Ⅰ. 역학적 상호 작용 > 2. 행성의 운동과 상대성　　　　(　　　)년 (　　)월 (　　)일

[1] 등속 원운동　　　　3학년 (　)반 (　　)번 이름 (　　　　)

▶ **Quiz Time!**　　　　**(점수:　　/ 5)**

[1~2] 중력 가속도가 g인 지표면에서 처음 속력 v_0, 지면으로부터의 발사 각도 θ로 물체가 비스듬히 위로 던져졌다. 시간 t가 지난 후, 물체의 속도의 수평 성분 $v_x(t)$와 수직 성분 $v_y(t)$는 각각 얼마인가?

1. 수평 성분: $v_x(t) =$(　　　　　　)

2. 수직 성분: $v_y(t) =$(　　　　　　)

3. 물체가 최고점에 도달하는 데 걸리는 시간 t_H는 얼마인가? (　　　　　　)

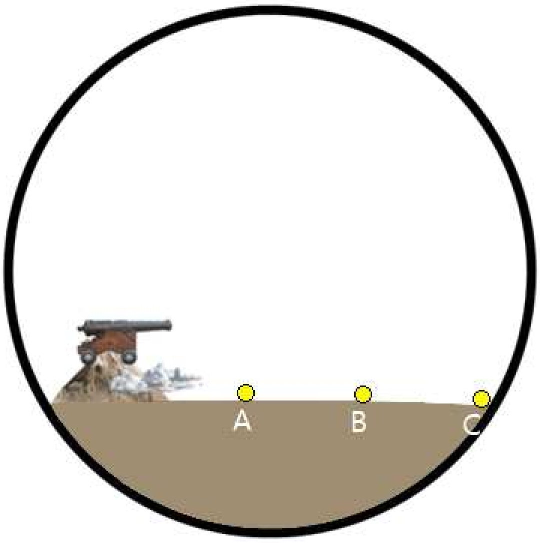
4. 지표면으로부터 최고점까지의 높이는 얼마인가? $H=$(　　　　　　)

5. 물체가 지표면에 처음 닿을 때까지 물체가 수평으로 이동한 거리(수평 도달 거리)는? $R=$(　　　　　　)

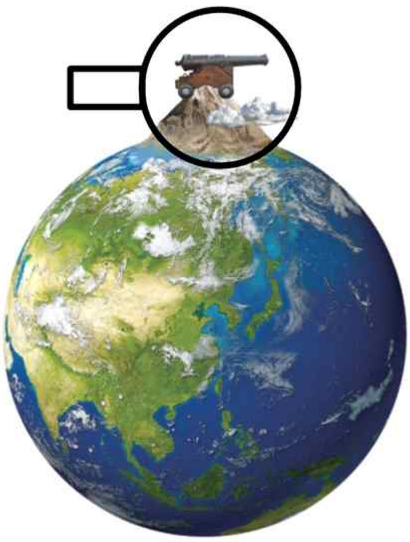
▶ **뉴턴 대포**

1. 뉴턴 대포: 지구의 지표면에서 수평으로 빠르게 발사한 대포의 운동에 대한 사고 실험에서의 개념.
   ① (가)에서 대포알을 각기 다른 속력으로 발사하여 A, B, C에 떨어졌을 때, 각각의 궤도를 그려보자.
   ② (나)에 A, B, C에 해당하는 운동 궤도를 간단히 그린 후, 이처럼 발사 속력이 점점 커짐에 따라 궤도가 어떻게 달라질지 나타내 보자.

(가) 지표면에서 본 뉴턴 대포의 운동



(나) 지구 밖에서 본 뉴턴 대포의 운동



2. 지표면에서 수평으로 발사한 대포는 중력을 받아서 (포물선) 궤도로 운동하여 지면에 떨어진다. 그런데 지구는 평평하지 않고 **둥근 모양이기 때문에, 충분히 빠르게 발사하면 영원히 지면에 떨어지지 않고 지구 주위를 공전**할 것이다(공기 저항이 없다면). 이렇게 발사하는 것을 '**뉴턴 대포**'라고 한다.
   ☞ 지구 주위를 공전하는 것에는 무엇이 있을까? ____________________

3. 이들은 지구 주위를 일정한 속력으로 공전하는 물체들이며, **중력 가속도의 방향은 지구의** (중심) 방향이다. 이를 일반화하면, **모든 등속 원운동하는 물체의 가속도의 방향은 원의** (중심) 방향이다.

▶ 등속 원운동에 필요한 속력 계산하기

1. 중력 가속도가 g일 때, 지표면에서 속력 v로 수평으로 발사하여 포물선 운동을 하는 물체가 시간 t만큼 지났을 때의 수평 방향의 이동 거리는 (vt), 수직 방향의 이동 거리는 ($\frac{1}{2}gt^2$)이다.

2. 이를 이용하여 반지름이 R인 부채꼴 안에 들어있는 삼각형에 대해 피타고라스의 정리를 적용하면,

   (vt)^2 + ($R-\frac{1}{2}gt^2$)^2 = R^2.

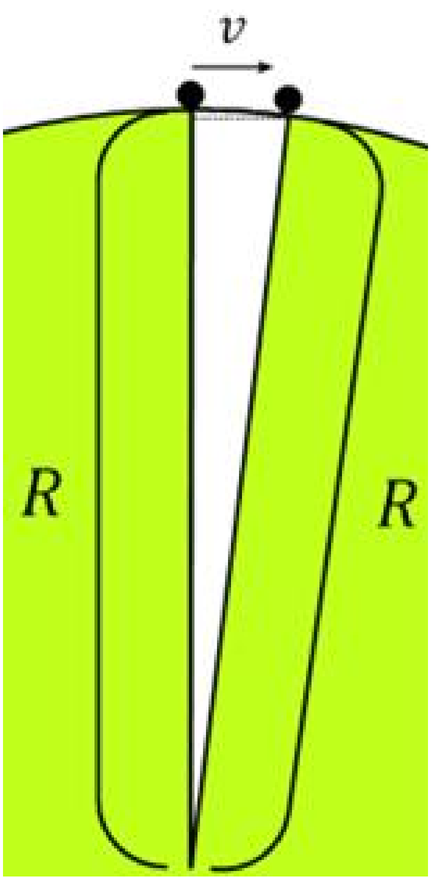
3. 위 식을 정리하여 인수분해하면, $v^2 - gR + \frac{1}{4}g^2t^2 = 0$이다.

   이때 시간이 $t \to 0$인 극한을 취하면, $v \to$($\sqrt{gR}$).

4. 지구 주위를 등속 원운동하는 동안에 시간에 따라 중력 가속도의 방향이 바뀌므로, 지표면을 공전하는 등속 원운동을 포물선 운동으로 근사시키려면 시간이 $t \to 0$인 극한을 취하여 구한 속력 $v=$($\sqrt{gR}$)으로 발사해야 한다. 이 속력을 **제1 우주 속도**(1st cosmic velocity)라고 한다.

   ☞ 지표면에서의 중력 가속도가 $g \fallingdotseq 10$ m/s^2, 지구의 반지름이 $R \fallingdotseq 6.4\times10^6$ m일 때, 물체가 지구 표면 근처에서 공전하는 데 필요한 속력(제1 우주 속도) v_1을 계산하면

   $v_1 \fallingdotseq$ (8×10^3) m/s = (8) km/s.

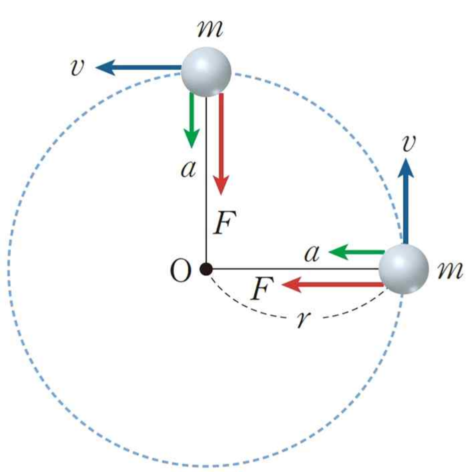


5. v의 속력으로 반지름이 R인 지구 주위를 **등속 원운동하는 물체의 가속도는 지구의 (중심) 방향으로** g와 같으며, $v^2 = gR$의 관계가 성립하므로 중력 가속도 $g = \frac{v^2}{R}$과 같다. 이 결과를 **모든 등속 원운동에 대하여 일반화**할 수 있다.

▶ 구심 가속도와 구심력

1. **구심 가속도**: 등속 원운동하는 물체의 가속도. 방향은 항상 **원의 (중심) 방향**이며, 크기는 $a = \frac{v^2}{R}$.

2. **구심력**: 물체가 등속 원운동하기 위해 필요한 힘.
   뉴턴의 운동 제2법칙에 따르면 질량 m인 물체가 가속도 a로 운동하려면, 가속도와 같은 방향으로 알짜힘이 작용해야 하며 그 크기는 (ma)이다. 따라서 질량이 m인 물체가 v의 속력으로 반지름 R인 원 궤도를 등속 원운동하기 위해 필요한 구심력 F는 $F=\left(m\frac{v^2}{R} \right)$.



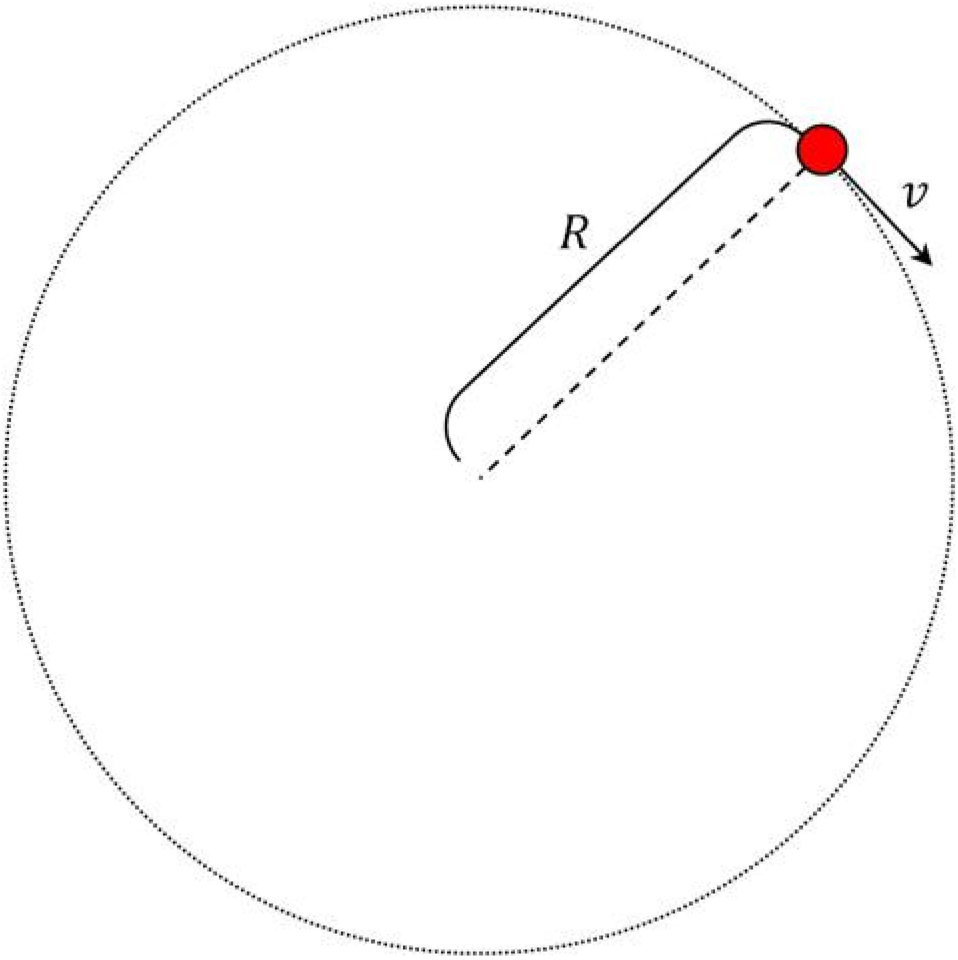
3. 일상생활의 등속 원운동 사례에서 구심력으로 작용하는 힘은?

___

___

▶ 등속 원운동의 표현

1. 회전 운동을 좌표 평면에 나타내고 수평 성분과 수직 성분으로 나누어서 분석하는 것은 수학적으로 복잡하다. 회전 운동의 중심을 원점으로 잡고 각도를 이용하여 나타내면 쉽게 운동을 표현할 수 있다.



2. 원운동의 요소
   ① (주기): 같은 운동을 한 번 반복하는 데 걸리는 시간(한 바퀴 도는 데 걸리는 시간).
   ② (회전각): 원운동하는 물체가 어느 기준 위치로부터 회전한 정도를 각도로 나타낸 물리량.
   ③ (각속도): 시간 당 회전각의 변화량. 물체가 얼마나 회전을 빠르게 하는지 나타낸 물리량.

3. 반지름이 R인 원 위에서 v의 속력으로 등속 원운동하는 물체의 각속도를 ω라 하면 $v=$($R\omega$)이므로, 구심 가속도의 크기는 $a=\frac{v^2}{R}=R\omega^2$, 구심력의 크기는 $F=m\frac{v^2}{R}=mR\omega^2$과 같다.

4. 반지름이 R인 원의 둘레는 $2\pi R$이므로, 등속 원운동하는 물체의 속력 v와 주기 T와의 관계는

$$T=\frac{(\quad 2\pi R \quad)}{(\quad v \quad)}=\frac{(\quad 2\pi \quad)}{(\quad \omega \quad)}$$

따라서 $\omega=\frac{2\pi}{T}$의 관계가 있다. 따라서 반지름이 R인 원 궤도를 주기 T로 등속 원운동하는 물체의 구심 가속도의 크기는 $a=\frac{4\pi^2 R}{T^2}$, 구심력의 크기는 $F=\frac{4\pi^2 mR}{T^2}$과 같이 나타낼 수 있다.

Ⅰ. 역학적 상호 작용 > 2. 행성의 운동과 상대성 ( ) 년 ( ) 월 ( ) 일

[2] 행성의 운동 3 학년 ( ) 반 ( ) 번 이름 ( )

▶ Quiz Time! (점수: / 5)

[1~5] 질량이 m인 물체가 반지름이 R인 원 위에서 v의 속력으로 등속 원운동할 때, 다음을 구하시오.

1. 주기: $T=($ $)$
2. 각속도: $\omega=($ $)$
3. 구심 가속도의 크기: $a=($ $)$
4. 구심력의 크기: $F=($ $)$
5. 구심력의 방향: ( )

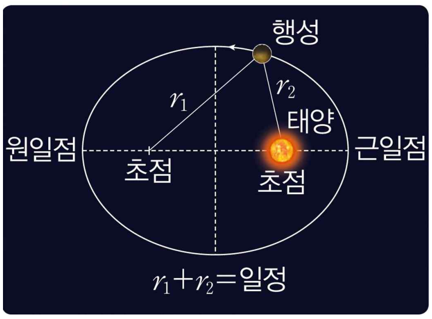
▶ 행성의 운동에 관한 이론의 변천

1. 아리스토텔레스(기원전 4세기경): 끊임없이 변화하는 불완전한 세계인 지상과 달리, 천상에서는 모든 천체가 질서있게 **저절로 완전한 (원) 궤도**를 돈다고 믿음.
2. 프톨레마이오스(1세기경): 지구는 고정되어 있고 지구를 제외한 **모든 천체가 지구를 중심으로 완전한 원 궤도로 운동한다는 (천동설)을 주장**하였고, 이후 약 1500년 동안 정설로 받아들여짐.
3. 코페르니쿠스(16세기경): 그의 저서 '천체의 회전에 관하여'에서 지구를 포함한 **모든 행성이 태양을 중심으로 원운동**한다고 가정하면, 태양과 행성의 운동들이 잘 설명될 수 있다는 (지동설)을 주장.
4. 케플러(17세기경): 스승인 티코 브라헤의 정밀한 관측 자료를 바탕으로, **태양을 중심으로 하는 행성의 운동 궤도가 완전한 원이 아니라는 분석 결과**를 얻었으며, 행성의 운동에 관한 3가지 법칙을 발표함.

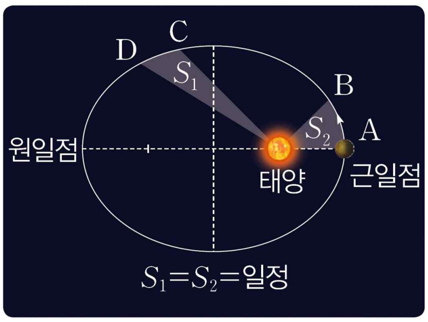
▶ 행성의 운동을 설명하는 케플러의 법칙

1. **타원 궤도**의 법칙: 태양계 내의 모든 행성은 **태양을 한 (초점)으로 하는 타원 궤도**를 공전한다.
2. **면적 속도 일정**의 법칙: 태양계 내의 행성이 **같은 시간 동안 그리는 부채꼴 모양의 (면적)은 위치에 상관없이 항상 일정**하다.
3. **조화**의 법칙: 태양계 내의 행성의 **공전 주기의 제곱은 궤도 (긴반지름)의 세제곱에 비례**한다.

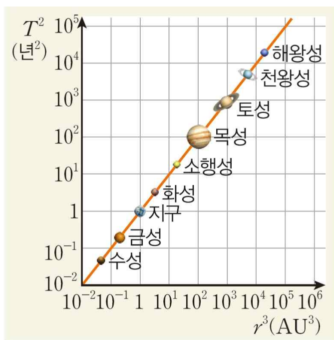
<케플러의 제1법칙>



<케플러의 제2법칙>



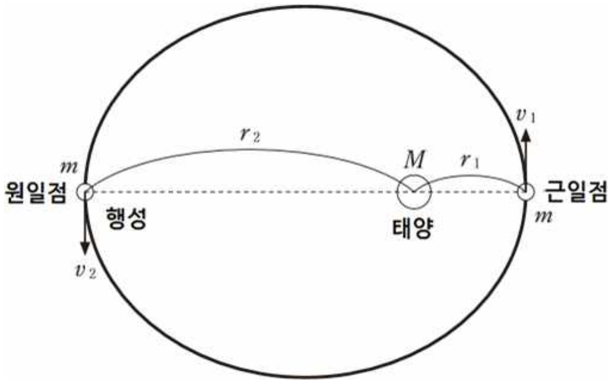
<케플러의 제3법칙>



▶ 뉴턴이 케플러의 3가지 법칙을 통해 거리에 따른 중력의 크기를 알아내다

1. 케플러의 제1법칙인 타원 궤도의 법칙을 통해, 행성은 태양으로부터의 거리가 가까울 때도 있고 멀 때도 있음을 알게 됨으로써, **태양으로부터의 (거리)에 따른 힘의 크기를 분석할 수 있음**을 깨달음.

2. 케플러의 제2법칙인 면적 속도 일정의 법칙을 통해, 태양으로부터 행성까지의 거리를 r, 행성의 공전 속력을 v라 하면 단위 시간 동안 그리는 부채꼴 모양의 면적은 $\frac{1}{2}rv$로 항상 일정하므로 **행성의 공전 속력 v는 항상 거리 r에 반비례**함을 알게 됨.



☞ 질량이 m인 물체가 반지름이 R인 궤도를 v의 속력으로 운동하기 위해 필요한 구심력의 크기는 $F=\left(m\frac{v^2}{R} \right)$에서, 타원은 좌우 대칭이므로 근일점에서나 원일점에서나 궤도의 반지름 R은 동일하다. 그런데 행성의 속력 v는 태양으로부터의 거리 r에 반비례하므로, 근일점과 원일점에서 비교해보면 행성이 공전할 때 **구심력의 크기 F는 r^2에 (반비례)하는 관계**가 있음을 알 수 있음.

3. 구심력의 크기가 r^2에 반비례한다는 사실을 이용하여 케플러의 제3법칙인 조화의 법칙을 설명할 수 있음. 태양으로부터의 거리가 R인 궤도를 속력 v로 등속 원운동하는 물체가 태양으로부터 받는 힘이

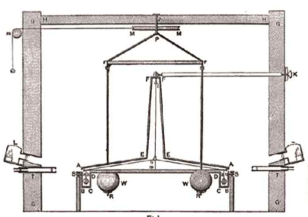
$$F = m\frac{v^2}{R} \propto \frac{1}{R^2}$$

이므로 $v^2 \propto \frac{1}{R}$의 관계가 있으며, 주기의 제곱이 $T^2 = \frac{4\pi^2 R^2}{v^2} \propto$ (R^3)의 관계가 있음을 보임.

4. 중력은 질량과 중력 가속도의 곱과 같으므로, 행성이 태양으로부터 받는 **중력은 (행성)의 질량에 비례**한다. 그런데 이 힘의 반작용으로서 태양도 행성으로부터 중력을 받으므로, 태양이 행성으로부터 받는 **중력은 (태양)의 질량에 비례**한다고 추론함. 즉 태양의 질량을 M, 행성의 질량을 m, 태양과 행성 사이의 거리를 r이라 할 때, 태양과 행성 사이에 작용하는 중력의 크기 F는

   ☞ $F \propto \left(\frac{Mm}{r^2} \right)$

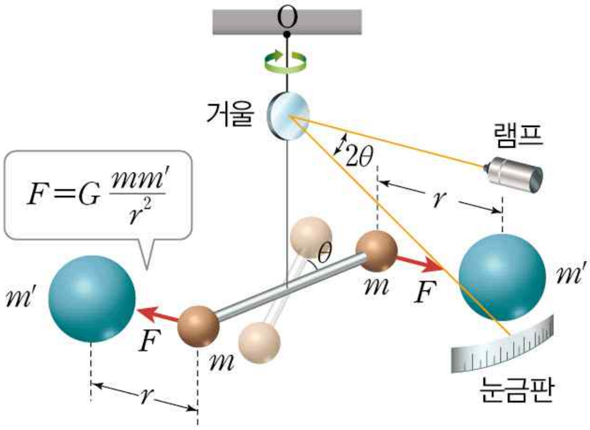
5. **중력 상수**(Gravitational constant) G를 사용하여 태양과 행성 사이의 중력의 크기 F를 $F = G\frac{Mm}{r^2}$라는 수식으로 나타낼 수 있었으며, 뉴턴은 이 결과를 일반화하여 중력은 천체들 사이에서만 작용하는 것이 아니라 **질량을 가진 모든 물체 사이에 작용하는 힘**이라는 (만유인력)**의 법칙**을 발표함.



6. 영국의 물리학자인 캐번디시는 **질량이 있는 두 물체 사이에 잡아당기는 힘이 있음**을 실험을 통해 증명함(1798).

▶ 캐번디시의 실험

1. 존 미첼(John Mitchell)의 설계: 질량이 m, m'인 무거운 두 물체를 거울이 달린 줄로 천장에 매달고 가만히 놓았을 때, 만일 두 물체 사이에 두 질량에 각각 비례하고 거리의 제곱에 반비례하는 인력(만유인력)이 존재한다면 이 **인력으로 인하여 거울이 회전하므로 거울을 통해 반사된 눈금판의 각도를 관찰**하는 것으로 실험을 설계함.



2. 미첼의 사망으로 캐번디시가 실험을 이어 수행하였으며, 실험 결과:
   ① 서로 붙는 방향으로 눈금판이 회전하는 것을 관찰하여, 두 물체 사이에 인력이 작용함을 확인함.
   ② 두 물체 질량을 바꾸어가며 인력의 크기가 두 물체의 질량에 각각 비례함을 확인함.
   ③ 인력의 크기가 거리의 제곱에 반비례함을 확인함.
   ④ 실험 결과 **중력 상수 G의 값을 약 6.67×10^{-11} (N·m^2/kg^2)**으로 정함.

▶ 만유인력의 법칙을 이용한 계산

1. 중력 상수 G를 정함으로써, 인류는 지구의 질량을 알아낼 수 있게 됨. 지구의 반지름을 R, 질량을 M이라 하면, 질량이 m인 물체에 작용하는 중력은 $mg=G\dfrac{Mm}{R^2}$이므로 $M=\dfrac{gR^2}{G}$을 이용하여 계산.
   ☞ 알려진 $g\fallingdotseq 9.8$ m/s^2, $R\fallingdotseq 6.4\times10^6$ m, $G\fallingdotseq 6.67\times10^{-11}$ N·m^2/kg^{2}을 대입하면, $M\fallingdotseq 6\times10^{24}$ kg을 얻을 수 있다.

2. 지구의 반지름 R이 충분히 크기 때문에 지표면 근처에서는 일정 높이까지 중력 가속도 $g=\dfrac{GM}{R^2}$가 거의 일정하지만, 지표면으로부터 멀어질수록 지구 중심으로부터의 거리 r의 제곱에 반비례하여 가속도의 크기가 작아진다$\left(a=\dfrac{GM}{r^2}\right)$.

3. 만유인력을 구심력으로 받아 공전하는 사례:
   ① 달의 공전: 지구와 달 사이의 거리 $r=3.9\times10^8$ m(평균)를 대입하면, 지구와의 만유인력으로 인한 달의 가속도의 크기는 $a\fallingdotseq 2.6\times10^{-3}$ m/s^{2}이다. 여기서 구심 가속도 $a=\dfrac{v^2}{r}$을 적용하면, 달의 공전 속력은 $v=\sqrt{ar}\fallingdotseq 10^3$ m/s을 얻는다.
   ② 정지 궤도 위성: 지구의 자전 주기와 정확히 일치하는 인공위성. 지구의 자전 주기를 T라 하면 자전 각속도는 $\omega=\dfrac{2\pi}{T}$이고, $G\dfrac{Mm}{r^2}=mr\omega^2$이므로 정지 궤도 위성은 $r=\sqrt[3]{\dfrac{GMT^2}{4\pi^2}}$만큼 지구 중심으로부터 떨어진 것으로 계산할 수 있다. (계산하면 $r=$42,200 km로, 지표면으로부터는 35,800 km)

Ⅰ. 역학적 상호 작용 > 2. 행성의 운동과 상대성	(　　　) 년 (　　) 월 (　　) 일
[3] 비관성 기준계	3 학년 (　) 반 (　　) 번 이름 (　　　　　)

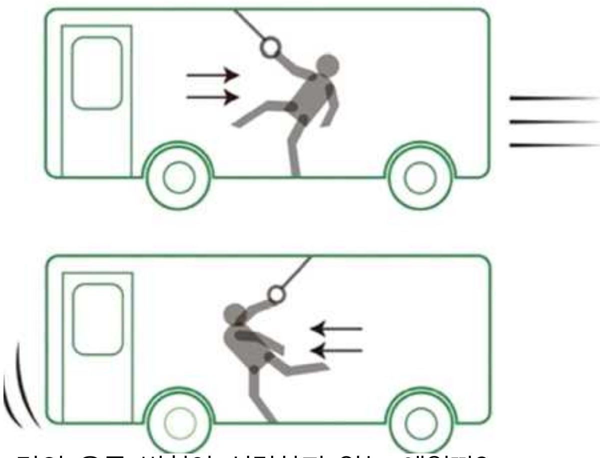
▶ 관성 기준계

1. **뉴턴의 운동 제1법칙**: (관성)**의 법칙**이라고도 하며, **물체가 받는 알짜힘이** 0이라면 정지해 있던 물체는 계속 (정지)하고 있고, 운동하던 물체는 계속 (등속 직선 운동)하고 있다.
2. **뉴턴의 운동 제2법칙**: (가속도)**의 법칙**으로, 물체의 가속도는 물체가 받는 (알짜힘)에 비례하고 물체의 (질량)에 반비례한다.
3. **뉴턴의 운동 제3법칙**: (작용-반작용)**의 법칙**이라고도 하며, 두 물체 사이에 서로 작용하는 힘의 짝이 존재하는데 이 짝은 서로 (크기)가 같고 (방향)이 반대인 두 힘이다.

→ 뉴턴의 3가지 운동 법칙이 모두 성립하는 관측자를 가리켜, (관성 기준계)에 존재한다고 말한다.

▶ 비관성 기준계

1. 뉴턴의 운동 법칙이 성립하지 않는 예: **버스 안에서**



※ 이러한 현상이 왜 뉴턴의 운동 법칙이 성립하지 않는 예일까?

____

____

____

2. 뉴턴의 운동 법칙이 성립하지 않는 관측자를 가리켜, (비관성 기준계)에 존재한다고 말한다. 관성 기준계에 존재하는 관측자가 바라볼 때, 비관성 기준계에 있는 관측자는 (가속도) 운동한다는 특징이 있다.
3. (관성력): 뉴턴의 운동 법칙이 비관성 기준계에서도 성립하도록 하기 위해 도입하는 가상의 힘. 관성 기준계에 존재하는 관측자가 측정한 비관성 기준계에 존재하는 관측자의 가속도를 a라 할 때, 비관성 기준계에 존재하는 질량 m인 물체에 작용하는 힘은 $F=($ $-ma$ $)$와 같다.
   ※ 힘의 부호에 '$-$'가 붙은 것은 **관성력의 방향이 가속도의 방향과 반대**라는 의미.
4. 위의 버스 안에서 휘청거리는 사람의 운동을, 관성력을 도입하여 다시 설명해보자. 관성력이라는 힘을 도입하면, 뉴턴의 운동 법칙이 성립하도록 할 수 있는가?

▶ 실생활에서 나타나는 관성력의 예

1. 정지 상태에서 급발진하는 버스 안에 타고 있는 사람은 (뒤쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 사람이 뒤로 쏠리고, 운동하다가 급제동하는 버스 안에 타고 있는 사람은 (앞쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 사람이 앞으로 쏠린다.

2. 정지 상태에서 위로 가속하는 엘리베이터 안에 타고 있는 사람은 (아래쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 아래로 누르는 중력이 더 세진다고 느끼고, 위로 올라가다가 정지하는 엘리베이터 안에 타고 있는 사람은 (위쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 아래로 누르는 중력이 더 약해진다고 느낀다.
반대로 정지 상태에서 아래로 가속하는 엘리베이터 안에 타고 있는 사람은 (위쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 아래로 누르는 중력이 더 약해진다고 느끼고, 아래로 내려가다가 정지하는 엘리베이터 안에 타고 있는 사람은 (아래쪽) 방향으로 관성력을 받으므로 아래로 누르는 중력이 더 세진다고 느낀다.

3. 버스가 급커브 길을 도는 동안, 도는 방향(안쪽)으로 구심력이 작용해야 한다. 그러나 급커브 길을 도는 버스 안에 타고 있는 사람은 도는 방향의 반대(바깥쪽)로 관성력을 받는데, 이를 (원심력)이라고 한다.
※ 구심력: 관성 기준계에서 볼 때, 물체가 원운동하기 위해 필요한 힘.
※ 원심력: 원운동하는 비관성 기준계에 존재하는 관측자에게 도입하는 힘.

4. 그밖에 실생활에서 나타나는 관성력의 예에는 무엇이 있을까?

Ⅰ. 역학적 상호 작용 > 2. 행성의 운동과 상대성 ( ) 년 ( ) 월 ( ) 일

[4] 등가 원리 3 학년 ( ) 반 ( ) 번 이름 ( )

▶ Quiz Time! (점수: / 5)

1. 뉴턴의 3가지 운동 법칙이 성립하지 않는 관찰자를 가리켜 ( )에 있다고 한다.
2. 뉴턴의 3가지 운동 법칙이 성립하지 않을 때, ( )이라는 가상의 힘을 도입하면 성립하게 만들 수 있다.

[3~5] 다음 상황에 있는 관찰자에게 가상의 힘이 어느 방향으로 작용하는지 쓰시오.

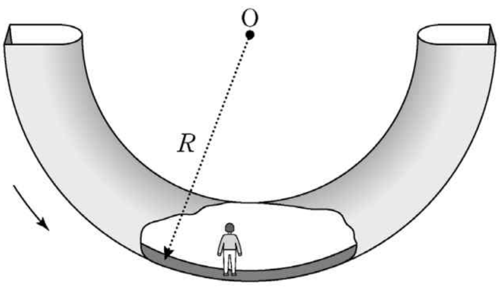
3. 빠르게 달리던 버스가 갑자기 브레이크를 강하게 밟았을 때: ( )
4. 높은 곳에 정지해 있던 엘리베이터가 자유 낙하할 때: ( )
5. 자동차가 왼쪽으로 꺾이는 급커브길을 빠르게 돌 때: ( )

▶ 빛의 성질*

1. **빛은** (파동)의 한 종류로, 원자핵이 핵반응 과정에서 (질량)이 감소하면서 발생하는 에너지 형태의 방사선 또는 물체의 표면에서 빛이 발생하여 퍼지는 (복사)의 형태, 전하량을 가진 입자가 (진동)할 때 이것이 공간 상으로 전파되는 형태 등이 있다.
2. **빛을** (전자기파)라고도 하며, (파장)에 따라 (감마)선, X선, 자외선, 가시광선, 적외선, (전파) 등으로 나뉜다. 그중에 우리가 눈으로 볼 수 있는 영역은 (가시광선) 뿐이다.
3. 파동의 성질을 가지고 있어서, 매질이 바뀔 때 그 **경계에서** (반사) **또는** (굴절)이 일어난다.
4. 다른 파동과 달리 유일하게 **빛은** (진공)**에서도 전파**된다. 이때 파장에 관계없이 빛의 속력은 항상 $c = 299{,}792{,}458\ \text{m/s}$이며, 관성 기준계에 있는 관찰자의 경우 관찰자의 속도에 따라 변하지 않는다.
5. 힘을 받으면 경로가 휘어지는 '입자'와 달리, 빛은 파동이므로 경로가 휘어지지 않고 (직진)한다.
   ☞ 아인슈타인은 **중력장에 있는 관찰자에게는 빛의 경로가 휘어져 보일 수 있다**는 이론을 발표(1916).

▶ 인공 중력

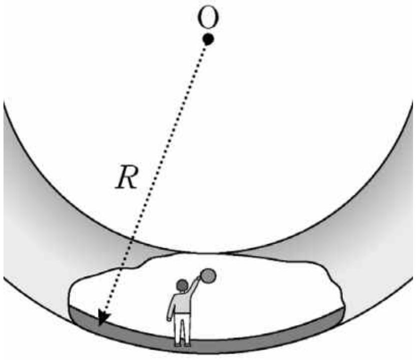
1. 만유인력: (질량)**을 가진 두 물체**가 서로 끌어당기는 힘. 지구 상의 모든 물체는 연직 아래 방향으로 중력을 받는데, 이는 (지구)의 질량이 매우 크기 때문이다.
2. 우주 상에서 매우 큰 질량의 천체가 없이도 마치 지구의 중력장처럼 만들어 놓은 것을 (인공) 중력이라고 한다. 인공 중력은 (원심력)이라는 원리를 이용한다.
   ☞ 오른쪽 그림과 같이 무중력 상태의 우주 상에서 반지름이 R인 고리 모양의 우주선이 v의 일정한 속력으로 회전할 때, 질량이 m인 사람이 받는 원심력의 크기를 계산하고 화살표로 방향을 표시해 보자.



3. 물이 들어있는 물병을 거꾸로 잡은 상태에서 빠르게 돌리면 물이 쏟아지지 않는데, 이는 물병이 원운동하면서 (바깥) 방향으로 원심력을 받기 때문이다. 이러한 원리를 이용하여 우주선을 회전시키면, 질량이 없이도 (관성력)**이라는 가상의 힘**이 인공 중력의 역할을 하는 것이다.

▶ 인공 중력에서 빛의 경로는 어떻게 보일까?

1. 회전하는 고리 모양의 우주선 밖에서 정지해 있는 관찰자는 (관성) **기준계**, 우주선 안에서 우주선과 같이 회전하고 있는 관찰자는 (비관성) **기준계**에 있다.

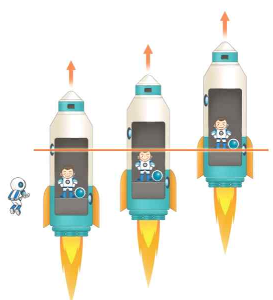


2. 관성 기준계에서 볼 때, 우주선 안의 사람이 등속 원운동하기 위해 필요한 힘은 (구심력)이다. 우주선 안의 사람에게 작용하는 힘은 오직 우주선의 바닥이 사람을 위로 받치는 (수직 항력) 밖에 없으며, 이 힘이 곧 구심력이 된다.

3. 비관성 기준계에서 볼 때, 우주선 안의 사람은 정지해 있으므로 바닥이 사람을 위로 받치는 수직 항력과 (원심력)이 서로 평형이어야 한다. 이는 지구의 땅 위에 가만히 서 있는 사람이 바닥으로부터 받는 수직 항력과 지구의 중력이 서로 평형인 것과 비슷하다.

4. 우주선이 회전하는 빠르기를 조절하여 지구에서의 중력 mg와 같게 만든 상태에서, 우주선 안에서 사람이 공을 가만히 놓으면 어떻게 될까?
   ① 관성 기준계에서 볼 때, 접선 방향으로 v의 속력으로 이동하는 사람이 공을 가만히 놓았을 때 공도 접선 방향으로 v의 속력으로 (등속 직선) 운동한다. 따라서 우주선 밖에 있는 관찰자가 볼 때, 공은 접선 방향으로 직진하며 오히려 바닥의 높이가 (높아)지는 것처럼 보인다.
   ② 비관성 기준계에서 볼 때, 공은 중심 방향의 바깥으로 (원심력)을 받아 자유 낙하한다. 따라서 우주선 안에 있는 관찰자가 볼 때, 바닥의 높이는 그대로인 채 공이 떨어지는 것처럼 보인다.
   ☞ **비관성 기준계에서의 운동은 중력장에서의 운동과 같게 보인다**는 점에서 아인슈타인은 '물체가 관성력을 받는 상황을 중력을 받는 상황과 구분할 수 있을까?' 하는 관점을 갖게 됨.

5. (등가 원리): 물체에 작용하는 **중력을 관성력과 동일시**하는 관점.
   ☞ 등가 원리에 따라 **중력장에서 빛의 경로가 휘어져 보인다**는 사고 실험의 결과를 설명해 보자.



① **관성 기준계**에서의 관찰자

② **비관성 기준계**에서의 관찰자

③ **중력장**에서의 관찰자

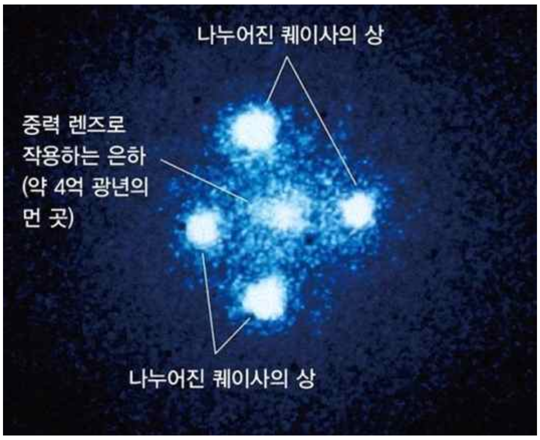
Ⅰ. 역학적 상호 작용 > 2. 행성의 운동과 상대성　　　(　　　　)년 (　　)월 (　　)일

[5] 일반 상대성 이론　　　3학년 (　)반 (　　)번 이름 (　　　　　)

▶ 일반 상대성 이론

1. 아인슈타인의 상대성 이론은 (관성) **좌표계에 있는 관찰자에만 성립하는 특수 상대성 이론**(1905), (비관성) **좌표계에 있는 관찰자에도 성립하는 일반 상대성 이론**(1916) 두 가지로 되어 있다.
→ 관성 좌표계에서는 관성력 개념이 도입되지 않으므로 빛의 경로가 휘어 보이는 현상이 없지만, **비관성 좌표계에서는 관성력 개념이 도입되므로 중력장에서 빛의 경로가 휘어 보이는 현상**이 관찰된다.

2. 일반 상대성 이론은 1919년 영국의 천문학자 에딩턴의 개기일식 관측으로 증명되었다. 아인슈타인의 이론대로라면 빛이 태양처럼 큰 중력장을 만들어내는 질량이 큰 천체에 의해 휘어질 수 있으므로, **태양 뒤에 가려진 어느 천체가 개기일식 때에는 태양을 휘어서 지나감으로써 가려진 태양 주변에 그 천체가 십자가 모양으로 관측될 것**이라는 정보를 입수하였다. 개기일식이 예정된 아프리카의 어느 섬에서 **개기일식으로 어두워진 태양 주변에 나타난 십자가 모양의 상을 촬영**하여 신문의 1면에 실렸고, 이 사건 이후로 아인슈타인은 세계적으로 유명한 물리학자로 널리 알려졌다.



☞ 이때 에딩턴이 관측한 퀘이사의 상을 '아인슈타인의 십자가'라 부르는데, 하나의 퀘이사가 십자가 모양처럼 태양 주변의 여러 위치에서 관측될 수 있었던 까닭을 일반 상대성 이론으로 설명해 보자.

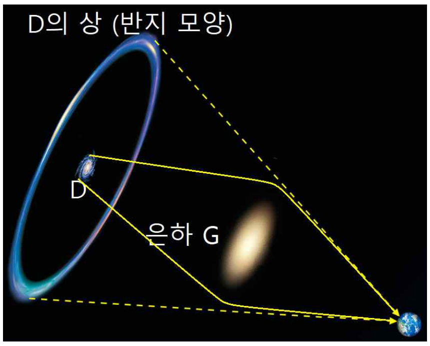
____

____

____

▶ 중력 렌즈 효과

1. **중력 렌즈 효과: 질량이 큰 천체**가 마치 빛을 모으는 (볼록) **렌즈**와 같은 역할을 하는 현상.
① 일반 상대성 이론에 따라, 천체 D에서 질량이 큰 은하 G의 주변을 지나는 빛이 휘어져서 관측자에게 도달하므로, 여러 방향으로 퍼지는 빛이 한 곳으로 모이게 된다.
② 이때 관측자는 천체 D로부터 온 빛이 사방에서 온 것처럼 관측하므로, 원래는 점 모양인 D의 상이 반지 모양으로 보인다.



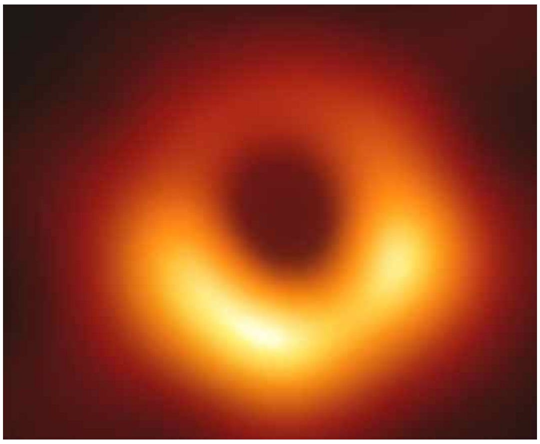
2. 중력 렌즈 효과에 의해 빛이 휘어지는 정도는 렌즈 위치에 있는 **천체의 질량이 클수록** 더 커진다.

▶ 블랙홀

1. **블랙홀**: 특정 영역이 (검은 구멍)처럼 보이는 천체. 어느 항성의 종말이 블랙홀로 되기 위해서는, 주계열성 단계에 진입할 때의 질량이 태양보다 훨씬 커야 한다.

2. 질량이 충분히 큰 천체의 경우, 주변의 빛조차 광속($c = 299{,}792{,}458$ m/s)으로도 빠져나올 수 없을 정도로 중력장에 의해 빛이 휘는 정도가 커지므로, 이 천체 주변에서 나오는 빛은 전혀 관측되지 못하여 검게 보이는 것이다.
   ① 만일 질량이 그대로인 채로 지구의 크기가 각설탕만큼 작아진다면, 각설탕만큼의 영역에서는 빛이 빠져나오지 못하므로 검게 보일 것.
   ② 사건의 지평선(event horizon): 블랙홀의 내부에서 일어나는 일이 블랙홀의 외부에 아무런 영향을 미치지 않게 되는 경계면. 블랙홀의 검은 영역을 둘러싸는 경계면이 곧 사건의 지평선과 같음.
   ☞ 점 모양의 블랙홀 주변에 검게 보이는 영역의 반지름을 슈바르츠실트 반지름(r_S)이라고 하는데, 슈바르츠실트 반지름 안에 있는 빛은 외부로 빠져나오지 못하므로 사건의 지평선 안팎에서의 정보 전달이 불가능하다.
   ③ 블랙홀의 질량이 클수록 더 먼 거리의 빛까지 중력장을 탈출할 수 없으므로, 블랙홀이 만드는 영역의 반지름이 커짐. 물리학자 슈바르츠실트의 계산에 의하면, **슈바르츠실트 반지름 r_S는 블랙홀의 질량 M에 비례**함.

3. 우리 은하의 중심 부근에도 거대 질량 블랙홀이 존재하며, 최근에 전파 망원경을 통해 블랙홀의 모습이 촬영되었다. 5천만 광년 정도 떨어진 처녀자리의 M87 부근에 존재하는 초거대 질량 블랙홀인 'M87*' 또한 촬영에 성공하였다.



   ☞ 관측 기술이 발전함에 따라, 이론적으로만 예측되었던 현상들이 실제로 관측되고 있음.