

## Chapitre 3 : La gravitation

**Objectifs :** Vous faire comprendre les étapes qui ont mené à la découverte par Newton que toutes les masses de l'Univers s'attirent mutuellement (théorie de la gravitation universelle). Vous faire comprendre comment les travaux d'Einstein ont modifié notre compréhension de la gravité.

*On vous suggère de lire et remplir le résumé au fur et à mesure que vous lisez le chapitre, car il y a des commentaires insérés dans le résumé qui vous guideront dans votre lecture.*

À moins de spécification contraire, les sections en bleu dans le texte et les compléments ne sont pas au programme.

### RÉSUMÉ PARTICIPATIF :

#### **Introduction à la deuxième partie (p. 106-107)**

*Avec le chapitre 3, on commence la deuxième partie du livre, « **Sur la Terre comme au ciel** ». Pour avoir un aperçu de ce que cette partie vous réserve, il est intéressant de lire le texte de pages 106-107.*

Quelle est la grande idée associée à la deuxième partie?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

La recherche en sciences se divise traditionnellement en recherche \_\_\_\_\_ et en recherche \_\_\_\_\_, mais en astronomie, c'est plutôt \_\_\_\_\_ qui joue le rôle de l'expérience.

L'astronomie ne consiste pas seulement à prendre en note la position des astres (ce qu'on appelle \_\_\_\_\_); l'aspect le plus important de l'astronomie moderne, c'est de se servir des lois de la physique pour expliquer ce qu'on observe, ce qu'on appelle \_\_\_\_\_.

Avec quel scientifique peut-on dire que l'astronomie est devenue une branche de la physique? \_\_\_\_\_

### **3.1 Les observations de Tycho Brahé**

Vers 1600, Tycho Brahé, un membre de la noblesse du \_\_\_\_\_, observait la position des planètes avec un précision de quelques \_\_\_\_\_. Pour prendre ses mesures, il utilisait \_\_\_\_\_. Incapable de mesurer la \_\_\_\_\_ des étoiles, il se met à croire qu'il n'y a pas de parallaxe, tout simplement parce que la Terre est \_\_\_\_\_. Il savait qu'il est plus simple de décrire le mouvement des planètes en supposant qu'elles tournent autour \_\_\_\_\_. Il construisit ainsi un modèle où \_\_\_\_\_ tourne autour \_\_\_\_\_, mais où les planètes tournent autour \_\_\_\_\_. À sa mort, Tycho légua ses données à \_\_\_\_\_.

### **3.2 Les lois de Kepler**

**1<sup>re</sup> loi :** L'orbite des planètes est en forme \_\_\_\_\_, et le Soleil n'est pas au centre mais plutôt à un des \_\_\_\_\_.

Une ellipse est définie comme l'ensemble des points \_\_\_\_\_.

On peut tracer une ellipse en mettant des punaises \_\_\_\_\_ et en attachant une ficelle entre les deux. On maintient la ficelle \_\_\_\_\_ à l'aide d'un \_\_\_\_\_ et on trace.

L'axe le plus grand se nomme \_\_\_\_\_. Une ellipse peut être plus ou moins aplatie, selon son \_\_\_\_\_ (symbole :  $e$ ), dont la valeur peut varier entre \_\_\_ et \_\_\_.

Un cercle est une ellipse pour laquelle  $e =$  \_\_\_\_\_.

Le demi-grand axe d'un cercle, on appelle cela habituellement \_\_\_\_\_.

Le périhélie est le point de l'orbite le plus \_\_\_\_\_ du \_\_\_\_\_, et l'aphélie est le point le plus \_\_\_\_\_.

**2<sup>e</sup> loi :** La ligne qui relie la planète \_\_\_\_\_ balaie \_\_\_\_\_.

Cela revient à dire que plus la planète est proche du Soleil, \_\_\_\_\_ elle va vite.

Cela explique enfin à la perfection de phénomène de \_\_\_\_\_.

Kepler réalise correctement qu'une force \_\_\_\_\_ est responsable du mouvement des planètes, mais il pense à tort que cette force est de nature \_\_\_\_\_. Néanmoins, ces spéculations permettent d'affirmer que Kepler est le premier \_\_\_\_\_, car il essaie d'appliquer à l'astronomie un concept utilisé à l'origine pour décrire \_\_\_\_\_.

**3<sup>e</sup> loi :** exprimez-la sous forme d'équation :

(Important : équation valable seulement pour les planètes tournant autour \_\_\_\_\_)

Avec Kepler, pour la première fois, l'écart entre les résultats attendus et les observations est \_\_\_\_\_.

### 3.3 La physique des orbites

\_\_\_\_\_ a été le premier à énoncer le \_\_\_\_\_ qui affirme qu'en l'absence de frottement ou de toute autre contrainte ou force, un objet en mouvement \_\_\_\_\_.

Il pensait à tort que « sur sa lancée » voulait dire \_\_\_\_\_ . C'est \_\_\_\_\_ qui réalisa correctement que « sur sa lancée » veut dire \_\_\_\_\_, ce qui donna naissance à la première loi de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_ réalise que les orbites planétaires s'expliquent par une force qui agit \_\_\_\_\_ . L'orbite d'une planète est le compromis entre \_\_\_\_\_ et \_\_\_\_\_.

Hooke réalise, à partir de la 3<sup>e</sup> loi de Kepler, que la force d'attraction varie en fonction de la distance  $r$  comme \_\_\_\_\_. Ainsi, une planète plus proche du Soleil subit une attraction plus \_\_\_\_\_, et elle doit donc avoir une vitesse latérale plus \_\_\_\_\_ pour éviter de \_\_\_\_\_.

Hooke essaie de prouver qu'une telle force en \_\_\_\_\_ implique une orbite elliptique avec le Soleil au foyer, mais les mathématiques nécessaires lui font défaut. Pourtant, elles existent, mais leur inventeur, \_\_\_\_\_, les garde secrètes!

### 3.4 La gravitation universelle

Dans sa jeunesse, Newton avait inventé une technique mathématique révolutionnaire, \_\_\_\_\_, mais il avait gardé ses travaux pour lui!

Hooke écrit à Newton et lui décrit son problème des orbites elliptiques... Newton résout le problème mais il garde ses travaux pour lui, car \_\_\_\_\_.

Plus tard, Halley croise Newton et lui fait avouer qu'il a résolu le problème... pour encourager Newton à écrire et publier un livre, Halley accepte de \_\_\_\_\_.

Dans son livre, Newton ne remercie nulle part Hooke. Il invente la légende de la pomme pour \_\_\_\_\_.

**La légende :** En voyant tomber une pomme, Super-Newton réalise que la force de gravité n'a pas de limite évidente et que \_\_\_\_\_ devrait aussi tomber. Il sait qu'une pomme tombe de \_\_\_\_\_ environ en 1 seconde, et il calcule que \_\_\_\_\_ tombe \_\_\_\_\_ fois moins pendant le même temps. De plus, il sait que l'attraction terrestre agit comme si toute la masse de la Terre \_\_\_\_\_, ce qui fait que \_\_\_\_\_ est \_\_\_\_\_ fois plus loin que la pomme. Mais comme \_\_\_\_\_, il en résulte que la gravité diminue comme le carré de la distance!

On sait aujourd'hui qu'en réalité, Newton n'avait jamais clairement compris le problème avant de recevoir \_\_\_\_\_.

Newton a quand même été le premier à réaliser que la force \_\_\_\_\_ (la même force qui nous cloue au sol) est responsable de l'orbite des corps célestes, et que \_\_\_\_\_ s'attirent mutuellement (c'est pour cela qu'on parle de gravitation *universelle*). À partir de la seule hypothèse  $F \propto 1/r^2$ , il est capable de retrouver \_\_\_\_\_. Si Tycho et Kepler représentent le triomphe de \_\_\_\_\_, Newton représente le triomphe de \_\_\_\_\_.

Une figure célèbre (*original en haut de la page 108*) explique comment la trajectoire \_\_\_\_\_ peut devenir une orbite si \_\_\_\_\_.

En pratique, on ne peut pas réaliser ce qu'illustre cette figure car \_\_\_\_\_

C'est pour cela qu'un vaisseau spatial doit nécessairement \_\_\_\_\_ avant de pouvoir se mettre en orbite autour de la Terre.

Attention : la gravitation de la Terre agit quand même sur une capsule en orbite, car sinon,

\_\_\_\_\_ ; si les astronautes se sentent en apesanteur, c'est parce que le « sol » de la capsule \_\_\_\_\_.

### 3.5 La masse des objets célestes

Newton a aussi démontré que la force gravitationnelle entre deux objets dépend \_\_\_\_\_ de leurs masses, ce qui permet une version généralisée de la \_\_\_ loi de \_\_\_\_\_. Cette loi permet de déterminer la masse d'un objet situé \_\_\_\_\_ d'un système gravitationnel. Par exemple, en analysant l'orbite \_\_\_\_\_, on peut déterminer la masse de Jupiter.

La logique de la loi est la suivante : plus la masse de \_\_\_\_\_ est grande, plus un petit objet \_\_\_\_\_ (à une distance donnée) doit aller \_\_\_\_\_ pour se maintenir en orbite.

### 3.6 Le triomphe de Newton

On peut dire qu'une théorie a vraiment du succès lorsque elle est capable de \_\_\_\_\_.

À la fin du 18<sup>e</sup> siècle, un anglais observe systématiquement les constellations du zodiaque et découvre une nouvelle planète, qu'il veut nommer \_\_\_\_\_ en l'honneur de \_\_\_\_\_ mais qui finalement s'appellera \_\_\_\_\_.

Après plusieurs décennies d'observation, on se rend compte que l'orbite de la planète présente une anomalie : elle est légèrement \_\_\_\_\_. Certains pensent que la théorie de Newton est prise en défaut, mais d'autres font plutôt l'hypothèse \_\_\_\_\_. On calcule la position que devrait avoir la nouvelle planète, et on découvre ainsi \_\_\_\_\_. C'est le plus grand succès de la théorie de Newton.

On découvre aussi que que l'orbite de \_\_\_\_\_ présente une anomalie, et pour l'expliquer on suppose l'existence d'une nouvelle planète très proche du Soleil que l'on nomme \_\_\_\_\_. Or, cette planète n'existe pas, et la théorie de Newton est finalement prise en défaut... C'est le temps d'appeler Einstein à la rescousse!

### 3.7 L'origine de la théorie de la relativité

À la fin du 19<sup>e</sup> siècle, deux expérimentateurs construisent un appareil très précis pour mesurer les variations de \_\_\_\_\_. Ils pensent pouvoir mettre en évidence l'effet du mouvement de \_\_\_\_\_, qui est de l'ordre de \_\_\_ km/s. Or, quoiqu'ils fassent, ils ne mesurent aucune variation de la vitesse observée : ils obtiennent toujours  $3 \times 10^8$  m/s.

Cela semble illogique : c'est comme si un camion fonçait vers une auto, et que la vitesse de l'auto n'affectait pas la vitesse du camion par rapport à l'auto!

En 1905, Einstein propose sa théorie de la \_\_\_\_\_, basée sur le postulat de base: \_\_\_\_\_

Pour que la vitesse  $3 \times 10^8$  m/s soit invariante, Einstein arrive à la conclusion qu'il faut que \_\_\_\_\_ et \_\_\_\_\_ varient en fonction de la vitesse de l'observateur.

Le facteur de ralentissement du temps relativiste est dénoté par la lettre grecque \_\_\_\_\_ (ce qui se prononce : \_\_\_\_\_ (*allez voir l'annexe III!*)). On dénote la vitesse de l'observateur par  $v$  et la vitesse de la lumière par \_\_\_\_\_.

Pour  $v = 0$ ,  $\gamma =$  \_\_\_\_\_. Pour les astronautes des missions Apollo, le ralentissement du temps était de l'ordre de 1 pour \_\_\_\_\_. Pour avoir  $\gamma = 2$ , il faut se déplacer à \_\_\_\_\_. Pour  $v = 0,99 c$ ,  $\gamma =$  \_\_\_\_\_.

Vrai ou faux? Si  $\gamma$  est assez important, les passagers d'une fusée vont s'en rendre compte en regardant leurs propres montres. \_\_\_\_\_

Pour une particule de lumière (ce qu'on nomme \_\_\_\_\_), le temps est \_\_\_\_\_ car  $\gamma =$  \_\_\_\_\_.

Une particule de masse nulle doit forcément voyager à la vitesse  $c$ , tandis qu'une particule qui a une masse ne peut pas voyager à  $c$  car si c'était le cas son énergie (d'après la relativité) serait \_\_\_\_\_.

Si on pouvait voyager plus vite que  $c$ , on pourrait dans certaines circonstances \_\_\_\_\_, ce qui semble être une impossibilité d'ordre fondamental ...

D'après la relation masse-énergie de la relativité, l'énergie d'une particule de masse  $m$  au repos vaut  $E = \text{_____}$ . Un kilogramme de masse au repos possède donc \_\_\_\_\_ J d'énergie, ce qui, au tarif de l'Hydro-Québec, vaut environ \_\_\_\_\_.

La relation masse-énergie est importante en astronomie car elle est à la l'origine de l'énergie que produisent \_\_\_\_\_.

### 3.8 La relativité générale

La théorie d'Einstein qui englobe la gravitation se nomme \_\_\_\_\_.

Dans cette théorie, la gravité est conçue comme une accélération dans \_\_\_\_\_, ce qu'on peut représenter à l'aide d'une « courbure ».

D'après Newton, la Lune suit son orbite en raison d'une \_\_\_\_\_ dirigée vers \_\_\_\_\_.

D'après Einstein, la Lune se déplace \_\_\_\_\_ par rapport à l'espace-temps, mais ce dernier est courbé par la présence de la Terre!

Plus la courbure de l'espace-temps est prononcée, \_\_\_\_\_ les prédictions d'Einstein diffèrent de celles de Newton. Dans notre système solaire, la courbure est la plus prononcée près \_\_\_\_\_, ce qui explique pourquoi c'est l'orbite de \_\_\_\_\_ qui est la plus affectée par la relativité.

Newton a unifié les lois du mouvement \_\_\_\_\_ avec celles du \_\_\_\_\_. Einstein a unifié davantage la physique en montrant les liens étroits entre \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ et \_\_\_\_\_.

La théorie de la relativité générale a été confirmée lors \_\_\_\_\_ en observant \_\_\_\_\_.

En général, lorsque la lumière d'un objet céleste est déviée par un autre objet qui se trouve « dans le chemin », on appelle cela \_\_\_\_\_.

### 3.9 Le ralentissement du temps gravitationnel

Le ralentissement du temps dû à la gravité dépend de la vitesse \_\_\_\_\_ à l'endroit où on se trouve. À la surface de la Terre, cette vitesse vaut \_\_\_\_\_. (Pour se mettre simplement en orbite, il suffit de voyager à \_\_\_% de cette vitesse.)

À la surface de la Terre, le temps est ralenti par la gravité de \_\_\_ partie dans un milliard.

À la fin de leurs vies, les étoiles forment des objets compacts (naines \_\_\_\_\_ ou étoiles \_\_\_\_\_) pour lesquelles  $\gamma_{\text{grav}}$  prend des valeurs appréciables. Si un objet est tellement compact que la vitesse de libération est égale à \_\_\_\_\_, l'écoulement du temps s'arrête. On appelle un tel objet \_\_\_\_\_. (On reparlera de ces objets au chapitre 7.)

\* \* \*

*Une fois le résumé complété, vous pouvez tester votre maîtrise de la matière à partir de la liste des termes importants et des questions de révision de la fin du chapitre (p.139-140) :*

*Vous devriez être en mesure de définir tous les termes importants **sauf** centripète, champ gravitationnel et principe d'équivalence.*

*Vous devriez aussi être en mesure de répondre aux questions de révision 1 à 42 **sauf** 11 et 35.*

**1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,  
12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,  
21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,  
31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40,  
41, 42**