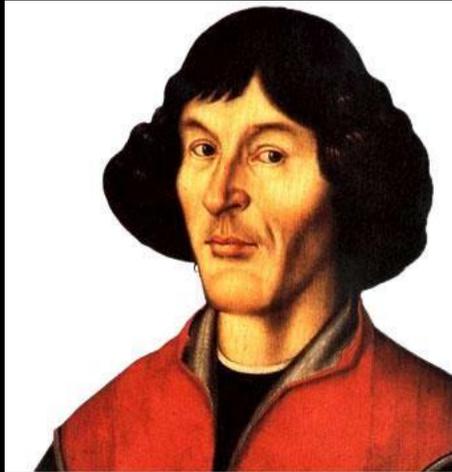


GRAVITAÇÃO

Renascimento: os gigantes desta fase (~ 1400 – 1700)

Trabalhos de Tycho Brahe, Kepler e Galileo eram empíricos



• Copérnico

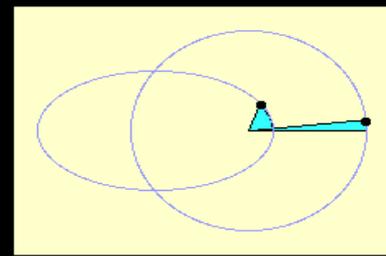
- Modelo Heliocêntrico
- Explica corretamente a causa das Estações Ano
- Determina a distância relativa dos planetas

• Tycho Brahe

- Famoso pelas obs. e análises de Supernovas e Cometas
- Medidas de posições de Planetas
- Não aceitava Helioc.

• Kepler

- Movimento Planetário



• Galileo

- Pai da ciência experimental: telesc.
- Experimentos mecânica
- Conceito inércia
- Heliocentrismo

Nicolau Copérnico (1473-1543)

astrônomo, matemático, médico e religioso polonês



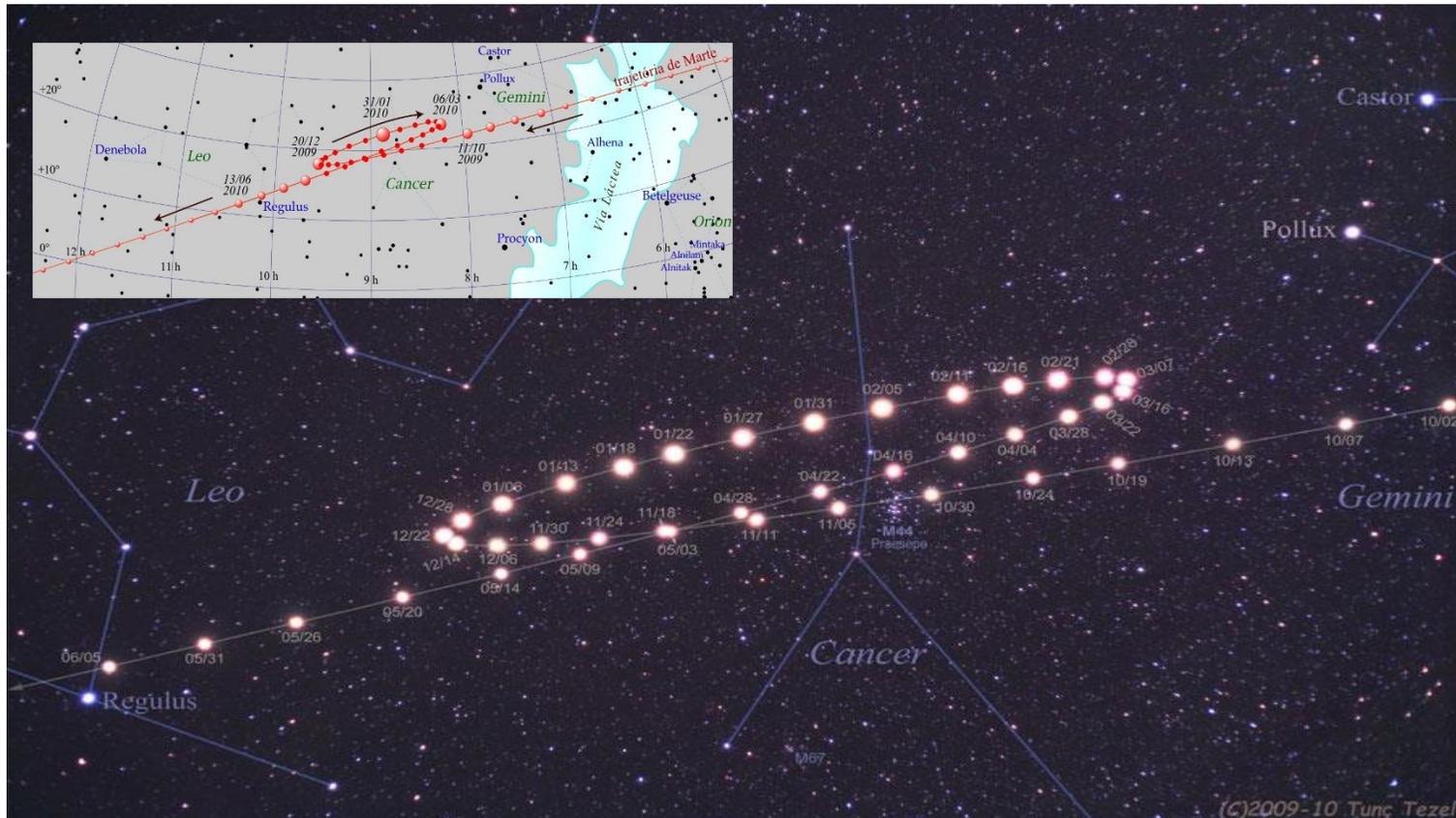
O conceito do Equante, feito por Ptolomeu, representava para Copérnico uma **ruptura insuportável** ao ideal de órbitas circulares perfeitas.

A Teoria de Copérnico também fazia uso dos epiciclos. Entretanto, a diferença é que, para ele, o Sol, fonte de luz e energia, era o “local” mais provável para encontrarmos Deus. Portanto, ele, e não nós, é quem deveria estar no centro do Universo.

Desta forma, ele propõem um modelo onde desloca a Terra do centro do Universo e coloca o Sol, divino, no centro do universo. Assim, a Terra, e os outros planetas, é quem orbitavam em torno do Sol em órbitas circulares, **introduzindo o heliocentrismo** na discussão científica da época.

Nesta concepção, o movimento aparente de “laço”, já amplamente observado para o planeta Marte, é explicado pelo fato de estarmos numa órbita interna não sincronizada com a órbita daquele astro. (vejam a seguir uma simulação do fenômeno)

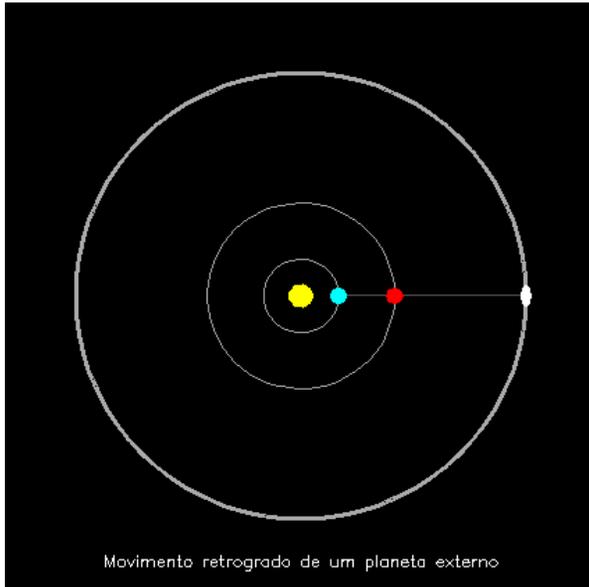
O movimento em "laço" de Marte (movimento retrógrado)



Créditos: Tunç Tezel (TWAN)

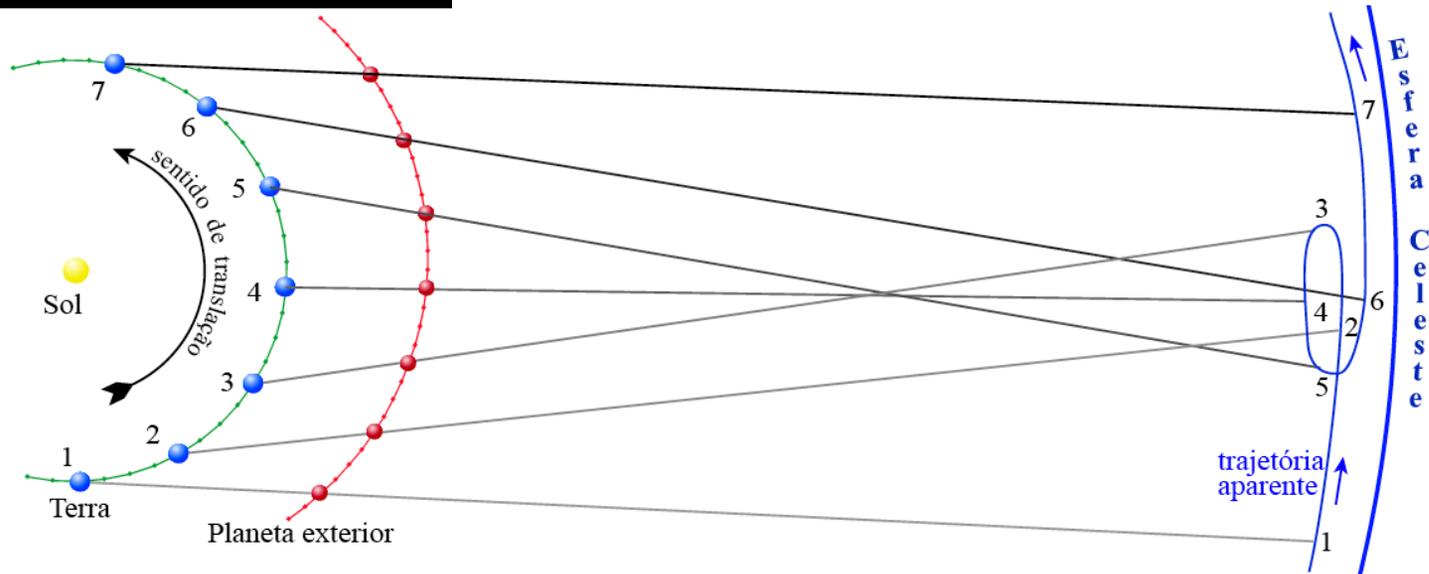
Os planetas apresentam movimento **direto** em relação às estrelas (de oeste para leste) na maior parte do tempo, mas também apresentam movimento **retrógrado** (de leste para oeste).

Movimento Retrógrado dos Planetas



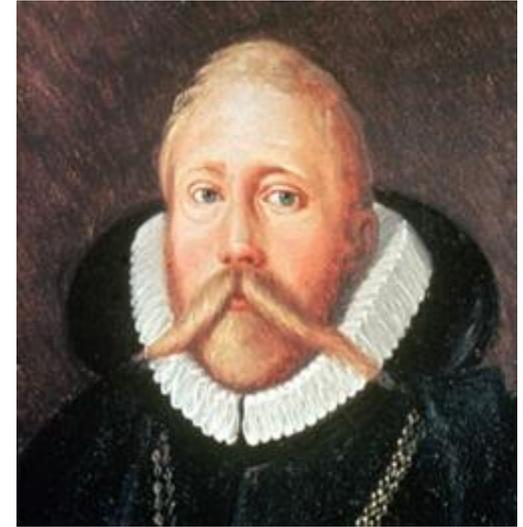
Ver animação em:

http://www.astro.iag.usp.br/~amancio/mpa5003_notas/Mars_Retrograde_Orbit_Simulation.wmv



Tycho Brahe (1546-1601)

Astrônomo bastante respeitado e por este motivo foi capaz de arrecadar fundos para construir um grande observatório.

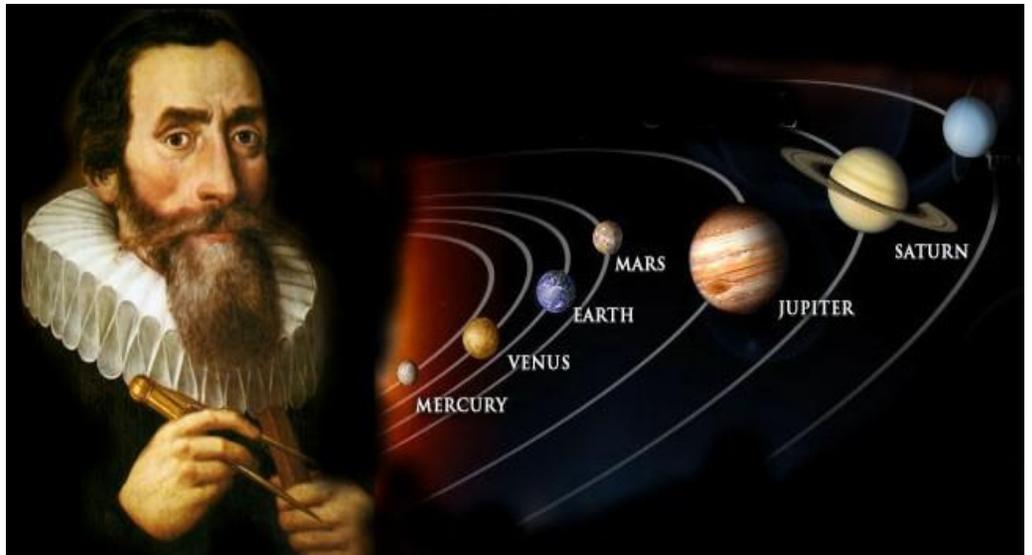


Conseguiu desta forma realizar **observações visuais** de alta precisão para a época, cerca de 1,5 minutos de arco, utilizando um instrumento conhecido como quadrante de parede.

Cerca de 1000 estrelas foram observadas por ele. Estas observações foram interpretadas somente após sua morte por J. Kepler.

Johannes Kepler (1571-1630),

alemão, matemático e astrônomo, foi assistente do Tycho Brahe.



As inúmeras observações, de alta qualidade para a época, feitas por T. Brahe, foram fundamentais para determinar a forma da órbita de Marte.

Kepler introduz o conceito de erro observacional como forma de obter o melhor modelo que explicasse os dados com um mínimo de desvio estatístico.

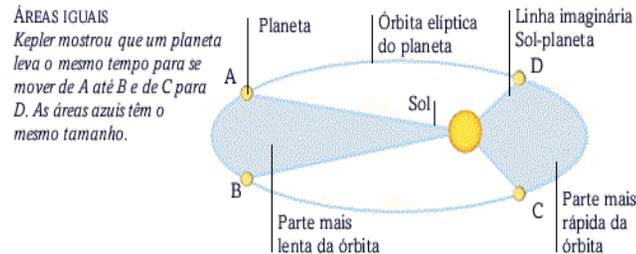
3 leis do Movimento Planetário (Leis de Kepler)

1ª Os planetas se movem em **elipses**, com o Sol em um dos focos;

...esta Lei dá a forma da órbita do planeta

2ª A linha que liga o Sol a um dado planeta varre **áreas iguais em tempos iguais**;

... esta Lei descreve como o planeta varia continuamente sua velocidade quando descreve sua órbita, movendo-se mais rápido no periélio e mais devagar no afélio.



3ª O quadrado do período orbital de cada planeta, em anos, é proporcional ao cubo do semi-eixo maior da órbita do planeta.

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

...esta Lei dá a relação entre as distâncias médias do planeta ao Sol e seus períodos de revolução.

As 3 Leis do movimento de Kepler e a da Gravitação de Newton, permitiram que Newton generalizasse a 1ª Lei de Kepler, verificasse a 2ª Lei e mostrasse que a 3ª Lei poderia ser alterada para a forma,

$$4\pi^2 a^3 / T^2 = G(M+m_p)$$

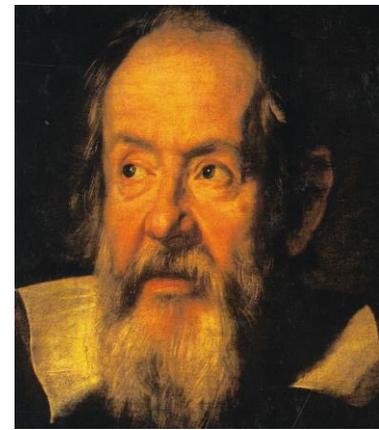
Onde T e a são o período de revolução e o semi-eixo maior, respectivamente, m_p é a massa do planeta, M a massa do Sol e G a constante gravitacional.

Comprove que a 3ª Lei de Kepler é obedecida pelos planetas do Sistema Solar.

<i>Photo</i>	<i>Planet</i>	<i>Relative Size</i>	<i>Average Distance from Sun (AU)</i>	<i>Average Equatorial Radius (km)</i>	<i>Mass (Earth = 1)</i>	<i>Average Density (g/cm³)</i>	<i>Orbital Period</i>	<i>Rotation Period</i>
	Mercury	•	0.387	2.440	0.055	5.43	87.9 days	58.6 days
	Venus	•	0.723	6.051	0.82	5.24	225 days	243 days
	Earth	•	1.00	6.378	1.00	5.52	1.00 year	23.93 hours
	Mars	•	1.52	3.397	0.11	3.93	1.88 years	24.6 hours
	Jupiter	●	5.20	71,492	318	1.33	11.9 years	9.93 hours
	Saturn	●	9.54	60,268	95.2	0.70	29.4 years	10.6 hours
	Uranus	●	19.2	25,559	14.5	1.32	83.8 years	17.2 hours
	Neptune	●	30.1	24,764	17.1	1.64	165 years	16.1 hours

Galileu Galilei (1564-1642)

Italiano, astrônomo, físico e matemático



Por volta de 1609, cientista respeitado, e simpático às idéias de Copérnico, percebeu a utilidade de utilizar um conjunto de lentes para construir um telescópio capaz de observar os objetos celestes com maior precisão.

Apesar da qualidade óptica ser ainda rudimentar, este telescópio se constituía em um enorme avanço em relação às observações anteriores feitas a olho nú.

No final deste mesmo ano ele já utilizava este instrumento para demonstrar que a **Lua tem crateras e montanhas**, e, portanto, **não era perfeita** quanto se imaginava na época. .

Provou que a Via Láctea era composta por uma miríade de estrelas e percebeu a presença das luas de Júpiter, conhecidas atualmente como luas galileanas, e ainda em 1610, que o planeta Vênus mostrava o fenômeno de fases, e que, portanto, deveria orbitar em torno do Sol e não da Terra.



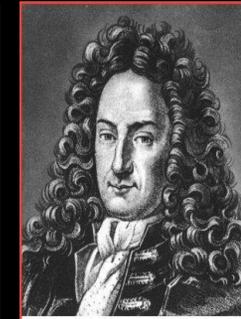
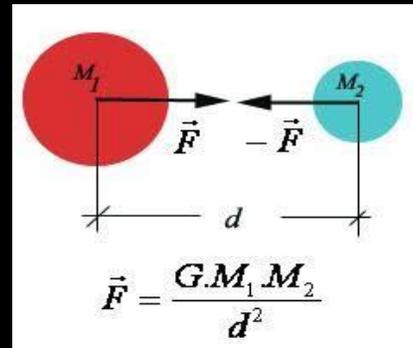
Isaac Newton (1642-1727)

Desenvolve **“ferramenta” física e matemática** para explicar as descobertas de Kepler e Galileo. Inventa o Cálculo

Realiza **experimentos em óptica**, como estudos da **natureza da luz** e desenvolve o **primeiro telescópio refletor**.

Desenvolve e **cria a Mecânica** que se ocupa do entendimento dos **movimentos dos corpos** e **cria o conceito de Energia**.

Formula as **3 Leis do Movimento** juntamente com as **Leis da Gravitação Universal** formando a base de um entendimento inteiramente novo do **Universo**.

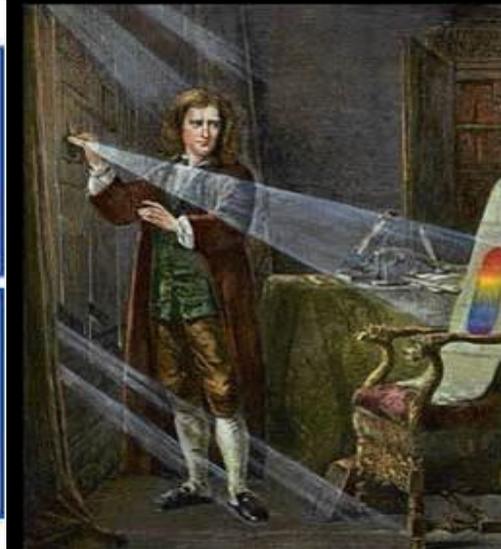


$$d(xy) = xdy + ydx$$

$$d(x + y) = dx + dy$$

$$\int xdy + \int ydx = xy$$

$$\text{omn. } l = y \int dy = y$$



Enuncia as 3 Leis do Movimento

1ª Lei da Inércia - (1ª Lei do Movimento - já descoberta por Galileo)

Um corpo em repouso ou em movimento uniforme ($v=cte$, direção cte) permanece neste estado a menos que alguma **força** atue sobre ele.

2ª Lei da Força (2ª Lei do Movimento)

A aceleração produzida quando uma força atua é diretamente proporcional à força e ocorre na direção em que a força atua e matematicamente descrita na forma **$F = m.a$**

3ª Lei da Ação e Reação (3ª Lei do Movimento)

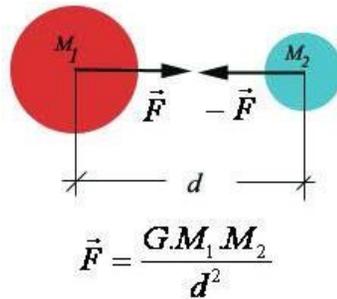
Força sempre ocorre aos pares, ou seja, para cada força em um sentido, existe outra igual em sentido oposto.

Lei da Gravitação Universal

GRAVIDADE, é a força que atrai corpos um em direção ao outro. É uma das 4 forças que atuam na natureza.

Cada par de objetos no Universo atrai um ao outro com uma força que é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado de suas distâncias.

Pode ser expressa, matematica e simplificada, como:



onde,

F = força gravitacional entre dois objectos

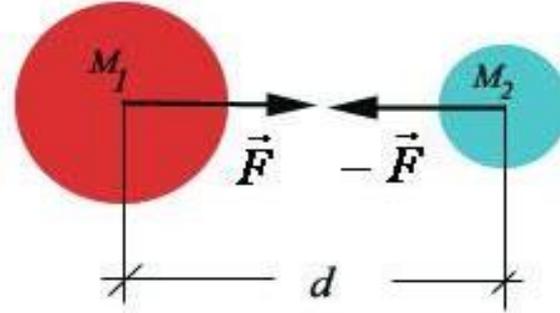
M_1 = massa do primeiro objecto

M_2 = massa do segundo objecto

d = distância entre os centros de massa dos objectos

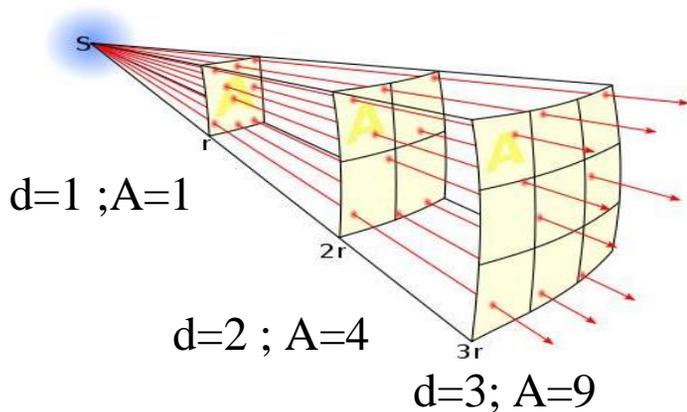
G = constante universal da gravitação ($6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{Kg}^2$); $N = 1 \text{ Kg.m/seg}^2$

Lei da Gravitação Universal



$$\vec{F} = \frac{G.M_1.M_2}{d^2}$$

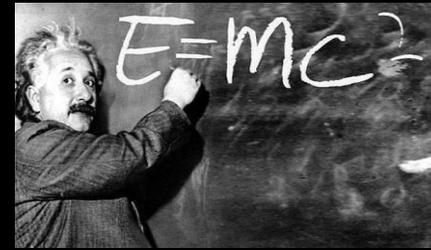
A analogia óptica



$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

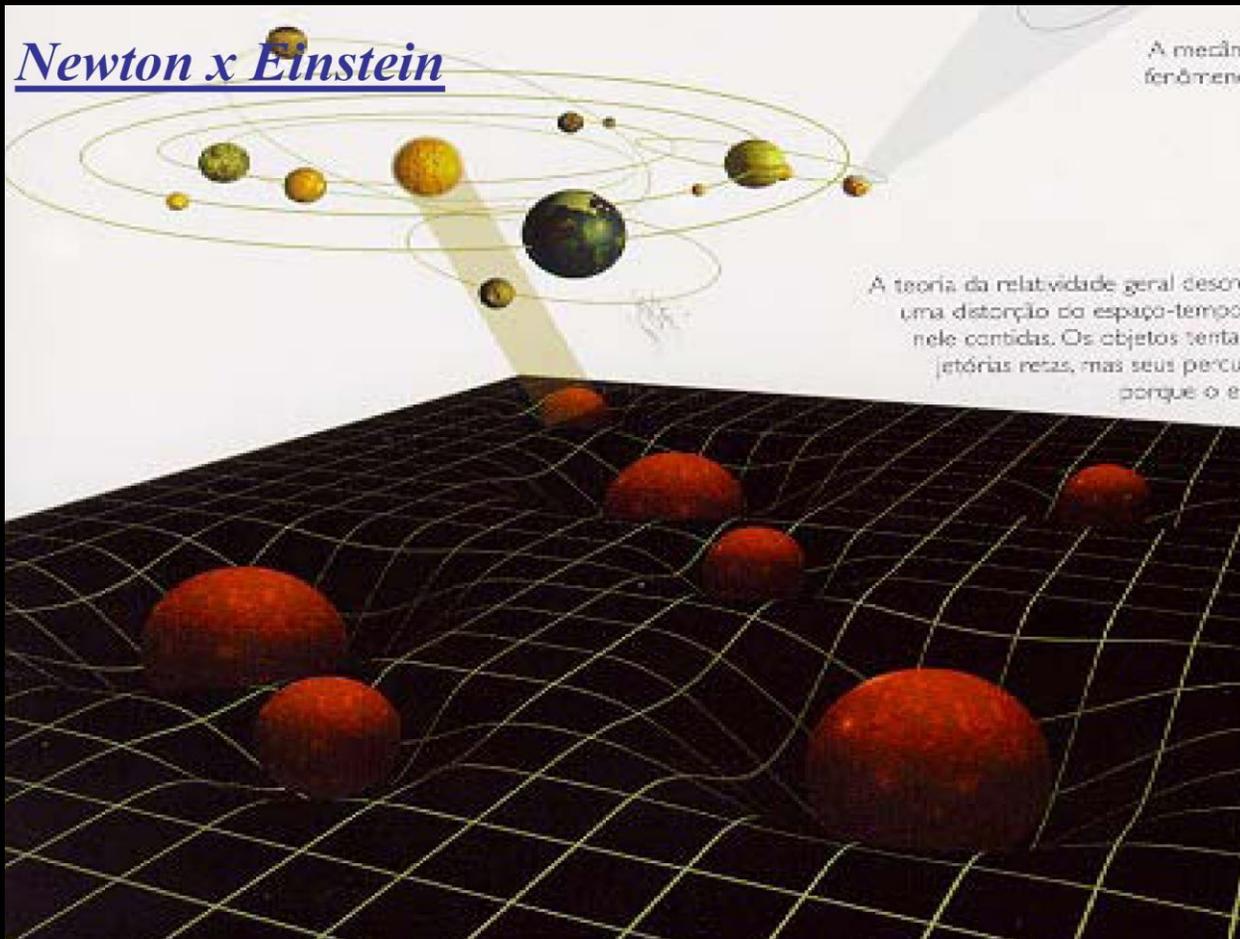
A densidade de raios de luz cai com o quadrado da distância à fonte

Teoria da Relatividade de Einstein (1879-1955)



GRAVIDADE

é o efeito geométrico provocado pela deformação do “espaço-tempo”



A curvatura do
“espaço-tempo”
deforma a
passagem do tempo
e as medidas de
distância

Teoria da Relatividade: Restrita e Geral

A **Teoria da Relatividade** (TRE) é uma atribuição dada ao conjunto de 2 teorias científicas – **A Relatividade Especial ou Restrita e a Relatividade Geral**.

- Relatividade Restrita (1905) se baseia em 2 princípios:

1o – Princípio da Relatividade, onde **2 observadores que se movem com velocidade constante um em relação ao outro**, concordam com todos os **resultados dos experimentos físico**. Isto implica em que **a velocidade é relativa!** implicando em que se for feito um experimento parado ou numa nave viajando a velocidade da luz, o resultado do experimento deve ser o mesmo para os 2 observadores.

2o – A velocidade da luz no vácuo é finita, constante e invariante!

....Não depende da fonte nem do observador (experiência de Michelson & Morley; experiência de Roemer – veremos adiante). Implicando que **c** é a velocidade que limita toda a matéria e toda a informação no Universo

Se $v = s/t \rightarrow$ e $v = c$ onde **c** é absoluta, **s e t** devem variar e vai haver uma interdependência...efeito de contração espacial e dilatação temporal

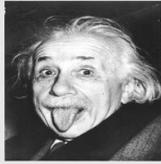
O que resulta em uma visão de que os **conceitos de espaço e tempo não são independentes, passam a ser interpretados como uma única entidade**, ou seja, o espaço consiste de 3 dimensões (x,y,z) e o tempo é unidimensional, então o espaço-tempo passa a ser visto como uma entidade geométrica unificada, de 4 dimensões: 3 delas associadas a posição espacial (x, y, z) e a 4^a associada ao tempo - quadridimensional.

Importante enfatizar aqui que no referencial do **espaço-tempo**, a unidade de medida será o **ano-luz** – a distância que a luz percorre em 1 ano...!

As unidades metro (m) e segundo (s) passam a ser medidas da mesma grandeza, só que em escalas diferentes: $1\text{s} = 299.792.458\text{m} = \text{ano-luz}$

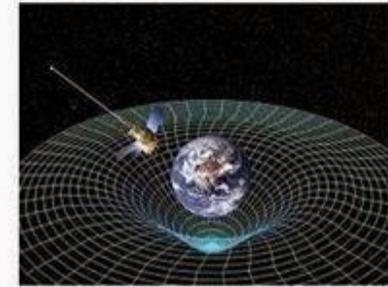
Teoria da Relatividade Geral (1915): o campo gravitacional é uma manifestação de distorções do tecido do espaço-tempo. Os efeitos da gravidade são integrados e surge a noção de **espaço-tempo curvo**

A curvatura do espaço-tempo”, deforma a passagem do tempo e as medidas da distância...



Equação de Campo de Einstein

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} \cdot g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = G \cdot \frac{8\pi}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Curvatura do espaço-tempo

Distribuição de matéria e energia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A equação de campo de Einstein $R_{\mu\nu}$ = Tensor de curvatura de Ricci $g_{\mu\nu}$ = Tensor métrico ("métrica") R = Curvatura escalar $T_{\mu\nu}$ = Tensor momento - energia

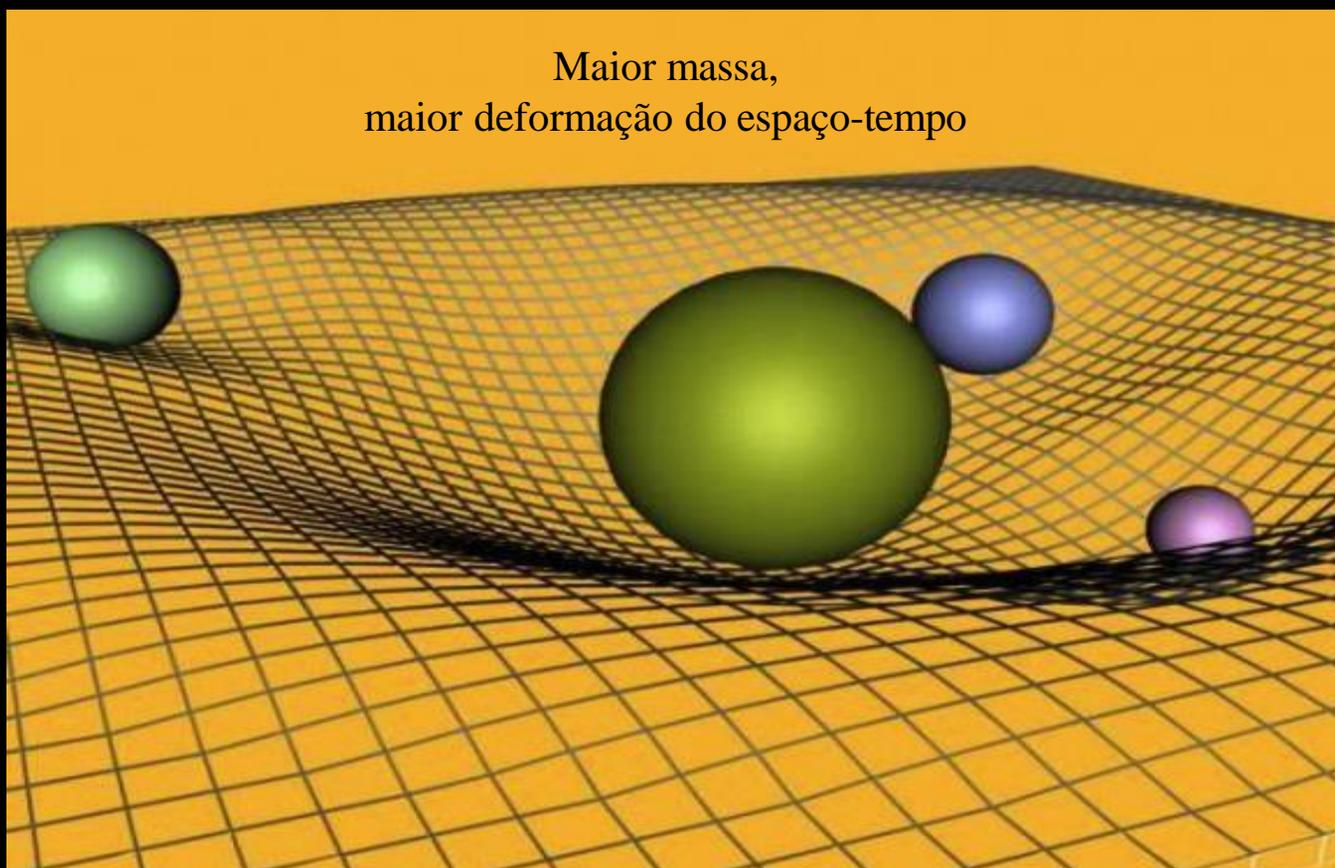
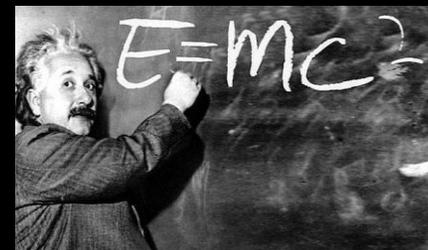
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Este tensor, com números diferentes de zero na diagonal principal da Matriz, representa matematicamente uma métrica que considera o universo homogêneo e isotrópico.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

* Os tensores são generalizações de vetores e escalares.

“O **espaço-tempo** diz à matéria como se mover...
a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar”

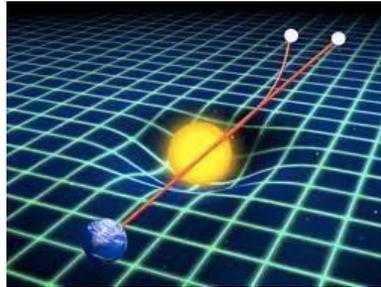


Como checar esta hipótese ? (1916)

Einstein e o Eclipse de 1919

<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/eclipse.pdf>

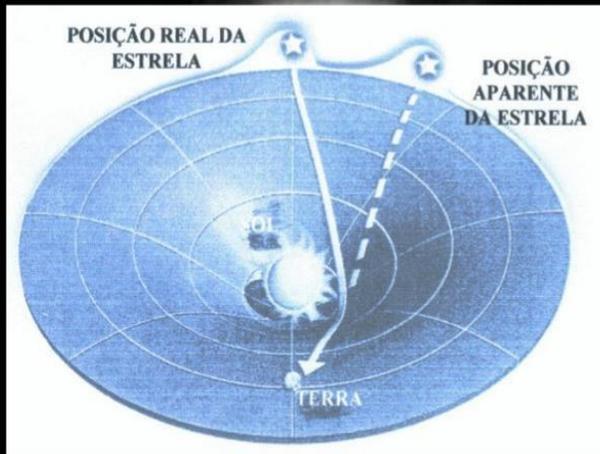
Em 1911 Einstein teve a idéia de realizar um **experimento** que lhe permitiria esclarecer o **desvio dos raios luminosos (fig)** aplicando o princípio de Huygens a respeito da propagação em linha reta da luz e as leis de reflexão e refração.



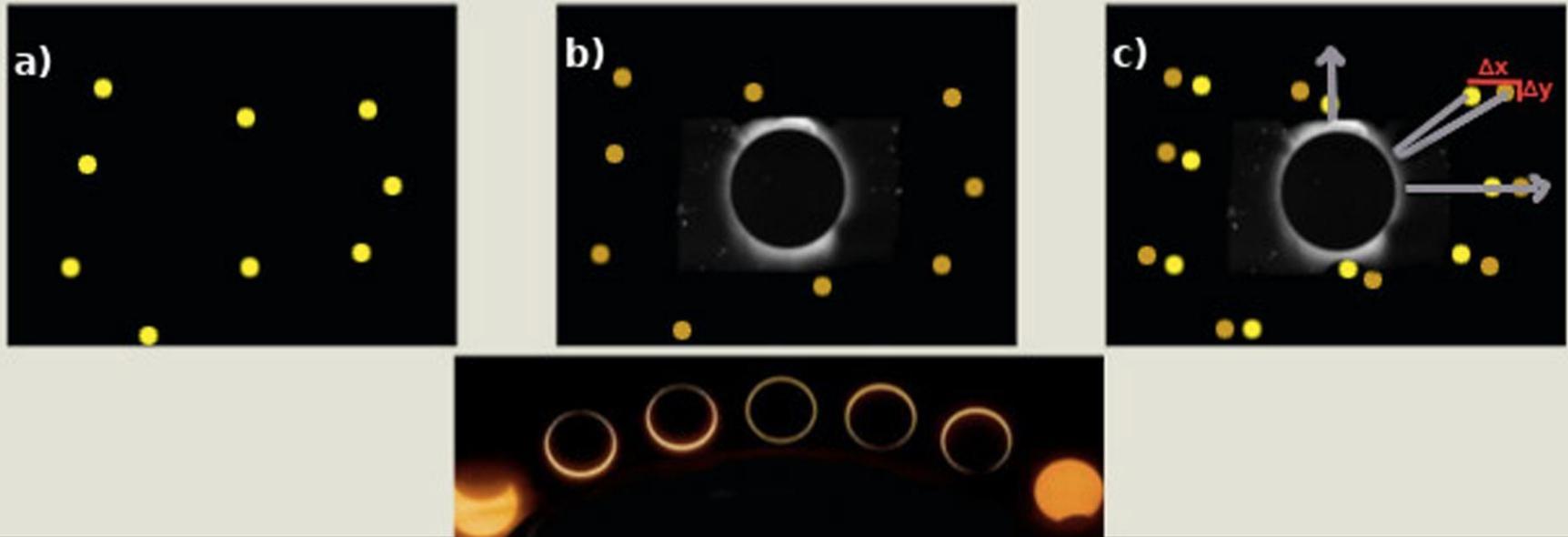
O experimento requereria um campo gravitacional muito intenso para que a medida pudesse ser efetivada. Para a verificação experimental, seria preciso obter duas fotografias, uma do **campo de estrelas durante a passagem do corpo maciço (por exemplo, o Sol)** diante dele e outra **do mesmo campo de estrelas sem a presença desse corpo**, e comparar, nas duas imagens, as posições das **estrelas mais próximas da borda desse corpo**. **Se o efeito existisse, a posição dessas estrelas estaria ligeiramente modificada.**

Caso o Sol fosse usado como ‘corpo teste’ para as idéias de Einstein, restaria uma outra dificuldade causada pela luminosidade do Sol, já que esta impediria que as estrelas mais próximas da sua borda fossem fotografadas.

A idéia do experimento: durante um eclipse total do Sol, observar se ocorria desvio dos raios luminosos... aplicando o princípio de Huygens a respeito da propagação em linha reta da luz e as leis de reflexão e refração.



Medida do Desvio da Luz



- O Eclipse Solar Total no Brasil - Sobral... Medida do ângulo de deflexão em 3 etapas.
- Estrelas são imagiadas no campo de visão sem a presença do Sol.
 - Posição deslocada das mesmas estrelas no momento do eclipse, e
 - Superposição final das duas chapas fotográficas e determinação do ângulo de desvio.

O resultado revelou-se de acordo com a teoria de Einstein.

Imagem obtida do artigo Revista Brasileira do Ensino de Física
<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0199>

O Eclipse Solar Total no Brasil....

Fotografia do eclipse de 29 de maio de 1919, obtida em Sobral



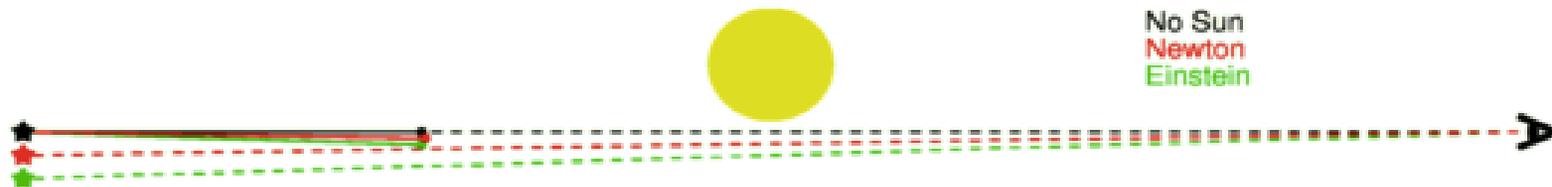
As linhas verdes marcam as posições das estrelas usadas para a verificação da teoria de Einstein

Einstein e o Eclipse de 1919

<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/eclipse.pdf>

Três eram os possíveis resultados para as medições, todos eles referentes a um raio de luz que praticamente tocasse a borda do disco solar:

- a) desvio igual a **zero**, que exigiria que se formulasse uma nova compreensão da composição da luz;
- b) desvio igual **0,87** segundos de arco (este resultado confirmaria a teoria de Newton);
- c) um desvio de **1,75** segundos de arco, explicado pela TRG de Einstein



Em preto: a luz segue em linha reta (sem a presença do Sol).

Em vermelho: a previsão pela teoria clássica de Newton.

Em verde: a previsão da TGR de Einstein, confirmada no eclipse solar de 1919. (Crédito Ned Wright)

Desvio medido nas placas fotográficas de Sobral = 1,98 segundos de arco com uma margem de erro de $\hat{\pm} 0,12$, confirmando a TRE

Estas previsões foram confirmadas em outras situações astrofísicas:
as “lentes gravitacionais”

