

XVI Semana da Física, Instituto Superior Técnico, Lisboa – 19 Fev 2013

& Escola Secundária Rainha D. Amélia, Lisboa – 27 Fev 2013

Relatividade, buracos negros, censura e paradoxos

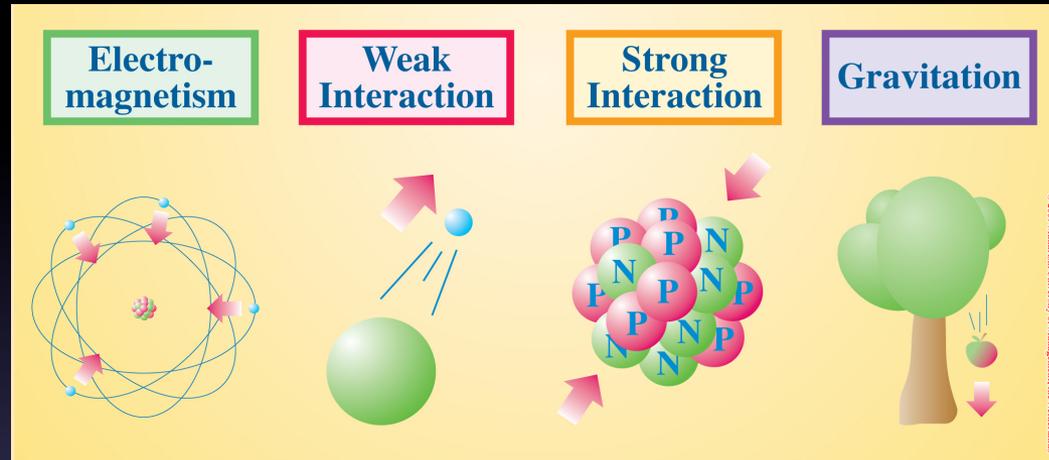
Jorge Rocha (CENTRA-IST)



* Não contempla o novo acordo ortográfico

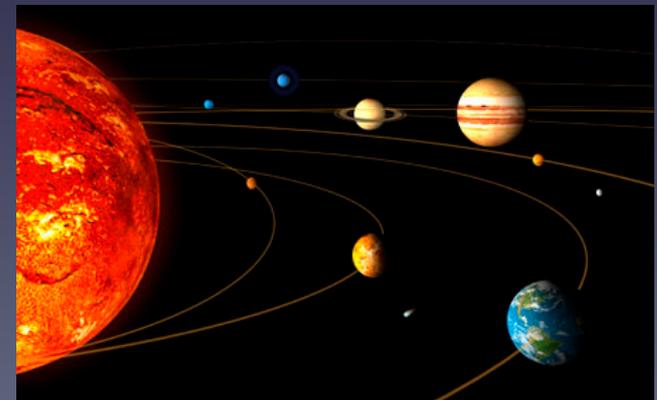
A importância da Gravidade

✧ Das 4 forças fundamentais, a da gravidade é a mais fraca...



... mas é também a que tem maior alcance.

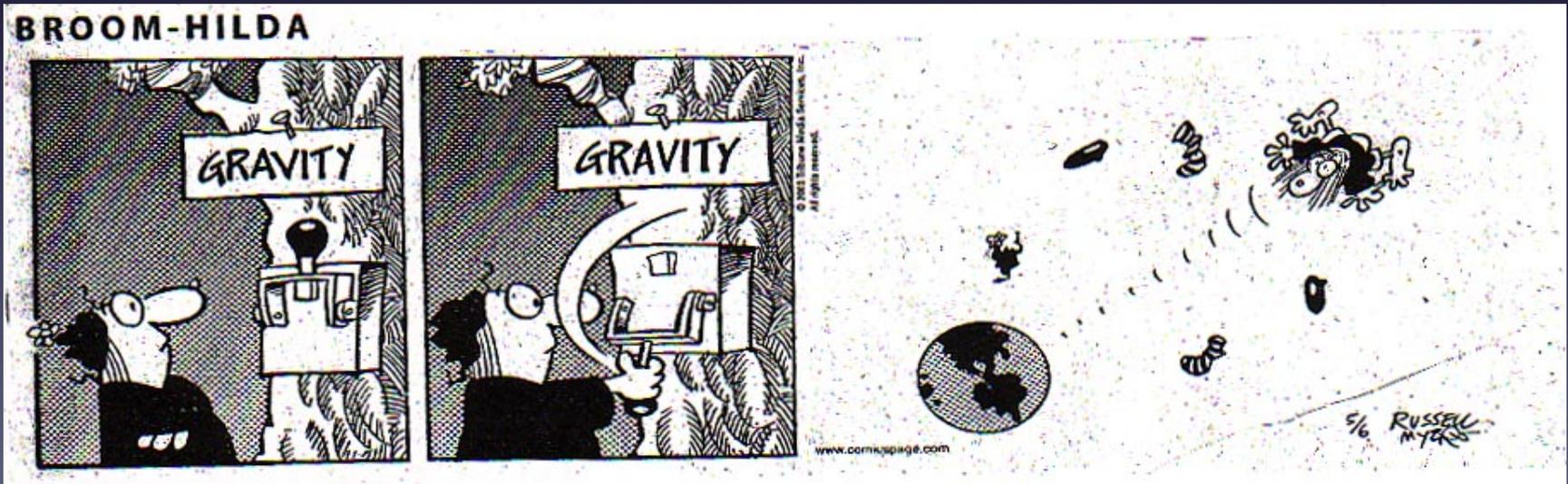
✧ A força da gravidade é responsável por manter os planetas orbitando o Sol.



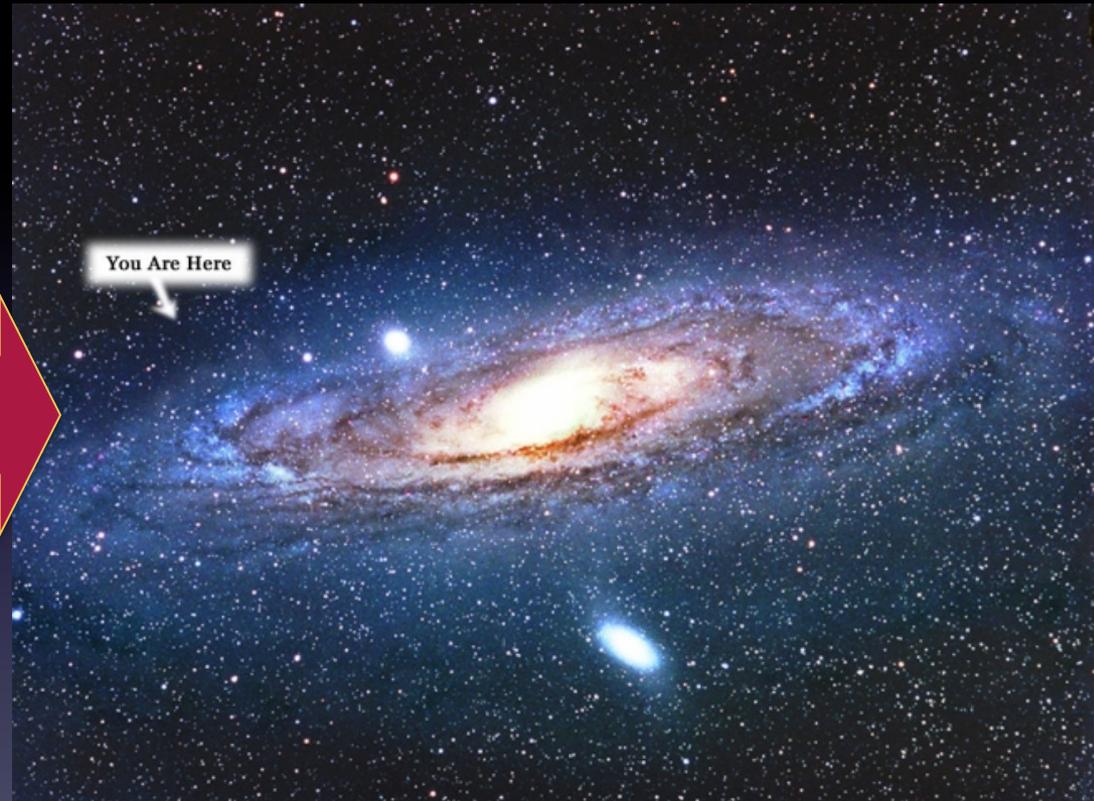
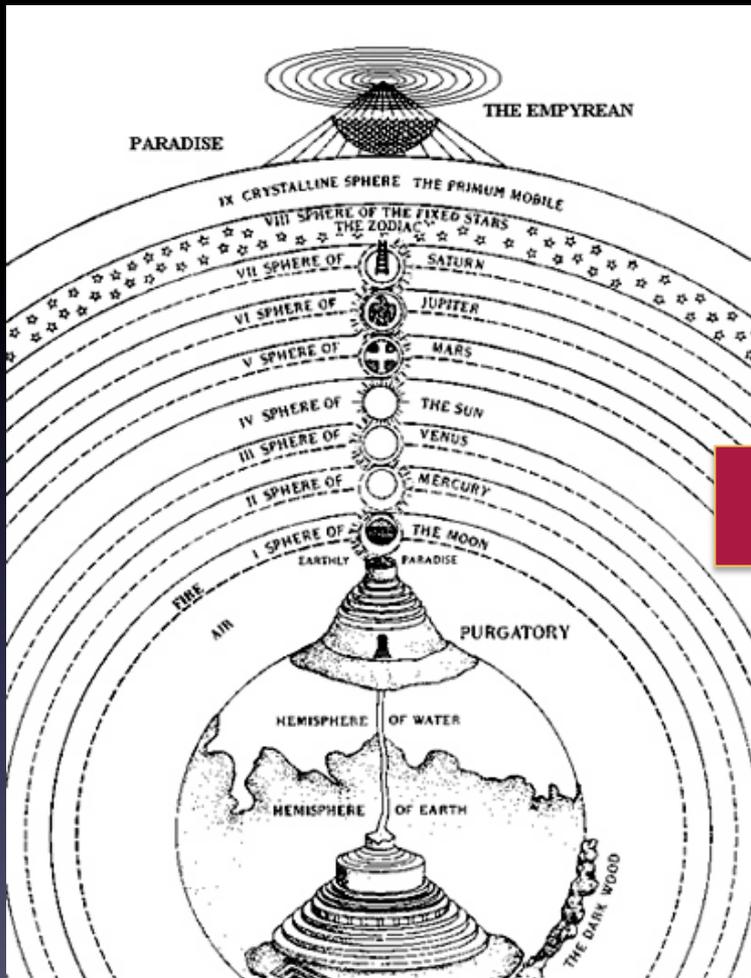
A importância da Gravidade

- ✧ A força da gravidade é:
 - ✧ atractiva;
 - ✧ exercida entre quaisquer dois corpos massivos.

- ✧ A força da gravidade não pode ser “desligada”.



Ciência: uma ferramenta para desvendar mistérios

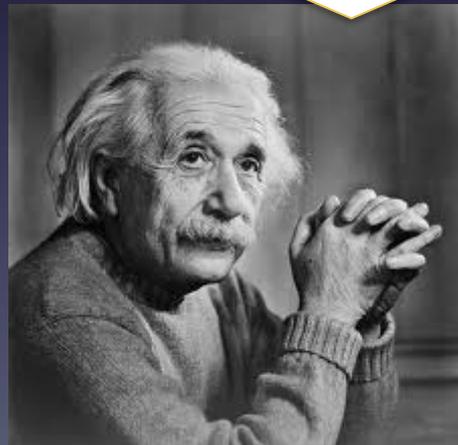


O nosso conhecimento do mundo em que vivemos sofreu profundos avanços nos últimos 500 anos.

Procuramos respostas exactas ...

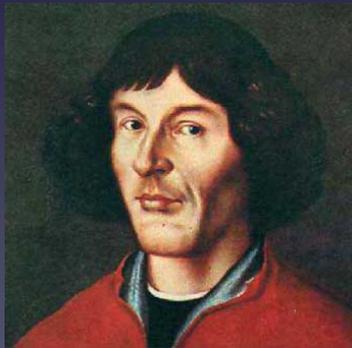
... para as perguntas certas

“If we knew what it was we were doing, it would not be called research, would it?”

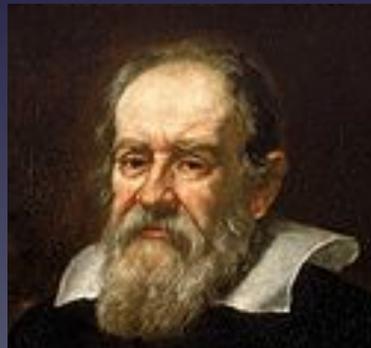


Um pouco de história

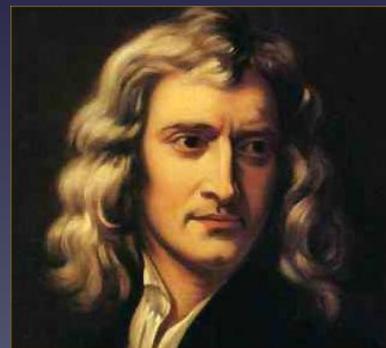
- ✧ Modelo Heliocêntrico (1543)
 - ✧ Relatividade Galileana (1632)
 - ✧ Mecânica Newtoniana (1687)
 - ✧ Relatividade Restrita (1905)
 - ✧ Relatividade Geral (1915)



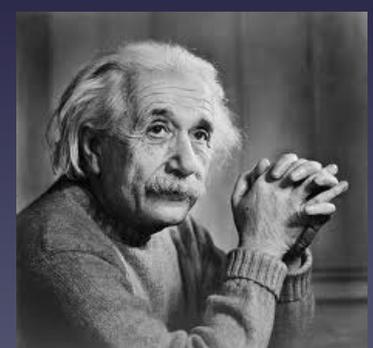
Copérnico



Galileo



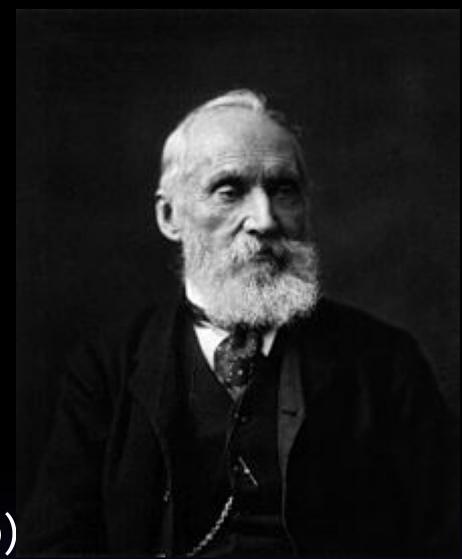
Newton



Einstein

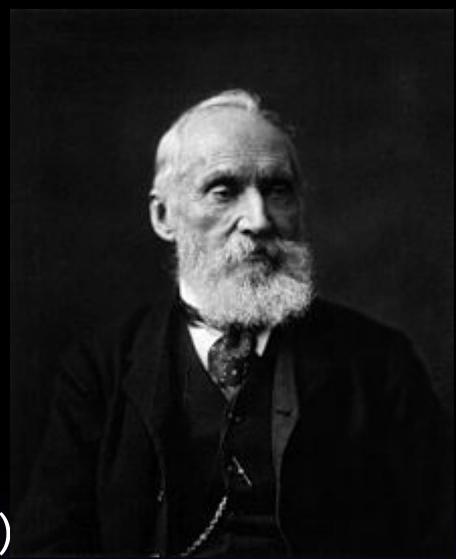
O fim da Física?

“Não há nada mais para ser descoberto em Física [...]” (1900)



Lord Kelvin

O fim da Física?



~~“Não há nada mais para ser descoberto em Física [...]” (1900)~~

Lord Kelvin

Isto estaria (e ainda está) longe de ser verdade!

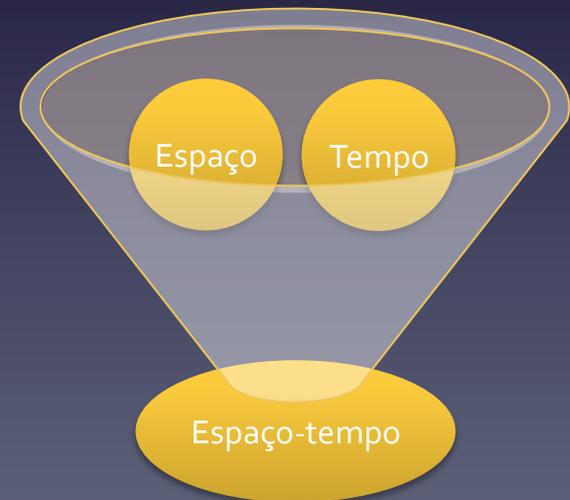
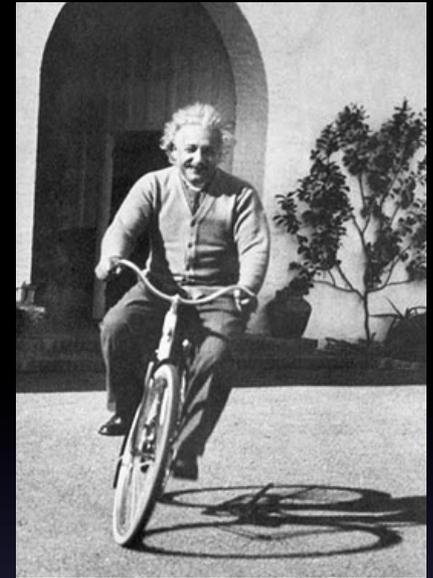
“Presentemente o nosso conhecimento é apenas escurecido por duas nuvens [...]” referindo-se ao que viriam a ser a

Mecânica Quântica e a **Física Estatística!**

Relatividade Restrita

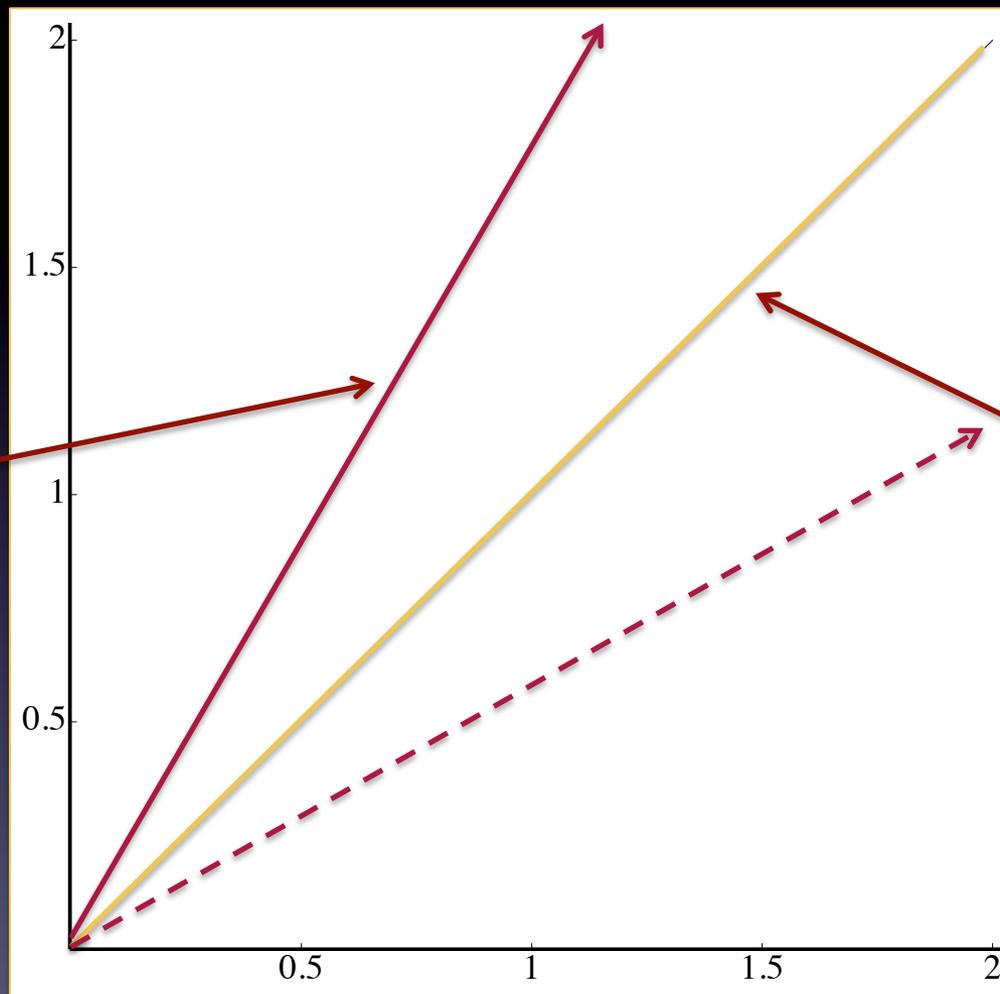
Relatividade Restrita

- ✧ Em 1905 Einstein formulou a teoria da Relatividade Restrita.
 - ✧ O tempo e o espaço não existem separadamente;
 - ✧ Existência de uma velocidade máxima: a da luz.
- ✧ Princípio da relatividade:
as leis da natureza ficam inalteradas quando se muda para um referencial em movimento uniforme.

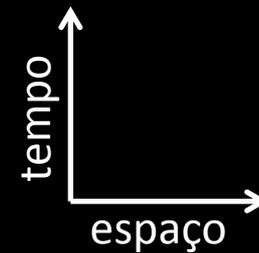


Diagramas de espaço-tempo

corpo em movimento uniforme

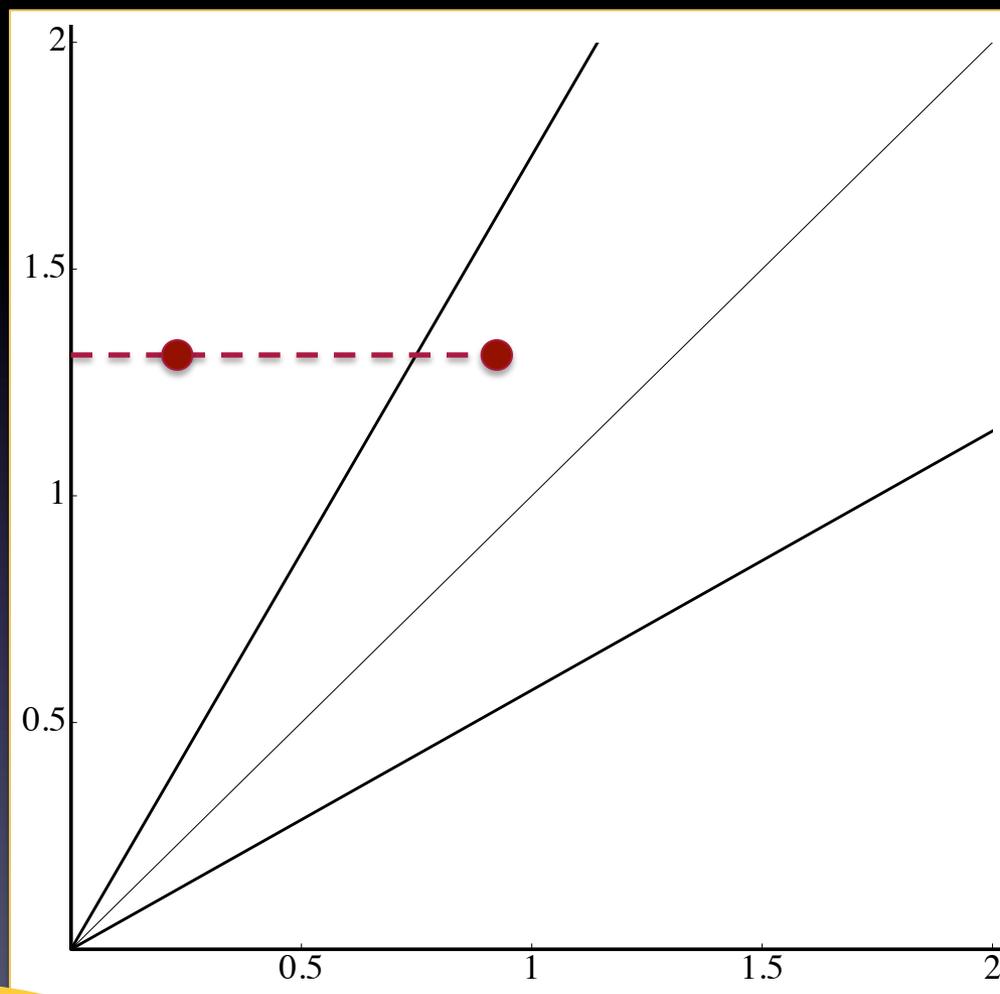


velocidade da luz



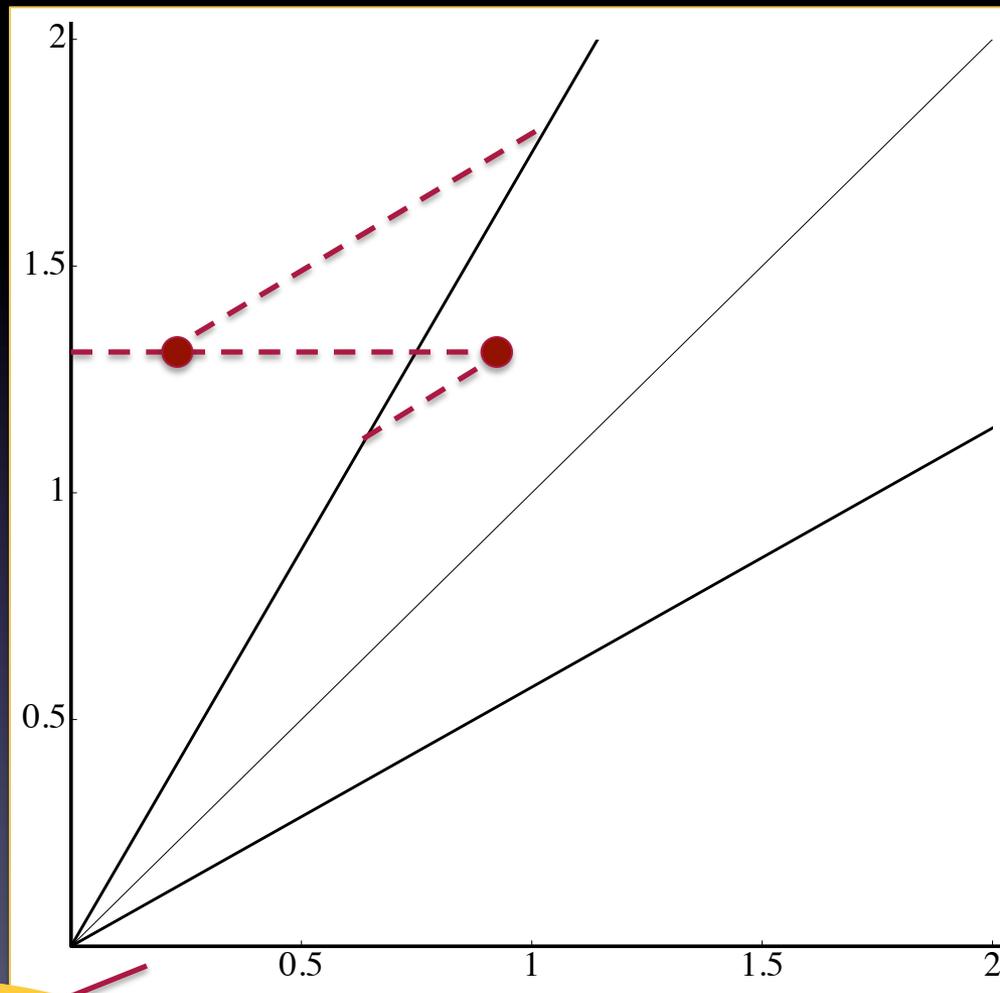
Simultaneidade

tempo
espaço



Simultaneidade

Simultaneidade



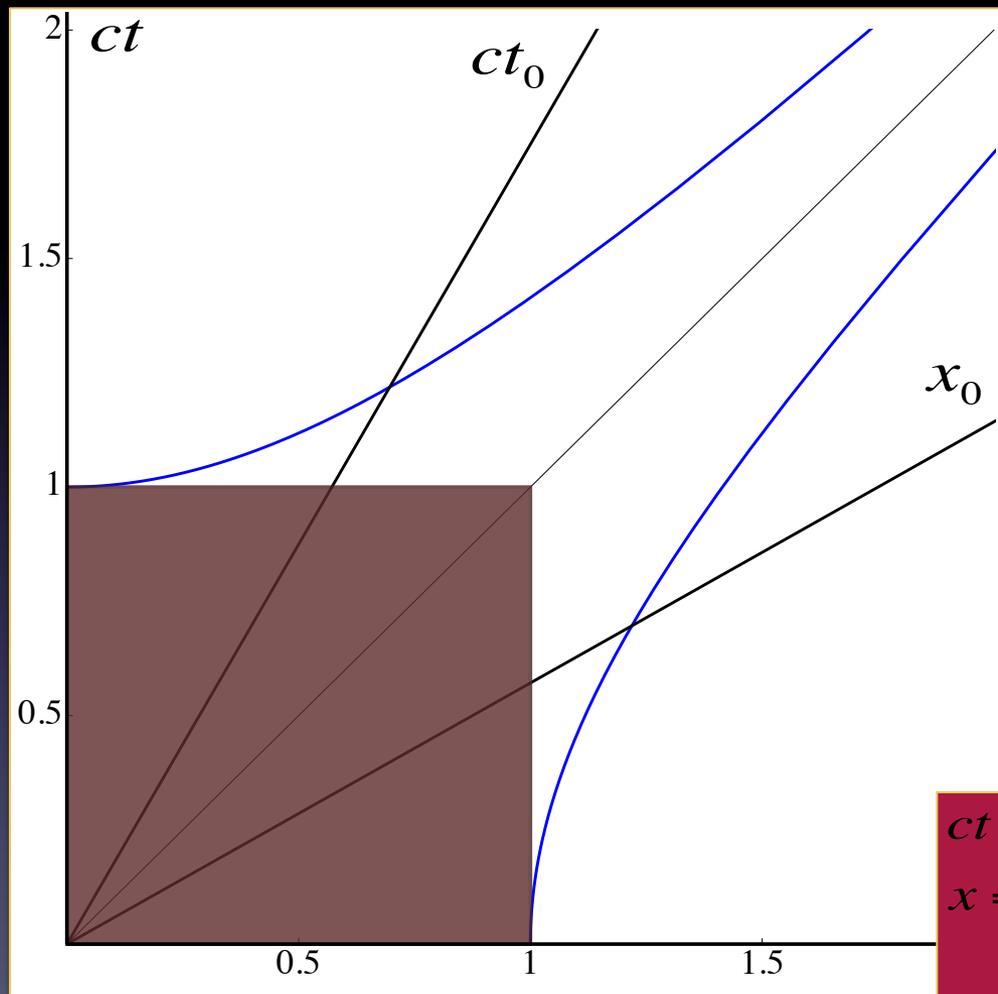
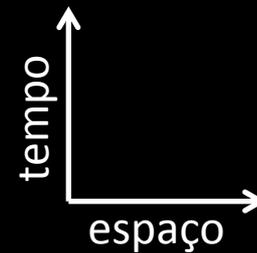
tempo
espaço

~~Simultaneidade~~



Consequências pouco intuitivas...

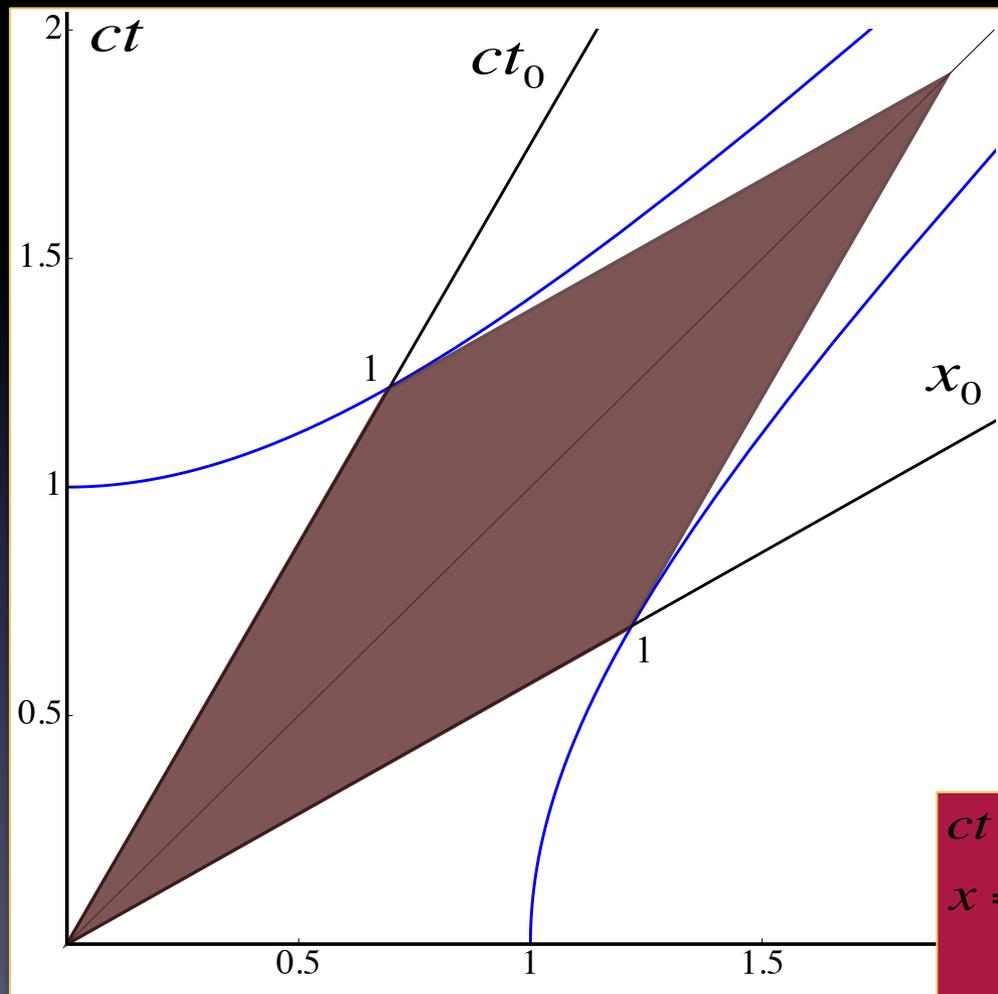
Transformações de Lorentz



$$ct = \gamma ct_0 + \beta \gamma x_0$$
$$x = \gamma x_0 + \beta \gamma ct_0$$

$$\beta = \frac{\mathbf{v}}{c}; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Transformações de Lorentz



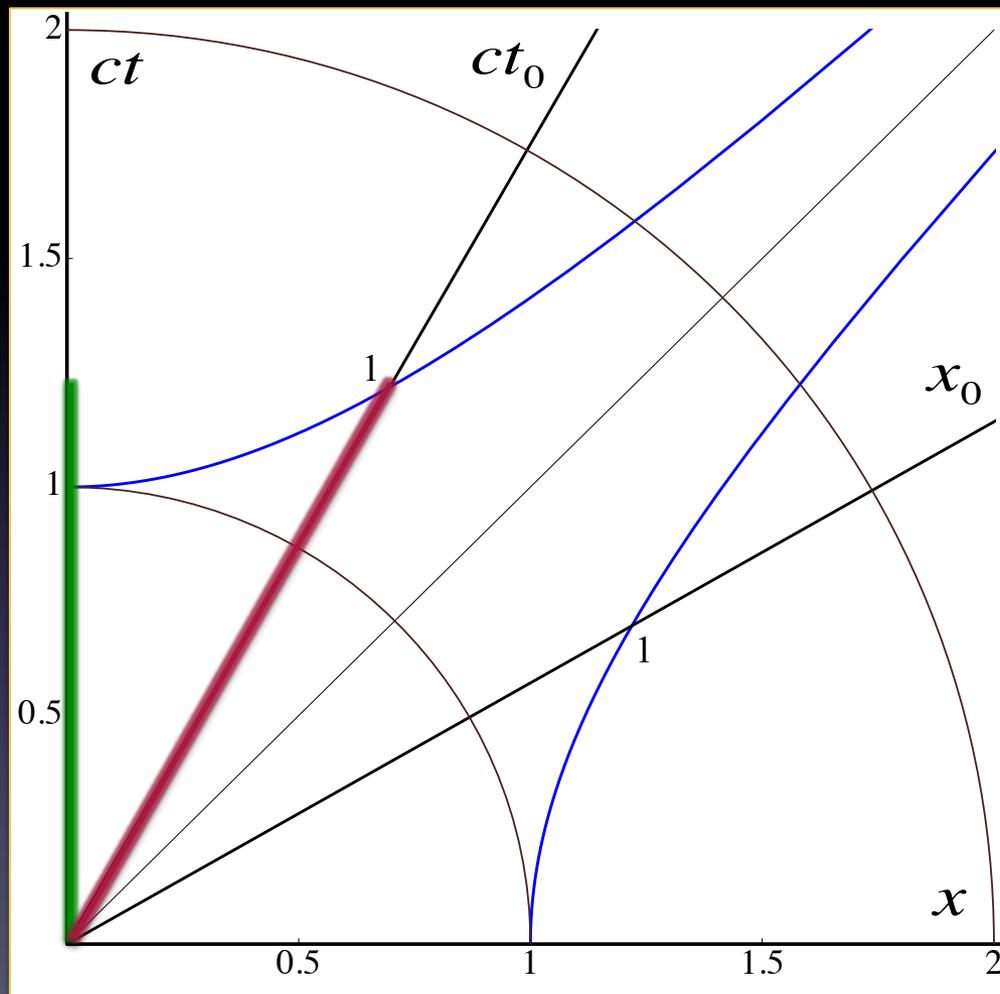
As transformações de Lorentz preservam áreas.

$$ct = \gamma ct_0 + \beta \gamma x_0$$
$$x = \gamma x_0 + \beta \gamma ct_0$$

$$\beta = \frac{\mathbf{v}}{c}; \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Dilatação do tempo

tempo
espaço



$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Peculiaridades da Relatividade Restrita

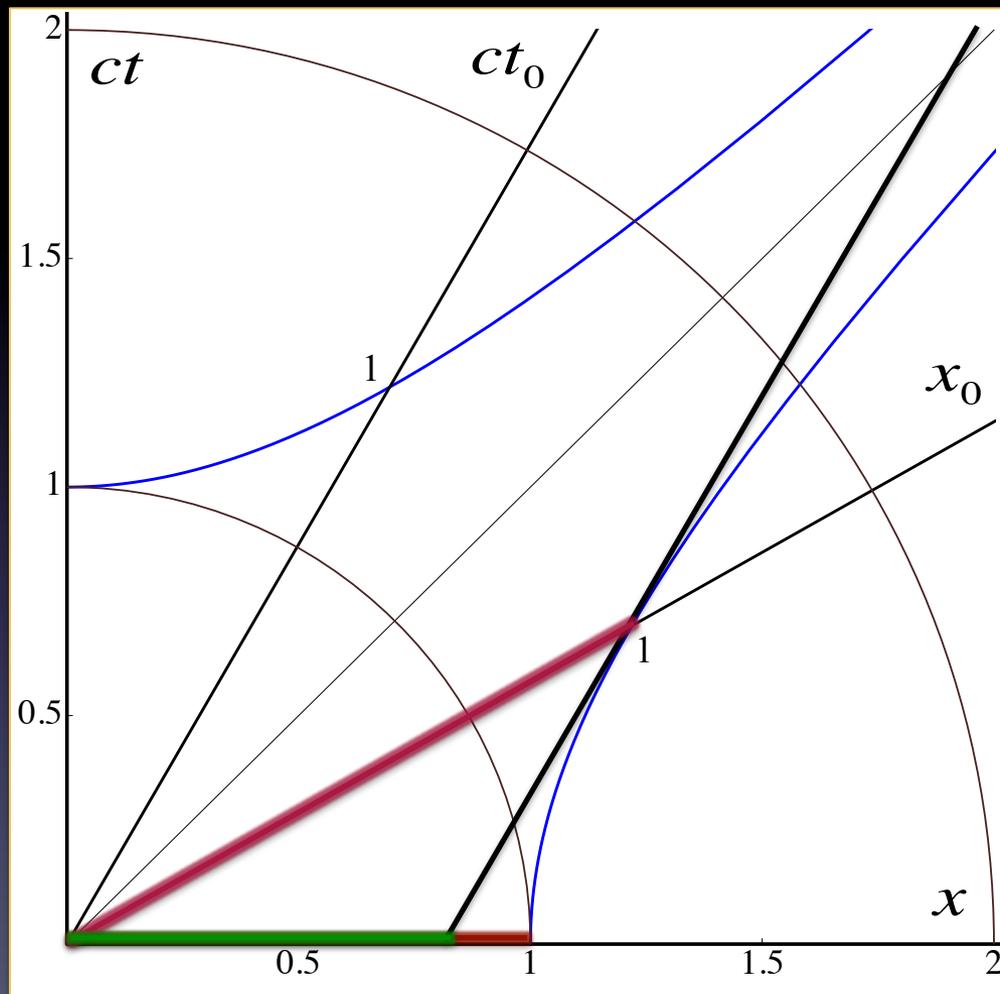
✧ Dilatação do tempo:



Decaimento de múons provenientes de raios cósmicos.



Contração de Lorentz



$$\Delta x = \gamma^{-1} \Delta x_0$$

Peculiaridades da Relatividade Restrita

✧ Dilatação do tempo:

➡ Decaimento de muões provenientes de raios cósmicos.

✧ Contração de Lorentz:

➡ Uma régua em movimento uniforme “encurta”.



Peculiaridades da Relatividade Restrita

✧ Dilatação do tempo:

➡ Decaimento de múons provenientes de raios cósmicos.

✧ Contração de Lorentz:

➡ Uma régua em movimento uniforme “encurta”.

✧ Adição das velocidades:

➡ Existe uma velocidade máxima (= velocidade da luz, c).

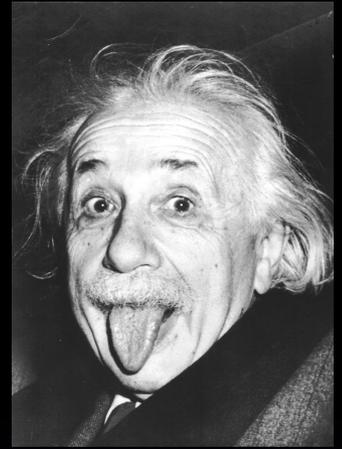


$$\mathbf{v}_{tot} = \frac{\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2}{1 + \mathbf{v}_1 \mathbf{v}_2 / c^2}$$

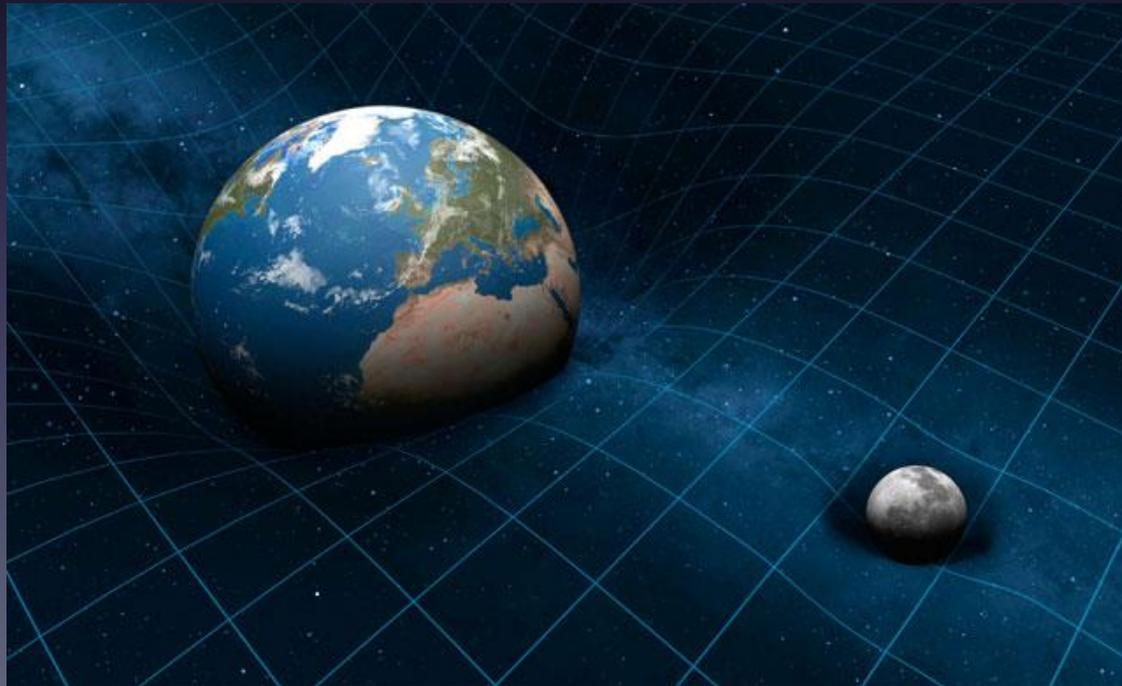
Relatividade Geral

Relatividade Geral

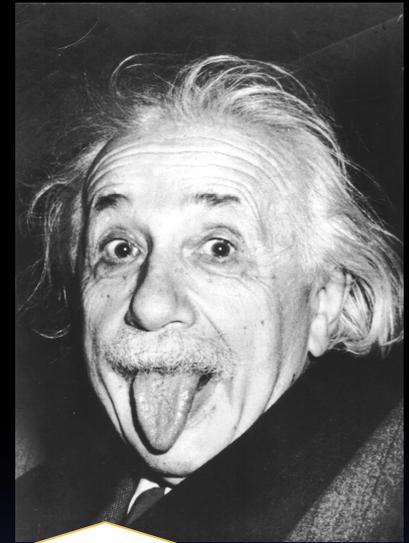
✧ Dez anos depois Einstein concebeu a teoria da Relatividade Geral (1915), combinando as ideias de Newton com os princípios da Relatividade Restrita.



✧ Espaço, tempo e gravitação não existem separadamente da matéria.



O Princípio da Equivalência



$$F = m_g g \quad \left(= G \frac{m M_{\oplus}}{r_{\oplus}^2} \right)$$

$$F = m_i a$$

“we [...] assume the complete physical equivalence of a gravitational field and a corresponding acceleration of the reference system” —Einstein, 1907

$$m_i = m_g$$



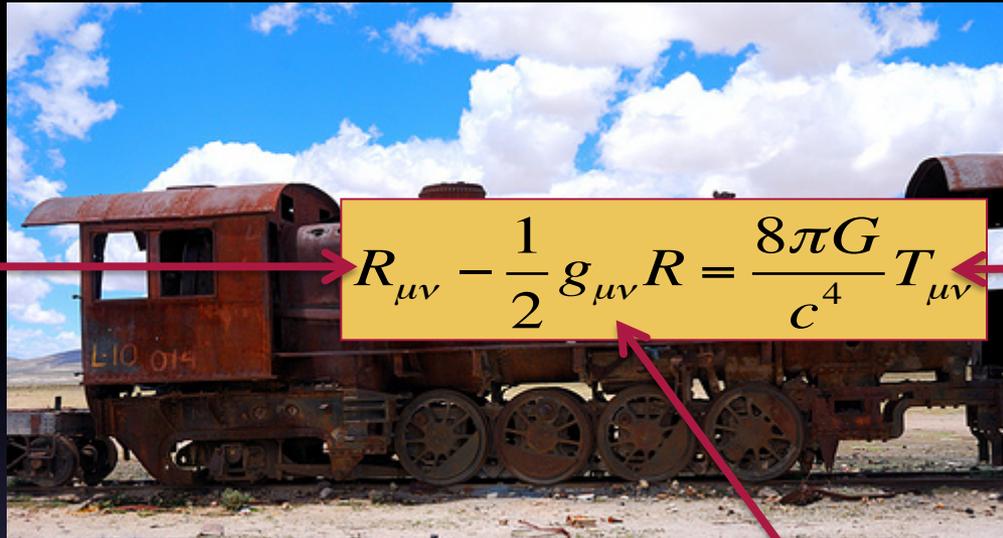
A força imputada por um campo gravitacional a um corpo é indistinguível da força aparente criada por um movimento não-uniforme (acelerado)

As equações de Einstein



As equações de Einstein

geometria



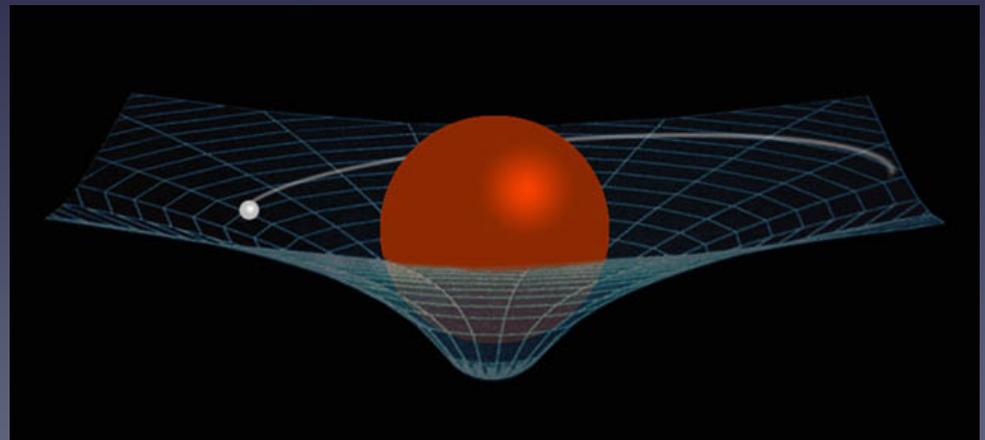
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

matéria

métrica

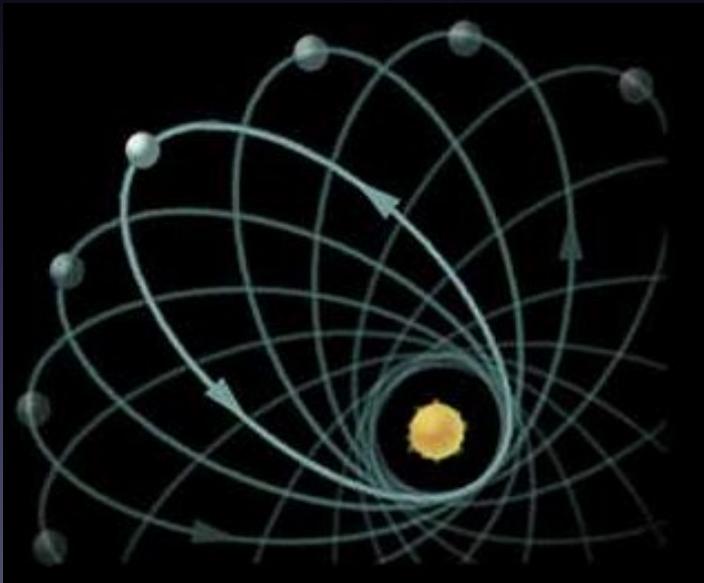
As equações de Einstein definem

- ✧ como a matéria deforma o espaço-tempo;
- ✧ como a geometria do espaço-tempo induz o movimento dos corpos.

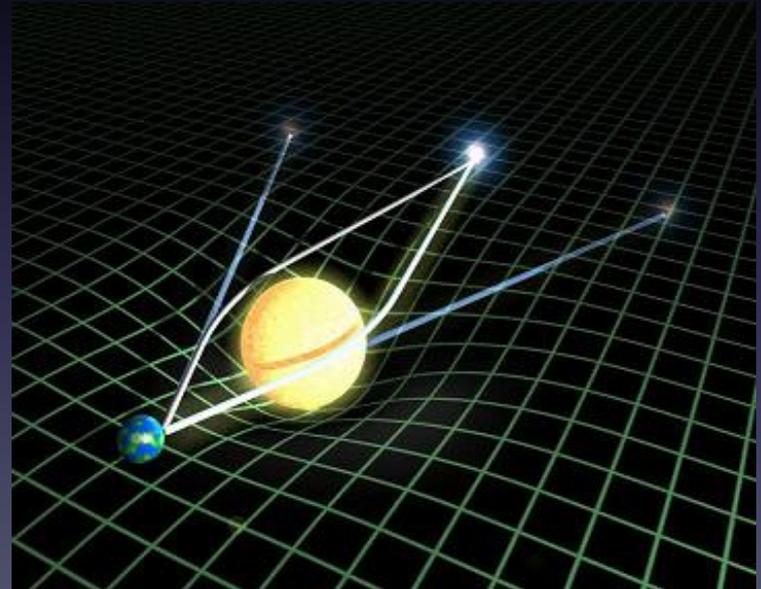


Relatividade Geral vs. Mecânica Newtoniana

A Relatividade Geral é a teoria de que dispomos que melhor descreve o fenómeno da gravitação.



✧ Avanço do perihélio

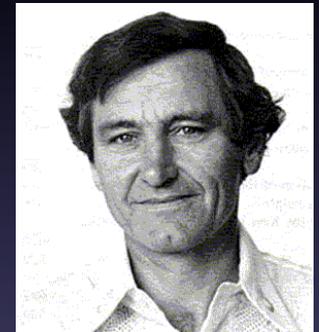
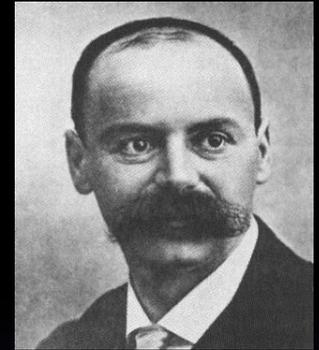


✧ Deflecção da luz

Buracos Negros

Buracos negros: um conceito matemático

- ✧ A solução mais básica, descrevendo um buraco negro estático, foi prontamente descoberta por Schwarzschild em 1916.
 - ✧ Somente 40 anos depois é que a comunidade científica tomou consciência do seu significado físico.
- ✧ A solução correspondendo a um buraco negro em rotação foi descoberta apenas em 1963 por Kerr.



**Buracos negros são os objectos mais simples do universo.
São completamente descritos por poucos parâmetros:
massa, momento angular, ...**

Buracos negros são o laboratório teórico ideal

Singularidade: uma peculiaridade embaraçosa

A teoria da Relatividade Geral permite (e em certas situações até garante!) a existência de **singularidades**.

O que à partida parece uma curiosidade matemática engraçada ...



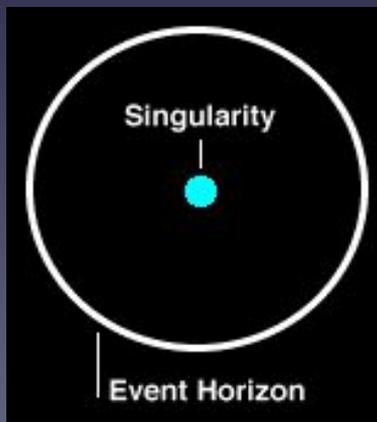
Singularidade: uma peculiaridade embaraçosa

A teoria da Relatividade Geral permite (e em certas situações até garante!) a existência de **singularidades**.

O que à partida parece uma curiosidade matemática engraçada ...

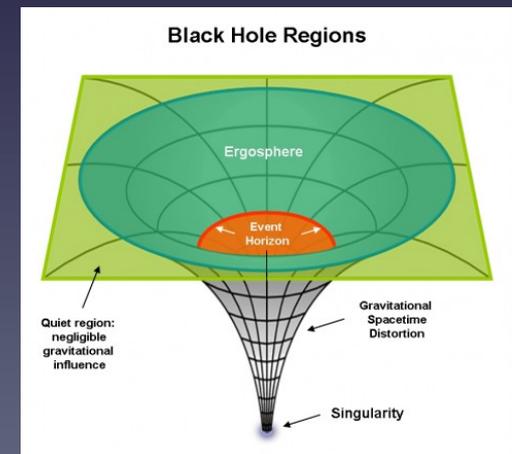


... torna-se um monstro difícil de eliminar.



Felizmente podemos escondê-los.

Buracos negros possuem **horizontes de eventos** que cobrem as singularidades.

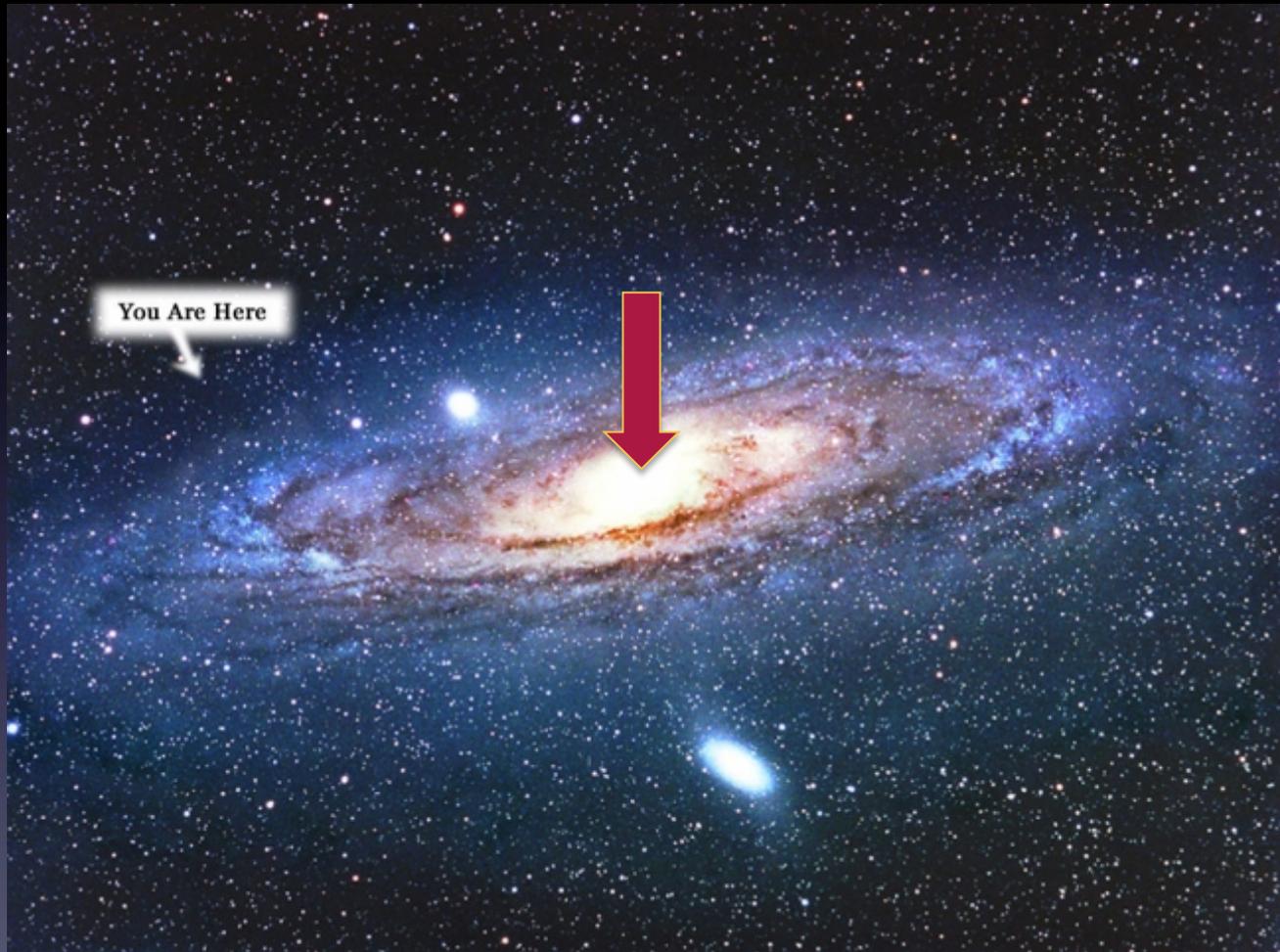


Horizonte de eventos: significado físico

- ✧ Horizontes de eventos são superfícies imaginárias que “rodeiam” as singularidades e correspondem a “pontos sem retorno”.
- ✧ Depois de atravessar o horizonte nada pode escapar a um buraco negro: nem sequer a luz!



Buracos negros: do conceito à realidade



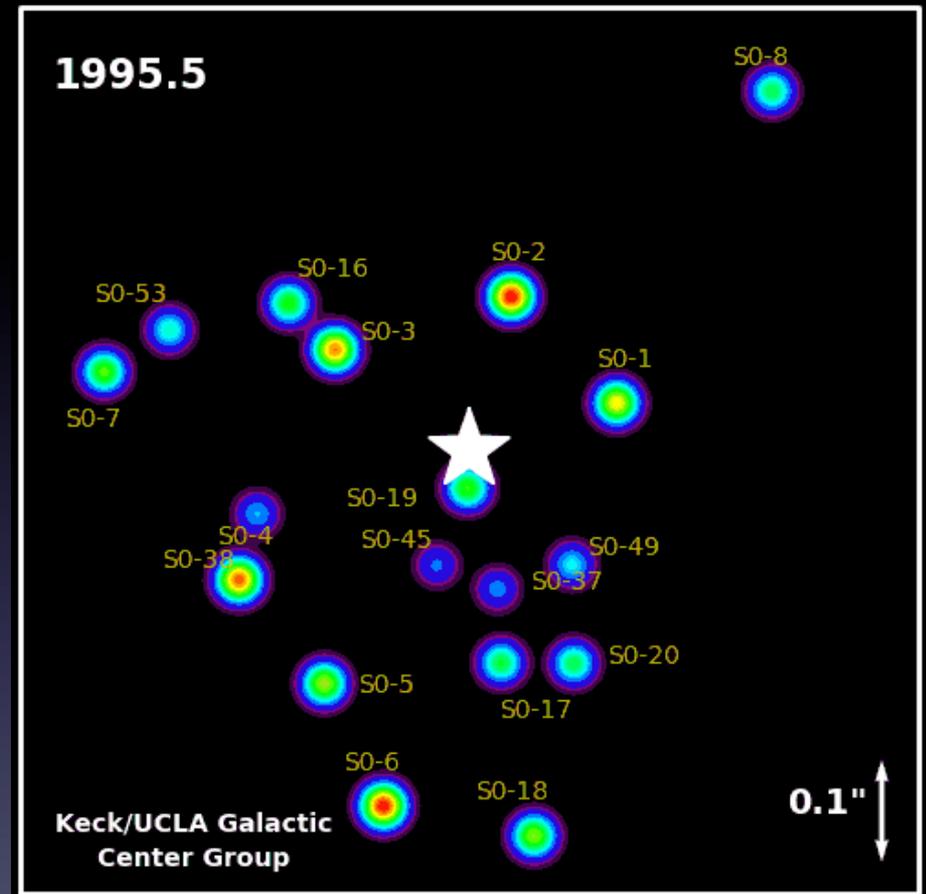
O centro da maioria das galáxias é habitado por um **buraco negro supermassivo**.

“Observando” buracos negros

Não podemos *ver* buracos negros ...

... mas conseguimos ver estrelas orbitando à sua volta.

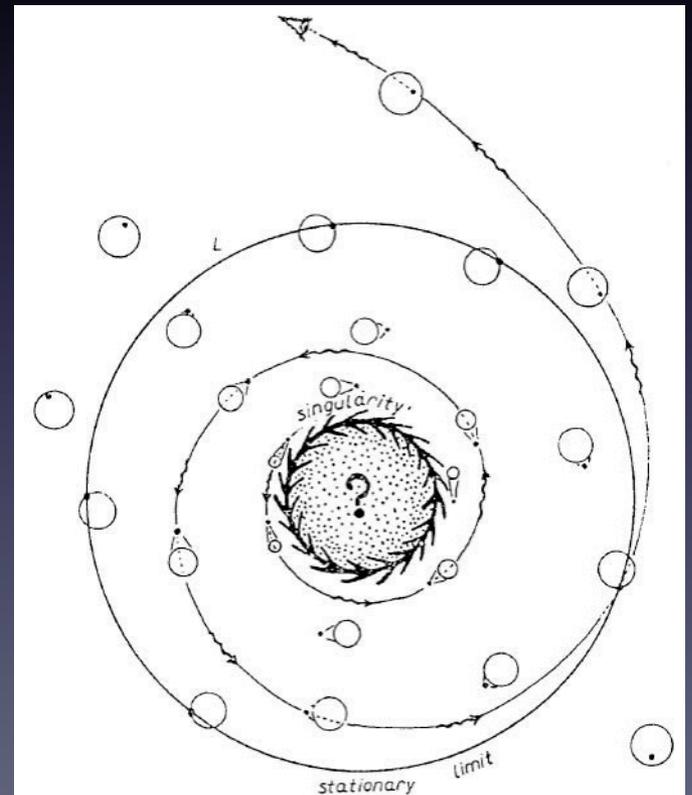
Tal efeito foi observado no centro da nossa própria galáxia, a Via Láctea.



Através das órbitas inferimos a presença de um buraco negro, com uma massa de aproximadamente **4 milhões de vezes a massa do Sol**.

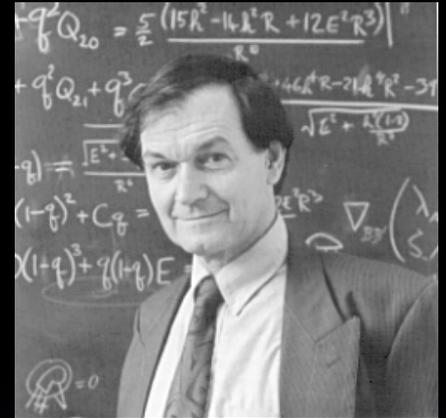
Singularidades despidas

- ✧ Para compreender a Física em torno das singularidades falta-nos uma teoria de **Gravidade Quântica**.
- ✧ Em buracos negros as singularidades encontram-se convenientemente vestidas.
- ✧ Existem soluções matemáticas possuindo singularidades mas sem horizontes.
 - ✧ Exemplo: impondo demasiada rotação a um buraco negro.



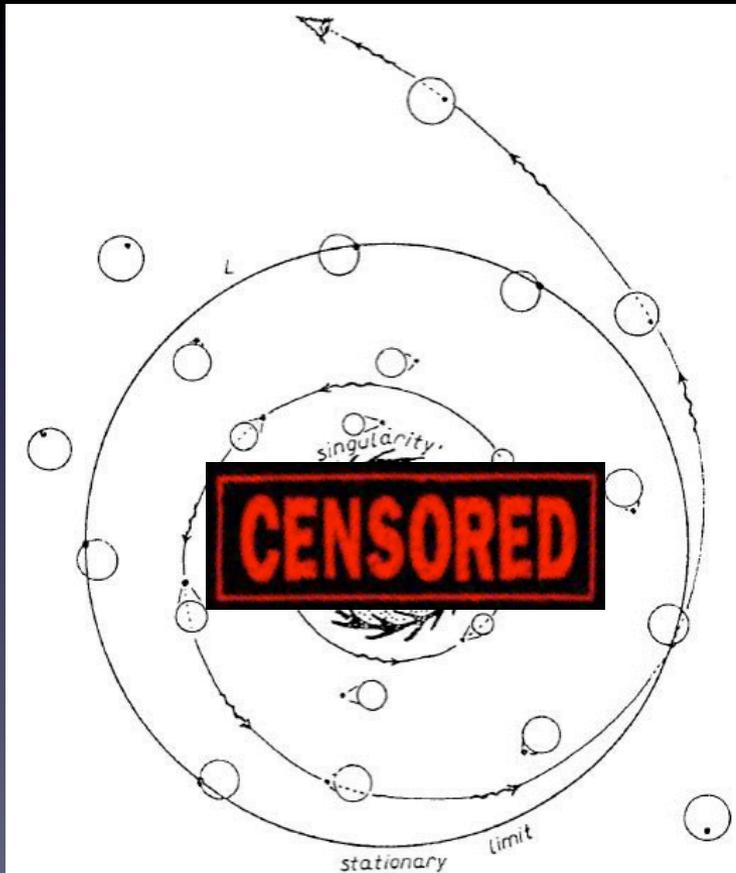
Censura cósmica

- ✦ Em 1969, Penrose formulou a conjectura da censura cósmica.



Conjectura:

A Relatividade Geral evolui qualquer sistema inicial (regular e genérico) de modo a que possíveis singularidades que apareçam estejam sempre escondidas por horizontes.



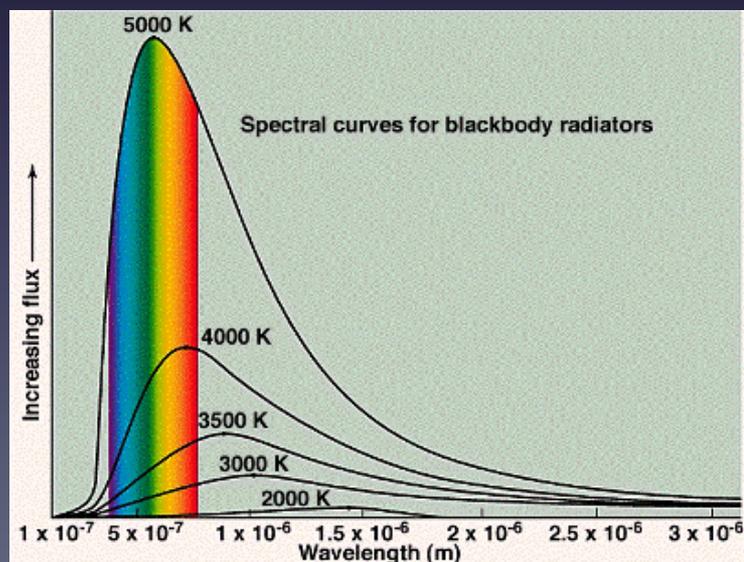
Como provar esta conjectura?

Efeitos quânticos em buracos negros

- ✧ Em 1974, Hawking mostrou que, conjugando Mecânica Quântica com Relatividade Geral, buracos negros emitem radiação.



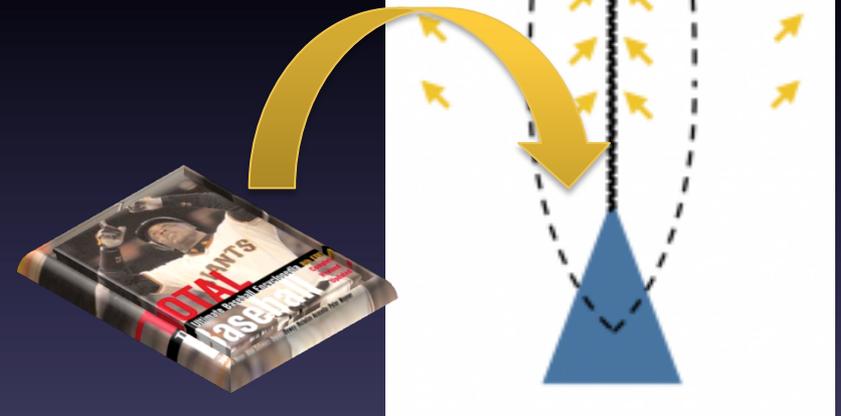
➡ buracos negros evaporam!



- ✧ Para além disso, a radiação que emitem é muito especial: é radiação de corpo negro, caracterizada somente por um número – a temperatura do buraco negro!

Paradoxo da informação

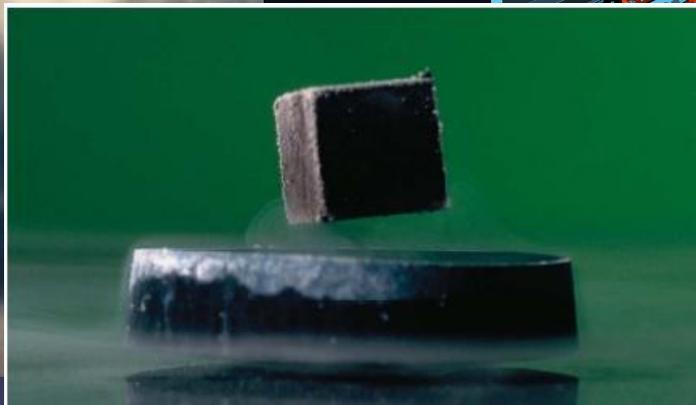
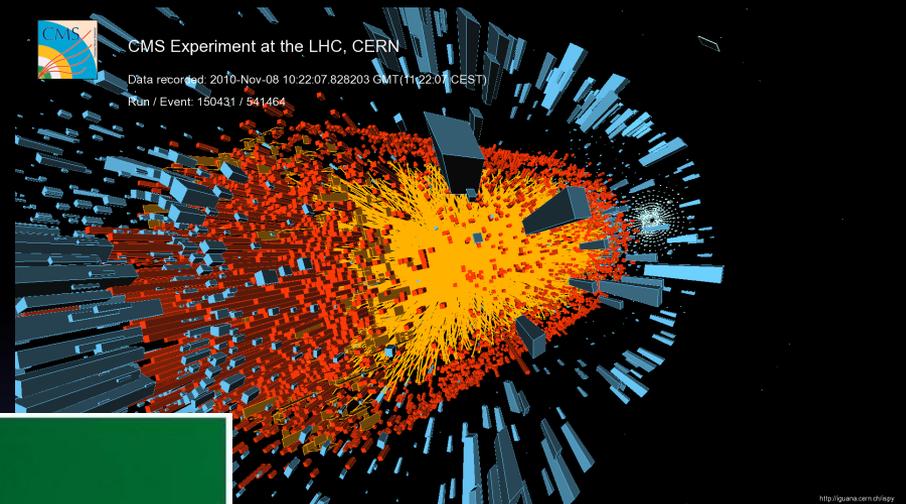
- ✧ A conciliação da Mecânica Quântica com a Relatividade Geral não é pacífica: informação pode ser destruída num buraco negro.



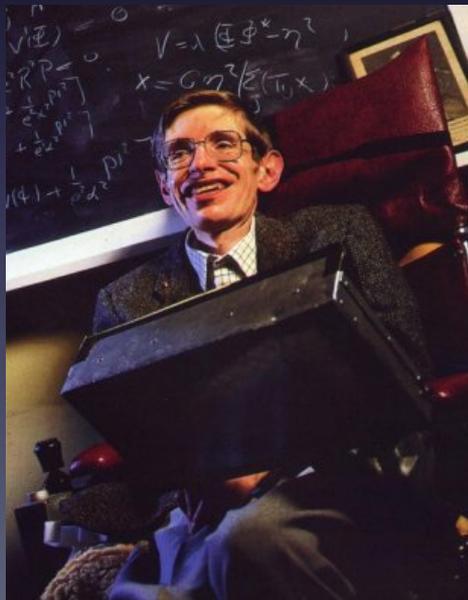
- ✧ Mas a preservação (microscópica) da informação é um dos princípios fundamentais da Mecânica Quântica!???

Como resolver este paradoxo?

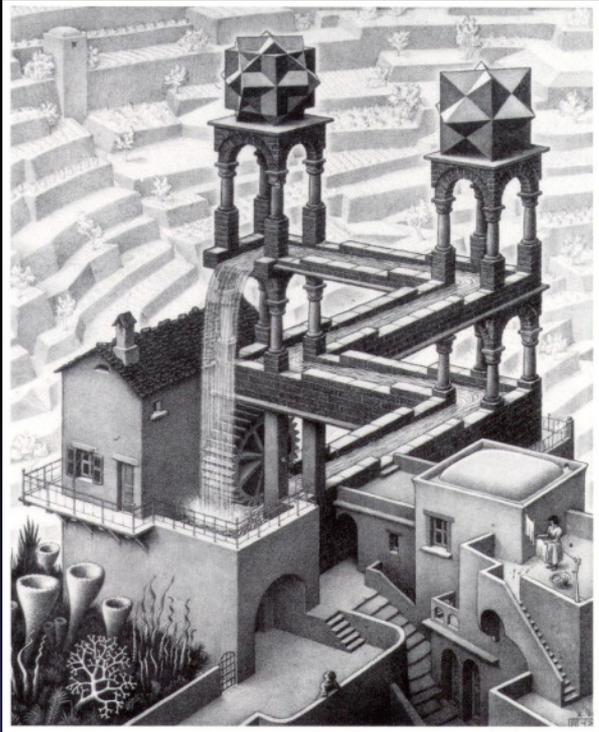
Aplicações modernas do estudo de buracos negros



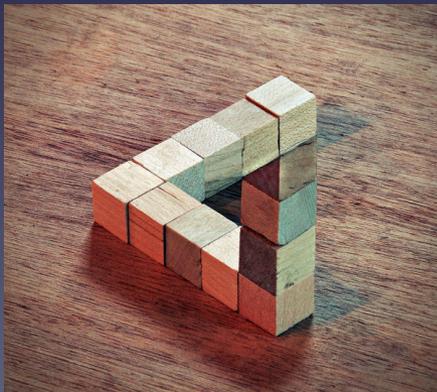
“Understanding is, after all, what science is all about — and science is a great deal more than mindless computation.” (R. Penrose)



“Not only does God play dice, but he sometimes throws them where they cannot be seen.” (S. Hawking)



O mundo
está cheio
de mistérios
por desvendar.



Obrigado

