 광년 떨어진 곳에서 약 110 km/s의 속력으로 가까워지고 있다. 따라서 약 40억 년 후에는 두 은하가 충돌하기 시작할 것으로 예상되며, 약 60억 년 후에는 두 나선 은하의 충돌이 완전히 끝나 거대 타원 은하로 합쳐질 가능성이 크다. 이 과정에서 태양계는 공전 궤도가 바뀌거나 우리은하를 이탈할 가능성도 있다.



▲ 우리은하의 충돌 과정(상상도)

중요 개념 체크

정답과 해설 180쪽

1. 전파 은하에서 로브와 중심핵을 연결하는 물질 흐름을 (　　)라고 한다.
2. 특이 은하에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.
   (1) 퀘이사의 스펙트럼을 분석한 결과, 퀘이사는 비교적 최근에 만들어졌다. — (　　)
   (2) 세이퍼트 은하는 성간 물질이 빠르게 회전하여 방출선이 넓게 나타난다. — (　　)

TOP 심화 강의

세이퍼트 은하의 방출선 폭이 넓은 까닭은 무엇일까?

1 세이퍼트 은하

세이퍼트 은하는 1943년 미국의 천문학자 칼 세이퍼트(Carl Seyfert, 1911~1960)가 처음으로 분류한 은하의 일종으로, 중심핵이 매우 밝고 독특한 스펙트럼을 지닌 것이 특징이다. 세이퍼트 은하는 가시광선으로 관측했을 때 주로 나선 은하의 형태를 띠며, 중심부에서는 넓은 폭의 수소 방출선이 포함된 스펙트럼이 관측된다. 세이퍼트 은하의 스펙트럼은 퀘이사와 유사하나, 은하 전체의 모양이 뚜렷하게 나타나기 때문에 퀘이사와 구분된다.

세이퍼트 은하의 분류 비율
나선 은하의 약 1 %가 세이퍼트 은하로 분류되며, 이는 대부분의 나선 은하가 전체 생애 중 약 1 % 동안 세이퍼트 은하와 같은 활동 은하 상태를 거칠 수 있음을 의미한다.

2 세이퍼트 은하의 방출선 폭이 넓은 까닭

천체의 스펙트럼에 나타나는 방출선은 원자나 이온이 에너지를 방출하며 특정 파장의 빛을 내는 현상이다. 일반적으로 온도가 높은 가스가 있을 때 나타나며, 선의 중심 파장과 그 폭으로 해당 가스의 구성, 온도, 운동 상태 등을 유추할 수 있다. 그런데 세이퍼트 은하에서는 다른 일반 은하보다 비정상적으로 넓은 방출선이 관측된다.

(1) **도플러 효과에 의한 선폭 확대**: 도플러 효과란 운동하는 광원에서 방출된 빛이 관측자에게 도달할 때, 이동 속도에 따라 파장이 길어지거나 짧아지는 현상이다. 광원이 관측자를 향해 접근할 때는 청색 이동, 멀어질 때는 적색 이동이 일어난다. 세이퍼트 은하의 중심 가스는 공전하면서 여러 방향으로 빠르게 움직이고 있으며, 이 때문에 가스는 우리 쪽으로 오기도 하고 멀어지기도 한다. 그 결과 스펙트럼선은 파장 중심을 기준으로 좌우로 퍼지게 된다. 이로 인해 한 가지 원소에서 나오는 방출선도 넓은 파장 범위에 걸쳐 분포하며, 이를 우리는 넓은 방출선으로 관측하게 된다.

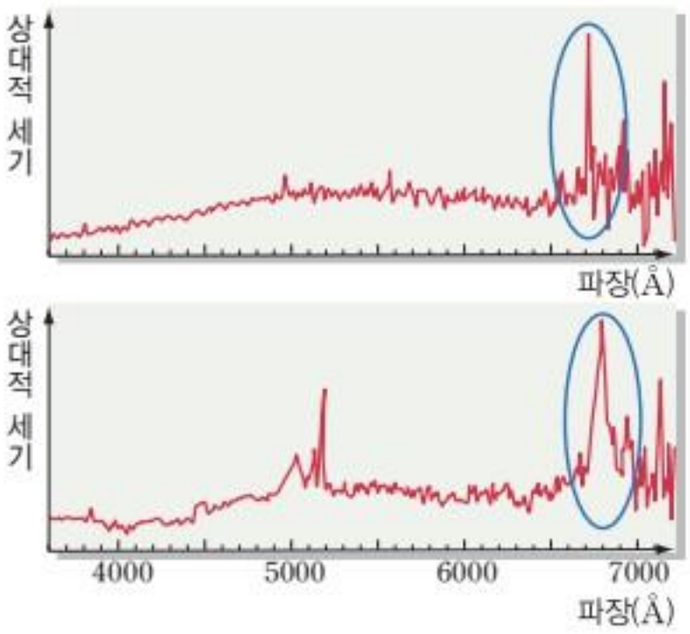
도플러 효과의 예시
속도가 약 10000 km/s인 가스는 Hα선(656.3 nm)을 최대 ±20 nm 범위까지 이동시킬 수 있다. 즉, 1개의 선이 수십 nm 폭으로 퍼지며 두껍고 뭉툭한 형태로 보인다.

(2) **고속으로 운동하는 전리 가스와 도플러 효과**: 세이퍼트 은하는 밝기가 시간이 지남에 따라 변하고, 수소 원자에서 나오는 빛(발머선)이 매우 넓게 퍼진 모습으로 보이기도 한다. 그 까닭은 세이퍼트 은하의 중심에는 태양보다 수백만 배에서 수십억 배의 질량을 가진 거대 질량 블랙홀이 있기 때문이다. 블랙홀이 있는 중심부의 광전리된 고밀도의 가스가 고속으로 운동하며, 그 빠른 운동 때문에 빛의 파장이 도플러 효과로 좌우로 퍼져 발머선이 넓게 보이는 것이다. 가스는 블랙홀에 가까울수록 중력의 영향을 더 강하게 받아 더 빠르게 회전한다. 특히, 블랙홀 바로 근처에 있는 가스는 초당 수천에서 수만 km에 이르는 매우 빠른 속도로 움직이며, 이처럼 극도로 빠른 운동이 도플러 효과를 일으켜 방출선이 넓게 퍼져 보인다. 따라서 세이퍼트 은하의 방출선이 넓게 보이는 가장 직접적인 원인은 중심부 가스의 고속 회전이다.

- 블랙홀에 가까운 가스: 속도가 빨라 도플러 이동이 커지면서 방출선의 폭이 넓다.
- 블랙홀에서 멀리 있는 가스: 속도가 느려 방출선의 폭이 좁다.

전리
원자나 분자가 전자를 잃거나 얻어 이온으로 변하는 과정이다.

광전리된 가스
기체가 자외선, X선 등의 고에너지 빛에 계속 노출되면 원자에 붙어있던 전자들이 빠져나가고, 가스는 이온 상태가 된다. 이러한 상태를 광전리된(빛에 의해 이온화된) 가스라고 한다.

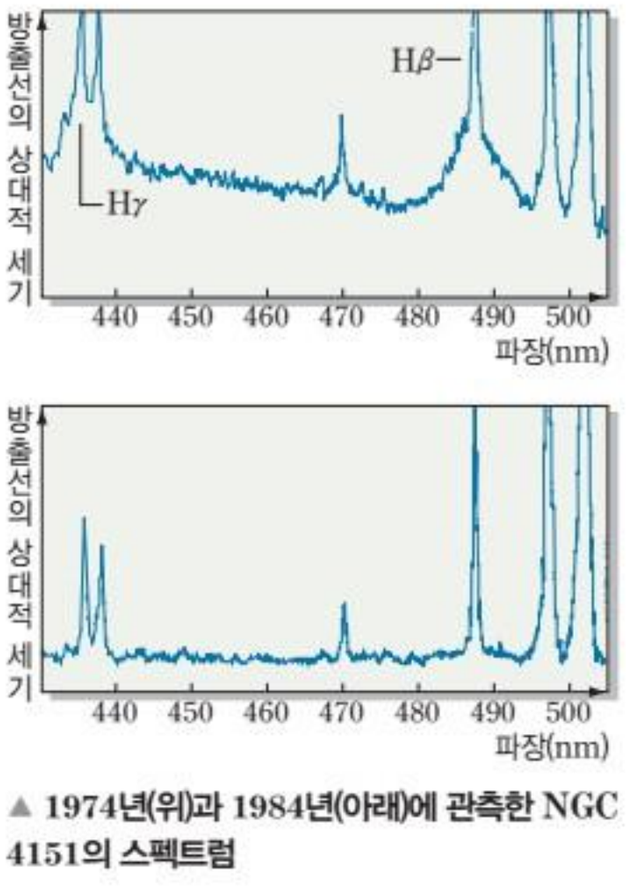


▲ **일반적인 나선 은하(위)와 세이퍼트 은하(아래)의 방출선 폭 비교**

블랙홀 주변 가스 구름의 회전 속도
- 블랙홀 가까이에 있는 가스: 약 5000~10000 km/s
- 블랙홀 바깥쪽에 있는 가스: 약 200~400 km/s

(3) **방출선을 관측하는 시선 방향에 따른 차이:** 세이퍼트 은하의 중심부에서 방출되는 빛은 관측자의 위치에 따라 다르게 보일 수 있다. 만약 고속으로 운동하는 전리 가스 구름이 관측자의 시야 방향으로 노출된다면, 매우 넓은 방출선이 관측된다. 반대로, 이 고속 가스가 가려져 있거나 시야에서 벗어나 있는 경우에는 좁은 방출선만이 관측된다.

- 우리가 은하를 중심부가 보이는 방향에서 관측하면, 고속으로 움직이는 가스의 움직임을 직접 감지할 수 있다. 이로 인해 도플러 효과가 크게 나타나고 방출선이 넓게 퍼져 보인다.
- 우리가 은하를 먼지에 가려진 방향에서 관측하면 고속으로 움직이는 가스가 가려져 잘 보이지 않는다. 따라서 도플러 효과가 거의 나타나지 않으며, 방출선은 좁고 뚜렷하게 보인다.
- 예를 들어, 세이퍼트 은하 NGC 4151을 관측한 결과, 1974년과 같은 특정 시점에는 넓은 수소 방출선이 나타났으며, 이는 전리 가스가 관측자 방향으로 노출된 경우로 해석된다. 이와 같은 현상으로 세이퍼트 은하의 중심부 밝기는 시간에 따라 변한다.



▲ 1974년(위)과 1984년(아래)에 관측한 NGC 4151의 스펙트럼

3 세이퍼트 은하의 분류

세이퍼트 은하는 스펙트럼에서 넓은 방출선이 나타나는 1형과 좁은 방출선만 보이는 2형으로 분류한다. 방출선의 폭은 은하를 관측하는 방향에 따라서 달라질 수 있으며, 중심부를 둘러싼 두꺼운 도넛 모양의 먼지 구조가 특정 시야에서 중심부를 가리면, 넓은 방출선 영역이 보이지 않아 좁은 방출선만 관측된다. 이러한 까닭에 활동 은하의 통합 모형에서는 세이퍼트 은하가 관측자의 시선 각도에 따라 두 가지 유형으로 나뉘는 것으로 추정한다.

4 다양한 파장 영역에서 관측한 세이퍼트 은하

세이퍼트 은하는 가시광선뿐만 아니라 X선과 전파 영역에서도 중요한 특징을 보여준다.

(1) **가시광선 영역 관측:** 밝은 중심핵이 있는 전형적인 나선 은하로 관측된다.

(2) **X선 영역 관측:** 블랙홀로 끌려 들어가는 물질의 중력 에너지가 열에너지와 복사 에너지로 전환되면서, 고온의 가스에서 고에너지 X선을 방출한다.

(3) **전파 영역 관측:** 은하 원반에 분포한 중성 수소 원자에서 21 cm 전파선이 방출되며, 나선팔 구조가 명확하게 드러난다.


가시광선 영역으로 관측한 모습


X선과 전파 영역으로 관측한 모습

◀ **세이퍼트 은하 NGC 4151**

도넛 모양의 먼지 구조

활동 은하의 통합 모형에 따르면, 활동 은하 중심부의 거대 질량 블랙홀은 '토러스(torus)' 형태의 두꺼운 먼지 구조에 둘러싸여 있다고 본다. 이 구조는 도넛 모양의 고온 분자 가스로 이루어져 있으며, 관측 방향에 따라 중심부가 보이거나 가려질 수 있다.



- 1형 세이퍼트 은하: 은하를 토러스의 위쪽이나 아래쪽에서 관측하면, 넓은 방출선 영역(BLR, Broad Line Region)이 직접 보이기 때문에 넓은 방출선이 나타난다.
- 2형 세이퍼트 은하: 은하를 토러스의 측면에서 관측하면, 넓은 방출선 영역이 가려지고 좁은 방출선 영역(NLR, Narrow Line Region)만 보인다.

개념 기본 문제

01 외부 은하

정답과 해설 180쪽

01 허블의 은하 분류에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 외부 은하를 가시광선 영역에서 관측되는 형태에 따라 분류한다.
ㄴ. 타원 은하는 시간이 지나면 나선 은하가 된다.
ㄷ. 우리은하와 안드로메다은하는 모두 나선 은하로 분류된다.

02 그림 (가)와 (나)는 허블의 은하 분류 중 서로 다른 종류의 은하를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

(가)가 (나)보다 더 큰 값을 가지는 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 성간 물질의 양
ㄴ. 구성하고 있는 별의 평균적인 나이
ㄷ. 은하 내에서 새로운 별이 생성되는 비율

03 다음은 불규칙 은하에 대한 설명이다.

불규칙 은하는 규칙적인 형태가 없는 은하로, 성간 물질을 ㉠(많이, 적게) 포함하고 있어서 새로운 별의 생성이 ㉡(활발하다, 거의 없다).

( ) 안에 알맞은 말을 고르시오.

04 다음은 전파 은하의 구조에 대한 설명이다.

이 은하는 가시광선 영역으로 관측했을 때는 주로 거대 타원 은하로 보이지만, 전파 영역으로 관측하면 훨씬 크게 보인다. 중심에는 핵이 있고, 핵 양쪽에 (㉠)로 연결된 거대한 전파 방출 영역인 (㉡)가 있다.

( ) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

05 퀘이사의 특징에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 일반 은하보다 상대적으로 최근에 생성되었다.
ㄴ. 은하의 스펙트럼에서 매우 큰 적색 이동이 나타난다.
ㄷ. 중심부에는 거대한 질량의 블랙홀이 존재할 것으로 추정된다.

06 세이퍼트 은하의 특징에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

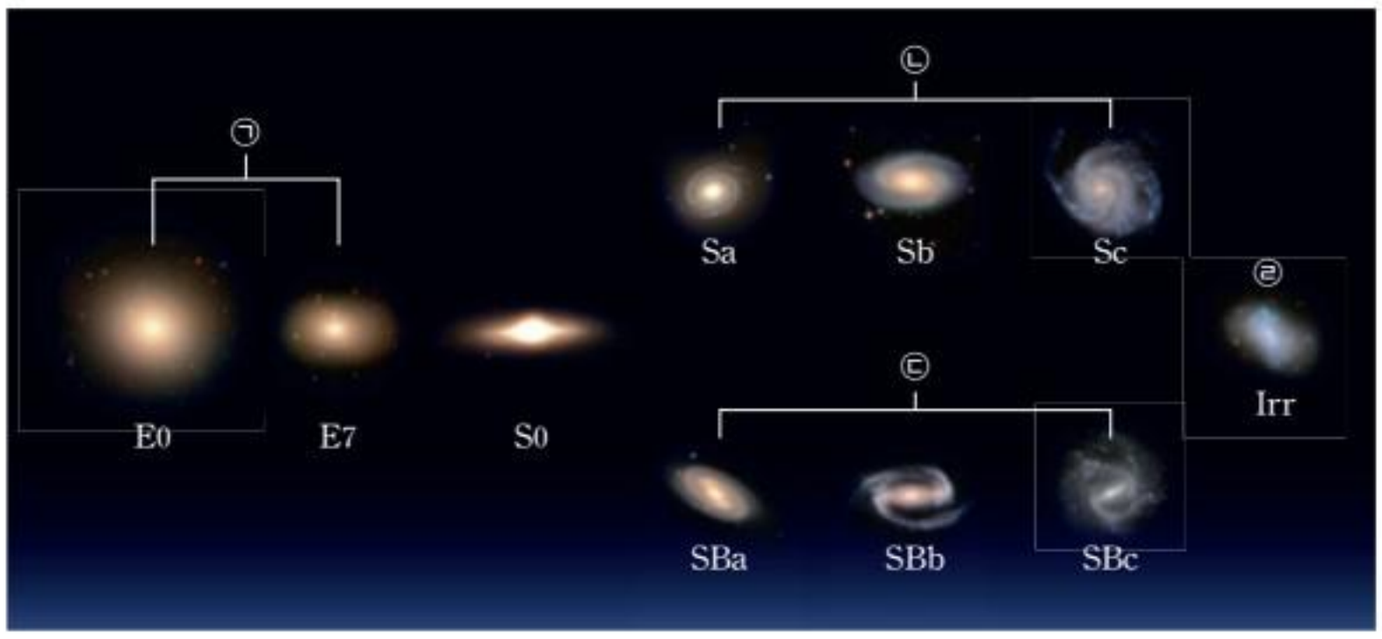
ㄱ. 은하의 중심부가 주변부에 비해 비정상적으로 밝다.
ㄴ. 일반 은하에 비해 방출선의 폭이 매우 넓게 나타난다.
ㄷ. 중심부에는 거대한 질량의 블랙홀이 존재할 것으로 추정된다.

정답과 해설 180쪽

개념 적용 문제

➤ 허블의 은하 분류

01 그림은 허블의 은하 분류 체계를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

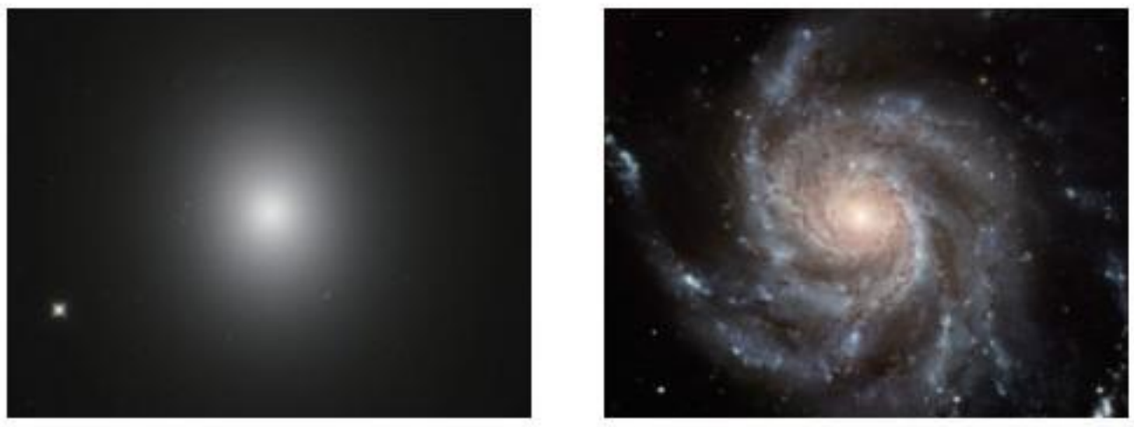
ㄱ. ㉠은 이후 ㉡이나 ㉢으로 진화한다.
ㄴ. ㉡과 ㉢을 나누는 기준은 막대 구조의 유무이다.
ㄷ. 은하를 구성하는 별의 평균 나이는 ㉠이 ㉣보다 많다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

허블은 다양한 외부 은하를 가시광선 영역에서 관측되는 형태학적 특징에 따라 크게 타원 은하, 정상나선 은하, 막대나선 은하, 불규칙 은하로 분류하였다.

➤ 허블의 은하 분류

02 그림 (가)와 (나)는 허블의 은하 분류 중 서로 다른 종류의 은하를 나타낸 것이다.



(가) (나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

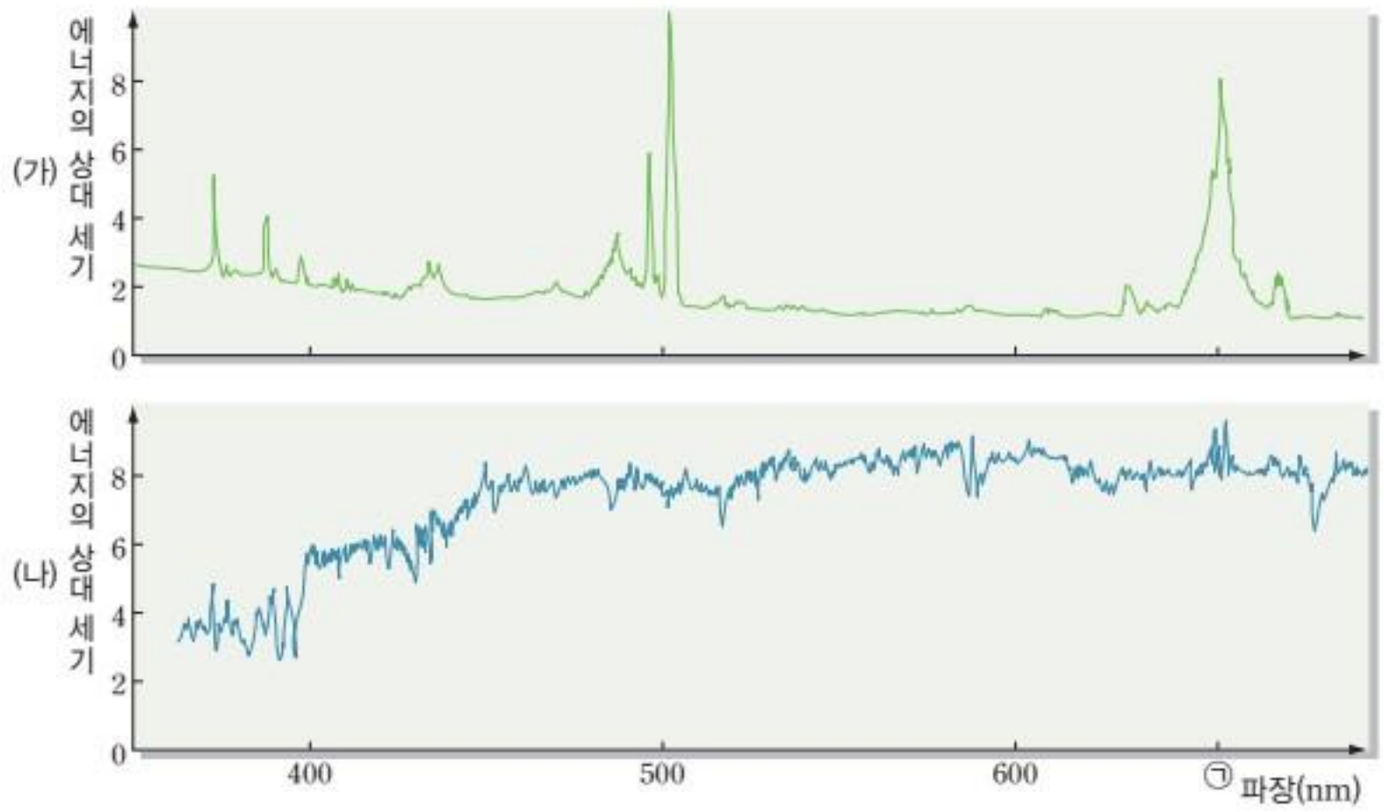
ㄱ. 새로운 별의 생성 비율은 (가)가 (나)보다 낮다.
ㄴ. 현재 은하 내 주계열성의 평균 질량은 (가)가 (나)보다 크다.
ㄷ. 은하를 구성하는 별의 평균 표면 온도는 (가)가 (나)보다 높다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

타원 은하에는 붉은색 별이 많으며, 나선 은하의 나선팔에는 푸른색 별이 많다.

➤ 세이퍼트 은하

03 그림 (가)와 (나)는 일반 은하와 세이퍼트 은하의 스펙트럼을 순서 없이 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. $\frac{\text{은하 중심핵의 밝기}}{\text{은하 전체의 밝기}}$는 (가)가 (나)보다 크다.

ㄴ. ㉠ 파장에서의 방출선 폭은 (가)가 (나)보다 넓다.

ㄷ. (가)는 가시광선 영역에서 대부분 타원 은하로 관측된다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

세이퍼트 은하는 일반 은하에 비해 방출선의 폭이 매우 넓게 나타나며, 중심부가 주변부에 비해 비정상적으로 밝다.

➤ 충돌 은하

04 그림은 두 은하가 충돌하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

ㄱ. 충돌하는 동안 별의 생성 비율은 줄어든다.

ㄴ. 은하 내부의 별들이 충돌하는 현상은 거의 일어나지 않는다.

ㄷ. 우주에서 은하의 분포가 더 균일하다면 이 현상이 더 자주 일어날 것이다.

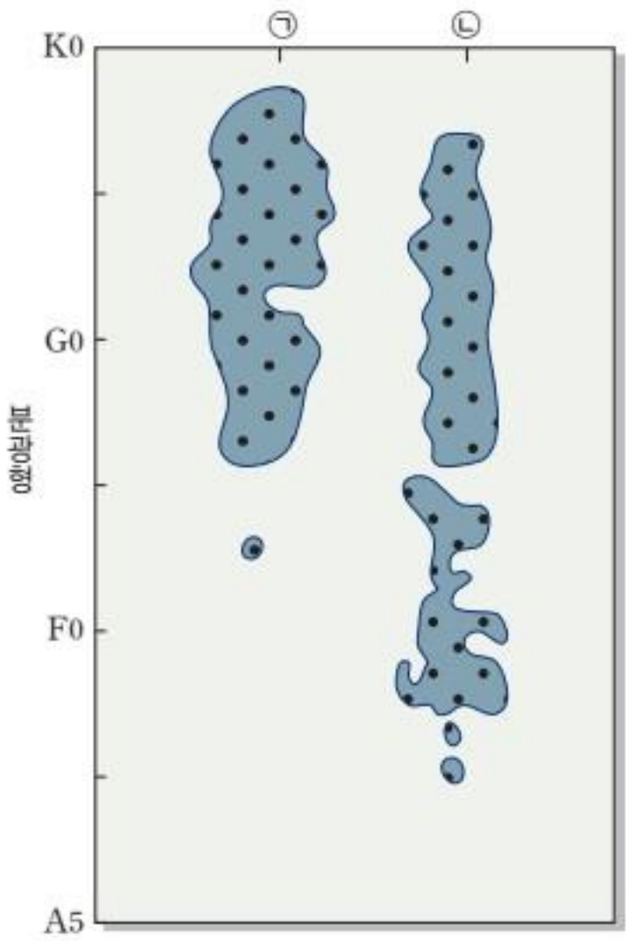
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

은하는 집단을 이루어 분포하며, 집단 내 은하들은 상대적으로 서로 가까워 충돌하는 현상이 일어나기도 한다. 이때, 별의 크기보다 별 사이의 공간이 훨씬 크다.

1등급 도전 문제

➤ 허블의 은하 분류

05 그림은 허블의 은하 분류 중 일부 그룹을 구성하는 별들의 분광형 분포를 나타낸 것이다. ㉠과 ㉡은 각각 타원 은하와 나선 은하 중 하나이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



보기

ㄱ. 붉은색 별의 비율은 ㉠이 ㉡보다 높다.
ㄴ. 은하 내 성간 물질은 ㉠이 ㉡보다 많다.
ㄷ. 우리은하는 ㉡과 같은 그룹으로 분류된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 분광형은 O형에서 M형으로 갈수록 표면 온도가 낮아지며, 표면 온도가 낮을수록 긴 파장의 영역에서 복사 에너지를 많이 방출한다.

➤ 특이 은하

06 표는 서로 다른 두 특이 은하 A, B를 관측한 내용이다.

구분	A	B
관측 특징	크기는 태양계 정도로 작지만, ㉠방출하는 에너지는 우리은하의 수백~수천 배에 이른다.	핵 양쪽에 제트로 연결된 거대한 영역인 ㉡로브가 있다.
관측된 흡수선의 파장	440 nm	400 nm

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 관측된 흡수선의 원래 파장은 390 nm이다.)

보기

ㄱ. ㉠을 통해 A 중심부에 거대 질량 블랙홀이 있다는 것을 추정할 수 있다.
ㄴ. ㉡은 가시광선보다 파장이 긴 영역에서 관측할 때 잘 보인다.
ㄷ. 지구로부터의 거리는 A가 B보다 멀다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 흡수선의 적색 이동량이 클수록 관측자로부터 더 멀리 있다.

02 우주의 팽창과 진화

핵심 내용 미리보기

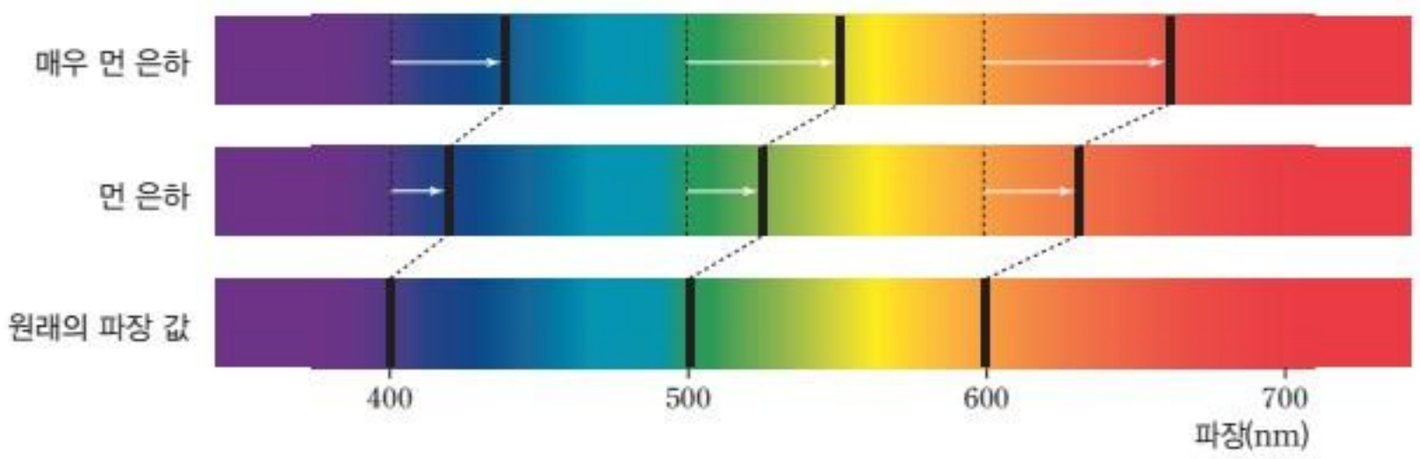
"외부 은하의 스펙트럼을 관측하여 **우주가 팽창**하고 있음을 알아내었고, 연구 결과 우주는 생성 초기에 **급팽창**하였고, 현재는 **가속 팽창**하고 있다."

1 허블-르메트르 법칙과 우주 팽창

오랜 시간 동안 사람들은 우주가 시작도 끝도 없는 정적인 시공간이라고 생각해 왔다. 그러나 허블의 관측을 통해 우주는 정적인 공간이 아니라 팽창하고 있다는 사실이 밝혀졌다.

1. 외부 은하의 스펙트럼 변화

(1) **적색 이동(편이):** 광원이 관측자에게서 멀어지면 도플러 효과로 스펙트럼의 흡수선이 파장이 긴 적색 영역으로 이동하는 현상이 나타나는데, 이러한 현상을 적색 이동이라고 한다. 한편, 외부 은하의 스펙트럼을 관측하면 멀리 있는 은하일수록 적색 이동량이 크게 나타난다.



▲ **은하까지의 거리에 따른 적색 이동량**

(2) **외부 은하까지의 거리와 적색 이동 사이의 관계**

① 적색 이동 계수(z): 외부 은하의 스펙트럼에서 적색 이동이 관측된다는 것은 해당 은하가 우리에게서 멀어지고 있음을 의미한다. 관측된 흡수선의 파장을 λ라고 하고 원래의 파장을 λ_0라고 할 때, 적색 이동의 정도를 나타내는 적색 이동 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$z=\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}=\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

② 후퇴 속도(v): 광원과 관측자 사이의 거리가 멀어질 때, 시선 방향으로 멀어지는 속도를 후퇴 속도라고 한다. 은하의 후퇴 속도가 광속보다 충분히 작다고 가정하면, 은하의 후퇴 속도 v와 적색 이동 계수 z 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$v=c\times z=c\times\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}=c\times\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}\ (c\text{: 빛의 속도, 약 } 3\times10^8\ \mathrm{m/s})$$

정적 우주론과 팽창 우주론

20세기 초까지 대부분의 과학자들은 우주가 정적인 상태를 유지한다는 정적 우주론을 주장하였다. 그러나 1922년경 프리드만은 우주가 팽창하고 있다는 팽창 우주론을 제안하였다. 하지만, 정적 우주론을 선호하는 과학자들 사이에서 팽창 우주론은 잘 받아들여지지 않았다. 이후 1929년 허블이 관측을 통해 우주가 팽창하고 있다는 사실을 밝혀내면서 팽창 우주론은 과학자들에게 받아들여지게 되었다.

도플러 효과

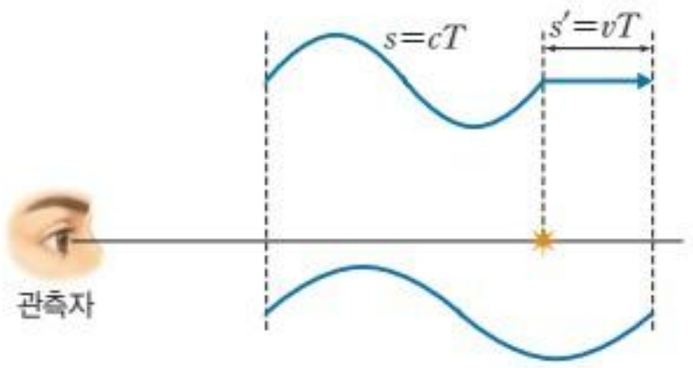
파동의 근원이 멀어질수록 파장이 길어지는 현상으로, 소리뿐만 아니라 빛에도 적용된다.

우주 팽창에 의한 적색 이동

엄밀하게 말하면 외부 은하에서 관측되는 적색 이동은 도플러 효과 때문에 나타나는 현상이 아니다. 도플러 효과는 광원의 운동이나 관측자의 운동에 따른 상대적인 거리 변화에 의해 나타나는 현상이다. 그러나 우주 팽창에 의한 적색 이동은 광원(외부 은하) 또는 관측자의 운동이 아니라 공간 자체가 늘어나기 때문에 나타나는 현상이다.

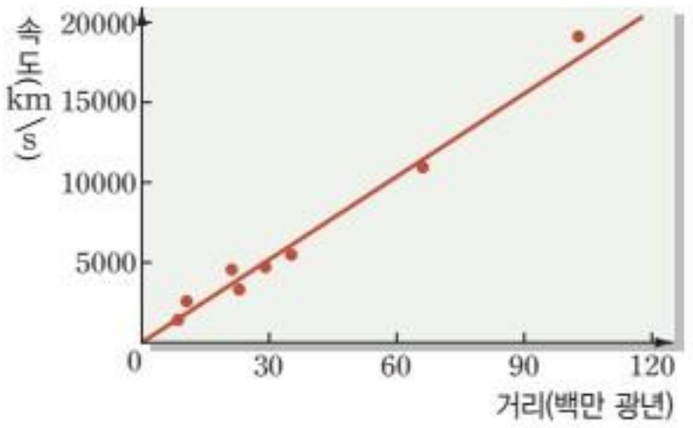
심화 **후퇴 속도와 적색 이동의 관계**

광원에서 방출되는 빛은 빛의 속도 c로 전달된다. 광원에서 방출되는 빛의 진동 주기가 T이고 광원이 관측자로부터 멀어지는 속도를 v라고 할 때, 시간 T 동안 광원에서 출발한 빛이 이동한 거리 $s=cT$이고, 광원이 관측자로부터 멀어진 거리 $s'=vT$이다. 따라서 관측된 빛의 파장은 $\lambda=s+s'=cT+vT$이고, 원래의 파장은 $\lambda_0=cT$이다. 따라서 파장 변화량 $\Delta\lambda=\lambda-\lambda_0=cT+vT-cT=vT$이고, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}=\frac{vT}{cT}=\frac{v}{c}$이다.



2. 허블–르메트르 법칙

허블은 외부 은하까지의 거리와 적색 이동을 비교하여 대부분의 은하가 지구로부터 멀어지고 있으며, 멀리 있는 은하일수록 더 빠르게 멀어진다는 것을 발견하였다. 즉, 은하의 후퇴 속도 v는 거리 r에 비례하는데 이를 허블–르메트르 법칙이라고 한다.



▲ 허블이 1931년에 발표한 그래프

$$v=H\times r\ (H\text{: 허블 상수})$$

이는 은하들이 실제로 멀어지는 운동을 하는 것이 아니라, 공간 자체가 특별한 중심 없이 모든 방향에 대해 균일하게 팽창하고 있는 것이다.

(1) **허블 시간:** 허블 상수의 단위는 km/s/Mpc이며, 이는 시간의 역수와 같은 단위이다. 따라서 우주의 팽창 속도가 일정하다면 허블 상수의 역수는 우주의 팽창이 시작되어 현재까지 걸린 시간을 의미하며, 이를 허블 시간이라고 한다.

$$H=\frac{v}{r}\left[\frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}\right]\ \Rightarrow\ t=\frac{r}{v}=\frac{1}{H}$$

(2) **허블 반경:** 우주의 팽창으로 관측자에게서 빛의 속도로 멀어지는 은하가 존재하는 거리를 허블 반경이라고 한다. 허블 반경(r)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c=H\times r\ \Rightarrow\ r=\frac{c}{H}$$

중요 개념 체크

정답과 해설 181쪽

1. 적색 이동 계수는 실제 은하에서 관측된 파장이 (짧을수록, 길수록) 커진다.
2. 허블–르메트르 법칙에서 은하의 후퇴 속도는 은하의 ( )에 비례한다.

허블–르메트르 법칙

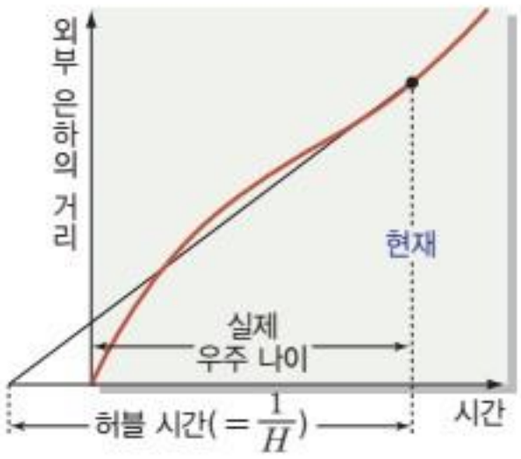
벨기에의 천문학자 르메트르는 허블보다 2년 앞서 허블 법칙을 유도하고, 우주 팽창의 증거를 발견했다. 하지만, 당시에는 그의 업적이 거의 알려지지 않았다. 이러한 르메트르의 업적을 기리기 위해 2018년 국제천문연맹(IAU)에서는 '허블 법칙'을 '허블–르메트르 법칙'이라고 부르기로 결정하였다.

허블 상숫값

허블이 최초로 측정한 허블 상숫값은 500 km/s/Mpc 이상이었으나, 최신 연구를 통해 현재는 약 70 km/s/Mpc이다. 이 값은 1 Mpc 사이의 공간이 1초마다 약 70 km씩 커지고 있다는 것을 의미한다.

허블 시간과 우주의 나이와의 관계

실제 우주의 팽창 속도는 일정하지 않기 때문에 허블 시간이 정확한 우주의 나이가 될 수 없으나, 대략적인 우주의 나이를 추정할 수 있다.

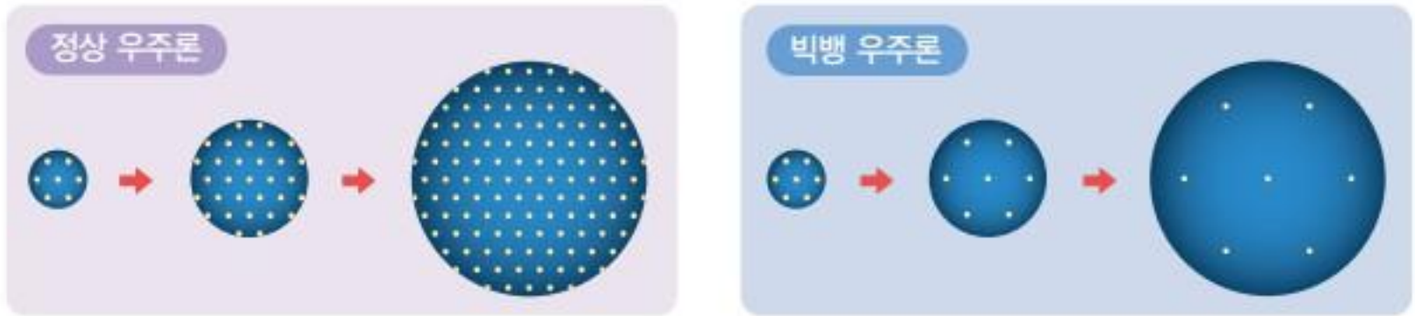


2 빅뱅 우주론

허블-르메트르 법칙 발견 이후의 우주론은 우주 팽창의 개념을 포함하는 정상 우주론과 빅뱅 우주론으로 발전하였고, 다양한 관측적 증거를 통해 빅뱅 우주론이 더 잘 맞는 우주론이라는 것이 확인되었다.

1. 정상 우주론과 빅뱅 우주론

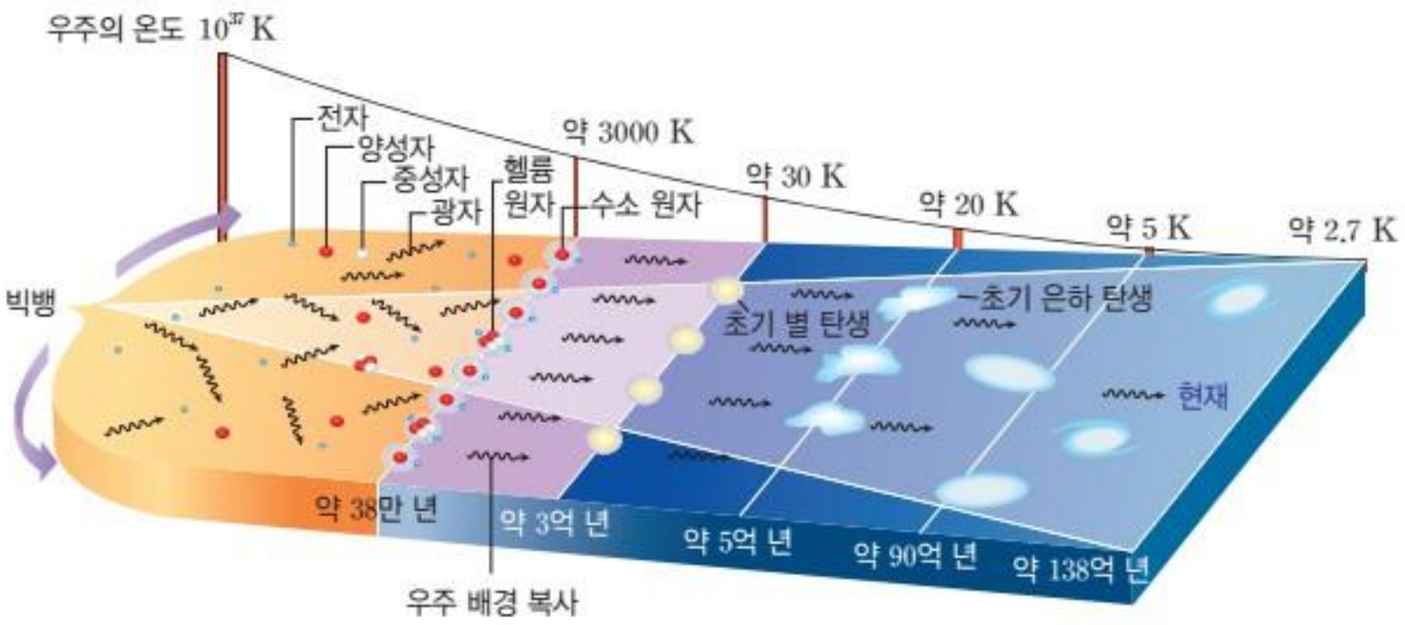
20세기 중반까지 우주의 기원과 진화에 대한 다양한 이론이 있었고, 그중 대표적인 것이 정상 우주론과 빅뱅 우주론이다. 두 이론 모두 우주가 팽창한다는 관측 결과는 수용하지만, 그 팽창을 해석하는 방식과 우주의 기원에 대한 설명이 다르다.



▲ 우주론에 따른 우주의 밀도 변화

(1) **정상 우주론:** 호일 등이 제안한 우주론으로, 우주는 팽창하고 있지만 팽창한 공간에 새로운 물질이 계속 생성되어 우주 전체의 평균 밀도가 일정하게 유지된다고 본다. 이 이론은 우주의 나이가 무한하며, 시간에 따라 평균적인 우주의 모습이 변하지 않는다는 것을 가정한다. 이러한 가정에 따라 물질이 끊임없이 생성된다는 점에서 연속 창조설이라고도 불린다.

(2) **빅뱅 우주론:** 가모프 등이 제안한 우주론으로, 우주는 고온·고밀도의 초기 상태에서 시작하여 대폭발한 뒤 공간이 팽창하면서 우주 전체의 평균 밀도가 감소한다고 본다. 이 이론은 우주의 나이가 유한하며, 시간에 따라 팽창하며 온도와 밀도가 서서히 낮아진다는 것을 가정한다.



▲ 빅뱅 우주론에 따른 우주의 탄생과 진화

2. 빅뱅 우주론의 관측적 증거

1960년대 이후 빅뱅 우주론을 지지하는 관측적 증거들이 발견되면서 빅뱅 우주론이 우주의 기원에 대한 정설로 자리 잡았다.

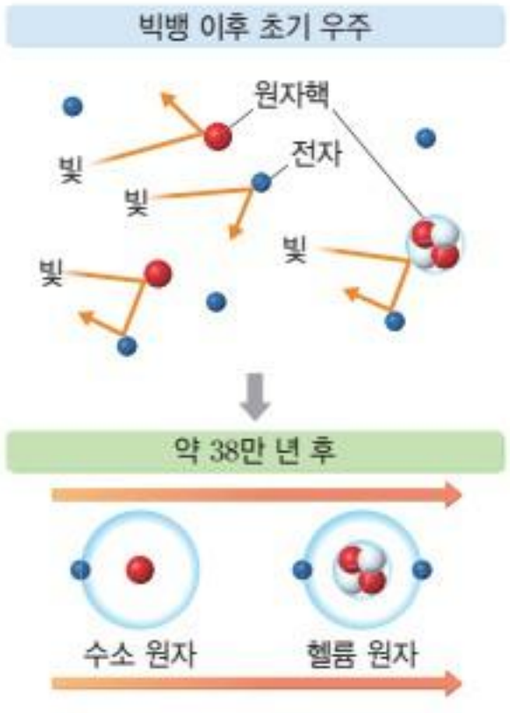
시간에 따른 우주의 물리량 변화

물리량	정상 우주론	빅뱅 우주론
크기	증가	증가
질량	증가	일정
밀도	일정	감소
온도	일정	감소

빅뱅 우주론에서 설명하는 우주의 탄생과 진화

빅뱅 직후, 우주는 매우 짧은 시간 동안 급격히 팽창하였으며, 이 과정에서 온도가 빠르게 낮아지고 시간과 공간이 형성되었다. 이후 에너지가 물질로 전환되면서 쿼크, 렙톤 등 기본 입자가 생성되었고, 이들이 결합하여 양성자와 중성자가 만들어졌다. 우주 나이 약 수 분에는 원시 핵융합이 일어나 중수소, 헬륨 등의 원자핵이 형성되었다. 그리고 약 38만 년 후, 우주의 온도가 충분히 낮아지면서 수소와 헬륨 원자핵이 전자를 포획하여 중성 원자를 형성하였고, 이때 우주는 빛이 자유롭게 이동할 수 있는 상태가 되었다. 이렇게 형성된 수소와 헬륨 원자는 중력에 의해 뭉쳐지며 이후 별과 은하를 이루게 되었다.

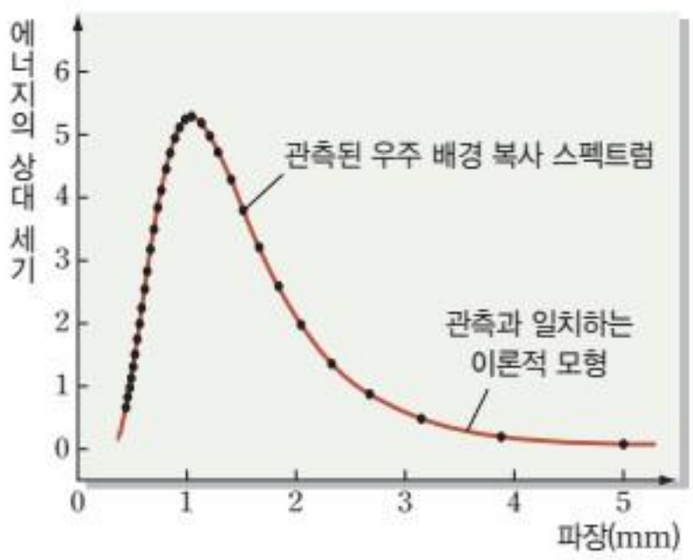
(1) **우주 배경 복사:** 빅뱅 우주론에 따르면 빅뱅 이후 초기 우주는 온도와 밀도가 매우 높아 전자가 자유롭게 움직였고, 이 전자의 산란으로 빛은 자유롭게 움직일 수 없었다. 이후 우주의 나이가 약 38만 년이 되었을 때, 우주의 온도는 약 3000 K까지 낮아졌다. 이때 빛을 산란하던 전자가 원자핵과 결합하면서 원자를 형성하였고, 빛이 자유롭게 움직일 수 있게 되었다. 이때 방출된 빛은 우주의 팽창으로 파장이 길어져 현재 약 2.7 K에 해당하는 복사로 우주 전역에서 관측되는데, 이를 우주 배경 복사라고 한다.



▲ 우주 배경 복사의 생성

불투명한 우주와 투명한 우주
전자가 원자핵과 분리되어 있던 초기 우주에서는 빛과 입자들이 상호작용을 하였기 때문에, 우주는 빛이 자유롭게 직진할 수 없는 불투명한 상태였다. 원자가 형성된 이후에야 빛이 자유롭게 우주 공간을 진행할 수 있게 되어 우주는 투명한 상태가 되었다.

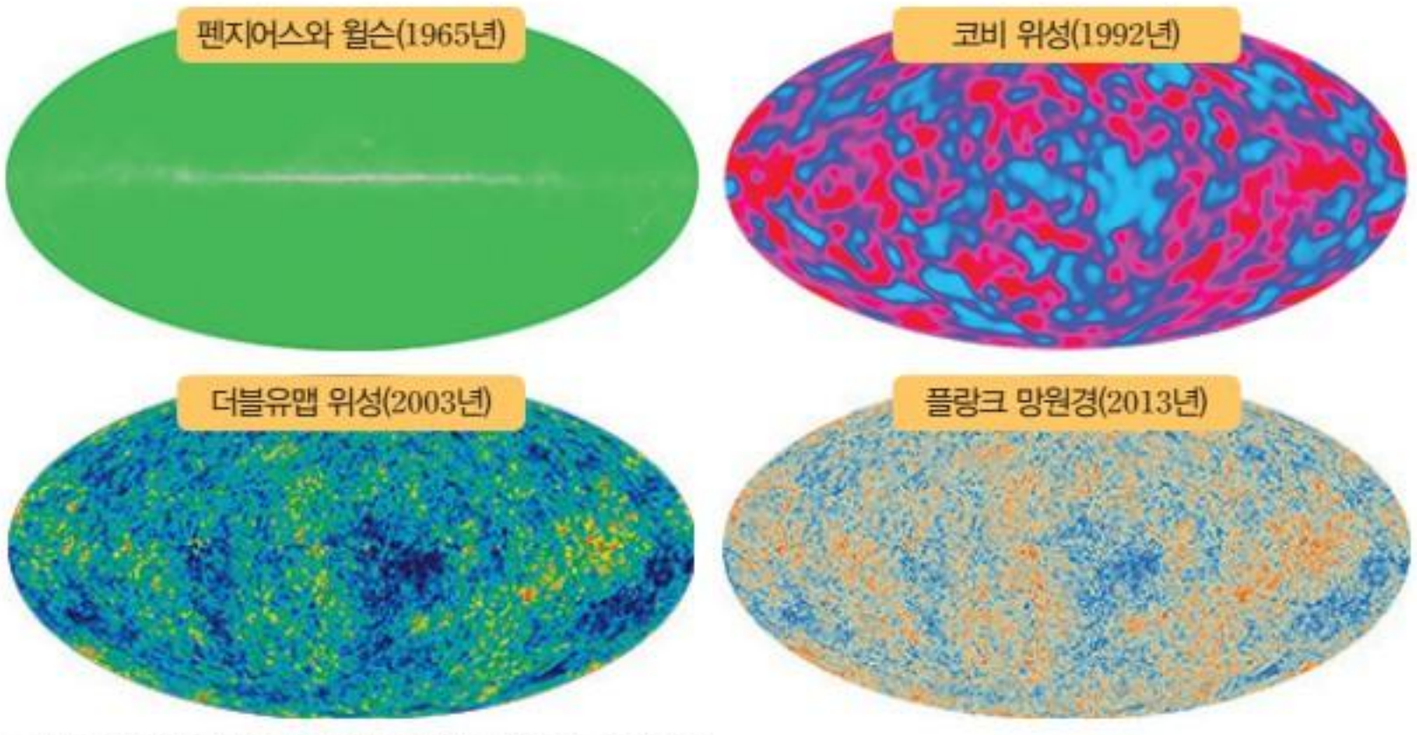
① 우주 배경 복사의 발견: 빅뱅 우주론을 주장한 가모프의 제자인 앨퍼와 허먼은 우주 배경 복사를 예측했지만, 당시 기술로는 우주 배경 복사를 관측하기가 어려워 큰 주목을 받지는 못했다. 이후 1964년 펜지어스와 윌슨은 전파 망원경을 이용하여 모든 방향에서 같은 세기로 측정되는 약 7 cm 파장의 마이크로파를 발견했다. 이 전파는 온도가 약 2.7 K인 흑체 복사의 에너지 분포와 거의 일치했으며, 이것이 빅뱅 우주론에서 예측한 우주 배경 복사였다. 이는 빅뱅 당시 우주가 매우 뜨겁고 밀도가 높았음을 나타내는 결정적 증거이다.



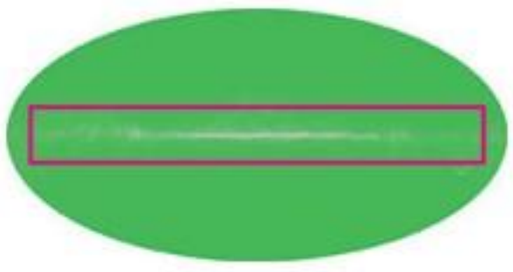
▲ 우주 배경 복사의 파장에 따른 에너지 세기 변화

우리은하에서 방출되는 전자기파
펜지어스와 윌슨의 관측 결과에서는 가로로 뻗은 높은 온도의 띠가 관측된다. 이것은 우리은하에서 방출된 전자기파로, 이후 관측 사진에서는 이 효과를 제거하였다.

② 우주 망원경을 이용한 관측: 펜지어스와 윌슨의 발견 이후 코비(COBE) 위성, 더블유맵(WMAP) 위성, 플랑크(Planck) 망원경을 이용한 관측으로 우주 전체에 거의 균일하게 분포하는 우주 배경 복사의 미세한 온도 차이를 볼 수 있게 되었다.

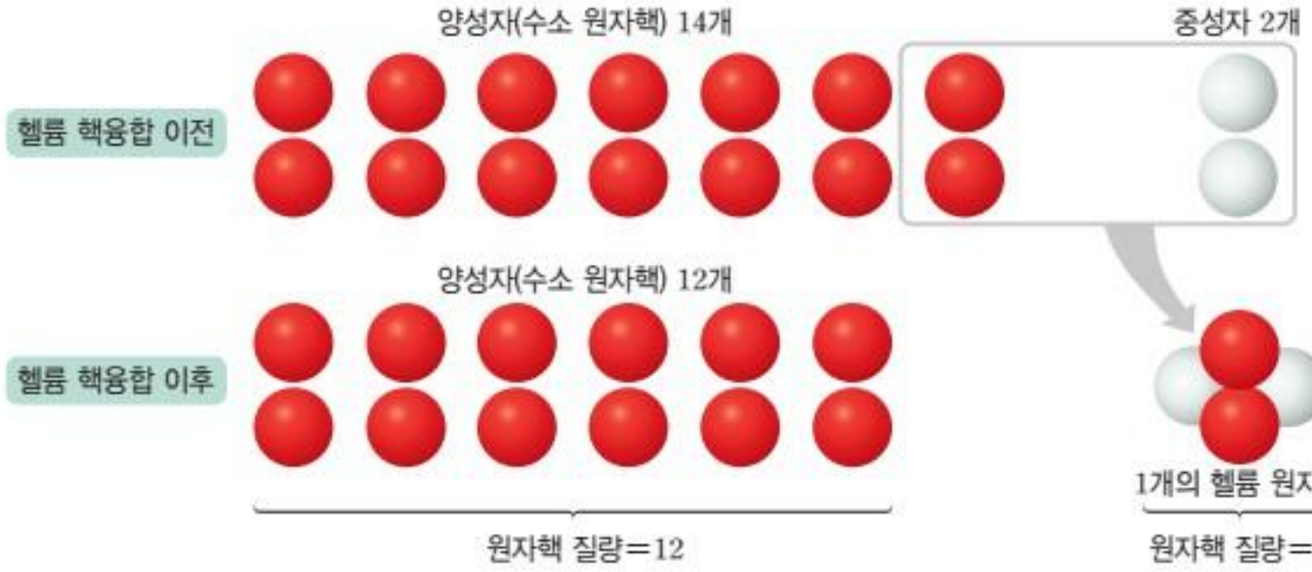


▲ 관측 기술 발달에 따른 우주 배경 복사 지도의 변화



우주 배경 복사 지도에서 관측되는 온도 차이
플랑크 망원경으로 관측한 우주 배경 복사 지도에서 붉은색으로 표시된 영역은 파란색 영역보다 온도가 약간 더 높은 곳을 나타내며, 그 차이는 약 10만 분의 1 수준이다. 이러한 온도 차이는 우주 전역에서 미세한 밀도 차이로 발생한 것이며, 이 초기 밀도 차이가 별과 은하의 형성으로 이어졌다.

(2) **수소와 헬륨의 질량비:** 빅뱅 우주론을 주장했던 과학자들은 우주를 구성하는 원소 대부분이 수소와 헬륨인 까닭을 빅뱅 우주론을 통해 설명하고자 했다. 빅뱅 우주론에 따르면, 우주가 생성된 직후 극도로 높은 온도와 밀도에서 양성자와 중성자가 형성되었고, 시간이 지나 양성자와 중성자의 개수비가 약 7 : 1이 되었다. 이후 우주의 나이 약 3분에 헬륨 등의 가벼운 원소의 원자핵이 핵융합 반응으로 만들어졌으며, 수소와 헬륨의 개수비는 약 12 : 1, 질량비는 약 3 : 1이 되었다. 이 비율은 현재 우주에서 관측되는 빛의 스펙트럼으로 계산한 값과 거의 일치한다. 이는 우주 초기에 고온·고밀도 상태에서 실제로 핵합성이 일어났다는 증거가 되며, 빅뱅 우주론을 지지하는 핵심적인 관측 근거 중 하나이다.



▲ 우주에서 관측되는 수소와 헬륨의 비율

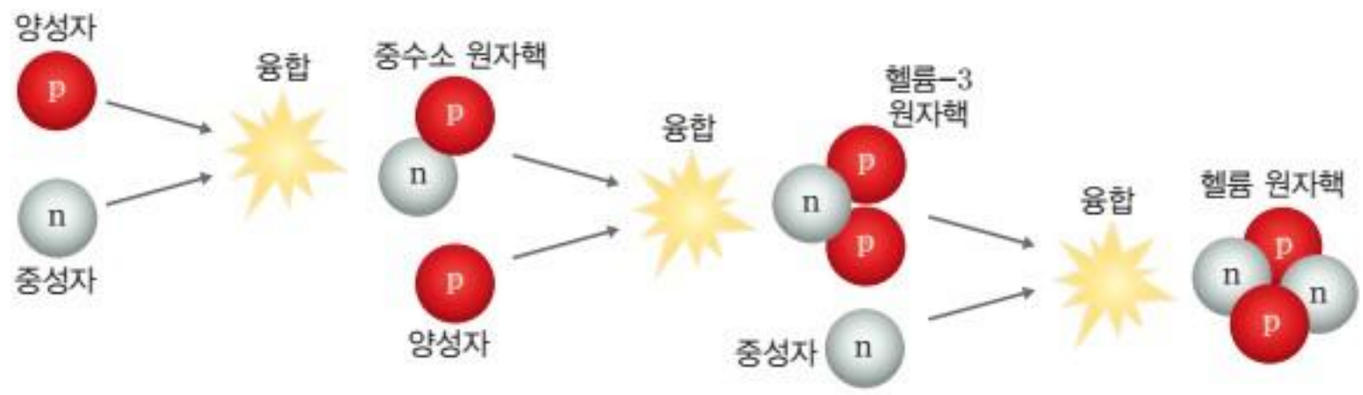
헬륨보다 무거운 원소의 합성

우주가 계속 팽창하면서 온도가 낮아졌기 때문에, 초기 우주에서는 헬륨보다 무거운 원소는 거의 형성되지 못했다. 오늘날 관측되는 대부분의 무거운 원소는 별의 진화 과정에서 생성된 것이다.

빅뱅 핵합성

헬륨은 별 내부에서도 생성될 수 있다. 하지만, 별 내부에서 생성되는 헬륨의 양은 현재 우주에 존재하는 전체 헬륨의 양에 비하면 매우 적다. 따라서 우주에 존재하는 헬륨의 대부분은 빅뱅 이후 3분 정도에 만들어진 것이다. 초기 우주에서 일어난 헬륨 원자핵의 합성 과정을 별 내부의 핵융합으로 만들어지는 과정과 구분하기 위해 빅뱅 핵합성이라고 한다. 빅뱅 핵합성 과정에서는 우주를 구성하는 전체 원소 중 약 25 %의 헬륨, 약 0.01 %의 중수소, 극소량의 리튬 및 베릴륨이 생성되었다고 추정된다. 그 외의 무거운 원소는 생성되지 않았으며, 이러한 이론적 예측은 실제 우주의 관측 결과와 대부분 정확히 일치한다.

심화 헬륨 원자핵의 생성



빅뱅 직후 기본 입자들이 결합하여 양성자(p)와 중성자(n)를 만들었고, 우주의 나이 약 1초가 되기 전에는 양성자와 중성자의 비율이 거의 같았다. 그러나 우주가 팽창하면서 온도가 낮아지자 양성자는 계속 만들어지는 반면, 중성자는 에너지 부족으로 만들어지기 어려워졌다. 결국 우주에는 양성자의 수가 더 많아졌고, 양성자와 중성자의 개수비는 약 7 : 1이 되었다. 우주의 나이 약 3분에는 양성자와 중성자가 단단히 결합할 수 있게 되어 중수소 원자핵, 헬륨-3 원자핵 등이 만들어졌다. 이후 이들 사이에 핵합성이 일어나 헬륨 원자핵이 만들어졌다.

중요 개념 체크

정답과 해설 181쪽

1. (정상, 빅뱅) 우주론에서 우주는 시간이 지남에 따라 온도와 밀도가 낮아진다.
2. 우주 배경 복사는 현재 약 ( ) K에 해당하는 흑체 복사 형태로 관측된다.
3. 우주 전체의 수소와 헬륨의 질량비가 약 ( )인 것은 빅뱅 우주론의 증거이다.

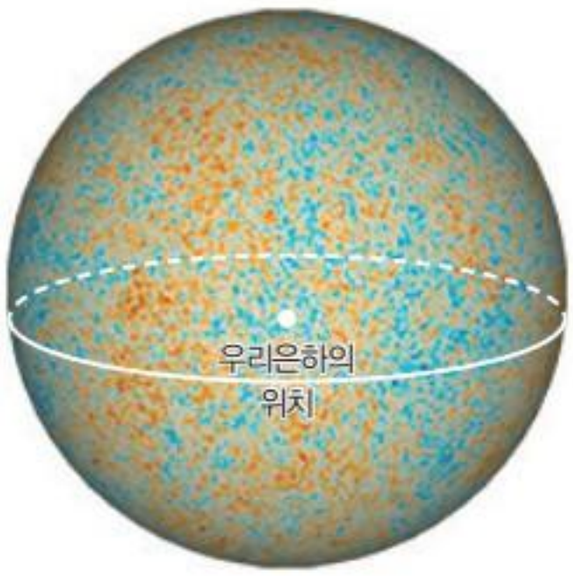
3 급팽창 우주론과 가속 팽창 우주

관측적 증거를 바탕으로 빅뱅 우주론이 적합한 우주론이라는 것이 밝혀졌다. 하지만 기존의 빅뱅 우주론으로는 설명하기 어려운 점들이 발견되면서 이를 보완할 수 있는 이론이 등장하였다.

1. 빅뱅 우주론의 문제점

우주 배경 복사, 수소와 헬륨의 질량비와 같은 관측적 증거를 바탕으로 빅뱅 우주론은 우주를 가장 잘 설명하는 이론이 되었다. 하지만 1970년대 이후 빅뱅 우주론으로 해결할 수 없는 문제점이 발견되었다.

(1) **지평선(등방성) 문제:** 우리은하를 중심으로 관측되는 등방성의 우주 배경 복사는 약 138억 년 전의 빛이 우리에게 도달한 것이지만, 그 사이 우주는 계속 팽창했다. 따라서 실제 관측 가능한 우주의 크기는 약 138억 광년보다 더 큰 약 465억 광년이며, 이것은 우리가 관측 가능한 범위의 한계인 우주의 지평선이 된다. 따라서 우리를 중심으로 서로 반대 방향에서 오는 우주 배경 복사는 각각 465억 광년 떨어져 있으며, 이들 사이의 거리는 약 930억 광년이다. 우주에서 빛을 통해 상호작용이 가능하다고 가정할 때, 이 두 지점은 상호작용할 수 없을 정도로 떨어져 있으며 빅뱅 이후 현재까지 계속 멀어지고 있다. 하지만, 두 지점의 우주 배경 복사가 거의 같은 까닭을 기존의 빅뱅 우주론으로는 설명할 수 없는데, 이를 지평선 문제(등방성 문제)라고 한다.

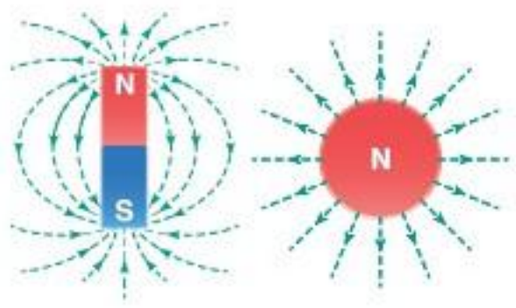


▲ 우주 배경 복사의 등방성

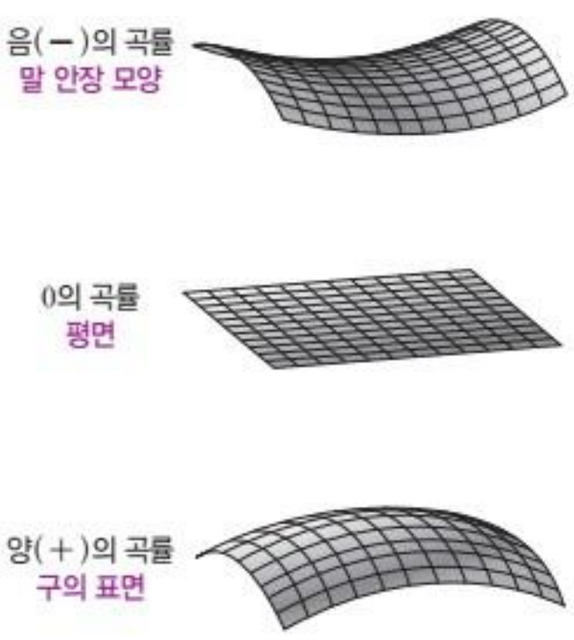
등방성
어느 방향을 관측해도 항상 그 특성이 변하지 않는 것을 등방성이라고 한다.

(2) **자기 홀극 문제:** 빅뱅 우주론에 따르면 초기 우주에서는 수많은 자기 홀극이 생성되었고, 지금도 발견되어야 한다. 하지만 자기 홀극은 현재까지 발견되지 않고 있는데, 이를 자기 홀극 문제라고 한다.

자기 홀극
자석은 양극 사이를 반으로 잘라도 항상 양극이 함께 존재한다. 하지만, 자기 홀극은 N극과 S극이 동시에 존재하는 보통의 자석과는 달리 N극 혹은 S극 중 하나의 극만 존재하는 이론적인 입자이다.



(3) **평탄성 문제:** 물질과 에너지가 존재하면 시공간은 휘어지므로, 우주도 곡률을 가진다. 우주 배경 복사 관측 결과, 현재 우주는 거의 완벽하게 0의 곡률인 평탄한 상태를 유지하고 있다. 이러한 평탄한 상태의 우주가 되려면 초기 우주의 밀도가 매우 정밀하고 특정한 값을 가져야 한다. 하지만 빅뱅 우주론으로는 어떻게 이러한 특정한 밀도 값을 가지게 되었는지 충분히 설명하기 어려운데, 이를 평탄성 문제라고 한다.

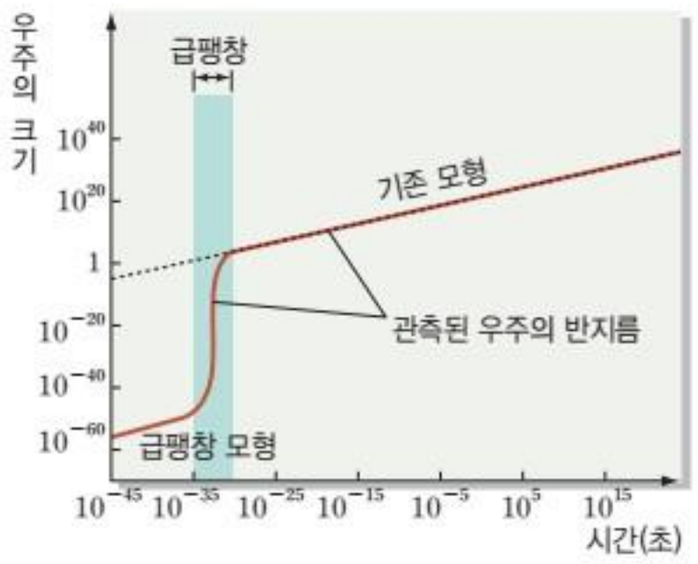


▲ 곡률에 따른 우주의 형태

곡률과 임계 밀도
곡률(曲率)은 곡선이나 곡면의 각 점에서 구부러진 정도를 나타낸다. 우주의 전반적인 곡률은 임계 밀도에 따라 다르다. 임계 밀도는 우주의 팽창과 수축을 결정하는 밀도이다. 즉, 우주가 수축하려는 힘과 팽창하려는 힘이 평형을 이룰 때의 밀도가 임계 밀도이다. 우주의 평균 밀도가 임계 밀도보다 작으면 음(−)의 곡률, 임계 밀도보다 크면 양(+)의 곡률, 임계 밀도와 같으면 0의 곡률이다.

2. 급팽창 우주론

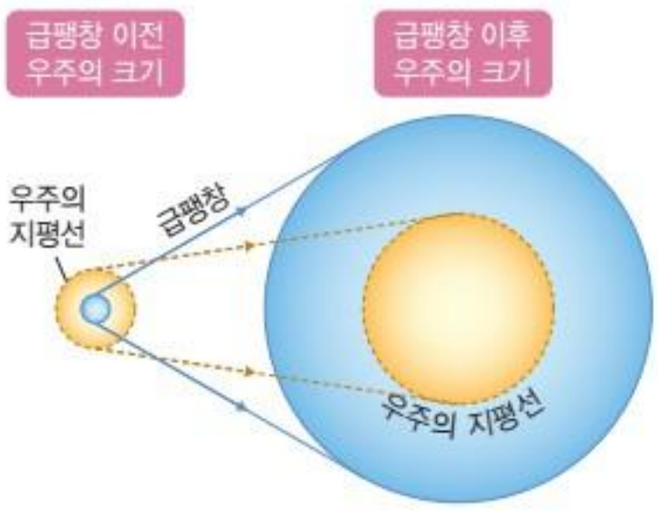
1980년대 초 구스는 빅뱅 우주론의 여러 가지 문제점을 해결하기 위해 급팽창 우주론을 제안하였다. 급팽창 우주론에 따르면 우주는 빅뱅 직후 매우 작은 크기였다가, 매우 짧은 시간 동안 10^{50}배 이상 커졌다. 이러한 급팽창 우주론은 빅뱅 우주론이 해결하지 못한 문제점을 잘 해결하였고, 급팽창이 전제된 빅뱅 우주론은 현재 우주를 가장 잘 설명하는 우주론이 되었다.



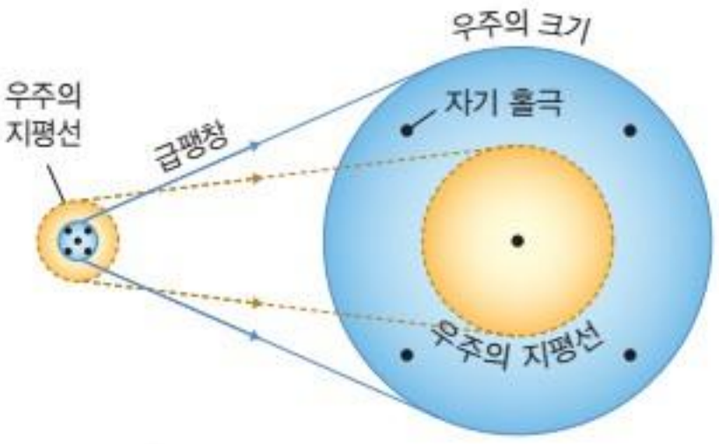
▲ 우주론에 따른 우주의 크기 변화

(1) **지평선(등방성) 문제의 해결:** 급팽창 우주론에 따르면, 빅뱅 직후 우주는 매우 작은 크기였다. 따라서 우주 내의 모든 영역이 서로 충분히 영향을 주고받을 수 있었으며, 이후 급팽창이 일어나 현재와 같이 멀어졌다. 이로 인해 우주의 에너지 밀도가 거의 균일해질 수 있었고, 이러한 균일성은 현재 우주 배경 복사가 모든 방향에서 거의 같게 관측되는 사실을 설명할 수 있다.

(2) **자기 홀극 문제의 해결:** 급팽창 우주론에 따르면, 우주가 급팽창하면서 초기 우주에 존재하던 자기 홀극이 우주의 지평선 너머로 흩어졌기 때문에 관측 가능한 우주 안에서 자기 홀극의 밀도는 매우 낮아졌다. 즉, 자기 홀극이 없는 것이 아니라 우주의 급팽창으로 우리가 볼 수 있는 우주의 지평선 내에서 발견하기 어려울 정도로 자기 홀극의 밀도가 낮아졌다는 것이다.

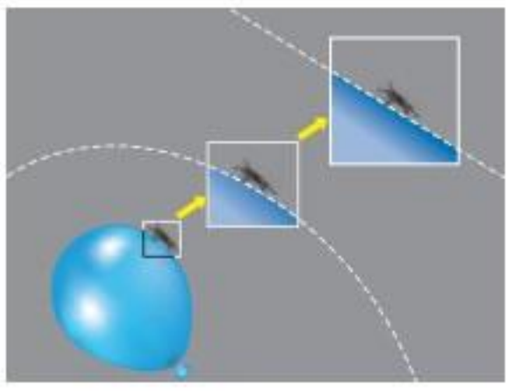


▲ 지평선 문제의 해결



▲ 자기 홀극 문제의 해결

(3) **평탄성 문제의 해결:** 급팽창 우주론에 따르면, 초기 우주의 밀도가 특정한 값이 아니더라도 급팽창이 발생하면 우주의 곡률이 작아져 우리가 관측할 수 있는 범위 내에서는 곡률이 거의 관측되지 않는다. 즉, 우주가 급팽창했기 때문에 초기 우주의 밀도 값과 관계없이 관측되는 우주는 거의 평탄하다.


▲ 평탄성 문제의 해결

심화 급팽창 우주론의 증거

급팽창 우주론에 따르면, 우주는 극도로 작고 밀도가 높던 상태에서 시작하여 매우 짧은 시간 동안 급격히 팽창하였고, 이 과정에서 우주 안에 존재하던 양자 요동도 함께 우주 전체 규모로 확대되었다. 이 양자 요동은 시간이 흘러 중력에 의해 뭉치거나 퍼지면서 은하와 같은 대규모 구조의 바탕이 되었다. 이러한 초기 양자 요동은 우주 배경 복사 속에도 약 10만 분의 1 수준의 아주 작은 온도 차이로 남아 있으며, 이는 플랑크 망원경과 같은 정밀한 장비의 관측으로 확인되었다. 따라서 우주 배경 복사의 온도 차이는 급팽창 시기에 발생한 양자 요동이 우주의 팽창을 거쳐 밀도 차이로 바뀐 결과로 해석되며, 이는 급팽창 우주론을 뒷받침하는 관측적 근거가 된다.

양자 요동

양자 요동은 진공 상태에서도 에너지와 입자가 아주 짧은 시간 동안 무작위로 생성되었다 사라지는 미세한 에너지 변화를 말한다. 이는 불확정성 원리에 따라, 아무것도 없는 것처럼 보이는 공간도 실제로는 에너지 밀도가 일정하지 않고 미세한 불균일성이 존재함을 의미한다. 이러한 양자 요동은 평소에는 눈에 띄지 않지만, 우주가 급격히 팽창하는 과정에서는 이 미세한 밀도 차이가 함께 확대되어 우주의 구조 형성에 결정적인 역할을 한다.

3. 급팽창 이후 우주의 팽창 속도

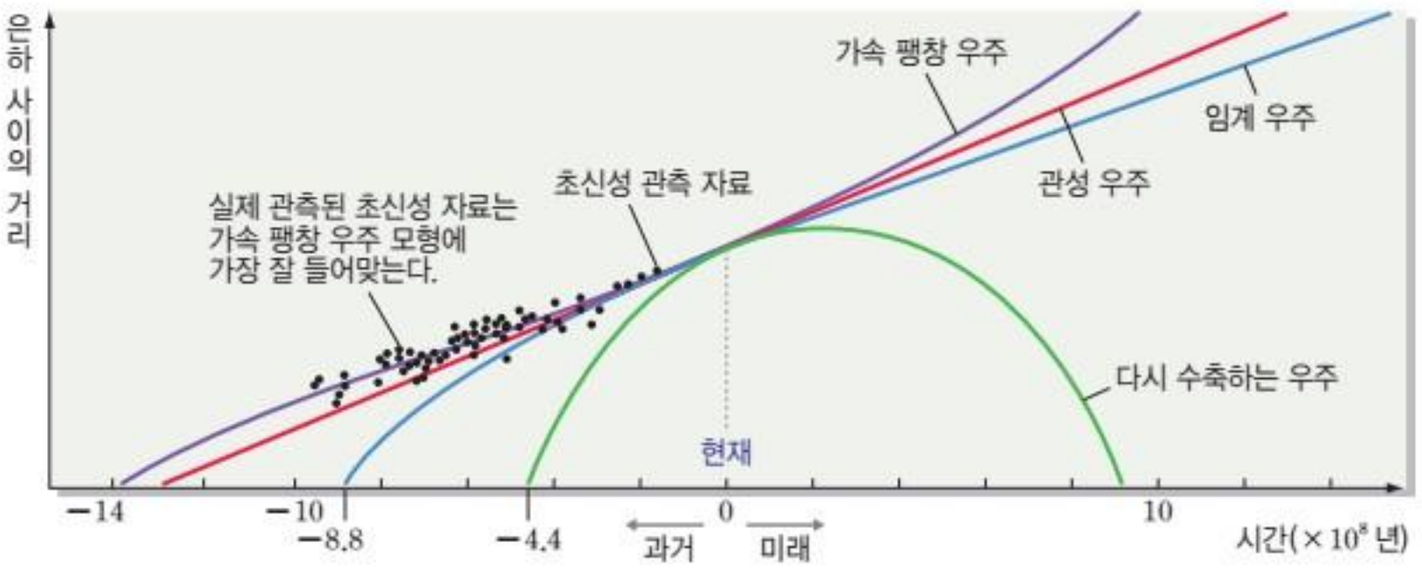
심화 강의 128쪽~129쪽

우주의 팽창 속도 변화는 과거와 현재의 팽창 속도를 비교하면 알 수 있다. 현재 우주의 팽창 속도는 가까이 있는 은하를, 과거 우주의 팽창 속도는 멀리 있는 은하를 관측해야 한다. 1990년대 이후 과학자들은 먼 거리까지 관측이 가능한 Ia형 초신성을 이용하여 우주의 팽창 속도를 연구하였다. 우주가 일정한 속도로 팽창한다고 가정했을 때 초신성의 밝기를 예측한 뒤, 실제 초신성의 밝기와 비교하였다.

(1) **예측과 관측 결과의 불일치:** 과학자들은 급팽창 이후 우주를 구성하는 물질의 중력이 우주를 끌어당겨 우주의 팽창 속도가 서서히 줄어든다고 예상했다. 만약, 우주의 팽창 속도가 줄어들고 있다면 일정한 속도로 팽창할 때보다 Ia형 초신성이 더 밝게 관측될 것이다. 하지만 관측 결과 Ia형 초신성은 더 어둡게 관측되었다.

(2) **성간 먼지에 의한 밝기 변화:** 과학자들은 성간 먼지에 의해 Ia형 초신성이 더 어둡게 관측되었을 수도 있다고 생각하여 적색 이동량이 매우 큰 Ia형 초신성의 밝기를 관측하였다. 만약, 성간 먼지에 의해 밝기가 어두워졌다면 적색 이동량이 매우 큰 Ia형 초신성의 밝기도 같은 비율로 어두워져야 한다. 하지만 이번에는 예상보다 더 밝게 관측되었고, 이는 성간 먼지에 의한 밝기 변화가 아니라는 것이다.

(3) **가속 팽창 우주:** 적색 이동량이 비교적 작은 Ia형 초신성이 예상보다 어둡게 관측된다는 것은 예상보다 더 멀리 있다는 것이다. 또한, 적색 이동량이 매우 큰 Ia형 초신성이 예상보다 밝게 관측된다는 것은 예상보다 더 가깝다는 것이다. 적색 이동량이 클수록 더 먼 과거, 작을수록 더 최근의 우주를 뜻한다. 따라서 매우 먼 과거의 우주는 점점 느리게 팽창했지만, 비교적 최근의 우주는 점점 빠르게 팽창하고 있다는 것이다. 즉, 우주는 초기에 감속 팽창하다 그 후 가속 팽창하고 있다.



▲ 우주의 미래 모형

중요 개념 체크

정답과 해설 181쪽

1. 급팽창 우주론에 대한 설명으로 옳은 것은 ○, 옳지 않은 것은 ×로 표시하시오.

(1) 우주는 빅뱅 직후 매우 짧은 시간 동안 10^{50}배 이상 빠르게 팽창했다. ——( )

(2) 급팽창 이후 우주의 모든 영역이 서로 영향을 주고받을 수 있었다. ——( )

2. Ia형 초신성 관측 결과, 현재 우주의 팽창 속도는 점점 (빨라, 느려)지고 있다.

Ia형 초신성
Ia형 초신성은 일정한 질량 조건에서 폭발하기 때문에 최고 밝기의 절대 등급이 거의 일정하다. 따라서 관측되는 겉보기 등급과 절대 등급을 비교하면 초신성까지의 거리를 알 수 있다. 또한, 그 밝기가 매우 밝아 아주 먼 거리에 있는 초신성도 비교적 쉽게 관측할 수 있어 멀리 있는 천체의 거리를 측정할 때 사용한다.

표준 우주 모형
급팽창 우주론을 포함한 빅뱅 우주론에 암흑 물질과 암흑 에너지의 개념까지 모두 포함하는 우주론으로, 표준 우주 모형으로 계산한 우주의 구조는 지금까지의 관측 결과와 매우 정확하게 일치한다.

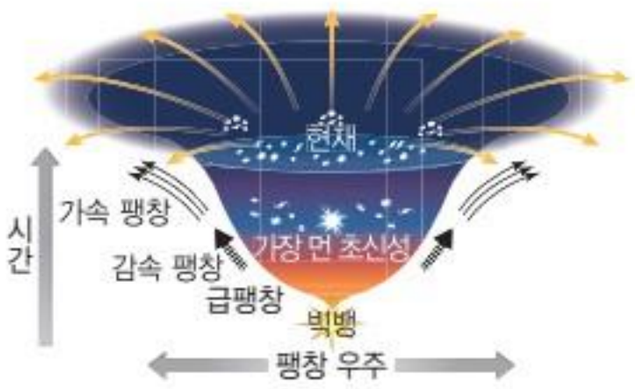
관성 우주
팽창 속도에 영향을 주는 물질이나 에너지가 전혀 없어, 우주의 팽창이 항상 일정한 속도로 나타나는 우주이다.

임계 우주
팽창 속도가 계속 느려지지만, 팽창이 완전히 멈추지는 않는 우주이다.

TOP 심화 강의

우주의 미래는 어떻게 될까?

별과 은하 등 물질로 이루어진 우주는 중력의 작용으로 팽창 속도가 점점 느려질 것으로 예상되었다. 그러나 Ia형 초신성을 관측한 결과, 우주는 오히려 가속 팽창 중이라는 사실이 밝혀졌다. 이후 우주는 어떻게 변할지 설명하기 위해 과학자들은 정체를 알 수 없는 암흑 물질과 암흑 에너지에 주목하게 되었다.



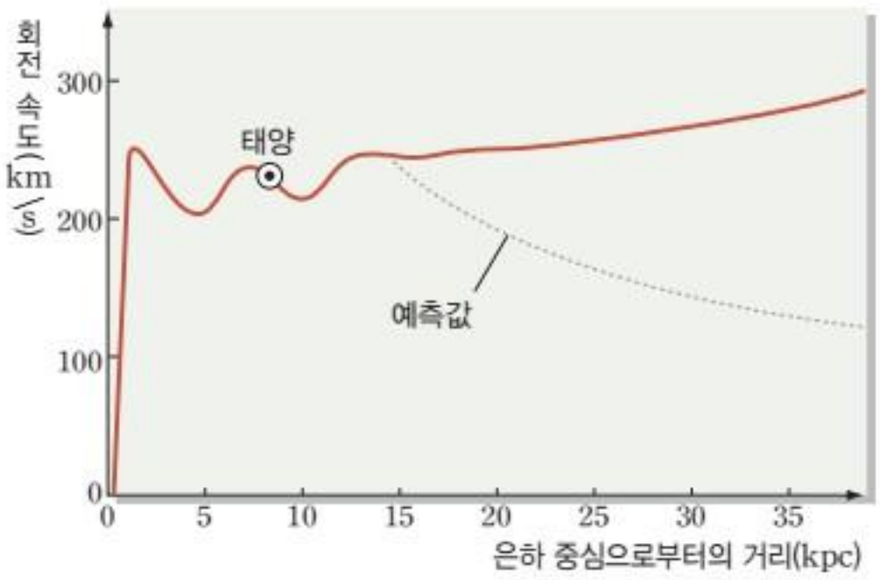
▲ 빅뱅 이후 우주의 팽창 속도 변화

1 암흑 물질(Dark Matter)

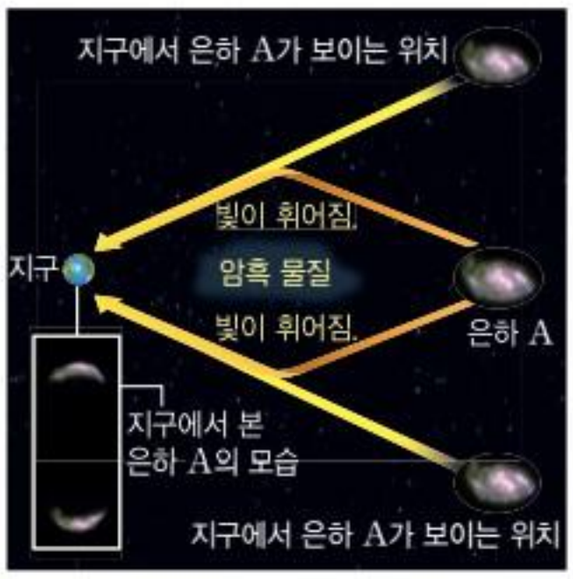
암흑 물질은 우주에 중력적 영향을 주지만, 직접 관측할 수는 없는 물질이다. 암흑 물질은 우주의 구조 형성과 은하의 중력 균형 유지 등에 필수적인 역할을 한다. 암흑 물질은 은하 내부뿐 아니라 은하단과 같은 더 큰 구조에서도 넓게 퍼져 있다.

(1) 암흑 물질 존재의 간접적 증거

- 은하의 회전 속도 곡선: 은하 안에서 빛을 내는 물질은 대부분 은하 중심부에 집중되어 있어, 은하 내 별들의 회전 속도는 중심에서 멀어질수록 느려져야 한다. 하지만, 실제 관측 결과는 거의 일정한 속도를 유지하며 중심에서 먼 별들이 예측보다 빠른 속도로 회전하고 있다. 이는 은하 외곽에 눈에 보이지 않는 암흑 물질이 존재하고 있음을 의미한다.
- 중력 렌즈 효과: 아주 먼 천체에서 나온 빛이 보이지 않는 거대한 질량의 암흑 물질에 의해 휘어져, 마치 렌즈에 빛이 휜 것처럼 보인다.



▲ 우리은하의 회전 속도 곡선



▲ 중력 렌즈 효과

(2) 암흑 물질의 특징

전자기파와의 상호작용	암흑 물질은 빛을 흡수하거나 방출하지 않기 때문에, 스펙트럼에서 전혀 드러나지 않는다. 이는 암흑 물질이 전자기파와 직접적인 상호작용을 하지 않는다는 것을 의미한다.
질량의 존재와 중력	암흑 물질은 질량을 가지며, 이는 간접적인 방법으로 계산한 천체의 전체 질량과 관측 가능한 물질의 질량 사이의 차를 통해 확인할 수 있다. 따라서 암흑 물질은 중력을 통해 천체의 운동에 영향을 준다.
검출 방식	지하 검출기나 가속기 실험 등 다양한 입자 검출 실험이 진행되고 있다. 이러한 탐색은 대부분 암흑 물질이 매우 약하게 상호작용한다는 가정을 바탕으로 이루어지고 있다.

루빈(Rubin, V., 1928~2016)
미국의 천문학자로, 은하의 회전 속도 곡선을 체계적으로 분석했다. 안드로메다은하와 우리은하의 회전 속도 곡선을 정밀하게 분석하여 별의 공전 속도가 은하 중심과의 거리와 무관하게 거의 일정하다는 것을 발견했다. 이는 은하 중심부의 질량 이외에도 보이지 않는 질량이 은하 외곽에 존재하고 있음을 의미하며, 암흑 물질의 존재를 뒷받침하는 결정적 근거가 되었다.

암흑 물질과 표준 모형의 한계
현재 입자물리학의 기본 이론인 표준 모형은 쿼크, 렙톤, 힘 매개 입자 등을 포함하며, 우리가 알고 있는 대부분의 물질과 힘을 설명할 수 있다. 하지만 암흑 물질은 표준 모형에 포함되지 않기 때문에, 이를 설명하기 위해서는 새로운 물리 이론이나 새로운 입자의 존재가 필요하다고 여겨진다.

2 암흑 에너지(Dark Energy)

암흑 물질은 중력을 통해 우주의 팽창 속도를 느리게 하는 역할을 한다. 하지만 관측 결과에 따르면 우주의 팽창 속도는 시간이 지남에 따라 점점 빨라지고 있다. 이를 설명하기 위해 과학자들은 우주 공간 자체에 존재하면서 중력과 반대되는 성질을 가진, 정체불명의 에너지인 암흑 에너지의 존재를 가정하였다. 암흑 에너지는 현재 우주의 물질과 에너지 구성에서 지배적인 역할을 하고 있다.

(1) **암흑 에너지 존재의 간접적 증거**: 우주 배경 복사를 분석한 더블유맵(WMAP) 위성의 관측 결과, 우주는 대규모 구조 차원에서 거의 완벽하게 평탄한 형태를 유지하고 있음이 밝혀졌다. 하지만 보통 물질과 암흑 물질을 모두 합쳐도 우주 전체 에너지 밀도의 약 32 %에 불과하며, 남은 약 68 %는 암흑 에너지라고 해석되고 있다. 암흑 에너지의 존재는 초신성 거리 측정, 우주 배경 복사 분석, 대규모 구조 분포 등 다양한 관측 결과에 의해 지지되고 있다. 또한, 현재 우주가 계속해서 가속 팽창 중이라는 사실 또한 암흑 에너지의 영향력을 보여주는 간접적인 증거이다.

(2) **암흑 에너지의 특징**

작용 방향	암흑 에너지는 중력과는 반대되는 힘으로 작용하여, 우주의 모든 방향으로 공간을 밀어내는 역할을 한다. 이로 인해 우주의 팽창 속도는 시간이 지날수록 점점 빨라지며, 이는 일반적인 중력 법칙으로는 설명할 수 없는 현상이다.
분포 형태	암흑 에너지는 별이나 은하처럼 특정한 곳에 국한되지 않고, 우주 전체에 균일하게 분포해 있는 것으로 추정된다. 이는 우주가 팽창할수록 암흑 에너지가 차지하는 비율이 점점 증가함을 의미한다.
정체	암흑 에너지의 정체는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 현재 가장 유력한 가설은 진공 에너지(Quantum vacuum energy) 또는 우주 상수(Cosmological constant)로 보는 것이다. 진공 에너지는 양자역학적으로 공간 자체가 에너지를 갖는다는 개념이며, 우주 상수는 아인슈타인이 일반 상대성 이론에 도입했던 일정한 에너지 항을 의미한다. 하지만 진공 에너지나 우주 상수 모두 이론적으로 예측되는 값과 실제 관측값 사이에 큰 차이가 있어, 암흑 에너지의 본질을 완전히 설명하기에는 여전히 부족하다.

암흑 에너지의 관측
유럽우주국(ESA)의 유클리드 망원경(Euclid)은 암흑 에너지와 암흑 물질의 정체를 밝히기 위해 2023년 발사되었으며, 먼 은하들의 분포와 중력 렌즈 효과 등을 정밀하게 관측하고 있다.

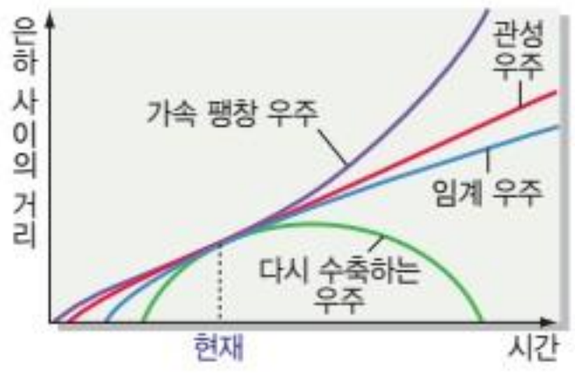
아인슈타인의 우주 상수
아인슈타인이 일반 상대성 이론을 발표할 당시에는 우주의 팽창이 밝혀지기 전이었다. 우주가 팽창하지 않는다면 중력에 의해 천체들이 가까워지고 결국에는 충돌할 것이므로, 아인슈타인은 우주의 수축을 일으키는 중력에 반대되는 힘인 우주 상수를 도입하였다. 이후 허블이 우주가 팽창한다는 사실을 밝혀내자 아인슈타인은 방정식에 추가된 우주 상수를 철회하였다. 그런데 최근에 우주의 가속 팽창이 밝혀졌고, 이 가속 팽창의 원인인 암흑 에너지를 설명하기 위해 우주 상수와 같이 반중력의 역할을 하는 존재가 다시 주목받게 되었다.

3 우주의 구성과 미래

관측과 이론적 분석에 따르면 현재 우주는 암흑 에너지가 약 68 %, 암흑 물질이 약 27 %, 보통 물질이 약 5 %로 구성되어 있다. 따라서 우주의 미래는 암흑 에너지와 암흑 물질 사이의 균형에 따라 달라질 것이다.

(1) **가속 팽창 우주**: 중력보다 암흑 에너지에 의한 척력이 강한 경우로, 암흑 에너지가 임계 밀도의 약 70 %, 물질의 밀도가 약 30 %이다. 평탄한 우주에 해당하며, 현재의 관측 결과와 가장 잘 맞는 우주 모형이다.

(2) **관성 우주**: 중력이나 척력에 영향을 미칠 수 있는 물질이나 에너지가 전혀 없는 경우로, 우주 팽창은 항상 일정한 속도로 나타날 것이다.



▲ 우주의 미래

(3) **임계 우주**: 우주의 밀도가 임계 밀도와 같으며 암흑 에너지가 없고 중력이 우주를 다시 수축시킬 정도로 강하지 않은 경우로, 팽창 속도가 계속 느려지지만 팽창이 완전히 멈추지는 않는 우주가 된다.

(4) **다시 수축하는 우주**: 중력이 강하고 암흑 에너지에 의한 척력이 약한 경우로, 우주는 다시 수축하여 종말을 맞는다.

개념 기본 문제

01 외부 은하의 관측에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 멀리 있는 은하일수록 적색 이동량이 크게 나타난다.

ㄴ. 외부 은하는 대부분 우리에게서 멀어지는 방향으로 움직이고 있다.

ㄷ. 우리은하로부터 멀어지는 외부 은하에서 우리 은하를 관측하면 적색 이동이 나타난다.

02 허블-르메트르 법칙에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. 우주가 팽창하고 있다는 증거이다.

ㄴ. 은하의 후퇴 속도는 은하까지의 거리에 비례한다.

ㄷ. 이 법칙에 따르면 모든 은하는 실제로 멀어지는 운동을 한다.

03 허블 상수에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

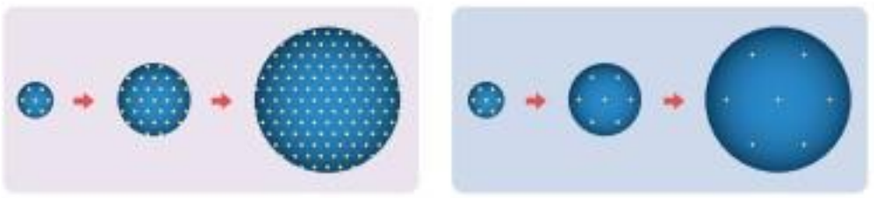
ㄱ. 허블 상수의 역수는 우주의 나이 추정에 활용할 수 있다.

ㄴ. 허블 상수는 허블-르메트르 법칙의 그래프에서 기울기에 해당한다.

ㄷ. 외부 은하의 적색 이동량은 허블 상숫값을 계산하는 데 사용할 수 있다.

02 우주의 팽창과 진화

04 그림 (가)와 (나)는 우주론에 따른 우주의 밀도 변화를 나타낸 것이다.



(가) (나)

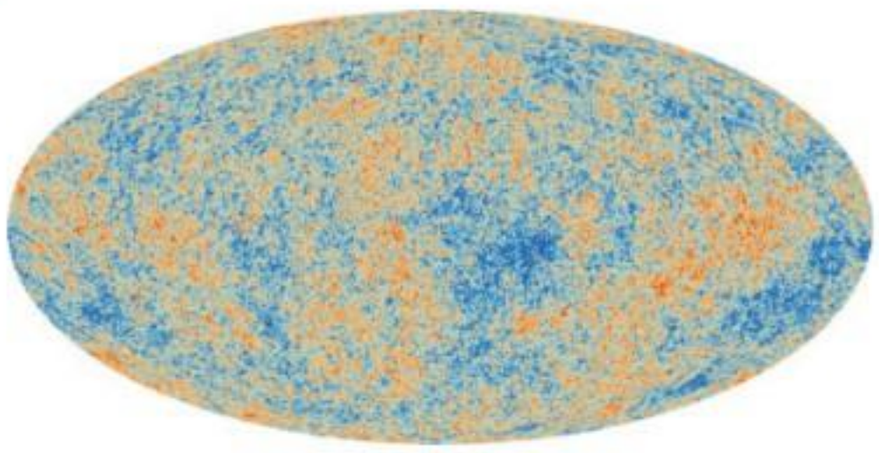
(가)와 (나)는 각각 정상 우주론과 빅뱅 우주론 중 무엇인지 쓰시오.

05 다음은 빅뱅 우주론에 대한 설명이다.

빅뱅 우주론에 따르면 시간이 지날수록 우주의 크기는 커지고, 우주의 밀도는 ㉠(증가, 감소)하며, 우주의 온도는 ㉡(증가, 감소)한다.

( ) 안에 알맞은 말을 고르시오.

06 그림은 우주 배경 복사 지도를 나타낸 것이다.



우주 배경 복사에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

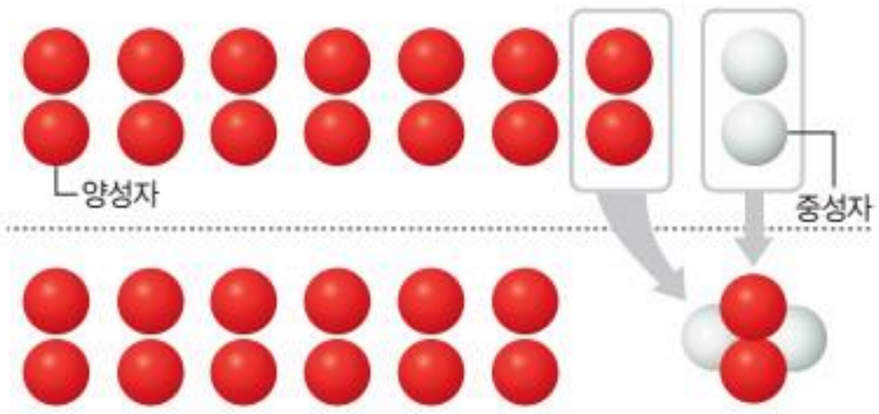
보기

ㄱ. 빅뱅 이후 약 3분이 지나 우주의 온도가 약 3000 K일 때 형성되었다.

ㄴ. 현재는 약 2.7 K의 흑체 복사로 관측된다.

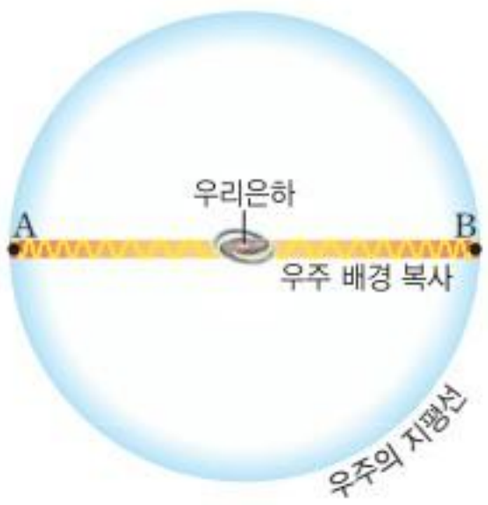
ㄷ. 방향에 따라 미세한 온도 차이가 있다.

07 그림은 빅뱅 우주론에서 우주 초기 헬륨 원자핵이 형성되는 과정을 나타낸 것이다.



헬륨 원자핵이 형성된 후, 수소 원자핵과 헬륨 원자핵의 ㉠ 개수비와 ㉡ 질량비를 쓰시오.

08 다음은 기존의 빅뱅 우주론만으로 설명하지 못하는 문제점 중 하나를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

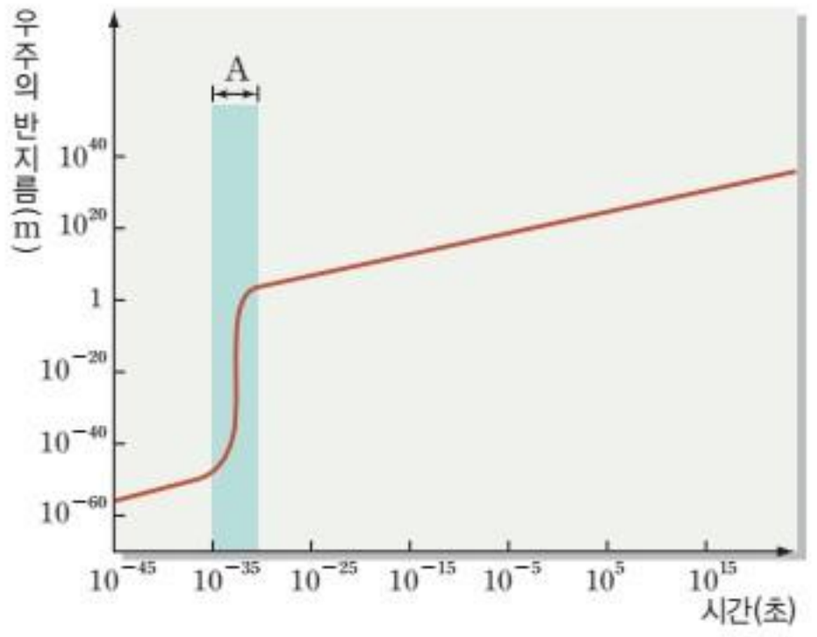
ㄱ. A와 B 지점은 빅뱅 이후 상호작용하였다.
ㄴ. A와 B 지점은 약 276억 광년 떨어져 있다.
ㄷ. A와 B 지점에서 오는 우주 배경 복사는 거의 같은 모습이다.

09 다음은 기존의 빅뱅 우주론만으로 설명하지 못하는 문제점 중 하나에 대한 설명이다.

현재 우주는 거의 0의 곡률인 (　　)한 상태를 유지하고 있다. 이러한 상태를 유지하려면 초기 우주의 밀도가 매우 정밀하고 특정한 값을 가져야 한다.

(　　) 안에 알맞은 말을 쓰시오.

10 그림은 빅뱅 이후 시간에 따른 우주의 반지름을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고르시오.

보기

ㄱ. A 시기 이전에 우주의 크기는 우주의 지평선보다 작았다.
ㄴ. A 시기 이전에 우주의 모든 영역이 서로 충분히 영향을 주고받았다.
ㄷ. A 시기 이후에 우주에서는 자기 홀극이 발견되었다.

11 다음은 Ia형 초신성을 이용한 우주의 팽창 속도 연구에 대한 설명이다.

적색 이동량이 비교적 작은 Ia형 초신성은 예상보다 ㉠(밝게, 어둡게) 관측되었고, 적색 이동량이 매우 큰 Ia형 초신성은 예상보다 ㉡(밝게, 어둡게) 관측되었다.

(　　) 안에 알맞은 말을 고르시오.

12 다음은 우주의 진화 과정에서 일어난 팽창을 순서 없이 나열한 것이다.

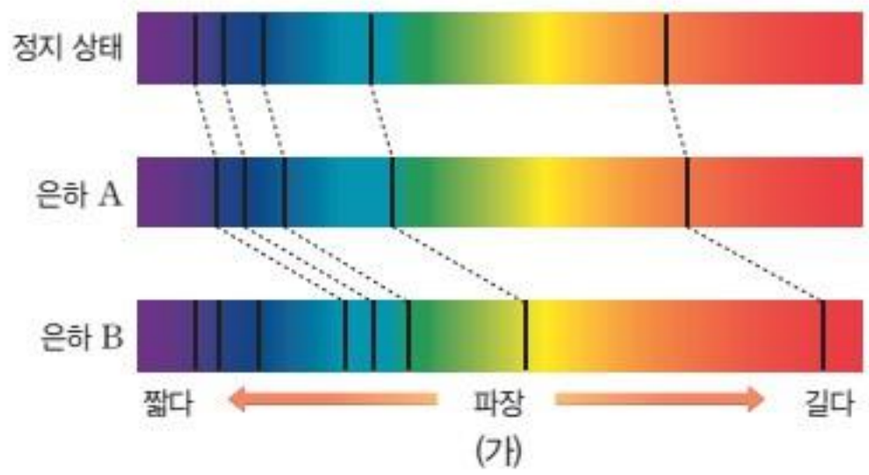
(가) 빅뱅　　(나) 감속 팽창
(다) 급팽창　　(라) 가속 팽창

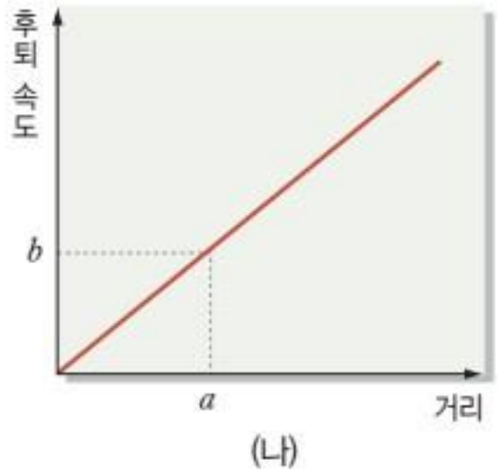
(가)~(라)를 일어난 시간 순서대로 나열하시오.

개념 적용 문제

➤ 허블-르메트르 법칙과 우주 팽창

01 그림 (가)는 지구에서 관측한 외부 은하 A와 B의 스펙트럼을 정지 상태의 스펙트럼과 비교한 것을, (나)는 외부 은하까지의 거리와 후퇴 속도의 관계를 나타낸 것이다.





이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. $\frac{b}{a}$의 값은 A가 B보다 크다.

ㄴ. 지구에서의 거리는 A가 B보다 가깝다.

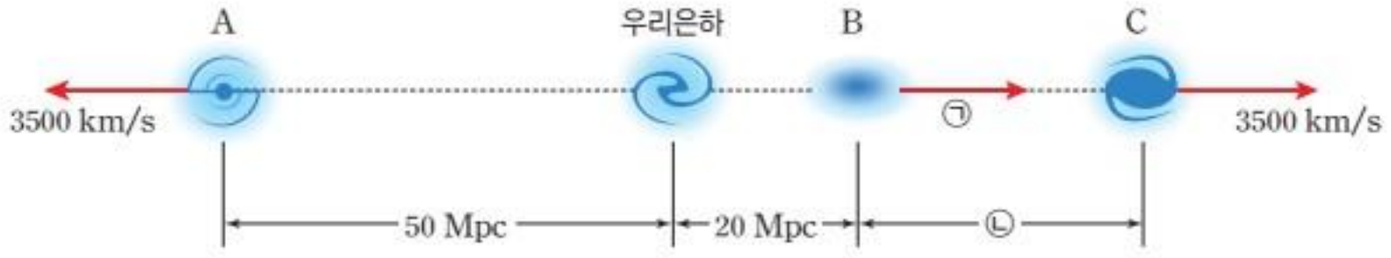
ㄷ. A에서 B를 관측하면 적색 이동이 나타난다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 허블은 외부 은하까지의 거리와 적색 이동을 비교하여 대부분의 은하가 지구로부터 멀어지고 있으며, 멀리 있는 은하일수록 더 빠르게 멀어진다는 것을 발견하였다.

➤ 허블-르메트르 법칙

02 그림은 어느 직선상에 있는 외부 은하 A~C의 거리와 후퇴 속도를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 허블 상수는 70 km/s/Mpc이다.

ㄴ. ㉠은 1400 km/s, ㉡은 20 Mpc이다.

ㄷ. C에서 측정한 후퇴 속도는 A가 우리은하의 2배이다.

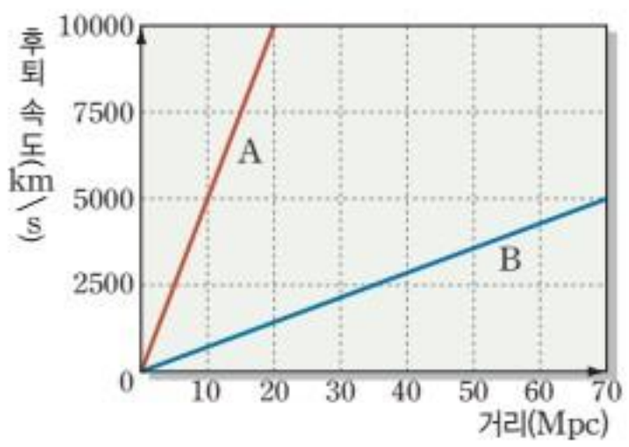
① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 허블-르메트르 법칙은 은하들이 실제로 멀어지는 것이 아니라 우주 공간이 모든 방향에 대해 균일하게 팽창하고 있음을 나타낸다.

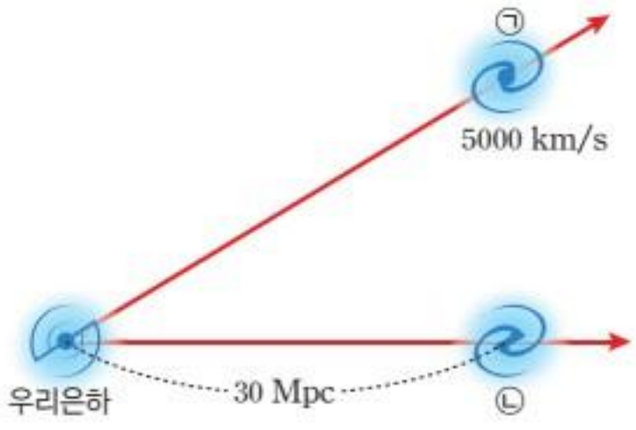
➤ 허블-르메트르 법칙

03 그림 (가)는 A와 B 시기에 우리은하에서 관측한 외부 은하까지의 거리와 후퇴 속도의 관계를, (나)는 우리은하에서 관측한 외부 은하 ㉠과 ㉡까지의 거리와 후퇴 속도를 나타낸 것이다.

▻ 은하까지의 거리와 후퇴 속도와의 관계를 나타낸 허블-르메트르 법칙에서 비례 상수가 허블 상수이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

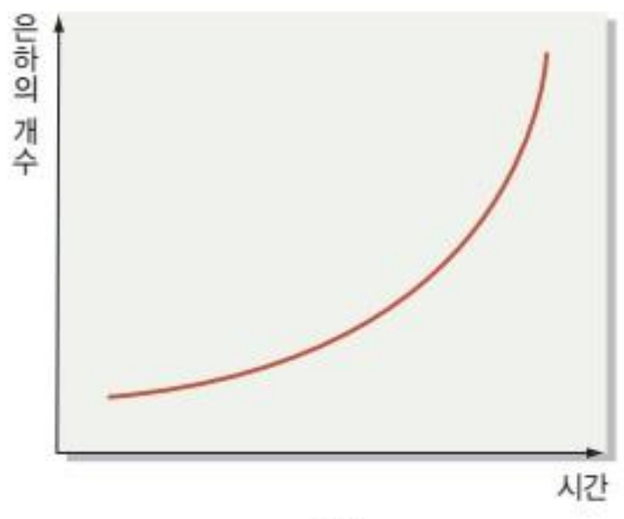
ㄱ. 허블 상수는 A 시기가 B 시기보다 더 크다.
ㄴ. ㉠까지의 거리는 A 시기보다 B 시기에 더 가깝게 측정된다.
ㄷ. ㉡의 후퇴 속도는 B 시기보다 A 시기에 더 빠르게 측정된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

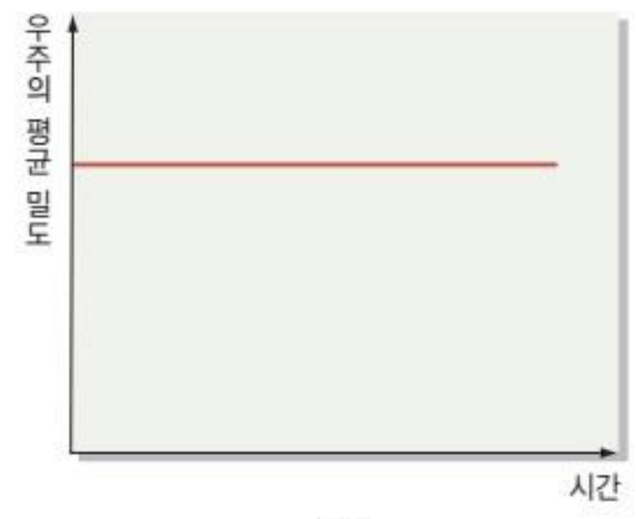
➤ 정상 우주론과 빅뱅 우주론

04 그림 (가)와 (나)는 어느 우주론을 근거로 하여 시간에 따른 은하의 개수와 우주의 평균 밀도의 변화를 나타낸 것이다.

▻ 팽창하는 우주와 관련된 우주론에는 대표적으로 정상 우주론과 빅뱅 우주론이 있다.



(가)



(나)

이 우주론에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

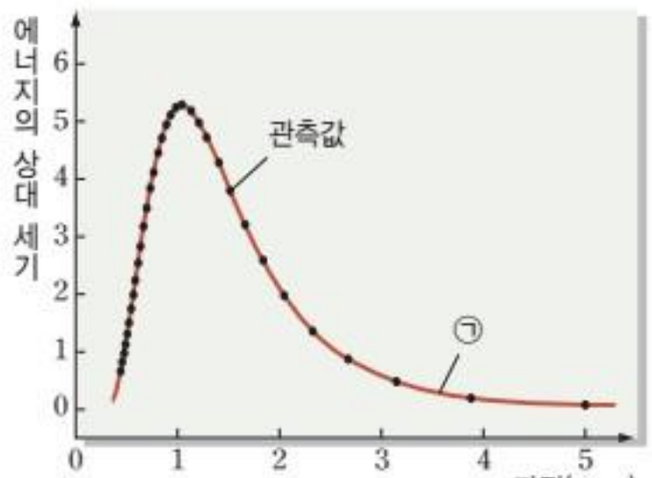
보기

ㄱ. 시간이 지날수록 우주의 질량은 증가한다.
ㄴ. 평균 밀도가 일정하므로 우주의 크기는 계속 일정하다.
ㄷ. 이 우주론에서는 허블-르메트르 법칙이 성립하지 않는다.

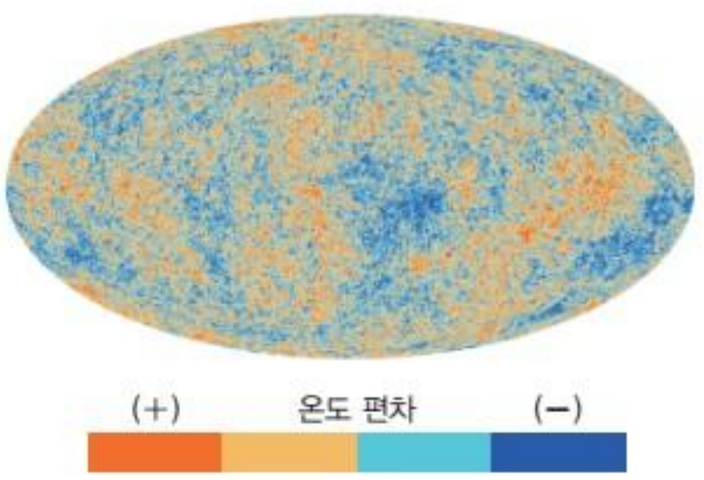
① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 빅뱅 우주론의 관측적 증거

05 그림 (가)는 우주 배경 복사의 파장에 따른 에너지 세기 변화를, (나)는 우주 배경 복사 지도를 나타낸 것이다.



(가)



(나)

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 우주는 계속 팽창한다고 가정한다.)

보기

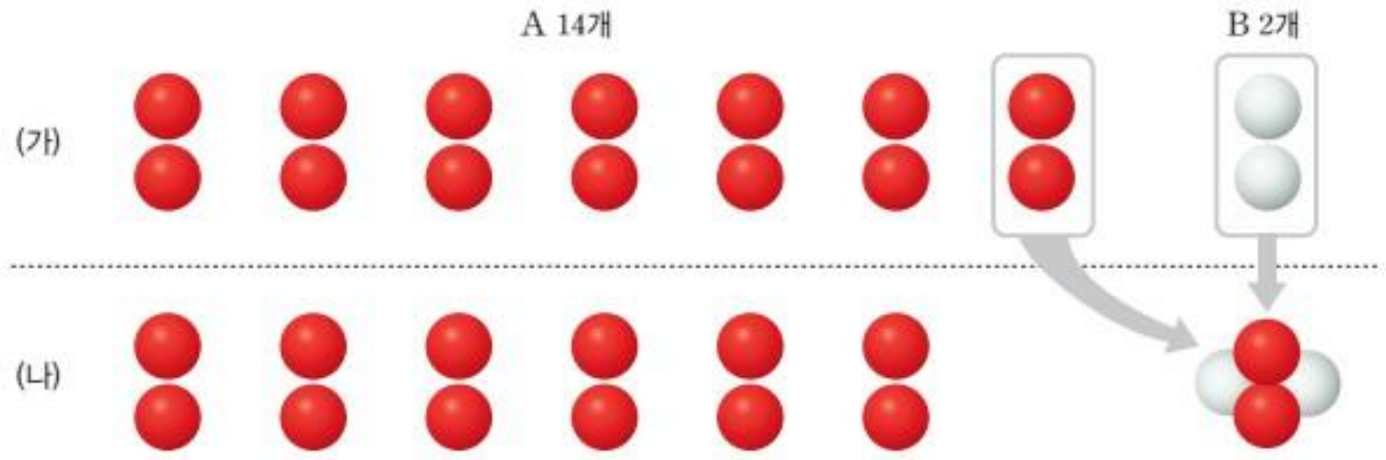
ㄱ. ㉠은 표면 온도가 약 2.7 K인 흑체의 에너지 분포 곡선과 같다.
ㄴ. 우주 배경 복사는 방향에 따라 미세한 차이가 있다.
ㄷ. 이후 시간이 지날수록 ㉠ 아래의 면적은 감소한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 우주 배경 복사는 우주의 온도가 약 3000 K일 때 방출된 빛이 우주의 팽창으로 파장이 길어진 상태로 관측된다.

➤ 빅뱅 우주론의 관측적 증거

06 그림은 빅뱅 우주론에서 우주 초기에 헬륨 원자핵이 생성되는 과정을 나타낸 것이다. A와 B는 각각 양성자와 중성자 중 하나이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

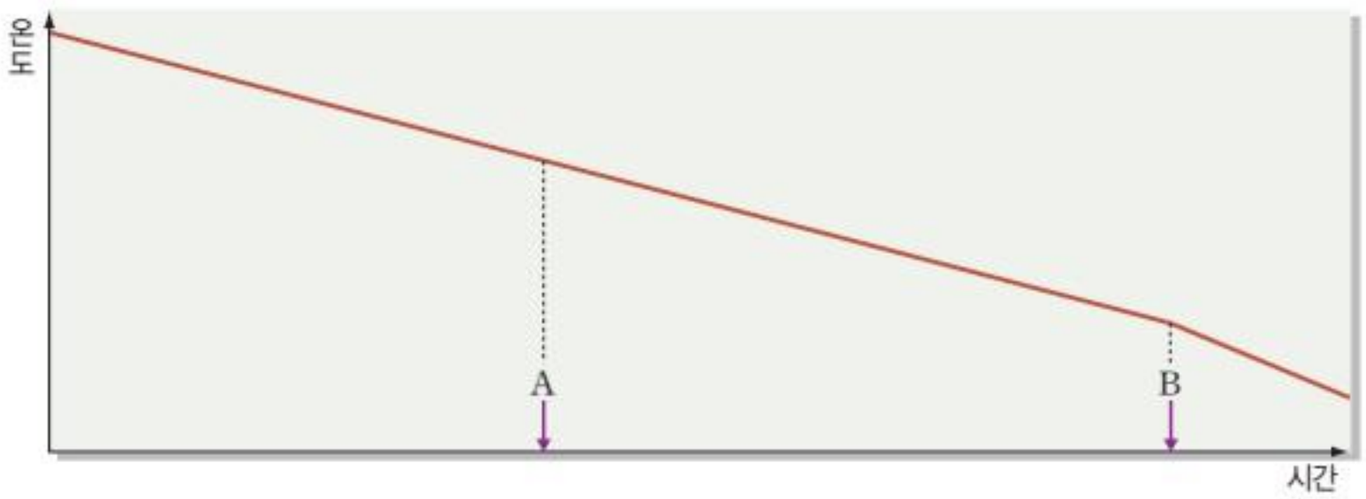
ㄱ. (가) 시기에 양성자와 중성자의 개수비는 7 : 1이다.
ㄴ. (나) 시기에 수소와 헬륨의 질량비는 12 : 1이다.
ㄷ. (가) 시기에 B의 개수가 2개 더 많았다면, (나) 시기에 수소와 헬륨의 개수비는 5 : 1이 된다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 빅뱅 우주론에 따르면, 우주 초기에 양성자와 중성자가 형성되었으며, 형성 초기에는 양성자와 중성자의 개수가 비슷하였으나, 후기에는 양성자의 개수가 더 많았다.

➤ 빅뱅 우주론의 관측적 증거

07 그림은 빅뱅 이후 시간에 따른 우주의 온도 변화를 나타낸 것이다. A와 B는 각각 헬륨 원자핵과 중성 원자가 형성된 시기 중 하나이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

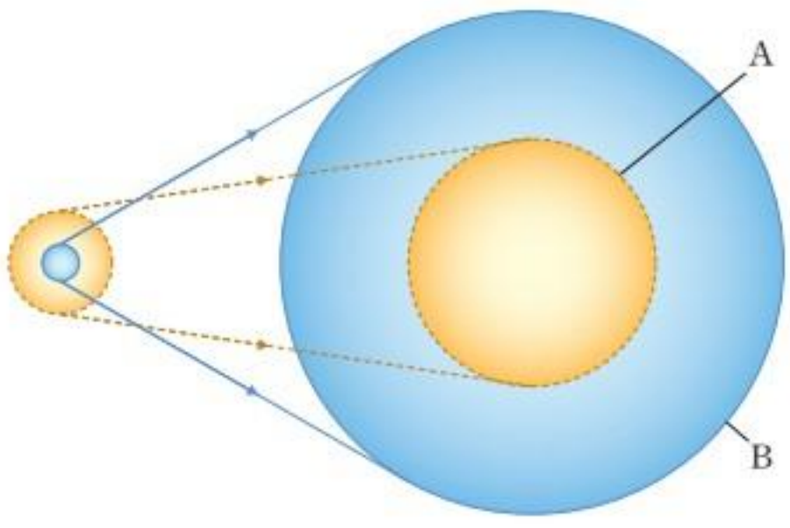
ㄱ. A 시기 이후 우주에서는 빛이 자유롭게 움직일 수 있게 되었다.
ㄴ. A 시기 이후 우주에 있는 수소와 헬륨의 질량비는 약 3 : 1이 되었다.
ㄷ. 우주에 있는 별과 은하는 B 시기 이후 만들어졌다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ 헬륨 원자핵은 우주의 나이가 약 3분일 때 만들어졌고, 중성 원자는 약 38만 년일 때 만들어졌다.

➤ 급팽창 우주론

08 그림은 급팽창 우주론에 따른 우주의 지평선과 우주의 크기 변화를, 표는 기존의 빅뱅 우주론만으로 설명하기 어려운 문제점 중 일부를 나타낸 것이다. A와 B는 각각 우주의 크기와 우주의 지평선 중 하나이다.



(가)	서로 약 930억 광년 떨어진 곳에서 오는 우주 배경 복사가 거의 같다.
(나)	우주에서 자기 홀극이 발견되지 않는다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

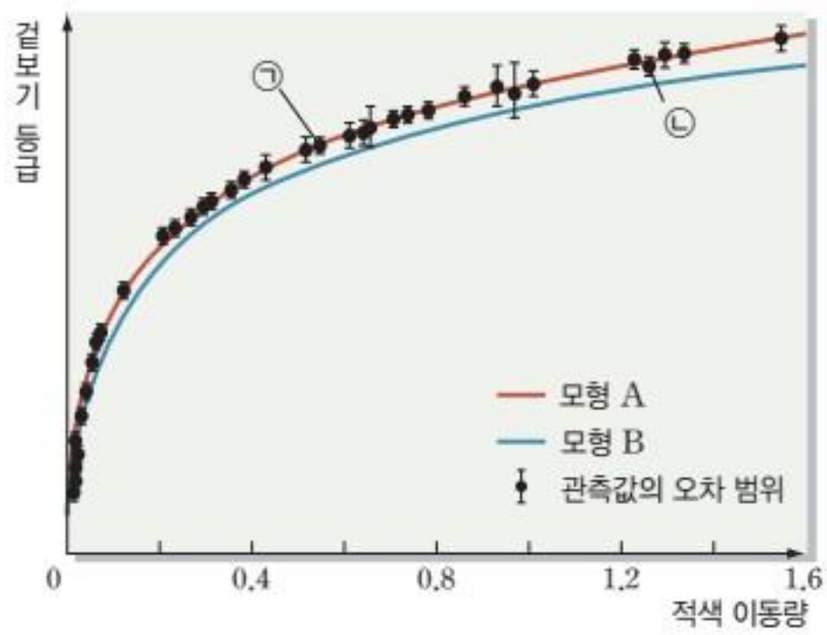
ㄱ. A는 우주의 크기, B는 우주의 지평선이다.
ㄴ. 급팽창이 일어나기 전, A와 B의 크기로 (가) 문제를 해결할 수 있다.
ㄷ. 급팽창이 일어난 후, 급격하게 커진 B의 크기로 (나) 문제를 해결할 수 있다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

▻ 기존의 빅뱅 우주론만으로 설명하기 어려운 문제점으로는 지평선(등방성) 문제, 자기 홀극 문제, 평탄성 문제가 있다. 이러한 문제점들은 우주가 매우 짧은 시간 동안 급격하게 커졌다는 급팽창 우주론으로 해결할 수 있다.

➤ 급팽창 이후 우주의 팽창 속도

09 그림은 외부 은하 안에 있는 Ia형 초신성의 적색 이동량과 겉보기 등급을 두 우주 모형 A와 B 위에 나타낸 것이다. A와 B는 각각 가속 팽창 모형과 감속 팽창 모형 중 하나이다.
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?



과학자들은 일정한 질량 조건에서 폭발하는 Ia형 초신성을 이용하여 우주의 여러 가지 팽창 모형을 비교하였고, 현재 우주가 가속 팽창하고 있다는 사실을 확인하였다.

보기

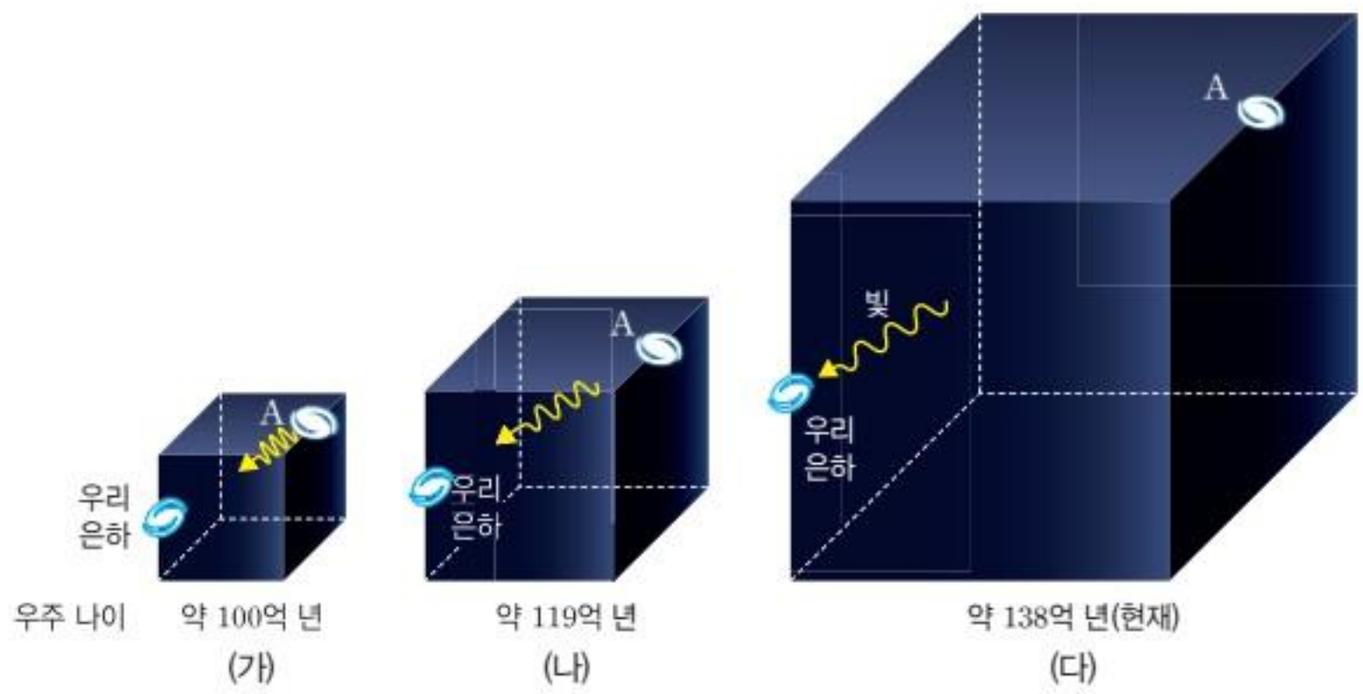
ㄱ. ㉠과 ㉡의 절대 등급은 거의 같다.
ㄴ. ㉠은 ㉡보다 지구로부터 더 멀리 있다.
ㄷ. Ia 초신성의 관측 결과로 우주가 A와 더 일치함을 알 수 있다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 급팽창 이후 우주의 팽창 속도

10 그림 (가)~(다)는 우주의 나이가 약 100억 년일 때 은하 A에서 출발한 빛이 현재 지구에 도달하는 모습을 나타낸 것이다.

빛이 우주를 이동하는 동안 우주도 팽창하며 크기가 계속 커진다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 이 기간에 우주는 계속 가속 팽창하였다.)

보기

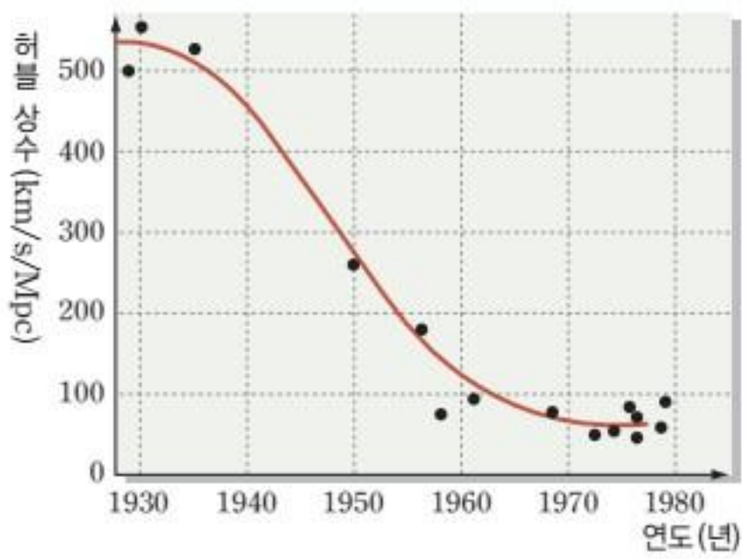
ㄱ. 우주가 팽창한 정도는 (가)~(나) 기간보다 (나)~(다) 기간이 더 크다.
ㄴ. A에서 출발한 빛의 파장은 빛이 A에서 출발했을 때가 현재보다 더 짧다.
ㄷ. A에서 출발한 빛이 우리은하에 도달하는 데까지 이동한 거리는 38억 광년이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

1등급 도전 문제

➤ 허블-르메트르 법칙

11 그림은 1930년~1980년까지 연도별 허블 상수의 측정값 변화를 나타낸 것이다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 우주의 팽창 속도는 일정하다고 가정한다.)



▻ 허블 상수의 단위는 km/s/Mpc이며, 이는 시간의 역수와 같은 단위이다.

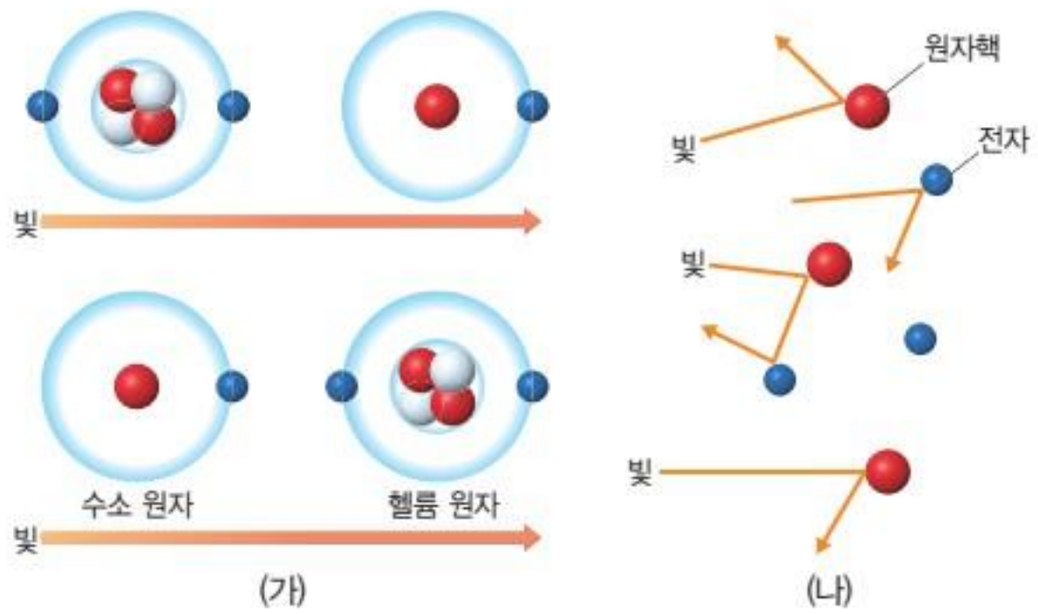
보기

ㄱ. 1930년대 이후 외부 은하의 적색 이동량은 점점 작아진다.
ㄴ. 허블 상수로 추정한 우주의 나이는 1930년대 계산값이 1970년대 계산값보다 적다.
ㄷ. 허블 상수로 추정한 은하까지의 거리는 1930년대 계산값이 1970년대 계산값보다 더 멀다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

➤ 빅뱅 우주론의 관측적 증거

12 그림 (가)와 (나)는 각각 빅뱅 이후 어느 시기에 빛이 우주 공간을 진행하는 모습을 순서 없이 나타낸 것이다.



▻ 빅뱅 이후 초기 우주는 온도와 밀도가 매우 높아 전자가 자유롭게 움직였다. 이후 우주의 나이가 약 38만 년이 되었을 때, 빛을 산란하던 전자가 원자핵과 결합하였다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. 우주의 나이는 (가) 시기가 (나) 시기보다 많다.
ㄴ. 우주의 밀도는 (가) 시기가 (나) 시기보다 크다.
ㄷ. 우주 배경 복사는 (가) 시기와 (나) 시기에 모두 존재한다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

중단원 핵/심/정/리 3. 은하와 우주

01 외부 은하

1 외부 은하의 분류

▸ 108쪽~110쪽

1. **외부 은하의 발견** 허블은 세페이드 변광성을 이용하여 외부 은하의 존재를 처음 증명하였다.
2. **허블의 은하 분류** 허블은 다양한 외부 은하를 가시광선 영역에서 관측되는 (1) 특징에 따라 분류하였다. 허블의 은하 분류는 은하의 진화와는 관련이 없다.

(2) 은하(E)	• 나선팔이 없는 타원 모양으로, E0에서 E7로 갈수록 점점 납작해진다. • 성간 물질이 매우 적어 별의 생성이 거의 일어나지 않고, 주로 나이가 많은 붉은색 별로 이루어져 있다.
(3) 은하(S, SB)	• 납작한 원반 구조를 가지며, 중앙 팽대부를 중심으로 나선팔이 감긴 모양이다. 중앙에 둥근 중심부를 가진 (4) 은하(S)와 막대 구조를 가진 (5) 은하(SB)로 분류한다. • a형에서 c형으로 갈수록 은하 전체에 대한 중앙 팽대부의 비율이 작고, 나선팔이 느슨하게 감기며, 새로운 별이 탄생하는 암흑 성운도 많이 분포한다. • 중앙 팽대부에는 나이가 많은 붉은색 별과 구상 성단이 주로 분포하고, 나선팔에는 나이가 적은 푸른색 별과 성간 물질 및 산개 성단이 많이 분포한다.
(6) 은하(Irr)	• 규칙적인 형태가 없고, 중앙 팽대부나 나선팔이 명확하지 않다. • 나이가 적은 푸른색 별이 많으나 나이가 많은 붉은색 별도 포함하고 있으며, 성간 물질이 많아 새로운 별의 생성이 활발하다.

2 특이 은하

▸ 111쪽~113쪽

전파 은하	• 가시광선 영역에서는 타원 은하로 관측되고, 강한 전파를 방출하는 은하이다. • 중심에는 핵이 있고, 핵 양쪽에 (7)로 연결된 거대한 전파 방출 영역인 (8)가 있다. • 은하 중심부에 거대 질량 블랙홀이 있다고 추정된다.
퀘이사	• 가시광선 영역에서는 별과 같이 관측되며, 스펙트럼에서 매우 큰 (9)이 나타난다. • 지구로부터 매우 멀리 있으며, 매우 빠른 속도로 멀어진다. 이를 통해 우주 초기부터 있었던 천체라는 것을 알 수 있다. • 크기는 태양계 정도로 작지만 막대한 에너지를 방출하는데, 이러한 에너지는 중심부에 있다고 추정되는 거대 질량 블랙홀의 영향으로 생성된다고 추정된다.
세이퍼트 은하	• 가시광선 영역에서는 나선 은하로 관측되며, 은하의 중심부가 매우 밝고 크기가 작다. • 일반 은하에 비해 (10)의 폭이 매우 넓게 나타나는데, 이것은 은하 중심에 있다고 추정되는 거대 질량 블랙홀의 영향으로 생성된다고 추정된다.
충돌 은하	• 은하 집단 내에서 상대적으로 서로 가까운 은하끼리 충돌하는 현상이다. • 별의 크기보다 별 사이의 공간이 훨씬 크기 때문에 별의 충돌은 거의 일어나지 않는다. 그러나 은하 내 성간 물질이 서로 충돌하고 압축되면서 별의 생성을 촉진한다.

02 우주의 팽창과 진화

1 허블-르메트르 법칙과 우주 팽창

▸ 120쪽~121쪽

1. **외부 은하의 스펙트럼 변화** 외부 은하의 스펙트럼에 나타나는 (11)을 측정하면 후퇴 속도를 구할 수 있다. → $v = c \times z = c \times \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = c \times \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$ (c: 빛의 속도, 약 3×10^8 m/s)

정답과 해설 184쪽

2. 허블-르메트르 법칙 후퇴 속도(v)는 거리(r)에 비례한다. → $v = H \times r$(H: 허블 상수)

(1) 은하들이 실제로 멀어지는 운동을 하는 것이 아니라, 공간 자체가 모든 방향에 대해 균일하게 팽창하고 있다.

(2) 허블 상숫값을 이용하여 우주의 팽창이 시작되어 현재까지 걸린 시간($t = \frac{1}{H}$)과 빛의 속도로 멀어지는 은하가 존재하는 거리($r = \frac{c}{H}$)를 구할 수 있다.

2 빅뱅 우주론

▸ 122쪽~124쪽

1. 정상 우주론과 빅뱅 우주론

(1) 정상 우주론: 우주는 팽창하고 있지만, 팽창한 공간에 새로운 물질이 계속 생성된다. → 시간에 따라 우주 전체의 평균 밀도와 온도가 (12)

(2) 빅뱅 우주론: 우주는 고온·고밀도의 초기 상태에서 시작하여 대폭발한 뒤 공간이 팽창한다. → 시간에 따라 우주 전체의 평균 밀도와 온도가 (13)

2. 빅뱅 우주론의 관측적 증거

(1) 우주 배경 복사: 빅뱅 이후 약 38만 년이 되었을 때, 우주의 온도가 약 (14) K까지 낮아졌다. 이때 빛을 산란하던 전자가 원자핵과 결합하면서 원자를 형성하고, 빛이 자유롭게 움직일 수 있게 되어 우주 전역에 퍼졌다. 이 빛은 우주의 팽창으로 파장이 길어져 현재 약 2.7 K에 해당하는 복사로 우주 전역에서 관측된다.

(2) 수소와 헬륨의 질량비: 빅뱅 직후 고온·고밀도 조건에서 양성자와 중성자가 약 7 : 1의 개수비로 생성되었다. 이후 우주의 온도가 내려가며 우주의 나이 약 3분에 핵융합이 일어나 수소와 헬륨의 개수비가 약 12 : 1, 질량비가 약 (15)이 되었다. 이 비율은 현재 우주에서 관측되는 빛으로 계산한 값과 거의 일치한다.

3 급팽창 우주론과 가속 팽창 우주

▸ 125쪽~127쪽

1. 기존 빅뱅 우주론의 문제점

(16) (등방성) 문제	현재 약 930억 광년 떨어진 우주의 지평선 양 끝 영역은 빅뱅 이후 서로 상호작용할 수 없었는데, 우주 배경 복사는 모든 방향에서 거의 같은 온도(등방성)로 관측된다.
(17) 문제	초기 우주에 자기 홀극이 많이 생성됐지만, 현재까지 발견되지 않았다.
(18) 문제	우주는 거의 완벽히 평탄(곡률 0)한 상태인데, 이를 위해서는 초기 우주 밀도가 매우 특정한 값을 가져야 한다.

2. 급팽창 우주론 빅뱅 직후 극히 짧은 시간 동안 우주가 10^{50}배 이상 팽창했다.

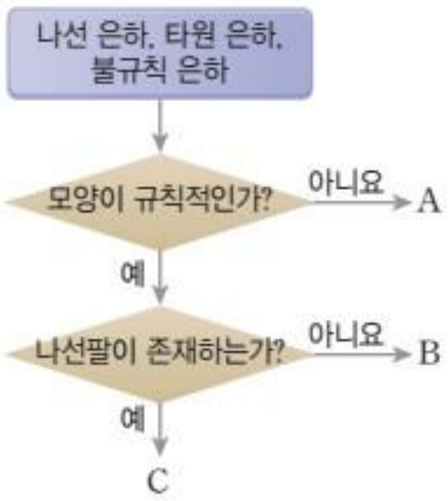
(16) (등방성) 문제의 해결	빅뱅 직후 우주는 매우 작아 모든 영역의 상호작용이 가능했으며, 이로 인해 우주의 에너지 밀도가 거의 균일해질 수 있었다.
(17) 문제의 해결	급팽창으로 자기 홀극이 우주의 지평선 밖으로 밀려나, 현재 관측 가능한 범위 내에서는 자기 홀극의 밀도가 매우 낮아졌다.
(18) 문제의 해결	급팽창이 발생하면 초기 우주 밀도와 관계없이 우주의 곡률이 매우 작아져 평탄하게 보인다.

3. 급팽창 이후 우주의 팽창 속도 (19)의 적색 이동량과 겉보기 등급을 관측한 자료를 우주의 여러 가지 팽창 모형과 비교하여 현재 우주가 (20)하고 있다는 사실을 확인했다.

통합 실전 문제

허블의 은하 분류

01 그림은 여러 은하를 허블의 은하 분류 기준에 따라 분류하는 과정을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

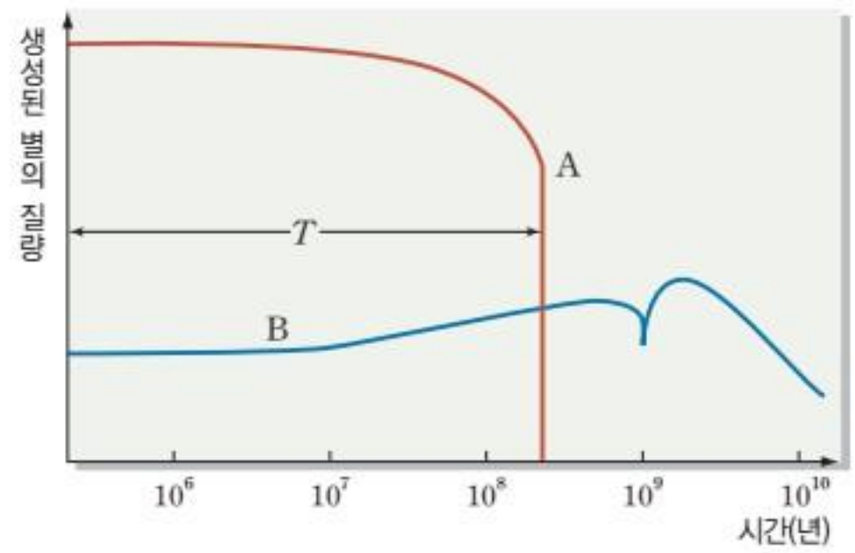
보기

ㄱ. 별의 평균 나이는 A가 B보다 적다.
ㄴ. 별이 생성되는 비율은 B가 C보다 높다.
ㄷ. $\frac{\text{붉은색 별의 개수}}{\text{별의 전체 개수}}$는 A가 가장 크다.

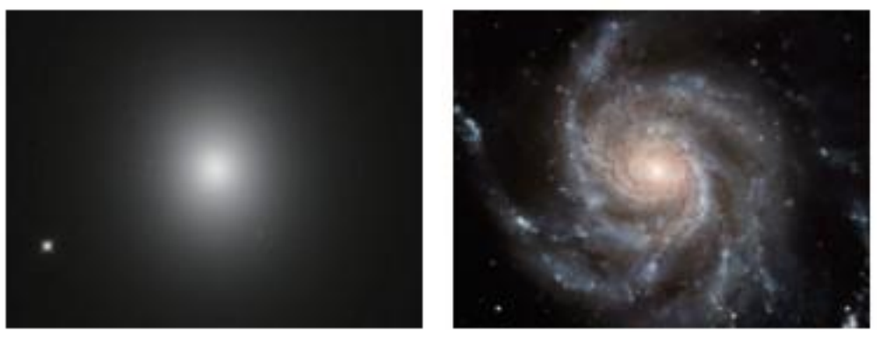
① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

허블의 은하 분류

02 그림 (가)는 서로 다른 은하의 종류 A와 B가 탄생한 이후 시간에 따라 연간 생성된 별의 질량을 추정하여 나타낸 것이고, (나)는 은하 ㉠과 ㉡의 모습을 나타낸 것이다. ㉠과 ㉡은 각각 A와 B 중 하나이다.



(가)



㉠ ㉡

(나)

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

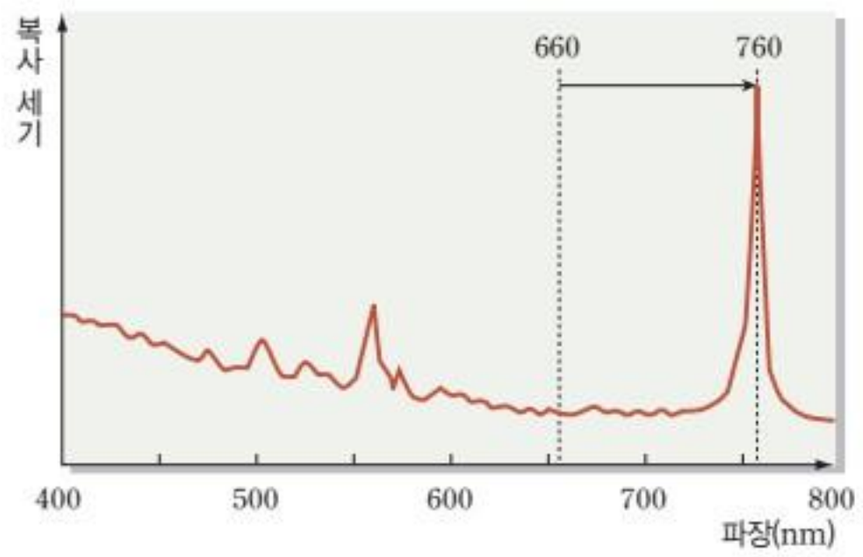
보기

ㄱ. ㉠은 A, ㉡은 B에 속한다.
ㄴ. T 기간 동안 생성된 별의 총 질량은 A가 B보다 크다.
ㄷ. T 기간 이후 $\frac{\text{성간 물질의 질량}}{\text{은하의 전체 질량}}$은 A가 B보다 크다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

퀘이사 + 허블-르메트르 법칙

03 그림은 어느 퀘이사의 스펙트럼에서 관측된 방출선의 파장 변화를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 빛의 속도는 3×10^5 km/s이고, 허블 상수는 70 km/s/Mpc이다.)

보기

ㄱ. 이 퀘이사까지의 거리는 500 Mpc보다 멀다.
ㄴ. 이 퀘이사의 중심에는 거대 질량 블랙홀이 있어, 우리은하보다 광도가 작다.
ㄷ. 이 퀘이사보다 먼 은하의 스펙트럼에서는 방출선의 파장 변화량이 100 nm보다 더 크다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

특이 은하

04 표는 은하 A와 B의 특징을 나타낸 것이다.

은하	특징
A	중심에는 핵이 있고, 핵 양쪽에 제트로 연결된 거대한 ㉠ 로브가 관측된다.
B	은하의 중심부가 주변부에 비해 매우 밝고 크기가 작으며, ㉡ 방출선의 폭이 매우 넓게 나타난다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. ㉠은 가시광선보다 파장이 긴 영역에서 잘 관측된다.
ㄴ. ㉡은 B 중심에 있다고 추정되는 블랙홀의 영향으로 나타난다.
ㄷ. A와 B는 모두 허블의 은하 분류 체계로는 분류하기 어려운 은하이다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

외부 은하의 스펙트럼 변화

05 표는 서로 다른 방향에 있는 은하 (가)와 (나)의 스펙트럼에서 관측된 방출선 A와 B의 고유 파장과 관측 파장을 나타낸 것이다.

방출선	고유 파장(nm)	관측 파장(nm)	
		(가)	(나)
A	500	550	520
B	㉠	770	㉡

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, (가)와 (나)는 허블-르메트르 법칙을 만족한다.)

보기

ㄱ. ㉠은 700이다.
ㄴ. (나)에서 측정한 파장 변화량은 A가 B보다 크다.
ㄷ. 적색 이동 계수는 (가)가 (나)의 3배이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

허블-르메트르 법칙

06 표는 관측 위치에 따른 은하 A~E의 후퇴 속도를 나타낸 것이다. 은하 A~E는 일직선상에 있다.

($\times 10^3$ km/s)

관측 위치	A	B	C	D	E
A:	–	7	14	21	28
B:	7	–	7	14	21
C:	14	7	–	7	14

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 모든 은하는 허블-르메트르 법칙을 만족하며, 허블 상수는 70 km/s/Mpc이다.)

보기

ㄱ. 우주 공간 팽창의 중심은 C이다.
ㄴ. A와 B 사이의 거리는 100 Mpc이다.
ㄷ. A와 C 사이의 거리는 C와 E 사이의 거리보다 멀다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

허블-르메트르 법칙

07 다음은 같은 평면에 있는 은하 A~C에 대한 설명이다.

- A에서 B까지의 거리는 20 Mpc이다.
- A에서 관측할 때 B와 C의 시선 방향은 60°를 이룬다.
- A에서 측정한 B의 후퇴 속도는 1400 km/s, C의 후퇴 속도는 2800 km/s이다.

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 세 은하는 허블-르메트르 법칙을 만족한다.)

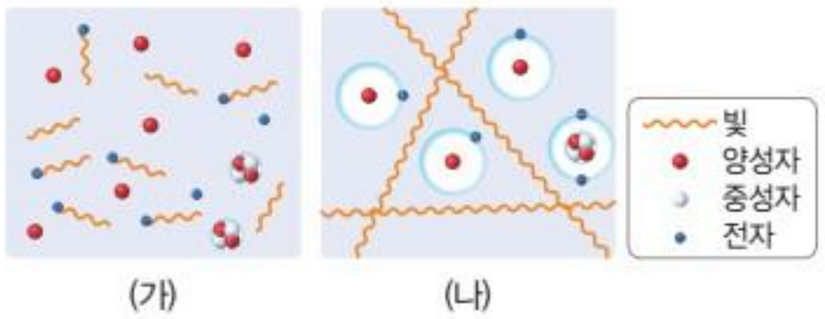
보기

ㄱ. 허블 상수는 70 km/s/Mpc이다.
ㄴ. A에서 C까지의 거리는 40 Mpc이다.
ㄷ. B에서 측정한 후퇴 속도는 A가 C보다 빠르다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

빅뱅 우주론

08 그림 (가)와 (나)는 각각 다른 시기에 빛이 우주 공간을 진행하는 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

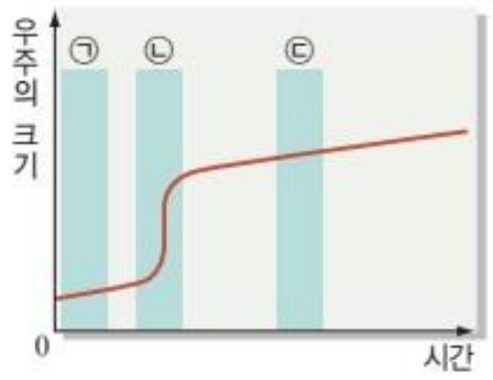
보기

ㄱ. 우주의 크기는 (가)보다 (나) 시기일 때 크다.
ㄴ. 수소와 헬륨의 질량비는 (가)와 (나) 시기에 서로 다르다.
ㄷ. 우주의 온도가 약 3000 K가 되었을 때, (나)와 같은 상태가 되었다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

급팽창 우주론

09 그림은 급팽창 우주론에 따른 우주의 크기 변화를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

보기

ㄱ. ㉠ 시기에 우주의 모든 지점은 상호작용이 가능했다.
ㄴ. ㉡ 시기 동안 우주는 빛보다 빠른 속도로 팽창한 적이 있다.
ㄷ. $\frac{\text{우주의 크기}}{\text{우주의 지평선 크기}}$는 ㉠보다 ㉢ 시기에 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

빅뱅 우주론 + 급팽창 우주론과 가속 팽창 우주

10 그림은 빅뱅 이후 우주에서 일어난 주요 사건 (가)~(다)를 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

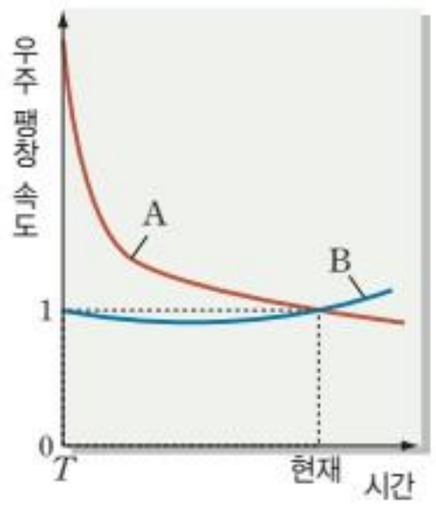
보기

ㄱ. (가) 시기 이후 우주에서는 자기 홀극이 관측되지 않는다.
ㄴ. (나) 시기에 퍼져나간 빛이 현재 우주 배경 복사로 관측된다.
ㄷ. (다) 시기에 우주 배경 복사의 온도는 약 2.7 K이다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

빅뱅 우주론 + 급팽창 우주론과 가속 팽창 우주

11 그림은 빅뱅 우주론에 따라 팽창하는 우주 모형 A와 B의 우주 팽창 속도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 현재 우주 배경 복사의 온도는 A와 B에서 같다. 이에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은?

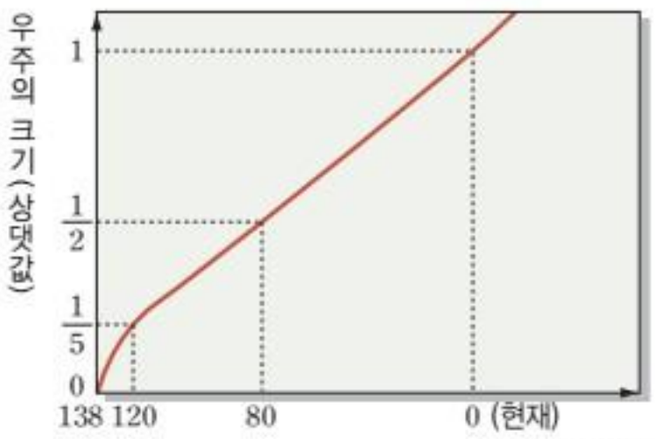


보기

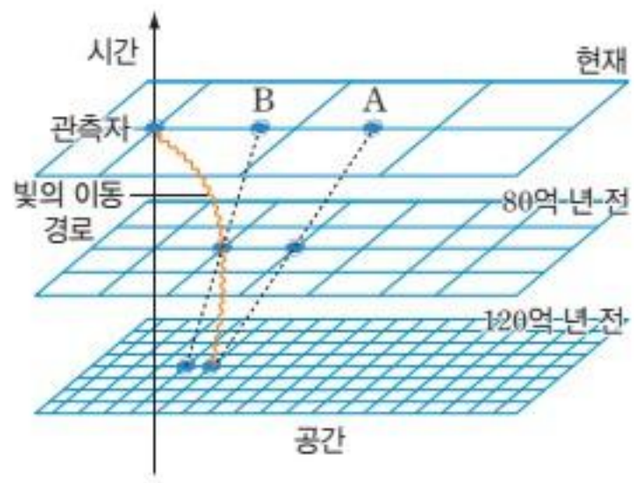
ㄱ. 현재 우주의 크기는 A와 B가 같다.
ㄴ. 현재 우주의 나이는 A가 B보다 많다.
ㄷ. T 시기 이후 현재까지 우주의 평균 팽창 속도는 A가 B보다 느리다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ
④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

1 그림 (가)는 어느 우주 모형에서 시간에 따른 우주의 상대적 크기를, (나)는 120억 년 전 은하 A에서 방출된 빛이 현재의 관측자에게 도달하는 상황을 나타낸 것이다. 이때, 빛의 파장은 우주의 크기에 비례한다고 가정한다.



(가)



(나)

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, A와 B는 관측자의 시선과 동일한 방향에 위치한다.)

보기

ㄱ. A에서 방출된 빛이 B를 지날 때의 파장은 방출 당시의 2배이다.

ㄴ. A에서 방출된 빛이 현재에 도달할 때의 파장은 방출 당시의 5배이다.

ㄷ. 만약 우주가 처음부터 현재와 같은 속도로 등속 팽창했다면, A에서 방출된 빛이 현재에 도달할 때의 파장은 더 짧아진다.

① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

만약 우주가 현재와 같은 속도로 등속 팽창했다면, 과거의 우주 크기는 실제보다 더 작다.

2 표는 우리은하에서 같은 시선 방향에 있는 외부 은하 A~C를 관측한 물리량을 나타낸 것이다. 세 은하는 허블 법칙을 만족한다.

은하	적색 이동 계수	은하 내 Ia형 초신성의 겉보기 밝기 (최댓값, A=1)	은하까지의 거리 (Mpc)
A	(㉠)	1	10
B	3.5×10^{-3}	( )	( )
C	( )	25	( )

이 자료에 대한 설명으로 옳은 것만을 보기에서 있는 대로 고른 것은? (단, 허블 상수는 70 km/s/Mpc이고, 빛의 속도는 3×10^5 km/s이다.)

보기

ㄱ. 우리은하에서 관측한 A의 후퇴 속도는 700 km/s이다.

ㄴ. 은하 내 Ia형 초신성의 겉보기 밝기는 A가 B의 2배보다 작다.

ㄷ. B에서 관측한 C의 적색 이동 계수는 ㉠보다 작다.

① ㄱ ② ㄷ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

Solution Tip

은하의 후퇴 속도는 적색 이동 계수와 빛의 속도로 알 수 있으며, 허블-르메트르 법칙으로도 알 수 있다. 천체의 겉보기 밝기는 거리의 제곱에 반비례한다.

사고력 확장 문제

1 그림은 어느 은하를 다양한 파장 영역으로 관측한 모습을 나타낸 것이다.



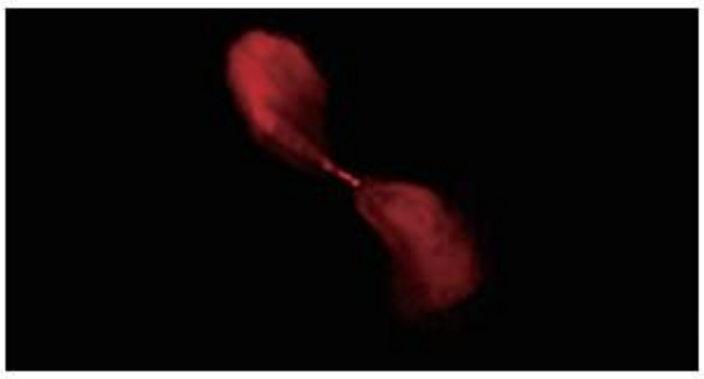
X선 영역



㉠



적외선 영역



㉡

(1) ㉠은 어느 파장 영역으로 관측한 것인지 쓰고, 이때 관측되는 특징을 서술하시오.

(2) ㉡은 어느 파장 영역으로 관측한 것인지 쓰고, 이때 관측되는 특징을 서술하시오.

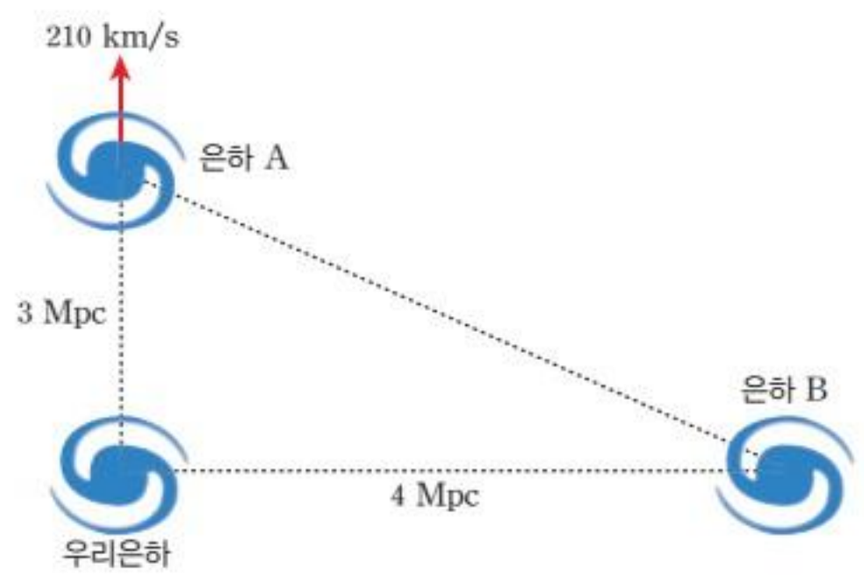
KeyWord

(1) • 타원 모양
(2) • 제트
• 로브

Solution Tip

하나의 은하를 다양한 파장으로 관측하면, 파장에 따라 관측되는 모습이 다르게 나타난다.

2 그림은 우리은하로부터 서로 직각 방향에 있는 두 은하 A와 B의 후퇴 속도를 측정한 것이다. 세 은하는 모두 같은 평면상에 있다.



(1) A와 B 사이의 거리를 구하시오.

(2) A에서 B를 관측했을 때의 후퇴 속도를 풀이 과정과 함께 서술하시오.

KeyWord

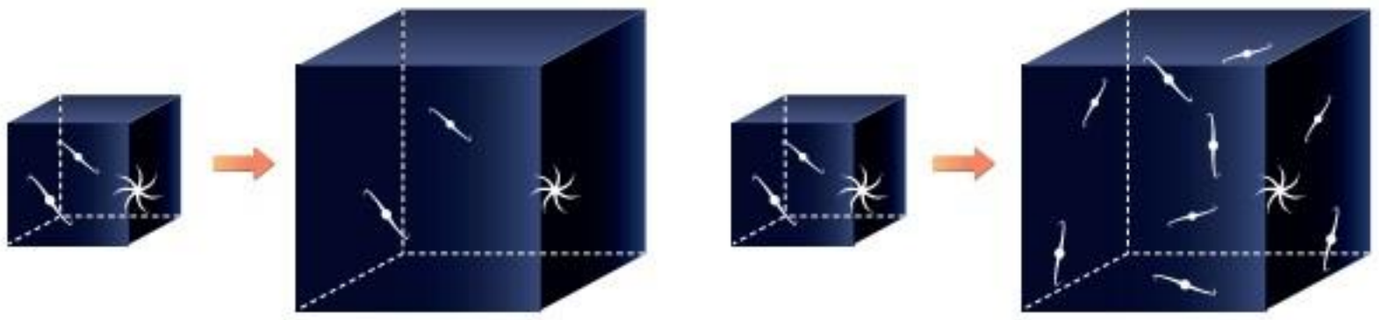
(1) • 피타고라스 정리
(2) • 허블-르메트르 법칙

Solution Tip

어느 은하에서 관측하더라도 허블-르메트르 법칙은 똑같이 적용된다.

정답과 해설 187쪽

3 그림 (가)와 (나)는 서로 다른 두 우주론에서 시간에 따른 우주의 변화 모습을 나타낸 것이다.



(가) (나)

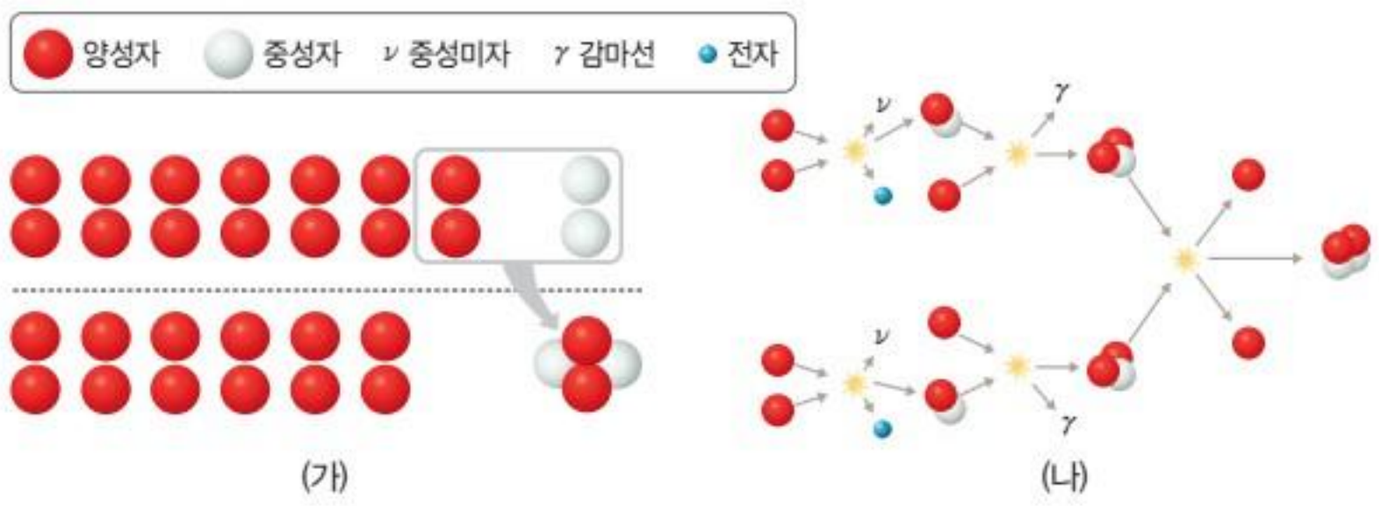
(1) 우주의 진화에 대해 (가)와 (나)의 이론이 설명하는 공통점과 차이점을 서술하시오.

(2) (가)와 (나) 중 현재 받아들여지고 있는 우주론이 어느 것인지 쓰고, 이 이론을 지지하는 관측적 증거에는 무엇이 있는지 서술하시오.

KeyWord
(1) • 정상 우주론
• 빅뱅 우주론
(2) • 빅뱅 우주론

Solution Tip
정상 우주론과 빅뱅 우주론은 우주의 밀도와 온도 변화 등에서 서로 다른 방법으로 우주의 진화를 설명한다.

4 그림 (가)와 (나)는 우주에서 헬륨 원자핵이 생성되는 반응 두 가지를 나타낸 것이다.



(가) (나)

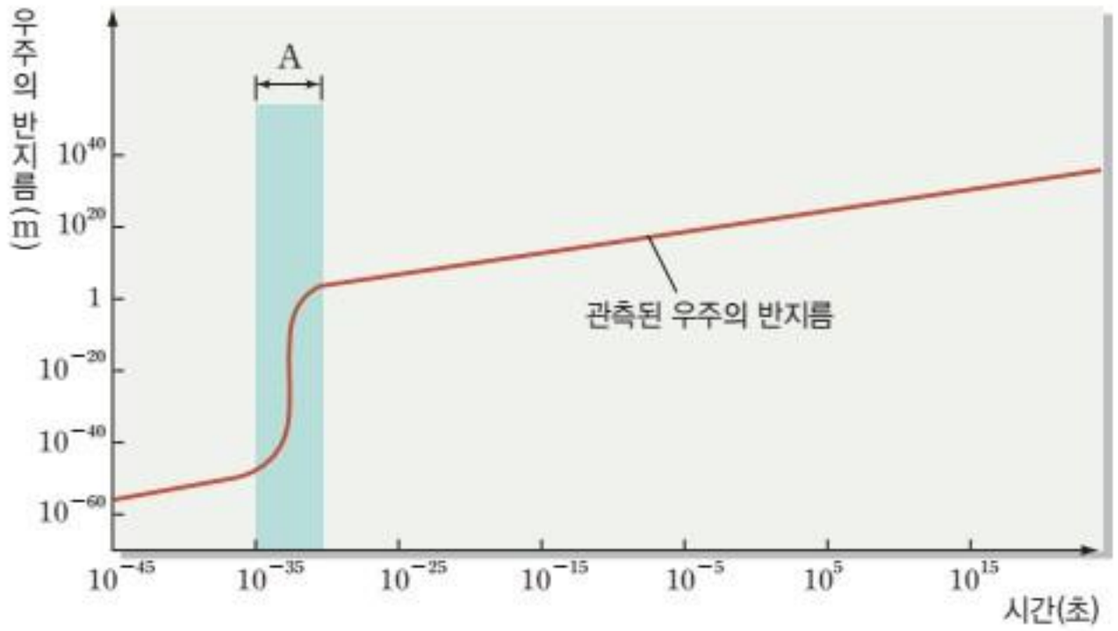
(1) (가)와 (나) 중 먼저 일어난 핵융합 반응이 무엇인지 쓰고, 다른 하나의 핵융합 반응과 어떤 차이가 있는지 서술하시오.

(2) (가) 반응이 일어난 뒤 수소와 헬륨의 질량비는 어떻게 되는지 쓰고, 그 과정을 서술하시오.

KeyWord
(1) • 빅뱅 핵합성
• 수소 핵융합 반응
(2) • 12 : 1
• 3 : 1

Solution Tip
빅뱅 초기 핵융합은 매우 짧은 시간 동안만 일어났으며, 별 내부의 핵융합은 오랜 시간 동안 지속된다.

5 그림은 어느 우주론에 따른 우주의 크기 변화를 나타낸 것이다.



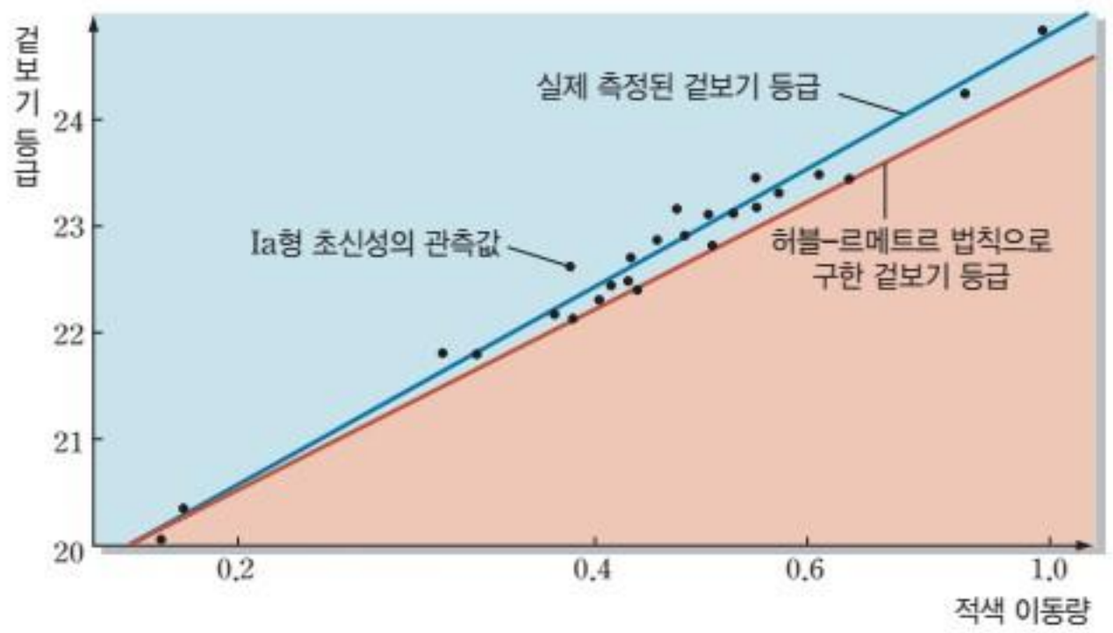
(1) A 시기에 일어난 일이 무엇인지 쓰고, 그 이전과 이후에 우주의 크기와 우주의 지평선 크기를 비교하여 서술하시오.

(2) 이 우주론이 우주 배경 복사의 등방성을 어떻게 설명할 수 있는지 서술하시오.

KeyWord
(1) • 급팽창
(2) • 우주의 크기와 우주의 지평선 크기 비교

Solution Tip
우주의 크기가 작으면 모든 영역에서 서로 충분히 영향을 주고받을 수 있다.

6 그림은 외부 은하 안에 있는 Ia형 초신성을 관측하여 적색 이동량과 겉보기 등급의 관계를 나타낸 것이다.



(1) Ia형 초신성은 멀리 있는 천체까지의 거리를 구하는 데 이용된다. 그 까닭을 Ia형 초신성의 특징과 관련지어 서술하시오.

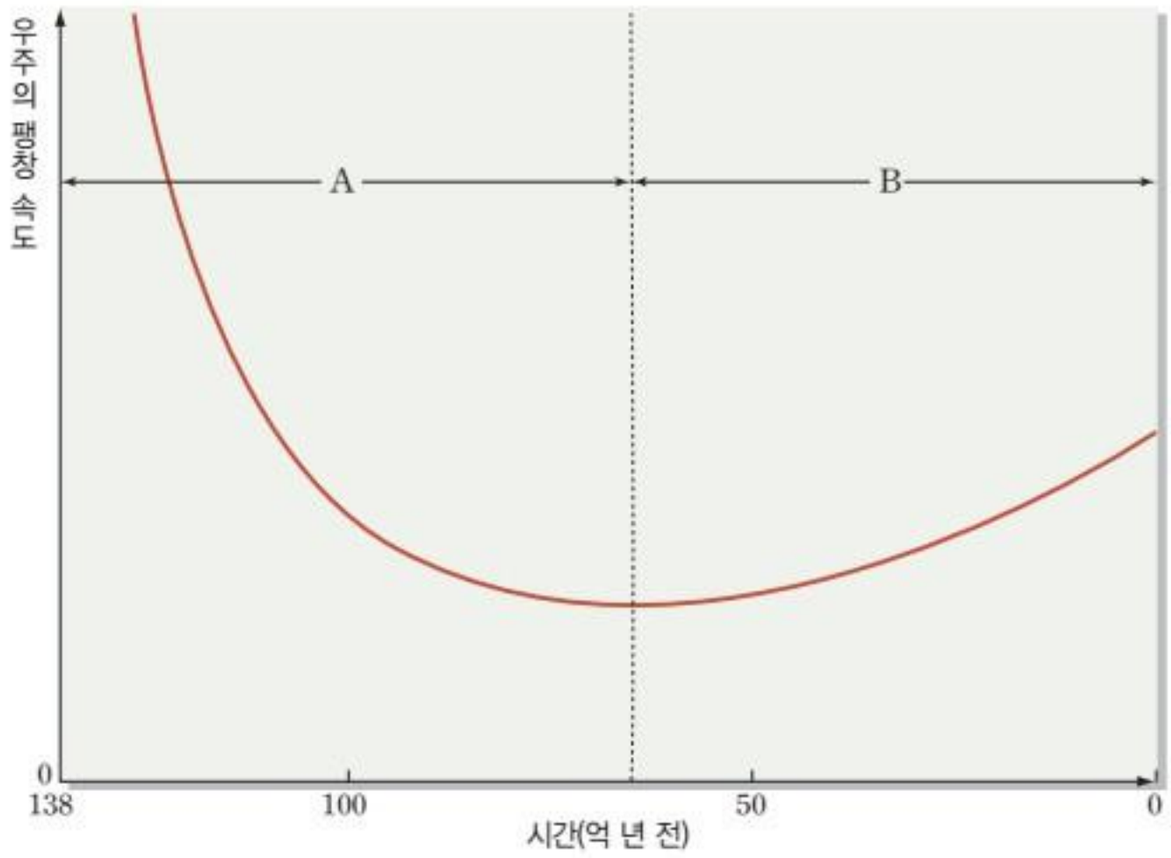
(2) 우주가 일정한 비율로 팽창한다고 가정했을 때의 Ia형 초신성의 밝기와 실제 관측된 Ia형 초신성의 밝기를 비교하고, 그것이 무엇을 의미하는지 서술하시오.

KeyWord
(1) • 광도
• 절대 등급
• 겉보기 등급
(2) • 팽창 속도

Solution Tip
천체는 거리에 따라 밝기가 달라진다. 멀리 있으면 더 어둡게 보이고, 가까이 있으면 더 밝게 보인다.

정답과 해설 187쪽

7 그림은 빅뱅 이후 우주의 팽창 속도 변화를 나타낸 것이다.



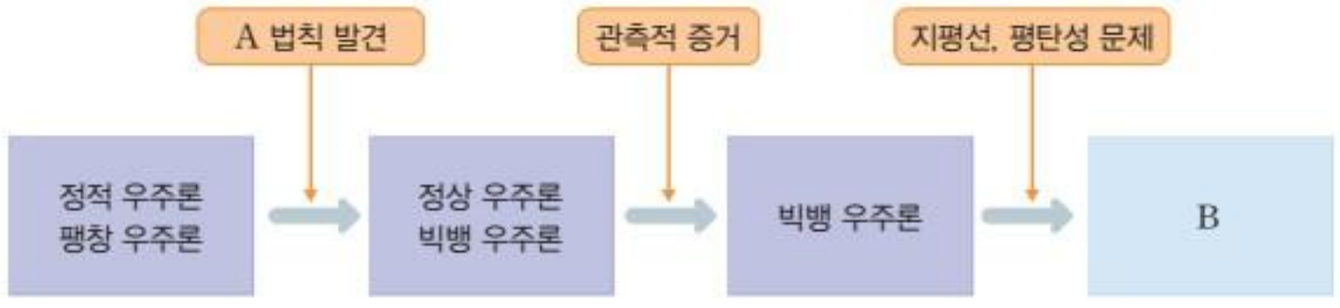
(1) A와 B 시기에 우주의 크기는 어떻게 변해 왔는지 우주의 팽창 속도 변화와 관련지어 서술하시오.

(2) 우주의 팽창 속도가 현재와 같은 변화 경향으로 계속 유지된다면, 우주의 크기는 어떻게 변할지 우주의 팽창 속도와 관련지어 서술하시오.

KeyWord
(1) • 그래프의 방향
(2) • 우주의 팽창 속도

Solution Tip
우주의 팽창 속도가 0보다 크면 우주의 크기는 계속 증가한다.

8 그림은 우주론이 수정되어 가는 과정을 나타낸 것이다.



(1) A에 해당하는 법칙을 쓰고, 그것이 무엇을 의미하는지 서술하시오.

(2) B에 해당하는 우주론을 쓰고, 이전 빅뱅 우주론과의 차이점을 서술하시오.

KeyWord
(1) • 거리
• 후퇴 속도
(2) • 우주의 크기

Solution Tip
빅뱅 우주론이 해결하지 못한 문제들은 우주의 크기가 짧은 시간에 매우 급격하게 커졌다는 이론으로 해결할 수 있었다.

논술술술 대비 문제

Ⅲ. 태양계 천체와 별과 우주의 진화

예시 문제

다음은 천문학이 발전해 온 과정에 대한 설명이다.

[제시문 1] 16세기까지 유럽의 주된 우주관은 지구 중심 모형인 프톨레마이오스의 천동설이었다. 하지만 이 우주관은 행성의 역행과 같은 천체 운동을 설명하기 위해 주전원과 같은 지나치게 복잡한 가정이 필요했다. 코페르니쿠스는 이러한 복잡성을 단순화하기 위해 태양 중심의 새로운 우주 체계를 제안하였다. 그는 『천구의 회전에 관하여』에서 지구를 포함한 행성들이 태양을 중심으로 공전한다고 설명하였고, 이를 통해 여러 천체 현상을 더 간결하게 이해할 수 있음을 보여주었다. 비록 그의 이론은 당시 쉽게 받아들여지지 않았지만, 이후 천문학 혁명의 중요한 단초가 되었다.

[제시문 2] 티코 브라헤는 망원경이 등장하기 전 가장 정밀한 관측 자료를 남긴 천문학자였다. 그의 방대한 기록은 제자인 케플러에게 전해졌고, 케플러는 이를 토대로 행성 운동의 세 가지 법칙을 발견하였다. 그는 행성 궤도가 원이 아니라 타원임을 밝혔고, 태양과 행성을 잇는 선이 같은 시간 동안 같은 넓이를 지난다는 면적 속도 일정의 법칙을 제시하였다. 또한 행성의 공전 주기와 궤도 반지름 사이의 일정한 수학적 관계를 찾아내어, 행성 운동을 단순하면서도 정밀하게 설명할 수 있게 하였다.

[제시문 3] 갈릴레이는 망원경을 이용하여 목성의 위성과 금성의 위상 변화를 관측하며 태양 중심설을 뒷받침하는 증거를 제시했다. 그러나 그는 행성 운동의 원리를 설명하지는 못했다. 이 문제를 해결한 인물은 뉴턴이었다. 그는 『프린키피아』에서 운동 법칙과 만유인력 법칙을 정립하여, 케플러의 법칙들이 중력의 결과임을 증명하였다. 이로써 행성들이 태양 중심의 체계에서 타원 궤도를 그리는 까닭이 물리학적으로 설명되었고, 천문학 혁명은 완성되었다.

(1) [제시문 1]에서 설명한 프톨레마이오스의 지구 중심 모형과 코페르니쿠스의 태양 중심 모형은 각각 행성의 역행 운동과 수성, 금성의 최대이각 문제를 어떻게 설명하는지 비교하여 서술하시오.

(2) [제시문 2]에서 설명한 케플러 법칙을 활용하여, 공전 궤도의 이심률이 큰 핼리혜성은 공전 주기가 약 76년임에도 꼬리가 실제로 관측되는 기간이 몇 달에 불과한 까닭을 설명하시오.

(3) 코페르니쿠스에서 시작하여 케플러와 뉴턴에 의해 완성된 천문학 혁명이 당시 과학적 탐구 방식에 어떤 변화를 가져왔는지 자연에 대한 이해 방식, 관측, 수학적 법칙, 물리적 설명과 관련지어 서술하시오.

출제 의도

코페르니쿠스, 티코 브라헤, 케플러, 갈릴레이, 뉴턴을 거쳐 이루어진 천문학 혁명의 배경과 과학사적 전개 과정에서 나타나는 행성의 운동 원리를 이해하고 있는지 평가한다.

문제 해결을 위한 배경 지식

- **주전원**: 과거 천동설에서는 행성의 역행 현상을 설명하기 위해 주전원을 도입하였다. 행성은 주전원을 따라 돌며, 주전원의 중심은 지구를 중심으로 공전한다.
- **궤도 이심률**: 타원 궤도의 납작한 정도를 나타낸 값을 궤도 이심률이라고 한다. 궤도 이심률이 1에 가까울수록 궤도가 납작하여 긴 반지름과 작은 반지름의 차가 커진다.
- **혜성의 꼬리**: 혜성의 꼬리는 태양에 가까울수록 태양풍에 의해 길어진다.

문제 해결 과정

(1) 지구 중심 모형은 역행 운동을 설명하기 위해 주전원 같은 복잡한 장치가 필요하고, 수성과 금성이 태양 근처에서만 보이도록 하는 특별한 가정도 필요하다. 반면 태양 중심 모형은 행성들의 공전 속도 차이로 안쪽의 행성이 바깥쪽의 행성을 추월할 때 생기는 상대 운동으로 역행을 자연스럽게 설명하며, 내행성인 수성과 금성은 지구보다 안쪽 궤도에서 태양을 공전하므로 항상 태양 근처에서만 보인다.

(2) 케플러의 법칙은 행성뿐 아니라 태양을 공전하는 모든 천체에 적용된다. 면적 속도 일정 법칙에 따르면, 태양에 가까울수록 빠르게, 멀어질수록 느리게 움직인다. 핼리혜성은 이심률이 큰 타원 궤도를 가지므로 근일점 부근에서 짧은 시간 동안 매우 빠르게 지나가며, 이때 태양 복사와 태양풍의 영향으로 꼬리가 뚜렷하게 나타난다.

(3) 코페르니쿠스는 태양 중심 모형을 제시하며 새로운 우주관을 제시하였고, 브라헤와 갈릴레이는 정밀한 관측으로 경험적 근거를 마련하였다. 케플러는 이 자료를 수학적으로 분석해 행성 운동 법칙을 발견하였다. 이후 뉴턴은 운동 법칙과 만유인력 법칙으로 이를 물리적으로 해석하였다.

해설

(1) 프톨레마이오스는 주전원을 도입하여 행성의 역행과 최대이각을 설명했지만, 코페르니쿠스는 태양 중심 모형에서 행성의 공전 속도 차이와 궤도 위치로 이를 더 단순하게 설명하였다.

(2) 케플러는 브라헤의 관측 자료를 분석하여 행성의 궤도가 타원임을 밝히고, 태양과 행성을 잇는 선이 같은 시간 동안 같은 넓이를 지난다는 면적 속도 일정 법칙을 제시했다. 이를 통해 핼리혜성의 꼬리가 근일점 부근에서만 짧게 관측되는 까닭을 설명할 수 있다.

(3) 코페르니쿠스에서 시작하여 케플러와 뉴턴까지 이어지는 천문학 혁명 과정에서 과학은 단순한 모형 제안에서 관측 → 수학적 법칙 → 물리적 설명으로 이어지는 근대 과학의 탐구 방식으로 발전하였다.

예시 답안

(1) 프톨레마이오스의 천동설에서는 행성의 궤도 위에 작은 원인 주전원을 도입하여 행성의 역행을 설명하였다. 또한 수성과 금성의 주전원 중심이 지구와 태양을 연결하는 직선 위에 놓여 있다고 가정하여, 이 두 행성의 최대이각 현상을 설명하였다. 반면, 코페르니쿠스의 태양 중심 모형에서는 행성들의 공전 속도 차이로 역행 운동이 나타난다고 설명하였고, 수성과 금성이 지구 궤도보다 안쪽에서 태양을 공전하기 때문에 최대이각 현상이 발생한다고 설명하였다.

(2) 핼리혜성은 공전 궤도의 이심률이 매우 크기 때문에 긴 타원 궤도로 태양을 공전한다. 케플러의 면적 속도 일정 법칙에 따르면, 혜성은 태양과 가까운 근일점에서는 빠르게 움직이고, 먼 원일점에서는 느리게 움직인다. 따라서 핼리혜성이 태양 근처를 지나는 시간은 매우 짧으며, 이때만 꼬리가 형성되어 관측된다. 그 결과 76년의 공전 주기 중 실제로 꼬리를 볼 수 있는 시기는 몇 달밖에 되지 않는다.

(3) 코페르니쿠스는 태양 중심 모형을 제시하며 자연을 이해하는 방식에 변화를 주었고, 이후 브라헤와 갈릴레이의 관측은 과학 탐구에서 경험적 자료의 중요성을 보여주었다. 케플러는 이러한 관측 결과를 수학적으로 분석하여 행성 운동 법칙을 발견하였고, 이를 통해 자연 현상을 수학적 법칙으로 설명하는 방식을 확립하였다. 마지막으로 뉴턴은 운동 법칙과 만유인력 법칙을 제시하여 케플러의 법칙을 물리적으로 증명하였다. 이 과정으로 과학은 단순한 모형 제안에서 출발하여 관측 → 수학적 법칙 → 물리적 설명으로 이어지는 근대 과학의 탐구 방식으로 발전하였다.

실전 문제

1 다음은 별의 진화에 대한 설명이다.

[제시문 1] 우주 공간의 가스와 먼지가 중력에 의해 수축하면 원시별이 형성된다. 원시별의 중심부 온도가 약 1000만 K에 도달하면, 4개의 수소 원자핵이 융합하여 1개의 헬륨 원자핵을 만드는 핵융합 반응이 시작된다. 이때 방출되는 막대한 에너지로 별의 내부 압력과 중력이 균형을 이루며, 별은 일생의 대부분을 보내는 주계열 단계에 들어선다. 태양의 경우 전체 질량 중 약 10 %가 핵융합 반응에 사용되며, 주계열 단계에서 안정적으로 빛을 방출한다. 이후 태양 중심부의 수소가 모두 고갈되면 적색거성으로 진화한다.

[제시문 2] 별의 운명은 질량에 크게 좌우된다. 태양보다 질량이 매우 작은 별은 내부 온도가 상대적으로 높지 않아 수소 핵융합 반응이 느리게 진행되고, 오랜 시간 적색왜성으로 머문다. 이 별은 결국 수소가 고갈되면 팽창하지 못한 채 서서히 식으며 백색왜성으로 진화한다. 반면 태양보다 질량이 훨씬 큰 별은 내부 온도가 상대적으로 높아 핵융합 반응이 매우 빠르며, 중심에서 헬륨뿐 아니라 산소, 규소 등 점점 더 무거운 원소의 핵융합 반응이 일어나다가 철 중심핵에 이른다. 철은 핵융합으로 에너지를 방출할 수 없으므로, 결국 중심부가 붕괴하여 초신성 폭발이 발생한다. 그 결과 중심은 질량에 따라 중성자별이나 블랙홀이 되고, 폭발한 별의 외곽은 초신성 잔해로 흩어진다.

[제시문 3] 별의 진화에서 최종 단계의 천체들은 독특한 성질을 가진다. 백색왜성은 전자의 축퇴압으로 유지되며, 태양과 비슷한 질량이지만 크기는 지구 정도로 작다. 중성자별은 반지름이 약 10 km인데 태양보다 질량이 크고, 중성자의 축퇴압으로 유지된다. 블랙홀은 중력 붕괴가 극단적으로 진행되어 빛조차 탈출하지 못하며, 사건의 지평선이라는 경계를 갖는다.

(1) 다음 자료와 [제시문 1]을 활용하여 태양이 주계열 단계에서 머물 수 있는 전체 시간을 계산하시오.

- 태양의 광도는 약 4×10^{26} J/s이고, 태양의 질량은 약 2×10^{30} kg이다.
- 수소 핵융합 반응에서는 약 0.7 %의 질량 결손이 발생하고, 결손된 질량은 질량–에너지 등가 원리에 따라 에너지로 변환된다. 이때, 빛의 속도는 약 3×10^{8} m/s이다.

답안

출제 의도

별의 진화 과정에서 핵융합 반응이 별의 수명에 어떤 영향을 미치는지를 직접 계산을 통해 설명할 수 있는지를 묻는다. 또한 주계열성의 질량 광도 관계를 활용하여 별의 질량이 클수록 수명이 짧아지는 까닭을 설명할 수 있는지 평가한다. 더 나아가 태양이 백색왜성으로 진화할 때의 평균 밀도를 추정하여 백색왜성의 특성을 이해할 수 있는지 평가한다.

문제 해결을 위한 배경 지식

- **질량–에너지 등가 원리**: 질량–에너지 등가 원리는 질량과 에너지가 서로 전환될 수 있다는 의미이다. 핵융합 반응에서 만들어지는 에너지 E와 감소한 질량 Δm의 관계는 다음과 같다.

$$E=\Delta mc^2$$

여기서 c는 빛의 속도이다.

- **주계열성의 질량 광도 관계**: 주계열성의 질량이 클수록 중심부 온도가 높아 핵융합 반응의 효율이 높아져 광도가 크다.

통합과학 연계 프로파일링

1. 가스와 먼지가 중력으로 뭉쳐져 원시별이 되고, 중심에서 수소 핵융합 반응이 시작되면 별이 탄생한다.
2. 별의 질량이 클수록 중심부 온도가 높아져 더 무거운 원소의 핵융합 반응이 일어난다.

정답과 해설 190쪽

(2) **다음 자료와 [제시문 2]를 활용하여 별의 질량이 작을수록 수명이 길고, 질량이 클수록 수명이 짧은 까닭을 서술하시오.**

- 별의 광도 L과 질량 M은 $L \propto M^{3\sim4}$의 관계가 있다.
- 별의 수명 $t \approx \frac{M}{L}$이다. 이때, M은 핵융합 반응에 사용 가능한 수소의 양이며, L은 별의 광도이다.

답안

(3) **다음 자료와 [제시문 3]을 활용하여 태양 질량 정도의 별이 최종적으로 진화한 백색왜성의 평균 밀도를 추정하시오. 그리고 그 값을 물과 철의 밀도와 비교하여 백색왜성의 특성을 서술하시오. (단, 별은 완전한 구라고 가정한다.)**

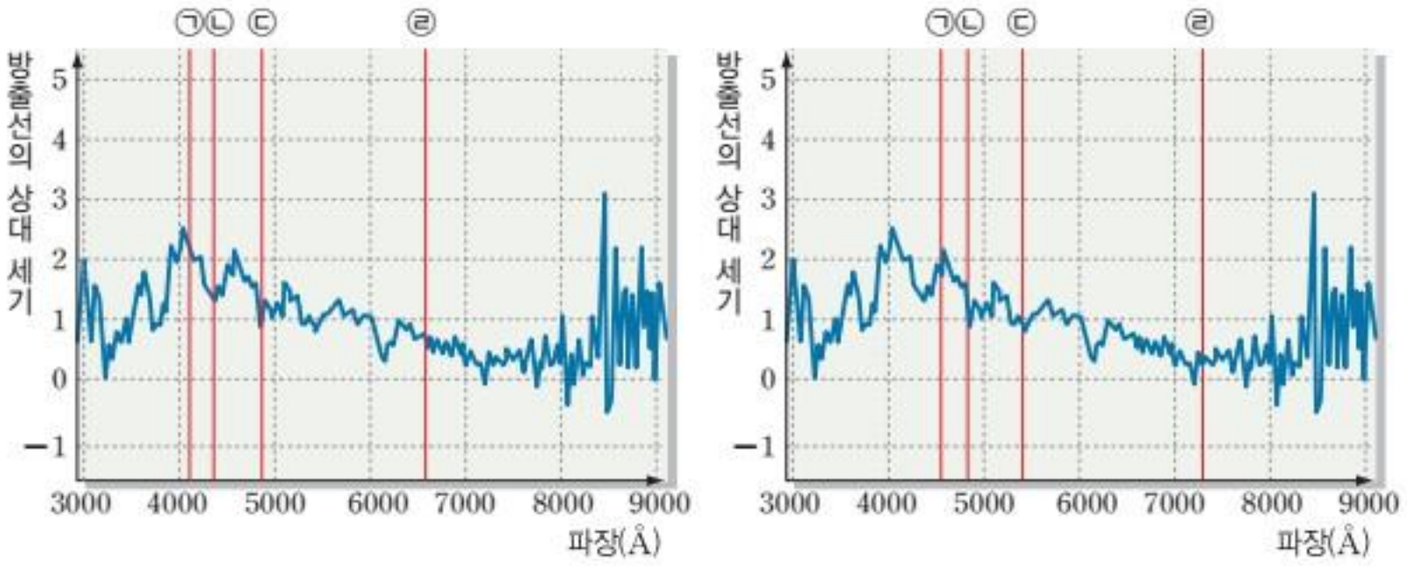
- 별의 평균 밀도 $\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3}$이며, $\pi \fallingdotseq 3$이다.
- 태양의 질량 $M_{\odot}$은 약 2×10^{30} kg이며, 백색왜성이 됐을 때 반지름 R은 약 7×10^{6} m이다.
- 물의 밀도는 약 10^3 kg/m^{3}이며, 철의 밀도는 약 7.9×10^3 kg/m^{3}이다.

답안

논구술 대비 문제

2 다음은 우주 팽창에 따른 스펙트럼의 적색 이동에 대한 설명이다.

태양에서 나온 빛은 약 8분 30초 만에 지구에 도달한다. 그러나 수억 광년 떨어진 은하에서 나온 빛은 수억 년 동안 우주 공간을 가로질러야 비로소 우리가 관측할 수 있다. 이렇게 빛이 오랜 시간을 이동하면, 빛의 성질에도 변화가 나타난다. 그 변화의 원인은 바로 우주의 팽창이다. 우주는 약 138억 년 전 빅뱅으로 탄생한 이후 지금까지 계속 팽창하고 있다. 우주가 팽창한다는 것은 단순히 별들이 서로 멀어지는 것이 아니라, 공간 자체가 늘어나고 있다는 것을 의미한다. 이 과정에서 빛의 파동도 함께 늘어나 파장이 길어진다. 파장이 길어지면, 원래 우리가 볼 수 있는 가시광선 영역에서는 점점 붉은색 방향, 더 나아가 적외선 영역으로 이동한다. 이를 과학자들은 적색 이동 또는 적색 편이(redshift)라고 부른다. 멀리 있는 은하에서 나온 빛일수록 우리에게 도달하는 빛에서 더 큰 적색 이동이 나타난다. 다시 말해, 은하가 멀리 있을수록 더 빨리 멀어지고 있다는 사실을 보여준다. 이 현상은 수소와 같은 원소의 스펙트럼 분석으로 확인할 수 있다. 정지 상태에서 수소 원자가 내는 방출 스펙트럼은 일정한 위치에 나타나지만, 먼 은하나 초신성에서 오는 스펙트럼은 같은 선이 붉은색 쪽으로 이동해 있다. 과학자들은 이 차이를 이용하여 은하의 후퇴 속도와 거리를 계산한다. 예를 들어, 초신성 iPTF15th의 스펙트럼에서 정지 상태의 수소 방출선 ㉠~㉣의 위치는 실제 관측 결과에서는 붉은색 쪽으로 이동해 있음을 알 수 있다.



▲ **초신성 iPTF15th의 스펙트럼에서 정지 상태의 수소 방출선 위치(왼쪽)와 실제 관측된 수소 방출선 위치(오른쪽)**

이러한 스펙트럼에서 나타나는 적색 이동의 발견은 미국의 천문학자 에드윈 허블이 1929년에 처음 제시한 허블–르메트르 법칙으로 이어졌다. 허블은 은하의 적색 이동을 측정한 결과, 지구에서 멀리 떨어진 은하일수록 더 빠른 속도로 멀어지고 있음을 확인했다. 이는 우주가 정지해 있는 것이 아니라 끊임없이 팽창하고 있다는 결정적 증거가 되었다. 따라서 우리가 밤하늘에서 바라보는 별빛은 단순히 과거의 모습을 보여줄 뿐만 아니라, 우주의 역사와 진화를 알려주는 단서가 된다. 최신 망원경 중 하나인 제임스 웹 우주 망원경(JWST)의 임무는 적색 이동 현상을 활용하여 가장 먼 곳에 있는, 즉 우주에서 가장 오래된 별과 은하에서 나와 이동하면서 파장이 길어진 빛을 근적외선과 중적외선 영역에서 관측하는 것이다. 이를 통해 천문학자들은 우주의 초기 역사를 연구할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

출제 의도

이 문제는 적색 이동의 개념을 바탕으로 스펙트럼선의 이동을 계산하여 은하의 후퇴 속도를 설명할 수 있는지 묻는 문제이다. 또한 도플러 효과와 허블–르메트르 법칙을 적용하여 적색 이동이 은하의 속도와 거리 계산에 주는 영향을 설명할 수 있는지 평가한다.

문제 해결을 위한 배경 지식

- **적색 이동 계수(z)**: 적색 이동의 정도를 나타내는 적색 이동 계수는 다음과 같다.

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

- **허블–르메트르 법칙**: 은하의 후퇴 속도 v는 은하까지의 거리 r에 비례한다.

$$v = H \times r$$

정답과 해설 190쪽

(1) 적색 이동과 관련된 내용과 다음 초신성 **iPTF15th**의 수소 방출선 정보를 이용하여 각 방출선의 적색 이동 계수 z를 구하고, 그 크기를 비교하시오.

선 / 파장	㉠	㉡	㉢	㉣
정지 파장(Å)	4102	4340	4861	6563
관측 파장(Å)	4511.91	4773.69	5347.64	7219.33

답안

(2) 다음 적색 이동과 관련된 공식을 이용하여 초신성 **iPTF15th**가 지구로부터 멀어지는 속도 v를 구하시오.

- 정지 파장 λ_0, 관측 파장 λ, 후퇴 속도 v, 빛의 속도 c일 때 $\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}=\frac{v}{c}$이다.
- 빛의 속도 $c=3\times10^8$ m/s이다.

답안

(3) 허블-르메트르 법칙을 이용하여 지구로부터 초신성 **iPTF15th**까지의 거리를 구하시오. (단, 이 초신성은 허블-르메트르 법칙을 만족하고, 허블 상수는 **70 km/s/Mpc**이다.)

답안