



Universidade Federal do ABC

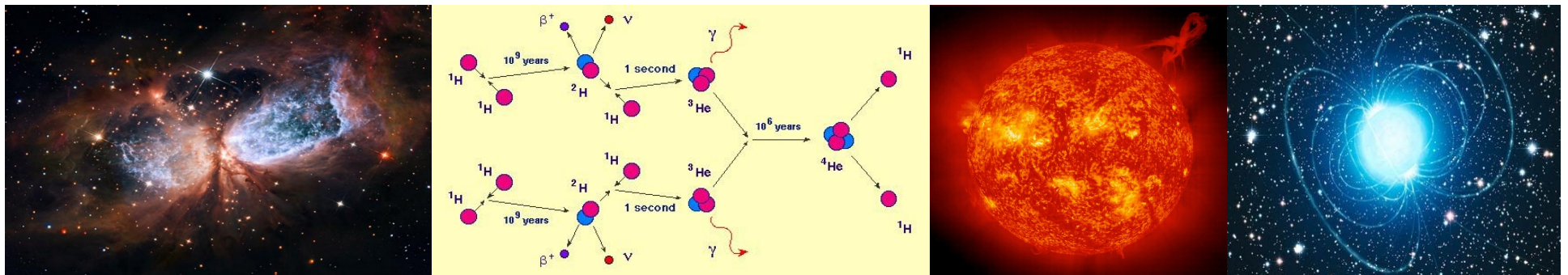
Introdução à Física Estelar

18. Relatividade e Buracos Negros

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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

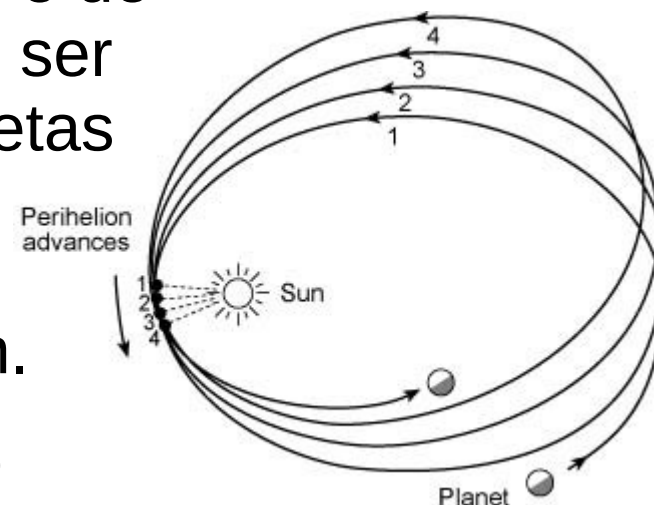
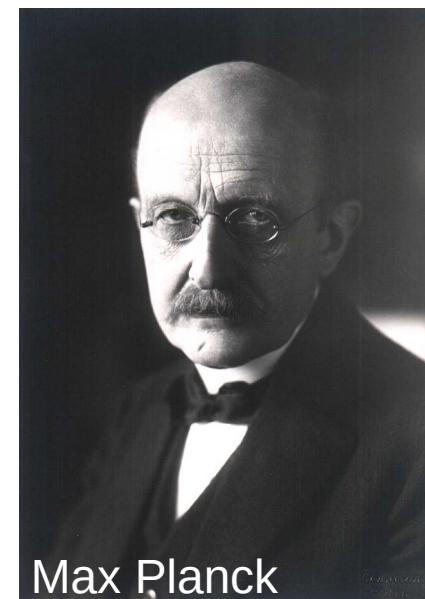


Relatividade

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** (\Rightarrow aula Sol), e o excesso da **precessão** do **periélio** da **órbita** de **Mercúrio** ($43''/\text{século}$; a precessão total é de $9'34''/\text{século}$, mas os demais $8'49''$ podiam ser explicados pela influência dos outros planetas e pela forma oblata do Sol), problemas, cuja resolução levou a um novo ramo da física, a **Teoria da Relatividade** de Einstein.

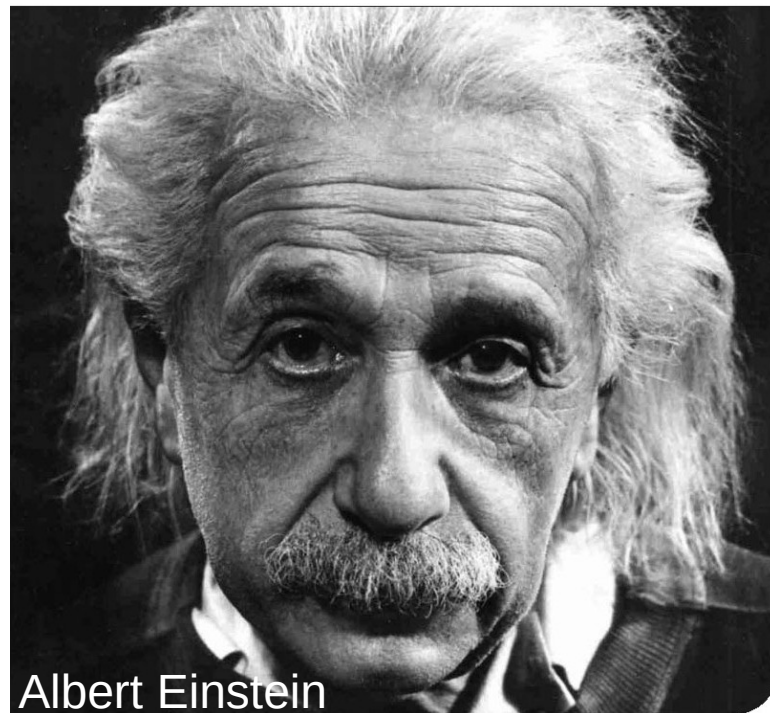
O próprio Max Planck acabou se tornando um dos fundadores da mecânica quântica.



Relatividade

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

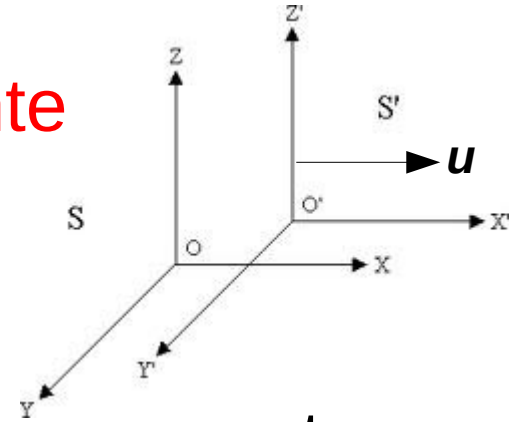
Ela afirma que as **propriedades** (geometria, eixo do tempo) de **espaço** e **tempo** dependem da situação do **observador**, do seu **estado** de **movimento** (velocidade, aceleração), e a sua **posição** em relação a **massas altas**.



Albert Einstein

A Transformação de Galileu

Considerando um **sistema** de **inércia** S' se movimentando com **velocidade constante** $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ em relação a um sistema S , as origens dos dois sistemas coincidindo em $t = 0$.



=> pode-se **transformar** as **coordenadas** de um ponto $\mathbf{r} = (x, y, z)$ e o **tempo** usando a seguinte transformação:

$$\mathbf{r}' = \mathbf{r} - \mathbf{u}t$$

$$\Rightarrow x' = x - ut$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t \quad (\text{simultaneidade e tempo absolutos}),$$

que é a **transformação** de **Galileu**.

A Transformação de Galileu

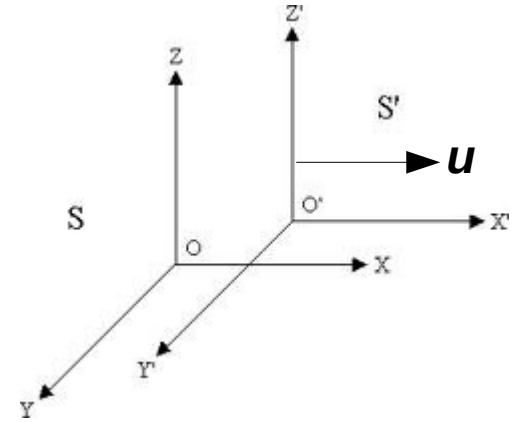
Velocidades se transformam assim:

$$\mathbf{v}' = d\mathbf{r}'/dt' = d(\mathbf{r}-\mathbf{u}t)/dt = d\mathbf{r}/dt - \mathbf{u}t/dt = \mathbf{v} - \mathbf{u}$$

$$\Rightarrow v'_x = v_x - u$$

$$v'_y = v_y$$

$$v'_z = v_z$$



e acelerações: $\mathbf{a}' = d\mathbf{v}'/dt' = d(\mathbf{v}-\mathbf{u})/dt = d\mathbf{v}/dt = \mathbf{a}$

\Rightarrow **Acelerações** e, com isto, as **Leis de Newton** são **invariantes** na **Transformação de Galileu**.

\Rightarrow **Princípio de invariância de Galileu**:

As **leis fundamentais da Física** são as **mesmas** em **todos** os **sistemas de referência inerciais**.

Todos os **sistemas de referência inerciais** são **equivalentes**.

Não há um **sistema de referência absoluto**.

A Transformação de Galileu

Porém (final do século XIX):

Para as Leis do **Eletromagnetismo**, o **princípio** de **invariância** de **Galileu** parece falhar.

Exemplo: A força magnética $\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ aplicada em uma carga muda numa Transformação de Galileu.

=> As Leis do **Eletromagnetismo** parecem funcionar só em **um** determinado **sistema** de **referência**, que chamaram de **éter**.

Em particular, **ondas eletromagnéticas** devem se **propagar** pelo **éter** com a **velocidade**

$$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2} = 299\,792\,458 \text{ m/s,}$$

que pode ser **derivada** das **Leis** de **Maxwell**.

=> **Conflito** com o **Princípio** de **invariância** de **Galileu**.

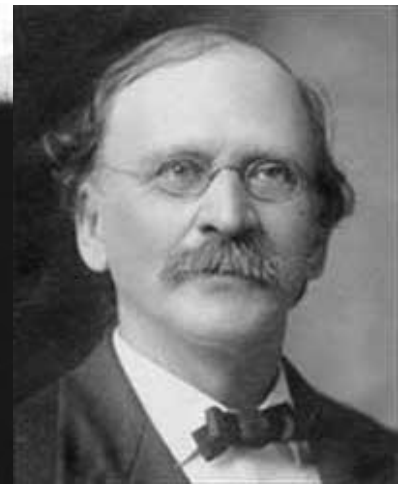
A Transformação de Galileu

O Experimento de Michelson-Morley

Em 1887 **Michelson** e **Morley** tentaram medir a **velocidade** da **Terra** em **relação** ao **éter**, medindo a **velocidade** da **luz** em **várias direções** e até em **várias épocas** do ano.



Albert Abraham
Michelson



Edward Williams
Morley

Eles encontraram um **resultado nulo**, quer dizer:

A **velocidade** da **luz** era a **mesma** em **todas** as **direções**, e **independente** da **velocidade** do **referencial** (a Terra), em **contradição** com a **Transformação** de **Galileu** $\mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}$.

=> **Crise** no **paradigma Newtoniano**.

Os Postulados de Einstein

Isto levou Einstein a fazer os seguintes dois **postulados** para a nova teoria:

- **O Princípio da Relatividade**: As **leis** da **física** são as **mesmas** em **todos** os **sistemas** de **referência inerciais**.
- **A Invariância da Velocidade da Luz**: A **luz** se movimenta pelo vácuo com uma **velocidade constante** c , que é **independente** do **movimento** da **fonte** da luz, ou do **observador**.

Outra condição:

- **Princípio de correspondência**: Para **velocidades baixas**, $u \ll c$, a nova teoria deve tender à **teoria newtoniana**.

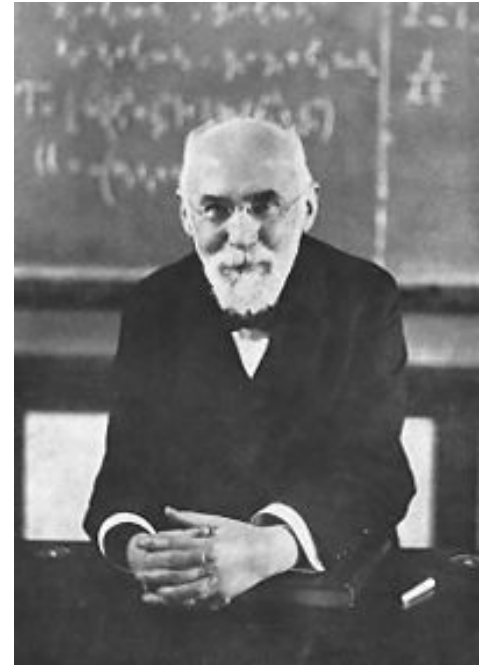
=> Encontrar novas **Transformações** que garantem isto.

A Transformação de Lorentz

Na **Relatividade Restrita**, a transformação de coordenadas na **troca** de **referencial**, i. e. no caso “Sistema S' se movimentando com $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ em relação a S ” é realizada pela

Transformação de Lorentz (1904):

Esta transformação é às vezes chamada **boost** pela velocidade \mathbf{u} (neste caso, na direção dos x).



Hendrik Antoon
Lorentz (1853-1928)

A Transformação de Lorentz

Mesma situação: Sistema S' se movimentando com $\mathbf{u} = (u, 0, 0)$ em relação a S .

Demos uma olhada nas seguintes transformações, chamadas **Transformações de Lorentz**:

$$x' = \gamma \cdot (x - ut)$$

$$y' = y$$

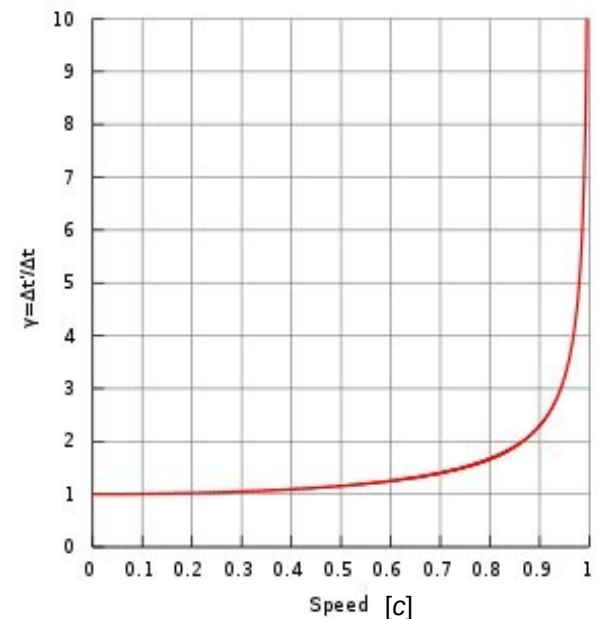
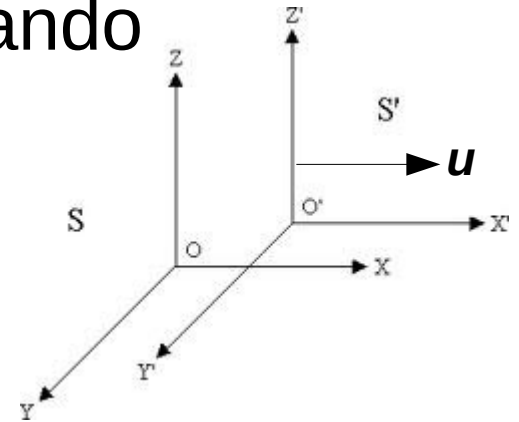
$$z' = z$$

$$t' = \gamma \cdot (t - ux/c^2),$$

onde $\gamma := 1/\sqrt{1-u^2/c^2} = 1/\sqrt{1-\beta^2}$
= **fator de Lorentz**, $\beta := u/c$

$$\gamma(u=0) = 1$$

$$\gamma(u=c) = \infty$$



A Transformação de Lorentz

Exercício: mostre que, aplicando esta transformação em (x',y',z',t') usando $-u$ em lugar de u , obtém-se (x,y,z,t) de volta.

=> As **transformações inversas** são as **mesmas**, substituindo u por $-u$, como deveria ser, já que S se movimenta com $-u$ em relação a S' .

Exercício 2: Mostre que, para $u \ll c$, estas transformações se tornam as transformações de Galileu.

A Transformação de Lorentz

É útil introduzir o **Diagrama Espaço-Tempo**

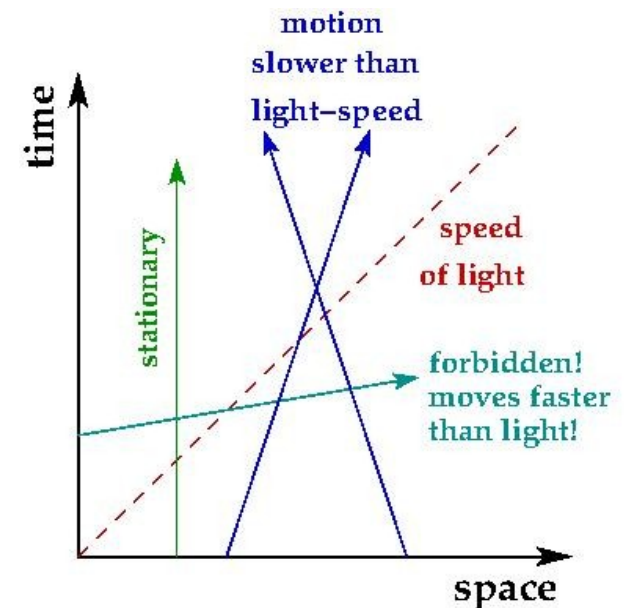
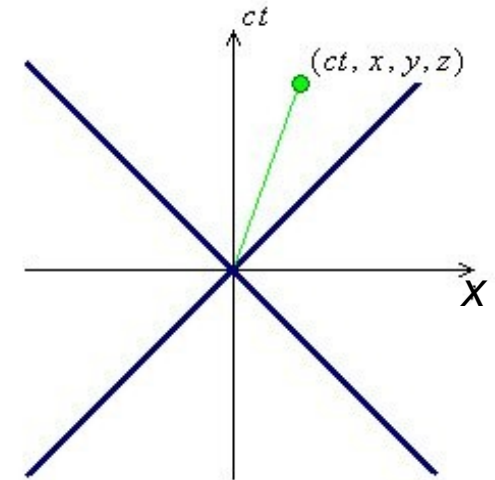
eixo **horizontal**: x

eixo **vertical**: t , multiplicado pela velocidade da luz, c , para que os eixos tenham as mesmas unidades (de distância).

y e z são **ignorados**, já que tudo que é interessante acontece nas dimensões x e t .

Retas no diagrama representam objetos viajando com **velocidades constantes**, quanto **mais rapidamente**, tanto **menos inclinadas**.

Uma inclinação de 45° corresponde à **velocidade da luz**.



A Transformação de Lorentz

Dando uma olhada de novo para estas transformações:

$$x' = \gamma \cdot (x - ut)$$

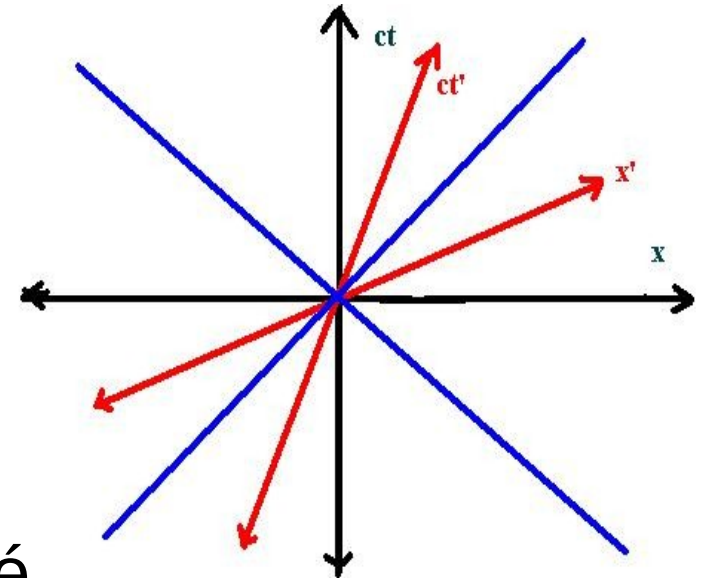
$$t' = \gamma \cdot (t - ux/c^2)$$

Elas **misturam espaço** (x) e **tempo**!

O que pro **observador** em S é **espaço** é (parcialmente) **tempo** pro **observador** em S' , e vice-versa.

Eventos que acontecem na **mesma posição** para S , **não** necessariamente acontecem na **mesma posição** para S' .

Eventos que são **simultâneos** para S , **não** necessariamente são **simultâneos** para S' .



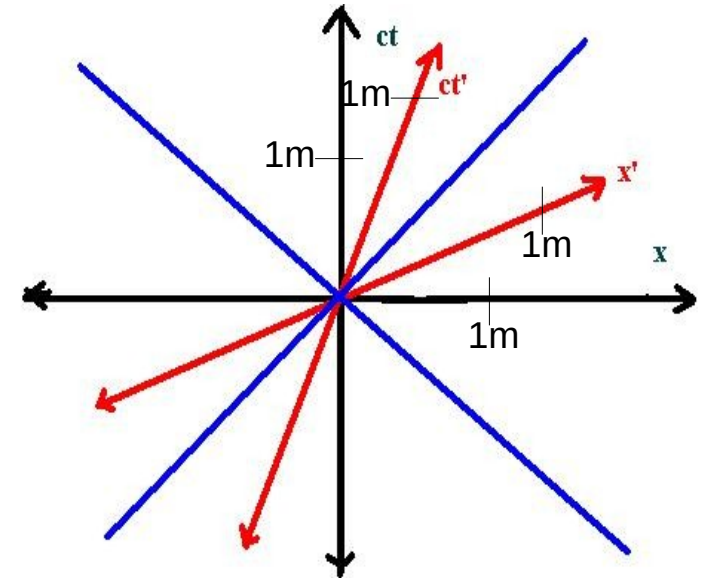
A Transformação de Lorentz

As quatro dimensões x , y , z e t (multiplicado por c) juntos definem um espaço **4-dimensional**, o **Espaço-Tempo**.

Definimos como **evento** um ponto no Espaço-Tempo, (x, y, z, ct) .

!! Vários autores usam t como zero-ésima coordenada (e não como quarta): (ct, x, y, z) .

!! Na transformação de um sistema para outra, as **escalas não são conservadas**.



A Transformação de Lorentz

E a Invariância da Velocidade da Luz?

tomando um **fóton**, que estava na origem de S e S' em $t = 0$, viajando na direção $+x$.

Após um tempo t , ele está em $(x=ct, 0, 0)$.

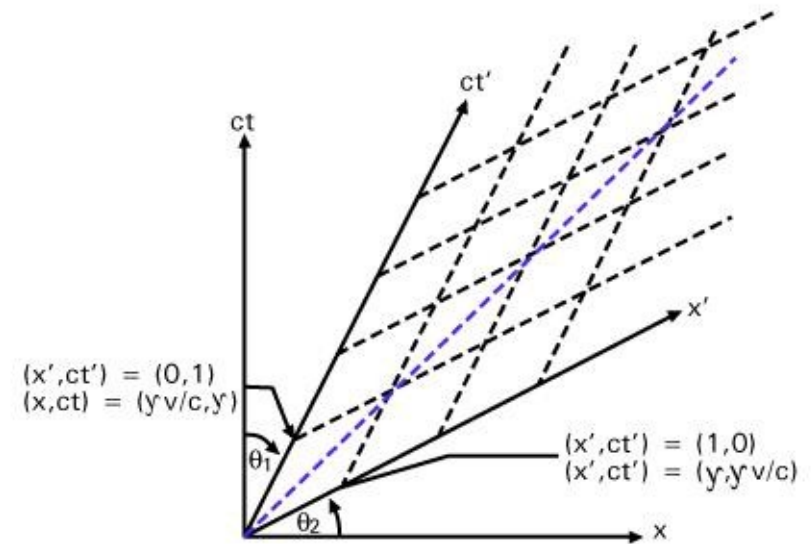
E no sistema S' :

$$t' = \gamma \cdot (t - ux/c^2), \quad x' = \gamma \cdot (x - ut)$$

=> neste sistema, o fóton viajou com velocidade

$$x'/t' = \gamma(x - ut) / \gamma(t - ux/c^2) = (ct - ut) / (t - uct/c^2) = c$$

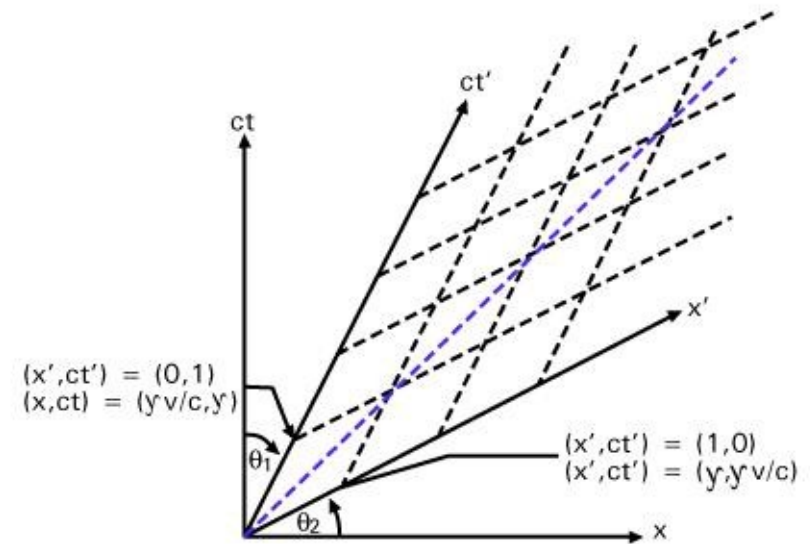
Também com c !



A Transformação de Lorentz

=> O postulado da **invariância** da **velocidade** da **luz** é **satisfeito**, pelo menos para luz viajando na direção $+x$, e dá pra mostrar para luz viajando em qualquer direção.

Exercício: Mostre a invariância da velocidade da luz para luz viajando na direção $-x$ e para luz viajando na direção y .



Relatividade Restrita

Dilatação do Tempo

Supondo uma lâmpada que viaja junto com S' (S' é seu sistema de repouso), e que pisca duas vezes em t'_1 e t'_2 :

Em S : $\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma \cdot (t'_2 - t'_1 + (x'_2 - x'_1)u/c^2)$

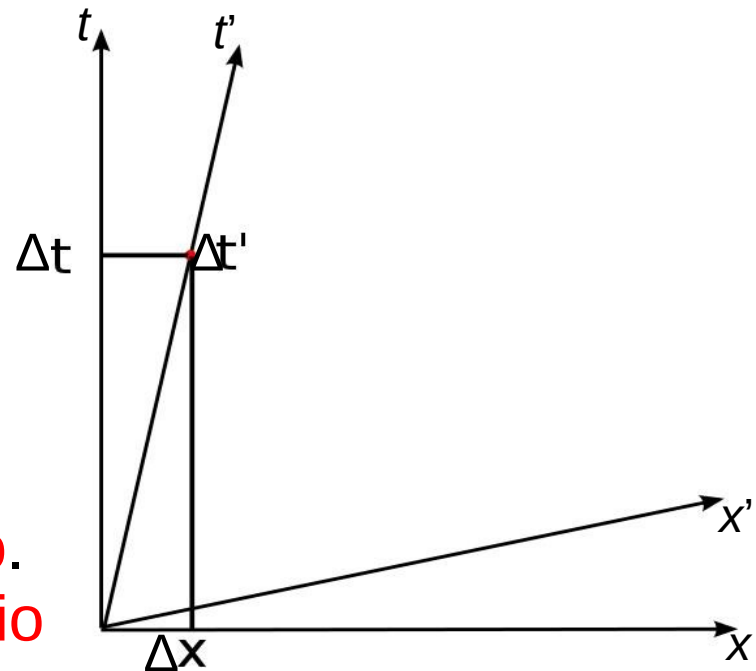
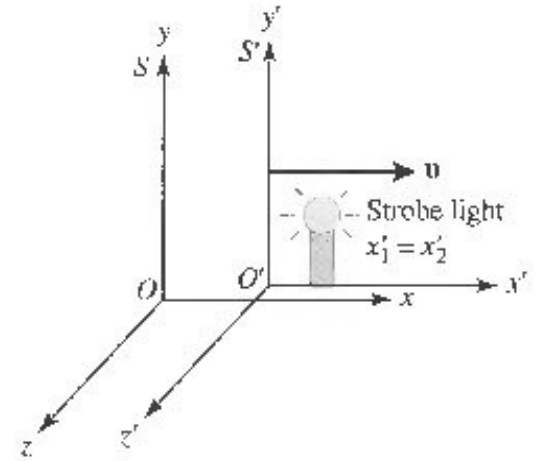
mas $x'_2 - x'_1 = 0$, já que S' viaja junto.

$\Rightarrow \Delta t = \gamma \cdot (t'_2 - t'_1) = \gamma \Delta t' \geq t'$

Em S passa **mais tempo** entre os pulsos.

\Rightarrow **Dilatação do tempo.**

O **sistema de repouso** é aquele, naquele o **tempo** entre os **dois eventos** é o **mais curto**. O tempo deste sistema, t' , é o **tempo próprio** da lâmpada.



Relatividade Restrita

Contração de Comprimentos

Supondo uma barra com comprimento L' viajando junto com S' (seu sistema de repouso), L' obviamente é $x'_2 - x'_1$, a distância entre suas extremidades no instante $t'_1 = t'_2 = 0$.

$$\Rightarrow L' = x'_2 - x'_1 = \gamma \cdot (x_2 - x_1 - u(t_2 - t_1))$$

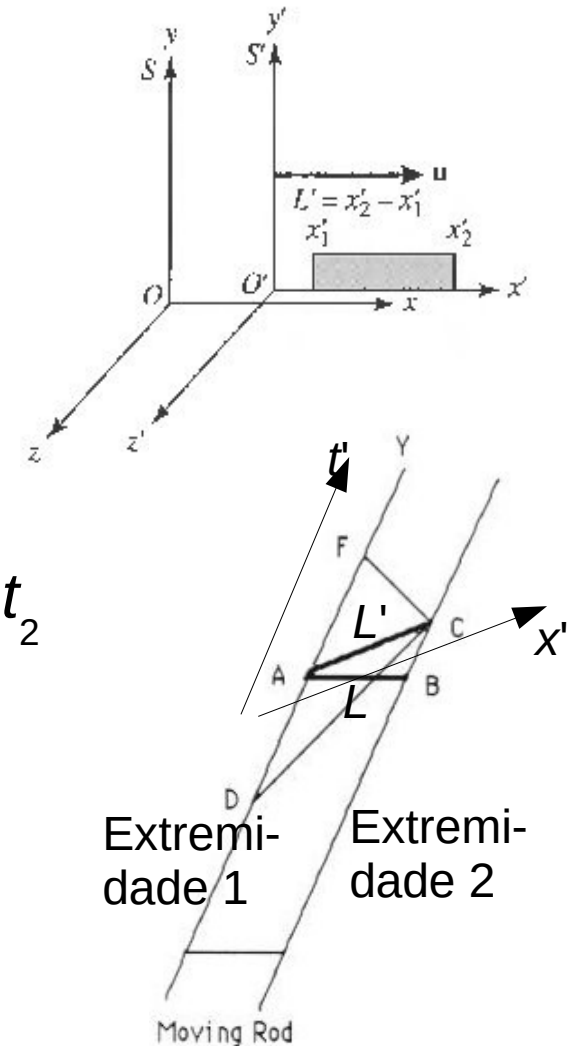
Para saber o comprimento em S , L , temos que medir $x_2 - x_1$ em S ao mesmo tempo, quando $t_1 = t_2$

$$\Rightarrow L' = \gamma \cdot (x_2 - x_1 - u(t_2 - t_1)) = \gamma L \Rightarrow L = \gamma^{-1} L' \leq L'$$

$\Rightarrow L$ é **mais curto** que L' .

\Rightarrow **Contração do comprimento.**

O **sistema de repouso** é aquele, naquele L é o **mais comprido**. O tempo deste sistema, t' , é o **tempo próprio** da barra.



Relatividade Restrita

Dilatação do Tempo e Contração de Comprimentos

Formulado de jeito popular:

“relógios em movimento rodam mais lentamente”, resp.

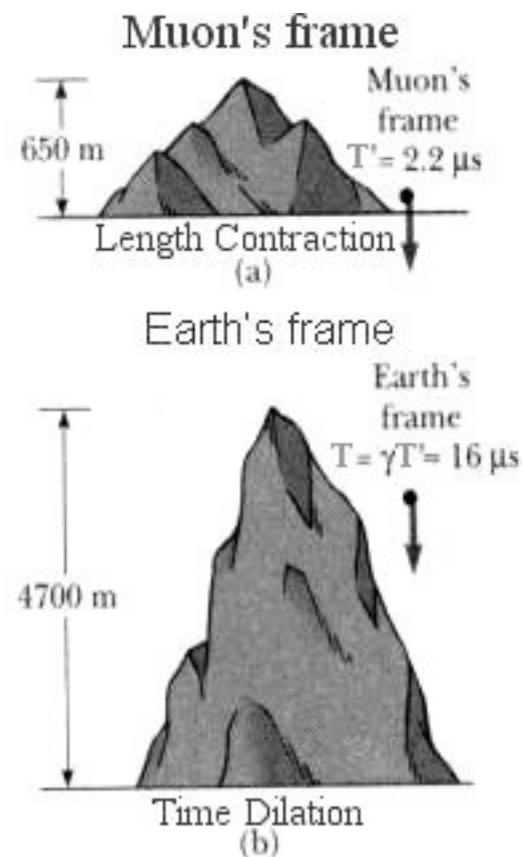
“réguas em movimento são mais curtas”.

Os dois efeitos são **complementares**.

Exemplo: múons, μ , têm tempo de vida de $2.2 \mu\text{s}$.

=> Os μ cósmicos, produzidos por raios cósmicos no topo da atmosfera da Terra, e descendo com velocidade $0.9952 \cdot c$, deveriam ter decaído até chegar na Terra, mas eles sobrevivem e são detectadas por causa da **Dilatação do Tempo**.

No referencial deles, a sobrevivência se deve à **Contração do caminho** até a Terra.



Relatividade Restrita

O Efeito Doppler para a Luz

Voltando para a fonte de luz em S' , tomando agora como $\Delta t'$ um **período de oscilação** da **radiação** da lâmpada: $\Delta t' = T = 1/\nu_0$, ($\nu_0 = \text{freq. de repouso}$):

$$t_2 - t_1 = \gamma/\nu_0.$$

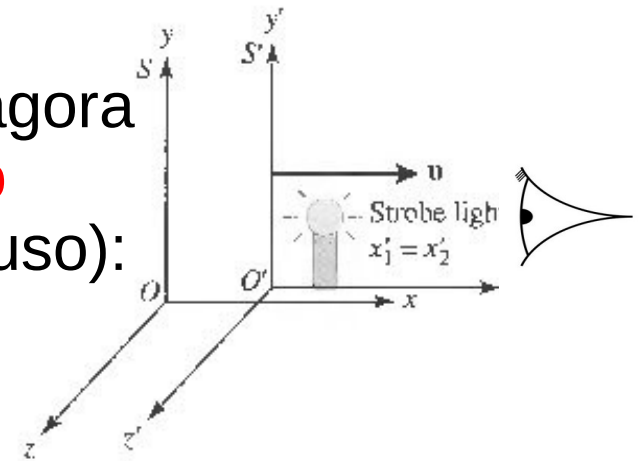
Mas t_1 e t_2 são os momentos da **emissão** das **frentes de onda** pela fonte.

Para calcular a diferença entre os momentos da **chegada** no observador em S , temos que **adicionar** a **diferença** (aqui negativa) de **caminho**, $(t_2 - t_1) \cdot u$, **dividida** pela **velocidade** do **sinal**, c .

$$\Delta t_{\text{obs}} = t_2 - t_1 + (t_2 - t_1) \cdot u/c = \gamma/\nu_0 \cdot (1 + u/c) = \nu_0^{-1} \cdot (1 + u/c) / (1 - u^2/c^2)^{1/2}$$

$$\Rightarrow \nu_{\text{obs}} = \nu_0 \cdot \sqrt{(1 - u/c)/(1 + u/c)}, \text{ para } |u| \ll c: \nu_{\text{obs}} \approx \nu_0 \cdot (1 - u/c)$$

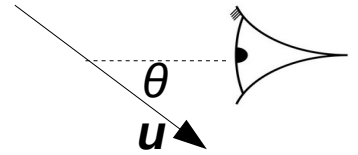
onde u é **negativa** para **aproximação**, e **positiva** para **afastamento relativo**.



Relatividade Restrita

O Efeito Doppler para a Luz

Isto vale para **movimento** na direção da **linha** de **visada**. Se a fonte está se movimentando a um ângulo θ com a linha de visada, a fórmula se torna ($u_r = u \cdot \cos\theta$):



$$\nu_{\text{obs}} = \nu_0 \cdot \sqrt{(1-u^2/c^2)} / (1+u_r/c)$$

Se a fonte está se movimentando **perpendicular** à linha de visada, há um **efeito Doppler transversal**, devido à **Dilatação do Tempo**:

$$\nu_{\text{obs}} = \gamma^{-1} \nu_0 = \sqrt{(1-u^2/c^2)} \cdot \nu_0$$

Às vezes se define o *redshift* devido ao efeito Doppler:

$$z \equiv (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_0) / \lambda_0 = \sqrt{(1+u_r/c) / (1-u_r/c)} - 1,$$

para $u_r \ll c$: $z = u_r/c$

Relatividade Restrita

Momento Linear e Energia Relativísticos

Momento linear e **Energia** também tomam uma forma diferente na **Teoria da Relatividade** (\mathbf{v} é a **velocidade** da **partícula**, e não alguma velocidade relativa entre referenciais; $\gamma := (1-v^2/c^2)^{-1/2}$):

Momento linear relativístico: $\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$

Energia relativística: $E = \gamma m c^2$,
onde $E_0 = m c^2$ é a **energia de repouso**,
e $K = (\gamma - 1) \cdot m c^2$, a **energia cinética**

Alguns ainda usam as grandezas massa de repouso, m (que é simplesmente a massa) e massa relativística, γm .

para $v \ll c$: $\mathbf{p} \approx m \mathbf{v}$,
 $K = ((1-v^2/c^2)^{-1/2} - 1) \cdot m c^2 = (1 + 1/2 \cdot v^2/c^2 + O((v/c)^4) - 1) \cdot m c^2 \approx 1/2 \cdot m v^2$

Relatividade Restrita

Momento linear e Energia Relativísticos

Fórmula útil: $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$

$m^2c^4 = E^2 - p^2c^2$ é uma **invariante** de **Lorentz**.

! Para $m \neq 0$ e $v \rightarrow c$, p e $E \rightarrow \infty$,
um dos motivos, por aqueles **objetos** com **massa não**
podem alcançar a **velocidade da luz**.

Objetos **sem massa** (fótons, grávitons, ...) **têm** que se
movimentar com a **velocidade da luz**. Senão eles teriam
 p e E **zero** (e não existiriam).

para estes, a última fórmula se reduz à já conhecida
relação de de Broglie: $E = pc$

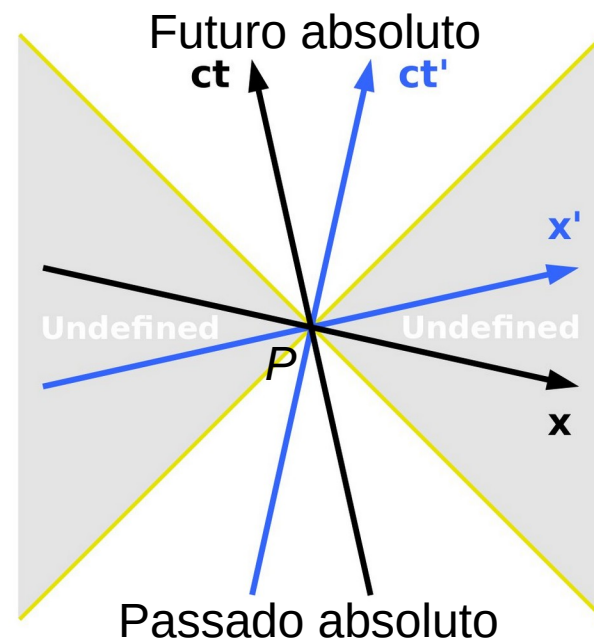
Relatividade Restrita

Passado, Futuro e Causalidade

O **diagrama Espaço-Tempo** centrado no evento P pode ser dividida em **várias regiões**:

O **passado absoluto** de P :
Eventos nesta parte foram **antes** de P ,
independente do referencial,
e podem ter **causado** P .

O **futuro absoluto** de P :
Eventos nesta parte serão **depois** de P ,
independente do referencial,
e podem ser a **consequência** de P .



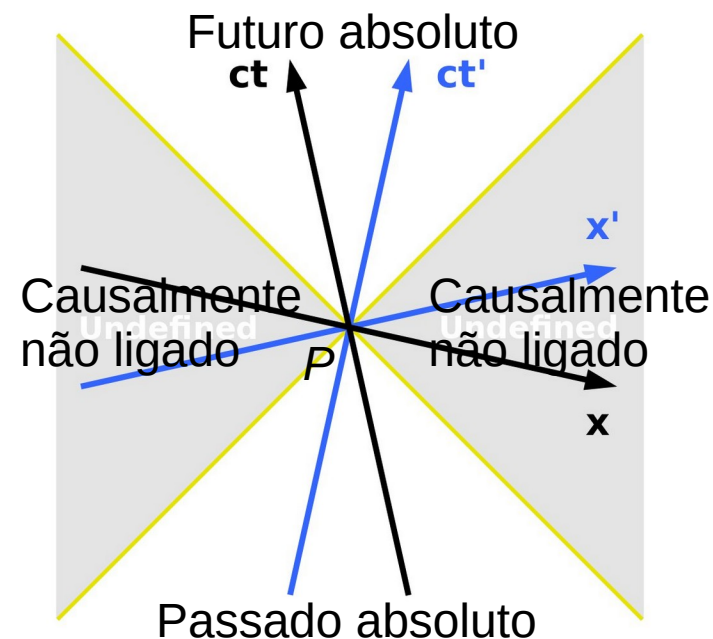
Relatividade Restrita

Passado, Futuro e Causalidade

A região **causalmente não ligada** a P :
Eventos nesta parte **não** tem/tiveram **contato** com P , q. d. **informação não** teve **tempo** para chegar destes eventos até P , ou vice-versa.

Eventos nesta região podem ser **antes**, **depois** ou **simultâneos** a P , **dependendo do referencial**, mas tão afastados que não há contato causal.

As retas amarelas são os **caminhos** que tomaria **luz** passando por P .



Relatividade Restrita

Intervalos no Diagrama Espaço-Tempo

É útil definir distâncias no diagrama espaço-tempo, chamadas **intervalos**, como a seguinte grandeza:

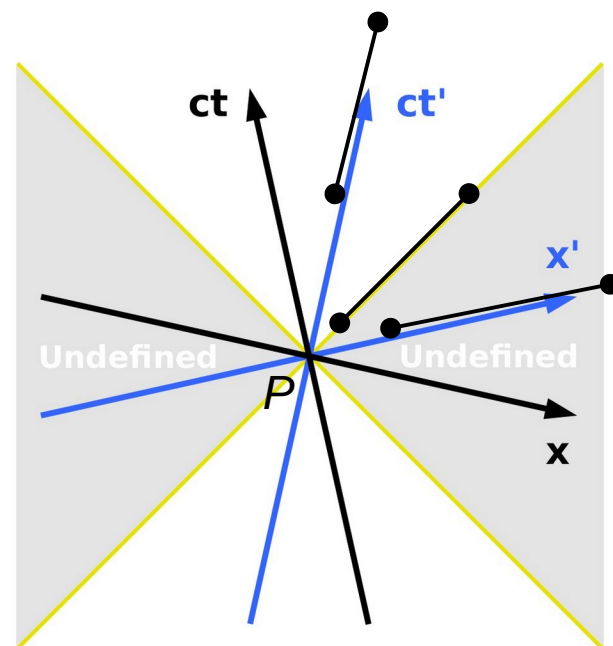
$$(\Delta s)^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$$

$(\Delta s)^2$ é uma **invariante de Lorentz**.

! $(\Delta s)^2$ pode ser negativo.

!! Alguns autores definem $(\Delta s)^2$ com **sinal oposto**:

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2$$

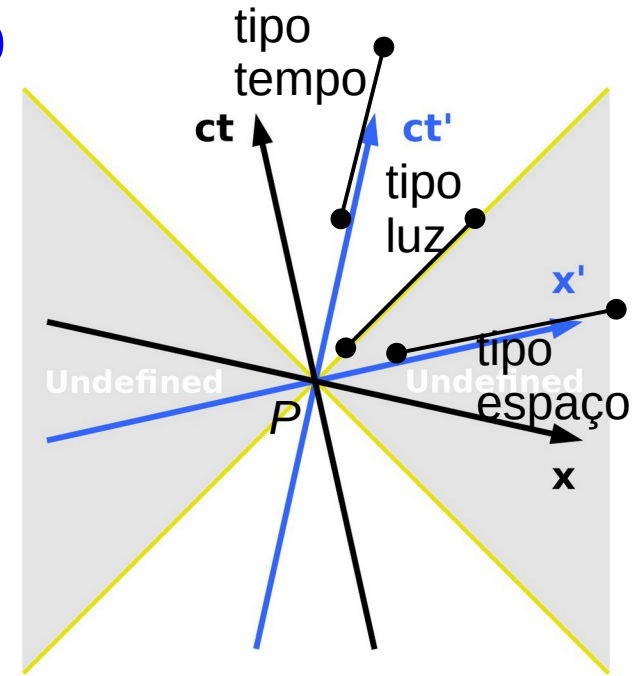


Relatividade Restrita

Intervalos no Diagrama Espaço-Tempo

Um intervalo se chama:

- **tipo espaço** se $(\Delta s)^2 < 0$: pode ser o **eixo** de uma **dimensão espacial** de um **referencial**.
- **tipo tempo** se $(\Delta s)^2 > 0$: pode ser o **eixo** do **tempo** de um **referencial**.
- **tipo luz** se $(\Delta s)^2 = 0$: pode ser o **caminho** de um **fóton**.



Na definição com o sinal oposto, intervalos tipo espaço têm $(\Delta s)^2 > 0$, e intervalos tipo tempo, $(\Delta s)^2 < 0$.

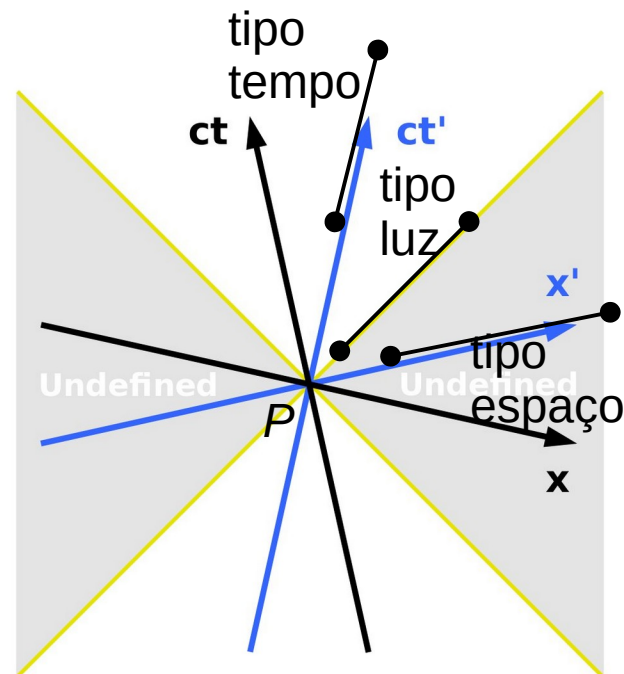
Relatividade Restrita

Intervalos no Diagrama Espaço-Tempo

Num intervalo **tipo espaço**, $\sqrt{|(\Delta s)^2|}$ é a **distância própria** entre os eventos, a **distância** entre eles num **referencial**, onde eles ocorrem **simultaneamente**.

Num intervalo **tipo tempo**, Δs é o **tempo próprio** entre os eventos ($\cdot c$), o **tempo** entre eles no **referencial**, onde eles acontecem no **mesmo lugar**.

No caso **tipo luz**, $\Delta s = 0$ significa, que o **tempo próprio** é **zero**. => Para **fótons** (ou qualquer partícula viajando com velocidade da luz) o tempo **não passa!**



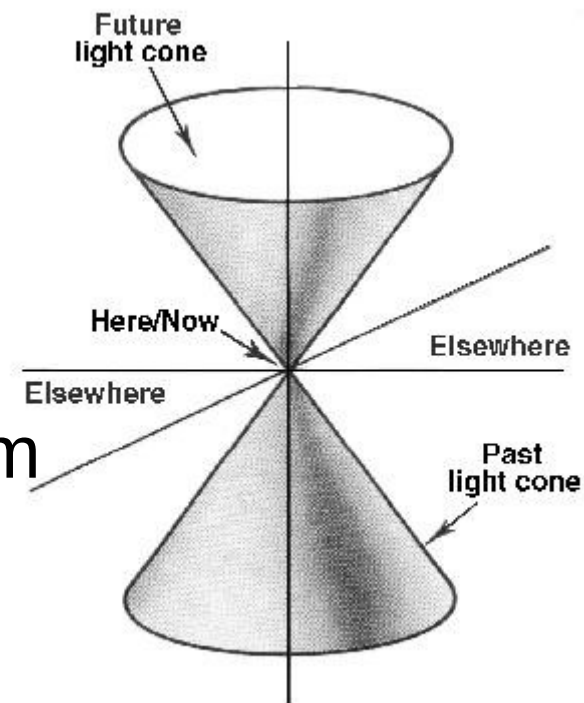
Relatividade Restrita

Cone de Luz

Pode-se fazer **diagramas espaço-tempo** levando em conta x , y e t (suprimindo só z).

=> Os possíveis **caminhos** de **luz** formam a superfície de um **cone**, o **cone de luz**.

Passado e **futuro absolutos** são as regiões **dentro** do **cone**, e a região **causalmente não ligada**, a região **fora**.



Relatividade Geral

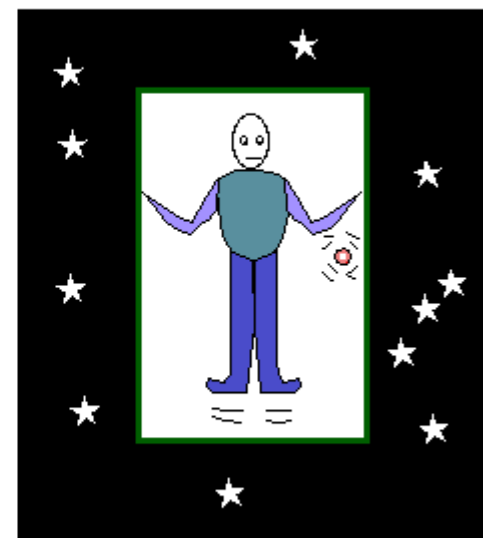
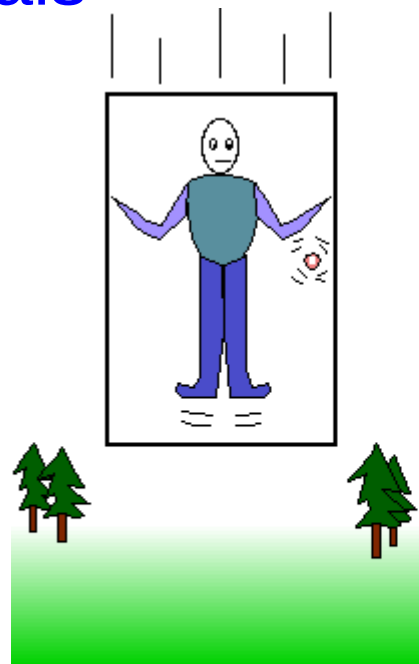
Alguns Experimentos Mentais

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**.

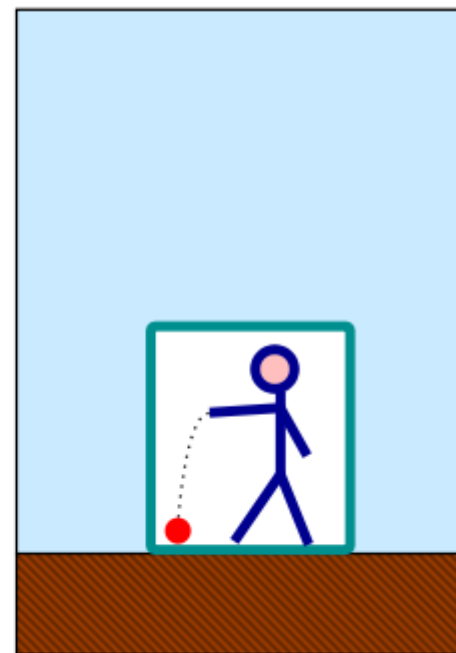
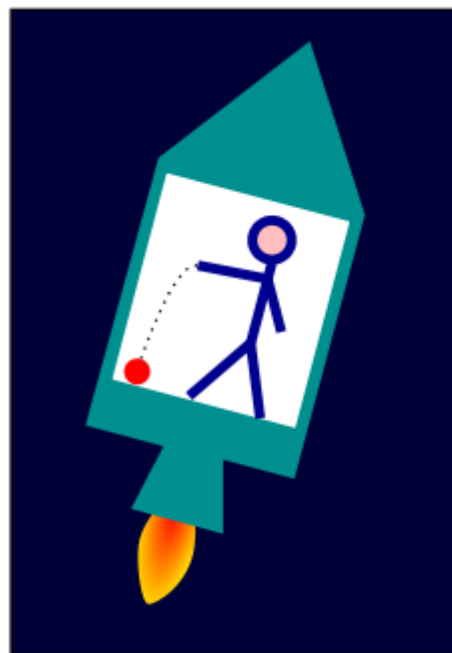


Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

Uma pessoa num foguete em **aceleração** (9.81 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.

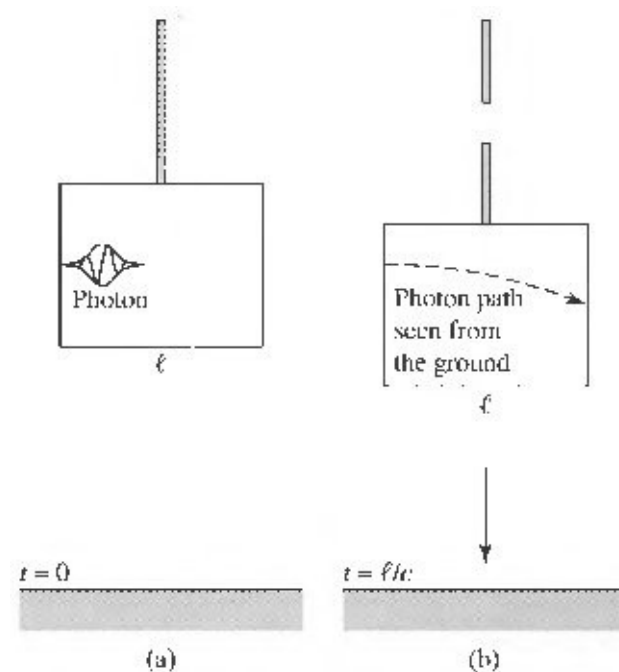
Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

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**.

Só que no campo da Terra, a curvatura é quase nula, tal que 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**:

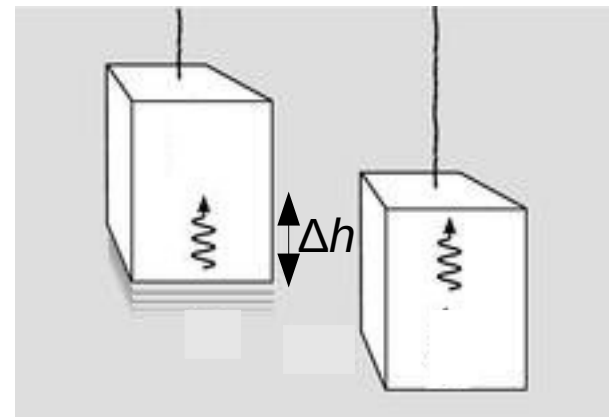
O percurso do fóton pra cima durou $\Delta t = \Delta h/c$

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

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

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

=> “**Conservação de energia**” para **fótons**.



Relatividade Geral

Alguns Experimentos Mentais

No **campo** de uma **estrela** de **raio** r_0 , onde a **aceleração gravitacional** \mathbf{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**”:

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

e o *redshift* correspondente, 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.

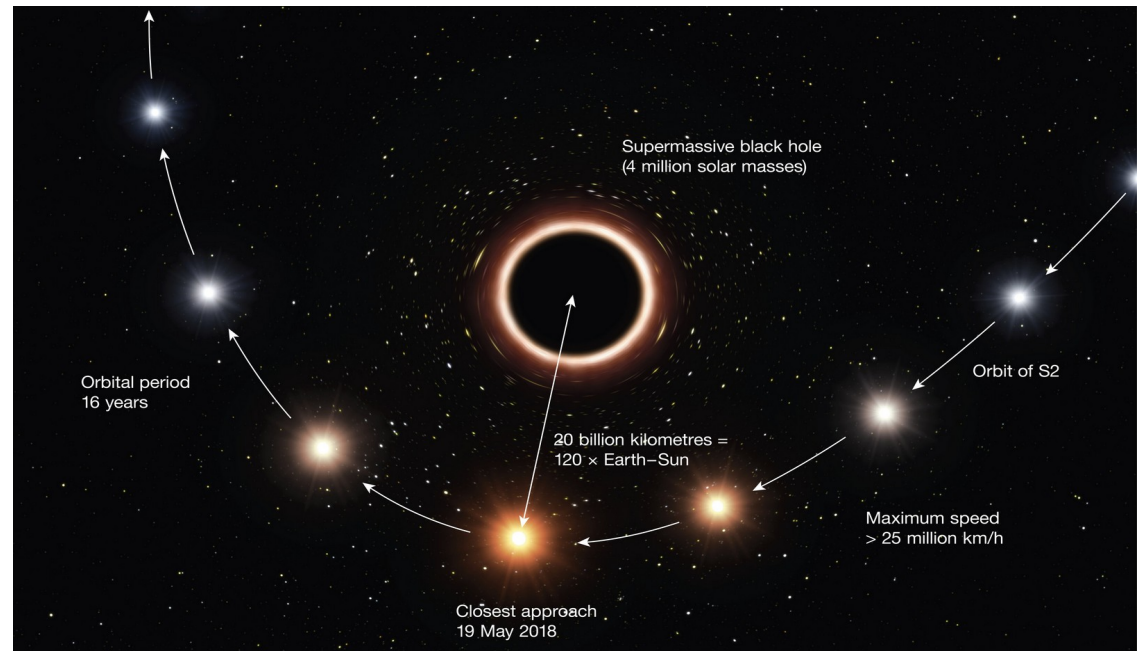
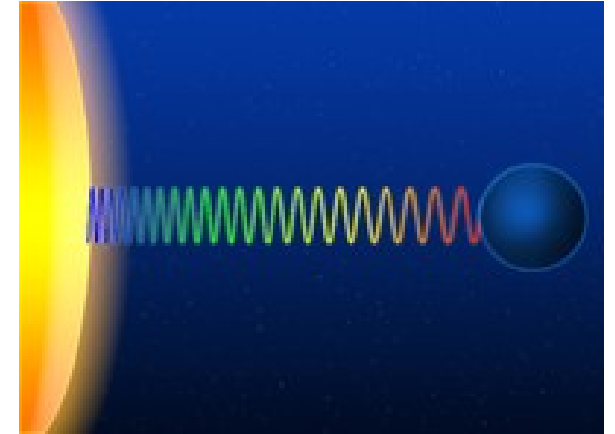
Luz **descendo** num **campo gravitacional** sofre um *blueshift* gravitacional, a **frequência aumenta**.

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**!

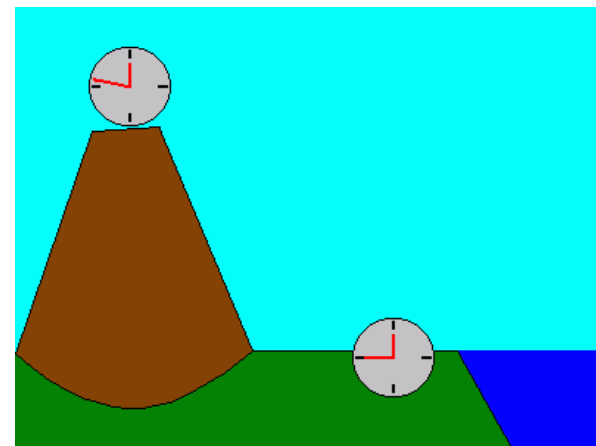
$$\Delta t_0 / \Delta t_\infty = v_\infty / v_0 = \sqrt{1 - 2GM/r_0 c^2}$$

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**.

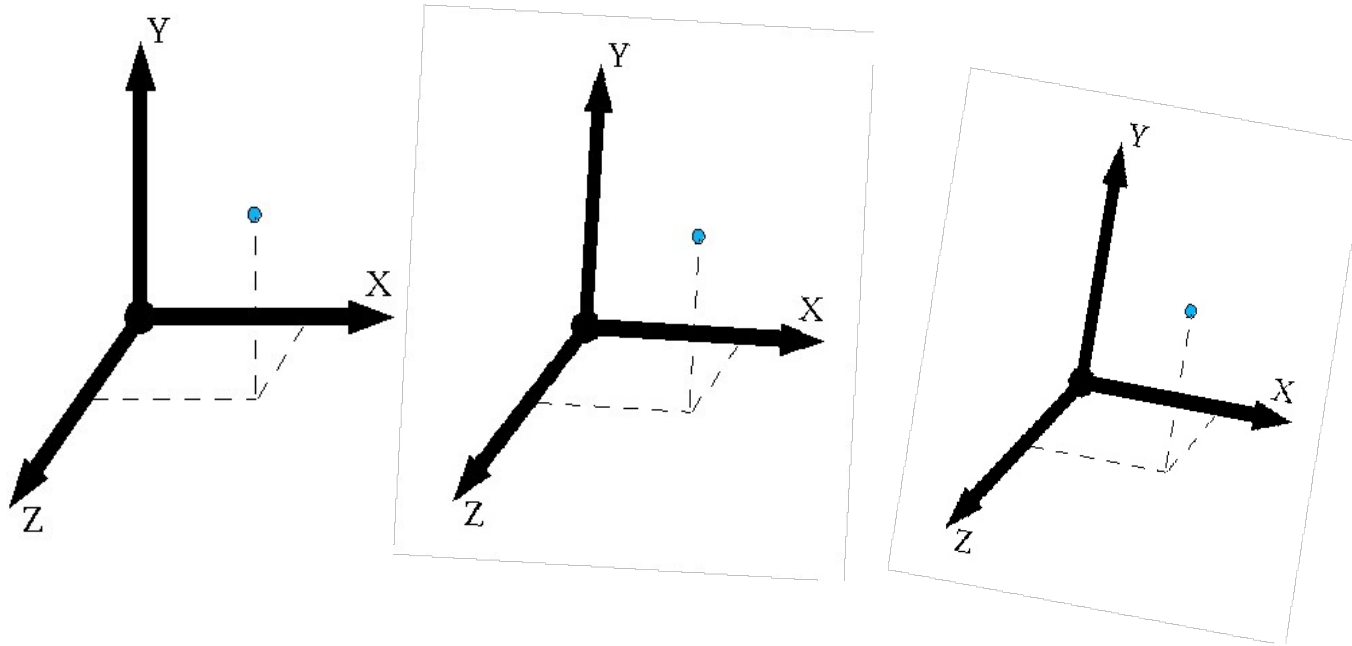
No caso da Terra, o efeito é minúsculo, da ordem de 1.3 segundos em 60 anos.

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



Relatividade Geral

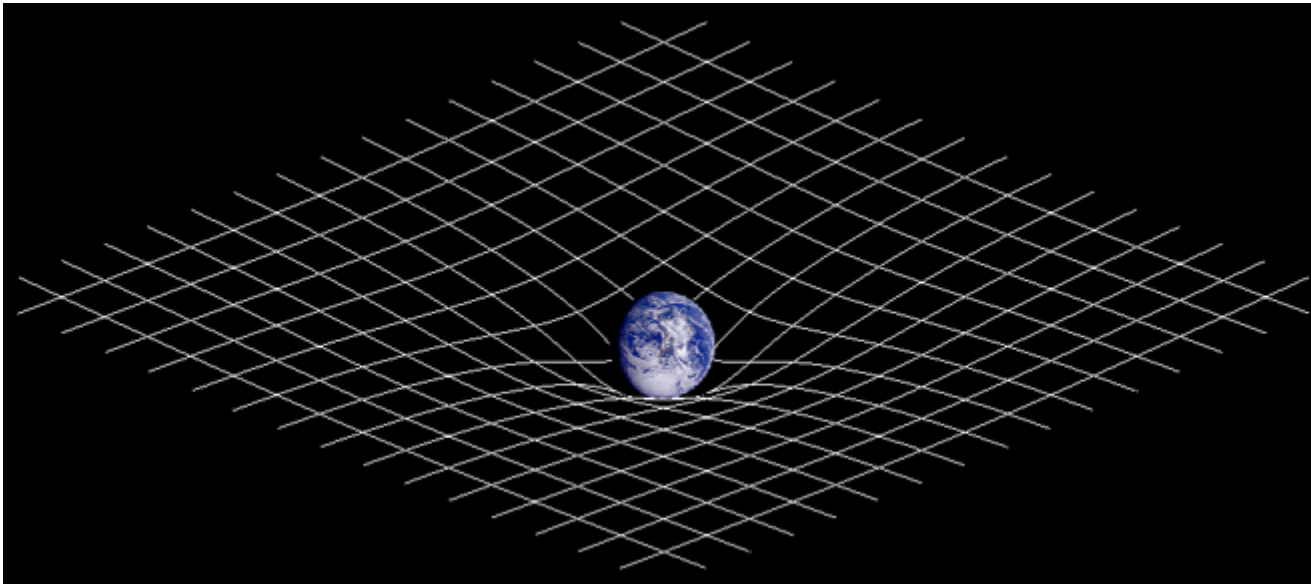
Disto tudo pode se concluir que **não existe** um **referencial global**, cada **ponto** no **Espaço-Tempo** tem seu próprio sistema acelerado de coordenadas.



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.

=> **Massas** altas **curvam** o **Espaço-Tempo!**



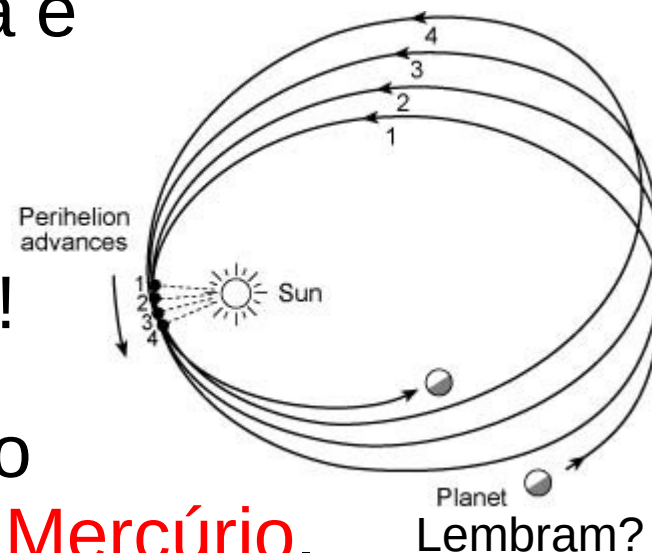
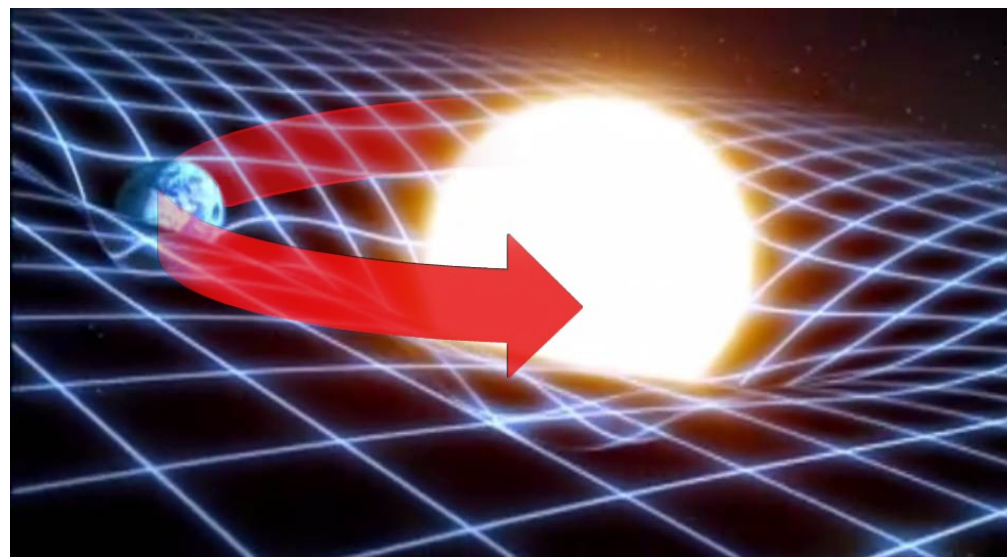
Relatividade

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**!

A curvatura também explica o excesso da **precessão** do **periélio** da **órbita** de **Mercúrio**.



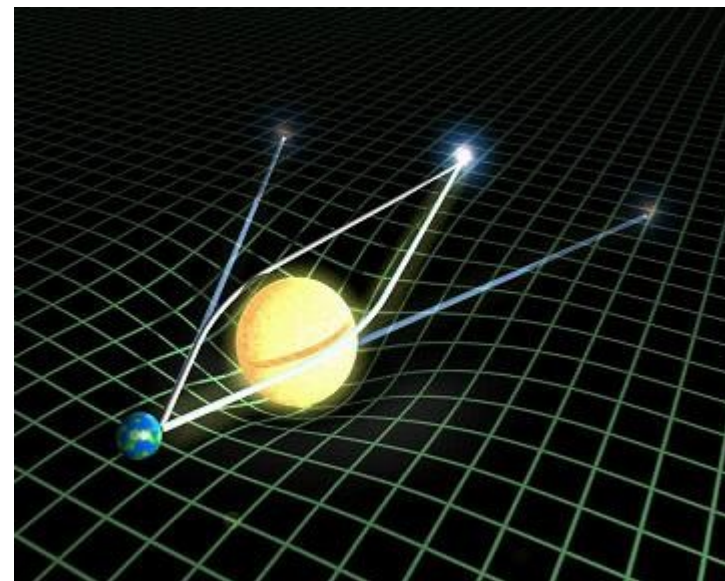
Relatividade Geral

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 $\Delta\varphi = 4GM/c^2R = 1.75''$.
=> Primeira **corroboração** da **Relatividade Geral**.

Desde então, foi observado muitas vezes em situações diferentes (galáxias desviando a luz de outras galáxias, aglomerados de galáxias desviando luz, etc.



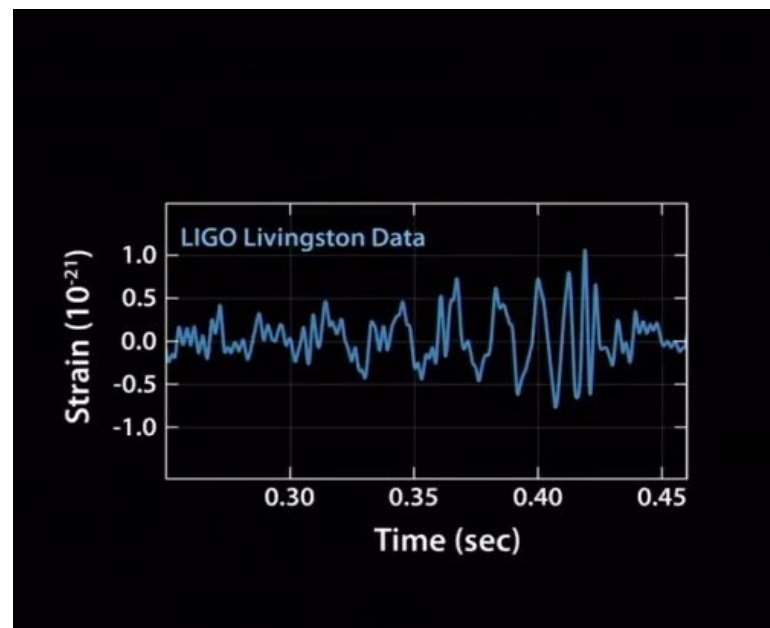
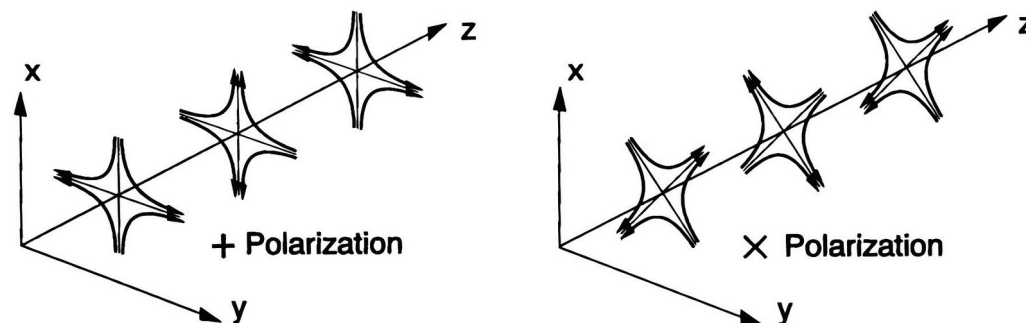
Relatividade Geral

Ondas Gravitacionais

Outra previsão da Relatividade Geral é a existência de **Ondas**

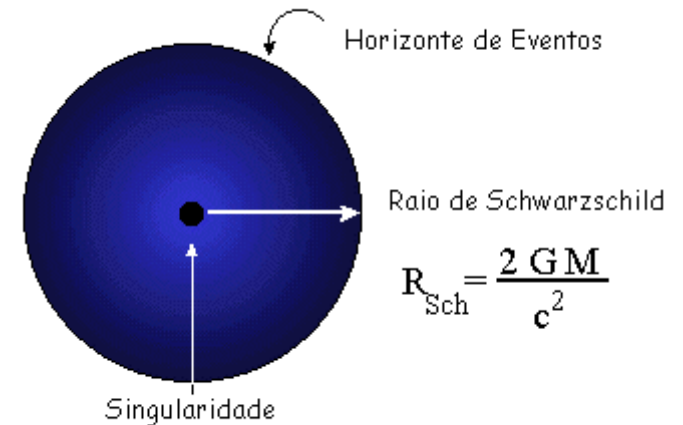
Gravitacionais, deformações periódicas do **espaço-tempo** geradas por **massas** altas **aceleradas** e que se **propagam** à **velocidade** da **luz**.

Várias já foram **detectadas**, a primeira no final de 2015 pelo “telescópio” de ondas gravitacionais LIGO nos EAU.



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**.



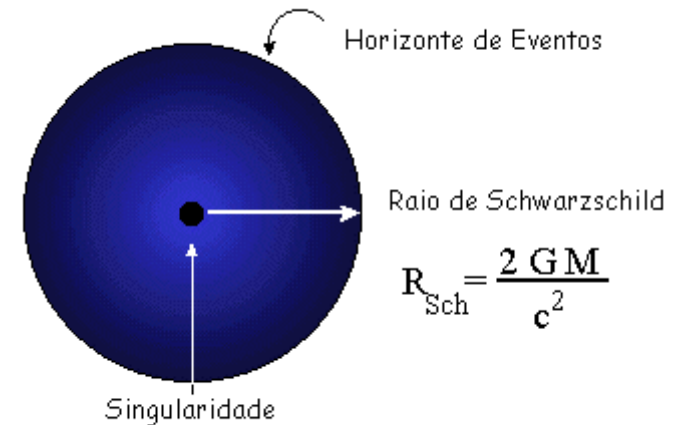
Para a massa do Sol, esta distância é de 3 km.

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.

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

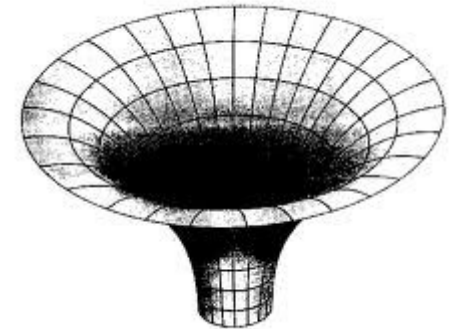
Alguns efeitos bizarros acontecem no **Horizonte de Eventos**:

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. a 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.

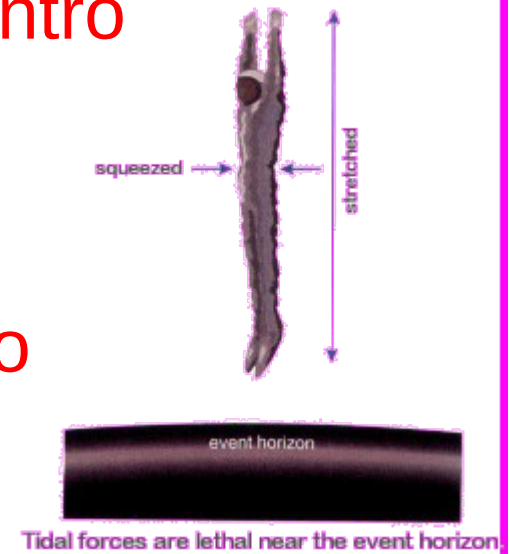
Em lugar disso temos uma “estrela congelada”, mas que é invisível mesmo assim, devido ao *redshift* gravitacional enorme.

Em conclusão, visto de fora, Buracos Negros não existem 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, efeito chamado espaguetificação, **antes de alcançar** o **Horizonte de Eventos** (melhor fazer o experimento com um inimigo).



Buracos Negros

Mas tem esperança:

Nos centros de galáxias há **Buracos Negros Supermaciços** (=> aulas Via Láctea, Galáxias I e II, AGNs) que têm **massas** e, portanto, **raios de Schwarzschild, maiores**.

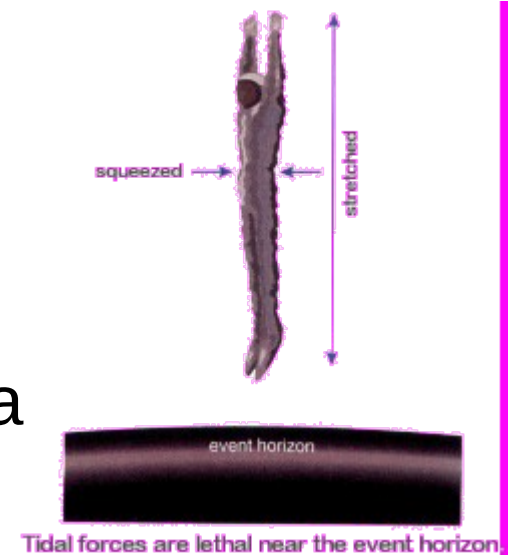
Aquele no centro da Via Láctea tem uma massa de 3.7 mio. M_{\odot} , e portanto, um Raio de Schwarzschild de 12 mio. km.

Já que forças de maré caem com a 3ª potência da distância (=> aula planetas), temos no Horizonte de eventos de um Buraco Negro com massa M :

$$F_{\text{maré}} \propto M/R_S^3 \propto M/M^3 = M^{-2}$$

=> mais **fracas** em Buracos Negros de **maior massa**

=> ele pode sobreviver.



Relatividade

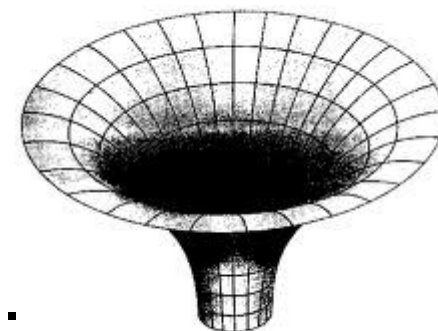
E o que ele vê, caso sobrevive?

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).



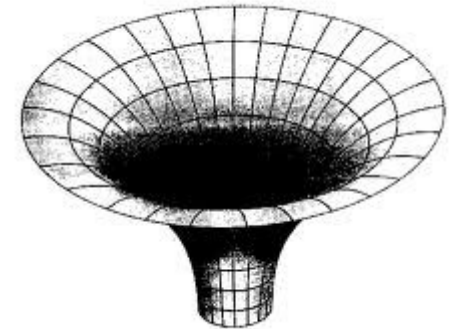
Espaço curvado por um Buraco Negro

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**.



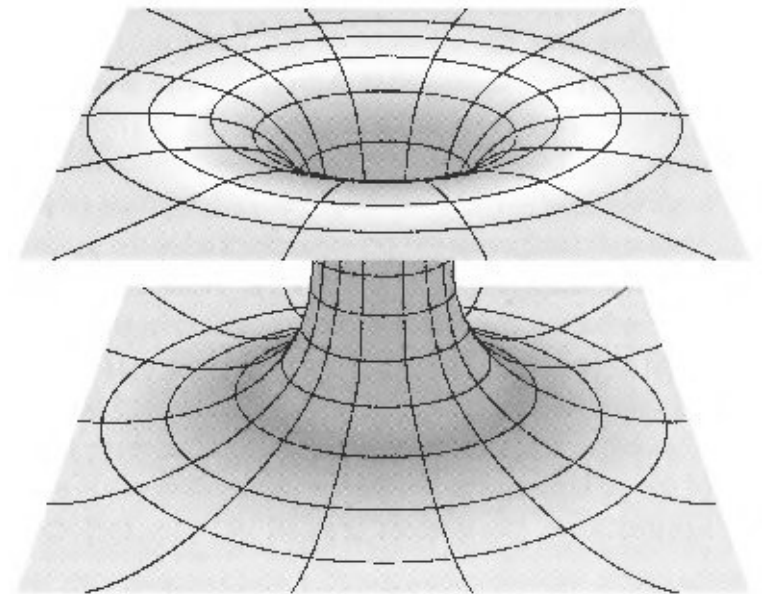
Espaço curvado por um Buraco Negro

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**, 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

Já que **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 Elétrica** (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

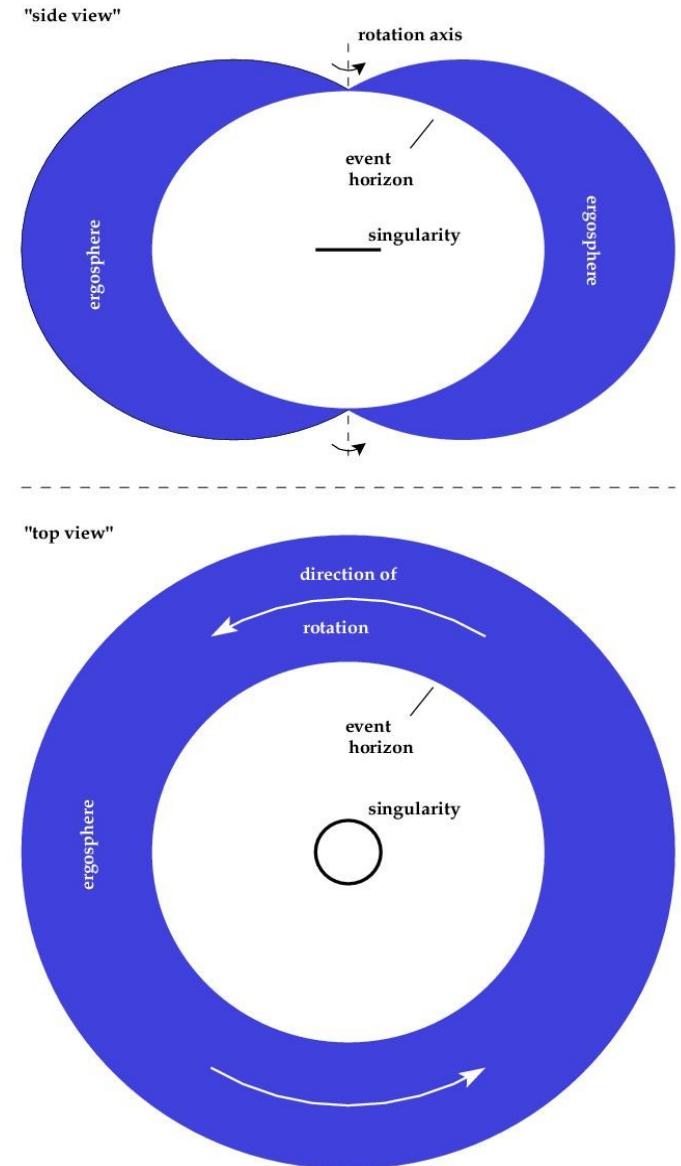
Buracos Negros em Rotação

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**.

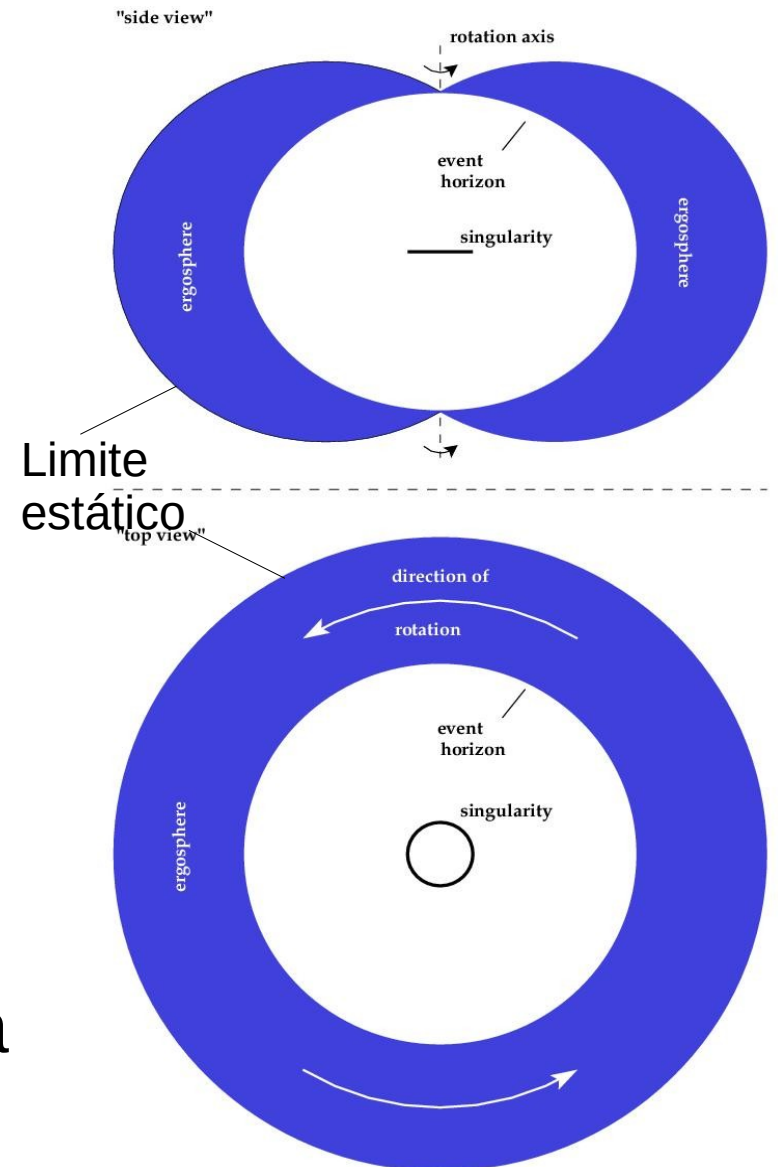


Buracos Negros

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”

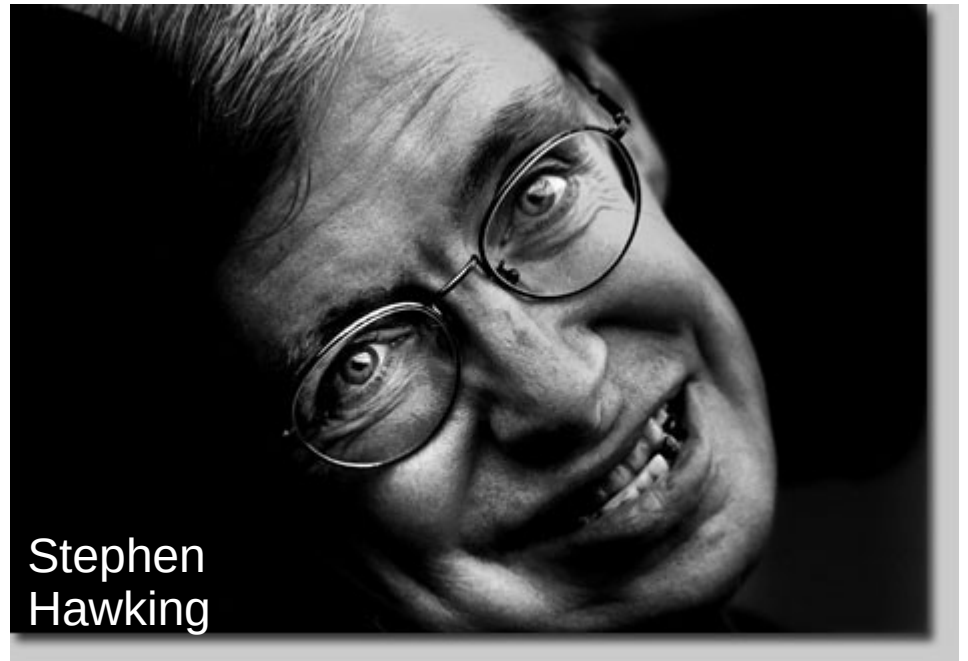


Buracos Negros

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**.



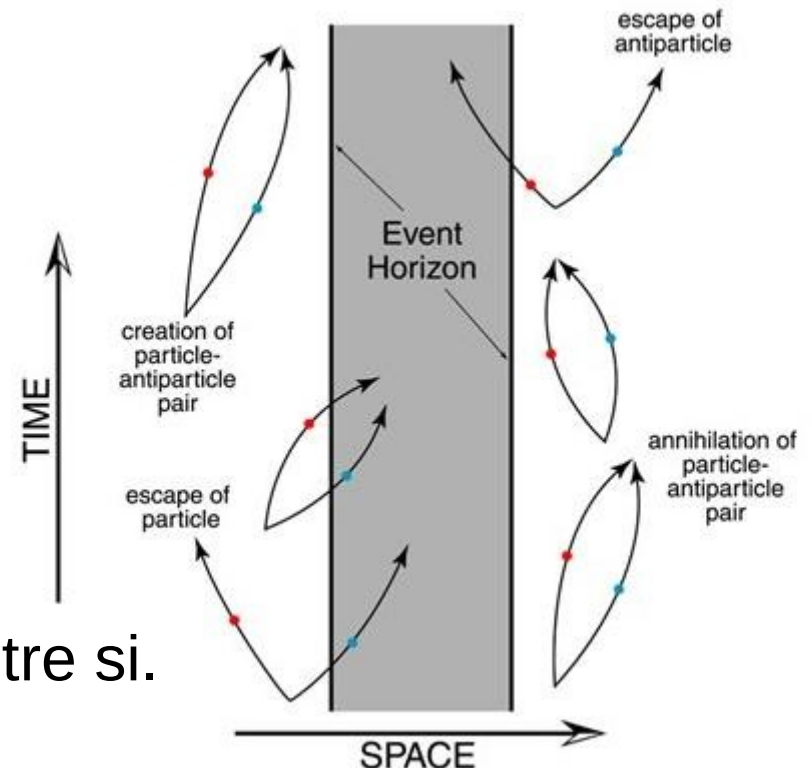
Stephen
Hawking

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):

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

=> um Buraco Negro de uma massa solar levaria 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 γ , e^- , e^+ e outras partículas.

A **radiação γ** 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_{\odot} ,
resultados do **colapso** de **caroços** de **estrelas** de **alta massa** (=> Aulas Evolução Estelar, Supernovas e Estrelas de Nêutrons)

- **de Massas Intermediárias**, 100 - 10 000 M_{\odot} ,
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**, nos **centros** de **galáxias**
- **Primordiais**, 10^{-8} kg - $100\,000 M_{\odot}$, formados nos **primeiros instantes** do **Universo**.
Não foram **detectados** ainda, talvez poderão ser detectados pela **radiação de Hawking** no hora de eles **evaporarem**.

Buracos Negros

Existe **prova** que os **Buracos Negros estelares** existem?

Foram encontrados alguns **sistemas binários**, similar àqueles contendo uma Anã Branca ou uma Estrela de Nêutrons,

onde dá para determinar a **massa** do **componente “invisível”** através do seu **efeito** sobre o **componente visível** (Leis de Kepler), e um limite superior para o seu **raio** através da radiação nos **raios X** emitida pelo **disco de acreção**.



Cygnus X-1 (interpretação artística)

Buracos Negros

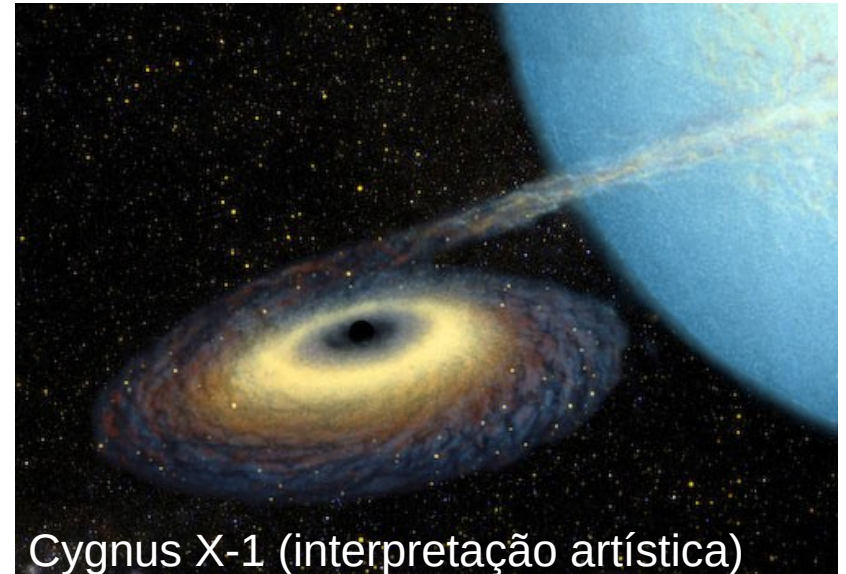
Em Cygnus X-1, LMC X-3 e V404 Cyg e outros encontra-se **massas maiores** que $3 M_{\odot}$:

Cygnus X-1: $10 M_{\odot}$,

V404 Cyg: $12 M_{\odot}$.

Já que a **massa limite** para **Estrelas de Nêutrons** é entre 2.2 e $2.9 M_{\odot}$, estas “estrelas” invisíveis e compactas devem ser **objetos mais massivos** e **densos** ainda.

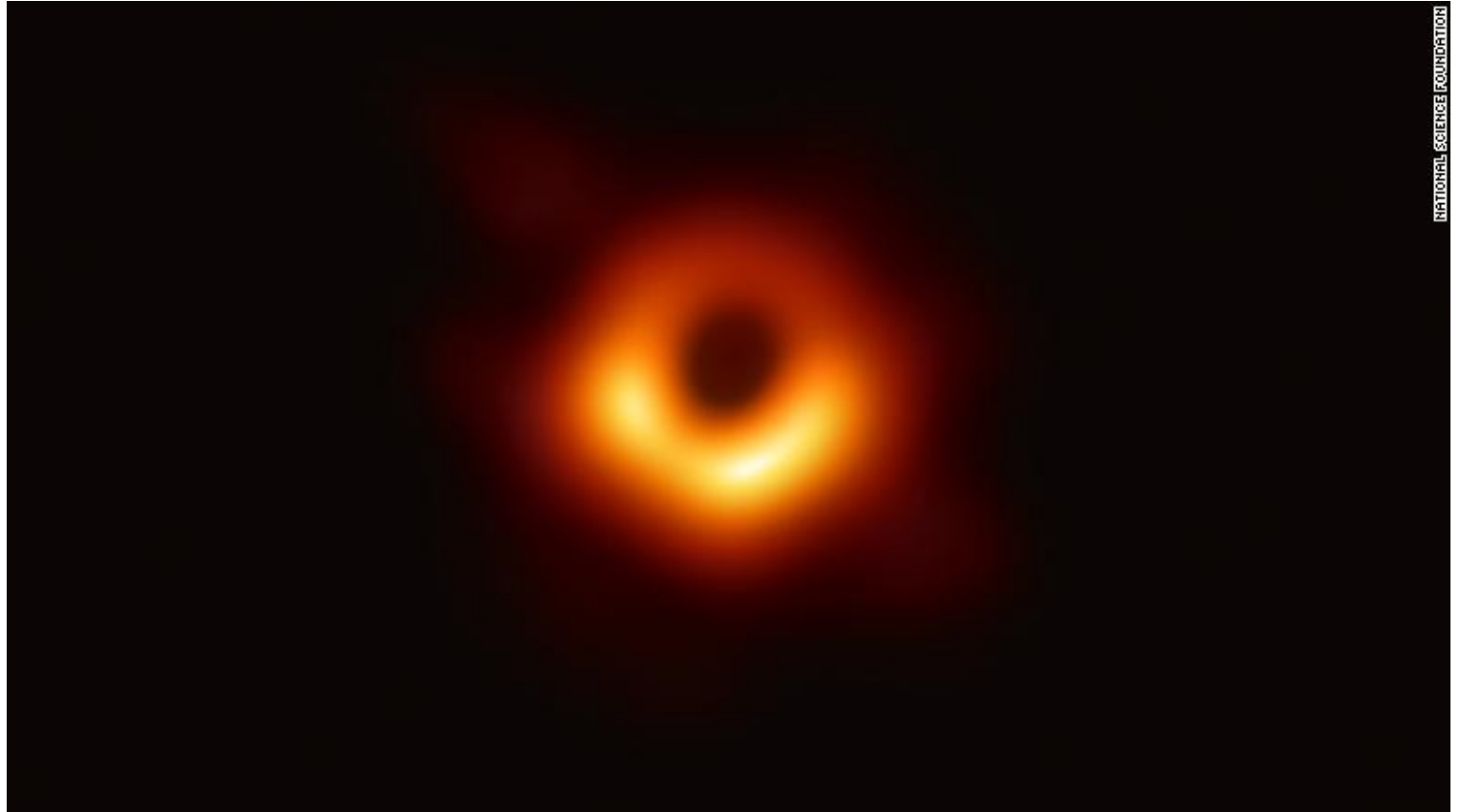
=> **Buracos Negros**



Cygnus X-1 (interpretação artística)

Buracos Negros

E agora,
a imagem
do Buraco
Negro
super-
maciço
(melhor:
do disco
de
acrecção)
no centro
da galáxia gigante M87.





Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

