

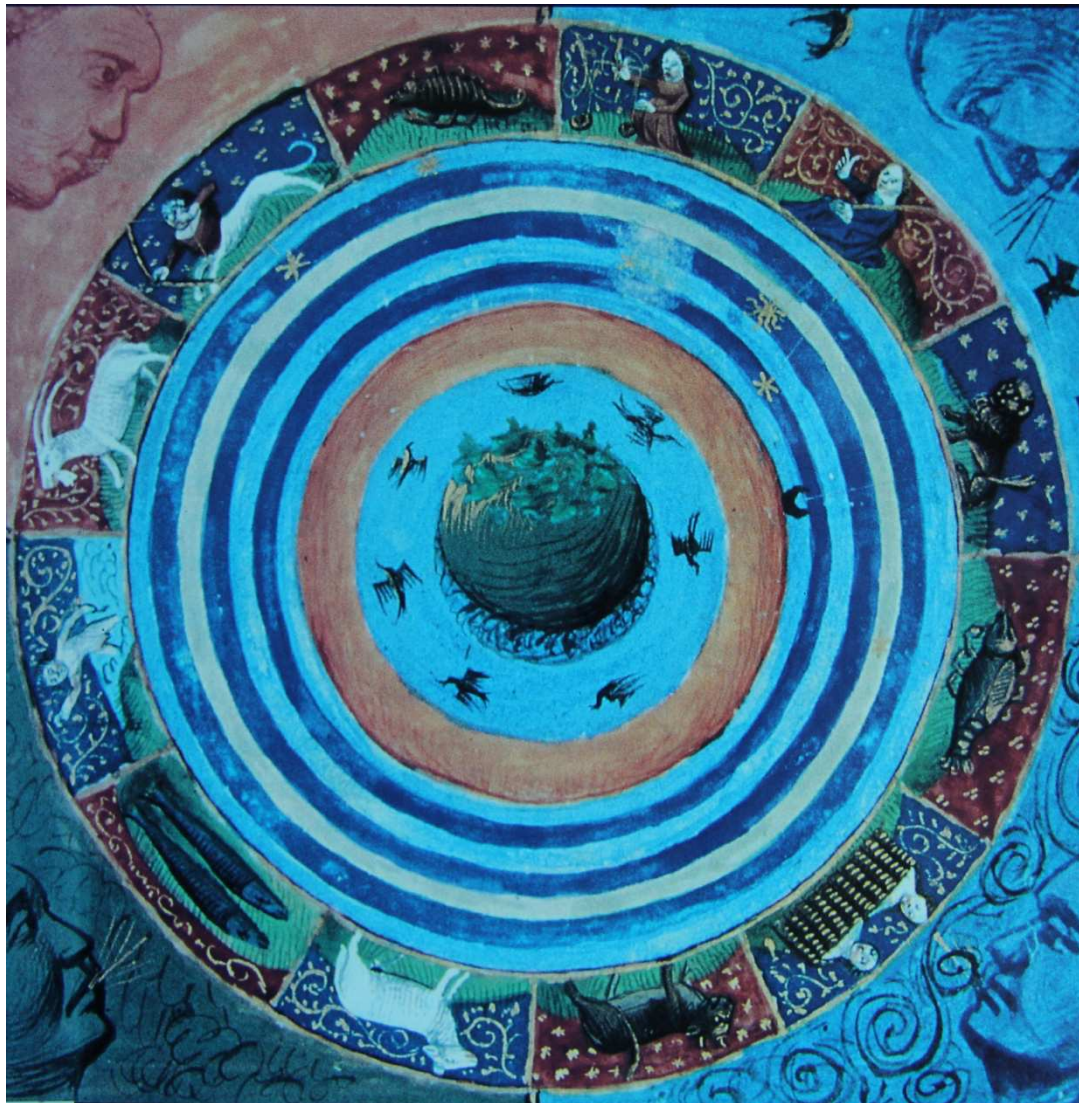
Les constantes astronomiques d'Aristarque à Halley

Présentation à l'OMIM

19/11/2013

Efthymios Nicolaidis

Le monde aristotélicien.
BN Ms Latin 7432, f. 209





La machine du monde géocentrique construite entre 1588 et 1593, sous la supervision d'Antonio Santucci à la demande de Ferdinand I de' Medici.

Museo Galileo, Firenze

Les dimensions du monde: les Grecs

- **Aristote (384-322 a. J.C.)**
- Idée qui vient de Platon que la circonférence de la terre est 400,000 stades.

- **Aristarchos (vers 310-230 av. J.C.), cité par Archimède**
- Utilise le diagramme des éclipses pour déterminer la taille de la lune et du soleil.
- Il trouve que Terre-Soleil / terre-lune $> 18/1 < 20/1$
- Diamètre soleil $> 19/3 < 46/6$ diamètre terre.
- Mais ne calcule pas les distances absolues.

- **Archimède (vers 287-212 av. J.C.)**
- *Arénaire* :
- **Unité: rayon terrestre (rt).**
- Estimation d'Archimède pour la circonférence terrestre: 300,000 stades.
- Stade d'Archimède? Peut-être env. 185 m.
- Terre-soleil 10,000 rt donc~ 300,000,000 stades
- Diamètre du Cosmos 100,000,000 rt

Les dimensions du monde: les Grecs

- **Eratosthène (vers 276-195 av. J.C.)**
- Mesure l'unité: le rayon terrestre.
- Syène – Alexandrie 5000 stades
- Ombre du stylet (obélisque) $1/50$ du cercle, donc circonférence $50 \times 5000 = 250,000$ stades. Stade ~ 157 m. (incertain).
- Donc circonférence terrestre. $\sim 39,250$ km.
- Rayon $\sim 40,000$ stades $\sim 6,280$ km.

- **Hipparchos (vers 190-120 av. JC)**
- Ptolémée dit qu'Hipparchos trouva que le diamètre du soleil est de 30 fois plus grand que celui de la plus petite étoile (?) et que le diamètre apparent de Venus est $1/10$ de celui du Soleil.
- Distance lune; périgée 71 rt, apogée 83rt
- Parallaxe solaire $7'$, donc distance Terre-soleil 490rt

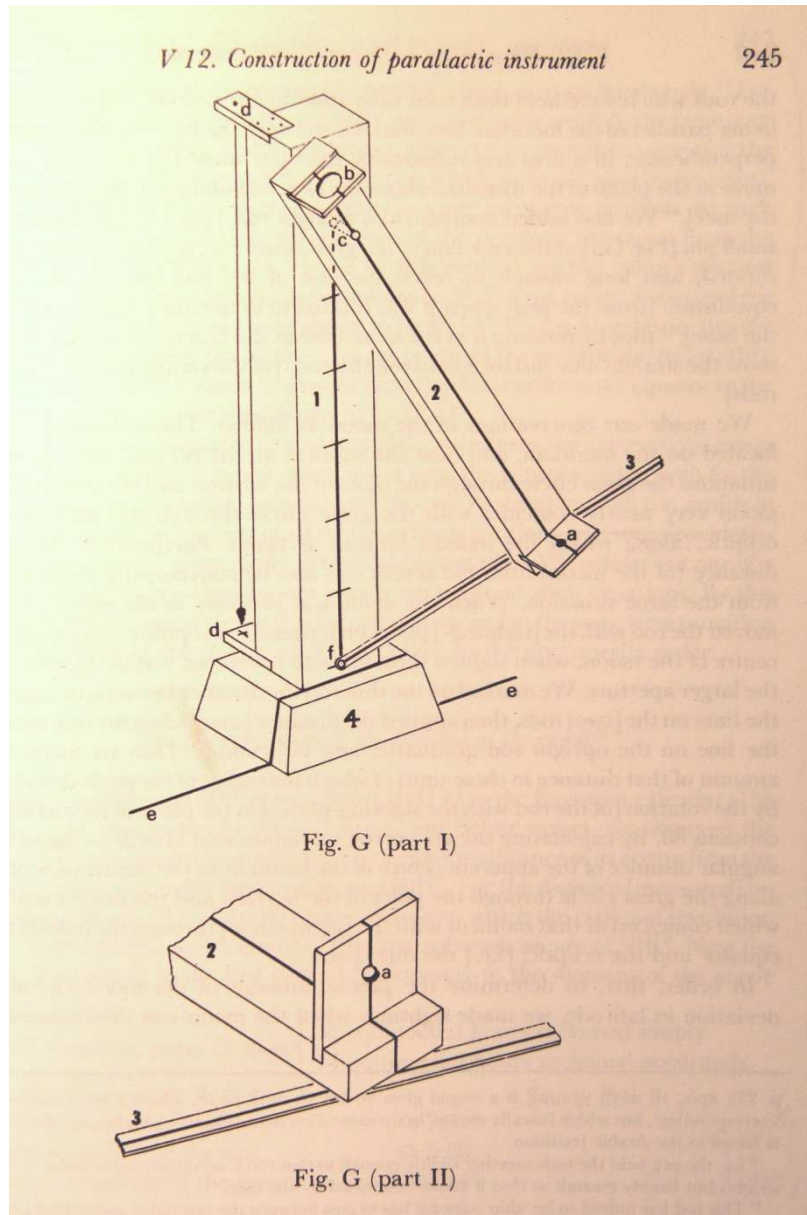
Les dimensions du monde: les Grecs

- **Posidonius (vers 140-50 av. JC)**
- Méthode grossière, il assume l'ombre de la terre un cylindre 2 fois plus grand que le diamètre lunaire apparent. Conclut que le diamètre lunaire $\frac{1}{2}$ terre, ou 40,000 stades
- Circonférence de l'orbite lunaire 30,000,000 stades et son rayon 5,000,000 stades (125rt)
- Terre soleil : deux cas :
- 1) Orbite solaire 10,000 circonférences terrestres donc terre-soleil 10,000rt
- 2) Soleil et lune se meuvent avec les mêmes vitesse linéaires donc terre-soleil 1,625 rt.

- **Ptolémée**
- *Hypothèses des planètes :*
- Rayon terre « deux myriades de stades plus un demi plus un tiers plus une part de 30 myriades de stades » = 28,667 stades
- Rayon du monde 569,643,333 stades ~ 19,871 rt

Les dimensions du monde : Ptolémée

Almageste, Livre 12: Instrument parallactique



- **5. 13 De la distance de la Lune**
- La plus grande distance aux syzygies 64;10 unités (unité=rt)
- Distance moyenne 59 unités. Rayon de l'épicycle 5;10 unités
- **5.14 Rapport des diamètres apparents du soleil, lune et ombre aux sygygies.**

Almageste, Livre 12

- **5. 15 De la distance du Soleil et autres conséquences de cette démonstration**
- En unités rayon Terre
- Distance moyenne de la Lune aux syzygies 59
- Rayon sphère du Soleil 1210. Distance min 1160rt max 1260rt.
- **5. 16 De la grandeur du Soleil, de la Lune et de la Terre**
- Unités rayon Terre
- Rayon Lune 0;17,33
- Soleil 5 ½ donc son volume 170 celui de la Terre

344 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΣΥΝΤΑΞΕΩΣ ΒΙΒΛΙΟΝ Ε.

la plus grande distance de la lune dans les syzygies est de $64 \frac{1}{2}$ fois le rayon de la terre regardé comme unité, la distance moyenne ayant été démontrée de 59 de ces rayons, et le rayon de l'épicycle de $5' 10''$, évaluons actuellement la distance du soleil.

τὸ κατὰ τὰς συζυγίας μέγιστον ἀπόστημα τῆς σελήνης τοιούτων ἐστὶ ξδ' εἰ, οἷου ἐστὶν ἐνός ἢ ἐκ τοῦ κέντρου τῆς γῆς, διὰ τὸ τὸ μὲν μέσον δεδειχθῆαι τῶν αὐτῶν νθ', τὴν δ' ἐκ τοῦ κέντρου τοῦ ἐπικύκλου εἰ, ἴδωμεν πηλίκον συνάγεται καὶ τὸ τοῦ ἡλίου ἀπόστημα.

Soient les grands cercles décrits dans un même plan: ABG sur le globe du soleil autour du centre D; EZH sur le globe de la lune dans sa plus grande distance, autour du centre T; KLM sur le globe terrestre autour du centre N. Quant aux plans qui passent par les centres, soient AXG le plan qui passe par les centres de la terre et du soleil, et ANG celui qui passe par les centres du soleil et de la lune, et supposons l'axe commun DTNX. Soient encore les droites qui passent par les contacts, et qui sont parallèles et sensiblement égales aux diamètres, ADG pour le soleil, ETH pour la lune, KNM pour la terre; et OPR pour l'ombre où la lune tombe dans sa plus grande distance, ensorte que TN soit égale à NP, et que chacune de ces droites soit de $64 10'$ des parties dont NL rayon de la terre n'en fait qu'une. Il s'agit de trouver quelle est la raison entre la droite ND de la distance du soleil, et le rayon NL de la terre.

Ἐσῶσαν γὰρ οἱ μέγιστοι καὶ ἐν πρῶτῳ ἐπιπέδῳ τῶν σφαιρῶν κύκλοι, τῆς μὲν ἡλιακῆς ὁ ABΓ περὶ κέντρον τὸ Δ, τῆς δὲ σεληνιακῆς κατὰ τὸ μέγιστον αὐτῆς ἀπόστημα ὁ EZH περὶ κέντρον τὸ Θ, τῆς δὲ κατὰ τὴν γῆν ὁ KAM περὶ κέντρον τὸ Ν· τῶν δὲ διὰ τῶν κέντρων ἐπιπέδων, τὸ μὲν τὴν γῆν καὶ τὸν ἥλιον περιλαμβάνον τὸ ΑΞΓ, τὸ δὲ τὸν ἥλιον καὶ τὴν σελήνην τὸ ΑΝΓ, καὶ ἄξων μὲν κοινὸς ὁ ΔΘΝΞ· αἱ δὲ διὰ τῶν ἐπαφῶν εὐθεῖαι παράλληλοι δηλονότι γιγνώσκονται, καὶ ταῖς διαμέτρους ἴσαι πρὸς αἰθέρισιν, τοῦ μὲν ἡλιακοῦ κύκλου ἢ ΑΔΓ, τοῦ δὲ σεληνιακοῦ ἢ ΕΘΗ, τοῦ δὲ τῆς γῆς ἢ ΚΝΜ, τοῦ δὲ τῆς σκιᾶς εἰς ἣν ἐμπίπτει κατὰ τὸ μέγιστον ἀπόστημα ἢ σελήνη, ἢ ΟΠΡ, ὥστε ἴσων εἶναι τὴν ΘΝ τῆ ΝΠ, καὶ ἑκατέραν τοιούτων ξδ' εἰ, οἷου ἐστὶν ἢ ΝΛ ἐκ τοῦ κέντρου τῆς γῆς ἐνός. Δεῖ δὲ εὐρεῖν ὅν ἔχει λόγον ἢ ΝΔ εὐθεῖα τοῦ ἡλιακοῦ ἀποστήματος πρὸς τὴν ΑΝ ἐκ τοῦ κέντρου τῆς γῆς.

Les dimensions du monde: les Arabes

- **Al-Farghani (vers 800-870)**
- *Résumé de l'Almageste*
- $R_t = \text{env. } 5229 \text{ km}$
- Soleil min 1120rt max 1220rt moyenne 1170rt
- Diamètre $5 \frac{1}{2} \text{ rt}$

- **Al Battani (vers 850-929)**
- Soleil min 8022rt, max 12924 rt, moyenne 10473 rt
- Diamètre $4 \frac{1}{3} \text{ rt}$
- Etoiles fixes: distance 19,000rt diamètre $4 \frac{2}{3} + \frac{1}{20} \text{ rt}$

- **Al-Urdi (+ 1266)**
- Considérations cosmologiques : pas de place entre Mercure et Soleil pour la sphère de Venus, donc Venus au-delà du soleil. La plus grande distance solaire est 1266rt donc la plus grande distance de Venus 8486rt donc la sphère de Mars s'éloigne etc.
- Rayon cosmos 140,147rt

Les dimensions du monde: l'Occident

- Rayon du Cosmos cité par l'évêque chrétien Hippolytus (3 c. ap. J.C.)
248,264,780 Stades ~ 5000 rt
- **Levi ben Gerson (1288-1344)**
- Mercure et Venus planètes extérieures, apogée de Venus 8,971,112 rt! (on les a jamais vu passer devant le soleil).
- Rayon du monde 159,651,513,380,944 rt! (on ne sais pas comment il déduit cela).
- **Peurbach (1423-1461)** défend l'ordre planétaire de Ptolémée en disant que comme le diamètre Venus 10 fois plus petit que celui du soleil le passage de venus n'obscurcirait que 1/100 de la surface solaire, donc aurait été passé inaperçu.

Les dimensions: les débuts de la science classique

- **Copernic (1473-1543)**
- Nouvelle unité: distance terre-soleil (u.a.).
- Moyenne 1, min 0,9678, max 1,0322
- $1 = 1,142r_t$
- Distance moyenne de Saturne 9.173 unités
- Il ne définit pas la distance des fixes.

- **Tycho (1546-1601)**
- Distance moyenne soleil $1,150r_t$ diamètre $5 \frac{14}{75}$
- Etoiles $14,000r_t$

Les dimensions: le jeune Kepler

- Distances planétaires vraies et prédites dans *Mysterium Cosmographicum*
- Dans *De Stella nova in pede serpentarii* (1606):
- Distance solaire 1,432 rt (parallaxe de 2' 14'')
- Diamètre soleil 6rt
- sphère saturne 10 a.u (14,320rt)
- Fixes 34,177,066 2/3 rt
- Rayon terre = 860 Miles allemands (d'après son maître Maestlin), env. 6450 km.

Young Kepler *

59

TABLE 8 Kepler's Actual and Predicted Planetary Distances in *Mysterium Cosmographicum*

Planet		Relative Distance in a.u. ^a			
		(1) According to Copernicus & Reinhold	(2) True Heliocentric	(3) Predicted by Regular Solids	(4) Prediction with Moon Included
Saturn	max.	9.7000	9.9875	10.5989	11.3044
	min.	8.6500	8.3417	8.8522	9.4406
Jupiter	max.	5.4581	5.4925	5.1108	5.4506
	min.	4.9803	4.9994	4.6522	4.9606
Mars	max.	1.6656	1.6478	1.5506	1.6536
	min.	1.3739	1.3931	1.3108	1.3978
Earth	max.	1.0000	1.0417	1.0417	1.1017
	min.	1.0000	0.9583	0.9583	0.8983
Venus	max.	0.7611	0.7414	0.7614	0.7139
	min.	0.6778	0.6964	0.7153	0.6706
Mercury	max.	0.4900	0.4886	0.5058	0.4742
	min.	0.3006	0.2333	0.2333	0.2186
Sun	max.	0.0417 ^b	—	—	—
	min.	0.0323 ^b	—	—	—

^aKepler gives the distances in sexagesimal numbers.

^bThese are the maximum and minimum values for the solar eccentricity according to Copernicus (*De Revolutionibus*, chaps. 3, 16).

Kepler après l'*Astronomia Nova* (1609)

En 1618 après étude des observations de Tycho:

(Tables: Albert van Helden, *Measuring the Universe. Cosmic dimensions from Aristarchus to Halley*, The University of Chicago Press, 1985)

Kepler's Synthesis *

81

TABLE 10 Heliocentric Distances of the Planets Based on Tycho's Observations and Elliptical Orbits

Planet	Distance from the Sun in a.u.		
	Least	Mean	Greatest
Mercury	0.307	0.389	0.470
Venus	0.719	0.724	0.729
Earth	0.982	1.000	1.018
Mars	1.382	1.523	1.665
Jupiter	4.949	5.200	5.451
Saturn	8.968	9.510	10.052

Kepler après l'*Astronomia Nova*

- Il trouve d'autres rapports par la suite, dans *Harminices Mundi* (1619)
- Distance solaire dans *HM*
- 3,469 $\frac{1}{3}$ rt
- Rayon 15 rt (nouvelle détermination)
- Idées de Kepler dans correspondances etc:
- Rayon de la sphère de Saturne moyenne proportionnelle du rayon du soleil et celui de la sphère des étoiles.
- Du diamètre apparent du soleil il s'ensuit qu'est contenu 229 fois dans le rayon de la sphère terrestre ($\sin 15' = 1/229$).
- Saturne 10 fois plus éloigné du soleil que la Terre, donc rayon de sa sphère $\sim 2,000$ rayons solaires (229×10). Donc sphère des fixes 2000^2 ou 4,000,000 r soleil ou ($\times 15$) 60,000,000rt.
- Calcule l'épaisseur de la sphère des fixes 2 miles allemands (env. 15 km).
- Soleil beaucoup plus grand que les étoiles. Chose prouvée par le télescope (selon les observateurs habiles les étoiles apparaissent comme des point d'où partent des rayons lumineux).

Les dimensions: le 17^e s.

- **Gassendi**
- En préparant les éphémérides 1629-36 des tables rudolphines, Kepler et son assistant Jacob Bartsch trouvent qu'en nov. 1631 passage de Mercure et déc. 1631 de Venus.
- Selon Kepler, Venus apparaîtrait $\sim \frac{1}{4}$ du diamètre apparent du soleil. IL ne prédit pas le diam. apparent de Mercure, mais grand.
- Gassendi observe le passage de Mercure le 6 nov. et à sa grande surprise le trouve tout petit. Johannes Remus l'observe aussi et mesure sa tache 18'' au lieu de env. 2' attendu par Kepler.
- Petitesse des planètes très paradoxale pour tous, sauf Galilée.
- **Martinus Hortensius** (Martin van den Hove) (1605-1639) Diamètres apparents des planètes et tailles: de l'ordre du dizaines de seconde d'arc et tailles (rayons) variant de 1/18 Terre (Mercure) à 1.3 Terre (Saturne).
- Diam.apparents étoiles: Sirius 10'' et les autres étoiles de 8'' à 2''.
- Parallaxe stellaire 1', dist. 6875 u.a et diam. Sirius 1/3 u.a
- **Landsberge** parallaxe stellaire 15''. Distance aux étoiles 28,000 u.a Sirius diam. 1 1/3 u.a.

Wenderlin

Le premier à s'éloigner de idées reçues.

1644 analysant des éclipses lunaires: distance solaire 14,656 rt .

Parallaxe solaire beaucoup plus petit que jusqu'alors, de l'ordre de 15''.

Riccioli: *Almagestum novum*, 1651.

Distance solaire moyenne 7,300 rt.

Distance aux étoiles 200,000rt

Rayon terre 3,459,565 toises (plus grand de 3,280 toises de celui trouvé par JD Cassini). Toise env. 1,949 m.

TABLE 14 Riccioli's Scheme of Sizes and Distances

Planet	Apparent Diameter		Distance (e.r.)		Diameter (Earth = 1)	Volume (Earth = 1)
	Apogee	Perigee	Apogee	Perigee		
Mercury	9"20'''	25"12'''	4,087	10,868	1/4	1 1/256
Venus	33"30'''	4' 8"	1,917	12,919	1 5/100	1 1/2
Mars	10" 6'''	1' 32"	2,373	21,005	5 2/100	1 4/100
Jupiter	38"18'''	1' 8"46'''	26,441	47,552	8 4/5 ^a	685
Saturn ^b	46"	1' 12"	57,743	90,155	20 1/6 ^a	891

^aIn calculating the actual diameters of Jupiter and Saturn, Riccioli erred by a factor of 2. Jupiter's actual diameter should be 4 2/5 the Earth's, and Saturn's 10 1/2. The volumes should be 86 and 112.

^bThe measures for Saturn's apparent diameters and actual diameter include the ansae, i.e., rings. The volume, however, is for the planet's body only.

Huygens (micromètre)

Systema Saturnium 1659 :

Proportions des planètes au soleil :

Venus 1/84, Mars 1/166, Jupiter 2/11, Saturne 5/37.

6 planètes + 6 satellites (4 Jupiter, Titan de Saturne découvert par Huygens, lune), donc 2 fois le nombre parfait $6=1+2+3$.

TABLE 15 Comparative Accuracy of Huygens's Apparent Planetary Diameters at Perigee

Planet	Modern	Hortensius	Horrocks	Riccioli	Huygens
Venus	64"	100" (56%)	76" (19%)	248" (288%)	85" (33%)
Mars	25"	64" (156%)	120" (380%)	92" (268%)	30" (20%)
Jupiter	49"	62" (27%)	60" (22%)	69" (41%)	64" (31%)
Saturn	22"	42" (91%)	30"-60"	48" (118%)	30" (36%)

Jean Picard (1620-1682) et John Flamsteed (1646 -1719)

Le micromètre à vis

The Micrometer from Huygens to Flamsteed *

127

TABLE 18 Flamsteed's Apparent Diameters

Planet		Flamsteed	Modern	% Error
Venus	min.	10" 21'''	9.9"	4.5
	max.	1' 12" 16'''	1' 4.0"	12.9
Mars	min.	4" 48'''	3.5"	37.1
	max.	34" 24'''	25.1"	37.1
Jupiter	min.	34" 16'''	30.5"	12.3
	max.	53" 50'''	49.8"	8.1
Saturn	min.	19" 10'''	14.7"	30.4
	max.	26" 36'''	20.5"	29.8

N.B.: Flamsteed's actual measurements were to the nearest half or third of a second. The thirds given here are the results of his calculations.

Les dimensions: après Cayenne (1672)

- JD Cassini: parallaxe Mars $\sim 25''$; solaire $9.5''$; distance solaire $\sim 22,000r_t$ (env. 134,000,000 km).
- Cassini avait à sa disposition une grande série de mesures et aurait pu déterminer d'autres valeurs. Mais il essaya d'éliminer les erreurs de la théorie du soleil en trouvant une meilleure combinaison parallaxe-correction due à la réfraction.
- À Cayenne Jean Richer fut chargé de déterminer:
 - Vrai valeur de l'écliptique
 - Mouvements des équinoxes
 - Parallaxes soleil, Venus, Mars
 - Mouvement et parallaxe lunaire
 - Mouvement Mercure
 - Déclinaison, ascension droite, magnitude des étoiles Sud qui n'apparaissent pas au ciel parisien.
- Fontenelle dans ses *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) utilise les grandeurs et distances de Ptolémée. Il ne corrige qu'à la 6^e édition en 1708, quand il est secrétaire perpétuel de l'Académie.

Précession des équinoxes et trépidation chez Hipparchos

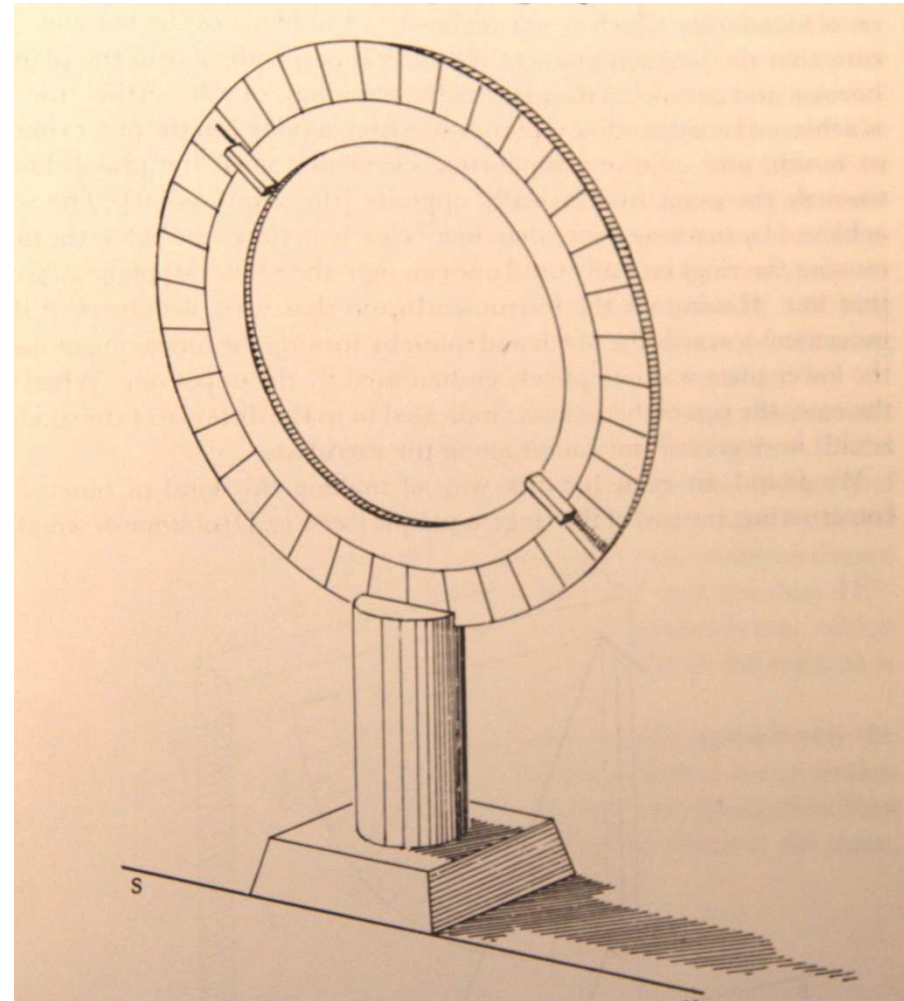
- (v. Otto Neugebauer, A history of Ancient Mathematical Astronomy, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1975).
- Hipparchos estime la longueur de l'année sidérale:
- $365 \frac{1}{4} \frac{1}{144}$ jours = $365;15,25^j$ en assumant 1° pour 100 ans la constante de la précession en combinaison avec $365;14,48$ pour l'année tropique.
- Mais pour lui 1° n'était que la limite inférieure. Ptolémée mentionne que dans la théorie de la lune d'Hipparchos $126007^j 1^h = 345$ rotations sidérales du soleil – $7;30^\circ$ ou (en sex.) $35,0,7;30^j = 5,44;58,45$ Rot. Sid.
- Donc 1 Rot. Sid. = $365;15,35,29,28\dots^j = 365 \frac{1}{4} \frac{1}{100}$... pour la durée de l'année sidérale.
- Sid. - trop. = $\Delta t = 365;15,35,29 - 365;14,48 = 0;0,47,29^j$
- Ce qui requiert un mouvement du soleil de:
- $0;0,47,29 \times 0;59,8 = 0;0,46,47,51^\circ$
- Donc précession par an $0;0,46,48^\circ$ ou 1° pour 77 années égyptiennes.

Précession des équinoxes et trépidation chez Hipparchos

- Nous savons que dans l'astronomie pro-ptolémaïque il y a une théorie de changement périodique rapportée par Théon, nommée "trépidation". Cette théorie ancienne suppose que la précession annuelle est de $0;0,45^\circ$ ou 1° en 80 années égyptiennes.
- La variation périodique de la longitude sidérale λ du point vernal est supposée de suivre une fonction linéaire en zigzag avec un max de $\lambda = 8^\circ$ à l'ère d'Auguste -127 coïncidant avec les recherches de Hipparchos. Il semble que ce serait Hipparchos l'inventeur de la trépidation.
- (Theodor S. Jacobsen, *Planetary systems from the Ancient Greeks to Kepler*, Dpt of astronomy, Un of Washington, and The University of Washington Press, 1999):
- Hipparchos discute des erreurs et de la précision des observations:
- Exactitude de l'année tropique: il dit que l'heure du solstice peut être erronée de $3/4$ de jour et de l'équinoxe de $1/4$ de jour donc erreur possible de $1 \frac{1}{2}$ jours pour une période de 150 ans ou 15 mn / an.
- En réalité son année n'était que 6mn trop longue.

Obliquité de l'écliptique chez Ptolémée

- **Almageste 1. 12 (de l'arc entre les solstices)**
- En comparant des observations près des solstices il s'est révélé que, après un certain nombre de retours du soleil l'arc entre la position la plus au nord et la plus au sud est $> 47 \frac{2}{3}^\circ$ et $< 47 \frac{3}{4}^\circ$
- Moyenne divisée par 2 donne la valeur de $\sim 23'51,15^\circ$
- Ptolémée utilise $23;51,20^\circ$ qui est entre les 2 valeurs qu'il donne mais pas la moyenne.
- Ptolémée dit que cette valeur a été adoptée avant lui par Ératosthène et Hipparque.
- Instrument utilisé; anneaux de bronze, le petit coulisse dans le grand. (ed. *Almageste* de Toomer).



Obliquité de l'écliptique et précession chez Ptolémée

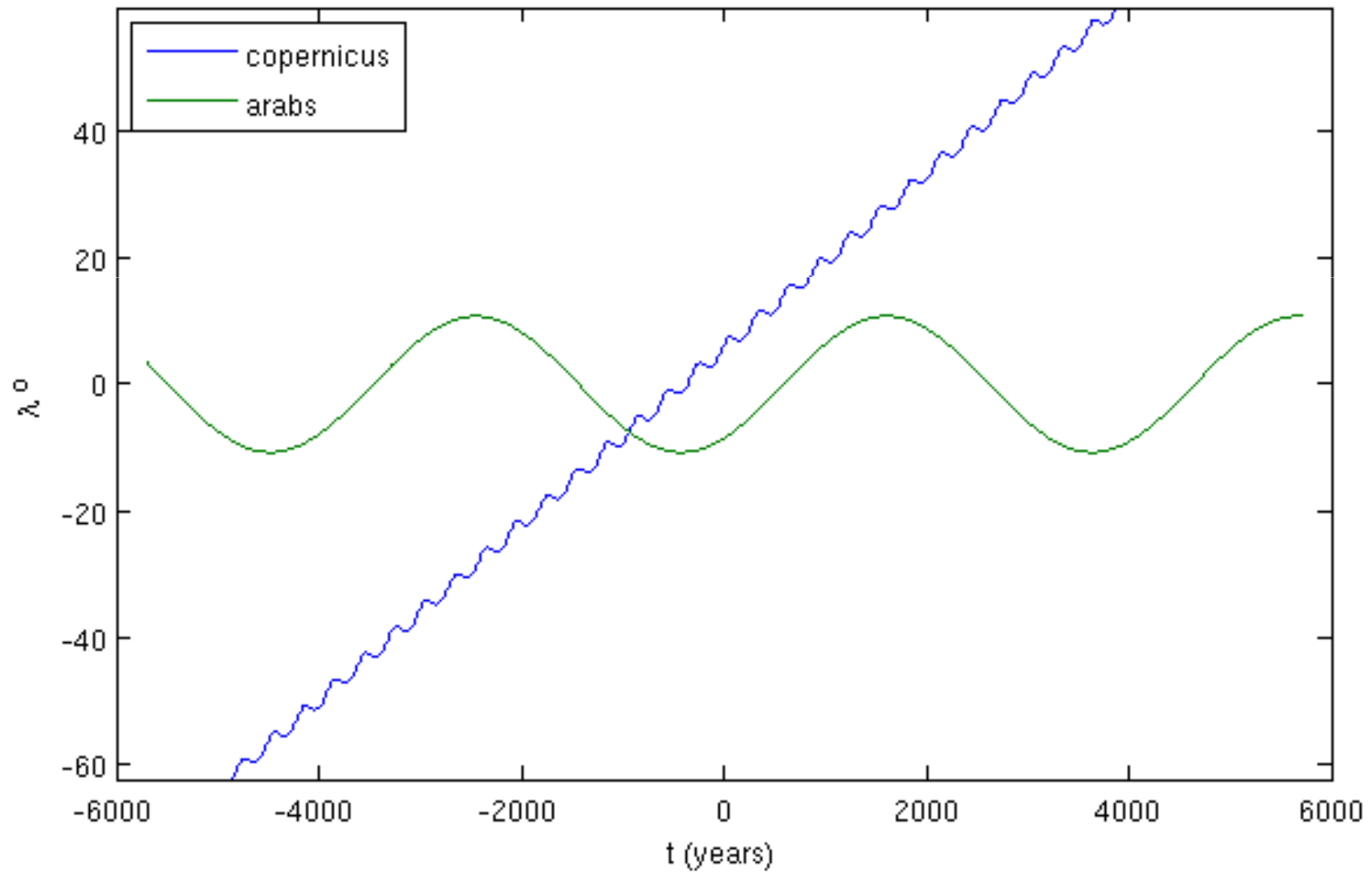
- Erreurs dans Ptolémée (N. M. Sverdllov "Tycho, Longomontanus, and Kepler on Ptolemy's Solar Observations and Theory, Precession of the Equinoxes, and Obliquity of the Ecliptic" in A. Jones *Ptolemy in perspective*, Springer, 2010, p 151-202).
- Φ d'Alexandrie = 30;58° (lat. correcte = 31;13°).
- Conséquence: l'altitude méridienne de l'équateur céleste trop haute de 0;15° , environ 15 heures dans le mvt du soleil en déclinaison et 0;37° en latitude près des équinoxes et une erreur de 0;15 pour toute l'écliptique. Obliquité de l'écliptique = 23;51,20° (calcul moderne pour l'an 140: 23;40,39°).
- Date des observations équinoxiales et du solstice d'été de 21 à 36 h trop tard.
- Conséquence: Elles confirment exactement l'année tropique de Hipparchos qui est trop longue de 0;6,26 heures. Cela affecte la longitude moyenne du soleil et donc indirectement les planètes.
- Résultat de l'erreur dans la longitude moyenne du soleil: la longitude des étoiles fixes ont une erreur systématique de 1°. Donc la différence de longitude des étoiles des 265 ans d'Hipparchos à Ptolémée est de 2;40° au lieu de plus de 3;40° et la précession de 1° / siècle.
- **Théon** (4^e s.) dans les *Tables faciles* : « des astrologues disent que la sphère des fixes se meut 1° les 80 ans et quand elle a fait 80° elle change de direction ». Mais il suit Ptolémée.

.

Obliquité de l'écliptique et précession: les Arabes

- Les Arabes ont trouvé l'obliquité de l'écliptique plus petite, l'année tropicale plus courte, l'excentricité du soleil plus petite et le mvt des fixes plus rapide.
- 2 solutions:
- 1) Al Battani (vers 858-929); accepte les nouveaux paramètres et corrige Ptolémée. Thabit ibn Qurra (826-901) dit que les observations de Hipparchos sont meilleures.
- 2) Les paramètres ont changé, donc développement d'un modèle complexe pour les variations de longue durée. Mvt non uniforme de la 8e sphère.
- *De motu octavae sphaerae* (faussement attribué à Thabit) est suivi par les Tables tolédanes; réelle diminution de l'Obliquité de l'écliptique + variation du taux de la précession.
- Équation en longitude du point équinoxial printanier de cette théorie:
- **$\sin \lambda = \sin 10^\circ 45' \sin (360^\circ (t-622)/4057 \text{ ans}) + 1^\circ 34' 2''$** (t calendrier Jullien; original dans calendrier hégirien).

Équation en longitude du point équinoxial printanier dans *De motu octavae sphaerae*



Obliquité de l'écliptique et précession: les Arabes

- **Al-Farghânî** (vers 800-870) utilise Ptolémée comme source unique mais le corrige en certains points suivant les résultats des astronomes de al-Ma'mûn comme la correction de l'obliquité de l'écliptique de 23;51 à 23;33
- En 994 **al-Khujandî** a mesuré l'obliquité de l'écliptique à Ravi (12km Sud de Téhéran). Il a observé avec un grand sextant fondé sur le principe de la chambre noire: une chambre obscure avec une petite ouverture (Encyclopedia of the history of Arabic science, vol 1, Astronomy-theoretical and applied, ed by Roshdi Rashed, Routledge, London and New York, 1996 ; Régis Morelon, Eastern Arabic astronomy)
- **Ibn al-Haytham** (vers 965-1040) s'oppose à la méthode de Ptolémée pour la détermination de l'inclinaison de l'écliptique. Il dit qu'il a observé le soleil le long du méridien et trouva la différence entre le plus haut point au solstice d'été et sa position au solstice d'hiver de 47° + une valeur plus grande que $2/3^\circ$ et plus petite que $1/2^\circ + 1/4^\circ$.
- Il dit que les solstices n'arrivent pas nécessairement quand le soleil traverse le méridien et que Ptolémée le savait. Il conclut que ni l'année solaire, ni le point équinoxial ni la déclinaison ne sont connus par Ptolémée et que la preuve est que les astronomes modernes les ont trouvés différents (*George Saliba, Arabic planetary theories*)

Obliquité de l'écliptique et précession: l'Occident

- Dans les Tables alphonsines un mvt non uniforme est adopté mais seulement dans les tablés, non dans le modèle. Dans le *Theoricae novae planetarum* Peurbach explique son propre modèle pour les Tables alphonsines. Regiomontanus considère les deux théories fausses.
- Copernic a un modèle cohérent fondé sur les mvts de la Terre et non du soleil et des fixes.
- Les paramètres de Copernic sont inclus dans les Tables pruténiques de Reinhold (1551) base des éphémérides du 16^e et début 17^e s. Le modèle de Copernic est adapté à la théorie géocentrique par Giovanni Magini en transférant les mvts de la Terre à la sphère des fixes et au soleil.

Obliquité de l'écliptique et précession: Copernic

- Theodor S. Jacobsen, Planetary systems from the Ancient Greeks to Kepler, Dpt of astronomy, Un of Washington, and The University of Washington Press, 1999.
- **Estimations de Copernic:**
- Il se fonde sur des observations de la position de Spica :
- Timocharis -293
- Hipparchos -127 1° en 72 ans 50''/an
- Hipparchos
- Menelaus +98 1° en 100 ans 36''
- Menelaus
- Ptolémée +138 1° in 86 years 42''
- Ptolémée
- Al-Battani 880 1° en 66 ans 54''
- Al-BAttani
- Copernic 1525 1° en 70 ans 51''
- Il en déduit un minimum vers 64 av JC et un max vers 794 ap JC (Ces résultats sont erronés)
- Il explique ces 2 résultats par un mécanisme qui graduellement change la direction de l'axe de la rotation de la terre.
- Variation de 24' de l'inclinaison de l'écliptique décrite par une sinusoïde de période de 3434 années, amplitude 12' et valeur min 23° 28' en 64 av JC.
- Déviation de la position des équinoxes relative à celle donnée par une précession constante. Fluctuation sinusoïdale en longitude, amplitude 28' , période 1717 ans centré sur le point du cercle colure solsticial déterminé par la projection du 1^{er} mouvement. Mvt aussi en latitude.
- *Copernic croit à une précession uniforme superposée par une petite trépidation ou mieux oscillation.*
- Formule de Copernic pour la différence de longitude de Aries (α Arietis) de l'équinoxe vernal:
- $\lambda = 5^{\circ}32' + 50.2''T + 70' \sin (0.02096^{\circ}T + 13.2^{\circ})$ (période 1717 ans)
- T année tropique de 1 ap. J.C.
- Formule de Copernic pour l'inclinaison de l'écliptique :
- $E = 23^{\circ}40' + 12' \cos (0.1048^{\circ}T + 6.75^{\circ})$ (Période 3434 ans)
- Valeur séculaire de la précession de Copernic : 1° / 72 ans (période 25816 ans)

Obliquité de l'écliptique et précession: Tycho Brahé

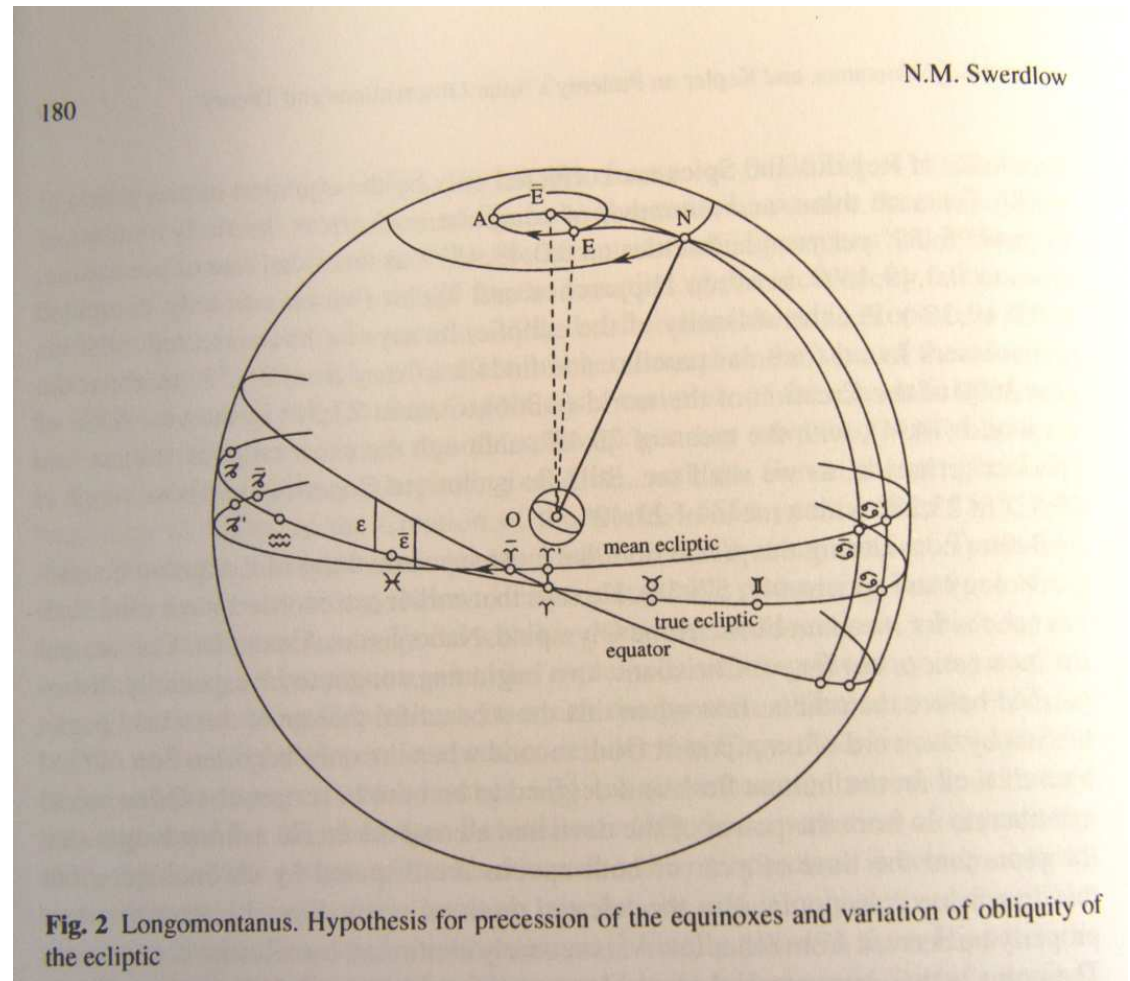
- (Sverdlov p. 154-171)
- Tycho croit que l'obliquité de l'écliptique décroît depuis l'antiquité.
- En 1584 il trouve sa valeur définitive : $23;31,30^\circ$
- Il croit comme Copernic que la durée de l'année tropique a aussi varié depuis l'antiquité:
- De Hipparchos à Ptolémée 365j 5;55,12h 365;14,48j
- De Ptolémée à al-Battani 365j 5;46,20h 365;14,26j
- De al-Battani à Tycho 365j 5;49,29h 365;14,34j
- De Ptolémée à Tycho 365j 5;47,52h 365;14,29,40j
-
- Tycho explique que l'inégalité de l'année tropique est le résultat de la variation de l'apogée et de l'excentricité du soleil produisant un mvt sur l'écliptique.
- Il croit comme Copernic que l'année sidérale est invariable. Il utilise les données de Ptolémée et trouve que:
- A.S. = 365j 6;9,26,43 $\frac{1}{2}$ h
- La durée correcte de l'année sidérale (365j 6;9,10h) est env. 17'' de moins et accumule 1h en 212 ans. La cause est l'erreur de l'équinoxe de Ptolémée (33h en retard) qui est partiellement compensée par l'erreur de Tycho, env. 3h de retard.
- Précession: 51'' / an
- La théorie de précession de Tycho est inachevée. Probablement il adopte 51'' comme valeur moyenne, acceptant que durant Ptolémée elle était de 36''.
- IL croit que l'obliquité de l'écliptique varie dans une fourchette d'env. 20'' donc il accepte l'obliquité de Ptolémée de $23;51,20^\circ$ presque 20'' plus grande que la sienne..

Obliquité de l'écliptique et précession: Longomontanus

- Sverdlov (p 171-184)
- **Longomontanus (1562-1647)**
- Longomontanus se méfie de toutes les anciennes observations du soleil et des équinoxes à cause de la taille insuffisante des instruments, du savoir faire des constructeurs, de l'erreur de la latitude supposée de l'observateur et des effets de parallaxe et réfraction.
- Précession et année tropique non uniformes.
- Il corrige Timocharis, Hipparchos, Ptolémée et al-Battani en longitude en suivant les observations de Tycho. Ses corrections sont incohérentes.
- Longomontanus essaye comme Tycho de développer une théorie du soleil, de la précession et de l'obliquité de l'écliptique valable pour toutes les époques. Il critique et corrige les Anciens mais il n'a d'autre choix que d'utiliser leurs observations.

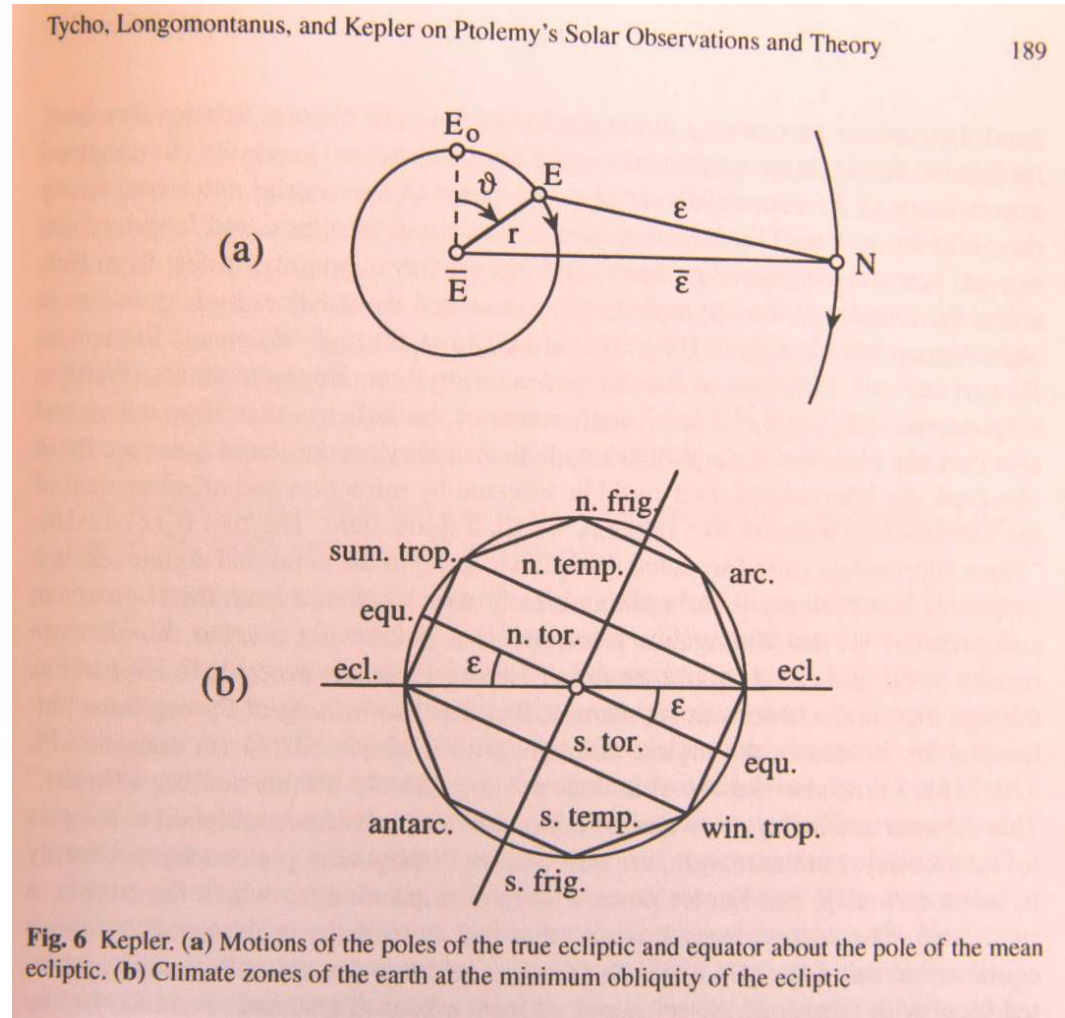
Obliquité de l'écliptique et précession: Longomontanus

- L'axe de la terre a un mvt conique qui a comme résultat que le point moyen de l'équinoxe vernal a un mvt de précession le long de l'écliptique moyenne.
- Période: 26,050 ans ($0;0,49,45^{\circ}/\text{an}$)
- La variation de l'obliquité est trouvée entre $23;42^{\circ} \pm 0'11^{\circ}$. Mais il la change en $23;42^{\circ} \pm 0;10,53^{\circ}$
- Pourquoi? Parce que $0;10,53^{\circ}$ env. $90^{\circ} / 496$ et 496 le 3e en ordre des nombres parfaits.
- À la création du monde la précession moyenne est 0 et l'anomalie est 0 donc l'inégalité est 0 et l'obliquité est maximale.
- La période de l'anomalie de la précession est 36,000 ans, mesurable depuis l'antiquité. Elle est exactement $6' / \text{an}$ et 6 est le premier des nombres parfaits.



Obliquité de l'écliptique et précession: Kepler

- Sverdllov (p. 184-198)
- **Johannes Kepler**
- La vraie écliptique: mvt de la Terre autour du soleil.
- Écliptique moyenne ou chemin royal: l'équateur de la révolution du soleil.
- La vraie écliptique ne tourne pas autour de l'équateur céleste mais autour de l'écliptique moyenne.
- Obliquité moyenne: $\epsilon = 24;17,40^\circ$. L'obliquité vraie varie de $22;30^\circ$ à $26;5,20^\circ$. Cela implique inclinaison de l'équateur solaire par rapport à l'écliptique $1^\circ 47,40^\circ$ (trouvée plus tard par le mvt des tâches solaires $7;15^\circ$)
- Kepler établit sa variation archétypale de l'obliquité de ses conséquences sur les zones des climats. *Epitomè* 3,4).
- Avec l'obliquité minimale $\epsilon = 22;30^\circ$ la terre est divisée en tranches d'un octogone sous-tendant $2^\epsilon = 45^\circ$. À la création l'obliquité moyenne $24;17,40^\circ$ la somme de la surface des aires des zones torride et frigide = la surface des zones tempérées.



Obliquité de l'écliptique et précession: Edmond Halley

- James Evans *The History and Practice of Ancient Astronomy*, New York, Oxford: Oxford University Press, 1998.
- **Halley (1654-1742) et les mvts propres**
- Halley utilise les latitudes de 18 étoiles d'Almageste et déduit que l'obliquité de l'écliptique décroît car les étoiles proches des points solsticiaux présentent une variation importante en latitude tandis que la variation de celles proches des équinoxes est petite.
- Mais la variation des étoiles brillantes (Aldebaran, Betelgeuse) contredit cette variation: Halley déduit que ces étoiles ont bougé par rapport à leurs voisines.
- Contrairement à Tycho qui minimisa la variation pour la faire coïncider avec sa théorie d'étoiles fixes sur une sphère, Halley dans le monde newtonien est préparé à accepter le mvt propre des étoiles causé par la gravité. Selon lui les deux étoiles sont brillantes donc proches, donc le mvt peut être observé.
- Halley remarqua deux autres mvts propres, Arcturus et Sirius. Arcturus est trop proche du colure équinoxial pour en tirer une conclusion basé sur l'obliquité. En comparaison avec Ptolémée il a bougé vers le sud de 33' et Sirius de 42'.
- Cassini confirme le mvt en 1738 et l'astronome allemand Tobias Mayer met en évidence le mvt propre en comparant des observations de Roemer en 1706 avec les siennes et de la Caille de 1750 à 56. Pour Aldebaran et Betelgeuse Halley se trompe se fondant sur des observations trop imprécises. Mais pour Sirius et Arcturus son estimation est proche du bon ordre de grandeur.