

A
Revolução
Astronômica
Parte I
Astronomia e
Cosmologia da
Antiguidade à
Idade Média
Versão revista

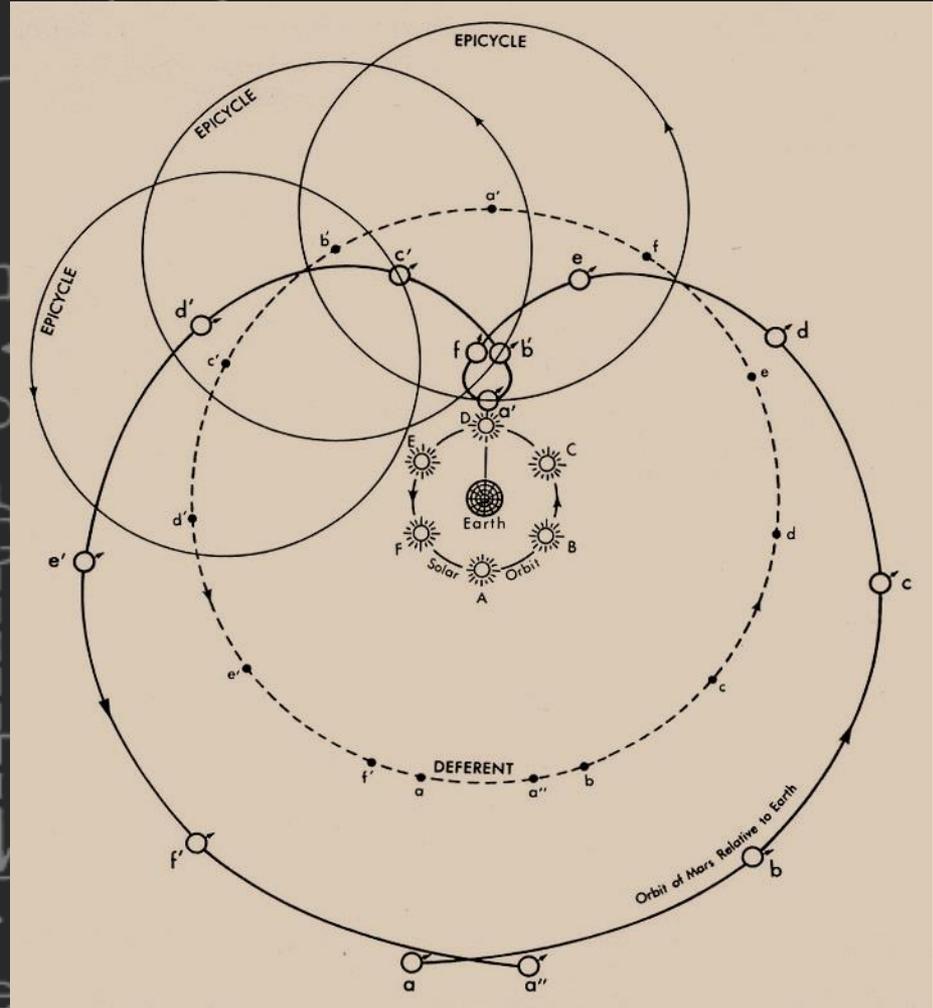


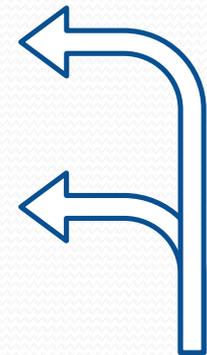
Ilustração de fundo: Hanson, *Constellations and conjectures*

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Introdução

Na Antiguidade grega (clássica / helenística / período romano), e até a Idade Média, o estudo dos fenômenos celestes era conduzido, majoritariamente, dentro de um quadro conceitual formado *basicamente* por:

- Astronomia ptolomaica
- +
• Cosmologia de inspiração platônico-aristotélica



A questão de como se *combinavam* e *articulavam* esses componentes, e qual o seu *estatuto*, é complexa.

Nota bene: Articulação e extensão de sistemas, bem como a justaposição de sistemas diferentes, frequentemente podem acarretar tensões conceituais!

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Introdução – As desigualdades planetárias

Existem duas “anomalias” ou “desigualdades” principais no movimento planetário, já conhecidas desde a Antiguidade.

- A “*primeira desigualdade*”: a variação na velocidade aparente dos planetas.
- A “*segunda desigualdade*”: os movimentos retrógrados dos planetas em relação ao fundo proporcionado pelas estrelas fixas.



Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Platão

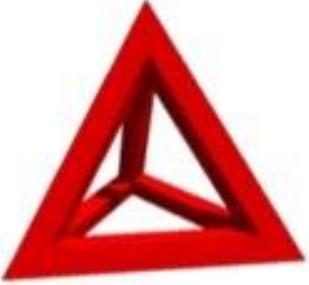
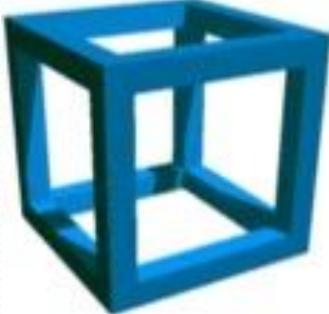
O papel desempenhado na cosmologia platônica pelos quatro elementos e pelos cinco sólidos “perfeitos” (i.e. poliedros regulares, formados por faces idênticas, que são polígonos regulares).

- Platão, *Timeu* 31b-33a, 53b-55c, 55e-56b

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Platão

Eis os cinco sólidos, na ordem em que eles são construídos por Platão (sempre a partir de triângulos):

| | | | | |
|---|--|--|--|---|
|  |  |  |  |  |
| Tetraedro | Octaedro | Icosaedro (20) | Hexaedro (Cubo) | Dodecaedro (12) |
| Fogo | Ar | Água | Terra | Universo |
| <ul style="list-style-type: none">• Ângulos mais agudos e arestas mais “cortantes”• Menor razão V/A• Divide a esfera em partes iguais | <ul style="list-style-type: none">• Gira livremente em torno do eixo• Adequado a um elemento mais móvel | <ul style="list-style-type: none">• Maior razão V/A• Adequado a um elemento que preenche o espaço | <ul style="list-style-type: none">• O mais estável”• Possui a base mais ampla | |

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Platão

Nas partes seguintes do *Timeu*, Platão, explica por meio de sua teoria da correlação entre sólidos e elementos, uma série de propriedades físicas:

- repouso e movimento,
- homogeneidade e heterogeneidade,
- a solubilidade,
- as transformações entre substâncias,
- o leve e o pesado,
- sabores, odores, sons e cores.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Platão

De acordo com Platão, o Criador

“torneou o mundo em forma de esfera, por estarem todas as suas extremidades a igual distância do centro, a mais perfeita das formas e mais semelhante a si mesma, por acreditar que o semelhante é mil vezes mais belo que o dessemelhante”.

(*Timeu*, 33b, trad. Carlos Alberto Nunes, ed. UFPA)

Fora do mundo não há nada, por isso a sua superfície é esférica e lisa. No centro da esfera do mundo está a Terra (também esférica).

O movimento da esfera do mundo “é o mais indicado para a sua forma” — a saber, a rotação em torno do si mesma, “privando-a dos outros seis movimentos” (i.e. para frente, para trás, para a esquerda, para a direita, para cima e para baixo).

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movt^s. do “Mesmo” e do “Outro” em Platão

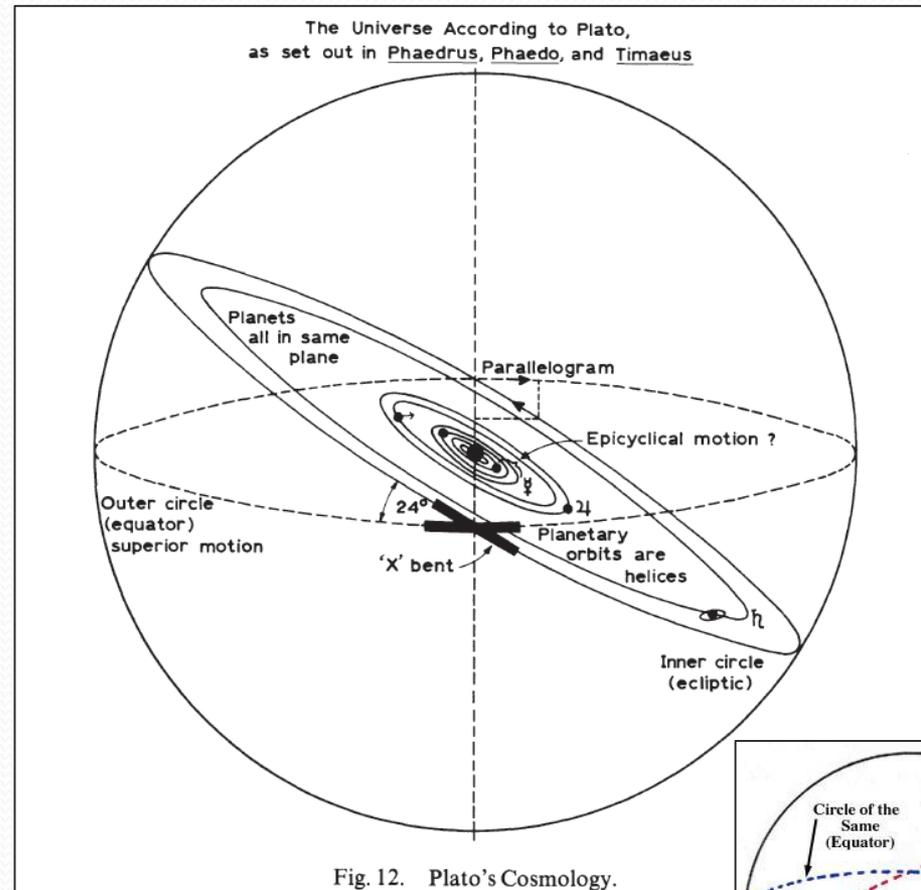
O Sol, a Lua e as cinco estrelas / planetas são carregados pela rotação da esfera exterior, de Leste para Oeste, num movimento denominado “movimento do Mesmo” (isto é, comum a todos).

Cada planeta também possui além deste movimento geral, um movimento circular interior, denominado movimento do “Outro”, em sentido contrário ao primeiro e num plano que corta obliquamente o equador celeste. Os “movimentos do Outro” dos vários planetas se processam a velocidades diferentes (*Timeu*, 36d).

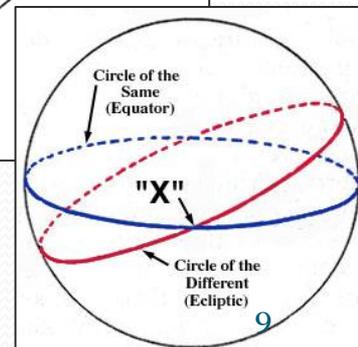
Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movt^s. do "Mesmo" e do "Outro" em Platão

O movimento de cada planeta, portanto, é um movimento em **hélice**, que resulta de uma **combinação** do movimento do Mesmo com o movimento do Outro. (*Timeu*, 39b; a tradução de Nunes traz: "...imprime a todos os círculos uma torção em espiral" — mas o termo grego, aqui, é mais precisamente "hélice" — leitura corroborada por Hanson em *Constellations and conjectures*.)



Acima: Diagrama de N. R. Hanson,
Constellations and conjectures



Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movt^s. do “Mesmo” e do “Outro” em Platão

A Terra não necessita de sustentação, nem está inclinada para nenhum lado, como ele mesmo escreve no *Fédon*:

“Uma coisa em equilíbrio no meio de qualquer substância uniforme não teria causa para inclinar-se mais ou menos para qualquer direção”. (*Fédon*, 109^a)

Platão parece supor uma Terra em rotação, na seguinte passagem:

“A Terra, ele dispôs para ser nossa nutridora, fazendo-a girar em torno do eixo que atravessa o universo, guarda e artífice da noite e do dia, a primeira e mais antiga das divindades nascidas no interior do céu”. (*Timeu*, 40c)

Aristóteles, no *De Caelo*, registra essa leitura:

“Alguns dizem que a Terra, realmente, está colocada no centro, e ainda gira e se move em torno de um eixo estendido através do Universo de pólo a pólo, como está escrito no *Timeu*”. (Aristóteles, *De Caelo*, II, 13, 293b30).

Essa leitura é disputada pelo erudito contemporâneo T. L. Heath, que considera a tese da rotação terrestre incompatível como todo o sistema apresentado no *Timeu*.

(Cf. Évora, *A revolução copernicano-galileana*, v. 1, p. 29, nota 18 para uma transcrição de Heath).

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Rotação da Terra

Há testemunhos, respectivamente da parte de Hyppolitus e também de Cícero e Teofrasto, no sentido de que Ecfanto de Siracusa (séc. IV aC) e Hicetas de Siracusa (?-338 aC) teriam defendido a idéia da rotação da Terra.

Porém os dois autores que propuseram a tese da rotação terrestre de forma mais explícita foram **Aristarco de Samos** (310-230 a.C.) e **Heráclides de Ponto** (387-315/310 a.C.). (Falaremos sobre eles adiante.)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Axioma platônico

É atribuído a Platão o axioma segundo o qual:

Os movimentos dos corpos celestes são movimentos circulares e uniformes ou combinações de movimentos circulares uniformes.

Este *Axioma Platônico* influenciaria a astronomia durante quase dois milênios.

Começou então a desenvolver-se a implementação de um programa de pesquisa astronômica que atendesse aos requisitos do Axioma Platônico:

A fonte mais confiável para o Axioma Platônico é Simplicio, comentando o *De Caelo* de Aristóteles...

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Eudoxo

«And so in this way Aristotle presented the solution to the difficulty and applies it to the difficulty. He agrees that the planets have many motions in kind due to not merely their apparent forward motion, but also their retrogradations and stations and different phases and advances (westward) and followings (eastward) and many sorts of anomaly. For since these motions are to be preserved they accept many motions for each star; some suppose eccentrics and epicycles, and others homocentrics, the so-called unwinders. For the true account accepts neither their stations or their retrogradations, nor additions or subtractions in the number of their motions, even if they appear as moving in this way, and it does not allow that the hypotheses hold in this way either.

Yet by taking evidence from their essence, it proves the heavenly motions to be simple, circular, uniform, and regular. Unable to get precisely how, given their dispositions, their attributes are merely an appearance and not true, they sought to discover by which hypotheses they would be able to preserve the appearances of the motions of the bodies that are said to wander (i.e., planets) through uniform, regular, and circular motions. And Eudoxos of Knidos was the first of the Greeks, as Eudemos relates in Book II of *The History of Astronomy*, as does Sosigenes as well, who gets this from Eudemos. **He [Eudoxos] is said to have attached himself to these sorts of hypotheses of Plato, who set this problem for people who had inquired into these things, i.e., given what hypothesized uniform and regular motions the appearances of the motions of the planets would be preserved, as Sosigenes says.»**

-- Simplicio, *In Aristotelis de caelo* (Comentário a Aristóteles, Sobre os céus) II, 12, 292b10 (p. 488.3-24)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Eudoxo

Para descrever as irregularidades dos movimentos dos planetas com precisão, **Eudoxo de Cnido** (408-355 a.C.) propôs um modelo de esferas concêntricas com 27 círculos, distribuídos em 5 grupos de 4 para cada um dos planetas errantes, mais 2 grupos de 3 para a Lua e o Sol, mais uma esfera para as estrelas.

As esferas requeridas para o movimento de cada planeta eram: uma para o seu movimento diurno junto com as estrelas fixas, uma para variações na longitude, uma para variações na latitude e uma para levar em conta o movimento retrógrado. (O Sol e a Lua requeriam apenas três, uma vez que eles nunca mostravam movimento retrógrado.)

As esferas giravam com velocidades diferentes em torno de eixos inclinados diferentes.

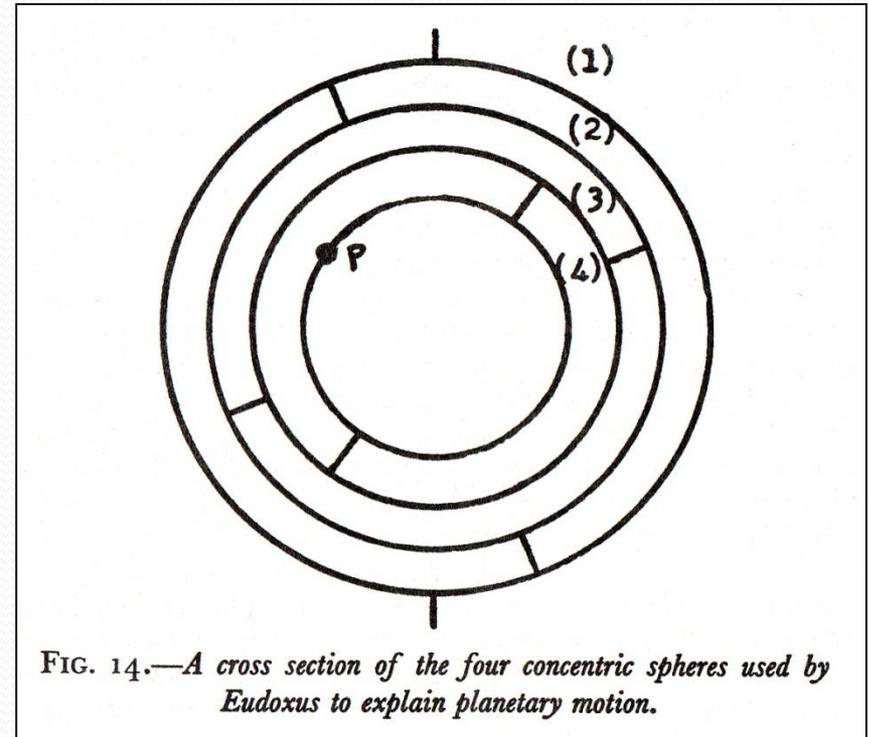


FIG. 14.—A cross section of the four concentric spheres used by Eudoxus to explain planetary motion.

Calipo (c.370-c.300 aC) acrescentou mais 7 esferas, totalizando 34.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

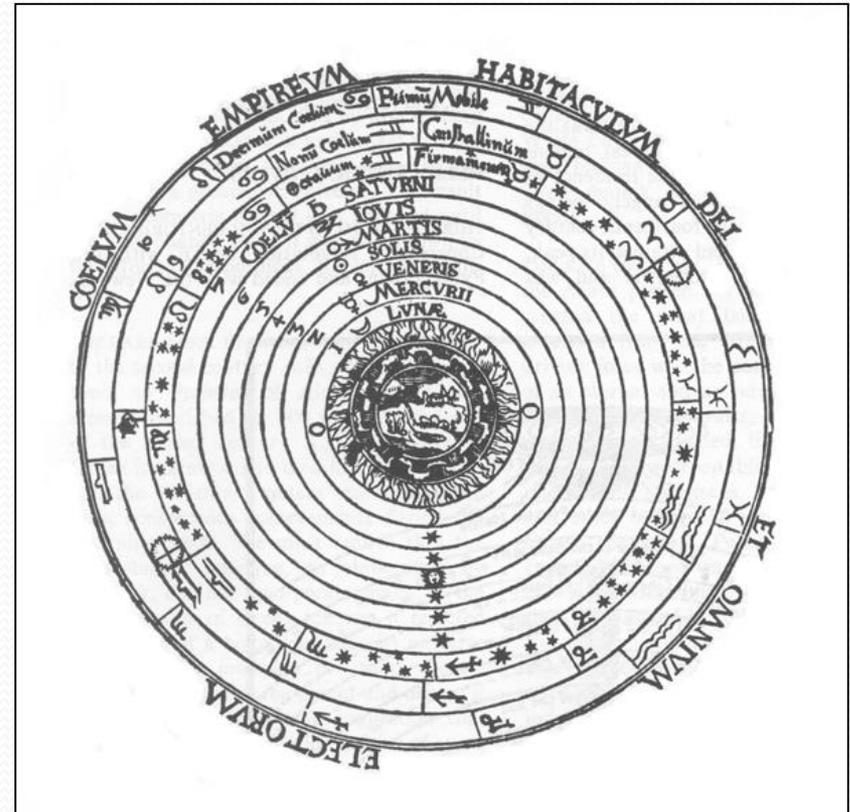
Movimentos circulares – Aristóteles

Aristóteles propunha que a Terra estava localizada no centro, circundada por esferas contendo os três elementos (água, ar, fogo). Acima dessas esferas, estão os orbes da Lua e dos outros planetas.

- A Lua ocupava o orbe mais baixo. A esfera da Lua divide o Universo em duas regiões — região celeste e região terrestre, ou região supralunar e região sublunar — que são qualitativamente diferentes.

Todas as coisas que compõem a região sublunar são formadas pelos quatro elementos; ao passo que todas as coisas pertencentes à região supralunar são constituídas pelo quinto elemento (éter).

- As esferas dos diversos planetas estão, na realidade, subdivididas em *grupos* de esferas.



Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Aristóteles

«[Após ter apresentado os sistemas de Eudoxo e de Calipo:]
However, this is still not enough to comply with observation. In fact, each of the planets must have other spheres, one less than the Callipian ones in each case, which counteract the Eudoxan-Callipian ones. These will return to its position the first sphere of the star in each case immediately below. This is the only way in which the universe as a whole can produce the courses of the planets. Thus: [1] spheres of the planetary courses: $8+25=33$; [2] (given that only those by which the lowest situated planet is moved need not be counteracted) spheres counteracting the first two planets: 6; [3] spheres counteracting the next four planets: 16; [4] total number of spheres, carrying and counteracting: 55. If one does not assign the additional movements that have been mentioned to the sun and moon, then the total will come to 47.»

— Aristóteles, *Metafísica*, Livro Λ, 1074a. Trad. Hugh Lawson-Tancred, ed. Penguin.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Aristóteles

- O sistema aristotélico comporta 55 círculos (esferas) no total. (Comparar com os 27 círculos de Eudoxo.)
- A função do sistema de grupos de esferas era transmitir o movimento da esfera mais exterior, a das estrelas fixas, até a mais inferior, a da Lua, porém preservando a especificidade do movimento de cada planeta.
- Cada grupo de esferas obedece a uma complexa relação de velocidades, sentidos e eixos de rotação. Saturno, por exemplo (o mais externo dos planetas), jaz dentro de um sistema composto por sete sub-esferas.
- É esse sistema que assegura que os planetas não sejam simplesmente carregados à uma pelo movimento diurno da esfera estelar.
- **E também é ele que garante que, após cada planeta estar em seu movimento correto, o planeta mais abaixo receba corretamente o *movimento original* das estrelas fixas, *neutralizando o efeito do planeta acima dele.***

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Aristóteles

Por exemplo, a esfera mais interior do grupo de Saturno move-se *da mesma maneira que as estrelas fixas*, e é esse movimento que será transmitido a Júpiter (o planeta imediatamente abaixo) e ajustado pelo seu sistema de esferas, de modo a fazer com que Júpiter assuma o movimento adequado.

Através desse sistema, o movimento é transmitido aos orbes cada vez mais internos, e finalmente à esfera mais baixa, aquela responsável pelo movimento da Lua.

(Cf. Fátima Évora – *A revolução copernicano-galileana*, Vol. 1.)

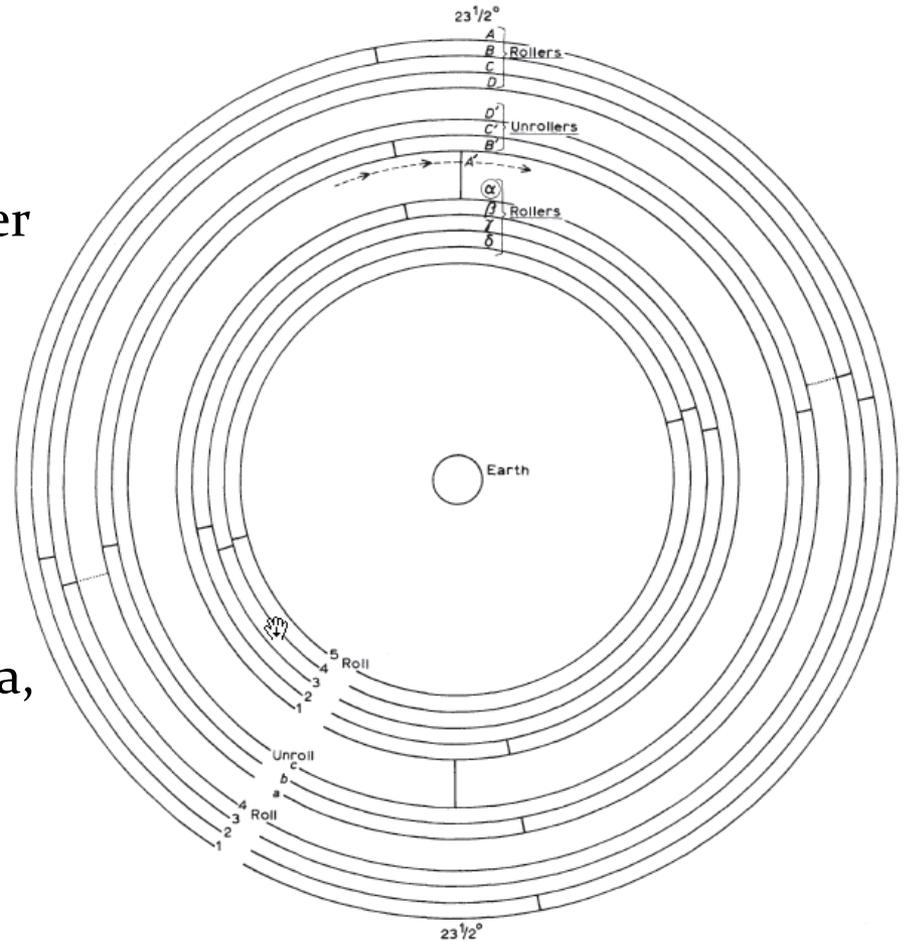


Fig. 23. A Eudoxian Sphere-Cluster adapted by Aristotle.

Diagrama de N. R. Hanson,
Constellations and conjectures

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Movimentos circulares – Aristóteles

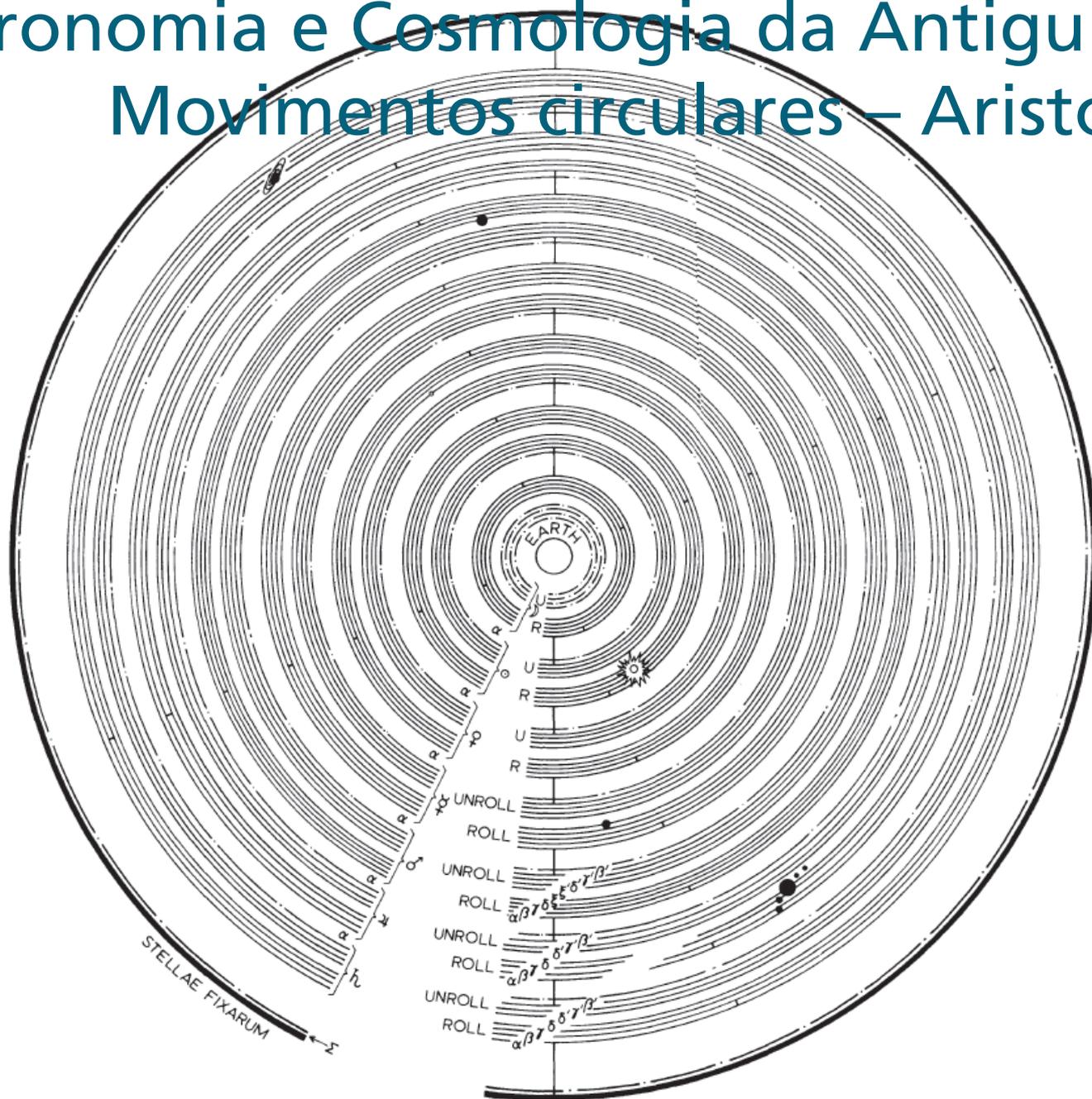


Fig. 24. Aristotle's cosmology.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Eratóstenes

Eratóstenes e a determinação da circunferência da Terra

- Eratóstenes (276-195/194 a.C.) obteve para a circunferência da Terra um valor de 250000 “estádios”, depois corrigidos para 252000 estádios.
- Há uma ambiguidade na conversão para unidades modernas. Uma milha romana era equivalente a algo entre $7\frac{1}{2}$ e 10 estádios. Supondo 10 estádios por milha, teríamos 25200 milhas romanas, ou 37497km.
- Outros estudiosos calculam o valor de Eratóstenes como sendo igual a 39690 km, o que não deixa de estar bastante próximo do valor aceito atualmente de 40120km (para a circunferência média).

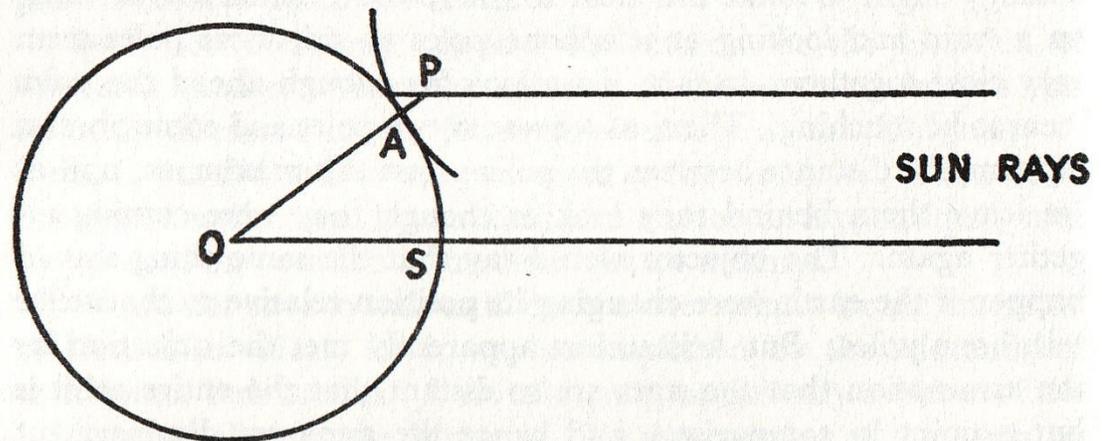


FIG. 16.—*Eratosthenes determination.*

Figura de Claggett, *Greek science in Antiquity*, p. 92

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Aristarco de Samos

Aristarco de Samos (310-230 aC)

O modelo heliocêntrico e as determinações de dimensões astronômicas

Você (Rei Gelon) está ciente de que “Universo” é o nome dado por muitos astrônomos à esfera cujo centro é o centro da Terra, que seu raio é igual à linha reta entre o centro do Sol e o centro da Terra... Mas Aristarchos publicou um livro considerando certas hipóteses, no qual aparece, como uma consequência destas suposições, que o Universo é muitas vezes maior do que o “Universo” mencionado acima. Suas hipóteses são que as estrelas fixas e o Sol permanecem imóveis, que a Terra gira em torno do Sol em uma circunferência de um círculo, o Sol repousa no meio da órbita*, e que a esfera das estrelas fixas, situada ao redor do mesmo centro que o Sol, é tão grande que o círculo, no qual ele supôs a Terra revolver, mantém uma proporção tão grande em relação à distância das estrelas fixas quanto o centro da esfera mantém em relação à sua superfície⁴⁸.

Em símbolos,

$$r_{\text{Terra}} : R_{\text{Estrelas}} :: r_{\text{Sol}} : r_{\text{Terra}}$$

As idéias de Aristarco recontadas segundo Arquimedes, em *O contador de areia* (*Arenarius* ou *The Sand-Reckoner*) — obra importante no desenvolvimento da teoria de números — apud Heath, *A history of greek mathematics*, apud Évora, *A revolução copernicano-galileana*, v. 1.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Aristarco de Samos

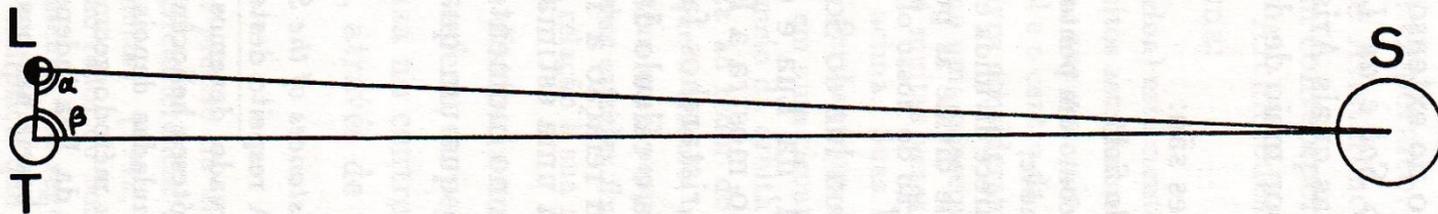
Primeiro cálculo quantitativo das distâncias relativas Terra—Sol e Terra—Lua (no tratado de Aristarco intitulado *Sobre os tamanhos e as distâncias do Sol e da Lua*). Chamando a primeira dessas distâncias de D e a segunda de d , Aristarco demonstrou, por um cálculo geométrico baseado em alguns valores observacionais, que:

$$18d < D < 20d.$$

(Sabe-se atualmente que $D \approx 390d$.)

O método geométrico empregado por Aristarco para solucionar o problema é adequado. No momento da dicotomia, quando o disco da Lua está meio cheio, o ângulo α junto à Lua é de 90 graus. Assim, $\tan \beta = D/d$, logo, $D = d \tan \beta$.

A principal dificuldade para se conseguir, por esse método, uma boa precisão para D está na determinação do ângulo β . Aristarco estimou $\beta = 87$ graus, ao passo que atualmente se sabe que $\beta = 89^{\circ}30'55''$. Como o valor da tangente de um ângulo cresce muito rapidamente perto de 90° , um pequeno erro na estimativa de β causa um erro muito grande na estimativa de D .



Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Aristarco de Samos

Aristarco determinou que o diâmetro angular aparente da Lua seria de $1/15$ de um signo do zodíaco, ou seja 2° , bastante próximo ao valor real.

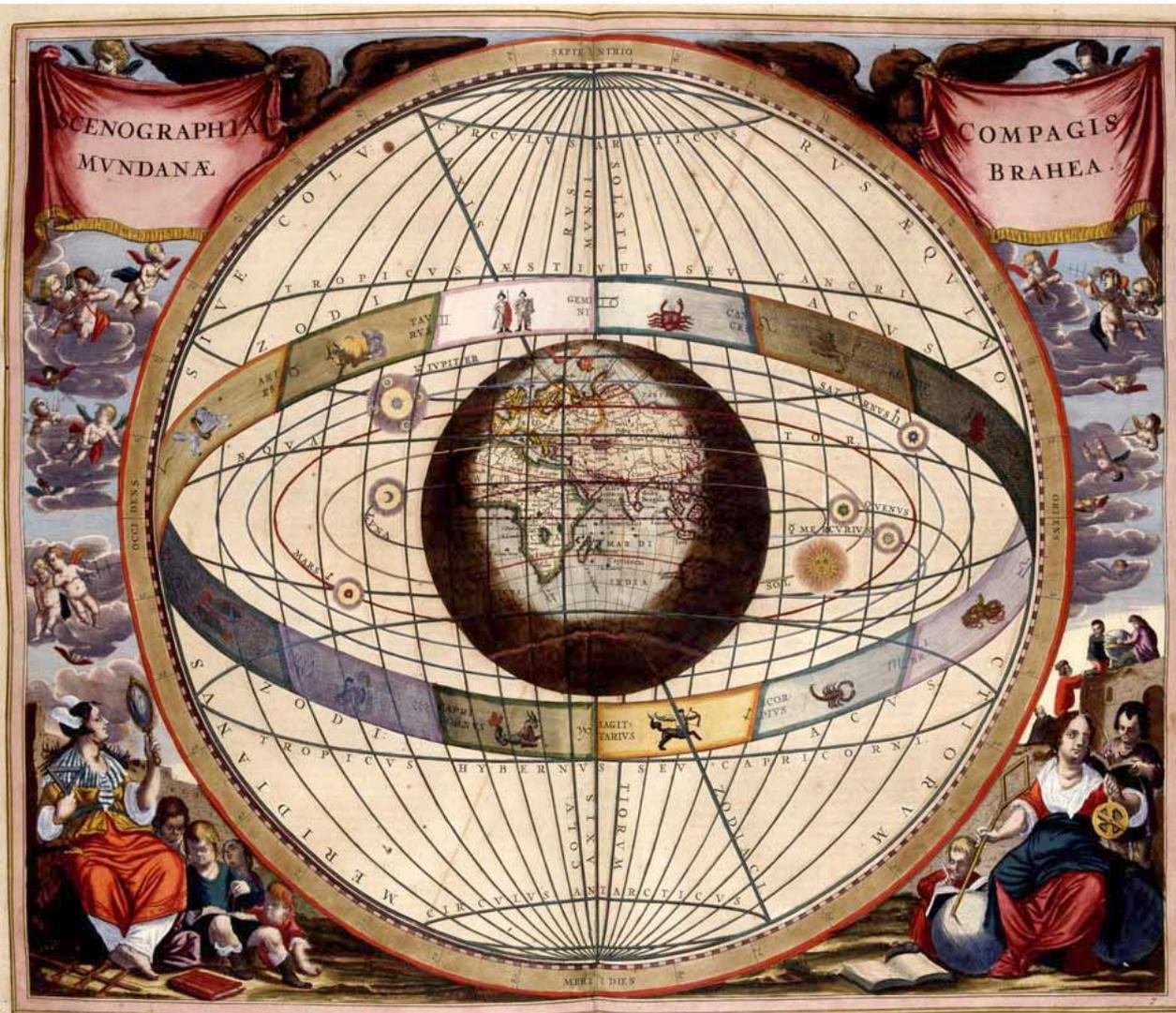
Também determinou que o diâmetro angular aparente do Sol seria $1/720$ do círculo do zodíaco, ou seja, $0,5^\circ$, também bastante próximo ao valor real.

O sistema de Aristarco não teve repercussão significativa no contexto da astronomia grega, pois ele fazia duas afirmações que não eram consideradas aceitáveis na época:

- (i) que o Universo era desmesuradamente grande para os padrões tidos como razoáveis na época;
- (ii) que não se observava uma paralaxe significativa das estrelas fixas — tal paralaxe seria de se esperar em um sistema heliocêntrico.
- (iii) A inexistência de um sistema compatível de Física, no qual essa hipótese pudesse encaixar-se de maneira coerente. (Cf. Koyré – “As etapas da cosmologia científica”, e tb. Cohen & Drabkin, *apud* Fátima Évora, vol. 1, pp. 54-55.)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Heráclides de Ponto



À esquerda, uma prancha da *Harmonia Macrocosmica*, atlas celeste de Andreas Cellarius do século XVII (com reedições no século XVIII), representando o sistema de Heráclides de Ponto (387-315/310 a.C.) — aqui erroneamente identificado como sistema braheano. (Fonte: R. H. Van Gent)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu

Handwritten Greek text in the left column of the manuscript page, likely containing astronomical or cosmological treatises.



Handwritten Greek text above the table: $\lambda\rho\omicron\mu\alpha\iota\sigma\iota\sigma\iota\varsigma$ and $\pi\rho\omicron\lambda\alpha\beta\alpha\tau\iota\sigma\iota\varsigma$

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 |
| 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 |
| 60 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 |
| 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 | 121 | 122 |
| 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 | 129 | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 |
| 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 | 160 | 161 | 162 | 163 | 164 |
| 165 | 166 | 167 | 168 | 169 | 170 | 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 | 180 | 181 | 182 | 183 | 184 | 185 |
| 186 | 187 | 188 | 189 | 190 | 191 | 192 | 193 | 194 | 195 | 196 | 197 | 198 | 199 | 200 | 201 | 202 | 203 | 204 | 205 | 206 |
| 207 | 208 | 209 | 210 | 211 | 212 | 213 | 214 | 215 | 216 | 217 | 218 | 219 | 220 | 221 | 222 | 223 | 224 | 225 | 226 | 227 |
| 228 | 229 | 230 | 231 | 232 | 233 | 234 | 235 | 236 | 237 | 238 | 239 | 240 | 241 | 242 | 243 | 244 | 245 | 246 | 247 | 248 |
| 249 | 250 | 251 | 252 | 253 | 254 | 255 | 256 | 257 | 258 | 259 | 260 | 261 | 262 | 263 | 264 | 265 | 266 | 267 | 268 | 269 |
| 270 | 271 | 272 | 273 | 274 | 275 | 276 | 277 | 278 | 279 | 280 | 281 | 282 | 283 | 284 | 285 | 286 | 287 | 288 | 289 | 290 |
| 291 | 292 | 293 | 294 | 295 | 296 | 297 | 298 | 299 | 300 | 301 | 302 | 303 | 304 | 305 | 306 | 307 | 308 | 309 | 310 | 311 |
| 312 | 313 | 314 | 315 | 316 | 317 | 318 | 319 | 320 | 321 | 322 | 323 | 324 | 325 | 326 | 327 | 328 | 329 | 330 | 331 | 332 |
| 333 | 334 | 335 | 336 | 337 | 338 | 339 | 340 | 341 | 342 | 343 | 344 | 345 | 346 | 347 | 348 | 349 | 350 | 351 | 352 | 353 |
| 354 | 355 | 356 | 357 | 358 | 359 | 360 | 361 | 362 | 363 | 364 | 365 | 366 | 367 | 368 | 369 | 370 | 371 | 372 | 373 | 374 |
| 375 | 376 | 377 | 378 | 379 | 380 | 381 | 382 | 383 | 384 | 385 | 386 | 387 | 388 | 389 | 390 | 391 | 392 | 393 | 394 | 395 |
| 396 | 397 | 398 | 399 | 400 | 401 | 402 | 403 | 404 | 405 | 406 | 407 | 408 | 409 | 410 | 411 | 412 | 413 | 414 | 415 | 416 |
| 417 | 418 | 419 | 420 | 421 | 422 | 423 | 424 | 425 | 426 | 427 | 428 | 429 | 430 | 431 | 432 | 433 | 434 | 435 | 436 | 437 |
| 438 | 439 | 440 | 441 | 442 | 443 | 444 | 445 | 446 | 447 | 448 | 449 | 450 | 451 | 452 | 453 | 454 | 455 | 456 | 457 | 458 |
| 459 | 460 | 461 | 462 | 463 | 464 | 465 | 466 | 467 | 468 | 469 | 470 | 471 | 472 | 473 | 474 | 475 | 476 | 477 | 478 | 479 |
| 480 | 481 | 482 | 483 | 484 | 485 | 486 | 487 | 488 | 489 | 490 | 491 | 492 | 493 | 494 | 495 | 496 | 497 | 498 | 499 | 500 |

Handwritten Greek text in the right column of the manuscript page, likely containing astronomical or cosmological treatises.

(Cópia do Almagesto em grego, século IX.)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu

Obras principais de Ptolomeu:

- *Almagesto* – O grande tratado de astronomia matemática da Antiguidade. Título original: *Mathematike Syntaxis* (gr) ou *Compositio Mathematica* (lat). Depois apelidado de: *He megale syntaxis* (gr = O grande tratado). Via língua árabe: *Al-Kitabu-Al-Majisti* (O grande livro), e finalmente *Almagesto*.
- *Tetrabiblos* (Teoria da predição astrológica)
- *Hipóteses planetárias* (Física, cosmologia e modelos mecânicos)
- *Tabelas práticas* (ingl: *Handy Tables*)
- *Geografia*
- *Harmônica* (Teoria matemática da música e da construção de instrumentos; Tese do paralelismo entre, por um lado, as consonâncias, dissonâncias, escalas e modulações, e, por outro, os movimentos dos astros)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o Almagesto

BOOK ELEVEN

1. DEMONSTRATION OF JUPITER'S ECCENTRICITY

Now that Mars' periodic movements, anomalies, and epochs have been shown, we shall next work out Jupiter's also, and in the same way, taking first again, for the demonstration of the apogee and eccentricity, 3 acronychal positions relative to the sun's mean passage. We observed the first of these by the astrolabe in the year 17 of Hadrian, Egyptianwise Epiphi 1-2, 1 hour before midnight, about $23^{\circ}11'$ within the Scorpion. The second in the year 21, Phaophi 13-14, 2 hours before midnight, about $7^{\circ}54'$ within the Fishes. And the third in the year 1 of Antonine, Athyr 20-21, 5 hours after midnight, about $14^{\circ}23'$ within the Ram. Now, of the two intervals, that from the first acronychal opposition to the second embraces 3 Egyptian years, 106 days, and 23 hours, and $104^{\circ}43'$ of the star's apparent passage; and that from the second to the third, 1 Egyptian year, 37 days, and 7 hours, and similarly $36^{\circ}29'$. And the mean longitudinal passage comes to $99^{\circ}55'$ for the time of the first interval, and $33^{\circ}26'$ for that of the second. From these intervals, in consequence of the methods propounded by us in the case of Mars, we first construct the proof of the things we are required to find, again with the one eccentric circle, in this way:

Let there be the eccentric circle ABC ; and let A be supposed the point where the epicycle's centre was at the first acronychal opposition, B at the second, and C at the third. Within the eccentric ABC let D be taken as the centre of the ecliptic; and let AD , BD , and CD be joined. And, with CDE produced, let AE , BE , and AB be joined. Let EF and EG be drawn from E perpendicular to AD and BD ; and AH from A perpendicular to EB .

Since, then, the eccentric's arc BC is assumed to subtend $36^{\circ}39'$ of the ecliptic, angle $EDG =$ angle BDC

$$= 36^{\circ}29'$$

angle BDC being at the centre. And so also, on the circle about right triangle EDG ,

$$\text{arc } EG = 72^{\circ}58',$$

and

$$\text{chord } EG = 71^{\circ}21'$$

where

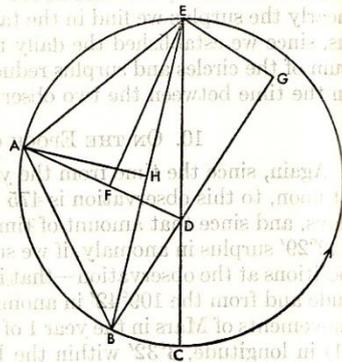
$$\text{hypot. } DE = 120^{\text{p}}.$$

Likewise, since

$$\text{arc } BC = 33^{\circ}26',$$

therefore, being an angle at the circumference,

$$\text{angle } BEC = 33^{\circ}26' \text{ to } 2 \text{ rt.},$$



and, by subtraction,

THE ALMAGEST, XI

347

and so also, on the circle about right triangle BLG

$$\text{arc } EG = 39^{\circ}32',$$

and

$$\text{chord } EG = 40^{\circ}35'$$

where

$$\text{hypot. } BE = 120^{\text{p}}.$$

And therefore

$$BE = 210^{\text{p}}58'$$

where it was shown

$$EG = 71^{\circ}21'$$

and

$$DE = 120^{\text{p}}.$$

Again, since the eccentric's whole arc ABC is assumed to subtend on the ecliptic $141^{\circ}12'$, the sum of both intervals; therefore, being at the ecliptic's centre,

$$\begin{aligned} \text{angle } ADC &= 141^{\circ}12' \\ &= 282^{\circ}24' \text{ to } 2 \text{ rt.} \end{aligned}$$

and, being adjacent to it,

$$\text{angle } ADE = 77^{\circ}36' \text{ to } 2 \text{ rt.}$$

And so also, on the circle about right triangle DEF ,

$$\text{arc } EF = 77^{\circ}36',$$

and

$$\text{chord } EF = 75^{\circ}12'$$

where

$$\text{hypot. } DE = 120^{\text{p}}.$$

Likewise, since the eccentric's arc ABC adds up to $133^{\circ}21'$, therefore, being an angle at the circumference,

$$\text{angle } AEC = 133^{\circ}21' \text{ to } 2 \text{ rt.}$$

But

$$\text{angle } ADE = 77^{\circ}36' \text{ to } 2 \text{ rt.}$$

And therefore, by subtraction,

$$\text{angle } EAF = 149^{\circ}3'.$$

And so, on the circle about right triangle AEF ,

$$\text{arc } EF = 149^{\circ}3',$$

and

$$\text{chord } EF = 115^{\circ}39'$$

where

$$\text{hypot. } AE = 120^{\text{p}}.$$

And therefore

$$AE = 78^{\circ}2'$$

where it was shown

$$EF = 75^{\circ}12'$$

and it is supposed

$$DE = 120^{\text{p}}.$$

Again, since the eccentric's arc AB is $99^{\circ}55'$, therefore, being at the circumference,

$$\text{angle } AEB = 99^{\circ}55'.$$

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o Anagesto

348
 And so, on the circle about right triangle AEH ,
 arc $AH = 99^{\circ}55'$
 and as supplement
 And therefore
 where
 And so
 and likewise
 where it was shown
 and
 It had already been shown
 And therefore, by subtraction,
 where
 And
 and likewise
 which, added together, make
 in length, therefore,
 where
 and likewise
 And also
 where
 for AB subtends an arc of $99^{\circ}55'$. And therefore
 where
 and
 And so also, AE being an arc on the eccentric,
 arc $AE = 40^{\circ}45'$,
 and, by addition,
 And therefore

PTOLEMY

$$\text{arc } AH = 99^{\circ}55'$$

$$\text{arc } EH = 80^{\circ}5'$$

$$\text{chord } AH = 91^{\text{p}}52'$$

$$\text{chord } EH = 77^{\text{p}}12'$$

$$\text{hypt. } AE = 120^{\text{p}}$$

$$AH = 59^{\text{p}}44'$$

$$EH = 50^{\text{p}}12'$$

$$AE = 78^{\text{p}}2'$$

$$DE = 120^{\text{p}}$$

$$BE = 210^{\text{p}}58'$$

$$BH = 160^{\text{p}}46'$$

$$AH = 59^{\text{p}}44'$$

$$\text{sq. } BH = 25,845^{\text{p}}55'$$

$$\text{sq. } AH = 3,568^{\text{p}}4'$$

$$\text{sq. } AB = 29,413^{\text{p}}59'$$

$$AB = 171^{\text{p}}30'$$

$$DE = 120^{\text{p}}$$

$$AE = 78^{\text{p}}2'$$

$$AB = 91^{\text{p}}52'$$

$$\text{ecc. diam.} = 120^{\text{p}}$$

$$DE = 64^{\text{p}}17'$$

$$AE = 41^{\text{p}}47'$$

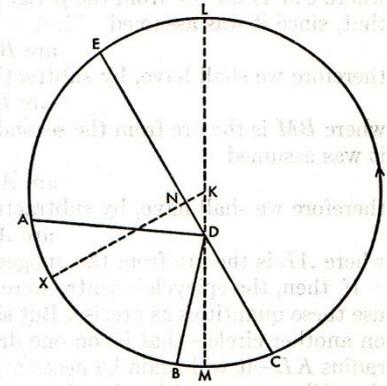
$$AB = 91^{\text{p}}52'$$

$$\text{ecc. diam.} = 120^{\text{p}}$$

$$\text{arc } AE = 40^{\circ}45'$$

$$\text{arc } EABC = 174^{\circ}6'$$

where
 Since, then, segment EAC is less than a semicircle and therefore the eccentric's centre falls outside it, let it be supposed the point K . And let the diameter through both centres be drawn through it and D , and let KNX be drawn from K perpendicular to CE and produced.



Since, then, it was shown
 $CE = 119^{\text{p}}50'$,
 $DE = 64^{\text{p}}17'$
 where
 diam. $LM = 120^{\text{p}}$,
 therefore, by subtraction, we shall have
 $CD = 55^{\text{p}}33'$.
 And so, since
 rect. $ED, DC = \text{rect. } LD, DM$,
 we shall have
 rect. $LD, DM = 3,570^{\text{p}}56'$
 where
 diam. $LM = 120^{\text{p}}$.
 But

rect. $LD, DM + \text{sq. } DK = \text{sq. half diam.}$
 $= \text{sq. } KL$
 Therefore, if we subtract the rectangle LD, DM or $3,570^{\text{p}}56'$ from the square on half the diameter or $3,600^{\text{p}}$, we shall have left the square on DK as $29^{\text{p}}4'$. And therefore we shall have
 1. betw. c. $DK \cong 5^{\text{p}}23'$
 where
 ecc. rad. $KL = 60^{\text{p}}$.
 Again, since
 half CE or $CN = 59^{\text{p}}55'$
 where
 diam. $LM = 120^{\text{p}}$,
 and it was shown also
 $CD = 55^{\text{p}}33'$,
 therefore also, by subtraction,
 $DN = 4^{\text{p}}22'$
 where
 $DK = 5^{\text{p}}23'$.
 And so also
 $DN = 97^{\text{p}}20'$
 where
 $DK = 120^{\text{p}}$;
 and, on the circle about right triangle DKN ,
 arc $DN = 108^{\circ}24'$.
 And therefore
 angle $DKN = 108^{\circ}24'$ to 2 rt.
 $= 54^{\circ}12'$.
 And since it is at the eccentric's centre, we shall have also
 arc $MX = 54^{\circ}12'$.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o *Almagesto*

Dispositivos básicos

Epiciclo sobre deferente
(O conceito de epiciclo já havia sido proposto por Apolônio no século III a.C.)

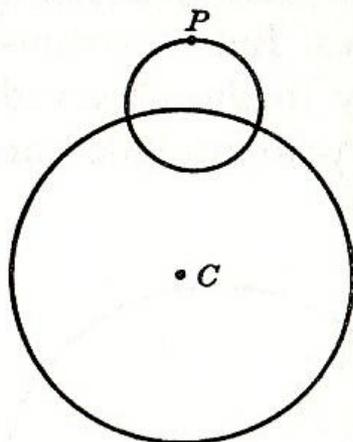


FIGURE 5

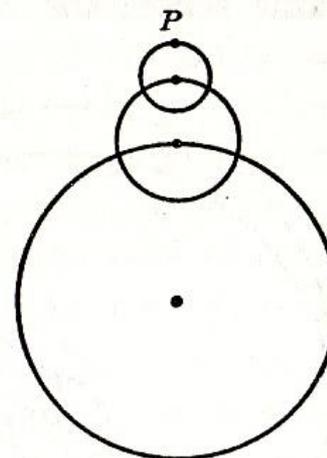


FIGURE 6

Epiciclo sobre epiciclo sobre deferente
(possibilidade em princípio)

Excêntrico – O movimento é circular e uniforme, porém não em relação à Terra E (centro do Universo), e sim em relação a um outro ponto C (fora do centro, daí “excêntrico”).

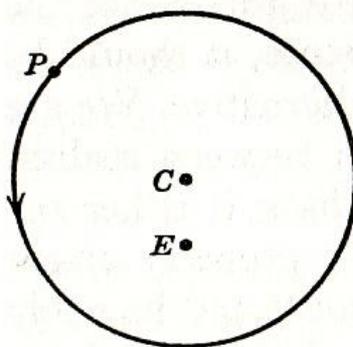


FIGURE 1

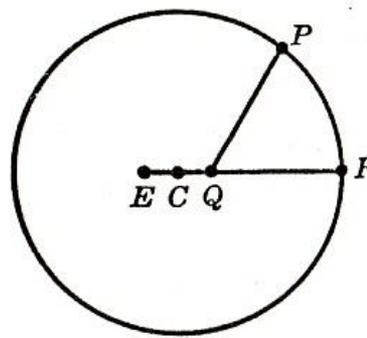


FIGURE 8

Equante – O movimento é circular em relação ao ponto excêntrico C (em vez de sê-lo em relação à Terra E), porém não uniforme; ele somente é uniforme em relação ao ponto equante Q .

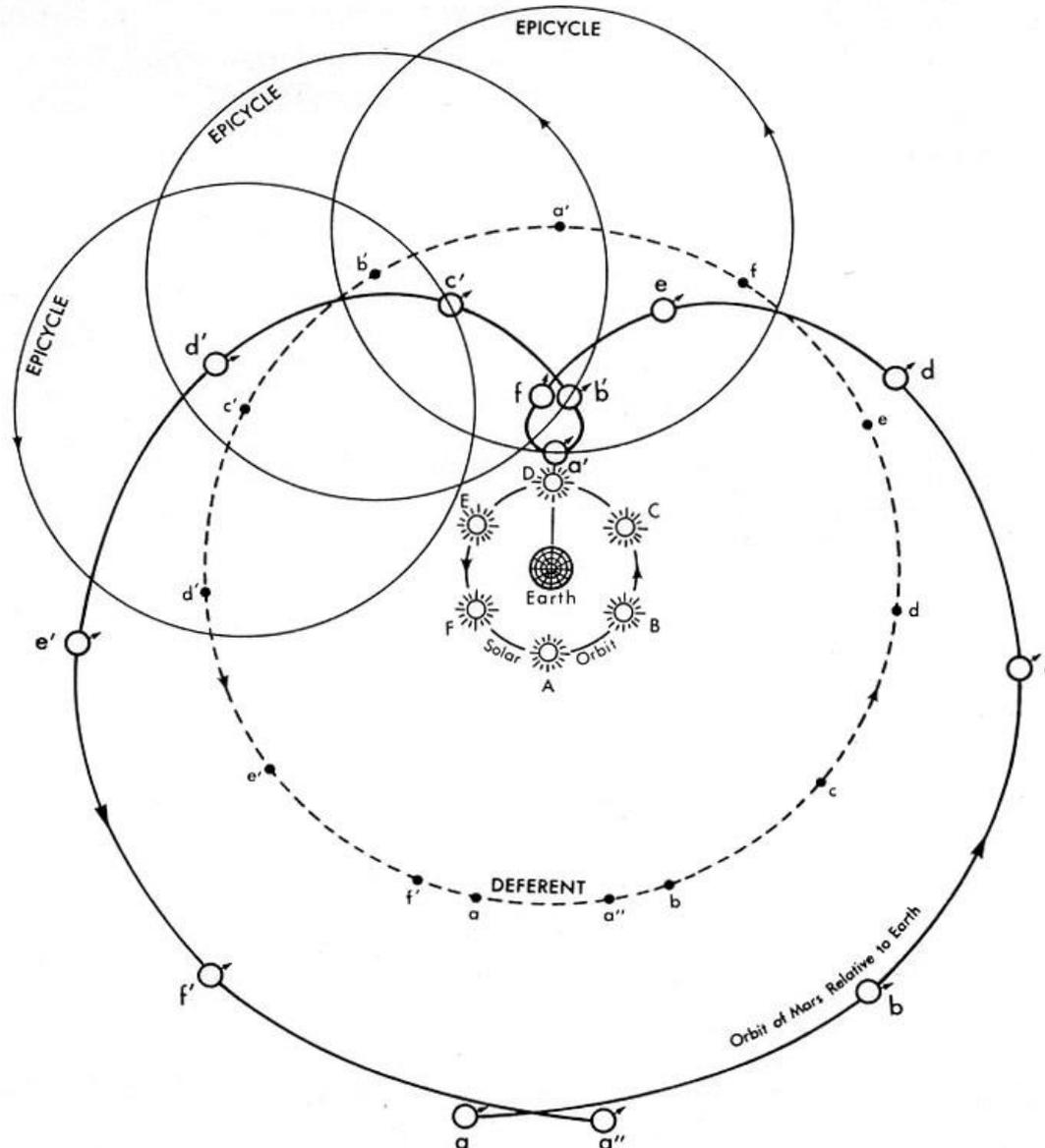
(Note a engenhosidade do conceito!)

(Fonte: E. Rosen, *Three Copernican Treatises*, Introdução)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o *Almagesto*

A retrogradação de um planeta exterior (Marte) descrita pelo modelo ptolomaico.



Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o *Almagesto*

Note-se o potencial imenso do sistema ptolomaico:

Por meio de um uso engenhoso dos epiciclos, deferentes, equantes e excêntricos, é possível modelar *qualquer* tipo de órbita, com um grau arbitrariamente alto de precisão.



Fig. 32. Near-triangularity from epicycularity.

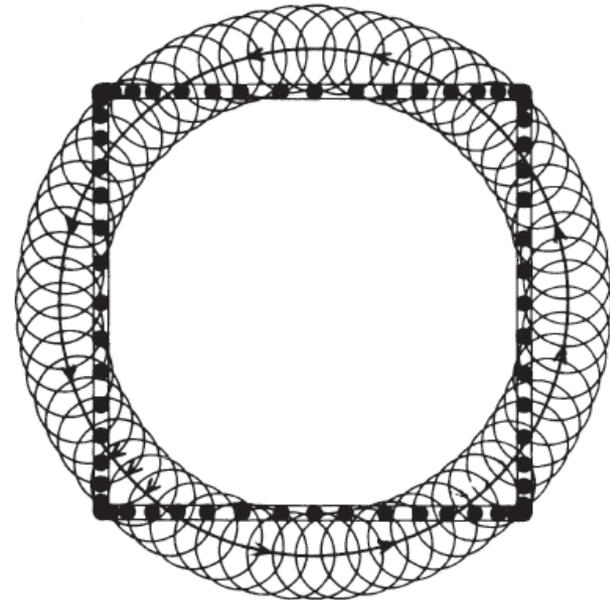
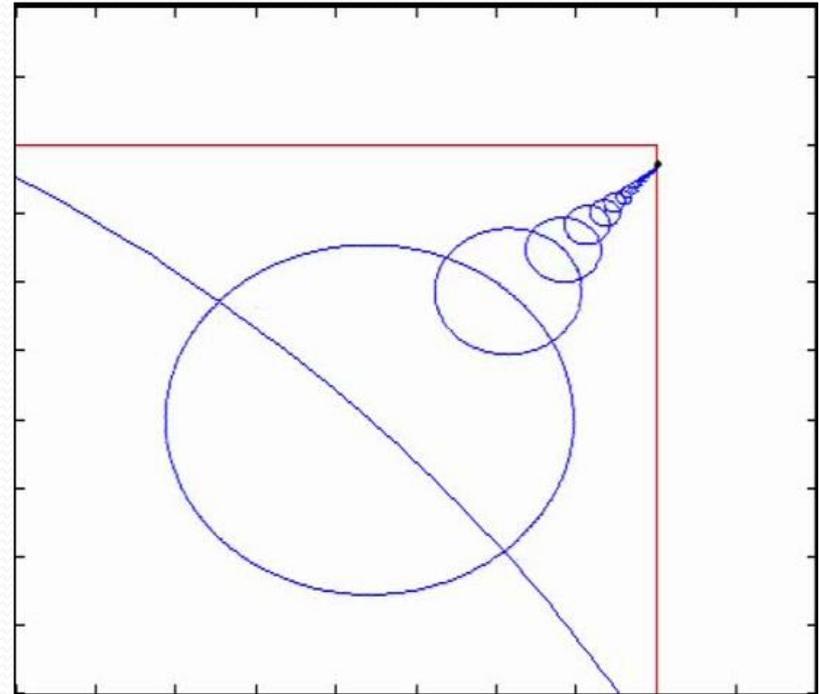
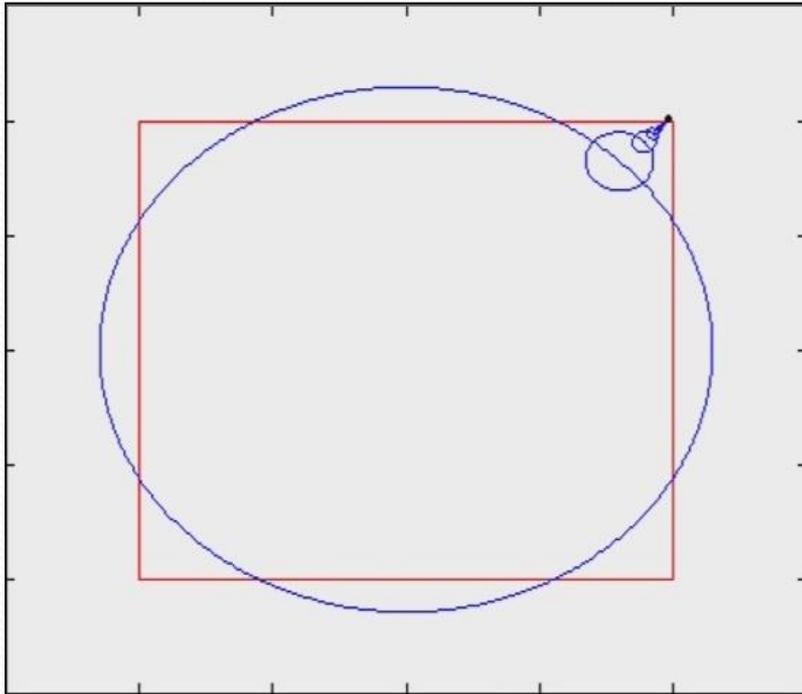


Fig. 34. A square 'orbit' from epicycularity.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o *Almagesto*



Exemplo: Acima à esquerda: Uma órbita quadrada (como proposta por N. R. Hanson em *Constellations and Conjectures*). À direita: *Close-up* do canto superior direito. (Frames de vídeo realizado por Christian Carman & Ramiro Serra, Argentina, 2005.)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e o *Almagesto*



Acima: Utilizando-se, por exemplo, 1000 epiciclos, pode-se gerar órbitas das mais variadas formas, contanto que sejam curvas contínuas, periódicas e limitadas. (Frame de vídeo realizado por Christian Carman & Ramiro Serra, Argentina, 2005. URL: <https://youtu.be/NvCdsnyx7Qk>, mencionado em Carman, “La refutabilidad del sistema de epiciclos y deferentes de Ptolomeo”, *Principia* v. 14, n. 2, pp. 211–239, 2010.)

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e as *Hipóteses planetárias*

- Obra contendo uma proposta de **fundamentação física para a astronomia matemática**, amalgamando em seu texto **astronomia matemática**, **astronomia física e cosmologia**, e também...
- Um programa de construção de **modelos mecânicos!**
- Estrutura da obra:
 - Livro I, seção 1 – Texto grego preservado – Discussão geral sobre os modelos físicos (baseados nos modelos matemáticos do *Almagesto*).
 - Livro I, seção 2 – Preservado em árabe, controversia sobre sua autenticidade na 1ª metade do século XX ⁽¹⁾ – Discussão sobre dimensões e distâncias no universo. ⁽²⁾
 - Livro II, seção 1 – Preservado em trad. árabe (problemática) – Sobre a natureza do céu e modelos físicos detalhados.
 - Livro II, seção 2 – Preservado em árabe – Programa de construção de modelos mecânicos = **Computadores astronômicos analógicos**.
- Dispomos de uma **excepcional tradução integral desta obra para o espanhol**, acompanhada de uma introdução excepcionalmente esclarecedora, por Eulalia Pérez Sedeño (*Las hipótesis de los planetas*, Madrid: Alianza Editorial, 1987).

(1) Traduzido para o inglês em 1967 por Bernard R. Goldstein (já com autenticidade comprovada).

(2) Ver Van Helden, *Measuring the universe: Cosmic dimensions from Aristarchus to Halley*

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e as *Hipóteses planetárias*

- A obra contém diversas críticas à cosmologia aristotélica:
 - contra o primeiro motor,
 - contra a transmissão de movimentos de orbe para orbe,
 - contra as esferas de contra-rolamento (ver diagrama de Hanson reproduzido anteriormente).
- Propõe a tese de que os planetas são *automotores*, por serem dotados de almas.
- Os epiciclos seriam alojados fisicamente dentro dos orbes, conciliando assim os epiciclos, os excêntricos e os orbes cosmológicos.
- Proposta de orbes truncados ou “serrados” (setores esféricos em vez de esferas inteiras, com a forma como a de um bracelete), e associados a eixos matemáticos (não físicos) com inclinações diferentes.
- De acordo com Ptolomeu, a utilização de orbes truncados permitiria reduzir o número de elementos de 43 esferas para apenas três esferas e 26 orbes.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e as *Hipóteses planetárias*

- O livro de Ptolomeu era conhecido em árabe como *Kitāb al-Manshūrāt*, “O livro das peças recortadas” ou “O livro das esferas seccionadas”
- (Ele sugere que o “espaço restante” acima e abaixo dos orbes seccionados seria preenchido com um “éter livre”.)

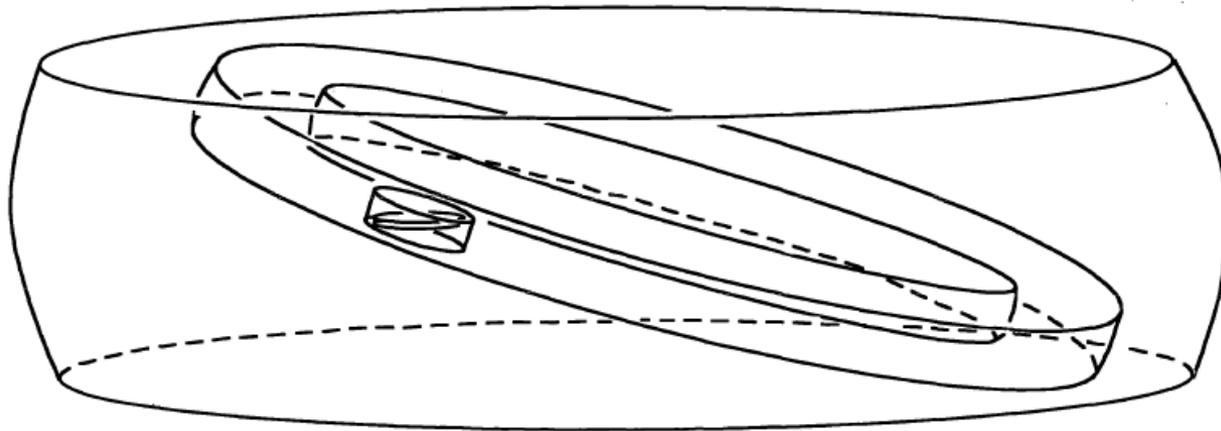


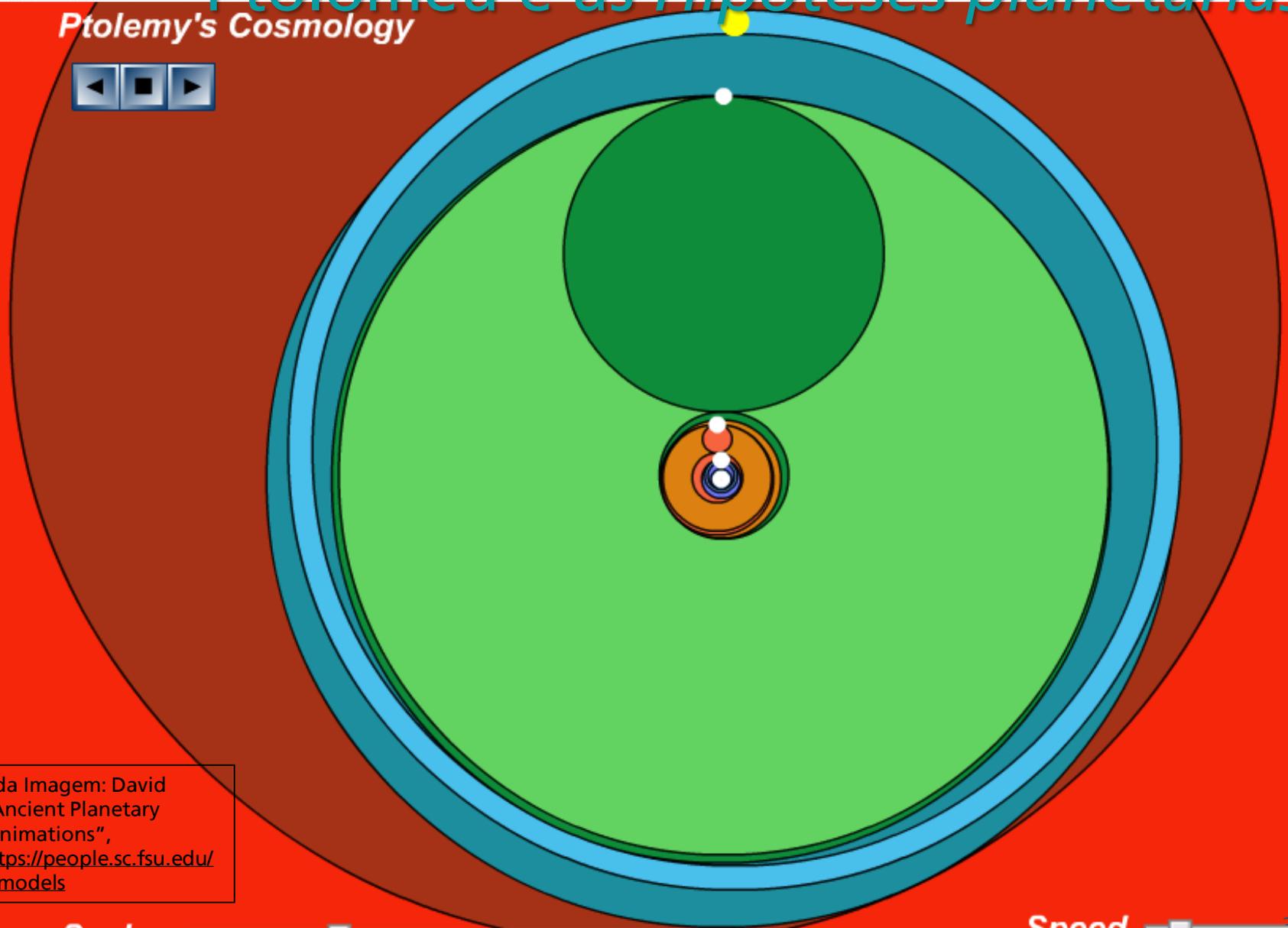
FIG. 4. The model (without mover) for the superior planets and Venus using *manshūrāt*. For clarity, the dimensions of this model are exaggerated, and the inner boundary of the largest shell is omitted.

- Tendo estado, em sua maior parte, inacessíveis no Ocidente após o século VI, as *Hipóteses planetárias* não exerceram influência significativa – pelo menos não documentada – no *mainstream* da astronomia e cosmologia europeias posteriores.

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e as *Hipóteses planetárias*

Ptolemy's Cosmology



Crédito da Imagem: David Duke, "Ancient Planetary Model Animations", <http://https://people.sc.fsu.edu/~dduke/models>

Scale



1.91

Speed



37 20

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade

Ptolomeu e as *Hipóteses planetárias*

Ptolemy's Cosmology



Crédito da Imagem: David Duke, "Ancient Planetary Model Animations", <http://https://people.sc.fsu.edu/~dduke/models>

Scale



Speed



Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Geminus e o “salvar os fenômenos”

O texto de Geminus de Rodes (c.110-c.40 a.C.), “O escopo da astronomia comparado com o da física”, é um fragmento do comentário à *Meteorologia* de Posidonius [c.135-51 a.C.], citado por Alexandre de Afrodísia (c.200 d.C.), citado por Simplicio (c. 540 d.C.) em seu comentário à *Física* de Aristóteles.

- Este texto *já foi* utilizado para apoiar uma leitura instrumentalista.
 - Por exemplo, por Pierre Duhem em “Salvar os fenômenos: Ensaio sobre a teoria física de Platão a Galileu”. Mas cuidado, o instrumentalismo de Duhem não é simples, por causa da noção de “classificação natural”.⁽¹⁾
- Porém ele não expressa, por si mesmo, uma leitura instrumentalista, nem uma desvinculação disciplinar, mas sim exatamente aquilo que diz o título: uma distinção de *escopo*.

(1) Ver Sonia Dion, “Pierre Duhem and the inconsistency between instrumentalism and natural classification”, *Stud. Hist. Phil. Sci.*, v. 44, 2013.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Geminus e o “salvar os fenômenos”

O texto de Geminus – Continuação :

O que o texto *afirma*:

- Que existe uma *distinção de escopo* entre a astronomia (a qual introduz hipóteses para salvar os fenômenos) e a física (que investiga os princípios, as naturezas e as causas).

O texto *não* afirma:

- Que a astronomia e a cosmologia sejam desvinculadas – pelo contrário;
- Que a física seja “imune” aos experimentos – afinal, as teorias físicas também precisam explicar os fenômenos (“demonstrar as revoluções”);
- Que, pelo fato de que a astronomia não conseguir decidir entre hipóteses rivais que dão conta do mesmo fenômeno, seja *irrelevante* determinar qual explicação melhor corresponde à realidade.
- Que a ciência *como um sistema, como um todo* não possa investigar a estrutura da realidade.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Geminus e o “salvar os fenômenos”

O que significa “*salvar os fenômenos*”?

- Em termos epistemológicos, diríamos que, na visão proposta, o astrônomo matemático trabalha com *modelos parciais* ou com *modelos de dados*, ao passo que o físico trabalha com *modelos potenciais* ou “estruturas com enriquecimentos teóricos”.
- A inteligibilidade científica não se completa sem qualquer uma delas.
- O “salvar os fenômenos” não se assemelha a um trabalho de “livro-caixa”, pois os fenômenos são organizados de maneiras intelectualmente robustas e não-triviais – por exemplo, com a ideia de reproduzir movimentos complexos por meio de elementos simples; ou com o dispositivo do equante; ou, mais tarde, com as curvas cônicas.
- Vale lembrar que a astronomia matemática também envolve a criação científica e o trabalho com aspectos propriamente *conceituais*.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Geminus e o “salvar os fenômenos”

O que significa “*salvar os fenômenos*”? (cont.)

- A distinção de Geminus é compatível com a existência de tratados puramente matemáticos e tratados puramente físicos, mas **não** exclui a possibilidade de tratados de dupla natureza (física+astronomia).
- A existência de obras como as *Hipóteses Planetárias* de Ptolomeu (e, depois, o resgate de ideias desse tipo por astrônomos do século XV, como Peurbach – como veremos mais tarde, na Parte II da Unidade I do curso) proporciona **contraexemplos** à tese de uma separação estrita e uma completa independência entre astronomia, por um lado, e física / cosmologia, por outro.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Geminus e o “salvar os fenômenos”

1 – Cosmologia - Nível ontológico – Estruturas macroconceituais e temáticas
Pressupostos metafísicos

Ex.: Axioma platônico, redução complexo/simples, hierarquia dos cosmos, força/alma
Casos: *De Caelo*, *Timeu*, *A douta ignorância* (Cusa), *Sobre o infinito* (Bruno)



2 – Física celeste - Nível explicativo – Modelos potenciais – Estruturas T-teóricas
Arsenal explicativo - Poder expressivo da teoria

Ex.: Considerações sobre a natureza dos astros, dos orbes, busca de causas para os fenômenos. Casos: *Hip. planetárias*, *Defesa* (Regiomontanus), *Astron. nova*, *Tadhkira*



3 – Astronomia: Nível descritivo – Modelos parciais – Estruturas T-não-teóricas
Conceitos abastecidos pela geometria

Ex.: epiciclos, excêntricos, equantes, distâncias, órbitas

Instâncias: *Almagesto*, *Epitome do Almagesto* (Regiomontanus), *De Revolutionibus*



4 - Nível empírico – ‘Modelos de dados’ – Estruturas T-não-teóricas

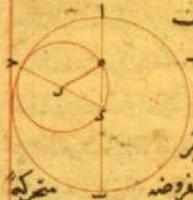
Ex.: Coordenadas celestes (astronomia de posição), tabelas práticas. Instâncias: *Tabelas Práticas* (Ptolomeu), *Tab. Alfonsinas* (1483 e antes), *Tab. Prutênicas* (E. Reinhold, 1551), *Tabelas Rudolfinas* (Kepler, 1627). Desigualdades, retrogradação, outras anomalias. Dados observacionais (Tycho, Peurbach, Regiomontanus, Toscanelli)

Observação: as noções de “T-teórico” e “T-não-teórico” não possuem nada em comum com as noções de “vocabulário teórico” e “vocabulário observacional” da concepção standard de teorias (empirismológico) – Cf. p. ex. Moulines, *Exploraciones metacientíficas*

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

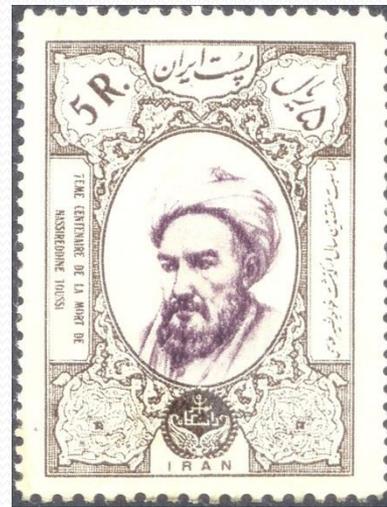
Recepção árabe – al-Tusi

لا طلقى رده و رده المسا ومن لساوى ساقى رده ردى فادن رادونا
 حوى حوى احساوتان وخطوه مطبق على خطى و افضطة ا ادن
 على قطر ا عبر زالملة عنه وكذلك فى ساير الاوضاع فادن نقطة
 مترددة داها بين طرفى خطاات غير الملة معنه وان اردنا جعلنا الدائرتين
 منطقتى فلكن بحسبى وبنى ان يكون المراد من الدائرة الصغرة مدار
 مركز الدوير منها ومن الدائرة الكبيرة دائرة نصف
 قطرها بقدر قطر الدائرة الصغرة بم ان جعلنا يد
 النقطة كسرة مفروضة واردا ان يكون قطر الدائرة
 المفروضة داها سطحيا على قطر الكرة الكبيرة غير
 نابل عن وضعها فرضا كة اخرى محطة بالمفروضه
 متحركة
 سلك حركة الكبيرة بعينها وفى جهتها الزمة العطرالى وضعه بقدر ما زسلة
 فصل حركة الصغرة على الكبيرة وستطرها فيها ان يكون قطر الدائرة الصغرة
 نصف قطر الدائرة الكبيرة ما زها مركزها بدأ وحسب نرى الكرة المفروضة متحركة
 على خط مستقيم مطبق على قطرها مترددة بين طرفيه غير الملة عن ذلك
 الانطباق. واذ افردت هذه المفروضه فلنقيم تدوير القمر مكان العدة
 المفروضة مركزه نقطة و محيطه البعد الذى يكون تدوير القمر والفرض
 كره اخرى محطة به حافظه لوضعها باى تدوير من الفرض يتفق وبنى ان



| | | | |
|--|--|--|--|
| صورة الدائرتين فى البدار والنقطة الصغرة الى جهتين الناتر والكبرى الى جهة يساره | صورةهما بعدان قطعت الصغرة نصفها والكبرى ربعها | صورةهما بعدان قطعت الصغرة دورة والكبرى دورة | صورةهما بعدان قطعت الصغرة دورة والكبرى دورة |
|--|--|--|--|

ولسان ان النقطة لا زول عن الخط اصلا وان لم يكن نقصا باراد البراكين
 الهندسية فى هذا المحصر فليكن الكبيرة دائرة ا ب و قطرها ا ب ومركزها
 و الصغرة دائرة ح د ه و قطرها ح د ومركزها و والنقطة المفروضة
 ه وليطبق اول القطر ح د على خط ا ب ونقطة د على ا ولكن ه ضا
 معها لم يتحرك دائرة ح د فى جهة ح د ولنقل محركاتها نقطة ه الى
 ان يقطع قوس ح د مثلا وليحرك معها دائرة ا ب فى جهة ا ب نصف
 تلك الحركة ولنقل طرف قطر ح د الى ان يقطع قوس ا ب فى نسبة
 نصف قوس ح د ونصل ه د و فزاوية ح د ه ضعف زاوية ح د ا
 لاجل تحركين وهى ايضا ضعفها الكبرها خارجة من سلك ه دى وساقه



Acima: Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274). À esquerda: *Tadkhira* (Memória sobre a astronomia), cópia do séc. XIV.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Recepção árabe – al-Tusi

- Al-Tusi foi o supervisor de construção e o diretor do esplêndido Observatório de Maragha, no atual Azerbaijão. Escreveu comentários sobre textos de Euclides, Aristarco, Arquimedes e outros.
- A *al-Tadhkira fi-ilm al-hay'a* ou *Memória sobre Astronomia*, conhecida simplesmente como *Tadhkira*, é a principal obra de al-Tusi, que não se limita a ser um comentário ao *Almagesto*, mas ostenta vários traços originais.
- Ali, ao autor propõe modelos que atendem a critérios matemáticos, observacionais e também razões físicas.
- Criticou o que entendia como inconsistências de Ptolomeu por não respeitar, em sua opinião, o primado dos movimentos circulares e uniformes.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Recepção árabe – al-Tusi

- Formulou o chamado “acoplamento de Tusi” para produzir movimentos retilíneos a partir de combinações de movimentos circulares.
- Discutiu dezesseis críticas às soluções dadas por Ptolomeu a problemas relativos a irregularidades e oscilações finas nos movimentos planetários (II.7,§25–II.11,§21)
- Criticou os argumentos destinados a demonstrar a imobilidade da Terra a partir de observações, notando que eles não eram decisivos.
- Assim como as *Hipóteses Planetárias* de Ptolomeu, o *Tadhkira* não exerceu grande influência, ao menos explicitamente, sobre a tradição *mainstream* da astronomia europeia medieval. Influenciou, porém, uma importante tradição de astronomia islâmica, com seus escritos sendo estudados e comentados durante séculos.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Recepção árabe – al-Tusi

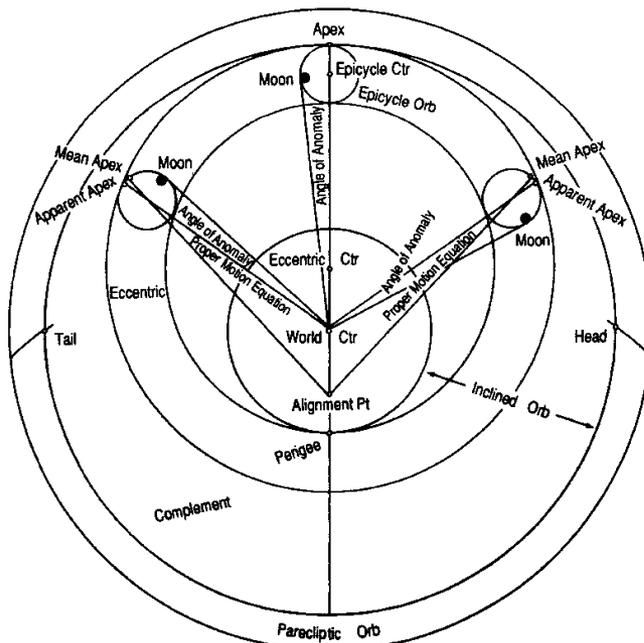
160

Translation II.7 [26–27]

[a] the distances of the epicycle center from the [deferent] center must be equal under all circumstances; [b] the angles [formed] at the [deferent center] must be equal in equal times; and [c] the diameter passing through the apex and the [epicyclic] perigee must be aligned with the [deferent center] under all circumstances. If any one of these three were not to hold, this would be due to the motion being composed. In fact, we do find these things violated in the case of the moon. For while the distances of its epicycle center *are* equal with respect to the center of the eccentric, the equality of angles occurs at the center of the World and the alignment of the diameter is to the point of alignment. The practitioners of the profession have not yet explained in what way this motion is composed; in fact, they have not ventured any explanation of this at all. I shall present below what I have regarding this matter, God willing.

[26] The moon has another anomaly called parallax whose description will be forthcoming.

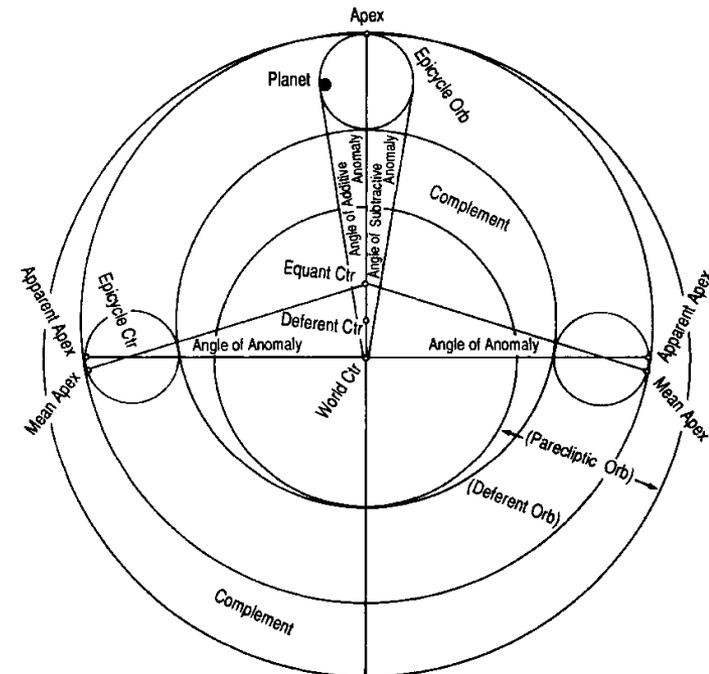
[27] This is the illustration of the orbs of the moon:



186

Translation II.9 [16–18]

[16] This is the illustration of the orbs for each of the four planets:



[Fig. T10]

[17] Those who limit themselves to circles set forth five orbs: the parecliptic, the inclined, the deferent, the equant, and the epicycle. The explication of terms is analogous to what was given previously.

[18] This then is what the practitioners of this science have said concerning the orbs of the planets. The total number of solid orbs that they have established for the seven planets is 22; for those who limit themselves to circles, it is 32.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Os Tratados da Esfera

Os chamados “*Tratados da Esfera*” — manuais didáticos de astronomia, de inspiração ptolomaica — proliferaram durante a Idade Média e o Renascimento, sendo muitos deles cópias, adaptações ou traduções de outros mais antigos, e foram muito utilizados no ensino.

Neles, encontramos as mais reiteradas tentativas de justaposição entre aristotelismo, platonismo e ptolemismo – muitas vezes ocasionando tensões internas e simplificações no sistema.

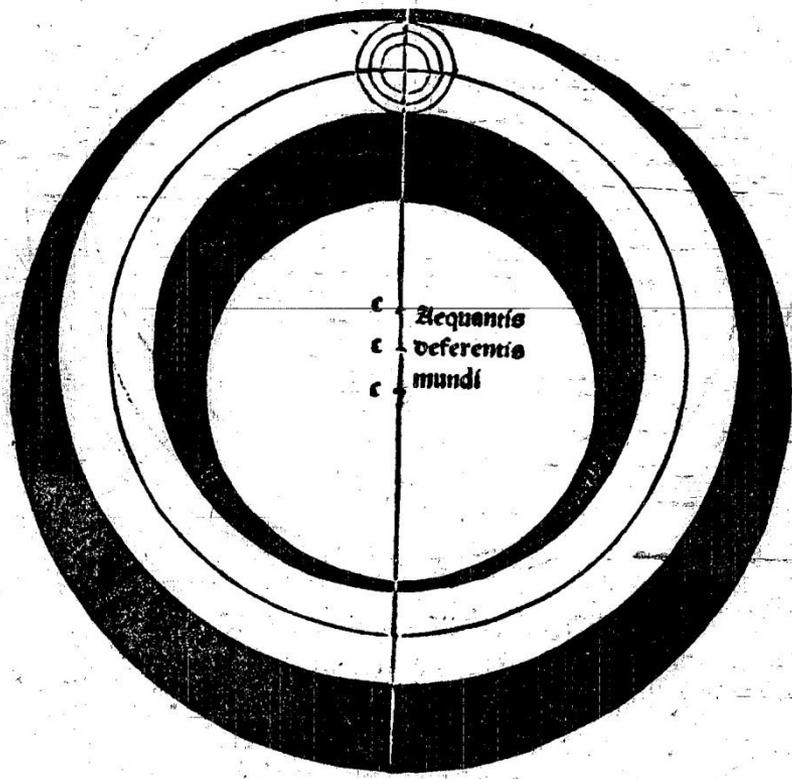
Um dos mais famosos autores de *Tratado da esfera* (*De sphaera*) (1230) é Johannes de Sacrobosco (i.e. ‘Hollywood’) (1195-1256). Este tratado teve tradução portuguesa por Pedro Nunes, cosmógrafo-mor de Portugal, em 1537 (editada no Brasil em 1991). Muitos nautas e pilotos portugueses estudaram por esta obra.

Há também uma versão com acréscimos, em forma de diálogo, de autoria de João de Castro (1500-1548), ex-aluno de Pedro Nunes, intitulado *Tratado da esfera, por perguntas e respostas, a modo de diálogo*. (O historiador Walmir Thomazi Cardoso escreveu uma dissertação sobre esta obra.) A seguir, vemos dois exemplos de edições de *Tratado da esfera*.

Astronomia e Cosmologia da Idade Média

Octava sphaera in aere z poli eius ad polu[m] mundi. Sed orbis eptery-
 clu[m] deferens super axe suo axem zodiaci secante secundu[m] successio-
 ne[m] signoz[m] mouet: z poli eius distant a polis zodiaci distantia non
 equali. Quare fit vt auges eoz[um] eccentricoz[um] nunq[ue] eclipticam p[er]tran-
 seant sed semper ab ea versus aquilonem z opposita versus austru[m]
 maneant: ita vt auges sc[ilicet] deferentiu[m] epicyclos simili[ter] opposita at-
 q[ue] cetra z poli deferentiu[m] eccentricoz[um] circumferentias superficie eclip-
 tice virtute mot[us] octaue sphaere describat equidistantes. Vñ etiaz
 in illis superficies eccentricoz[um] a superficie ecliptice ineq[ua]liter secabunt

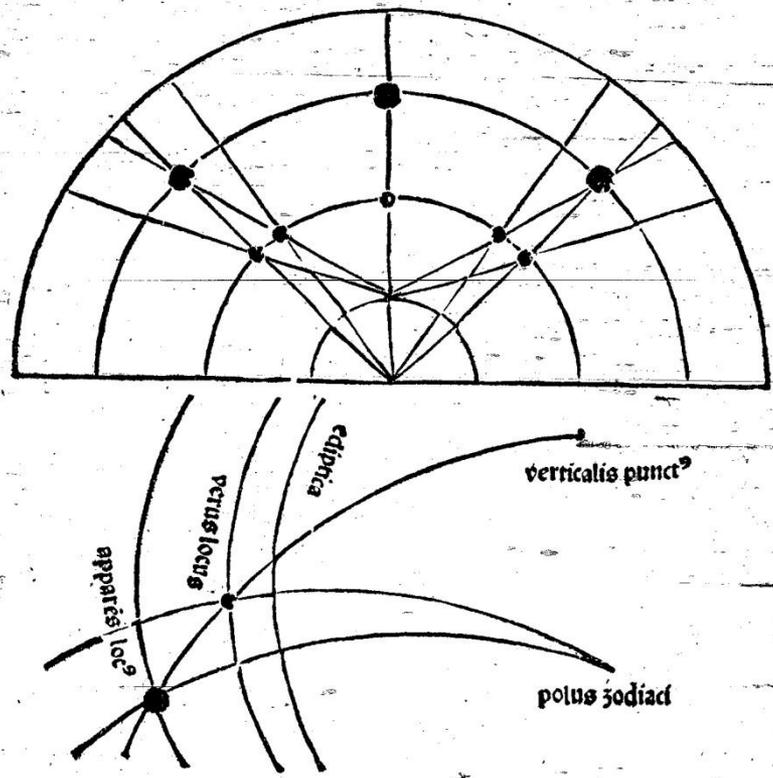
Theorica Trium superioru[m] z Veneris.



Os Tratados da Esfera

Et dicitur astra affric[um] z usque ad longitudo[n]em z veru[m] locu[m] atri
 transcantis inter locu[m] astri veru[m] z apparente[m] interceptus. Inde
 manifestu[m] est quod a vicinis astra ceptu[m] mundi z obliquitate sine
 ut tanto maiore obliquitate diuersitate aspectus. Hanc quoq[ue] maximam
 in Luna reperiunt. In Marte vo[n]e non bene perceptibile. Habet nan-
 q[ue] semidiameter terre[m] sensibilem ad semidiameter orbis lune non
 multu[m] aut[em] perceptibile ad semidiameter orbis Martis magnitudine[m]
 ¶ Diuersitas aspectus astri i[n] longitudine e[st] arcus ecliptice inter duos
 circulos magnos interceptus quoz[um] vnus p[er] polos ecliptice z locu[m]

Theorica diuersitatis aspectus z coiunctio[n]is visibilis.



Astronomia e Cosmologia no umbral do séc. XVI

A questão do movimento da Terra

Várias observações cotidianas parecem indicar que a Terra está em repouso no centro e os astros se movem em redor dela:

- (i) o fato de que o Sol “nasce” e “se põe”;
- (ii) o movimento aparente das estrelas durante a noite;
- (iii) os eclipses solares.

Dessas observações parece bastante plausível inferir que os astros se movem em redor da Terra, como nota Ptolomeu no *Almagesto*.

De fato, com base nas *aparências* (movimentos observáveis) parece difícil apoiar outro sistema que não o geocêntrico.

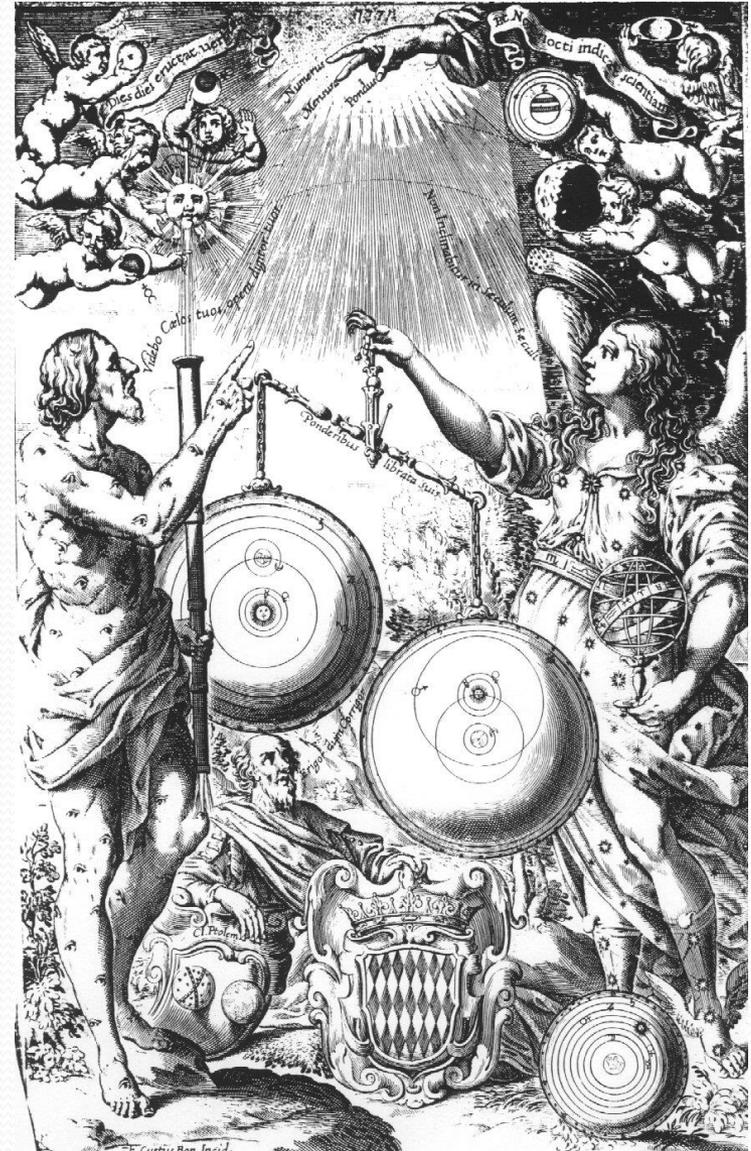
Aristóteles: “Nada há nas observações que sugira que estamos afastados do centro [por metade de um diâmetro terrestre]” (*De Caelo*, II.13, 293b31)

Para sustentar um sistema não-geocêntrico/não-geostático, seria preciso *problematizar as aparências*, além de refutar os argumentos existentes e aduzir outros argumentos.

Astronomia e Cosmologia no umbral do séc. XVI

A questão do movimento da Terra

- Ademais, existe uma grande variedade de argumentos (mais ou menos cogentes) visando estabelecer as teses da centralidade e da imobilidade da Terra.
- Em seu *Almagestum Novum*, de 1651,  Giovanni Battista Riccioli viria a fazer um inventário dos argumentos até então conhecidos (propostos ao longo dos séculos) contra o movimento da Terra, investigando ainda se haveria réplicas copernicanas satisfatórias para cada um deles.
- Eles foram traduzidos por Christopher Graney em "**Giovanni Battista Riccioli's Seventy-Seven Arguments Against the Motion of the Earth: An English Rendition of *Almagestum Novum* Part II, Book 9, Section 4, Chapter 34, Pages 472-7**" (<https://arxiv.org/abs/1011.3778>)
- Mas sobre isso voltaremos falar quando tratarmos da *Revolução Astronômica* dos séculos XVI e XVII.



Astronomia e Cosmologia no umbral do séc. XVI

A questão do movimento da Terra

| ARGUMENT | COPERNICAN ANSWER |
|---|---|
| | <i>whole into the East. This may not be seen by us, because that motion is likewise common to us.</i> |
| <p>Comment: Argument #12 is the first argument against the Earth's motion for which Riccioli states that the Copernicans have a good answer – that being the “common motion”. Riccioli is listing all arguments against Earth's motion – not just arguments he thinks are valid. Riccioli will go on to list a number of arguments which are easily refuted by “common motion” (not to mention common sense).</p> | |
| #13 <i>If Earth moves, then it should be more difficult to move towards the east than towards the west, owing to air resistance...</i> | <i>The Copernicans answer that common motion applies to air, too.</i> |
| #14 <i>...and there should be a continuous wind from the west...</i> | <i>Common motion applies to air.</i> |
| #15 <i>...and there should be various other effects caused by that motion...</i> | <i>...all of which can be dismissed with the answer of common motion.</i> |
| #16 <i>If Earth rotates, a cannon ball launched toward the west should travel further than an identical shot to the east, for the cannon pursues the eastern ball and recedes from the western one. But this is contrary to the experiments of Tycho and Landsgrave.</i> | |
| <p>Comment: Riccioli discusses the answer to this argument, which he states in terms of the motive force added to or subtracted from the ball, etc. but which essentially is a variation on the common motion idea.</p> | |
| #17 <i>A cannon ball launched in the direction of the plane of the meridian (due north or</i> | <i>No solid Copernican answer against this argument.</i> |

Riccioli, *Almagestum Novum*, trad. Graney, op. cit.

| ARGUMENT | COPERNICAN ANSWER |
|--|---|
| <i>south) will have a different trajectory if the cannon is nearer the poles than if it is nearer the equator, owing to the slower speed of the ground near the poles. But this is contrary to the experiments of Tycho.</i> | |
| <p>Comment: Another Coriolis Force argument (see Arguments #6 and #10). Riccioli adds that the only answer to this argument is that perhaps such an experiment has never been properly performed (apparently Tycho's experiments were not completely convincing). However, he says, the experiment is possible – the effect should not be insensible if the motions involved are sufficiently violent (that is, for artillery of sufficient range).</p> | |
| #18 <i>If Earth rotates, the ball from a cannon aimed at a western target will hit below the mark, while the ball from a cannon aimed at an eastern target will hit above the mark. But this is contrary to experience.</i> | <i>Galileo has answered this argument, calling such experiments into doubt.</i> |
| <p>Comment: At first glance this Argument appears to be a variation on #16, but it is much different. #16 deals with motion towards the east or west, as though the surface of the Earth moved linearly at a fixed rate (that is, with translational motion). This Argument deals with direction changes owing to Earth's rotational motion – the line from a cannon's muzzle to a target changes as Earth turns, while the flying ball's trajectory does not, with the results being as Riccioli states. As this Argument is based on Earth being a rotating frame of reference, it has more in common with the Coriolis Force Arguments seen so far (#6, #10, #17) than the Common Motion Arguments (#12 through #16).</p> <p>Galileo addresses this question in his <i>Dialogue</i>, arguing that the effect would be about one inch of deviation at a range of 500 yards – too small to measure, a cannon being accurate to no better than a yard at that range.³³ But, Riccioli notes, movement of the</p> | |

³³ *Dialogue...*, p. 209-212.

Astronomia e Cosmologia no umbral do séc. XVI

O sistema ptolomaico conseguia dar conta com perfeição da primeira e da segunda desigualdades.

Mas existe também uma *outra* variação a considerar: a variação no brilho aparente dos planetas...

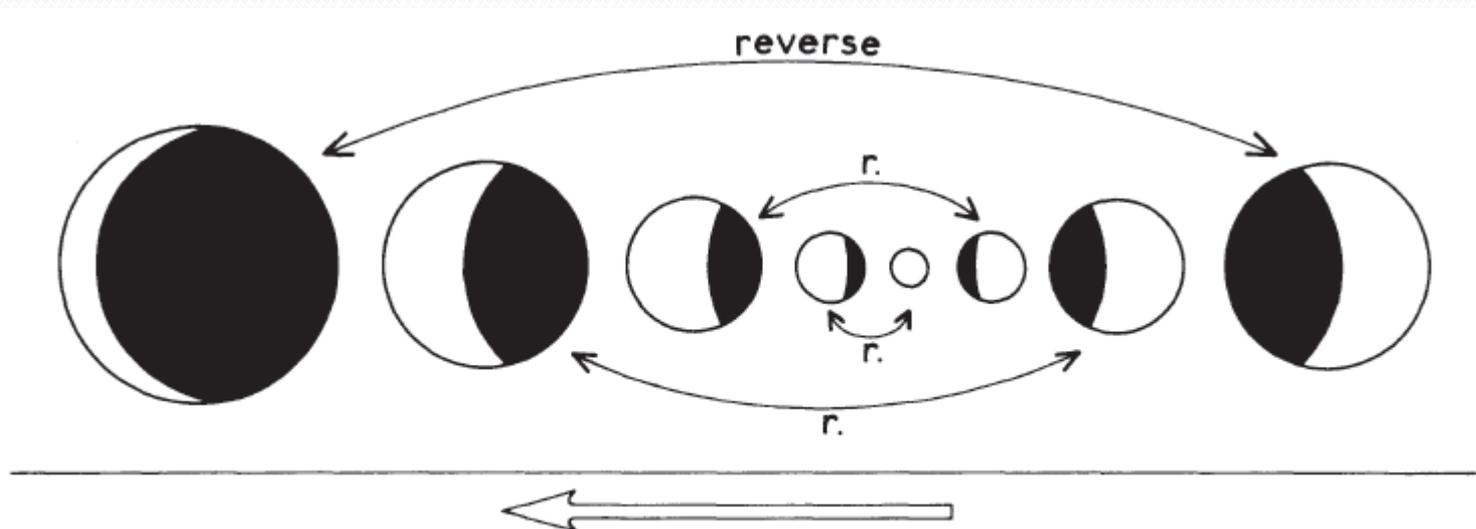


Fig. 26. Variations in size and brightness of Venus.

As fases de Vênus e as variações no seu diâmetro aparente eram percebidas a olho nu como uma coisa só: variações de brilho aparente. *Por um longo tempo, ao menos...*

Astronomia e Cosmologia da Antiguidade à Idade Média

POPULAR-PRACTICAL ASTRONOMY
e.g., Hesiod: Traditional Problems

600 BC

LITERARY TRADITION

SCIENTIFIC TRADITION

PHILOSOPHICAL TRADITION

500

400

300

200

100 BC

100 AD

200

300

400 AD

Agricultural Writers, e.g., Columella

Encyclopedists, e.g., Pliny

Rise of Geometry
Euclid,
Apollonius

Development of Trigonometry

Babylonian Influence

Astronomical Textbooks e.g., Geminus, Theon of Smyrna, Cleomedes

Practical Applications: Sundials, Anaphoric clock, Astrolabe,

Ptolemy (Planetary Theory)

Pappus (Commentaries on Ptolemy)

Theon of Alexandria (Treatise on astrolabe)

Meton and Euctemon (Parapegma)

Eudoxus (First planetary theory)

Autolycus (The sphere)

Timocharis and Aristyllos (Systematic observation)

Hipparchus (Solar and lunar theories)

Democritus
Plato

Aristotle

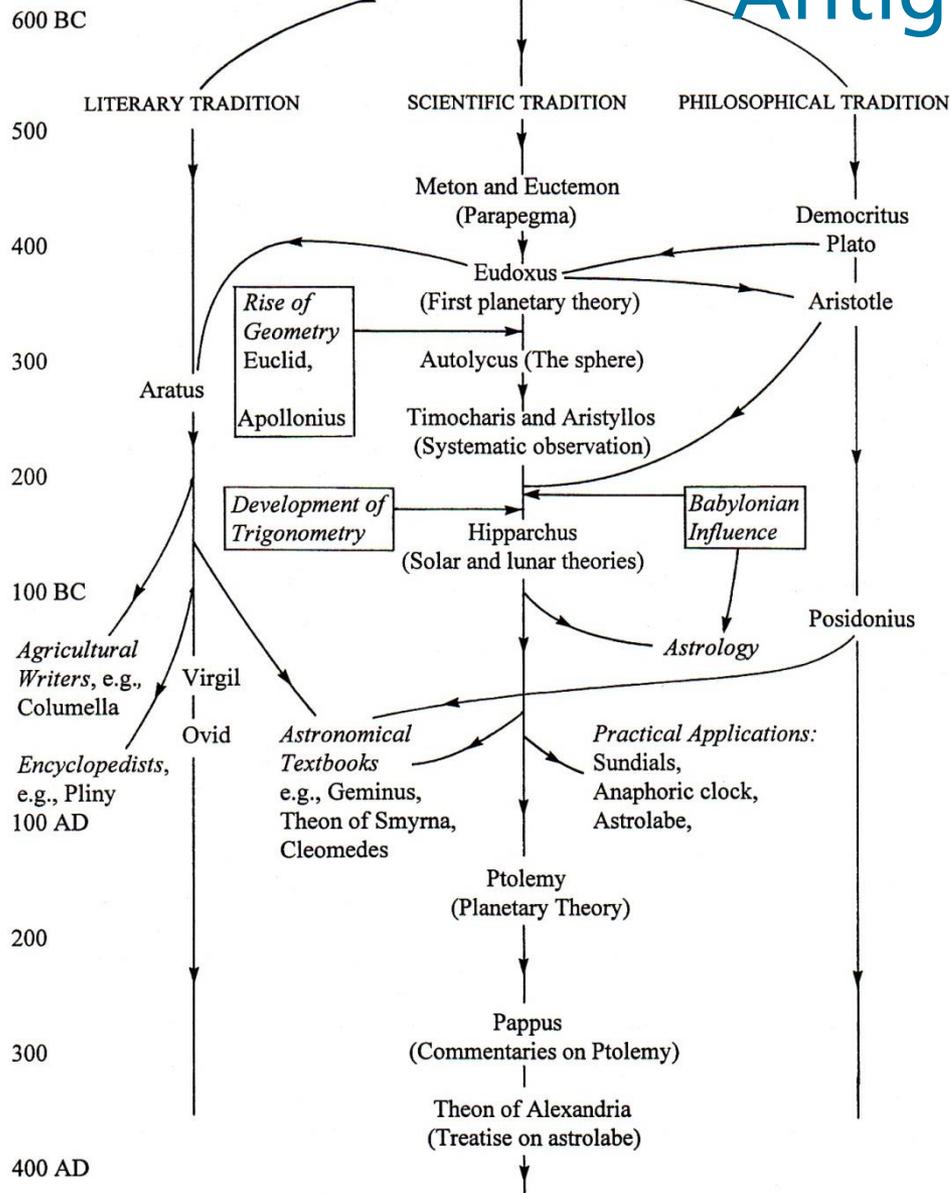
Posidonius

Astrology

Aratus

Virgil

Ovid



Fonte: James Evans, *The history and practice of ancient Astronomy*, p. 28 (Oxford UP, 1998)