

Évolution des idées sur l'Univers

*II - Systèmes du monde et Voie Lactée (suite):
« du monde clos à l'univers infini »*

*III - Les problèmes du système géocentrique et
l'avènement d'une nouvelle conception de l'Univers*

Gilles Theureau

LPC2E/CNRS-Orléans

Et

Observatoire de Paris

Rappel à propos de la Voie Lactée et des nébuleuses : les critiques d'Aristote au moyen âge

Les néoplatoniciens : Ammonius, Jean Philopon (VIe siècle)

**Les penseurs occidentaux (scholastique médiévale) :
Gérard de Crémone, Robert Grosseteste, Roger Bacon, Albert Le Grand**

Les savants arabes :

Al Biruni (~1029)

La Voie Lactée constituée d'une collection d'innombrables fragments de même nature que les étoiles nébuleuses ou les comètes.

Averroes (1126-1198) (EXTRAIT)

Traducteur et commentateur d'Aristote, critique de l'exhalaison

Aboulfarag (1226-1286) = Aboulfaradi, Bar Hebraeus (EXTRAIT)
rejet de la Voie Lactée au-delà de l'orbite de Saturne

XVIème et XVIIème siècles:

Tycho Brahe (1546-1601) (EXTRAITS)

interprétation de l'étoile nouvelle de 1572

relie les comètes à la Voie Lactée

la Voie Lactée entre le système solaire et la sphère des fixes

Thomas Harriot (1609) observe la Voie Lactée avec une lunette

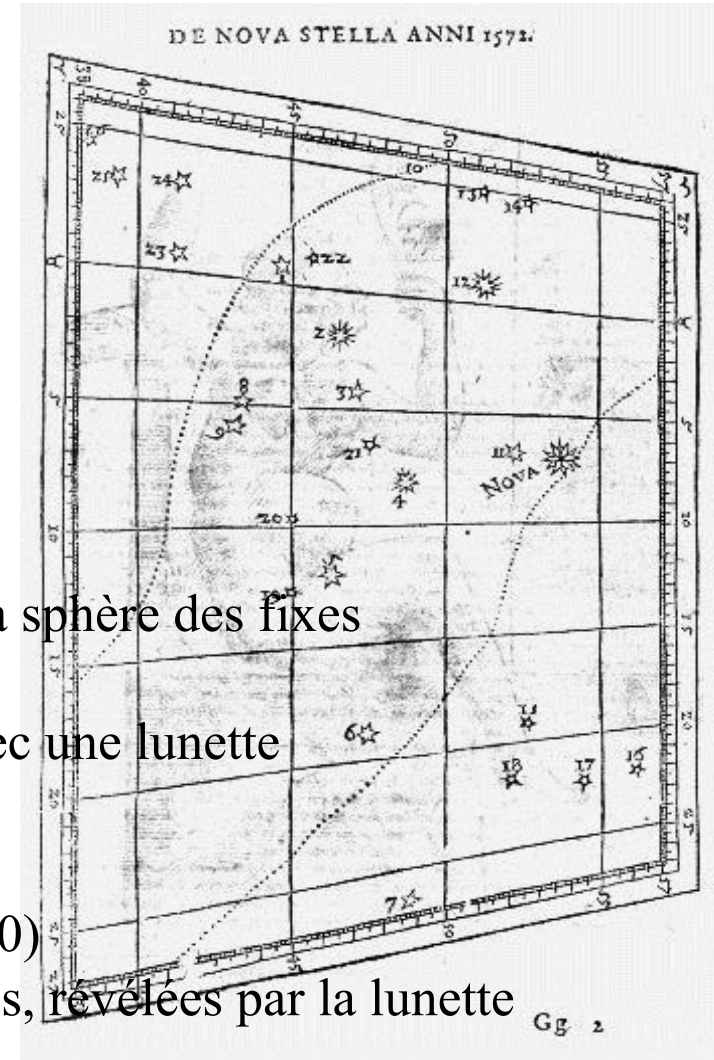
Galilée (1564-1642) (EXTRAITS)

le Messager Céleste (Siderus Nuncius, 1610)

La Voie Lactée comme agglomérat d'étoiles, révélées par la lunette

Kepler (1571-1630)

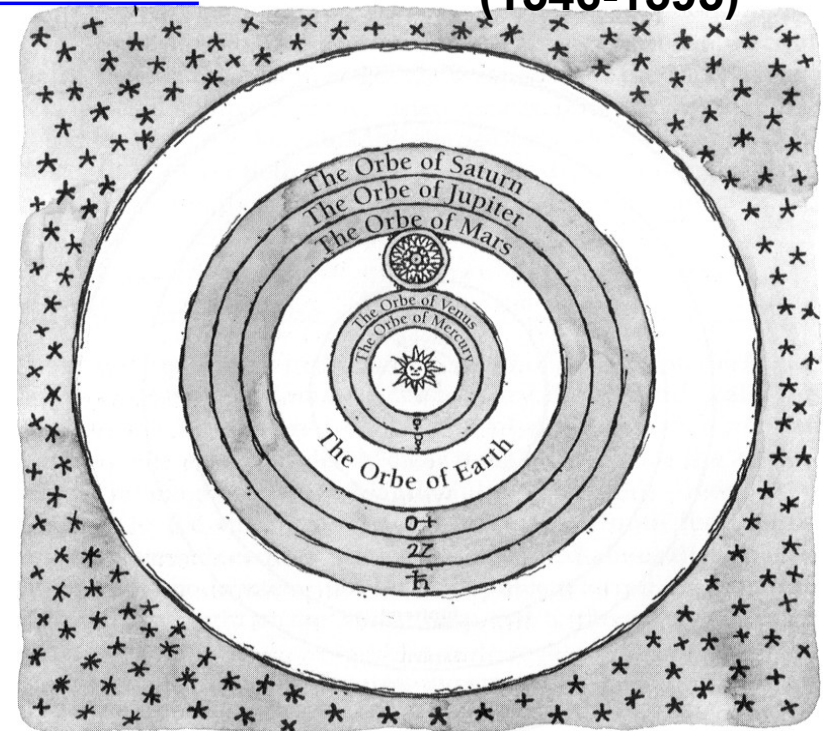
suit d'abord Tycho, mais préfère Galilée car il est réfractaire à l'idée de naissance ou mort d'une étoile



Etat des lieux au début du XVIIème siècle:

Thomas Digges
(1546-1595)

*La voie Lactée est
constituée d'étoiles,
mais ...*



y aurait-il un nombre infini d'étoiles ?

Pourquoi les étoiles sont-elles concentrées dans la Voie Lactée ?

Si les nébuleuses sont des conglomérats d'étoiles,
sont-elles d'autres Voies Lactées?

Avec le développement de la Physique “mathématique” Newtonienne,
jusqu'au milieu du XIXème, ces questions sont repoussées hors de la
science “positive” (Auguste Comte)

Etat des lieux au début du XVIIIème siècle:

Banalisation de l'idée de la pluralité des mondes

La découverte de la Gravitation Universelle (Newton)

Un programme unique :
vérifier les lois de Newton (mécanique céleste)

Un phénomène géopolitique :
le calcul de la longitude et la maîtrise des mers

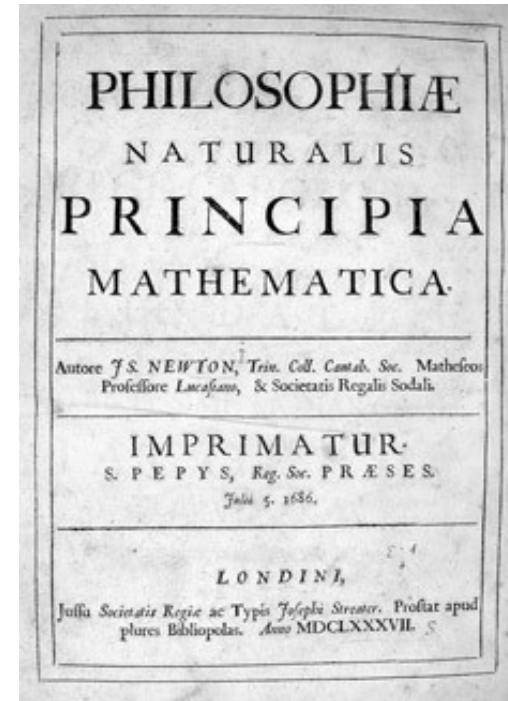


Des instruments astrométriques de plus en plus précis

Des calculs de plus en plus complexes

La fondation des grands Observatoires (Paris, Greenwich, Leyden, Aberdeen, Pékin...)

Les grandes expéditions scientifiques (mesure du méridien, parallaxes de Vénus et Mars...)



Les problèmes du système géocentrique et l'avènement d'une nouvelle conception de l'Univers

1. Mesure de la taille de l'Univers (=système solaire) dans l'antiquité grecque
2. Le modèle géocentrique: physique et astronomie de l'Antiquité à la Renaissance
3. Matière et dynamique selon Aristote et Ptolémée
4. Critiques médiévales
5. Vers un nouveau système du monde

Rappel : l'univers géocentrique de l'antiquité grécque

- **Des pré-socratiques à Aristote** (env 600-350 av JC) :
développement d'une description rationnelle du monde, fondée sur la réflexion et l'observation (pas encore la mesure ou l'expérimentation)
- **Platon et Aristote :**
Terre sphérique flottant librement dans l'espace, au centre du monde
Modèle des sphères homocentriques :
 - représentation des mouvements des étoiles « fixes » par la rotation de la sphère céleste
 - représentation des mouvements des planètes (y compris Lune, Soleil) par rapport au fond des étoiles par des sphères à axes de rotation et périodes de rotation différentes
- Les mesures des distances commencent à l'époque hellénistique (vers 300 av JC; p.ex. Eratosthène, circonférence de la Terre)

L'Univers géocentrique de l'antiquité (Aristote, Ptolémée...)

- **Platon :**
expliquer, à l'aide de *mouvements circulaires*, les phénomènes observés dans les mouvements des planètes !
- **Aristote :**
 - Tout mouvement est circulaire, rectiligne ou composite
 - Priorité aux mvts « purs » et, parmi eux, au mvt circulaire : sans fin, sans point privilégié - seul le mv^t circulaire est éternel

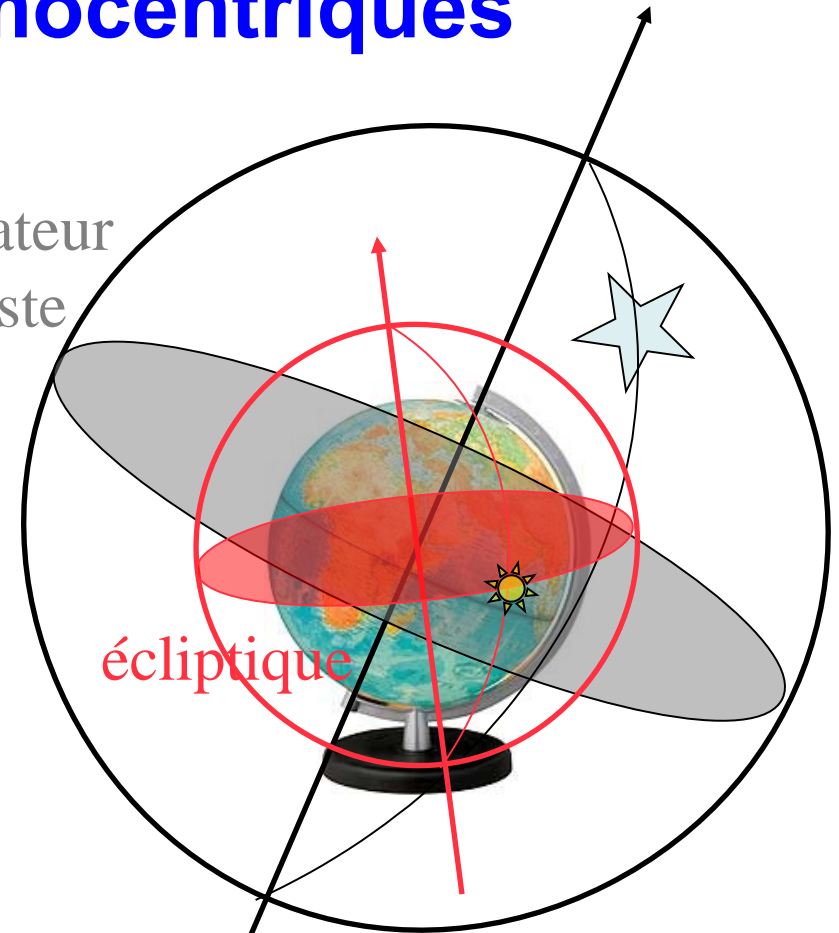


Une représentation très simplifiée du modèle géocentrique.

L'Univers géocentrique de l'antiquité : les sphères homocentriques

- **Un ensemble complexe :**
 - chaque « planète » a besoin de plusieurs sphères ;
 - chaque sphère transmet son mouvement à sa voisine plus interne :
des sphères « compensatrices » pour qu'une sphère donnée représente le mvt de la « planète » sans être affectée par les autres, plus externes.
 - Aristote : 55 sphères pour représenter le m^{vt} de toutes les « planètes ».

équateur
céleste



Eudoxe, Callippe, Aristote ... (4^{ème} siècle av JC) : sphères homocentriques emboîtées les unes dans les autres

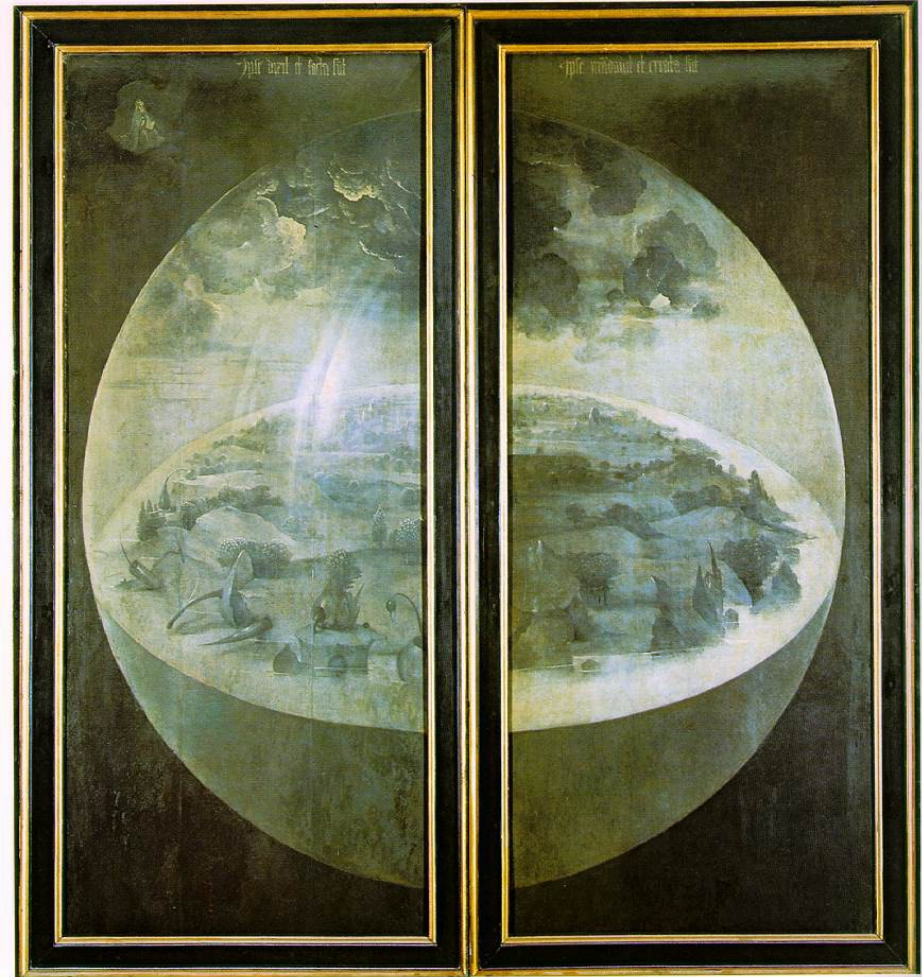
La taille de l'« Univers »

Pour les Grecs :

Univers = système solaire + sphère céleste

La taille de l'Univers chez les pré-socratiques

- Si la Terre est plate et soutient la sphère céleste, la distance Terre-ciel est un demi-diamètre terrestre.
- Terre connue à cette époque: colonnes d'Hercule-Babylone
 γ 5000 km \rightarrow ciel à 2500 km de la Terre
- Anaxagore: le Soleil est plus grand que le Péloponnèse

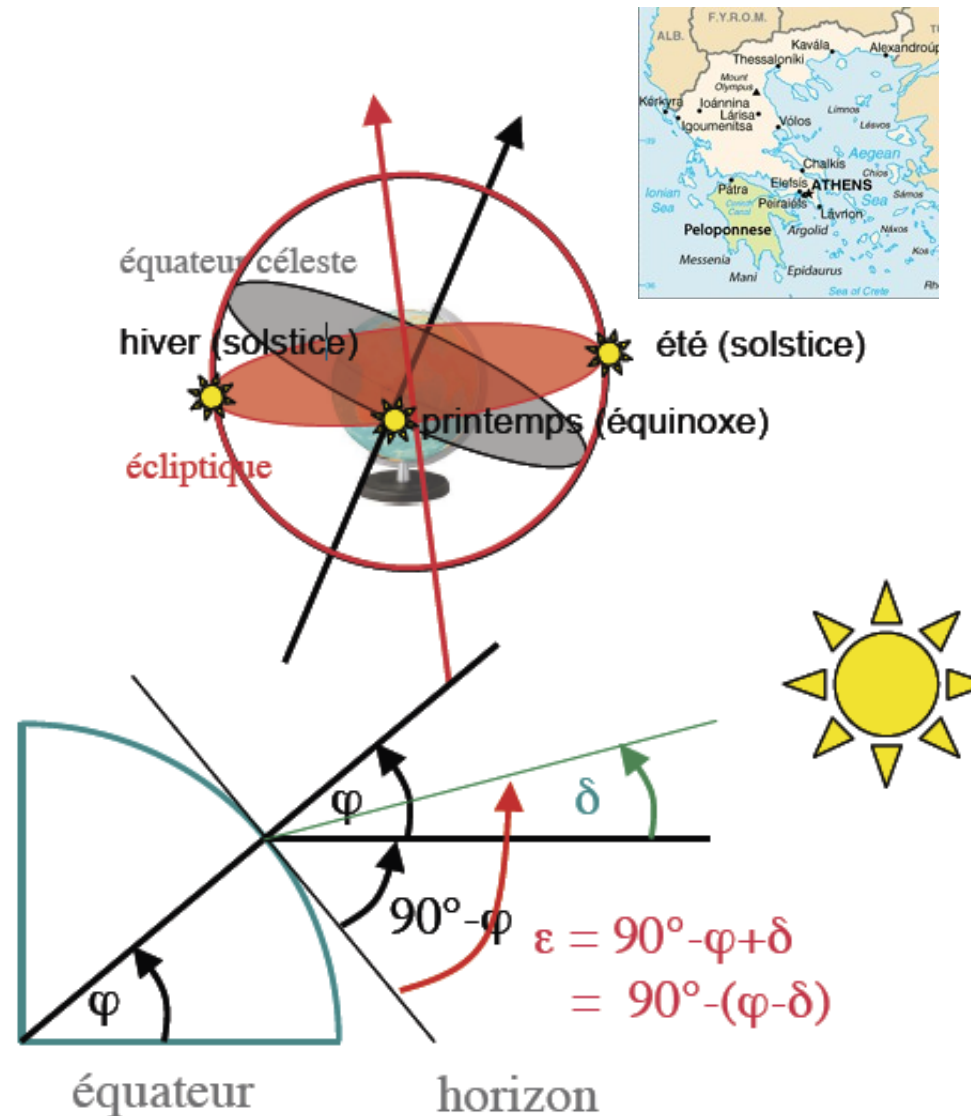


J. Bosch (1500-1510),
Le jardin des délices, Musée du Prado; Madridh

La taille de l'Univers chez les pré-socratiques

« *Le Soleil est plus grand que le Péloponnèse* » (Anaxagore)

- Point de départ: mesure d'ombres d'un gnomon à deux endroits, Delphes (38,5°N 22,5°E), Sparte (37,1°N, 22,5°E), distants de 156 km
- Élévation du Soleil au-dessus de l'horizon à midi, le jour du solstice d'été
 - $\varepsilon_D = 90^\circ - (38,5^\circ - 23,5^\circ) = 75,0^\circ$ (D)
 - $\varepsilon_S = 90^\circ - (37,1^\circ - 23,5^\circ) = 76,4^\circ$ (S)
- A partir de ces mesures:
 $\tan \varepsilon_D = 3,73$; $\tan \varepsilon_S = 4,13$



(1) D'après D.L. Cuprie, *Heaven and Earth in Ancient Greek Cosmology*, Springer 2011)

La taille de l'Univers chez les pré-socratiques

« *Le Soleil est plus grand que le Péloponnèse* » (Anaxagore)

Anaxagore part de l'idée d'une terre plate. Son interprétation des mesures d'élévation du Soleil est

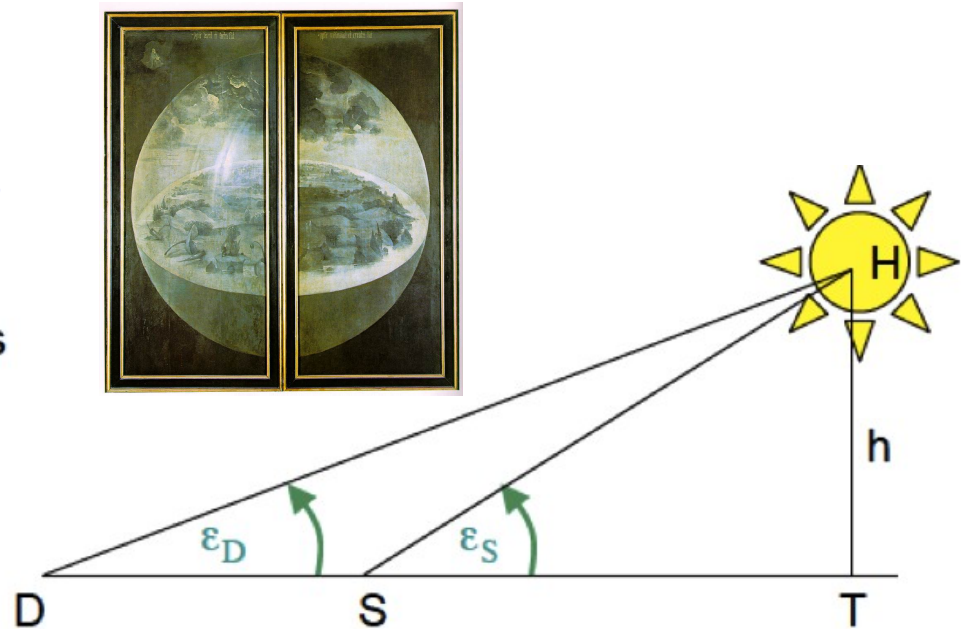
$$\tan \varepsilon_D = \frac{h}{TD}; \quad \tan \varepsilon_S = \frac{h}{TS}$$

- Il sait que $DS = TD - TS = 156 \text{ km}$
- Il peut donc calculer

$$\frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S} = \frac{h}{TD} \times \frac{TS}{h} = \frac{TS}{TD}$$

$$DS = TD - TS = TD \left(1 - \frac{TS}{TD} \right) = \quad \Rightarrow$$

$$= TD \left(1 - \frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S} \right)$$



$$TD = \frac{DS}{1 - \frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S}} = \frac{156 \text{ km}}{0,0968} = 1610 \text{ km}$$

$$h = TD \times \tan \varepsilon_D = 6000 \text{ km}$$

Diamètre du Soleil:

$$d = 2\pi DH \times \frac{0,5^\circ}{360^\circ} = 2\pi \sqrt{TD^2 + h^2} \times \frac{0,5^\circ}{360^\circ} = 54 \text{ km}$$

La taille de l'Univers chez les pré-socratiques

« Le Soleil est plus grand que le Péloponnèse » (Anaxagore)

Anaxagore part de l'idée d'une terre plate. Son interprétation des mesures d'élévation du Soleil est

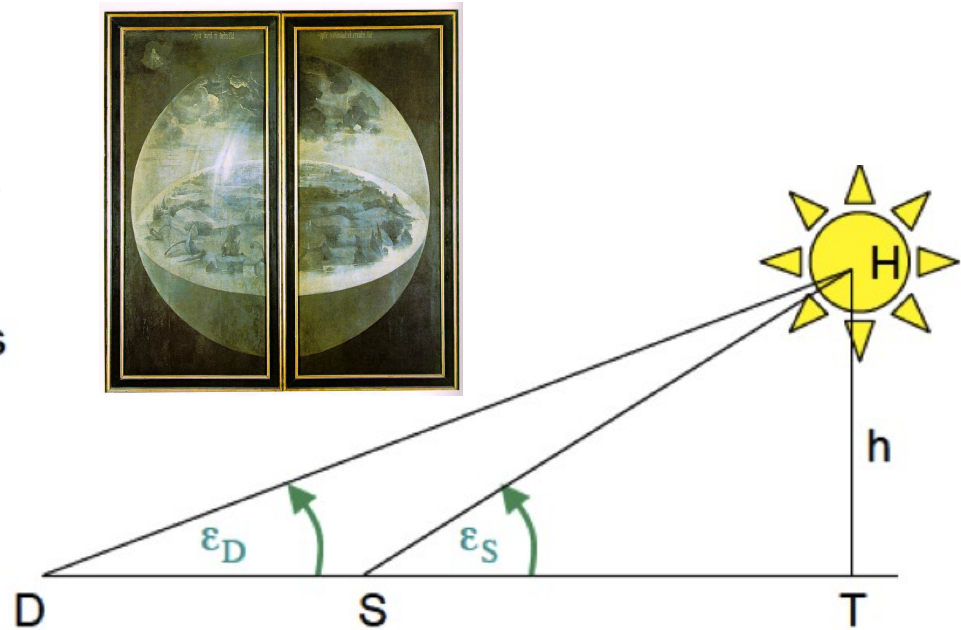
$$\tan \varepsilon_D = \frac{h}{TD}; \quad \tan \varepsilon_S = \frac{h}{TS}$$

- Il sait que $DS = TD - TS = 156 \text{ km}$
- Il peut donc calculer

$$\frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S} = \frac{h}{TD} \times \frac{TS}{h} = \frac{TS}{TD}$$

$$DS = TD - TS = TD \left(1 - \frac{TS}{TD} \right) = \quad \Rightarrow$$

$$= TD \left(1 - \frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S} \right)$$



$$TD = \frac{DS}{1 - \frac{\tan \varepsilon_D}{\tan \varepsilon_S}} = \frac{156 \text{ km}}{0,0968} = 1610 \text{ km}$$

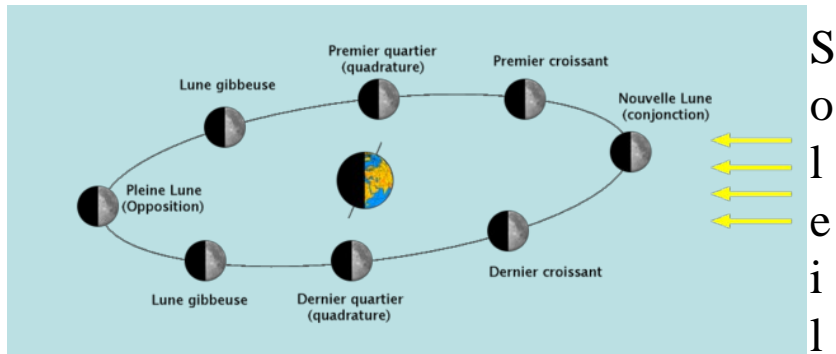
$$h = TD \times \tan \varepsilon_D = 6000 \text{ km}$$

Diamètre du Soleil:

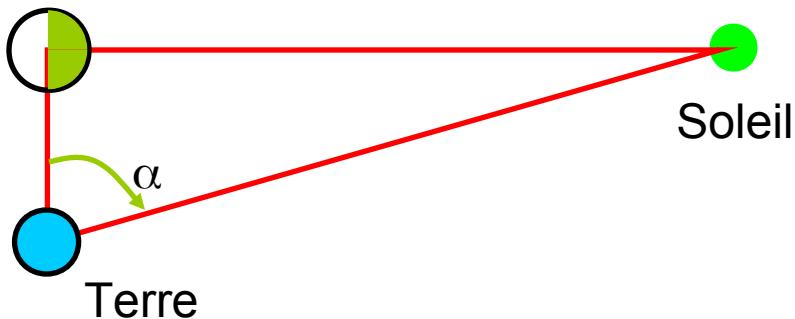
$$d = 2\pi DH \times \frac{0,5^\circ}{360^\circ} = 2\pi \sqrt{TD^2 + h^2} \times \frac{0,5^\circ}{360^\circ} = \cancel{54} \text{ km} \quad \overset{2^\circ}{216 \text{ km}}$$

Les phases de la Lune et la distance

Terre - Soleil (Aristarque de Samos, env. 310-230)



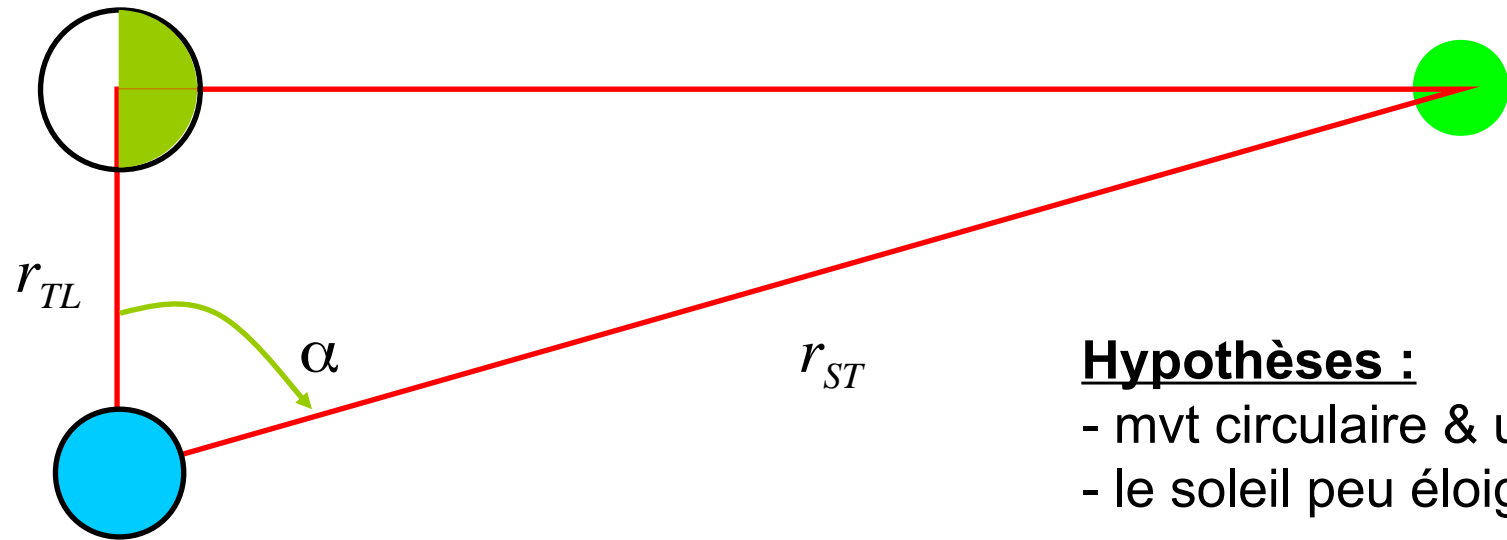
- Idée: mesurer l'angle entre les directions de visée vers le Soleil et vers la Lune au 1^{er} quartier



Phases lunaires

Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
						1
2	3 DQ à 12:46 HN	4	5	6	7	8
9	10 NL à 07:03 HN	11	12	13	14	15
16	17 PQ à 01:57 HN	18	19	20	21	22
23	24	25 PL à 05:32 HN	26	27	28	29
30	31					

Les phases de la Lune et la distance Terre - Soleil (Aristarque de Samos, env. 310-230)



Hypothèses :

- mvt circulaire & uniforme
- le soleil peu éloigné

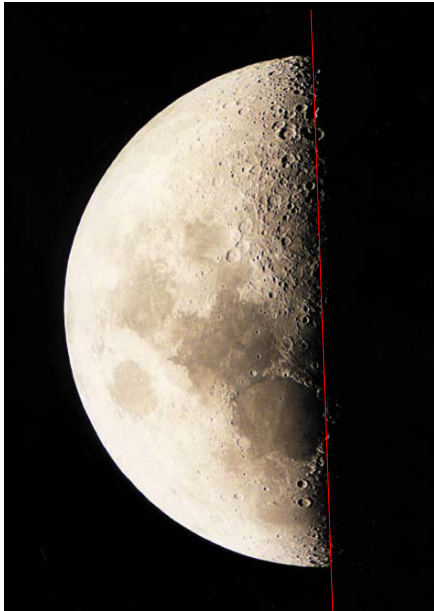
$$\alpha = 87^\circ : r_{ST}/r_{TL} = 1/\cos \alpha \approx 19$$

(mais: trigonométrie inconnue d'Aristarque; valeur actuelle : 390)

- Méthode d'Aristarque: solution approchée sans connaissance de la trigonométrie

Les phases de la Lune et la distance

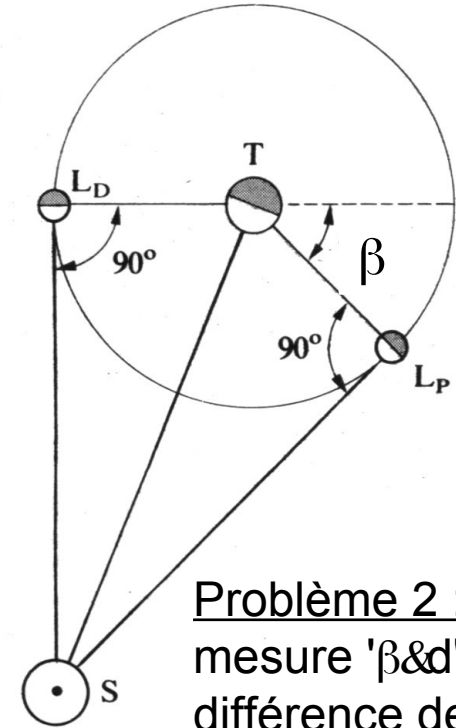
Terre - Soleil (Aristarque de Samos, env. 310-230)



1^{er} quartier



1^{er} quartier + 1 j



Problème 2 :
mesure ' β ' d'une
différence de durée
entre le 1^{er} et le
dernier quartier
(OK si mvt uniforme!)

- Problème 1 : surface irrégulière de la Lune;
comment identifier l'instant précis du 1^{er} quartier ?
- Méthode simple, ingénieuse, mais forcément peu précise ($1/\cos \alpha$!). Résultat
Aristarque : $\alpha = 87^\circ$; distance Terre-Soleil = 18-20 fois distance Terre-Lune
(valeur actuelle: 390).

La distance Terre-Lune (Aristarque de Samos, env. 310-230)

Hypothèse :

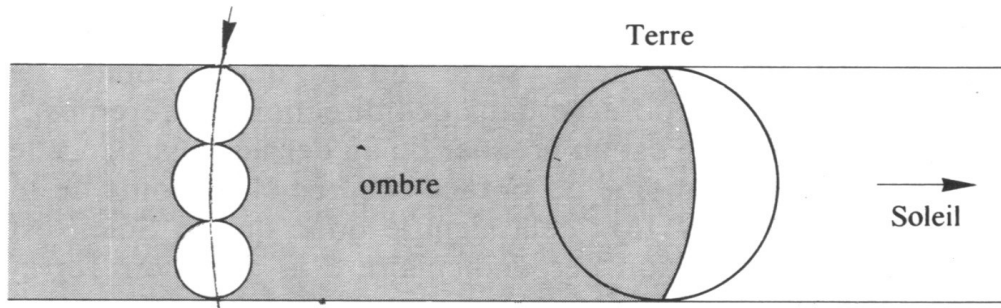
- Le Soleil bcp plus éloigné que la Lune

Observations :

- Diamètre apparent Lune $\sim 2^\circ$
- En 1 heure, la Lune se déplace d'une quantité égale à son diamètre
- L'éclipse totale dure 2 heures

→ **Distance ~ 10 fois le diamètre terrestre**

mouvement de la Lune



La distance Terre-Lune (Aristarque de Samos, env. 310-230)

Hypothèse :

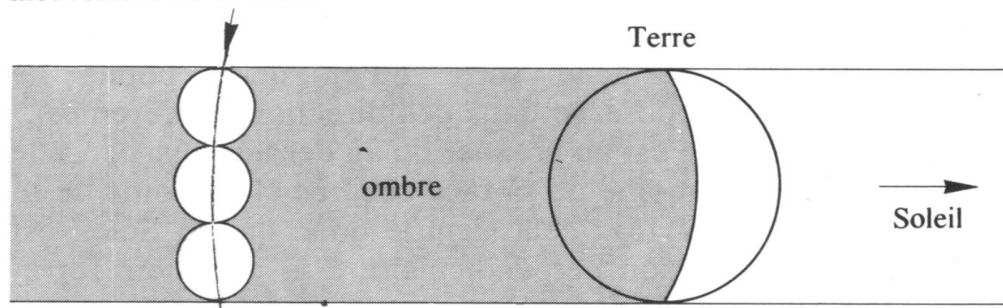
- Le Soleil bcp plus éloigné que la Lune

Observations :

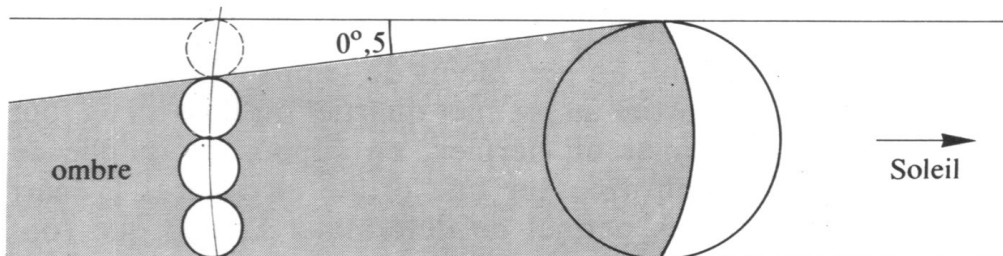
- Diamètre apparent Lune $\sim 2^\circ$
- En 1 heure, la Lune se déplace d'une quantité égale à son diamètre
- L'éclipse totale dure 2 heures

→ **Distance ~ 10 fois le diamètre terrestre**

mouvement de la Lune



(a)



Problème 1 :

Lune $\sim 0,5^\circ$

Problème 2 :

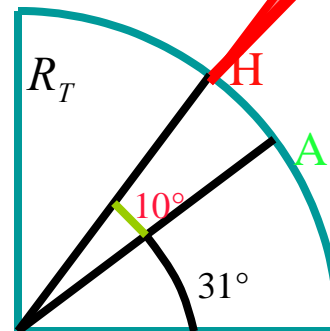
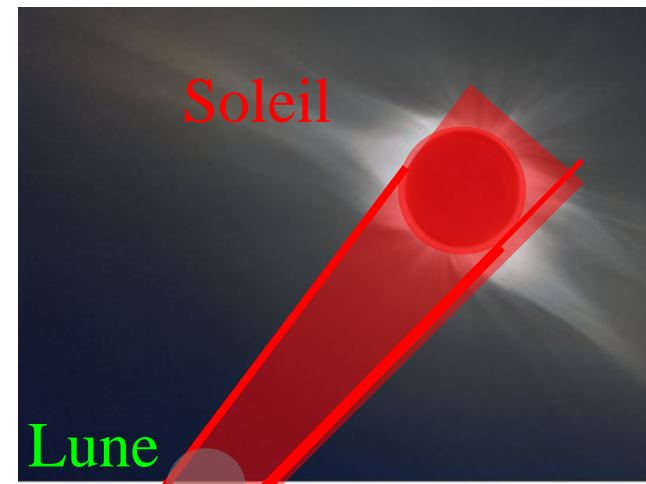
Cône d'ombre

→ Terre = 4 x Lune

Réévalué par Hipparque : **distance Terre-Lune ~ 38 diamètres terrestres $\sim 490\,000$ km**

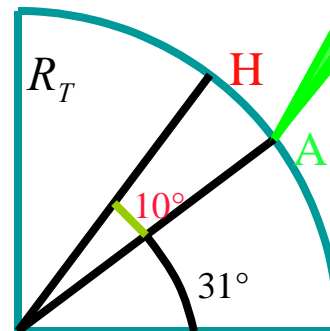
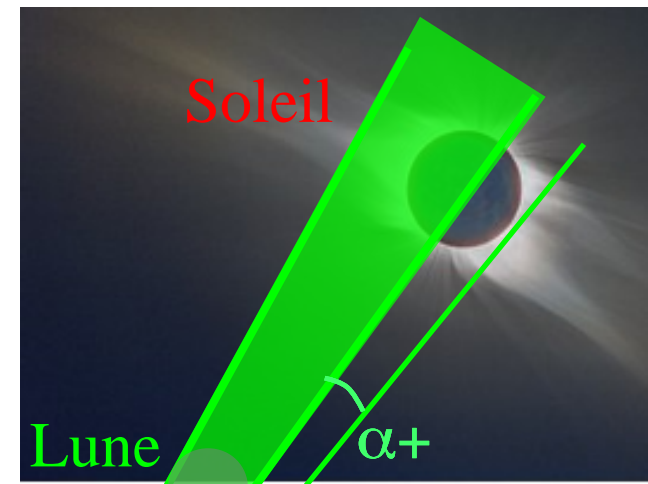
La distance Terre - Lune (Hipparque de Nicée, env. 180-125)

- Observation d'une éclipse du Soleil depuis deux endroits:
 - Éclipse totale en H (Hellespont = Dardanelles, lat. géo. 41°)
 - Le Soleil est occulté à 4/5 en A (Alexandrie, lat. 31°)
 - Partie dégagée du Soleil en A : α_+



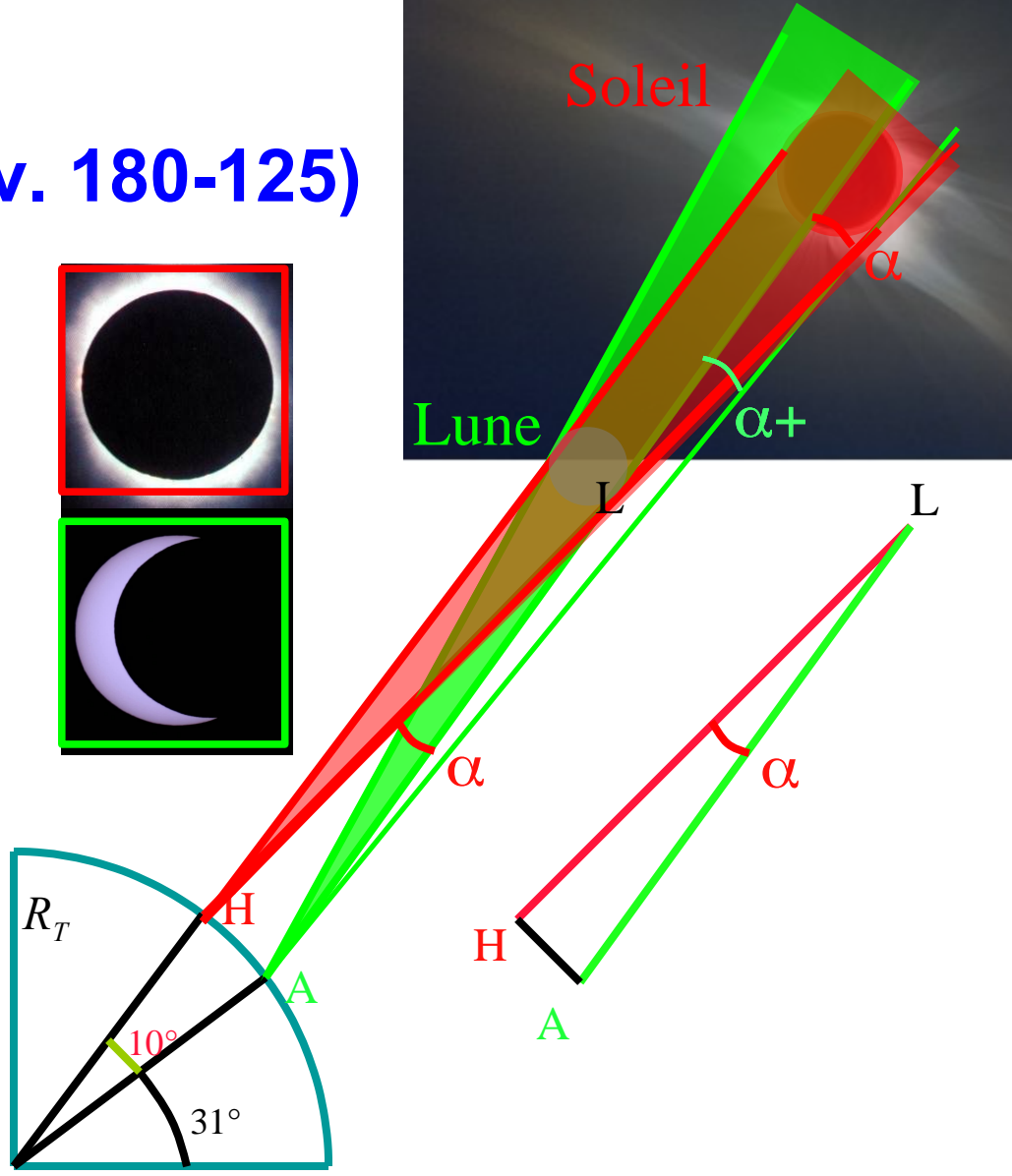
La distance Terre - Lune (Hipparque de Nicée, env. 180-125)

- Observation d'une éclipse du Soleil depuis deux endroits:
 - Éclipse totale en H (Hellespont = Dardanelles, lat. géo. 41°)
 - Le Soleil est occulté à $4/5$ en A (Alexandrie, lat. 31°)
 - Partie dégagée du Soleil en A : α_+



La distance Terre - Lune (Hipparque de Nicée, env. 180-125)

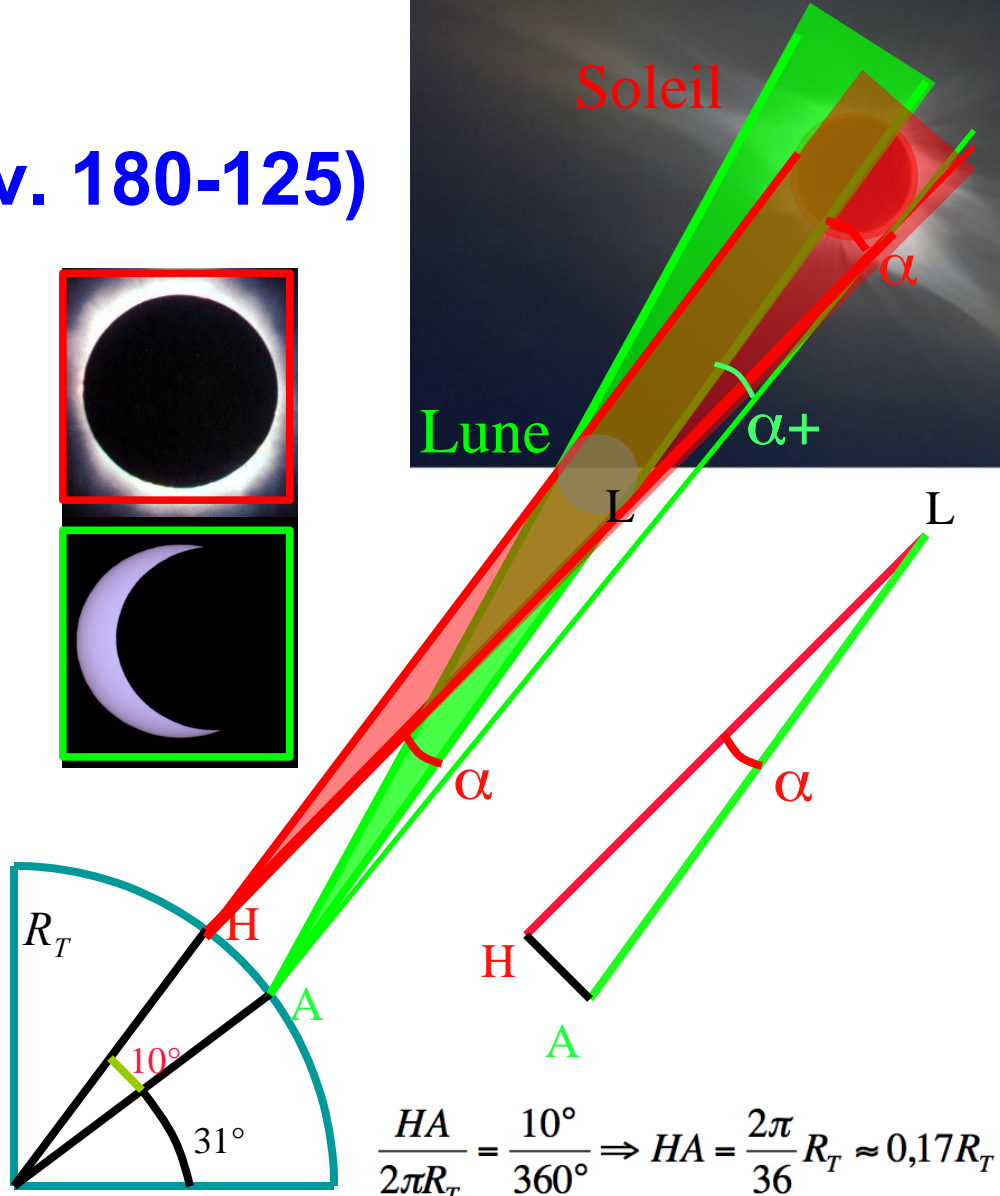
- Observation d'une éclipse du Soleil depuis deux endroits:
 - Éclipse totale en H (Hellespont = Dardanelles, lat. géo. 41°)
 - Le Soleil est occulté à 4/5 en A (Alexandrie, lat. 31°)
 - Partie dégagée du Soleil en A : $\alpha+$



La distance Terre - Lune (Hipparque de Nicée, env. 180-125)

- Observation d'une éclipse du Soleil depuis deux endroits:
 - Éclipse totale en H (Hellespont = Dardanelles, lat. géo. 41°)
 - Le Soleil est occulté à 4/5 en A (Alexandrie, lat. 31°)
 - Partie dégagée du Soleil en A : $\alpha+$
- Diamètres apparents Soleil = Lune.
Hipparque: $\emptyset = 1/650$ de l'orbite
 $= 360^\circ/650 = 0,550^\circ$
- 1/5 de ce diamètre : $\alpha+ = 0,110^\circ$
- Si dist. Soleil-Lune $\gg HL$: $\alpha+ \approx \alpha$

Résultat : Terre-Lune $\approx 560\ 000$ km
(distance aujourd'hui : 384 000 km)
Combinaison avec mesure Soleil-Terre: le Soleil est plus grand que la Terre !



$$\frac{HA}{2\pi R_T} = \frac{10^\circ}{360^\circ} \Rightarrow HA = \frac{2\pi}{36} R_T \approx 0,17 R_T$$

$$HA \approx \frac{\alpha}{360^\circ} 2\pi HL \approx \frac{2\pi \times 0,110}{360} HL \approx 1,9 \times 10^{-3} HL$$

$$\Rightarrow HL \approx 516 HA \approx 88 R_T$$

La vue « 3D » de l'univers dans la période hellénistique

- Avec le développement des techniques de mesure (et la combinaison entre les modèles de l'univers et les techniques de mesure) on commence à développer une idée de la taille du « monde » (= système solaire).
- On réalise que le Soleil est plus grand que la Terre (Aristarque et la mesure/estimation de la distance Soleil-Terre).
- L'idée que le Soleil pourrait être au centre du « monde » est évoquée (Aristarque; avant lui Heraclide du Pont), mais elle ne s'impose pas.

Le modèle géocentrique : physique et astronomie Antiquité-Renaissance

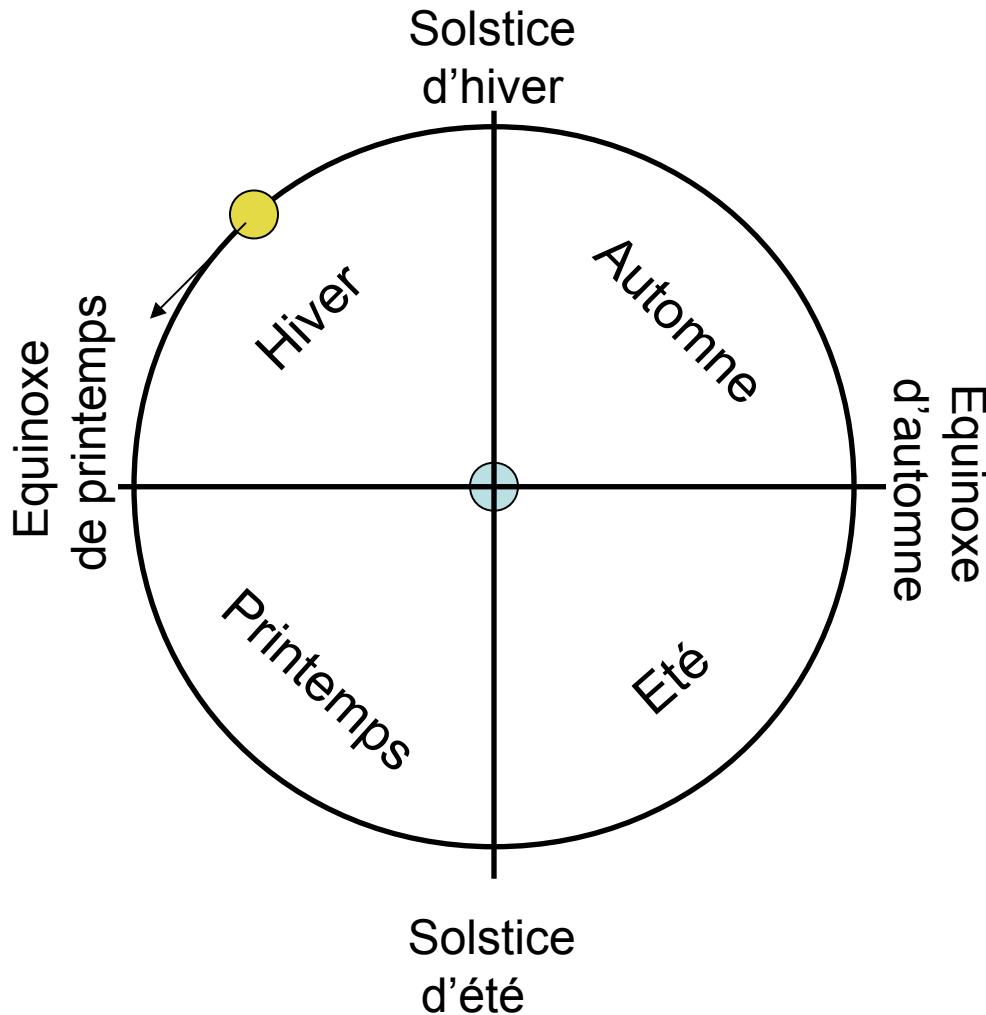
- Le système géocentrique et les observations : « sauver les phénomènes »
- Notions de physique (mécanique) d'Aristote - mondes sub-lunaire et supra-lunaire
- Des difficultés à réconcilier physique et astronomie (Moyen Age - Renaissance)
- La Renaissance : nouvelles observations, nouvelles idées, le système héliocentrique (Copernic, Brahe, Galilée, Kepler)

Le modèle géocentrique

Observations astronomiques

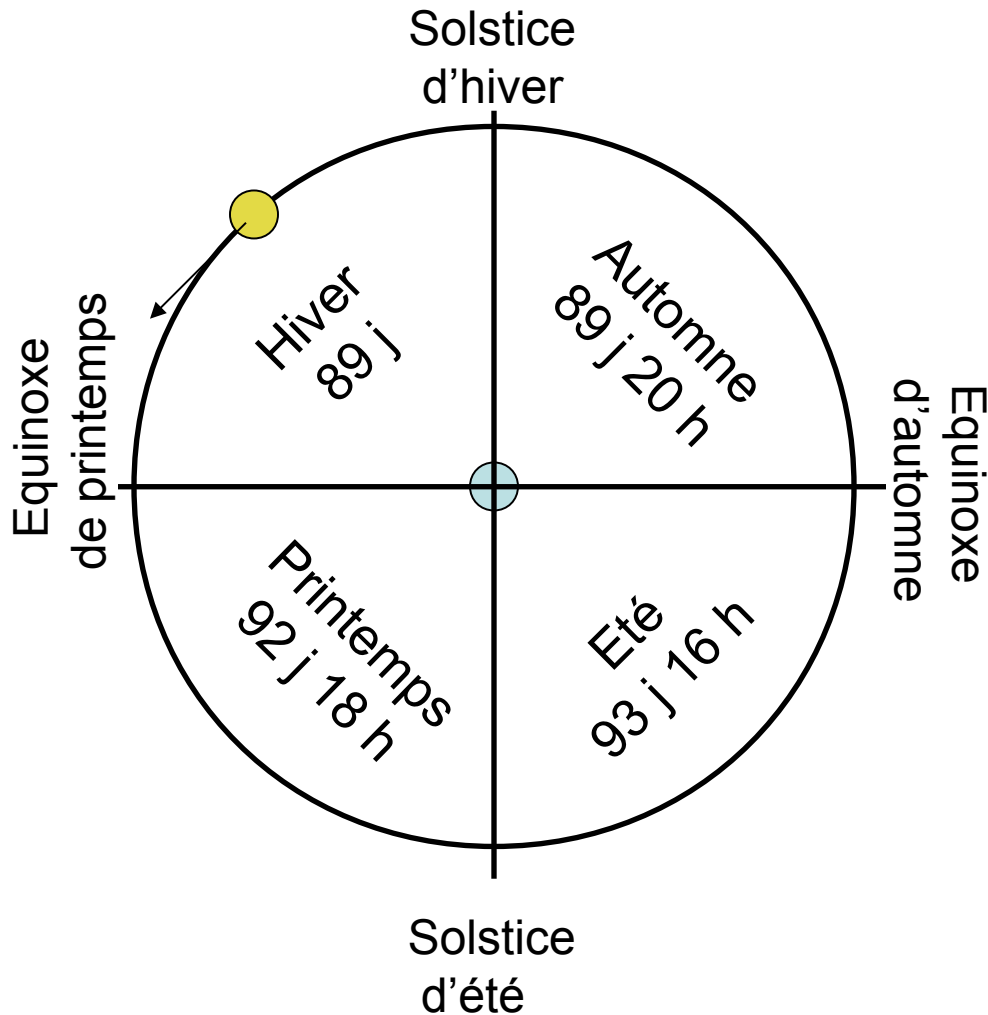
problèmes et complexification du modèle
géocentrique à l'époque hellénistique

Problèmes de la vue géocentrique (1) : l'inégalité des saisons



- Modèle simple : Terre au centre, Soleil sur orbite circulaire à vitesse constante
- Chaque saison devrait avoir la même durée $365,25 \text{ jours} / 4 \approx 91 \text{ jours}$!
- Or :
on sait dès l'antiquité que les saisons ont des durées inégales (Callippe, Hipparque...).

Problèmes de la vue géocentrique (1) : l'inégalité des saisons



- Calendrier actuel⁽¹⁾ :

- Printemps

20 mars 2020 à 3h49m UT

- Été

20 juin 2020 à 21h43m UT

- Automne

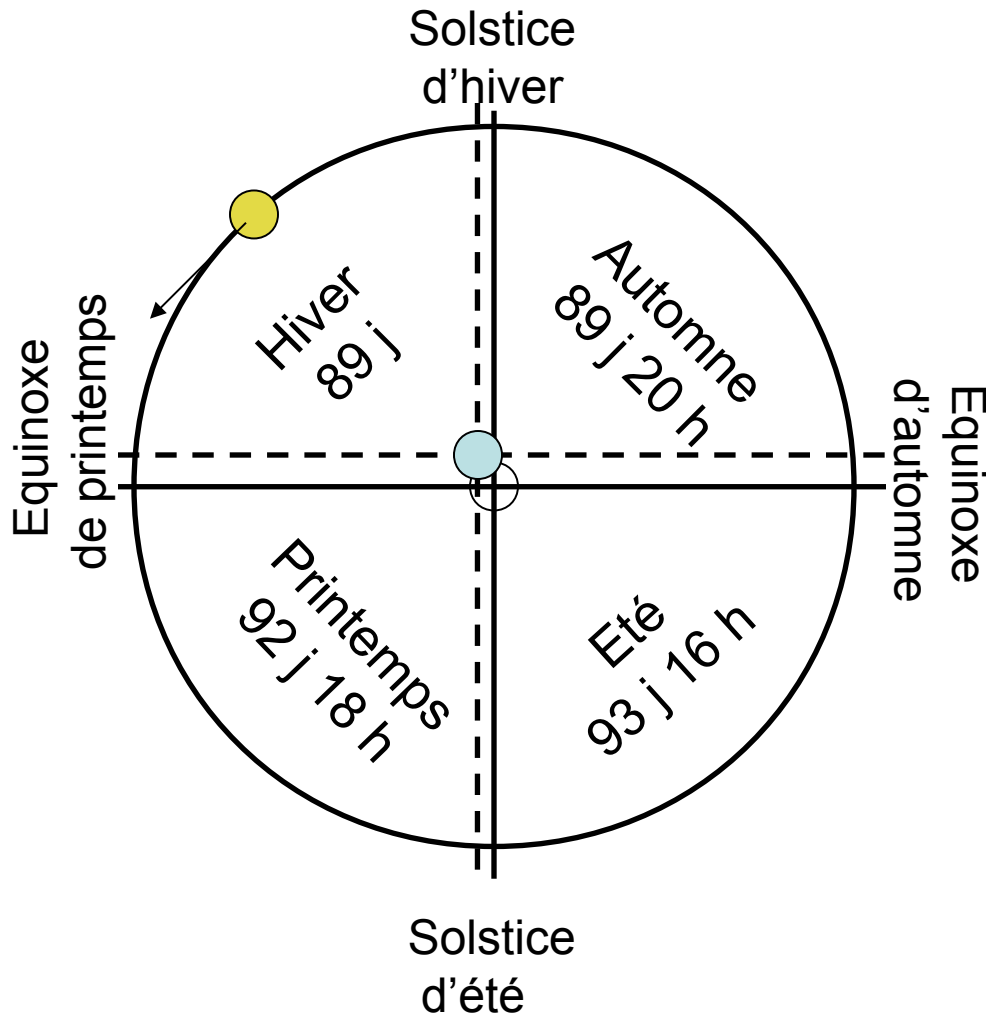
22 septembre 2020 à 13h30m UT

- Hiver

21 décembre 2020 à 10h02m UT

(1) <https://promenade.imcce.fr/fr/pages4/439.html>

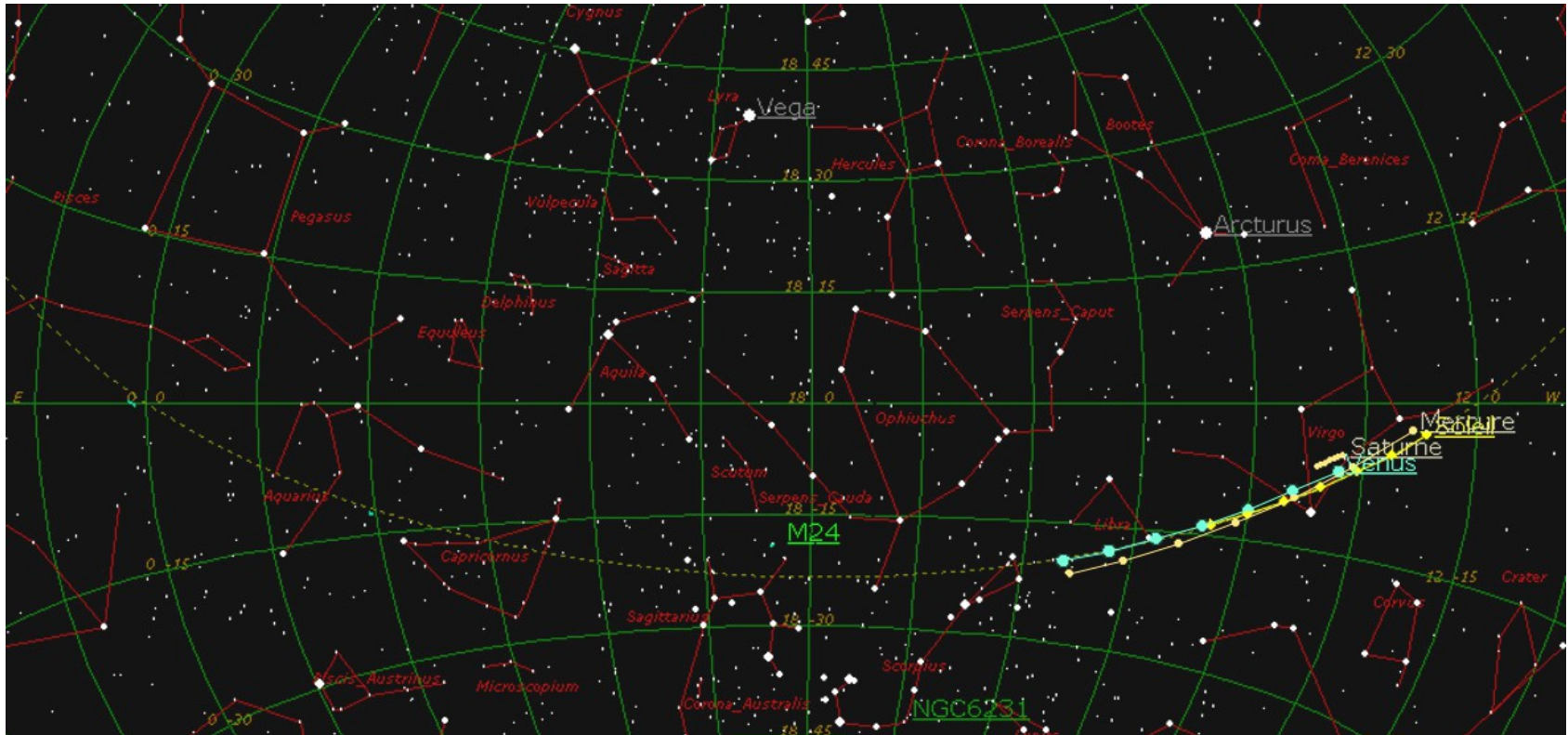
Problèmes de la vue géocentrique (1) : l'inégalité des saisons



Quelles solutions ?

- Le mouvement du Soleil change de vitesse le long de son orbite (difficile à réconcilier avec la physique d'Aristote : quelle force ? Impossible changement dans la sphère supra-lunaire).
- **La Terre n'est pas au centre de l'orbite du Soleil.**
- Le Soleil se meut sur un épicycle dont le centre effectue une orbite circulaire autour de la Terre (voir plus loin).

Problèmes de la vue géocentrique (2) : la rétrogradation des planètes



<http://www.astrourf.com/saf/>

- Les planètes et le Soleil se situent presque dans le même plan : écliptique → les trajectoires des planètes suivent le zodiaque
- Changement régulier des positions des planètes au cours des jours/semaines - **mais** :

Problèmes de la vue géocentrique (2) : la rétrogradation des planètes

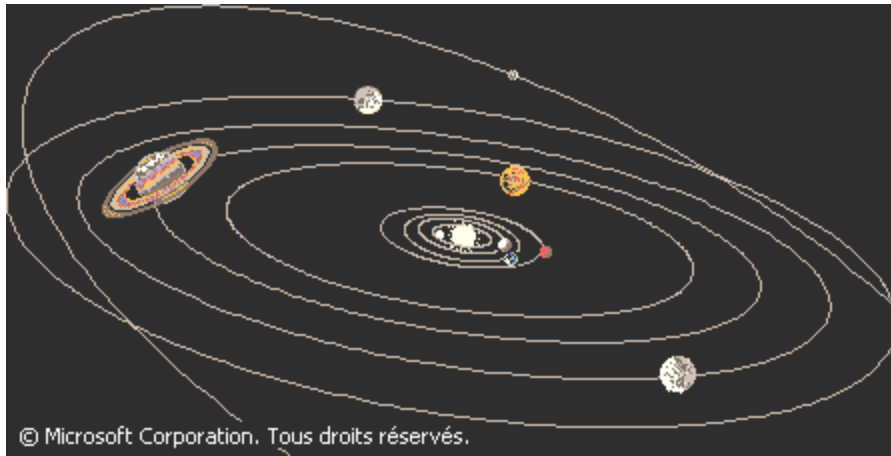
Observation de la planète Mars pendant plusieurs jours :



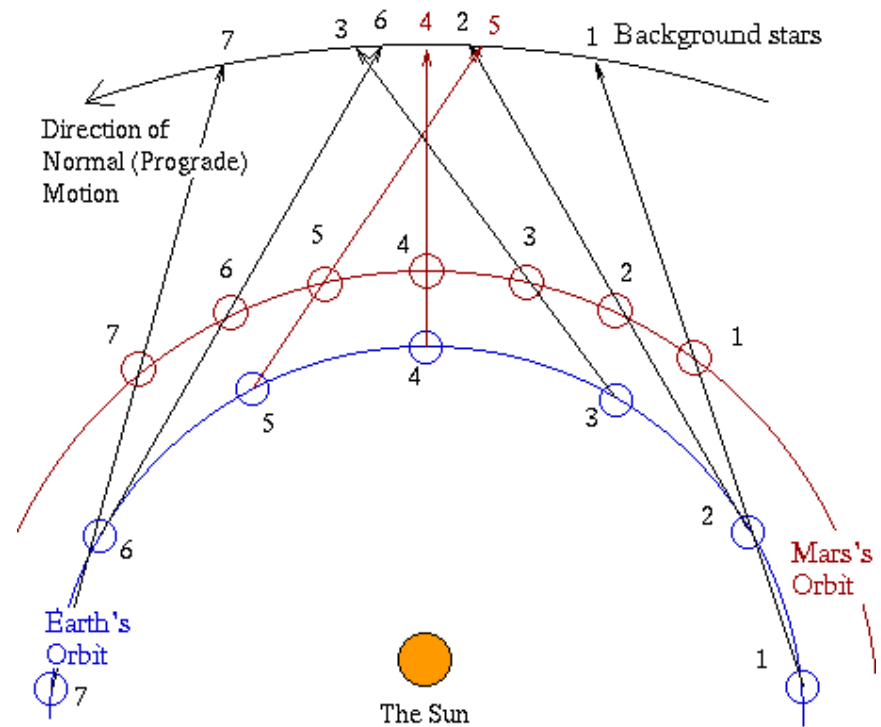
- Addition d'images prises pendant plusieurs jours, en superposant les étoiles « fixes ».
- La trajectoire de Mars n'est pas une progression régulière le long du zodiaque, la planète décrit une boucle (*rétrogradation*).

Problèmes de la vue géocentrique (2) : la rétrogradation des planètes

Explication simple dans le modèle héliocentrique :



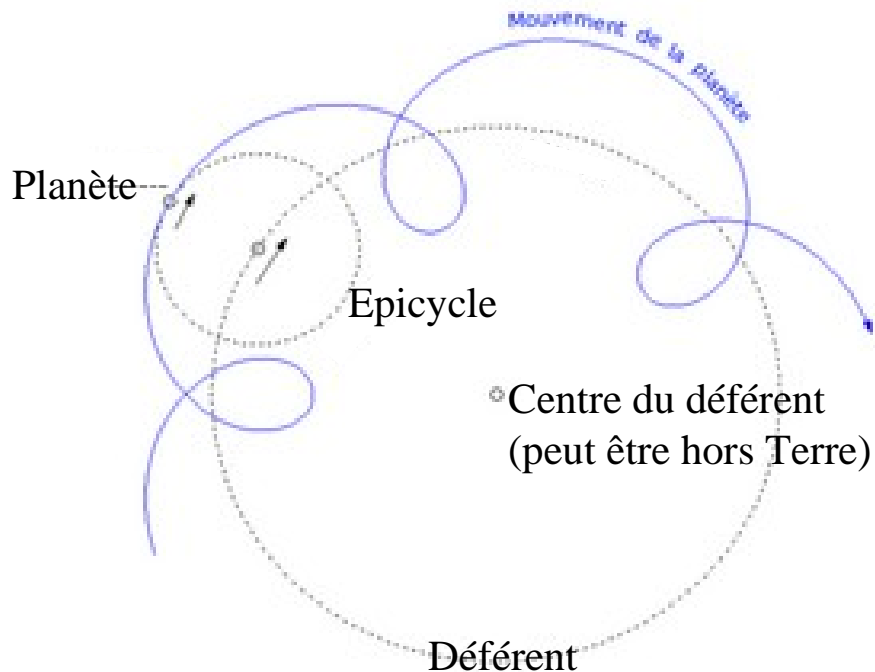
Vue héliocentrique: les périodes des planètes augmentent avec leur distance au Soleil (Kepler, 17^{ème} siècle: $P^2 \propto r^3$) → la Terre « double » de temps en temps une planète extérieure.



Conséquence : mouvement de « rétrogradation » des planètes extérieures par rapport aux étoiles « fixes ».

Problèmes de la vue géocentrique (2) : la rétrogradation des planètes

L'explication géocentrique:

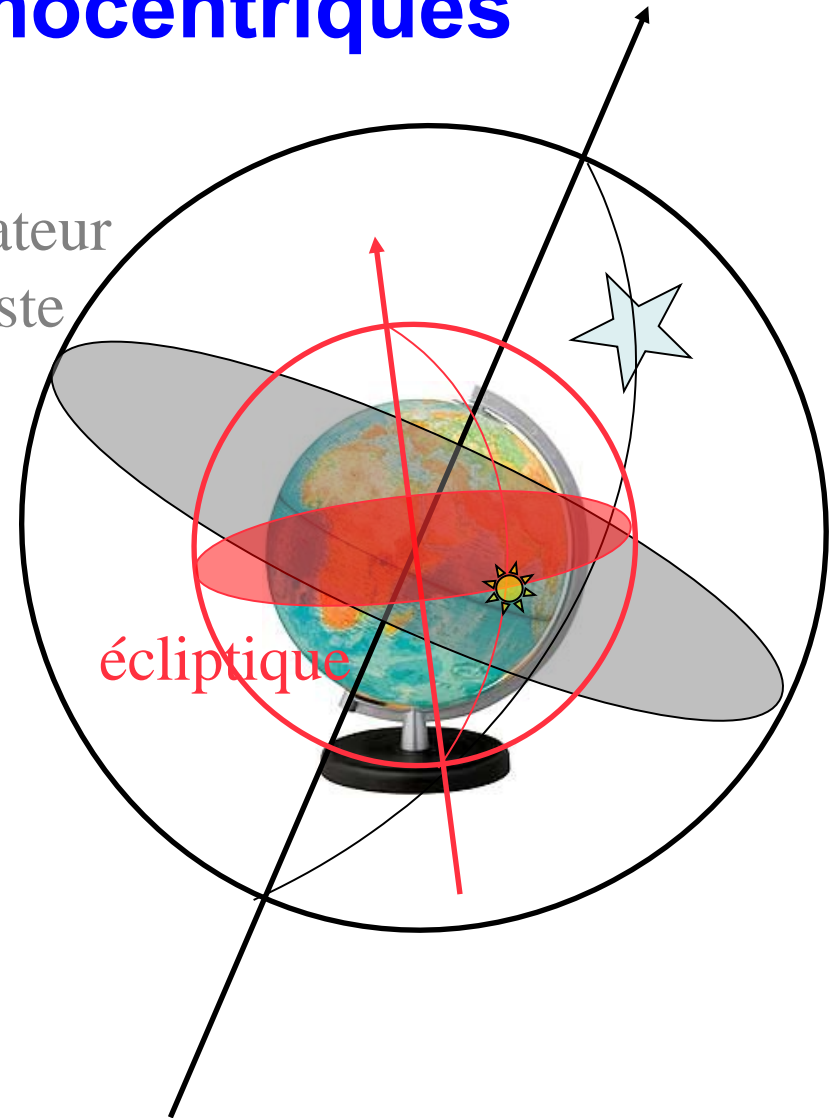


- La planète n'effectue pas d'orbite circulaire autour de la Terre
- La planète se meut sur un cercle (épicycle) dont le centre se meut sur un autre cercle (déférent).
- Le centre du déférent n'est pas forcément la Terre (distances variables Terre-planète, se manifestant par la variation de la brillance de la planète).

L'Univers géocentrique de l'antiquité : les sphères homocentriques

- Un ensemble complexe :
 - Aristote : 55 sphères pour représenter le mvt de toutes les « planètes »
 - + précession (Hipparque) ...
 - + épicycles et/ou orbites excentrés (Terre non au centre de l'orbite circulaire)
- Pourquoi maintenir l'interprétation géocentrique ?
 - Pour un ensemble cohérent de réflexions astronomiques & physiques.

équateur
céleste



Matière et dynamique chez Aristote et Ptolémée

Le mouvement des corps
(terrestres) selon Aristote. La
nécessaire immobilité de la Terre
selon Aristote et Ptolémée.

La matière selon Aristote

- 4 éléments sur Terre : terre, eau, air, feu
- Terre (sphère sub lunaire): changement, génération & corruption
- Astres (sphère supra lunaire): 5^{ème} espèce de matière (plus tard appelée « quintessence », « éther » ...); immuable, éternelle
- Postulat d'Aristote: les lois de la physique sur la Terre (sub-lunaire) et celles gouvernant le mouvement des astres (supra-lunaire) relèvent de deux domaines distincts.
- Observation reliée: les mouvements « naturels » (Aristote) des corps sur la Terre et des astres sont différents.

Eléments de dynamique d'Aristote (1)

(EXTRAIT)

- **Différence corps terrestres - corps célestes (Aristote, *Traité du ciel* I, 3) :**

« Posons donc qu'est pesant ce qui est naturellement transporté vers le centre, qu'est léger ce qui est transporté à partir du centre, qu'est le plus pesant ce qui est situé au-dessous de tous les corps transportés vers le bas, et qu'est le plus léger ce qui est à la surface de tous les corps transportés vers le haut.

... ces choses peuvent avoir une pesanteur ou une légèreté relatives, par exemple l'air est léger par rapport à l'eau, mais l'eau est légère par rapport à la terre. Mais il est impossible que le corps transporté en cercle ait une pesanteur ou une légèreté ; car ni par nature ni contre-nature il ne lui est possible d'être mû en direction du centre ou en venant du centre. ... »

- A noter : en introduisant une orbite excentrée (comme Hipparque-voir plus haut), on crée une composante du mouvement en direction du centre du monde - incohérence avec la physique aristotélicienne !

Eléments de dynamique d'Aristote (2)

- **Mouvements « naturels » :**
 - **monde sub-lunaire : mvt rectiligne** par nature vers le haut ou vers le bas
 - terre et eau (lourdes) vers le centre du monde (donc centre Terre), air et feu (légers) vers le haut
 - endroits naturels occupés par les éléments, qui s'y meuvent (chute ou montée) pour rétablir un ordre perturbé.
 - **monde supra-lunaire (astres) : cercle** = orbite « parfaite » pour un mouvement éternel et identique à lui-même.
 - Idée liée à celle d'un univers fini

A noter : orbite circulaire autour du centre du monde

- astres n'effectuent pas de mouvement vers le centre
- ne possèdent **pas de 'pesanteur'** dans le sens aristotélicien.

- **Mouvements « violents »** (« contre nature ») d'un corps (requiert un moteur) :
 - jet d'un objet.



Eléments de dynamique d'Aristote (3)

- **Expérience quotidienne** : tout corps en mouvement finira par s'arrêter si le mouvement n'est pas entretenu (par une force exercée sur lui).
 - Raisonement contemporain :
le corps s'arrête à cause d'une force : frottement.
 - Conclusion Aristote :
tout mouvement tend vers le repos si une force ne l'entretient pas.
- **1er principe : Mouvement \leftrightarrow Action** (ou « force »)
il y a dans tout mouvement deux facteurs principaux :
une action motrice F et une action de résistance R ,
il y a mouvement si $F > R$
- **2nd principe:** la vitesse est proportionnelle à F/R
 v est d'autant plus grande que la force motrice (F) est grande : $v \propto F$
mais v est d'autant plus faible que la résistance est grande : $v \propto 1/R$

Eléments de dynamique d'Aristote (4)

- **Conséquence : le vide n'existe pas.** Aristote, *Physique*: « Personne, si l'on suppose que le vide existe, ne pourrait donner une raison pourquoi un objet qui a été mis en mouvement devrait arriver à l'arrêt : ... il doit donc continuer à se mouvoir sans fin tant qu'une force plus importante ne l'en empêche pas. ».
→ C'est l'énoncé exact de la loi d'inertie de Galilée et Newton, utilisée par Aristote pour montrer l'absurdité de l'existence du vide !

EXTRAIT (Aristote vu par Galilée)

- **Problème** : expérience de chute libre de deux sphères de même taille et de poids différents → **si poids(S_1) = 2 x poids(S_2), alors $v_1 = 2 \times v_2$ et $T_1 = \frac{1}{2} T_2$**

La conclusion d'Aristote n'est pas fausse, mais elle attribue au mouvement en général l'effet d'une force spécifique (frottement) et devient incapable de rendre compte du mouvement dans le vide. Conclusion erronée, mais fondamentale pour la physique d'**Aristote : la vitesse de chute des corps dépend de leur masse.**

Le grand attrait de la physique aristotélicienne :

explication chute des corps, flottement libre de la Terre, stabilité du ciel par une seule idée de base (pesanteur = mvt vers le centre).

Eléments de dynamique d'Aristote (4)

La négation du vide : interprétation d'Aristote par Galilée

SIMPLICIO. — Aristote, autant qu'il me souviennne, s'insurge contre certains anciens qui introduisirent le vide comme nécessaire au mouvement, en disant que sans celui-ci [le vide] cet autre [le mouvement] ne pourrait avoir lieu. A l'encontre de cela, Aristote démontre que, tout au contraire, c'est [ainsi que nous le verrons] la production du mouvement qui s'oppose à la position du vide ; aussi raisonne-t-il comme suit. Il suppose deux cas : l'un, celui de mobiles différents en gravité mus dans le même milieu ; l'autre, celui du même mobile mu dans des milieux divers. Quant au premier (cas), il suppose que les mobiles de gravité différente se meuvent dans le même milieu avec des vitesses différentes, et qui auront entre elles la même proportion que les gravités ; ainsi, par exemple, qu'un mobile dix fois plus lourd qu'un autre se mouvra dix fois plus vite (2). Dans l'autre cas, il admet que les vitesses du même mobile dans des milieux différents auront, entre elles, la proportion inverse de l'épaisseur, ou de la densité, de ces milieux ; ainsi, par exemple, si l'on suppose que l'épaisseur [densité] de l'eau soit dix fois celle de l'air, il veut que la vitesse dans l'air soit dix fois plus grande que la vitesse dans l'eau (3). Et de cette seconde supposition, il tire une démonstration de la forme suivante : puisque la ténuité du vide surpasse, d'une distance infinie, la corpulence, si subtile qu'elle soit, de tout milieu plein, tout mobile qui, dans le milieu plein, se meut par quelque espace en quelque temps, devra dans le vide se mouvoir en un instant (4) ; mais accomplir un mouvement en un instant est impossible ; par conséquent en vertu de [l'existence] du mouvement, il est impossible qu'il y ait du vide.

Ptolémée : pourquoi la Terre est immobile⁽¹⁾

La conception aristotélicienne de la physique joue un rôle crucial dans la justification de l'image géocentrique du monde:

« Certains philosophes ... composent un système qui leur paraît plus crédible et s'adonnent à l'idée qu'aucun témoignage ne les contredira s'ils supposent par exemple que la sphère céleste est immobile, alors qu'ils font faire à la Terre presque un tour par jour autour de son axe, d'ouest en est Même si, en ce qui concerne les phénomènes célestes, aucune objection ne pourrait gêner la plus grande simplicité de cette idée, il a pourtant échappé à ces hommes que le ridicule de leur hypothèse éclate au grand jour au vu des propriétés qui nous sont propres et que nous constatons dans l'atmosphère de la Terre. » (Almageste)

(1) Voir aussi les arguments d'Aristote, 1er cours

Ptolémée : pourquoi la Terre est immobile⁽¹⁾

- Si la Terre n'était pas au milieu de l'Univers, elle devrait y tomber plus vite que tous les corps de moindre masse (idée aristotélicienne que la vitesse de chute dépend de la masse). Or, nous voyons les corps tomber sur la Terre, non pas la Terre tomber en s'éloignant des corps plus légers. La Terre est donc au repos - au centre de l'Univers.
- Si la Terre effectuait une rotation d'ouest en est,
 - aucun nuage ou autre chose qui vole ne devrait se mouvoir vers l'est, puisque tout objet serait dépassé par la Terre, à cause de sa rotation. Vu par un observateur sur Terre, tout objet devrait au contraire se déplacer vers l'ouest;
 - une flèche tirée vers le haut ne devrait pas retomber au même endroit.

Pouvons-nous comprendre les mouvements célestes ?

- Une description de la nature qui n'est pas purement « objective » (Ptolémée, *Almagest* livre 13) :

« Il ne faut pas juger la 'simplicité' de ce qui se passe dans le ciel d'après ce qui paraît simple à nous autres humains - d'autant que sur Terre on n'est nullement d'accord sur la notion de simplicité. ... Il faut plutôt partir de l'immuabilité des créatures orbitant le ciel et de leurs mouvements; ce n'est que sous ce point de vue qu'ils peuvent tous paraître simples, voire simples à un degré supérieur aux choses qui sont considérées comme simples sur Terre, puisque aucune peine, aucune nécessité n'est pensable en ce qui concerne les orbites de ces êtres. »

- La chute du modèle géocentrique, formulé à son niveau le plus sophistiqué par Ptolémée, vient de la mise en évidence des contradictions intrinsèques de ses fondations physiques et astronomiques au cours du Moyen Age et en particulier de la Renaissance.

Avis critiques sur l'astronomie et la physique d'Aristote et de Ptolémée au Moyen Age

Critique de la dynamique d'Aristote:

Jean Philopon

- Philosophe chrétien; Alexandrie, v. 490 - v. 566
- **Contre les mouvements « naturels » vers le haut/bas :**
« L'air ne possède pas seulement le principe du mouvement vers le haut, mais aussi vers le bas. Car lorsque la terre ou l'eau sont enlevées au-dessous de l'air, l'air remplira immédiatement leur place. »
- **Contre la théorie du jet :** *« le projectile doit recevoir de celui qui le lance une certaine force cinétique immatérielle, alors que l'air propulsé soit ne contribue rien, soit peu à ce mouvement. ... il est clair que le même processus aura lieu d'autant plus aisément si la pierre ou la flèche sont lancées ... dans l'espace vide.»*

Doutes sur la démarche scientifique - le retour de Platon, l'oubli du Moyen Age chrétien

Proklos (Philosophe grec, Athènes; 412 – 485)

- **doutes sur la démarche scientifique** « *Le grand Platon, mon ami, exigeait d'un vrai philosophe qu'il étudie l'astronomie d'un point de vue qui se situe au-delà de la voûte céleste, sans se faire embrouiller par la perception sensorielle et la matière, soumise au changement perpétuel ... »*

→ Concentration sur la spiritualité, oubli de la science au Moyen Age chrétien (parfois évocation d'une Terre plate ...)

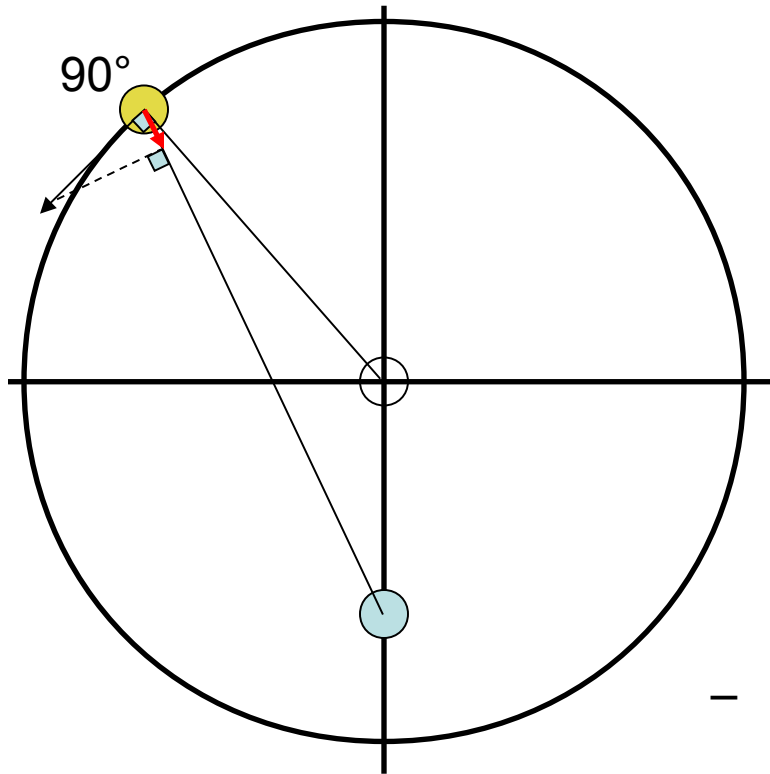
Physique et astronomie chez les Arabes (9^{ème} - 13^{ème} siècle)

- Conservation, traduction, commentaires des textes grecs
- Observations et établissement de tables astronomiques
- Discussion critique des hypothèses d'Aristote et Ptolémée

Orbites excentrés, épicycles : « Une orbite épicyclique n'est pas possible, puisqu'un corps qui se meut sur un cercle doit se mouvoir autour du centre du monde. Car c'est l'objet qui se meut sur un cercle qui définit le centre. S'il y avait un mouvement circulaire en dehors de ce centre, il y aurait un autre centre en dehors de celui-là, et il y aurait une autre Terre en dehors de cette Terre-ci. »

Averroës = Abu'l-Walid Muhammad Ibn Rushd,
(Cordoue 1126 – Marrakech 1198)

Problème que pose une orbite excentrée à la physique d'Aristote



- **Averroès met en évidence une contradiction entre la physique d'Aristote et les arrangements de Ptolémée :**
 - Vu depuis le centre de l'orbite, le mouvement de la planète n'a aucune composante vers le centre - la planète ne possède pas de pesanteur, dans le sens aristotélicien.
 - Vu depuis la Terre, le mouvement orbital a une composante vers le centre de la Terre. → Soit la planète possède de la pesanteur, soit la Terre devrait chuter vers le centre.
- **Les phénomènes ne peuvent être « sauvés » qu'au prix d'une perte de cohérence entre physique et astronomie !**

Physique et astronomie chez les Arabes (9^{ème} - 13^{ème} siècle)

- **L'existence d'épicycles implique un mouvement orbital qui n'est pas centré sur le centre du monde.** « *De plus, Aristote, dans sa Physique, fait ce constat fondamental que le mouvement circulaire n'est simplement pas possible sans un objet matériel persistant, autour duquel il a lieu. De là il s'ensuit forcément que la Terre doit être un objet matériel persistant. Mais si la sphère secondaire existait, son mouvement serait une rotation qui n'aurait lieu autour d'aucun objet matériel persistant.* » (Moïse Maïmonide, Cordoue 1135 - Le Caire 1204)
- **Pourquoi ce genre de raisonnement n'entraîne-t-il pas l'effondrement du modèle géocentrique de Ptolémée ?**

Une interprétation : astronomie = tentative de décrire les phénomènes (mouvements des astres) par des mouvements circulaires ; pas de notion qu'il s'agit là d'une « réalité » physique (concept qui se maintient de Ptolémée à Copernic)

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle

- **Critiques de la physique du mouvement d'Aristote :**
 - Jean Buridan (γ 1300 - 1366),
 - Nicole (Nicolas) d'Oresme (γ 1325-1382)
- **Buridan : notion de l'*impetus* (= élan)**

L'impetus est une puissance transmise au projectile par le moteur. Il est affaibli par la résistance de l'air et la pesanteur
- **Oresme : la relativité du mouvement**
 - Rappel de trois arguments de Ptolémée contre la rotation de la Terre : mouvement diurne du ciel, absence d'un vent dominant depuis l'est, montée/chute d'une flèche lancée
 - Contradiction d'Oresme : les mouvements sont relatifs, l'air se meut avec la Terre. Relation entre les expériences terrestres et les mouvements dans l'Univers.

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle : Buridan

Aristote : « l'air ébranlé entretient le mouvement du projectile »
(l'énergie cinétique transmise à l'air, pas au projectile)

—▶ A1 : un mouvement tourbillonnaire pousse le projectile

Buridan : *expérience de la toupie*
expérience du javelot à deux pointes
Inertie du bateau

—▶ A2 : il existe un « ébranlement » qui se propage en
avant du projectile et le tire

Buridan : *le courant d'air produit par la main de l'homme n'est que*
de faible puissance
une plume devrait être lancée plus loin qu'une pierre

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle : Buridan

L'impetus :

- Plus un corps contient de matière, plus il reçoit d'impetus :
un corps « dense et grave » reçoit plus d'impetus qu'un corps « rare et léger »
(la meule du forgeron)

- Plus la vitesse imprimée est grande, plus l'impetus est grand

~ quantité de mouvement (Descartes)

\propto Masse x Vitesse

Si absence de résistance, ou de mvt naturel, l'impetus est conservé et le mvt rectiligne OU circulaire est éternel (\neq principe d'inertie)

Un impetus particulier est donné par Dieu au commencement à chacune des orbes célestes le principe d'inertie justifie le repos du 7eme jour !

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle : Oresme

(EXTRAIT)

A1 (Ptolémée) : Le ciel est en mouvement, car on voit des astres se lever et se coucher, d'autres tourner autour du pôle nord.

Oresme: « Je dis donc que si des deux parties du monde susdites celle d'en haut était mue aujourd'hui d'un mouvement journalier comme elle le fait et celle d'en bas non, et que demain ce fût au contraire celle d'ici-bas qui fût en mouvement journalier, et l'autre, c'est-à-dire le ciel étoilé, non, nous ne pourrions en rien constater cette mutation mais que tout semblerait être d'une même façon aujourd'hui et demain à ce sujet. Il nous semblerait continuellement que la partie où nous sommes fût fixe et que l'autre fût toujours en mouvement, comme il apparaît à un homme sur un bateau en mouvement, que les arbres à l'extérieur sont en mouvement. »

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle : Oresme

(EXTRAIT)

A2 (Ptolémée) : Si la Terre était en mouvement, on devrait sentir un fort vent d'est. Or, les vents dominants viennent de l'ouest.

Oresme : « *La réponse à la seconde expérience est, semble-t-il, que, selon cette interprétation, la terre n'est pas seule à avoir un tel mouvement, mais avec elle l'eau et l'air comme on l'a dit, quoique l'eau et l'air d'ici-bas aient un mouvement différent sous l'effet des vents ou d'autres causes. C'est la même chose que s'il y avait de l'air enclos dans un bateau : il semblerait à celui qui serait dans cet air-là que cet air ne fût pas en mouvement.* »

Critiques scholastiques d'Aristote, Paris, 14^{ème} siècle : Oresme

(EXTRAIT)

A3 (Ptolémée) : Si la Terre effectuait une rotation d'ouest en est, une flèche tirée verticalement à un endroit devrait retomber à l'ouest.

Oresme: « A la troisième expérience qui apparaît comme la plus nette, celle de la flèche ou de la pierre lancée vers le haut, etc., on pourrait dire que la flèche entraînée vers le haut, par ce jet, est mue très rapidement vers l'Est avec l'air au sein duquel elle passe ainsi qu'avec toute la masse de la partie inférieure du monde définie précédemment et qui est mue d'un mouvement journalier ; c'est pourquoi la flèche retombe au lieu de la terre dont elle était partie.

Chose qui se manifeste comme possible par comparaison, car si un homme était sur un bateau en mouvement très rapide vers l'Est sans qu'il se rendît compte de ce mouvement, et qu'il abaissât sa main en décrivant une ligne droite le long du mât du bateau, il lui semblerait que sa main n'eût qu'un mouvement rectiligne ; ainsi, selon l'opinion en question, nous semble-t-il qu'il en est de la flèche qui descend ou monte verticalement vers le bas ou vers le haut. »

Résumé :

situation de l'astronomie à la Renaissance

- Modèle géocentrique : ne peut être « sauvé » qu'au prix de complications : orbites excentriques, épicycles ...
- Conséquence : incohérences avec la physique aristotélicienne, tout en améliorant l'utilité pratique (calcul des calendriers, tables pour la navigation ...).
- Le modèle héliocentrique devient plausible. Orbites circulaires des planètes autour du Soleil : Copernic 1543

Justification de l'hypothèse de la rotation et du mouvement orbital de la Terre (Copernic)

- *« Mais si quelqu'un croit que la Terre tourne, il sera sans doute aussi de l'avis que ce mouvement est naturel et non pas violent. ... C'est donc sans raison que Ptolémée craint que la Terre et tous les objets terrestres mis en mouvement ne soient détruits par l'action de la nature... Mais pourquoi ne craint-il pas la même chose, et dans une bien plus grande mesure, pour le monde dont le mouvement devrait être d'autant plus rapide que le ciel est plus grand que la Terre ? »*
- *« ... il reste certain que la Terre ...est délimitée par sa surface sphérique. Pourquoi alors lui refuser une mobilité qui lui convient par sa nature et qui correspond à sa forme ? Pourquoi supposer plutôt que le monde entier se meut, dont les frontières ne sont connues et ne peuvent être connues ? Et pourquoi ne voulons-nous pas admettre que l'apparence d'une rotation diurne appartient au ciel, mais la réalité de cette rotation à la Terre ... ? »*
- *« Comme enfin les planètes se trouvent tantôt plus près, tantôt plus loin de la Terre, on voit que le mouvement d'un même corps qui a lieu autour du centre, voulant dire du centre de la Terre, a également une direction vers le centre ou à partir du centre. »*

Justification de l'hypothèse de la rotation et du mouvement orbital de la Terre (Copernic)

- **Les arguments de Copernic** combinent
 - l'application au ciel des raisonnements valables sur la terre (force centrifuge liée à la rotation de la sphère céleste) - donc l'abandon de la limite entre le sub-lunaire et le supra-lunaire;
 - des raisonnements aristotéliens sur les mouvements « naturels » convenant à certains corps selon leur forme;
 - des arguments basés sur les contradictions de la physique aristotélienne et des orbites complexes introduites à l'époque hellénistique (épicycles, orbites excentrées)
- **Ce n'est pas une rupture radicale** avec les idées anciennes, mais la reconnaissance d'incohérences dans l'image traditionnelle, basée sur les réflexions des critiques médiévaux (philosophes Arabes, scholastiques).
- **Compromis (Tycho Brahe)** : Planètes tournent autour du Soleil, mais Soleil + cortège planétaire autour de la Terre

Résumé : situation de l'astronomie à la Renaissance

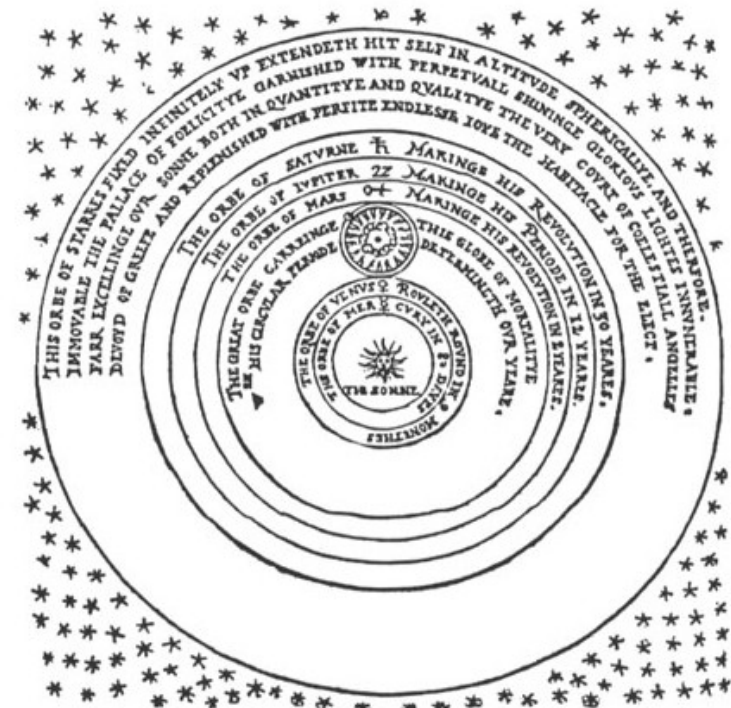
- Un modèle héliocentrique naïf : Thomas Digges (1546-1595)
- Toujours problème de « sauver les phénomènes » (p.ex. : durée des saisons) : pour expliquer les observations, Copernic doit conserver les épicycles !
- Le nouveau système ne permet pas immédiatement de faire des prévisions plus précises que l'ancien.
- Evolution des instruments (perfection instruments classiques, invention lunette) : nouveaux doutes sur les hypothèses du géocentrisme et de la physique d'Aristote.

A Perfit Description of the Celestiall Orbs

Thomas Digges

(1576)

☞ A perfit description of the Celestiall Orbes,
according to the most auncient doctrine of the
Pythagoreans, &c.



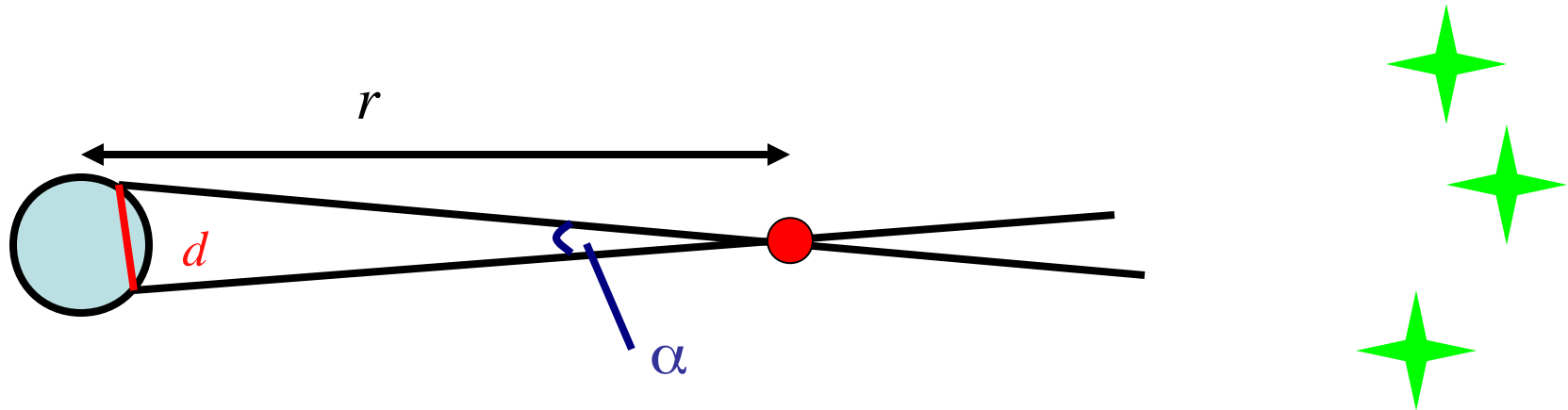
Vers un nouveau système du monde

Nouvelles observations mettant
en doute l'idée géocentrique et la
physique d'Aristote:

Brahe, Galilée

Rappel :

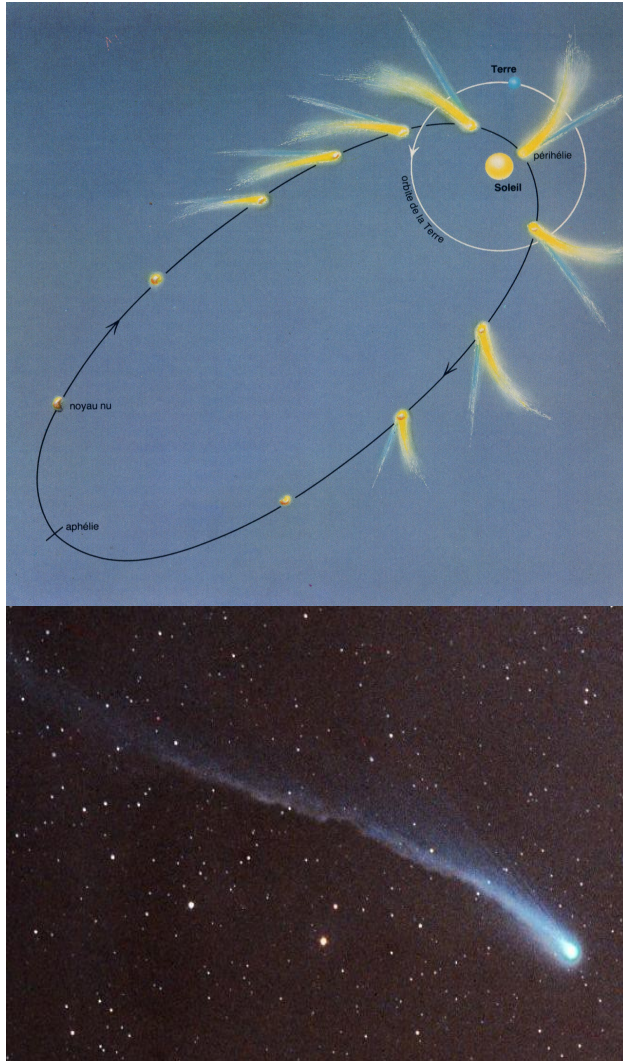
Les distances des astres - parallaxes



- Astres proches: visée depuis deux observateurs dont la distance d sur la surface de la Terre est connue
- Mesure de l'angle α entre les directions de visée
- Distance r de l'astre à la Terre à partir de la trigonométrie
- Parallaxe = angle (astre-centre Terre, astre-bord Terre)

Le ciel n'est pas immuable :

T. Brahe et la comète de 1577

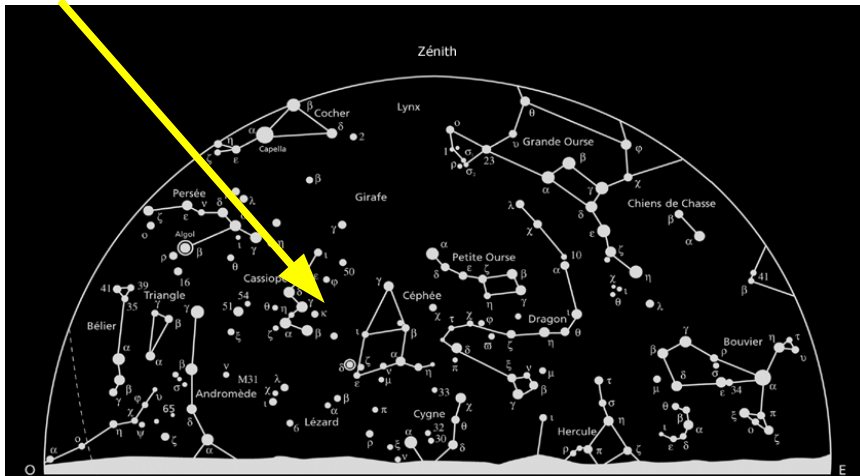


- Comètes : phénomènes atmosphériques (Aristote), donc sphère sub-lunaire
- Mesures Danemark et Prague 1577 : parallaxe $< 1'$
→ distance au moins $(6-7)Y$
distance Terre-Lune
- Conclusion : la comète fait partie du monde supra-lunaire

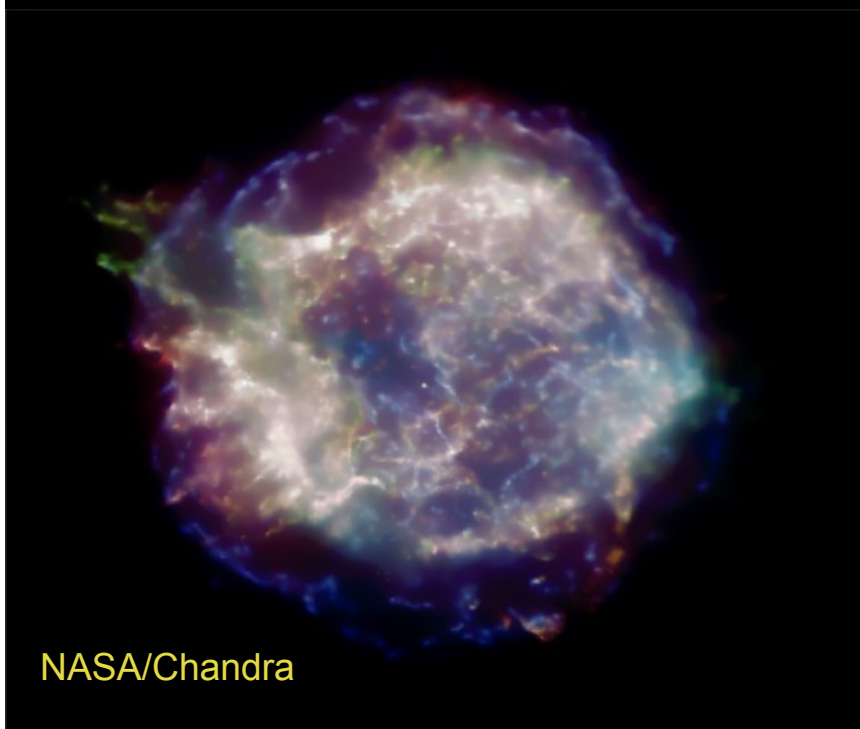


Contradiction à l'idée d'un monde supra lunaire sans génération ou corruption !

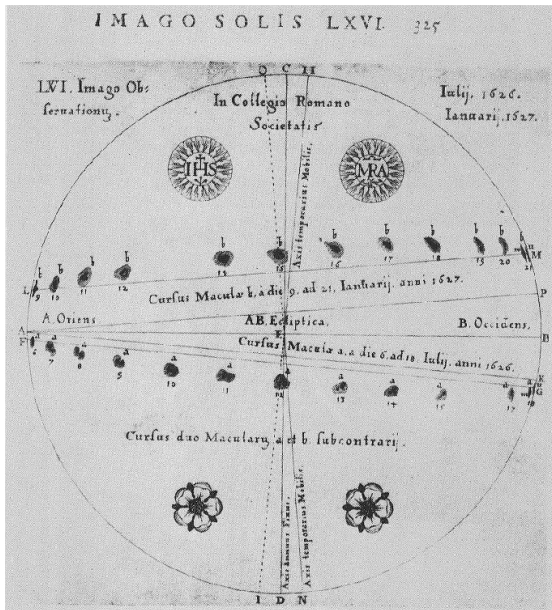
Le ciel n'est pas immuable : T. Brahe et la supernova de 1572



- Apparition brusque d'une « étoile nouvelle » brillante dans la constellation Cassiopée: « un miracle qui n'a jamais été vu avant, depuis le début du monde »
- Devient de plus en plus brillante (→ Vénus) pdt qq semaines, change couleur, s'affaiblit et disparaît en mars 1574
- Mesure de la parallaxe (plusieurs mois d'intervalle) : aucun mouvement par rapport aux étoiles → distance stellaire
- L' « étoile nouvelle » fait partie du monde supra-lunaire, bien que phénomène transitoire !



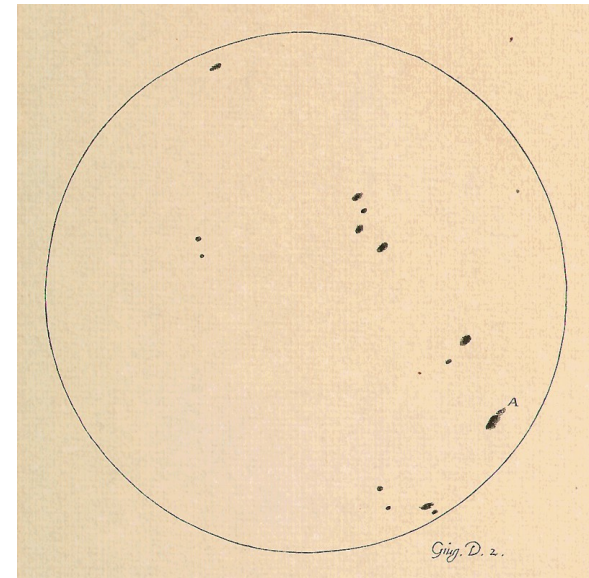
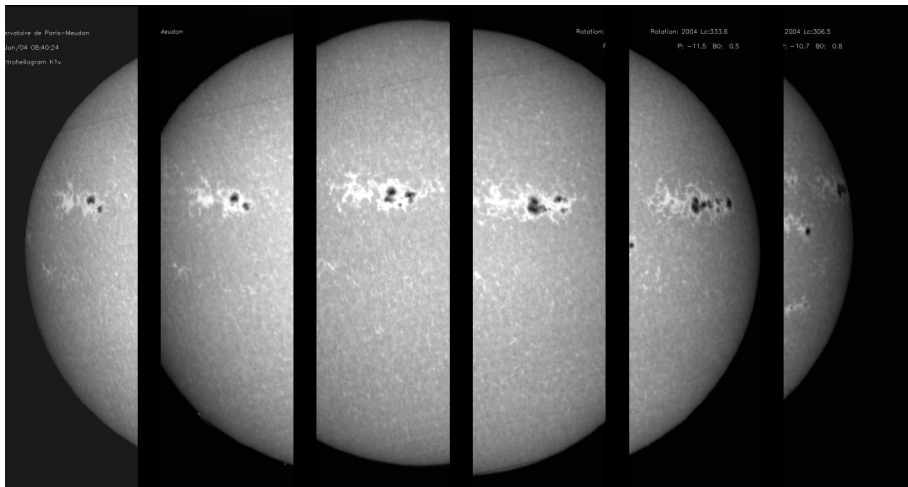
Le ciel n'est pas immuable : les taches solaires (1611)



Scheiner, 21 mars 1611

Deux interprétations :

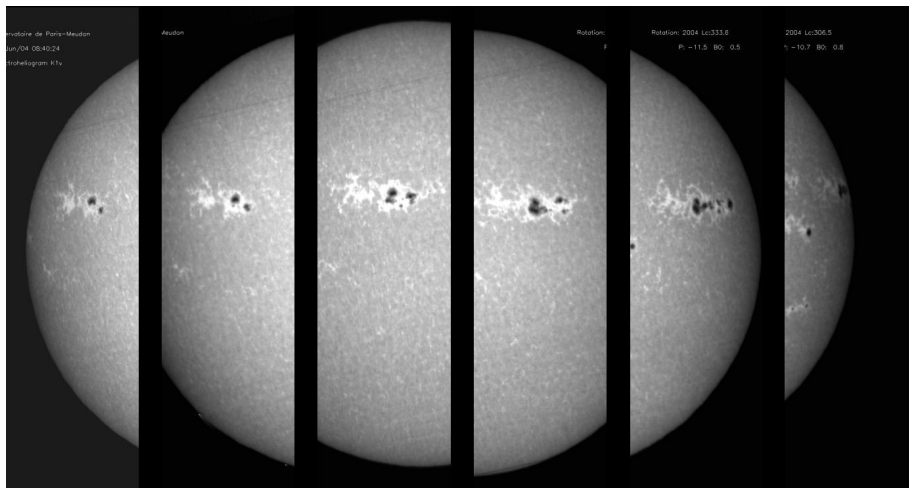
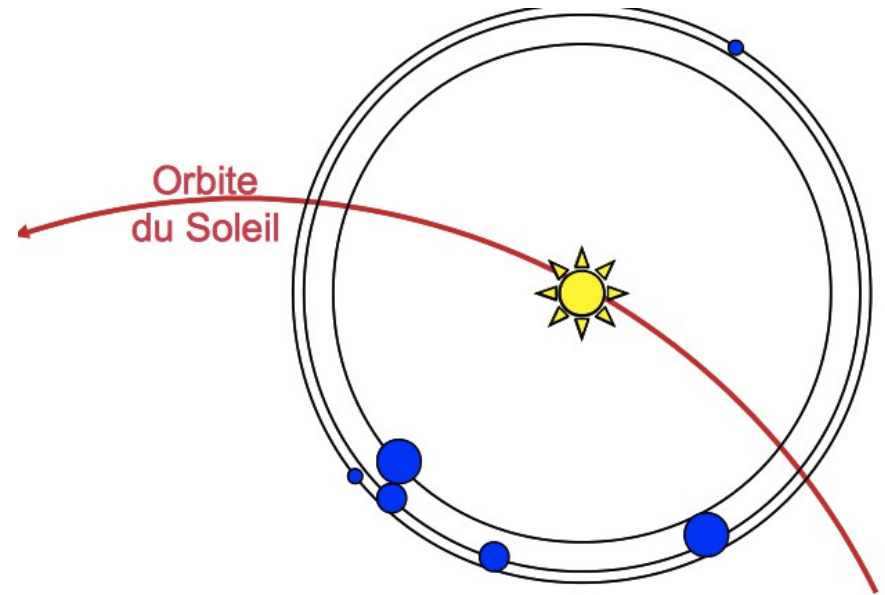
- Corps en orbite autour du Soleil (C. Scheiner, Jésuites)
- Galilée (*Dialogo*): phénomènes à la surface du Soleil



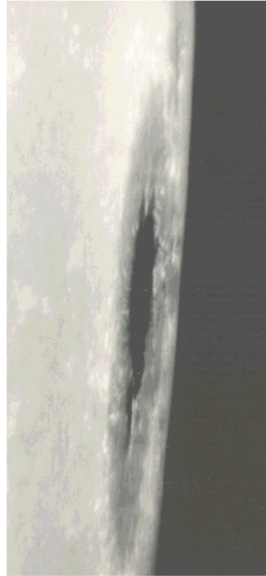
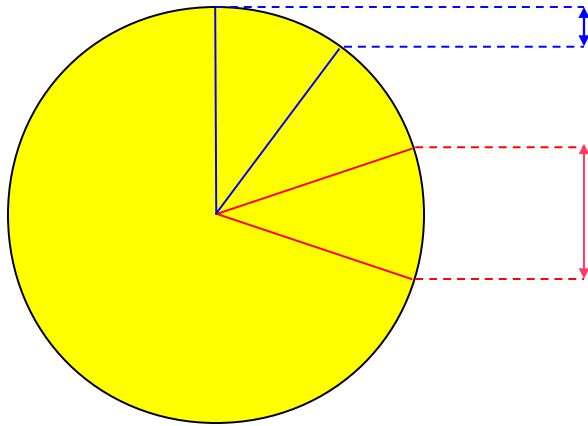
Galilée, 2 juin 1611

La nature des taches solaires (selon Scheiner)

- Corps opaques tournant autour du Soleil.
→ Changement visuel sans génération ou corruption
- A noter : abandon de l'idée que tous les « astres errants » tournent autour de la Terre !
→ modèle de Tycho Brahe

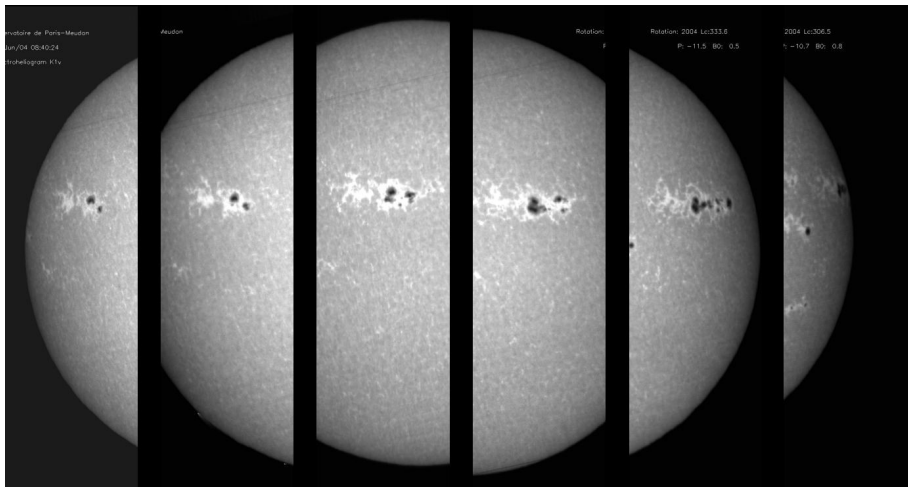


La nature des taches solaires (selon Galilée)



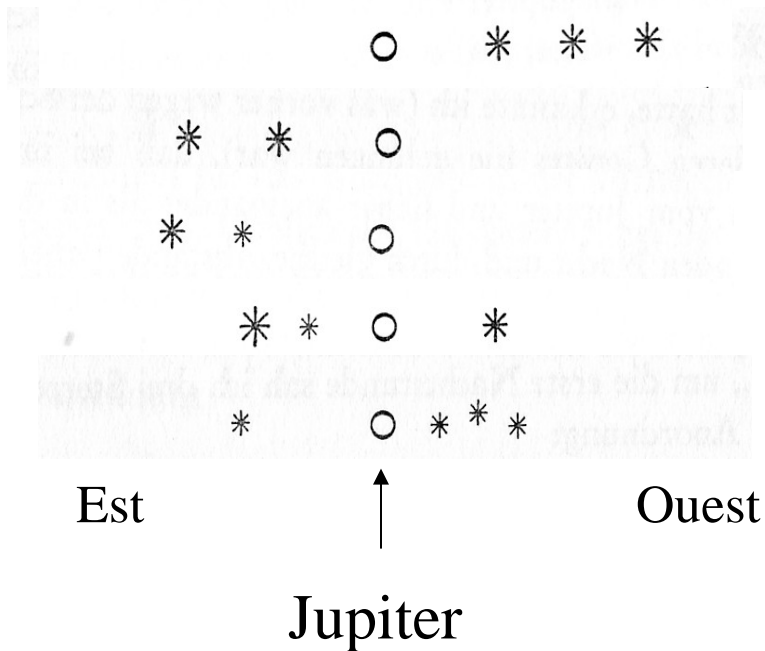
Phénomènes à la surface du Soleil :

- Les taches peuvent se former et se désagréger au milieu du disque solaire.
 - Les taches font partie de la surface du Soleil :
 - Déplacement plus lent près du bord qu'au centre du disque solaire;
 - Taches plus étroites près du bord qu'au centre du disque.
- Génération et corruption au Soleil, non seulement changement visuel.



Les incohérences du système géocentrique: les satellites de Jupiter (Galilée 1610)

Galilée, Le messenger céleste:



- Observation de Jupiter avec la lunette, plusieurs jours de suite
- Constat: astres alignés de part et d'autre, changent position de jour en jour
- Après des semaines d'observation : 4 astres, doivent être en orbite autour de Jupiter

Conclusion: il existe des astres qui ne tournent pas autour de la Terre !

Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



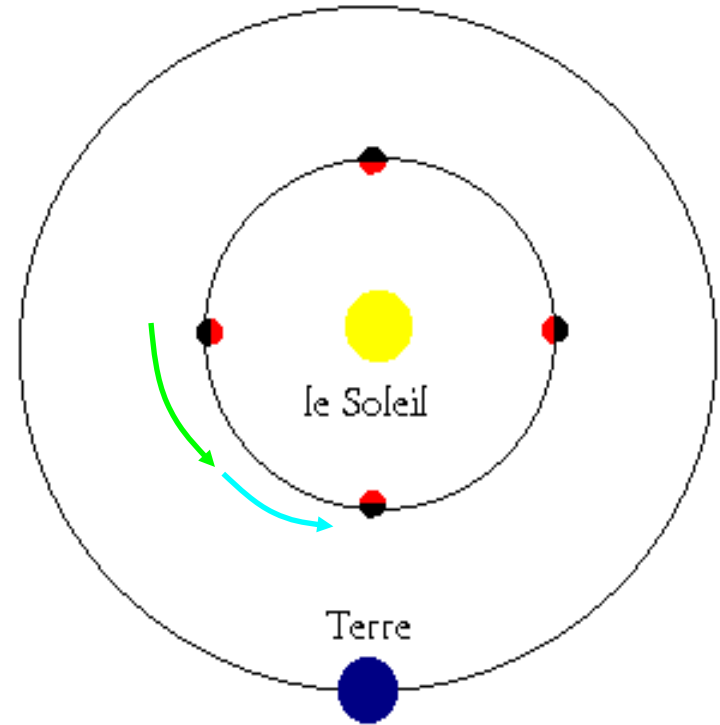
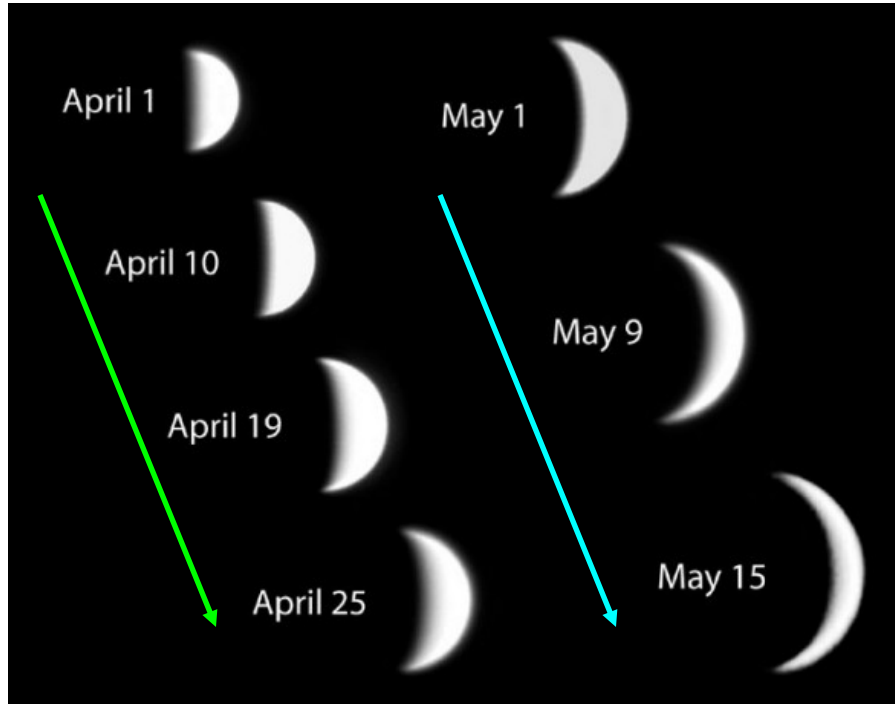
Les observations (Galilée, lettre à B. Castelli, 30/12/1610)

M. Clavelin, *Galilée Copernicien*, Albin Michel 2004



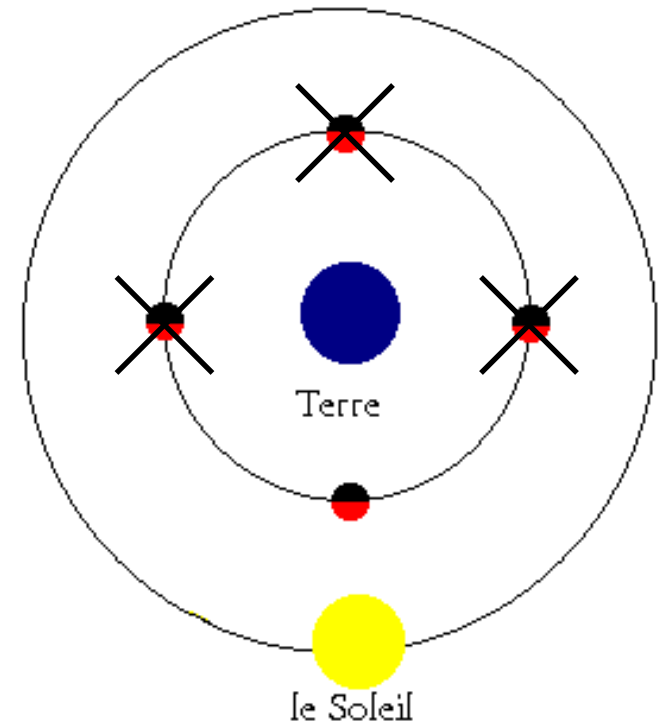
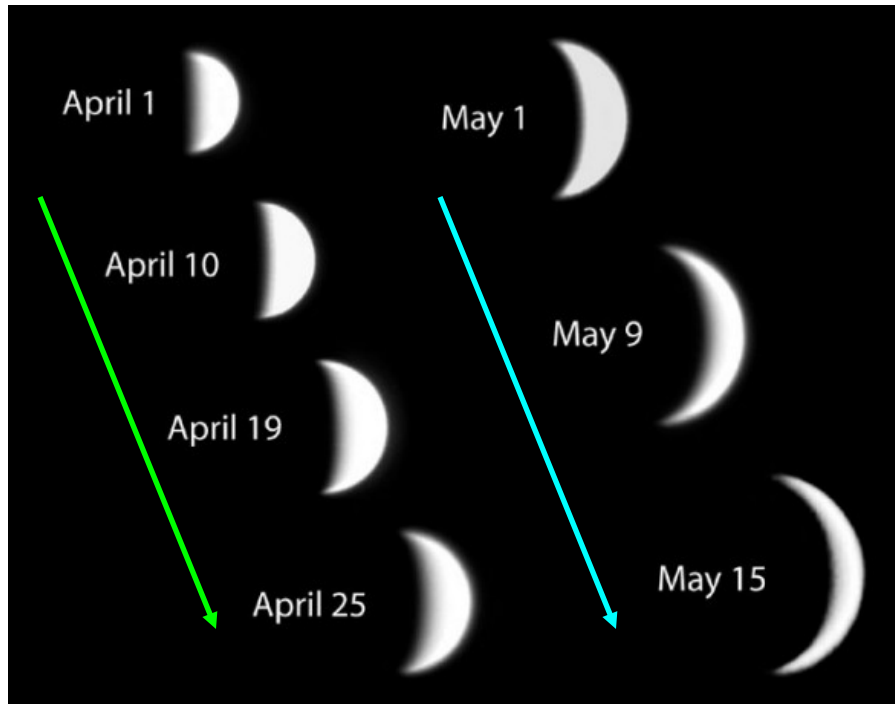
- 1^{ère} apparition Vénus le soir : ronde & petite
- Approche depuis quadrature (ici vers 01/04) : la moitié de Vénus tournée vers Soleil est éclairée, sa taille apparente augmente
- Puis (10 avril-15 mai): corne de plus en plus prononcée, taille augmente

Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



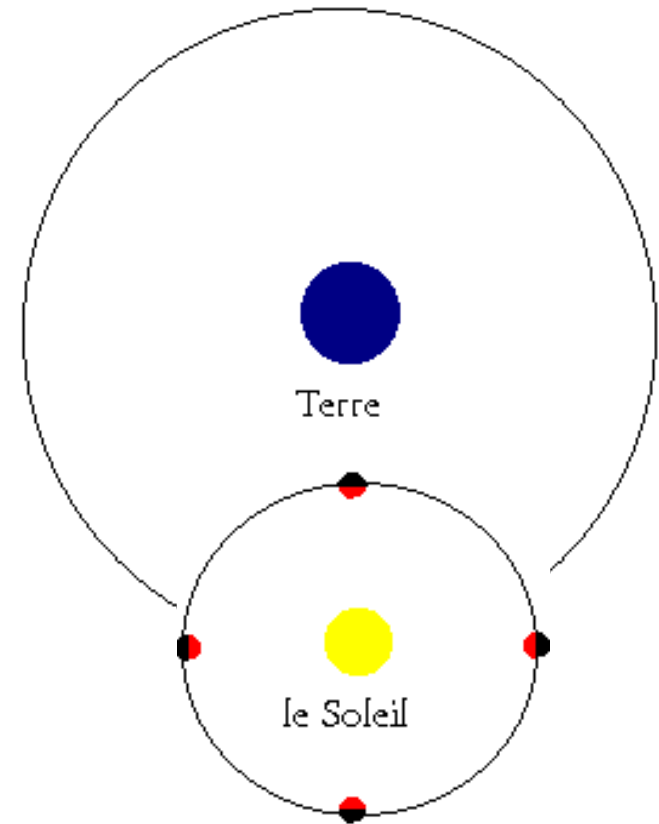
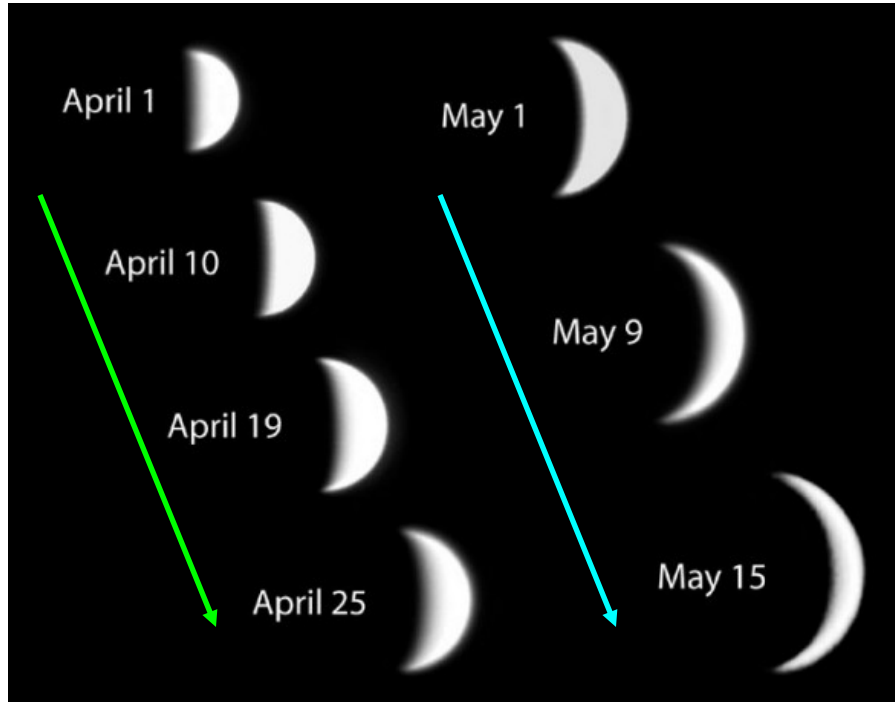
Interprétation héliocentrique actuelle : Vénus à l'intérieur de l'orbite de la Terre, les positions relatives Terre-Vénus-Soleil permettent de représenter toutes les observations.

Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



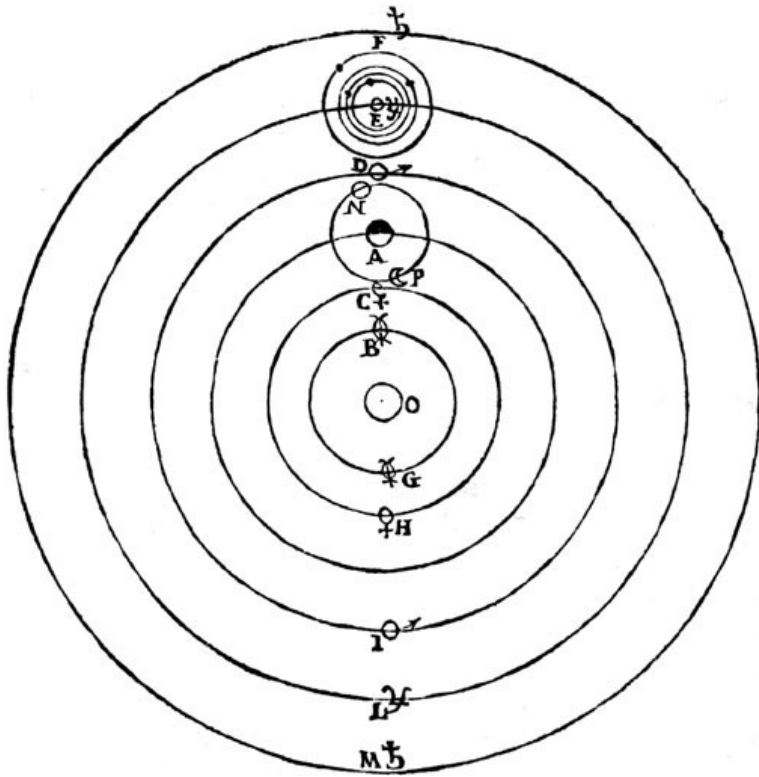
Interprétation géocentrique impossible : Vénus n'est jamais observée loin du Soleil; configurations géocentriques Terre-Vénus-Soleil ne permettent pas de voir différents éclairages de la planète !
(opposition et conjonction sont inversées en termes de phases)

Les incohérences du système géocentrique: les phases de Vénus (Galilée)



Une preuve du modèle héliocentrique ? Non, car un modèle géocentrique à la Tycho Brahe représente aussi les observations. Mais pas le modèle de Ptolémée !

Le système solaire selon Galilée



- Soleil au centre
- Terre + Lune
- Jupiter et ses satellites
- Mais : les orbites circulaires ne permettent pas de rendre compte des observations (Kepler) !

Résumé : d'Aristote au système héliocentrique

- **Système géocentrique de Ptolémée** : ensemble complexe d'orbites pour décrire les mouvements observés des astres par des orbites circulaires. Observation élément de la recherche astronomique.
- **Conflit astronomie - physique d'Aristote**
 - pas un problème pour Aristote qui considérait que le ciel était gouverné par des lois différentes de la physique de la sphère sub lunaire;
 - pas un problème pour Ptolémée qui considérait son modèle comme un outil de description et de calcul, pas comme un modèle physique
- **Développements au cours du Moyen-Âge** : monde arabe, Europe (scolastique) → critique d'Aristote.
- Copernic, *De la révolution des orbés célestes* (1543)
- **Nouveaux phénomènes** célestes & expériences de mécanique mettant en doute la physique d'Aristote.

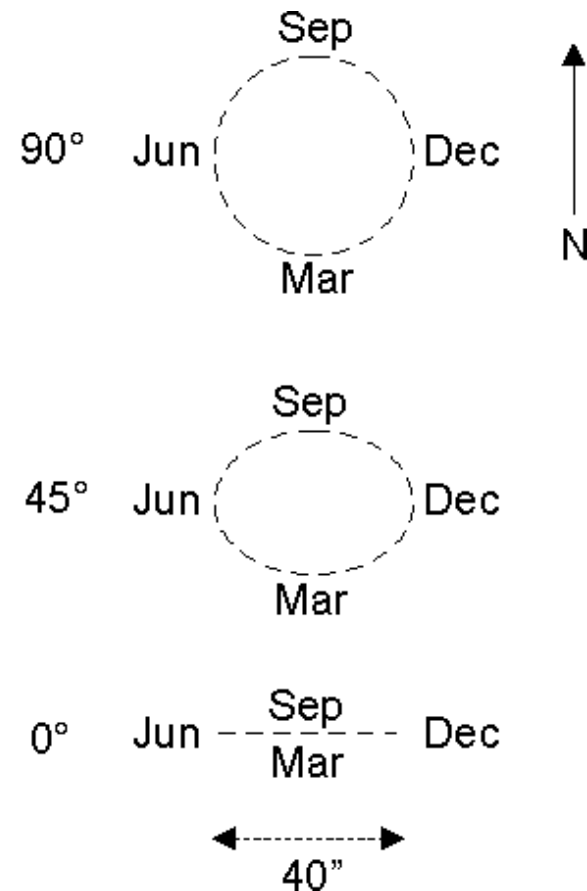
Des preuves du système héliocentrique ?

- 17^{ème} siècle : on note des faits qui le rendent plausible et qui sont en conflit avec le système géocentrique ou qui contredisent au moins la vue de Ptolémée (phases Vénus).
- Preuves du mouvement orbital de la Terre : aberration de la lumière (Bradley, 1727), parallaxe stellaire (Bessel, 1838).
- Preuves de la rotation de la Terre : aplatissement aux pôles (18^{ème} siècle), (mouvement inertiel du pendule - Foucault, 19^{ème}).

Annexe

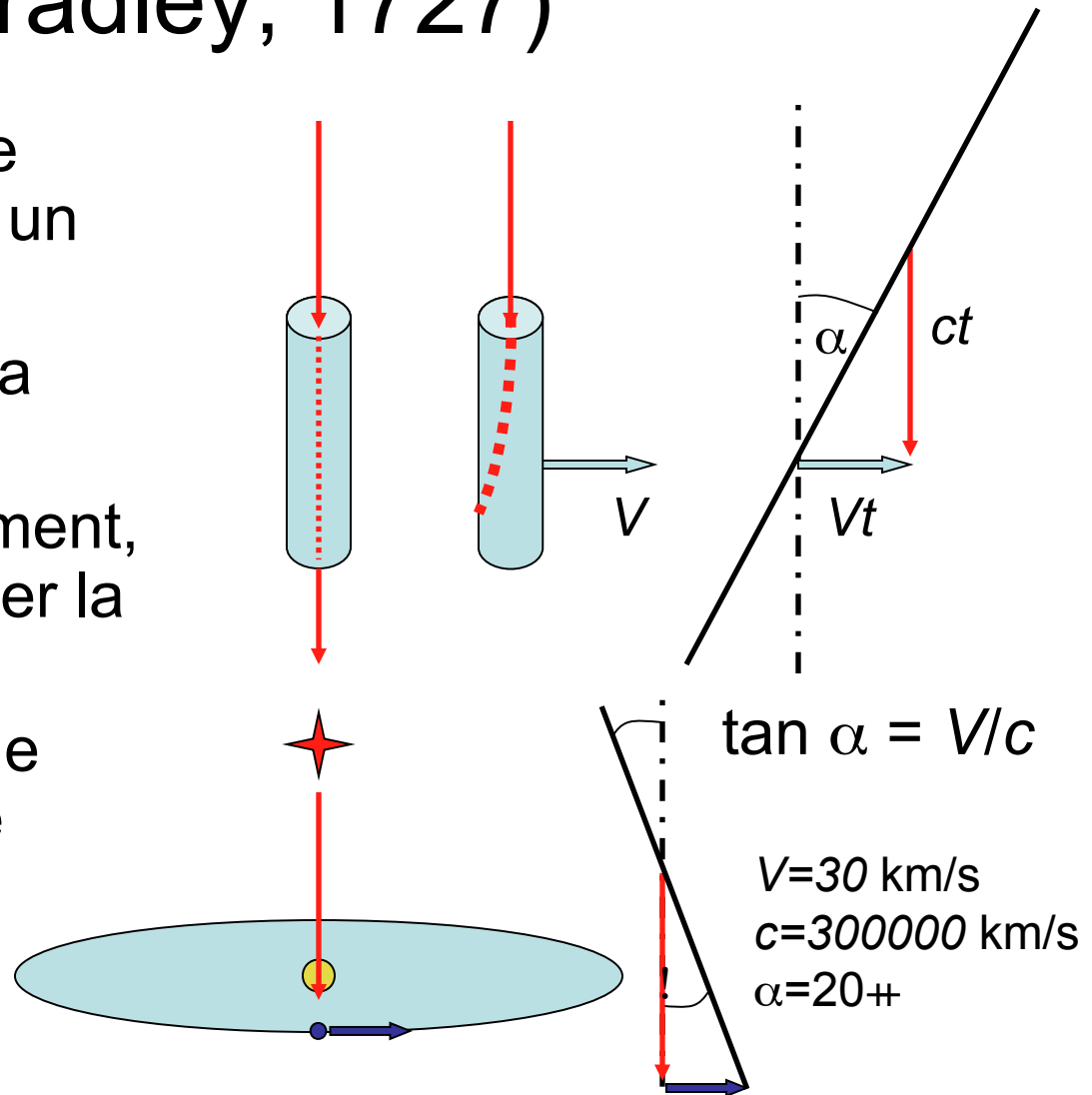
L'aberration de la lumière des étoiles (J. Bradley, 1727)

- Déplacement apparent des étoiles au cours de l'année
- Combinaison de la vitesse orbitale de la Terre (env. 30 km/s) avec la vitesse de la propagation de la lumière (env. 300000 km/s)



L'aberration de la lumière des étoiles (J. Bradley, 1727)

- Analogie : goutte de pluie tombant dans un tuyau vertical
- Si tuyau au repos, la goutte le traverse
- Si tuyau en mouvement, la goutte peut heurter la paroi
- Pour que la goutte le traverse : incliner le tuyau d'un angle !



L'aberration de la lumière des étoiles (J. Bradley, 1727)

- Analogie : goutte de pluie tombant dans un tuyau vertical
- Si tuyau au repos, la goutte le traverse
- Si tuyau en mouvement, la goutte peut heurter la paroi
- Pour que la goutte le traverse : incliner le tuyau d'un angle !

