

# 4

## Gravitació

1. Del naixement de l'astronomia a Newton
2. Llei de gravitació universal
3. Gravetat
4. Massa i pes
5. Caiguda lliure
6. Els viatges espacials

La distància més gran de la Terra a què ha arribat l'ésser humà va ser quan la tripulació de l'*Apollo 13* era a 254 km de la superfície de la Lluna, que equival a 400.171 km sobre la superfície de la Terra.

Aquest rècord es va produir a les 1 h 21 min de la matinada del 15 d'abril de 1970. La missió va començar quatre dies abans, l'11 d'abril, i fou dissenyada per ser la tercera missió tripulada a aterrar sobre la Lluna. No obstant això, a les 56 hores de vol i a meitat de camí de la Lluna, un dels tancs d'oxigen va explotar i va danyar greument el mòdul de comandament, l'*Odyssey*.

Els astronautes Jim Lovell, Fred Haise i Jack Swigert es van refugiar en el mòdul lunar i després van segellar el túnel cap al mòdul de comandament. Van apagar tots els sistemes de l'*Odyssey* per intentar salvar la poca energia que els quedava i van passar a dependre dels sistemes de suport a la vida del mòdul lunar *Aquarius*.

L'*Aquarius* estava dissenyat específicament per aterrar sobre la Lluna i donar suport a dos astronautes durant uns quants dies, no per a tres astronautes durant tot el trajecte de tornada a la Terra. Els filtres d'aire de l'*Aquarius* es van començar a saturar ràpidament i es van omplir amb el diòxid de carboni que exhalaven els tres homes, que van haver d'improvisar amb grans dificultats filtres extra amb l'equip recuperat de l'*Odyssey*. Contra totes les dificultats, la NASA va ser capaç de portar de tornada els tres astronautes sans i estalvis, encara que greument deshidratats. Cap dels tres no va tornar a volar a l'espai.





### QÜESTIONS

- Busca informació sobre la missió *Apollo 13*.
- Per què penses que són importants les missions a l'espai?
- En una missió espacial es diu que es fa servir com a «combustible» la gravetat. Sabries dir per què?
- Sobre la missió *Apollo 13*, es va fer una pel·lícula amb el mateix nom (*Apollo 13*), on s'explica molt bé com es pot fer un viatge per l'espai. Si pots veure la pel·lícula fes un petit resum de com es pot anar a la Lluna.

### EN AQUESTA UNITAT

- Coneixerem la història dels diferents models sobre el moviment dels planetes.
- Estudiarem la llei de la gravitació universal.
- Aprendre a calcular el valor de la gravetat (camp gravitatori).
- Analitzarem la diferència entre massa i pes.
- Aplicarem les lleis del moviment a la caiguda lliure.
- Descriurem com es fan els viatges espacials.

## 1. Del naixement de l'astronomia a Newton



**Fig. 1:** L'esfinx és una magnífica mostra del l'elevat grau de civilització de l'antic Egipte. La mitologia egípcia identificava el déu Horus amb el Sol, representat a la Terra pel faraó. Per això l'esfinx, imatge del sobirà, era adorada com a representació divina.

Un dels problemes que més s'han discutit des de temps antics fins avui, ha estat l'estudi dels cossos celestes.

La vida dels pobles antics estava regulada pels fenòmens celestes. Les activitats humanes estaven relacionades amb la presència i l'absència del Sol, la Lluna, les estrelles, etc.

Els egipcis i els babilonis van tractar de donar una explicació precisa del moviment planetari, però només el van poder explicar mitjançant mites i llegendes.

Alguns pobles de l'antiguitat van recopilar dades d'observacions astronòmiques molt acurades i durant molts anys, de manera que, en alguns casos, van ser capaços de predir eclipsis.

### 1.1 Els grecs: de la mitologia als primers models

Els grecs, que consideraven l'home com el centre de l'Univers, suposaven que la Terra era el centre geomètric de l'Univers i que els cossos celestes es movien al voltant de la Terra.

Els filòsofs d'aquella època creien que els cossos celestes estaven incrustats en esferes que giraven al voltant de la Terra. Els cossos coneguts es van ordenar d'acord amb la distància aparent a la Terra: la Lluna, Mercuri, Venus, el Sol, Mart, Júpiter, Saturn i les estrelles. Encara que aquest model era el que semblava més



**Fig. 2:** Model grec de l'Univers.

lògic en aquella època, Aristarc de Samos (310-230 aC) havia proposat abans un altre model on els planetes giraven al voltant del Sol, d'acord amb les observacions que feia. El problema va ser que el seu model no va ser acceptat.

## 1.2 Model geocèntric

Al segle II de l'era cristiana, l'astrònom Claudi Ptolemeu d'Alexandria (100-170 dC) va plantejar un model planetari que va tenir una gran acceptació durant l'edat mitjana. Suposava que tots els planetes es movien en cercles que giraven al voltant de la Terra.

Amb aquest model s'aconseguia una reproducció raonable dels moviments observats, però per ajustar el model a les observacions dels planetes i per explicar el moviment d'un únic planeta, es va haver de fer servir a vegades un gran nombre d'esferes, cosa que va derivar en un «Univers» molt complicat.

### Sabies que...

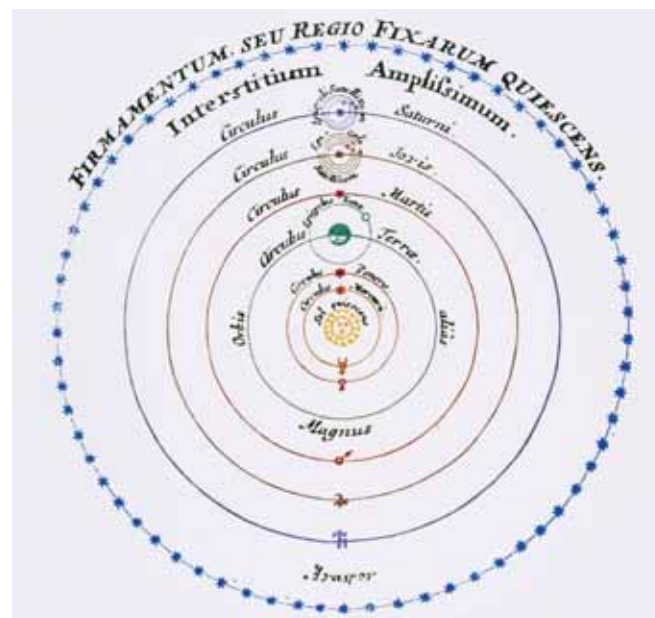
A l'època antiga es creia que, com que l'Univers era obra de Déu, era una obra perfecta i, per tant, les trajectòries dels planetes havien de ser circulars.

## 1.3 Model heliocèntric

Al segle XVI, el monjo i astrònom polonès Nicolau Copèrnic (1473–1543), que buscava una solució més simple que la de Ptolemeu, va proposar que tots els planetes inclosa la Terra es movien en òrbites circulars al voltant del Sol, el qual estava al centre.

D'acord amb Copèrnic, l'ordre de les òrbites dels planetes respecte al Sol era el següent: Mercuri, Venus, Terra, Mart, Júpiter i Saturn, amb la Lluna girant al voltant de la Terra.

Un sistema on el Sol es considerava immòbil i la Terra passava a ser un planeta en moviment com qualsevol dels altres era revolucionari en aquella època. Tement represàlies per part de la Inquisició, Copèrnic es va abstenir durant molt temps de publicar el seu llibre. El primer exemplar el va rebre al seu llit de mort. A causa d'aquesta publicació, Copèrnic va ser titllat de boig i heretge. Les seves idees van ser considerades falses i oposades a les Sagrades Escriptures.



**Fig. 3 i 4:** Model geocèntric de l'Univers proposat per Ptolemeu (dreta) i model heliocèntric de Copèrnic.



Tycho Brahe treballava com a astròleg a la cort de l'emperador Rodolf, i gràcies a això va poder fer les seves recerques i observacions astronòmiques sobre el moviment dels planetes.

## 1.4 Model de Tycho Brahe

Tycho Brahe (1546–1601) va fer mesuraments de les posicions dels cossos celestes durant vint anys, les més precises que s'havien fet fins al moment.

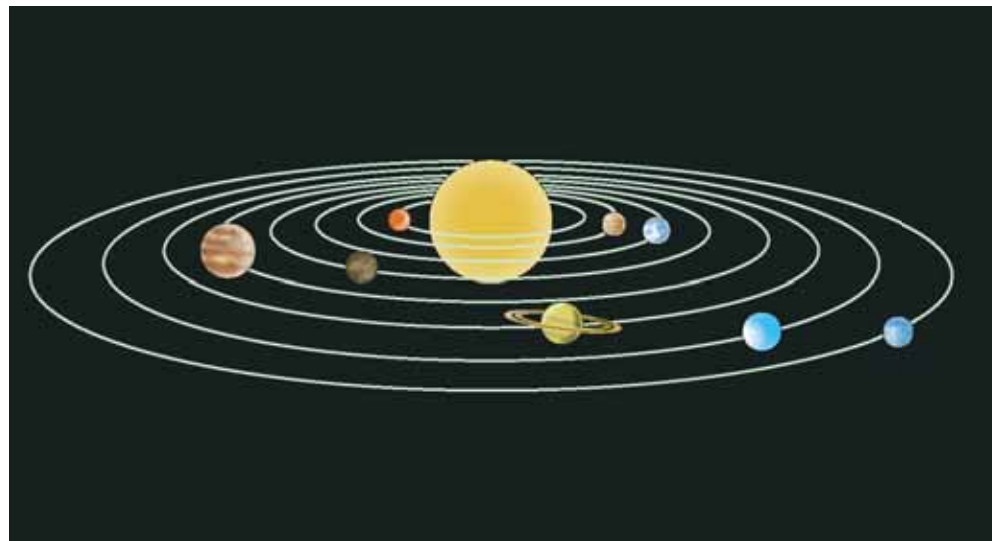
Les observacions de Tycho Brahe el van conduir a pensar que el model de Ptolemeu havia de ser incorrecte, però per a Brahe la idea que la Terra no fos el centre de l'Univers tampoc no era raonable. Ell creia en un model on la Terra era al centre de l'Univers i el Sol girava al voltant de la Terra, i els planetes al voltant del Sol.

## 1.5 Lleis de Kepler

Les mesures fetes per Tycho Brahe van ser aprofitades a la seva mort pel seu alumne, l'alemany Johannes Kepler (1571-1630), que va descobrir que els planetes giraven al voltant del Sol, però les òrbites no eren circulars sinó el·líptiques.

Amb les seves observacions, Kepler va deduir les lleis que governen el moviment planetari, anomenades lleis de Kepler. Les lleis de Kepler són les següents:

- **Primera llei de Kepler.** Tots els planetes descriuen òrbites el·líptiques al voltant del Sol, i el Sol és en un dels focus de l'el·lipse.
- **Segona llei de Kepler.** El segment que uneix el Sol amb un planeta escombra àrees iguals en temps iguals (velocitat areolar constant).
- **Tercera llei de Kepler.** El quadrat del període de revolució d'un planeta al voltant del Sol és proporcional al cub del semieix més gran de l'òrbita el·líptica del planeta, i la constant de proporcionalitat és la mateixa per a tots els planetes.



**Fig. 5:** Sistema solar. Trajectòria el·líptica dels planetes al voltant del Sol.



### Sabies que...

Des de la Terra s'observa que Mart i Venus fan un moviment errant cap endavant i cap enrere. Per aquest motiu, quan es creia en el model geocèntric aquests cossos es van anomenar planetes, ja que planeta vol dir *errant* i era com es veia el seu moviment, que era contrari al moviment en cercles perfectes proposat per Aristòtil.



### activitats proposades

1. Quin és el sistema de referència en el model geocèntric? I en l'heliocèntric?
2. Cerca informació sobre la vida de Tycho Brahe i de com va morir.

## 2. Llei de gravitació universal

L'estudi del moviment dels planetes va portar com a conseqüència que el famós astrònom Galileu Galilei (1564-1642) s'inclinés a defensar la teoria de Copèrnic, gràcies a les observacions amb el telescopi.

Els estudis realitzats per Kepler i Galileu van ser la base que va permetre a Isaac Newton (1642-1727) formular la seva llei de la gravitació universal. Això va comportar un salt mental important, ja que de sobte va aparèixer una llei aplicable tant a l'esfera terrenal com a l'esfera celeste, que fins aleshores es consideraven separades.

Galileu i Kepler es preguntaven: per què els planetes giren al voltant al Sol? Van arribar a la conclusió que hi havia una força que causava l'acceleració centrípeta dels planetes. Va ser, però, Isaac Newton qui va proposar que és el Sol el que atreu els planetes i en provoca el moviment al voltant seu. A més a més, es va adonar que entre tots els cossos hi ha sempre una força d'atracció.

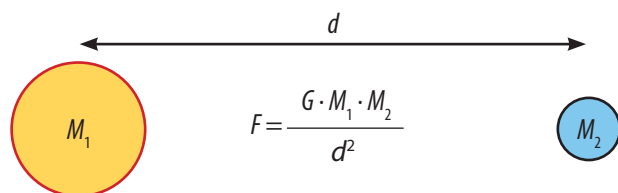
D'aquesta manera, Newton va descriure com és aquesta força, en el que es coneix com la llei de gravitació universal.

Aquesta llei indica que la força gravitatòria entre dos cossos és una força atractiva directament proporcional al producte de les masses i inversament proporcional al quadrat de la distància de separació entre els cossos.

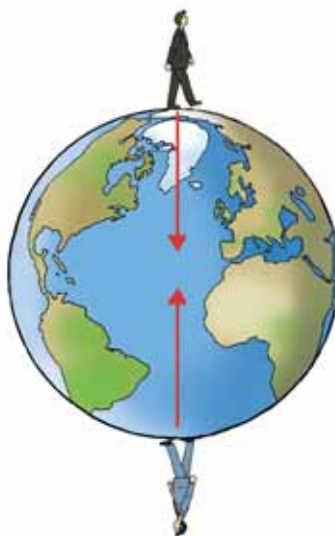
Aquesta força es calcula a partir de l'expressió següent:

$$F = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{d^2}$$

on  $F$  és la força gravitatòria (en el Sistema Internacional d'unitats (SI) es mesura en newtons);  $G$  és la **constant de gravitació universal** i té un valor de  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ;  $M_1$  i  $M_2$  són les masses dels cossos (en el SI es mesuren en quilograms); i,  $d$  és la distància de separació entre els cossos (en el SI es mesura en metres).



La força de la gravetat afecta tots els cossos. El Sol i tots els planetes s'atreuen a causa de la força gravitatòria. Com que la massa del Sol és molt més gran que la dels planetes, aquests planetes giren al voltant del Sol. D'aquesta manera, la Lluna gira al voltant de la Terra, ja que la massa de la Terra és més de trenta vegades la de la Lluna, encara que l'atracció de la Lluna es pot notar en el fenomen de les mareas. 📖



**Fig. 6:** La gravetat és una força «invisible» que provoca, entre altres efectes, la caiguda dels cossos i que les persones visquin «enganxades a la superfície de la Terra».

### Sabies que...



Henry Cavendish (1731-1810) va ser el primer a determinar un valor fiable de la constant de gravitació universal,  $G$ .

Cavendish era fill d'una família aristocràtica i va invertir gran part de la seva fortuna a crear un laboratori i una biblioteca on es va dedicar a fer estudis de física.

Cavendish va utilitzar dues esferes de plom i una balança de torsió per determinar el valor de  $G$  i va obtenir un resultat de  $6,754 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ . Actualment, el valor acceptat de  $G$  és  $6,726 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ .



**Fig. 7 i 8:** Dues imatges d'un mateix indret, el mont Saint-Michel, a Normandia (França), amb la marea baixa (esquerra) i amb la marea alta. Les mareas són un efecte de les forces gravitatòries.

### Exemple resolt

#### Calcula la força d'atracció gravitatòria entre el Sol i la Terra.

Dades: massa del Sol,  $2 \cdot 10^{30}$  kg; massa de la Terra,  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg; distància Terra-Sol,  $1,5 \cdot 10^{11}$  m.

Per calcular la força d'atracció gravitatòria s'aplica la llei de la gravitació universal de Newton:

$$F = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{d^2}$$

Les dades del problema són:  $G = 6,7 \cdot 10^{-11}$  N·m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>;  $M_1 = 2 \cdot 10^{30}$  kg;  $M_2 = 5,98 \cdot 10^{24}$  kg;  $d = 1,5 \cdot 10^{11}$  m.

Substituint:

$$F = \frac{G \cdot M_1 \cdot M_2}{d^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{(1,5 \cdot 10^{11})^2} = 3,6 \cdot 10^{22} \text{ N}$$



La distància entre els cossos sempre es pren respecte al seu centre. Si es tracta, per exemple, del Sol i la Terra, la distància de separació es considera la distància entre el centre del Sol i el centre de la Terra.



### activitats proposades

- Quina força d'atracció experimenten dos nois de 70 kg de massa si estan separats una distància d'1 m?
- De quins factors depèn la força d'atracció gravitatòria entre dos cossos?

### 3. Gravetat

Qualsevol cos crea una pertorbació a la regió de l'espai que l'envolta a causa de la seva massa. Aquesta pertorbació es coneix com a camp gravitatori.

El **camp gravitatori** és una pertorbació que crea un cos en l'espai que l'envolta.

El camp gravitatori és una magnitud vectorial, és a dir, la gravetat es representa amb vectors.

Les característiques del vector gravetat són les següents:

- Direcció: radial.
- Sentit: cap al centre del cos.
- Mòdul: està determinat per l'**acceleració de la gravetat**, que es representa amb la lletra  $g$ .



**Fig. 9:** Direcció del vector camp gravitatori de la Terra.

El valor del mòdul o la intensitat del vector camp gravitatori (gravetat) depèn de la massa del cos que el crea i de la distància del cos al punt on es calcula el valor que té. Matemàticament, es calcula a partir de l'expressió següent:

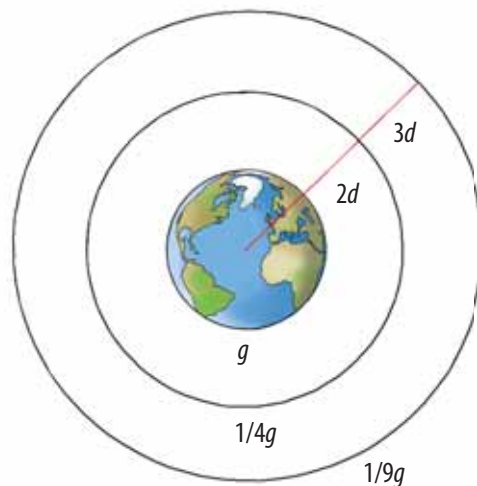
$$g = \frac{G \cdot M}{d^2}$$

on  $g$  és el valor del camp gravitatori o gravetat (es mesura en N/kg);  $G$  és la constant de gravitació universal i té un valor de  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ ;  $M$  és la massa del cos (es mesura en quilograms); i,  $d$  és la distància des del punt on es calcula la gravetat al centre del cos (es mesura en metres).

Com es pot comprovar en aquesta fórmula, el camp gravitatori (gravetat) depèn de la massa del cos. D'aquesta manera, a la superfície del Sol la gravetat és molt més gran que a la superfície de la Terra (vint vegades més gran) i a la superfície de la Terra és més gran que a la superfície de la Lluna (cinc vegades més gran).

De la mateixa manera, el camp gravitatori (gravetat) depèn de la distància al cos que crea la pertorbació. Així, per exemple, quan un cos és a la superfície de la Terra el valor del camp gravitatori és més gran que quan aquest cos n'està molt allunyat, com es pot veure en el dibuix següent:





**Fig. 10:** Valors de la gravetat a la superfície de la Terra i en alguns punts situats a distàncies diferents.

En el cas de la Terra, la gravetat té un valor de  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Aquest valor és a la superfície, ja que si te n'allunyes la gravetat és més petita. 📖

### Exemple resolt

**Calcula el valor del camp gravitatori (gravetat) a la superfície de la Terra.**

Dades: massa de la Terra,  $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ;  $R_T = 6.370 \text{ km}$ ;  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$

Passem les dades del problema a les unitats en el SI:

$$M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}; R_T = 6.370 \text{ km} \cdot \frac{1.000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 6.370.000 \text{ m}$$

Per calcular el valor de la gravetat apliquem la fórmula següent:

$$g = \frac{G \cdot M}{R_T^2} = \frac{6,7 \cdot 10^{-11} \cdot 5,98 \cdot 10^{24}}{6.370.000^2} = 9,87 \text{ N/kg}$$



### activitats proposades

5. De quins factors depèn el valor de la gravetat?
6. Indica dues unitats del camp gravitatori.
7. Calcula el valor de l'acceleració de la gravetat a la superfície dels planetes següents:

PLANETA	MASSA	RADI	GRAVETAT
Venus	$4,9 \cdot 10^{24} \text{ kg}$	6.051,1 km	
Mart	$6,58 \cdot 10^{23} \text{ kg}$	3.376,1 km	
Júpiter	$1,9 \cdot 10^{27} \text{ kg}$	71.334 km	
Saturn	$5,69 \cdot 10^{26} \text{ kg}$	60.005,4 km	

8. Quin serà el valor de la intensitat del camp gravitatori a 400 km de distància de la superfície de la Terra?

## 4. Massa i pes

Els conceptes de massa i pes semblen equivalents en el llenguatge quotidià, però en el tècnic no ho són.

Aquest llibre té una massa que està relacionada amb la quantitat de matèria que té, i tindrà la mateixa massa aquí, a la Lluna, a Júpiter o al Sol.

La **massa** és una característica pròpia del cos, relacionada amb la seva quantitat de matèria.

La massa d'un cos es representa amb la lletra  $m$  i la seva unitat en el SI és el **quilogram** (kg).

Encara que la massa d'aquest llibre sigui la mateixa aquí que a qualsevol altre planeta del Sistema Solar o al Sol, el pes del llibre no és el mateix en cadascun d'aquests llocs.

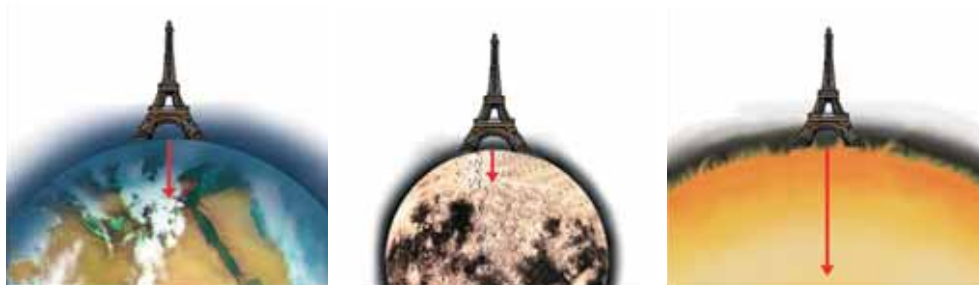
El pes d'un cos a la Terra és la força amb la qual la Terra atreu el cos, i depèn de la massa del cos i de la gravetat de la Terra.

El pes d'un cos és una força. Per tant, la seva unitat en el SI és el newton (N) i el seu mòdul es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$\text{Pes} = m \cdot g$$

on  $m$  és la massa (en el SI es mesura en quilograms, kg) i  $g$  és l'acceleració de la gravetat (en el SI es mesura en N/kg).

El pes d'un cos és diferent si aquest cos és a la Terra, a la Lluna o al Sol, ja que la gravetat és diferent a la Terra, a la Lluna o al Sol.



**Fig. 11:** El pes d'un mateix cos varia si es mesura a la Terra, a la Lluna o al Sol, pel fet que a tots tres llocs la gravetat és diferent.

OBJECTE	MASSA
Electró	$9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
Home	75 kg
Muntanya	$10^{12}$ kg
Terra	$5,98 \cdot 10^{24}$ kg
Protó	$1,7 \cdot 10^{-27}$ kg
Casa de fusta	$5 \cdot 10^4$ kg
Lluna	$7,4 \cdot 10^{22}$ kg
Sol	$2 \cdot 10^{30}$ kg

**Fig. 12:** Exemples de la massa d'alguns cossos.

### activitats proposades



9. La frase «aquest cos pesa 10 kg» és correcta? Raona la teva resposta.
10. Què representa la unitat de força 1 kgf? Raona la teva resposta.
11. Pesaràs igual a tota la Terra?
12. Calcula el teu pes a cada planeta dels quals has calculat el valor de la intensitat del camp gravitatori en l'apartat anterior.

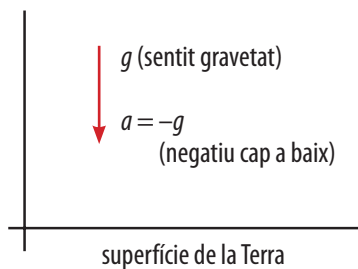
## 5. Caiguda lliure



Recorda que el valor de l'acceleració de la gravetat a prop de la superfície de la Terra és de  $9,8 \text{ m/s}^2$  i va dirigida cap al centre de la Terra. Es representa amb la lletra  $g$ .



El signe de l'acceleració de la gravetat és negatiu, ja que, si es pren com a sistema de referència la superfície de la Terra, el sentit de la gravetat és cap a baix.



Tots els cossos en els moviments verticals que cauen a prop de la superfície de la Terra es mouen amb una acceleració constant, que s'anomena **acceleració de la gravetat** i que és igual a la intensitat del camp gravitatori de la Terra.

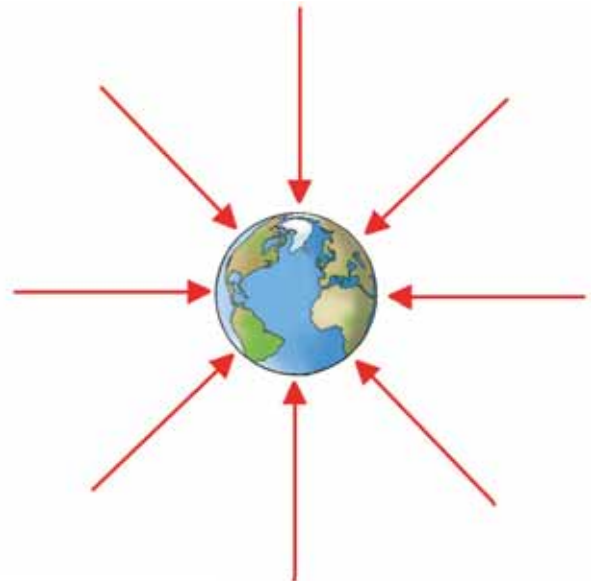
Si es pren com a sistema de referència la superfície de la Terra, l'acceleració de la gravetat és vertical i dirigida cap a baix.

Les equacions de la caiguda dels cossos són les d'un moviment rectilini uniformement accelerat amb l'acceleració  $a = -g$ .

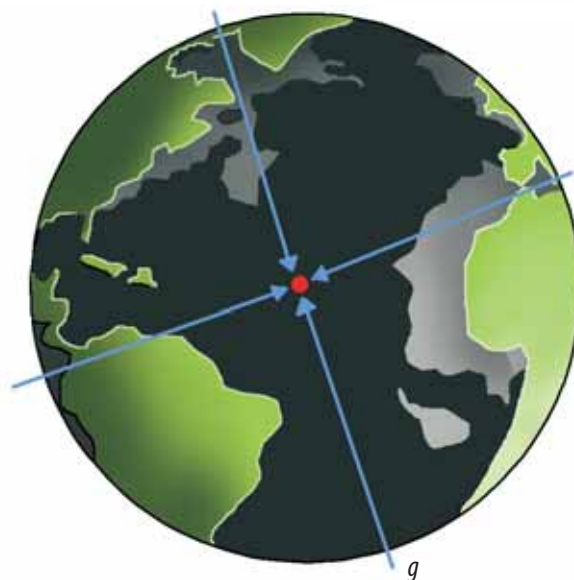
- **Equació de la posició (altura).** Aquesta equació indica l'altura a la qual es troba un cos segons el temps:

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

on  $y$  és l'altura;  $y_0$  és l'altura inicial;  $v_0$  és la velocitat vertical inicial;  $g$  és l'acceleració de la gravetat;  $t$  és el temps.



**Fig. 13:** Sentit d'acceleració de la gravetat de la Terra.



**Fig. 14:** Representació de la Terra com a sistema de referència i de la direcció del vector gravetat.

**Exemple resol't**

Es llança cap amunt una pilota a una velocitat inicial de 5 m/s. A quina altura estarà quan hagi passat mig segon?

Les dades del problema són:  $y_0 = 0$  (es llança des del terra);  $v_0 = 5$  m/s;  $t = 0,5$  s;  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

L'altura serà:

$$y = y_0 + v_0 \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 = 0 + 5 \cdot 0,5 - \frac{1}{2} \cdot 9,8 \cdot 0,5^2 = 0 + 2,5 - 1,23 = 1,27 \text{ m}$$

Es trobarà a 1,27 m.



Totes aquestes equacions tenen validesa si es menyspreen els efectes del fregament amb l'aire en la caiguda dels cossos.

- **Equació de la velocitat de caiguda.** Aquesta equació indica la velocitat de caiguda d'un cos en cada instant de temps:

$$v = v_0 - g t$$

on  $v_0$  és la velocitat inicial;  $v$  és la velocitat final;  $g$  és l'acceleració; i,  $t$  és el temps.

**Exemple resol't**

Un noi es deixa caure fent salt de pont. Quina velocitat tindrà als 0,25 segons? Expressa el resultat en km/h.

Les dades del problema són:  $v_0 = 0$  (es deixa caure);  $t = 0,25$  s;  $g = 9,8$  m/s<sup>2</sup>

La velocitat a la qual arriba al terra serà:

$$v = v_0 - g t = 0 \text{ m/s} - 9,8 \cdot 0,25 \text{ m/s} = -2,45 \text{ m/s}$$

La velocitat s'ha de passar a km/h:

$$v = -2,45 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ km}}{1.000 \text{ m}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = \frac{2,45 \cdot 3.600}{1.000} = -8,82 \text{ km/h}$$

El signe - de la velocitat indica que el noi va caient (sentit cap a baix).

**Investiga**

Dissena una sèrie d'experiments per comprovar si la massa influeix en la caiguda dels cossos. Després d'haver fet els experiments, investiga sobre l'estudi de la caiguda dels cossos que va fer Galileu i els seus descobriments. Redacta un informe amb les conclusions a què arribes.

**activitats proposades**

13. La velocitat de caiguda d'un cos depèn de la seva massa?
14. Representa la gràfica velocitat-temps d'un cos des que es llança cap amunt a una velocitat determinada fins que arriba a la màxima altura.
15. Es llança una pilota cap amunt. En el punt més alt, quin és el valor de la seva velocitat? I de l'acceleració?
16. Es deixa caure una bossa des d'una altura de 10 m. Calcula:
  - a) Altura quan  $t = 1$  s.
  - b) Velocitat a què arriba al terra.

## 6. Els viatges espacials

### 6.1 L'estat ingràvid

Si es deixa caure un objecte des d'una torre a 100 m d'altura, caurà al terra en la mateixa vertical del punt del llançament.

Si es llança aquest objecte des de la mateixa torre però a una velocitat cap endavant, caurà al terra, més lluny respecte a la vertical, però també caurà al terra. Si es torna a llançar des la mateixa torre l'objecte cap endavant però a més velocitat, tornarà a caure al terra, però molt més lluny que abans.

No obstant això, si es llança aquest objecte a una velocitat de 28.800 km/h, no caurà al terra, sinó que descriurà una òrbita circular al voltant de la Terra (sense tenir en compte les forces de fregament). Si la velocitat fos més gran que 28.800 km/h, l'objecte s'escaparia de l'atracció gravitatòria de la Terra i sortiria a l'espai exterior.

D'aquesta manera, si anéssim en un coet que estigués en caiguda lliure, tots els objectes que hi ha a la nau experimentarien la mateixa acceleració, és a dir, «caurien» de la mateixa forma. Per tant, els astronautes no poden notar els efectes de la gravetat.

Quan un cos no sent els efectes de la gravetat (es troba en caiguda lliure) es diu que està en un estat **ingràvid**. L'**estat d'ingravidesa**, o **ingravitació**, s'anomena a vegades **gravetat zero** o **microgravetat**, encara que els termes no siguin gaire correctes, ja que hi ha gravetat encara que no se'n puguin notar els efectes.

A les missions espacials, els astronautes, quan estan en òrbita al voltant de la Terra, estan en estat ingràvid. Per aquest motiu i perquè els astronautes s'acostumin a viure en estat d'ingravidesa, abans de fer les missions espacials fan entrenaments en estat d'ingravidesa en uns avions que puguen i baixen en paràboles, on s'aconsegueixen períodes de 20 segons en les baixades en estat d'ingravidesa.

Alguns d'aquests avions són AIRBUS 300 que pertanyen al programa de vols parabòlics de l'Agència Espacial Europea (ESA) i permeten fer recerques científiques i tecnològiques en breus períodes d'estat ingràvid.



**Fig. 15:** Maqueta d'un Airbus 300 Zero de l'Agència Espacial Europea (ESA) pertanyent al programa de vols parabòlics en què es fan recerques en estat d'ingravidesa («gravetat zero»).  
© CNES/ill. David Ducros

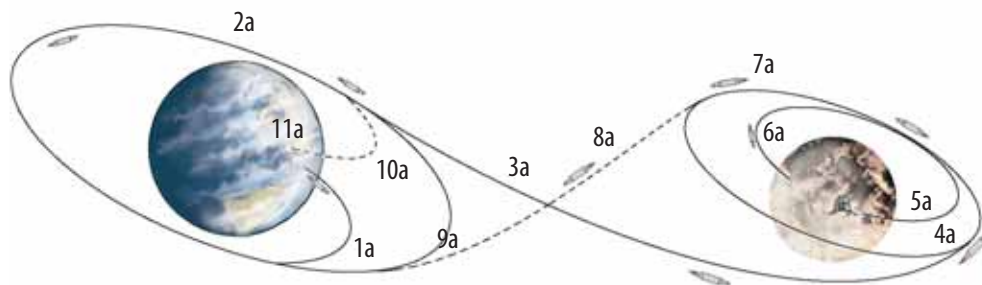
## 6.2 Els viatges espacials

Quan es fan viatges espacials, s'aprofita la força d'atracció gravitatòria entre els cossos per estalviar molt combustible. Imaginem que volem fer un viatge a la Lluna. El primer que podríem pensar és que per fer aquest viatge ens caldria un coet i combustible per poder empènyer el coet des de la Terra fins a la Lluna. El problema és que un viatge així seria molt car i implicaria grans problemes pel gran volum de combustible que ens caldria portar per poder arribar a la Lluna.

Per estalviar-se aquest problema, els viatges espacials utilitzen com a «combustible» la força d'atracció gravitatòria. D'aquesta manera, un viatge de la Terra a la Lluna i tornada a la Terra es faria en les fases següents:



**Fig. 16:** Edwin Aldrin, el segon astronauta que va trepitjar la Lluna el juliol de 1969, durant la missió de l'*Apollo XI* (el primer va ser Neil Armstrong), fent treballs de recerca científica sobre la superfície del satèl·lit.



**Fig. 17:** Representació de les fases que seguiria una nau espacial en un viatge hipotètic de la Terra a la Lluna.

D'aquesta manera, els motors del coet es farien servir a les fases 1a, 3a, 6a i 8a; a la resta de fases i dels viatges serien l'atracció gravitatòria de la Lluna al coet i l'atracció gravitatòria de la Terra al coet les responsables del viatge, sense cap despesa de combustible.

1a Llançament des de la Terra.
2a Òrbita al voltant de la Terra.
3a Llançament translunar.
4a Òrbita lunar.
5a Allunatge.
6a Llançament des de la Lluna.
7a Òrbita lunar.
8a Llançament transterrestre.
9a Òrbita terrestre.
10a Entrada a l'atmosfera terrestre.
11a Aterratge.

### activitats proposades



- 17.** Quan es diu que s'està en caiguda lliure?
- 18.** Cerca informació sobre les dificultats de la vida d'un astronauta en estat ingràvid.
- 19.** Busca informació sobre els vols de gravetat zero de l'ESA (Agència Espacial Europea).
- 20.** Fes un dibuix de com seria un viatge des de la Terra fins a Mart.



## Activitats finals

- Quina era la funció de la mitologia a l'època antiga?
- Per quin motiu el model geocèntric va tenir més acceptació a l'època antiga que el model heliocèntric?
- Fes una redacció que porti per títol *Del mite a Newton* i que tracti de l'evolució dels diferents models que hi ha hagut per explicar el moviment dels planetes.
- Com es pot justificar la frase «el Sol surt per l'est i es pon per l'oest»? Raona la resposta.
- Quines van ser les errades més importants del model astronòmic proposat per Copèrnic?
- Cerca informació de les tres lleis de Kepler sobre el moviment dels planetes i explica-les.
- Quina és la causa que fa que els planetes girin en una òrbita el·líptica al voltant del Sol? Qui ho va descobrir?
- Què diu la llei de la gravitació universal?
- El Sol atreu la Terra, però la Terra atreu el Sol? Raona la teva resposta.
- Calcula la força amb què la Terra atreu la Lluna si la massa de la Terra és  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg, la massa de la Lluna és  $7,4 \cdot 10^{22}$  kg i la distància entre la Terra i la Lluna és 384.000 km.
  - Amb quina força atraurà la Lluna la Terra?
- La força d'atracció gravitatòria entre dues masses iguals separades una distància de 10 m és  $4 \cdot 10^{-11}$  N. Quin serà el valor de les masses?
- A quina distància han d'estar separats dos cossos de 80 kg de massa cadascun perquè la força d'atracció gravitatòria entre els cossos sigui d'1 N?
- Dos cossos estan separats una distància d'1 m. Si s'augmenta la distància de separació entre els cossos a 2 m, 4 m i 10 m, com variarà la força d'atracció gravitatòria entre els cossos? Raona la teva resposta.
- Completa la taula amb les unitats en el SI de les magnituds següents:
 

Magnitud	Unitat SI
Massa	
Constant de gravitació universal	
Pes	
Camp gravitatori (gravetat)	
Distància	
- Comprova que 1 N/kg és equivalent a  $1 \text{ m/s}^2$ .
- Nosaltres vivim «enganxats a la Terra», però podríem escapar del camp gravitatori? Com? Raona la teva resposta.
- Fes un dibuix de la Terra amb les línies de camp gravitatori.
- Calcula el valor de la intensitat del camp gravitatori creat per un alumne de 4t d'ESO de 75 kg de massa en un punt que és a 2 m de distància de l'alumne.
- Per què és més gran la intensitat del camp gravitatori a la superfície de Júpiter que a la superfície de la Lluna? Cerca les dades necessàries per calcular el valor de la intensitat del camp gravitatori a la superfície de Júpiter i de la Lluna i compara els resultats.
- Quin serà el valor de la intensitat de camp gravitatori a una altura des de la superfície de la Terra equivalent a dos radis terrestres?  
Dades: massa de la Terra,  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg;  $R_T = 6.370$  km.

- 21.** A quina distància de la superfície de la Terra es redueix el valor del camp gravitatori a la meitat? Dades: massa de la Terra,  $5,98 \cdot 10^{24}$  kg;  $R_T = 6.370$  km;  $g_{\text{superfície}} = 9,8$  N/kg.
- 22.** Per què quan un astronauta és a la ISS (Estació Espacial Internacional), en òrbita a una altura de 400 km respecte a la superfície de la Terra, nota com sura, és a dir, no té gravetat? Raona la teva resposta.
- 23.** Indica quina o quines de les frases següents són correctes:
- Aquest sac de patates pesa 5 kg.
  - Aquest sac de patates pesa 5 kgf.
  - Aquest sac de patates té una massa de 5 kg.
  - Aquest sac de patates té una massa de 5 kgf.
- Raona la teva resposta.
- 24.** Digues on pesaràs més:
- Al cim d'una muntanya o al nivell del mar?
  - A Barcelona o al pol Nord?
  - A la Terra o a Mart?
  - Al Sol o en un forat negre?
- 25.** Busca informació sobre el concepte «velocitat d'escapament»: què és, com es calcula, quin és el seu valor per a la Terra, per al Sol, etc.
- 26.** Es volen fer unes competicions esportives al Sistema Solar i es fan proves a la Lluna, a Júpiter i a la Terra. Si els esportistes són els mateixos, digues on es realitzaran millors marques en les proves següents:
- Salt de llargària.
  - Llançament de javelina.
- Raona la teva resposta.
- 27.** Calcula l'altura màxima a què arriba un coet que es llança verticalment cap amunt a una velocitat de 72 km/h.
- 28.** Es deixa caure una pilota des d'una altura de 40 metres. Calcula:
- L'acceleració de caiguda.
  - La velocitat quan arriba al terra.
- 29.** Volem fer un viatge a Mart. Explica en quines fases s'hauria de fer, des del moment de sortida de la Terra fins al moment d'arribada a la superfície de Mart.
- 30.** Cerca informació i redacta un petit informe sobre les malalties que poden tenir els astronautes després d'haver passat llargues temporades en estat d'ingravedesa.
- 31.** Quina diferència hi ha entre el model de Kepler i el de Tycho Brahe?
- 32.** Quina diferència hi ha entre el model de Copèrnic i el de Kepler?
- 33.** W. Stukeley, al seu llibre *Memòries de la vida de sir Isaac Newton*, escriu el següent:
- Després del sopar [el 15 d'abril de 1726], amb clima agradable, vam sortir al jardí ell [Newton] i jo a prendre el te a l'ombra d'unes pomeres. En la conversa em va dir que estava en la mateixa situació que quan li va venir a la ment per primera vegada la idea de la gravitació. La va originar la caiguda d'una poma, mentre estava assegut, reflexionant. Va pensar: per què ha de caure la poma sempre perpendicularment a terra? Per què no cau cap a dalt o cap a un costat, i no sempre cap al centre de la Terra? La raó ha de ser que la Terra l'atreu. Hi ha d'haver una força d'atracció en la matèria; i la suma de la força d'atracció de la matèria de la Terra ha d'estar al centre de la Terra, i no en un altre costat. Per això la poma cau perpendicularment, cap al centre. Per tant, si la matèria atreu la matèria, ha de ser en proporció a la seva quantitat [la massa]. La poma atreu la Terra tant com la Terra atreu la poma. Hi ha una força, que es diu gravetat, que s'estén per tot l'Univers.
- Quines són les idees principals del text?
  - Què diu realment la llegenda de la poma i la gravetat?
  - La poma atrau la Terra? Raona la teva resposta.



## [ DIVULGACIÓ ]

## Els vestits espacials



Una imatge que crida molt l'atenció quan es parla de missions espacials és el vestit dels astronautes, i sempre ens fem una pregunta: per a què serveix aquest tipus de vestit tan «fort»?

La resposta va molt lligada a com és la vida a la superfície de la Terra, on tenim unes condicions que no es donen a l'espai i, per tant, quan sortim «fora» de la Terra ens hem de protegir mitjançant aquests vestits.

Potser, una bona manera d'entendre la importància de la protecció que proporciona un vestit espacial és pensar, per un moment, què et passaria si fessis un tomb per la Lluna sense el vestit espacial:

- La falta d'oxigen et deixaria inconscient en uns 15 segons. Al cap d'uns quants minuts, t'asfixiaries.
- Els gasos dissolts a la teva sang començarien a formar grans bombolles, com si la sang estigués bullint. Aquest efecte pot provocar la paràlisi i la mort.
- La baixa o nul·la pressió atmosfèrica faria que la pell i altres òrgans interns s'expandessin.
- Quedaries sotmès a variacions extremes de temperatura a les parts del teu cos en contacte amb la superfície de la Lluna. Patiries temperatures de 120 °C al sol i suportaries un fred de -200 °C a l'ombra.
- Estaries exposat a la radiació procedent del Sol i d'altres fonts còsmiques.
- Rebries l'impacte directe de diminutes partícules de pols interestel·lar que viatgen a grans velocitats.

**Fig. 18:** Edward H. White II va ser el primer astronauta nord-americà que va «passejar» per l'espai lliure de la força de gravetat, el 3 de juny de 1965, durant una missió del programa *Gemini* de la NASA.

Un vestit espacial crea al seu interior un ambient similar al terrestre i permet la mobilitat de l'astronauta. Per això, el vestit espacial té les característiques següents:

- Una atmosfera pressuritzada: dins del vestit l'aire assoleix prou pressió per mantenir els fluids corporals en estat líquid.
- Aportació d'oxigen i eliminació del CO<sub>2</sub>: els vestits espacials proporcionen oxigen pur. Aquesta aportació és necessària, ja que, a causa de la baixa pressió, l'ús d'aire normal donaria lloc a baixes concentracions d'oxigen a la sang. D'altra banda, el vestit proporciona mecanismes per netejar l'aire, retirant el CO<sub>2</sub> produït en la respiració.
- Una temperatura regulada: el cos de l'astronauta genera calor, especialment quan fa tasques que requereixen un esforç físic. En aquestes condicions, la calor i la suor alliberades poden convertir el vestit en una sauna, raó per la qual és important disposar d'un sistema que en refrigeri l'interior. Això es pot aconseguir fent circular aire fresc, o bé mitjançant conductes pels quals circula aigua refrigerada.
- Protecció contra micrometeorits: per aconseguir aquest objectiu, els vestits espacials disposen de diverses capes de teles resistents, com ara el Dacron o el Kevlar. Aquests materials, a més a més, eviten que es produeixin esquinçaments en cas de quedar enganxats en una aresta o superfície punxeguda.
- Protecció contra la radiació del Sol i de partícules procedents de l'espai: els vestits espacials estan fortament aïllats amb teixits especials i, a més, recoberts amb capes especials que reflecteixen la llum solar.

Els vestits espacials creen a l'interior una atmosfera similar a la terrestre, és a dir, ens proporcionen oxigen, eliminen el CO<sub>2</sub> i regulen la temperatura i la pressió.

**Activitat:**

Cerca informació sobre materials que es fan servir a la Terra avui dia i que es van descobrir fent-los servir en missions espacials.

## Mesura de l'acceleració de la gravetat

### [ EXPERIMENTA ]

#### Objectius:

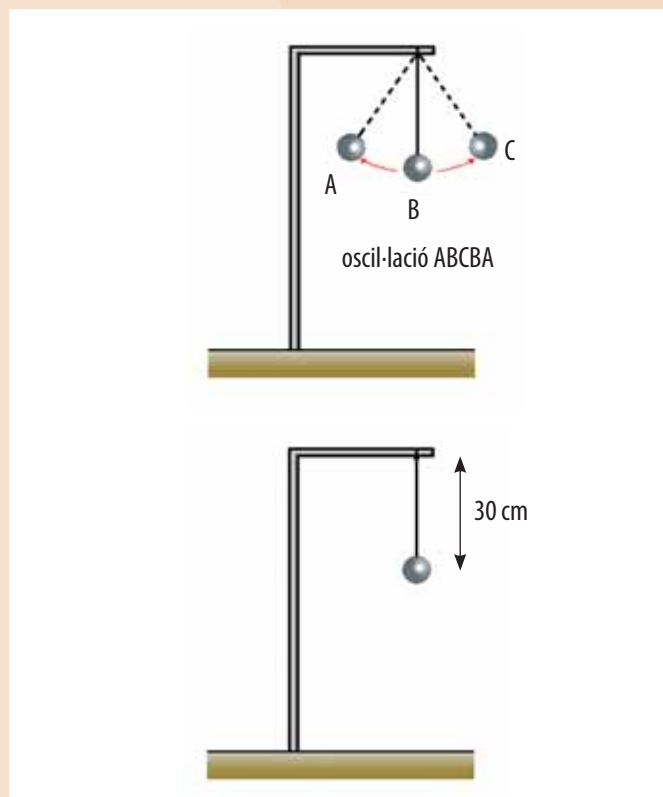
- Estudiar la força d'atracció gravitatòria sobre un pèndol.
- Mesurar les variables que intervenen en el moviment d'un pèndol.
- Relacionar el període d'oscil·lació d'un pèndol amb el càlcul de la gravetat.

#### Material:

- Cinta mètrica.
- Cronòmetre.
- Cordill.
- Esfera d'acer petita i pesant.

#### Procediment:

1. Talla un tros de cordill d'uns 40 cm de longitud i en un extrem lliga-hi l'esfera d'acer.



2. Fixa l'altre extrem del cordill al suport, de manera que l'esfera quedi penjant amb un cordill de 30 cm de longitud. Aquesta distància l'anomenem  $l$ .
3. Separa una mica la bola de la posició d'equilibri.
4. Deixa anar la bola i, al mateix temps, posa en marxa el cronòmetre.
5. Cronometra el temps que tarda la bola a descriure 15 oscil·lacions al voltant del punt d'equilibri. La posició a la qual arriba l'esfera anirà variant, però això no influirà en el resultat.
6. Divideix el temps resultant entre 15 per calcular el temps que tarda la bola en cada una de les oscil·lacions. Aquest valor del temps s'anomena període ( $T$ ).
7. Calcula el valor de la gravetat,  $g$ , per mitjà de l'expressió següent:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Aquesta expressió surt de l'aplicació de les lleis de Newton.

8. Repeteix l'experiment quatre vegades i anota els resultats a la taula:

$T(s)$	$g(m/s^2)$

9. Calcula el valor mitjà de la gravetat.

#### Activitats:

1. Per què es repeteix l'experiment? Seria fiable el resultat obtingut a partir d'una única dada? Per què?
2. Es pot aplicar aquest mètode per calcular la gravetat a la Lluna? Raona la teva resposta.
3. Per què no s'utilitza una bola més gran i menys pesant per fer l'experiment?
4. Què passaria si el cordill fos més llarg?
5. I què passaria si el cordill fos més curt?