


REVOLUÇÃO COPERNICANA

- O modelo de Copérnico resolvia muitos dos problemas que levaram o geocentrismo a entrar em crise.
- Entretanto, o modelo heliocêntrico proposto por Copérnico não foi aceito de forma imediata.
- Um modelo heliocêntrico do cosmo encontrava muitos opositores, entre eles a Igreja.
- Diversos cientistas precisaram defender e melhorar o modelo de Copérnico antes que ele fosse aceito, como veremos a seguir.
- A ciência não evolui de forma linear e sem que haja oposição.

GIORDANO BRUNO (1548-1600)

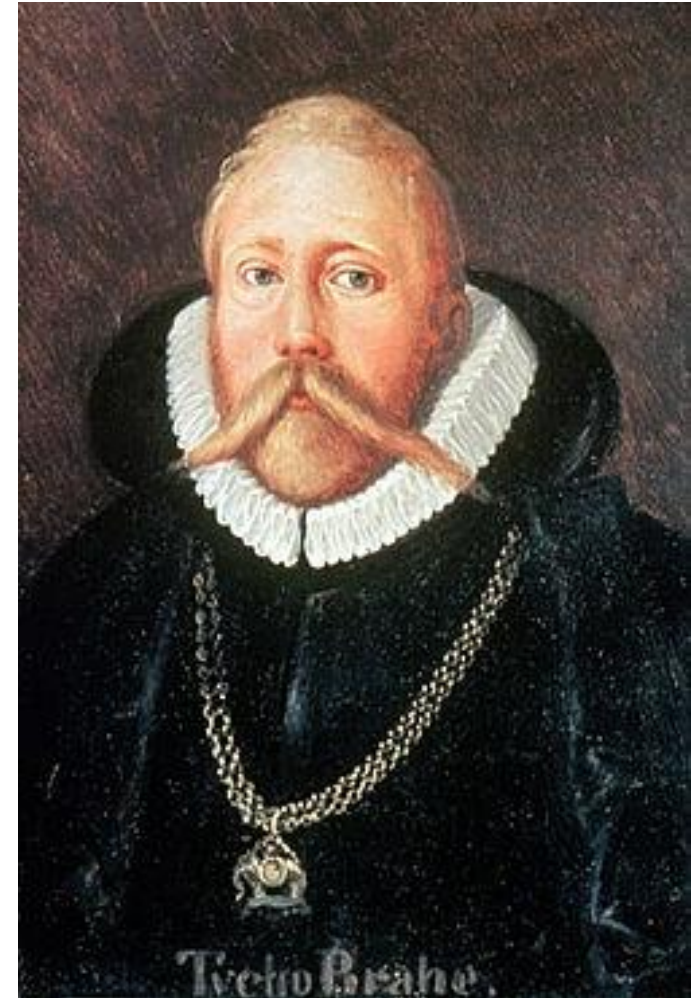
- Frade dominicano.
- Filósofo, matemático, poeta e astrólogo.
- Sua teorias cosmológicas foram ainda mais longe do que o modelo de Copérnico.
- Insistiu que o Universo é infinito, não tendo, portanto, nenhum corpo celeste em seu “centro”.
- Propôs que as estrelas eram sóis distantes cercados por seus próprios planetas.



- 
- Acreditava na possibilidade de que outros planetas também poderiam abrigar formas de vida.
 - Em 1593, Bruno foi julgado por heresia pela Inquisição sob as acusações de negação de várias doutrinas católicas centrais.
 - Em 1600 ele foi queimado na fogueira em Roma.
 - Estudiosos destacam que as opiniões astronômicas de Bruno foram, no máximo, um componente menor das crenças teológicas e filosóficas que o levaram ao seu julgamento.
 - Entretanto, Bruno contribuiu para a divulgação das ideias de Copérnico.

TYCHO BRAHE (1546-1601)


- Um dos melhores astrônomos observacionais da história.
- Desenvolveu novas técnicas e novos instrumentos (antes do advento do telescópio) para realizar observações astronômicas.
- Melhores observações astronômicas efetuadas a olho nu.
- Medições com precisão de cerca de $0,1^\circ$!

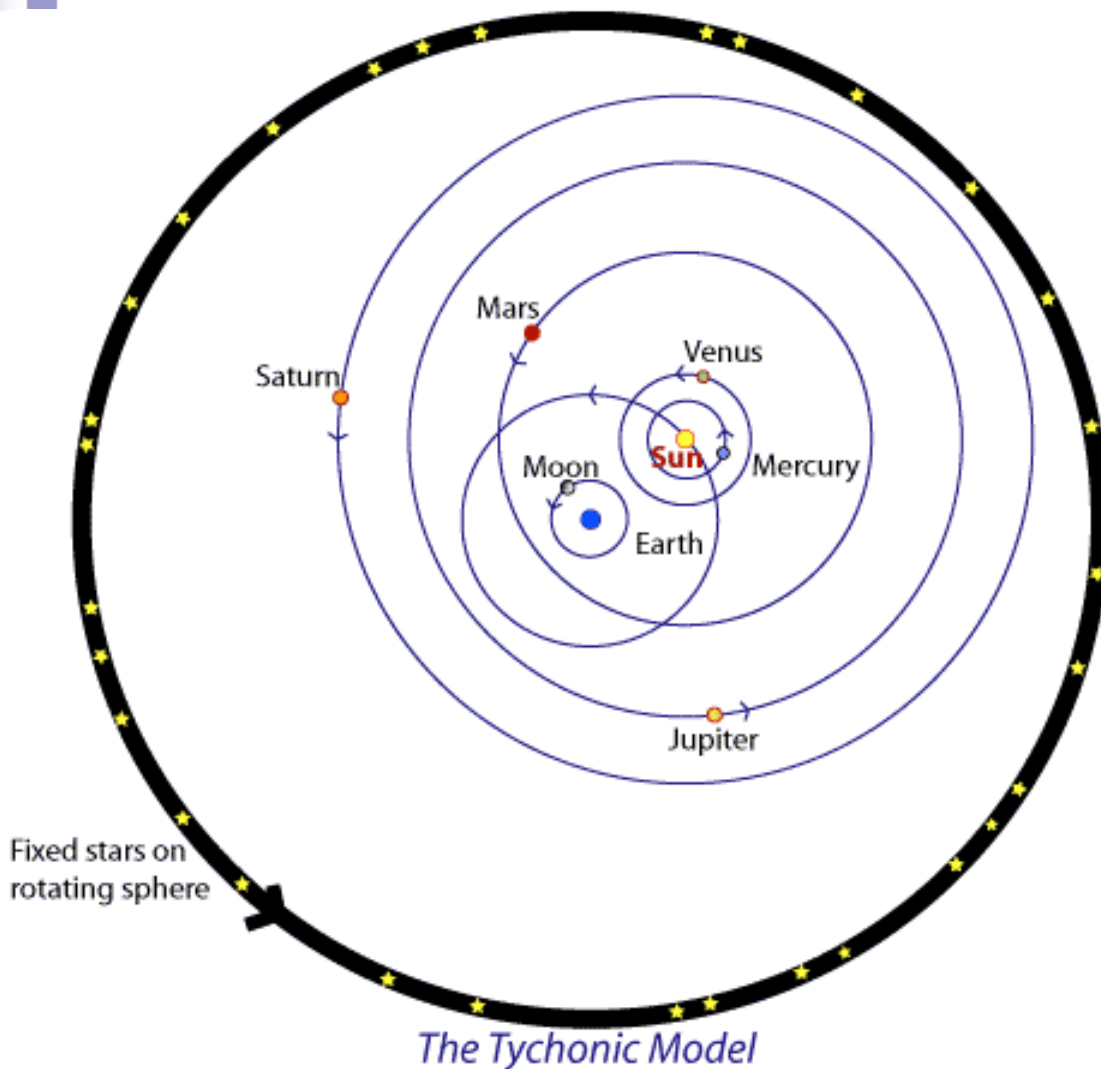


- Observações importantes: supernova de 1572 e cometa de 1577: provas de que o firmamento não é imutável.

- Porém, defendia o modelo geocêntrico, com a Terra ocupando o centro do Universo.



- 
- Tycho propôs um modelo intermediário entre os de Ptolomeu e Copérnico.
 - A Terra estaria imóvel no centro do Universo (finito).
 - Todos os planetas, com exceção da Terra, se moveriam em torno do Sol, mas o Sol se moveria ao redor da Terra.
 - Tycho não percebeu que seu modelo só diferia do de Copérnico por uma mudança trivial do sistema de referência.



- Os raios das órbitas de Marte, Júpiter e Saturno ao redor do Sol são maiores do que o raio da órbita do Sol ao redor da Terra. Assim, esses planetas nunca se encontram entre o Sol e a Terra.

- Já os raios das órbitas de Mercúrio e Vênus são menores do que o raio da órbita do Sol e esses planetas podem se encontrar entre o Sol e a Terra.

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

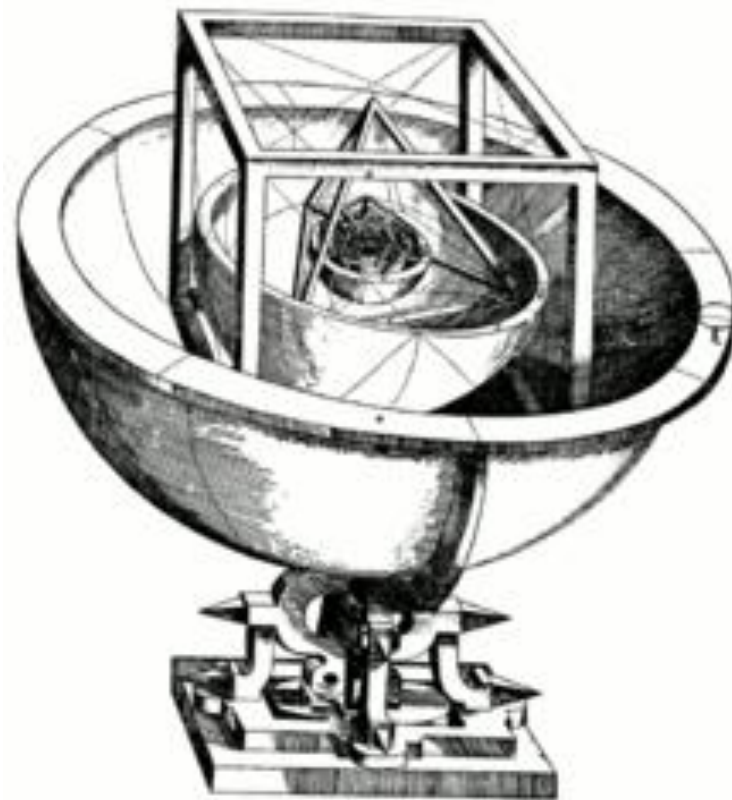
- Assistente de Tycho Brahe durante um ano.
- Defensor do modelo heliocêntrico.
- Contribuiu significativamente para a substituição de uma física contemplativa e qualitativa por uma **matematização da física**.
- Buscava uma **causa física** para o movimento dos corpos celestes e não apenas a descrição desse movimento. Nascimento hesitante dos conceitos modernos de **força**, **energia radiante** e **causa e efeito**.




- Motivado por uma forte convicção, do tipo platônico-pitagórico, de que o universo é construído de acordo com um plano matemático, cuja estrutura pode ser deduzida por argumentos de perfeição e da “harmonia das esferas”.
- Ideia fantástica: os raios das órbitas planetárias deviam ter alguma explicação geométrico-mística em termos de figuras perfeitas.
- Entre os 6 planetas então conhecidos havia 5 distâncias a explicar, número igual ao dos sólidos regulares ou “perfeitos”, os sólidos platônicos: tetraedro, cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro.

- Kepler construiu um modelo utilizando os 5 sólidos regulares inscritos e circunscritos em esferas (que representariam as órbitas dos planetas).

- Entre as órbitas de Saturno e Júpiter, Kepler inseriu um cubo.




- Entre Júpiter e Marte: tetraedro.
- Entre Marte e Terra: dodecaedro.
- Entre Terra e Vênus: icosaedro.
- Entre Vênus e Mercúrio: octaedro.

- 
- Kepler procurou mostrar que as proporções obtidas com os sólidos regulares seriam as mesmas que aquelas entre os raios das órbitas planetárias obtidas por Copérnico. Entretanto, a concordância não era das melhores.
 - Kepler possuía um grande respeito pelos dados experimentais. Não se satisfazia com qualquer modelo enquanto não levasse a uma concordância praticamente perfeita com a experiência.
 - Por esse motivo, Kepler pode ser considerado um dos pioneiros da física teórica e experimental pois, embora pudesse ter liberdade total para produzir teorias, estas precisavam concordar com as observações.

- Em 1600, Kepler é convidado para trabalhar como assistente de Tycho Brahe. Ele aceita o convite para ter acesso a dados mais preciso sobre as órbitas dos planetas.
- Tycho faleceu em 1601, deixando de herança para Kepler os dados e tabelas que ele havia compilado durante décadas.
- Utilizando os dados obtidos por Tycho Brahe, Kepler propôs uma correção ao modelo de Copérnico: o Sol estaria no centro (e não em uma posição excêntrica como considerava Copérnico) das órbitas circulares dos planetas.
- A hegemonia do círculo e da esfera continuava!
- Entretanto, Kepler se recusava a utilizar epiciclos, pois não podia conceber um planeta girando em torno de um ponto geométrico vazio (o centro do epiciclo), que não podia responder pela *causa física* do movimento do planeta.

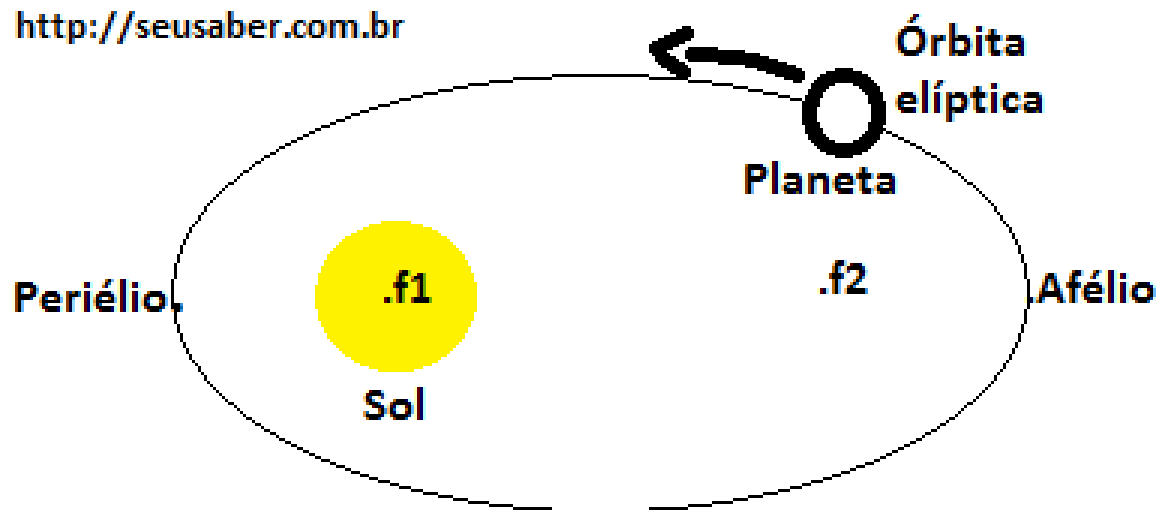
- Para Kepler, “a gravidade é uma tendência corpórea mútua entre corpos materiais (...), de modo que a Terra atrai uma pedra muito mais do que a pedra atrai a Terra”.
- Kepler relaciona a força da gravidade exercida por um corpo material à massa desse corpo. Quanto maior a massa do corpo, maior a força gravitacional por ele exercida e maior é a distância alcançada pela força.
- Assim, qualquer objeto seria atraído para a Terra, não pelo fato dela ocupar o centro do Universo como afirmava Aristóteles, mas pelo fato da Terra possuir uma massa maior que o objeto.
- Kepler também acreditava que a força da gravidade poderia ser exercida à distância. Por isso a Lua orbita ao redor da Terra e os planetas ao redor do Sol, pois existe uma atração mútua entre os corpos que possuem massa.
- Prenúncio da concepção de **atração gravitacional**.

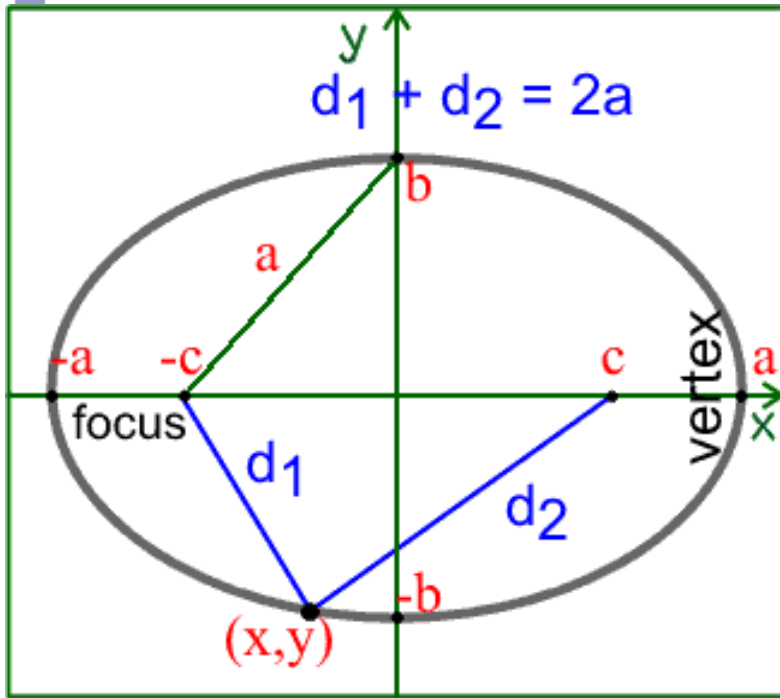
- 
- O modelo de Kepler concordava melhor com a experiência do que o modelo de Copérnico.
 - Entretanto, para a órbita de Marte persistia um desvio de 8 minutos de arco.
 - Esse erro era muito pequeno e compatível com a precisão das observações feitas na antiguidade e utilizadas por Copérnico.
 - Mas esse desvio estava em desacordo com a precisão das observações de Tycho Brahe que era de pelo menos 4 minutos de arco.
 - Nesse ponto, Kepler poderia acreditar no modelo de círculos perfeitos ou nos dados experimentais obtidos por Tycho Brahe. **Ele decidiu confiar na experiência.**

- Kepler abandonou qualquer ideia preconcebida, inclusive o programa platônico de explicar tudo em termos de movimentos circulares uniformes.
- Ele estudou a órbita de Marte por mais de 2 anos na tentativa de encontrar uma trajetória que fosse compatível com os dados experimentais.
- A precisão das observações de Tycho permitiram que Kepler determinasse corretamente que **as órbitas dos planetas são elipses com o Sol em um dos focos.**
- A partir desse resultado, Kepler formulou suas 3 leis planetárias que constituiriam a base de uma nova ciência, a **astronomia física**, básica para o **nascimento da mecânica.**

1ª LEI DE KEPLER

- Lei das Órbitas: *As órbitas descritas pelos planetas ao redor do Sol são elipses, com o Sol ocupando um dos focos.*





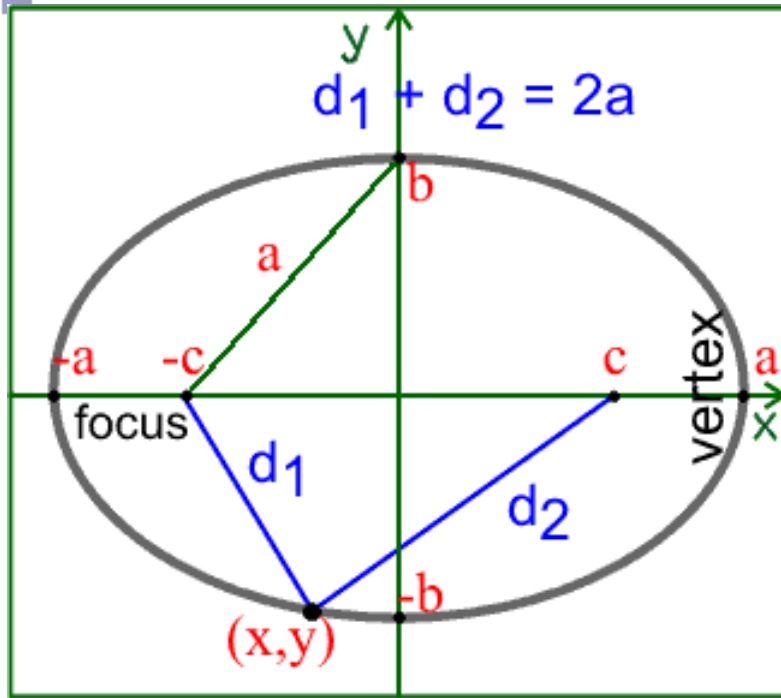
<https://people.richland.edu/james/lecture/m116/conics/elldef.html>

Elipse:

- Conjunto dos pontos (x, y) que satisfazem a equação:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1$$

- Obs: na figura, o centro da elipse é o ponto $(x_0, y_0) = (0, 0)$
- Eixo maior: comprimento $2a$
- Eixo menor: comprimento $2b$
- Focos localizados sobre o eixo maior: $(x_0 \pm c, y_0)$
- Semi-distância focal c : $c^2 = a^2 - b^2$
- Soma das distâncias d_1 e d_2 de qualquer ponto (x, y) aos focos é igual a $2a$, ou seja, $d_1 + d_2 = 2a$.



<https://people.richland.edu/james/lecture/m116/conics/elldef.html>

<i>Planeta</i>	<i>Semi-eixo maior a (UA)</i>	<i>Ecentricidade e</i>
<i>Mercúrio</i>	<i>0,387096</i>	<i>0.2056</i>
<i>Vênus</i>	<i>0,723342</i>	<i>0.0068</i>
<i>Terra</i>	<i>1</i>	<i>0.0167</i>
<i>Marte</i>	<i>1,523705</i>	<i>0.0934</i>
<i>Júpiter</i>	<i>5,204529</i>	<i>0.0483</i>
<i>Saturno</i>	<i>9,575133</i>	<i>0.0560</i>
<i>Urano</i>	<i>19,30375</i>	<i>0.0461</i>
<i>Netuno</i>	<i>30,20652</i>	<i>0.0097</i>

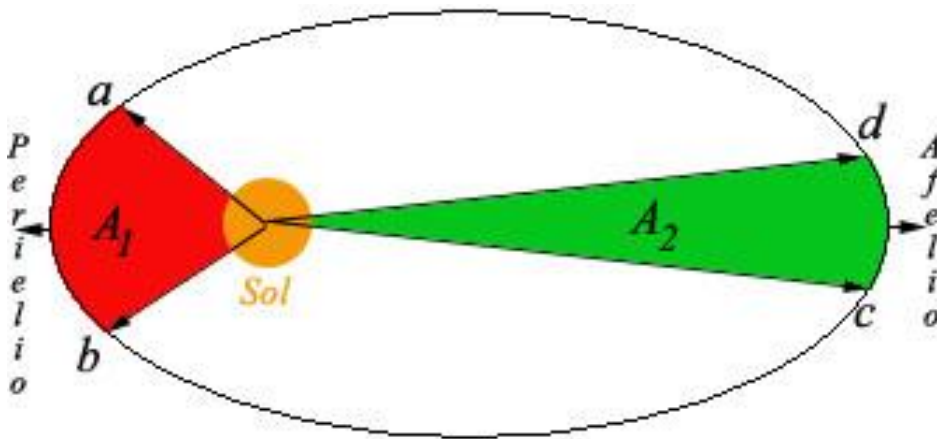
Luis Gregório Dias da Silva (IFUSP),
Notas de aula de Gravitação (2014)

Excentricidade da Elipse: $e = \frac{c}{a}$

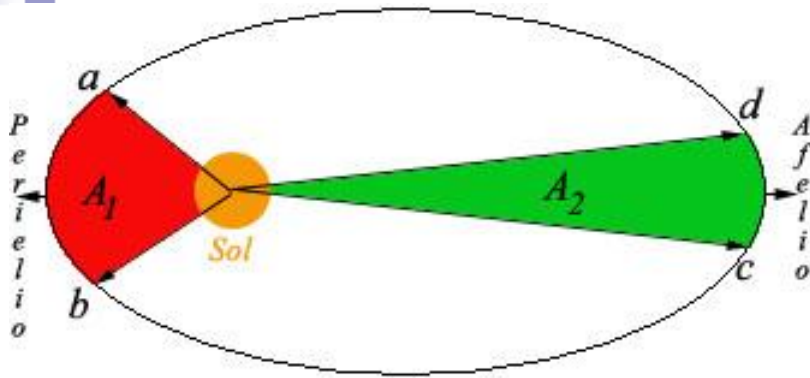
- Elipse: $0 < e < 1$
Quanto maior o valor de e , mais “achatada” é a elipse.
- Círculo: $e = 0$ e $a = b$

2ª LEI DE KEPLER

- Kepler observou que a Terra não se movia uniformemente ao longo de sua órbita. Sua velocidade dependia da distância ao Sol, reforçando sua concepção de que o Sol comandava o movimento dos planetas.
- Imaginou que o tempo necessário para percorrer um pequeno trecho da órbita também deveria ser proporcional àquela distância.
- 2ª Lei de Kepler (Lei das Áreas): *a linha reta que une o planeta ao Sol varrerá áreas iguais em tempos iguais.*



$$A_1 = A_2 \Leftrightarrow \Delta t_1 = \Delta t_2$$



$$A_1 = A_2 \leftrightarrow \Delta t_1 = \Delta t_2$$

- Supondo que os arcos percorridos são muito pequenos, podemos considerá-los delimitando 2 setores de círculo com $\overline{Sa} = \overline{Sb} = R_1$ e $\overline{Sc} = \overline{Sd} = R_2$
- Área desses setores de círculo: $abR_1/2 = cdR_2/2$
- Logo, $abR_1/\Delta t = cdR_2/\Delta t \Rightarrow v_{ab}R_1 = v_{cd}R_2 = \text{constante}$
- A 2ª Lei de Kepler permite determinar a variação da velocidade do planeta em diferentes pontos da órbita.
- Se m é a massa do planeta, tem-se: $mv_{ab}R_1 = mv_{cd}R_2 \Rightarrow L_1 = L_2$
- onde $L = mvR$ é o momento angular.
- A 2ª Lei de Kepler é uma lei de conservação do momento angular (leis de conservação são extremamente importantes na Física).

3ª LEI DE KEPLER

- Kepler observou que os períodos dos planetas aumentavam com sua distância ao Sol. Quanto mais distantes do Sol, mais lentos eram os planetas.
- Kepler procurava uma relação matemática entre a distância de um planeta ao Sol e a duração de seu período.
- Em 1618, ele verificou que: *O quadrado do período de translação de um planeta é proporcional ao cubo da distância média de sua órbita em torno do Sol.*

$$T^2 = k\bar{R}^3$$

- Kepler também buscava relacionar, numa única expressão matemática, dados dos diferentes planetas, porque estava convencido que deveria haver alguma regularidade ou ordem especial que ligaria o movimento dos diferentes componentes do sistema solar.
- Ao notar que o valor da constante k era o mesmo para todos os planetas, ele pôde finalmente enunciar sua 3ª lei.
- 3ª Lei de Kepler (Lei dos Períodos): *os quadrados dos períodos de revolução de dois planetas quaisquer estão entre si como os cubos de suas distâncias médias ao Sol.*

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{\bar{R}_1^3}{\bar{R}_2^3} = \text{constante}$$

- A 3ª Lei de Kepler mostrou-se básica para Newton na formulação do princípio universal da gravitação.

Planeta	Período de revolução (T) anos	Raio de órbita (r) (em u.a.)*	$T^2 / r^3 = K$ (ano) ² / (u.a.) ³
Mercúrio	0,241	0,387	1,002
Vênus	0,615	0,723	1,000
Terra	1,000	1,000	1,000
Marte	1,8881	1,524	0,999
Júpiter	11,86	5,204	0,997
Saturno	29,6	9,58	0,996
Urano	83,7	19,14	1,000
Netuno	165,4	30,2	0,993
Plutão **	248	39,4	1,004

(*) 1 u.a. = 1 unidade astronômica
= raio de órbita da Terra

(**) A partir de agosto de 2006,
Plutão passou a ser considerado
planeta anão.

(***) Urano, Netuno e Plutão ainda
não eram conhecidos na época de
Kepler.

(****) raio de órbita (r) = raio **médio**
da órbita