



Universidade Federal do ABC

# Teoria da Relatividade

Alguns Conceitos da Relatividade Geral

Prof. Pieter Westera

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

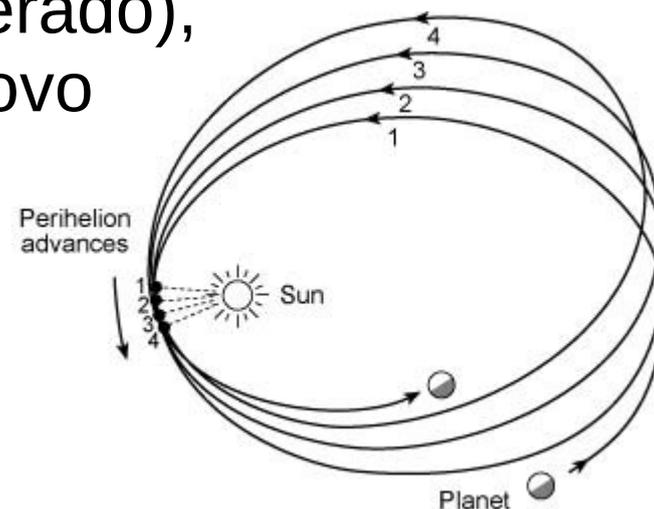
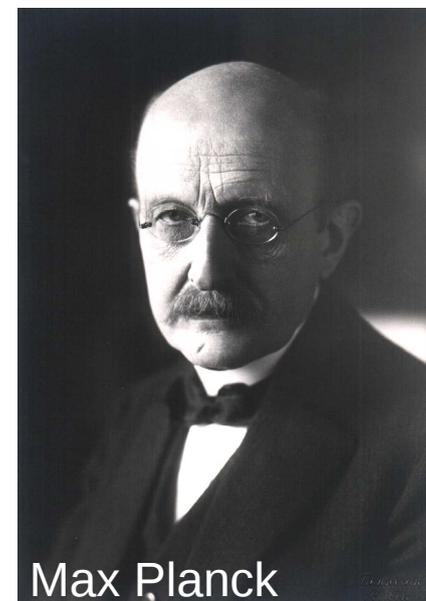
<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Relatividade.html>

# 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.

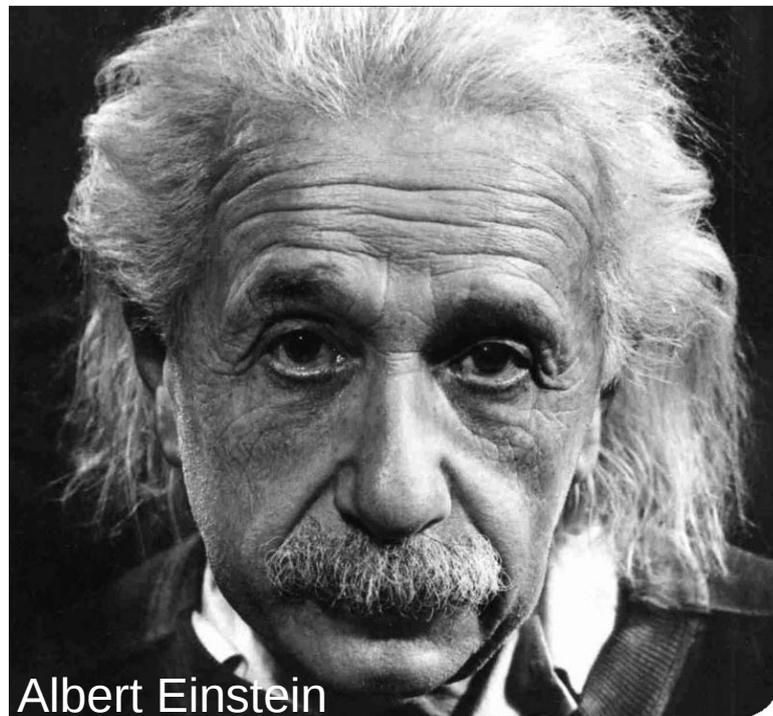
O próprio Max Planck acabou se tornando um dos fundadores da mecânica quântica.



# Relatividade

A **Teoria da Relatividade** foi desenvolvida por **Albert Einstein** de 1905 (Relatividade **Restrita**) a 1915 (Relatividade **Geral**).

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**.

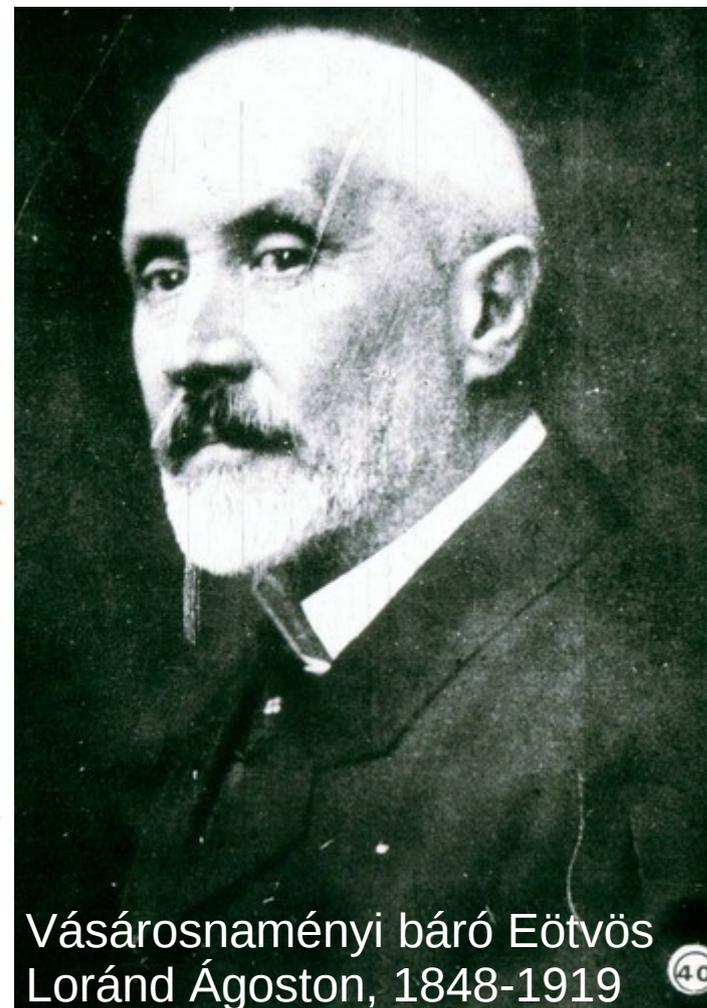
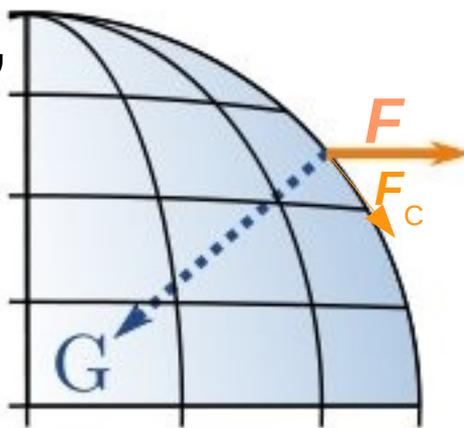
Será que a **gravitação** é uma **pseudo-força**, ou seja, um **efeito** de **referencial acelerado** (não-inercial)?

# 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  $m_g$ .



Vásárosnaményi báró Eötvös  
Loránd Ágoston, 1848-1919

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

# Relatividade Geral

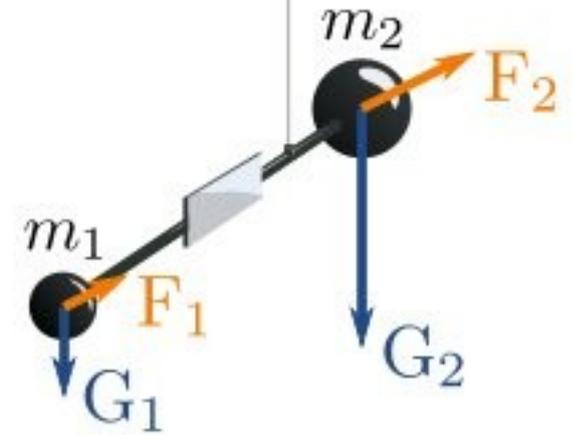
Eötvös (1899)

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

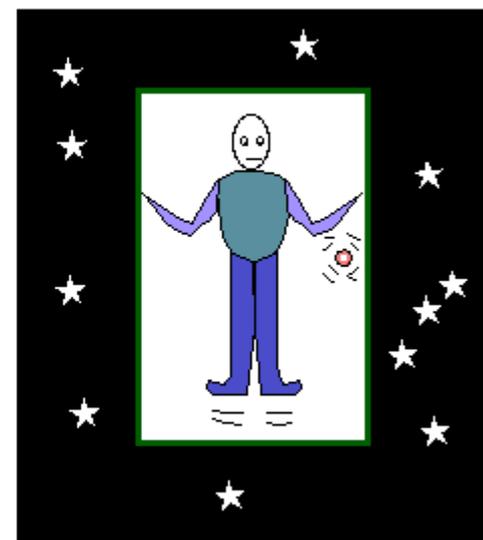
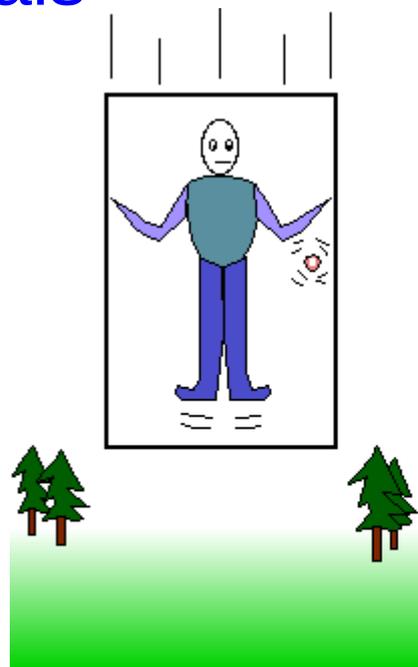
## Alguns Experimentos Mentais

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 um **referencial inercial**.

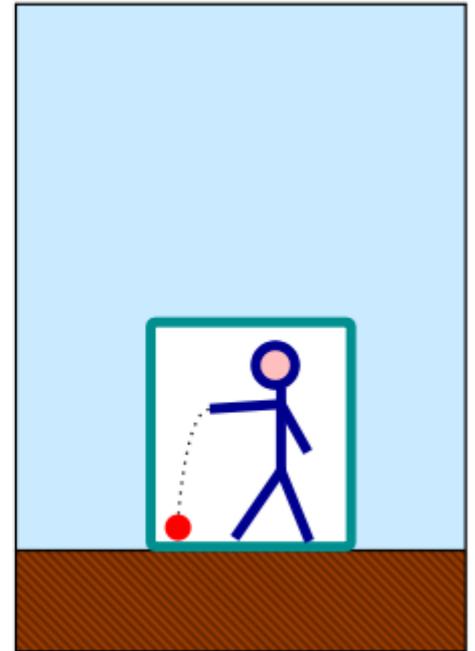
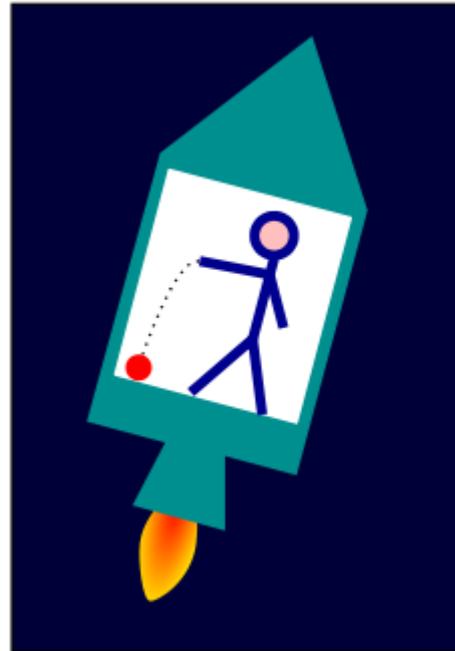


# Relatividade Geral

## Alguns Experimentos Mentais

Uma pessoa num foguete em **aceleração** ( $9.81 \text{ m/s}^2$  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

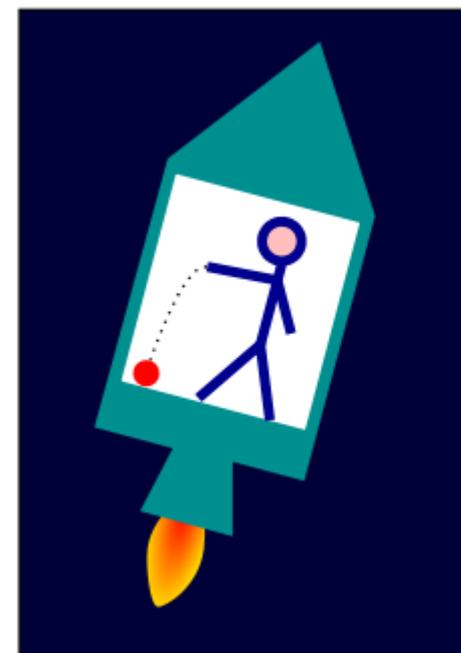
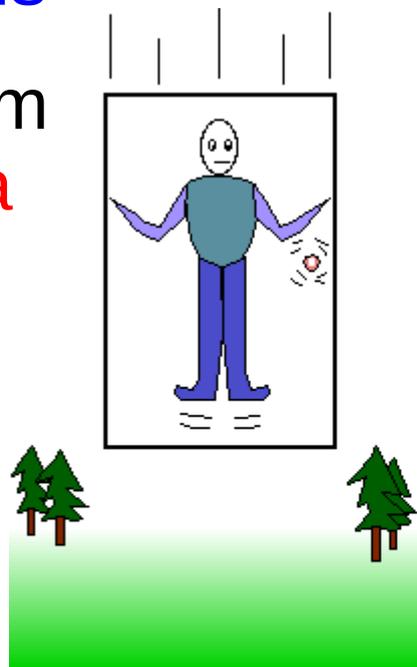
## Alguns Experimentos Mentais

=> 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 inercial.



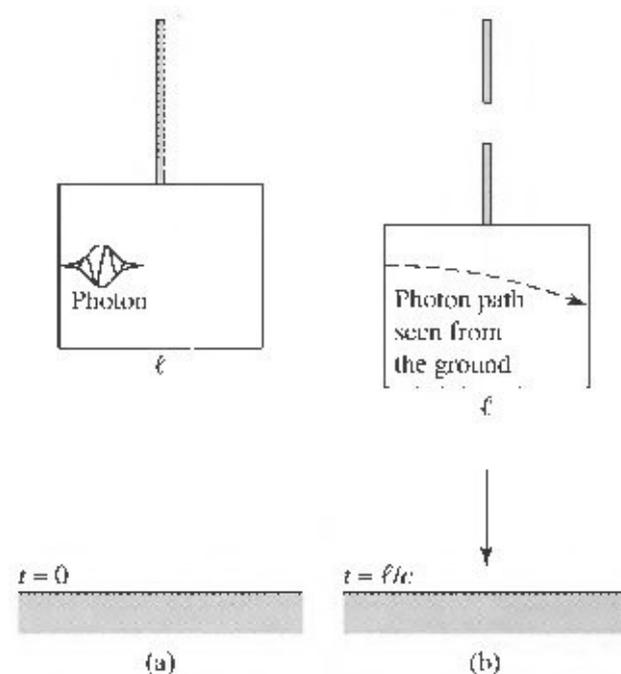
# Relatividade Geral

## 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 curva** 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

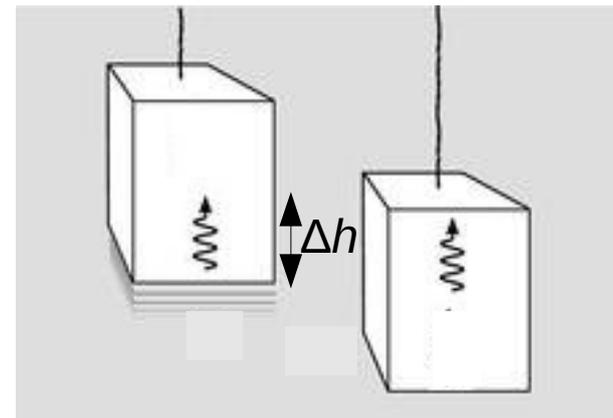
E se a luz estiver viajando na **vertical**?  
Visto de **dentro do elevador**, a **luz mantém** sua **frequência**.

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, 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.

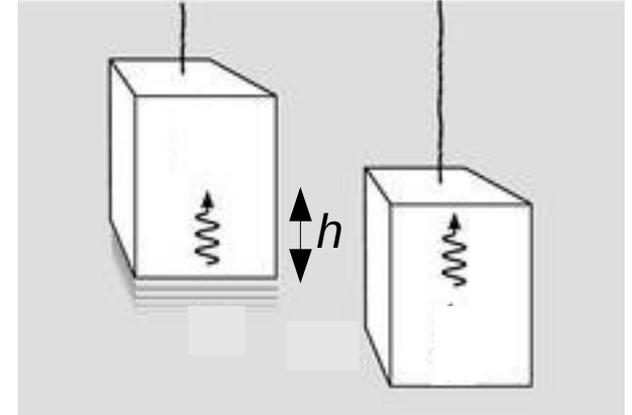
=> Mudança da frequência:  $\Delta\nu/\nu_0 \approx \Delta v/c = g\Delta h/c^2$



# 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).



=> 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

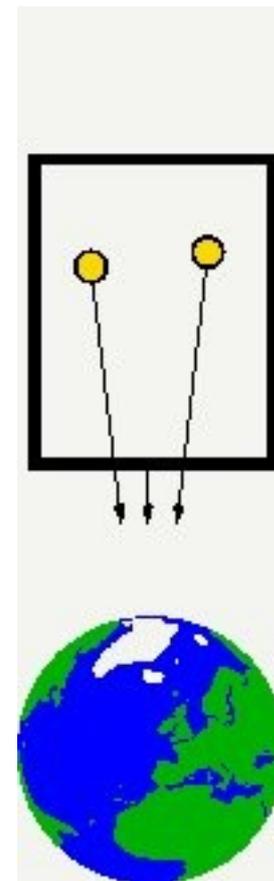
## Probleminha com o Princípio de Equivalência

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**.

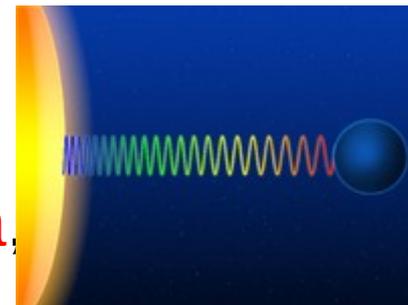
=> Para um tratamento completo, teríamos que aplicar **geometria diferencial**.  
(=> disciplina Relatividade Geral)



# Relatividade Geral

## Alguns Experimentos Mentais

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



A **variação** de **frequência** entre a **superfície** e um ponto “**longe**”:

$$\nu_{\infty}/\nu_0 = \sqrt{(1-2GM/r_0 c^2)} \approx 1 - GM/r_0 c^2$$

e a **variação** relativa do c. d. o., chamado **redshift gravitacional**:

$$z = (\lambda_{\infty} - \lambda_0)/\lambda_0 = \nu_0/\nu_{\infty} - 1 = (1-2GM/r_0 c^2)^{-1/2} - 1 \approx GM/r_0 c^2$$

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

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

# 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”.

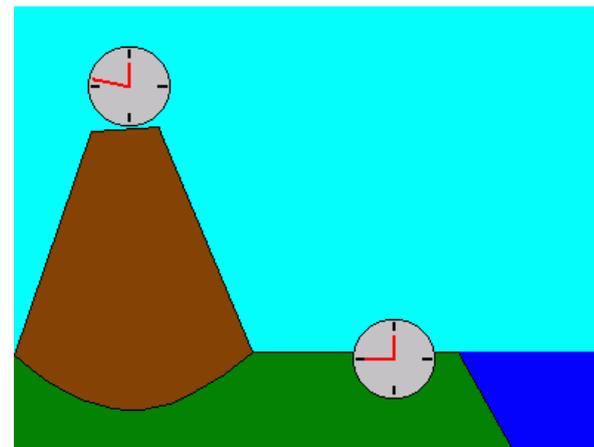
O **tempo** passa mais **rapidamente** na **altura**!

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

onde  $\Delta t_0$  e  $\Delta t_\infty$  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.

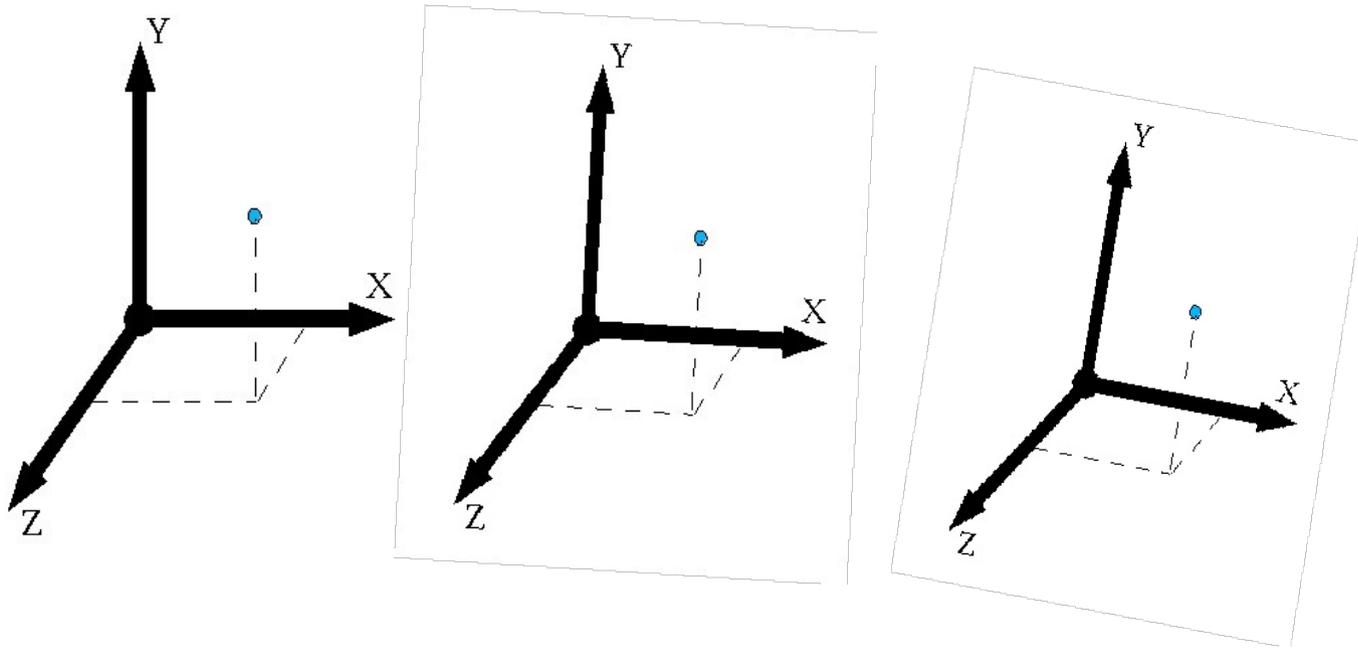
Mesmo assim, foi **confirmada** em 1976 usando relógios atômicos de alta precisão na Terra e em foguetes.

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

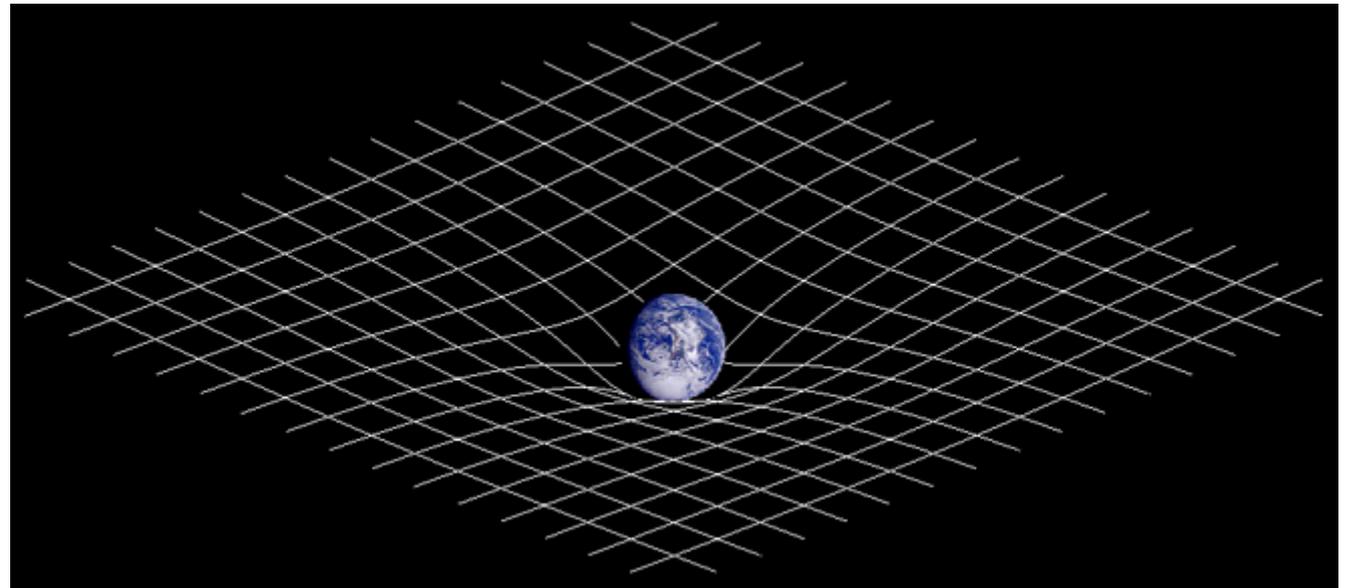
Disto tudo pode se concluir que **não existe** um **referencial global**, cada **ponto** no **espaço-tempo** tem seu próprio sistema acelerado de coordenadas.



# 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!**



# Relatividade Geral

## Quais as Propriedades do Espaço-Tempo curvo?

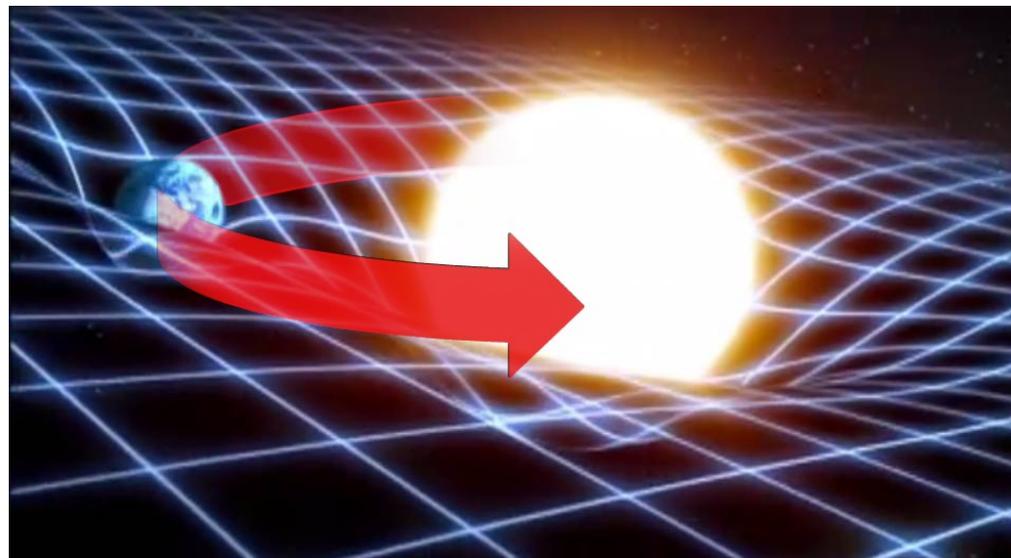
O Espaço-Tempo da Relatividade Geral **não** é **euclidiano** (“plano”), nem pseudo-euclidiano:

- **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 Geral

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** o **mesmo trajetório espacial**.

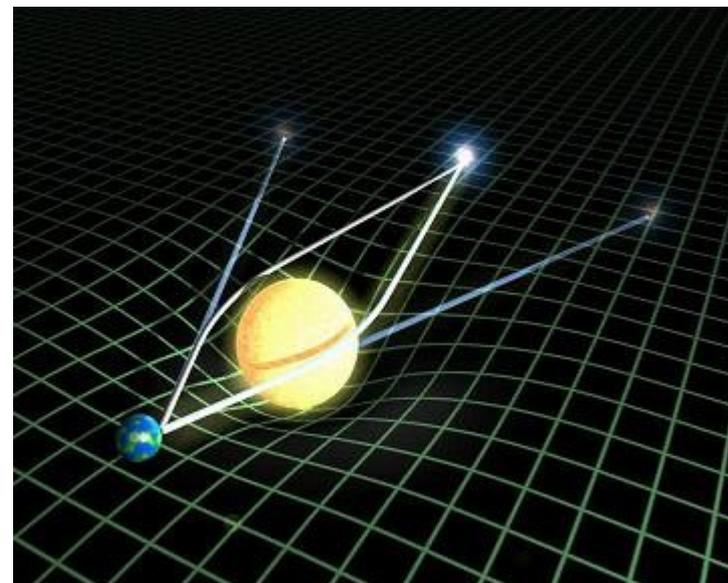
# Relatividade Geral

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 uma **eclipse solar**.

Observou-se o **Sol desviando** a **luz** de uma **estrela** atrás pelo ângulo predito de  $\Delta\varphi = 4GM/c^2R = 1.74''$  (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

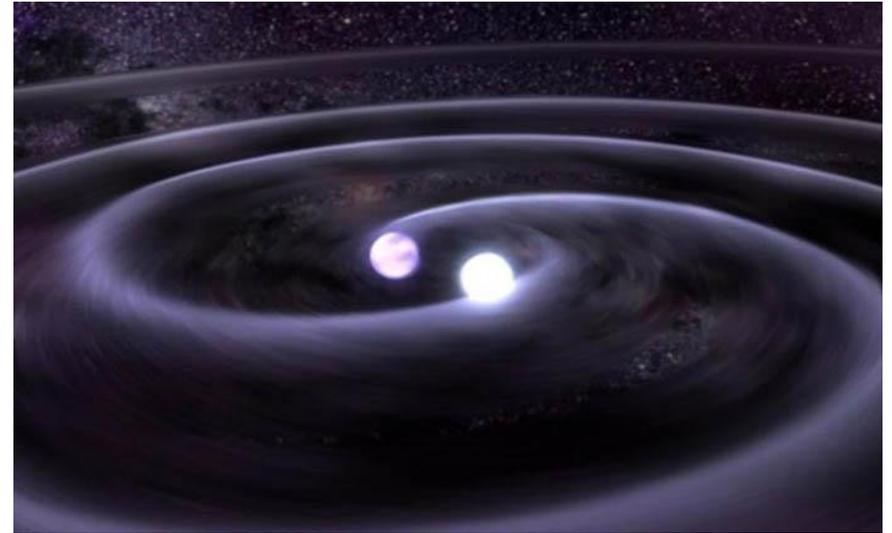
Desde então, foi observado muitas vezes em situações diferentes: o Sol desviando luz de quasares (observável sem eclipse solar), galáxias desviando a luz de outras galáxias, aglomerados de galáxias desviando luz, Anãs Marrons amplificando luz de estrelas, etc. => em breve

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

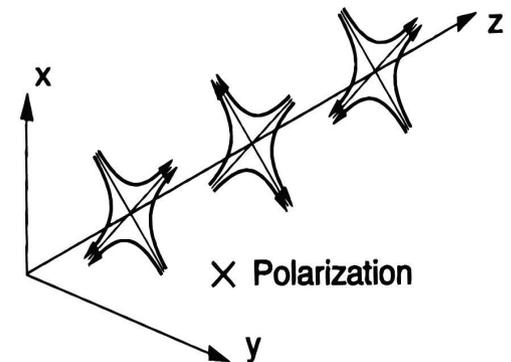
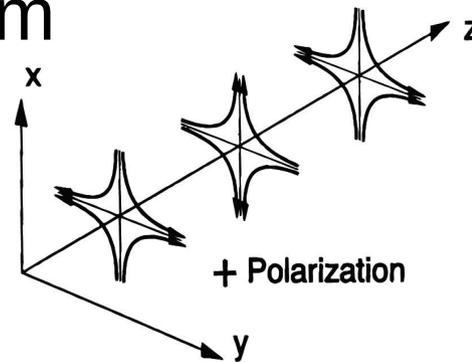
A **Curvatura do Espaço-Tempo** e o **Princípio de Equivalência** constituem as **bases conceituais** da Teoria da **Relatividade Geral**.

# 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.



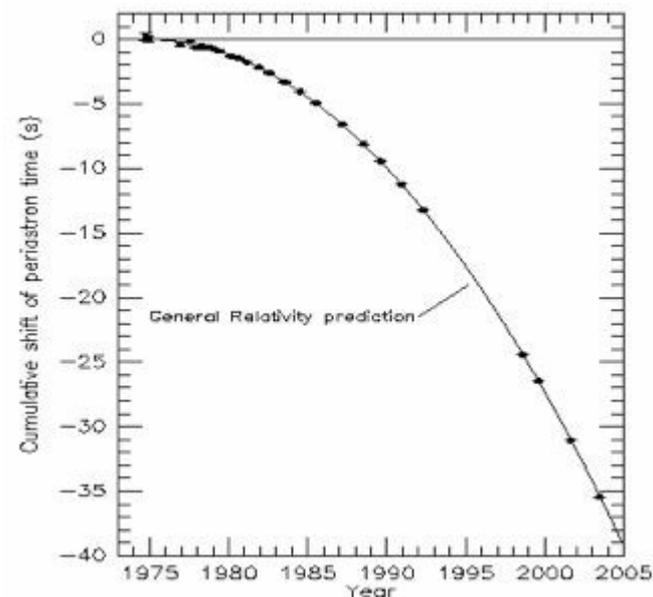
As deformações alternariam entre as duas direções perpendiculares á direção de propagação.



# 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 periastro** (ponto de maior aproximação das duas) de  $\sim 4.23^\circ$  por ano, fato **confirmado** nas **observações**.



Atraso acumulado da passagem pelo periastro 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, EUA), medindo a interferência entre dois raios laser passando por braços perpendiculares dos detectores.

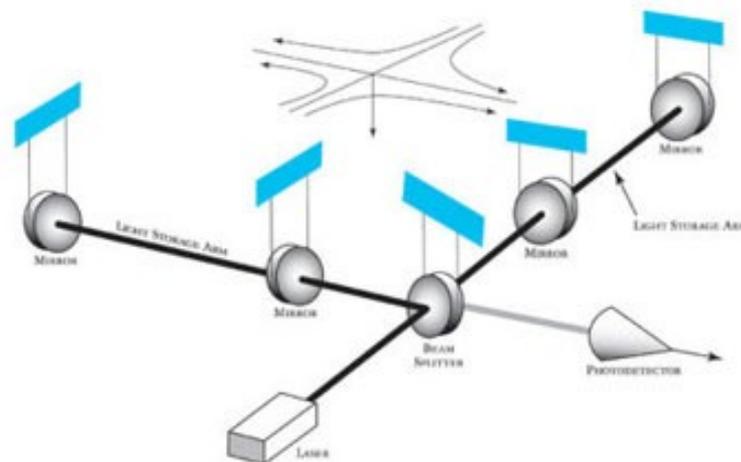
LIGO começou as observações (à resolução atual) em setembro de 2015.



LIGO detector em Hanlon

# Evidências para Ondas Gravitacionais

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



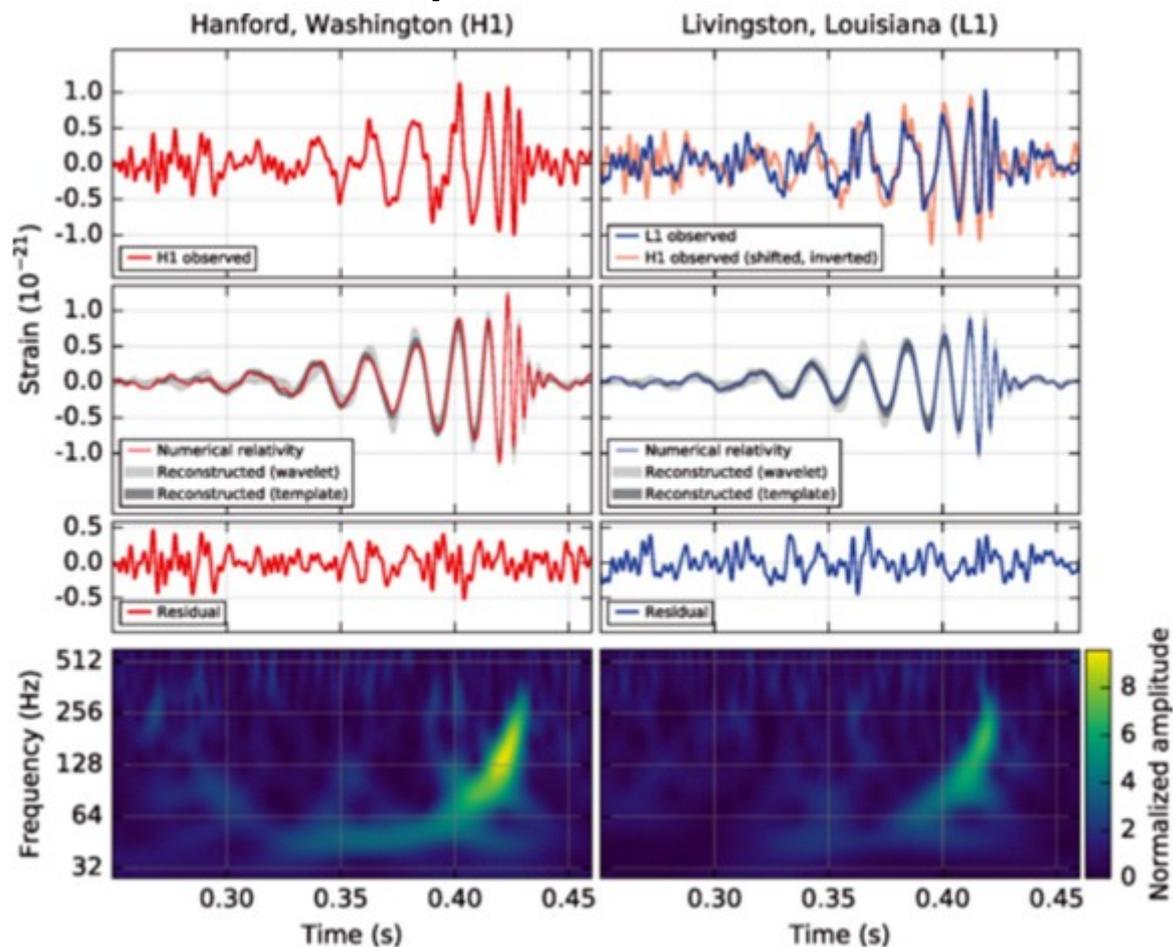
Desvantagem: A detecção só dá certo, se a fonte da onda se encontrar na direção verticalmente em cima do detector e a polarização for na direção dos braços. Para geometrias menos ideais, o sinal é mais fraco (normalmente fraco demais para ser detectado).

# 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 2 Buracos Negros.

Uma **2<sup>a</sup> detecção** foi anunciada 15/06/2016 (observada 26/12/2015).



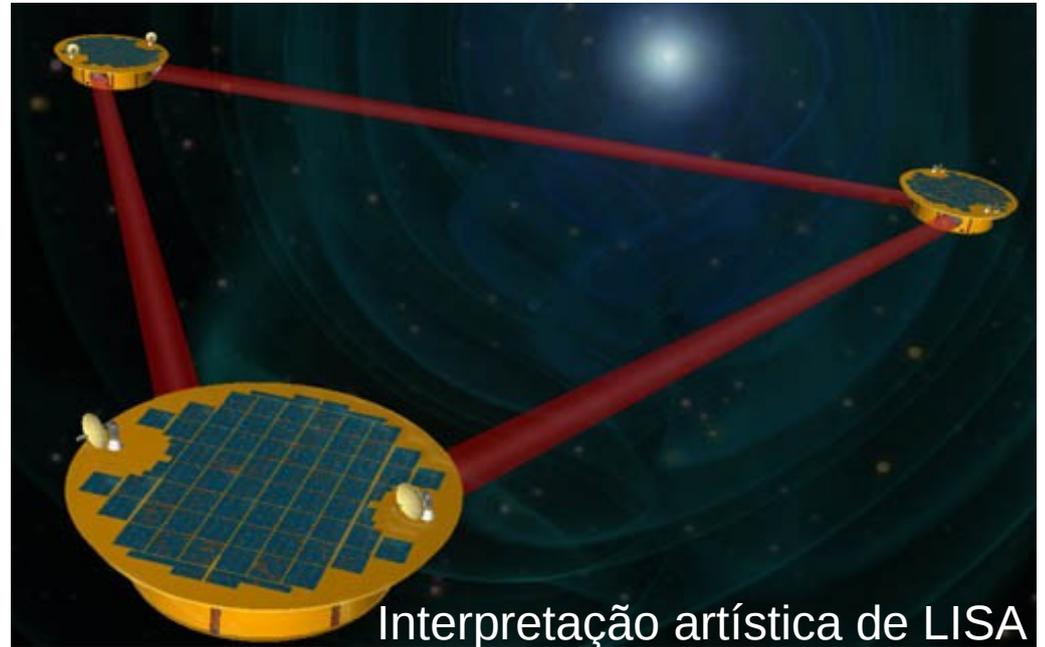
# “Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Se a detectabilidade de ondas gravitacionais se confirma, talvez algum dia poderemos observar aquelas emitidas na época da **Inflação** (=> aulas 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 2034 (?).

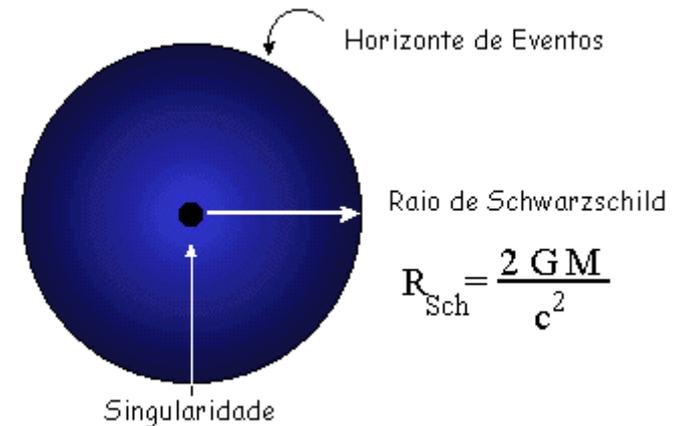
O Japão está desenvolvendo um telescópio similar, chamado DECIGO, a ser lançado em 2027.



Interpretação artística de LISA

# Buracos Negros

Empregando a **Relatividade Geral**, dá pra calcular a **distância**, chamada **Raio de Schwarzschild**  $R_S$ , a partir daquela a **luz** não consegue mais **escapar** da **influência** de uma **massa**  $M$ , resp. ela sofre um **redshift gravitacional infinito**.



Para a massa do Sol, esta distância é de 3 km.

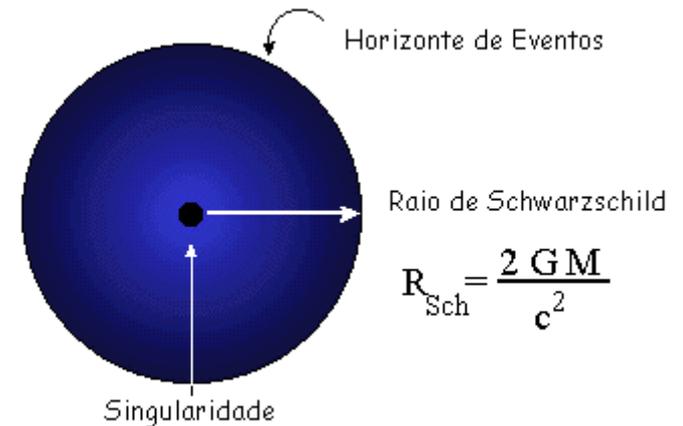
Se uma **massa** é **concentrada** em um **espaço menor** que a esfera delimitada pelo seu **Raio de Schwarzschild**, temos um **Buraco Negro**.

Buracos Negros eram hipotetizados, usando mecânica Newtoniana, em 1783 por John Mitchell:

$$\frac{1}{2}m \cdot v_{esc}^2 - GmM/R = 0 \Rightarrow R = 2GM/v_{esc}^2 = 2GM/c^2$$

# Buracos Negros

A **esfera** com este **raio** em torno do centro do Buraco Negro é chamada **Horizonte de Eventos**, e é vista como **limite exterior** do **Buraco Negro**.



O **Horizonte de Eventos** se chama assim, por que **não** se pode **ver além** dele (para dentro do Buraco Negro).

Fora do Horizonte de Eventos, um Buraco Negro de massa  $M$  **atrai** outras massas com a **mesma força** que qualquer outra **massa** de quantia  $M$ .

=> Um **Buraco Negro não suga!**

# Buracos Negros

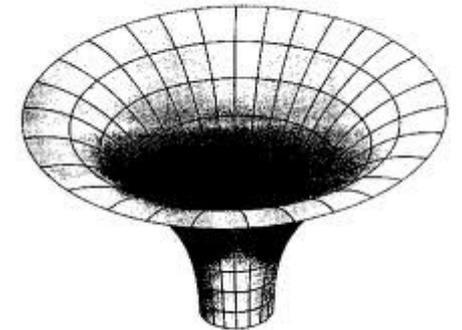
Alguns efeitos bizarros acontecem no **Horizonte de Eventos**:

A **dilatação do tempo** e o **redshift gravitacional** se tornam **infinitos**.

O que significa isto?

Se você joga um relógio **para dentro** de um **Buraco Negro** e **observa** o relógio de fora:

- Ele **nunca alcança** o **Horizonte de Eventos**
  - Ele **anda** cada vez mais **lentamente**
  - Ele se torna cada vez mais **vermelho** e **menos brilhante** até ficar invisível,
- enquanto ele se **aproxima** do **Horizonte de Eventos**.



Espaço curvado por um Buraco Negro

# Buracos Negros

De fato, isto acontece também com o próprio material que está formando o Buraco Negro, p. e. uma estrela que está colapsando:

O material nunca alcança o Horizonte de Eventos.

=> A velocidade do colapso tende a zero antes de ele ser completado.

=> O Buraco Negro nunca fica pronto.

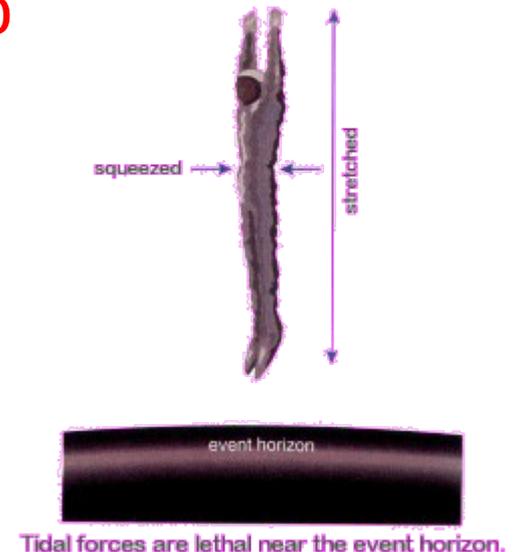
Em lugar disso temos uma estrela congelada, mas que é invisível mesmo assim, devido ao redshift gravitacional enorme.

Em conclusão, visto de fora, Buracos Negros não existem (a não ser que eles são primordiais) mas, sim, objetos extremamente similares a Buracos Negros.

# Buracos Negros

Para o relógio, ou um amigo **caindo para dentro** do Buraco Negro, a coisa é bem **diferente**:

Caso seja um **Buraco Negro Estelar**, infelizmente, o nosso amigo estará **destruído** por **forças de maré**, devido a diferenças da força nos pés e na cabeça **antes** de **alcançar** o **Horizonte de Eventos** (melhor fazer o experimento com um inimigo).



Mas tem esperança:

Os **Buracos Negros Supermaciços**, nos centros de galáxias têm **massas** e, portanto, **raios de Schwarzschild, maiores**.

Aquele no centro da Via Láctea tem uma massa de 3.7 mio.  $M_{\text{Sol}}$ , e portanto, um Raio de Schwarzschild de 12 mio. km.

=> **forças de maré** mais **fracas**. => ele pode sobreviver.

# Relatividade

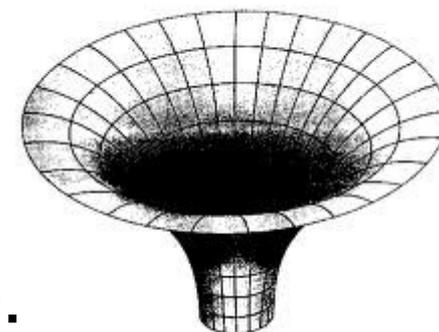
E o que ele vê, caso sobrevive?

Ele **alcança**, sim, o **Horizonte de Eventos** em um **tempo** finito, na verdade, **muito curto**.

Olhando para trás, ele vê:

- o **nosso tempo** andando cada vez mais **rapidamente**, até alcançar **rapidez infinita**,
- nós nos tornando cada vez mais **azul**, enquanto ele se **aproxima** do **Horizonte de Eventos**.

Apesar de o nosso tempo se tornar infinitamente rápido pra ele, ele não verá a história do Universo até o fim, porque a luz de lá nunca alcança ele (e ele nunca vai poder nos contar, o que ele viu).



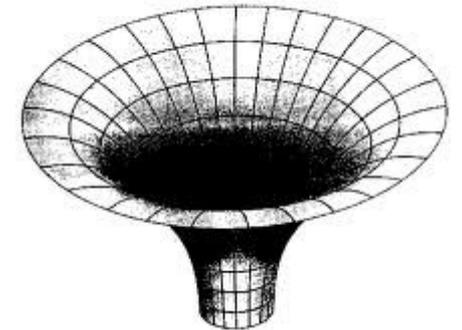
Espaço curvado por um Buraco Negro

# Buracos Negros

E o que tem **dentro** de um Buraco Negro?

De alguma forma, deve ter **toda a matéria** daquela ele foi feito (p. e. do caroço colapsado da estrela explodida), mas em uma forma extremamente **densa** que **não** conseguimos descrever com a **física atual**.

Segunda a teoria, tem uma **singularidade** no **centro**, um estado de **densidade** e **curvatura infinitas**.



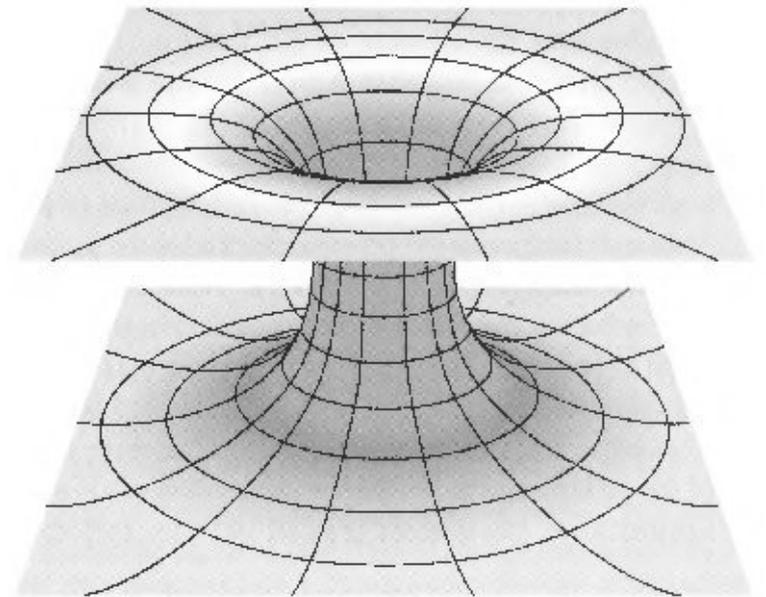
Espaço curvado por um Buraco Negro

# Buracos Negros

Gargantas de Schwarzschild, Pontes Einstein-Rosen e Buracos de Minhoca

Algumas Teorias postulam **reaberturas** do **Espaço-Tempo** **atrás** do **Horizonte de Eventos**, que poderiam servir como **túneis** para **lugares/épocas distantes** do **Universo** ou Universos paralelos mas, por enquanto, estas têm mais a ver com o domínio da Ficção Científica.

Cálculos deste tipo de objeto **não** conseguem criar **mecanismos** para passar algo de um lado pro outro, ainda menos sem enfrentar coisas desagradáveis como singularidades no caminho.



# Buracos Negros

## As Grandezas que Caracterizam um Buraco Negro

Como **informação** do Buraco Negro **não** tem como **chegar** em **nós**, as **únicas propriedades** que conseguimos **determinar** de **fora** são as que ele já tinha **antes** do colapso, e que foram **conservadas**, os seus:

- **Massa**
- **Momento Angular**
- **Carga** (deve ser desprezível, por que cargas positivas e negativas são sempre encontradas juntas, tal que depois do colapso não deve ter nenhuma carga resultante significativa)

Além destas grandezas, não conseguiremos detectar **nenhuma estrutura**. Astrônomos dizem, que “Buracos Negros não têm cabelo”.

# Buracos Negros

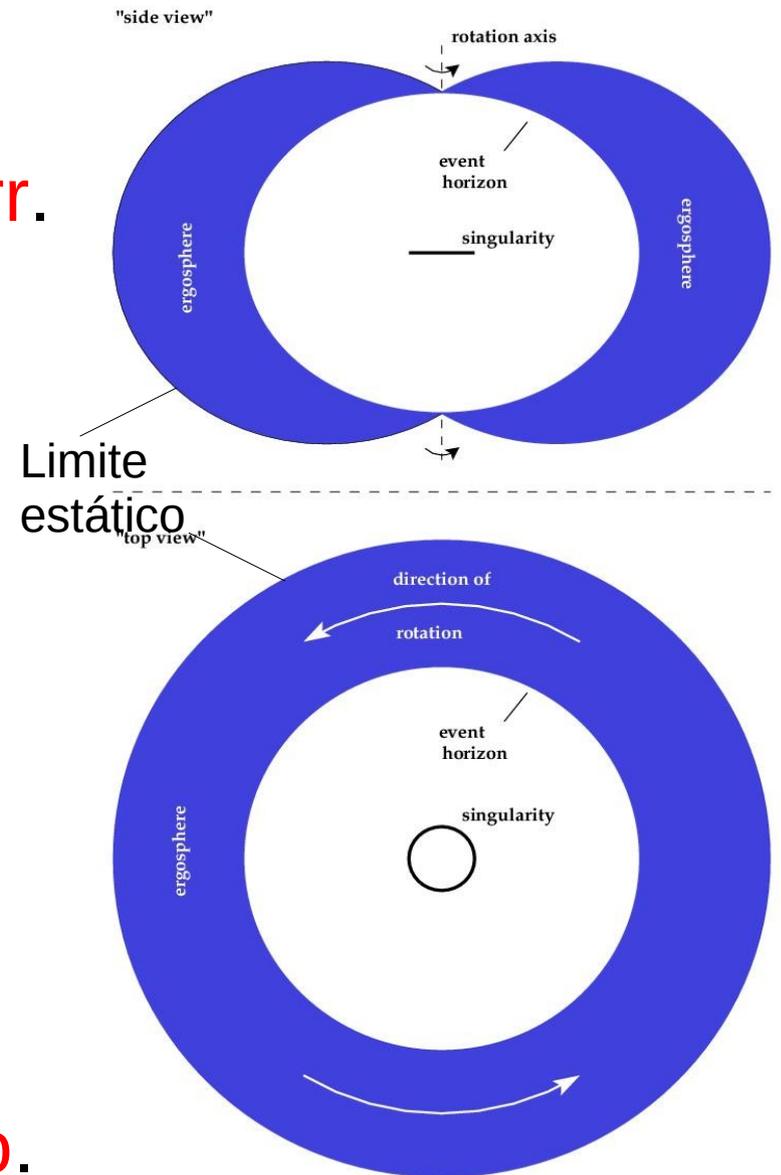
## Buracos Negros em Rotação

Chamados Buracos Negros de **Kerr**.

O **momento angular** de um Buraco Negro de Massa  $M$ , pode ser no **máximo**  $L_{\max} = GM^2/c$ .

O **Horizonte de Eventos** se **achata**, e a **singularidade** vira um **anel**.

O Buraco (na verdade, qualquer massa em rotação) faz o **Espaço-Tempo** em torno **girar junto**.

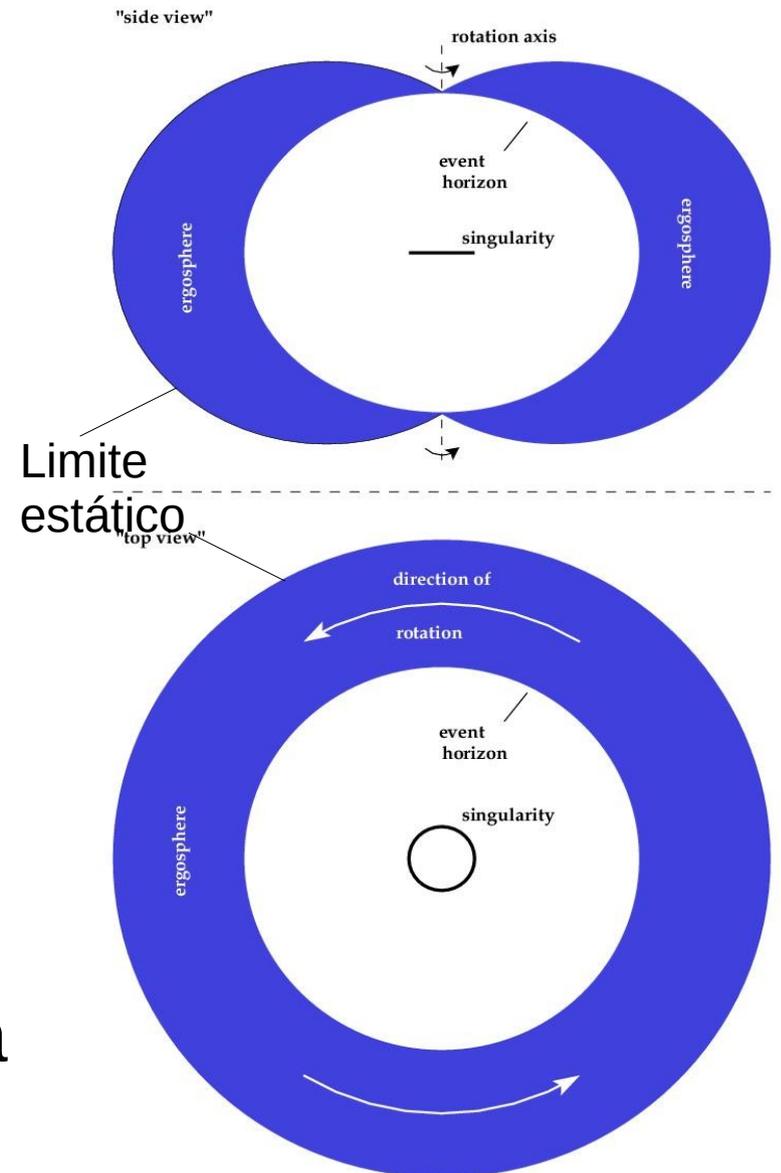


# Buracos Negros

## Buracos Negros em Rotação

Dentro de um limite chamado **Limite Estático**, esta **rotação** do **Espaço-Tempo** é tão **forte**, que **nada** consegue ficar “**parado**”. **Tudo é forçado a girar junto** com o Buraco Negro.

Entre o **Horizonte de Eventos** e o **Limite Estático** há uma região chamada **Ergosfera**, ainda fora do “limite sem retorno”, mas dentro da região “sem escapar da rotação”

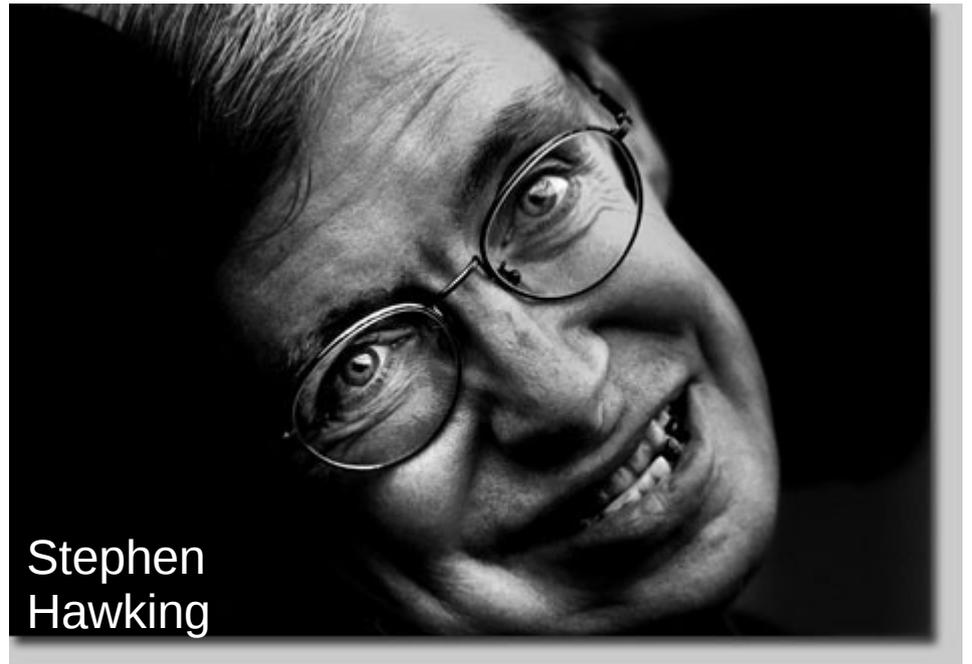


# Buracos Negros

## Radiação de Hawking

Classicamente, um **Buraco Negro**, uma vez formado, só pode **crescer** e deveria **existir por sempre**, como provado por **Stephen Hawking**.

Porém, o mesmo Stephen Hawking encontrou um **mecanismo quântico** que **possibilita a evaporação** de **Buracos Negros**, a **Radiação de Hawking**.



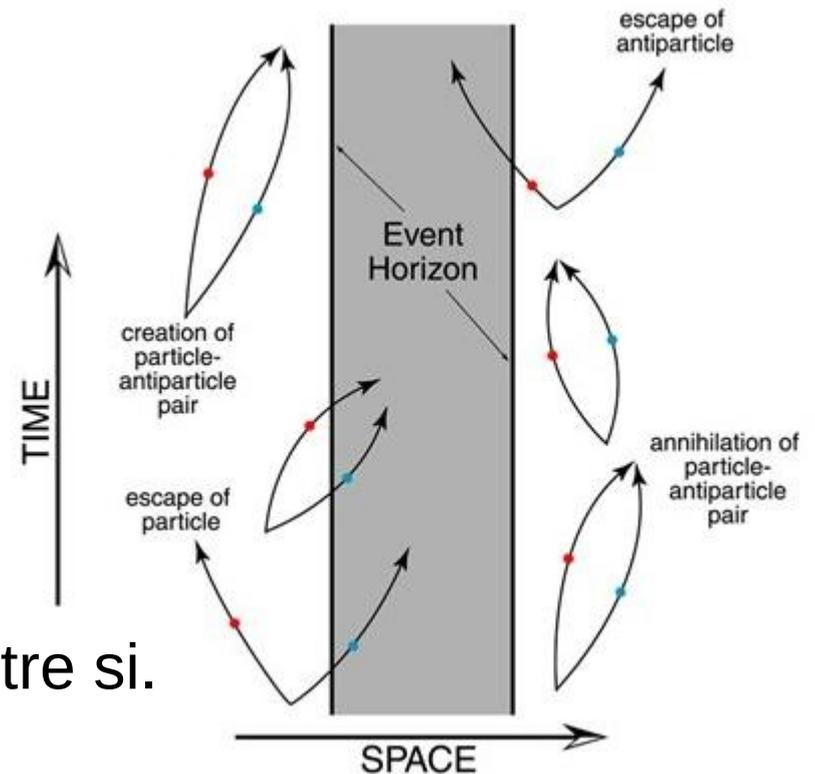
Stephen  
Hawking

# Buracos Negros

## Radiação de Hawking

Segundo ele, **pares de partícula-antipartícula** podem se **formar perto do Horizonte de Eventos** de um Buraco Negro, “**emprestando**” **energia gravitacional** do Buraco.

Esta energia é **devolvida** logo depois, quando as **partículas** se **aniquilam** entre si.



Mas de vez em quando pode ser que uma das partículas **cai no Buraco Negro** antes de se **aniquilar** com o seu parceiro.

O parceiro pode **escapar**, levando junto parte da **energia** “**emprestada**”.

=> O **Buraco Negro** **perde energia**, quer dizer, **massa**.

=> Ele **encolhe**.

# Buracos Negros

## Radiação de Hawking

A **perda** de **massa** é proporcional a  $M^{-2}$ , de modo que para **Buracos Negros** de **alta massa**, ela é muito **lenta**:

O tempo de vida de um Buraco Negro antes da sua evaporação é ( $h$  = constante de Planck):

$$t_{\text{evap}} = 2560 \cdot \pi^2 \cdot (2GM/c^2)^2 \cdot (M/h) \approx 2 \cdot 10^{67} (M/M_{\text{Sol}})^3 \text{ anos}$$

=> um Buraco Negro de uma massa solar levaria da ordem de  $10^{67}$  anos para evaporar.

Mas um hipotético **Buraco Negro primordial** de inicialmente  $\sim 10^{11}$  kg chegaria no seu fim mais ou menos **hoje**.

A **última erupção** seria mais **energética**, emitindo uns  $10^{13}$  W em raios  $\gamma$ ,  $e^-$ ,  $e^+$  e outras partículas.

A **radiação  $\gamma$**  de uma **erupção** destas poderia ser **detectável** (mas não foi detectada ainda).

# Buracos Negros

Que Tipos de Buracos Negros existem?  
(isto é, se eles existem)

Acredita-se que existem Buraco Negros

- **de Massas Estelares**, com massas de 3 a 15  $M_{\text{Sol}}$ ,  
resultados do **colapso** de **caroços** de **estrelas** de **alta**  
**massa**.

Candidatos foram detectados em sistemas binários.

- **de Massas Intermediárias**, 100 – 10'000  $M_{\text{Sol}}$ ,  
provavelmente encontrados como **fontes ultraluminosas**  
**de raios X** nos **centros** de alguns **aglomerados**  
**globulares** e **galáxias anãs**

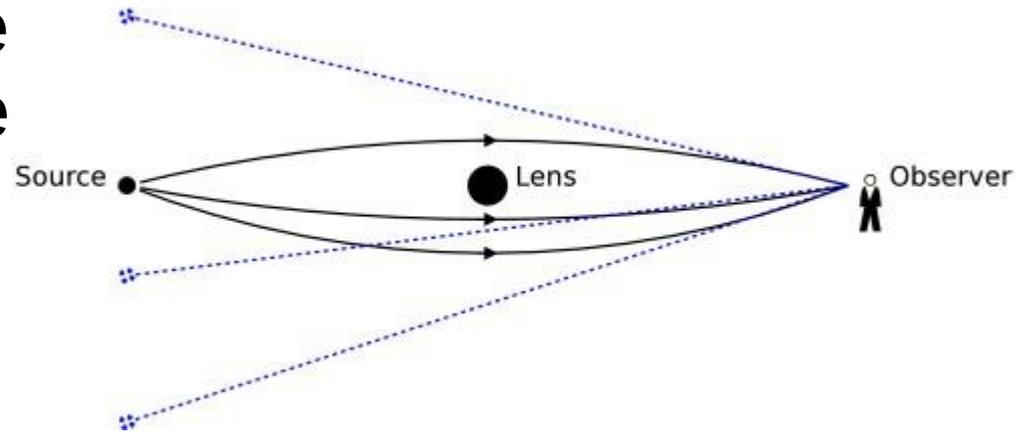
# Buracos Negros

## Que Tipos de Buracos Negros existem?

- **Supermaciços**, de alguns 100'000 a bilhões de massas solares, nos **centros** de **galáxias**, p. e. na Via Láctea. Alguns se manifestam por radiação forte pelo disrompimento do material em volta => Quasares.
- **Primordiais**,  $10^{-8}$  kg –  $100'000 M_{\text{Sol}}$ , formados nos **primeiros instantes** do **Universo**.  
**Não** foram **detectados** ainda, talvez poderão ser detectados pela **radiação de Hawking** no hora de eles **evaporarem**.

# 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.

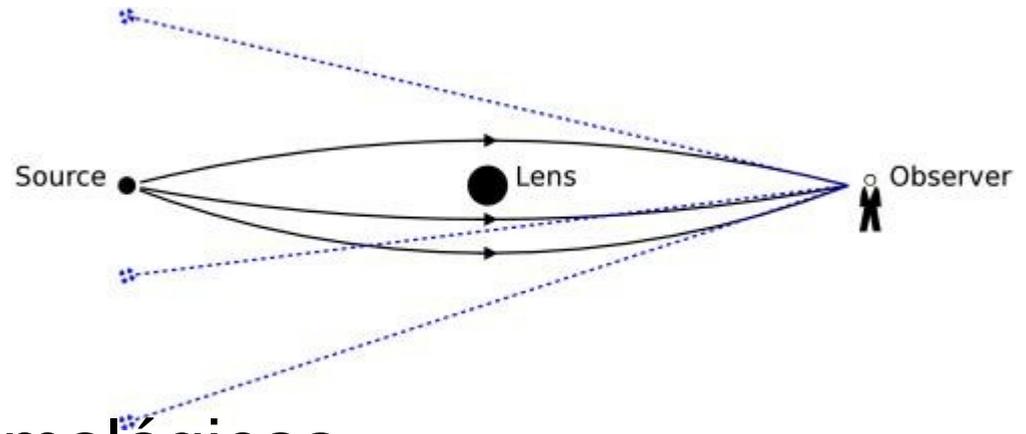
Lentes gravitacionais nos fornecem uma maneira direta de medir **massas** e **distâncias**, sem precisar fazer suposições sobre a natureza da matéria. Eles podem fornecer informações sobre a **fonte** ou sobre a **lente**.

# 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



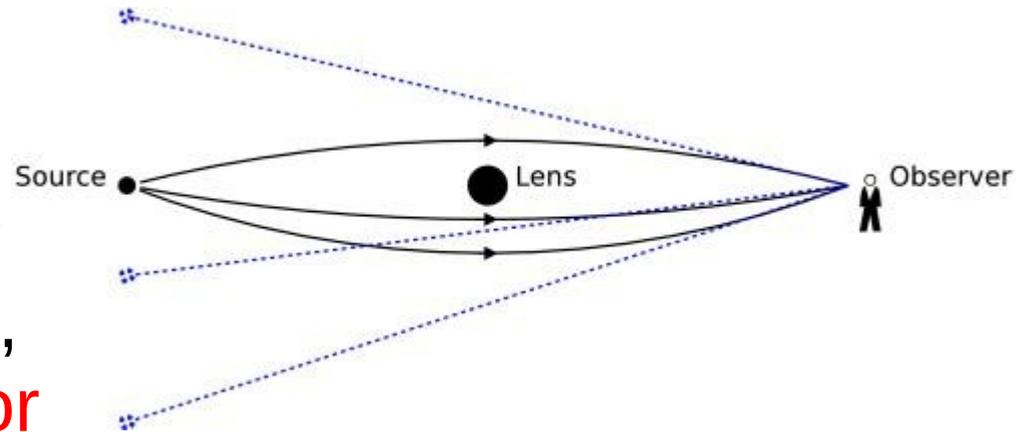
# Lentes Gravitacionais

## O que acontece?

A **luz** vindo de uma **fonte** astronômica é defletida por uma **massa** chamada **lente**, entre a **fonte** e o **observador** (a Terra),

o que pode levar ao **deslocamento**, à **magnificação** ou à **distorção** da **imagem** da fonte.

Também podem surgir **imagens múltiplas** da fonte.



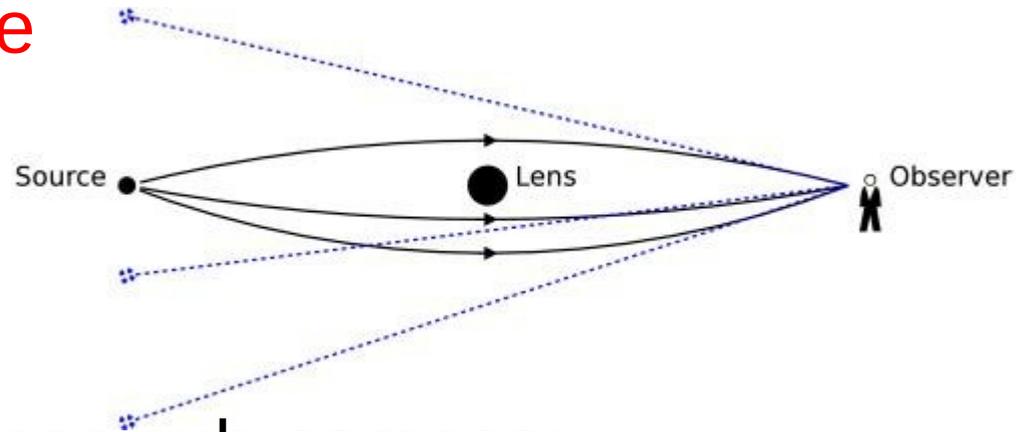
# Lentes Gravitacionais

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:

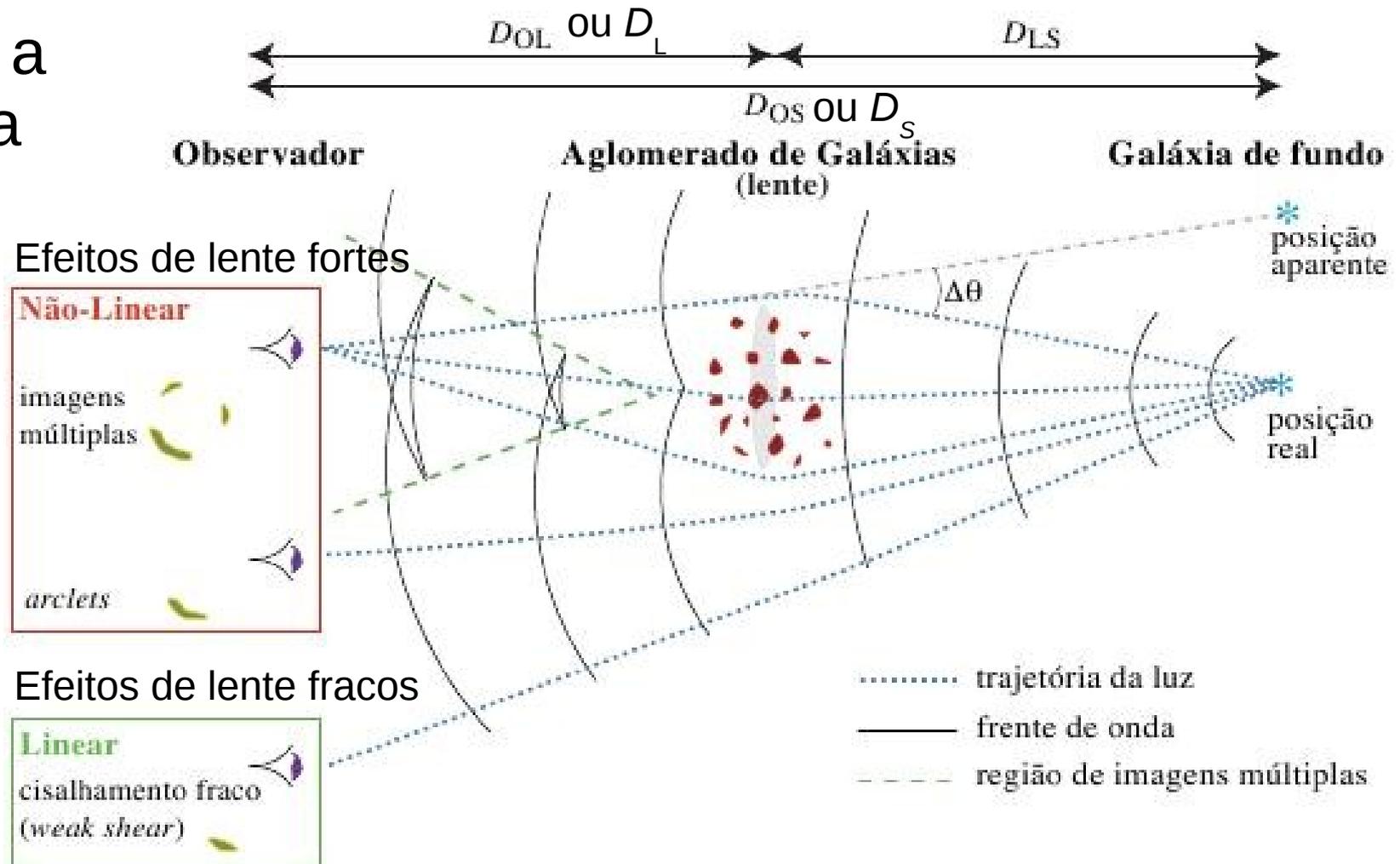
- **Lensing forte**: imagens múltiplas, distorções fortes da imagem, como anéis e arcos;  
as lentes são galáxias e aglomerados de galáxias
- **Lensing fraco**: distorções fracas da imagem, cisalhamento; lentes: galáxias e aglomerados
- **Microlensing**: magnificação da luz da fonte;  
lentes: MACHOs (MAssive Compact Halo Objects), exoplanetas, ...



# Lentes Gravitacionais

## Efeitos de Lente fortes e fracos

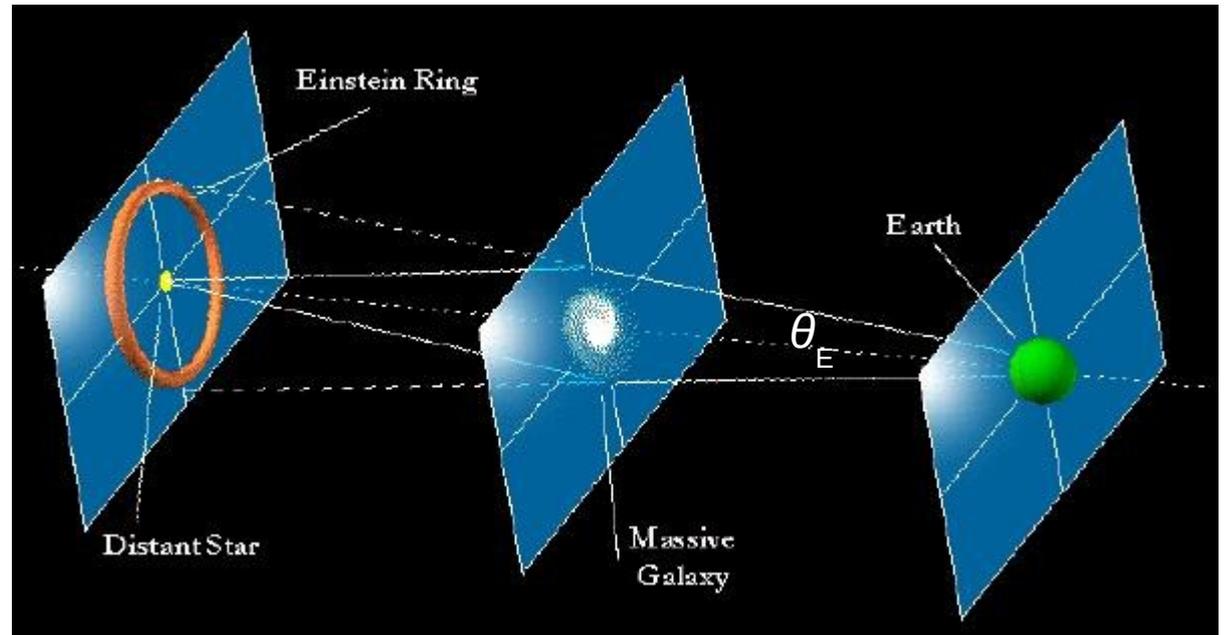
Supondo a geometria ao lado.



# 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**  $\theta_E$ : 
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L}}$$

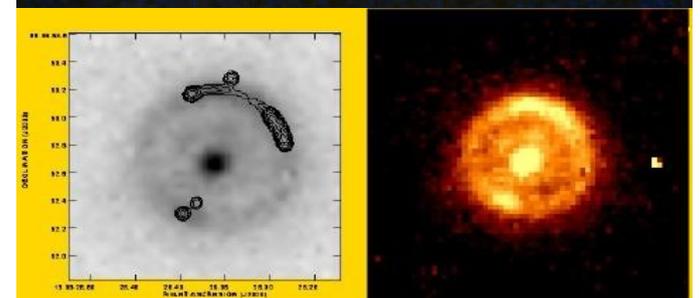
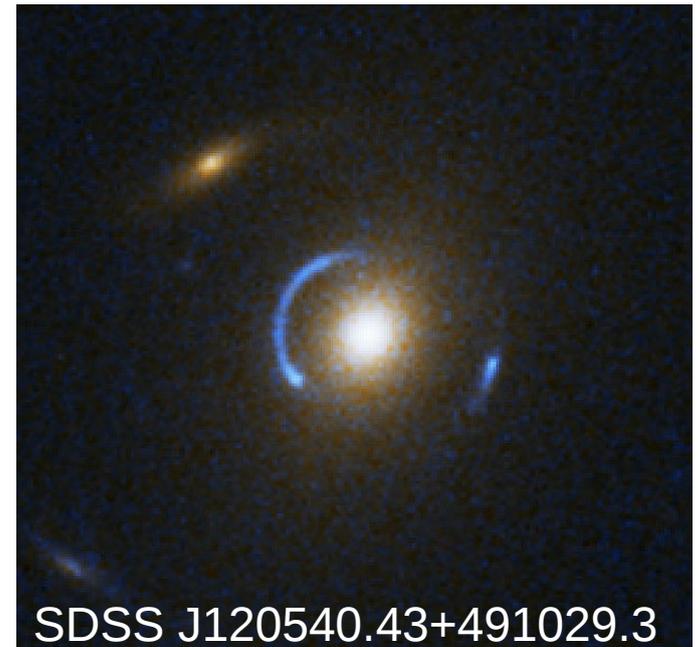
Conhecendo as distâncias (i. e. pelos redshifts), o **raio** de um **anel de Einstein** nos dá a **massa**  $M$  da **lente**.

# 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  $10^{12} M_{\text{Sol}}$ .



The gravitational lens JVAS B1938+666

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

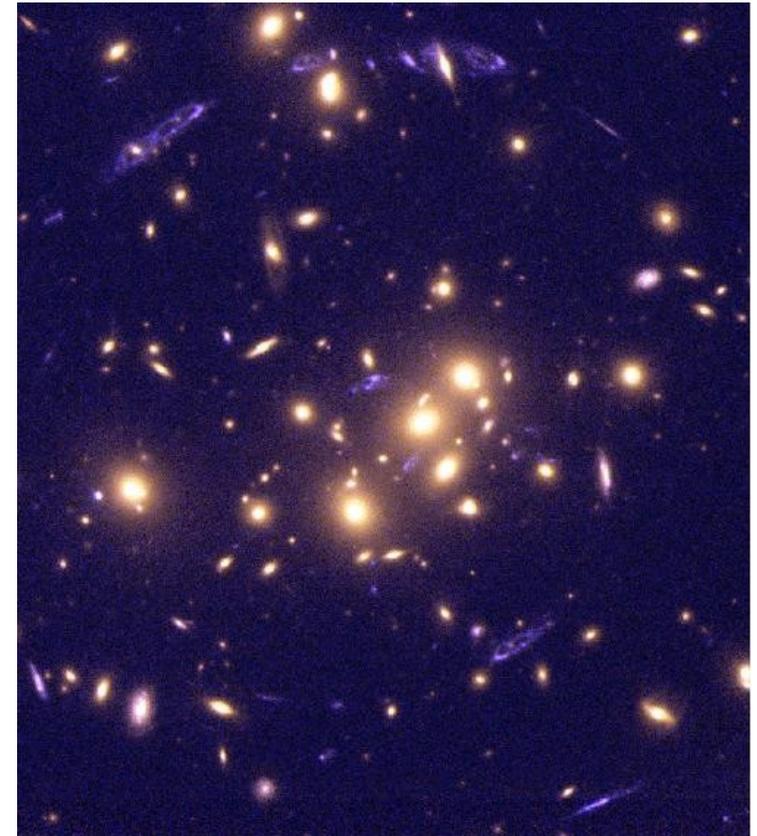
# Lentes Gravitacionais

## 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

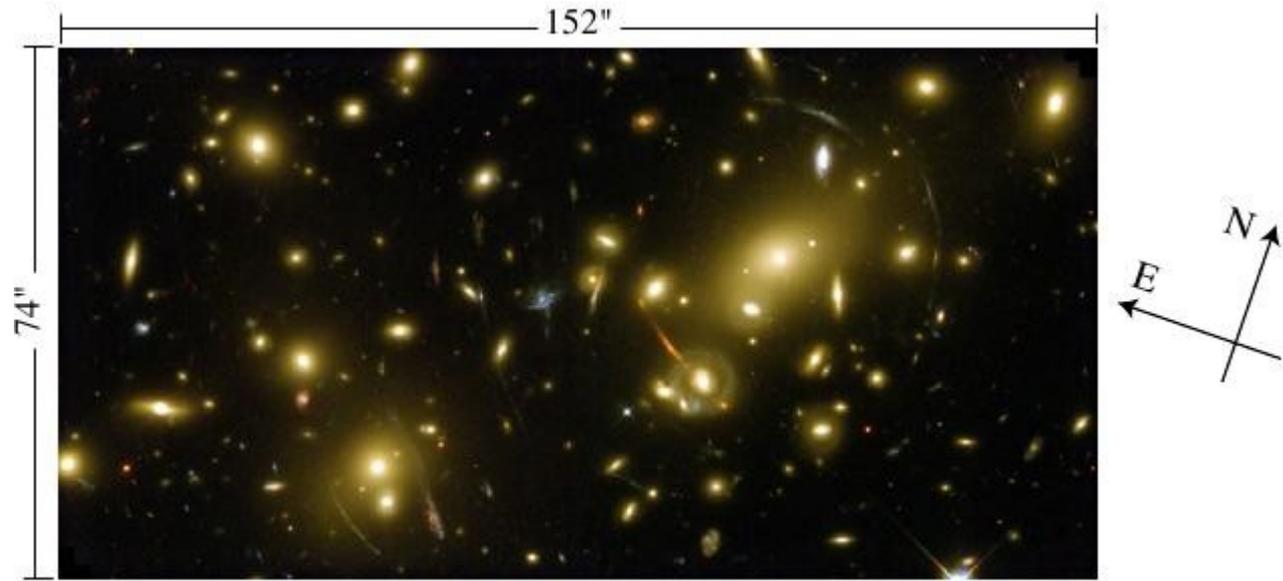
Aqui outro aglomerado com arcos.

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

=> **Aglomerados** de **massas** em torno

de  $10^{14} M_{\text{Sol}}$ , em **concordância** com as **massas encontradas** por **outros métodos** (teorema virial, emissão do gás interaglomerado; => aulas cosm.).

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



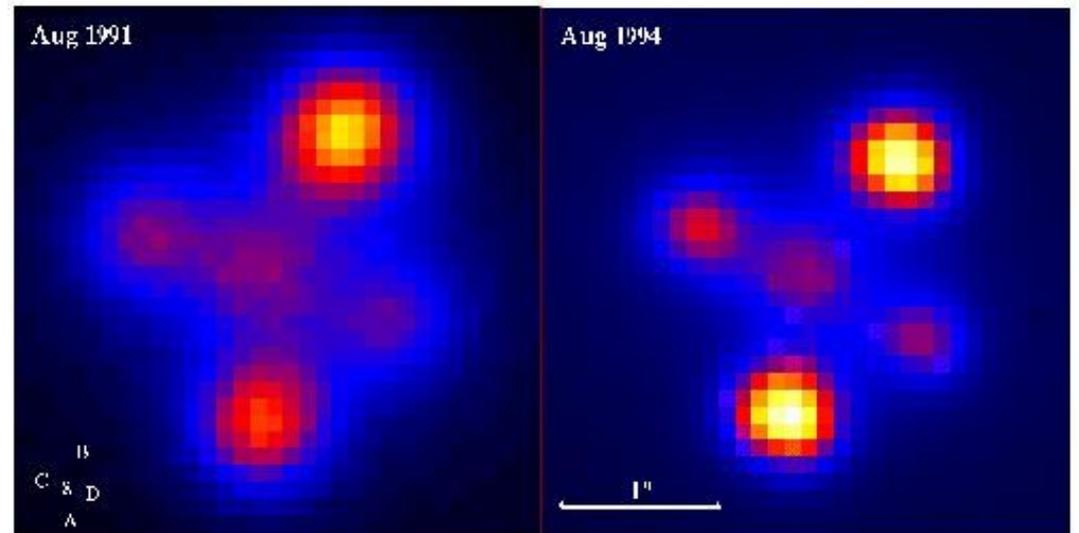
O Aglomerado de galáxias Abell 2218

# Lentes Gravitacionais

## Imagens Múltiplas

Este **quasar** aparece em **quatro posições** no céu, por ser “lensado” por uma **galáxia** no caminho.

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

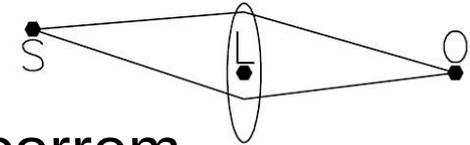


Duas imagens do quasar quadruplo Q2237+0305

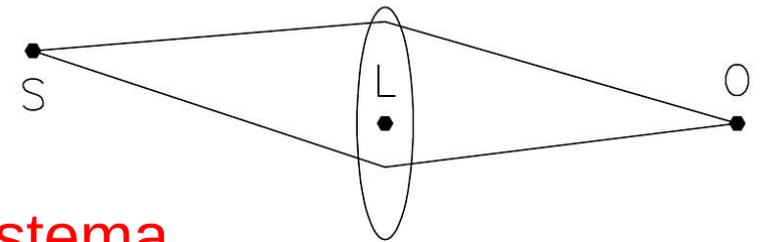
# Lentes Gravitacionais

## 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.

# Lentes Gravitacionais

## Lentes Não-Esféricas

**Perto da lente:**

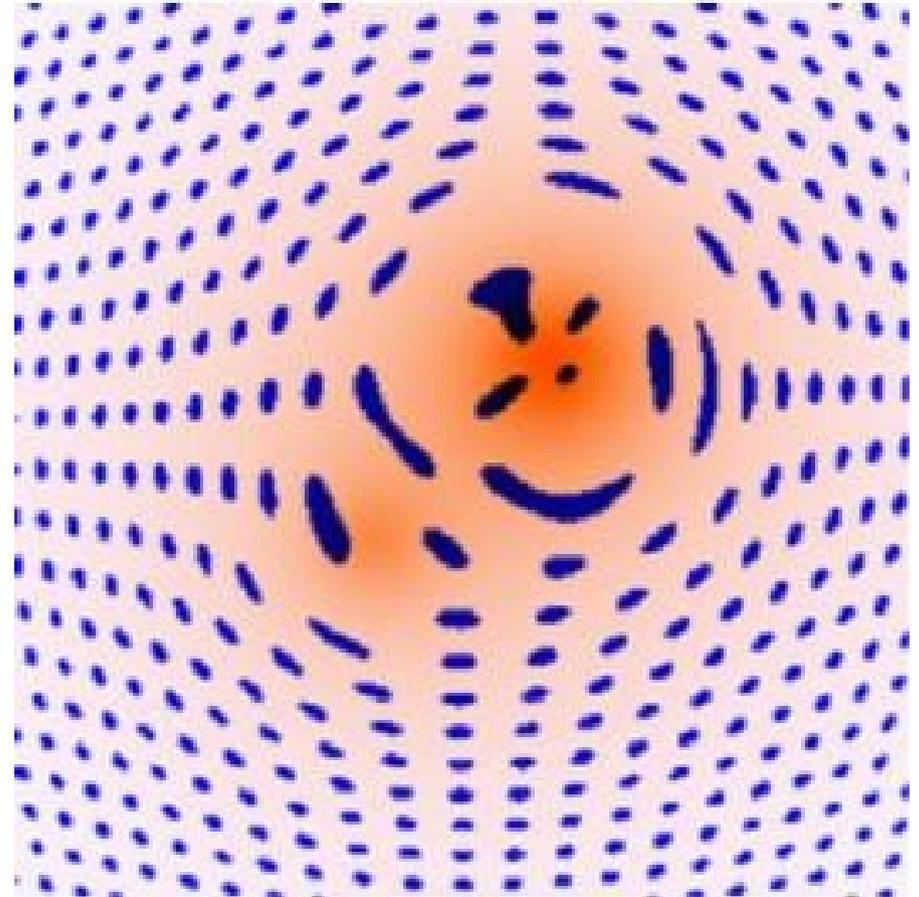
**Efeitos de lente fortes:**

**Imagens múltiplas,**  
**arcos grandes** com  $R \sim \theta_E$ ,  
**arclets** (“arquinhos”)

**Longe da lente:**

**Efeitos de lente fracas:**

**Distorções menores**  
chamadas **cisalhamento** e  
**convergência**.



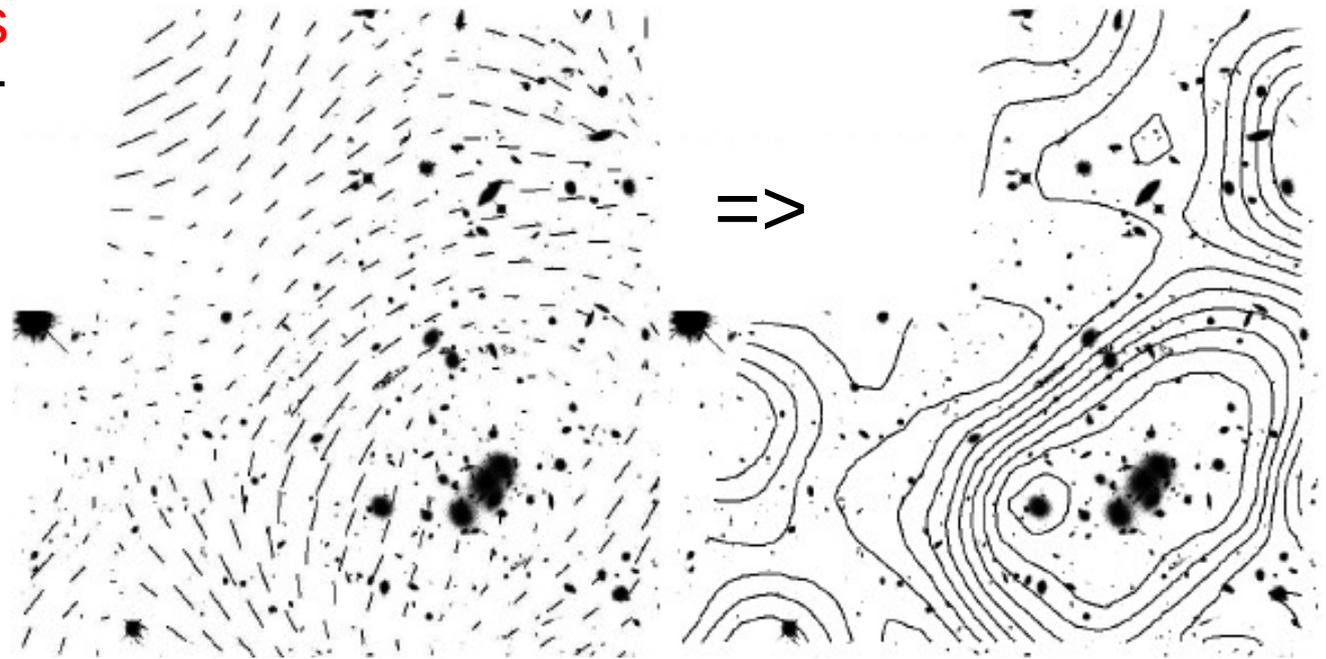
Simulação dos efeitos de lente de um aglomerado com duas concentrações de massa

# 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**.



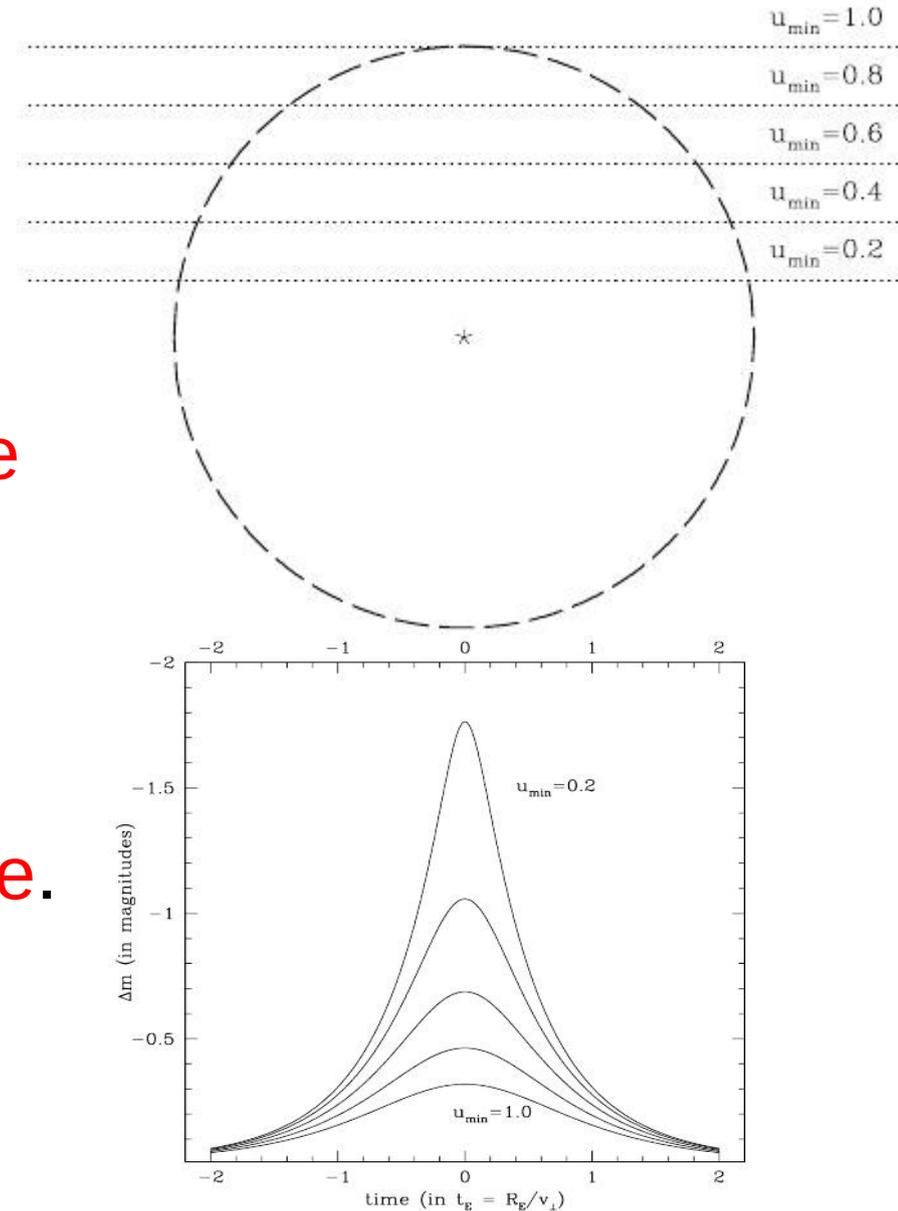
Campo de cisalhamento e distribuição de massa em torno de C10024

# Lentes Gravitacionais

## *Microlensing*

Uma **lente**, p. e. um **MACHO** (Anã Branca, Anã Marrom, estrela fraca, “Júpiter”), passando na **frente** de uma **fonte** (estrela) causa um **aumento** da **luminosidade** da fonte.

Dependendo do **alinhamento**, o **aumento** é **mais** ou **menos forte**.

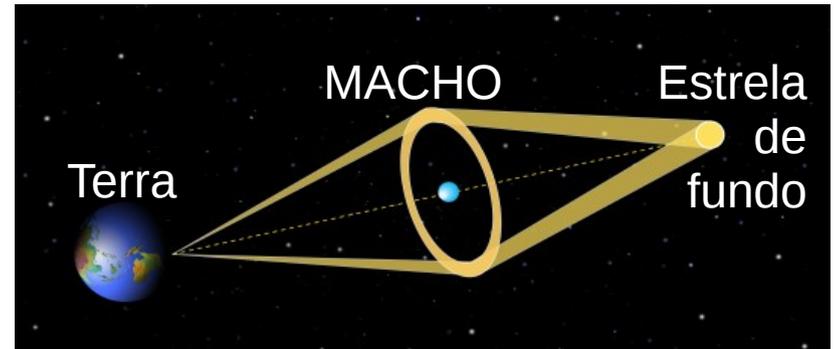


# Lentes Gravitacionais

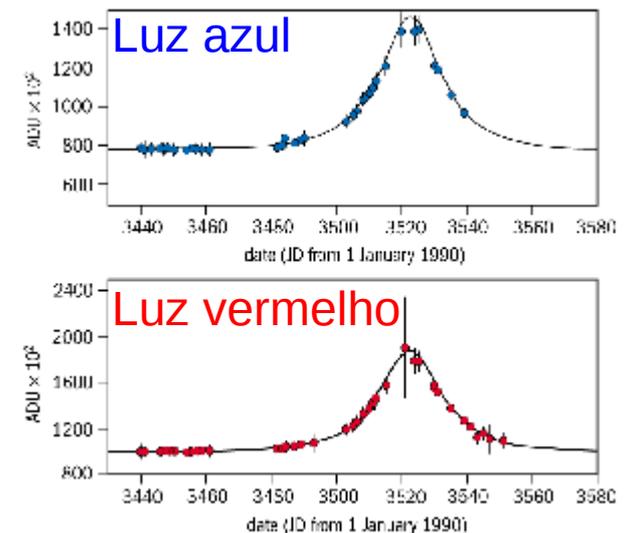
Eventos de *microlensing* se **distinguem** de outras **variações de luminosidade** por:

- 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** (=> próximas aulas).



Curvas de luz de uma estrela durante um evento de microlensing





Universidade Federal do ABC

# Teoria da Relatividade

**FIM PRA HOJE**