physics | P07

teach with space

→ BALLES BARYCENTRIQUES

Les orbites et le centre de masse

Activités en classe et fiche de travail pour les élèves

European Space Agency

→ BALLES BARYCENTRIQUES

Les orbites et le centre de masse

EN BREF

Tranche d'âge : 14-18 ans

Type : démonstration par l'enseignant

Difficulté : facile

Durée de préparation pour l'enseignant : 1 heure pour la préparation du matériel

Temps nécessaire pour la leçon : 10 à 30 minutes

Coûts par kit : moyens (5-25 euros)

Lieu : en extérieur ou dans un grand espace intérieur (par ex. salle des fêtes/gymnase de l'école)

Comprend l'utilisation de : balles de tennis, roulements à billes

Liens pédagogiques

Physique
- Principe des moments/couple
- Centre de masse
- Orbites de planètes/satellites
- Effet Doppler
- Mécanique des corps en rotation

Mathématiques
- Principe des moments/couple
- Centre de masse
- Mécanique des corps en rotation

Astronomie
- Orbites de planètes/satellites
- Effet Doppler
- Étoiles binaires
- Détection des exoplanètes

Aperçu

Dans cette activité, le principe des moments est appliqué à un système en rotation afin de démontrer le concept de barycentre, ou centre de masse, et de montrer comment des objets qui sont en orbite l'un autour de l'autre se déplacent. Les élèves consolident ce concept en calculant le centre de masse d'une série de contextes astronomiques différents.

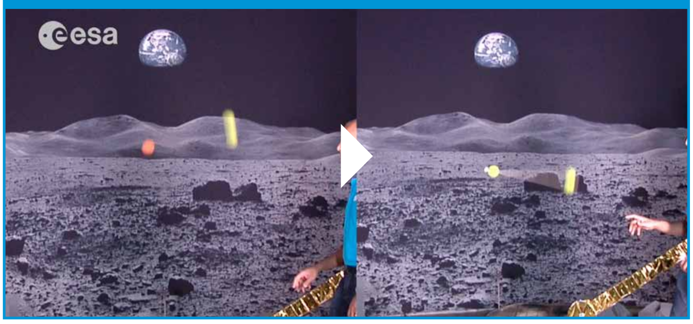
Ce que les élèves devraient déjà connaître

1. Le concept de principe des moments/couple ;
2. Le concept de l'effet Doppler appliqué au spectre électromagnétique.

Résultats de l'apprentissage

1. Les élèves apprendront ce qu'est le centre de masse et comprendront que dans un système gravitationnel comprenant deux corps ou plus, tous les objets sont en orbite autour d'un centre de masse commun.
2. Les élèves apprendront comment appliquer le principe des moments pour calculer le centre de masse d'un système à deux corps.
3. Les élèves appliqueront les concepts physiques à différentes situations astronomiques, apprendront ce que sont des systèmes d'étoiles binaires, des systèmes planète-lune et des planètes extrasolaires.

Ce dont vous aurez également besoin



↑ Vidéo sur les balles barycentriques (VP07a).
Vidéo « Barycentric balls in space » (système de balles).

Balles barycentriques balls

Quand on considère les orbites de planètes autour du Soleil, les lunes en orbite autour de leurs planètes-mère, ou les sondes spatiales orbitant autour de la Terre ou d'un autre corps céleste, on pourrait être tenté de supposer que l'un des objets (le moins massif) est en mouvement alors que l'autre reste fixe. Toutefois, la troisième loi de Newton, dont l'énoncé est

> *« Si un corps A exerce une force sur un corps B, alors le corps B exercera à cette occasion une force d'intensité égale, de même direction mais de sens opposé sur le corps A. »,*

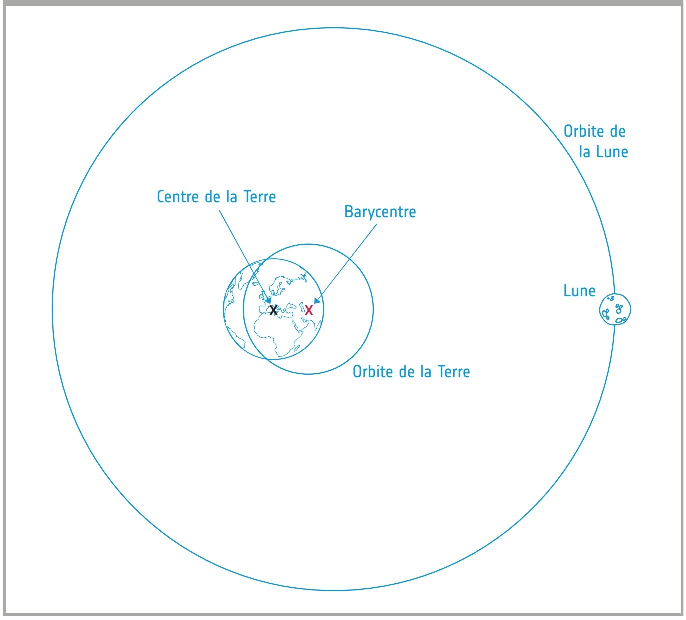
et qu'on décrit souvent comme « Toute action entraîne une réaction égale et de sens opposé », nous montre qu'il est clair que les deux objets exercent la même force d'attraction gravitationnelle l'un sur l'autre et que leurs trajectoires seront affectées par cette force gravitationnelle.

Cela signifie que si on considère un système composé de deux corps, par exemple la Terre et la Lune, ce n'est pas la Lune qui orbite autour de la Terre – mais la Terre et la Lune qui orbitent ensemble autour d'un point commun situé dans l'espace. Le point autour duquel les deux corps sont en orbite, le **centre de masse*** commun du système, est appelé le **barycentre***.

Quand l'un des objets est bien plus massif que l'autre, comme cela est le cas avec la Terre et la Lune (ou avec un satellite artificiel en orbite autour de la Terre), le mouvement orbital de l'objet le plus massif (la Terre) peut ne pas être visible aussi nettement. C'est parce que le barycentre, ou centre de masse, est bien plus proche du centre de la Terre que du centre de la Lune ou du satellite. La Figure A1 est une représentation du système Terre-Lune.

Les mêmes considérations s'appliquent au système solaire considéré comme un tout. Le Soleil concentre approximativement 99,85% de la masse du Système solaire. Le barycentre du Système solaire est ainsi proche du centre du Soleil et, par voie de conséquence, l'orbite du Soleil autour du barycentre ne peut être détectée qu'au prix d'observations de grande précision.

Figure A1



↑ Représentation schématique du système Terre-Lune (hors échelle), mettant en évidence la position du barycentre et les orbites de la Terre et de la Lune autour de ce point. Le barycentre est situé à près de 4 650 km du centre de la Terre, le rayon de la terre étant tout juste inférieur à 6 400 km. Le barycentre est environ 80 fois plus éloigné du centre de la Lune que du centre de la Terre.

* **Barycentre :** le centre de masse d'un système.
Centre de masse : point unique d'un objet ou d'un système où les composantes de poids de chaque point ont une résultante égale à zéro. Un objet est en équilibre quand il est suspendu à un point à cet emplacement.

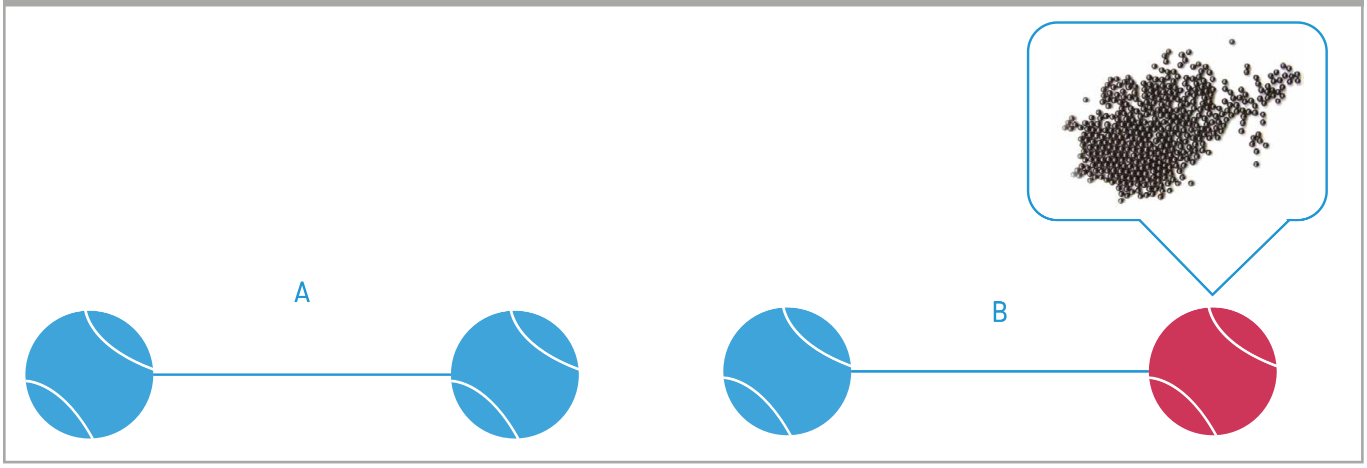
Dans cette démonstration, deux paires de balles de tennis préalablement assemblées sont utilisées pour montrer comment la position du barycentre d'un système de deux corps change avec la masse des deux corps. Les balles de la première paire ont chacune la même masse. Dans l'autre paire, l'une des balles est remplie de pièces de monnaie ou de roulements à billes pour en augmenter la masse.

Matériel

Les instructions pour la préparation des balles de tennis se trouvent en annexe.

- Paire de balles de tennis de masses égales reliées par une ficelle
- Paire de balles de tennis de masses inégales reliées par une ficelle

Figure A2



↑ A) Ensemble de balles de tennis de masses égales (vides).
B) Ensemble de balles de tennis de masses inégales : l'une des balles a été remplie de roulements à billes, de grains de plomb ou de pièces de monnaie et elle a été colorée pour l'identifier comme étant la balle la plus massive.

Instructions

Veuillez visionner la vidéo d'accompagnement : Teach with space – barycentric balls | VP07a. (Apprendre avec l'espace - balles barycentriques)

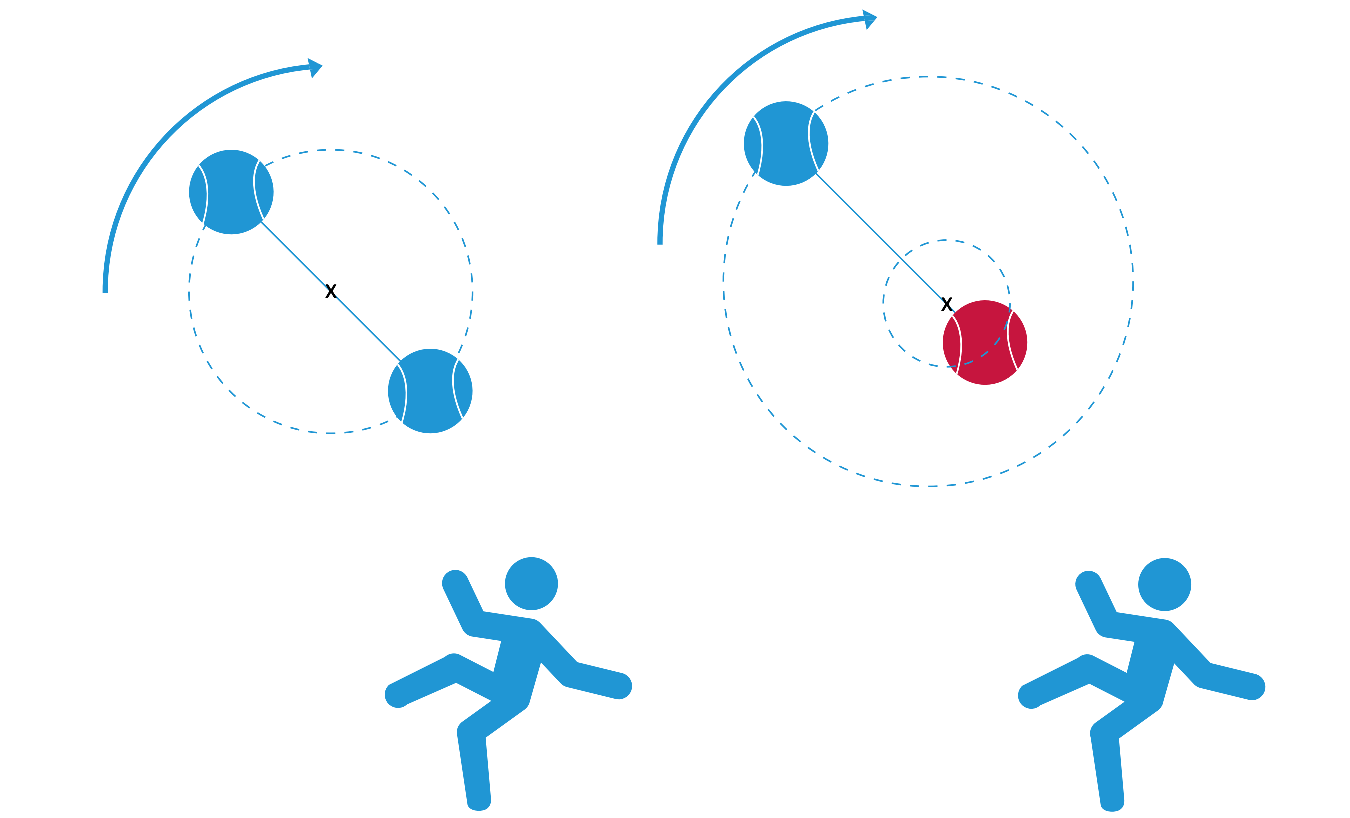
1. Tenez la paire de balles de tennis de masses égales en laissant une balle suspendue en-dessous de l'autre.

2. Faites plusieurs fois un mouvement de balancier pour leur faire prendre de l'élan et lâchez la balle que vous tenez en main.

3. Sur leur trajectoire, les balles tourneront toutes les deux autour du centre de masse du système. Dans le cas de balles de masses égales, il s'agit du centre de la ficelle (Figure A3).

4. Répétez l'opération avec la paire de balles de masses inégales. Le démonstrateur est libre de choisir s'il tiendra en main la balle la plus lourde ou la plus légère. Quand les balles de masses inégales sont lâchées, la balle la plus lourde parcourt nettement une orbite courte autour du centre de masse (c.-à-d. près de la balle lourde) alors que la balle la plus légère décrira une orbite beaucoup plus large (Figure A3). Plus la différence de masse est importante, plus le barycentre est proche de la balle de tennis la plus lourde.

Figure A3



↑ À gauche : le centre de masse, ou barycentre, de la paire de balles de masses égales se situe au centre du système, à la moitié de la longueur de la ficelle, à l'endroit marqué par un X. Les deux balles de tennis décrivent le même parcours orbital (ligne en pointillé).
À droite : le centre de masse, ou barycentre, de la paire de balles de masses inégales se situe bien plus près de la balle la plus massive et alourdie (colorée en rouge), à l'endroit marqué par un X. On observe que la balle la plus lourde parcourt un trajet/cercle orbital bien plus petit alors que la balle plus légère parcourt une orbite/cercle beaucoup plus large.

Santé et sécurité

- Cette démonstration devrait être effectuée à l'extérieur ou dans un local très spacieux comme la salle des fêtes ou le gymnase de l'école.
- Les élèves se tiendront bien en retrait.
- La personne qui effectue la démonstration devrait s'entraîner à lancer les balles avant de faire la démonstration devant la classe.
- Avant chaque démonstration, assurez-vous que tous les nœuds sont solides et que le trou utilisé pour remplir la balle plus massive est bien refermé.

Discussion

Après la démonstration, discutez avec les élèves de ce qu'ils ont observé. Sont énoncées plus bas quelques questions que l'on pourra poser pendant la discussion.

On trouvera en annexe une discussion guidée, basée sur ces questions et axée sur le lien avec l'espace. Une fiche de travail avec des calculs à faire par les élèves dans un contexte spatial est également fournie et peut être utilisée en cas de besoin.

La discussion a pour objet de faire saisir aux élèves les points cruciaux suivants :

- Un système comprenant deux objets ou plus possède un barycentre, ou centre de masse, commun autour duquel tous les objets orbitent.
- La position du barycentre dépend de la masse des objets. Quand deux objets ont la même masse, le barycentre se situe au centre géométrique du système. Quand les masses sont inégales, le barycentre sera plus proche du centre de masse de l'objet le plus massif.
- Avec un cas simple de système à deux corps, les élèves devraient être en mesure d'appliquer le principe des moments pour calculer la position du barycentre.
- La compréhension des barycentres est importante dans le contexte spatial, en appliquant par exemple le principe du barycentre pour détecter des planètes qui seraient sinon invisibles autour d'autres étoiles, jusqu'à la classification des corps célestes dans notre Système solaire, en faisant la distinction entre les planètes avec des lunes et les systèmes à doubles planètes.

Suggestions de questions :

- **Comment pouvons-nous trouver le barycentre d'un système ?**
- **Comment les astronomes font-ils pour trouver les barycentres de systèmes orbitaux distants dans l'espace, comme des systèmes d'étoiles binaires ou des planètes en orbite autour d'autres étoiles ?**
- **Comment utilise-t-on le concept de barycentre pour faire la différence entre une planète possédant un satellite naturel (la Lune) et deux planètes sur une orbite mutuelle autour d'un barycentre (système de planète double) ?**
- **Est-ce que Pluton fait partie d'un système de « planète naine double » ?**
- **Que se passe-t-il dans les systèmes d'étoiles binaires quand deux objets très massifs sont en orbite très proche l'un de l'autre ?**

→ CONCLUSION

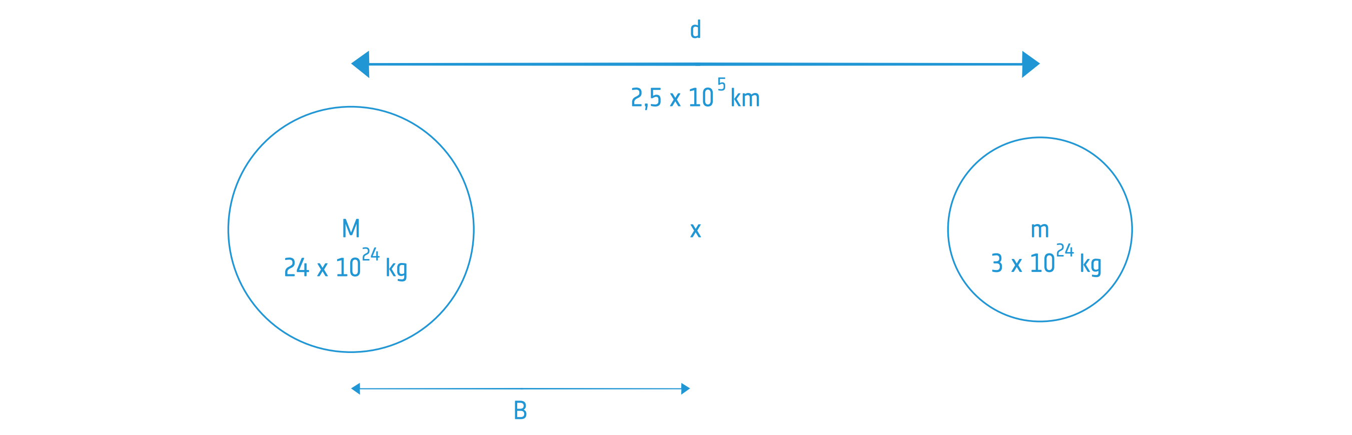
Cette activité explore deux concepts centraux de la physique et des mathématiques – le barycentre, ou centre de masse, et le principe des moments – au travers d'une démonstration simple, mais efficace. L'activité place ces concepts dans le contexte d'orbites dans l'espace, de lunes, de planètes doubles et d'étoiles binaires afin de stimuler l'imagination des élèves.

Barycentres in space

Questions

1. Pour les objets de la Figure W1, trouvez la distance du barycentre par rapport au centre de l'objet M et ensuite par rapport au centre de l'objet m.

Figure W1



2. a) La Lune a une masse de 0,0123 M_T (avec M_T la masse de la Terre) et la séparation entre le centre de la Terre et le centre de la Lune est de 384 000 km. Si le rayon de la Terre est de $6{,}37 \times 10^3$ km, montrez que la Terre et la Lune forment un système planète-lune.

   b) Quelques données pour Pluton et sa plus grande lune, Charon, extraites des NASA Lunar and Planetary Science factsheets (Fiches d'information de la NASA sur la Lune et les Planètes), sont reproduites ci-dessous :

Masse de Pluton	$1{,}31 \times 10^{22}$ kg
Rayon de Pluton	1 195 km
Masse de Charon	$1{,}62 \times 10^{21}$ kg
Séparation des centres	19 600 km

   Montrez si Pluton et Charon sont un système planète-lune ou un système de planète double.

3. Le Soleil a un diamètre de 1,4 million de km et Jupiter un rayon de 140 000 km. La distance moyenne entre le Soleil et Jupiter est de 778 millions de kilomètres. La masse du Soleil est approximativement 1 000 fois celle de Jupiter. Calculez la position du barycentre du système Soleil-Jupiter et commentez son emplacement.

4. Dans la vidéo « Teach with space – barycentric balls in space | VP07b », l'astronaute de l'ASE, Samantha Cristoforetti, démontre le principe barycentrique en microgravité à bord de la Station spatiale internationale (ISS).

   Dans le premier scénario, Samantha relie les deux balles de baseball entre elles avec une aiguille à tricoter. Les deux balles sont de masses égales et le barycentre se situe alors au centre géométrique du système, le centre de l'aiguille à tricoter. Quand Samantha applique une force à l'une des deux balles, le système tourne autour de son barycentre. Puis Samantha applique une force, cette fois-ci à l'emplacement du barycentre, alors le système complet se déplace dans l'espace, mais ne tourne pas.

   Dans le second scénario, Samantha remplace l'une des balles de baseball par une autre de taille similaire, mais de masse différente. Quand Samantha applique une force à la nouvelle balle, le système tourne autour du barycentre qui ne se situe plus au centre géométrique du système. Comme précédemment, quand Samantha applique une force à l'emplacement du barycentre, le système ne tourne plus, mais translate.

   Sachant que la masse d'une balle de baseball est de 0,145 kg, que la longueur de l'aiguille à tricoter est de 0,3 m et que le barycentre se situe au quart de la distance entre le centre de la balle de baseball et le centre de l'autre balle, quelle est la masse de la seconde balle ? Quel est l'objet le plus massif ?

→ ANNEXE

Comment préparer les deux jeux de balles de tennis

Dans chaque cas, deux balles de tennis sont reliées entre elles par un morceau de ficelle solide. Les balles de la première paire sont de masses égales. Dans la seconde paire de balles de tennis, l'une des balles est remplie de roulements à billes ou de pièces de monnaie afin d'obtenir une paire d'objets de masses inégales.

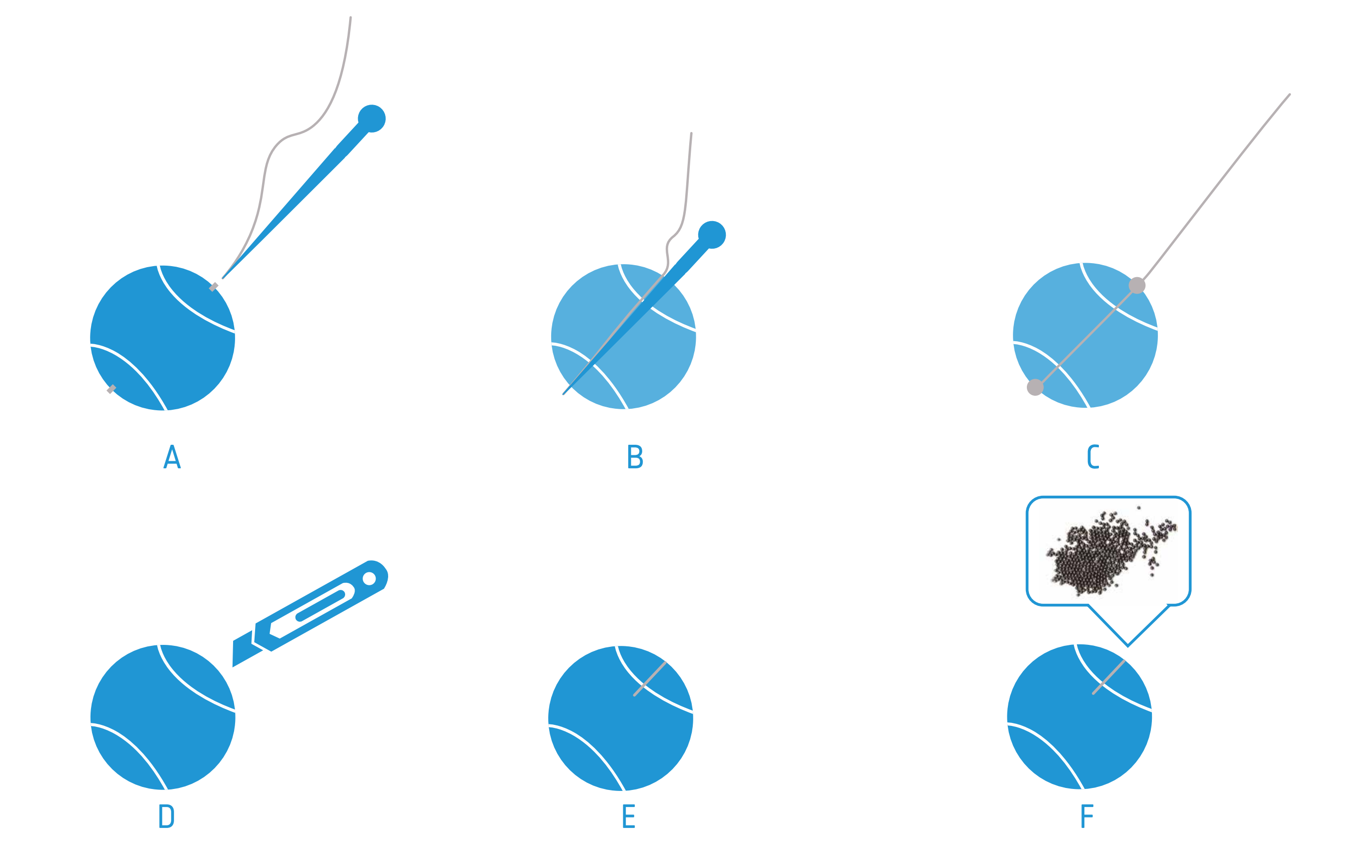
Matériel

- 4 balles de tennis
- Ficelle résistante
- Ciseaux
- Marqueur
- Aiguille à tricoter (ou tournevis)
- Roulements à billes/grains de plomb/petites pièces de monnaie – en quantité suffisante pour remplir l'une des balles
- Colle forte ou adhésif puissant
- Ruban adhésif
- Cutter

Instructions

1. Coupez un bout de ficelle de 60 cm de longueur environ.
2. Fixez une extrémité de la ficelle à l'aiguille à tricoter avec du ruban adhésif.
3. Percez la balle de tennis avec l'aiguille pour faire un petit trou. La pointe de l'aiguille à tricoter doit ressortir de l'autre côté de la balle, en faisant un deuxième trou – il pourrait être plus commode de tracer deux points sur la balle pour vous aider. Quand la pointe de l'aiguille ressort du côté opposé de la balle, retirez le ruban adhésif et faites un double nœud pour fixer la ficelle (voir la Figure AX1 A-B).
4. Tirez l'aiguille à tricoter hors du trou initial et faites un double nœud dans la ficelle. La ficelle est maintenant solidement fixée à la balle avec des nœuds des deux côtés. Si nécessaire, renforcez les alentours des trous avec de la colle ou du ruban adhésif fort (voir la Figure AX1 C).
5. Répétez les étapes 1-4 avec une seconde balle de tennis et l'extrémité opposée de la ficelle. Les deux balles de tennis devraient être séparées par une longueur de ficelle de 40-50 cm environ.
6. Répétez les étapes 1-5 avec un second jeu de balles de tennis. Assurez-vous que la longueur de ficelle entre les deux balles est sensiblement la même dans les deux cas.
7. Choisissez l'un des deux jeux de balles. Avec le cutter, pratiquez une petite incision dans l'une des balles. Insérez des roulements à billes/grains de plomb/petites pièces de monnaie jusqu'à ce que la balle soit remplie. Refermez l'incision avec de la colle ou du ruban adhésif fort. (Voir la Figure AX1 D-F).
8. Colorez/marquez la balle pleine avec le marqueur.

Figure X1



↑ Comment assembler les deux jeux de balles de tennis.

Comment pouvons-nous trouver le barycentre d'un système ?

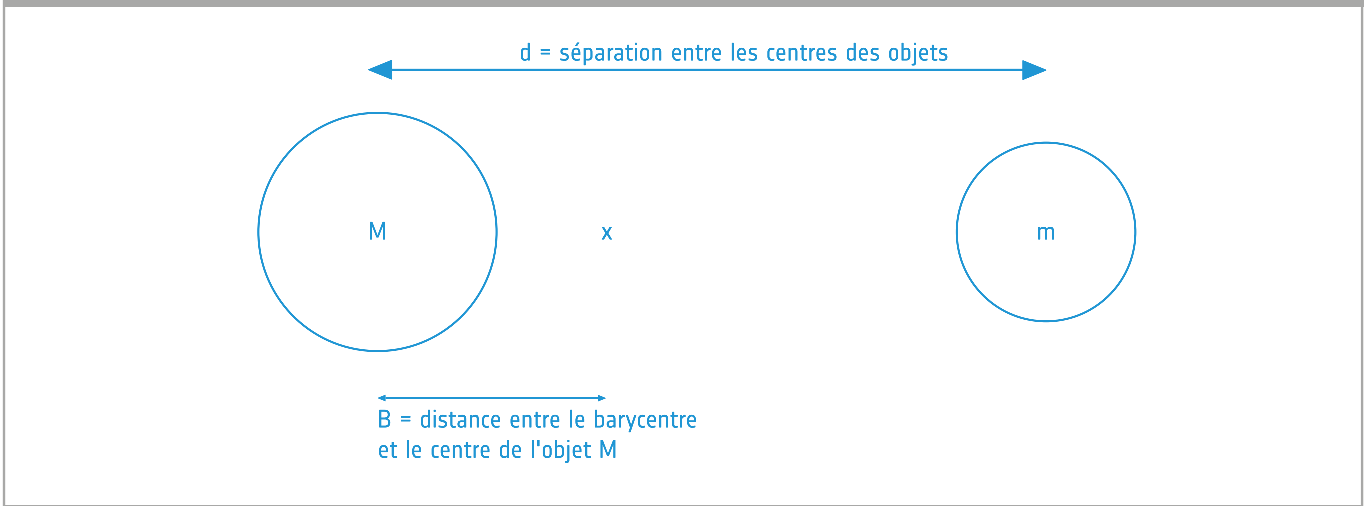
Dans l'espace, chaque système dans lequel deux objets ou plus sont en orbite les uns autour des autres possède un centre de masse, ou barycentre, autour duquel tous les corps orbitent.

Le cas simple : un système composé de deux corps
Dans le cas simple d'un système composé de deux corps, le centre de masse, ou barycentre, est le point autour duquel les deux objets orbitent. On peut s'imaginer le barycentre comme étant le « point d'équilibre » du système.

Si nous connaissons la masse de deux objets et la distance qui les sépare, nous pouvons alors calculer la position du barycentre en appliquant le principe des **moments***. Commençons par visualiser le système comme étant en équilibre sur un point pivot, comme deux personnes sur une balançoire à bascule. Si ce pivot était situé au barycentre, alors les moments de chaque côté s'annuleraient si le système était placé dans un champ gravitationnel externe imaginaire.

Examinez le système composé de deux objets de la Figure X2. Les objets ont respectivement une masse M et m et leurs centres sont séparés par la distance d. Le barycentre se situe entre les deux objets. B est la distance entre le centre de l'objet le plus massif et le barycentre.

Figure X2



↑ Deux objets (de masses M et m) en orbite autour d'un centre de masse commun ou barycentre. Les objets sont séparés par une distance d, B étant la distance entre le centre de l'objet le plus massif M et le barycentre.

Si nous appliquons le principe des moments au centre de masse (le barycentre), nous obtenons alors :

Somme des moments dans le sens horaire autour du barycentre	=	somme des moments dans le sens antihoraire autour du barycentre

c.-à-d. que les moments s'annuleront. Ainsi, pour le système de la Figure X2 :

* **Moment :** tendance à produire un mouvement, notamment de rotation autour d'un point ou d'un axe.

B = distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M (en mètres)
d = séparation entre les centres de masse des deux objets (en mètres)
m = masse de l'objet le plus petit (en kg)
M = masse de l'objet le plus grand (en kg)

Donc :

$$M \times B = m \times (d - B)$$
$$MB = md - mB$$
$$MB + mB = md$$
$$B \times (M + m) = md$$

On obtient la distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M avec :

$$B = md/(M+m)$$

Comment les astronomes font-ils pour trouver les barycentres de systèmes orbitaux distants dans l'espace, comme des systèmes d'étoiles binaires ou des planètes en orbite autour d'autres étoiles ?

À l'échelle des distances astronomiques, le mouvement des étoiles dans un système d'**étoiles binaires*** autour de leur barycentre est difficile à détecter. Alors que la distance physique entre les étoiles peut atteindre plusieurs millions de kilomètres, de notre point de vue ou depuis un endroit proche de la Terre, le mouvement des étoiles dans le ciel est infime – il peut représenter à peine un millième de degré, voire moins.

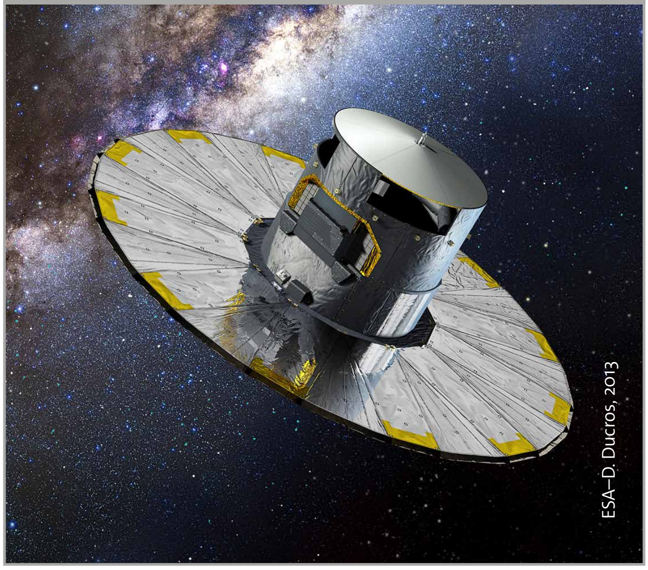
Mais il y a encore plus difficile à observer que les mouvements des étoiles binaires. En effet il y a aussi les petites « oscillations » infligées à une étoile-mère par le mouvement d'une planète (une **exoplanète***) orbitant autour de leur centre de masse commun – dans un système planète-étoile, le barycentre sera situé à l'intérieur de l'étoile-mère. Pour détecter ces minuscules mouvements, il faut mesurer avec une grande précision les positions des étoiles, cela de nombreuses fois, afin de de discerner les oscillations.

Le saviez-vous ?

En décembre 2013, l'Agence spatiale européenne lançait l'observatoire Gaia (Figure X3) afin de cartographier avec précision les positions et les caractéristiques de près de 1,2 milliard d'étoiles de notre galaxie, la Voie lactée. Gaia marche pour ainsi dire dans les traces de la précédente mission de l'ASE qui s'appelait Hipparcos.
– Hipparcos a été lancé en 1989 (Figure X4). Pendant une durée de quatre années, Hipparcos a relevé avec beaucoup de détails la position de près de 120.000 étoiles dans le ciel. Les mesures effectuées par Hipparcos ont permis de déterminer les barycentres de nombreux systèmes d'étoiles binaires. Dans le cas de quelques systèmes, les résultats ne correspondaient pas aux attentes, suggérant ainsi la présence de compagnons, certains d'entre eux ayant d'ailleurs été confirmés plus tard à la faveur d'autres observations. L'étude de la position et des mouvements d'étoiles dans le plan du ciel, plus connue comme la science de l'**astrométrie***, n'est qu'une des techniques qu'emploient les astronomes pour détecter la présence d'étoiles ou de planètes compagnon. Une autre technique complémentaire, appelée la méthode des **vitesses radiales***, emploie l'effet Doppler pour détecter une « oscillation » dans le spectre lumineux de l'étoile observée. Pour une discussion au sujet de ces techniques et pour s'informer sur d'autres méthodes de détection d'exoplanètes, voir dans la section Liens sous « Comment trouver une planète extrasolaire ».

* **Astrométrie :** une branche de l'astronomie employant des mesures précises des positions et des mouvements des objets célestes.
Étoiles binaires : deux étoiles en orbite autour de leur barycentre commun.
Exoplanète / planète extrasolaire : une planète en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil.
Vitesse radiale : la vitesse d'un objet le long de l'axe de visée entre deux objets.

Figure X3



↑ Vue d'artiste de la sonde spatiale Gaia de l'ASE.

Figure X4

↑ Hipparcos a relevé la position de deux millions d'étoiles.

Comment utilise-t-on le concept de barycentre pour faire la différence entre une planète avec un satellite naturel (une lune) et deux planètes sur une orbite mutuelle autour d'un barycentre (système de planète double) ?

Dans un système comprenant deux objets orbitant l'un autour de l'autre, le barycentre sera toujours plus proche du centre de masse de l'objet le plus massif. Plus la différence de masse entre les deux objets est grande, plus le barycentre sera proche du centre de masse de l'objet le plus massif.

C'est la raison pour laquelle dans un système de deux corps avec une très grande différence de masse entre les objets, le barycentre se situera à l'intérieur de l'objet le plus massif. Ainsi on voit l'objet le plus léger orbiter autour de l'objet le plus lourd. Une manière simple de le visualiser est :

Un système **planète-lune** est un système dont le barycentre se situe à l'intérieur de l'objet (planète) le plus lourd.

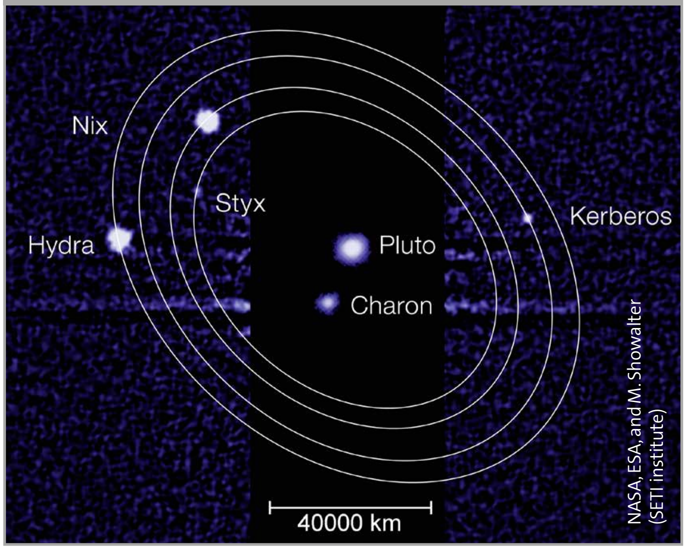
Un système de **planète double** est un système dont le barycentre se situe à l'extérieur des surfaces des deux objets.

Les principes barycentriques s'appliquent à un quelconque système en orbite, comme les systèmes d'étoiles binaires ou multiples, de même qu'aux planètes en orbite autour de leur étoile-hôte et aux satellites et sondes spatiales en orbite autour de la Terre et d'autres corps du système solaire.

Est-ce que Pluton fait partie d'un système de « planète naine double » ?

Alors que Pluton a été rétrogradée au rang de **planète naine*** (en 2006), des observations répétées de ses lunes suggèrent que le système plutonien serait bien plus complexe. Pluton possède cinq lunes. La plus proche de ses lunes, Charon, est bien plus proche de Pluton en termes de taille et de masse que les quatre autres lunes. En fait, le système complet orbite autour du barycentre entre Pluton et Charon alors qu'on s'attendrait à ce que le barycentre se situe à l'intérieur du rayon de Pluton comme cela serait le cas pour une planète naine avec cinq lunes. On désigne donc parfois Pluton et Charon comme un système de deux planètes naines possédant quatre lunes plus petites. La Figure X5 montre une image que le télescope spatial Hubble (HST) a prise de Pluton et Charon accompagnés de leurs quatre petites lunes. Les orbites des quatre lunes plus petites sont en surimpression. La Figure X5 fait clairement apparaître que le barycentre du système se situe entre Pluton et Charon.

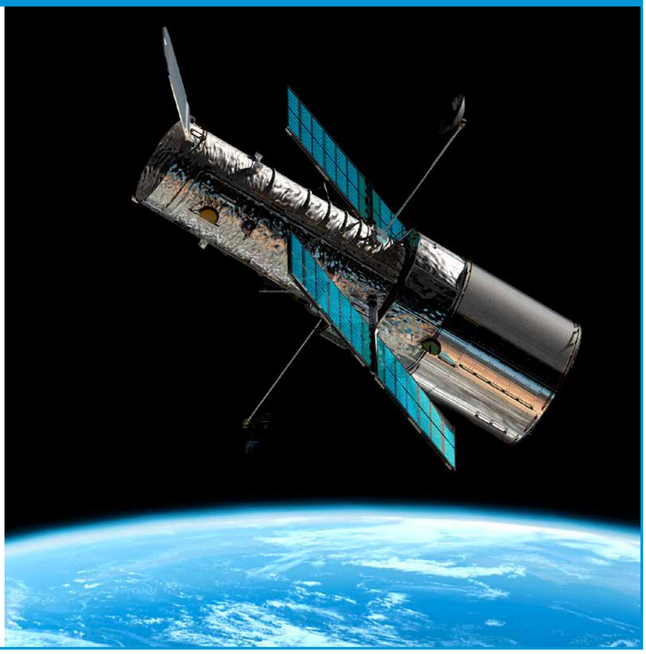
Figure X5



↑ Photo du télescope spatial Hubble (HST) montrant les quatre petites lunes orbitant autour du système de doubles planètes naines Pluton-Charon. Les trajectoires orbitales des plus petites lunes sont en surimpression.

Le saviez-vous ?

Le télescope spatial Hubble (HST) est un projet conjoint de l'ASE et de la NASA. Il a été placé en 1990 sur une orbite à 600 kilomètres de la surface de la Terre et il est l'un des observatoires spatiaux les plus grands et les plus réussis de tous les temps. Depuis son point d'observation hors de l'atmosphère terrestre en constant mouvement, ce qui a pour effet de déformer les rayons lumineux qui parviennent sur la Terre depuis l'espace, le HST Hubble nous a offert d'étonnantes images en haute résolution de milliers d'objets de l'espace comme des planètes, des systèmes d'étoiles binaires, des galaxies, des nébuleuses et des régions de l'espace dans lesquelles naissent des étoiles. Le HST a profondément changé notre vision de l'Univers.



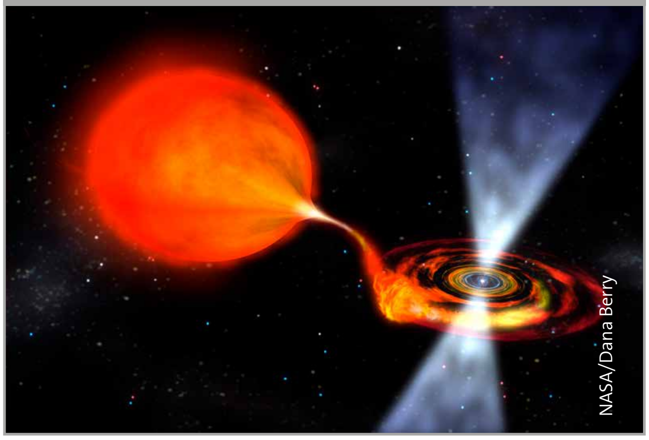
* **Planète naine :** un objet de masse planétaire qui n'est ni une planète ni un satellite naturel. Une planète naine est suffisamment massive pour que sa forme soit pratiquement sphérique. Elle orbite directement autour du Soleil, mais elle n'a pas fait place nette dans son voisinage orbital. Le terme planète naine a été adopté en 2006 par l'Union astronomique internationale. Actuellement, cinq objets du Système solaire sont classés comme planètes naines – Pluton, Cérès, Hauméa, Makémaké et Éris. Cérès se trouve dans la Ceinture d'astéroïdes alors que les quatre autres planètes naines se situent au-delà de l'orbite de Neptune. On suppose que de nombreuses autres planètes naines existent dans les confins glacés du Système solaire

Que se passe-t-il dans les systèmes d'étoiles binaires quand deux objets très massifs sont en orbite très proche l'un de l'autre ?

Un système d'étoiles binaires est composé de deux étoiles assez proches l'une de l'autre pour que des interactions gravitationnelles les contraignent d'orbiter autour d'un barycentre commun. Les étoiles binaires particulièrement proches l'une de l'autre subissent souvent un transfert de masse de l'une vers l'autre. La Figure X6 est une vue d'artiste d'un tel système binaire proche dans lequel une **étoile à neutrons*** en rotation, appelée un **pulsar*** tire de la masse de son étoile compagnon.

Quel serait l'effet de ce transfert de masse sur le barycentre et, par voie de conséquence, sur les caractéristiques orbitales de ce système binaire ? À mesure que le pulsar absorbe de la masse de son étoile compagnon, sa masse augmentera et celle de l'étoile compagnon diminuera. Le barycentre se rapprochera alors du pulsar. Avec le temps, l'étoile compagnon orbitera autour du pulsar.

Figure X6



↑ Vue d'artiste d'une étoile en rotation rapide appelée pulsar en train d'aspirer de la masse de son étoile compagnon. La forte gravité du pulsar dense (à droite) attire la matière de l'étoile compagnon (à gauche).

* **Étoile à neutrons :** les restes d'une grande étoile qui a explosé à la fin de sa vie. Les étoiles à neutrons sont extrêmement petites, mais leur masse est importante et leur densité est donc très élevée.
Pulsar : une étoile à neutrons en rotation possédant un puissant champ magnétique. Un pulsar émet un faisceau de radiations qui, s'il est aligné avec la Terre, peut être vu comme un « éclat » périodique dans les longueurs d'ondes radio.

Glossaire

Astrométrie : une branche de l'astronomie employant des mesures précises des positions et des mouvements des objets célestes.

Barycentre : le centre de masse d'un système.

Centre de masse : point unique d'un objet ou d'un système dans lequel les composantes de poids de chaque point ont une résultante égale à zéro. Un objet est en équilibre quand il est suspendu à un point à cet emplacement.

Étoile à neutrons : les restes d'une grande étoile qui a explosé à la fin de sa vie. Les étoiles à neutrons sont extrêmement petites, mais leur masse est importante et leur densité est donc très élevée.

Étoiles binaires : deux étoiles en orbite autour de leur barycentre commun.

Exoplanète / planète extrasolaire : une planète en orbite autour d'une autre étoile que le Soleil.

Moment : tendance à produire un mouvement, notamment de rotation autour d'un point ou d'un axe.

Planète naine : un objet de masse planétaire qui n'est ni une planète ni un satellite naturel. Une planète naine est suffisamment massive pour que sa forme soit pratiquement sphérique. Elle orbite directement autour du Soleil, mais elle n'a pas fait place nette dans son voisinage orbital. Le terme planète naine a été adopté en 2006 par l'Union astronomique internationale. Actuellement, cinq objets du Système solaire sont classés comme planètes naines – Pluton, Cérès, Hauméa, Makémaké et Éris. Cérès se trouve dans la Ceinture d'astéroïdes alors que les quatre autres planètes naines se situent au-delà de l'orbite de Neptune. On suppose que de nombreuses autres planètes naines existent dans les confins glacés du Système solaire.

Pulsar : une étoile à neutrons en rotation possédant un puissant champ magnétique. Un pulsar émet un faisceau de radiations qui, s'il est aligné avec la Terre, peut être vu comme un « éclat » périodique dans les longueurs d'ondes radio.

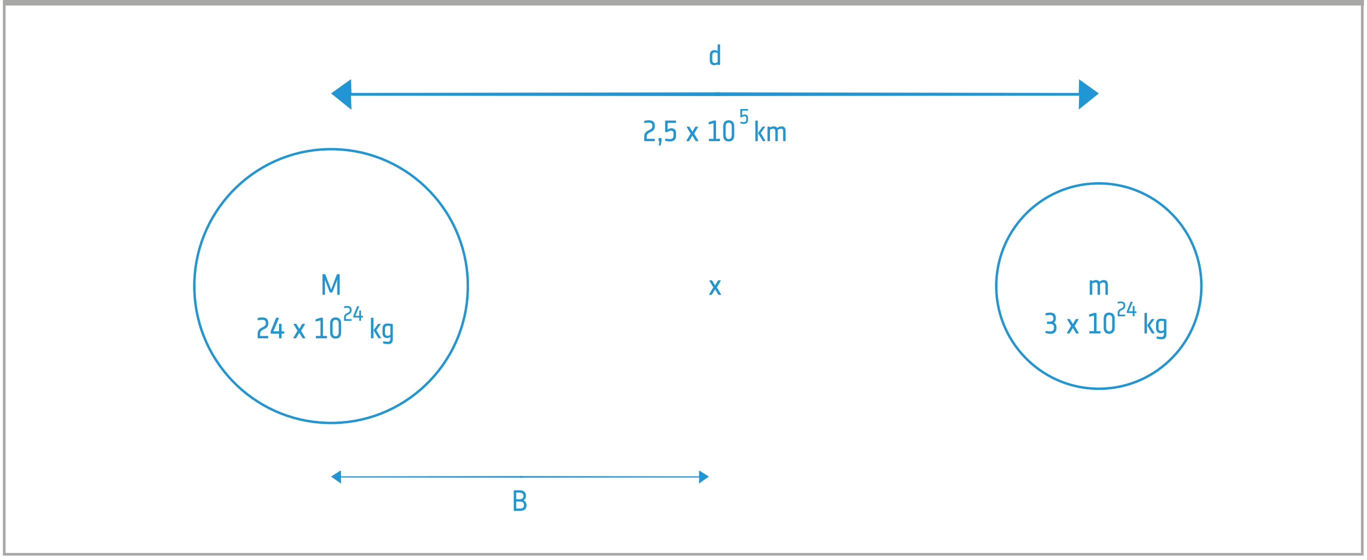
Vitesse radiale : la vitesse d'un objet le long de l'axe de visée entre deux objets.

Barycentres dans l'espace

Questions

1. Pour les objets de la Figure W1, trouvez la distance du barycentre par rapport au centre de l'objet M et ensuite par rapport au centre de l'objet m.

Figure W1



B = distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M (km)
d = séparation entre les centres de masse des deux objets (km)
m = masse de l'objet le plus petit (kg)
M = masse de l'objet le plus grand (kg)

En suivant les dérivations des pages 7-8, on obtient la distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M comme :

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

En insérant les chiffres,

$$B = \frac{(3 \times 10^{24})(2,5 \times 10^{5})}{(24 + 3) \times 10^{24}}$$

$$B = 27\,778 \text{ km}$$

Le barycentre se situe à 28 000 km environ du centre de l'objet M.

Les deux objets sont séparés par $2,5 \times 10^5$ km

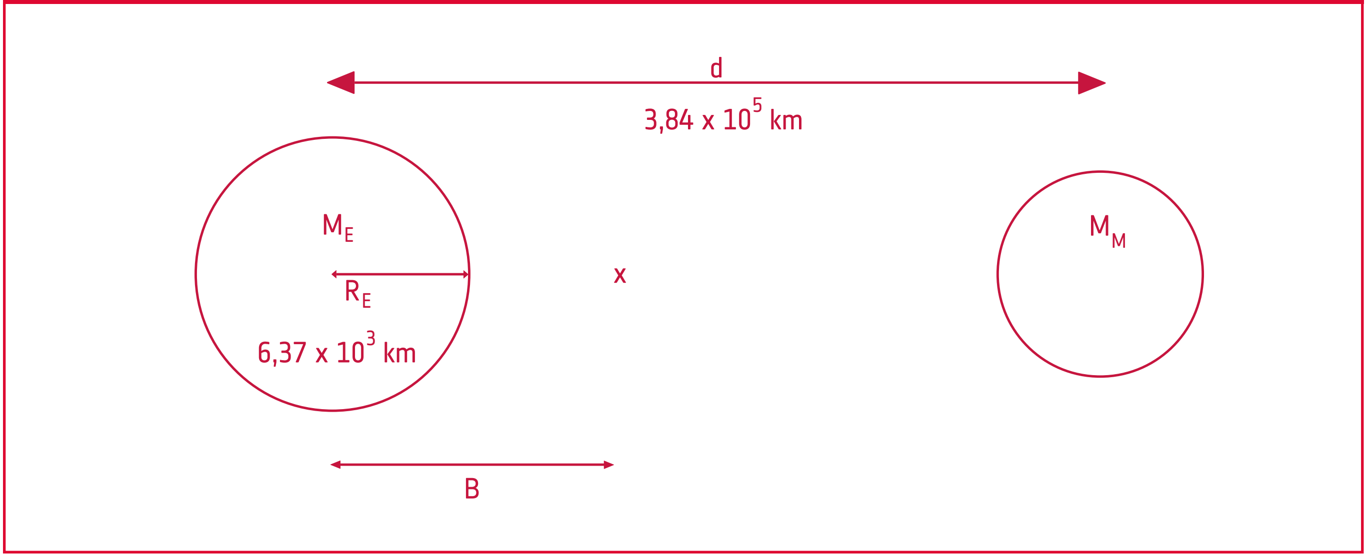
Donc, la distance entre l'objet m et le barycentre est :

$$2,5 \times 10^5 - 2,8 \times 10^4 = 2,22 \times 10^5 \text{ km}$$

Le barycentre se situe à 222 000 km environ du centre de l'objet m.

2. a) La Lune a une masse de 0,0123 M_T (avec M_T la masse de la Terre) et la séparation entre le centre de la Terre et le centre de la Lune est de 384 000 km. Si le rayon de la Terre est de 6,37 x 10^3 km, montrez que la Terre et la Lune forment un système planète-lune.

Figure W2



B = distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M (km)
d = séparation entre le centre de la Terre et le centre de la Lune (km)
M_L = masse de la Lune (kg) = m
M_T = masse de la Terre (kg) = M

D'après ci-dessus,

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

Les masses de la Terre et de la Lune ne sont pas indiquées, seulement le rapport entre elles. Ainsi, en estimant que la masse de la Terre est 1, la masse de la Lune est donc 0,0123 et ainsi,

$$B = \frac{0{,}0123 \times (3{,}84 \times 10^5)}{(0{,}0123 + 1)} = 4\ 666 \text{ km}$$

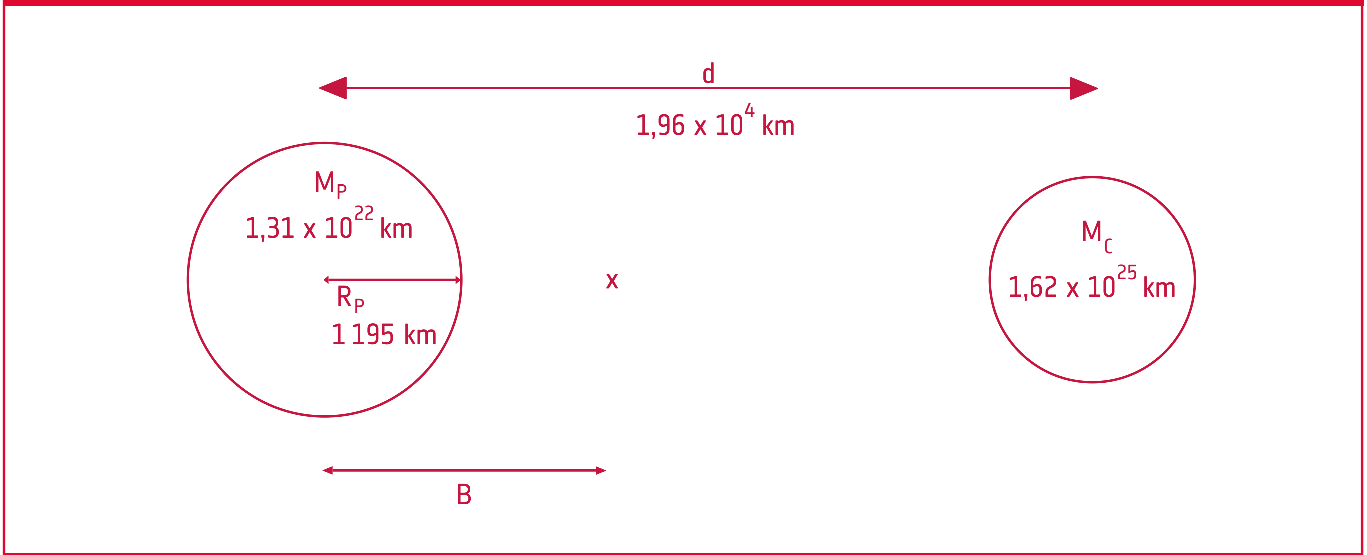
Puisque le rayon de la Terre est de 6 370 km, le barycentre se situe à l'intérieur de la Terre et c'est pourquoi la Terre et la Lune sont considérées comme un système planète-lune.

b) Quelques données pour Pluton et sa plus grande lune, Charon, extraites des NASA Lunar and Planetary Science factsheets (Fiches d'information de la NASA sur la Lune et les Planètes), sont reproduites ci-dessous :

Masse de Pluton	**$1{,}31 \times 10^{22}$ kg**
Rayon de Pluton	**1 195 km**
Masse de Charon	**$1{,}62 \times 10^{21}$ kg**
Séparation des centres	**19 600 km**

Montrez si Pluton et Charon sont un système planète-lune ou un système de planète double.

Figure W3



B = distance entre le barycentre et le centre de l'objet de masse M (km)
d = séparation entre le centre de Pluton et le centre de Charon (km)
M_P = masse de Pluton (kg) = m
M_C = masse de Charon (kg) = M

Ainsi,

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

En insérant les chiffres,

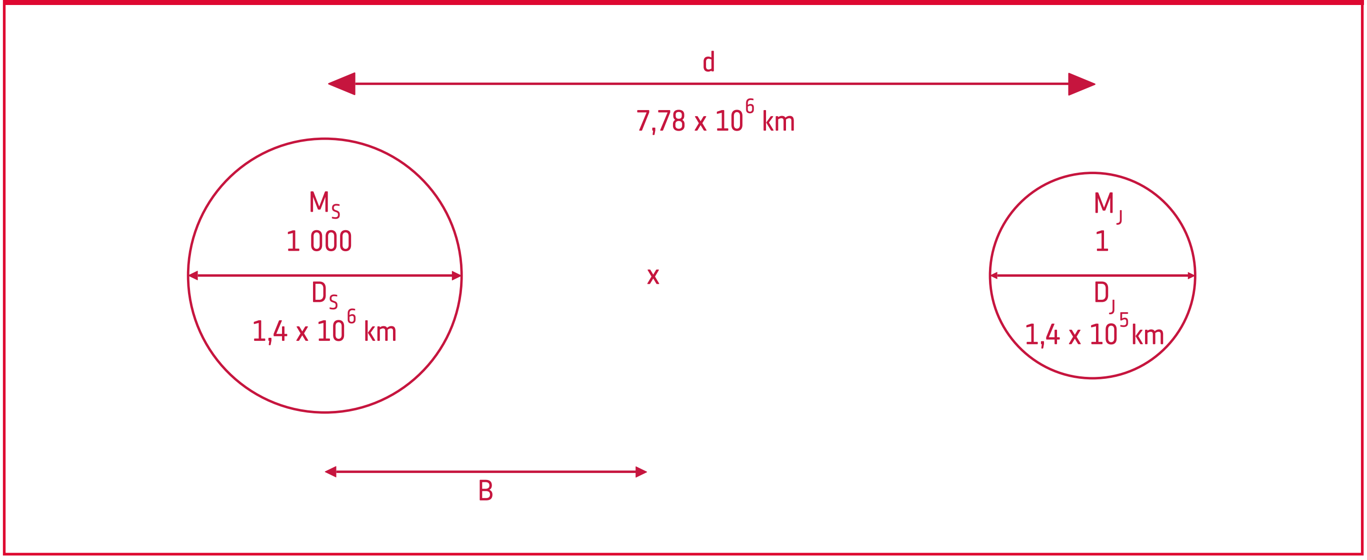
$$B = \frac{(1{,}62 \times 10^{21}) \times (1{,}96 \times 10^{4})}{(1{,}31 \times 10^{22} + 1{,}62 \times 10^{21})} = 2\,157 \text{ km}$$

Le rayon de Pluton étant de 1 195 km, le barycentre se situe hors de Pluton. Pluton et Charon sont donc un système de planète (naine) double.

3. Le Soleil a un diamètre de 1,4 million km et Jupiter un rayon de 140 000 km. La distance moyenne entre le Soleil et Jupiter est de 778 millions de kilomètres. La masse du Soleil est approximativement 1 000 fois celle de Jupiter. Calculez la position du barycentre du système Soleil-Jupiter et commentez son emplacement.

   Si nous considérons que la masse de Jupiter, M_J, est 1 = m,
   alors la masse du Soleil, M_S, est 1 000 = M

Figure W4



Ainsi,

$$B = \frac{md}{(M + m)}$$

Alors,

$$B = \frac{1 \times (7{,}78 \times 10^6)}{(1\,000 + 1)} = 777\,200 \text{ km}$$

Le rayon du soleil est d'environ 700 000 km. Cela signifie que le barycentre du système Soleil-Jupiter se situe tout juste à l'extérieur du Soleil.

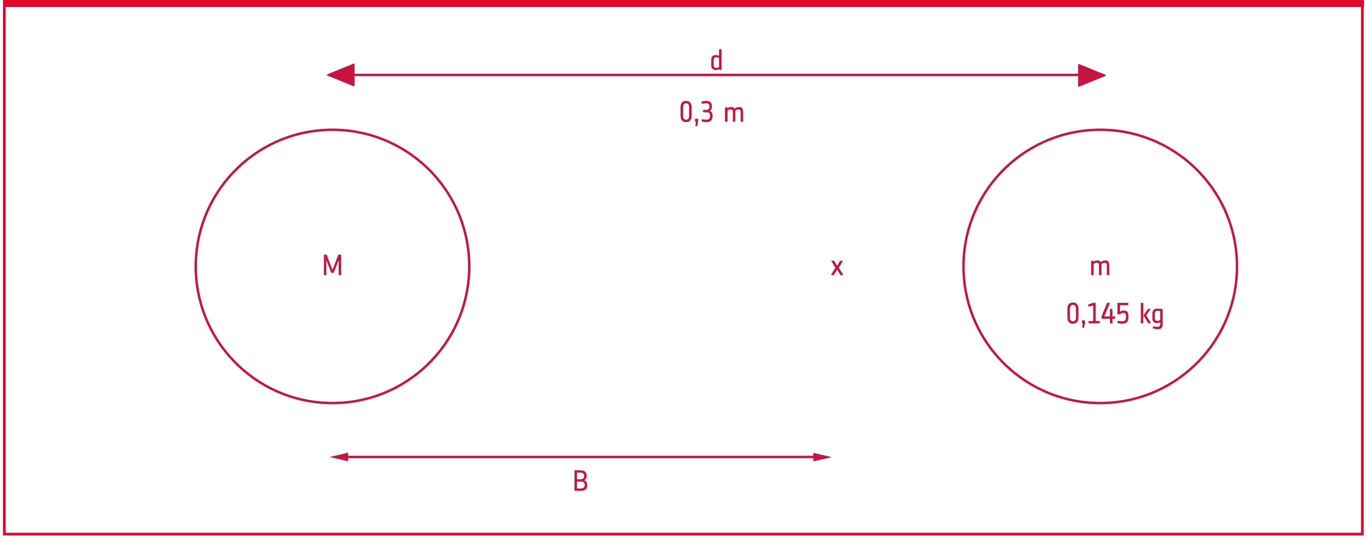
4. Dans la vidéo « Teach with space – barycentric balls in space | VP07b », l'astronaute de l'ASE, Samantha Cristoforetti, démontre le principe barycentrique en microgravité à bord de la Station spatiale internationale (ISS).

   Dans le premier scénario, Samantha relie les deux balles de baseball entre elles avec une aiguille à tricoter. Les deux balles sont de masses égales et ainsi le barycentre se situe au centre géométrique de l'aiguille à tricoter. Quand Samantha applique une force à l'une des deux balles, le système tourne autour de son barycentre. Puis Samantha applique une force, cette fois-ci à l'emplacement du barycentre, alors le système complet translate (se déplace) dans l'espace, mais ne tourne pas.

Dans le second scénario, Samantha remplace l'une des balles de baseball par une autre de taille similaire, mais de masse différente. Quand Samantha applique une force à la nouvelle balle, le système tourne autour du barycentre qui ne se situe plus au centre géométrique du système. Comme précédemment, quand Samantha applique une force à l'emplacement du barycentre, le système ne tourne plus, mais se déplace.

Sachant que la masse d'une balle de baseball est de 0,145 kg, que la longueur de l'aiguille à tricoter est de 0,3 m et que le barycentre se situe au quart de la distance entre le centre de la balle de baseball et le centre de l'autre balle, quelle est la masse de la seconde balle ? Quel est l'objet le plus massif ?

Figure W5



m = masse de la balle de baseball = 0,145 kg
M = masse de la seconde balle
d = longueur de l'aiguille à tricoter = 0,3 m
B = distance entre le barycentre et le centre de la seconde balle

Le barycentre se trouve plus près de la balle de baseball, approximativement au quart de la longueur de l'aiguille à tricoter en partant du centre de la balle de baseball. La distance entre le barycentre et le centre de la seconde balle est donc :

$$B = 0{,}75 \times 0{,}3 = 0{,}225 \text{ m}$$

Après réarrangement,

$$B = \frac{md}{(M+m)}$$

on obtient :

$$M = \left(\frac{md}{B}\right) - m = \left(\frac{0{,}145 \times 0{,}3}{0{,}225}\right) - 0{,}145 = 0{,}048 \text{ kg}$$

La seconde balle a une masse de 48 g. La balle de baseball est la balle la plus massive.

LIENS

Collection Teach with space

ESA teach with space – marble-ous ellipses teacher's guide and student activities | P02 : esamultimedia.esa.int/ docs/edu/P02_Marble-ous_ellipses_teacher_guide.pdf
ESA teach with space – marble-ous ellipses video | VP02 : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/07/Marble-ous_el- lipses_-_classroom_demonstration_video_VP02
ESA teach with space - cooking a comet video | VP06 : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2014/10/Cooking_a_comet_ ingredients_for_life_-_classroom_demonstration_video_VP06
ESA teach with space – barycentric balls video | VP07a : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/Barycentric_ balls_-_classroom_demonstration_video_VP07a
ESA teach with space – barycentric balls in space video | VP07b : www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2015/04/ Barycentric_balls_in_space_-_classroom_demonstration_video_VP07b

Missions en rapport avec l'ASE et les sciences

Mission Gaia de l'ASE : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Gaia
Les Petits Livres de Gaia (en 7 langues européennes) : www.esa.int/Education/ Little_Books_of_Gaia
Application Gaia pour iPhone : blogs.esa.int/gaia/2014/09/01/gaia-in-your-pocket-mapping-the-galaxy-with-the-new-gaia- app/
Science@ESA vodcast : Episode 6 : Cartographie de la galaxie – d'Hipparcos à Gaia : www.esa.int/Education/Teachers_ Corner/Science_ESA_Episode_6_Charting_the_Galaxy_-_from_Hipparcos_to_Gaia
Mission Hipparcos de l'ASE : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Hipparcos_overview
Créez votre propre globe stellaire Hipparcos (Make your own Hipparcos star globe) : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Create_your_own_Hipparcos_star_globe2
Télescope spatial Hubble ASE/NASA : sci.esa.int/hubble/
Comment trouver une planète extrasolaire : www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/How_to_find_an_extrasolar_planet

NASA Lunar and Planetary Science database (Base de données scientifiques de la NASA sur la lune et les planètes)

Page d'accueil : nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/
Répertoire des fiches d'information sur les planètes (Planetary factsheets index) : nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html
Fiche d'information sur le Soleil (Sun Factsheet) : nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html

teach with space – balles barycentriques | P07
www.esa.int/education

Faites part de vos réactions et de vos commentaires à l'ESA Education Office
teachers@esa.int

Une production ESA Education