



Universidade Federal do ABC

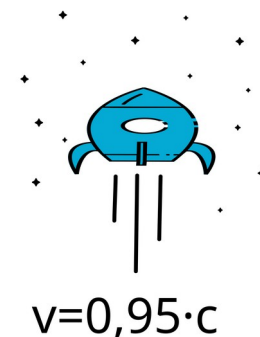
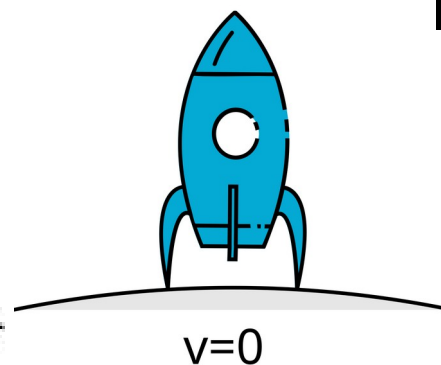
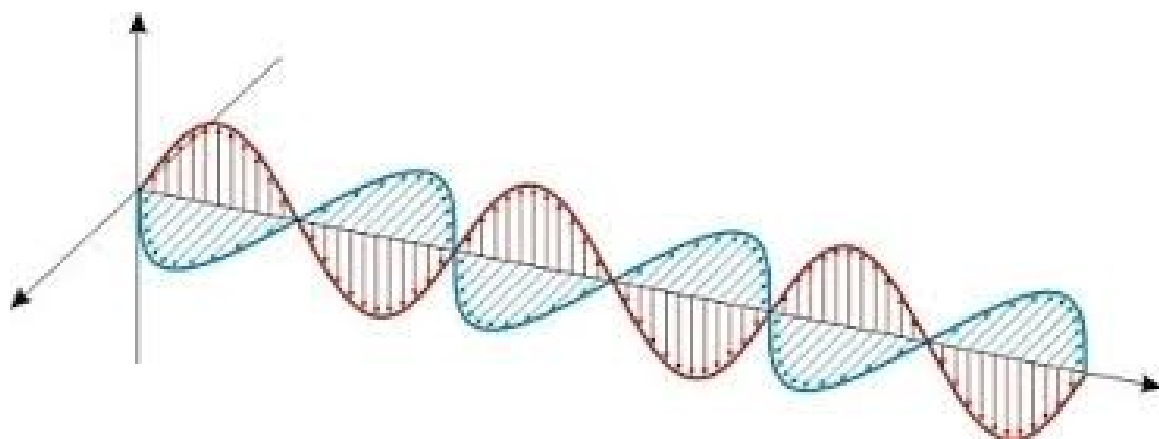
Ótica e Relatividade

19. Breve Noções de Relatividade Geral

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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

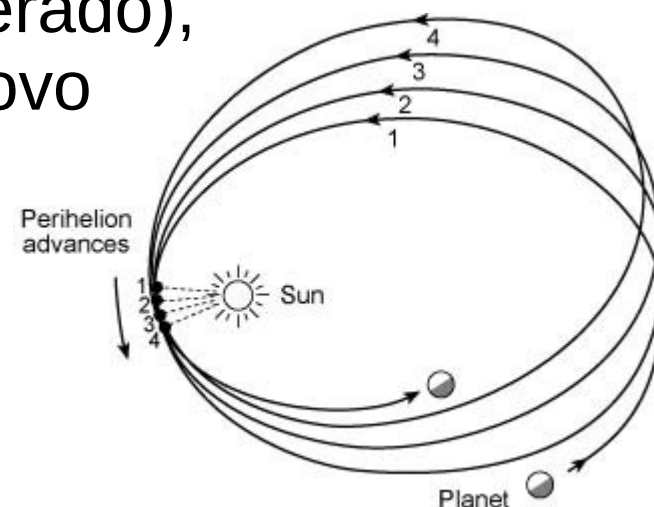
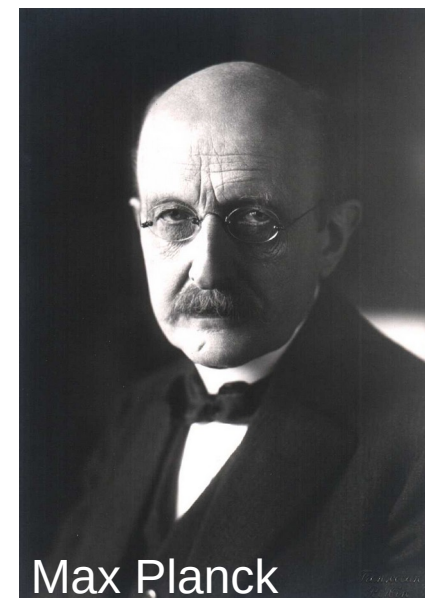


Relatividade

Em 1874, um dos professores de Max Planck, Philip Jolly, desaconselhou o aluno dele de estudar física, por que "não tinha mais nada para ser descoberto".

Só tinha alguns detalhes ainda não explicadas, como a **fonte de energia** do **Sol**, e a **precessão do periélio** da **órbita de Mercúrio** (43"/século a mais do que esperado), problemas, cuja resolução levou a um novo ramo da física, a **Teoria da Relatividade** de Einstein.

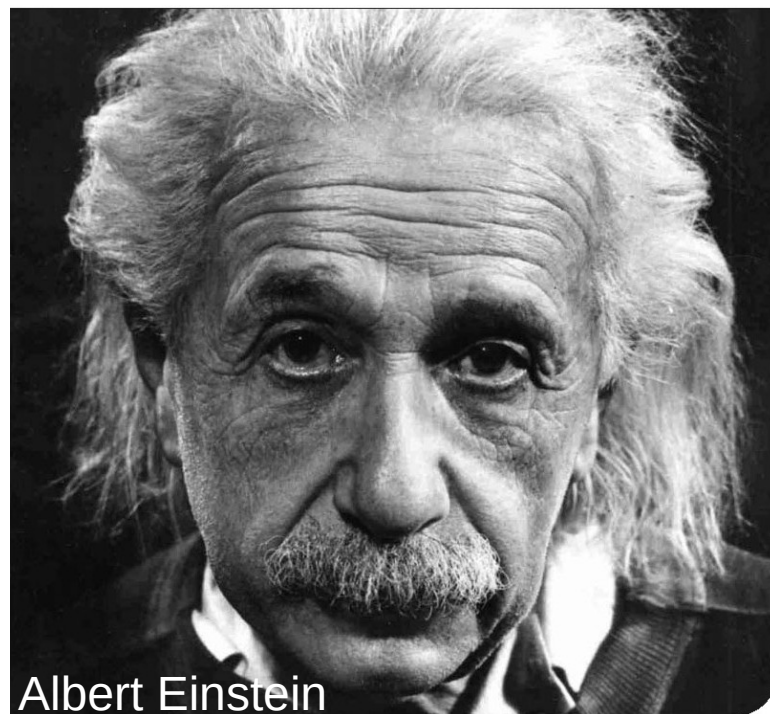
O próprio Max Planck acabou se tornando um dos fundadores da mecânica quântica.



Relatividade

A **Teoria da Relatividade** foi desenvolvida por **Albert Einstein** de 1905 (Relatividade **Restrita** => aulas 12 a 18) a 1915 (Relatividade **Geral** => esta aula).

Ela afirma que as **propriedades** (geometria, eixo do tempo) de **espaço** e **tempo** dependem da situação do **observador**, do seu **estado** de **movimento** (velocidade, aceleração), e a sua **posição** em relação a **massas altas/densas**.



Albert Einstein

Relatividade Geral

A **aceleração** $\mathbf{a}$ de uma partícula/um corpo num **campo gravitacional** $\mathbf{g}$ **independe** da sua **massa**, devido ao fato, que a suas **massas gravitacional** e **inercial** são as **mesmas** ($m_i = m_g =: m$):

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m = m\mathbf{g}/m = \mathbf{g}$$

Se m_i e m_g fossem diferentes, a aceleração gravitacional dependeria da razão entre as duas massas:

$$\mathbf{a} = \mathbf{F}/m_i = m_g\mathbf{g}/m_i = (m_g/m_i) \cdot \mathbf{g}$$

A **independência** da **massa** é algo típico para **forças de inércia**, ou **pseudo-forças** (como, por exemplo, a "força" centrífuga).

Será que a **gravitação** é uma **pseudo-força**, ou seja, um **efeito de referencial acelerado** (não-inercial)?

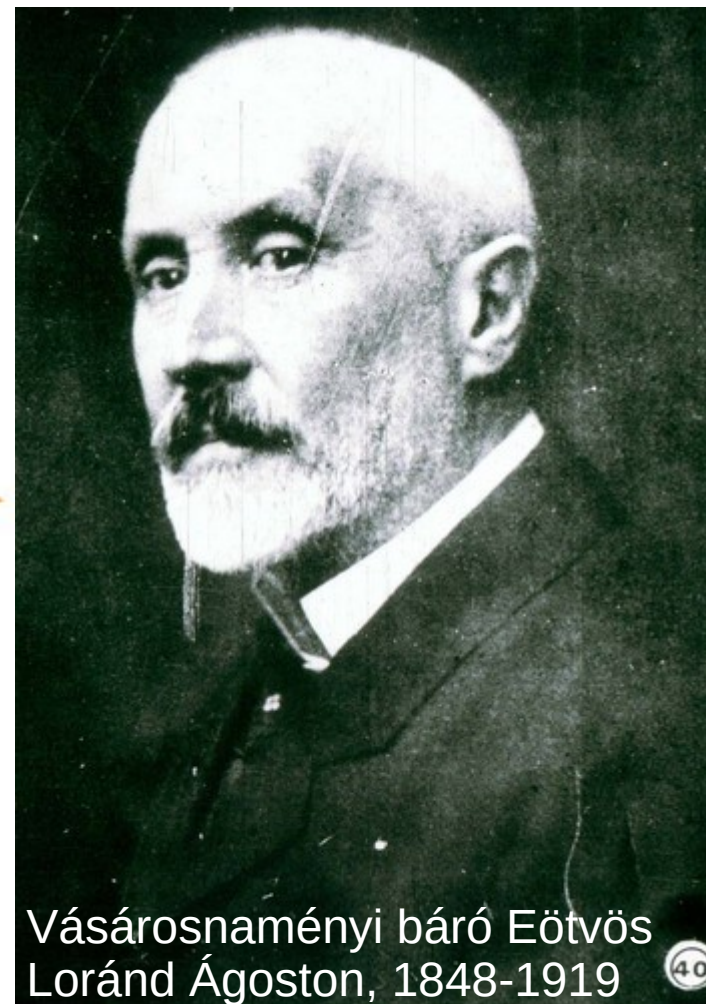
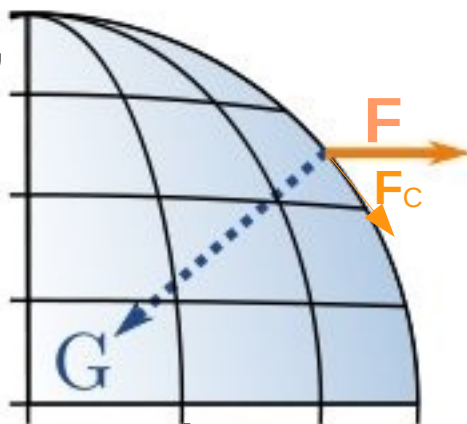
Relatividade Geral

Eötvös (1899)

As massas gravitacional e inercial realmente são iguais?

A **força** de **Coriolis** F_c , que é a componente horizontal da "força centrífuga" F , é uma **força de inércia** (prop. m_i), enquanto a gravitação G é proporcional a m_g .

=> A **razão** entre as duas forças deveria ser sempre **igual** numa dada **posição** (latitude) na Terra.



Vásárosnaményi báró Eötvös
Loránd Ágoston, 1848-1919

Relatividade Geral

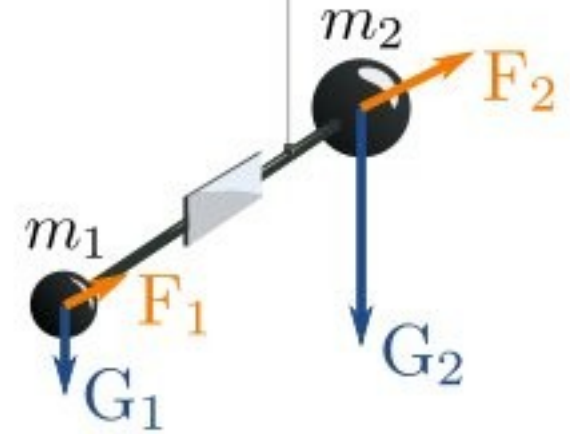
Eötvös (1899)

Dois corpos da **mesma massa gravitacional** pendurados na direção Leste-Oeste num fio de torção. Apontando um laser pro espelho dá pra medir torções muito fracas.

Se as duas **massas inerciais** também são **iguais**, as forças de Coriolis nos dois corpos deveriam ser iguais, e **não** deveria haver **torção** no fio.

=> Eötvös mediu **nenhuma torção**.

=> **$m_i = m_g$** por uma parte em 10^{11} .



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

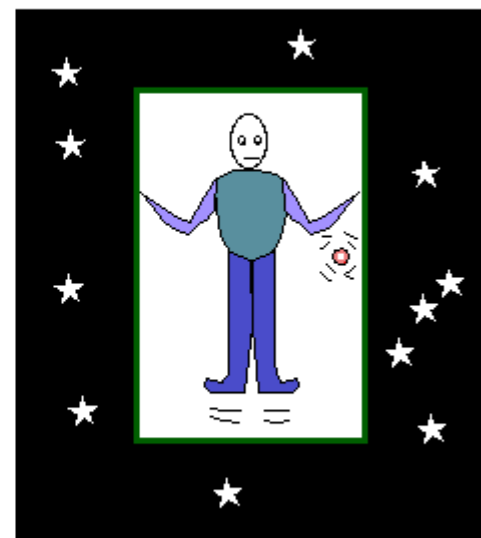
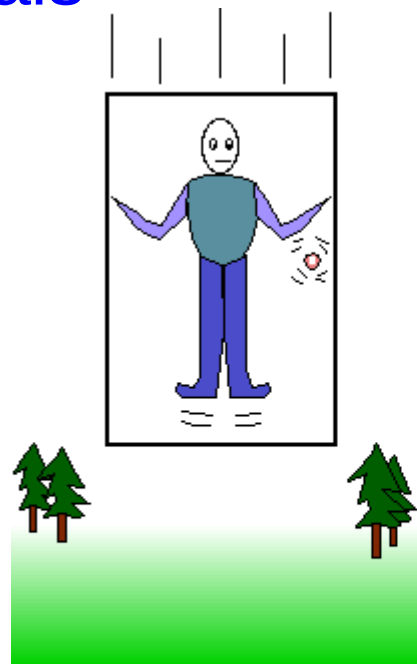
O "pensamento mais feliz" da vida de Einstein:

Uma pessoa em **queda livre** não sente seu **próprio peso**.

Para uma pessoa num elevador em queda livre é como se o elevador estivesse flutuando no espaço.

=> As duas situações são a mesma!

Um **referencial acelerado** junto com o **campo gravitacional** se comporta como (na verdade, é!) um **referencial inercial**.

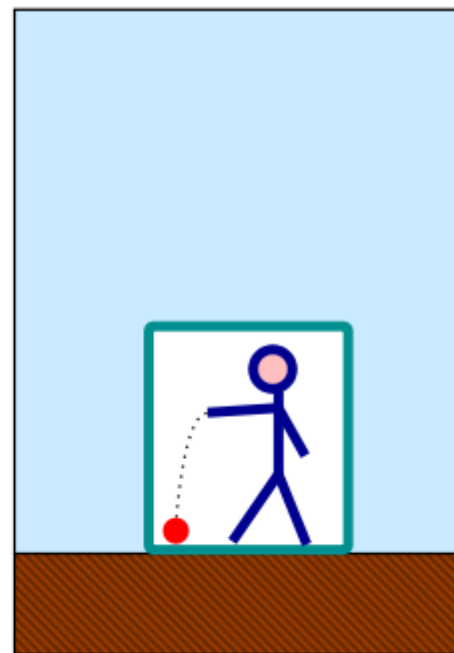
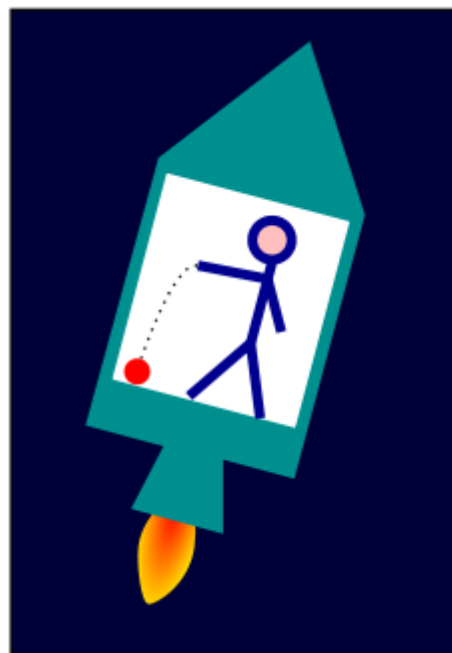


Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

Uma pessoa num foguete em **aceleração** (9.81 m/s^2 pra cima) se sente, como se ela estivesse **parada** na **Terra**.

=> Estas duas situações também são a mesma!



Referenciais acelerados e referenciais em campos gravitacionais são equivalentes.

Relatividade Geral

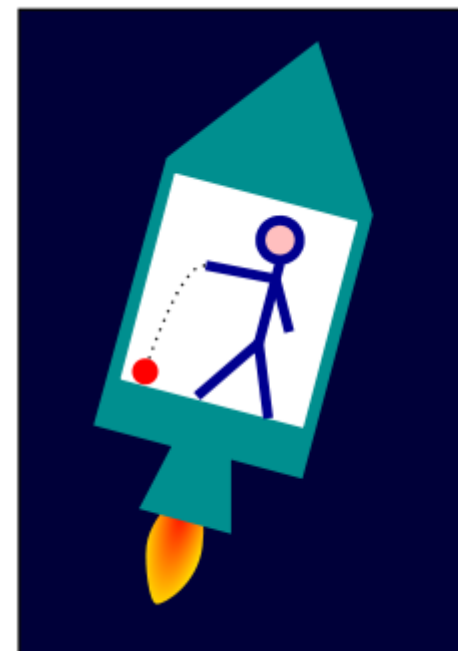
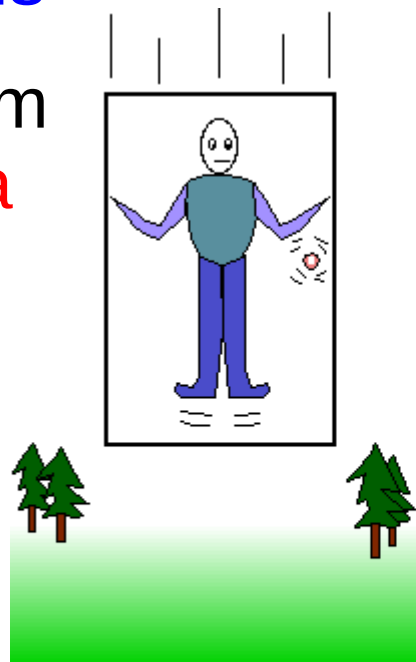
Alguns Experimentos Mentais

=> A **existência** (e valor) de um **campo gravitacional** é **relativa** e depende do **estado** de **aceleração** do **referencial**.

Nas palavras de Einstein:

"Um laboratório local, não girante, em queda livre, é equivalente, para a realização de qualquer experiência física, a um referencial inercial numa região do espaço sem gravidade" => **Princípio de Equivalência**

As leis da física válidas num laboratório local em queda livre são as leis da **Relatividade Restrita**, válidas num referencial inicial.



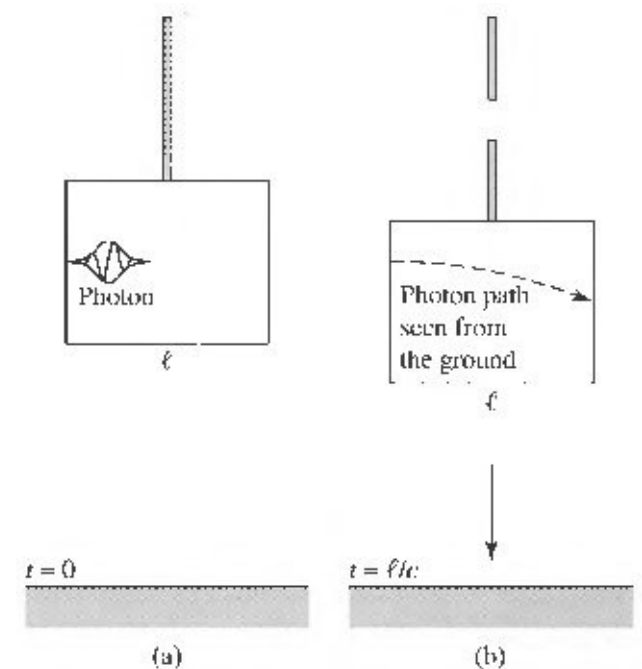
Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

Neste caso, sendo o **elevador** um **referencial inercial**, um raio de **luz** deve **cair junto** com o elevador, até se o elevador for só imaginário.

=> **luz "cai"** em **campos gravitacionais**, ou seja, o **caminho** da **luz** é **curvo** na direção da **massa** (mas a sua velocidade continua sendo c).

Só que no campo da Terra, a curvatura é quase nula, tal que em situações diárias, não percebemos nada dela.



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

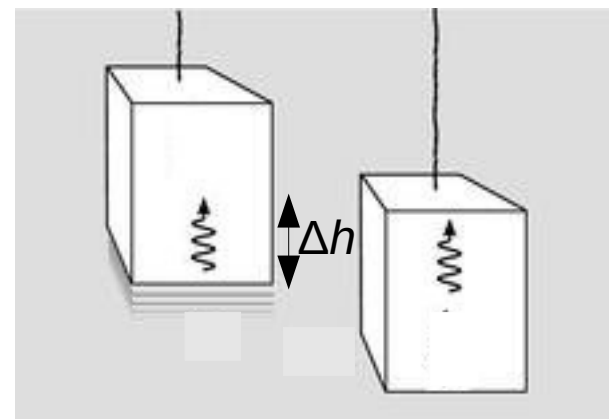
E se a luz estiver viajando na **vertical**?
Visto de **dentro** do **elevador**, a **luz mantém** sua **frequência**.

Visto de **fora** (Terra), deve ter ocorrido uma **dilatação do tempo**, resp. um **efeito Doppler**, já que o elevador tem uma **outra velocidade** na **chegada** da luz, da que ele tinha na **emissão**:

O percurso do fóton pra cima durou $\Delta t = \Delta h/c$

Neste tempo, o elevador ganhou $\Delta v = g\Delta t = g\Delta h/c$ em velocidade.

=> Mudança da frequência: $\Delta\nu/\nu_0 \approx \Delta v/c = g\Delta h/c^2$



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

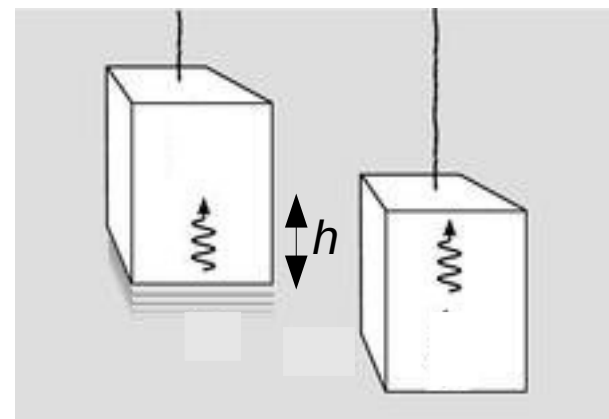
A **frequência** da luz **diminui**, ou seja, a **energia** $E = h\nu$ **diminui**, quando luz "sobe" no **potencial gravitacional** (observe que $g\Delta h$ é a diferença de potencial).

=> **redshift gravitacional**

(ou *blueshift* gravitacional, no caso de luz "descendo")

=> Um tipo de **Conservação** de **energia** para **fótons**.

Pound e Rebka conseguiram confirmar isto, de baixo e em cima de uma torre de 30 m de altura (1960).



Relatividade Geral

Probleminha com o Princípio de Equivalência

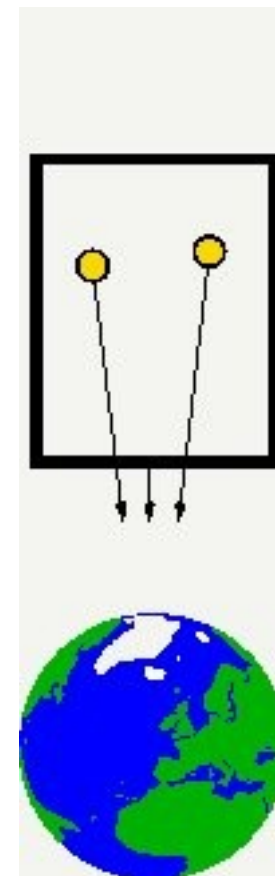
Num Elevador gigantesco, de tamanho continental, o campo gravitacional varia com a posição dentro do elevador. => **campo gravitacional não-uniforme**.

=> **Forças de Maré** (forças gravitacionais diferenciais) agem no elevador, tentando deformar/disrompê-lo.

=> Num campo gravitacional não-uniforme, o **referencial** que "cancela" a aceleração gravitacional é **diferente** em **cada ponto**.

=> Para um tratamento completo, teríamos que aplicar **geometria diferencial**.

(=> disciplinas Relatividade Geral e Cálculo Vetorial e Tensorial)



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

No **campo** de uma **estrela** de **raio** r_0 , onde a **aceleração gravitacional** **g** **não é uniforme**, temos que usar o **potencial** de uma **massa esferica**, $\Phi = -GM/r$ ($r > r_0$).

A **variação de frequência** entre a **superfície** e um ponto "**longe**": $\nu_\infty/\nu_0 = \sqrt{(1-2GM/r_0c^2)}$

e o *redshift* correspondente, chamado **redshift gravitacional**:
 $z = (\lambda_\infty - \lambda_0)/\lambda_0 = \nu_0/\nu_\infty - 1 = (1-2GM/r_0c^2)^{-1/2} - 1 \approx GM/r_0c^2$

A **frequência** da luz **diminui** (*redshift*), enquanto ela se **afasta** de uma **massa** alta.

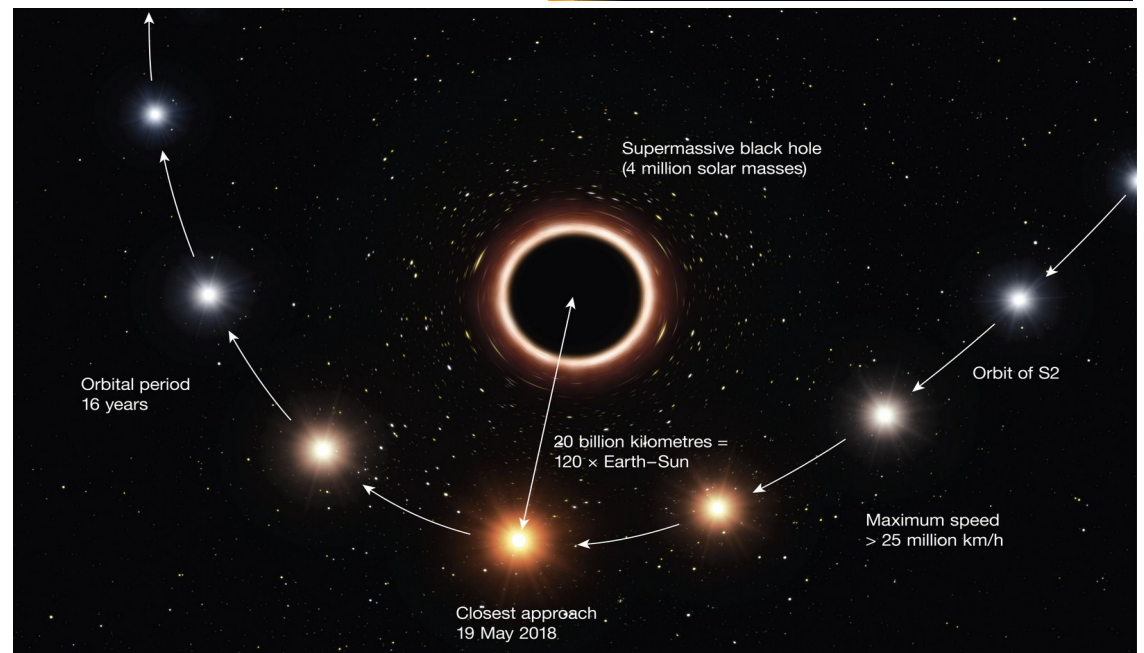
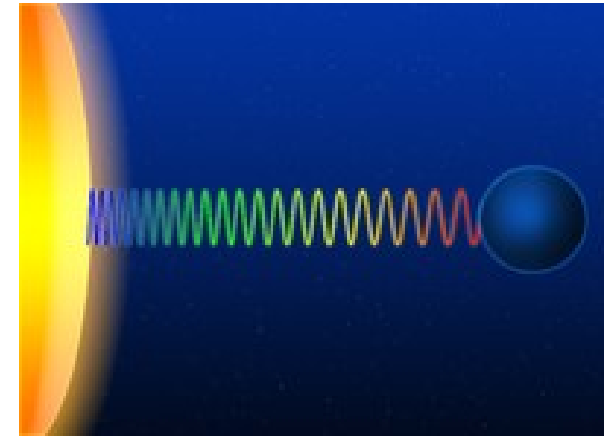
Luz **descendo** num **campo gravitacional** sofre um *blueshift* gravitacional, a **frequência aumenta**.

Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

O *redshift* gravitacional foi detectado em espectros de Anãs Brancas,

e no espectro de S2
(uma estrela que orbita o centro da Via Láctea a uma distância muito pequena),
publicado 26/07/2018.



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

Mas isto não atinge só a luz.
Qualquer processo "em baixo" sofre uma **dilatação de tempo** e ocorre **mais lentamente** para alguém "em cima".

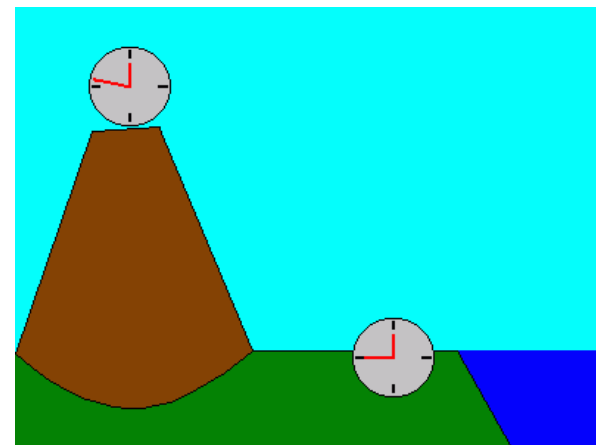
O **tempo** passa mais **rapidamente** na **altura**!

$$\Delta t_0 / \Delta t_\infty = v_\infty / v_0 = \sqrt{1 - 2GM/r_0 c^2},$$

onde Δt_0 e Δt_∞ são as durações de um dado processo na superfície (da Terra) e longe.

Para um campo fraco: $\Delta t_0 / \Delta t_\infty \approx 1 - GM/r_0 c^2$

O fato, de que o tempo passa mais lentamente perto de massas altas se chama **dilatação gravitacional do tempo**.



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

No caso da Terra, a dilatação gravitacional do tempo é minúsculo, da ordem de 1.3 segundos em 60 anos.

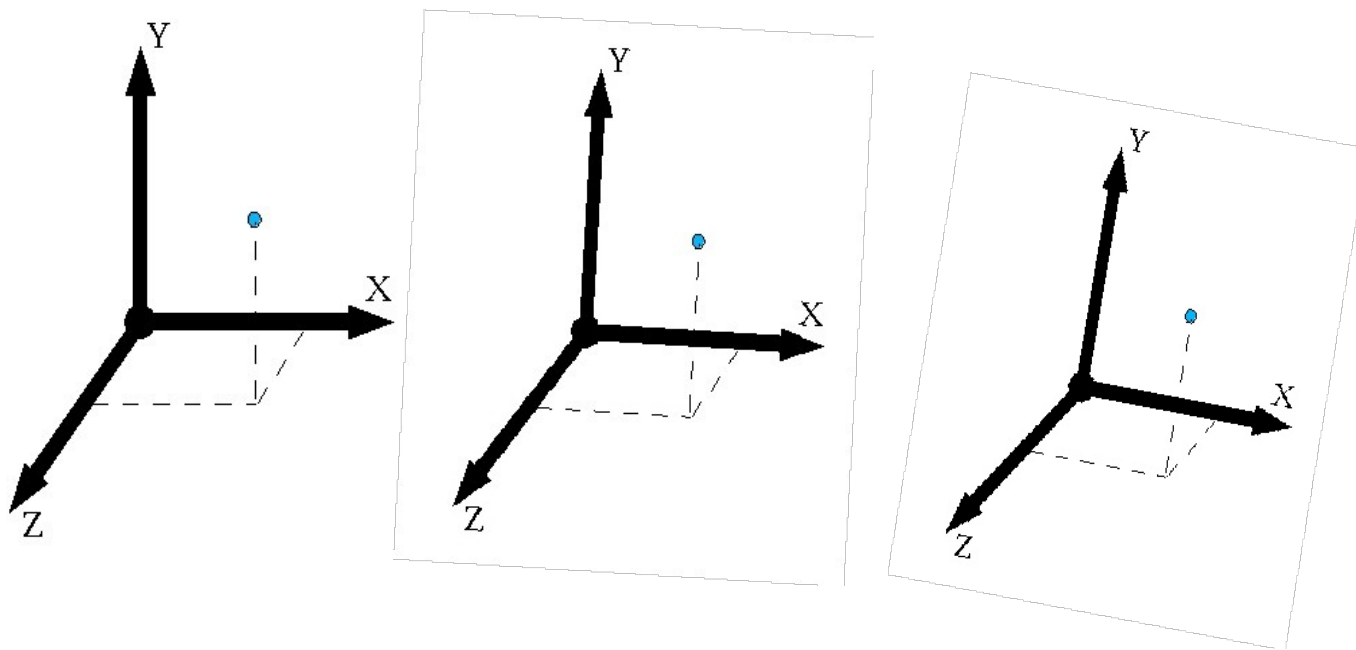
Mesmo assim, foi **confirmada** em 1976 usando relógios atômicos de alta precisão na Terra e em foguetes.

O efeito tem que ser (e é) levado em conta para manter os relógios atômicos a bordo dos satélites do **GPS** sincronizados com relógios na Terra.



Relatividade Geral

Disto tudo pode se concluir que **não existe** um **referencial global**, cada **ponto** no **espaço-tempo** tem seu próprio sistema acelerado de coordenadas.



Relatividade Geral

Se tentamos juntar todos estes sisteminhas infinitesimais de coordenadas para formar uma grade global, esta não "fecha". A grade acaba sendo curva, especialmente perto de massas grandes ou muito densas.

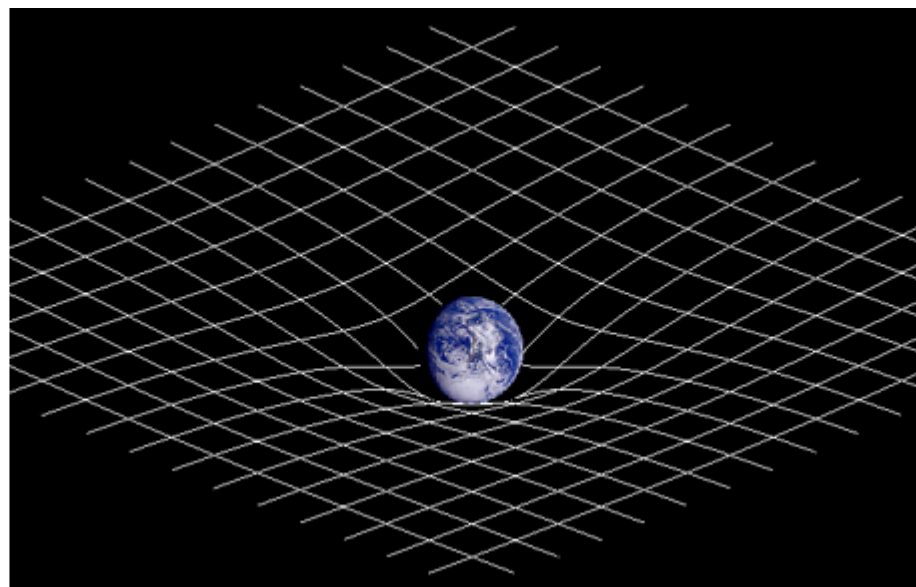
=> **Massas** altas ou muito densas **curvam** o **Espaço-Tempo**!

Equação de campo de Einstein:

$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$,
onde $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento, $G_{\mu\nu}$, o da curvatura, $R_{\mu\nu}$, o de Ricci, $g_{\mu\nu}$, a métrica e R , o escalar de Ricci.

É o análogo relativístico da equação de Poisson,

$$\Delta\Phi = \nabla^2\Phi = 4\pi G\rho.$$



Relatividade Geral

Quais as Propriedades do Espaço-Tempo curvo?

O Espaço-Tempo da Relatividade Geral **não** é **euclidiano** ("plano"), nem pseudo-euclidiano:

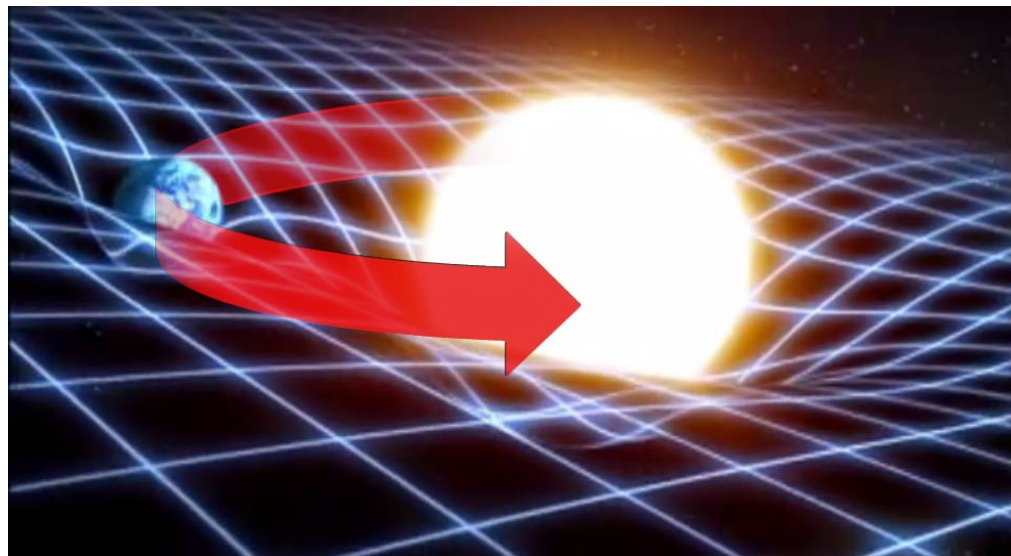
- **Retas paralelas** em **uma região** podem **não** ser paralelas em **outra região**.
- A **soma** dos **ângulos** em um **triângulo** **não** é necessariamente **180°** .
- Partículas ou raios de luz partindo do mesmo ponto em direções diferentes podem se reencontrar em outro ponto.

Relatividade

Neste Espaço-Tempo curvo, as partículas (p. e. a Terra) andam em linhas as mais retas possíveis, chamadas **geodésicas**.

No caso da Terra no espaço curvado pelo Sol, a geodésica é uma órbita elíptica.

=> A **gravitação** pode ser vista como **efeito** da **curvatura** do **Espaço-Tempo**!



Relatividade Geral

! Partículas passando pelo mesmo ponto (evento) e indo na mesma direção espacial, mas com velocidades diferentes, **não** estão indo na **mesma direção** no **Espaço-Tempo**, já que a "direção" no Espaço-Tempo contém uma componente temporal e depende, então, da velocidade.

=> Elas **não** seguem a **mesma geodésica**, e **tampouco** a **mesma trajetória espacial**.

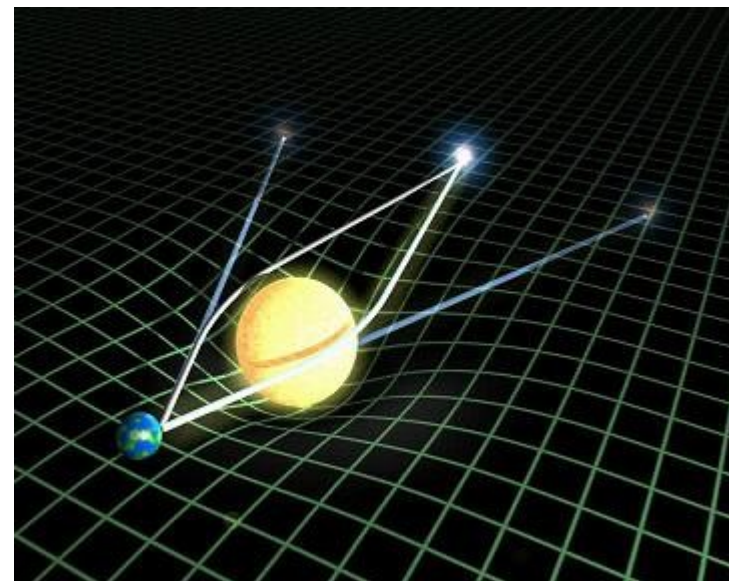
Relatividade Geral

Como mencionado, este efeito também **curva** os **caminhos** da **luz**.
=> **Massas** altas **desviam** a **luz**.

Isto foi **confirmado** pela primeira vez em 1919 em Sobral, no Ceará durante um **eclipse solar**.

Observou-se o **Sol desviando** a **luz** de uma **estrela** atrás pelo ângulo predito de $\Delta\varphi = 4GM_{\odot}/c^2R_{\odot} = 1.75''$ (o dobro do valor clássico para o desvio de uma partícula com velocidade v passando por uma massa M na distância R , $\Delta\varphi = 2GM/v^2R$).

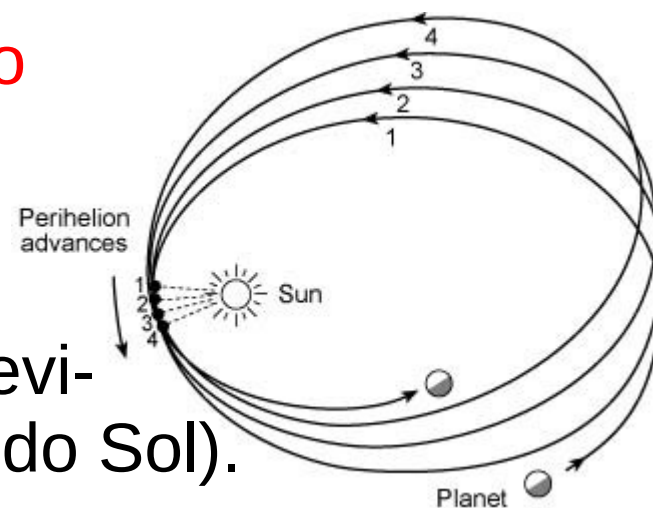
=> Primeira **corroboração** da **Relatividade Geral**.



Relatividade Geral

Desde então, foi observado muitas vezes em situações diferentes: o Sol desviando luz de quasares (observável sem eclipse solar), galáxias desviando a luz de outras galáxias, aglomerados de galáxias desviando luz, Anãs Marrons amplificando luz de estrelas, etc. => em breve

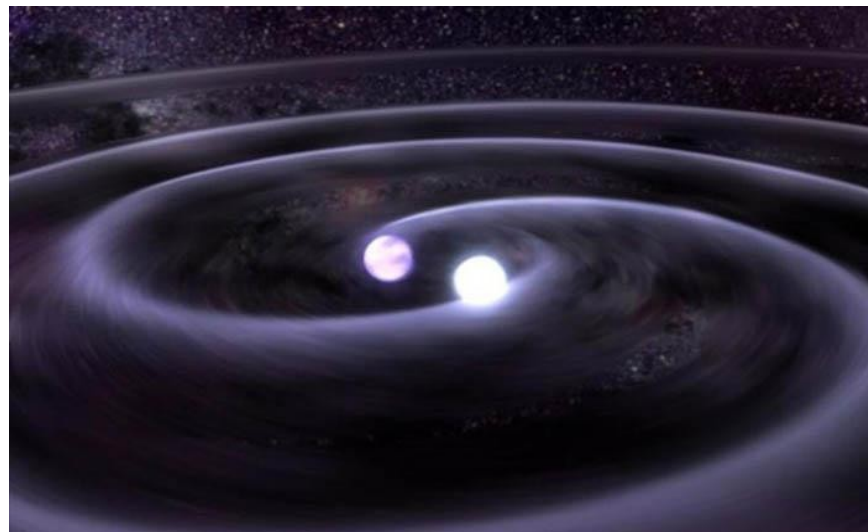
A curvatura também explica a **precessão** do **periélio** da **órbita** de **Mercúrio** (531"/século podem ser explicados pela influência dos outros planetas e a forma oblata do Sol, e 43"/século são devidos à curvatura do espaço-tempo perto do Sol).



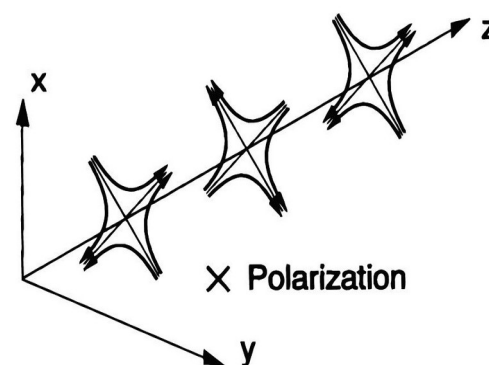
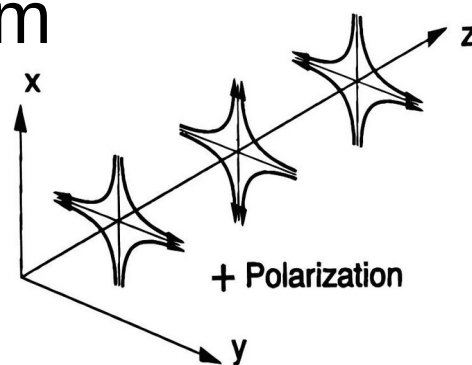
A **Curvatura do Espaço-Tempo** e o **Princípio de Equivalência** constituem as **bases conceituais** da Teoria da **Relatividade Geral**.

Ondas Gravitacionais

Outra previsão da Relatividade Geral é a existência de **ondas gravitacionais**, **deformações periódicas** do **Espaço-Tempo**. Por menos que $1:10^{20}$, emitidas por **massas** em **aceleração**, e propagando-se à velocidade da luz.



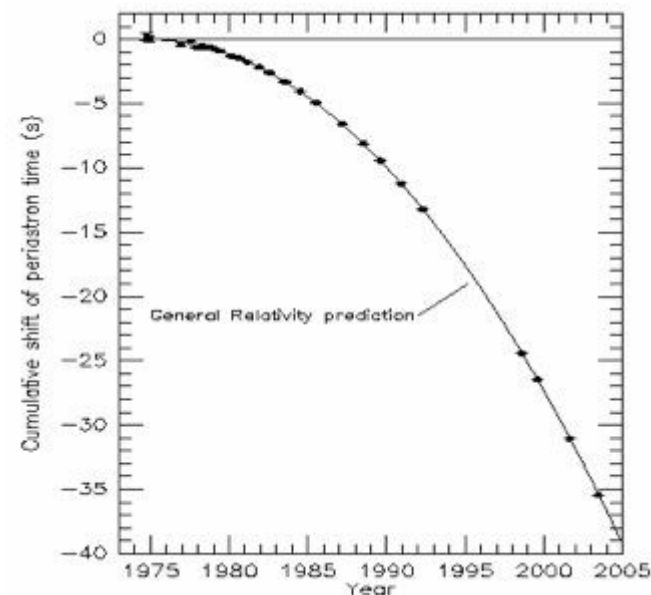
As deformações alternariam entre as duas direções perpendiculares à direção de propagação.



Evidências para Ondas Gravitacionais

Já houve **detecções indiretas**:
A perda de energia rotacional
nas órbitas de pares de pulsares
(Estrelas de Nêutrons),
i. e. o pulsar binário PSR1913+16,
ou Hulse-Taylor (1974)

Segundo a Relatividade Geral, dois
objetos de **alta massa** como Estrelas
de Nêutrons **orbitando-se** em **curta**
distância deveriam emitir **ondas**
gravitacionais, resultando em uma **rotação** do **periastron**
(ponto de maior aproximação das duas) de $\sim 4.23^\circ$ por
ano, fato **confirmado** nas **observações**.



Atraso acumulado da
passagem pelo periastron
no sistema Hulse-Taylor

Evidências para Ondas Gravitacionais

"Telescópios"/Detectores de Ondas Gravitacionais procuram fazer **detecções diretas** destas ondas, por exemplo LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*), um par de detectores em duas localidades nos EUA (Hanford e Livingston), medindo a interferência entre dois raios laser passando por braços perpendiculares dos detectores.

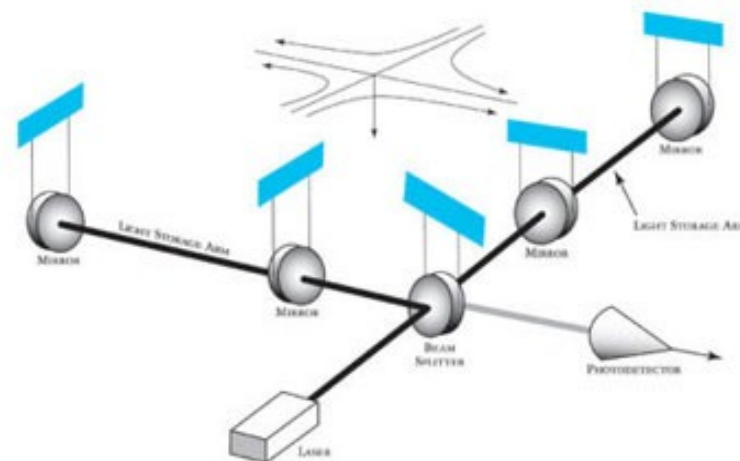
LIGO começou as observações (à resolução atual) em setembro de 2015.



LIGO detector em Hanlon

Evidências para Ondas Gravitacionais

A **passagem** de uma **onda gravitacional** deveria **aumentar** o **caminho ótico** do laser em **um** dos **braços**, e **diminuir** o caminho no **outro**, causando uma **alteração** na **diferença** de **caminho ótico** dos dois raios (por menos do que o diâmetro de um núcleo atômico!) e, assim, na **interferência** dos dois.



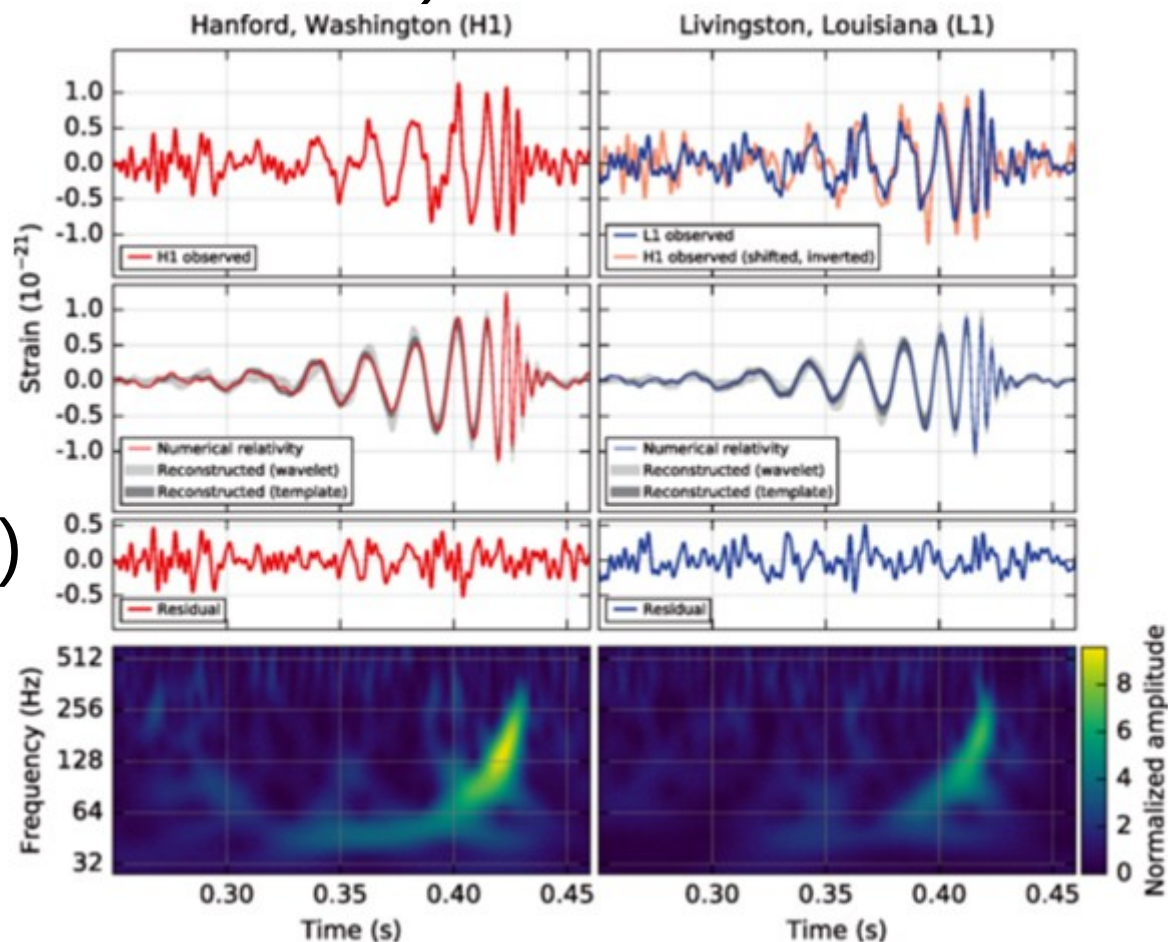
Desvantagem: A detecção só dá certo, se a fonte da onda se encontrar na direção verticalmente em cima do detector e a polarização for na direção dos braços. Para geometrias menos ideais, o sinal é mais fraco (normalmente fraco demais para ser detectado).

Evidências para Ondas Gravitacionais

14/09/2015 (anunciado 11/02/2016)

LIGO anunciou a
detecção de uma
onda gravitacional
devida a um evento
de fusão de dois
Buracos Negros
(36 e 29 $M_{\odot} \Rightarrow 62 M_{\odot}$)
a ~400 Mpc de
distância.

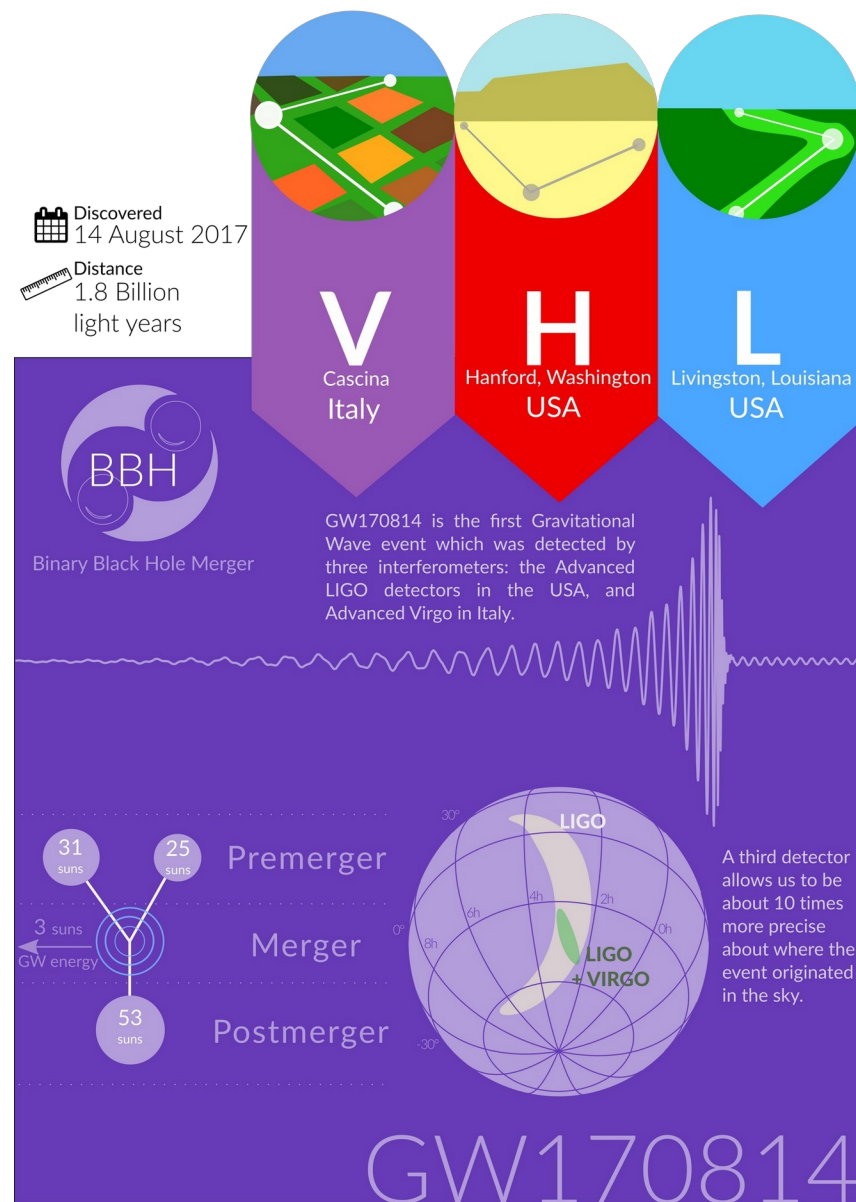
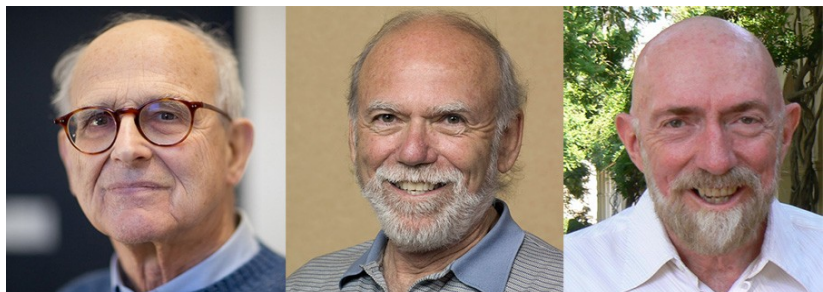
Duração do sinal:
0.2 s



Evidências para Ondas Gravitacionais

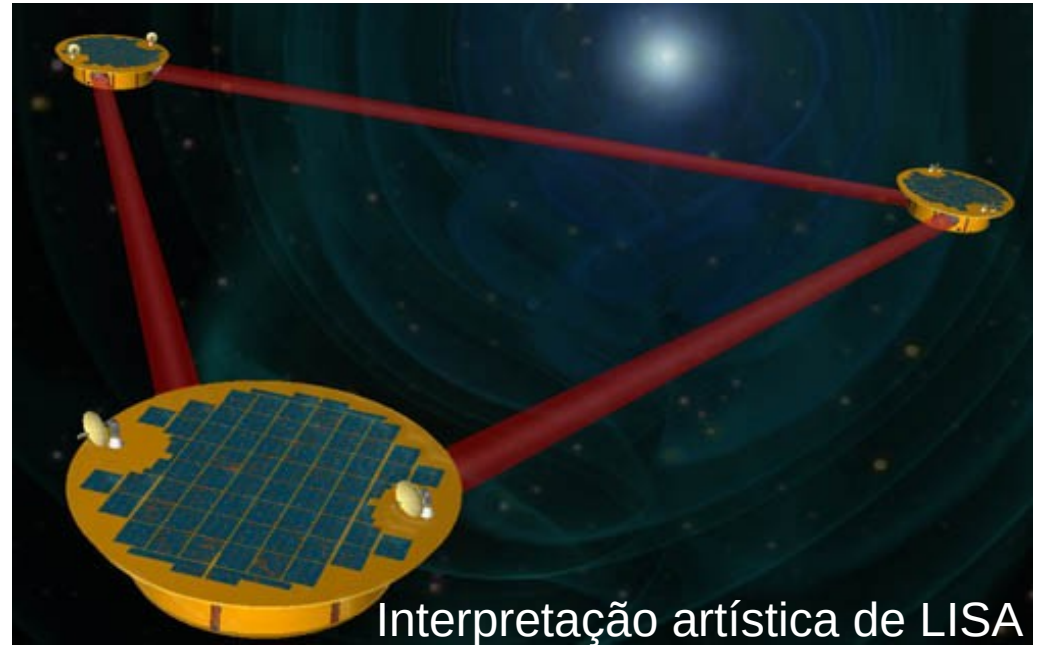
Desde então houve dezenas de outras detecções, incl. uma, naquela a contrapartida ótica também foi detectada, e uma detectada também por Virgo, um detector na Itália, similar ao LIGO.

=>  Prémio Nobel de física (2017) para K. Thorne, R. Weiss e B. C. Barish.



"Telescópios" de Ondas Gravitacionais

Se a detectabilidade de ondas gravitacionais se confirma, talvez algum dia poderemos observar aquelas emitidas na época da **Inflação** Cosmológica (=> disciplinas sobre astronomia e cosmologia).



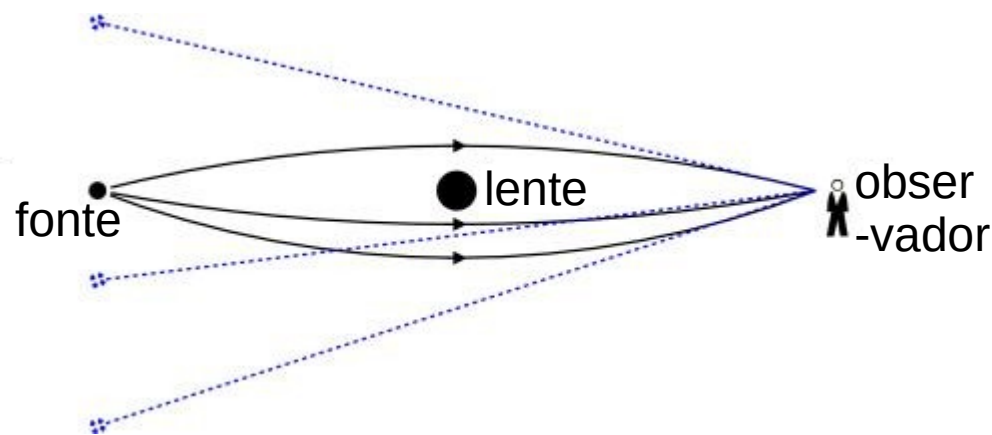
Telescópios de ondas gravitacionais do **futuro** incluem **conjuntos** de **satélites**, resultando em "braços" muito maiores.

O "telescópio" LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) foi projetado como colaboração das NASA e ESA. Porém, a NASA saiu do projeto por causa dos custos altos, e a ESA redimensionou o projeto, agora projetado para ser lançado em 2035 (?).

O Japão está desenvolvendo um telescópio similar, chamado DECIGO (*Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory*), a ser lançado nos anos 2030 (2037?).

Lentes Gravitacionais

Uma consequência, de que **massas defletem luz** é, que elas podem agir como **lentes gravitacionais**.



Baseada na **Relatividade Geral** (1915), lentes gravitacionais são uma **ciência observacional** só desde 1979.

Hoje, já virou rotina.

Lentes gravitacionais nos fornecem uma maneira direta de medir **massas** e **distâncias**, sem precisar fazer suposições sobre a natureza da matéria.

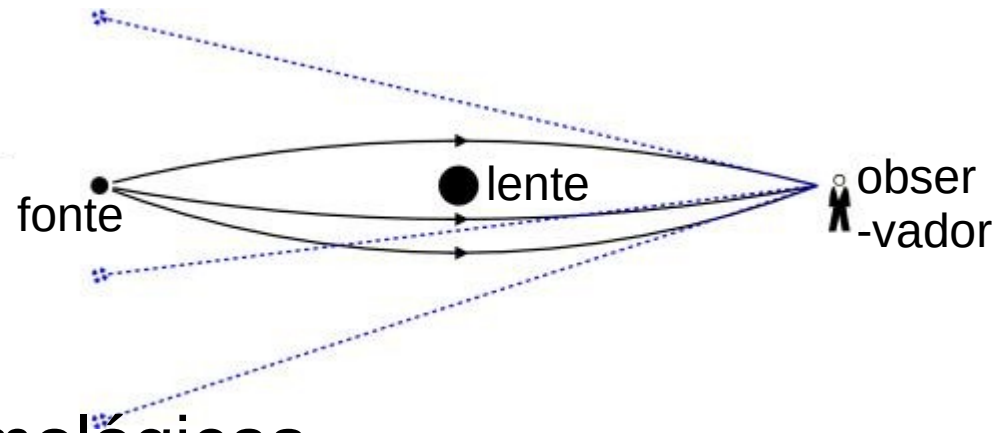
Eles podem fornecer informações sobre a **fonte** ou sobre a **lente**.

Lentes Gravitacionais

Lentes Gravitacionais

contribuíram nas seguintes áreas da astronomia:

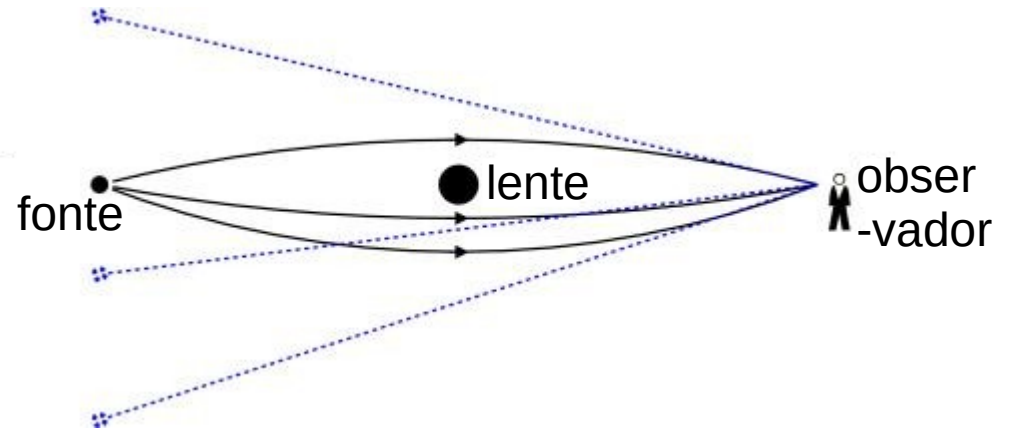
- Escalas de distâncias cosmológicas
- Distribuição de matéria em grandes escalas
- Massas e distribuição de massa em aglomerados de galáxias
- Física dos quasares
- Matéria escura nos halos de galáxias
- Estrutura de galáxias
- Exoplanetas
- e outras



Lentes Gravitacionais

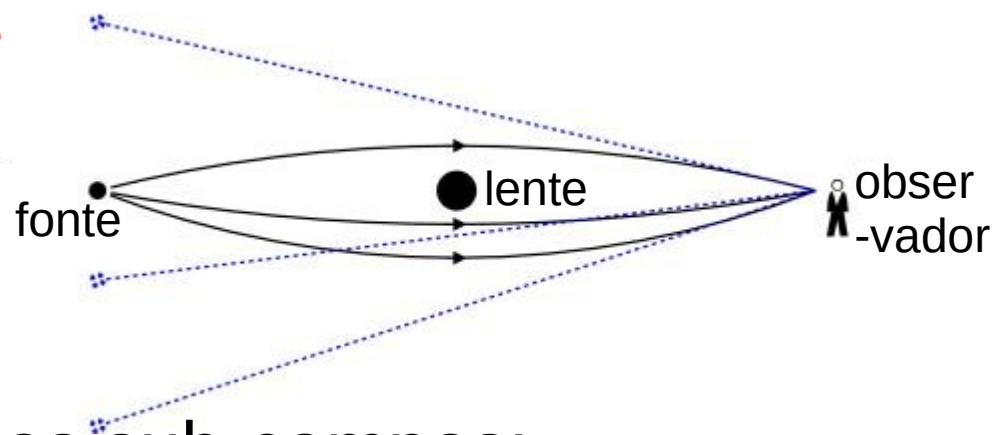
O que acontece?

A **luz** vindo de uma **fonte** astronômica é defletida por uma **massa** entre a **fonte** e o **observador** (a Terra), chamada **lente**, o que pode levar ao **deslocamento**, à **magnificação** ou à **distorção** da **imagem** da **fonte**. Também podem surgir **imagens múltiplas** da fonte.



Lentes Gravitacionais

Dependendo da **intensidade** do efeito, que depende da **massa** da **lente**, e do **alinhamento** fonte-lente-observador,



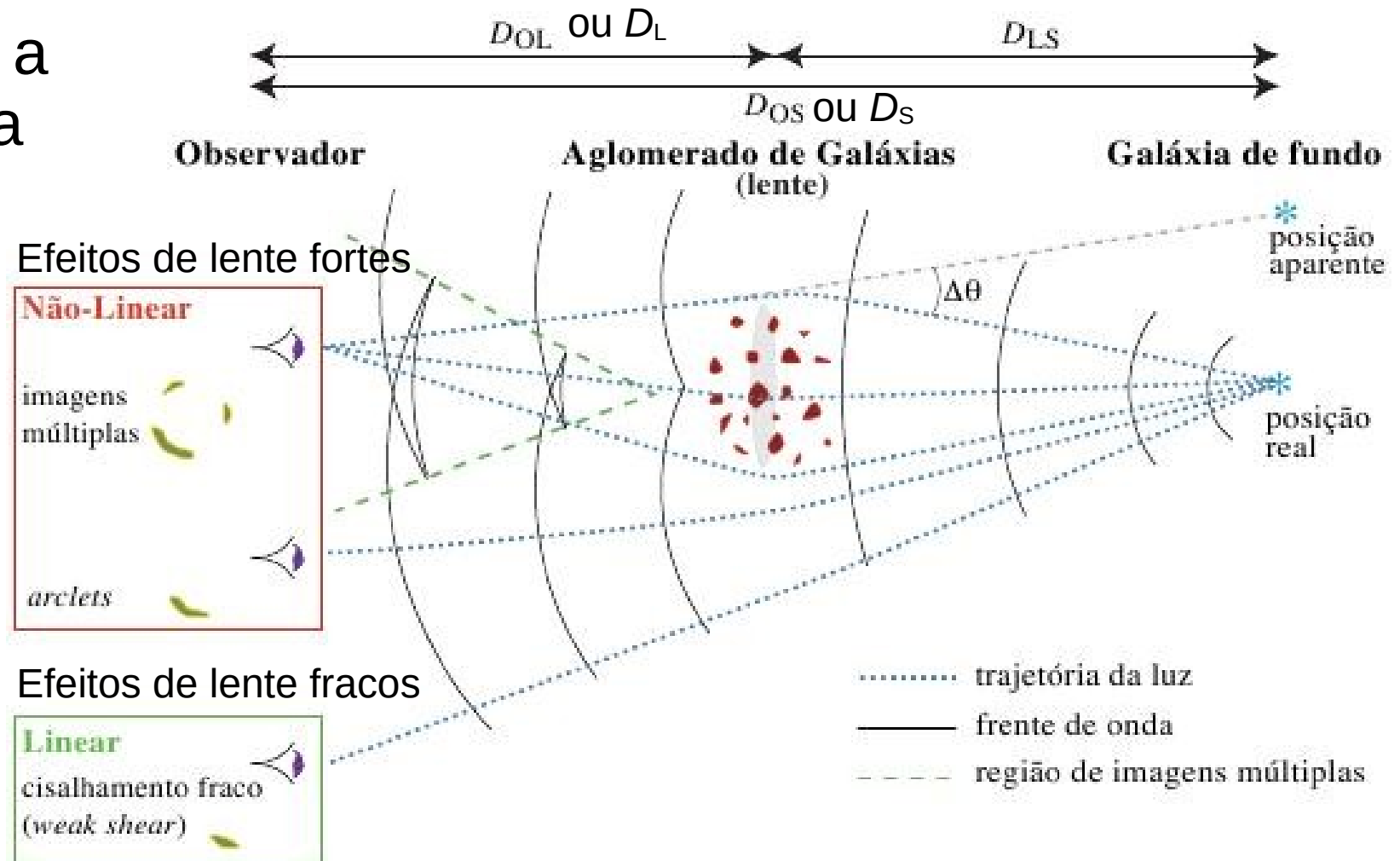
o campo pode ser dividido nos sub-campos:

- **Lensing forte**: **imagens múltiplas**, **distorções fortes** da imagem, como **anéis** e **arcos**; as lentes são **galáxias** e **aglomerados de galáxias**.
- **Lensing fraco**: **distorções fracas** da imagem, **cisalhamento**; lentes: **galáxias** e **aglomerados**
- **Microlensing**: **magnificação** da luz da fonte; lentes: **MACHOs** (*M*Assive *C*ompact *H*alo *O*bjects, vide aula Matéria Escura), **exoplanetas**, ...

Lentes Gravitacionais

Efeitos de Lente fortes e fracos

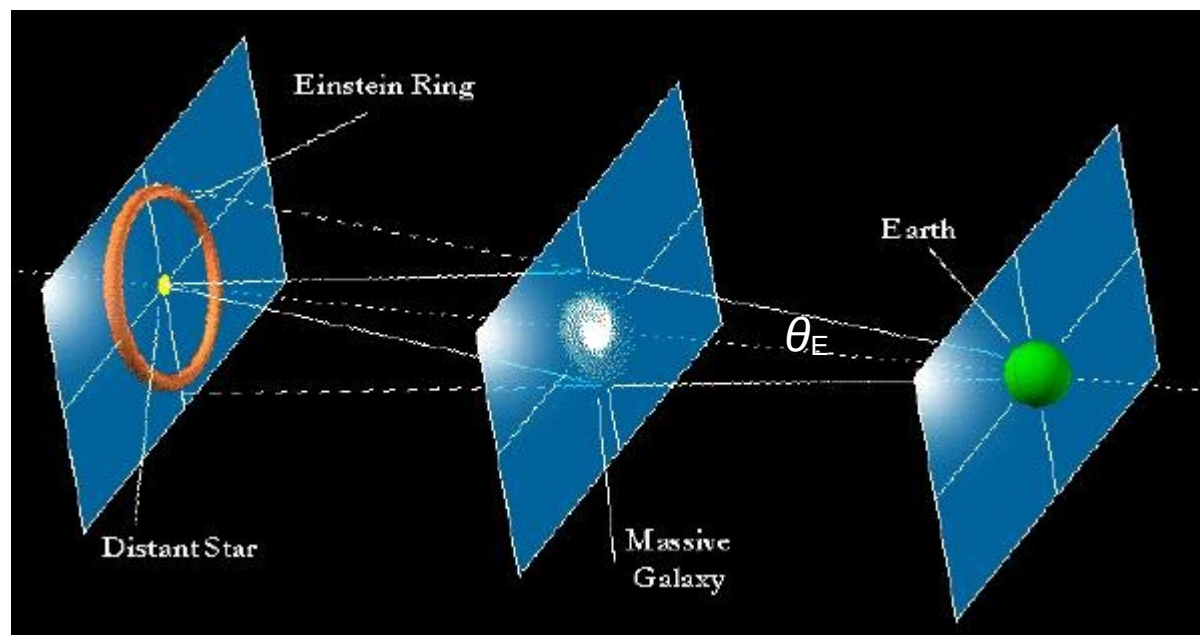
Supondo a geometria ao lado.



Lentes Gravitacionais

Anéis de Einstein

No caso de uma lente circularmente simétrica e alinhamento perfeito fonte-lente-Terra, a imagem da fonte será um anel.



O raio deste anel no céu é chamado Raio de Einstein θ_E :
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L}}$$

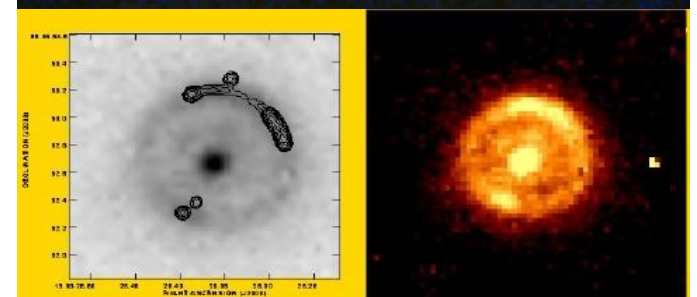
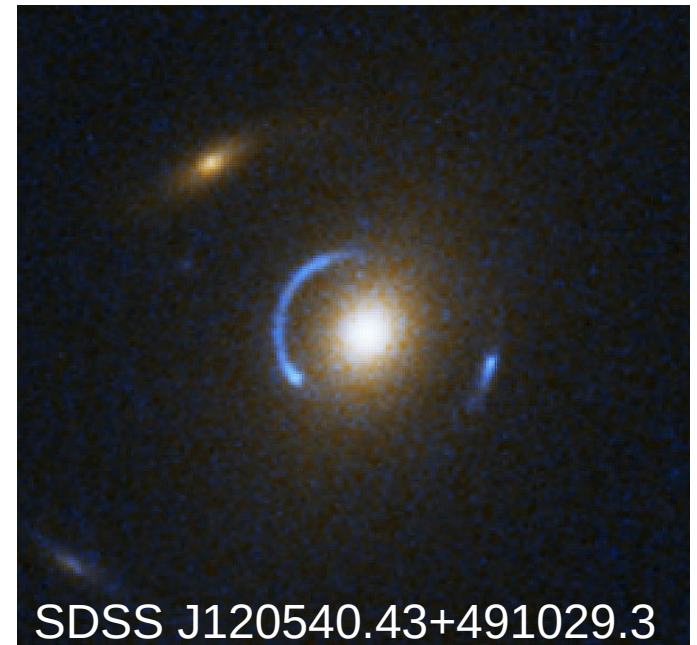
Conhecendo as distâncias (i. e. pelos *redshifts*), o raio de um anel de Einstein nos dá a massa M da lente.

Lentes Gravitacionais

Anéis de Einstein

Foram encontrados **anéis de Einstein** em torno de **várias galáxias**, com **raios** angulares da ordem de $\theta_E \sim 1''$.

=> **galáxias lentes** de **massas** da ordem de $10^{12} M_{\odot}$.



The gravitational lens JVAS B1938+666

Left: HST/NICMOS greyscale with MERLIN radio contours
Right: Colour image of the HST/NICMOS image.

Lentes Gravitacionais

Arcos e aumento de fluxo

Quando o **alinhamento** é **menos perfeito**, ou a **lente não é simétrica**, podem surgir **arcos**, "fragmentos de anéis de Einstein".

Os **raios** destes **arcos** também levam à **determinação** da **massa** da **lente**.

Ao lado: arcos em torno do Aglomerado de galáxias lente CL0024+1645.



CL0024+1654

Lentes Gravitacionais

Arcos e aumento de fluxo

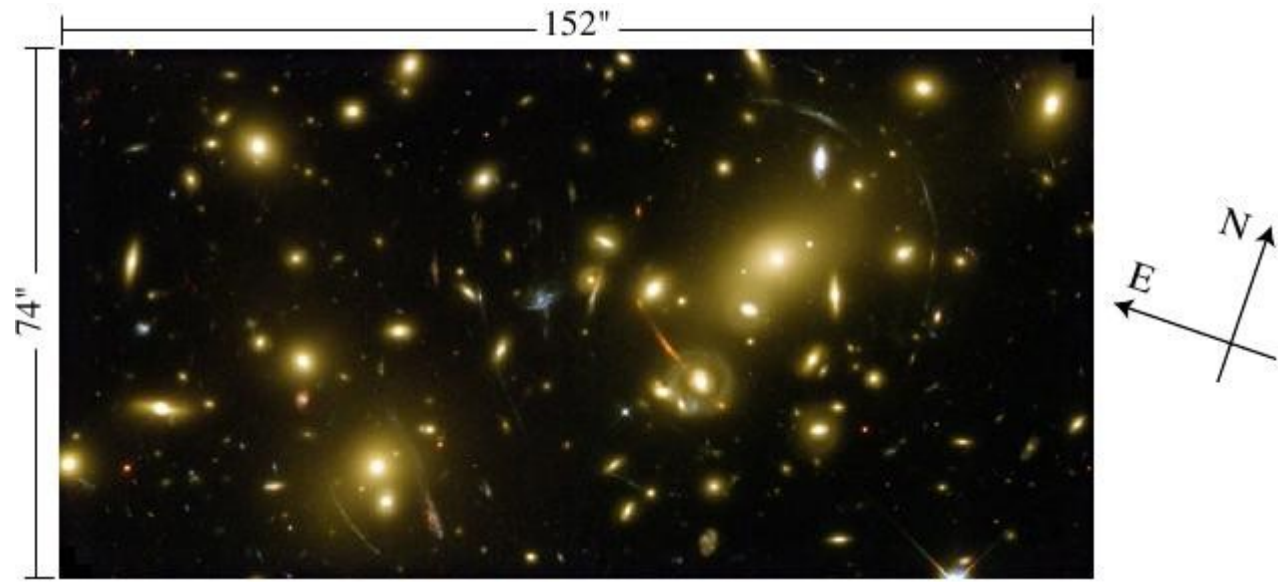
Aqui outro
Aglomerado com
arcos.

=> **arcos** com **raios**
de **curvatura** $\sim 30''$

=> **Aglomerados** de
massas em torno

de $10^{14} M_{\odot}$, em **concordância** com as **massas**
encontradas por **outros métodos** (teorema virial,
emissão do gás interaglomerado, ...).

Além disso o **fluxo** das **galáxias fontes** é **aumentado** por
um fator até ~ 10 , o que ajuda para observá-las.

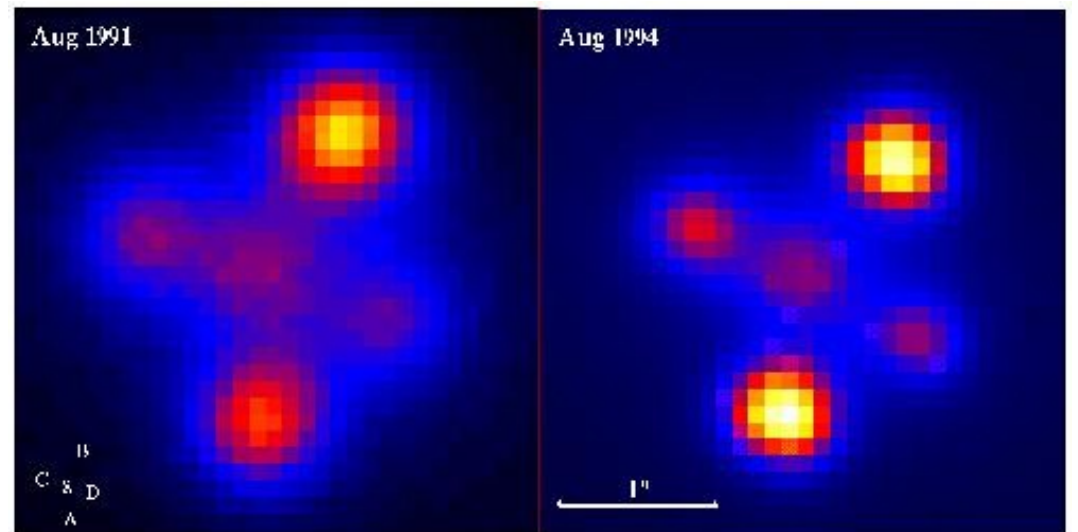


O Aglomerado de galáxias Abell 2218

Lentes Gravitacionais

Imagens Múltiplas

Este **quasar** (Buraco Negro no centro de uma galáxia ativa) aparece em **quatro posições** no céu, por ser "lensado" por uma **galáxia** no caminho.



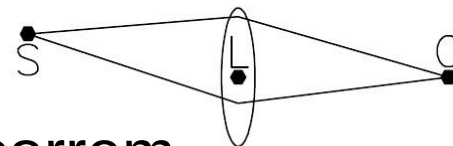
Duas imagens do quasar quadruplo Q2237+0305

Pelas **posições** das **imagens**, dá pra **reconstruir** a **distribuição** de **massa** na **galáxia lente**.

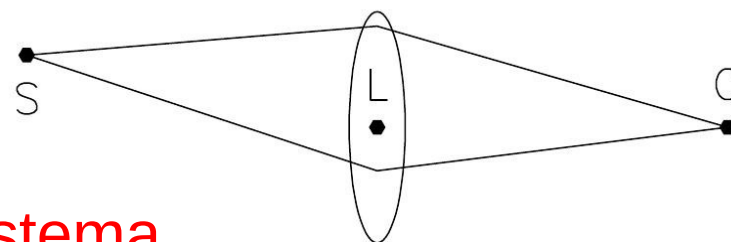
Lentes Gravitacionais

Diferença de Tempo

Um fenômeno interessante quando há **imagens múltiplas** é, que **eventos no quasar** ocorrem em **momentos diferentes nas imagens diferentes**, devido às **diferenças** entre os **caminhos da luz**.



Medindo a **diferença de tempo** entre a ocorrência em **uma imagem** e em **outra**, pode-se calcular a **diferença de caminho**, a **escala do sistema**, e as **distâncias no sistema**.



Problemas, que podem aparecer:

- Pode ser difícil identificar dois quasares no céu como imagens do mesmo.
- A lente pode ser invisível.
- A diferença de tempo entre imagens pode ser > 1 ano (=> difícil identificar o mesmo evento nas diferentes imagens).

Lentes Gravitacionais

Lentes Não-Esféricas

Perto da lente:

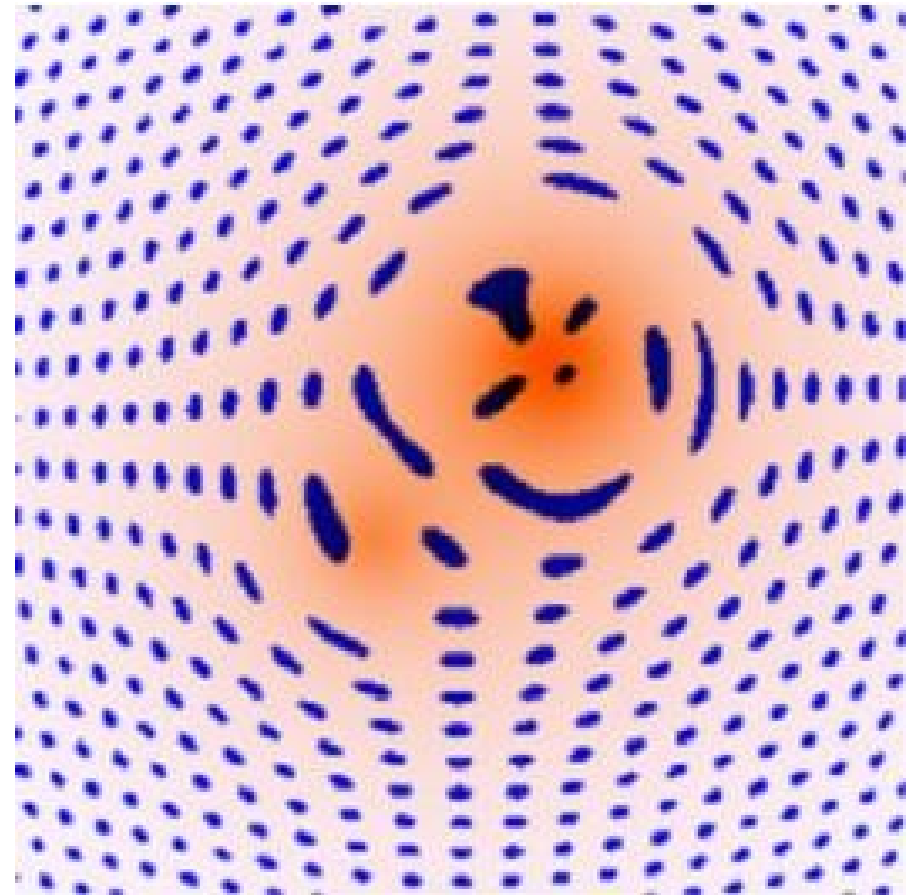
Efeitos de lente fortes:

Imagens múltiplas,
arcos grandes com $R \sim \theta_E$,
arclets ("arquinhos")

Longe da lente:

Efeitos de lente fracos:

Distorções menores
chamadas cisalhamento e
convergência.



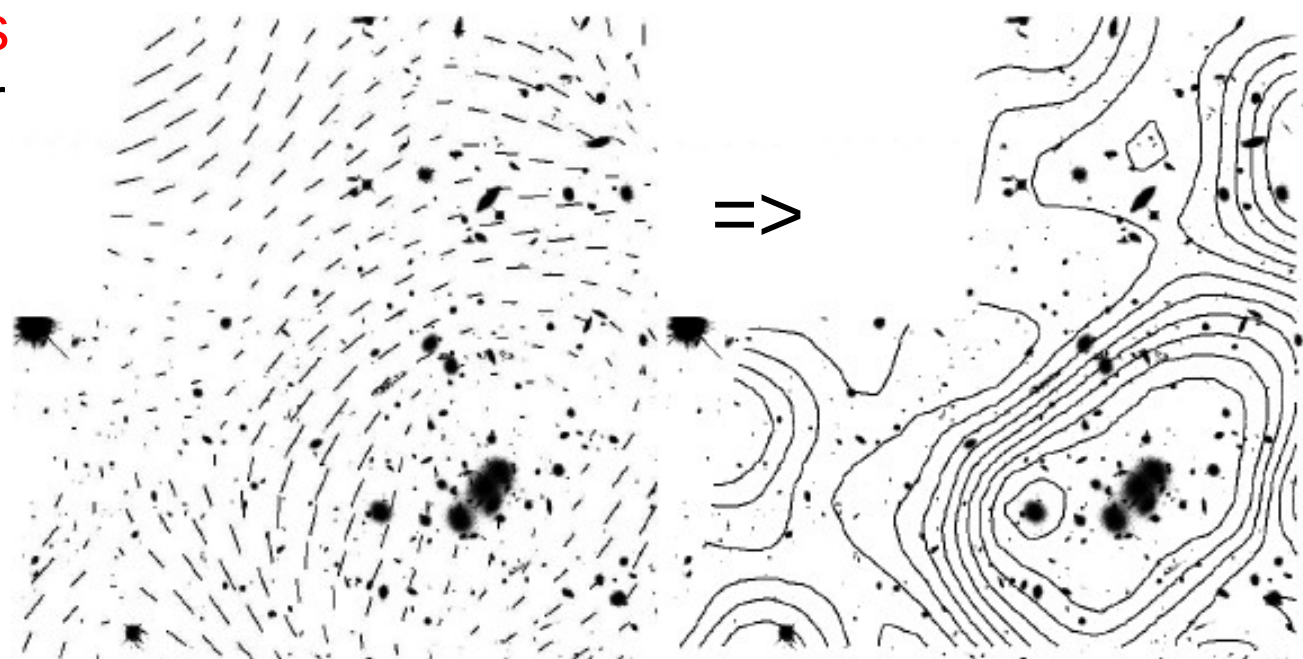
Simulação dos efeitos de lente de um aglomerado com duas concentrações de massa

Lentes Gravitacionais

Na região dos **efeitos fracos**, pode-se fazer um **mapa** do **cisalhamento médio** das **galáxias de fundo** (fontes).

Com este mapa podemos **reconstruir** a **distribuição** de **massa** no **Aglomerado** de galáxias **lente**.

É preciso mediar sobre **muitas imagens** de **galáxias de fundo**, o que **hoje** é feito **rotinamente**.



Campo de cisalhamento e distribuição de massa em torno de Cl0024

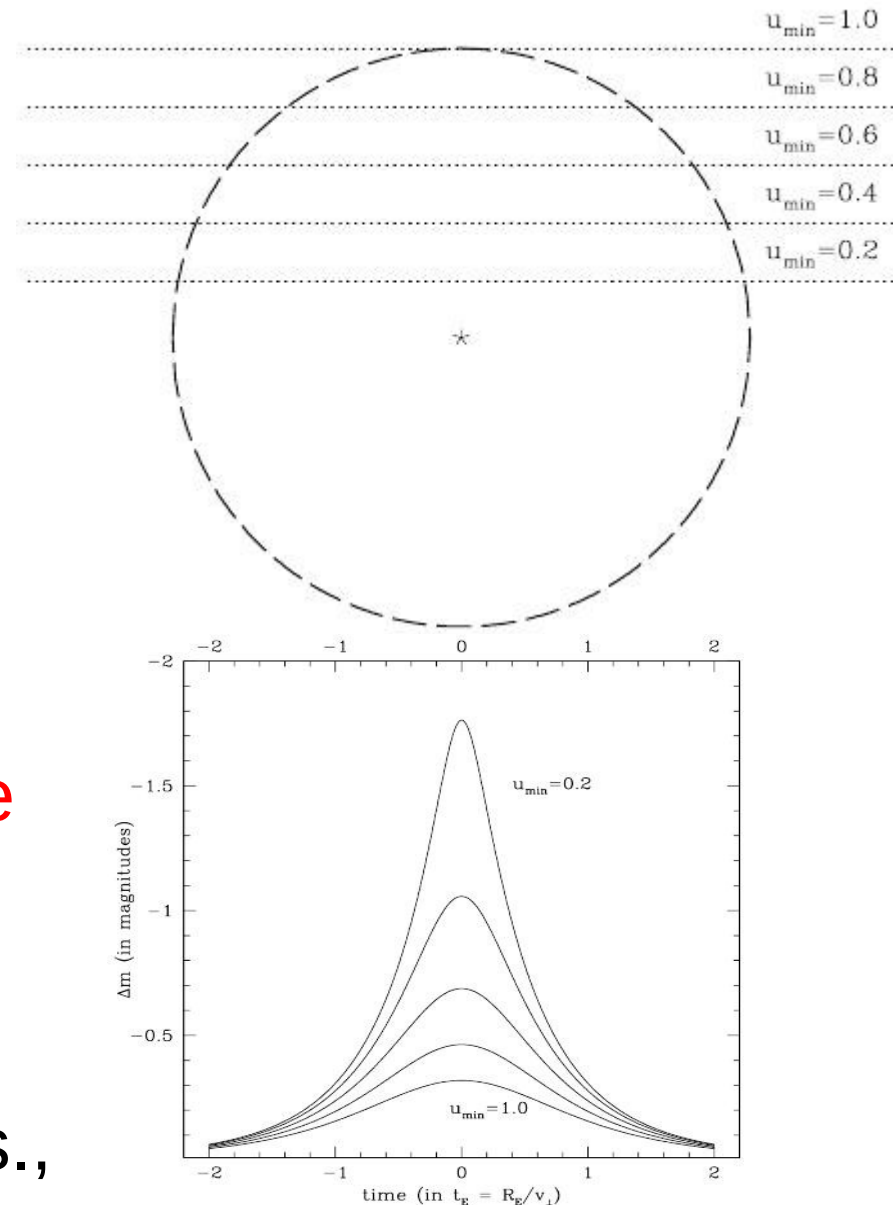
Lentes Gravitacionais

Microlensing

É interessante para testar uma hipótese sobre a natureza da Matéria Escura:

Uma **lente**, p. e. um **MACHO** (*MAssive Compact Halo Object*, Anã Branca, Anã Marrom, estrela fraca, "Júpiter", ...), passando na **frente** de uma **fonte** (estrela) causa um **aumento** da **luminosidade** da **fonte**.

Dependendo da massa da lente e do **alinhamento** fonte-lente-obs., o **aumento** é **mais** ou **menos** forte.

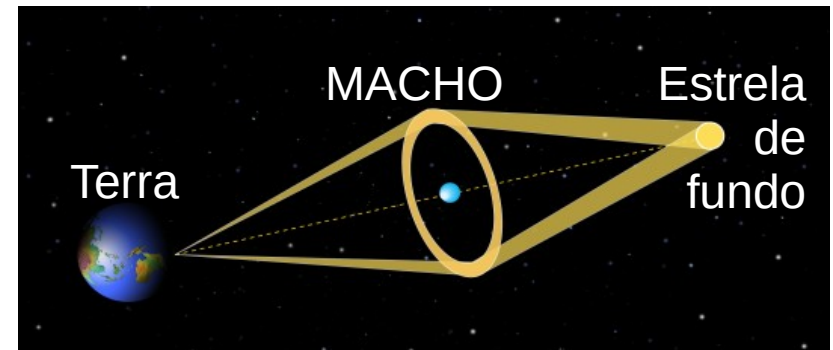


Lentes Gravitacionais

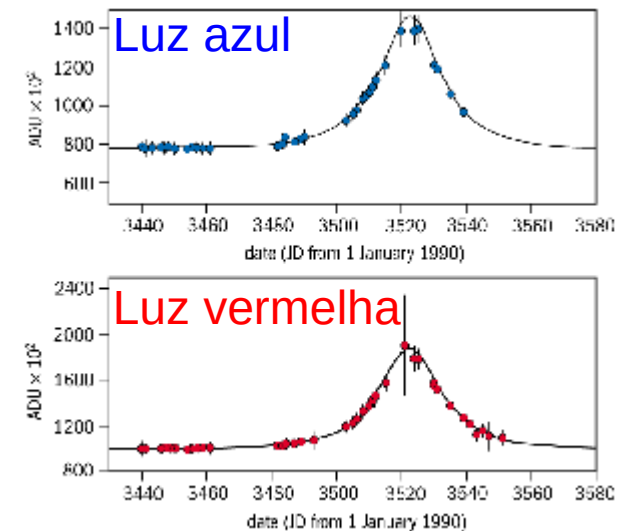
Eventos de *microlensing* se **distinguem** de outras **variações de luminosidade** por:

- serem **eventos únicos**
- sua **forma característica** da **curva de luz**
- serem **acromáticos**.

A **frequência** de eventos de *microlensing* nos dá a **densidade** de **MACHOs** na Via Láctea, **insuficiente** para compor o **Halo de Matéria Escura** ($\Rightarrow$ disciplinas de astronomia e cosmologia).



Curvas de luz de uma estrela durante um evento de microlensing





Universidade Federal do ABC

Ótica e Relatividade

FIM PRA HOJE

