

Astrofísica Moderna

Aula 2: Breve introdução histórica

Prof. Aion Viana e Prof. Vitor de Souza

Referências principais da aula:

“Astronomia de Posição”, notas do Prof. Gastão B. Lima Neto IAG/USP

A tradição astronômica grega

- Registros mais antigos: ~3000 AEC (chineses, babilônios, assírios e egípcios)
- Objetivos práticos: agricultura (fazer calendários) e astrologia (deuses)
- Somente a partir do século VII a.C., na Grécia, que verdadeiras teorias cosmológicas começaram a serem criadas com o intuito de não apenas descrever as observações mas explicá-las a partir de princípios básicos.

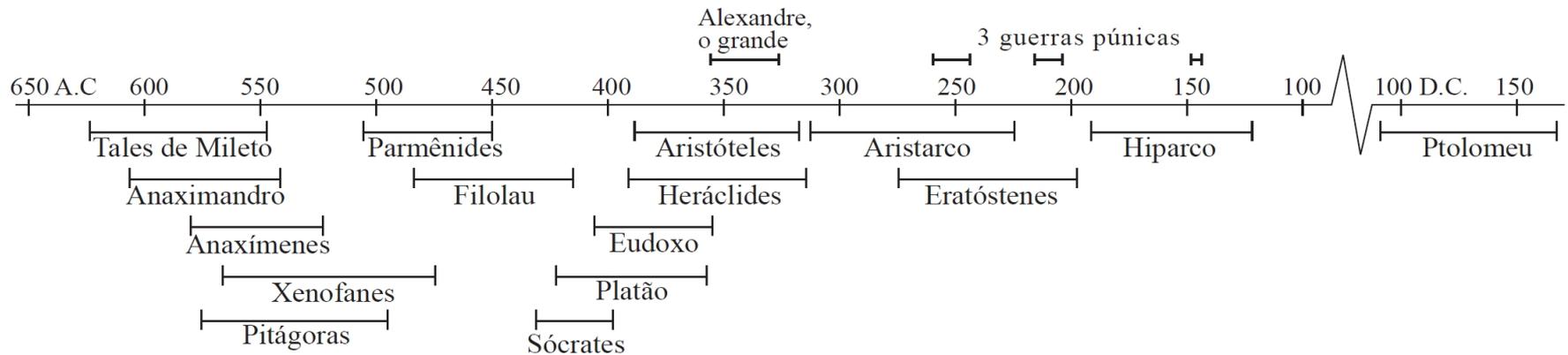
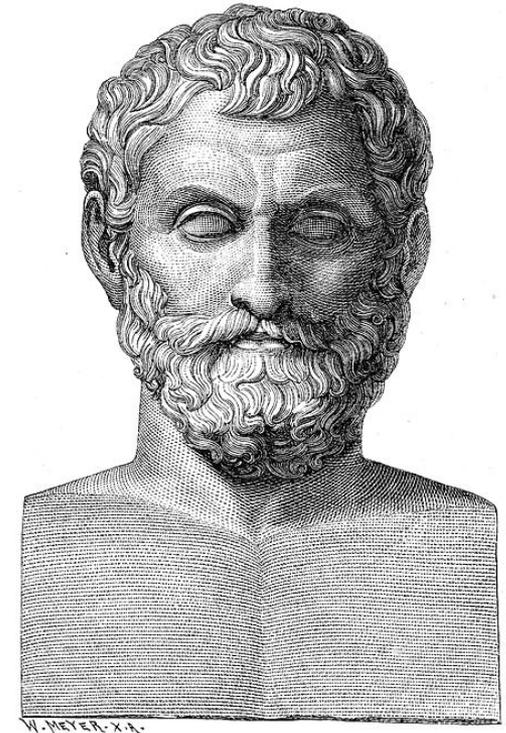


Figura 4.1: Linha do tempo dos principais filósofos da Grécia clássica que tiveram destaque na astronomia.

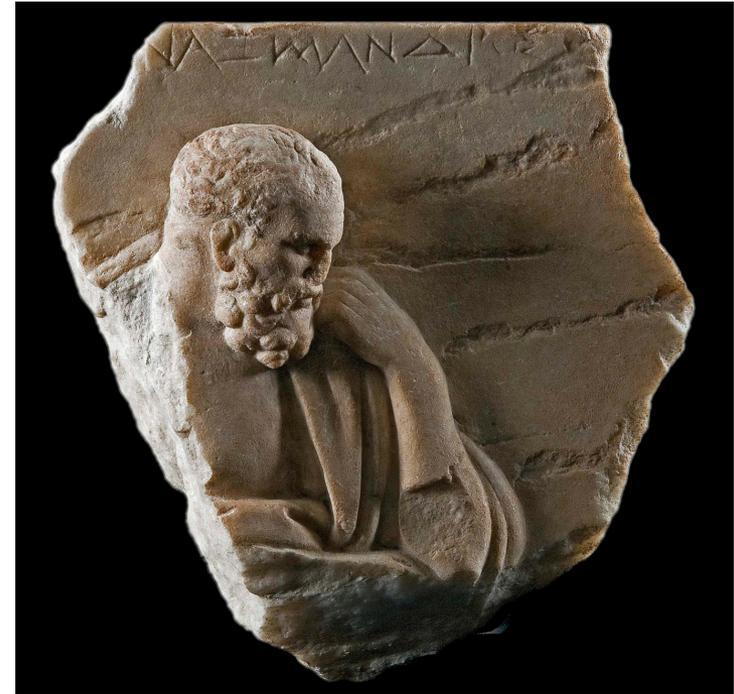
Tales de Mileto (~600 a.C., escola jônica)

- A Terra é um disco achatado flutuando como uma madeira em um oceano cuja a água seria o princípio de tudo e limitado pela abóbada celeste.
- Alega-se que ele foi capaz de prever um eclipse solar. Como ???!!!!
- Tudo o resto gira em torno da Terra



Anaximandro (~550 a.C.)

- Terra esta em equilíbrio no centro do Universo porque só assim ela não cairá;
- A Terra é um cilindro;
- O céu é esférico;
- Os objetos estão em diferentes camadas no céu a distancias diferentes, onde o Sol se encontraria na mais distante e as estrelas fixas na camada mais proxima;
- A Lua estaria numa camada intermediaria.
- As estrelas são furos na esfera sólida;



Universo de Anaximandro

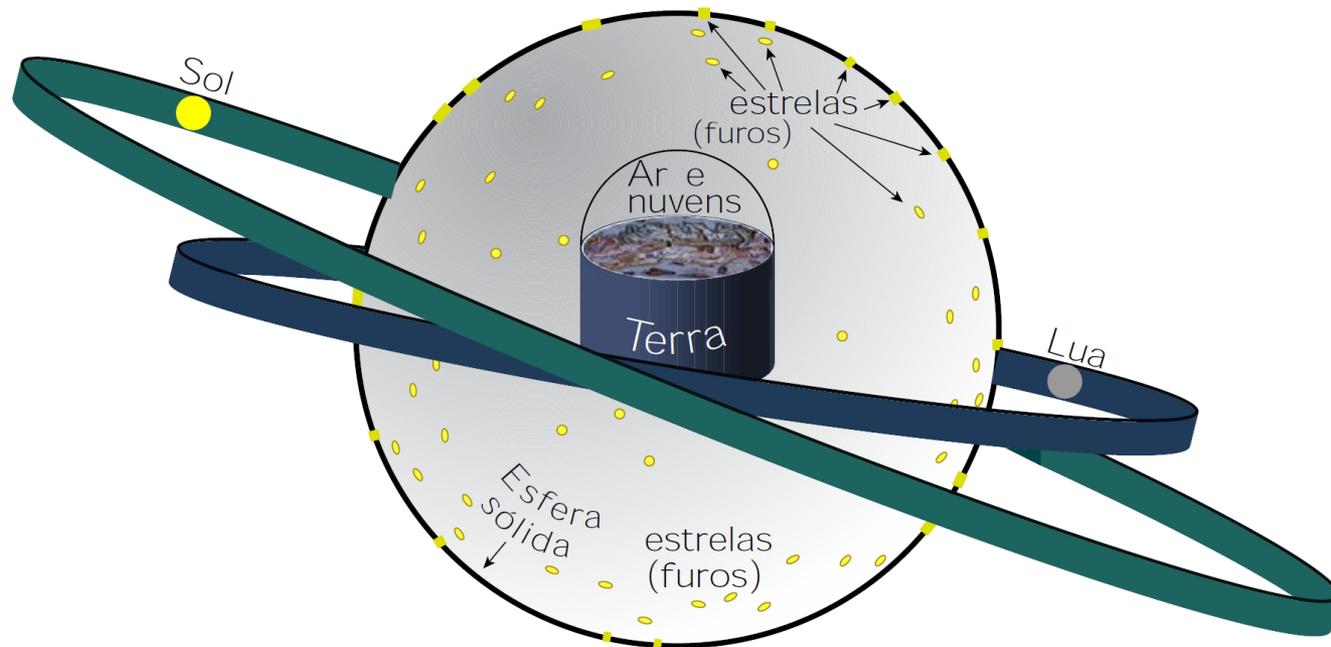


Figura 4.2: Universo de Anaximandro. A Terra fica no centro do Universo, as estrelas são furos em uma esfera sólida, por onde escapa a luz. Em seguida vem um anel com a Lua e um anel mais distante com o Sol.

Anaxímenes de Mileto (~500 a.C.)

- Estrelas estão “pregadas” na esfera celeste, que seria um sólido cristalino
- Terra seria um disco achatado flutuando no ar



Leucipo de Mileto (~450 a.C.)

- a Terra é o hemisfério de uma esfera
- Acima da Terra o ar preenche o hemisfério superior

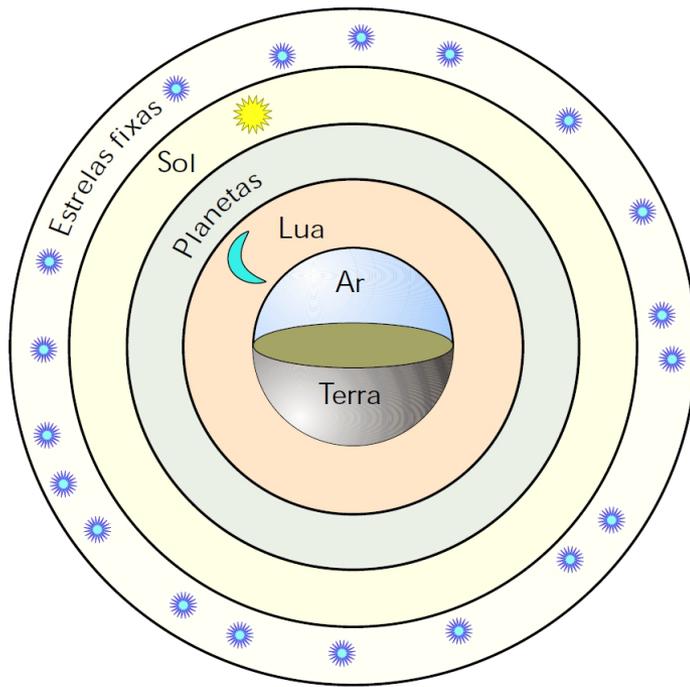
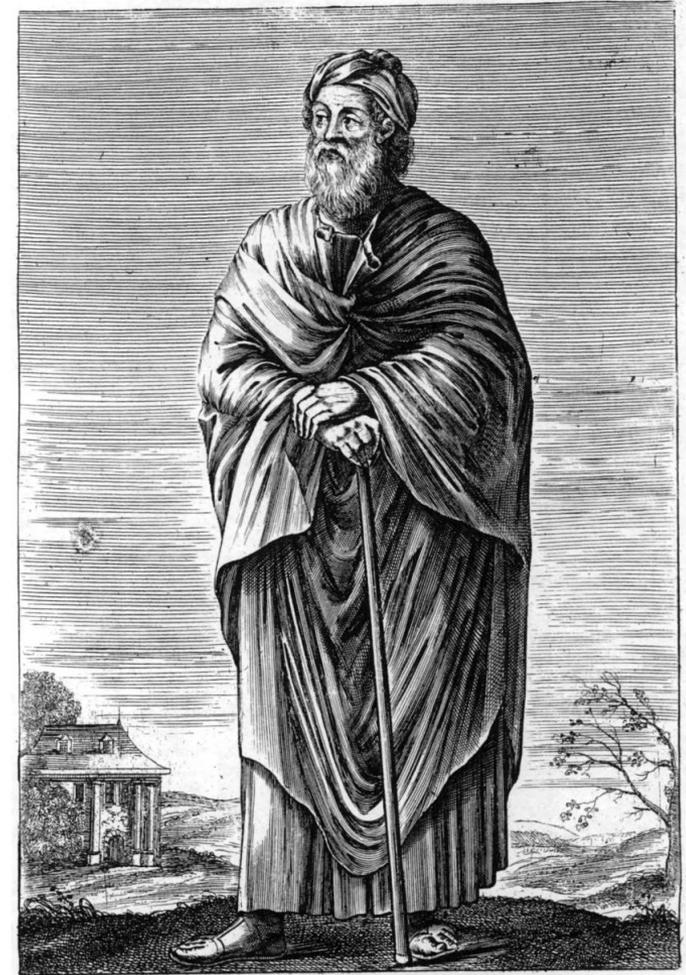


Figura 4.3: Modelo de Universo de Leucipo. A Terra é uma semi-esfera e os astros são fixados em esferas concêntricas transparentes.

Xenofanes de Colophon (~500 A.C., escola eleática)

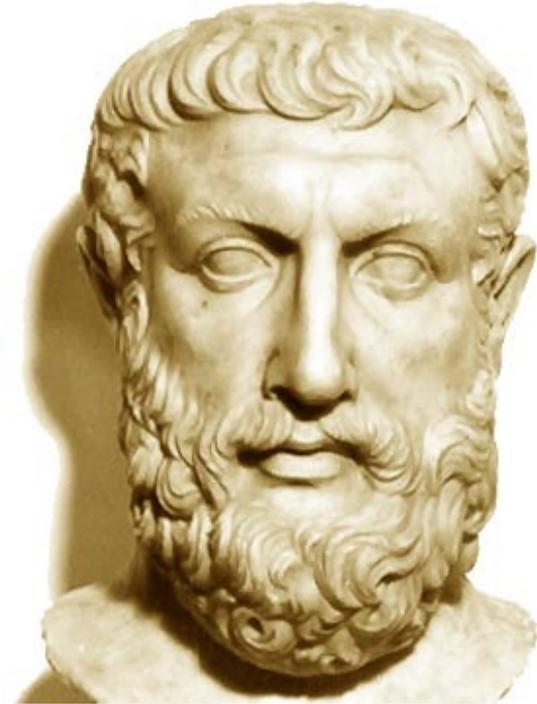
- Terra plana e sem limites, ancorado no infinito;
- Sol e estrelas são nuvens condensadas;
- A trajetória dos astros são retilíneas e a aparência circular é ilusão devido à distância



XENOPHANES.

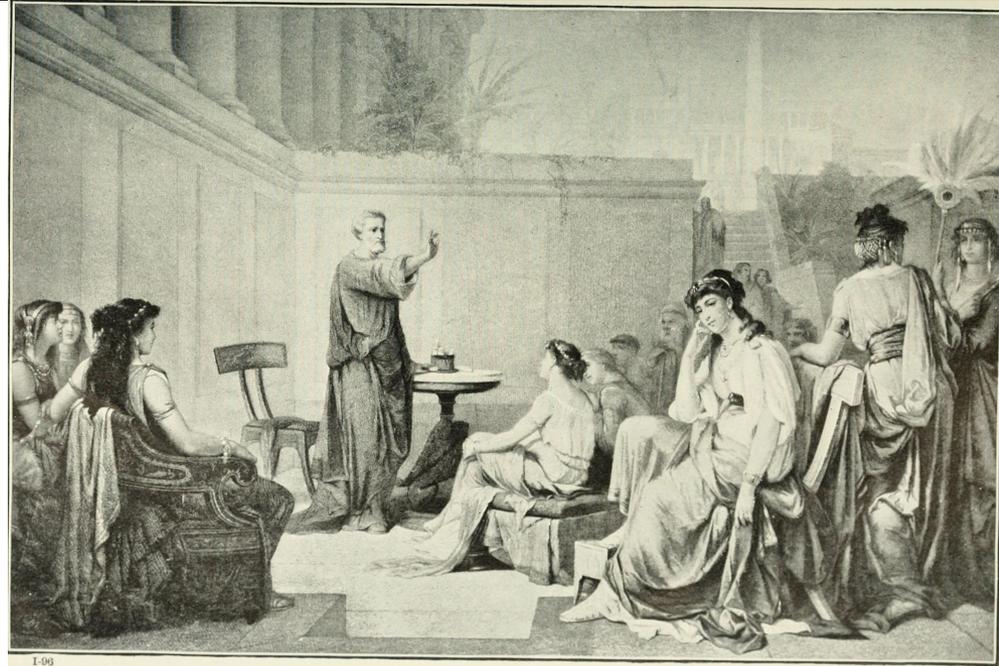
Parmênides (~450 a.C.)

- Terra era uma esfera → grande avanço
- dividiu a Terra em cinco zonas: tropical, temperadas e glaciais;
- O universo é uma série de camadas concêntricas;
- A Lua reflete a luz do Sol;
- A Lua e o Sol se desprenderam da Via Láctea;
- As estrelas estão mais próximas da Terra do que a Lua e o Sol;



Pitágoras (~500 a.C. , escola pitagórica)

- O Universo é governado pela Matemática;
- Terra, água, ar e fogo;
- Identificou Vênus;
- Lua reflete a luz do Sol;
- Planetas tem órbita inclinada em relação ao equador celeste;



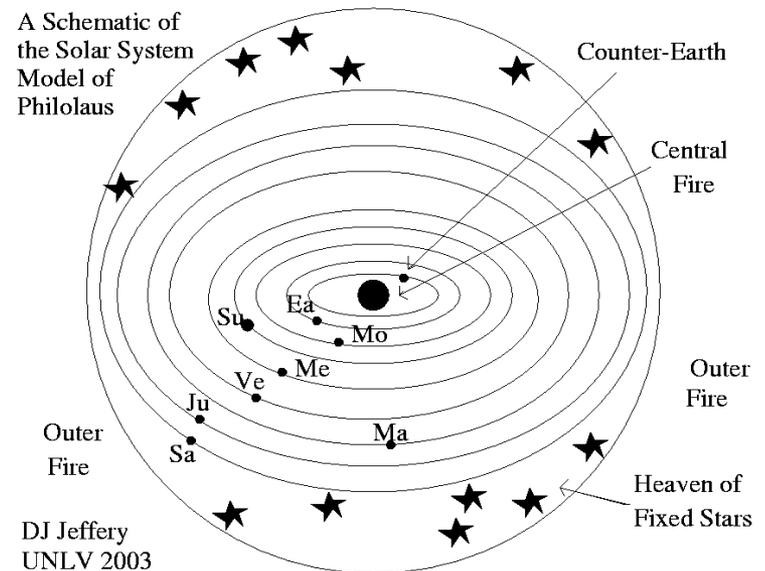
A regularidade dos movimentos celestes e os intervalos regulares das harmonias musicais levou os pitagóricos a conclusão de que cada um dos planetas, assim como as estrelas, estariam em esferas cujo movimento produziriam uma nota musical. Esta musica celestial seria, e claro, impossível de ser escutada pelos seres humanos.

Filolau (~480 a.C.)

- Primeiro filósofo a propor que a Terra não está no centro do Universo;
- No centro tem um fogo: Héstia;
- A Terra é esférica e gira em torno do fogo central;
- Lua, sol e planetas também giram em torno do fogo central: Terra, a Lua, o Sol, Vênus, Mercúrio, Marte, Júpiter e Saturno;
- Existe uma Anti-Terra entre a Terra e o fogo central;



A Schematic of the Solar System Model of Philolaus



Eudoxo (~350 a.C.)

- Ciclo solar = $(3 \times 365 + 366 \text{ dias})$;
- A Terra está no centro do Universo;
- Cada planeta está ligado a várias esferas homocentricas;
- Explicava a diferença de duração das estações:
 - Verão = 88.99 dias
 - Primavera = 92.75 dias
 - Inverno = 93.65 dias
 - Outono = 89.95 dias
- Primeiro filósofo a tentar dar uma explicação matemática para o movimento dos planetas

Sistema de Eudoxo

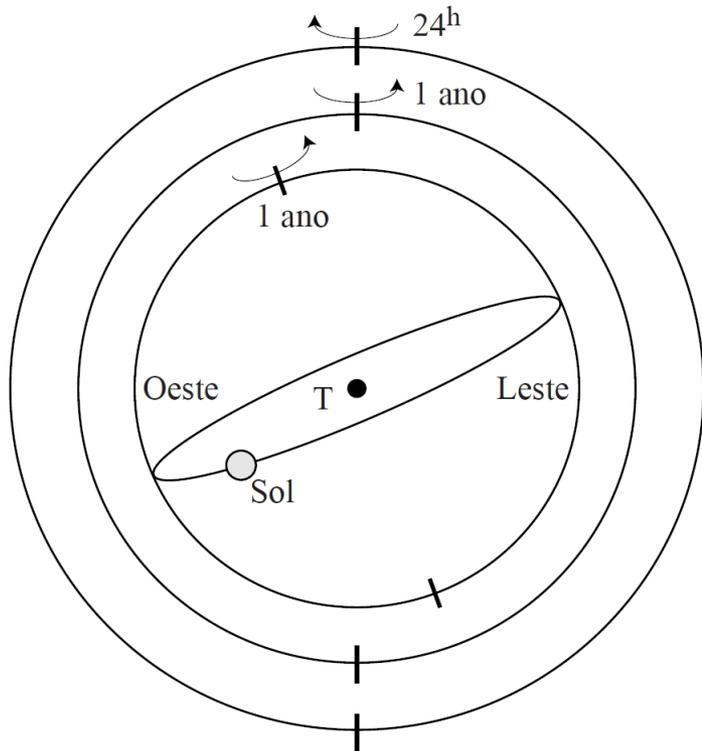
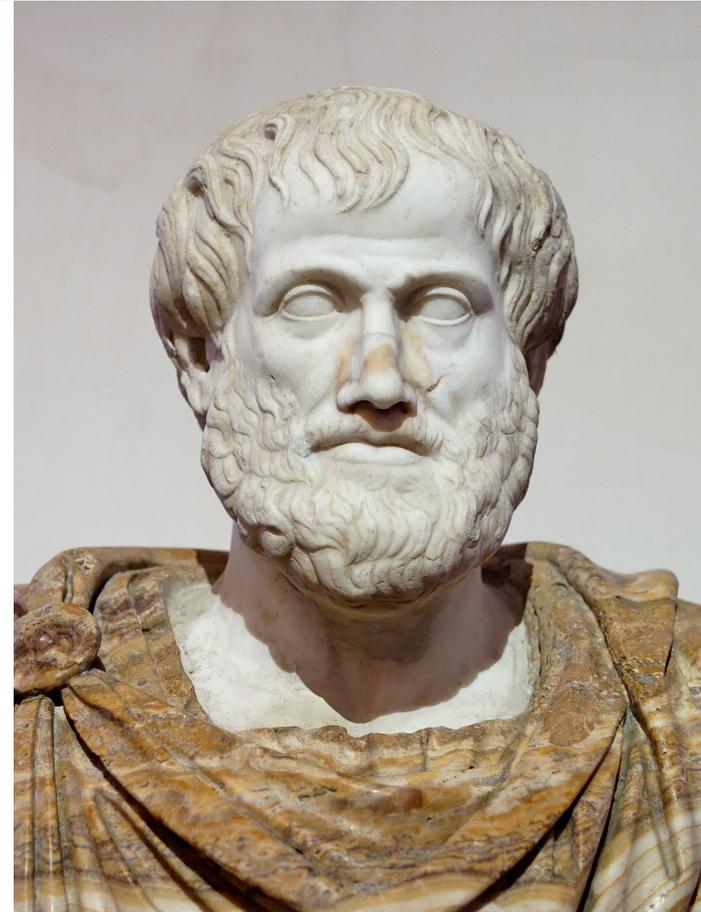


Figura 4.4: Movimento do Sol segundo a teoria das esferas homocêntricas de Eudoxo. As esferas têm mesmo raio e foram desenhadas desta forma para maior clareza. A primeira esfera (mais externa no desenho), é responsável pelo movimento aparente diário; as duas outras esferas reproduzem o movimento aparente anual do Sol. A inclinação da terceira esfera (mais central) é igual à obliquidade da eclíptica. A Terra fica imóvel no centro.

Aristóteles (~350 a.C.)

- Universo esférico e finito;
- Quatro elementos;
- Terra imóvel no centro;
- Esferas homocêntricas de Eudoxo;
- Esferas eram reais de cristal transparente;
- Acrescentou esferas pra Marte;
- “Explicou” eclipses do Sol e da Lua;
- Sombra da Terra na Lua -> Terra é esférica-
Também porque estrelas visíveis no Egito
não o são da Grécia.



Modelo aristotélico

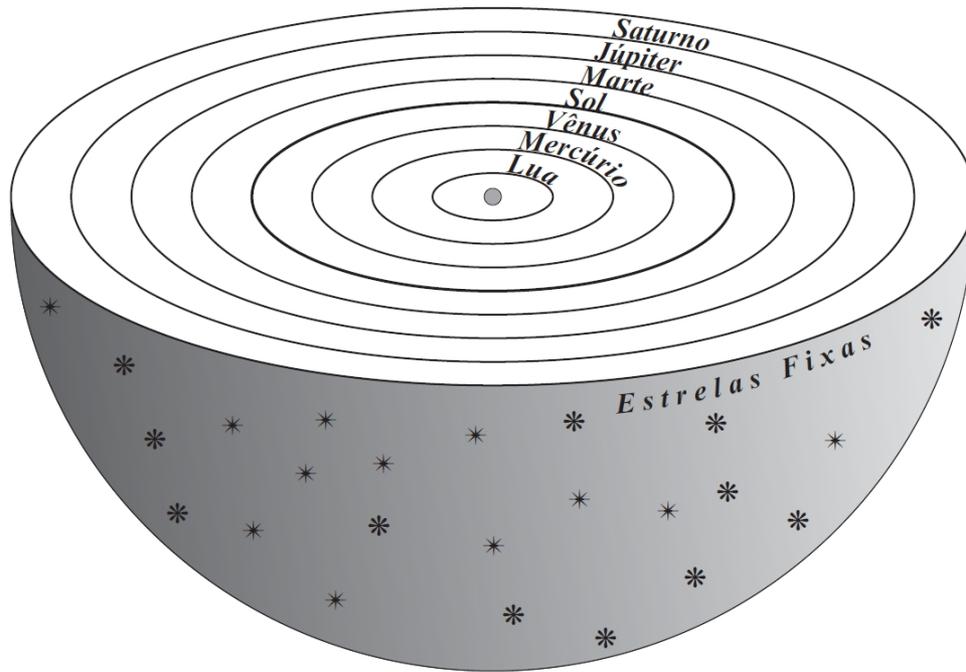


Figura 4.5: Universo aristotélico. A Terra fica imóvel no centro e os astros celestes estão colados em esferas concêntricas.

Heráclides Ponticus (~350 a.C.)

- Contemporâneo de Aristóteles
- a Terra gira em torno dela mesma em torno de um eixo que passava pelos polos celestes;
- Mercúrio e Vênus giram em torno do Sol → explica porque estão sempre próximos do Sol

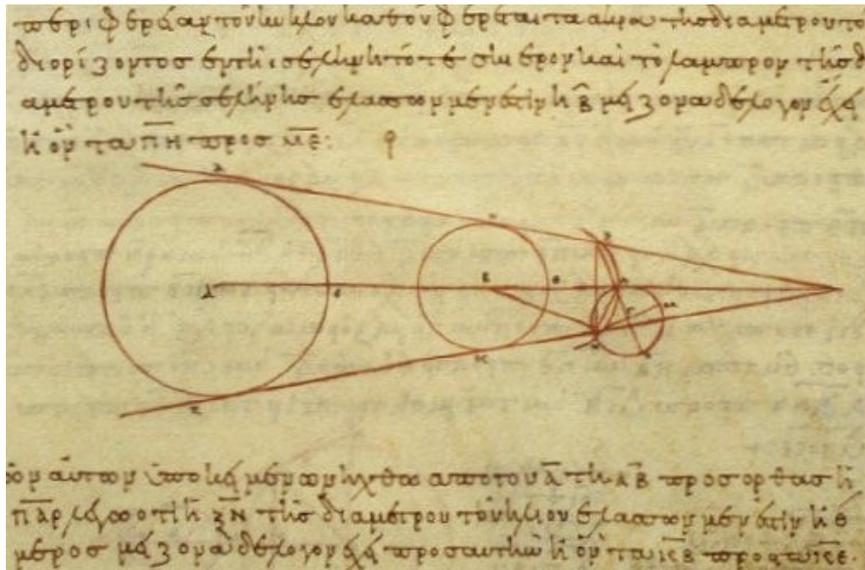
Aristarco de Samos (~260 a.C.)

- Primeiro filósofo a propor que o Sol estava no centro do Universo;
- Dava os mesmos resultados que Aristóteles;
- Mediu o tamanho e as distâncias relativas do sistema Sol, Terra e Lua



Aristarco de Samos (~260 a.C.)

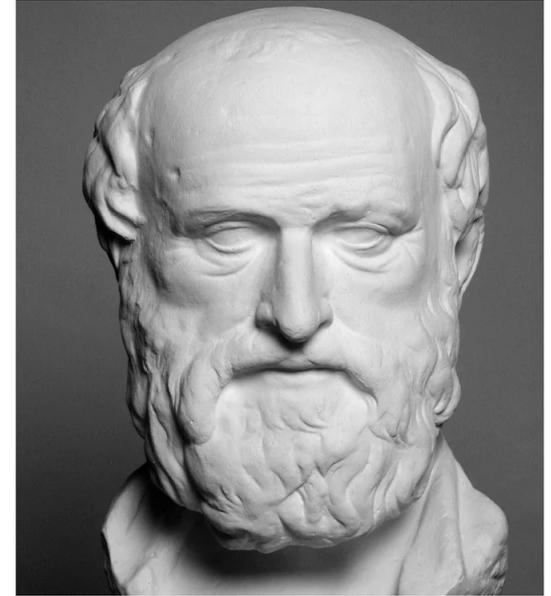
- Primeiro filósofo a propor que o Sol estava no centro do Universo;
- Dava os mesmos resultados que Aristóteles;
- Mediu o tamanho e as distâncias relativas do sistema Sol, Terra e Lua



Semelhança de triângulos
+
Tamanho angular do sol e da lua são iguais

Erastóstenes (~276 a.C.)

- Mediu o tamanho da Terra: 252.000 *stadia*
- 1 *stadium* ~185 m em Attic → 16% de erro.
- 1 *stadium* ~ 157.5 m no Egito → 1% de erro.



Erastóstenes (~276 a.C.)

- Mediu o tamanho da Terra: 252.000 *stadia*
- 1 *stadium* ~185 m em Attic → 16% de erro.
- 1 *stadium* ~ 157.5 m no Egito → 1% de erro.

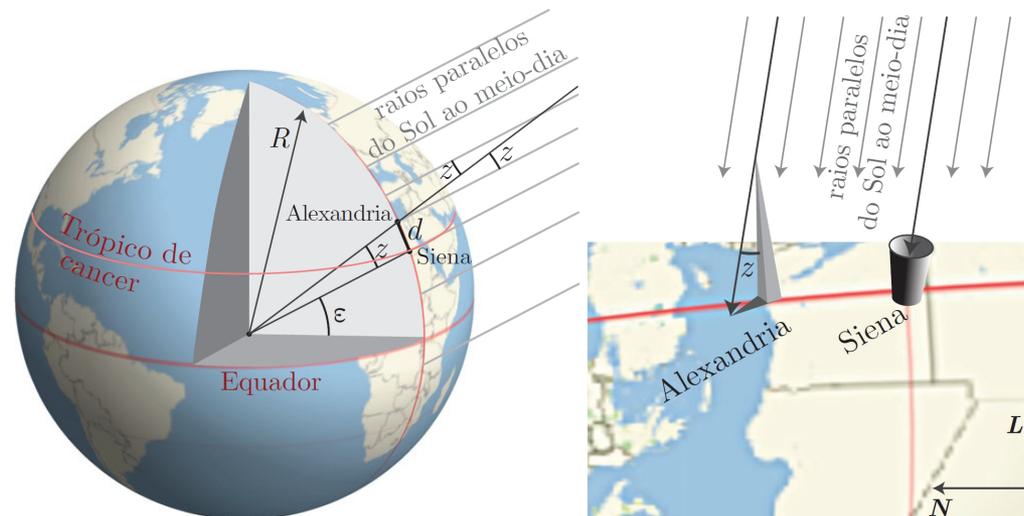
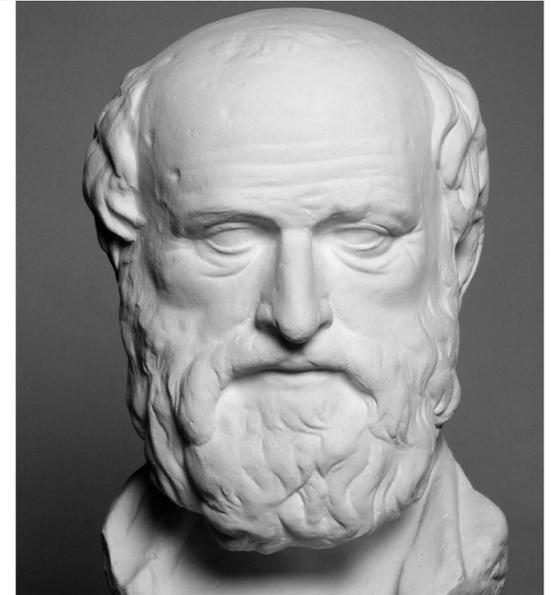


Figura 4.25: Ao meio-dia do solstício de Verão no hemisfério norte, o Sol tem um ângulo zenital z em Alexandria e zero em Siena (hoje, Assuã). A distância entre as duas cidades é d , R é o raio da Terra e ϵ é a obliquidade da eclíptica na época de Eratóstenes.

Hiparcos (~150 a.C.)

- Construiu um observatório na ilha de Rodes;
- Fez medidas precisas
- Fez um catálogo de estrelas;
- Criou um sistema de magnitudes;
- Mediu a precessão da Terra (~26000 anos);
- Mediu precisamente a distância da Terra a Lua.



Ptolomeu (~85 d.C.)

- Compilou o Almagesto (iniciado por Hiparcos);
- Deu a forma definitiva para o sistema geocêntrico do Universo: epiciclos;

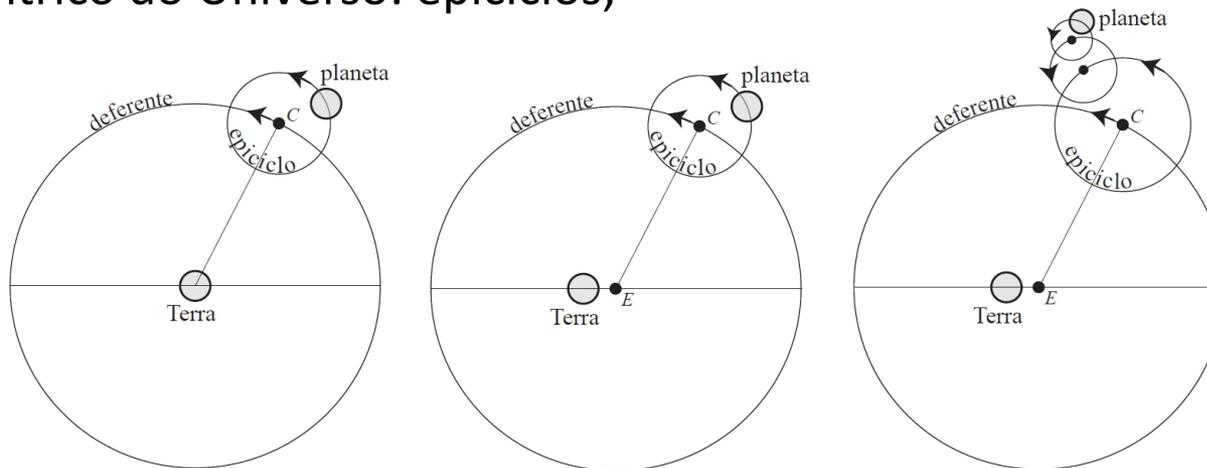


Figura 4.6: Sistema de epiciclos. Esquerda: a Terra se encontra no centro do círculo (deferente) onde o epiciclo orbita. O planeta por sua vez gira em torno do ponto C , centro do epiciclo. Meio: Hiparco notou que, para levar em conta a velocidade variável no movimento anual do Sol, a Terra deveria ser deslocada do centro do deferente (E). Isto é, existe uma excentricidade na posição da Terra (ainda hoje se emprega este termo quando nos referimos a elipses, cujo centro não coincide com o foco). Direita: Para poder explicar precisamente todas as irregularidades das órbitas dos planetas, Ptolomeu introduziu epiciclos que giram em torno de epiciclos.

Ptolomeu (~85 d.C.)

- Epiciclos: representação em série de funções circulares (senos e cossenos) da posição dos planetas
- Se manteve por razões religiosas: perfeição divina (círculo) e geocentrismo

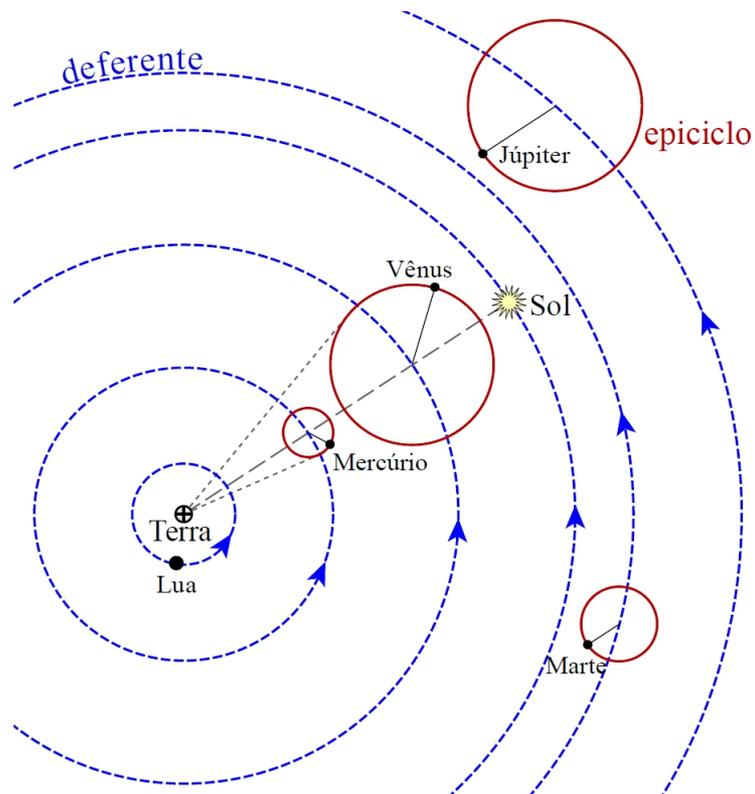


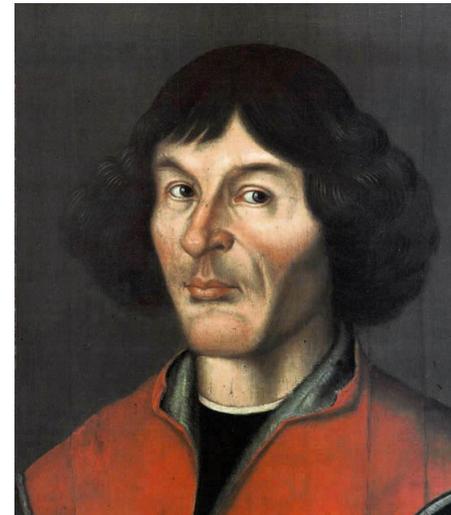
Figura 4.7: Sistema de Ptolomeu mostrando a relação entre as posições dos epiciclos de Mercúrio e Vênus alinhado com a direção Terra-Sol, assim como os raios dos epiciclos dos planetas externos paralelos à direção Terra-Sol.

Modelo heliocêntrico

- **Aristarco (~260 a.C)**
 - Universo heliocêntrico
 - A Terra se move em torno do Sol



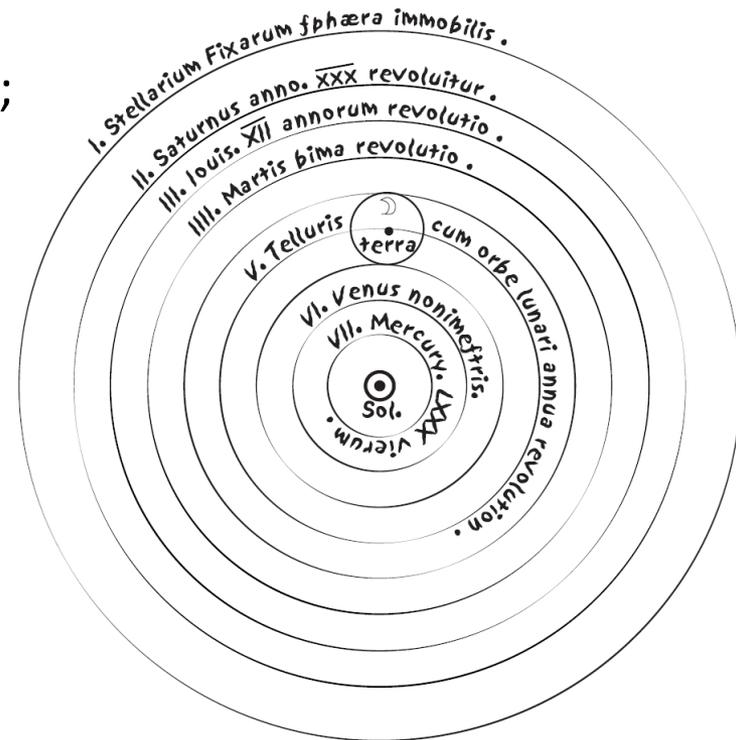
- **Nicolau Copérnico (1543)**
 - Órbitas circulares em torno do Sol



Nicolau Copérnico (1543)

- Sol no centro (baseando-se em Filolau, Heráclides e, principalmente, Aristarco de Samos);
- Terra gira em torno do próprio eixo e do Sol;
- Planetas tem movimento circular e uniforme;
- Ordem correta dos planetas: período proporcional a distância.
- Explica o movimento retrógrado.

Figura 4.8: O sistema solar segundo Copérnico. Os planetas se movem em órbitas circulares em torno do Sol. Para poder prever corretamente a posição dos planetas, Copérnico também precisou introduzir epiciclos em seu sistema Heliocêntrico.



Movimento aparente do planetas

Planeta vem do grego: πλανήτης ('planētēs' «vagabundo, errante»)

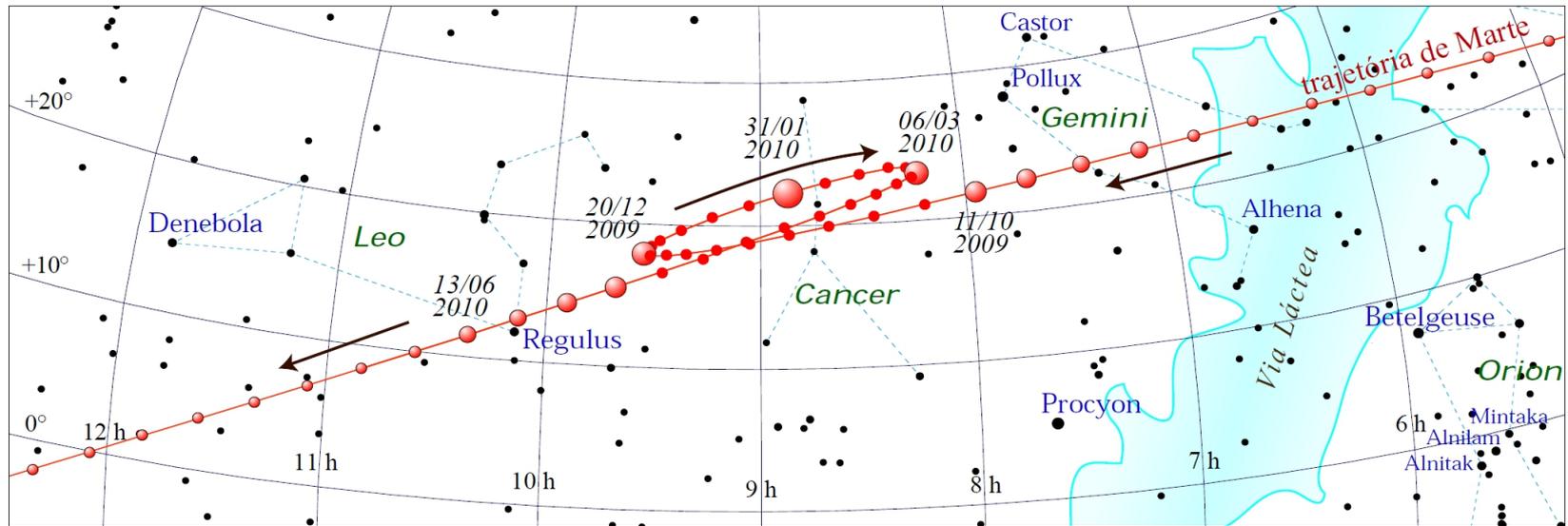


Figura 1.9: Movimento aparente de Marte na esfera celeste ilustrando o movimento retrógrado. O intervalo entre duas posições ao longo da trajetória corresponde a uma semana. O tamanho aparente de Marte está representado de forma aproximada (e fora de escala). O movimento retrógrado dos planetas externos ocorre quando o planeta passa pela conjunção (Fig 4.12 na seção 4.9). Também estão indicadas algumas estrelas brilhantes, constelações e as coordenadas equatoriais.

Movimento aparente do planetas

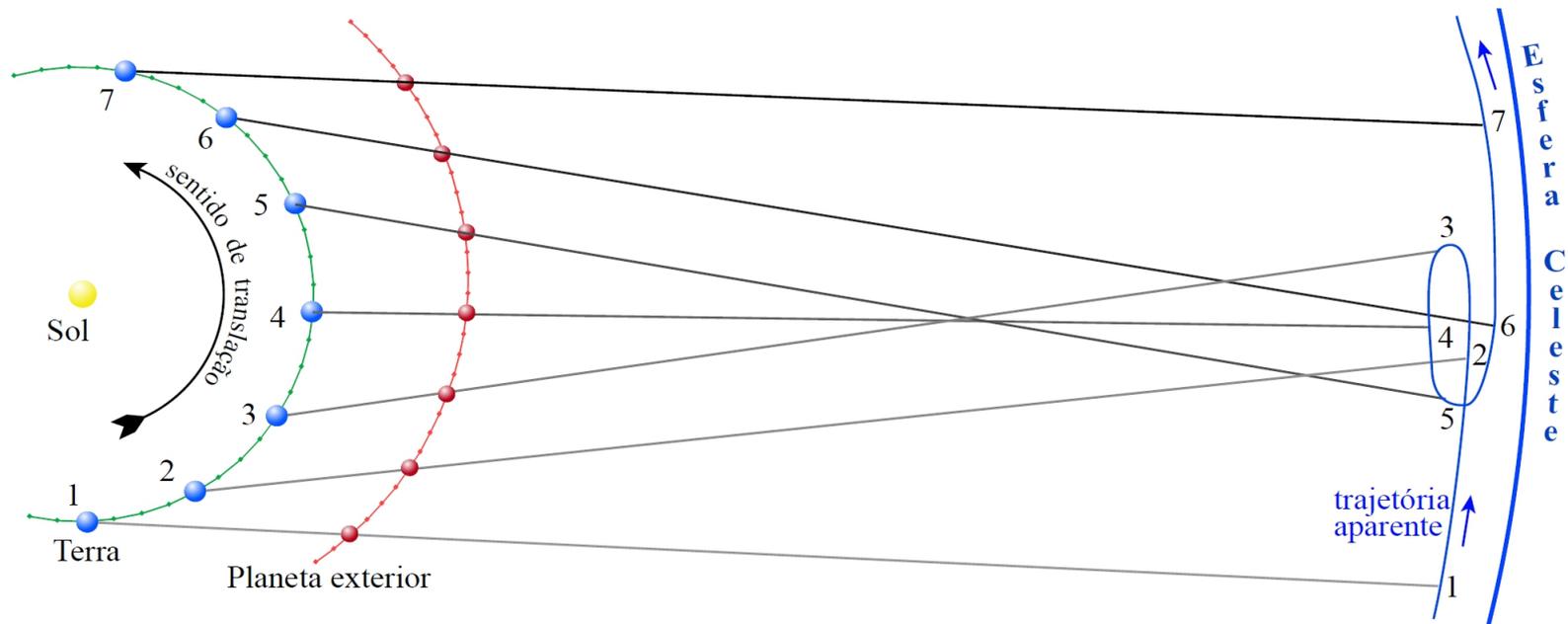


Figura 1.10: Posições da Terra e Marte em suas órbitas em torno do Sol no mesmo período do Fig. 1.9. Entre as posições marcadas 1 e 3, o movimento aparente de Marte é direto. Entre as posições 3 e 5, o movimento é retrógrado e, em seguida volta a ser direto. Em 4, Marte está em oposição. As posições nas órbitas correspondem a intervalos de 4 semanas.

Galileu Galilei (1564-1642)

- Criou a luneta
- Luas de Júpiter: existem astro que não giram em torno da Terra.
- Sombras na Lua

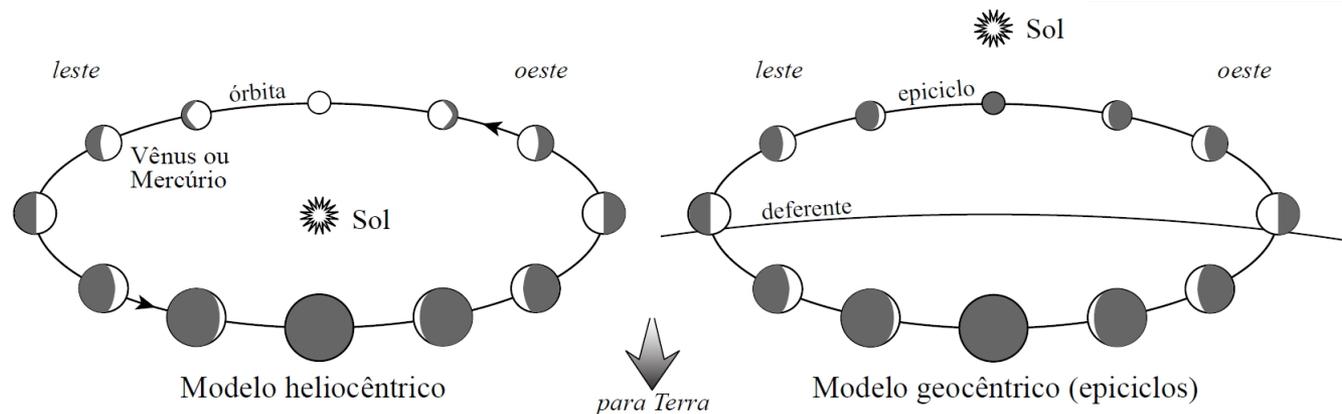
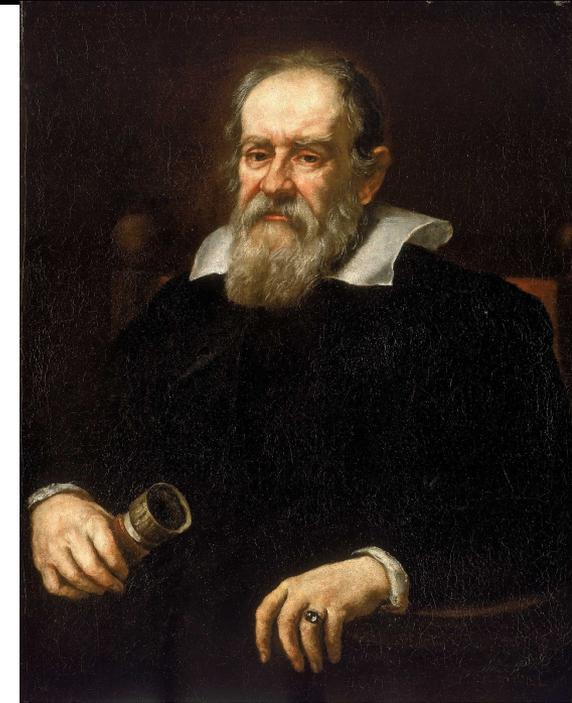
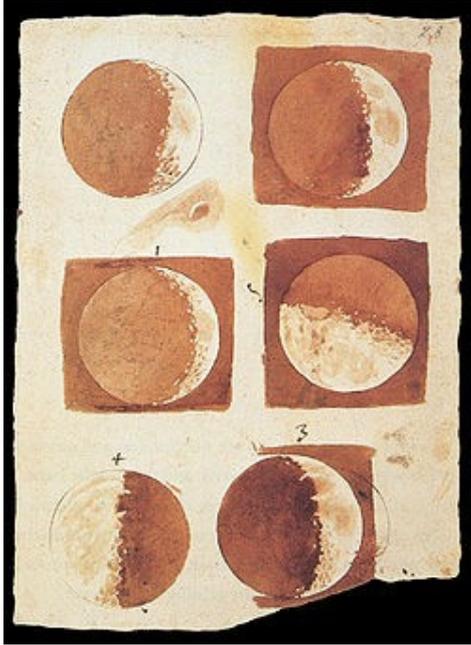


Figura 4.9: Esquerda: Fases de um planeta interno (Mercúrio ou Vênus) visto da Terra no modelo heliocêntrico. Direita: Fases de um planeta interno observadas da Terra no modelo geocêntrico. Antes do uso da luneta por Galileu, não era possível distinguir as fases destes planetas.

Superfície da Lua



Observações da Lua feita por Galileu em 1616. Note nos desenhos que Galileu foi capaz de observar pela primeira vez o relevo do solo lunar através das sombras irregulares.



Primeira foto da lua feita por um satellite enviado pela então URSS em 1959.



Primeira pegada humana na Lua em 1969.

Modelo heliocêntrico pós-Copérnico

- **Tycho Brahe (~ 1590)**

- observações detalhadas do movimento dos planetas, em particular de Marte. (mas acreditava no universo geocêntrico)

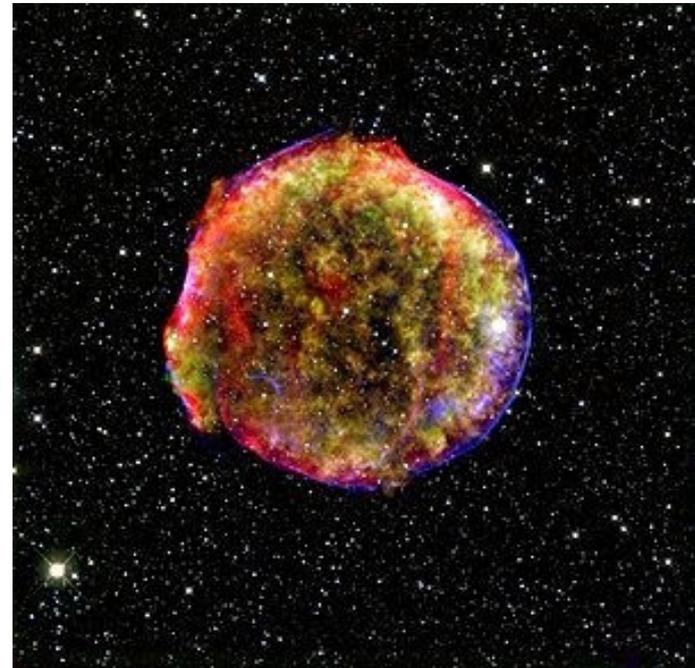
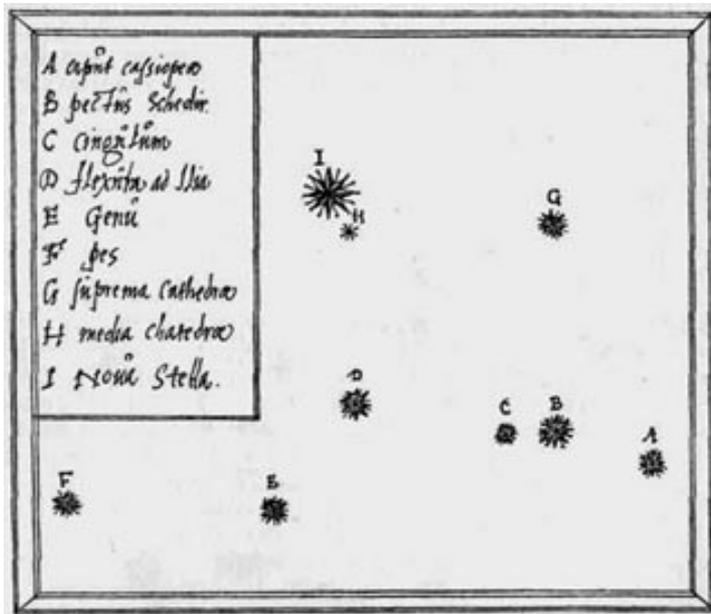


- **Johannes Kepler (1609)**

- Utiliza dados de Tycho Brahe.
- Inicialmente acredita no universo geocêntrico, mas adota a visão heliocêntrica devido à sua própria análise
- Observando dados: abandona movimento circular do SS: adota elipses



Supernova de Tycho



O desenho acima mostra as observações feitas por Tycho Brahe em 1572. Nesta época ainda não se utilizavam telescópios. No desenho, Tycho marca uma estrela pela letra I. Esta estrela não estava lá no dia anterior, ou seja, ela apareceu de um dia pro outro. Esta foi a primeira evidência de que o céu não era estático, quebrando as teorias vigentes sobre o Universo. Estes objetos passaram a ser chamados de supernova. A imagem a direita feita pelos telescópios Chandra, Spitzer e Calar Alto mostra uma foto atual da mesma supernova vista por Tycho Brahe em 1572.

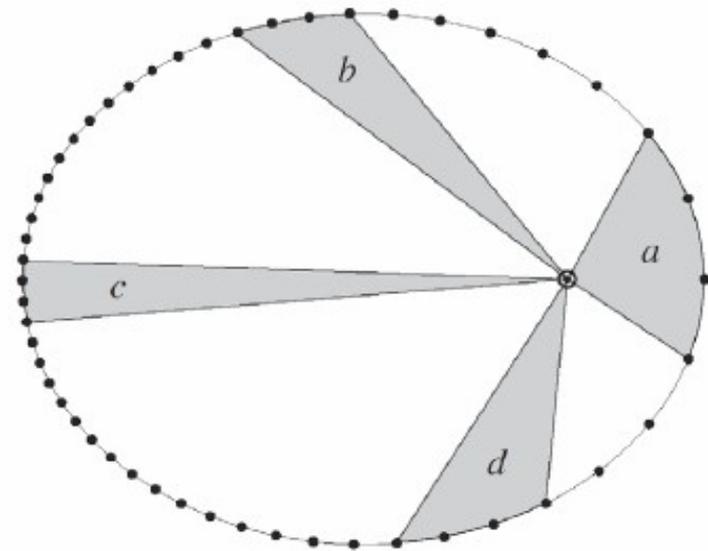
Modelo heliocêntrico

- **Johannes Kepler**

- Órbitas elípticas em torno do Sol
- **3 leis empíricas dos movimentos planetários** (entre 1609–1619):

- Os planetas se movem em elipses, com o Sol em um dos focos;
- A linha que liga o Sol a um dado planeta varre áreas iguais em tempos iguais;
- O quadrado da razão dos períodos de translação de 2 planetas é igual ao cubo da razão entre as distâncias dos planetas ao Sol

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3$$



**Explicadas pela
teoria da gravitação
de Newton (1687)**

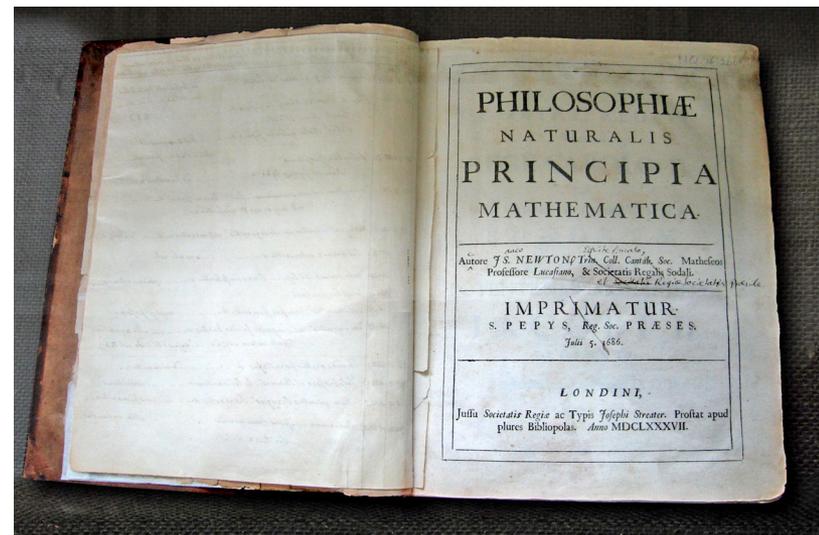
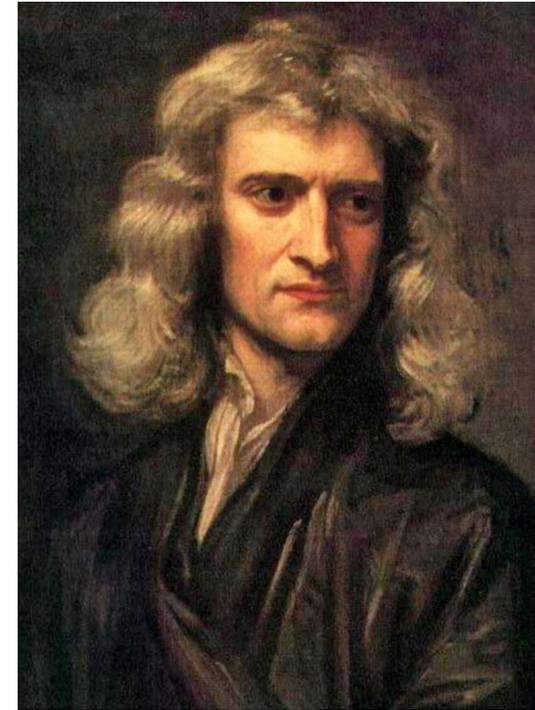
Isaac Newton (1643-1727)

- Fim da era empírica

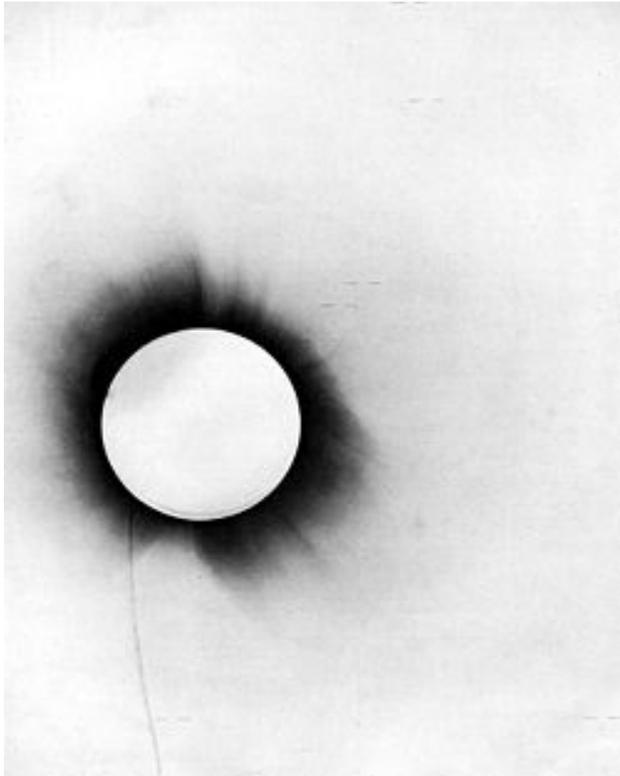
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$\vec{F} = -\frac{GMm}{r^2} \hat{r}$$

- Teoria da Gravitação Universal



Espaço-tempo e relatividade de Einstein



A foto da esquerda mostra um eclipse do Sol que aconteceu em 1919 e foi tirada em Sobral, Ceára, por um equipe coordenada pelo Sir Arthur Eddington. Esta foto foi a primeira comprovação da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Após analisar estas fotos os cientistas concluíram que a luz curva-se ao atravessar um região com campo gravitacional intenso comprovando assim as previsões de Einstein.

A foto da direita feita pelo telescópio Hubble mostra um quasar multiplicado por 4 pela gravidade de um galáxia grande. O quasar está no centro da imagem, mas sua luz é desviada pela gravidade da galáxia como uma lente e nós aqui na Terra vemos 4 imagens do mesmo objeto. Está é uma demonstração atual da mesma Teoria da Relatividade de Einstein feita em 1919.

Matéria Escura

Fritz Zwicky



Utilizando o efeito Doppler relativístico Fritz Zwicky calculou as velocidades das galáxias no aglomerado de Coma. Ele calculou a massa total aplicando o teorema do Virial:

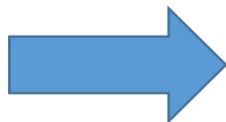
$$T = -\frac{1}{2}F \cdot x$$

T=energia cinética

F=força gravitacional

x=posição da galáxia

Ele achou que a massa gravitacional era 100 vezes maior do que a massa visível.



Coma deve conter uma grande quantidade de massa não visível = matéria escura

Matéria Escura: choque de aglomerados

Bullet cluster ou Aglomerado da Bala



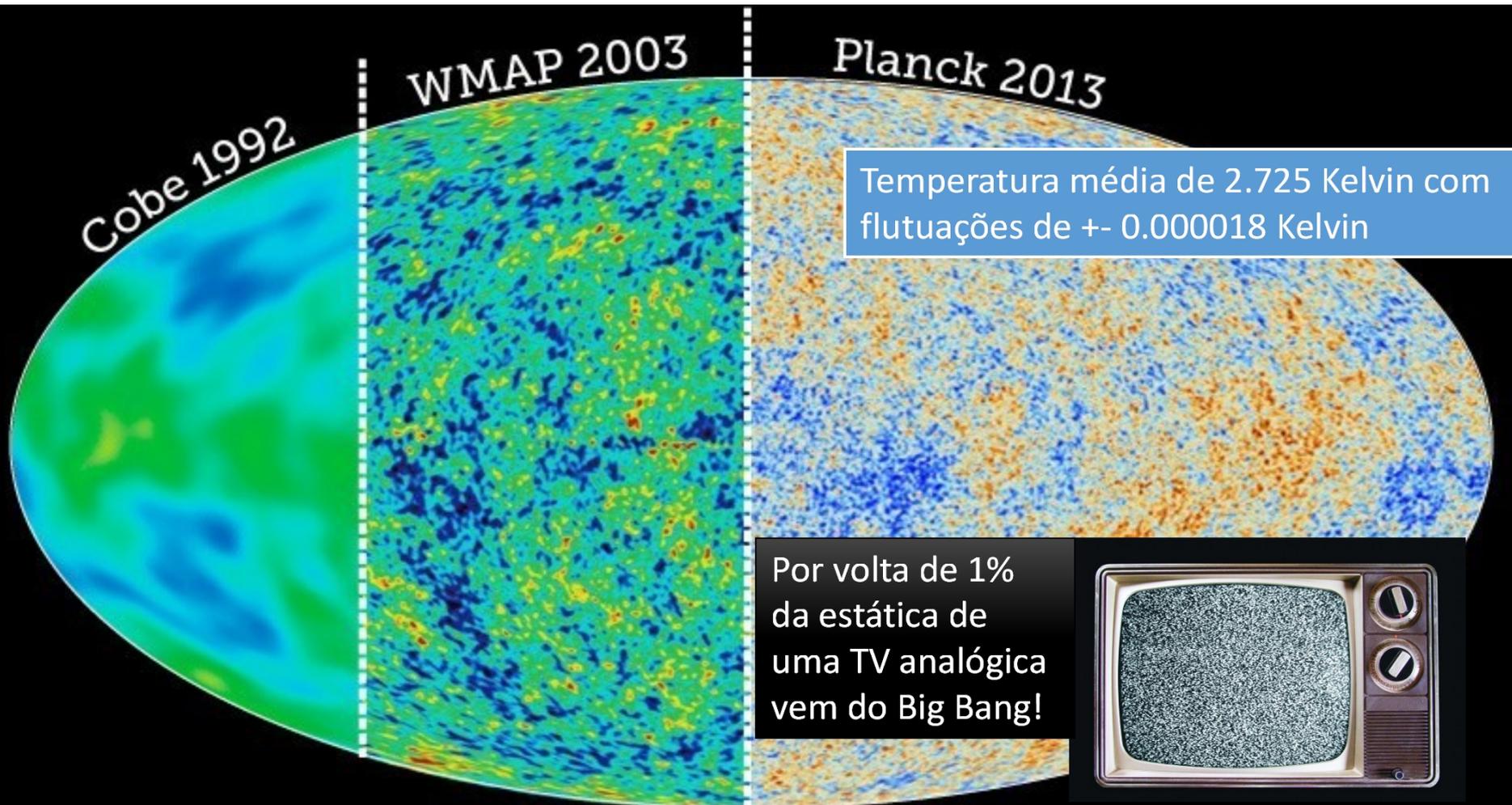
Gás de matéria comum quente devido ao choque

Distribuição de matéria escura medido com lente gravitacional

Quando dois aglomerados se chocam os halos de matéria escura devem passar sem interagir, enquanto que a matéria comum será puxada para frente pelo seu próprio halo, e para trás pelo outro.

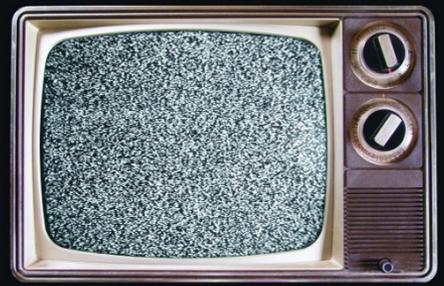
Radiação cósmica de fundo em micro-ondas

- Somente após 380000 anos do Big Bang a luz se desacopla da matéria e pode se propagar livremente no Universo
- Com a expansão do Universo os fótons se esfriam e hoje são detectados como a **radiação cósmica de fundo em micro-ondas (CMB, *Cosmic Microwave background*)**



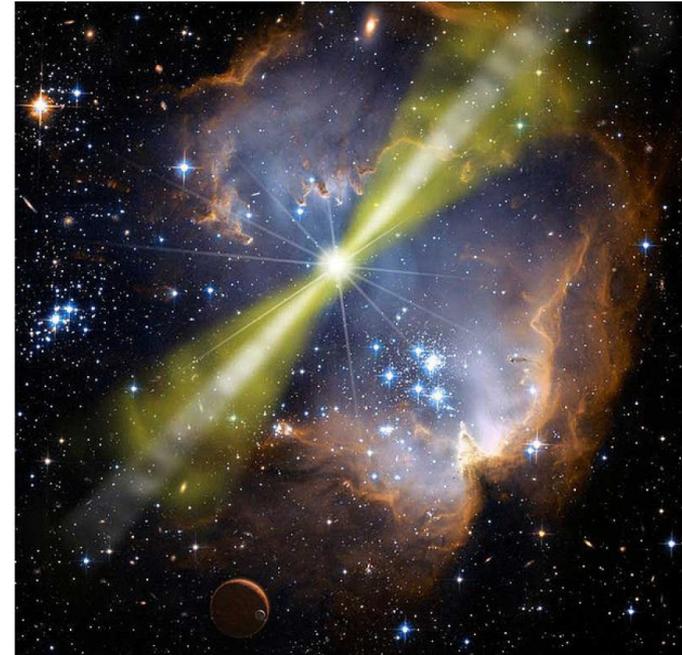
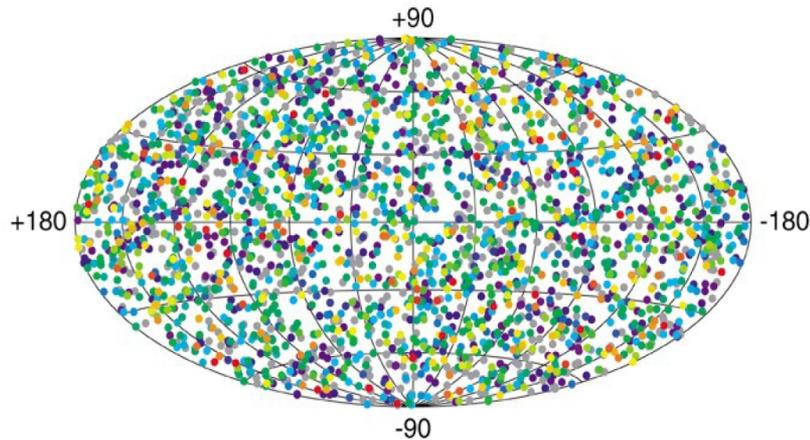
Temperatura média de 2.725 Kelvin com flutuações de +- 0.000018 Kelvin

Por volta de 1% da estática de uma TV analógica vem do Big Bang!



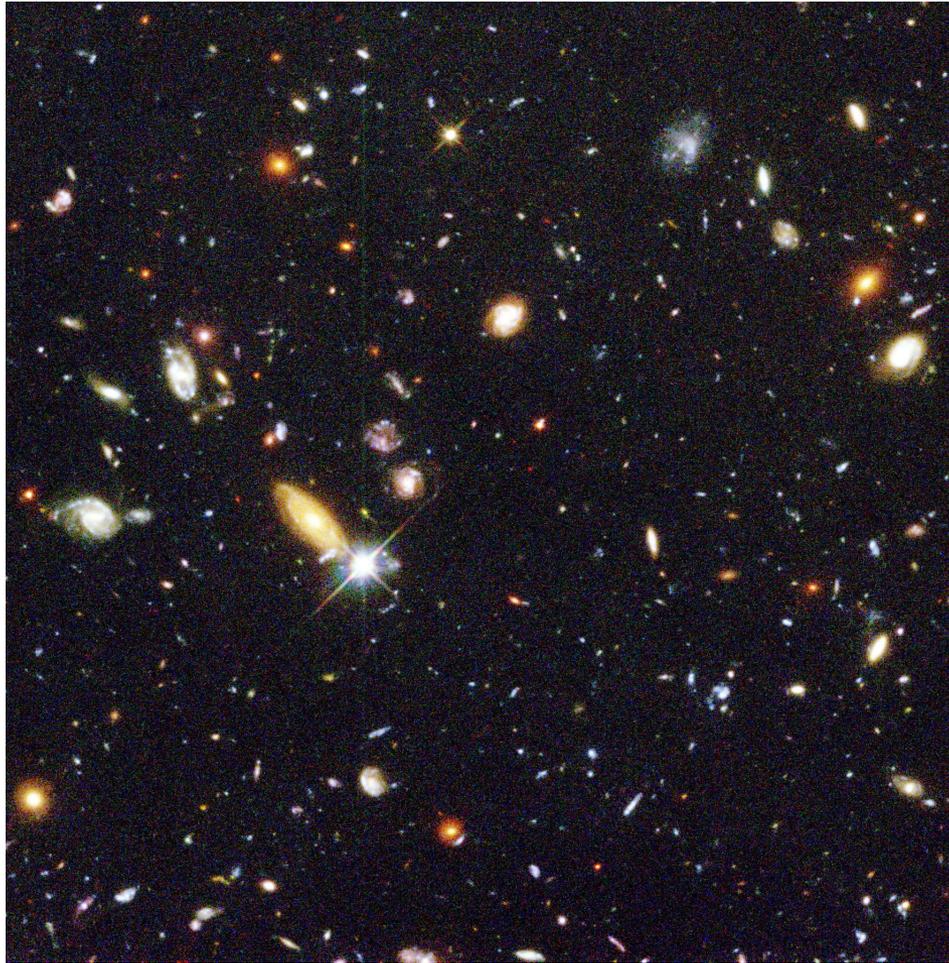
Gamma-ray bursts

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



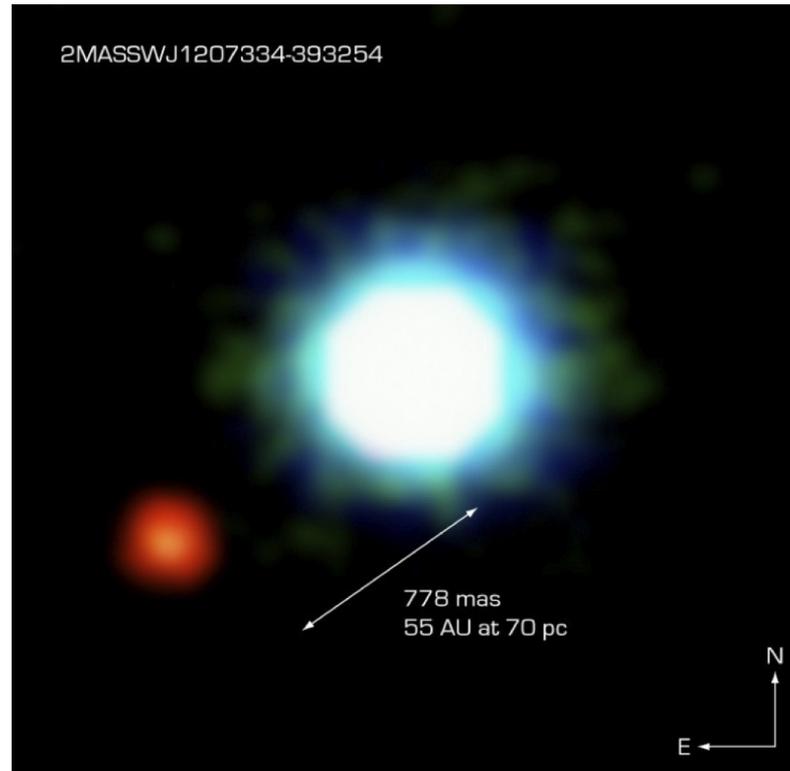
Na década de 60, satélites foram lançados pelos EUA para monitorar testes nucleares dos seus inimigos. A análise do sinal desses satélites mostravam grandes explosões vindas da direção oposta da Terra, ou seja, do Universo. Assim foram descobertas essas explosões em galáxias distantes chamadas de Gamma-Ray Bursts. Esses são os acontecimentos mais luminosos que acontecem no Universo e os detalhes de como essas explosões acontecem ainda não são compreendidos. A figura a esquerda mostra a distribuição das explosões no Universo e a figura a direita mostra uma ilustração artística de como essas explosões poderiam acontecer no interior de uma região formadora de estrelas.

Hubble Ultra Deep Field



A imagem acima feita em 1996 pelo telescópio Hubble da NASA mostra as galáxias mais distantes já vistas pelo ser humano. Cada ponto brilhante nesta imagem é uma galáxia com bilhões de estrelas em seu interior. Esta imagem tem sido usada para estudar a evolução do Universo até os tempos mais remotos.

Planetas extrasolares



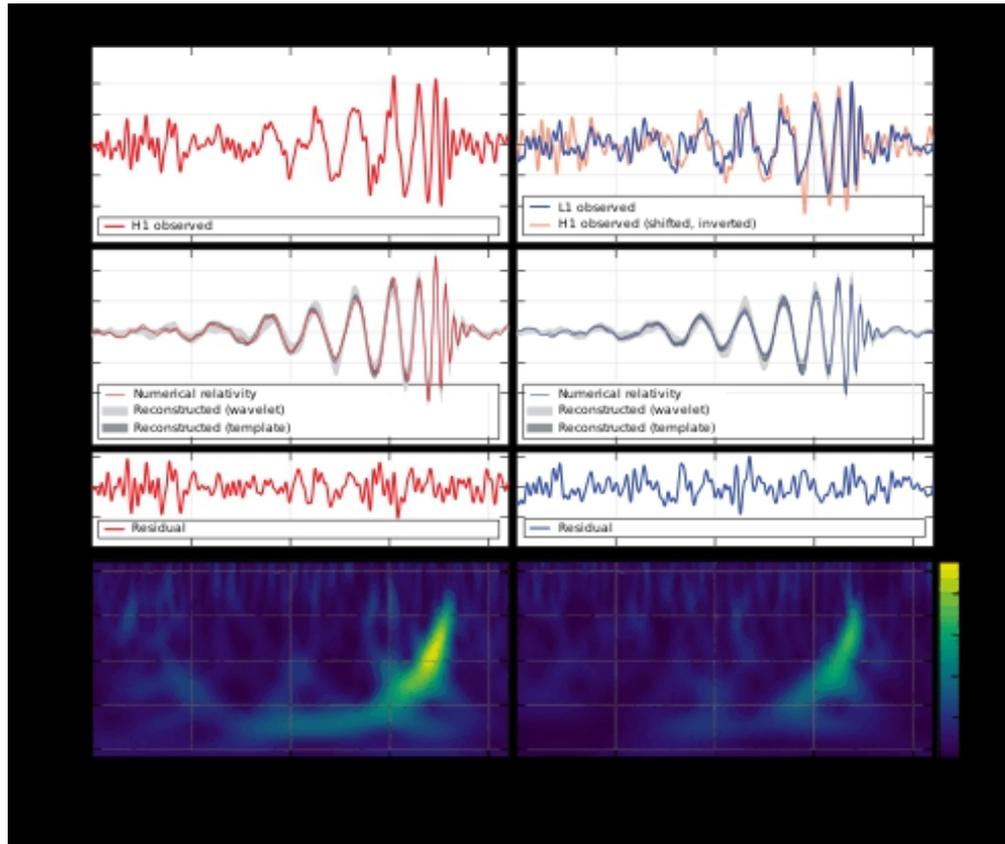
The Brown Dwarf 2M1207 and its Planetary Companion
(VLT/NACO)

ESO PR Photo 14a/05 (30 April 2005)



Em 2007 o telescópio VLT no Chile tira a primeira foto de um planeta fora do sistema solar. A imagem acima mostra o planeta em vermelho e a estrela que ele orbita no centro da figura. Hoje já são conhecidos mais de 3000 planetas fora do sistema solar graças ao avanço dos telescópios e ao uso de novas técnicas de análise.

Ondas gravitacionais



Em Fevereiro de 2016 o experimento LIGO anunciou a detecção das primeiras ondas gravitacionais, previstas na Teoria da Relatividade Geral de Einstein, cruzando a Terra e causando distorções no espaço-tempo. O sinal detectado foi proveniente da fusão de dois buracos negros a mais de 1.3 bilhões de anos luz.