Introduction aux modèles cosmologiques

Avant Newton : systèmes du monde

- Version provisoire
- NE PAS FAIRE CIRCULER svp

- MERCI

Hésiode (*Théogonie*)

« En vérité, aux tout premiers temps, naquit Chaos, l'Abîme-Béant, et ensuite Gaia la Terre aux larges flancs ... »

Avant la Renaissance

L'astronomie grecque replace les observations de l'astronomie mésopotamienne dans un cadre géométrique. La démarche permet une modélisation des phénomènes naturels.

Les modèles sont abstraits et découlent d'un idéal philosophique (harmonie, unité: le monde fait de sphères concentriques et géocentriques).

L'astronomie arabe s'attachera à valider la théorie par l'observation des phénomènes physiques ; d'où le perfectionnement des instruments mathématiques (globe, sphère armillaire, horloges astronomiques), des instruments de visée (quadrants et sextants…) , de nombreux observatoires bien équipés. L'échange entre savants venus de tous les horizons du Monde islamique stimule profondément la recherche. La civilisation arabe et islamique sont responsables de progrès significatifs de la science astronomique dans tous les domaines et préparent la renaissance scientifique occidentale.

Rome
Byzance
Nicée
Pergame
Athènes
Syracuse
Samos
Carthage
Rhodes
Cyrène
Jérusalem
Alexandrie
Héliopolis
Ptolémaïs
Médine
Syène
La Mecque

Géométrie et représentation du Monde : Antiquité grecque

• Ioniens: Thalès de Milet (624-548), Anaximène de Milet, Anaximandre de Milet, Xéno

de Colophon

• Autres présocratiques: Anaxagore, Héraclite, Empédocle

• Eleates: Parménide, son élève Zénon

• Pythagoricens : Pythagore, PHILOLAOS (–470/ ?) ARCHYTAS de Tarente (–430/ – 348)

• Atomistes: Leucippe (Vè), Démocrite, Épicure (–341/ – 270)

• Platon et Aristote : cercles et sphères, polyèdres (= solides platoniciens), harmonie du monde

• Eudoxe

• Aristarque (c310 – 230 av. JC)

• école d'Alexandrie : Hipparque – Ptolémée

• Ératosthène (Eratosthenes; 276-194 BCE)

Époque Hellénistique (après –338) : domination macédonienne ; sa civilisation se répand dans tout l'Orient par les conquêtes d'Alexandre le Grand

Les systèmes du Monde

Toujours décrits de manière géométrique

Platon et Aristote :

Terre au centre

Rôles du cercle et de la sphère : figures parfaites, harmonieuses (=symétriques):

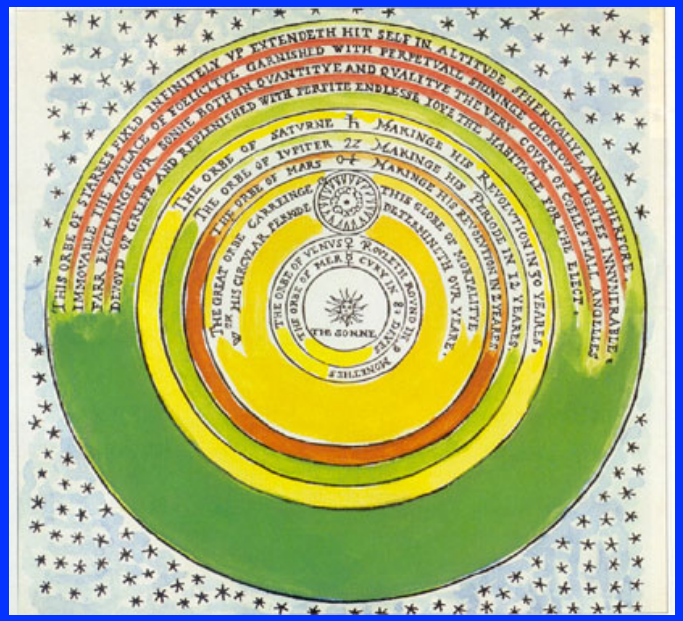
Éléments de base pour

la structure du ciel parfait.

Cercles et sphères :

structure concentrique de sphères emboîtées

Épicycles : combinaison de cercles



Présocratiques ioniens

Au VIe siècle, les navigateurs Ioniens commencent à développer des idées nouvelles sur les cieux souslesquels ils naviguaient. La plus fondamentale d'entre elles fut que l'univers pouvait tourner, non seulement selon la volonté des dieux, mais selon des règles physiques et mécaniques, selon des principes qui pouvaient être compris et prédits.

[œuvres connues par les commentaires ultérieurs : Aristote, Diogène Laërce, …].

Thalès de Milet (624-548 avant J-C) (connu essentiellement par Aristote)

Anaximandre de Milet (610-546 avant J-C.)

Anaximène de Milet (VIe siècle avant J-C)

Xénophane de Colophon (c. 570-490 BC)

Ioniens: Thalès de Milet (624-548 avant J-C)

(connu essentiellement par Aristote):

- « L'eau est la cause matérielle de toutes choses »

  « Thalès a vu l'unité de l'Etre, et quand il a voulu la dire, il a parlé de l'eau »

(Nietzsche, *Naissance de la philosophie à l'époque de la tragédie grecque*)

- la Terre [plate] flotte sur les eaux [fleuve **Ωκεανος**]

Prédit une éclipse en 585 (en consultant les observations babyloniennes d'éclipses et de lune remontant à 150 ans, une période assez longue pour noter la récurrence régulière des éclipses selon un cycle d'environ 18 ans [le Saros].

observations d'étoiles et trigonométrie (qu'il passe pour avoir fondé)

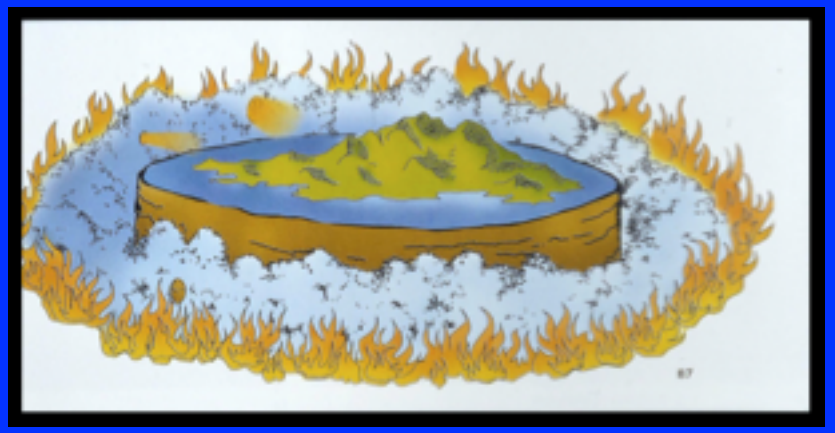
Ioniens: Anaximandre de Milet (610-546 avant J-C.)

élève et ami de Thalès

Substance primordiale infinie, éternelle, sans âge : apeiron

Mais générateur de changement : un processus initial de séparation, puis d'équilibre, aboutit finalement au quatuor d'éléments.

Anaximandre oppose l'Etre et le Devenir



la Terre est un « fût de colonne cylindrique

encerclé par l'air, puis par le feu

comme un arbre par son écorce ».

Elle est « suspendue librement, et non sous la contrainte d'aucune force.

Elle reste où elle est parce qu'elle est à égale distance de toutes choses ». (immobile au centre de l'Univers)

Les hommes vivent sur le disque supérieur. Le disque inférieur représente les Antipodes, où vivent sans doute d'autres êtres vivants.

Les corps célestes sont assimilés à des roues de feu, et leur lumière visible n'en constitue qu'une partie, décrite comme un tuyau, un évent ou un tube à travers lequel jaillit le feu. Les éclipses et les phases de la Lune sont causées par l'ouverture ou la fermeture partielles de ces évents.

http://www.normalesup.org/~adanchin/causeries/Physique.html

Ioniens: Anaximène de Milet (VIe siècle avant J-C)

Élève de Anaximandre

l'air, le souffle comme élément premier

Deux principes gouvernent les lois de l'Univers : mouvement et changement, agissant sur l'Air par **condensation** et **raréfaction**.

tous les objets sont produits par ces processus: la terre se condense à partir de l'air, et le feu est "exhalé" par la terre.

La Terre et les corps célestes sont plats et flottent comme une feuille sur un air s'étendant à l'infini

Les corps célestes tournent en faisant un angle; beaucoup sont obscurcis par les parties "supérieures" de la terre au nord.

Ioniens: Xénophane de Colophon (c570-490 BC)

émigra de l'Ionie vers l'Italie, emportant avec lui la théorie Milésienne.

Cosmologie originale:

Terre illimitée, surmontée par la voûte infinie des cieux, enracinée dans l'infini, sous nos pieds

les astres sont renouvelés chaque jour: une infinité de soleils, de lunes et d'étoiles passent régulièrement au dessus de nos têtes et disparaissent ensuite pour toujours.

Ces corps célestes sont des nuages flamboyants engendrés par des exhalaisons de la Terre.

Les variations de leurs états (selon la présence plus ou moins régulière de masses humides) font les phases de la Lune et du Soleil.

(Comme chez Anaximène) Ils suivent des courses circulaires et sont obscurcis derrière les parties supérieures de la terre.

- l'Homme est, comme toutes choses, une combinaison de terre et d'eau.
- L'origine de l'Univers est d'ailleurs la boue, et l'Univers redeviendra boue (égyptiens: éternel retour, crues du Nil)

Successeur des Ioniens: Anaxagore (Athènes, 610-547 av. JC)

(ami de l'Athénien Périclès, légèrement plus jeune qu'Empédocle)

suit la théorie usuelle de séparation et de condensation.

Le « Νους » (l'intelligence, l'entendement) est principe et force organisatrice de l'Univers.

Il déclenche un flux tourbillonnaire qui se propage dans tout l'univers !

→ Création de la Terre et des Astres.

le mouvement entraîne, de façon centrifuge, les masses solidifiées et les projette dans l'Air et même dans l'Ether → grand nombre de corps célestes maintenus en l'air

[La matière est divisible à l'infini.]

La Lune réfléchit la lumière du soleil.

Les éclipses de lune sont causées par l'ombre de la terre ou de la Lune.

Anaxagore (Athènes, 610-547 av. JC)

« Alors que toutes les autres choses contiennent une part de chaque chose,

l'esprit (νοῦς) est non-limité et n'est allié à rien, mais existe par lui-même, seul.
En effet, s'il n'existait pas par lui-même, mais était mélangé à quelque autre chose, il contiendrait une part de toutes choses, en étant allié seulement à une chose car comme je l'ai déjà dit, il y a une part de tout dans tout.

Et, alors les choses qui se trouveraient mélangées avec lui l'empêcheraient de dominer les choses, comme il le fait, parce qu'il est sans mélange.
Et en effet il est le plus subtil et le plus pur de tout [ce qui existe];
en outre il possède le savoir parfait sur tout et il possède la plus grande puissance.
Et les êtres qui ont une âme, qu'ils soient petits ou grands, sont tous dominés par l'esprit. »

http://www.normalesup.org/~adanchin/causeries/Physique.html

Présocratiques: Héraclite d'Ephèse (« l'Obscur », 550-480 av. J-C)

Présocratiques: Héraclite

la nature aime à se cacher.

perpétuel changement / conjonction nécessaire et harmonie des contraires

« les contraires s'accordent et la belle harmonie naît de ce qui diffère »

« Nous devons savoir que la guerre est commune à toutes choses, que la lutte est la justice et que toutes choses naissent et disparaissent par la lutte ».

Héraclite, Johannes Moreels, 1630.

- le feu éclaire le monde:

« Toutes choses sont échangées contre le Feu et le Feu contre toutes choses ».

« Ce monde n'a été fait par aucun des dieux ni par aucun des hommes ; il a toujours été et sera toujours feu éternellement vivant, s'allumant par mesure et s'éteignant par mesure. »

- Image *créatrice* du temps : création par balance entre différentes substances et processus de condensation, à partir du feu.

La Nuit se forme à partir d'exhalaisons sombres de la Terre (comme chez Hésiode à partir du Tartare). Le jour naît des exhalaisons émises par le soleil.

Le Soleil, la lune et les étoiles sont du feu emprisonné dans des coupes, qui se renversent pour causer les éclipses et les phases lunaires. La lune traverse l'air purifié proche de la terre, aussi est-elle faible, et le soleil est la plus proche, donc la plus brillante et la plus chaude des étoiles.

éléates: Parménide d'Elée (en Italie) (vers 450 av JC)

(héritier de Pythagore [mais opposé à la discontinuité de la théorie des nombres]

et Xénophane)

(Souvent opposé à Héraclite)

la totalité de l'Etre est pleine, continue et permanente:

ni mouvement, ni changement, ni différences ne se produisent dans la matière.

(Ils sont dus à nos perceptions)

« L'Etre est, le Non-être n'est pas » …

les corps célestes, se détachant de la matière plus pesante vers le centre, sont des concentrations de feu-vapeur, ici réglées par la "Nécessité" qui les fait se mouvoir entre une "guirlande de feu" intérieure et une sphère solide extérieure.

Parménide et son élève Zénon croyaient que la substance constitutive de l'univers était le Un, masse infinie embrassant tout, immobile, ne contenant aucun espace vide.

Sera nié par Leucippe : mouvement → vide

Présocratiques: Empédocle d'Agrigente (490-435 avant JC)

intègre et réinterprète ses prédécesseurs: Eléates (le continu), Milésiens (quatre éléments) Pythagoriciens (opposés).

quatre éléments premiers : la terre, l'eau, l'air et le feu.

« Entends d'abord les quatre racines de toutes choses »

Cette théorie des quatre éléments va perdurer jusqu'au XVIIe siècle.

« Et jamais le changement ne cesse son perpétuel devenir »

Les éléments se combinent suivant des principes d'attraction (amour) et de répulsion (haine) qui agissent en alternance et sont la source des changements multiples observés dans la nature.

Empédocle d'Agrigente (-490 / -435)

« Au fond de la forteresse solide de l'Harmonie,
Est enfoncée, fière, joyeuse, et solitaire,
la Sphère du monde unique et arrondi. » Empédocle, *Genèse des éléments*.

Concilie l'univers "immuable" de Parménide avec la matière chaotique et différentiée qui maintient l'univers dans un état de flux entre l'harmonie et le conflit (comme chez Héraclite).

il propose une sphère solide universelle sur laquelle les étoiles sont fixées, et une sphère intérieure de deux hémisphères, l'un de feu clair pour le jour, l'autre d'obscurité pour la Nuit. Le soleil et la lune ne sont pas des corps physiques, mais des taches concentrées sur cette surface interne qui reflètent le feu extérieur.

- « Empédocle dit que les étoiles fixes sont attachées au cristal, mais que les planètes sont libres. » (Aétius, Opinion)

Pythagoriciens (Ve siècle avant JC)

- Mélange d'héritages milésien et orientaux.

  Influenceront Platon et Aristote

Supposent des proportions convenables dans toutes les parties de l'Univers.

- Pythagore (-569 / -494) : « le Maître »

« En ce qui concerne son enseignement, la plupart affirment qu'il a appris des Égyptiens et Chaldéens ainsi que des Phéniciens ce qui touche aux sciences dites mathématiques.

En effet, si lageométrie a passionné les Égyptiens depuis des temps très reculés, les Phéniciens, eux, se sont faitune spécialité des nombres et des calculs arithmétiques, et les Chaldéens de la spéculation astrono-mique. Pour ce qui est des rites religieux et de toutes les autres règles de vie, c'est de l'enseignementdes mages, disent-ils, qu'il l'a reçu. » (Porphyre, Vie de Pythagore)

méditations sur les nombres

Liens

Musique – mathématiques (cordes vibrantes / rapport harmonieux)

matière et nombres : « les nombres sont les modèles des choses ».

Pythagoriciens (Ve siècle avant JC)

- Philolaus (Ve siècle avant J-C):

Vision numérico-géométrique du Monde:

« Tout ce qu'on peut connaître a un nombre.

Sans le nombre nous ne comprenons ni ne connaissons rien »

Terre sphérique.

Les astres tournent autour d'un « Feu Central » (Hestia),

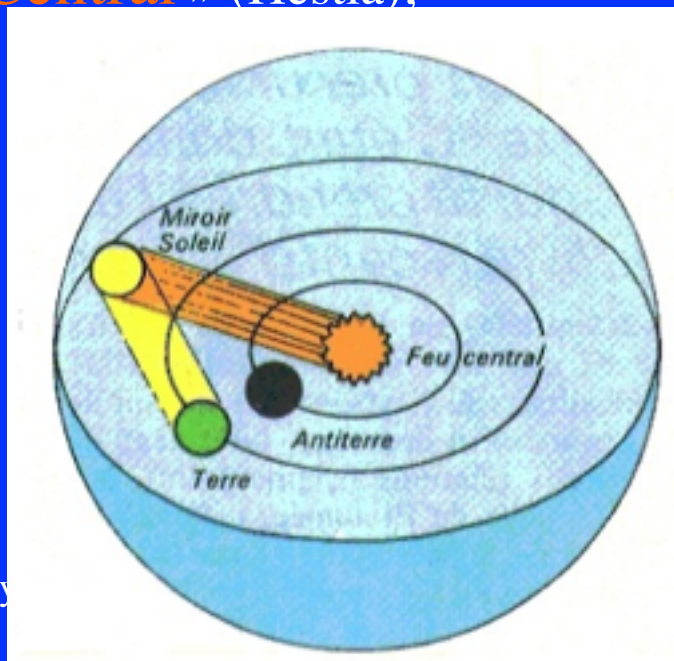
dans cet ordre : Antiterre (αντιχτον)

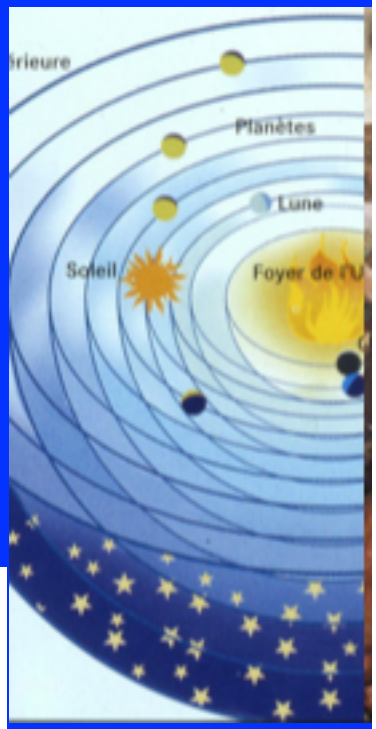
en opposition avec la Terre,

Terre, Lune, Mercure, Vénus, Soleil,

Mars, Jupiter, Saturne, étoiles fixes.

Les distances entre les sphères des différents astres ont des proportions harmonieuses.





Pythagoriciens (Ve siècle avant JC)

- « Le pythagoricien Philolaos affirme que c'est le feu qui occupe le milieu de l'univers, puisqu'il en estle foyer ; en deuxième lieu vient l'anti-Terre, puis en troisième lieu la Terre, habitée, située à l'op-posé et tournant à l'inverse de l'anti-Terre. C'est ce qui explique que les habitants de la Terre sontdans l'impossibilité de voir ceux de l'anti-Terre. » (Aétius, Opinions)

• Le tyran-philosophe de Tarente, ARCHYTAS (–430/ – 348)

(élève de Philolaus, contemporain de Platon, qu'il influença)

réputé l'inventeur de la mécanique mathématique et de dispositifs comme la vis, la poulie et le cerf- volant.

Paradoxe du Monde fini (borné)

Musiques célestes

« Écoutez en vous-même
Et regardez dans l'infini
De l'Espace et du Temps.

Là, on écoute le chant des Astres,
La voix des Nombres ;
L'harmonie des Sphères. »
Hermès Trismégiste.

« Sur le haut de chaque cercle se tient une Sirène qui tourne avec lui en faisant entendre un seul son, une seule note ; et ces huit notes composent ensemble une seule harmonie . »
Platon, *La République*, livreX

les astres exécutent « le plus magnifique de tous les chœurs » (Platon, *Épinomis*).

Songe de Scipion (Cicéron)

« Que se passe-t-il ? Quel est donc ce son qui remplit mes oreilles, si intense et si agréable ?

– Ce son provient des globes que tu vois : l'impulsion et le mouvement de ces orbes sont réglés selon certains intervalles inégaux, obéissant à des rapports de proportion très exacts. Les plus aigus sont tempérés par les plus graves, et leur équilibre donne différentes harmonies.

Le trajet le plus élevé, celui du ciel, qui transporte les étoiles, est très rapide et produit un son très aigu et perçant ; au contraire le trajet lunaire, le plus bas, produit un son extrêmement grave. Ces huit trajets, dont deux ont la même force, produisent par leurs intervalles sept sons différents ; car c'est ce nombre qui est la clé de presque toutes choses.

Mais vous les hommes, vos oreilles sont assourdies, parce qu'elles sont emplies de ce son. Vous êtes comme ceux qui habitent à Catadupa, au bord des chutes du Nil : le fracas immense fait que ce peuple n'entend même plus. C'est ce qui se passe pour le son que produit l'univers en tournant si rapidement : il est si intense que les oreilles des hommes sont incapables de l'entendre, tout comme vous ne pouvez regarder le soleil . »

Cicéron, «Le Songe de Scipion», La République, livreVI, Les Belles Lettres, p.172.

les astres exécutent « le plus magnifique de tous les chœurs »
Platon, *Épinomis*

“ la grande musique du monde,
cette merveilleuse correspondance des cieux,
des éléments et des créatures ”
Athanasius Kircher, *Musurgia universalis*, 1650

Plus tard, Kepler

Atomistes : Leucippe , Démocrite, Epicure et Lucrèce

atomes et vide: la matière est formée d'atomes indivisibles, en nombre infini

Univers infini, Autres mondes

- Leucippe de Milet (460-370 avant J-C.)

(contemporain et adversaire de Zénon d'Elée)

Grande Cosmologie

Nos sens nous disent qu'il y a du mouvement, et le **vide** est nécessaire pour le mouvement.

Un nombre infini de particules, les atomes, forment tout ce qui existe. La dissolution de ces particules conduit à la destruction ou à la mort de l'objet.

Rien de ce qui existe réellement ne peut changer ou naître ou périr. Seules les formes que les atomes constituent changent; les atomes eux-mêmes sont inchangeants.

Terre en forme de tambour

Leucippe : création du monde (Selon Diogène Laërce):

» Les choses sont illimitées (**ἀπειρα**) et se transforment les unes en les autres. Le Tout est vide (**κενον**) et plein [de corps matériels]. Les mondes sont formés quand des atomes tombent dans le vide et se trouvent accrochés les uns aux autres; et de leur mouvement, au fur et à mesure que leur taille augmente, se constituent les étoiles.

Le soleil tourne selon un cercle plus grand que celui de la lune. La terre se meut uniformément, en tourbillonnant autour du centre; elle a la forme d'un tambour. (...) Le Tout est sans limites, comme déjà dit; et une partie est vide et l'autre pleine, de ce qu'on appelle éléments. De ces éléments naissent des mondes en nombre illimité, au sein desquels ils se dissolvent. La façon dont les mondes se constituent est la suivante. En un point donné de nombreux atomes, de toutes formes, se trouvent transportés de l'Illimité dans le Vide. Ils se rassemblent et forment un tourbillon (**δινήν**), au sein duquel ils se heurtent, et tournant en tous sens, se séparent, les semblables s'associant aux semblables. Puis, lorsqu'ils se trouvent rassemblés en si grand nombre qu'ils ne peuvent plus tourner en restant en équilibre, les plus légers s'échappent dans le Vide qui les entoure, comme s'ils passaient au travers d'un tamis; les autres restent ensemble, et commençant à s'accrocher, se mettent à tourbillonner de concert, en formant un premier système sphérique. Cet ensemble se différencie en une sorte de membrane (**ὑμενα**), qui entoure des atomes de toutes sortes; et, comme ceux-ci se trouvent emportés dans le tourbillon, à cause de la résistance du centre, la membrane devient de plus en plus fine, alors que les atomes qui se trouvent au voisinage se combinent à l'ensemble lorsqu'ils viennent en contact avec le tourbillon. C'est ainsi que se forme la terre, à partir de portions qui se fondent ensemble vers le centre. Et à nouveau, même la membrane externe augmente, par l'apport des atomes extérieurs, et au fur et à mesure qu'elle tourne elle ajoute tous les atomes qui viennent à son contact. Et, parmi ceux-ci, certains groupes s'associent et forment une masse, d'abord humide et boueuse, mais, lorsqu'ils ont séché en tournant avec le tourbillon universel, ils viennent à prendre feu, et forment la substance des étoiles. (...) Toutes les étoiles sont enflammées par la vitesse de leur mouvement; la combustion du soleil est aussi aidée par les étoiles (...) De la même façon qu'est né ainsi un monde, il va grandir, décliner et périr, en vertu de quelque nécessité, dont [Leucippe] ne donne pas la nature."

Atomistes: Démocrite d'Abdère (-460 / -370)

(élève de Leucippe)

On lui attribue 52 ouvrages (dont *Petite Cosmologie)*

les atomes se sont regroupés dans une vaste zone pour former un tourbillon ou vortex.

Les matières les plus lourdes sont tombées au centre et ont formé la terre. Les plus légères ont remonté sur les bords du vortex et ont fini par s'enflammer en raison de la vitesse élevée de leurs révolutions. Ces atomes plus légers ont alors formé les corps célestes.

conception géocentrique, dans laquelle il y a une infinité de mondes dans l'univers.

"Si tout corps est divisible à l'infini, de deux choses l'une : ou il ne restera rien ou il restera quelque chose. Dans le premier cas la matière n'aurait qu'une existence virtuelle, dans le second cas on se pose la question : que reste-t-il ? La réponse la plus logique, c'est l'existence d'éléments réels, indivisibles et insécables appelés donc atomes. » (Démocrite)

Démocrite d'Abdère (-460 / -370)

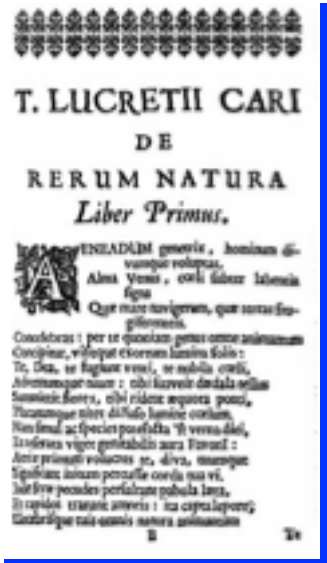
Démocrite riant,
huile sur toile 1628
Hendrick ter Brugghen

Lachièze-Rey, http://marclrey.free.fr/

- Démocrite méditant sur le siège de l'âme par Léon-Alexandre Delhomme

Chronique de Nuremberg
1493

arclrey.free.fr/


T. LUCRETII CARI
DE
RERUM NATURA
Liber Primus.

Atomistes: Lucrèce (-98,95 / -55)

« traducteur fidèle d'Epicure »

De Natura rerum

Pensée mécaniste : conception d'une nature fondée sur des lois internes, sans intervention divine ou de type magique.

(les dieux existent peut-être mais ils n'agissent en rien sur le cours des choses)

Rien ne nait de rien, ni ne retourne au rien

Le monde est infini en extension et n'a pas de centre

Atomes insécables et vide

ÉPICURE (–341 / – 270)

"Rien ne vient du néant, et rien, après avoir été détruit, n'y retourne. Les atomes se déplacent dans tout l'univers en effectuant des tourbillons et c'est de la sorte que se forment les composés : feu, eau, air et terre. »

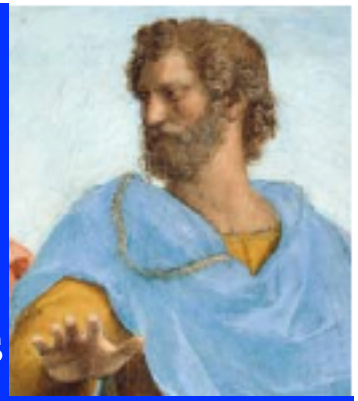
- "L'univers est infini parce qu'il n'est l'œuvre d'aucun démiurge."

Platon, Eudoxe et Aristote

Platon (427/347) et Aristote (384/322).

détail central de la fresque l'Ecole d'Athènes (Raphaël, *1511, Vatican, chambre de la signature.*

Platon, Eudoxe et Aristote



- Platon, élève de Socrate (*Timée*)
- Eudoxe de Cnide (mathématicien, v.–406/v.–355) Grâce à ces théories put décrire mathématiquement la conception des sphères concentriques
- Aristote, élève de Platon (-384 / -322): *Traité du ciel* (*De caelo*), *Physique*

adoptent les sphères et l'harmonie pythagoriciennes, ainsi qu'un système géocentrique.

- « En ce qui nous concerne, le Dieu nous fait signe, semble-t-il, que vraisemblablement un Monde unique est né. » (Platon, *Timée*)

Cercle et sphère = figures parfaites, harmonieuses, symétriques:

Éléments de base pour la structure du ciel parfait.

Univers géocentrique et ordonné;

un centre;

une hiérarchie de couches sphériques concentriques qui s'emboîtent parfaitement;

une frontière.

Platon: que nul n'entre ici s'il n'est géomètre

né en 428 BC (probablement à Athènes), mort en 347 BC à Athènes.

élève de (et influencé par) Socrate

En 387 BC, fonde l'Académie, où il enseigne la philosophie

vingt-sept dialogues (*Timée*, *La République* …), treize lettres.

- Le monde est créé (avec le temps) par un démiurge

« En ce qui nous concerne, le Dieu nous fait signe, semble-t-il, que vraisemblablement un Monde unique est né. » (Platon, *Timée*)

- Le monde changeant autour de nous et les choses qu'il contient sont de simples ombres (ou reflets) d'entités existant indépendamment, éternelles et inchangeantes, appelées "formes" ou "idées".

Les propriétés des objets ordinaires se définissent en fonction de leur relation ou de leur "participation" à ces réalités plus fondamentales. Les formes sont les objets propres du savoir ou de la connaissance, et le désir d'atteindre à leur compréhension doit être la motivation première d'une existence humaine saine et heureuse.

Platon

Cercle et sphère = figures parfaites, harmonieuses, symétriques:

Éléments de base pour la structure du ciel parfait.

Univers géocentrique et ordonné;

un centre;

une hiérarchie de couches sphériques concentriques qui s'emboîtent parfaitement;

une frontière.

Platon: La « Vraie Astronomie »

- Platon insiste sur le fait que les futurs astronomes devront faire beaucoup plus que contempler simplement les astres; ils devront utiliser les mathématiques et la géométrie pour découvrir la vraie nature de la science astronomique: rôle essentiel dans l'évolution de la pensée astronomique.

« ...celui qui est un véritable astronome doit être le plus sage d'entre tous… »

- l'astronomie, en tant que science, doit être traitée sous l'angle de la géométrie plutôt que celui de l'esthétique ou de l'art. Ne contempler les étoiles que pour leur seule beauté revient à se priver d'un outil de valeur.
- Platon décrit les rotations des planètes, de la lune, du soleil et de la terre dans le Mythe d'Er (*La République*): huit hémisphères creux appelés pesons sont insérés l'un dans l'autre. Trois déesses, Lachesis, Atrapo et Clotho, contrôlent un fuseau pouvant les faire tourner.

EUDOXE de Cnide (c–406 / c–355)

- l'un plus grand mathématiciens de l'antiquité.
- introduction des 'grandeurs' géométriques (longueurs, aires et volumes). Des problèmes qui auraient pu être traités de manière algébrique ou arithmétiques sont désormais exprimés en langage purement géométrique.
- inventeur de la méthode des exhaustions (plus tard utilisée par Archimède dans le calcul du nombre π.)

EUDOXE de Cnide (v.–406 / v.–355)

système du monde = modèle géométrique (innovation extrêmement importante) du mouvement des planètes ; sauve les apparences (prédit les positions observées): sphères homocentriques

Terre immobile. Chaque astre attaché à une sphère en rotation uniforme centrée sur elle.

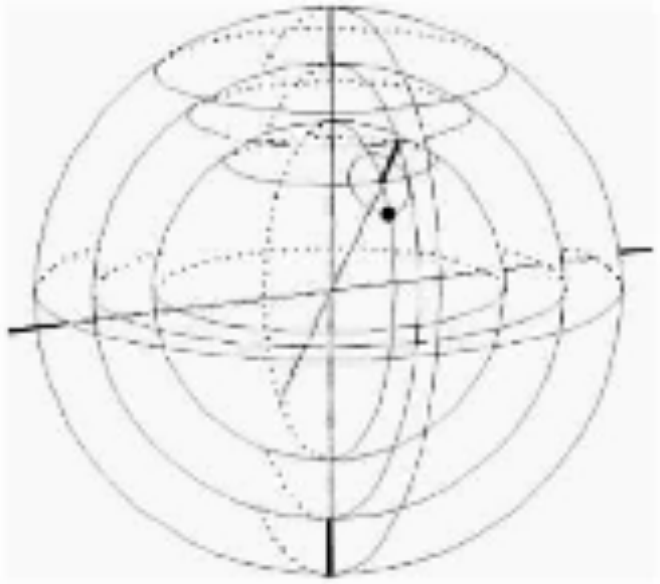
les sphères peuvent être fixées à d'autres sphères d'axes différents: mouvement apparent = combinaison de mouvements circulaires

(explique les irrégularités dans le mouvement des planètes et de la Lune)

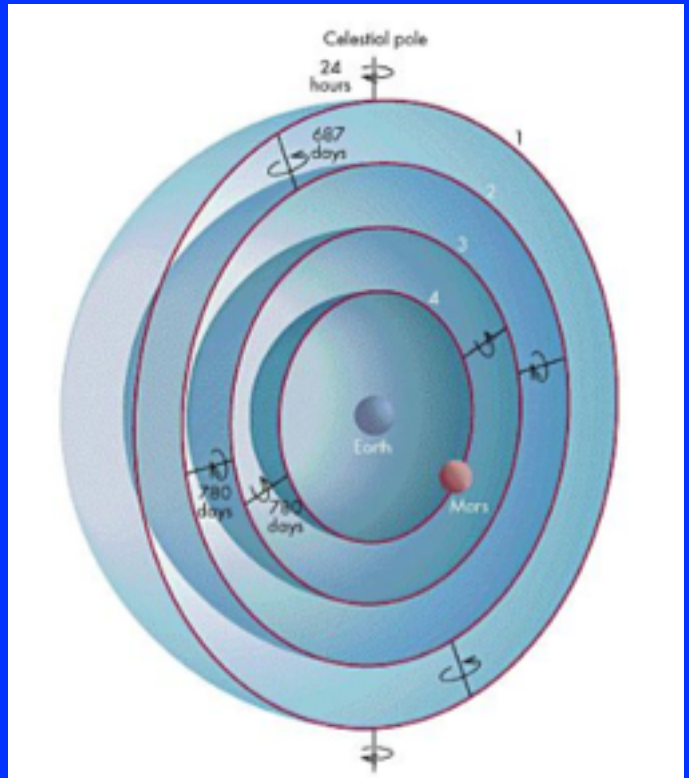
- 3 sphères pour la Lune,
- 3 pour le Soleil,
- 4 pour chaque planète:
- 27 sphères en tout

(en opposition avec les excentriques et épicycles de Ptolémée [plus tard]).

Les étoiles fixes n'ont besoin que d'une seule sphère

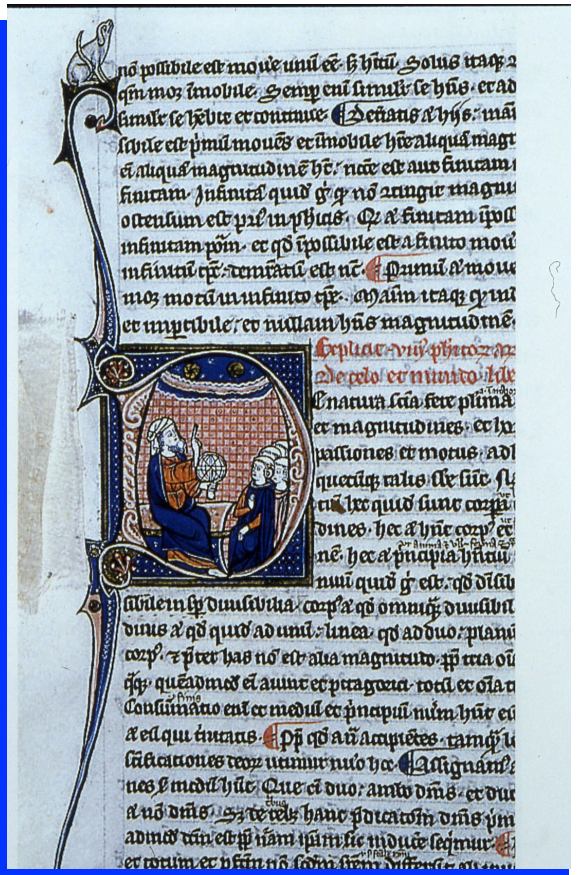


EUDOXE de Cnide (v.–406 / v.–355)



Le système des sphères homocentriques

Aristote



né à Stagyre (cité grecque de Macédoine) en 384 BC.

entre à l'Académie de Platon (jusqu'à la mort du maître en 347 BC).

Précepteur d'Alexandre le Grand

En 335 BC il retourne à Athènes et fonde l'école Lyceum.

meurt en 322 BC.

- L'Astronomie d'Aristote est basée sur des spéculations philosophiques a priori plutôt que sur l'observation empirique; la distinction moderne entre physique et métaphysique est absente
- l'univers est sphérique (parce que c'est la forme la plus parfaite) et fini (parce qu'il a un centre, celui de la Terre) [un corps ayant un centre ne peut être infini].
- la Terre est une sphère, relativement petite comparée aux étoiles, toujours au repos. Sinon, un observateur verrait les étoiles fixes se déplacer, les éclipses de lune ne montreraient pas un terminateur incurvé.
- les étoiles doivent être sphériques car cette forme, la plus parfaite, leur permettait de rester à la même position. (*De Caelo*, Livre II, chapt 1)

Aristote

- quatre éléments fondamentaux - la terre, l'air, le feu et l'eau (← Empedocle). Aristote postule un cinquième élément : éther, qu'il croit être le principal constituant des corps célestes: indécomposé, inengendré, éternel, inaltérable, et ni pesant ni léger.
- trouvé sous sa forme la plus pure dans les régions célestes; s'altère dans la zone sublunaire .
- univers hiérarchique: nette distinction entre le monde sublunaire du changement et supraunaire : les cieux éternels et immuables.
-
- (comme Eudoxe et Callippe avant lui) : chaque planète suit une trajectoire composée d'un certain nombre de sphères.
- [Calippe avait postulé 33 sphères en tout : 4 pour Saturne et 4 pour Jupiter, 5 pour chacune des planètes Mars, Venus, Mercure, le soleil et la lune. Aristote tente une explication mécanique et postule 22 sphères rétrogrades]

Aristote

• théorie du mouvement : trois sortes de mouvements : rectiligne, circulaire et mixte:

les quatre éléments du monde sublunaire se meuvent sur des lignes droites : la terre vers le bas, le feu vers le haut, l'eau et l'air entre les deux.

L'éther se meut naturellement sur des cercles.

• Tout corps en mouvement doit être mis en mouvement par un autre corps; de façon à éviter une régression infinie, il postule l'existence d'un *Premier Moteur*: transcendant, éternel et sans dimension; la cause du mouvement circulaire (le plus parfait, puisqu'il n'a ni commencement ni fin);

Bénéfique: son activité est la plus haute forme de la joie.

Dans *De Caelo*, il l'identifie avec la sphère des étoiles fixes (qui doit elle-même se mouvoir sans cesse). Dans la *Métaphysique*, il place un Premier Mobile "fixe" au-delà de la sphère des fixes.

• Ce modèle eut une profonde influence sur les savants médiévaux, qui le modifièrent pour le faire correspondre à la théologie chrétienne. Saint Thomas d'Aquin réinterpréta les premiers mobiles par des anges. Revenu sous l'autorité religieuse, le modèle d'Aristote perdura pendant des siècles. (freine le progrès de la science, car peu de gens osèrent défier l'autorité de l'église).

Barthélémy l'Anglais
Le Livre des Propriétés des choses
France XVe s

©Bibliotheque nationale de France

Aristote

Cosmologie d'Aristote (*Traité du Ciel* et *La Physique*)

- notion d'univers ordonné, ou cosmos;
- gouverné par le concept de lieu, plutôt que d'espace,
- distinction fondamentale : Monde sublunaire / Monde supralunaire (perfection)
  lois de la nature différentes dans les régions terrestre et céleste.
- pas de vide.
- Monde éternel, incréé (différence avec Platon)

Aristote : Monde sublunaire

• Monde sublunaire (englobant la région terrestre) : imparfait et corruptible

siège du changement et de la corruption : monde du changement et de la corruption : les êtres et les choses naissent, croissent, s'usent et meurent.

• les substances sont constituées des quatre éléments fondamentaux: terre, eau, air et feu.

- Chaque chose a sa place naturelle.
- Celle de la terre, l'élément le plus lourd, est au centre du cosmos : → géocentrique.
- La place naturelle de l'eau, de l'air et du feu étaient des couches sphériques concentriques autou de la sphère terrestre. Les corps cherchent à regagner la place naturelle de l'élément prédominan dans leur constitution. [les pierres (élement terre prédominant) tombent au centre du cosmos; le feu s'élève] → mouvements naturels radiaux .
- Les corps ne différent ente eux que par leurs qualités. Ainsi la Terre était froide et sèche, tandis que l'air était chaud et humide. Le changement de l'une de ces qualités en une autre transmutait un élément en un autre. De telles transformations se produisent en permanence, reflétant le changement constant de la région sublunaire
- Contrairement aux autres corps célestes, la Terre est toujours au repos. Si elle était en mouvement, un observateur verrait en effet les étoiles fixes se déplacer (nous savons aujourd'hu que les étoiles sont si éloignées de nous que l'argument ne s'applique pas).

Aristote : Monde supralunaire

- Monde supralunaire parfait et incorruptible : les cieux et la région des astres, éternels et immuables,
- monde de la perfection, que n'affectent ni le changement ni la corruption.
- composé d'une « quintessence » (=éther) inaltérable, immuable.
- « Il est nécessaire que le ciel ait une forme sphérique, car c'est là aussi bien la forme l plus appropriée par son essence que la première par nature » (Traité du Ciel)
- Les corps célestes sont portés par des sphères faites d'éther:

- matériau transparent de type cristallin

- divin, indécomposé, inengendré, éternel, inaltérable, ni pesant ni léger

Chaque couche a sa propre vitesse de rotation, rendant compte du mouvement du corps céleste qui lui est attaché (sans ralentissement ni accélération).

Les couches sphériques s'emboîtent parfaitement les unes aux autres, sans intervalle entre elles (Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, Saturne, étoiles fixes).

Au-delà de la sphère des fixes, le Premier Moteur (lui-même immobile), imprime le mouvement des sphères inférieures.

- Monde fini : cosmos clos contenant tout ce qui existe

Géométrie d'Aristote

géométrie sans espace : mais des lieux

- Pas d'homogénéité : Univers géocentrique ordonné et hiérarchisé ;
- un centre,
- une hiérarchie de couches sphériques qui s'emboîtent parfaitement,
- une frontière.
- Mouvement

Nécessite un agent causal direct : se mouvoir signifie être mû,

- distinct sur terre et au ciel
- Anisotropie fondamentale : la verticale diffère des dimensions horizontales :

→ centre de la Terre = « lieu naturel » des corps pesants (qui contiennent l'élément terre) : attirés vers elle par affinité ;

→ ciel = lieu de repos de l'élément feu, à la nature légère.

[Dans notre langage, cette géométrie prend en compte la gravitation terrestre, Mais terrestre uniquement.]

- Pas de vide

Aristarque de Samos (c310 – 230 av. JC)

- astronome et mathématicien.

- ouvrages disparus lors de la destruction de la bibliothèque d'Alexandrie ?

- Héliocentrisme (d'après *L'Arénaire* d'Archimède)
- « Aristarque commence en fait avec l'hypothèse que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles. Quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle ayant son centre dans le Soleil. »
- Perfectionne le gnomon

Aristarque de Samos (c310 – 230 av. JC)

- Mesure diamètre et distance de la Lune et du Soleil :

la Lune met à peu près une heure à parcourir une distance égale à son diamètre;

les éclipses de Lune durent deux heures

eratosthène→ le diamètre de la Terre est trois fois plus grand que celui de la Lune (en réalité 3,7 fois)

- la Terre voit la Lune de sous un angle de 2 ° (en réalité 0,5 °)

→ orbite lunaire = 60 diamètre terrestre

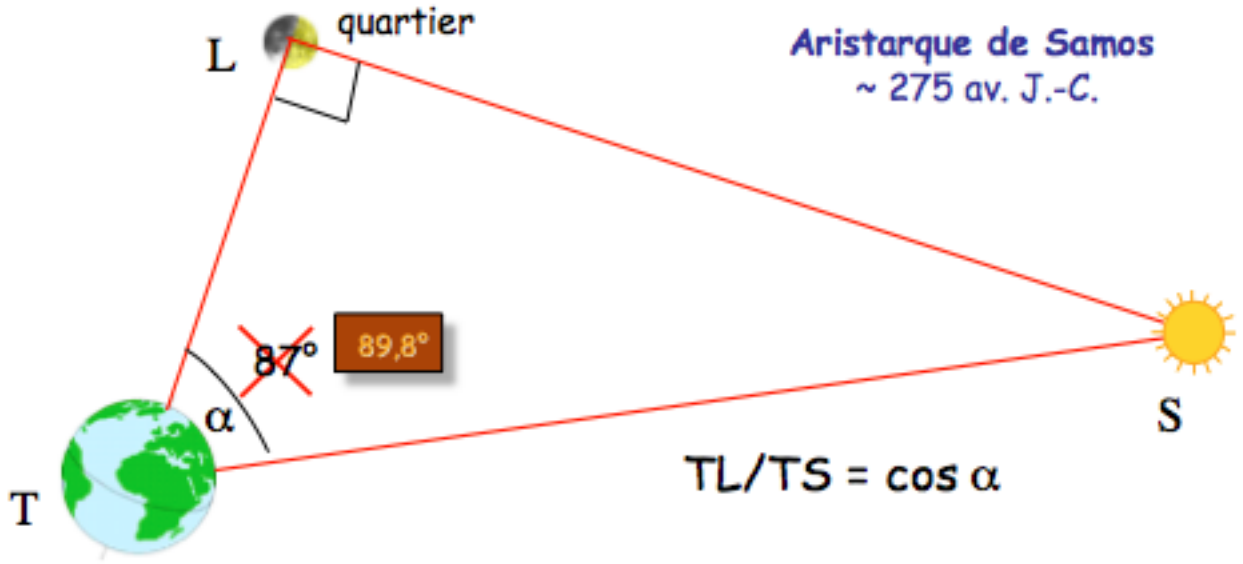
→ distance Terre-Lune == 40 rayons terrestres (60,2 en réalité).

→ Remet en cause le géocentrisme; place le Soleil au centre de l'univers; la Terre tourne sur elle-même et orbite autour du Soleil.

Comprend que la parallaxe est non mesurable car les étoiles fixes sont très éloignées.

- Résultats peu exacts quantitativement (facteur 20) mais méthode plus importante que le résult
- Un calcul plus précis sera fait par Hipparque (v. -190 / -120)

Mesure des distances Terre-Lune-Soleil



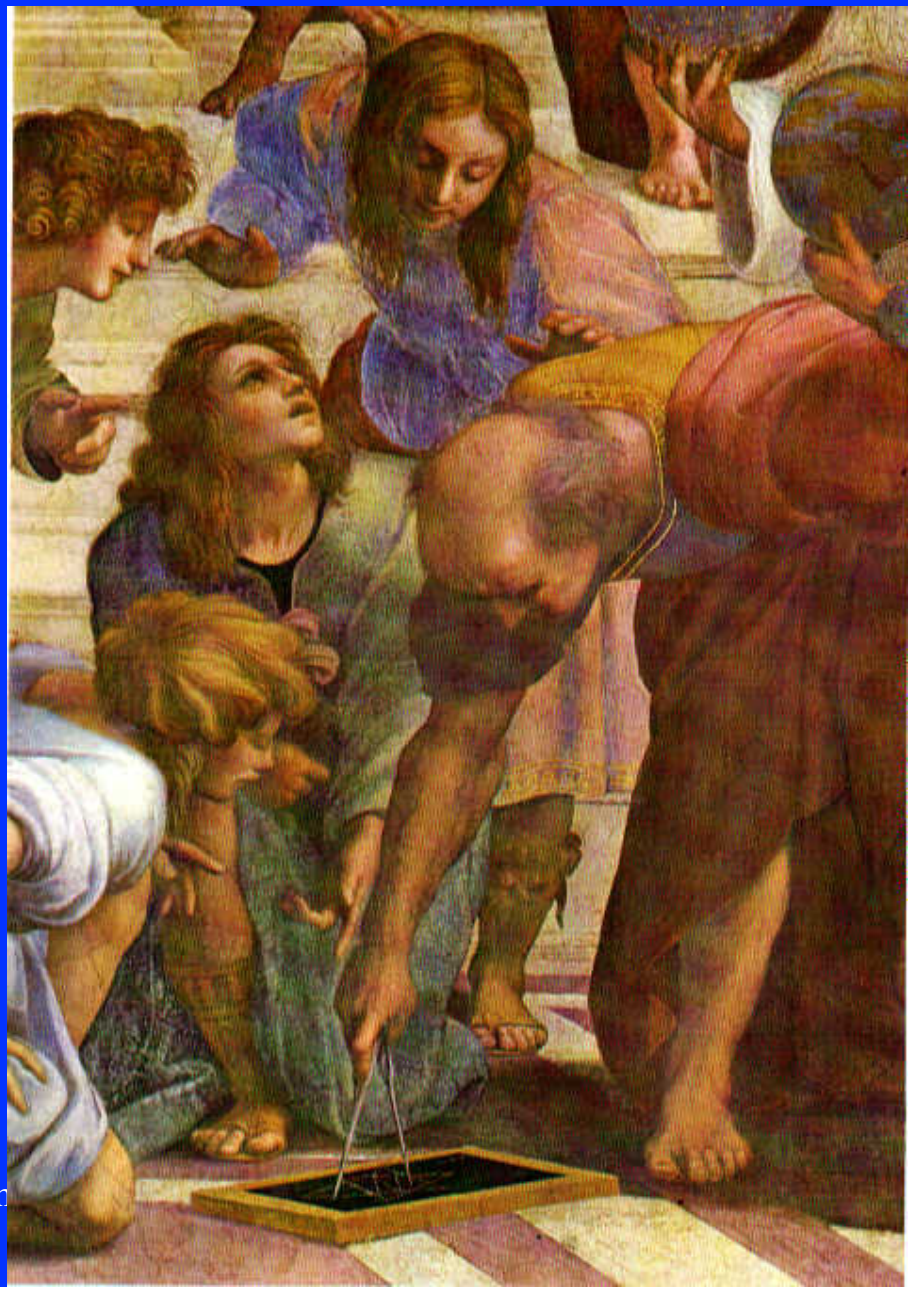
Distance trouvée Terre - Soleil = 20 fois la distance Terre-Lune
(valeur moderne : 400 fois)

Diamètre trouvé du Soleil = 7 fois celui de la Terre
(valeur moderne : 109 fois)

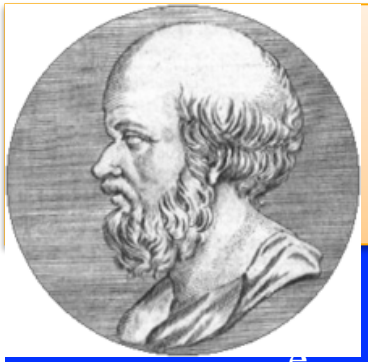
(Merci JPL)

Euclide (IIIè av. JC)

- À Alexandrie
- « inventeur de la géométrie »



Lachièze-Rey, http://m



Eratosthène de Cyrène (-275 / -193)

Directeur de la bibliothèque d'Alexandrie, grand géograph

e

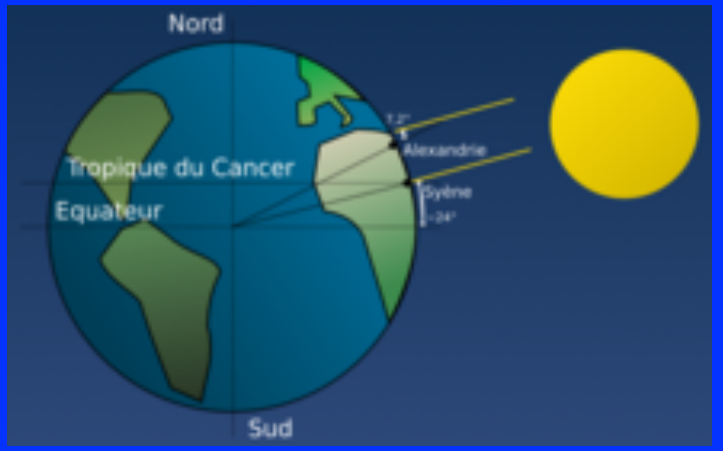
- ciel sphérique
- calcule la circonférence de la Terre (Archimedes corresponded extensively with Eratosthenes and other scholars in Alexandria, and knew of this result.)
- dresse des tables d'éclipses

Catalogue d'étoiles

- Démontre l'inclinaison de l'écliptique
- Invente la sphère armillaire

- Élabore une carte du monde habité (l'oekoumène) et la première "Géographie".
- étudie la répartition des océans et des continents, les vents, les zones climatiques, les altitudes des montagnes.

circonférence de la Terre



calcule la circonférence de la Terre (sphérique) en comparant les ombres de deux objets situés en deux lieux différents sur le même méridien, le 21 juin solstice d'été) à midi [Syène (aujourd'hui Assouan) - Alexandrie: 787,5 km] :

40 000 stades (6800 km)

Apollonius de Perga

230 bc : théorie des épicycles

Hipparque (v. -190 / -120)

le plus grand astronome d'observation de l'Antiquité

(la plus grande partie de ses écrits est perdue).

utilisa systématiquement connaissances et observations des astronomes chaldéens de Babylone (-8è siècle)

on lui attribue l'invention de l'astrolabe

- Observations minutieuses de 162 bc à 128 bc.
- Premiers modèles quantitatifs et précis du mouvement de la Lune et du Soleil: théorie des épicycles (basée sur les travaux d'Apollonius de Perga)
- tables astronomiques fondée sur la trigonométrie
- catalogue d'étoiles

→ découvre la précession des équinoxes (estimée à "au moins 1° /siècle, proche de la valeur réelle

- première méthode fiable de prédiction des éclipses lunaires et même solaires.

- méthodes trigonométriques pour évaluer la distance Terre-Lune

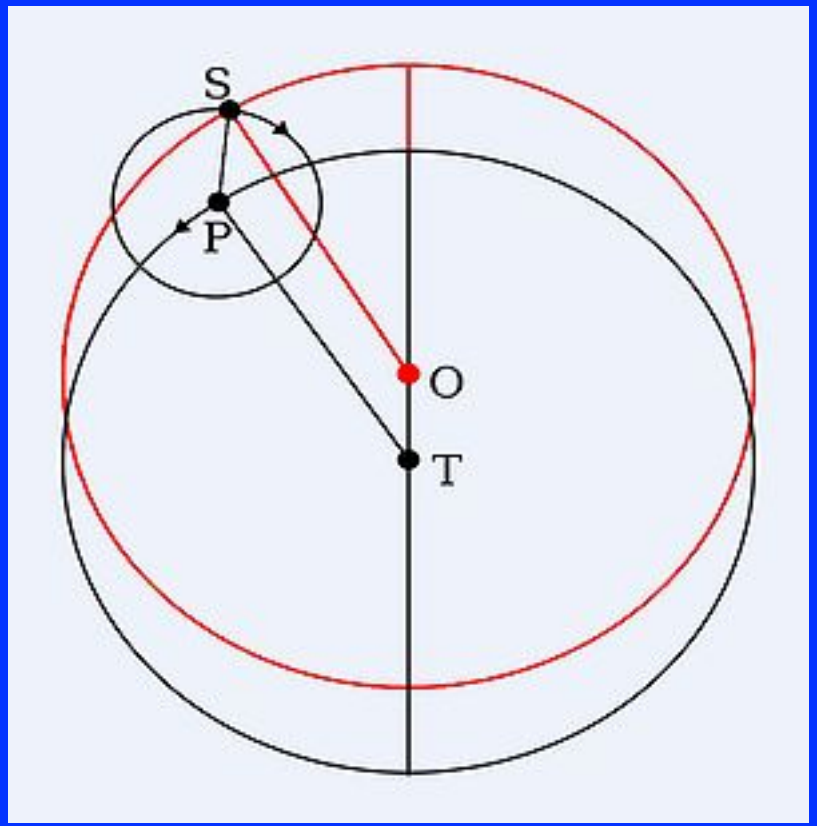
Hipparque (v. -190 / -120):

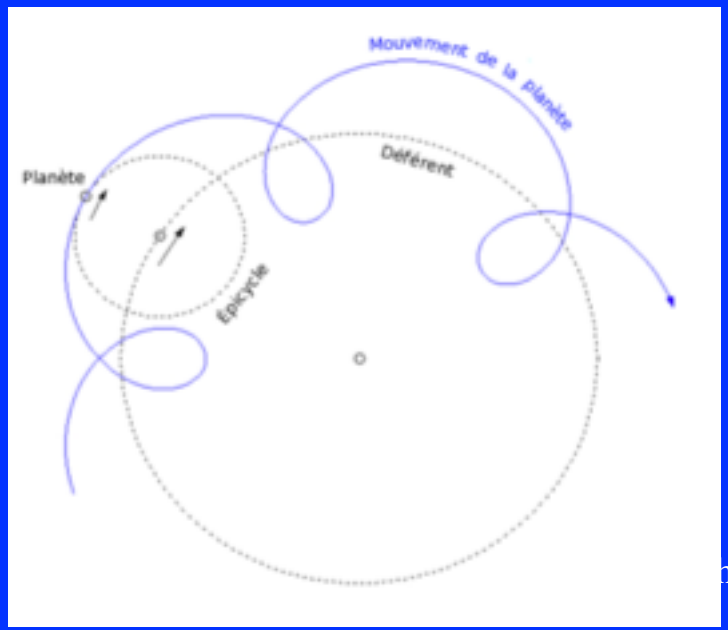
Mouvement du Soleil selon la théorie des épicycles.

La Terre (T) est au centre du déférent ;

P est le centre de l'épicycle du Soleil (S).

En rouge, la résultante.



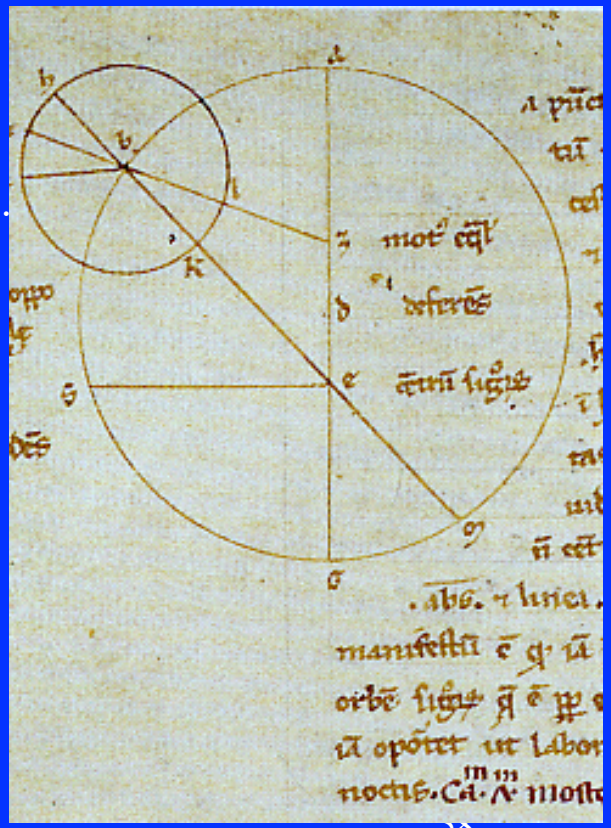


Claude Ptolémée (IIe siècle après JC, Alexandrie)

"phare" d'Alexandrie (qu'il a semble-t-il peu quitté pour voyager)
Synthèse de huit siècles d'histoire des sciences qui perdurera un millénaire et demi.
Reprend les travaux de Hipparque

Le cosmos est à la fois un contenant (le monde supra-lunaire)
et un contenu (la Terre et son atmosphère).

Méthode "mathématique"
- la *Géographie* / la *Tétrabible* : influence astrologique du ciel sur la Terre.
- l'*Almageste* (= *le Très Grand*, titre donné par les traducteurs arabes du IXe siècle ; titre grec original *Composition Mathématique*).



étudie le ciel
propose un catalogue de 1 022 étoiles (et 48 constellations)
(basé sur celui d'Hipparque)
qui servit de référence pendant de nombreux siècles (diapo suivante).
Ses tables astronomiques feront référence jusqu'à Copernic

Claude Ptolémée (IIe

Alexandrie)

Claude Ptolémée (IIe siècle après JC, Alexandrie)

Les cosmologies circulaires d'Eudoxe et d'Aristote ne décrivent pas correctement la complexité observée des planètes (ralentissent, accélèrent, rétrogradations, variations d'éclat …)

« sauver les phénomènes » (sans trop s'écarter des principes philosophiques d'Aristote)
→système extrêmement élaboré de constructions mathématiques pour expliquer les mouvements célestes (Terre immobile).
→multiplie, déplace et compose les mouvements circulaires, par combinaisons de trois figures de base immatérielles :
l'excentrique, l'épicycle, et l'équant
Un cercle planétaire (épicycle) n'est plus centré sur la Terre comme dans la théorie d'Eudoxe, mais sur un autre cercle, dit « excentrique » ou « déférent », lui-même légèrement décentré par rapport à la Terre.

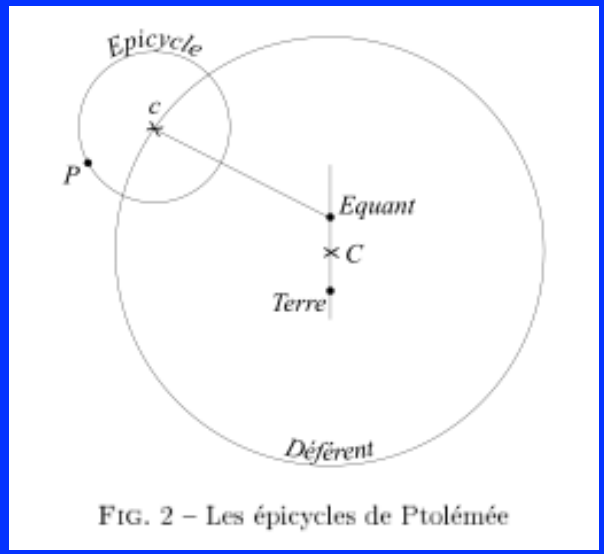
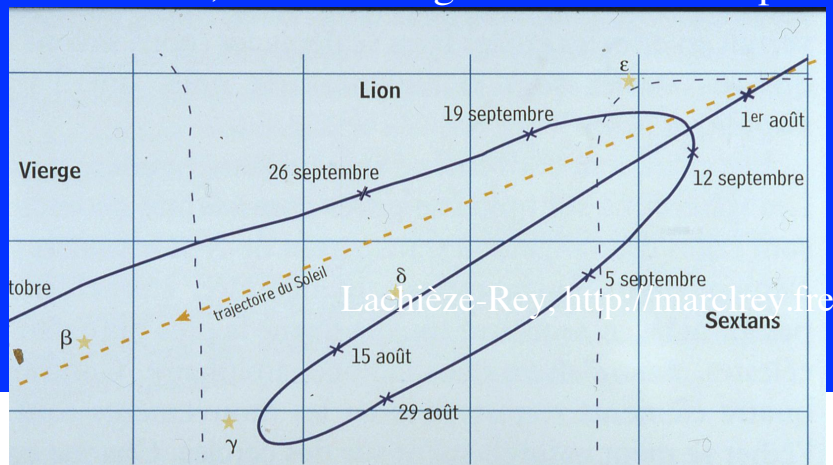
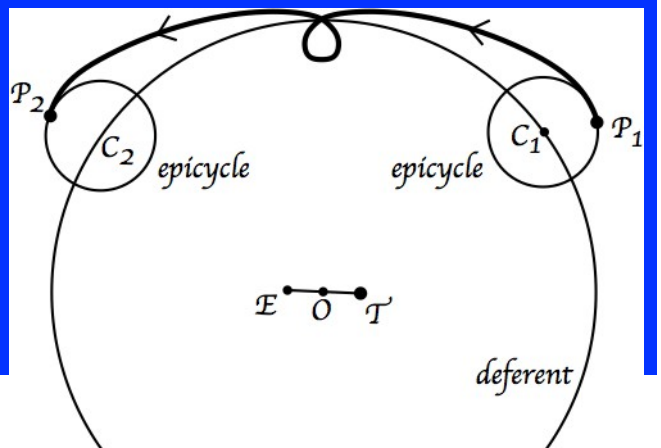


FIG. 2 – Les épicycles de Ptolémée





Lachièze-Rey, http://marclrey.free.fr/

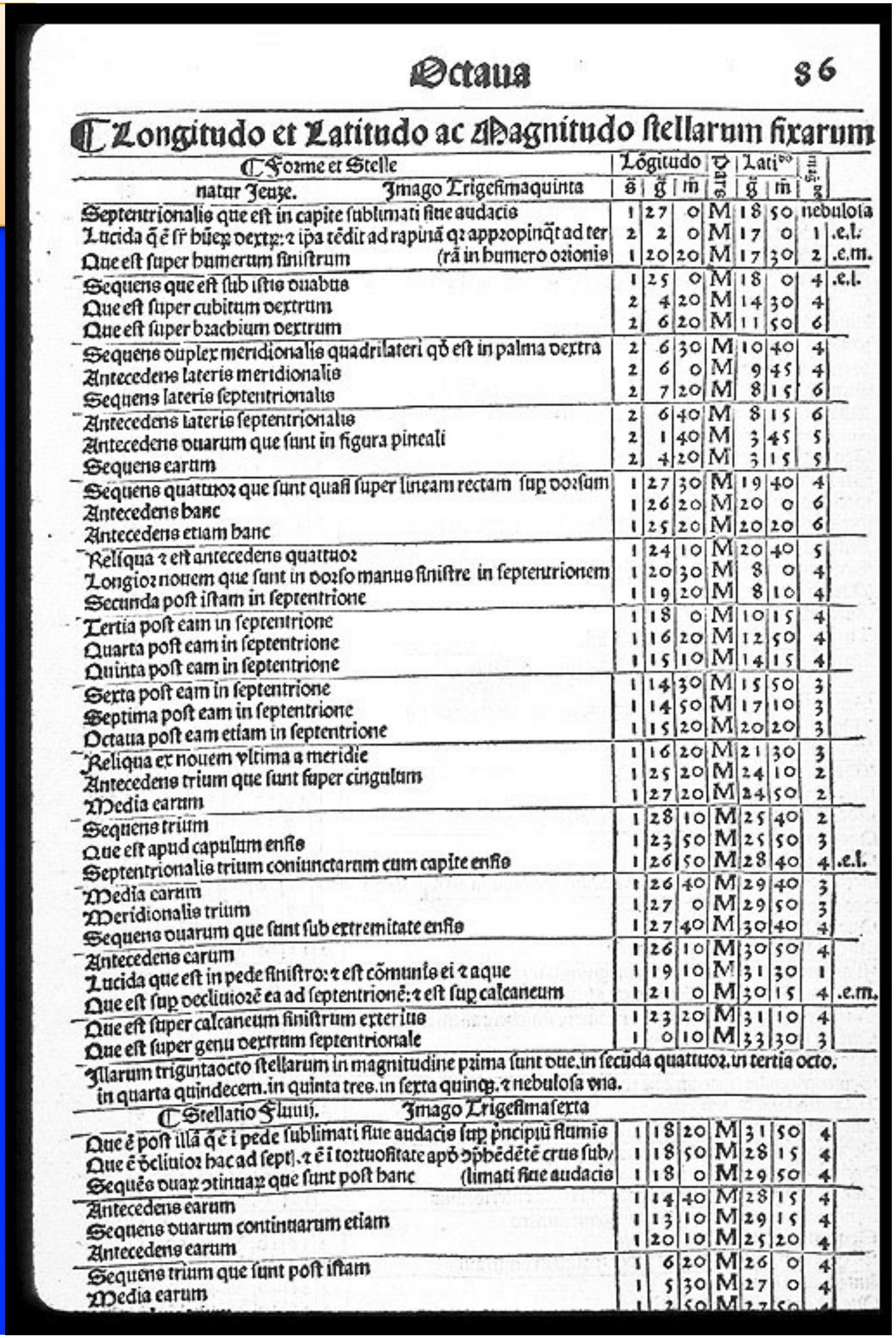
Ptolémée avec compas
Claude Ptolémée,
Géographie, XVe siècle
Paris, BnF, Manuscrits, Gr. 1401, fo 2

Ptolémée, tenant un compas et un quart de cercle,
observe les constellations, tandis qu'un géographe
de la Renaissance dessine un globe terrestre. Conçu pour mesurer l'angle que font deux directions quelconques, le compas (aussi appelé dioptre) servait à mesurer la distance angulaire entre deux astres. En procédant de proche en proche, un relevé du ciel par triangulation permettait alors d'établir les cartes célestes.

Carte du monde de ptolémée

Claude Ptolémée

(IIe siècle après JC, Alexandrie)



Longitudo et Latitudo ac Magnitudo ſtellarum fixarum

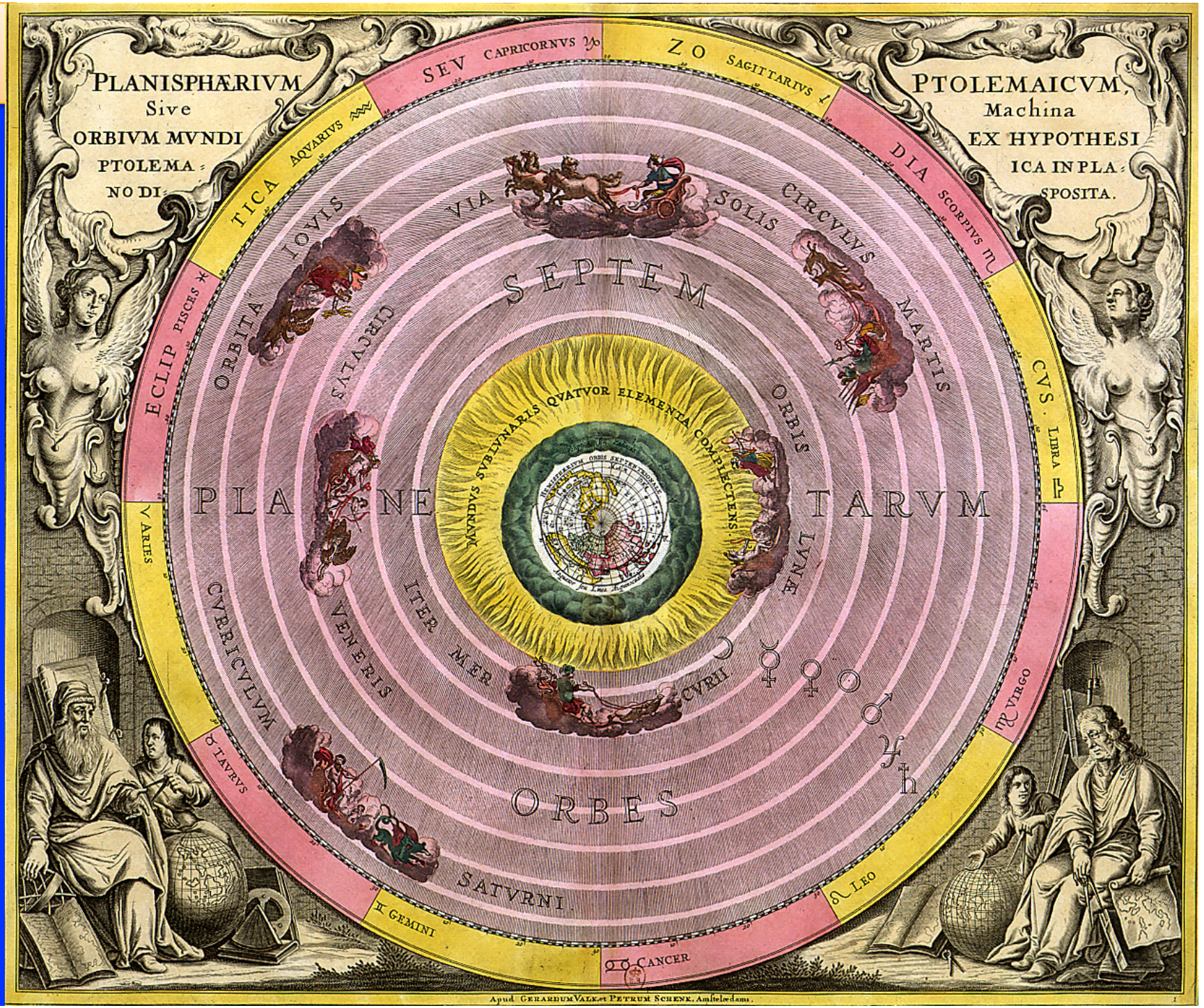
Forme et Stelle natur Jeuze. — Imago Trigeſimaquinta	Lōgitudo s	g	m	Pars	Lati^do g	m	Magni. g	
Septentrionalis que eſt in capite ſublimati ſiue audacis	1	27	0	M	18	50	nebuloſa	
Lucida q̄ ē ſr hūeꝝ dextꝛ: ꝛ ipa rēdit ad rapinā qꝛ appꝛopinq̄t ad terrā in humero oꝛionis	2	2	0	M	17	0	1	.e.l.
Que eſt ſuper humerum ſiniſtrum	1	20	20	M	17	30	2	.e.m.
Sequens que eſt ſub iſtis duabus	1	25	0	M	18	0	4	.e.l.
Que eſt ſuper cubitum dextrum	2	4	20	M	14	30	4	
Que eſt ſuper brachium dextrum	2	6	20	M	11	50	6	
Sequens duplex meridionalis quadrilateri qđ eſt in palma dextra	2	6	30	M	10	40	4	
Antecedens lateris meridionalis	2	6	0	M	9	45	4	
Sequens lateris ſeptentrionalis	2	7	20	M	8	15	6	
Antecedens lateris ſeptentrionalis	2	6	40	M	8	15	6	
Antecedens duarum que ſunt in figura pineali	2	1	40	M	3	45	5	
Sequens earum	2	4	20	M	3	15	5	
Sequens quattuoꝛ que ſunt quaſi ſuper lineam rectam ſuꝑ doꝛſum	1	27	30	M	19	40	4	
Antecedens hanc	1	26	20	M	20	0	6	
Antecedens etiam hanc	1	25	20	M	20	20	6	
Reliqua ꝛ eſt antecedens quattuoꝛ	1	24	10	M	20	40	5	
Longioꝛ nouem que ſunt in doꝛſo manus ſiniſtre in ſeptentrionem	1	20	30	M	8	0	4	
Secunda poſt iſtam in ſeptentrione	1	19	20	M	8	10	4	
Tertia poſt eam in ſeptentrione	1	18	0	M	10	15	4	
Quarta poſt eam in ſeptentrione	1	16	20	M	12	50	4	
Quinta poſt eam in ſeptentrione	1	15	10	M	14	15	4	
Sexta poſt eam in ſeptentrione	1	14	30	M	15	50	3	
Septima poſt eam in ſeptentrione	1	14	50	M	17	10	3	
Octaua poſt eam etiam in ſeptentrione	1	15	20	M	20	20	3	
Reliqua ex nouem vltima a meridie	1	16	20	M	21	30	3	
Antecedens trium que ſunt ſuper cingulum	1	25	20	M	24	10	2	
Media earum	1	27	20	M	24	50	2	
Sequens trium	1	28	10	M	25	40	2	
Que eſt apud capulum enſis	1	23	50	M	25	50	3	
Septentrionalis trium coniunctarum cum capite enſis	1	26	50	M	28	40	4	.e.l.
Media earum	1	26	40	M	29	40	3	
Meridionalis trium	1	27	0	M	29	50	3	
Sequens duarum que ſunt ſub extremitate enſis	1	27	40	M	30	40	4	
Antecedens earum	1	26	10	M	30	50	4	
Lucida que eſt in pede ſiniſtro: ꝛ eſt cōmunis ei ꝛ aque	1	19	10	M	31	30	1	
Que eſt ſuꝑ decliuioꝛē ea ad ſeptentrionē: ꝛ eſt ſuꝑ calcaneum	1	21	0	M	30	15	4	.e.m.
Que eſt ſuper calcaneum ſiniſtrum exterius	1	23	20	M	31	10	4	
Que eſt ſuper genu dextrum ſeptentrionale	1	0	10	M	33	30	3	

Illarum trigintaocto ſtellarum in magnitudine pꝛima ſunt due. in ſecūda quattuoꝛ. in tertia octo. in quarta quindecem. in quinta tres. in ſexta quinq;. ꝛ nebuloſa vna.

Stellatio Fluuij. — Imago Trigeſimaſexta	s	g	m	Pars	g	m	Magni.
Que ē poſt illā q̄ ē i pede ſublimati ſiue audacis ſuꝑ pꝛīcipiū flumīs	1	18	20	M	31	50	4
Que ē decliuioꝛ hac ad ſept., ꝛ ē i toꝛtuoſitate apđ ꝯpꝛehēdētē crus ſublimati ſiue audacis	1	18	50	M	28	15	4
Sequēs duaꝝ ꝯtinuaꝝ que ſunt poſt hanc	1	18	0	M	29	50	4
Antecedens earum	1	14	40	M	28	15	4
Sequens duarum continuarum etiam	1	13	10	M	29	15	4
Antecedens earum	1	20	10	M	25	20	4
Sequens trium que ſunt poſt iſtam	1	6	20	M	26	0	4
Media earum	1	5	30	M	27	0	4

Lachièze-Rey, http://marclrey.free.fr/

Ptolémée
(Cellarius)



Ptolémée (Cellarius)

La science arabe

- Les savants arabes traduisent et commentent les textes grecs oubliés en occident. Ils les y réintroduiront au XIIè.
- Ils développent mathématiques, astronomie, philosophie, théologie, droit, médecine… Tout ceci sera réintroduit en occident au XIIè.
- Ils développent des centres d'étude et d'enseignement (medersas) qui serviront de modèles aux universités en occident (XIIè).
- Ils promeuvent une approche de la connaissance par la raison et l'observation qui servira de base au développement de la science en occident.

Lachièze-Rey, http

La science arabe

622 après J.C : Hégire = début du calendrier islamique = émigration du prophète Mahomet de la Mecque à Médine

La nouvelle dynastie des Abbassides fonde sa capitale Bagdad en 762

En 813 le calife al-Mamoun

(celui des Mille et Une Nuits!) (fils de Hârûn ar-Rachîd)

fonde à Bagdad la Maison de la Sagesse, une académie où se côtoient un mélange de cultures dans la plus grande tolérance: mathématiques, astronomie.

Les auteurs grecs, oubliés en occident, sont traduits en arabe : Aristote, Euclide, Ptolémée, Archimède…

Reprise également de la science indienne (mathématique, astronomie)

(Thabit b. Qurra /

Ahmad al-Farghani, Les *Éléments*)

al-Battani , *Tables sabéennes*)

Les savants arabes: la Maison de la Sagesse

Al-Khwarizmi **(vers 780-850)**, astronome et mathématicien,
originaire du Khwarizm (vallée de l'Amou-Daria).
Il dédie au calife al-Mamoun son livre Précis sur le calcul de al-jabr et de al-muqabala (= Algèbre = *al-Jabr*; traduction latine vers 1110).
Auteur de tables astronomiques et théoricien de l'algèbre, il aurait dessiné le premier planisphère arabe, *Cûrat al-Ard'* (l'Image de la Terre) fondée sur des coordonnées astronomiques. Selon lui, fixer un point sur la carte, c'est établir sa position par rapport aux étoiles du ciel et définir les influences qu'il en reçoit (GPS!).

Son invention considérable inaugure une généalogie impressionnante d'algébristes
Il introduit la numération décimale indienne en Islam (chiffres arabes), dont le zéro. Par cet intermédiaire, l'algèbre commencera à s'implanter en occident au XIIe siècle, reprenant la tradition des mathématiciens grecs (Aristote, Euclide, Archimède).

Ahmad al-Farghani (mort en Égypte en 861) écrit le *Jawami* (*Éléments*):
fait connaître l'astronomie de Ptolémée → influence considérable en Occident
(Regomontanus fit des cours sur lui à l'université de Padoue en 1464).
Deux traductions latines au XIIè s: Jean de Séville et Gérard de Crémone (→ connaissances astronomiques de Dante : *Vita Nuova* et Il Convivio [Le Banquet]).

Mohamed al-Battani (= Albategnius, IXe siècle) écrivit le *Zij* (Tables d'Astronomie: *Tables sabéennes*), un des plus importants travaux d'astronomie entre ceux de Ptolémée et Copernic, mieux que Ptolémée (cité 23 fois dans *De Revolutionibus*, Copernic)
Il détermine la position de l'orbite solaire mieux que Ptolémée

L’astronomie arabe

s’attache à la validation de la théorie par l’observation des phénomènes physiques

- perfectionnement des instruments mathématiques (globe, la sphère armillaire, horloges astronomiques), des instruments de visée muraux (quadrants et sextants…) ,
- nombreux observatoires bien équipés où l’échange entre savants venus de tous les horizons du Monde islamique stimule profondément la recherche.
- Restant dans le cadre géocentrique, les astronomes arabes critiquent les détails techniques du système de Ptolémée

- Le principal traducteur grec est Thâbit ibn Qurra (826-901) ثَابِت اِبْن قُرَّة ,

principal successeur immédiat d’Al-Khawârizmî.

Il écrivit plus de 100 traités scientifiques, dont un commentaire sur l'Almageste.

Il **a écrit deux ouvrages commentant la théorie des parallèles d'Euclide:**

Le livre sur la démonstration du célèbre postulat d'Euclide, et

Le livre montrant que deux droites menées selon deux angles qui sont plus petits que deux droits se rencontrent".

Les savants arabes

Al Kindi (v. 796 - v. 873) : oeuvre considérable (265 livres), inspiré par Platon, Aristote, Plotin.
Le monde est créé ex nihilo. Tout ce qui existe en acte est fini: le monde est fini, le temps est fini.
« La sphère externe est vivante et intelligente. Elle obéit à Dieu, et transmet la vie aux êtres vivants dans le monde ».
Le « cercle de Al Kindi » traduit en arabe les fundamentaux Neoplatoniciens.

Al Fârâbi (872 - 950) "le deuxième maître" (après Aristote) : synthèse Platon - Aristote:
«il y a donc dix intelligences dont la première est celle du premier ciel, et les neuf autres sont successivement celles des étoiles fixes, de Saturne, Jupiter, Mars, le Soleil, Vénus, Mercure, la Lune. A la sphère de la Lune se termine l'être des corps célestes, lesquels, de par leur nature, se meuvent circulairement.»

Avicenne = Ibn Sina (v. 980 - v. 1037) : Médecin et philosophe. Auteur du Canon de la médecine.
éternité du monde

Abu al-Husayn al-Sufi [Azophi] (fin Xe siècle): Astronome : Livre des constellations des étoiles fixes.
Constructeur d'instruments (astrolabe).

Les savants arabes

(Al Ghazâli (mort en 1111))
(Ibn Khaldoûn (1332 - 1406))

• Ibn-Al-Haytham [Alha- zen] (965/1040): Le plus célèbre physicien du monde arabe. Théorie sur la lumière et la vision : l'Optique.
• Al-Khayyam [Omar Khayyam] (1048/1131) Médecin, astronome et poète, auteur des rôbaïates. Théorie géométrique (par sections coniques) des équations cubiques. Réforme du calendrier persan.
• Al-Karagi (XIe siècle)Auteur du livre suffisant sur la science de l'arithmétique. Étudie l'algèbre des polynômes.
• Al-Samaw'al (?/1174)Disciple de Al-Karagi. Utilise le symbolisme des tableaux pour l'algèbre des polynômes. Précurseur des fractions décimales. Nombres négatifs. Approximation d'un irrationnel par une suite de rationnels.
• Ibn Rushd [Averroès] (1126/1198)Philosophe et commentateur d'Aristote. Version de la théorie des sphères d'Eudoxe avec 47 sphères (au lieu des 55 du temps d'Aristote). Notion de double vérité (rationnelle vs révélée).

ABU ALI AL-HASAN IBN AL-HAITHAM, 965-1040

Les savants arabes

tables astronomiques d'Al-Battânî ou d'Al-Sûfî pour le Machreq,
tables andalouses de Maslama al-Majrîtî et d'Al-Zarqâluh (→→ *Tables alphonsines*, établies à Tolède par Alphonse X ; connaîtront, grâce à l'imprimerie, un succès de librairie sans précédent); ne seront dépassées qu'après l'utilisation de la lunette astronomique par Galilée.

nombreux traités :
critique de l'astrologie (Ibn Sîna)
mathématisation des raisonnements astronomiques avec Thâbit b. Qurra et Al-Bîrûnî,
introduction de la géométrie sphérique et surtout la trigonométrie sphérique avec 'Umar Khayâm et Nasr al

Al Sufi

Les savants arabes critiquent Ptolémée.

Restant dans le cadre géocentrique, les astronomes arabes critiquent les détails du système de Ptolémée.

• Dans ses *Doutes sur Ptolémée*, Ibn al-Haytham (XIè s) (= Ptolémée le second) critique l'utilisation de l'équant.
• Parallèlement, en Andalousie (Cordoue), l'astronome et philosophe Ibn Rushd (Averroès= le commentateur [d'Aristote]) rejette les déférents excentrés de Ptolémée et défend un modèle strictement concentrique de l'Univers.

À l'autre extrémité du monde islamique, école de Marâgha (aujourd'hui en Iran)

• Nasir al-Din al-Tusi (vers 1260-1274) fait construire un observatoire à Maragha :
Dans sa *Tadhkira* (*Memorandum*), élimine l'équant imaginé par Ptolémée, simplifie considérablement le modèle planétaire classique.

• Ibn al-Shatir (Damas vers 1350) construit un système planétaire totalement concentrique, mécaniquement acceptable, généralisant les idées d'al-Tusi.

• Aux XIIIe et XIVe siècles, nombre de travaux astronomiques arabes et persans sont traduits en grec par des savants occidentaux voyageant en Perse.
Copernic reprend (1543) les travaux des astronomes de Maragha (dont al-Tusi, le modèle terre-lune-soleil d'Ibn al-Shâtir): « le dernier membre de l'école de Marâgha »...

Nasir al-Din al-Tusi (XIIIè)

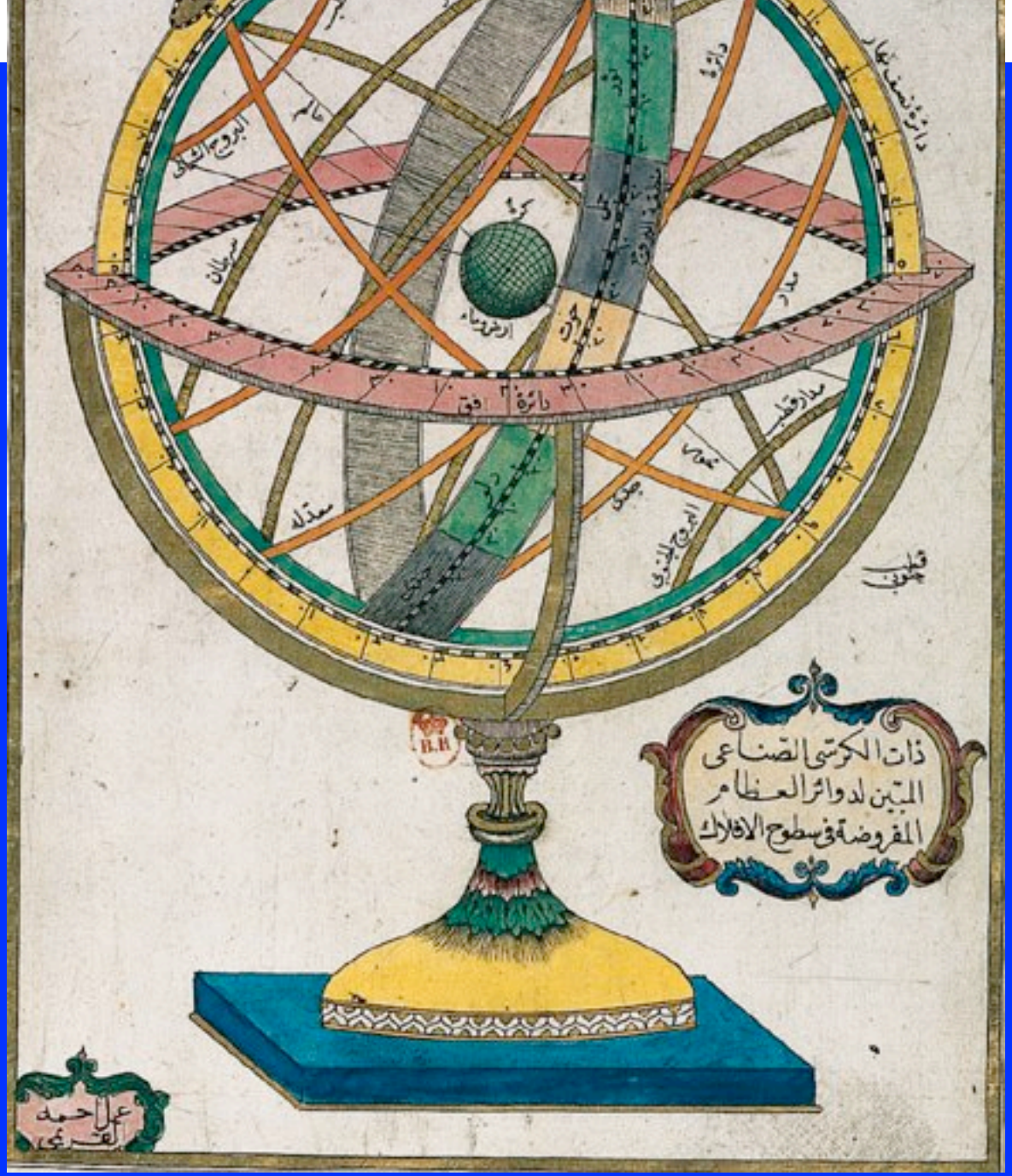
l'astrolabe

Instrument de démonstration (plutôt que de mesure) symbolique de l'astronomie arabe
(probablement conçu à la fin de la période hellénique avec Théon d'Alexandrie,
transmis à la science arabe par Jean Philopon au VIe siècle)

Pris en mains à Baghdâd par Al-Fazârî,
multiples perfectionnements dus à Al-Khwarizmî et à son contemporain Al-Farghânî (première moitié du IX^{e}s).

→ véritable calculateur universel: permet d'obtenir l'heure de jour comme de nuit, la latitude d'un lieu, la direction de la Mecque, la hauteur d'un bâtiment ou d'une montagne, la profondeur d'un puits, etc. Il est en quelque sorte l'ordinateur de poche et le GPS du Moyen-Âge.
→ vérification de toutes les données fournies par Ptolémée
→ précision accrue des mesures des phénomènes astronomiques : coordonnées et magnitudes des étoiles fixes, calcul de l'obliquité de l'écliptique et de la précession des équinoxes, orbites du soleil, de la lune et des cinq planètes, etc.

les savants du Monde arabe et islamique assument l'ensemble de l'héritage de leurs prédécesseurs (grecs, indiens ou perses)


ذات الكرسي الصناعي
المبين لدوائر العظام
المفروضة في سطوح الافلاك
عمل احمد
الفرغاني

Sphère armillaire turque
Mustafa Ibn Abdullah, dit Katib Tchelebi ou Hadji Khalifa,
Le Livre de la description du monde, ou *Géographie*,
(Traduction en turc par Ibrahim Efendi, Constantinople, 1732)

En établissant une certaine manière de voir et de penser, la sphère armillaire (ici, d'après le système de Ptolémée) enseignait comment aborder le ciel. Base de l'astronomie géométrique, elle devint le principal emblème de cette discipline dans l'iconographie ancienne, ornant les frontispices de nombreux ouvrages.

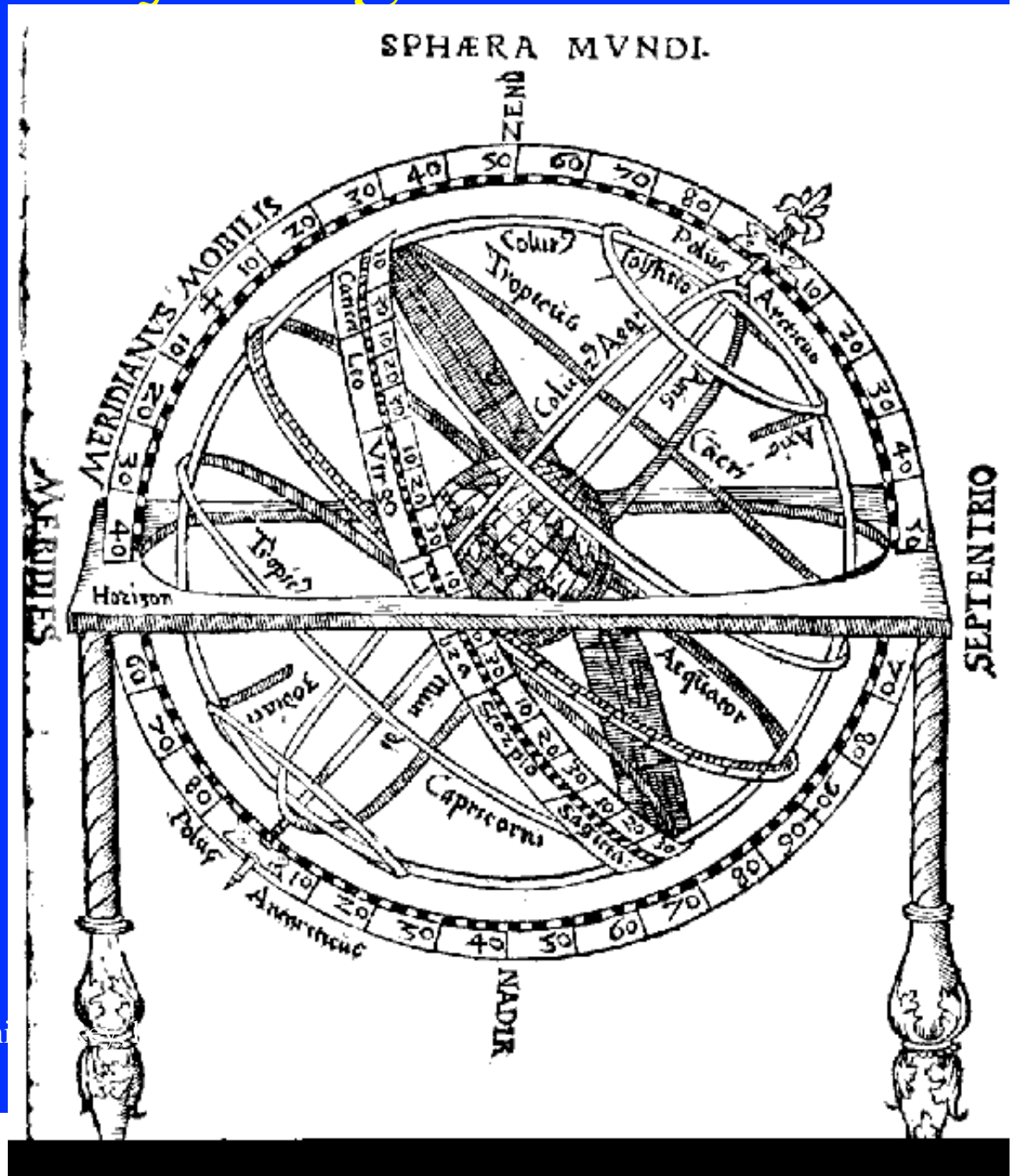
Antiquité – Moyen âge

Quatre périodes:

- Monde spirituel et chrétien
- Redécouverte des grecs
  par l'intermédiaire des arabes
  opposition univers chétien / Aristote
- Assimilation d'Aristote
- Critiques d'Aristote →
  vers la Renaissance scientifique

Apianus

•



Antiquité – Moyen âge

Moyen âge: Peu d'intérêt en Europe pour la vision scientifique

- Conception biblique du Monde : Le monde chrétien, l'univers spirituel
- Intérêt pour les rapports Homme – Cosmos (astrologie, almanachs, microcosme – macrocosme…)
- Les savants arabes traduisent et réintroduisent les auteurs grecs ; critiquent Aristote et Ptolémée

Les acquis de la cosmologie grecque avaient été remis en cause par l'avènement du christianisme. Vers le Ve siècle, la cosmographie s'était détachée du modèle scientifique Grec pour devenir purement spirituelle:

Du Tabernacle à l'Empyrée

Au cours des premiers siècles de l'ère chrétienne, certains Pères de l'Église comme Ambroise de Milan avaient tenté de concilier les Écritures et la philosophie d'Aristote (monde éternel, incréé)

- Au VIIe siècle, Bède le Vénérable et Isidore de Séville adoptent une attitude plus ouverte.
- Le pape savant Sylvestre II (= Gerbert d'Aurillac) revient au modèle grec.
- Puis la cosmologie platonicienne est progressivement amalgamée à la vision chrétienne (Hildegarde de Bingen, *Scivias*, entre 1141 et 1151)
-

Haut Moyen-âge

- Les partisans de la stricte orthodoxie chrétienne imposent leur point de vue: effacement du savoir astronomique

  Topographie chrétienne (Cosmas Indicopleustès, moine alexandrin du VIe siècle):

« Il faut se rapporter à la Bible. C'est là qu'on trouve les hypothèses, les systèmes cosmographiques authentiquement chrétiens, tous ceux qui pensent autrement se trompent . »

Cosmos – tabernacle

Lachièze-Rey, http://marclrey.free.fr/

Hildegarde de Bingen,
Scivias, (entre 1141 et 1151)

Lachièze-Rey, http://marclrey.free.fr/

Hildegarde de Bingen,
Scivias, (entre 1141 et 1151)

Dante: *La Divine Comédie*

Achevée entre 1316 et 1321

le « Paradis » = véritable dissertation astronomique : description de l'ordre physique et spirituel qui règne au sein de l'Univers. Le voyage initiatique du poète rassemble les connaissances cosmologiques de son temps.

Le monde de Dante est une hiérarchie s'élevant de l'impur au parfait : terre, eau, air, feu, et quintessence ; puis passage, au niveau de la Lune, au monde incorruptible : Lune, Mercure, Vénus, Soleil, Mars, Jupiter, et Saturne, et sphère des étoiles fixes, dont le mouvement simple et pur n'est pas soumis au ballet compliqué des planètes.

Le Premier Moteur (ou neuvième ciel) ne contient aucun astre ; sa substance cristalline et parfaitement homogène s'engrène directement sur l'Empyrée, demeure des dieux.

L'homme trouve naturellement sa place dans cette belle construction : le monde est fini, et même petit. Le paradis, à sa frontière, est accessible.

« Au sein du ciel de la divine paix
Tourne un grand corps, dans la vertu duquel
Réside l'être-en-soi de tout ce qu'il contient.

Le ciel d'après, où l'on voit tant d'étoiles,
Répand cet être en diverses essences,
Bien distinctes de lui, mais par lui contenues.

Puis les orbes suivants, selon leurs caractères,
Disposent pour leurs fins les essences distinctes
Qu'ils reçoivent en eux, ainsi que leurs effets.

Tu le vois à présent : les organes du monde
S'en vont ainsi, de degré en degré :
Ils reçoivent d'en haut, puis agissent en bas. »

Dante, *La Divine Comédie*, « Paradis », chant II.

Moyen âge: Redécouverte d'Aristote

Aux XIIe et XIIIe siècles, la cosmologie aristotélicienne et l'astronomie de Ptolémée pénètrent en Occident par le biais des traductions arabes et de leurs commentaires, notamment ceux d'Averroès (Aristote, Almageste…) et de la littérature des astronomes de l'Islam (dans le paradigme ptolémaique).

En même temps, le monde savant européen s'organise autour des universités, fondées à partir de 1200. En 1210, l'Université de Paris est reconnue par le pape Innocent III.

L'évêque Étienne Tempier y interdit l'enseignement d'Aristote dès 1215.

Mais la rigueur de la pensée aristotélicienne séduit les intellectuels – tous issus de l'Église.

Roger Bacon (venu de l'Université d'Oxford) est le premier à enseigner officiellement la *Physique* et la *Métaphysique* d'Aristote à l'Université de Paris, en 1245.

Aristote figure dans toutes les questions concernant la nature de l'univers, la philosophie, la théologie.

L'astronomie de Ptolémée est enseignée dans le curriculum mathématique.

Une synthèse est dès lors recherchée entre pensées grecque et chrétienne, entre raison et foi.

Ce sera principalement l'œuvre de saint Thomas d'Aquin (*Somme théologique*, 1272).

L'emboîtement des sphères célestes est complété par l'Empyrée , créé au premier jour de la Genèse. La fonction de cette ultime sphère, immobile, est purement théologique : c'est le Trône de Dieu.

Redécouverte d'Aristote

Saint Thomas d'Aquin (1228-1274)
(*Somme théologique*, 1272) :
principal artisan de la synthèse
entre pensées grecque et chrétienne,
entre raison et foi .
L'emboîtement des sphères célestes est
complété par l'Empyrée:
ultime sphère purement théologique :
le Trône de Dieu.

- La conception aristotélicienne perdure jusqu'à la révolution copernicienne.

Atomisme à la Renaissance

En dehors de certains, tels Jean Buridan, Nicole Oresme et Nicolas de Cuse qui s'opposent à Aristote, la conception aristotélicienne perdurera jusqu'à Copernic.

• Nicolas de Cues (1401-1464) (*La Docte Ignorance*) : travail actif de l'intellect, place au négatif

- L'infini ← argument de Plénitude
- « L'intelligence doit étudier le monde physique, non en cherchant des types qui n'y sont pas, non pas en les cherchant d'autre part, dans tel phénomène sensible, dépouillé de ses accidents individuels, mais en déterminant les rapports des phénomènes ». (*Dialogue sur la genèse*, 1447)

• Giordano Bruno, « voyageur cosmique » Brulé à Rome par l'Inquisition (17 février 1600, Campo dei Fiori)

Souper des Cendres (1584), L'expulsion de la bête triomphante, La cabale du cheval pégaséen, Les fureurs héroïques, De l'infini, de l'univers et des mondes, De la cause, du principe et de l'un.

Abandonne les principes aristotéliciens. Il rejette la théorie des lieux naturels

conception du monde matérialiste et unitaire

propagandiste d'un univers infini, de la pluralité des mondes [et du vitalisme cosmique]

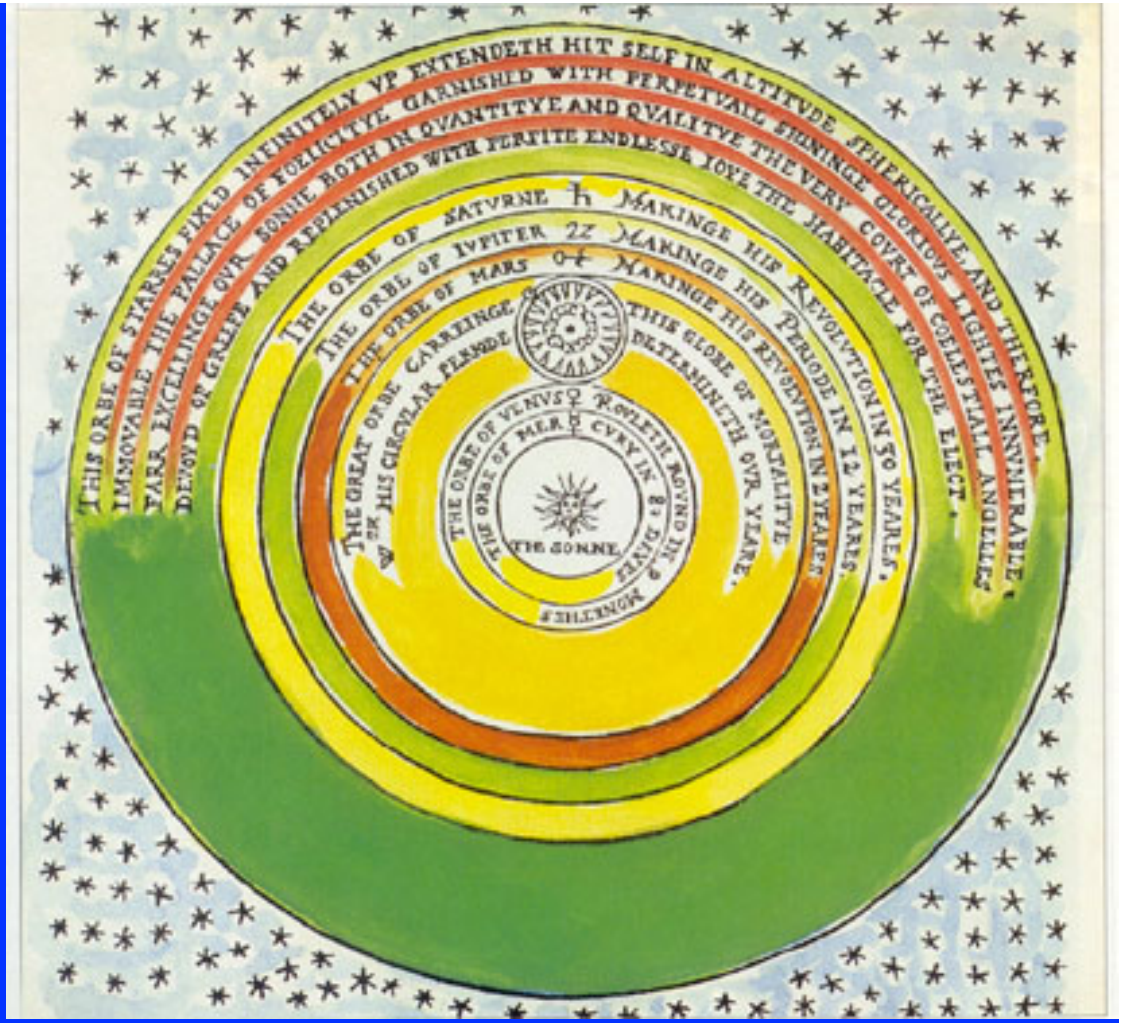
Chaque système solaire a un centre, à savoir l'étoile autour de laquelle tournent les planètes

Giordano Bruno

Deinfinito, universo e mondi **Giordano Bruno**
(1548-1600)

Déchire les surfaces concaves et convexes qui terminent au dedans et au dehors tant d'éléments et de cieux. Jette le ridicule sur les orbes déférents et les étoiles fixes. Brise et jette à terre, dans le grondement et le tourbillon de tes arguments vigoureux, ce que le peuple aveugle considère comme les murailles adamantines du premier mobile et du dernier convexe. Que soit détruite la position centrale accordée en propre et uniquement à cette Terre. Supprime la vulgaire croyance en la quintessence. »

Univers infini ?



Thomas Digges (1576) « A perfit description of the Celestiall Orbes… »

Application de la méthode (géographique) de la parallaxe aux étoiles

1576 (Prognostication Everlasting) : Univers infini

Renaissance

Pierre Gassendi (1592-1655)

Syntagma philosophiae Epicuri (1649) : Logique, Physique , Ethique.

Résurrection de l'atomisme, séparé de l'athéisme

[in 1624, the Parliment of Paris had issued a decree that anyone holding or teaching a position opposed to Aristotle (including atomism) was liable to be put to death.]

Copernic (1543) placera le Soleil au centre de l'univers et construira un système astronomique fondé sur cette hypothèses: effacera la frontière disciplinaire entre les traditions textuelles de la cosmologie physique et de l'astronomie technique.

Galilée (*Dialogue sur les "Deux Principaux Systèmes du Monde*, 1632) attaquera la cosmologie d'Aristote et les développements géométriques de Ptolémée, en faveur du système héliocentrique proposé par Copernic.

Pierre de Ronsard: *L'Hymne du ciel* (1555) :

Tu prends tout, tu tiens tout dessous ton arche ronde
D'un contour merveilleux la terre couronnant
Et la grand'mer qui vient la terre environnant,
L'air épars et le feu, et bref, on ne voit chose
Ou qui ne soit à toi, ou dedans toi enclose,
Et de quelque côté que nous tournions les yeux
Nous avons pour objet la clôture des Cieux.

Divine Proportion (1509), Luca Pacioli :

Cinq corps, dans la nature, sont produits,
corps naturels appelés simples,
parce que, à la formation de tout corps composé
ils concourent tous, réunis en un certain ordre.
Ils furent créés nets et purs.
On les nomme les quatre éléments et le ciel ;
ce sont eux dont Platon veut que la représentation
donne l'être à des fruits infinis.
Mais parce que la nature a horreur du vide.
Aristote dans [son traité] du *ciel et du monde*
a voulu les placer, sans les représenter.
Cependant le profond esprit géométrique
de Platon et d'Euclide se plut à en présenter
cinq autres qui s'inscrivent dans la sphère,
corps réguliers et d'aspect agréable,
égaux de côtés et de bases comme on peut les voir,
et jamais on n'en peut former un sixième.

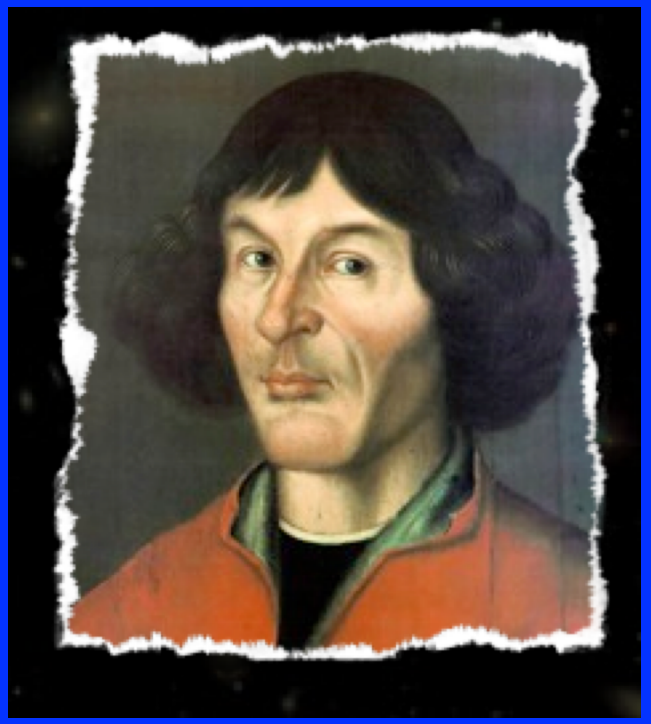
Les corps parlent au lecteur

NICOLAI COPERNICI

net, in quo terram cum orbe lunari tanquam epicyclo contineri diximus. Quinto loco Venus nono mense reducitur. Sextum denique locum Mercurius tenet, octuaginta dierum spacio circũ currens. In medio uero omnium residet Sol. Quis enim in hoc

pulcherrimo templo lampadem hanc in alio uel meliori loco ponere, quàm unde totum simul possit illuminare? Siquidem non inepte quidam lucernam mundi, alij mentem, alij rectorem uocant. Trimegistus uisibilem Deum, Sophoclis Electra intuentẽ omnia. Ita profecto tanquam in solio regali Sol residens circum agentem gubernat Astrorum familiam. Tellus quoque minime fraudatur lunari ministerio, sed ut Aristoteles de animalibus ait, maximam Luna cum terra cognationẽ habet. Cõcipit interea à Sole terra, & impregnatur annno partu. Inuenimus igitur sub hac

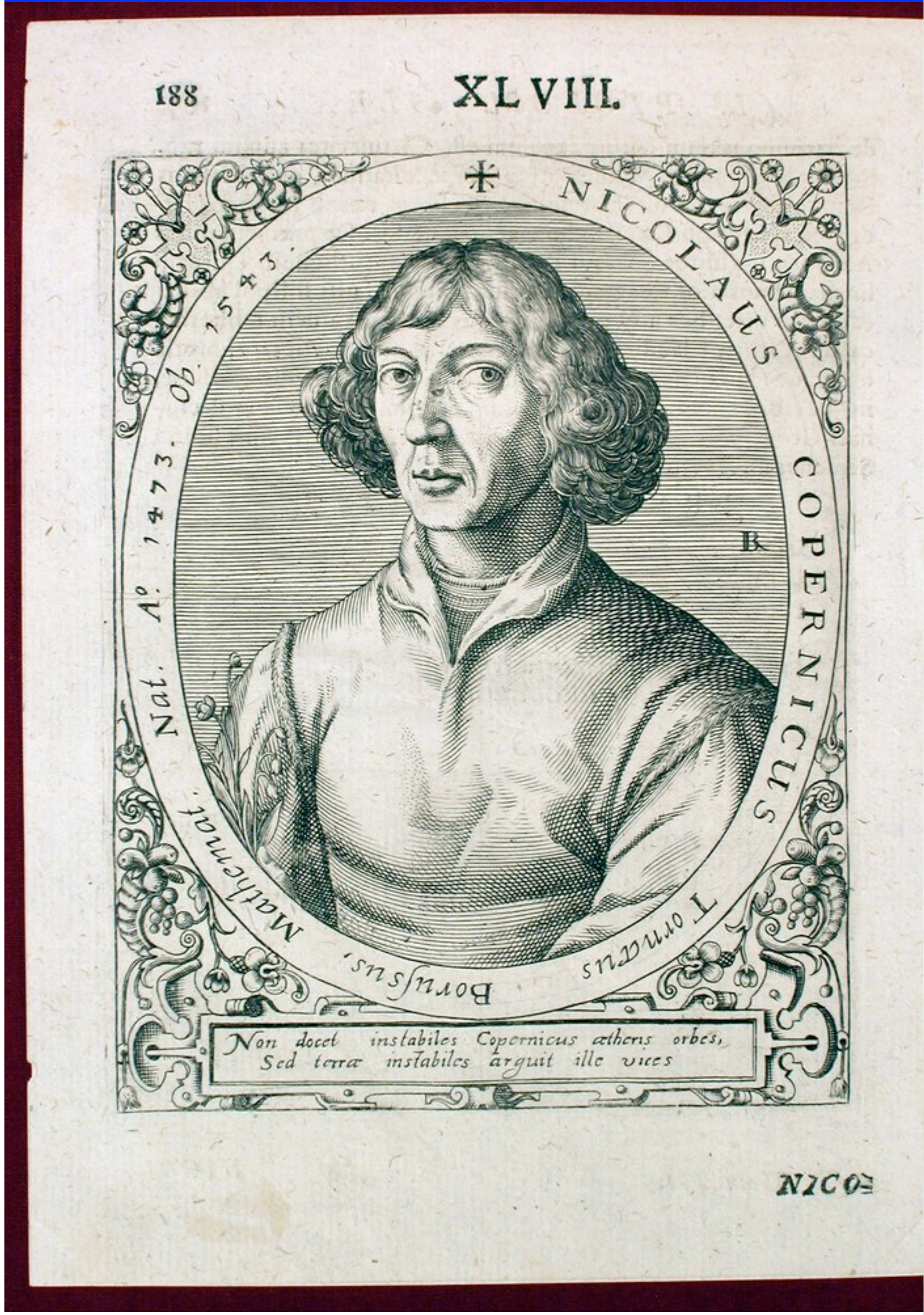
Copernic



Changement de centre

Toujours mouvements circulaires

Copernic



Ex correctione quæ prodijt Romæ Anno 1620
N. VIII. 30

NICOLAI COPERNICI TORINENSIS DE REVOLVTIONIBUS orbium cœlestium, Libri VI.

IN QVIBVS STELLARVM ET FIXARVM ET ERRATICARVM MOTVS, EX VETERIBUS atque recentibus obseruationibus, restituit hic autor. Præterea tabulas expeditas luculentasque addidit, ex quibus eosdem motus ad quoduis tempus Mathematum studiosus facillime calculare poterit.

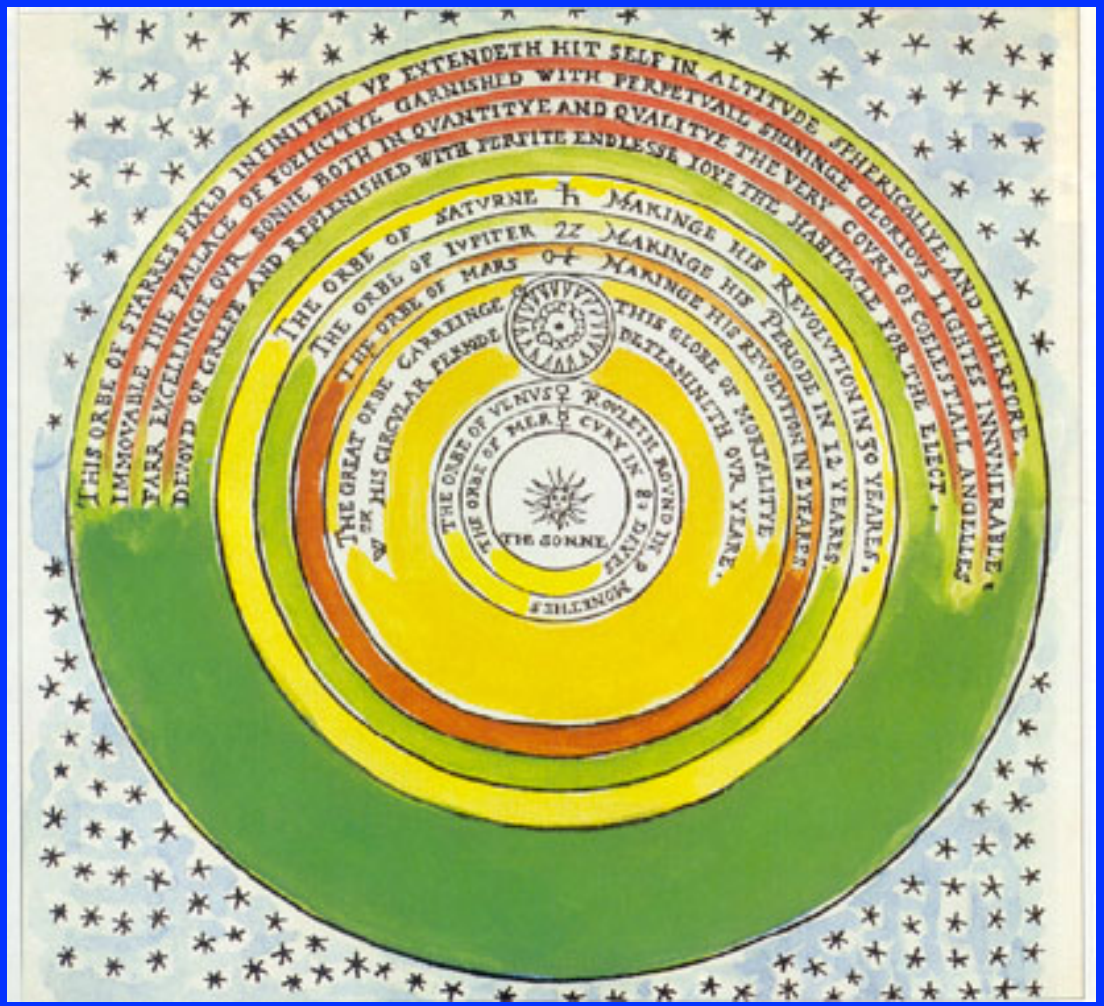
ITEM, DE LIBRIS REVOLVTIONVM NICOLAI Copernici Narratio prima, per M. Georgium Ioachimum Rheticum ad D. Ioan. Schonerum scripta.

Est Conventus S.ti Francisci Romani Mediolani Fratrum Eremitarum Excalceat. Ordinis S.ti Augustini Congregationis Italiæ

Cum Gratia & Priuilegio Cæs. Maiest.

BASILEAE, EX OFFICINA HENRICPETRINA. 72.

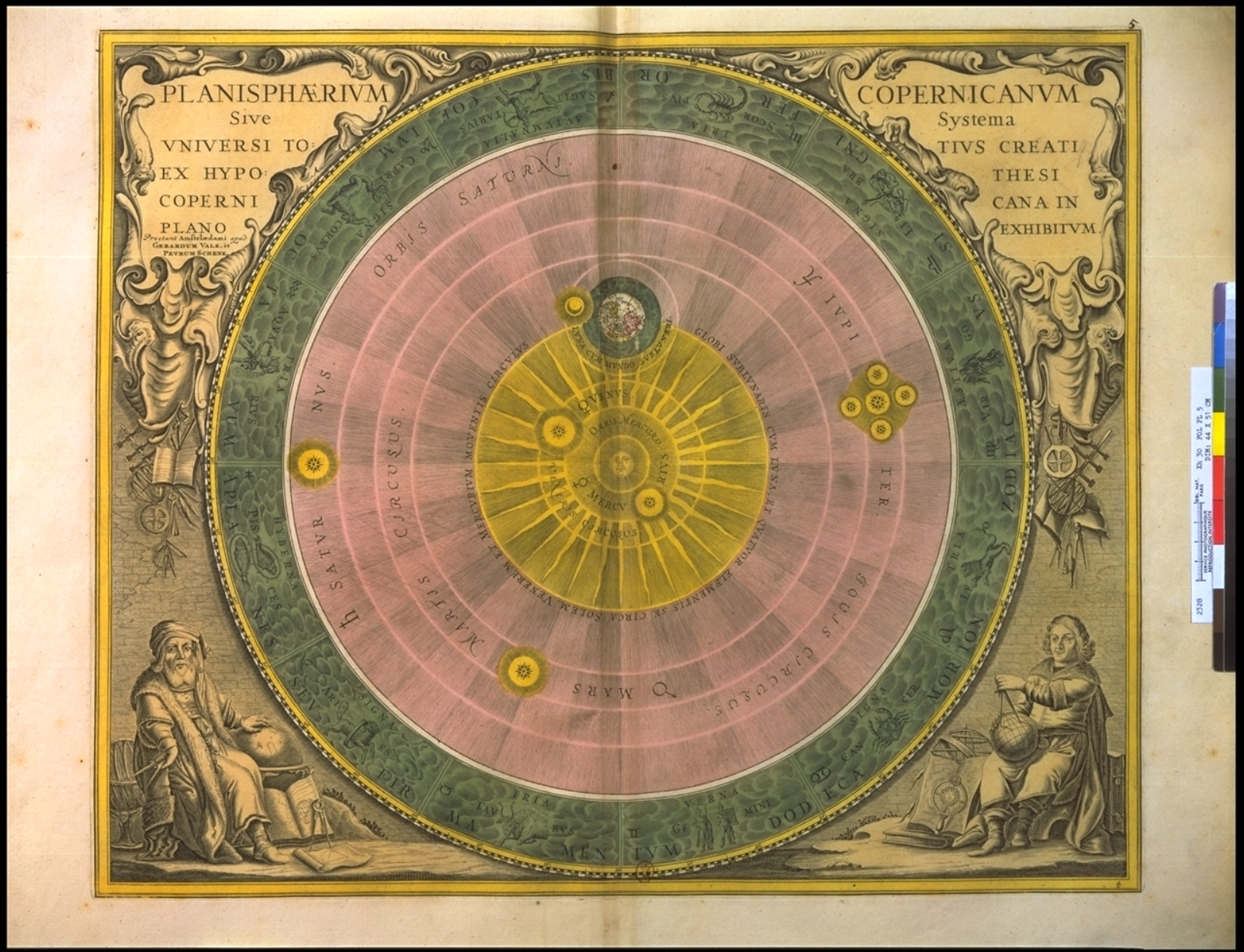
Copernic



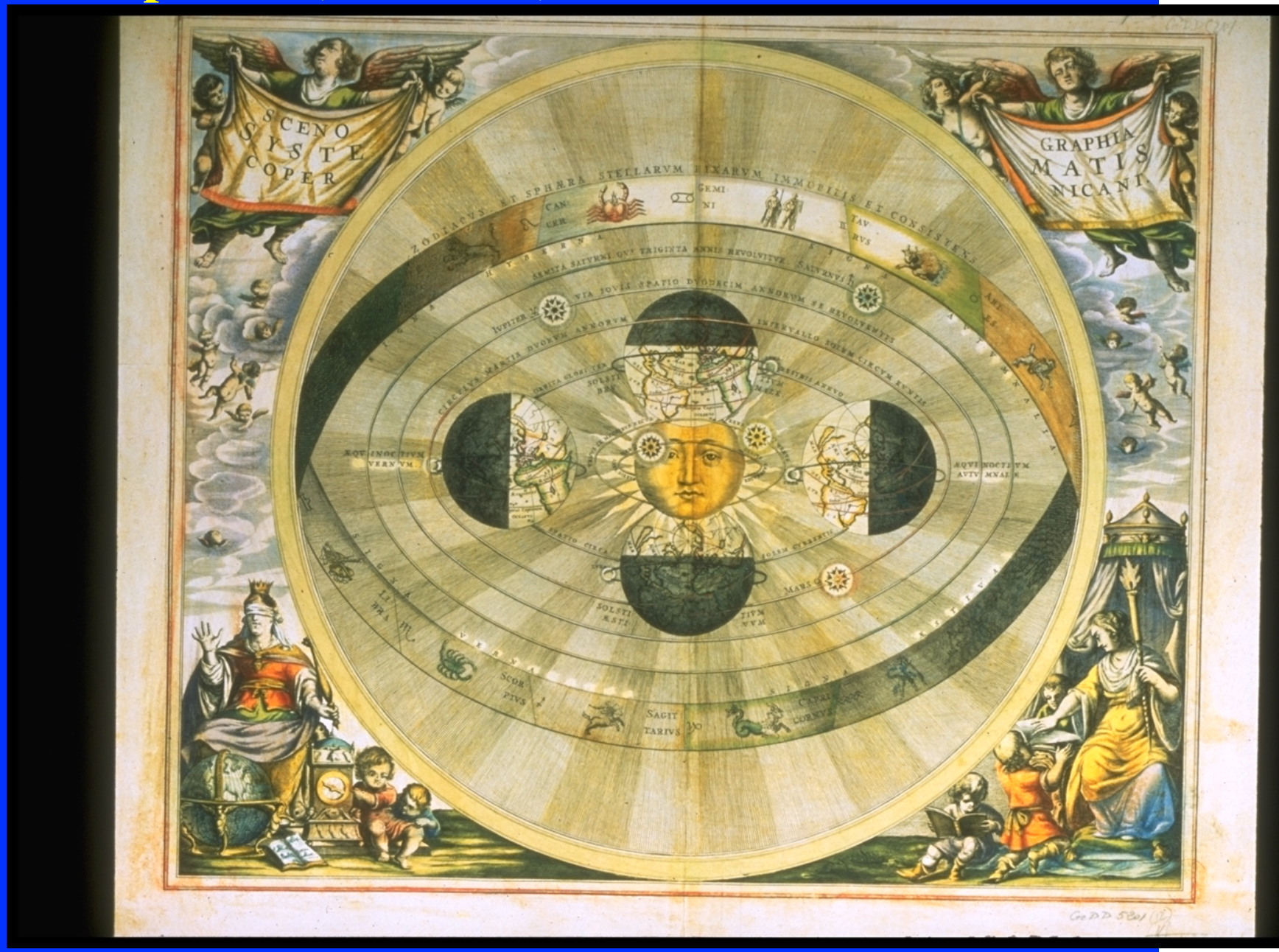
Changement de centre

Toujours mouvements circulaires

Copernic (Cellarius)



Copernic (Cellarius)



x

Johannes Kepler
(1571 - 1630)

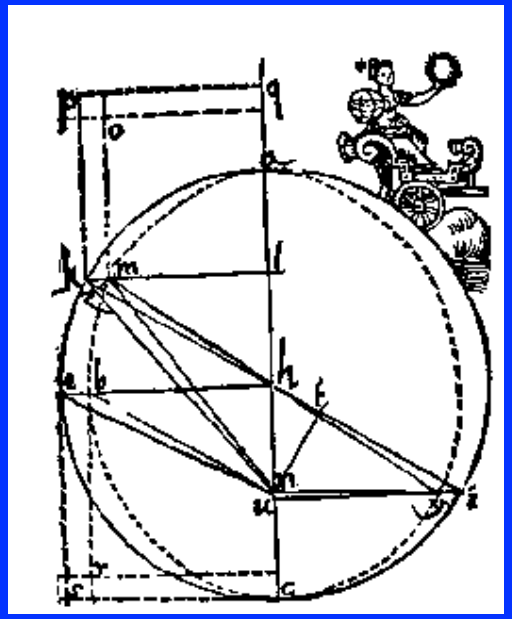
- *Mysterium cosmographicum* 1596
  (*Le Secret du monde*) (rédigé à l'âge de 25 ans)
- *Harmonices mundi* 1619
  (*L'Harmonie du monde*)

• Un des premiers à adopter les idées de Copernic.

Il déclare vouloir rechercher "les causes des nombres, tailles et mouvements des planètes sur leurs orbites".

- Il se propose de glorifier Dieu, responsable de l'organisation harmonieuse du monde.
- Il affirme voir dans les trois éléments astronomiques réputés fixes (les astres, le soleil et l'espace) le signe de la trinité divine. (*Harmonices Mundi*, 1619).

Kepler



cercles --> ellipses

Encore plus harmonieux ! (selon lui : harmonie des sphères)

Kepler

IOANNIS KEPPLERI
Mathematici Cæsarei
hanc Imaginem
ARGENTORATENSI BIBLIOTHECÆ
Consecr.
MATTHIAS BERNEGGERVS
Kal. Ianuar. Anno Chr.
M. DC. XXVII

Kepler

- *Somnium, sive opus posthumum de astronomia lunaris*.[1] Dans cet ouvrage publié à titre posthume en 1634 par son fils Ludwig.
- « Le but de mon Songe est de donner un argument en faveur du mouvement de la Terre ou, plutôt, d'utiliser l'exemple de la Lune pour mettre fin aux objections formulées par l'humanité dans son ensemble, qui refuse de l'admettre. Je pensais que cette vieille ignorance était bien morte, et que les hommes intelligents l'avaient arrachée de leurs mémoires, mais elle vit toujours, et cette vieille dame survit dans nos Universités. »

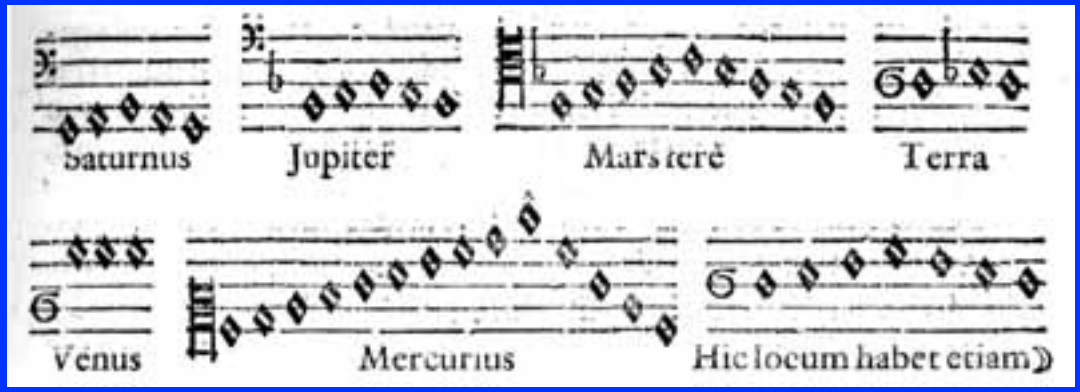
- (*Dissertatio* de 1593: *Comment les cieux apparaissent à un homme situé sur la Lune*)
- 1609 – année particulièrement féconde dans la production keplérienne, qui a vu la publication de *Astronomia Nova*, où sont exposées les deux premières lois des mouvements planétaires, et *Strena sive de Nive sexangula*, où la forme sexangulaire des cristaux de neige et autres structures naturelles sont déduites de profondes considérations géométriques.

Kepler : harmonie du monde

Harmonie des sphères

Cicéron, dans le *Songe de Scipion* (55 av. J-C), explique pourquoi nous n'entendons pas les sons correspondants : nos oreilles sont assourdies par le fracas sonore de l'univers, de la même façon que les habitants des bords du Nil n'entendent plus le bruit des cataractes.

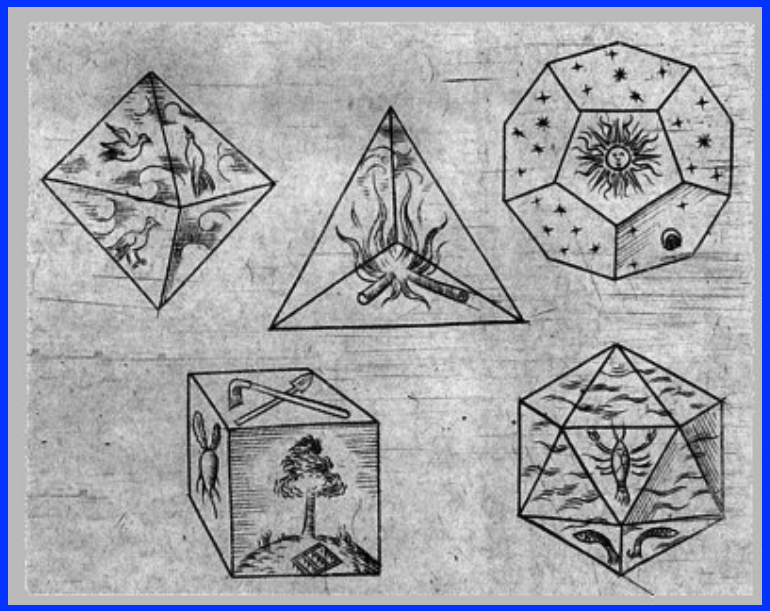
Ellipses → encore plus harmonieux !



" La Terre chante MI, FA, MI afin que tu conjectures à partir des syllabes que la MISÈRE et la FAMINE prévalent dans notre domicile. "
Johannes Kepler, *Harmonices mundi*

Préface au *Secret du monde* :

« Mon dessein, Lecteur, est de démontrer dans ce petit ouvrage que le Créateur Très Bon et Très Grand s'est référé pour la création de ce monde mobile et la disposition des cieux à ces cinq corps réguliers qui, depuis Pythagore et Platon jusqu'à nos jours, ont acquis une si grande célébrité, et qu'il a ordonné en fonction de leur nature le nombre des cieux, leur proportion et le rapport de leurs mouvements. »



La coupe cosmique

Dans *Mysterium Cosmographicum* [1596], Kepler expose une vue générale sur l'Univers fondée sur les solides parfaits.

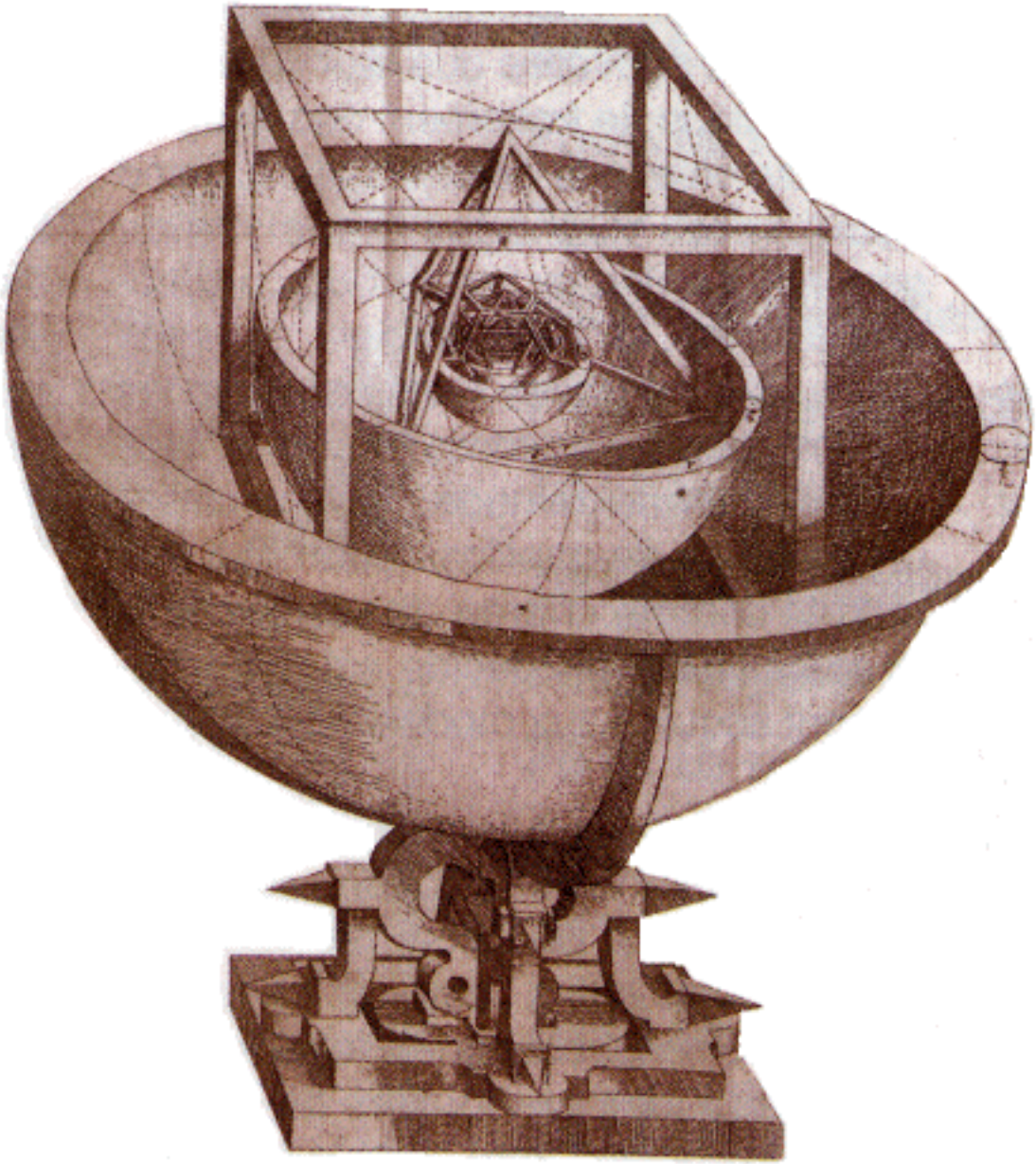
Après de nombreux calculs, Kepler voit « les solides symétriques s'insérer les uns après les autres avec tant de précision entre les orbites appropriées que si un paysan demandait à quels crochets les cieux sont fixés pour ne pas tomber, il serait facile de lui répondre ».

Pour Képler, ravi, cela ne saurait être un hasard. Il l'interprète comme une manière nouvelle de rendre compte des symétries et de l'harmonie fondamentales qui règnent dans le ciel !

- Il entreprend le projet d'un distributeur de boissons, choisies et préparées en relation avec les polyèdres et les harmonies planétaires. Il va même jusqu'à en fabriquer une maquette.

- En février 1596, Kepler se rend à la cour de son protecteur, le duc Frédéric de Wurtemberg, pour le persuader de faire construire une maquette de l'Univers en forme de coupe. Les symboles des planètes seraient taillés dans des pierres précieuses : un diamant pour Saturne, une hyacinthe pour Jupiter, une perle pour la Lune, etc. La coupe verserait plusieurs breuvages, que des tuyaux dissimulés amèneraient de chaque sphère planétaire à sept robinets placés sur le rebord. Le projet n'aboutit pas.

- octaèdre entre les orbites de Mercure et de Venus, un icosaèdre entre Venus et la Terre, un dodécaèdre entre la Terre et Mars, un tétraèdre entre Mars et Jupiter, et un cube entre Jupiter et Saturne.



Kepler: univers infini?

- Epitome of Copernican astronomy (1621)

- Si l'espace était infini (nombre infini d'étoiles) et éternel, alors la nuit serait brillante

36 EPITOMES ASTRONOMIÆ,

ceu à muro vel fornice quodam concluſum & circumſcriptum: & in hujus Cavi ingentis complexu, Tellus noſtra cum ſole & ſtellis mobilibus comprehenſa eſt.

Vide ſubjectam figuram.

Quod habes hujus rei Argumentum?

Si Regio fixarum vndique ſimiliter eſſet conſita ſtellis, etiam in vicinia noſtri mundi mobilis, ſic ut ſitus mundi ſolisque noſtri nullam haberet peculiarem circumſcriptionem præ ſitu fixæ alicujus: tunc appareret nobis paucæ aliquæ fixæ ingentes, nec ultra duodecim (quot angulos habet Icoſaedron) poſſent eſſe omnes ejusdem à nobis diſtantiæ, & magnitudinis: ſuccedentes his haud multo plures, haberent jam diſtantiam duplicatam proximarum; aliæ ſuperiores triplicatam, & ſic conſequentes ſemper multipliciorem.

Ac cùm omnium maximæ, tam appareant parvæ, ut vix inſtrumentis poſſint notari aut menſurari: quæ igitur duplo aut triplo &c. diſtarent longius, duplo & triplo apparerent minores, poſitis æqualibus ipſis veris magnitudinibus

Johannes Kepler

« ... à peu près tous les multiples mouvements sont causés par une force matérielle, magnétique très simple » ,

« (qu'il) fait voir aussi comment ces causes physiques doivent recevoir une expression numérique et géométrique ».

TABULÆ

RUDOLPHINÆ,

QUIBUS ASTRONOMICÆ SCIENTIÆ, TEMPOrum longinquitate collapsæ RESTAURATIO continetur;

A Phœnice illo Astronomorum,

TYCHONE

Ex Illustri & Generosa BRAHEORUM in Regno Daniæ familiâ oriundo Equite,

PRIMUM ANIMO CONCEPTA ET DESTINATA ANNO CHRISTI MDLXIV: EXINDE OBSERVATIONIBUS SIDERUM ACCURATISSIMIS, POST ANNUM PRÆCIPUE MDLXXII, QUO SIDUS IN CASSIOPEJÆ

TANDEM TRADUCTA IN GERMANIAM, INQUE AULAM ET Nomen RUDOLPHI Imp. anno MDIIC.

TABULAS IPSAS, JAM ET NUNCUPATAS, ET AFFECTAS, SED MORTE AUTHORIS SUI ANNO MDCI DESERTAS,

JUSSU ET STIPENDIIS FRETUS TRIUM IMPPP.

RUDOLPHI, MATTHIÆ, FERDINANDI,

ANNITENTIBUS HÆREDIBUS BRAHEANIS; EX FUNDAMENTIS

IOANNES KEPLERUS,

TYCHONI primùm à RUDOLPHO II. Imp. adjunctus calculi minister; indeq; trium ordine Imppp. Mathematicus:

Qui idem de speciali mandato FERDINANDI II. IMP.

Opus hoc ad usus præsentium & posteritatis, typis, numericis propriis, cæteris & prælo JONÆ SAURII, Reip. Ulmanæ Typographi, in publicum extulit, & Typographicis operis ULMÆ curator affuit.

Cum Privilegiis, Imp. & Regum Rerumq; publ. vivo TYCHONI ejusq; Hæredibus, & speciali Imperatorio, ipsi KEPLERO concesso ad annos XXX.

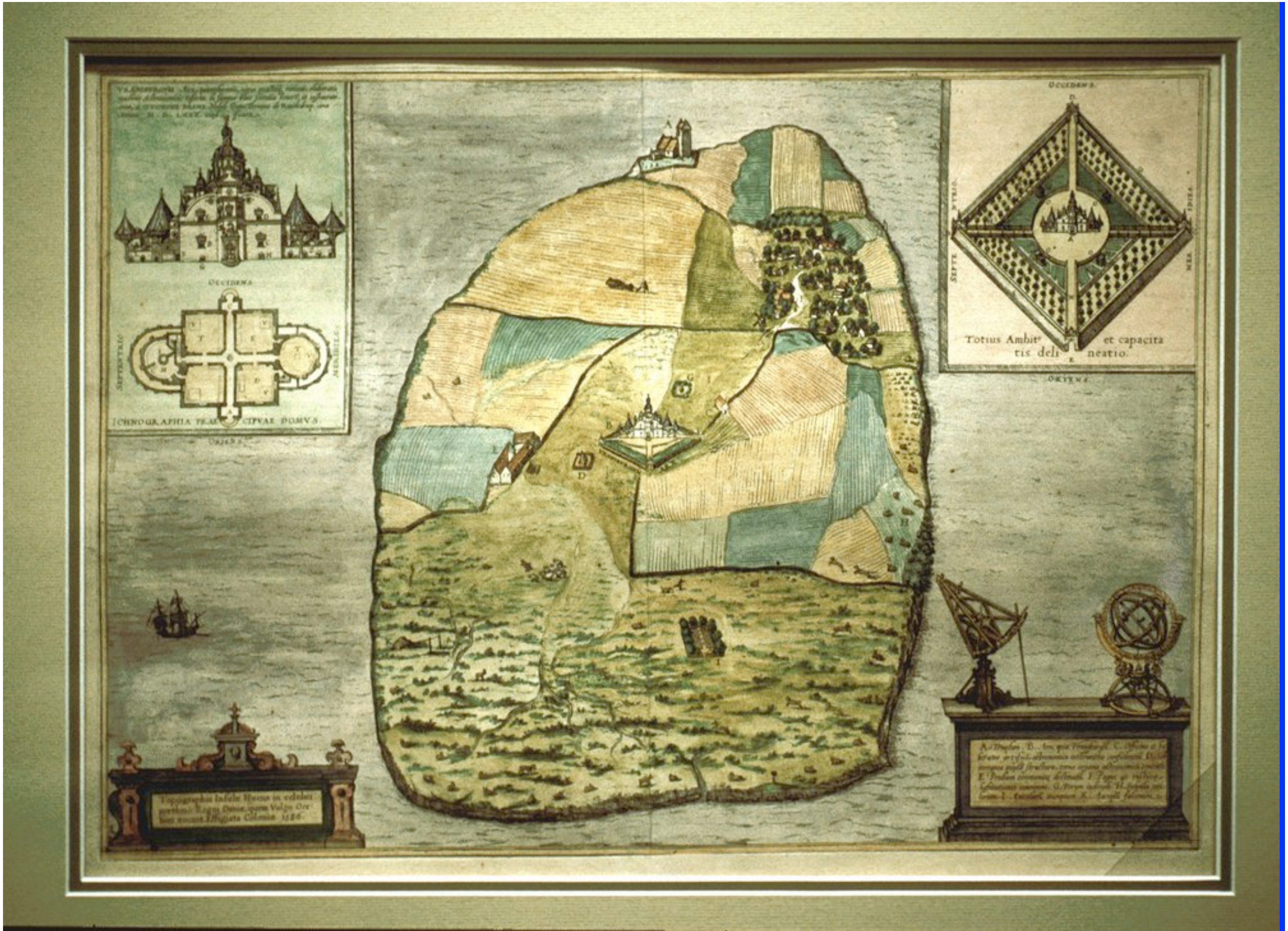
ANNO M. DC. XXVII.

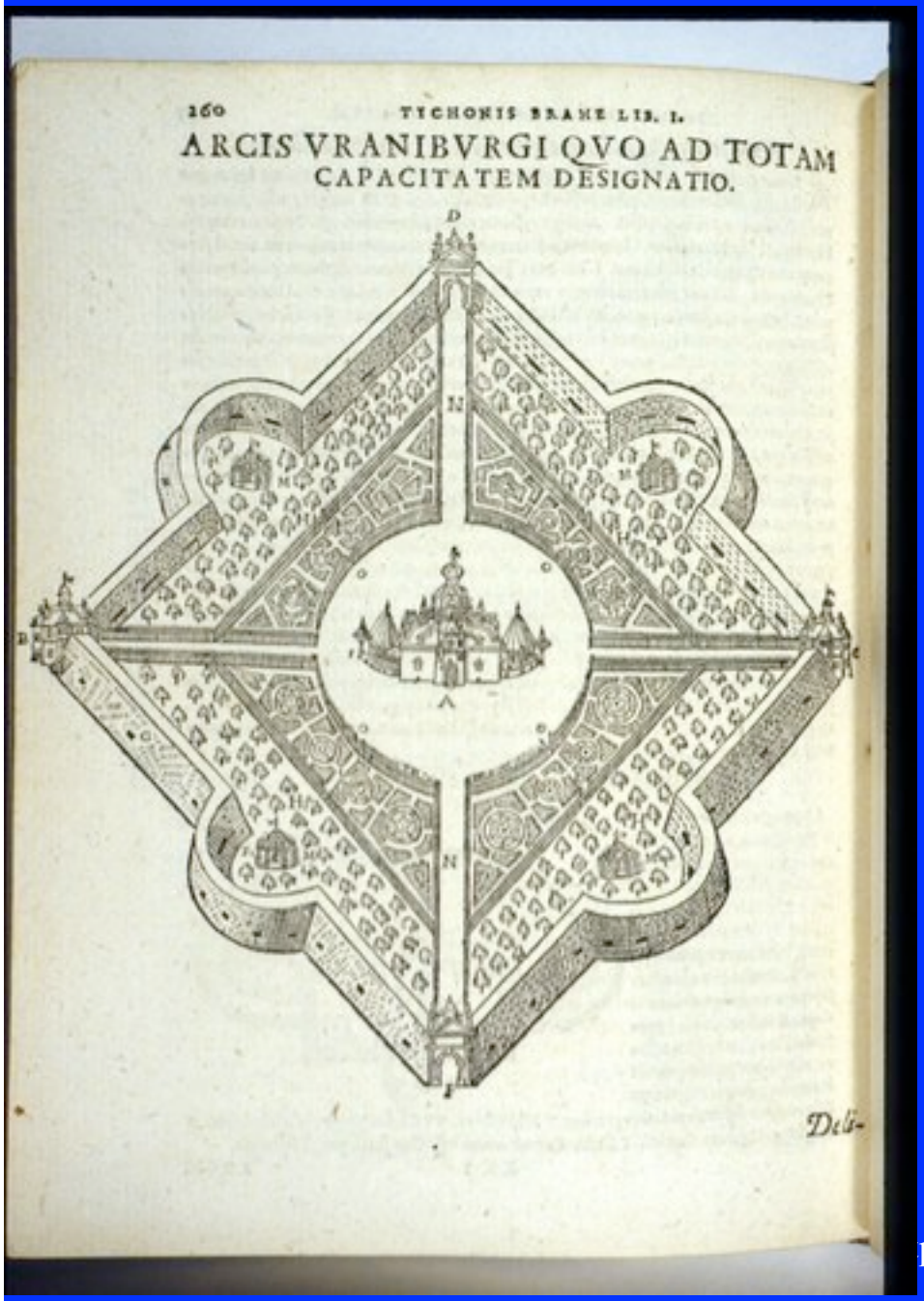
Tycho Brahé

Uraniborg: le : "château céleste"

- Tycho obtient les moyens de faire construire un château et un observatoire dans l'île de Hveen au Danemark, dédiés à l'astronomie.
- Il le baptise Uraniborg,
- Ce "château céleste" était une véritable communauté consacrée à l'observation du ciel, dont l'organisation reflétait l'étonnante personnalité de son maître. On y trouvait en effet, outre les observatoires, les ateliers destinés à fabriquer les instruments, la bibliothèque, un laboratoire, un moulin à papier, une presse ; mais également jardins, potagers, viviers, arboretum, système de pompage, moulin à farine, etc.
- A Uraniborg, Tycho se consacre à l'observation du ciel. Il affine nos connaissances sur la lune, fait état de la réfraction de la lumière, met au point une table de correction pour identifier les étoiles. Il en répertorie 777, et note avec une précision jamais égalée les positions des planètes.

- Il conçoit ce bâtiment dédié à l'astronomie en fonction des "justes proportions" mises à l'honneur par les théoriciens du Quattrocento, et appliquées à l'architecture européenne, notamment par Palladio.
- (**# I-39 J. Blaueu : Atlas major**)


OCCIDENS
Totius Ambit⁹ et capacita
tis deli neatio.
ORIENS


160 TYCHONIS BRAHE LIB. I.
ARCIS VRANIBVRGI QVO AD TOTAM CAPACITATEM DESIGNATIO.
D
N
A
N
Deli-

B
A
C
D
E

p://mar

QVADRANS MVRALIS
SIVE TICHONICVS.
EXPLI-

Tycho Brahé (Cellarius)

Tycho Brahé

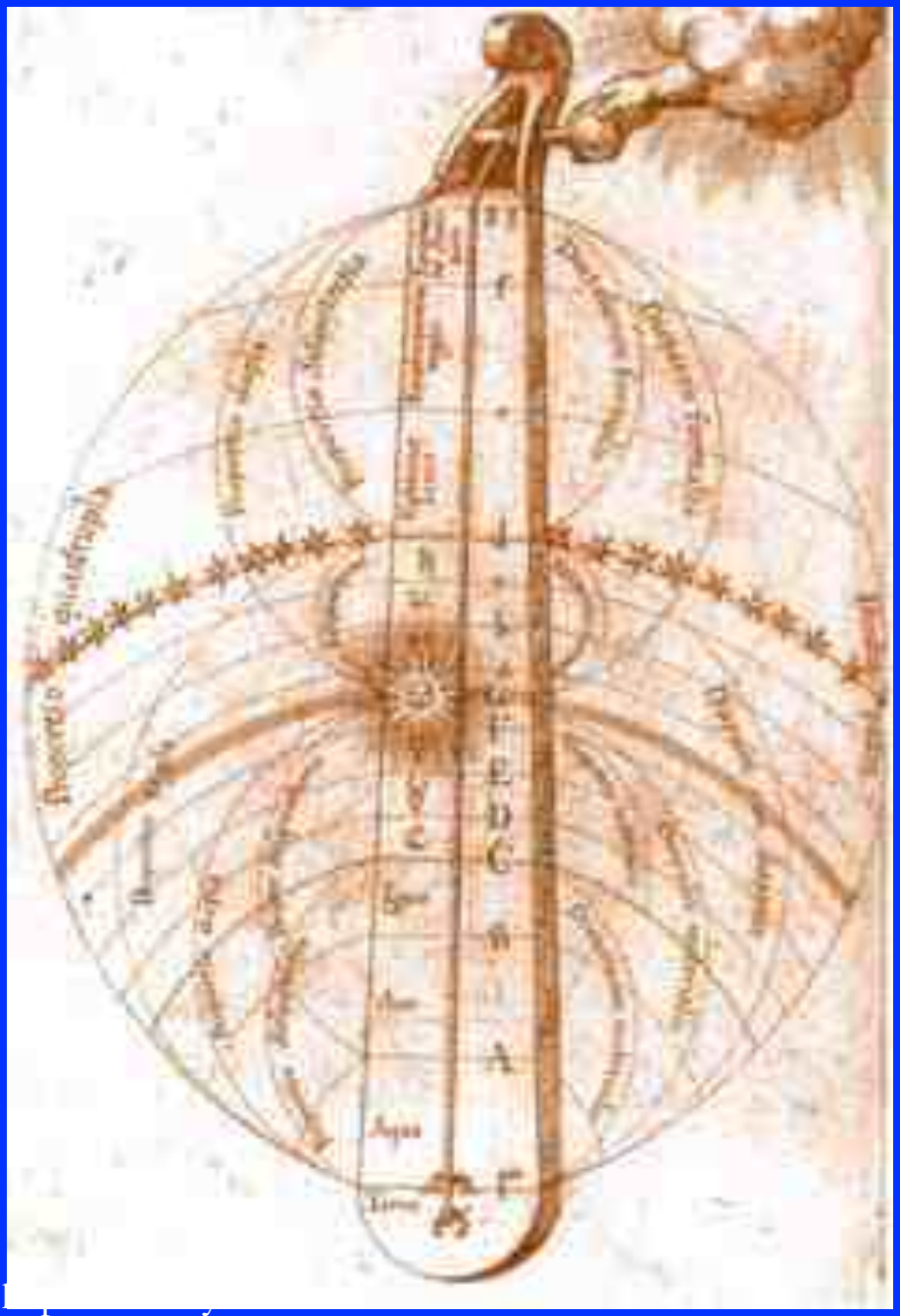
- In Cellarius

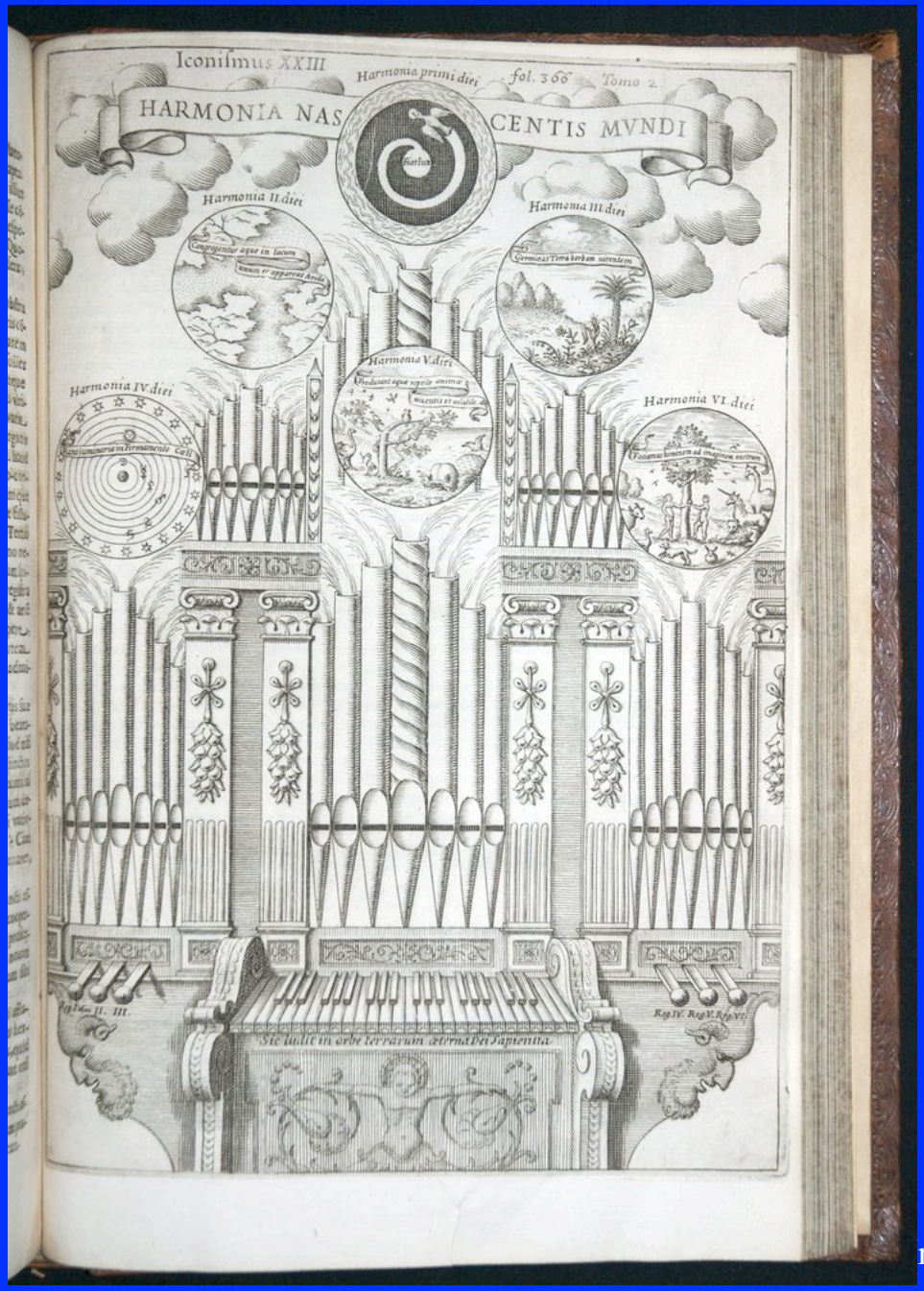
Lachièze-Rey, http://ma

- Robert Fludd

(*Utriusque Cosmi*, 1617)

Lyre cosmique





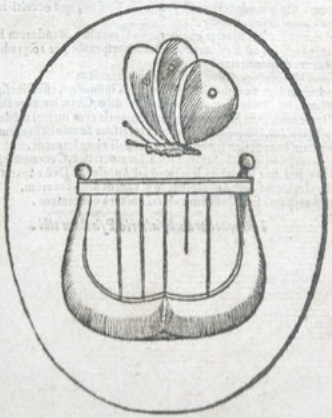
ATHANASII KIRCHERI
FVLDENSIS E SOC. IESV PRESBYTERI

MVSVRGIA VNIVERSALIS SIVE ARS MAGNA CONSONI ET DISSONI

IN X. LIBROS DIGESTA.

Quâ Vniuersa Sonorum doctrina, & Philosophia, Musicæque tam Theoricæ, quam practicæ scientia, summa varietate traditur; admirandæ Consoni, & Dissoni in mundo, adeòque Vniuersâ Naturâ vires effectusque, vti noua, ita peregrina variorum speciminum exhibitione ad singulares vsus, tum in omni pœnè facultate, tum potissimùm in Philologiâ, Mathematicâ, Physicâ, Mechanicâ, Medicinâ, Politicâ, Metaphysicâ, Theologiâ, aperiuntur & demonstrantur.

Tomus I.



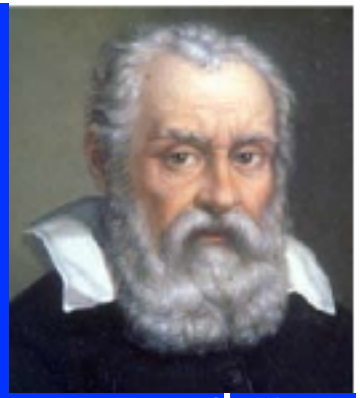
Pulsare certant plectra
Cicada, fractam
Victori repens
voce suppleuit fidem.

ROMAE, Ex Typographia Hæredum Francisci Corbelletti. Anno Iubilæi. MDCL.

SVPERIORVM PERMISSV.

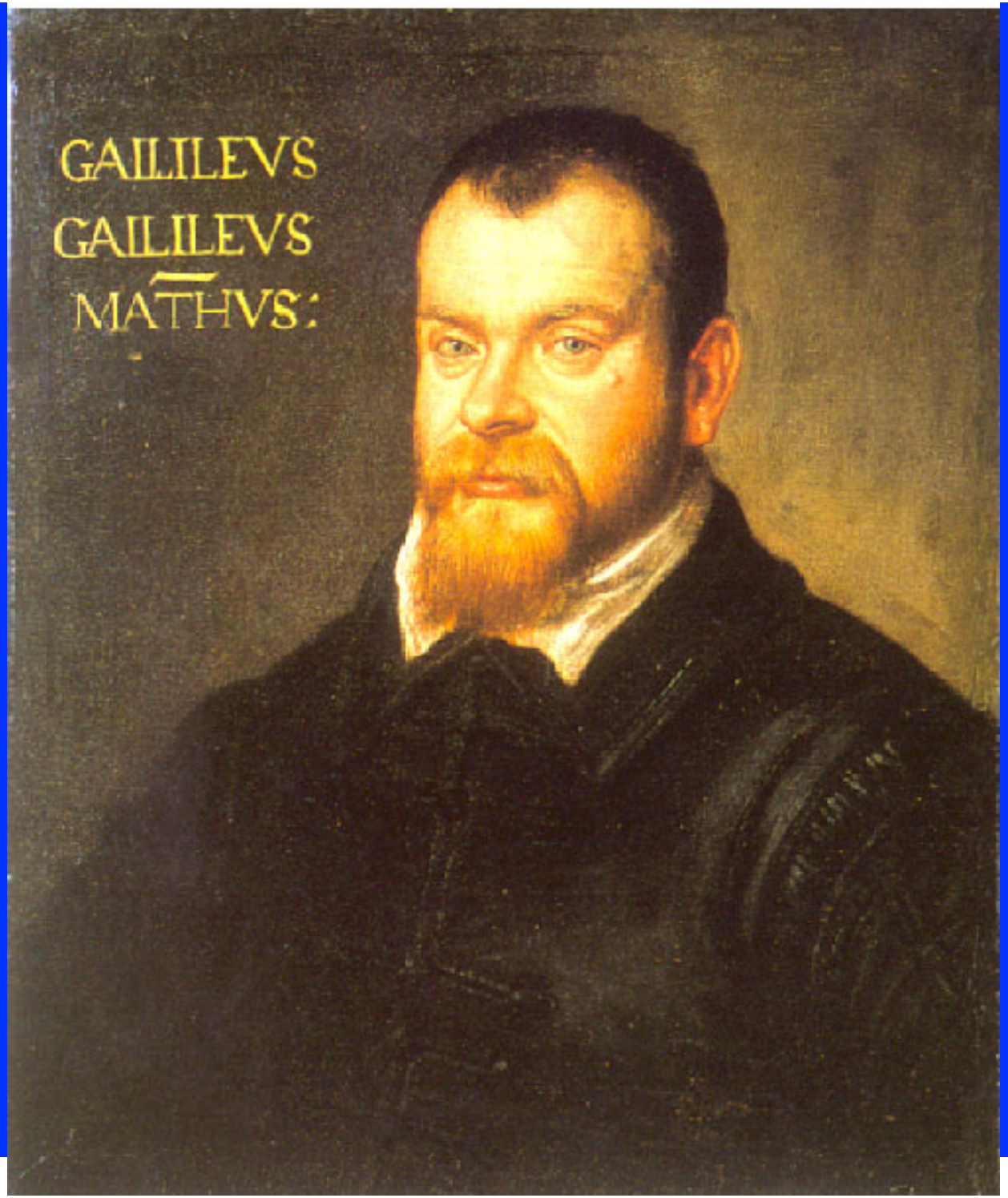
יהוה
ITER EXSTATICUM
KIRCHERIANUM,
Prælusionibus & Scholijs
illustratum, schematibusq; exornatum
à
P. GASP. SCHOTTO.
Societatis JESU.
16 60.
F. Sc.

Galilée (1564-1642)

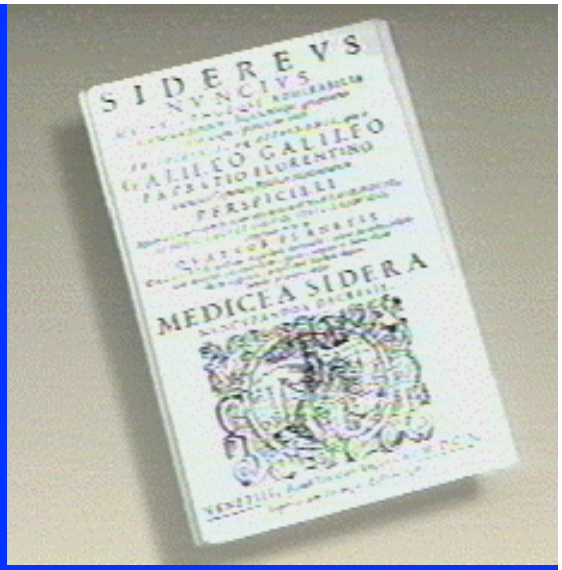


«La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend pas à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vraiment en un labyrinthe obscur»

(*Il Saggiatore* , 1623).


GAILILEVS
GAILILEVS
MATHVS:

Galilée



- la Lune, constellée de cratères, est imparfaite

comme la Terre ; son relief la rend « terreuse ».

Le Soleil est couvert de taches. Les étoiles sont innombrables, en particulier dans la Voie lactée. Jupiter tourne autour du Soleil en entraînant ses satellites. Vénus a des phases.

- Finalement, tenant compte de l'étoile nouvelle de 1572, qui renverse le dogme de l'immuabilité des étoiles fixes, Galilée montre l'identité de nature entre les deux mondes sublunaire et supralunaire, qu'Aristote considérait comme foncièrement distincts.

- Il établit l'universalité du monde et des lois qui le gouvernent, et fonde ainsi la physique.

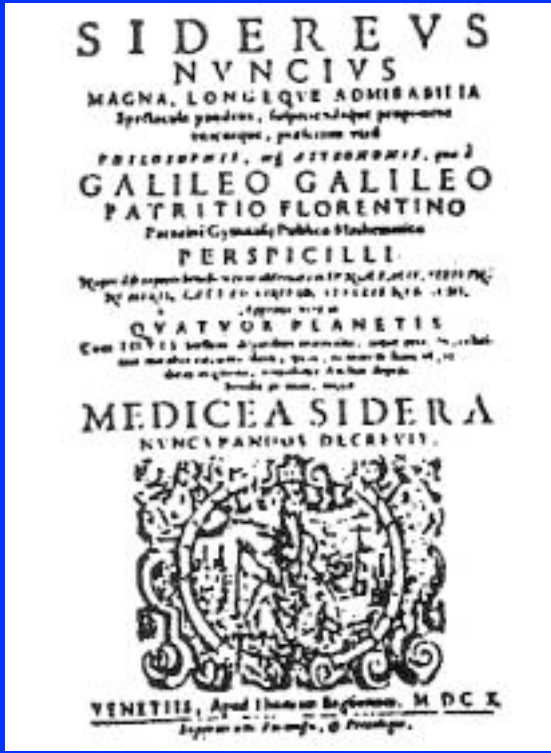
La lunette de Galilée

Galilée utilise une lunette primitive (plus tard améliorée par Huygens).

- aberration chromatique (découverte plus tard par Newton) → télescope à miroir.

- la Lune, constellée de cratères, est imparfaite comme la Terre ; son relief la rend « terreuse ». Le Soleil est couvert de taches. Les étoiles sont innombrables, en particulier dans la Voie lactée. Jupiter tourne autour du Soleil en entraînant ses satellites. Vénus a des phases.

Messager céleste (1610)


SIDEREVS
NVNCIVS
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
GALILEO GALILEO
PATRITIO FLORENTINO
PERSPICILLI
QVATVOR PLANETIS
MEDICEA SIDERA
VENETIIS,

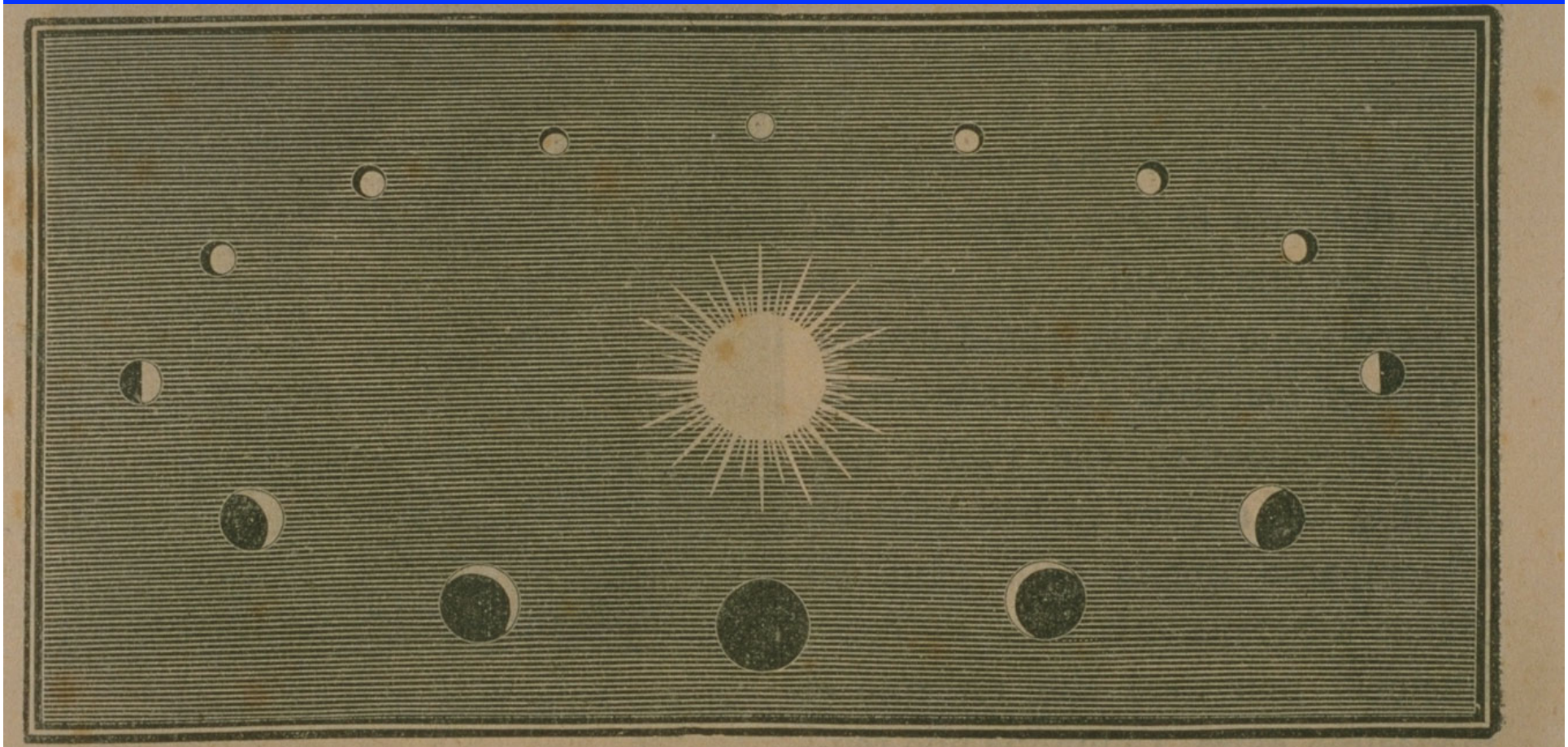
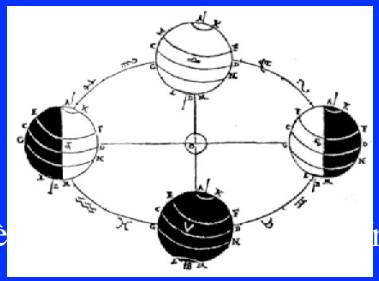
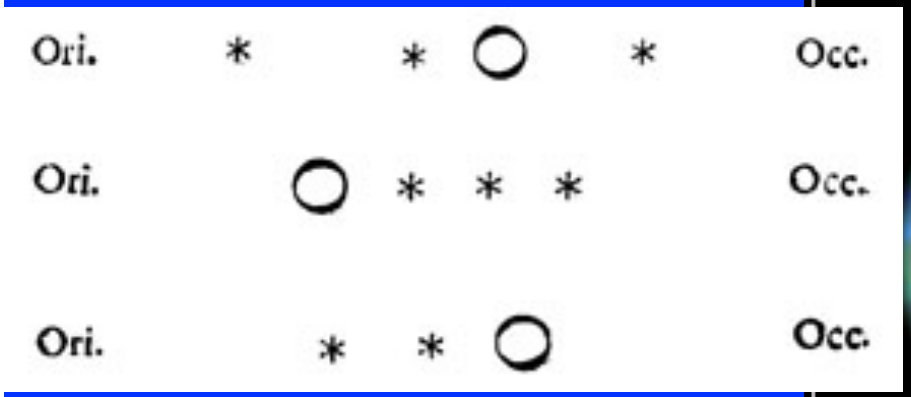
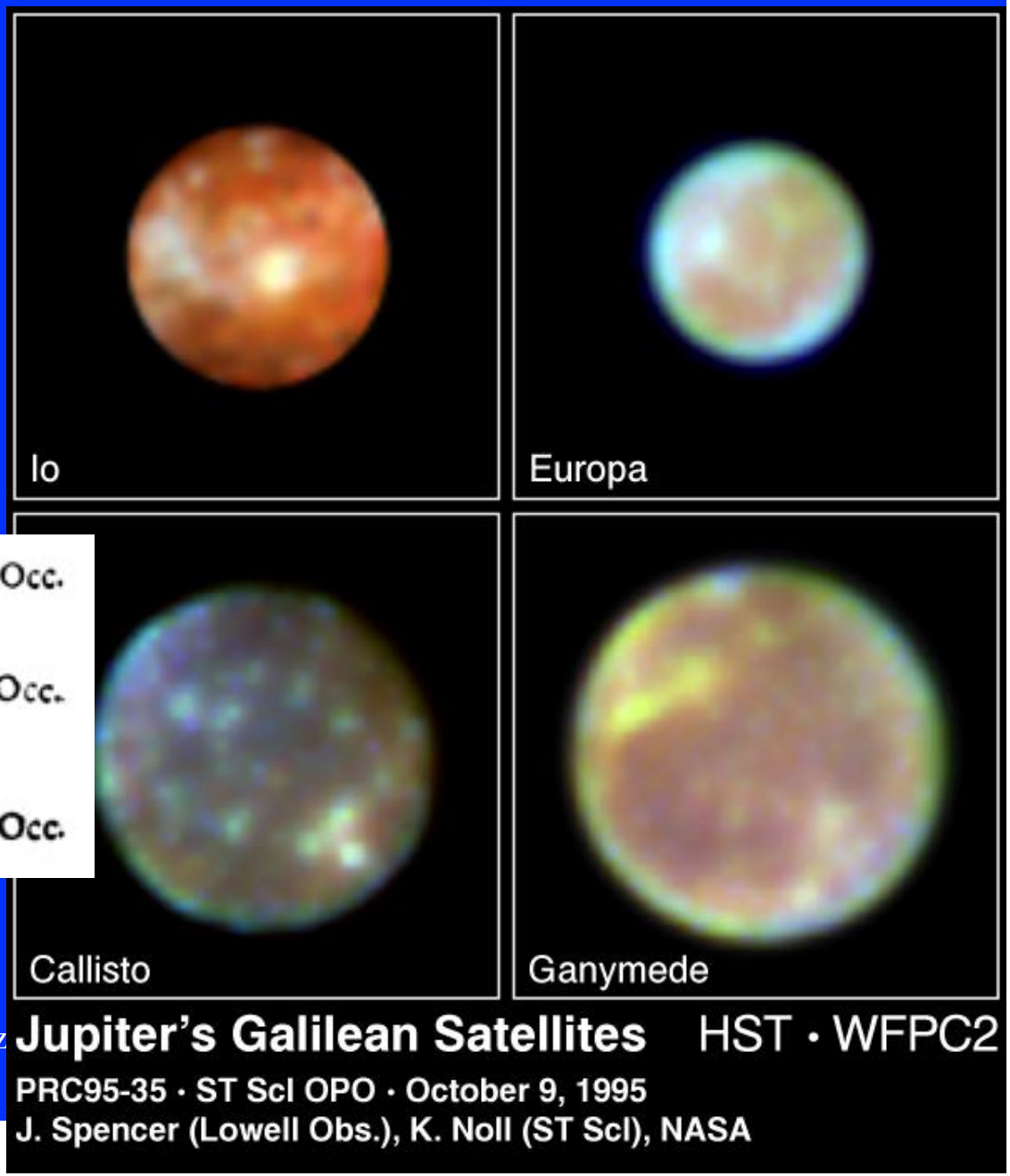


Fig. 205. — Ordine delle fasi di Venere.



« Le 7 janvier de cette année 1610, à la première heure de la nuit, alors que je regardais les astres à la lunette, Jupiter se présenta à moi ; et comme j'avais mis au point un instrument vraiment excellent, j'aperçus près de la planète trois astres … »

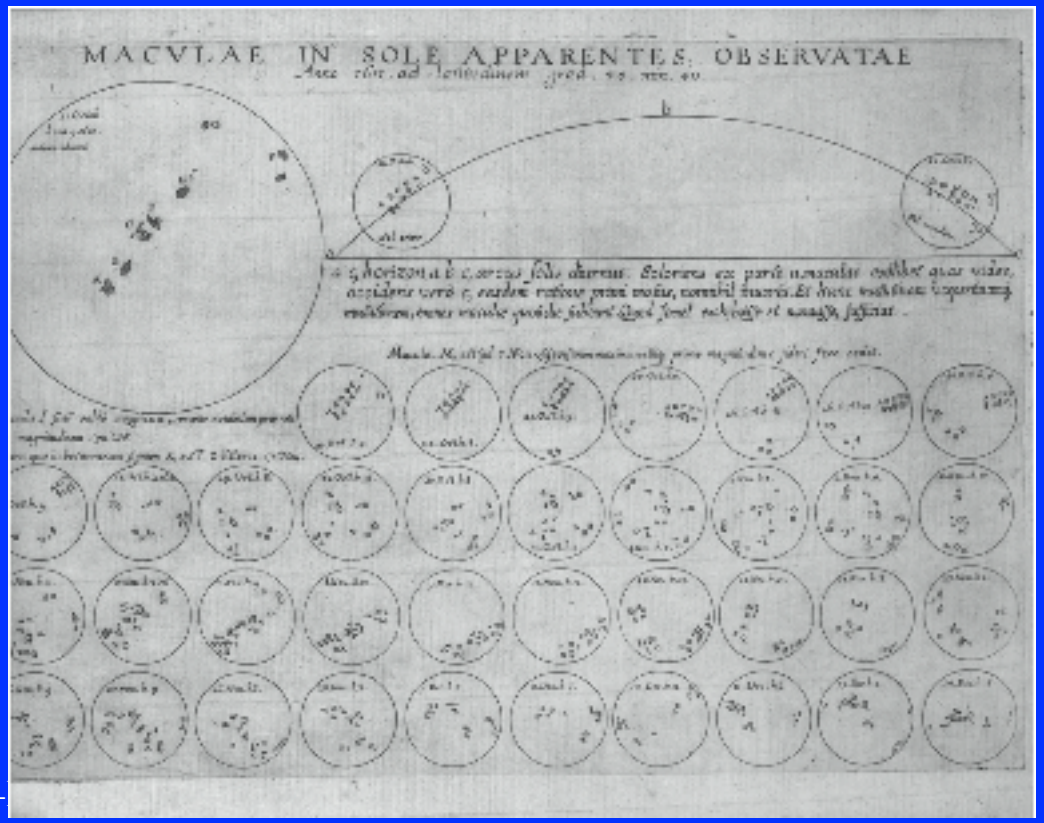




Lachièz

Taches solaires

Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari...
Rome: 1613.
he dismantled the received wisdom about these perfect heavenly bodies by demonstrating that sunspots generated and dissolved on the surface of solar bodies.



Lachièze-

En 1615, malgré les réticences de certains cardinaux, le Saint-Office condamne l'œuvre de Copernic et met en garde Galilée, qui reprend le chemin de Florence.
Mais, encouragé par le cardinal Barberini, qui devient pape en 1623 sous le nom d'Urbain VIII, il publie un ouvrage polémique, *L'Essayeur* (1623).

En 1632, son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* s'en prend avec virulence à la conception aristotélicienne du monde et aux développements géométriques de Ptolémée. Il affirme la validité du système copernicien : la Terre, une planète comme les autres, tourne autour du Soleil.

Dans cet ouvrage, Galilée n'énonce plus d'hypothèses. Il affirme une réalité. Pour cette raison, le tribunal de l'Inquisition le condamne le 22 juin 1633 ; il est alors placé en résidence surveillée.

Malgré sa rétractation, ses idées se répandent avec son dernier ouvrage, *Discours et démonstrations mathématiques*, paru en Hollande en 1638, quatre ans avant sa mort. La rigueur qu'il apporte à l'étude de la chute des corps ouvre des perspectives scientifiques inédites.

- Dialogue sur les deux grands systèmes du monde (1632)

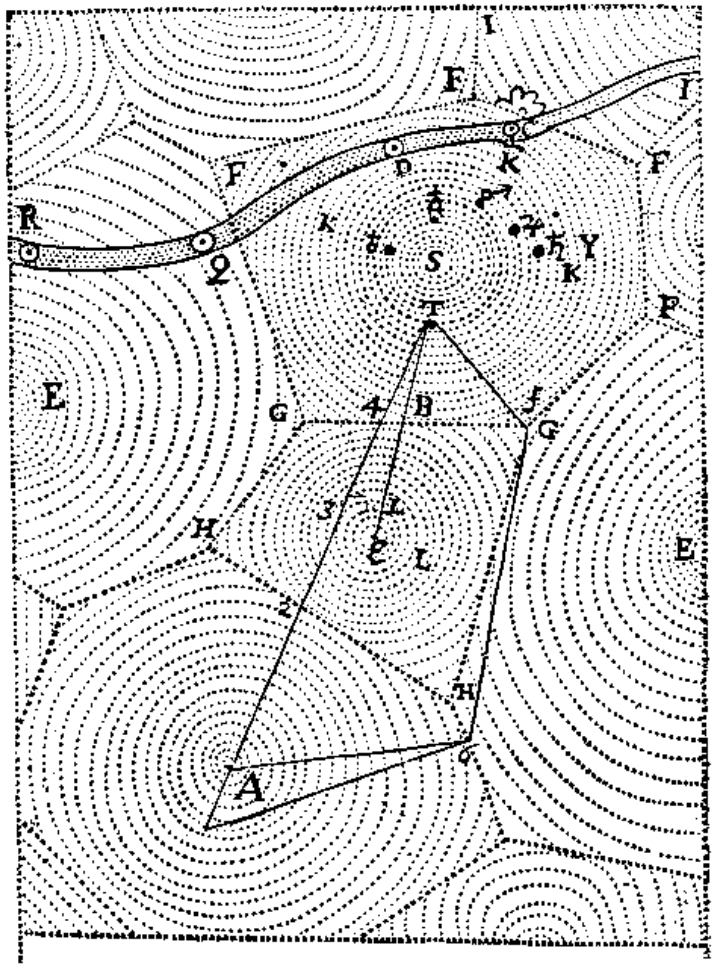
Il est encore non décidé (et je crois que cela le restera toujours pour la science humaine) si l'Univers est fini ou infini.

René Descartes (1596-1650)

Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences
(appendice : La géométrie)
application de l'algèbre à la géométrie
•

RENE DESCARTES 1596 -1650

Les tourbillons de Descartes

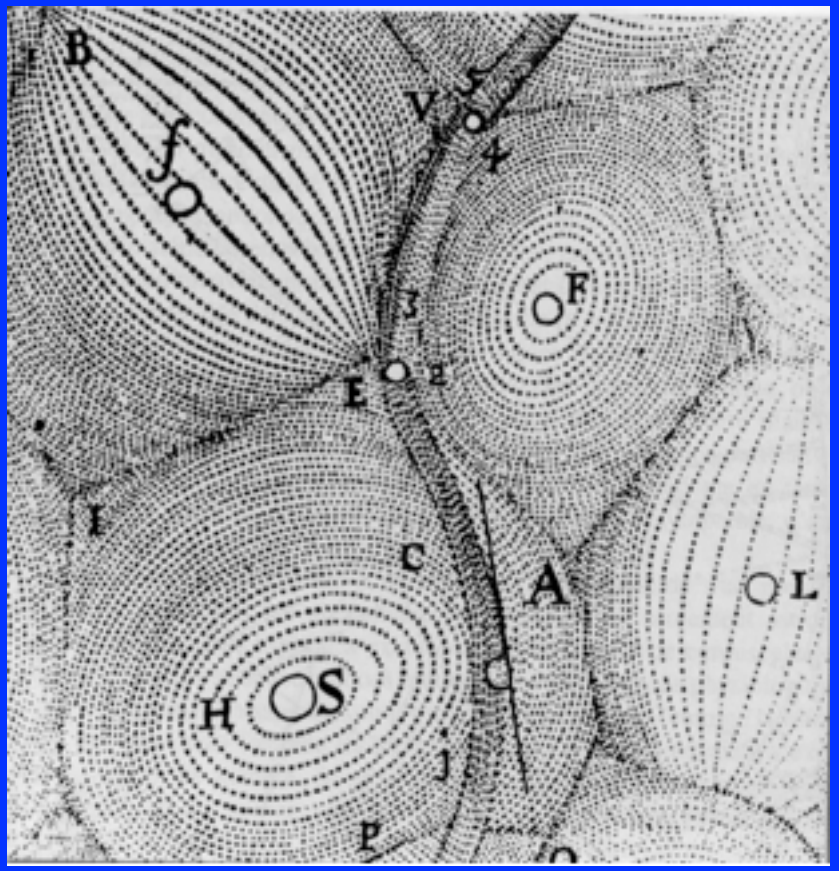


Lachièze-Rey, http://mar

Principia philosophiae (Descartes, Amsterdam, 1644)

conception du monde : au centre, le Système Solaire est dominé par le Soleil, entouré du tourbillon associé. Autour, le monde est rempli d'autres étoiles, occupant chacune le centre d'un tourbillon.

Descartes mentionne une « matière subtile », partout répandue, réceptacle de ses tourbillons et rendant compte ainsi de toute interaction.



éther

- Huygens applique l'idée à la lumière, considérée comme ébranlement d'un « éther luminifère » omniprésent.

- Pour Newton,
- la lumière est corpusculaire : aucun besoin d'un support ondulatoire. Il invoque en revanche

un « éther gravitationnel » capable de transmettre la gravitation universelle,

occupant l'espace absolu.

(Le XIXe siècle verra renaître la conception ondulatoire de la lumière, transmise par un éther vibratoire. Chez Maxwell, l'éther supporte la propagation des ondes électromagnétiques.)

Römer 1666

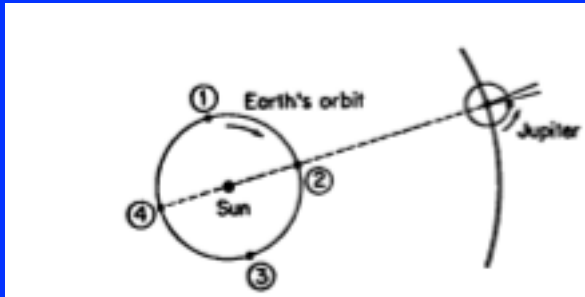


Fig. 2. Roemer's method of measuring the speed of light.

Isaac Newton 1643 - 1727

« Si j'ai pu voir loin, c'est parce que des géants m'ont porté sur leurs épaules. »

« J'ignore ce que le monde pensera de mes œuvres, mais il me semble que j'ai été comme un petit garçon jouant au bord de la mer, trouvant ici un galet mieux poli, là une coquille plus agréablement nacrée, tandis que l'océan infini de vérité m'offrait son immensité inexplorée. »

OPTICKS:

OR, A

TREATISE

OF THE

REFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS and COLOURS

OF

LIGHT.

ALSO

Two TREATISES

OF THE

SPECIES and MAGNITUDE

OF

Curvilinear Figures.

LONDON,
Printed for SAM. SMITH, and BENJ. WALFORD,
Printers to the Royal Society, at the *Prince's Arms* in
St. *Paul's* Church-yard. MDCCIV.

Dropheda

THE

MATHEMATICAL PRINCIPLES OF Natural Philoſophy.

By Sir *ISAAC NEWTON.*

Tranſlated into *Engliſh* by ANDREW MOTTE.

To which are added,

The Laws of the MOON's Motion, according to Gravity.

By JOHN MACHIN *Aſtron. Prof. Greſh.* and *Secr. R. Soc.*

IN TWO VOLUMES.

LONDON:
Printed for BENJAMIN MOTTE, at the *Middle-Temple-Gate*, in *Fleetſtreet.*
MDCCXXIX.

tp://marc

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore *J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheſeos Profeſſore *Lucaſiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater*. Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

La révolution newtonienne

[après Galilée, Descartes, Huygens, Leibniz]

cadre géométrique de la physique : espace et temps géométrisés…
L'espace physique est assimilé à l'espace mathématique euclidien
Il devient isotrope.

Mouvements:
Nouvelle cinamatique
Nouvelle dynamique
gravitation exclue de l'espace.

Le monde = distribution de matière (régie par des forces) dans ce cadre géométrique

Problème cosmologique : extension du monde matériel dans ce cadre géométrique infini ?

Notre galaxie ? Univers-iles ?

La verticale

La spécificité de la verticale est
- **locale** (sur Terre uniquement, et donc conjoncturelle)
- et **non géométrique** :
  due à une influence physique, extérieure,

-> Unification de la dynamique

La cinématique newtonienne

Une cinématique exprime les liens entre dimensions spatiales et temporelles : par exemple,

espace + temps et non pas espace-temps.

Celle de Newton se fonde sur

le principe d'inertie

la loi d'addition des vitesses.

Le mouvement décrit par des vitesses (= objets géométriques)

Dynamique newtonienne

Newton identifie la gravitation à une force physique :
il l'exclut de l'espace.
Cela permet *l'isotropisation* de l'espace :
Les trois dimensions spatiales deviennent équivalentes.

n.b. **Principe d'inertie et isotropie** :

Le principe d'inertie exprime l'isotropie de l'espace :

il n'existe aucune direction privilégiée selon laquelle
un corps pourrait se mettre en mouvement.

Le principe d'inertie, et la cinématique qui en découle, sont
donc de nature géométrique.

> Déjà une géométrie de l'espace-temps ; mais ici,
> Espace-temps = espace + temps séparés

Lumière et matière :

La cinématique de Newton est fondée sur la relativité (galiléenne) du mouvement

Au XIXè, les physiciens s'aperçoivent que la loi d'addition des vitesses ne s'applique pas à la lumière (*c* constant) → crise

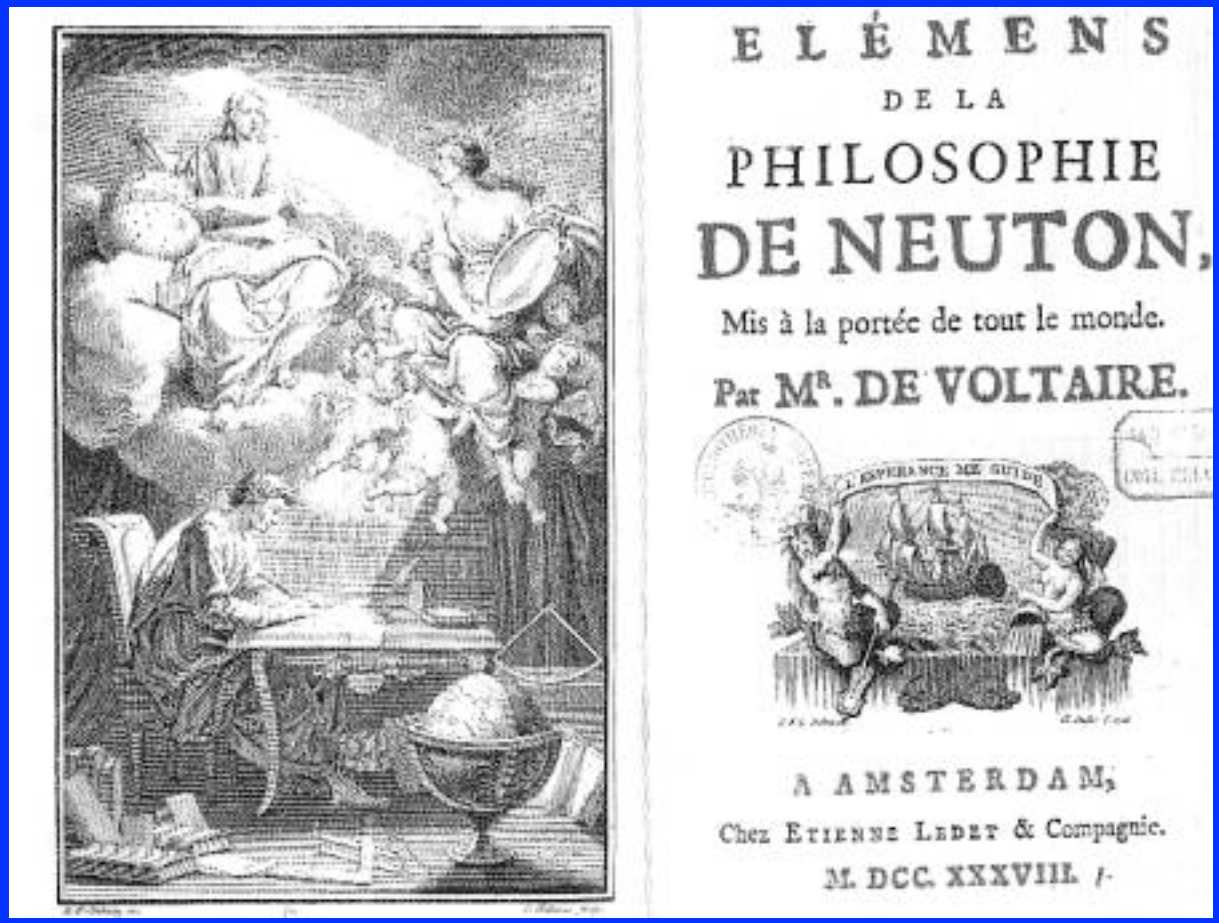
Doit-on considérer deux cinématiques différentes ?
Deux conceptions différentes de l'espace, du temps et de leurs rapports ?

La crise sera résolue par l'introduction de **la relativité restreinte.**

L'Univers newtonien

Le système du monde newtonien se distingue radicalement des précédents.
Le monde n'est plus clos ni centré sur la Terre.
Newton introduit un espace d'extension infinie, dont tous les points sont équivalents.
Ni la Terre, ni le Soleil, ni aucune planète n'y occupent une position privilégiée.
Surtout, ce monde est soumis à une dynamique particulière, régie par la loi de gravitation universelle selon laquelle tous les corps s'attirent mutuellement. C'est ainsi que Newton peut rendre compte des mouvements planétaires, et non pas par des mouvements circulaires composés de manière plus ou moins complexe.
Ce n'est plus le cercle qui joue un rôle privilégié dans cette conception du monde. À vrai, dire, il n'y a plus de figure privilégiée.

Les astres – ici les planètes – séjournent dans l'espace infini, dont la structure rigide et dépourvue de toute courbure est tissée par les trajets rectilignes de la lumière.



ELÉMENS
DE LA
PHILOSOPHIE
DE NEUTON,
Mis à la portée de tout le monde.
Par Mr. DE VOLTAIRE.

A AMSTERDAM,
Chez Etienne Ledet & Compagnie.
M. DCC. XXXVIII.

« La comète rétrograde, qui parut en 1607, décrit un orbe qui s'accorde assez juste, selon les calculs de Halley, avec celui de la comète qui parut en 1682. En supposant que ces deux comètes n'aient été qu'une seule et même, on trouvera que le temps de sa révolution est de 75 ans, que le grand axe de son orbe est au grand axe de la Terre comme la racine cubique du carré de 75 ou comme 1778 à 100 environ… Tout cela se trouvera prouvé si cette comète revient dans ce même orbe au bout de 75 ans » Newton, *Principia*.

En novembre 1758, ils annoncent le retour au périhélie de la comète de Halley pour avril 1759, soit avec un an et huit mois de retard sur son précédent passage. Le jour de Noël 1758, la comète est signalée par un paysan allemand. Elle passe au périhélie le 12 mars. C'est un triomphe extraordinaire, qui vainc les dernières résistances envers la théorie newtonienne et lui assure un immense succès.

Les théories et les conclusions de Newton sont d'abord difficilement acceptées, surtout sur le continent où la théorie de Descartes garde la faveur.

• Maupertuis

est le premier à soutenir le savant anglais ; dans son mémoire présenté en 1732 à l'Académie, *Sur les lois de l'attraction*, il prouve le désaccord entre la thèse des tourbillons et le mouvement des planètes, et souligne que la théorie de Newton est bien plus simple.

• Voltaire travaille à faire admettre les idées newtoniennes, qu'il vulgarise dans les *Lettres anglaises* (1733), les *Éléments de la philosophie de Neuton* (1738) et les *Éléments de physique de Neuton* (1741).

La théorie de Descartes sera finalement vaincue.

« Ainsi ces Tourbillons mal assemblés dans leur origine, quoiqu'ils eussent paru faire fortune par leur nouveauté, souvent refondus ensuite ; attaqués d'abord légèrement, puis vivement pressés et ébranlés par toute la force de la raison, leur redoutable ennemie, furent enfin renversés pour jamais, et tombèrent avec fracas. […] Aux tourbillons succéda l'attraction », (Benoît Stay, philosophe anglais, 1755)

Lumière et matière :

La cinématique de Newton est fondée sur la relativité (galiléenne) du mouvement

Au XIXè, les physiciens s'aperçoivent que la loi d'addition des vitesses ne s'applique pas à la lumière (*c* constant) → crise

Doit-on considérer deux cinématiques différentes ? Deux conceptions différentes de l'espace, du temps et de leurs rapports ?

La crise sera résolue par l'introduction de **la** relativité restreinte**.**

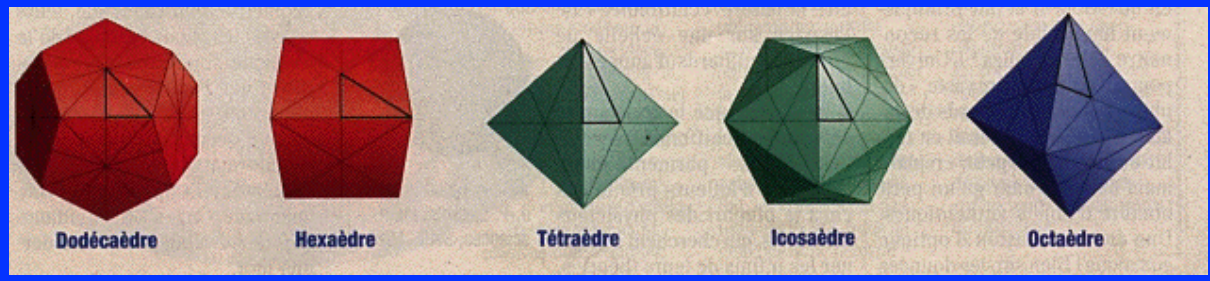
Géométrisation de la physique

Déjà chez Platon et Aristote :

Représentation de la matière par des combinaisons d'éléments

Éléments représentés par les polyèdres.

Chaque polyèdre caractérise certaines symétries.



Le Monde après Newton

cadre géométrique : espace et temps géométrisés…

Espace + temps = cadre géométrique de la physique

Mouvement décrit par des vitesses, des forces = objets géométriques

Le monde = distribution de matière (régie par des forces) dans ce cadre géométrique

Problème cosmologique : quelle est l'extension du monde matériel dans ce cadre géométrique infini ?

Notre galaxie ? Univers-iles ?