



Universidade Federal do ABC

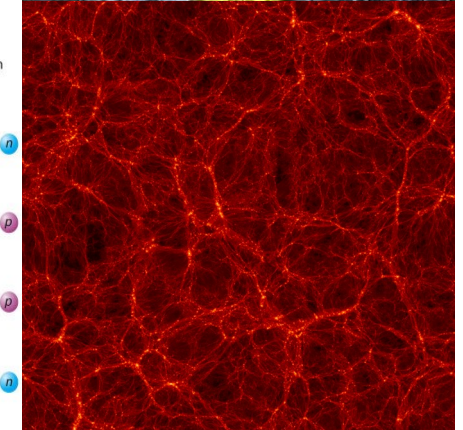
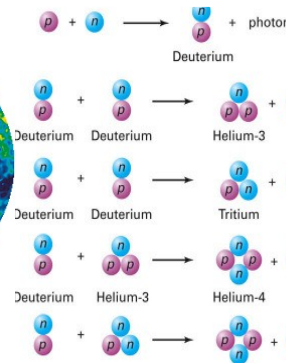
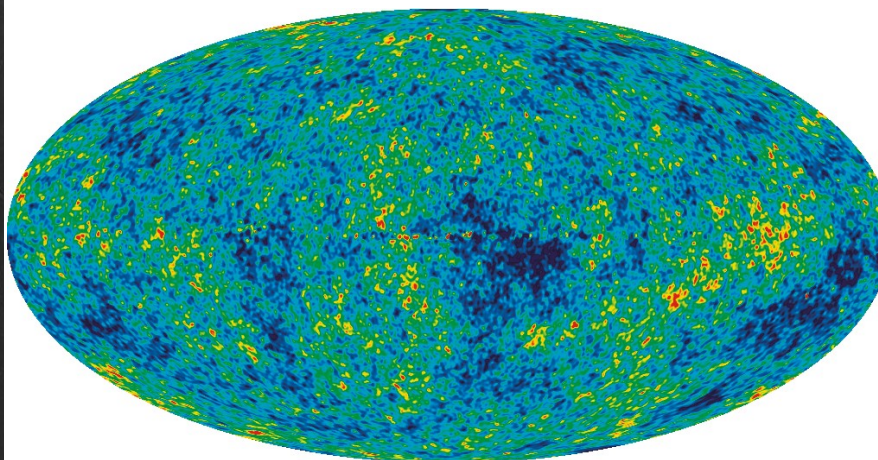
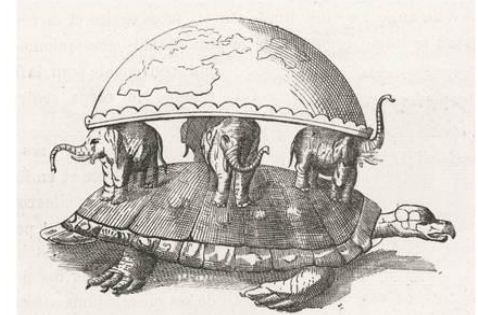
# Introdução à Cosmologia

## 01. História I

Prof. Pieter Westera

[pieter.westera@ufabc.edu.br](mailto:pieter.westera@ufabc.edu.br)

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>



# Introdução à Cosmologia

Wikipedia:

A **Astronomia**, ou **Astrofísica** (do grego astron (ἄστρον), "estrela" e nomos (νόμος), "lei" ou "cultura") é uma **ciência natural** que estuda **corpos celestes** (como estrelas, planetas, cometas, nebulosas, aglomerados de estrelas, galáxias) e fenômenos que se originam **fora da atmosfera da Terra** (como a radiação cósmica de fundo em micro-ondas). Ela está preocupada com a **evolução**, a **física**, a **química**, e o **movimento** de **objetos celestes**, bem como a **formação** e o **desenvolvimento** do **Universo**.

!! Astronomia **não** é **Astrologia**, q. d. **não** trata de horoscópios e afins.

# Cosmologia

wikipedia: Cosmologia (do grego κοσμολογία, κόσμος="cosmos"/"ordem"/"mundo" + -λογία="discurso"/"estudo") é o ramo da **astronomia** que estuda a **origem**, **estrutura** e **evolução** do **Universo** a partir da aplicação de **métodos científicos**.

O Modelo mais aceito hoje em dia é o do *Big Bang* (Vide maior parte desta disciplina).

# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

Wikipedia: **Cosmogonia** (ou Cosmogenia) é qualquer **modelo** relacionado à **existência** (ou seja, a **origem**) que seja do **cosmos** (ou o **universo**), ou da chamada **realidade** dos seres sencientes. A cosmogonia é a **especulação** sobre a **origem** e **formação** do **mundo** que se encontra em muitos **mitos religiosos** e na **filosofia** dos **pré-socráticos**, principalmente Tales de Mileto, o primeiro a buscar a origem de todas as coisas, acreditando encontrá-la na água, considerada por ele como a substância primordial do universo.

Se usa de métodos **não tão científicos** assim...

# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

A **cosmologia** de cada **grupo social** é um reflexo da **cultura** e do **momento histórico** de quem a inventa.

"Funções":

- Oferecer **visão integradora** do mundo
- Oferecer **tranquilidade psicológica** (**crença** coletiva)
- **Organização da vida em comunidade**

# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Egípcios

Centrada em **Ma'at**, a **ordem fixa** e **eterna** do **Universo**, frequentemente personificada como **deusa** e que era **renovada ciclicamente**. Destaque na viagem diária pelo céu de **Rá**, **deus do Sol**.



A **Terra** era uma **extensão plana** de **terra**, personificada pelo **deus Geb**, sobre ela a **deusa** do **céu Nut**, os dois separados pelo **deus** do **ar**, **Shu**.

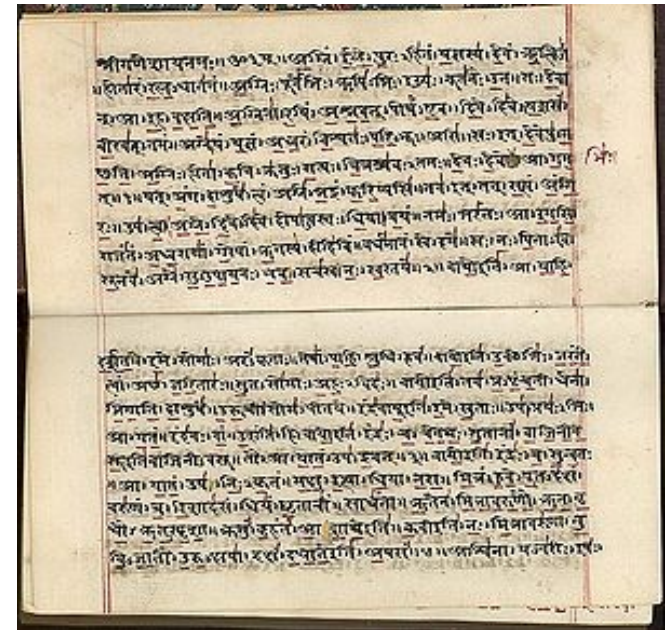
# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

Hindus (Rigveda, 1700-1100 a.C.)

Um **ciclo de existência** é por volta de 311 trilhões de anos, e a **vida de um Universo** é cerca de **8 bi. de anos**. Este **ciclo universal** é precedido por um **número infinito de universos** e deve ser **seguido** por outro **número infinito de universos**.

Também inclui um **número infinito de universos** em um dado momento.

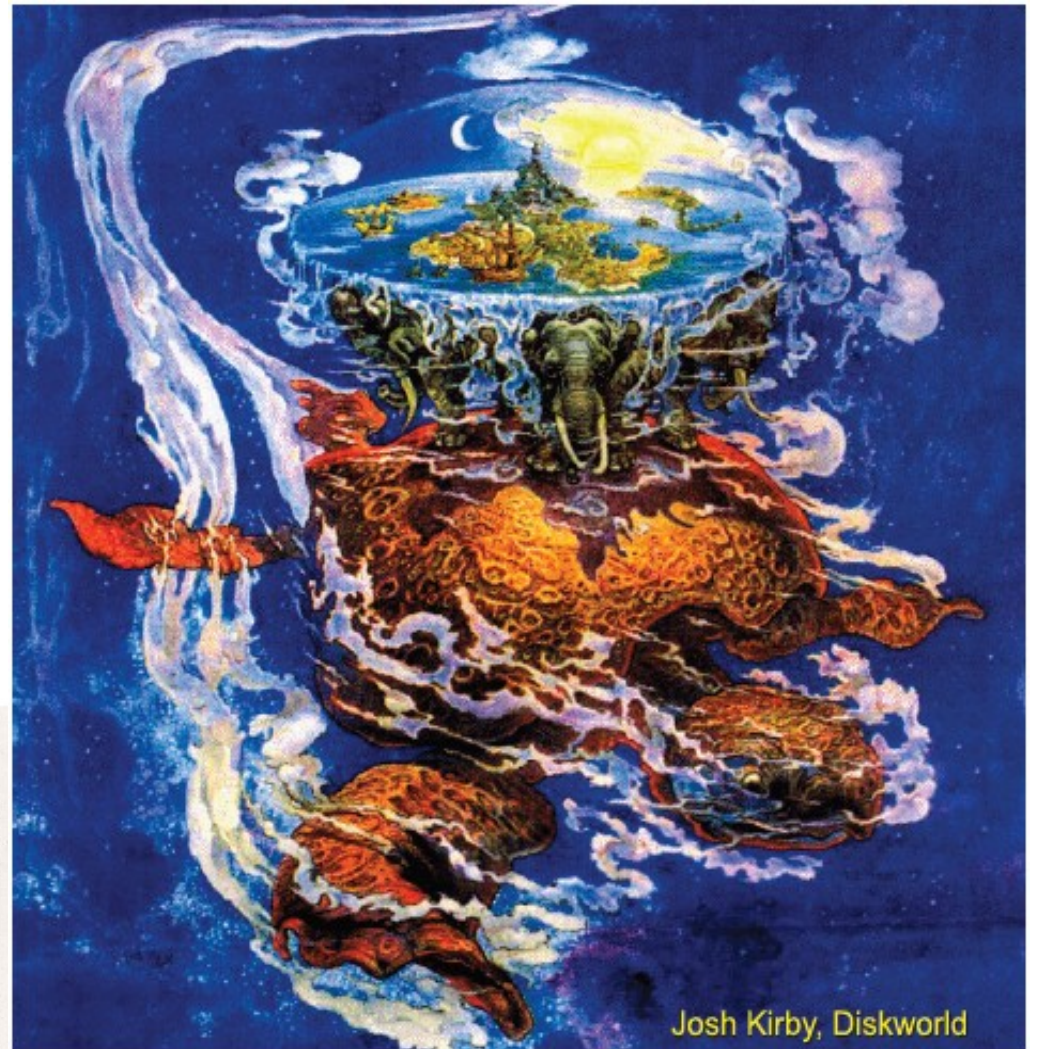
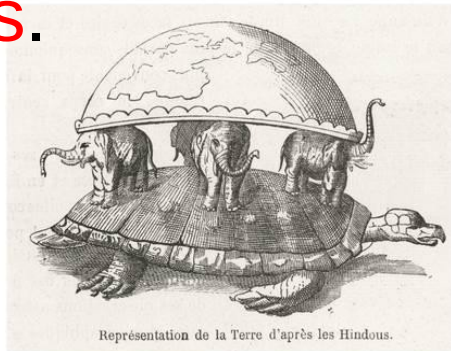
=> Conceito de **Multiversos**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## A Tartaruga do Mundo

Também conhecida como Tartaruga **Cósmica** ou **Carregadora do Mundo**. Similar aos Elefante do Mundo e Serpente do Mundo, ela ocorre nas mitologias **hindu**, **chinesa**, e dos povos **indígenas das Américas**.



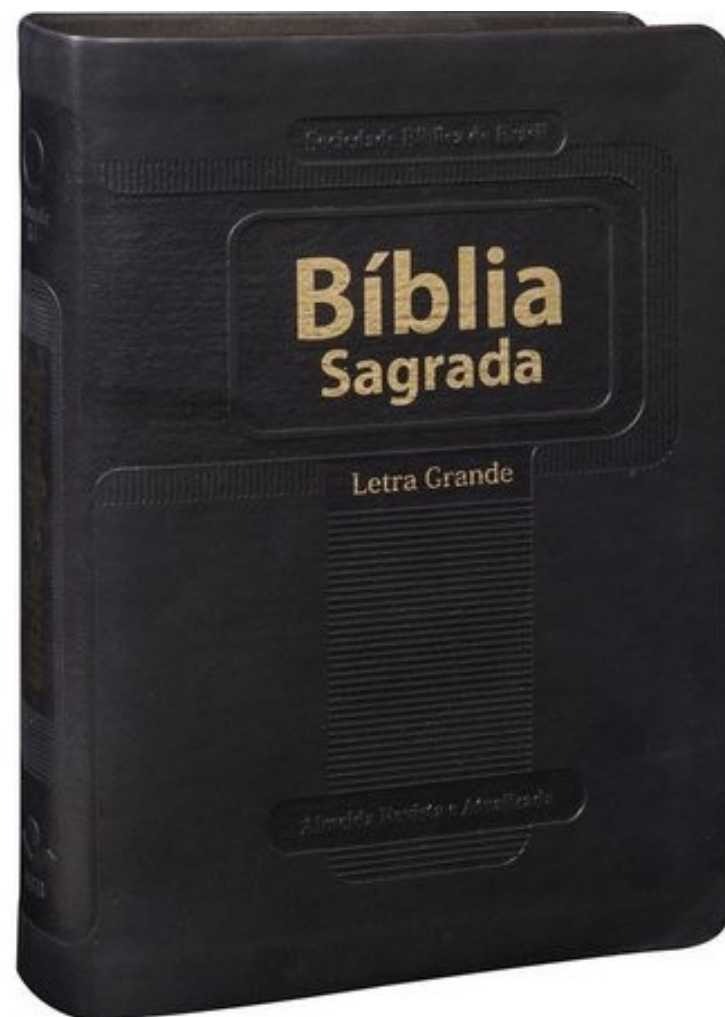
# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Cristãos

**Bíblia**, livro de **Gênesis**:  
**Deus** criou **Céu** e **Terra** e  
**separou** as **águas**, em **seis dias**,  
e descansou no sétimo dia.

Hoje, a teologia liberal considera  
esta narrativa **alegórica**,  
**abandonando** seu **sentido literal**.

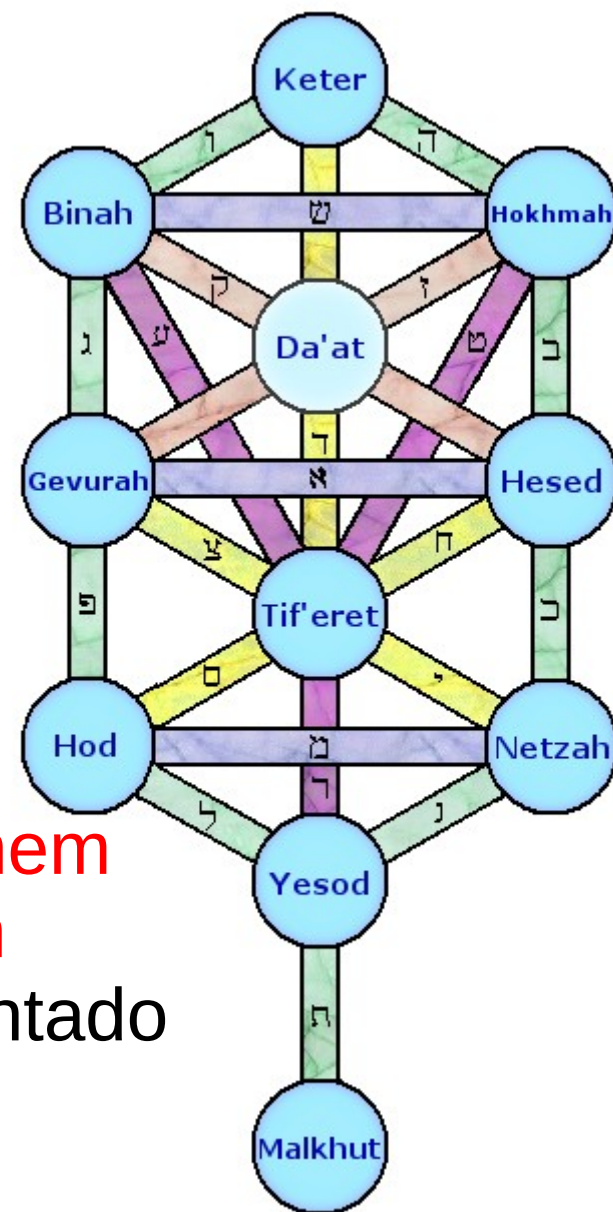
A **Igreja Católica** Romana  
atualmente **aceita** a teoria  
científica do **Big Bang**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Judeus

**Cabala** (tradição esotérica e mística do judaísmo): Segundo esta tradição, a **criação** do **mundo** e do **Homem** deu-se por **emanações** de um **princípio** chamado de **Ain Soph**. Estas emanações são chamadas de **Sephiroth**, em número de dez, e o seu conjunto forma a **árvore da vida**, que representa esotericamente o **Homem Arquetípico**, Homem **Primordial**, **Adam Kadmon**. O **mundo material** é representado na árvore da vida por sua **base**, que é associada a **Adonai**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Budismo

A **cosmologia budista** considera que o **Universo** é composto por vários **sistemas mundiais**, sendo que **cada** um desses **possui** um **ciclo** de **nascimento**, **desenvolvimento** e **declínio** que dura **bilhões** de **anos**.

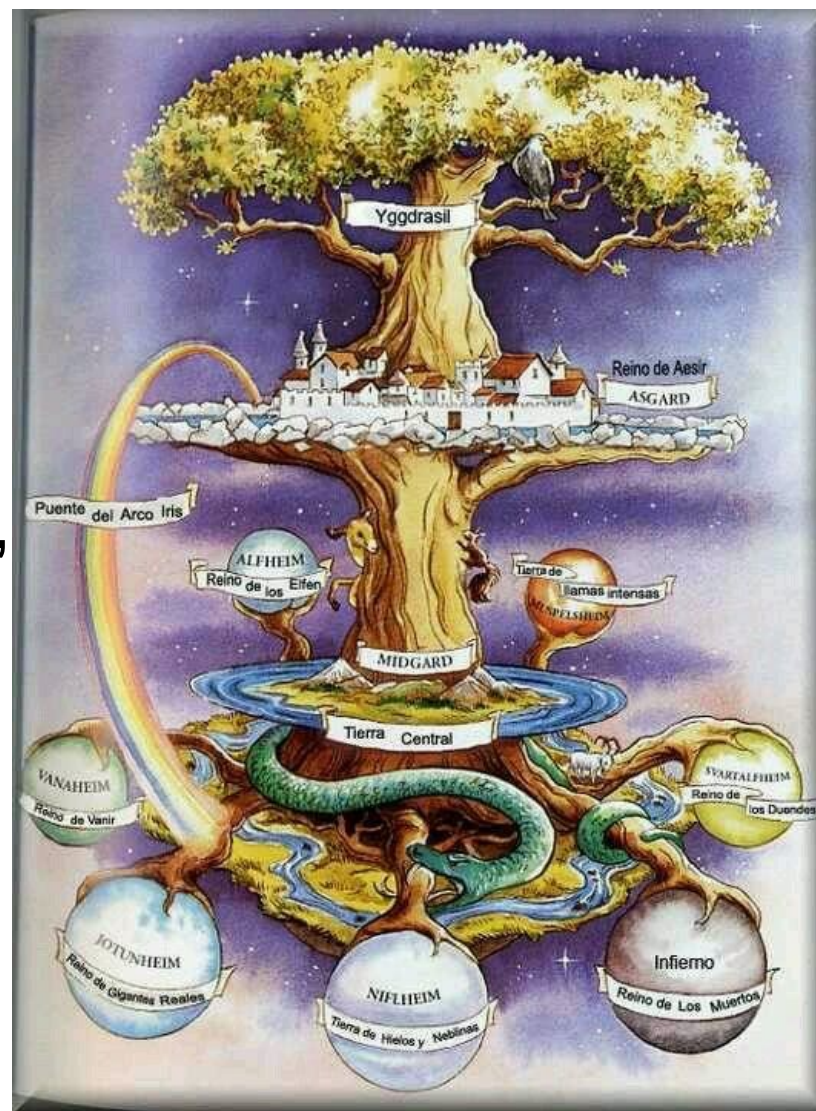
Num **sistema mundial** existem **seis reinos**, que por sua vez incluem vários **níveis**, num total de **trinta e um**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Mitologia nórdica

**Odin**, **Vili** e **Vé** (a Santíssima Trindade Nórdica) **matar**am o gigante **Ymer** e do corpo criaram os **Nove Mundos** da Mitologia Nórdica: Asgard, Midgard, Jotunheim, Vanaheim, Alfheim, Musphelheim, Svartalfheim, Nidavellir e Niflheim em volta do **tronco** da **árvore** de vida, **Yggdrasil**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Tupi-Guarani

Com a ajuda da **deusa lua**, **Araci**, **Tupã**, o **deus Sol** e **realizador** de toda a **criação**, **desceu** à Terra e **criou** tudo sobre a **face** da **Terra**, incluindo o **oceano**, **florestas** e **animais**, e as **estrelas** foram colocadas no céu.

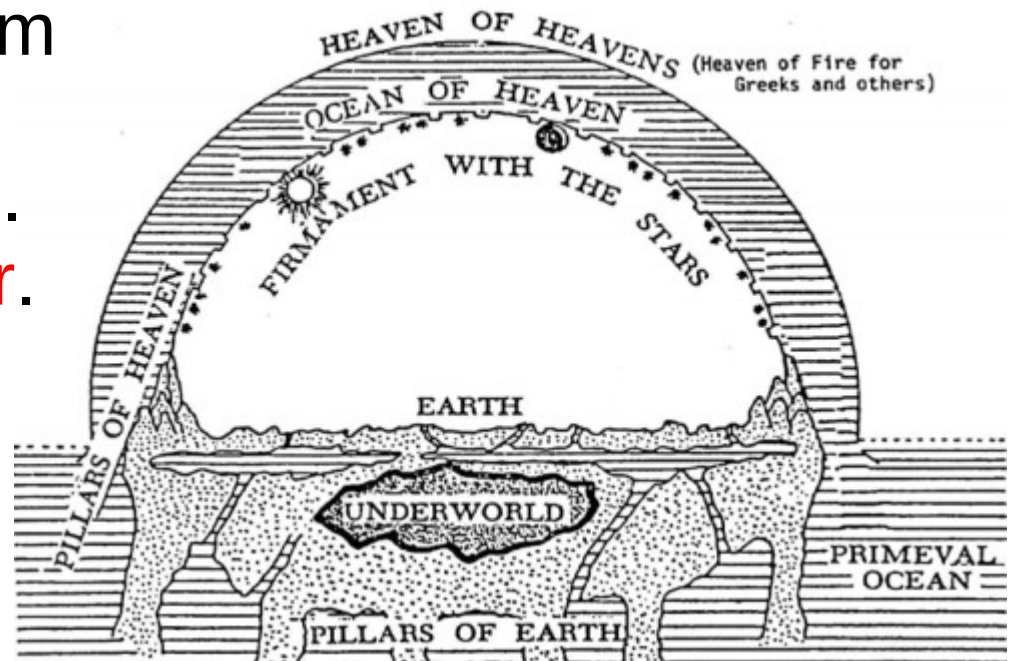
Tupã **criou** a **humanidade** a partir de **estátuas** de **argila** com uma mistura de vários elementos da natureza. Depois de **soprar vida** nas formas humanas, **deixou-os** com os **espíritos** do **bem** e do **mal** e **partiu**.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

Babilônios (~3000 a.C.)

A **Terra** e os **Céus** formam uma **unidade** dentro de "águas de cáos" infinitas. A **Terra** é **plana e circular**. Uma **cúpula sólida**, chamada **firmamento**, mantém o **oceano de cáos exterior** por fora.



# Cosmologia na Antiguidade, Cosmogonia

## Mitologia grega

No **princípio** havia o **Caos**, e em algum momento surgiu **Érebo**, o lugar desconhecido onde a **morte mora**, e **Nix**, a **noite**. Havia apenas silêncio e vazio. Então, **Eros** nasce produzindo um **início de ordem**, e se faz **Luz e Dia**, e a **terra (Gaia)** aparece. **Érebo e Nix copulam** e dão nascimento a **Éter**, a **luz celestial**, e **Dia**, a **luz terrena**.

Gaia, por si só, gera **Urano**, o **céu**.

Urano casa-se com Gaia e a cobre por todos os lados. Da união de Urano e Gaia surgem **todas as criaturas**, **Titãs**, **Ciclopes** e **Hecatonquiros**.

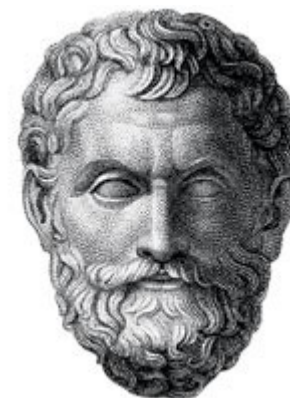


# Nascimento da Ciência

Foi na **Grécia** que nasceu a **ciência** (~550 a. C.) como a conhecemos hoje, com indução, dedução, análise, síntese, hipótese, modelos, teorias, etc. (=> Bases Epistemológicas).

**Thales** de Miletus (~625 - 557 a. C.) foi o primeiro filósofo natural grego importante e, frequentemente, é considerado o pai da astronomia grega.

Ganhou fama ao prever um eclipse solar no ano 585 a.C.



Thales de Mileto

# Os modelos cosmológicos antigos

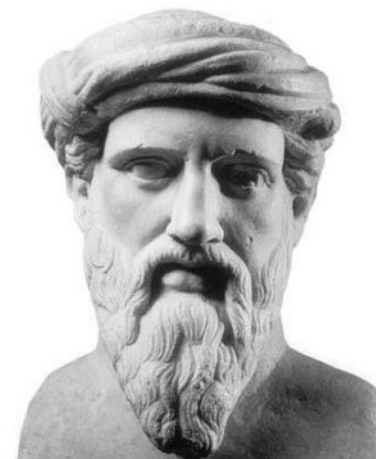
**Pitágoras** de Samos  
(~570 - ~495 a.C.) "inventou"  
a **matemática** e fez hipóteses  
sobre a **organização** do **Universo**:

A Terra é **esférica\***, e os **planetas**  
movem-se em diferentes velocidades  
nas várias **órbitas** ao redor da Terra.

Há uma **ordem** que domina o **Universo**.

\*A forma esférica da Terra, é, então bem conhecida desde a antiguidade.

Leitura interessante sobre o tema: Fernando Lang da Silveira:  
Sobre a Forma da Terra: <https://goo.gl/WbaqWA>



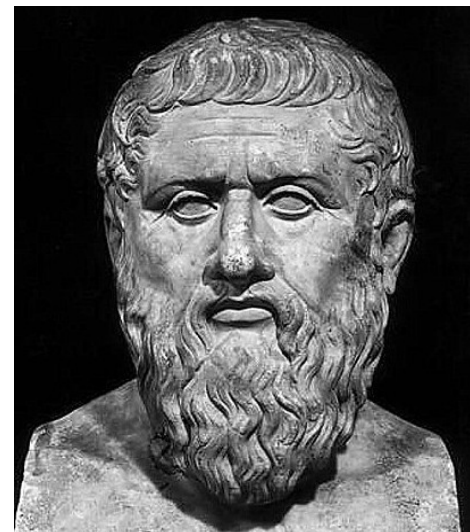
Pitágoras de Samos

# Os modelos cosmológicos antigos

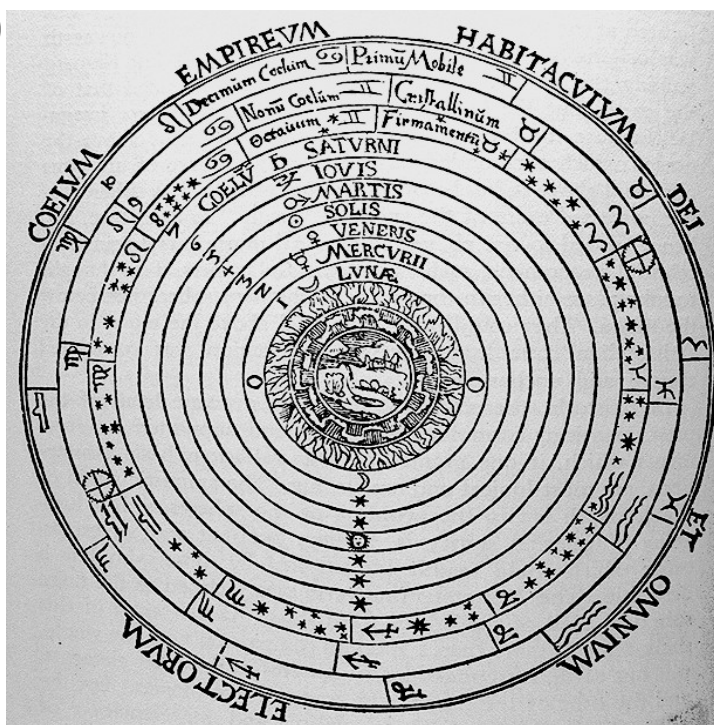
~350 a. C.: **Platão: Universo Geocêntrico**

**Esfera** de **estrelas** girando em torno da **Terra imóvel**, já que **círculos** e **esferas** eram vistos como as **formas** mais **perfeitas** (dogma do círculo)

Acrescentado pelo aluno de Platão **Eudócio** de Cnido por **mais esferas** carregando os **planetas**



Platão

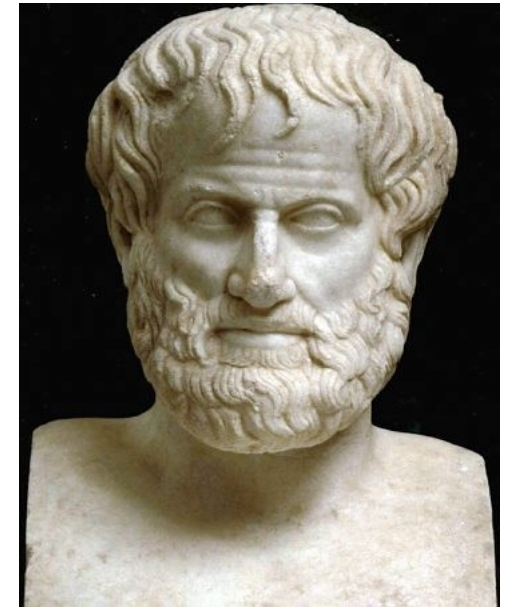


Representações esquemáticas do modelo geocêntrico

# Os modelos cosmológicos antigos

**Aristóteles** (384 - 322 a. C.):

Aluno de Platão, argumentou, **não** conhecendo o **princípio da inércia** de Newton, que a **Terra** deve ser **imóvel**, por que, caso **girasse**, um objeto lançado verticalmente **não voltaria** pro **mesmo ponto**, mas com algum **recuo**, já que, durante o voo, a **Terra** teria se **deslocado** (paradigma da **física aristotélica**).



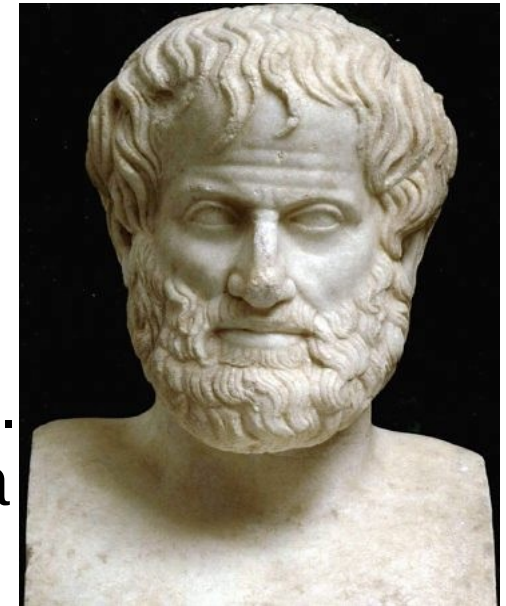
Aristóteles

# Os modelos cosmológicos antigos

**Aristóteles** (384 - 322 a. C.):

Ele também propôs 4 **provas observacionais** de que a **Terra** é uma **esfera**:

- Navios **desaparecem** lentamente no **horizonte**.
- Durante os **eclipses lunares** a **sombra** lançada sobre a **Lua** pela **Terra** parece **circular**.
- **Estrelas diferentes** são visíveis em **latitudes** mais ao norte e mais ao sul (ou as mesmas estrelas em alturas diferentes).
- Elefantes são encontrados tanto na Índia, que estava na sua direção leste, como no Marrocos, na sua direção oeste. Sua ideia era que ambos as regiões estão a uma distância razoável na superfície de uma esfera de tamanho moderado.



Aristóteles

# Os modelos cosmológicos antigos

**Heráclides do Ponto** (388 - 315 a. C.):

Foi o primeiro a propor, que o **movimento aparente** das **estrelas fixas** seria devido à **rotação** da **Terra**. A Terra giraria em torno do seu eixo em um dia na direção do oeste pro leste ("refutado" por Aristóteles).



Heráclides do Ponto

# Os modelos cosmológicos antigos

**Aristarco de Samos** (310 - 230 a. C.)

conseguiu determinar os diâmetros e distâncias da Lua e do Sol em termos do raio da Terra a partir do seguinte raciocínio:

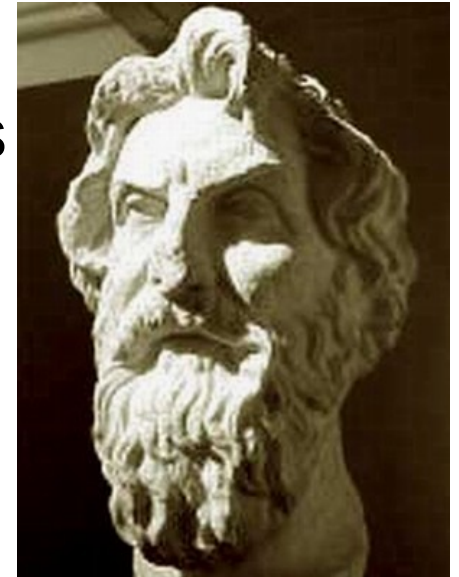
**Sol** e **Lua** são os únicos corpos celestes que, a olho nu, se apresentam como **discos** e não pontos luminosos e parecem ter o **mesmo tamanho** angular no céu.

+

A **Lua** eventualmente passa **à frente do Sol** produzindo os chamados **eclipses solares**.  
=> **Lua** está **mais próxima** da Terra que o **Sol**.

↓

O **Sol**, objeto mais distante, deve ter **dimensões maiores** que a **Lua**, objeto mais próximo.



Aristarco de Samos



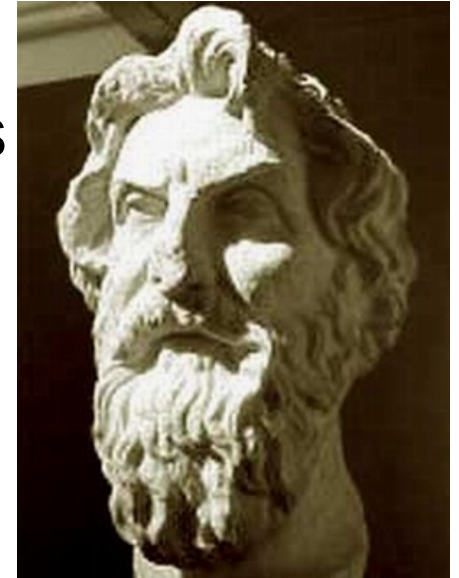
# Os modelos cosmológicos antigos

## Aristarco de Samos (310 - 230 a. C.)

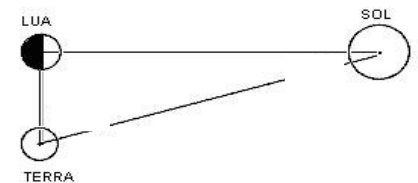
conseguiu determinar os diâmetros e distâncias da Lua e do Sol em termos do raio da Terra a partir das seguintes hipóteses e medidas:

### Hipóteses

- A **Lua** é **iluminada** pelo **Sol**
- O **raio** da **Terra** é muito **menor** que a **órbita** da **Lua** (de fato é menor que 2%)
  - ângulos medidos a partir da superfície da Terra coincidem com ângulos medidos a partir do seu centro
- Quando a **Lua** está na fase de **quarto crescente** ou **quarto minguante**, o triângulo Terra-Lua-Sol é **reto** na **Lua**, já que a linha que vemos separando a parte clara da parte escura é perpendicular à linha Sol-Lua



Aristarco de Samos



# Os modelos cosmológicos antigos

## Medidas (angulares\*)

- O **ângulo** entre o **Sol** e a **Lua** (chamado de elongação) na fase de quarto minguante ou quarto crescente (87°, levemente subestimado, valor moderno: 89° 51' 10")
- A **largura** da **sombra** da **Terra** à distância da **órbita lunar**, observada durante eclipse lunares (2 diâmetros da Lua, valor moderno:  $2.64 d_{\text{L}}$ )
- O **diâmetro angular** da **Lua** (2°, 4 × maior que o valor verdadeiro!)
- O **diâmetro angular** do **Sol** é **igual** ao da **Lua**  
→ decorrente de observações de eclipses solares totais

\*Na astronomia, medidas "de tamanho" normalmente são de tamanho **angular** (em graus/minutos/segundo de arco/radianos resp. segundo de arco em quadrado/steradianos). O tamanho físico (em km/AU/pc/... ou km<sup>2</sup>/AU<sup>2</sup>/pc<sup>2</sup>) só pode ser determinado conhecendo a **distância**, que nem sempre é fácil de determinar.

# Os modelos cosmológicos antigos

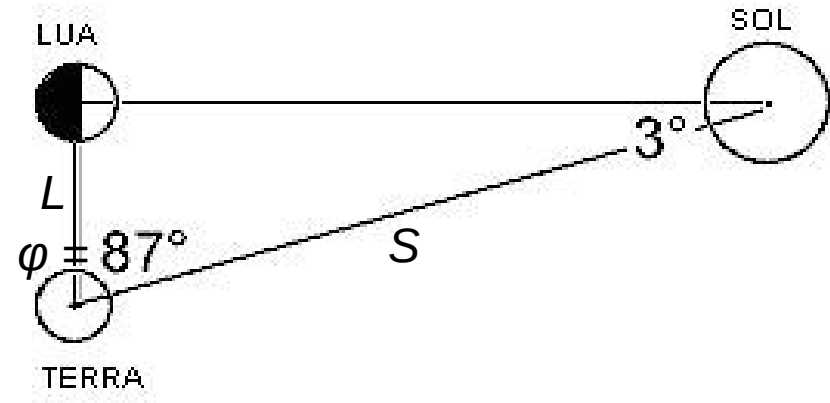
## Distâncias

Sendo

$L$ : distância Terra-Lua

$S$ : distância Terra-Sol

$\varphi$ : ângulo entre Sol e Lua  
no quarto minguante  
ou crescente



obtemos

$$\cos \varphi = L/S \approx 1/19 \quad (\text{valor moderno: } \sim 1/389)$$

# Os modelos cosmológicos antigos

## Tamanhos

### O sistema Terra-Lua-Sol num eclipse lunar

Dando Mais nomes:

$L$ : distância Terra-Lua

$S$ : distância Terra-Sol

$s$ : raio do Sol

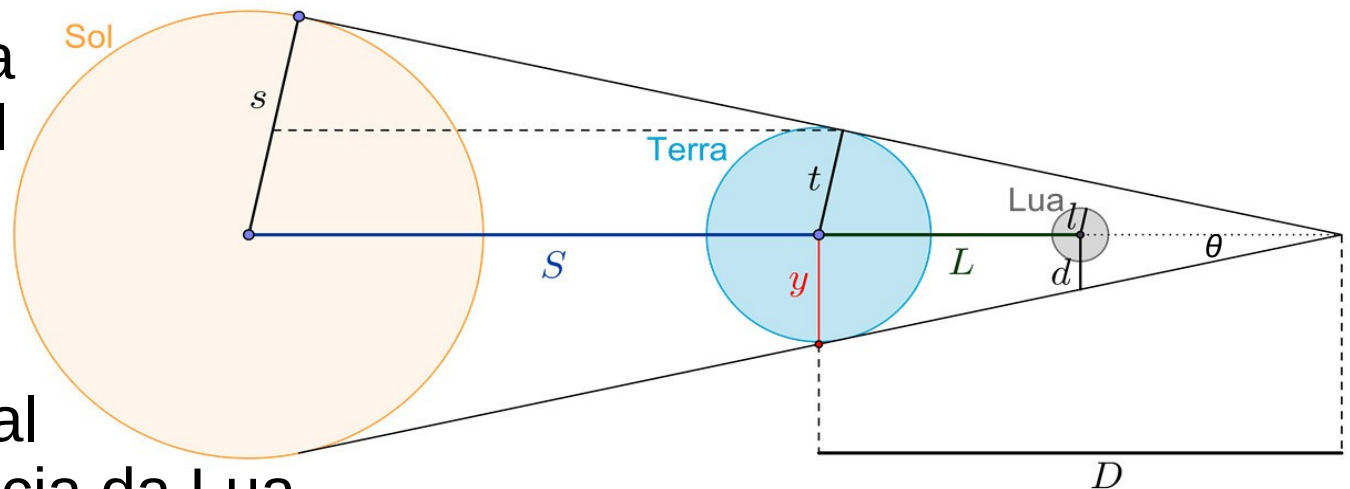
$t$ : raio da Terra

$l$ : raio da Lua

$d$ : raio da sombra total  
da Terra, na distância da Lua

$D$ : distância do centro da Terra ao vértice do  
cone de sombra da Terra

$\theta$ : semi-abertura do cone



# Os modelos cosmológicos antigos

## Tamanhos

Por semelhança de triângulos:

$$\text{sen } \theta = s/(S+D) = t/D \rightarrow D/S = t/(s-t) \quad (\text{I})$$

$$\text{tan } \theta = d/(D-L)$$

Já que  $\theta$  é muito pequeno, vale a aproximação:

$$\text{sen } \theta \approx \text{tan } \theta = t/D = d/(D-L) \rightarrow D/L = t/(t-d) \quad (\text{II})$$

Dividindo (I) por (II) e lembrando que os diâmetros angulares do Sol e Lua são ~iguais ( $s/S \approx l/L$ ) conseguimos eliminar  $D$ :

$$L/S = l/s = (t-d)/(s-t)$$

Colocando os tamanhos como função do tamanho da Terra:

$$s/t = (1 + s/l) / (1 + d/l) \quad \text{e}$$

$$l/t = (1 + l/s) / (1 + d/l)$$

# Os modelos cosmológicos antigos

## Tamanhos

Usando  $L/S = l/s = 1/19$  e  $d/l = 2$  (pela hipótese de que a largura da sombra da Terra equivale a duas Luas) obtemos pros **raios** da **Lua** e do **Sol** (em unidades do raio da Terra,  $t$ ):

$$s/t \approx 6.7 \text{ (valor moderno: } \sim 107) \quad \text{e}$$
$$l/t \approx 0.35 \text{ (valor moderno: } \sim 0.275)$$

Para determinar as **distâncias** da **Lua** e do **Sol** usamos o diâmetro angular  $\delta \sim 2^\circ = 0.035$  (valor moderno: um quarto disso):

$$S/t = 2/\delta \cdot (s/t) \approx 380 \text{ (valor moderno: } \sim 24\,500) \quad \text{e}$$
$$L/t = 2/\delta \cdot (l/t) \approx 20 \text{ (valor moderno: } \sim 63)$$

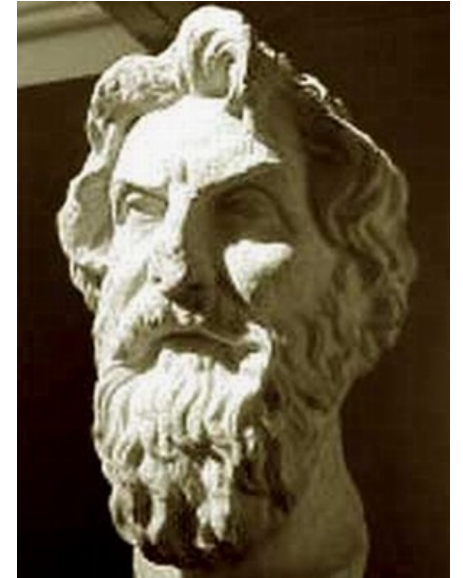
# Os modelos cosmológicos antigos

**Aristarco de Samos** (310 - 230 a. C.)

A partir destes valores, Aristarco sugeriu um **modelo heliocêntrico** (quase 2000 anos antes de Copérnico!), por intuição:

Já que, segundo estas determinações, o tamanho do **Sol** é **muito maior** que o da **Terra**, ele achou contra-intuitivo um corpo grande girar em torno de um corpo muito menor.

Mas a hipótese dele não "pegou" e acabou caindo no esquecimento até o trabalho de Copérnico, mais que 1500 anos depois.



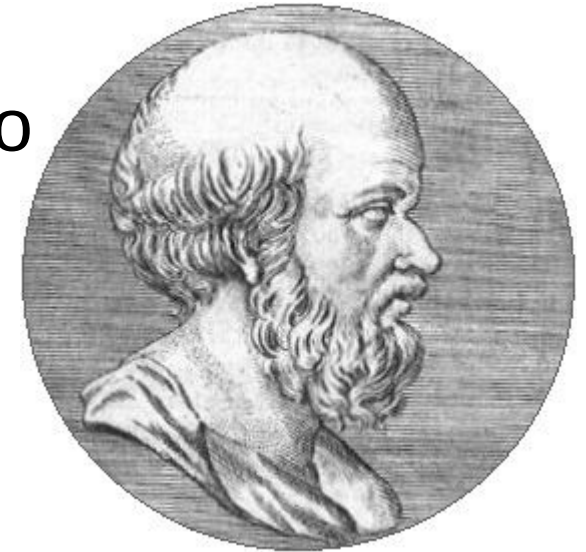
Aristarco de Samos

# 1ª Determinação do raio da Terra

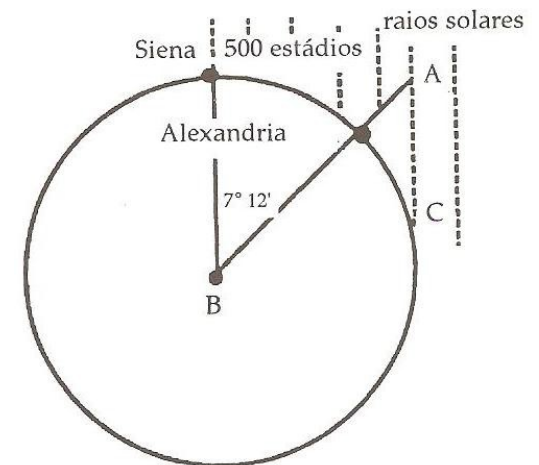
~240 a. C.: **Eratóstenes**

Sabendo que meio dia de um certo dia do ano, o Sol fica no **zênite** em **Alexandria**, a  $d = 500$  estádios = 800 km de Siena, e medindo o **ângulo** entre a **posição do Sol** e a **vertical** em **Siena** como  $\sim 7^\circ$ , ele chegou em ( $l$  é a circunferência da Terra):

$R_{\oplus} = l/2\pi = d \cdot 360^\circ / 7^\circ / 2\pi = 6548$  km  
bem perto do valor real de 6378 km



Eratóstenes



# Os modelos cosmológicos antigos

## Juntando os valores de Aristarco e Eratóstenes

	Medida Antiga [km]	Medida Atual [km]
Diâmetro da Terra	13 000	12 756
Diâmetro da Lua	4300	3476
Diâmetro do Sol	$9 \cdot 10^4$	$1.39 \cdot 10^6$
Distância Terra-Lua	$10^5$ *	$3.84 \cdot 10^5$
Distância Terra-Sol	$2.5 \cdot 10^6$ *	$1.50 \cdot 10^8$

\*Na verdade, na época de Aristarco e Eratóstenes já era possível determinar, que o diâmetro angular de Lua e Sol é mais para  $0.5^\circ$  do que para  $2^\circ$ , o que resultaria em distâncias Terra-Lua e Terra-Sol de  $4 \cdot 10^5$  km e  $10^7$  km, respectivamente, como melhores valores possíveis na época.

# Os modelos cosmológicos antigos

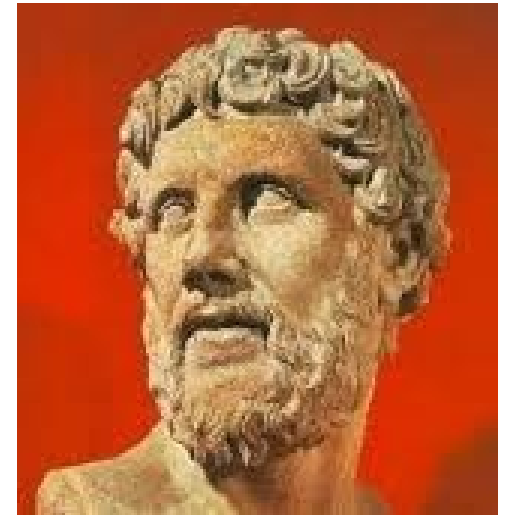
~150 a. C.: **Hiparco: Epiciclos**

Cada **planeta** faz um **movimento circular uniforme**, chamado **epiciclo**, em torno de um **ponto** (no desenho: P) que faz um **movimento circular uniforme** em torno da **Terra**.

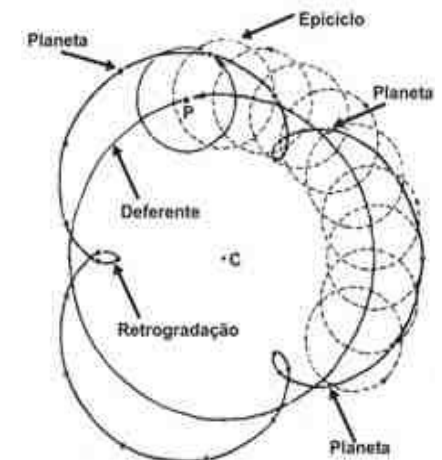
A **órbita** deste ponto se chama **deferente**.

Explica o **movimento retrógrado** dos planetas, pelo menos qualitativamente e o maior brilho durante o trecho retrógrado.

Além disso, ele compilou o primeiro catálogo de estrelas (umas ~850), entre outras contribuições para a ciência.



Hiparco



Modelo de epiciclos

# Os modelos cosmológicos antigos

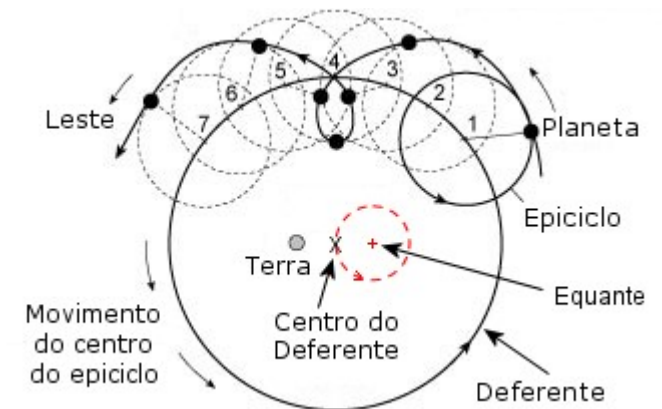
~100 d. C.: **Ptolomeu** (Autor do *Almagesto*, o "Grande Livro"): **Modelo Ptolomaico**

Refinamento do modelo de **epiciclos**:  
Os **centros** dos **deferentes** não ficam mais na Terra, mas **giram** em torno de pontos chamados **equantes**,  
que também se movimentam.

A **velocidade angular** do epiciclo é **uniforme em relação ao equante** (então a velocidade é, na verdade, não-uniforme).



Ptolomeu



Modelo ptolomaico

# Os modelos cosmológicos antigos

~100 d. C.: **Ptolomeu** (Autor do *Almagesto*, o "Grande Livro"): **Modelo Ptolomaico**

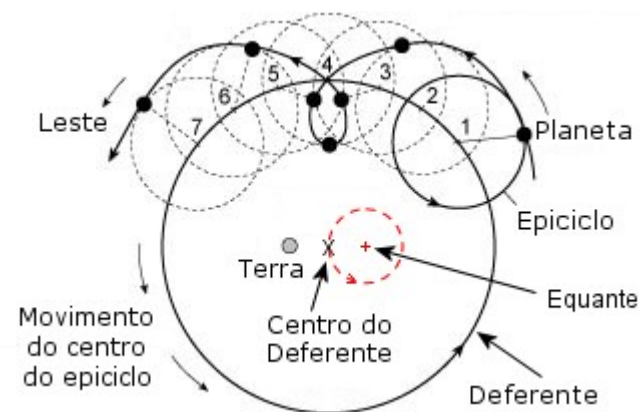
Prevê **melhor** as **posições** dos **planetas**.

Mas ainda não perfeitamente.  
Nos séculos seguintes foram acrescentados mais e mais epiciclos para manter a concordância. O modelo se tornou muito complicado.

Com um número suficientemente grande de epiciclos, dá para descrever qualquer órbita:



Ptolomeu



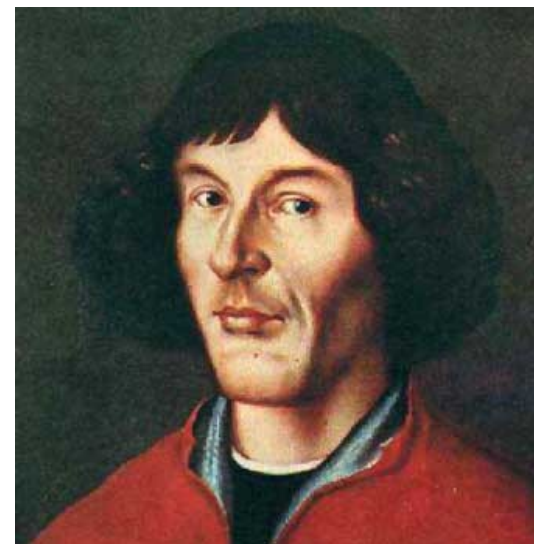
Modelo ptolomaico

<https://www.youtube.com/watch?v=QVuU2YCwHjw> .

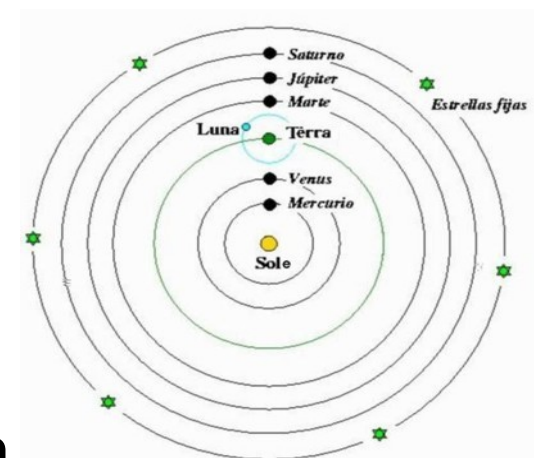
# Os modelos cosmológicos antigos

## 1543: Copérnico: Modelo Heliocêntrico

- O **Sol** é **imóvel** (e não é mais considerado um planeta).
- A **Terra** (que agora é um planeta) e os outros **planetas** (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) **giram** em torno do **Sol**, todos no mesmo plano (a eclíptica) e no mesmo sentido, movimento chamado **revolução** (ou translação\*) dos planetas. Quanto **mais longe** o planeta fica do Sol tanto **mais lentamente** ele se movimenta.



Nicolau Copérnico



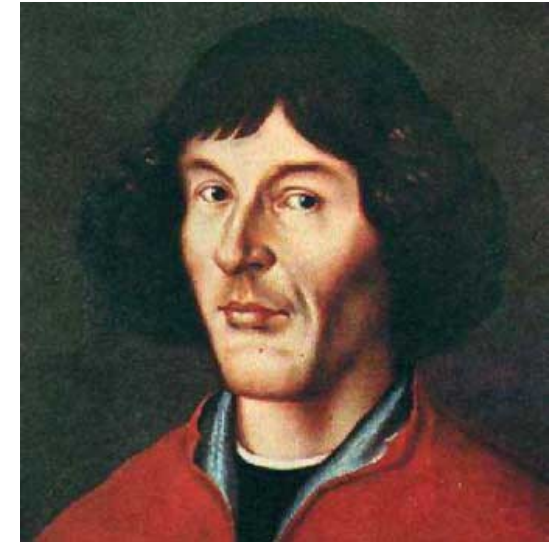
Modelo heliocêntrico

\*Mas: Vide: <https://planeta.rio/translacao-ou-revolucao/>

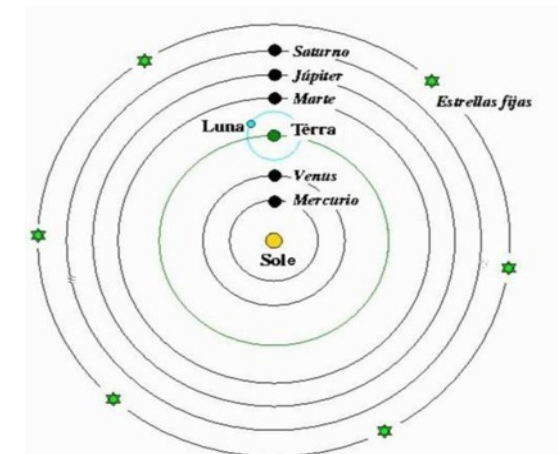
# Os modelos cosmológicos antigos

## 1543: Copérnico: Modelo Heliocêntrico

- A **Terra gira** em um dia sideral em torno do seu **eixo norte-sul** direção leste, chamado **rotação** da Terra. Esta rotação explica, por que todo o céu parece girar (como já tinha sido sugerido por Heráclides do Ponto).
- A **Lua** (que não mais é planeta) **gira** em torno da **Terra** em um mês sideral.



Nicolau Copérnico

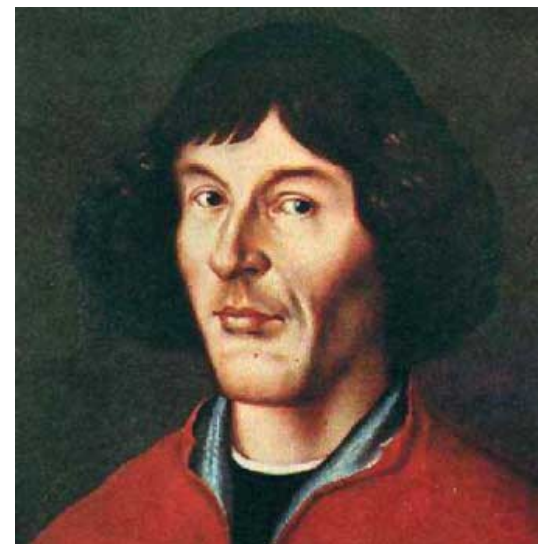


Modelo heliocêntrico

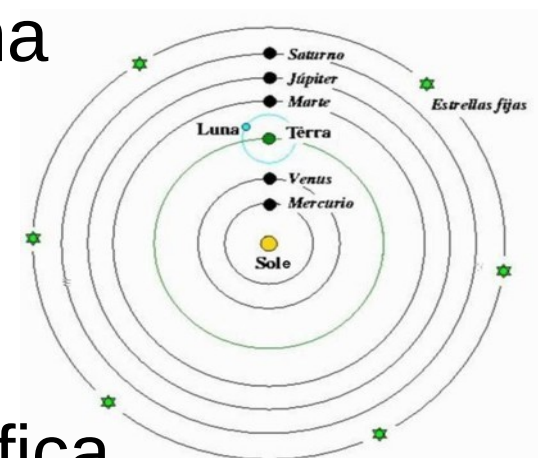
# Os modelos cosmológicos antigos

## 1543: Copérnico: Modelo Heliocêntrico

- As **estrelas fixas** são **imóveis**, e ficam numa **distância muito maior** que o **Sol**.
- Desta maneira, o modelo também explica, por que uma dada **constelação** aparece predominantemente em uma dada **época** do **ano** (exemplo: Órion é uma constelação do verão do hemisfério sul): Nesta época, a Terra se encontra **entre** o **Sol** e a **constelação**, tal que ela esta no **céu noturno**. Meio ano depois, o **Sol** está entre **Terra** e **constelação**. A constelação fica no **céu diurno** atrás do Sol e é invisível.



Nicolau Copérnico



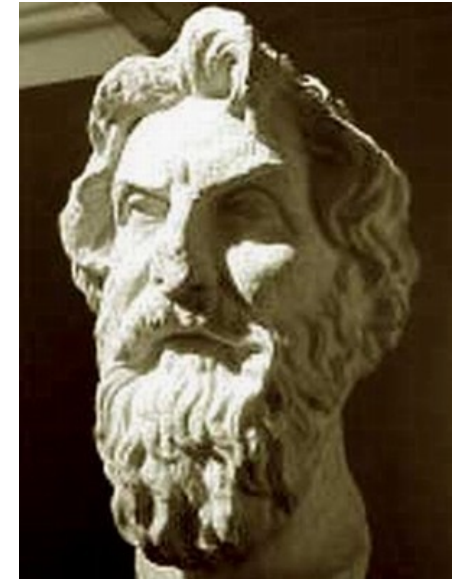
Modelo heliocêntrico

# Os modelos cosmológicos antigos

## Modelo Heliocêntrico

Como mencionado, Copérnico não foi o primeiro a colocar o Sol no centro.

**Aristarco de Samos** (310 - 230 a. C.) já tinha sugerido um modelo heliocêntrico quase 2000 anos antes (vide alguns slides atrás).



Aristarco de Samos

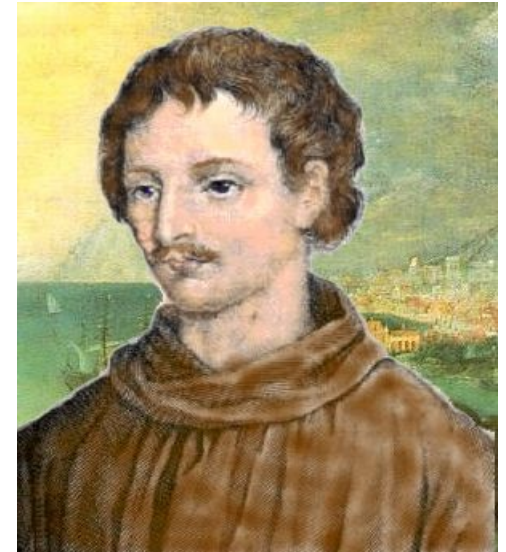
Copérnico tinha citado Aristarco numa versão preliminar de *De Revolutionibus*, mas deixou a referência fora do manuscrito publicado no final.

E na Índia também já se tinha um modelo heliocêntrico 1 milénio antes de Copérnico.

# Os modelos cosmológicos antigos

**Giordano Bruno** (1548-1600):

Frade dominicano italiano, teólogo, filósofo e escritor, sugeriu que o **Universo** seria **infinito**, que o **Sol** seria uma **estrela** como as estrelas fixas, que existiriam **planetas** girando em torno de **outras estrelas**, e que nestes poderia existir **vida inteligente**.



Giordano Bruno

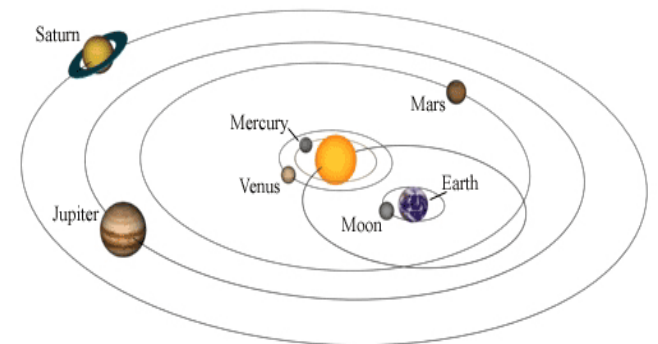
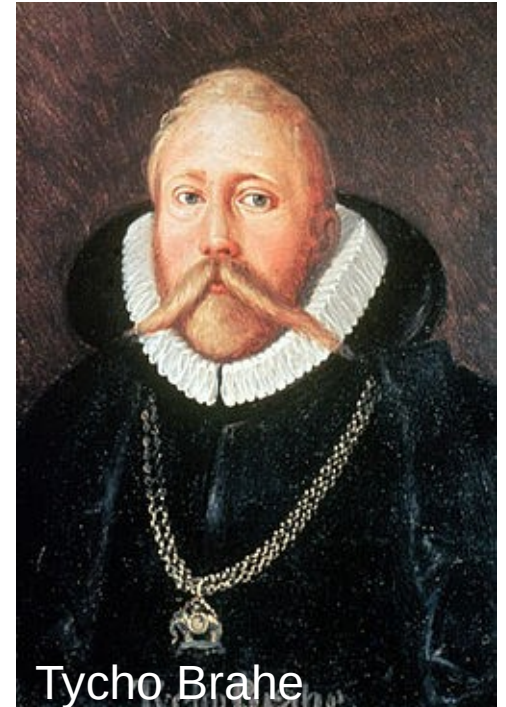
Foi condenado e queimado pela inquisição.

# Tycho Brahe

1546-1601, astrônomo dinamarquês, último grande observador da era "pré-telescópio", fez e compilou as **melhores medidas** de **posições** de **planetas** até então, que mais tarde seriam usados por **Kepler** (três slides pra frente).

Também desenvolveu um modelo cosmológico, naquele o Sol gira em torno da Terra, e os planetas em torno do Sol para manter a Terra no centro.

Em 1572 descobriu uma Supernova, o que estava em conflito com a crença da época, de que o céu era invariável.



Modelo de Tycho Brahe

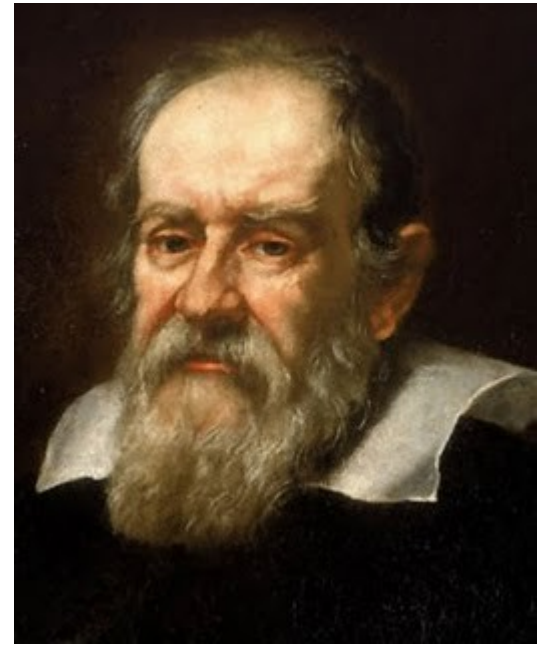
# As Observações de Galileu

**Galileu Galilei** (1564-1642) foi o primeiro a apontar um telescópio pro céu, e é considerado o pai da **astronomia observacional moderna**.

Ele observou pela primeira vez (1609-10):

- As **crateras** da **Lua**,
  - As **manchas solares**,
  - As **fases** da **Vênus**,
  - As **Luas** de **Júpiter**,
- corroborando** o modelo **heliocêntrico** de Copérnico.

Além disso, ele observou que a **Via Láctea** não é simplesmente uma nuvem, mas consiste de **estrelas**, e fez contribuições importantes para a mecânica.



Galileu Galilei



A luneta de Galileu

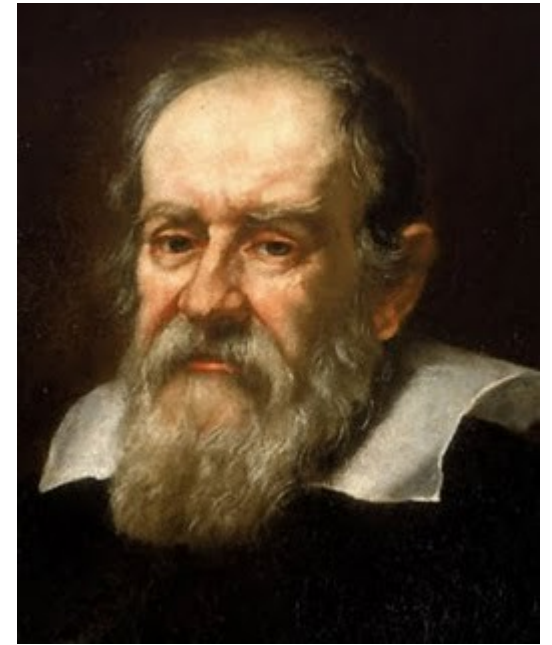
# As Observações de Galileu

1616 foi forçado pela igreja católica a renunciar o seu apóio para o modelo copernicano.

1632 publicou a obra *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, que também apoia o modelo copernicano.

De novo, ele teve que renunciar e a igreja colocou o *Diálogo* no index.

Só foi absolvido em 1992 pelo papa João Paulo II.



Galileu Galilei

# As Leis de Kepler

Como mencionado, as **previsões** das **posições** dos **planetas** pelo **modelo copernicano** não eram tão boas assim. Isto, por que Copérnico não abriu mão de **movimentos circulares uniformes**.

Quem conseguiu fazer o modelo bater melhor com os dados foi o astrônomo alemão **Johannes Kepler**, aluno de Tycho Brahe, sugerindo **órbitas elípticas** e estabelecendo três **leis quantitativas** sobre o movimento dos planetas (1609).

Estas leis também dão uma dica quanto às **causas físicas** destes movimentos.



Johannes Kepler

# As Leis de Kepler

Primeira Lei de Kepler: Os planetas descrevem **órbitas elípticas**, com o **Sol** num dos **focos**.

Alguns nomes e propriedades de elipses:

$a$ ,  $b$  = **semi-eixos maior e menor**,

$b/a = \sqrt{1-e^2}$ , onde  $e$  = **excentricidade**

(0 para círculos, 1 para “retas”),

distância centro-foco:  $e \cdot a = \sqrt{a^2 - b^2}$ ,

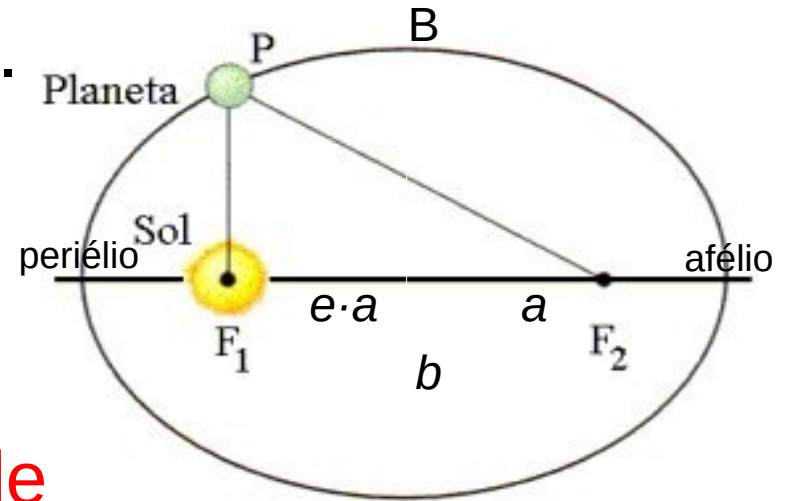
posição do planeta mais **próxima** do Sol: **periélio** (perihélio)

posição mais **distante**: **afélio** (aphélio)

Área:  $\pi ab$

Para qualquer ponto  $P$  na elipse vale:  $\overline{F_1P} + \overline{F_2P} = 2a$

$\Rightarrow$  O ponto  $B$  fica à distância  $a$  de cada um dos focos

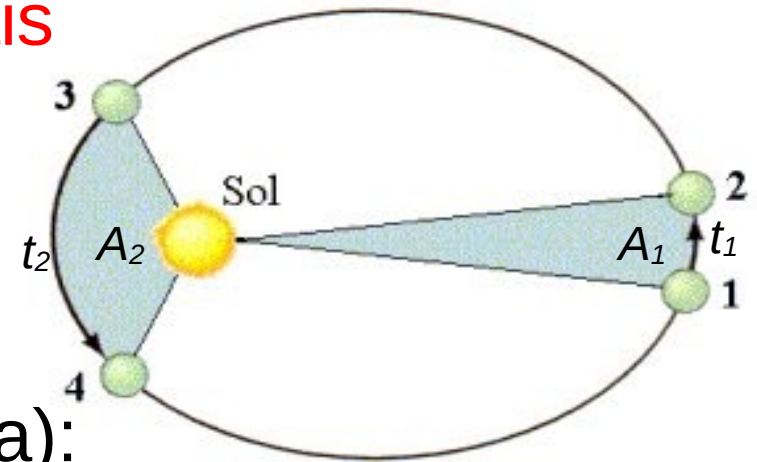


# As Leis de Kepler

Segunda Lei de Kepler (lei das áreas):  
A linha Sol-planeta varre **áreas iguais**  
em **tempos iguais**.

no desenho:

se  $t_1 = t_2$ , então  $A_1 = A_2$



Terceira Lei de Kepler (lei harmônica):

Os **quadrados** dos **períodos** de **revolução**,  $T$ , são **proporcionais** aos **cubos** das **distâncias médias**, ou **semi-eixos maiores**,  $a$ , do **Sol** aos **planetas**:

$T^2 = k \cdot a^3$ , onde  $k$  é uma constante de proporcionalidade.

As Leis de Kepler também valem para os corpos menores orbitando o Sol (asteroides, cometas, TNOs ...).

# Mecânica Newtoniana

Baseado nos conceitos de **inércia** e **aceleração**, introduzidos por **Galileu**, o físico e matemático Sir **Isaac Newton** (1642-1727), publicou na sua obra prima, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) as três **leis fundamentais da mecânica**, ou **Leis de Newton** (=> Fenômenos Mecânicos):

1. Se  $F = 0$ , então  $\mathbf{v} = \text{constante}$  (lei de inércia)
2.  $\mathbf{F}_{\text{tot}}$  ou  $\mathbf{F}_{\text{res}} = m \cdot \mathbf{a}$
3.  $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$  (actio = reactio)



Sir Isaac Newton

# Mecânica Newtoniana

Usando estas leis, Newton conseguiu explicar o movimento dos planetas (as Leis de Kepler) por uma força atrativa Sol-planeta, que ele chamou **gravitação** e é da forma:

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



Sir Isaac Newton

vetorial:  $\mathbf{F} = -\frac{GMm\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{\mathbf{r}}$ ,  $G = 6.673 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

chamada constante gravitacional universal.

(e ele ainda inventou o cálculo infinitesimal, e fez contribuições pra ótica, entre outros.)

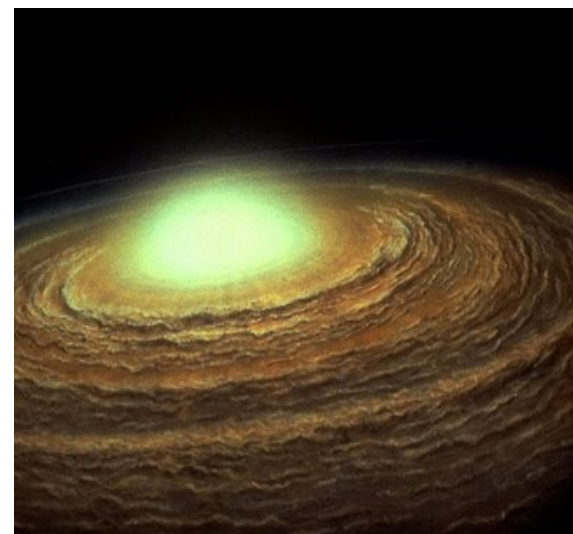
# Origem e Evolução do Sistema Solar

## Hipótese Nebular

- Proposto já por **René Descartes** (1596-1650), **Immanuel Kant** (1724-1804) e o **Marquês de Laplace** (1749-1827):

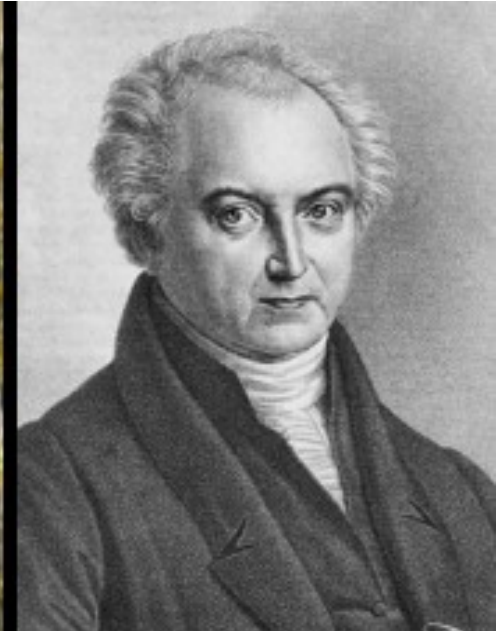
O **Sol** e os **planetas** se formaram **simultaneamente** pelo colapso de uma nuvem de material, a **Nébulosa Solar**.

Para detalhes deste modelo, vide a disciplina Noções de Astronomia e Cosmologia.



# Paradoxo de Olbers (1823)

Análogo a uma floresta de extensão infinita:



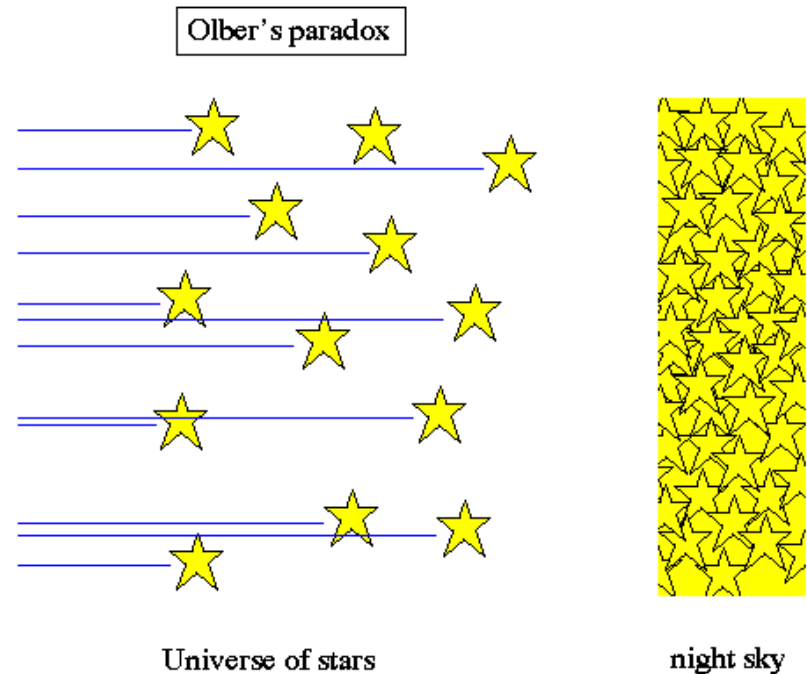
Heinrich W. M. Olbers  
1758-1840

Médico e Astrônomo

Descobridor de vários  
cometas e asteróides

# Paradoxo de Olbers

Se o Universo é infinito e existe "desde sempre", então em qualquer direção que se olha deveria ter uma estrela.  
=> O céu deveria estar tão brilhante quanto a superfície de uma estrela.



Já que o **céu** de noite é **escuro**, um dos dois (ou ambos), o tamanho ou a idade do Universo, deve ser **finito** (hoje sabemos que pelo menos a idade é finita).

Thomas Digges (1546-1595), Kepler (1571-1630), Halley (1656-1742), Cheseaux (1718-1751), Edgar Allan Poe (1809-1849) e Lord Kelvin (1824-1907) já tinham chegado a esta conclusão.

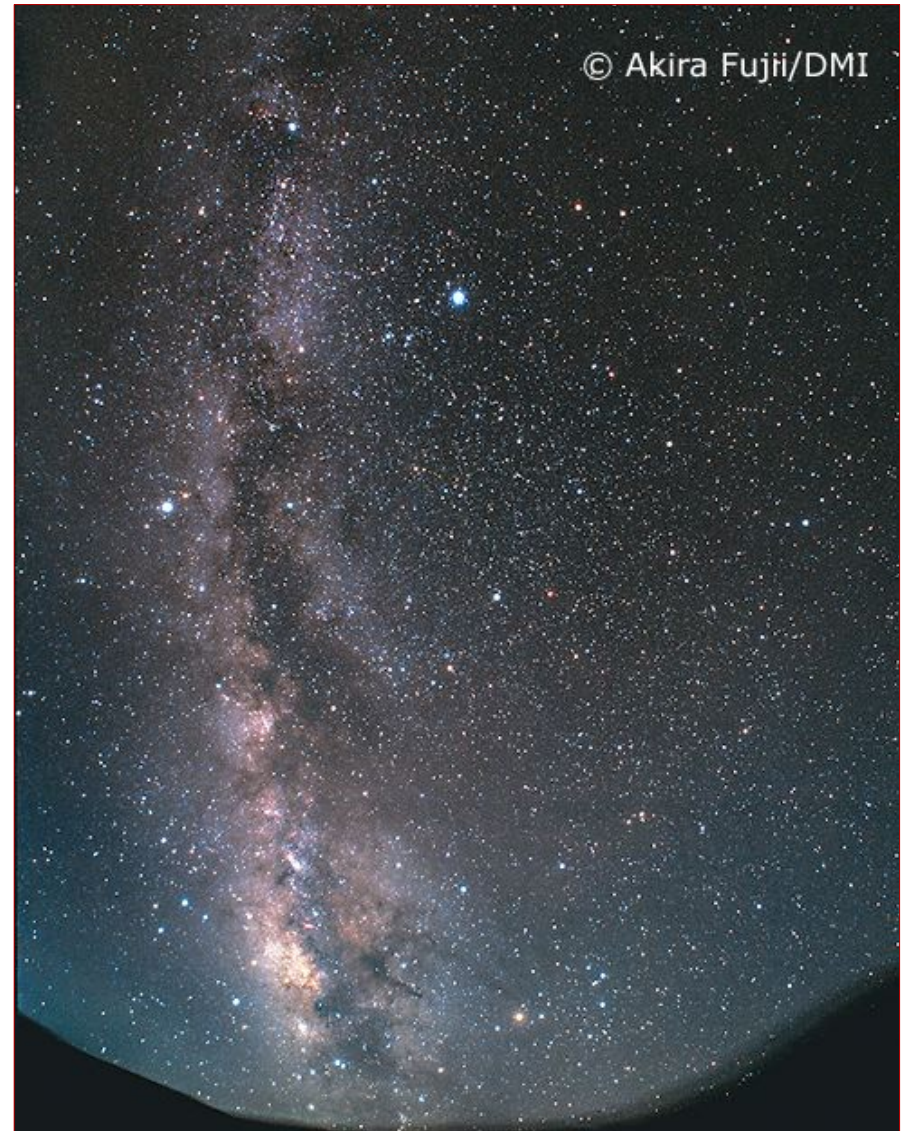
# Via Láctea

Originalmente: Uma **faixa** de luz difusa no céu.

Na mitologia grega leite materna da deusa Hera jorrado no céu, quando esta deu um empurrão ao menino mortal Heracles.

Galileu descobriu em 1610 que ela consiste de **estrelas**.

Hoje é a **nossa Galáxia** (com G maiúsculo) e o **Sistema Solar** faz **parte**.



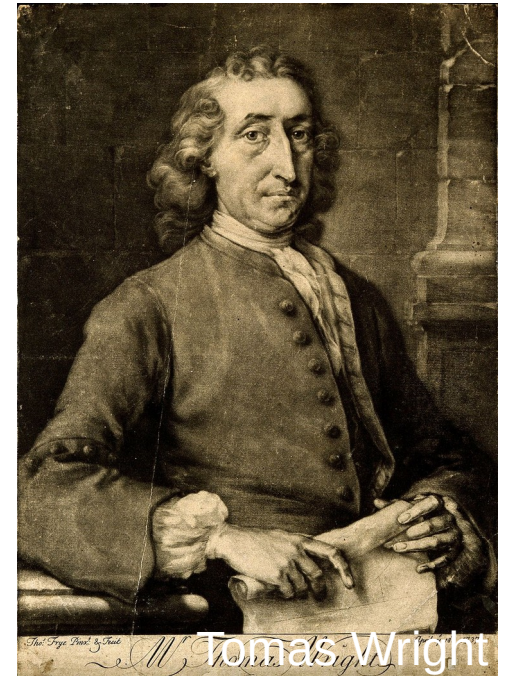
# Via Láctea

Até o começo do XX século, a Via Láctea era considerada o **Universo inteiro** (por muitos).

No **18º século**, **Immanuel Kant** propôs que ela fosse um **disco de estrelas**, e que o **Sistema Solar** fizesse **parte**, e **Tomas Wright** sugeriu que ela fosse uma **casca esférica** de estrelas.

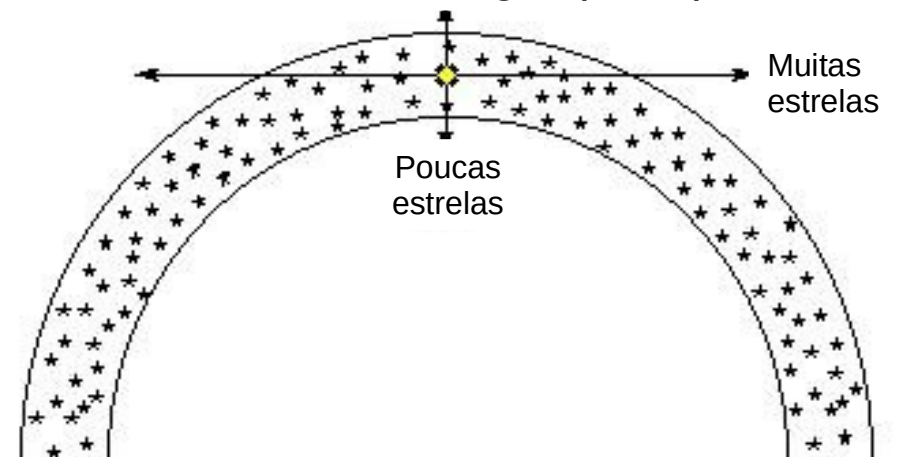


Immanuel Kant



Thomas Wright

Via Láctea de Wright (1750)



# Via Láctea

Nos **anos 1780**, **William Herschel** produziu um **mapa** da Via Láctea baseado em **contagens de estrelas**, e supondo **magnitude absoluta igual** para todas as estrelas, **densidade de estrelas constante**, **nenhuma extinção** interestelar (na verdade, uma suposição demais), e **visão até o limite** da Galáxia.

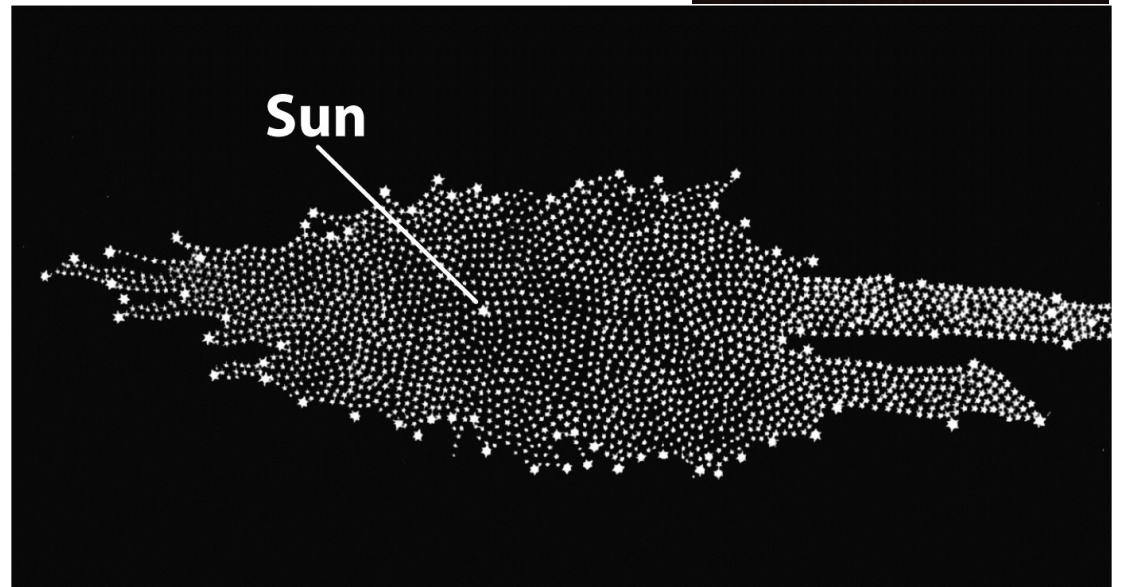


Figure 23-2  
Universe, Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

Mapa da Via Láctea de William Herschel

# Via Láctea

Em 1922, **Jacobus Kapteyn**, fazendo suposições mais realistas quanto às magnitudes absolutas, chegou num **modelo** da Via Láctea **similar** àquele do **Herschel**, um **esferóide achatado** com densidade de estrelas diminuindo com a distância do centro.

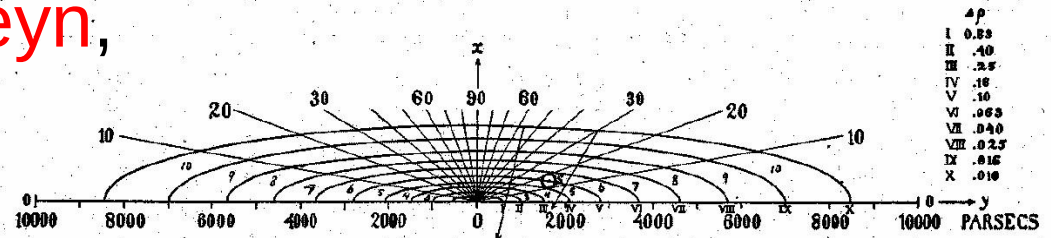


FIG. I  
O Universo de Kapteyn, as elipses são superfícies de densidade estelar constante

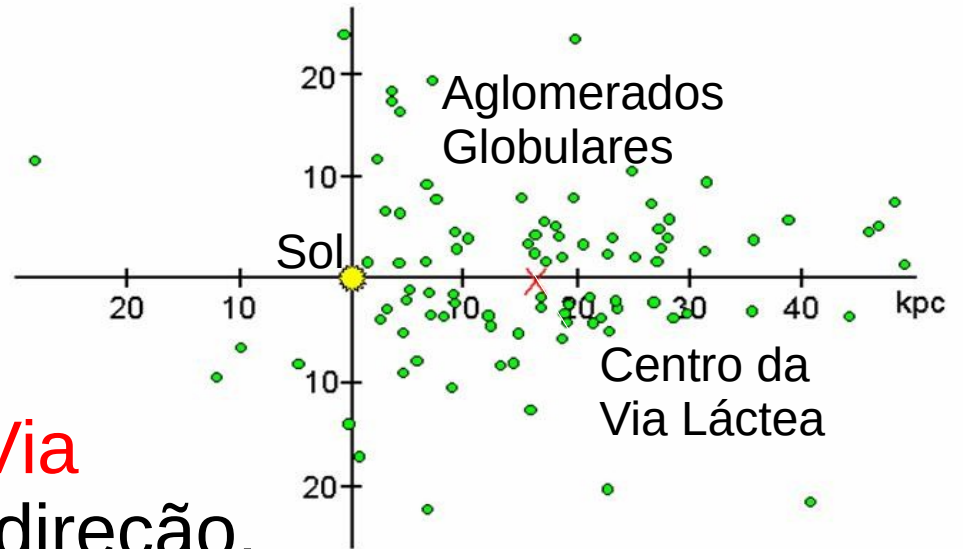
Em ambos os modelos, o **Sol** fica perto do **centro**, por que ambos não levaram em conta a **extinção inter-estelar**, que faz que a **distância de vista** é comparável em **todas as direções** no **disco**, onde fica a **poeira**.

# Via Láctea

Pouco antes, **Harlow Shapley** tinha encontrado que a **distribuição de Aglomerados Globulares é centrada** na região da constelação **Sagitário**.

Ele concluiu que o **centro da Via Láctea** deveria estar naquela direção, a uns 15 kpc do Sol (quase duas vezes o valor atual), e que o diâmetro deve ser da ordem de 100 kpc (também quase duas vezes o tamanho atual).

Shapley's Globular Cluster Distribution



# Via Láctea

Ambas a subestimação do tamanho da Via Láctea de Kapteyn e a sobreestimação de Shapley eram devidas à **extinção interestelar**.

No caso de **Kapteyn**, ela **limitou** a **distância de visão** (observações dentro do disco, onde a extinção é forte).

No caso de **Shapley**, ela levou a **erros** na curva de **calibração** período-luminosidade das **estrelas variáveis** usadas como **velas padrão** para determinar a distância aos aglomerados, assim **superestimando** estas distâncias.

O papel da poeira só fica bem estabelecido no início da década de 1930.

# Galáxias

**Immanuel Kant**,  
século XVIII:  
Se a **Via Láctea** tem  
**tamanho limitado**, então  
talvez as "**nebulosas  
elípticas**" no céu sejam  
**sistemas discos** como o  
nosso, "**Universos ilhas**".

Na época, qualquer objeto  
flocoso no céu era  
chamado de nebulosa.



# Galáxias

O catálogo de 103 a 110 "nebulosas" de

**Messier** continha:

- **nebulosas gasosas:**

M1, M42, ...

- **aglomerados estelares:** M3, M45, ...

- objetos de natureza até então

**desconhecida:**

M31, M51, M81, ....

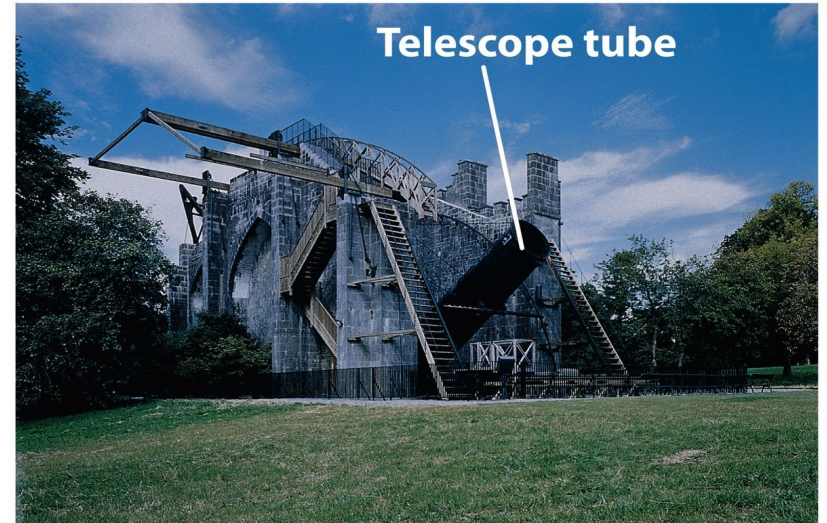
Outros catálogos similares foram compilados nos anos seguintes, i. e. o New General Catalog (NGC).



# Galáxias

Em 1845, **William Parsons**, usando o então maior telescópio do mundo (1.8 m), o Leviathan, observou pela primeira vez **estruturas espirais** em algumas das **nebulosas**, e que estas nebulosas espirais têm espectros similares a estrelas.

Em 1912, **Vesto Slipher** conseguiu evidenciar, medindo o efeito Doppler em algumas linhas espectrais, que estas **nebulosas espirais** estão **girando**.



Rosse's "Leviathan of Parsonstown"



M51 as viewed through the "Leviathan"

# Galáxias

## O grande Debate Shapley-Curtis (1920)



### Harlow Shapley

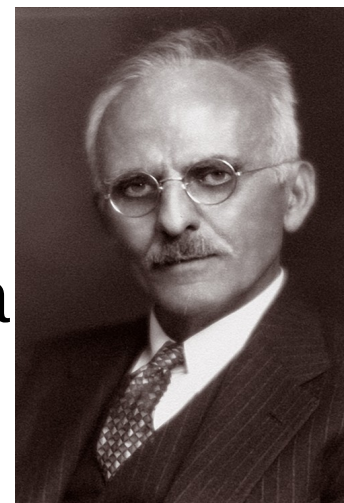
(o mesmo que usou aglomerados globulares para (super-)estimar a distância até o Centro da Via Láctea, 20 kpc):

"**Nebulosas Espirais** são **membros** da **nossa Galáxia**."

### Heber Doust Curtis

(acreditando no modelo da Via Láctea com diâmetro de 16 kpc e o Sol no centro de Kapteyn):

"**Nebulosas Espirais** são objetos **similar** à **Via Láctea**, e se encontram **separadas** desta. Elas são os "Universos Ilhas" de Kant."



# Galáxias

Em 1923, **Edwin Hubble** detectou **Cefeidas** (estrelas variáveis) nas **Nebulosas** de **Andrômeda**, M31, e Triângulo, M33, e, usando a relação período-luminosidade destas estrelas, conseguiu determinar a **distância** até M31 e M33.



Ele encontrou que estas **nebulosas espirais** se encontram **fora** da **Via Láctea**, e são objetos **similares** a esta.

=> **Nascimento** da **Astronomia ExtraGaláctica**.



Universidade Federal do ABC

# Introdução à Cosmologia

## FIM PRA HOJE

