



Astrofísica Geral

Tema 03: Noções de Gravitação

Alexandre Zabet

Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

Nova gravitação

Bibliografia



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

Nova gravitação

Bibliografia



Johannes Kepler

- ▶ 27/12/1571 – 15/11/1630
- ▶ *Mysterium Cosmographicum* (1596)
 - ▶ Defendeu o heliocentrismo de Copérnico (1543).
- ▶ 1600: Trabalho com Tycho Brahe
- ▶ 1609: *Astronomia Nova*
 - ▶ Trabalho com dados de Brahe (†1601)
 - ▶ Duas primeiras leis
- ▶ 1619: *Harmonices Mundi*
 - ▶ Terceira lei
- ▶ Muito ignorado por contemporâneos, como Galileu e Descartes.

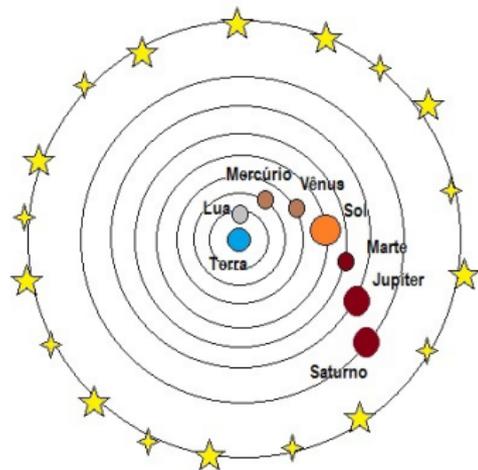


Kepler em 1610.



Geocentrismo

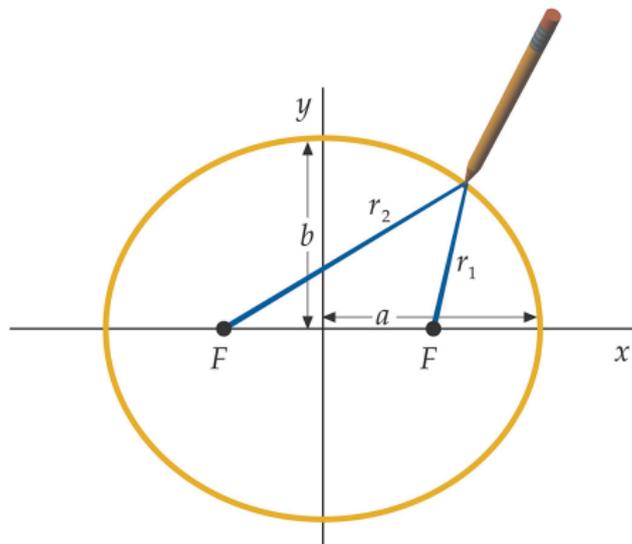
- ▶ Geocentrismo era o modelo mais aceito na época de Kepler
- ▶ Matematizado por Ptolomeu no Almagesto (~100 dC).
- ▶ Órbitas circulares
- ▶ Epíclis
- ▶ Explicava os dados e era consistente com a filosofia



Sistema Geocêntrico de Ptolomeu.



Elipse



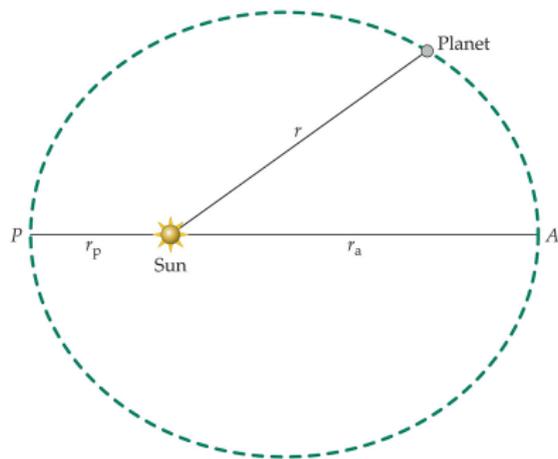
Como desenhar uma elipse. Definição geométrica.



Leis de Kepler

1ª lei

Todos os planetas se movem em órbitas elípticas com o Sol em um dos focos.



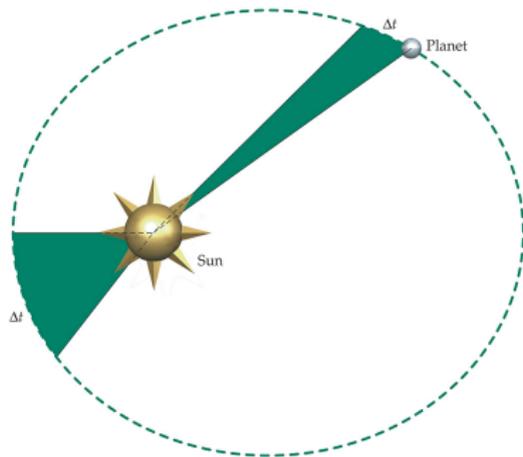
Primeira lei de Kepler.



Leis de Kepler

2ª lei

Uma linha ligando qualquer planeta ao Sol varre áreas iguais em tempos iguais.



Segunda lei de Kepler.

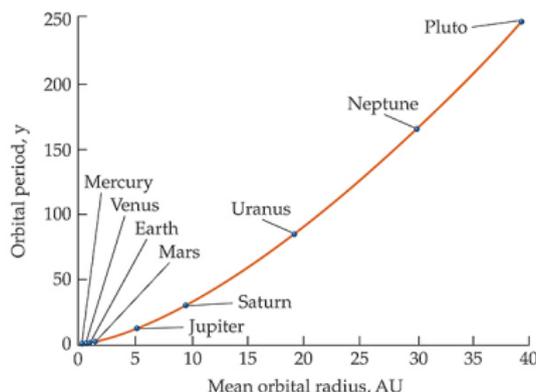


Leis de Kepler

3ª lei

O quadrado do período de qualquer planeta é proporcional ao cubo do semi-eixo maior de sua órbita:

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



Terceira lei de Kepler aplicada ao Sistema Solar.



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:

$$\left(\frac{P_J}{P_T}\right)^2 = \left(\frac{a_J}{a_T}\right)^3$$



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:

$$\left(\frac{P_J}{P_T}\right)^2 = \left(\frac{a_J}{a_T}\right)^3 \rightarrow \left(\frac{P_J}{1}\right)^2 = \left(\frac{5.20}{1}\right)^3$$



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:

$$\left(\frac{P_J}{P_T}\right)^2 = \left(\frac{a_J}{a_T}\right)^3 \rightarrow \left(\frac{P_J}{1}\right)^2 = \left(\frac{5.20}{1}\right)^3 \rightarrow P_J = \sqrt{5.20^3}$$



Período de Júpiter

Exercício 3.1

O semi-eixo maior de Júpiter é 5.20 UA. Qual é o período da órbita de Júpiter em torno do Sol?

- ▶ 1 Unidade Astronômica (UA) é a distância média da Terra ao Sol.
- ▶ A órbita da Terra é praticamente circular, então podemos assumir que $a_T = 1$ UA.
- ▶ O período da órbita da Terra em torno do Sol é 1 ano ($P_T = 1$ ano).
- ▶ Assim, aplicamos a 3ª lei de Kepler:

$$\left(\frac{P_J}{P_T}\right)^2 = \left(\frac{a_J}{a_T}\right)^3 \rightarrow \left(\frac{P_J}{1}\right)^2 = \left(\frac{5.20}{1}\right)^3 \rightarrow P_J = \sqrt{5.20^3}$$

$$\therefore P_J = 11.86 \text{ anos}$$



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

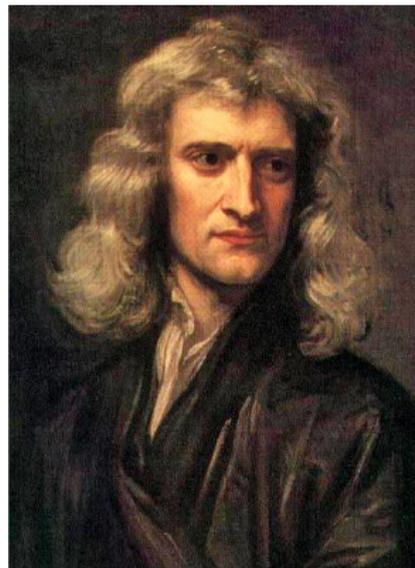
Nova gravitação

Bibliografia



Isaac Newton

- ▶ 25/12/1642 – 20/03/1727
- ▶ Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)
 - ▶ Livro mais importante da história da ciência
 - ▶ Base de toda mecânica dos próximos 200 anos!
 - ▶ Leis da mecânica
 - ▶ Leis da gravitação
 - ▶ Dedução das leis de Kepler



Retrato de Isaac Newton em 1689 (46 anos) por Godfrey Kneller.



Isaac Newton



“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton, carta a Robert Hooke – 5/2/1676



Leis da Mecânica

1ª Lei

Um corpo em repouso permanece em repouso *a não ser* que uma força externa atue sobre ele. Um corpo em movimento continua em movimento com velocidade constante e em linha reta *a não ser* que uma força externa atue sobre ele.



Leis da Mecânica

1ª Lei

Um corpo em repouso permanece em repouso *a não ser* que uma força externa atue sobre ele. Um corpo em movimento continua em movimento com velocidade constante e em linha reta *a não ser* que uma força externa atue sobre ele.

2ª Lei

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$



Leis da Mecânica

1ª Lei

Um corpo em repouso permanece em repouso *a não ser* que uma força externa atue sobre ele. Um corpo em movimento continua em movimento com velocidade constante e em linha reta *a não ser* que uma força externa atue sobre ele.

2ª Lei

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

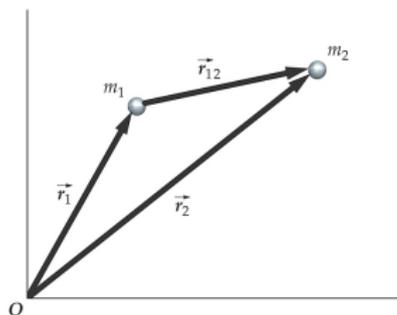
3ª Lei

Quando dois corpos interagem entre si, a força \vec{F}_{BA} exercida pelo corpo B sobre o corpo A tem a mesma magnitude e o sentido oposto ao da força \vec{F}_{AB} exercida pelo corpo A sobre o corpo B.

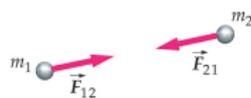


Lei da Gravitação Universal

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1m_2}{r_{12}^2}\hat{r}_{12}$$



(a)



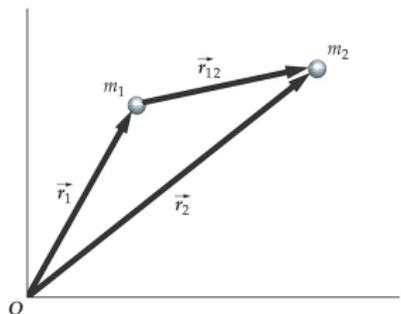
(b)

- (a) Vetores na lei da Gravitação.
(b) As partículas exercem forças iguais e opostas.



Lei da Gravitação Universal

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}$$



(a)



(b)

- (a) Vetores na lei da Gravitação.
(b) As partículas exercem forças iguais e opostas.

Lei UNIVERSAL



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$



Estação Espacial
Internacional.



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$
Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então
podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

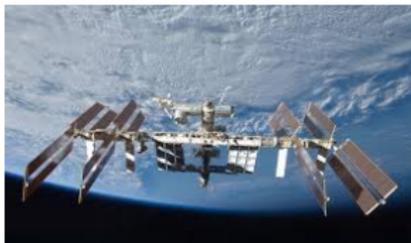
Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$
Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então
podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.
Usando a lei da gravitação,



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$
Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então
podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.
Usando a lei da gravitação,

$$F_g = \frac{GmM}{r^2} = mg \rightarrow g = \frac{GM}{r^2}$$



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$

Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.

Usando a lei da gravitação,

$$F_g = \frac{GmM}{r^2} = mg \rightarrow g = \frac{GM}{r^2}$$

Substituindo os valores, $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg, $r = R_T + h = 6371 + 400$ km, temos:



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$

Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.

Usando a lei da gravitação,

$$F_g = \frac{GmM}{r^2} = mg \rightarrow g = \frac{GM}{r^2}$$

Substituindo os valores, $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg, $r = R_T + h = 6371 + 400$ km, temos:

$$\therefore g = 8.7 \text{ m/s}^2$$



Imponderabilidade

Exercício 3.2

Qual é a aceleração da gravidade na altura da órbita da Estação Espacial Internacional?



Estação Espacial
Internacional.

Pela 2ª lei de Newton, $\vec{F} = m\vec{a}$
Se a força \vec{F} é a força da gravidade, então
podemos escrever $\vec{F}_g = m\vec{g}$.
Usando a lei da gravitação,

$$F_g = \frac{GmM}{r^2} = mg \rightarrow g = \frac{GM}{r^2}$$

Substituindo os valores, $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg,
 $r = R_T + h = 6371 + 400$ km, temos:

$$\therefore g = 8.7 \text{ m/s}^2$$

que é só 11% menor do que a aceleração na
superfície da Terra!



Massa inercial e gravitacional

- ▶ Duas leis diferentes:
 - ▶ $\vec{F} = m\vec{a}$
 - ▶ $\vec{F}_G = Gm_1m_2\hat{r}/r^2$
- ▶ Duas massas distintas: inercial e gravitacional
- ▶ Queda livre, $F = F_G$ e $g = Gm_T/R_T^2$
- ▶ $ma = gm_g$
- ▶ m = massa inercial e m_g = massa gravitacional
- ▶ Experimento de Galileu:
 - ▶ $a = gm_g/m$
 - ▶ Corpos diferentes de massas iguais caem juntos?



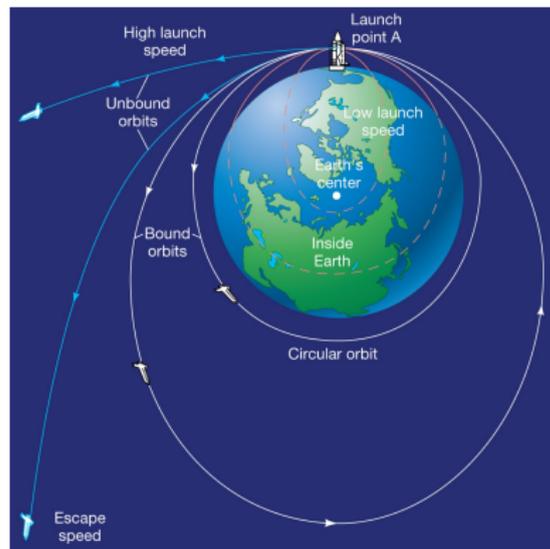
Torre de Pisa



Velocidade de escape

Velocidade mínima para escapar da atração gravitacional de um corpo:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$



Órbitas possíveis



Velocidade de escape

Algumas velocidades de escape:

Local	Vel. (km/s)
Sol	617.5
Terra	11.2
Lua	2.4
Marte	5.0
Via Láctea	594
Buraco Negro	> vel luz



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

Nova gravitação

Bibliografia



Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Anéis de Saturno
- ▶ Precessão

Em todo universo!



Maré



Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Anéis de Saturno
- ▶ Precessão

Em todo universo!



Face fixa da Lua

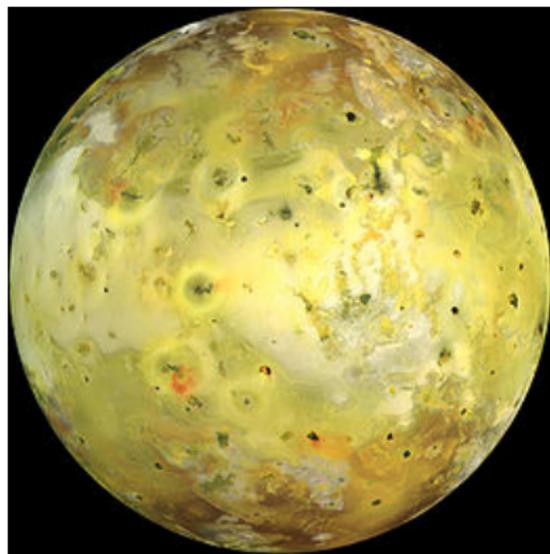


Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Aneis de Saturno
- ▶ Precessão

Em todo universo!



Io, lua de Júpiter



Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Anéis de Saturno
- ▶ Precessão

Em todo universo!



Comet Shoemaker-Levy 9

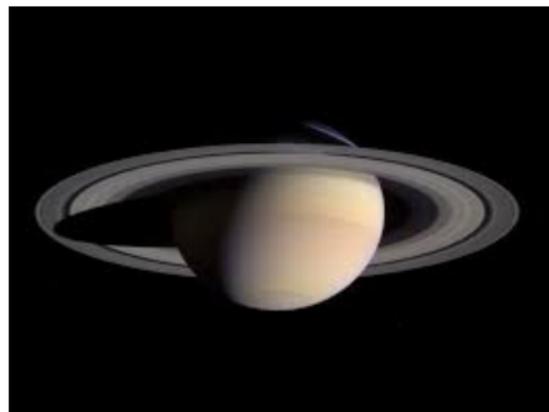


Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Anéis de Saturno
- ▶ Precessão

Em todo universo!



Saturno com seus anéis

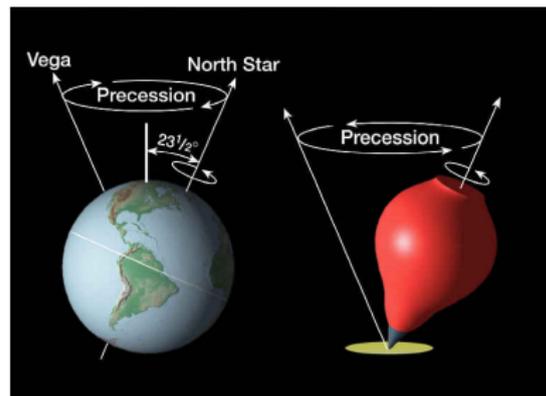


Forças de maré

Efeito importante!

- ▶ Marés na Terra
- ▶ Face fixa da Lua
- ▶ Vulcões em Io (Júpiter)
- ▶ Quebra de cometas
- ▶ Anéis de Saturno
- ▶ Precessão

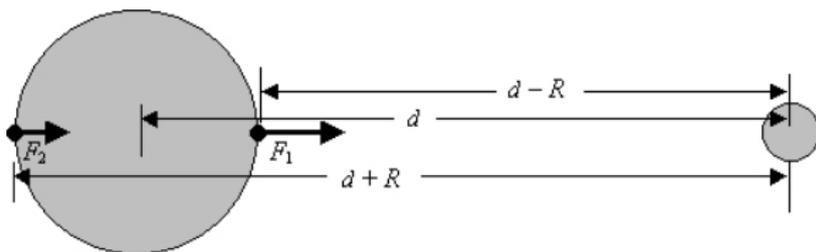
Em todo universo!



Precessão do eixo da Terra



Forças de maré



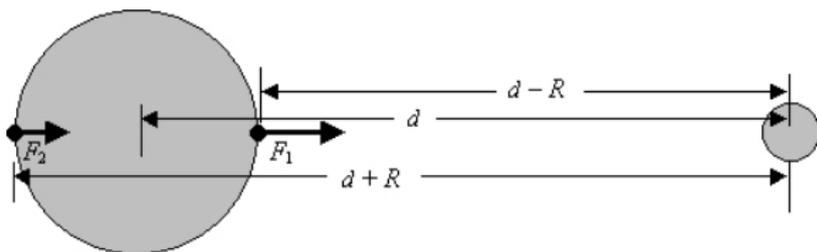
Efeito de maré: **Forças Diferenciais.**

Temos

$$F_1 = \frac{GMm}{(d - R)^2} \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{GMm}{(d + R)^2}$$



Forças de maré



Efeito de maré: **Forças Diferenciais.**

Temos

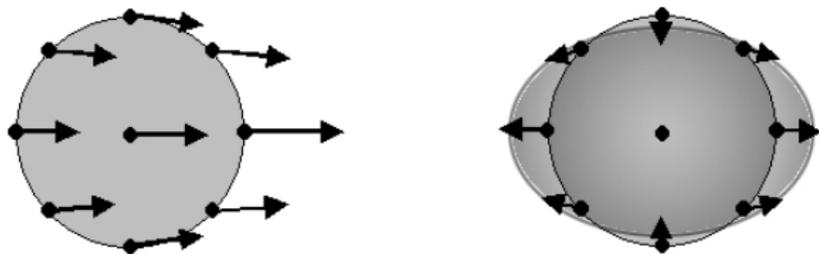
$$F_1 = \frac{GMm}{(d - R)^2} \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{GMm}{(d + R)^2}$$

então,

$$\Delta F = F_2 - F_1 = \frac{GMm}{d^2} \left[\left(1 + \frac{R}{d}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{R}{d}\right)^{-2} \right] \approx -\frac{4GMmR}{d^3}$$



Forças de maré



(a) Forças relativas à Lua. (b) Forças relativas ao centro da Terra.

$$\Delta F = \frac{4GMmR}{d^3}$$



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

Nova gravitação

Bibliografia



Limite de Roche

O limite de Roche é a distância mínima do centro do planeta que um satélite pode chegar sem se tornar instável frente a rompimento por maré.



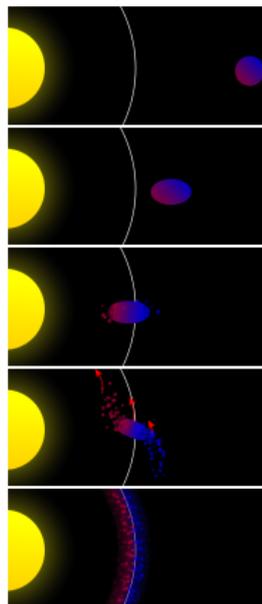
Édouard Roche, 17/10/1820 –
27/04/1883.



Limite de Roche

$$d = C \sqrt[3]{\frac{\rho_p}{\rho_s}} R_s$$

A distância mínima (d) depende da densidade do Planeta (ρ_p) e do satélite (ρ_s), do raio do satélite (R_s) e da constante de Roche, que varia com o tipo de corpo ($C = 2.44$ para satélites líquidos e $C = 1.38$ para satélites rochosos).



Satélite destruído por forças de maré quando ultrapassa o limite de Roche.



Limite de Roche para a Lua

Exercício 3.3

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?



Limite de Roche para a Lua

Exercício 3.3

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?

Considerando:

- ▶ $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg
- ▶ $R_T = 6370$ km
- ▶ $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ kg
- ▶ $R_L = 1738$ km



Limite de Roche para a Lua

Exercício 3.3

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?

Considerando:

- ▶ $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg
- ▶ $R_T = 6370$ km
- ▶ $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ kg
- ▶ $R_L = 1738$ km

Temos

- ▶ $\rho_T = \frac{M_T}{\frac{4}{3}\pi R_T^3} = 5514$ kg/m³
- ▶ $\rho_L = \frac{M_L}{\frac{4}{3}\pi R_L^3} = 3342$ kg/m³



Limite de Roche para a Lua

Exercício 3.3

Qual a menor distância que a Lua pode chegar da Terra sem se romper?

Considerando:

- ▶ $M_T = 5.97 \times 10^{24}$ kg
- ▶ $R_T = 6370$ km
- ▶ $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ kg
- ▶ $R_L = 1738$ km

Temos

- ▶ $\rho_T = \frac{M_T}{\frac{4}{3}\pi R_T^3} = 5514$ kg/m³
- ▶ $\rho_L = \frac{M_L}{\frac{4}{3}\pi R_L^3} = 3342$ kg/m³

e assim

$$d = 1.38 \times \sqrt[3]{\frac{5514}{3342}} \times 1738 = 2834 \text{ km}$$

que é cerca de 135 vezes menor do que a distância média da Lua à Terra.



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

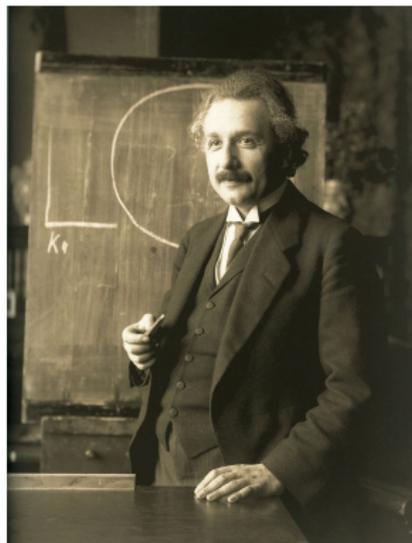
Nova gravitação

Bibliografia



Albert Einstein

- ▶ 14/03/1879 – 18/04/1955
- ▶ Escritório de Patentes
- ▶ 1905 – Annus Mirabilis (26 anos).
 - ▶ Efeito fotoelétrico
 - ▶ Relatividade especial
 - ▶ Movimento browniano
- ▶ 1907-1915 – Relatividade Geral
- ▶ Muitos outros trabalhos:
 - ▶ Cosmologia
 - ▶ Mecânica Quântica
 - ▶ Mecânica Estatística
 - ▶ Termodinâmica
 - ▶ Colaborações com todos os grandes nomes da física do séc. XX



Albert Einstein em 1921
(42 anos), quando recebeu o
Prêmio Nobel.



Relatividade Especial

- ▶ Crise na Física: Eletromagnetismo \times Mecânica
 - ▶ Em que meio a luz se move?
 - ▶ E: nenhum (éter); M: material
 - ▶ A velocidade depende do Referencial?
 - ▶ E: não; M: sim



O estudo da natureza e comportamento da luz causaram uma revolução da Física do séc. XX.



Postulados da Relatividade Especial

Princípio da Relatividade

As leis da física são iguais em todos os sistemas de referência inerciais.



Postulados da Relatividade Especial

Princípio da Relatividade

As leis da física são iguais em todos os sistemas de referência inerciais.

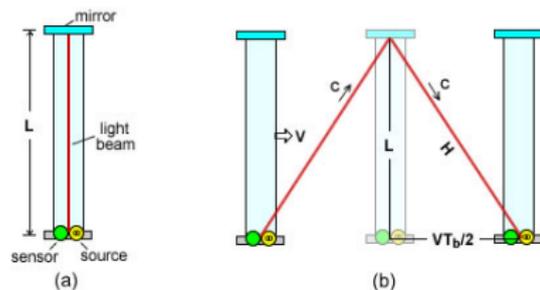
Constância da velocidade da luz

A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os referenciais inerciais, independentemente da velocidade do observador ou da velocidade da fonte emitindo a luz.



Dilatação do tempo

Sabemos que, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.



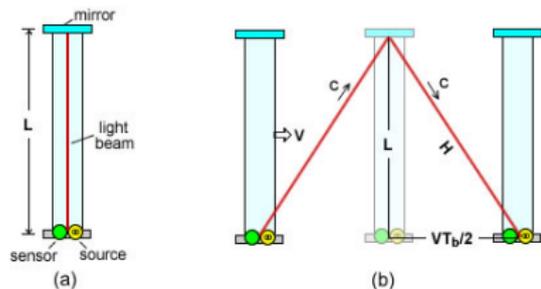
Medida do tempo de percurso da luz.



Dilatação do tempo

Sabemos que, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.
então,

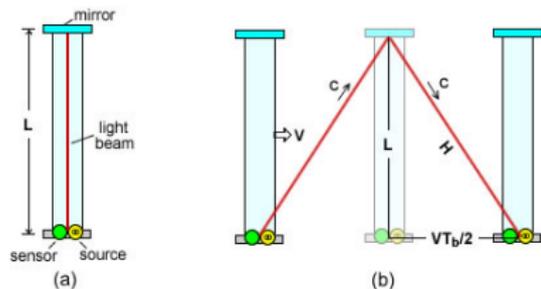
$$c = \frac{2L}{T_a} \quad c = \frac{2\sqrt{L^2 + (vT_b/2)^2}}{T_b}$$



Medida do tempo de percurso da luz.



Dilatação do tempo



Medida do tempo de percurso da luz.

Sabemos que, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.
então,

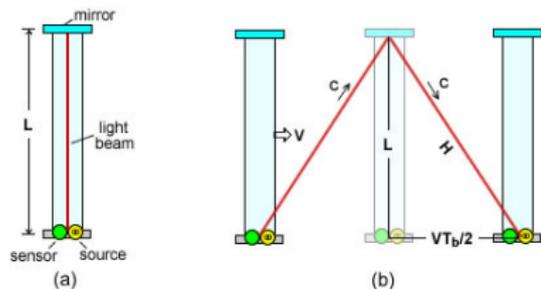
$$c = \frac{2L}{T_a} \quad c = \frac{2\sqrt{L^2 + (vT_b/2)^2}}{T_b}$$

Igualando as duas equações
(a velocidade da luz é constante!),

$$\frac{2L}{T_a} = \frac{2\sqrt{L^2 + (vT_b/2)^2}}{T_b}$$



Dilatação do tempo



Medida do tempo de percurso da luz.

Sabemos que, $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$.
então,

$$c = \frac{2L}{T_a} \quad c = \frac{2\sqrt{L^2 + (vT_b/2)^2}}{T_b}$$

Igualando as duas equações
(a velocidade da luz é constante!),

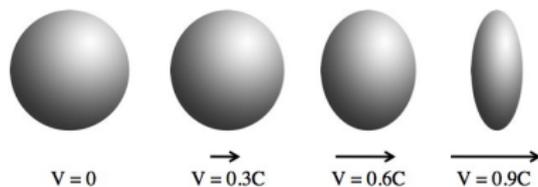
$$\frac{2L}{T_a} = \frac{2\sqrt{L^2 + (vT_b/2)^2}}{T_b}$$

obtemos T_b :

$$T_b = \frac{T_a}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



Contração do espaço

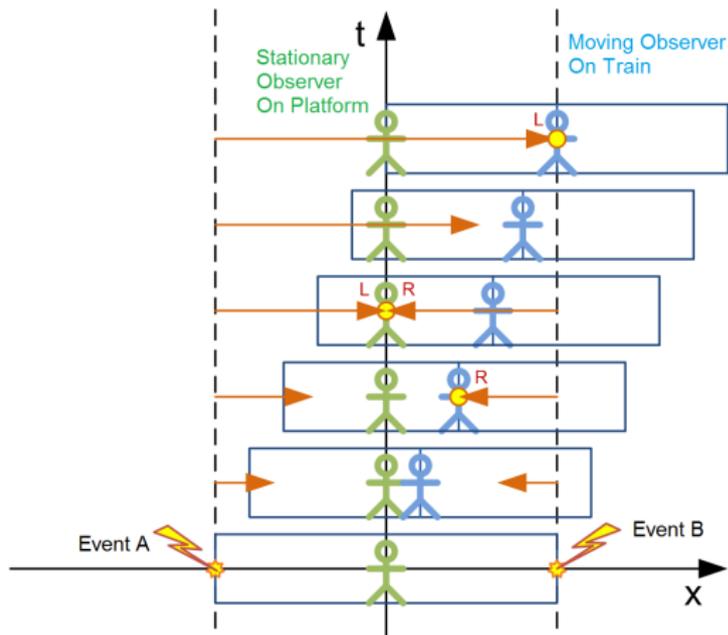


Encolhimento devido à velocidade.

$$L = L_0 \sqrt{1 - (v/c)^2}$$



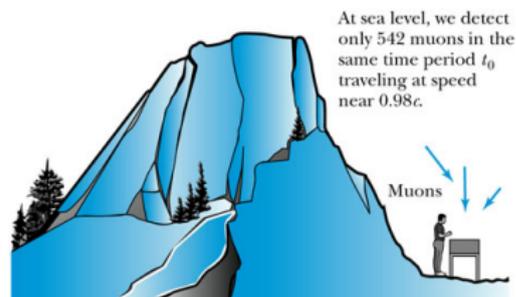
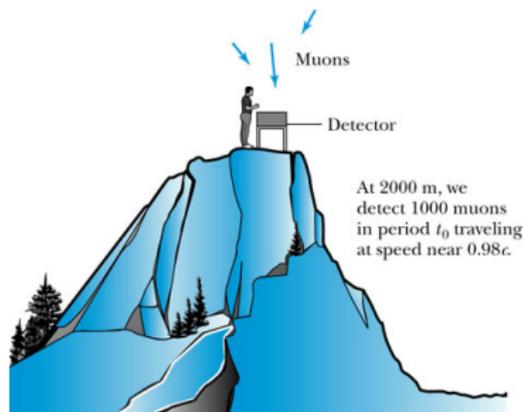
Simultaneidade



Eventos simultâneos num referencial podem não ser simultâneos em outro.



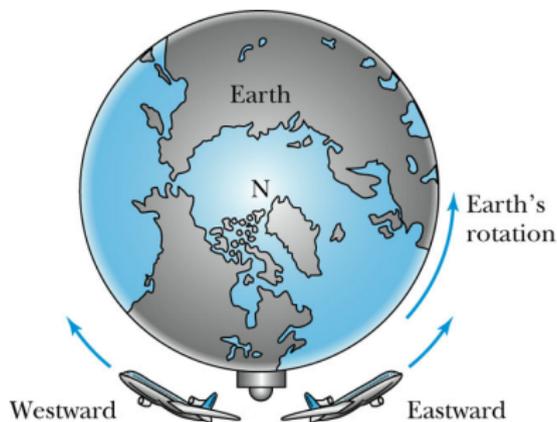
Verificação experimental



Sem considerações relativísticas, múons criados na atmosfera e descendo com uma velocidade de $0.98c$ percorreriam apenas ao redor de 600 m antes de decair com um tempo de vida médio de $2.2 \mu s$. Assim, um número muito pequeno de múons alcançaria a superfície da Terra. Com considerações relativísticas, o tempo de vida do múon é dilatado de acordo com um observador na Terra. Como resultado disso, de acordo com esse observador, o múon pode percorrer cerca de 5000 m antes de decair. Isso resulta em muitos múons chegando à superfície.



Verificação experimental

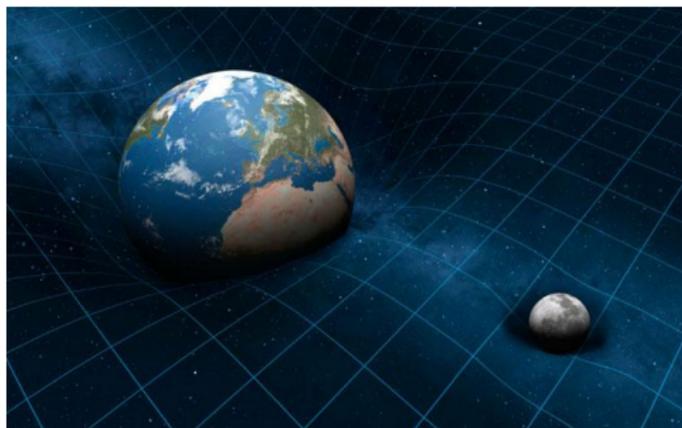


Dois aviões decolaram (em tempos diferentes) de Washington, onde fica o Observatório Naval dos EUA. Os aviões viajaram para o leste e o oeste em volta da Terra (rotação). Relógios atômicos a bordo dos aviões foram comparados com relógios similares que ficaram no Observatório para mostrar que relógios os em movimento nos aviões andaram mais devagar.



Relatividade Geral

- ▶ Relatividade Especial não trata de referenciais acelerados.
- ▶ O problema da massa inercial e gravitacional continuava em aberto.



A Relatividade Geral relacionou os efeitos de gravidade com a forma do espaço.



Postulado da Relatividade Geral

Princípio da equivalência

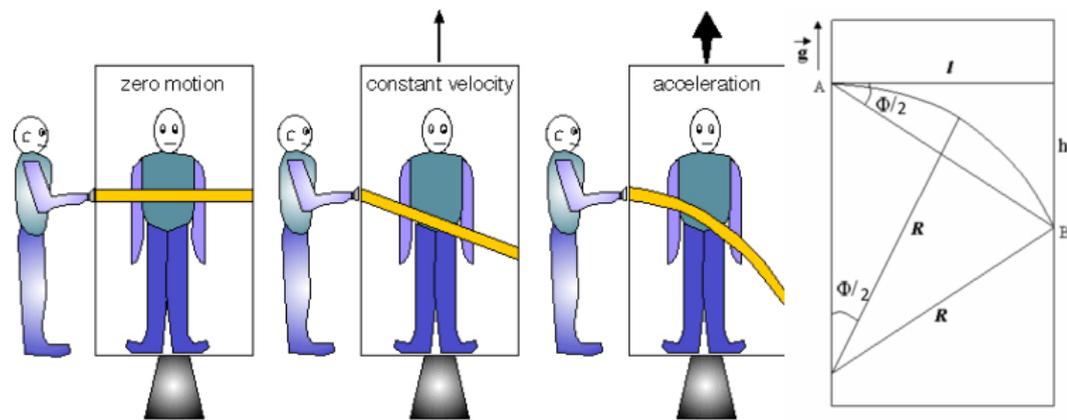
Um campo gravitacional é equivalente a um sistema de referência acelerado na ausência de efeitos gravitacionais.



Um observador dentro de um elevador não sabe se o elevador está parado sobre a Terra ou então acelerando para cima com $a = g$.



Curvatura da luz

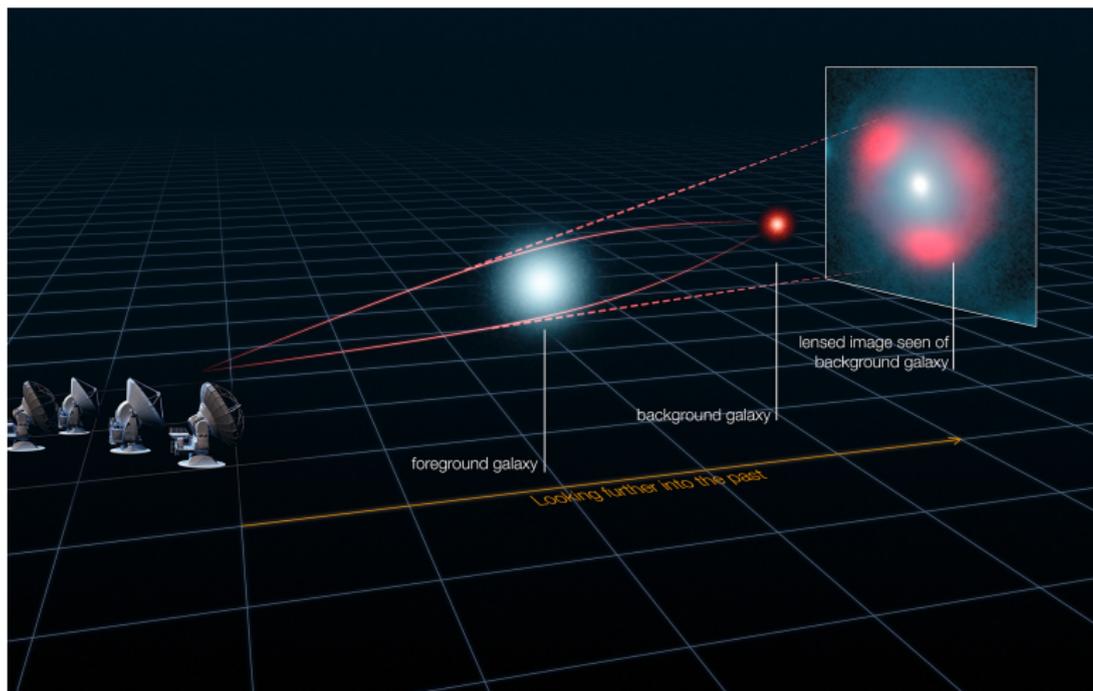


A luz se curva na presença de um campo gravitacional.

$$R \approx \frac{c^2}{g}$$



Verificação experimental



Lentes gravitacionais só são explicadas pela Relatividade Geral. Atualmente este efeito é usado para muitas medidas em Astrofísica, até mesmo para descobrir novos exoplanetas.



Verificação experimental

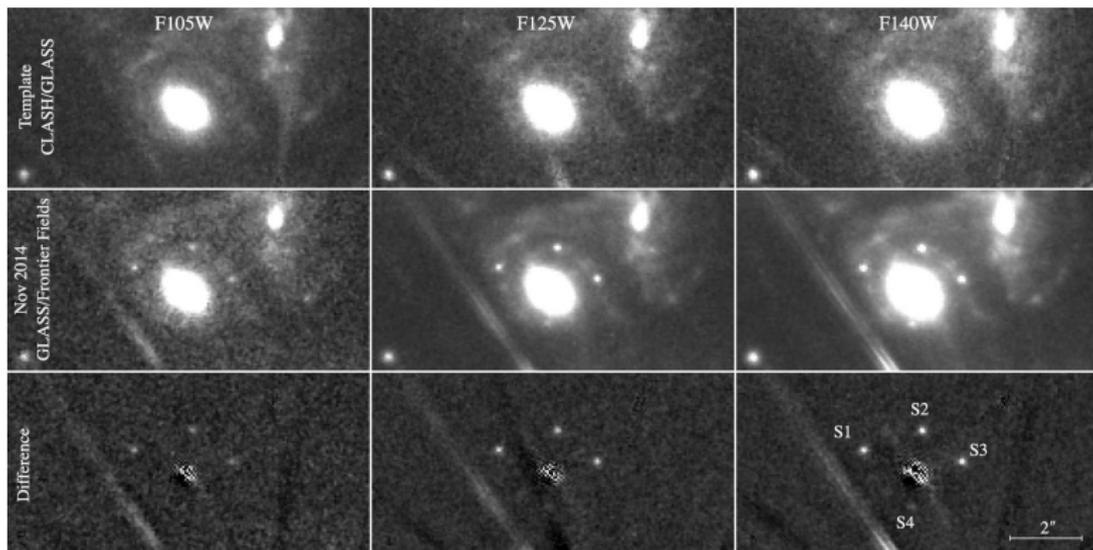
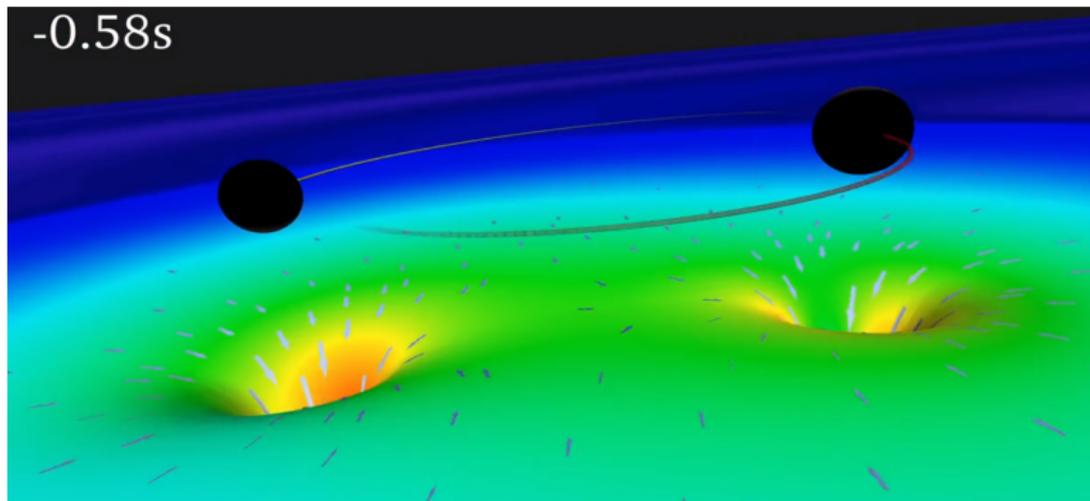


Figura do artigo de Kelly et al, publicado na Science em 6/3/2015. As imagens do telescópio espacial Hubble, com três diferentes filtros, mostram o aparecimento simultâneo de 4 imagens da mesma supernova. Entre a supernova e a Terra havia uma galáxia, que curvou a luz, conforme previsto pela Relatividade Geral. Pelas propriedades da imagem é possível estudar a galáxia que curvou a luz, agindo como lente.



Ondas gravitacionais



Vídeo: detecção de ondas gravitacionais.



LIGO: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

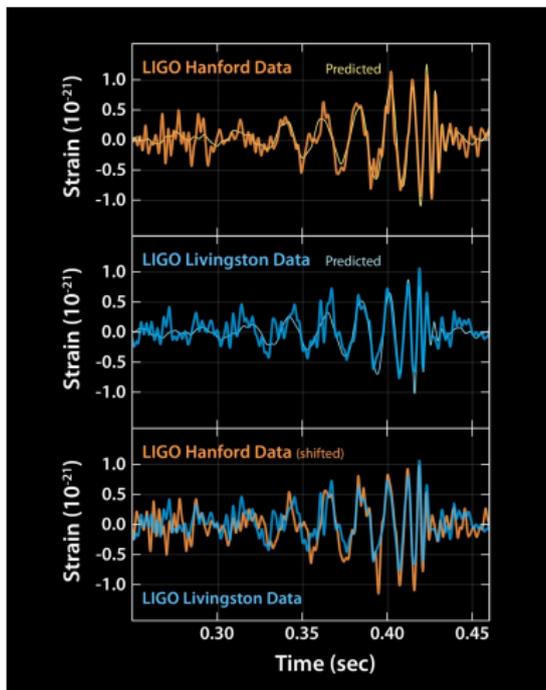


Observatório LIGO de Livingston.



O LIGO é composto de dois observatórios.





Detecção do LIGO em 11/02/2016.



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

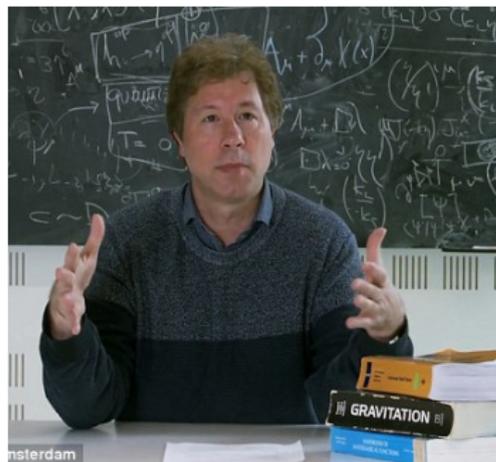
Nova gravitação

Bibliografia



Alguns “problemas” da Teoria de Einstein parecem indicar a necessidade de uma nova teoria:

- ▶ Não quântica
- ▶ Matéria escura
- ▶ Energia escura



Erik Verlinde (Holanda 21-01-1962), propôs uma nova teoria da gravitação. Em dezembro de 2016 um grupo confirmou uma previsão dela para a curvatura da luz em torno de mais de 33 mil galáxias, sem a necessidade de usar Matéria Escura.



Índice

Leis de Kepler

Lei da gravitação de Newton

Força de maré

Limite de Roche

Conceitos de Relatividade

Nova gravitação

Bibliografia



Fontes para estudo

- ▶ Várias seções em <http://astro.if.ufrgs.br/>
- ▶ Física, Paul Tipler & Gene Mosca, Volume 2, Capítulos R e 11



REALIZAÇÃO

