

Géocentrisme contre Héliocentrisme

Définitions

Les grecs (Aristarque de Samos,
Aristote, Ptolémée), puis
Copernic, Tycho Brahé, Giordano Bruno
Kepler, Galilée et Newton



Géocentrisme contre Héliocentrisme

Définitions :

Le géocentrisme est un modèle physique ancien selon lequel la Terre se trouve immobile, au centre de l'Univers et que toutes les planètes, ainsi que la Lune et le Soleil tournent autour d'une Terre fixe et immuable. Les étoiles étant beaucoup plus lointaines semblent immobiles et font partie de ce qu'on appelait « la Sphère des Fixes ». Cette théorie date de l'Antiquité et a été notamment défendue par Aristote et Ptolémée. Elle a duré jusqu'à la fin du XVI^e siècle pour être progressivement remplacée par l'héliocentrisme, selon lequel la Terre tourne autour du Soleil. Le modèle de Ptolémée a été abandonné progressivement, en raison de la précision croissante des mesures qui ne correspondait plus à la théorie rigide du modèle géocentrique. *Géo-* est un préfixe d'origine grecque (*Gé = la Terre*) qui se réfère à ce qui concerne la Terre. *Géocentrisme = la Terre est au centre*

L'héliocentrisme, c'est un modèle qui considère que le Soleil est au centre et que la Terre, ainsi que les autres planètes tournent autour du Soleil. La Lune, elle, tourne autour de la Terre. *Hélio-* est un préfixe d'origine grecque (*Helios = le Soleil*) qui se réfère à ce qui concerne le Soleil. *Héliocentrisme = le Soleil est au centre.*

Rappelons que, depuis l'Antiquité et jusqu'aux XVI^e et XVII^e siècles, on ne connaissait que six planètes car elles étaient visibles à l'œil nu : Mercure, Vénus, la Terre, Mars, Jupiter et Saturne. Par contre, Uranus et Neptune, invisibles à l'œil nu, ne seront découvertes que plus tard. Le seul point sur lequel tout le monde était d'accord c'est sur le fait que la Lune tournait autour de la Terre. Mais Galilée n'a pris conscience que la Lune était un astre à part, un « satellite » en orbite autour de sa planète, objet particulier, que lorsqu'il a découvert les 4 gros satellites de Jupiter.

Le géocentrisme est autant une tentative scientifique d'expliquer l'univers qu'une conception philosophique de ce monde. Un principe régit toutes les théories géocentriques, un deuxième la plupart :

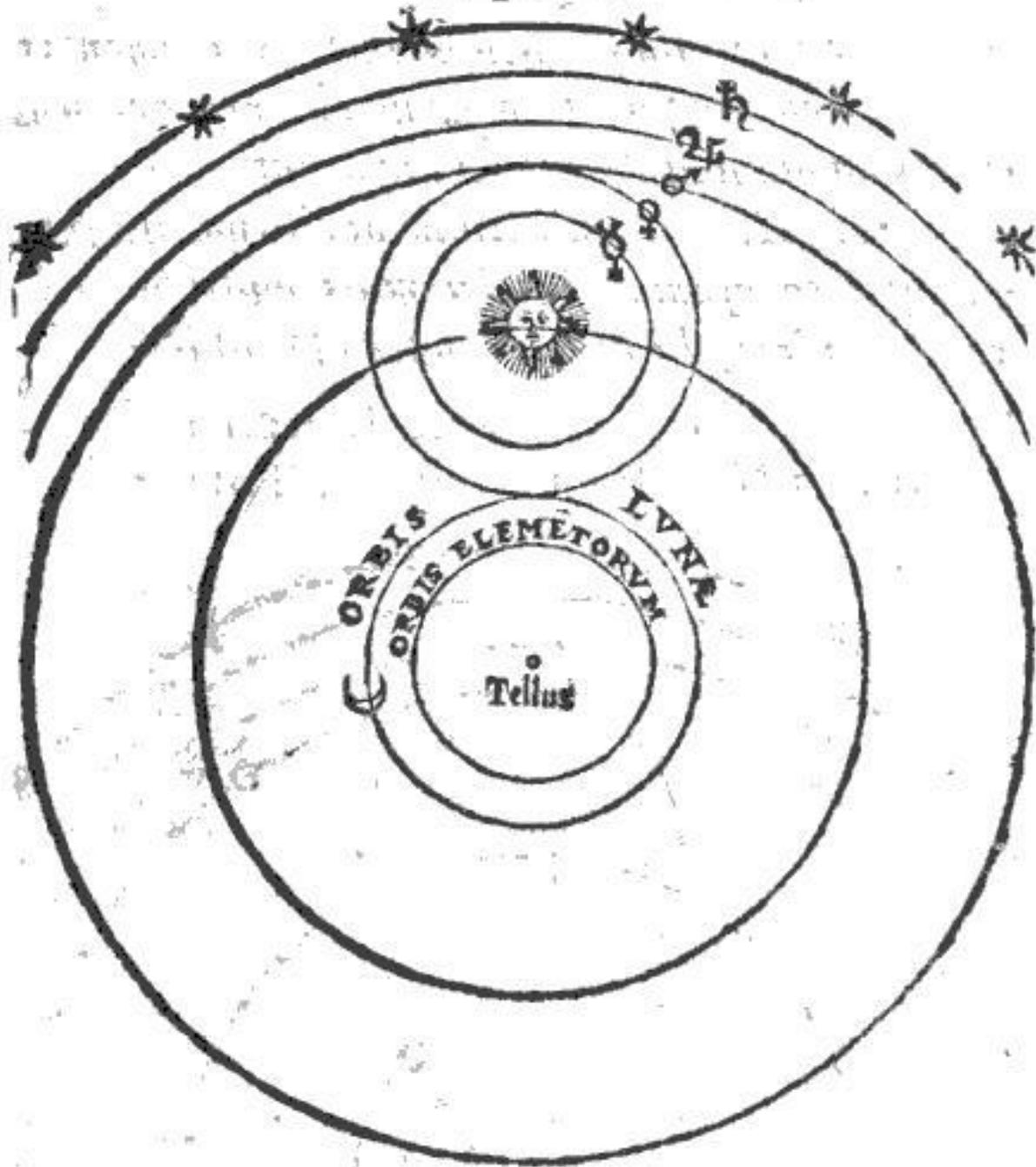
1. La Terre est le centre de l'univers, immobile de lieu (par l'an) et de position (par jour) : les changements des saisons et de jour et nuit se font donc par mouvements extérieurs à la Terre.
2. Les mouvements des planètes (au sens ancien, le mot planète inclut alors le Soleil et la Lune, mais pas la Terre) doivent être parfaits, donc seul le cercle est autorisé, les mouvements angulaires ou rectilinéaires étant considérés comme brusquement abrupts, forcés.

La cosmologie chez les grecs anciens :

Dans la cosmologie des premiers philosophes grecs (vers 600 av. J.-C., Anaximandre, Anaximène, Thalès), **la terre est plate, les astres sont des corps fixés sur des sphères en révolution.**

Les philosophes pythagoriciens (fin du VI^e siècle av. J.C.) imaginent une terre sphérique et dix sphères concentriques portant les différents astres. La dixième sphère est celle qui porte les étoiles. L'aspect le plus original du modèle des pythagoriciens est leur tentative de faire coïncider intervalles musicaux et distances entre les sphères. C'est ce qu'on appelle l'harmonie des sphères. Chaque sphère est censée produire un son dans son mouvement, son que l'on ne distingue pas car il fait partie du bruit de fond que l'on entend depuis notre naissance. Le philosophe Platon voit la Terre comme une sphère au centre de l'Univers, entourée d'une sphère d'eau (épaisseur 2 rayons terrestres), d'une sphère d'air (épaisseur 5 rayons terrestres), et d'une sphère de feu (épaisseur 10 rayons terrestres). Les étoiles se trouvent dans la partie supérieure de la sphère de feu (soit à 18 rayons terrestres) alors que les 7 planètes évoluent dans une région intermédiaire. Toutes ces sphères tournent de manière uniforme autour d'un même axe. Eudoxe de Cnide imagine 27 sphères concentriques mais ne tournant pas suivant le même axe, ce qui permet d'expliquer les différences de latitude des planètes.

Systema maximarum vniuersitatis partium ex sententia Martiani Capellæ.



Héraclide du Pont (v. 388 – v. 310 av. J.-C.) propose un modèle mixte (↑ dessin ci-dessus), de type géohéliocentrique : Vénus et Mercure tournent autour du Soleil, tandis que la Terre reste stationnaire, les révolutions autour de son axe expliquant le mouvement apparent des corps célestes. Cette théorie sera assez populaire dans l'Antiquité pour encore être reprise dans l'ouvrage encyclopédique de Martianus Capella vers 420, grâce à quoi elle sera connue de Copernic.

Cependant, aucun de ces modèles ne permet d'intégrer le mouvement rétrograde de certaines planètes, ni les variations de vitesse dans les mouvements. Il faut attendre, pour cela, le modèle d'Aristote.

***Une exception cependant : Aristarque de Samos (v. 310 / v. 230 av. J.C.)
qui se prononce clairement pour un univers héliocentrique,
mais sa vision ne sera pas partagée et tombera dans l'oubli.***

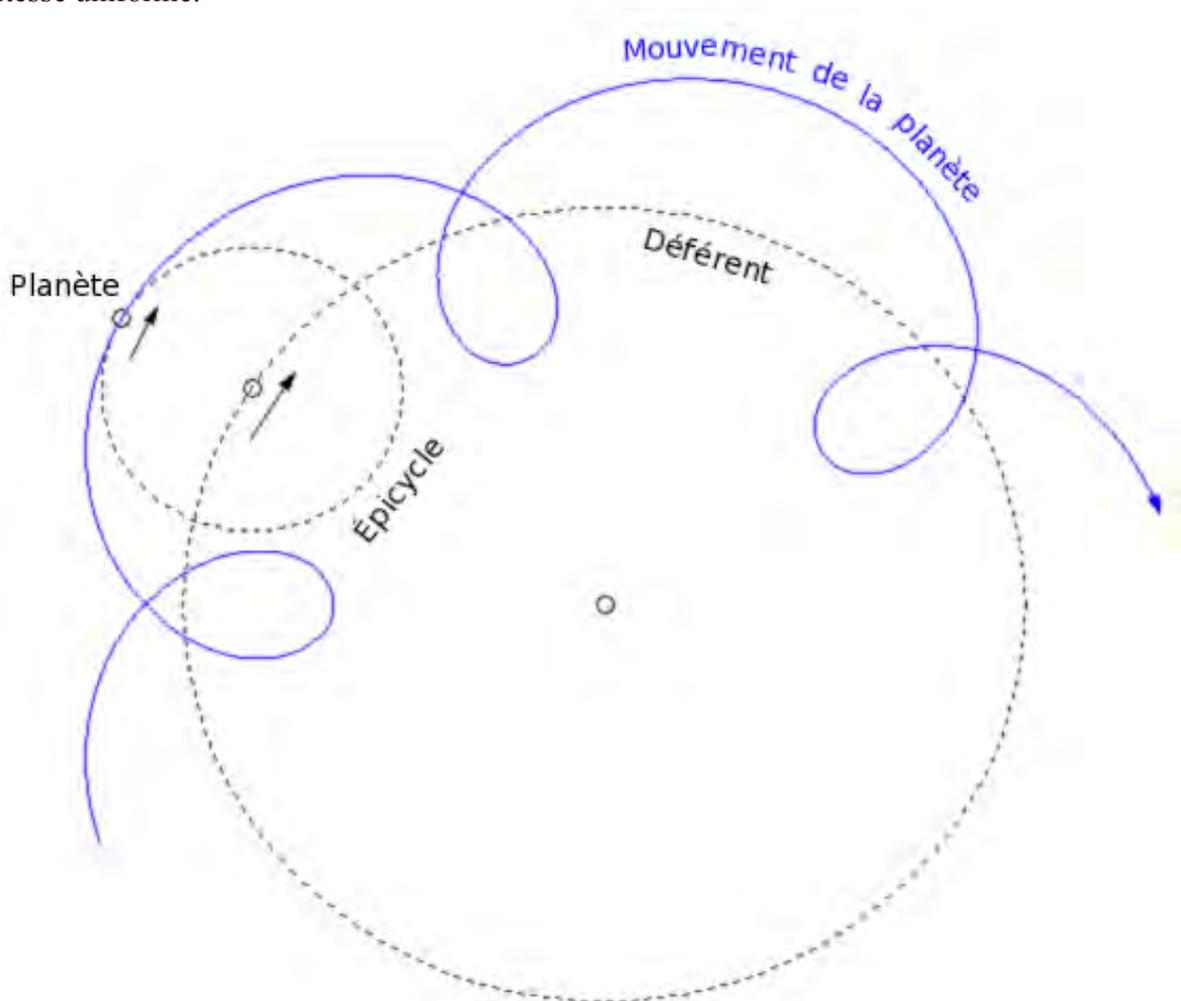
Le modèle d'Aristote (384 - 322 av JC)

Dans le modèle géocentrique d'Aristote la Terre est ronde (sphérique). L'univers, alors fini dans l'espace, se divise en deux parties : les mondes *sublunaire* et *supralunaire*. Le premier concernant tout ce qui est situé sous l'orbite de la Lune (la Terre et son atmosphère), est symbole de mouvement, d'incertitude, d'imperfection, continuellement altéré et instable. Il semble ne répondre à aucune loi et est plutôt hasardeux. Les êtres vivants naissent, changent, et meurent. Le second, quant à lui, est immuable, parfait, stable et éternel. Rien ne peut s'y créer ni disparaître. Les astres étaient portés par 55 sphères concentriques et se déplaçaient à différentes vitesses, suivant une trajectoire circulaire, car le cercle (et par la même occasion, la sphère) était, d'après les pythagoriciens, la figure parfaite. La dernière sphère était celle des astres fixes (les étoiles) ; la première celle de la Lune. Pour Aristote, les sphères sont en cristal contrairement à celles d'Eudoxe (408-355 av. J.C.) qui sont constituées d'une matière appelée *éther*.

Cependant un problème se posait quant à la trajectoire des planètes. Celles-ci semblaient, par moments, revenir en arrière quelque temps avant de reprendre leur course dans le sens « normal », ce phénomène s'appelle la rétrogradation. Pour y répondre, tout en respectant le caractère parfait du cercle, Aristote imagina tout un système de sphères dont certaines ne sont là que pour faire tourner d'autres sphères qui, elles, porteront peut-être un astre. Voilà pourquoi il faut 55 sphères pour seulement six planètes.

Les épicycles

Cette nouvelle théorie, généralement attribuée à Hipparque, mais basée sur les travaux d'Apollonius de Perga (on ignore la part exacte de l'un et de l'autre) apparaît au II^e siècle av. J.C. Les planètes tournent sur des roues appelées épicycles. Ceux-ci tournent eux-mêmes sur une autre roue (appelée *déférent*) dont le centre est la Terre. La rotation simultanée des deux permettait d'obtenir un mouvement complexe, éventuellement rétrograde, et d'expliquer celui des planètes et de la Lune, en préservant en grande partie les présupposés philosophiques de l'époque : les mouvements des astres sont circulaires, centrés sur la terre et de vitesse uniforme.



*Les planètes tournent sur un épicycle qui lui-même tourne sur un déférent.
Ce système permet de modéliser le mouvement rétrograde des planètes.*

L'élaboration de ce système constitue un progrès capital dans l'astronomie antique. En décomposant les mouvements complexes des astres en cercles parcourus par ceux-ci à vitesse constante, on rendait possible la confection de tables astronomiques très précises et très fiables. Ces tables permettront, par exemple, les premiers calculs d'éclipse solaire. Dès lors, la théorie géocentrique, fût-elle fautive, fonctionnait.

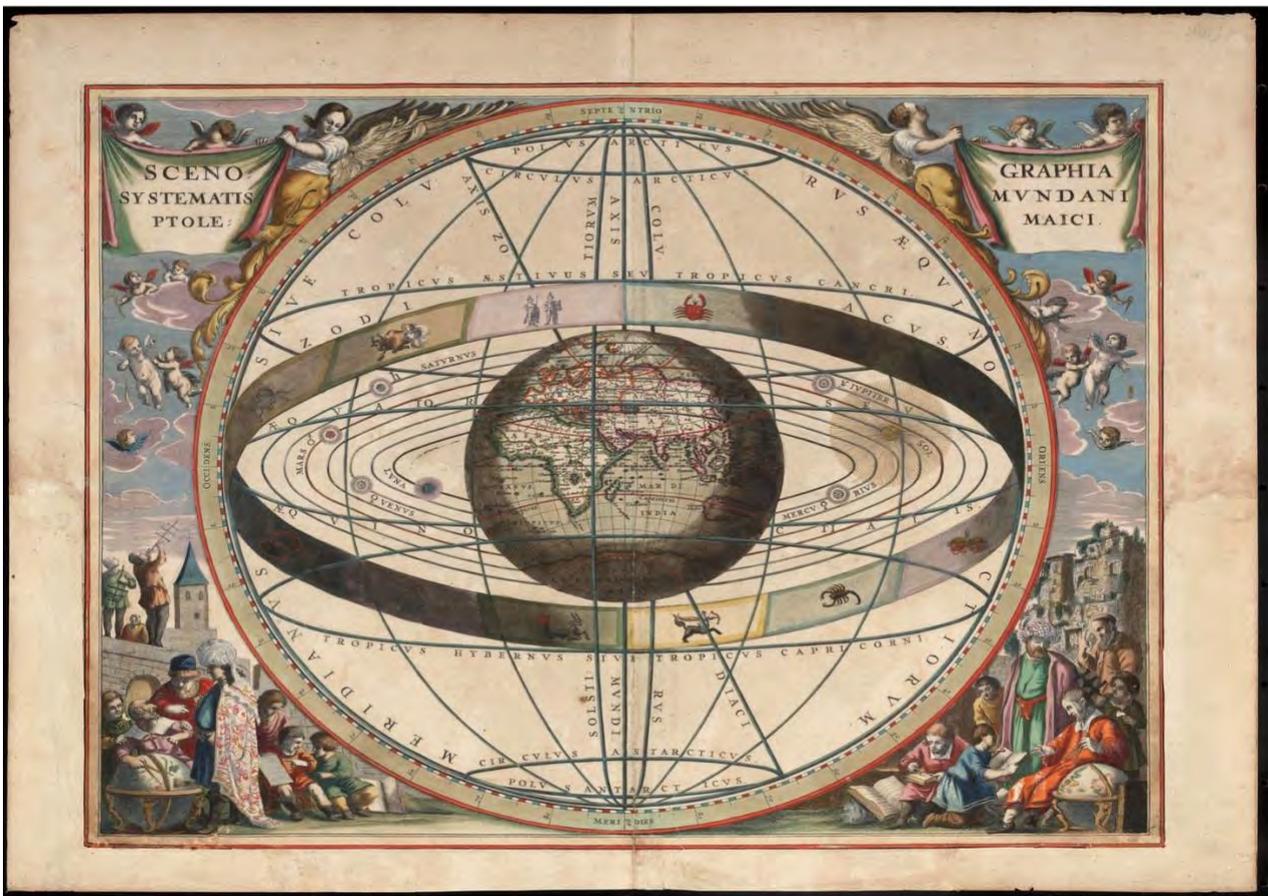
Le système de Claudius Ptolémée (né vers 100 – mort vers 168)

Ptolémée est un grec qui vivait en Égypte, alors province romaine. C'est un astronome, astrologue, mathématicien et géographe. Ptolémée, au II^e siècle après J.C., marque le sommet de l'évolution de la science astronomique de l'antiquité. Après lui, il y aura encore des « commentateurs », parfois intéressants, comme Théon d'Alexandrie, mais aucune théorie nouvelle ne le remettra en question avant la Renaissance. Ptolémée perfectionne la théorie des épicycles, effectue un travail d'observations, de calculs et de compilation de résultats antérieurs, laissant une œuvre en 13 volumes sur l'astronomie appelée la *Grande Syntaxe*. Traduite en arabe et diffusée sous le nom d'*Almageste*, cette œuvre aura une influence considérable sur l'astronomie des siècles suivants. Elle décrit notamment en détail les mouvements des planètes dans le modèle géocentrique.

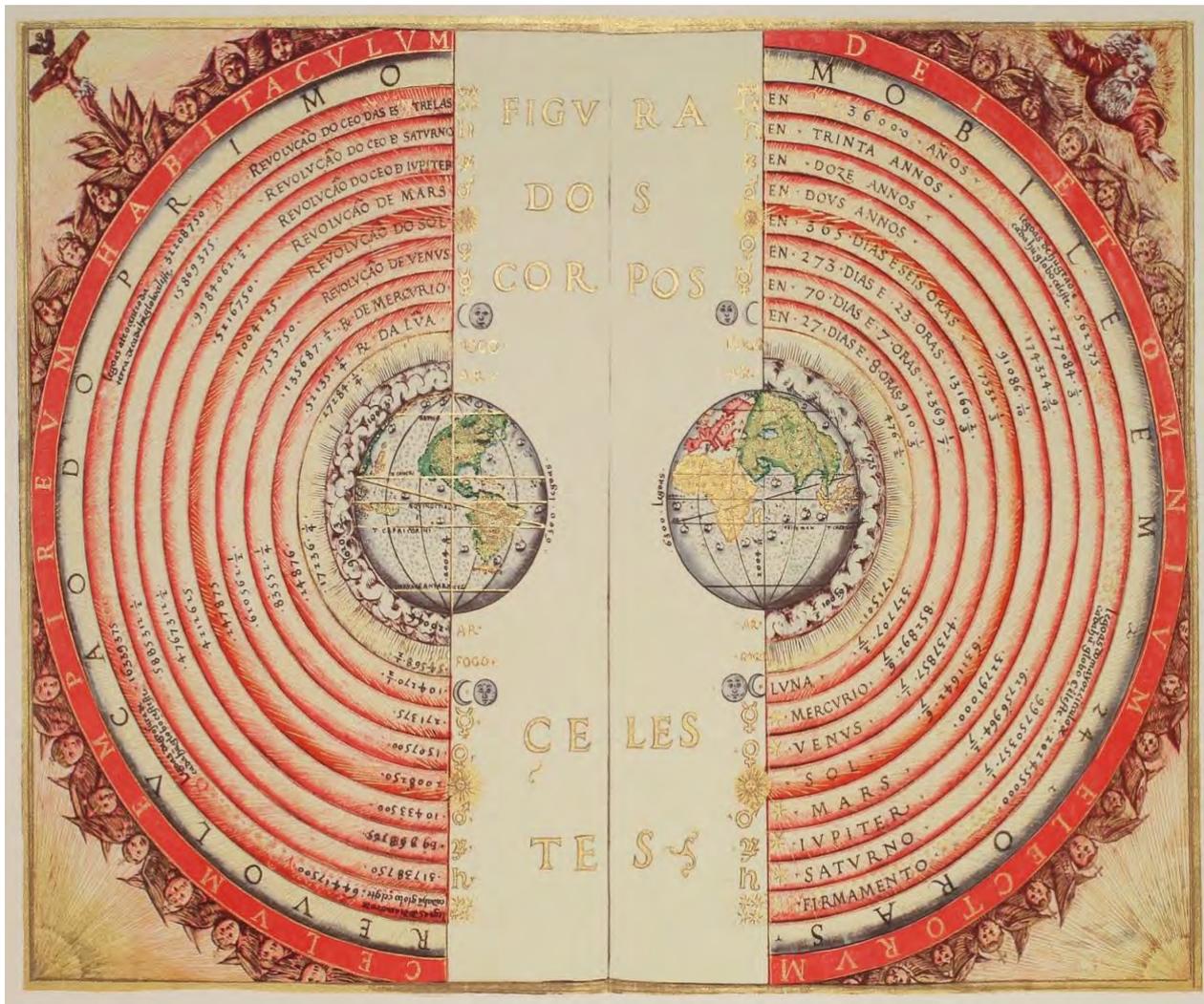
Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Système géocentrique de Ptolémée

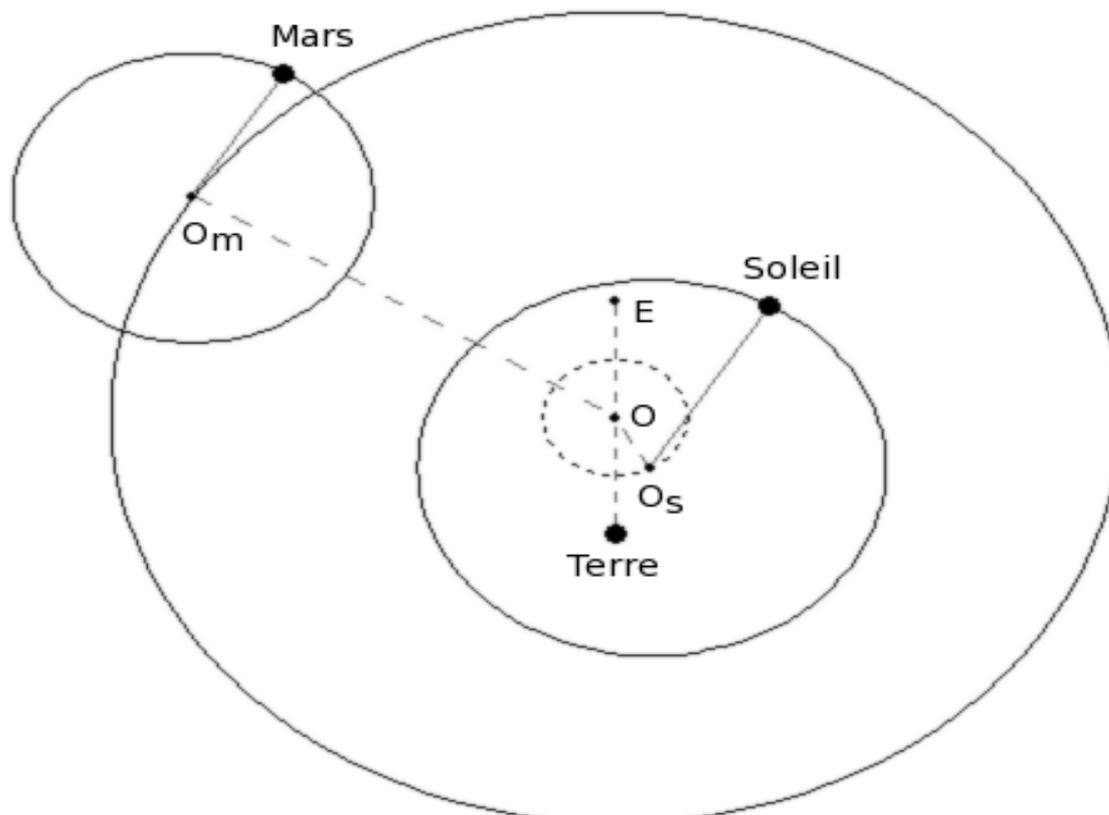


↑ Deux représentations anciennes du système de Ptolémée ↓



Concernant le mouvement du Soleil, Ptolémée reprend le modèle d'Hipparque et l'explique selon deux modèles équivalents : un mouvement uniforme sur un cercle de rayon R dont le centre n'est pas la Terre (modèle excentrique) ou bien rotation du soleil sur un épicycle dont le centre est situé sur un déférent de rayon R et centré sur la Terre, les deux rotations s'effectuant en sens contraire.

Concernant les planètes et afin de mieux rendre compte des observations, Ptolémée va modifier légèrement le modèle antérieur en introduisant la notion de point *équant*. L'équant est un point excentré duquel on voit la planète décrire une trajectoire avec une vitesse angulaire constante. Sous Aristote, ce point était confondu avec la Terre. Il introduit également l'*excentrique*, un épicycle inversé sur lequel tourne le centre du déférent. La Terre se trouve, elle, au symétrique de l'équant par rapport au centre de l'excentrique. Ce modèle, qui permet de mieux considérer les variations de vitesses des planètes, ne place donc plus la Terre en son centre mais un point « imaginaire » ne correspondant à l'emplacement d'aucun objet céleste. Grâce à cette nouvelle conception, Ptolémée obtient un accord bien meilleur avec les mesures les plus précises.



La trajectoire de Mars selon Ptolémée. Le point E est l'équant ; O est le centre de l'excentrique, tracé en pointillés. Les droites (O_m -Mars) et (O_s -Soleil) restent toujours parallèles entre elles.

Ptolémée se borne à donner une exposition et des calculs géométriques des positions et mouvements observés et déduits, sans donner d'explication physique aux mouvements. Il précise toutefois que « les astres nagent dans un fluide parfait qui n'oppose aucune résistance à leurs mouvements ». Il ne reprend donc pas à son compte les sphères de cristal d'Aristote, contrairement à une idée reçue.

L'apport important des astronomes musulmans

Tous les historiens et épistémologistes reconnaissent aujourd'hui l'apport des astronomes musulmans du Moyen-Âge (essentiellement de l'an 800 à l'an 1400). Plus particulièrement Nasir ad-Din at-Tusi (1201-1274) et Ibn al-Shatir (1304-1375) dans la remise en cause officielle des modèles du système planétaire de Ptolémée.

Les deux hommes faisaient partie de l'école de Maragha. Nasir al-Din al-Tusi a fait construire un observatoire et a étudié les mouvements de la Lune et du Soleil. À l'époque, les astronomes de Maragha se convainquirent que le précepte aristotélicien, selon lequel les mouvements dans l'univers ne peuvent être

que circulaires ou rectilignes, est faux. Nasir al-Din al-Tusi montrera de manière géométrique qu'on pouvait engendrer un mouvement rectiligne uniquement à partir de mouvements circulaires grâce à l'hypocycloïde.

Dans son ouvrage intitulé *al-Tadhkira fi 'ilm al-hay'a* (Mémoire des sciences de l'Astronomie), Nasir ad-Din al-Tusi se demande d'abord si la Terre n'était pas elle-même en mouvement et comment rendre cette hypothèse compatible avec les nouveaux calculs astronomiques effectués à l'observatoire de Maragha. Sa proposition est d'éliminer définitivement le concept de l'équant dans le modèle de Ptolémée, jugé incompatible avec les données d'observations des mouvements des corps célestes, et simplifie ainsi considérablement le modèle planétaire grec en proposant un nouveau système (selon les historiens, jugé « ingénieux pour l'époque ») de mouvements circulaires uniformes pour rendre compte des variations de distance de la Lune à la Terre. Ce système est connu sous le nom du « couple d'Al-Tusi », ou « hypocycloïde d'Al Tusi ». On retrouve d'ailleurs ce système à l'identique dans l'œuvre de Nicolas Copernic intitulée *De revolutionibus orbium coelestium* sans que l'on sache comment celui-ci se le serait procuré.



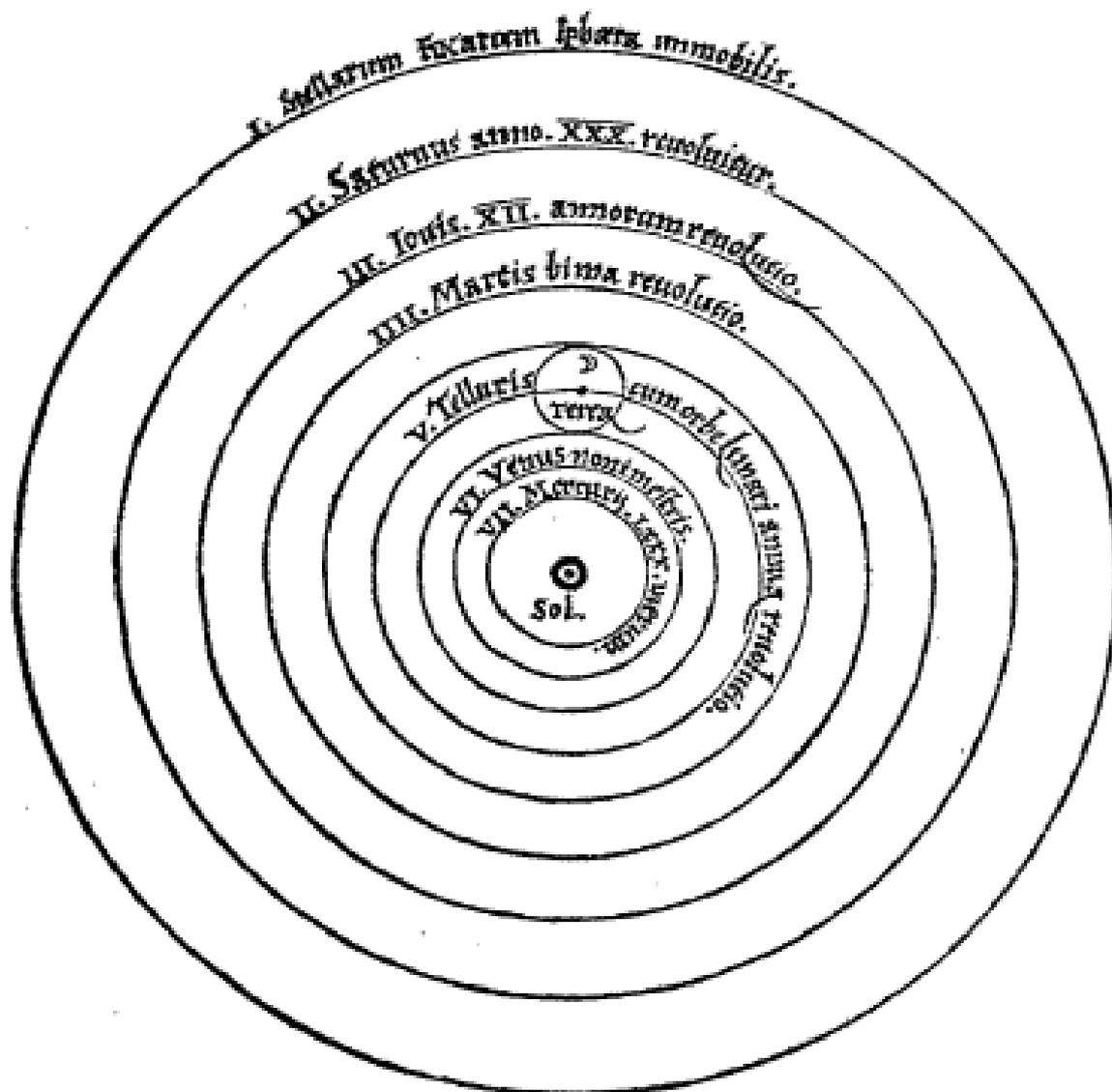
Le modèle du mouvement planétaire selon Al Tusi

Quant à Ibn al-Shatir (Damas vers 1350), il avait continué le travail d'Al Tusi en proposant un autre système planétaire celui-ci totalement concentrique, mécaniquement acceptable, et généralisant les idées d'al-Tusi. Selon les historiens, Nicolas Copernic aurait également repris le modèle terre-lune-soleil d'Ibn al-Shatir pour émettre sa théorie de l'héliocentrisme. Soulignons également l'apport considérable de deux autres astronomes musulmans dans cette aventure des modèles célestes. Il s'agit d'Al-Battani et Al-Zarqali qui, pendant quarante années pour le premier et vingt années pour le second, ont mesuré l'un en orient l'autre en Espagne musulmane, jour après jour les positions exactes du soleil par rapport à la terre et ont dressé des tables de la précession des équinoxes. Les tables d'Al-Battani sont citées dans les dernières pages de

l'ouvrage *De revolutionibus orbium coelestium* de Copernic. Al-Zarqali a établi pour sa part des tables précises sur le mouvement des planètes, connues sous le nom de Tables de Tolède, basées sur les observations qu'il a effectuées à Tolède entre 1061 et 1080. Ces tables étaient d'une précision telle qu'elles lui permirent de prédire des éclipses.

La révolution de Nicolas Copernic (1473 – 1543)

Très probablement influencé par les écrits des astronomes musulmans des XIII^e et XIV^e siècles, Copernic (chanoine, médecin, mathématicien et économiste polonais) propose le **premier système héliocentrique complet**, où le Soleil est au centre du système et où la Terre n'est qu'une planète parmi les autres, en rotation autour du Soleil.

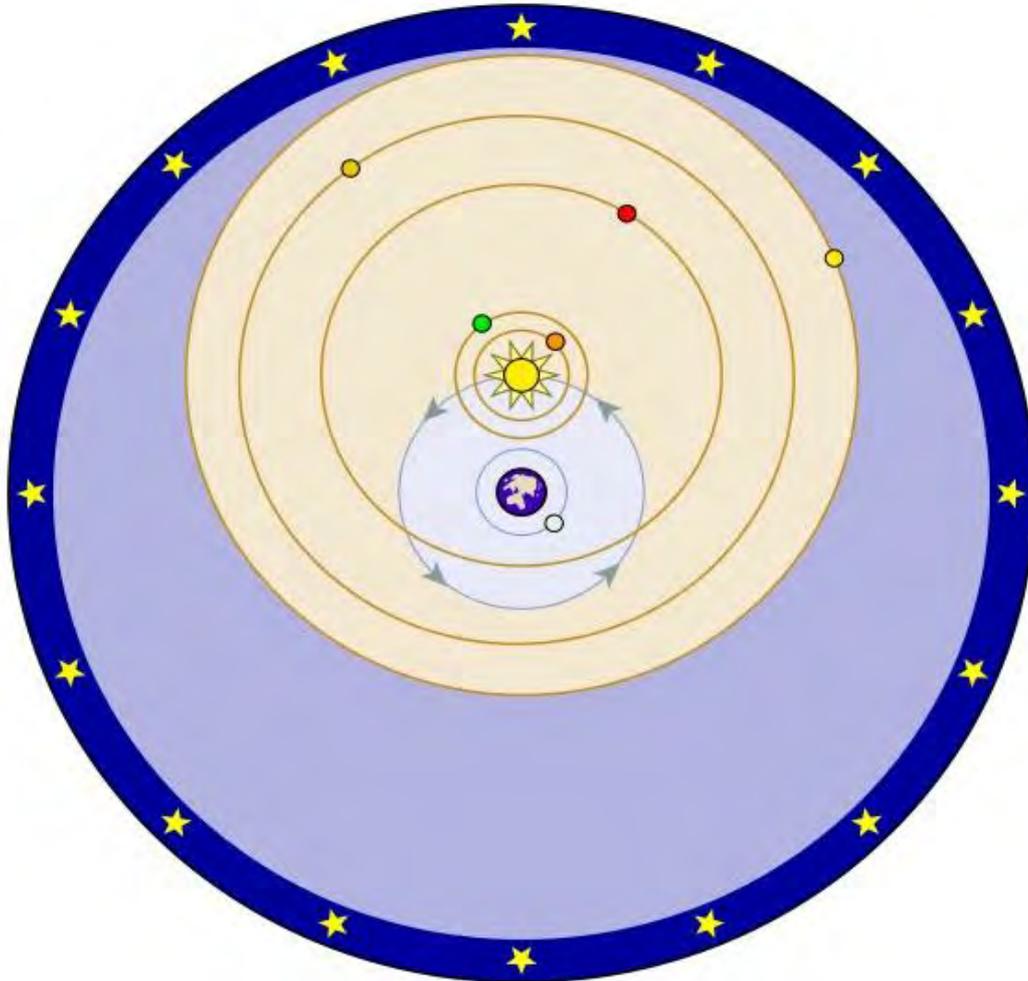


Le système héliocentrique de Copernic (De Revolutionibus orbium coelestium).

Le manuscrit de *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (*Des révolutions des sphères célestes*) est achevé vers 1530. En 1533, l'hypothèse héliocentrique de Copernic s'est déjà répandue jusqu'au Pape Clément VII, et plusieurs prélats pressent Copernic de la publier. Vers 1540 circulent peut-être déjà des copies ; du moins Georg Joachim Rheticus en publie à cette date à Dantzic une analyse qui connaît un grand succès. Mais ce n'est qu'en 1543 que l'ouvrage immortel paraît enfin chez un imprimeur luthérien de Nuremberg, au moment même de la mort de son auteur. On rapporte que Copernic a eu l'occasion d'en manier un exemplaire dans les heures de son agonie. Bien que chanoine, de son vivant Copernic ne fut jamais inquiété par les autorités ecclésiastiques pour ses écrits sur son modèle héliocentrique car il en parla prudemment comme n'étant **qu'une théorie**, et il dédia son livre au Pape Paul III. Mais en 1616 *De Revolutionibus Orbium Coelestium* est finalement mis à l'index. Cette censure très tardive arrive parce que les preuves de la réalité du système héliocentrique de Copernic sont enfin apportées par Galilée.

Les résistances de Tycho Brahe (1546 - 1601)

Au XVI^e siècle, l'astronome danois Tycho Brahe repense totalement la conception géocentrique de Ptolémée. Connaissant le modèle héliocentrique de Copernic, il ne pouvait l'accepter, *pour des raisons religieuses plus que scientifiques*. Ses observations le conduisent cependant à élaborer un modèle personnel hybride mélangeant géocentrisme (quant à l'Univers) et héliocentrisme (quant au Système Solaire, sauf la Terre) : la Lune et le Soleil tournent autour de la Terre, qui reste le centre de l'Univers, tandis que les planètes tournent autour du Soleil. Ce modèle a été créé afin de répondre au problème des phases de Vénus dans le système géocentrique précédent.



Dans ce modèle géo-héliocentrique de Tycho Brahe, les objets célestes sur les orbites en bleu-gris (Lune et Soleil) tournent autour de la Terre. Les objets sur les orbites en orange (Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne) tournent autour du Soleil. À la périphérie se trouvent les étoiles, fixes.

D'après Aristote, les comètes faisaient partie du monde sublunaire à cause de leurs trajectoires très excentriques et étaient même associées à des phénomènes météorologiques. Elles ne pouvaient faire partie du monde supralunaire où tout était ordonné car elles risquaient de heurter les sphères cristallines. Cependant, Tycho Brahe démontre que la comète de 1577 est à une distance supérieure à quatre fois la distance Terre-Lune et fait donc partie du monde supralunaire, infirmant la théorie des sphères matérielles. Les sphères n'étaient donc qu'une vue de l'esprit. Cette immuabilité du monde supralunaire avait été remise en cause par l'observation d'une nova cinq ans auparavant. Celle-ci apparut puis disparut 18 jours plus tard, là où les objets étaient censés ne jamais mourir.

Tycho Brahe se donnait une discipline d'observation quotidienne ; il a formé toute une génération d'astronomes, leur inculquant l'art de l'observation et a déduit de celles qu'il effectua un système, dit « de Tycho Brahe », élaboré à partir de la théorie géocentrique de Ptolémée (vers 90 – vers 168), de la théorie mixte d'Héraclide du Pont, pour qui le Soleil orbite autour de la Terre, tandis que les cinq planètes tournent autour du Soleil, et de la théorie héliocentrique de Copernic. Dans la théorie de Tycho Brahe, le Soleil et la Lune tournent autour de la Terre immobile, tandis que Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne tournent autour du Soleil.

Malgré son erreur, Tycho se classe dans un mode de pensée basé sur l'observation et l'expérimentation du monde, comme ce sera le cas aussi pour Kepler ou Galilée. Il s'oppose de ce fait à un mode de pensée fondé sur le choix de systèmes seulement théoriques, comme celui d'Aristote, qui influença pourtant la recherche astronomique pendant des siècles et qui, à plusieurs égards, restera fermement ancré dans la tradition des Anciens, ou enfin comme celui de Copernic.

Le système de Copernic (1473–1543) est déclaré contraire à la Bible par l'Église en 1616 lors du procès de Galilée. Le système de Tycho Brahe fut alors adopté par les jésuites.

Giordano Bruno, le visionnaire (1548 – 1600)

Ce moine dominicain, également philosophe, avait des idées peu orthodoxes ce qui attira sur lui, dès 1576, l'attention de l'Inquisition. Il voyage beaucoup, notamment en France (il sera reçu par Henri III) et en Angleterre, où il publie trois livres dont deux essentiels : « Le Banquet des Cendres » et « De l'Infini, de l'Univers et de Mondes ». Il expose dans ces ouvrages sa vision cosmographique d'un monde, où il soutient les thèses de Copernic et allant même bien plus loin quand il dit « Nous affirmons qu'il existe une infinité de terres, une infinité de soleils et un éther infini ». C'est donc le premier humain à avoir évoqué l'existence d'exoplanètes !! Il parle aussi d'un Univers infini au-delà du système solaire.

Il reprend aussi les idées de Nicolas de Cues dans *La Docte ignorance* : « Les planètes ont un double mouvement, sur elles-mêmes et autour du Soleil qui est au centre ».

Dans les quelques 35 livres qu'il a écrits, il en est sur la magie, sur l'astrologie, sur la philosophie, sur la poésie et de nombreux autres sujets. Son excommunication (prononcée en 1578) lui fait nier la nécessité d'un dieu créateur de l'Univers. De plus, il ne cesse, au travers de ses écrits, d'attaquer Aristote, précurseur de Ptolémée et icône du clergé catholique. Après la France il va en Allemagne en 1586, où il attaque les calvinistes et les catholiques.

Il s'intéresse au rapport entre les nombres et les figures géométriques, il publie des réflexions sur l'infiniment petit, il invente un magnifique système mnémotechnique. Invité par un patricien, il se rend à Venise, mais ne s'entend pas avec son hôte qui finalement le dénoncera à l'Inquisition. Il est arrêté en 1592. Son procès durera 8 ans mais il sera blanchi. Il est libre, ou presque. Mais la Curie romaine (le Vatican) s'acharne et veut lui faire payer son apostasie. Le pape Clément VIII obtient du Doge de Venise de l'extrader vers Rome. On le somme de se rétracter, il refuse. Il est condamné à périr sur le bûcher. D'ailleurs, sa condamnation est d'avantage due à ses positions sur Dieu que sur son support de la théorie héliocentrique de Copernic. À la lecture du verdict il dit à ses juges « Vous éprouvez sans doute plus de crainte à rendre cette sentence que moi à la recevoir ».

Le jeudi 17 février 1600, sur le Campo de' Fiori à Rome, il est livré vivant aux flammes devant la foule de pèlerins venus pour le Jubilé. Il est nu. Par raffinement de cruauté et pour le réduire au silence, on lui a cloué la langue sur un mors de bois.

Quelques-unes des pensées de Giordano Bruno au travers de ses livres :

« Il n'y a aucun astre au milieu de l'univers, parce que celui-ci s'étend également dans toutes ses directions. Chaque étoile est un soleil semblable au nôtre, et autour de chacune d'elles tournent d'autres planètes, invisibles à nos yeux, mais qui existent ».

« Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept « terres » [*la Terre, la Lune, les cinq planètes alors connues : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne*] que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche. »

— *Giordano Bruno, L'Infini, l'Univers et les Mondes, 1584*

On lui demande : « Ainsi donc les autres mondes sont habités comme l'est le nôtre ? ». Il répond : « Sinon comme l'est le nôtre et sinon plus noblement. Du moins ces mondes n'en sont-ils pas moins habités ni moins nobles. Car il est impossible qu'un être rationnel suffisamment vigilant puisse imaginer que ces mondes innombrables, aussi magnifiques qu'est le nôtre ou encore plus magnifiques, soient dépourvus d'habitants semblables et même supérieurs ».

— *Giordano Bruno, L'Infini, l'Univers et les Mondes*

« Aussi la terre, pas plus qu'aucun autre monde, n'est-elle au centre [de l'Univers] ; et il n'existe pas de points dans l'espace qui formeraient des pôles définis et déterminés pour notre terre, de même qu'elle ne forme pas un pôle défini et déterminé pour aucun autre point de l'éther ou de l'espace du monde; et ceci est vrai pour tous les autres corps [de l'Univers]. De points de vue différents ils peuvent, tous, être regardés comme centres, ou comme zéniths et ainsi de suite. Ainsi donc, la terre n'est pas le centre de l'Univers ; elle n'est centrale que par rapport à notre propre espace environnant. (...) Dès qu'on suppose un corps d'une taille infinie, on renonce à lui attribuer centre ou périphérie ».

« Il n'y a dans l'univers ni centre ni circonférence, mais, si vous voulez, le tout est central, et on peut aussi considérer tout point comme une partie de la circonférence, par rapport à un autre point central ».

Contrairement à Copernic il n'appuie pas ses dires sur des preuves mathématiques. « Concernant la mesure du mouvement [des corps célestes], la géométrie ment plutôt qu'elle ne mesure ». (*De immenso*)

« C'est à l'intellect qu'il appartient de juger et de rendre compte des choses que le temps et l'espace éloignent de nous. »

— *Giordano Bruno, De innumerabilibus, immenso, et infigurabili (1591)*

Il pense que tout est vivant, et il pense que tout est psychique :

« La Terre et les astres [...], comme ils dispensent vie et nourriture aux choses en restituant toute la matière qu'ils empruntent, sont eux-mêmes doués de vie, dans une mesure bien plus grande encore ; et vivants, c'est de manière volontaire, ordonnée et naturelle, suivant un principe intrinsèque, qu'ils se meuvent vers les choses et les espaces qui leur conviennent ». « J'ai découvert l'identité de toutes les religions, et donc je n'en remets aucune en doute, car la divinité m'apparaît en toute chose, du grain de sable à l'étoile la plus éloignée, de l'infiniment petit à l'infiniment grand ».

En 1993 de nouveau, le pape Jean-Paul II et les autorités vaticanes maintenaient que la condamnation de Bruno avait été « pleinement motivée ». Enfin, le 3 février 2005, une autorité vaticane, chargée d'examiner les réhabilitations possibles, refusait celle de Giordano Bruno, ses idées étant toujours qualifiées d'hérétiques.

Johannes Kepler (1571 - 1630)

Kepler ne parvint pas à convaincre Tycho Brahe d'adopter le modèle héliocentrique du système solaire. Brahe semble ne pas avoir eu d'objection de principe, mais s'y être opposé pour des raisons relatives aux observations. En effet, il considérait que si la Terre orbitait annuellement autour du Soleil, il devrait y avoir une *parallaxe stellaire observable sur une période de six mois, au cours de laquelle l'angle d'orientation d'une étoile changerait, ce qui n'était pas perceptible*.

Kepler et Brahe ont des relations houleuses. Ce dernier refuse le système de Copernic. Mais Kepler dit que Tycho Brahe un homme plein de richesses (ses mesures étaient les plus précises jamais réalisées) mais qu'il ne sait pas les exploiter correctement. Atteint de myopie et de diplopie à la naissance, Kepler s'appuie donc sur les observations de Brahe pour élaborer ses théories. Brahe demande à Kepler de calculer l'orbite de Mars, car ses propres mesures ne correspondent pas à celles prévues par les tables. Kepler s'exécutera et mettra beaucoup de temps à le faire. Mais cette recherche lui permet de découvrir ses deux premières lois fondamentales qu'il publie en 1609 dans *Astronomia nova*. Il publiera la troisième en 1619 dans *Harmonices Mundi*.

Ces trois lois seront mondialement connues et reconnues sous le nom des « 3 Lois de Kepler » et forment un socle fondamental de l'astronomie.

Loi 1 – Loi des orbites

Les planètes du système solaire décrivent des trajectoires elliptiques (et non circulaires), dont le Soleil occupe l'un des foyers. Plus généralement, les objets célestes gravitant autour du Soleil décrivent des trajectoires qui sont des coniques dont le Soleil est un foyer.

Loi 2 – Loi des aires

Le mouvement de chaque planète est tel que le segment de droite reliant le Soleil et la planète balaie des aires égales pendant des durées égales.

Loi 3 - Loi des périodes

Pour toutes les planètes, le rapport entre le cube du demi grand axe de la trajectoire et le carré de la période est le même — cette constante est indépendante de la masse de la planète

Galileo Galilei, dit Galilée (1564 - 1642)

Il est, dans l'ordre : mathématicien, physicien, géomètre, il s'intéresse à la mécanique et, enfin, il est astronome, l'archétype des génies de la renaissance qui touchent à de nombreuses matières (il n'est pas le seul dans son cas). Né à Pise il vivra essentiellement à Padoue (proche de Venise) et surtout à Florence.

On définit aujourd'hui une expérience physique ainsi : Une expérience est un protocole matériel permettant de mesurer certains phénomènes dont la théorie donne une représentation conceptuelle. Il est illusoire d'isoler une expérience de la théorie associée. Le physicien ne mesure évidemment pas des choses au hasard ; il faut qu'il ait à l'esprit l'univers conceptuel d'une théorie. Aristote n'a jamais pensé à calculer le temps que met une pierre lâchée pour atteindre le sol, simplement parce que sa conception du monde sublunaire n'avait rien à faire avec une telle quantification. Cette expérience a dû attendre Galilée pour être réalisée. Il s'intéresse à la chute des corps, aux pendules et à leurs oscillations, il étudie le centre de gravité des objets.

Ces quantifications ont permis à la nouvelle physique de Galilée et de Newton d'atteindre une exactitude auparavant non conçue : mais elle comporte d'autres éléments que la seule quantification. Pour Aristote, le lourd et le léger étaient deux qualités opposées. Pour Galilée le lourd était une qualité essentielle de la matière et le léger devient par là un simple manque de matière, une négation. Newton accepte cette conception du lourd et du léger, et il y ajoute la théorie de gravitation ou attraction universelle qui, par-là, est une théorie uniquement de l'attraction du lourd par le lourd. Ni l'un ni l'autre n'excluent l'action des esprits comme irréaliste, mais tous les deux la trouvent négligeable quant à l'étude de la nature. Ni l'un ni l'autre ne l'acceptent donc comme cause strictement contemporaine d'aucun mouvement. Et là ils introduisent aussi le concept d'un mouvement prolongé tant qu'il n'est pas arrêté. Désormais, gravitation et inertie, comprenant la continuation du mouvement, deviennent les seules causes acceptées par l'astronomie.

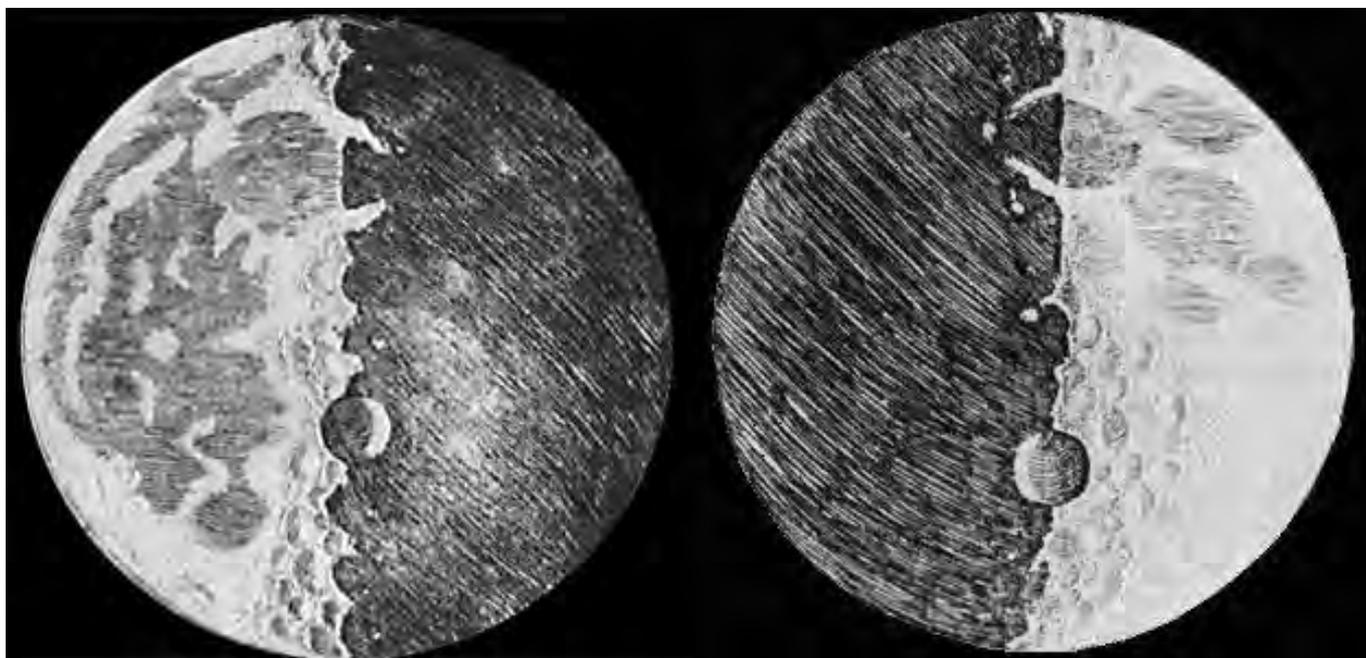
L'emploi de la parallaxe

Dans le procès de Galilée, l'Inquisiteur Robert Bellarmine fit l'objection que, si la Terre se mouvait, on devrait observer une parallaxe par rapport aux étoiles se référant à l'avis de Tycho Brahe sur ce sujet. Mais aucune parallaxe n'ayant été mesurée, ce fait devenait un argument contre l'héliocentrisme. Galilée répondit que les étoiles étaient trop lointaines pour que la parallaxe puisse être vue et mesurée avec les instruments d'alors. Ce n'est que bien plus tard qu'on validera (à posteriori) les thèses de Galilée. L'un des premiers à avoir réussi à mesurer les distances auxquelles se trouvent certaines étoiles par la mesure de la parallaxe est l'astronome allemand Friedrich Bessel (1784-1846) en 1838.

Les lunettes astronomiques de Galilée

Un de ses élèves (français) lui fait part en 1609 d'une invention hollandaise, une longue-vue, permettant de voir des objets éloignés. Galilée se met à en fabriquer plusieurs dizaines, mais peu doué en optique ses lunettes sont peu satisfaisantes et dit que seules quelques-unes étaient utilisables. En 1610 en a déjà fabriqué une soixantaine, grossissant de 6 fois à 20 fois, puis 30 fois.

Il se met alors à observer le ciel nocturne, découvre la Voie Lactée, il observe la Lune et ses phases, il observe les taches solaires (qu'il dessine), il observe et dessine les amas ouverts des Pléiades et de la crèche (Praesepe). Pour la Lune, qui faisait partie d'après Aristote et Ptolémée du monde « supralunaire » parfait et lisse, il découvre, en observant la zone transitoire qui sépare l'ombre de la lumière sur la Lune (le « terminateur ») qu'elle n'a absolument rien de régulier. Il en déduit l'existence de montagnes sur la Lune et estime même leur hauteur à 7 000 mètres, davantage que la plus haute montagne connue à l'époque.



Deux dessins de Galilée : La Lune

Mais Galilée a aussi d'autres arguments pour soutenir la théorie copernicienne. Notamment deux, qui sont essentiels :

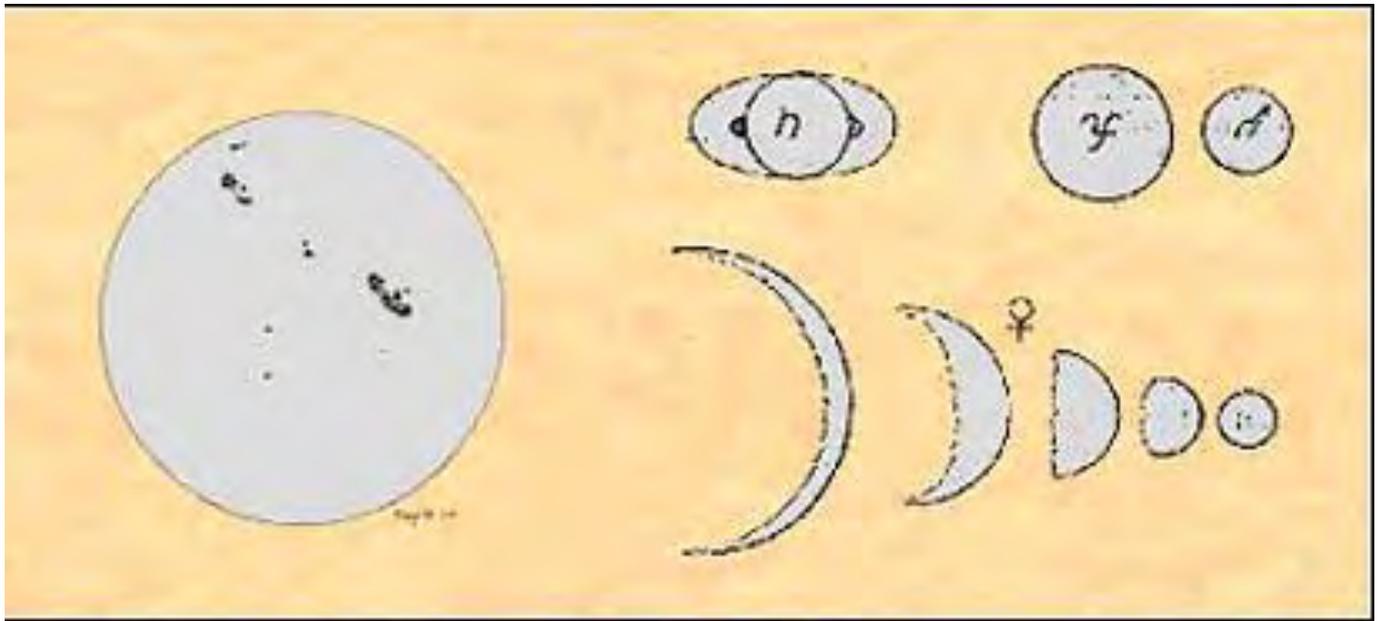
- 1) Il a observé (et il dessinait et datait tout ce qu'il regardait) la planète Jupiter à partir du 7 janvier 1610 avec la toute première lunette astronomique. Il s'est aperçu que 3 petits objets d'abord, puis 4, proches de la planète, tournaient autour de celle-ci, d'une manière régulière et répétitive (il fit ces observations pendant plusieurs jours consécutifs). Il venait de découvrir les 4 gros satellites de Jupiter (Io, Europe, Ganymède et Callisto), qu'il nomma étoiles Médicéennes (en l'honneur des Médicis). C'est l'un de ses grands admirateurs, Kepler, qui les appellera « satellites ».

7 janvier 1610	Oui.	*	*	○	*	Occ
8 janvier 1610				○	*	*
10 janvier 1610		*	*	○		
11 janvier 1610		*	*	○		
12 janvier 1610		*	*	○	*	
13 janvier 1610		*		○	*	*
15 janvier 1610				○	*	*
15 janvier 1610				○	*	*
16 janvier 1610		*	*	○	*	*

Dessins de Galilée lors de ses premières observations.

Relevé des observations de Jupiter et position des satellites par Galilée en janvier 1610

- 2) Il a observé (et dessiné) les phases de Vénus. Pour lui, c'est une nouvelle preuve de la vérité du système copernicien, car s'il est facile d'interpréter ce phénomène grâce à l'hypothèse héliocentrique, il est beaucoup plus difficile de le faire à l'aide de l'hypothèse géocentrique.



Dessins de Galilée : À gauche, le Soleil qui présente des taches. En haut : Saturne (et ses anneaux), Jupiter et Mercure. En bas : Vénus présentant plusieurs phases.

Le procès de Galilée

Le procès de Galilée a eu lieu au début du XVII^e siècle. Les guerres de religion sévissent et diverses révoltes éclatent en Europe. Surtout, il intervient à un moment où le pape est contraint d'apporter son soutien à la Contre-Réforme qui, définie par le Concile de Trente, est mise en œuvre de façon de plus en plus rigoureuse. Le contexte est celui d'une lutte politique et idéologique violente.

Galilée vit en Italie, protégé par le pape Urbain VIII et le grand-duc de Toscane. En 1632, il fait paraître à Florence ses *Dialogues sur les deux grands systèmes du monde* dans lesquels il se prononce contre le géocentrisme de Ptolémée. Cet ouvrage est publié **après** « *imprimatur* », c'est-à-dire avec l'approbation de l'Église.

Le livre décrit les échanges entre Filippo Salviati, un défenseur du système de Copernic, Simplicio, le défenseur de Ptolémée et de la physique aristotélicienne. Sagrado, Vénitien éclairé, est en place d'arbitre. Non seulement Simplicio est traité avec ironie et la théorie ptolémaïque récusée, mais, de plus, Salviati prétend s'affranchir de l'autorité et du dogmatisme. Selon lui, la connaissance de la nature devrait s'appuyer sur l'observation, le raisonnement et les calculs mathématiques.

Avec le succès du livre, Galilée devient un personnage connu et l'Église se doit de réagir. Galilée est convoqué par le Saint-Office. Il se rend à Rome en 1633 où il y est interrogé et finalement une menace de torture est évoquée pour l'effrayer, sur ordre du pape ; Galilée cède. Le 22 juin 1633, au couvent dominicain de Santa-Maria, la sentence est rendue :

« Il est paru à Florence un livre intitulé *Dialogue sur les deux systèmes du monde*, ceux de Ptolémée et de Copernic dans lequel tu défends l'opinion de Copernic. Par sentence, nous déclarons que toi, Galilée, t'es rendu fort suspect d'hérésie, pour avoir tenu cette fausse doctrine du mouvement de la Terre et repos du Soleil. Conséquemment, avec un cœur sincère, il faut que tu abjures et maudisses devant nous ces erreurs et ces hérésies contraires à l'Église. Et afin que ta grande faute ne demeure impunie, nous ordonnons que ce Dialogue soit interdit par édit public, et que tu sois emprisonné dans les prisons du Saint-Office ».

Galilée, sous la contrainte, prononce la formule d'abjuration préparée pour lui :

« Moi, Galiléo, fils de feu Vincenzio Galilei de Florence, âgé de soixante-dix ans, ici traduit pour y être jugé, agenouillé devant les très éminents et révérends cardinaux inquisiteurs généraux contre toute hérésie dans la chrétienté, ayant devant les yeux et touchant de ma main les Saints Évangiles, jure que j'ai toujours tenu pour vrai, et tiens encore pour vrai, et avec l'aide de Dieu tiendrai pour vrai dans le futur, tout ce que la Sainte Église catholique et apostolique affirme, présente et enseigne. Cependant, alors que j'avais été

condamné par injonction du Saint-Office d'abandonner complètement la croyance fausse que le Soleil est au centre du monde et ne se déplace pas, et que la Terre n'est pas au centre du monde et se déplace, et de ne pas défendre ni enseigner cette doctrine erronée de quelque manière que ce soit, par oral ou par écrit ; et après avoir été averti que cette doctrine n'est pas conforme à ce que disent les Saintes Écritures, j'ai écrit et publié un livre dans lequel je traite de cette doctrine condamnée et la présente par des arguments très pressants, sans la réfuter en aucune manière ; ce pour quoi j'ai été tenu pour hautement suspect d'hérésie, pour avoir professé et cru que le Soleil est le centre du monde, et est sans mouvement, et que la Terre n'est pas le centre, et se meut. J'abjure et maudis d'un cœur sincère et d'une foi non feinte mes erreurs. [...] ».

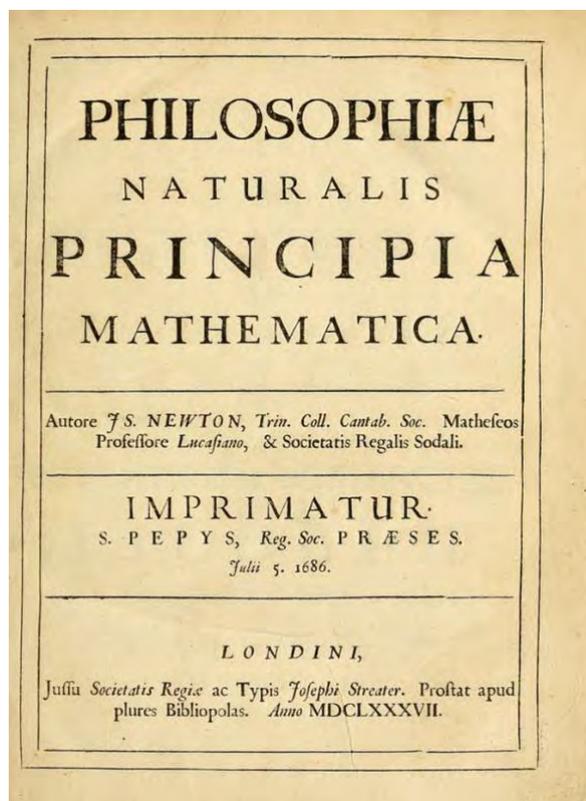
Pour une lecture plus complète et des considérations plus larges autour du procès de Galilée, voir cet article de « Philosophie, Science et Société » :
<https://philosciences.com/philosophie-et-societe/ideologie-croyance-societe/145-galilee-proces>

Galilée sera condamné à la prison à vie malgré son abjuration. Fort heureusement pour lui, il était l'un des amis intimes du Pape Urbain VIII et son emprisonnement fut commué en simple assignation à résidence.

La nouvelle physique s'impose : Isaac Newton (1642 – 1727)

Il n'est pas question ici de décrire tous les apports de Newton à l'astronomie. Ce serait beaucoup trop long. Il n'est cité ici que pour deux raisons principales : 1) Il endosse le modèle copernicien du système solaire et renvoie le modèle géocentrique aux oubliettes. 2) Il invente et construit le premier télescope, qui apporte une grande amélioration en termes de grossissement par rapport aux lunettes astronomiques du XVII^e siècle. Il facilite ainsi une analyse plus précise de ce qui se passe dans notre ciel et conforte les idées de Copernic, Kepler et Galilée.

En 1687, Isaac Newton publie le premier volume de son *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Il inclut les lois connues aujourd'hui comme les trois lois du mouvement de Kepler, ainsi que la loi universelle de la gravitation et le principe de relativité.



Couverture du premier volume de l'ouvrage majeur d'Isaac Newton



Réplique du premier télescope de Newton (miroir de 150 mm de diamètre) en 1672

Ces nouvelles lois prédisent le mouvement de tout corps en fonction des forces qui s'exercent sur lui. Elles sont utilisées dès lors et jusqu'à aujourd'hui pour tous les calculs en mécanique (à l'exception de quelques situations extrêmes réclamant la théorie de la relativité ou la physique quantique). Elles constituent la première mécanique cohérente, pouvant expliquer tous les phénomènes de la vie quotidienne.

En admettant que le Soleil est largement plus massif que les planètes, la loi de la gravitation et les lois du mouvement permettent de démontrer que les mouvements des planètes sont conformes aux lois de Kepler, que Kepler lui-même avait constaté expérimentalement. L'héliocentrisme est conforté, ainsi que le caractère elliptique des orbites. Toutefois ce n'est qu'en 1727, à la suite de la publication des travaux de James Bradley sur l'aberration de la lumière, qu'est apportée la première preuve expérimentale du mouvement de la Terre autour du Soleil. Capables de prévoir les trajectoires des comètes comme les dates des éclipses, les lois de Newton proposent un cadre physique à tous les mouvements cosmiques presque sans intervention d'autres forces. Presque car Newton lui-même affirmait que quand les planètes quittaient leurs orbites, Dieu les y replaçait. Pierre-Simon de Laplace démontra plus tard que les lois de Newton permettent au système solaire d'être suffisamment stable pour se maintenir sans intervention extérieure.

Conclusion

Importance philosophique

L'idée que la Terre devait être au centre de l'Univers découlait en grande partie d'une vision du monde. Aristote, en effet, avait construit un système suivant des critères d'esthétique (exigence de sphères parfaites) et de l'importance qu'il attribuait aux objets. Il s'agit d'un modèle surtout intuitif, qui attribue des comportements différents aux objets terrestres et célestes (il faut attendre Newton pour donner une explication commune aux mouvements des astres et à la chute des corps). Ce caractère intuitif est initialement la force du modèle géocentrique : l'homme ne ressent pas de mouvement de la Terre, et les objets célestes ne tombent pas comme les objets terrestres. Mais selon les critères, le rôle prépondérant de l'intuition fait juger ce modèle comme non scientifique.

L'exigence de perfection des sphères se retourna aussi contre le géocentrisme ; la découverte par Galilée des cratères lunaires le confortait dans la critique de ce modèle. De même sa découverte de satellites en orbite autour de Jupiter était la preuve flagrante que, contrairement au dogme, tout ne tournait pas autour de la Terre...

Position de l'Église

La conception du monde d'Aristote était largement reprise par l'Église catholique romaine, comme le montrait l'importance de la philosophie scolastique. De plus, certains passages de l'Ancien Testament étaient interprétés comme impliquant le géocentrisme, selon les traductions (par exemple dans le Psaume 93 « Aussi le monde est ferme, il ne chancelle pas. », le mot « chanceler » pouvant être remplacé par « bouger »). Cela n'exclut toutefois pas les recherches. Nicolas Copernic lui-même était un chanoine.

Face à Galilée

Le pape Urbain VIII avait autorisé Galilée à publier son ouvrage, à condition qu'il place sur le même plan les théories de Copernic et de Ptolémée ; Galilée présenta les deux théories, mais en favorisant tout de même celle de Copernic. Galilée fut donc accusé d'hérésie, et finalement, dut renier ses convictions pour éviter une condamnation à mort. Il fut condamné à la prison à vie, commuée en assignation à résidence. Galilée aurait dû faire preuve de la même prudence que Copernic en présentant l'héliocentrisme comme une théorie différente du géocentrisme, mais sans prendre ouvertement partie. Or Galilée a nettement tranché en faveur de la théorie de Copernic. Il se mettait ainsi, de facto, en contradiction avec le dogme de l'Église.

Face aux passages de l'Ancien Testament, Galilée n'avait pas cherché à discuter leur interprétation, mais avait contesté que la lecture littérale de la Bible puisse servir de référence en science. Ce procès est particulièrement important, car il marque ce que certains considèrent comme un conflit entre la science et la religion. Pour d'autres, il oppose plutôt ceux qui cherchent l'opposition entre religion et science (ceux qui ont condamné Galilée) à ceux qui cherchent à les concilier (comme Galilée lui-même). Dans tous les cas, le procès de Galilée devint le symbole de l'opposition entre les nouveaux scientifiques et les autorités religieuses. De plus, le refus de lire la Bible littéralement en matière de science devint plus tard essentiel dans l'opposition entre créationnisme et théorie de l'évolution.

Ce n'est que vers 1750, après la preuve expérimentale apportée par James Bradley, que l'Église, au cours du pontificat de Benoît XIV, abandonna discrètement le modèle géocentrique, et c'est bien plus tard encore qu'elle reconnut avoir fait erreur dans le procès de Galilée, et lui donna raison dans sa lecture de la Bible en matière de science : le 31 octobre 1992, le pape Jean-Paul II rendit hommage au savant lors de son discours aux participants à la session plénière de l'Académie pontificale des sciences. Il y reconnaissait clairement les erreurs de certains théologiens du XVII^e siècle dans l'affaire :

« Ainsi la science nouvelle, avec ses méthodes et la liberté de recherche qu'elle suppose, obligeait les théologiens à s'interroger sur leurs propres critères d'interprétation de l'Écriture. La plupart n'ont pas su le faire ».

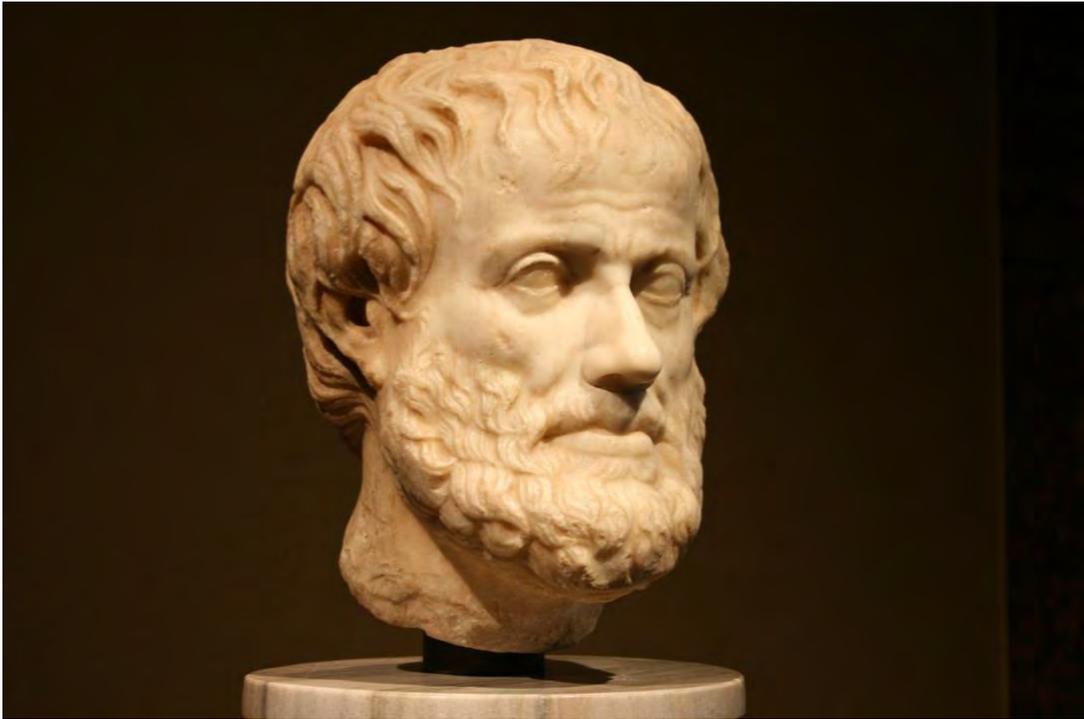
« Paradoxalement, Galilée, croyant sincère, s'est montré plus perspicace sur ce point que ses adversaires théologiens ». « Si l'écriture ne peut errer », écrit-il à Benedetto Castelli, « certains de ses interprètes et commentateurs le peuvent, et de plusieurs façons ». On connaît aussi sa lettre à Christine de Lorraine (1615) qui est comme un petit traité d'herméneutique biblique.

Malgré le fait que l'Église se soit discrètement rangée au XVIII^e siècle (sans trop le dire) à l'héliocentrisme, il aura quand même fallu attendre 359 ans (le 31 octobre 1992) pour que le Vatican veuille bien reconnaître officiellement le bien-fondé absolu de la théorie héliocentrique et **réhabilite Galilée...**

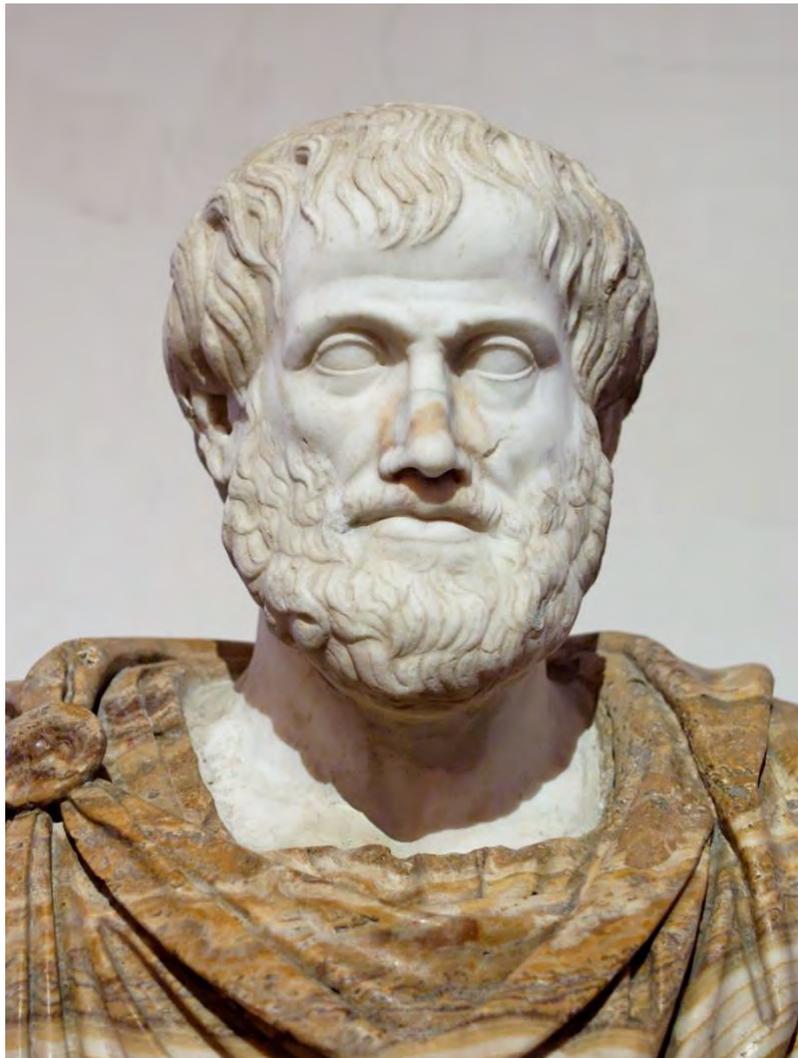
Mieux vaut tard que jamais !

Par contre le Vatican a refusé de réhabiliter Giordano Bruno, condamné pour hérésie et brûlé comme tel en place publique à Rome en 1600.

ICONOGRAPHIE



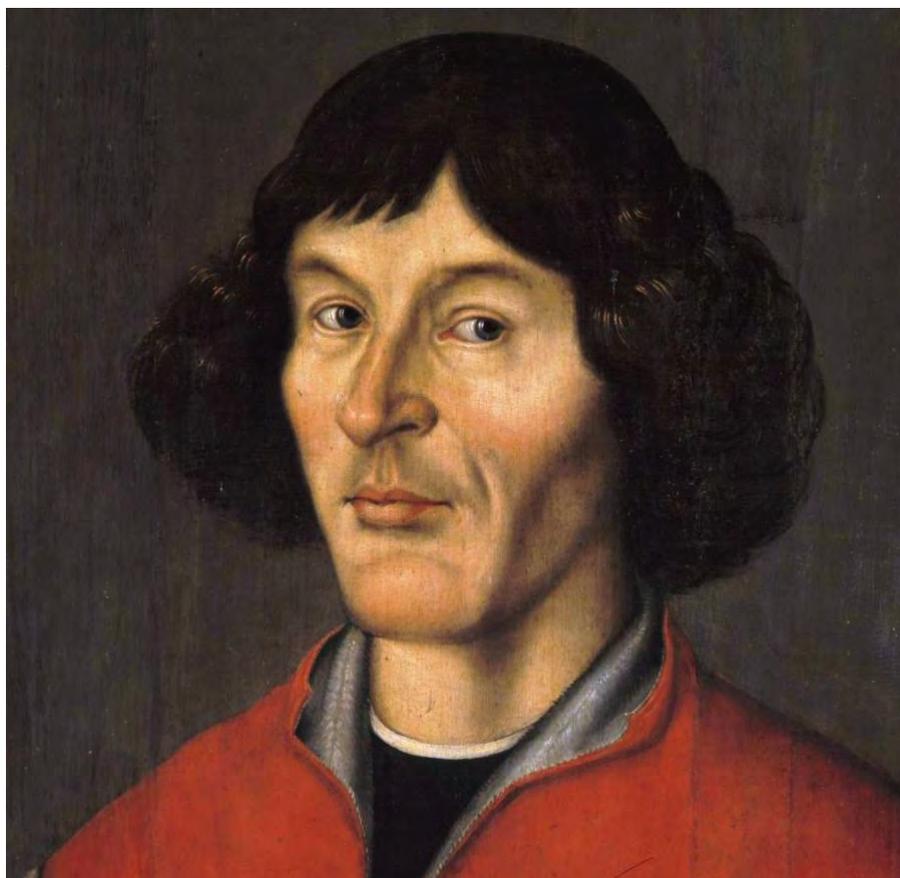
Buste d'Aristote



Buste d'Aristote. Marbre, copie romaine d'un original grec en bronze de Lysippe (vers 330 av. J.-C.)



Ptolémée, d'après une gravure du XVI^e siècle (rappelons qu'il vivait au II^e siècle !)



Nicolas Copernic



Tycho Brahe



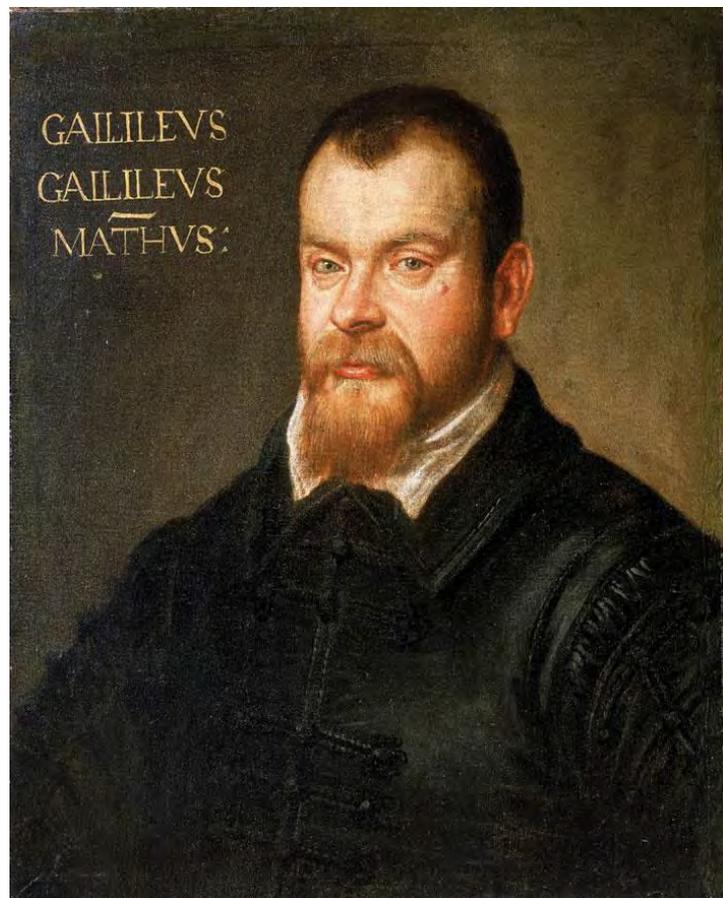
Giordano Bruno



*Statue de Giordano Bruno à Rome
sur le lieu même de son supplice
au Campo de' Fiori*



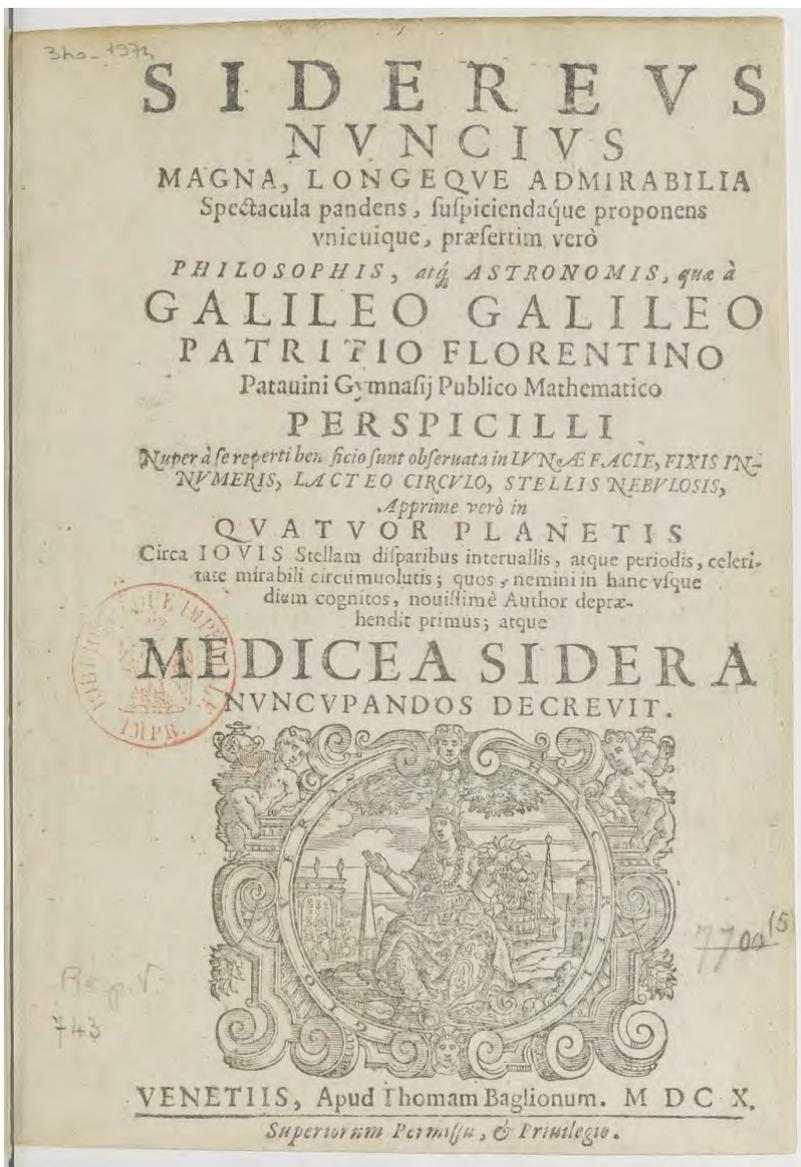
Johannes Kepler



Galilée à 41 ans (en 1605), par Le Tintoret



Galilée plus âgé (en 1636), par Justus Sustermans



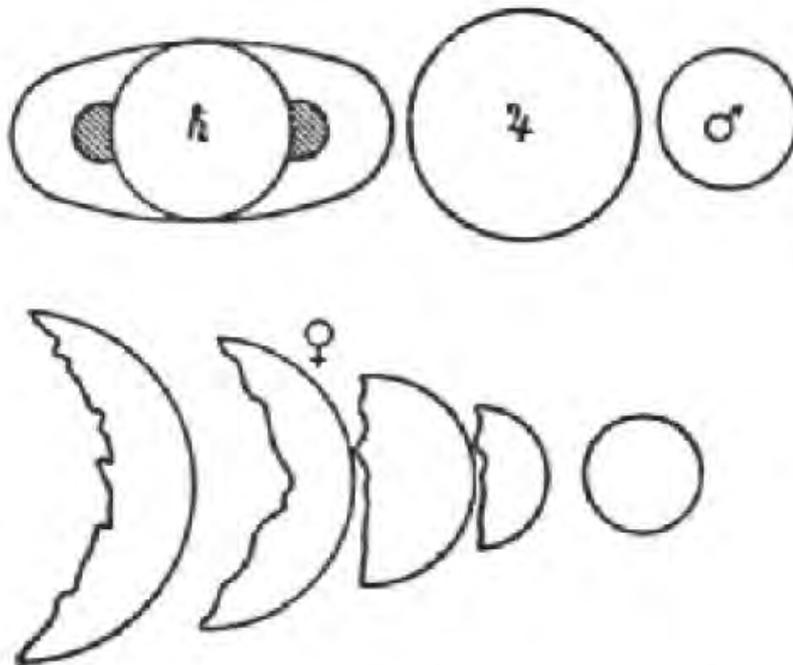
Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Couverture du livre

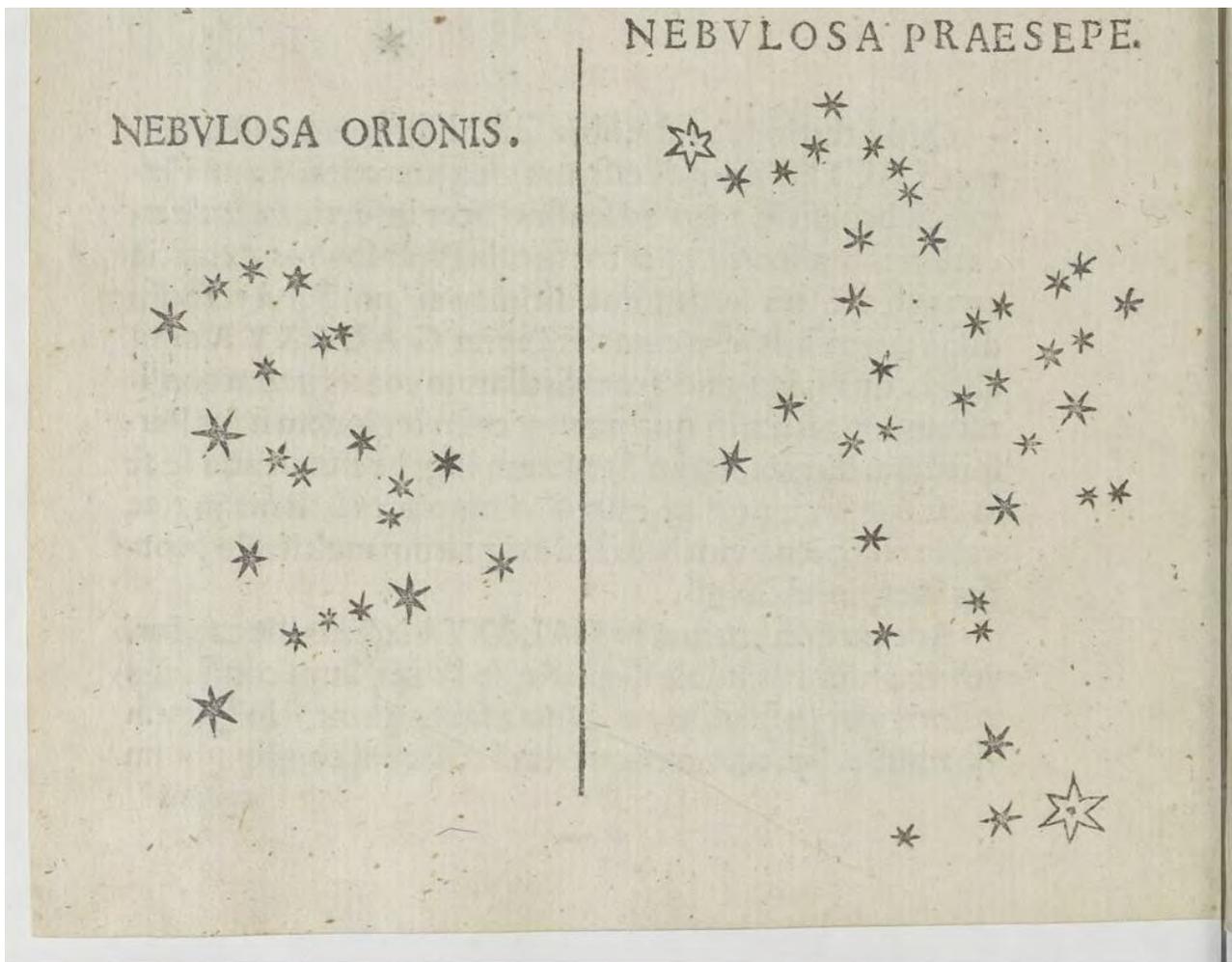
Sidereus Nuncius

de Galilée,

paru en 1610

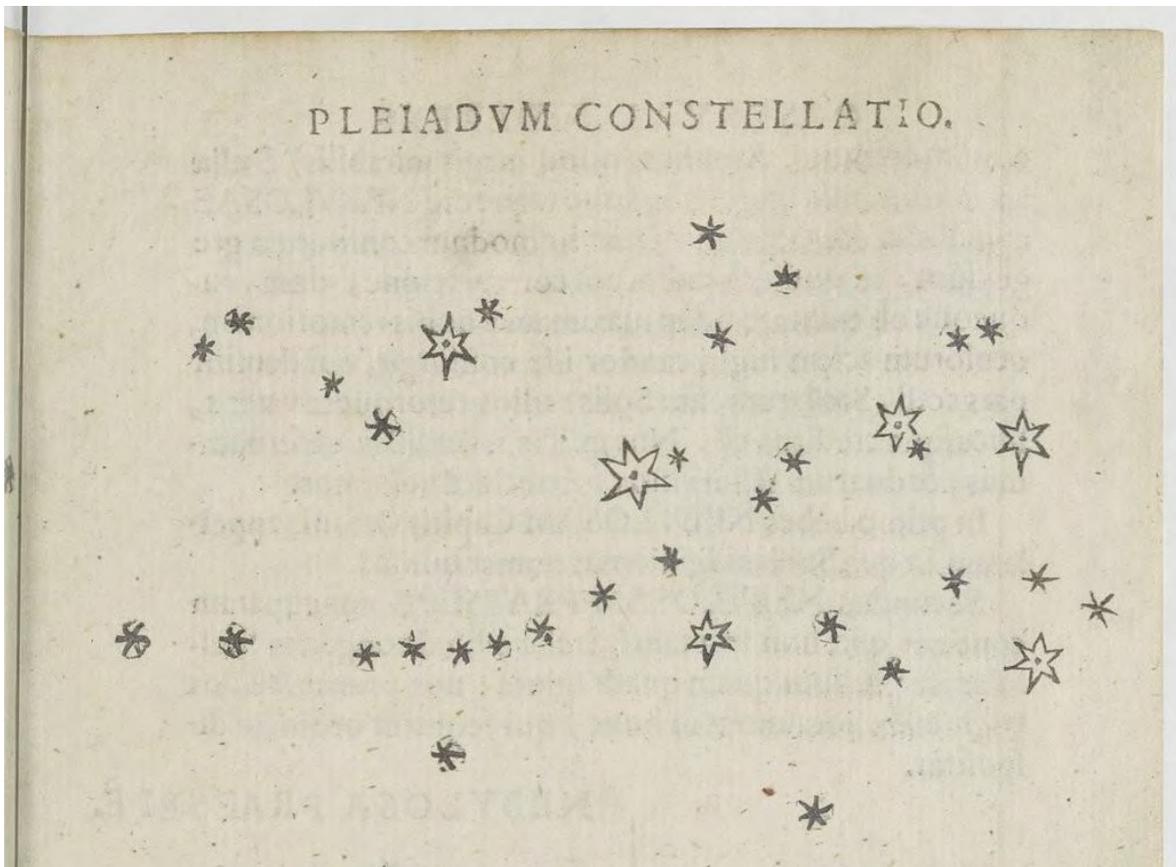


Dessins de Galilée. En haut Saturne, Jupiter et Mars. En bas les phases de Vénus



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Dessins de Galilée. À gauche la nébuleuse d'Orion. À droite l'amas ouvert Praesepe (la Crèche)



Dessin de Galilée de l'amas ouvert des Pléiades (constellation du Taureau)