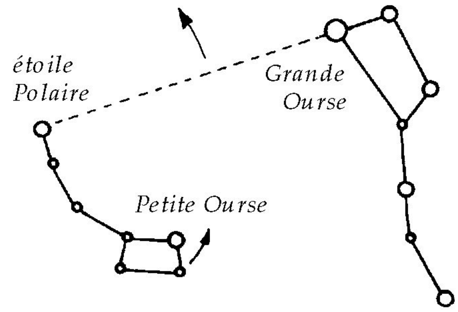
# Des planètes et des hommes

### Avant-propos

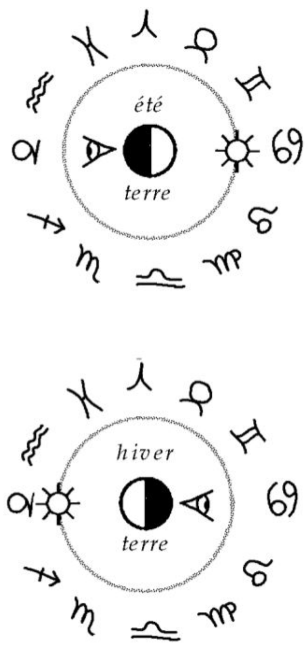
*Ces quelques pages constituent un résumé très condensé et simplifié (?) des différentes façons d'interpréter les apparitions célestes. Ainsi, seuls quelques-uns des principaux acteurs seront mentionnés et les aspects philosophiques ne seront qu'effleurés.*

### Et si on regardait un peu le ciel...

Il n'y a pas besoin d'être passionné d'astronomie pour regarder de temps en temps un beau ciel étoilé (si, si, ça existe encore) et, pourquoi pas, d'y reconnaître certaines constellations telles qu'Orion, ou la Grande Ourse à partir de laquelle on retrouve facilement l'étoile Polaire qui, invariablement, nous indique la direction du nord.




RÉF 1)



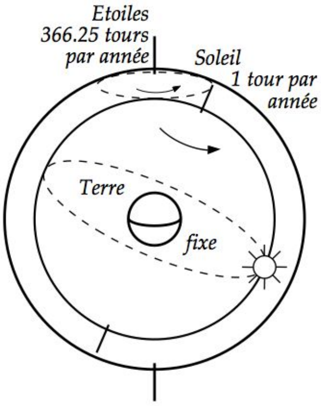

RÉF 1)

En effet, vous avez peut-être déjà constaté que la majorité des autres étoiles ainsi que le Soleil et la Lune se lèvent du côté est et se couchent à l'ouest quelques heures plus tard, alors que l'étoile polaire, elle, ne bouge pas.

Avez-vous déjà constaté que le ciel étoilé en hiver n'est pas le même qu'en été : les constellations près de l'étoile polaire ont changé de place et celles situées au sud ont laissé la place à d'autres constellations. En fait, tout se passe un peu comme si le Soleil tournait autour de la Terre, comme les étoiles, mais pas tout à fait à la même vitesse, de sorte qu'après six mois il se trouve en compagnie des étoiles se trouvant à l'opposé de la voûte céleste. En une année, le Soleil semble faire le tour des étoiles en passant successivement par toutes les constellations formant les *signes du Zodiac*.

Parmi les observations astronomiques bien accessibles à tout un chacun, il faudrait encore mentionner les métamorphoses de la Lune qui ne cesse d'hésiter entre la boulimie et l'anorexie, qui, chaque jour, se lève un peu plus tard et qui, au bout d'un mois, retrouve la même forme. Bien sûr, on ne saurait passer sous silence l'*étoile du berger*, parfois visible le soir, parfois le matin, parfois pas du tout.

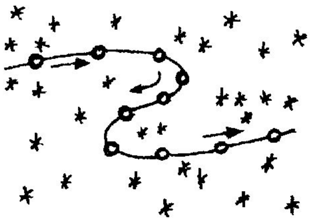
## La magie des sphères



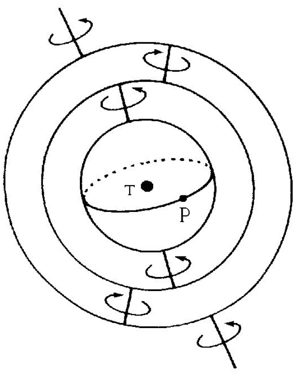

Réf 1)

Au temps de **Pythagore** (vers l'an 530 av. J.C.) on se représentait la Terre comme une sphère vers laquelle se précipitent tous les objets pesants, entourée d'une sphère d'eau (les océans), elle-même enfermée dans une sphère d'air (l'atmosphère) qui finalement devait toucher la sphère de feu abritant les corps célestes. Ces derniers constituaient de toute évidence des objets à part, puisqu'ils ne tombaient pas sur la Terre comme tous les autres objets.
On imaginait donc que les étoiles étaient fixées sur une sphère dont le centre coïncidait avec le centre de la Terre et qui tournait autour d'un axe nord-sud, faisant à peu près une révolution par jour.
A l'intérieur de cette sphère, on trouvait une autre sphère, portant le Soleil, dont l'axe de rotation était dévié d'à peu près $23^{\circ}$ par rapport à l'axe des étoiles et qui faisait un tour de moins par année que la sphère des étoiles.

## Les astres errants

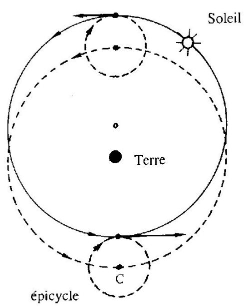


Est-ce la rêverie devant le tableau sidéral ou la volonté de percer le mystère du monde divin des étoiles qui permit à certains observateurs du ciel de constater que certaines étoiles bougeaient par rapport aux autres ; chaque soir leur position relative aux autres étoiles changeait un tout petit peu. Mais au lieu de se mouvoir en ligne droite, ces points lumineux avaient parfois le caprice de ralentir et même de rebrousser chemin (ou *rétrograder*) pendant plusieurs jours avant de se relancer dans leur direction première. Ces corps bizarres furent appelés **planètes** (du grec, *planêtês* : errant) et on leur donna des noms : *Mercure, Venus, Mars, Jupiter* et *Saturne*. Avec le Soleil et la Lune, on comptait donc 7 corps célestes ! (7, chiffre magique s'il en est.)
Ces planètes perturbaient passablement l'harmonie du monde céleste à cause de leur mouvement à première vue désordonné. Qu'à cela ne tienne ! Vers 400 av. J.C. **Eudoxe** réussit à décrire le mouvement de tous les corps célestes après les avoir rattachés par la pensée à une multitude de sphères toutes concentriques, fixées les unes sur les autres, avec des axes de rotations savamment orientés et des vitesses de rotation finement calculées. **Aristote** perfectionna ce système en faisant passer le nombre de sphères de 26 à 56 !



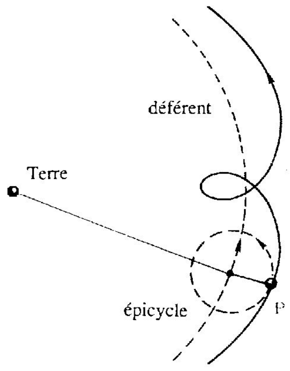

Réf 1)

## Les épicycles




Réf 1)

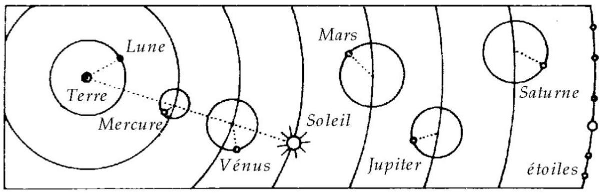
Même si ce système pouvait prédire, plus ou moins, la position de n'importe quel astre dans le ciel, il ne put malheureusement pas rendre compte du fait que les planètes avaient l'air d'être plus proches de la Terre à certains moments qu'à d'autres alors que d'après le modèle de Pythagore elles auraient toujours dû rester à la même distance de la surface de la Terre... Il fallait donc trouver d'autres modèles !




RÉF 1)

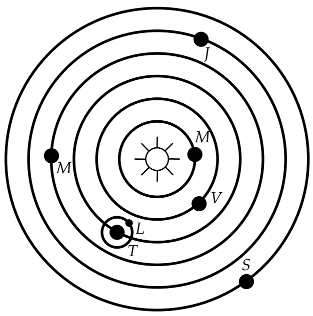
C'est ainsi qu'**Hipparque** (vers 150 av. J.C.) imagina que les sept corps célestes étaient fixés à de petites sphères tournant avec des vitesses plus ou moins grandes sur elles-mêmes et dont les centres étaient eux-mêmes fixés sur d'autres sphères centrées sur la Terre, tournant également autour d'axes différents et avec des vitesses différentes.

Cette manière de décrire les mouvements des planètes, appelée méthode des *épicycles* (du grec, *epi* : sur) fut perfectionnée par **Ptolémée** (vers l'an 120) qui se vit cependant obligé de supposer que les mouvements circulaires de ces sphères n'étaient pas uniformes. Il constituait toutefois un système potable pour prédire la position et la distance des différents corps célestes à n'importe quel moment.

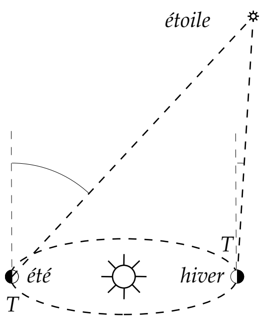



RÉF 1)

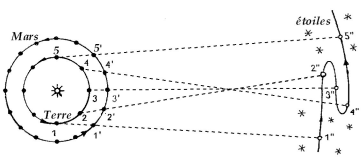
## La révolution copernicienne




Tous ces modèles étaient basés sur l'hypothèse (et pourquoi pas ?) que la Terre était immobile au centre de l'Univers et que les autres objets célestes se mouvaient autour d'elle. Il s'agissait donc de modèles *géocentriques* (du grec *gê* : la Terre).
Mais il y eut d'autres avis, comme par exemple celui d'**Héraclide** (vers 350 av. J.C.) qui affirmait que les étoiles pouvaient très bien être immobiles et que c'est la Terre qui tournait autour de son axe nord-sud.




**Aristarque de Samos** (vers 250 av. J.C.) alla même plus loin en supposant que c'est le Soleil qui était immobile et que la Terre, ainsi que les cinq planètes, tournaient autour de lui (la Lune continuant de tourner autour de la Terre). Cependant ce système *héliocentrique* (du grec, *hélios* : le Soleil) fut abandonné pour la raison suivante : si le Terre tourne autour du Soleil, elle se déplace aussi par rapport aux étoiles (supposées se trouver à une distance pas trop grande du Soleil) et ces dernières ne devraient donc pas apparaître à la même place en été et en hiver (notamment l'étoile polaire). Comme on n'observait pas cet effet, appelé *parallaxe*, l'idée d'Aristarque tomba dans l'oubli.

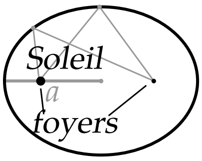


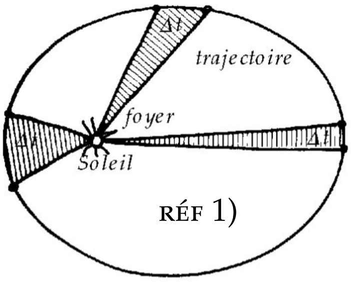

RÉF 1)

Ce ne fut que vers 1440 que des idées similaires furent à nouveau émises par le Cardinal de Cuse. Vers 1529, **Nicolas Copernic**, se basant sur un système héliocentrique, réussit à faire une description satisfaisante des mouvements des astres. Même si les résultats n'étaient pas plus performants que ceux de Ptolémée, le modèle eut cependant l'avantage d'être nettement plus simple. Ces trajectoires quasi-circulaires rappellent l'idée de Pythagore des sphères concentriques, mais cette fois centrées sur le Soleil. Cependant, pour obtenir des prédictions plus affinées, Copernic dut lui aussi faire appel à des dizaines d'épicycles.

## Adieu aux cercles

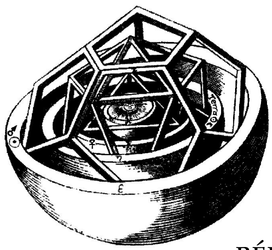
**Tycho Brahé** (vers 1570) réussit le tour de force de répertorier avec une précision inégalée pour l'époque (la lunette astronomique n'était pas encore inventée) la position de 777 étoiles et les mouvements exacts des planètes par rapport à la voûte céleste. **Johann Kepler** (en 1609), se basant sur ces travaux, améliora la conception copernicienne en supposant que les planètes décrivent non pas des cercles, mais des ellipses. Voici les fameuses trois **lois** énoncées par Kepler :




RÉF 1)

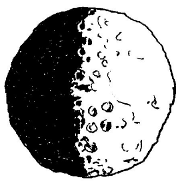
1) *Les trajectoires des planètes autour du Soleil sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.*
2) *Le segment reliant le Soleil à la planète balaie des aires égales en des temps égaux. Ce qui signifie : les planètes n'avancent pas à vitesse constante ; plus elles sont proches du Soleil, plus leur vitesse est grande.*
3) *Plus la distance moyenne $a$ entre une planète et le Soleil est grande, plus sa période $T$ (temps pour un tour du Soleil) est grande. Plus précisément, si on calcule le rapport $\frac{T^2}{a^3}$ pour n'importe quel satellite (planète, comète, astéroïde) du Soleil, on trouve toujours le même nombre appelé constante de Kepler.*



RÉF 1)

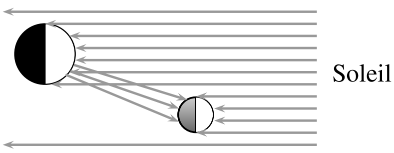
Même si Kepler condamnait implicitement les sphères pythagoriciennes (à cause des ellipses), il ne tenta pas moins de les rétablir par une découverte étonnante : si on associe à chaque orbite planétaire une sphère, il est alors possible d'insérer (à peu près) entre chaque couple de sphères consécutives l'un des cinq polyèdres platoniciens.

## Le système héliocentrique *do-it yourself*

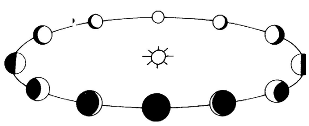


RÉF 1)

Vers 1609 le système héliocentrique trouve un défenseur avisé et pédagogue en la personne de **Galilée**. Ce dernier s'inspire des verres de lorgnons venus de Hollande pour fabriquer des lunettes (astronomiques) grossissant 9, 20 puis 30 fois. Ces lunettes, Galilée va les pointer vers le ciel pour y faire des découvertes surprenantes :




– La Lune n'est pas une boule lisse, mais elle est parsemée de montagnes parfois très hautes. Galilée pense aussi que la couleur cendrée de la partie non éclairée de la Lune (lorsqu'elle n'est pas pleine) n'est rien d'autre que le clair de Terre ; elle proviendrait de la lumière solaire diffusée par la Terre vers la Lune.
– Les étoiles ressemblent toujours à des points, alors que les planètes apparaissent comme des disques ou des sphères.
– Vénus a des phases, tout comme la Lune *(Cynthiae figuras aemulatur mater amorum)*, ce qui montre que Vénus passe bien derrière le Soleil à un moment donné. A l'œil nu la brillance de cette planète reste cependant à peu près constante, car lorsqu'elle est éclairée en croissant, elle est beaucoup plus proche de la Terre et donc mieux visible.

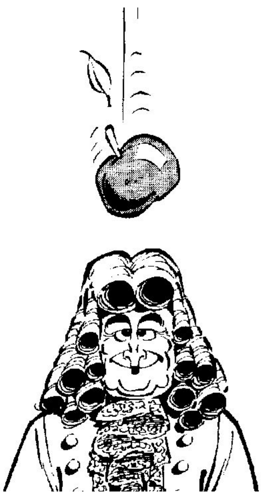


RÉF 1)

– Jupiter possède au moins quatre lunes. Le centre de leur mouvement n'est donc pas la Terre, mais Jupiter.
– Les taches du Soleil (nuages ?) se déplacent toujours dans la même direction, indiquant par là que le Soleil aurait également une rotation propre et serait un corps comme les autres.

Galilée a consigné la plupart de ces observations dans *Le messager des étoiles*, un livre destiné aux gens instruits de tous les pays.

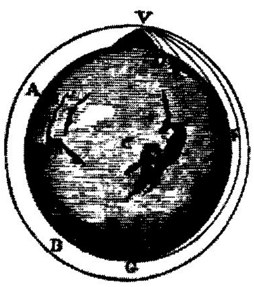
### La pomme de Newton



Gotlib. . .

Si on passe en revue tous ces modèles cosmologiques, force est de constater qu'il s'agit de modèles purement géométriques permettant de prévoir l'emplacement de n'importe quelle planète à n'importe quel moment. Si pour les sphères de Pythagore, les épicycles d'Hipparque et les cercles de Copernic on pouvait dire que les planètes se déplacent sur des corps géométriquement parfaits, la justification de trajectoires elliptiques posait davantage de problèmes. Comme l'époque de Kepler coïncidait avec l'avènement de la mécanique, dûment expérimentée par Galilée puis, plus tard, par **Newton**, on pouvait commencer à s'attaquer à la question : y a-t-il un principe plus général expliquant le mouvement des corps célestes ?
Voyons donc comment on pourrait interpréter l'anecdote de la pomme de Newton (1666) qu'on nous apprête à toutes les sauces.

Voici ce que Newton s'est dit (ou aurait pu se dire) en voyant une pomme tomber d'un arbre : « Cette pomme accélère vers le centre de la Terre ; normalement, si un corps accélère, c'est qu'une force s'exerce sur lui. La Terre exercerait donc une force invisible sur la pomme. »
En voyant en même temps la Lune se lever, notre grand homme poursuivit sa reflexion : « Tout compte fait, la Lune est également un corps censé être attiré par la Terre ! Pourquoi ne nous tombe-t-elle pas dessus ? » Mais d'autre part Newton avait bien étudié le mouvement circulaire uniforme et savait qu'un tel mouvement n'était pas possible sans une force (centripète) pour maintenir l'objet (ici, la Lune) sur sa trajectoire. « Et si l'attraction terrestre jouait ce rôle ? »



réf 1)

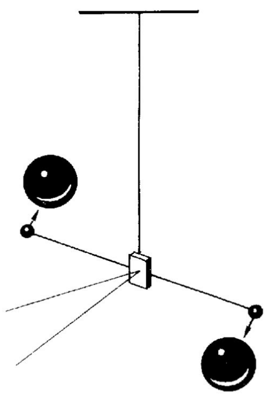
Arrivé à ce stade dans ses conclusions, Newton retourna en toute hâte chez lui pour étayer ses réflexions avec quelques calculs :

En comparant le mouvement d'un corps en chute libre à la surface de la Terre et le mouvement de la Lune autour de la Terre, Newton se réconforta dans l'idée que la force d'attraction de la Terre diminuait avec la distance. Plus précisément, il trouva qu'elle était inversement proportionnelle au carré de la distance $r$ entre le centre de la Terre et le corps et proportionnelle à la masse $M$ de la Terre et à la masse $m$ du corps. De manière générale, l'attraction gravitationnelle entre deux masses $m_1$ et $m_2$ dont les centres sont séparées par une distance $r$ est donnée par :

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$G$ étant la constante universelle de gravitation, mais Newton n'était parvenu à en calculer qu'une valeur approximative ; sa valeur officielle est $G = (6.67408 \pm 0.00005) \cdot 10^{-11}$ m$^3$ kg$^{-1}$ s$^{-2}$ (ou $6.67 \cdot 10^{-11} \ldots$).

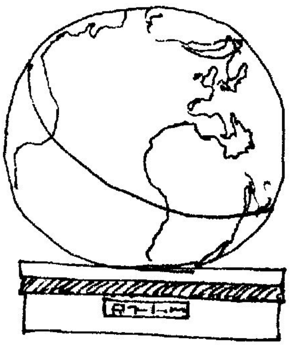
**L'homme qui pesa la Terre**



RÉF 1)

Le premier à déterminer la masse de la Terre n'était ni Archimède muni d'un levier, ni Atlas ou Hercule portant le monde, mais Lord **Kavendish** qui, en 1798, construisit un appareil capable de mesurer la force entre une masse de l'ordre du kilogramme et une autre de l'ordre de quelques grammes disposées à quelques centimètres l'une de l'autre. Connaissant la valeur des deux masses, la distance séparant leurs centres de gravité et mesurant la force s'exerçant entre elles, il put alors calculer la constante $G$ à l'aide de la formule de Newton (en fait l'expérience était un peu plus subtile que ça). A l'aide de la valeur de $G$ ainsi que de $g$ (l'accélération due à l'attraction terrestre à la surface de la Terre), il était maintenant capable de calculer la masse de la Terre, de nouveau en utilisant la formule de la gravitation.

*Remarques*



La constante $G$ est connue avec une précision de l'ordre de 0.5 pour-mille, ce qui n'est pas terrible ; il existe plusieurs projets ayant pour but d'améliorer cette précision...

Si Newton ne connaissait pas la valeur de $G$, il en avait tout de même fait une estimation : il pensait que la masse volumique moyenne $m_V$ de la Terre devait se situer entre 5000 et 6000 kg/m$^3$. Comme le volume d'une sphère est donné par : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ et que la masse de la sphère s'obtient en multipliant son volume par sa masse volumique, $M = V \cdot m_V$, il obtint une masse de la Terre d'environ $5.9 \cdot 10^{24}$ kg, ce qui n'est pas si mal, puisque la valeur aujourd'hui admise est de $5.97 \cdot 10^{24}$ kg.

**Mais ça ne joue pas !**

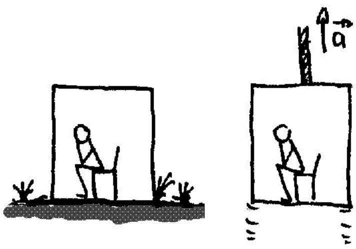
Après la découverte de la planète Uranus (la 7$^{\text{ème}}$, avec la Terre), en 1781, on tenta bien entendu de vérifier si son mouvement était bien conforme aux lois de la gravitation et on fut surpris de constater que ce n'était pas tout à fait le cas, même en tenant compte des perturbations qu'elle pouvait subir de par la « proximité » des grandes planètes Jupiter et Saturne. On supposa alors l'existence d'une huitième planète et en 1846 elle fut effectivement observée à l'endroit indiqué par les calculs. Le système solaire *accueille* donc une huitième planète, Neptune.

La neuvième, Pluton, fut découverte en 1930 en partant de calculs semblables ; il s'avéra cependant que ces calculs étaient faux et que Pluton avait en fait été observée par hasard à l'endroit prévu. Actuellement, Pluton n'est plus considérée comme une planète, mais seulement comme une planète naine...

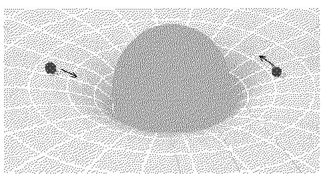
## Einstein

Il est intéressant de noter que la force s'exerçant entre deux masses ne dépend pas de leur nature chimique. Si, à l'aide d'une expérience de conservation de la quantité de mouvement (*explosion* entre deux glisseurs), on a déterminé qu'un objet en or et un objet en aluminium ont la même masse (*d'inertie*), alors la Terre exercera sur les deux masses la même force (balance). Dans la première moitié de ce siècle Einstein postula que les deux notions (*masse d'inertie*, qu'on a de la peine à mettre en mouvement et *masse pesante*, attirée par la Terre) sont identiques ; c'est le **principe d'équivalence**.

Le satellite **Microscope** a établi que s'il y avait une différence entre masse pesante et masse d'inertie, elle était inférieure à $2 \cdot 10^{-12}$ % !




En rapport avec ce principe on cite souvent l'expérience de pensée suivante (due à Einstein) : un homme est assis sur une chaise, dans une petite chambre close. Il lui est impossible de savoir si cette chambre repose à la surface de la Terre ou si elle est en train d'être accélérée dans l'espace (loin de tout corps céleste). Tout se passe donc comme si la Terre modifiait l'espace-temps de manière à ce que les objets au repos semblent tout de même accélérés.



Une image qui est souvent utilisée pour illustrer cette propriété est le « drap » tendu horizontalement et symbolisant l'espace, au milieu duquel est posée une boule (la « Terre ») qui le déforme. Toute autre bille posée en un autre endroit roulera vers le centre du drap comme si elle était attirée par la « Terre ». On peut même simuler une trajectoire orbitale à condition de lancer la bille comme il faut. . .

La théorie de la **relativité générale** d'Einstein est une extension de la théorie de la gravitation de Newton grâce à laquelle on parvint à expliquer certains phénomènes astronomiques inexpliqués jusque-là comme la vitesse de précession de l'orbite de Mercure. . .

## Théories du tout

Malheureusement cette théorie d'Einstein ne décrit que les phénomènes à grande échelle, au niveau des étoiles, des galaxies, de l'Univers, mais pas au niveau des atomes. Ces derniers sont cependant très bien décrits par ce qu'on appelle la **physique quantique**.

Il existe actuellement plusieurs pistes pour tenter de réunir les deux théories en une seule appelée **théorie du tout**. La plus connue est la **théorie des cordes**, mais elle n'est pas encore vraiment capable de faire des prédictions qu'on pourrait vérifier expérimentalement. . .

## Exercices

a) Le modèle de Ptolémée explique-t-il les rétrogradations ?

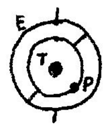
b) Le modèle de Copernic a-t-il besoin des épicycles pour expliquer les rétrogradations ?

c) Uranus met-elle plus de temps pour faire le tour du Soleil que la Terre ?

d) A quelle distance du Soleil tourne Jupiter, sachant qu'elle met environ 12 ans pour faire le tour du Soleil (exprimez la distance en UA : distance Soleil–Terre) ?

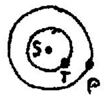
e) La Terre est-elle plus attirée par la Lune ou par le Soleil, sachant que le Soleil est 27 millons de fois plus massif que la Lune et que celle-ci est 389 fois plus proche de la Terre que le Soleil.

**Résumé succinct**



– Eudoxe imagine les planètes, la Lune et le Soleil comme fixés sur des sphères toutes concentriques ayant pour centre la Terre et tournant avec des vitesses et des axes de rotation tous différents.

– Hipparque introduit la méthode des épicycles (peaufinée par Ptolémée) où les corps célestes sont fixés sur des petites sphères centrées sur des sphères centrées sur la Terre. Avec cette méthode, les distances entre la Terre et les planètes sont également respectées.



– Copernic fait ressusciter la vision héliocentrique du monde : les planètes, y compris la Terre, décrivent des cercles autour du Soleil. Ce modèle est nettement plus simple que le précédent, même s'il n'est pas parfait.

– Képler montre que si on admet les trois lois qui portent son nom, on décrit de manière bien plus précise les mouvements des planètes dans l'espace. Les planètes décrivent des ellipses autour du Soleil.

– Newton établit la loi de la gravitation universelle décrivant l'attraction entre deux masses : $F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$.

– Cavendish détermine la constante de gravitation universelle, $G$, sans laquelle il est impossible de déterminer les masses des astres.

– Einstein, avec son espace-temps, modifie la vision de la gravitation et de l'Univers.

**Réponses**

a) Oui, tous les modèles cités le font... b) Non, mais ils augmentent la précision c) Oui car elle est bien plus loin du Soleil que nous d) Troisième loi de Kepler : $T_\mathrm{T}^2/a_\mathrm{T}^3 = T_\mathrm{J}^2/a_\mathrm{J}^3 \Rightarrow a_\mathrm{J} = a_\mathrm{T} \cdot \sqrt[3]{T_\mathrm{J}^2/T_\mathrm{T}^2} = 1\,\mathrm{UA} \cdot \sqrt[3]{(12\,\mathrm{an})^2/(1\,\mathrm{an})^2} = 5.2\,\mathrm{UA}$ e) Par le Soleil car il est plus que $389^2 \simeq 151'000$ fois plus massif que la Lune...

**Bibliographie**

— 1) A. MEESEN, *Gravitation*, De Boeck/Wesmael, 1989
— 2) K. SIMONYI, *Kulturgeschichte der Physik*, Harri Deutsch, 1990
— 3) J.-P. MAURY, *Galilée, le messager des étoiles*, Découvertes Gallimard, 1986
— 4) J.-P. MAURY, *Newton et la mécanique céleste*, Découvertes Gallimard, 1990