



Nas Fronteiras da Gravitação

Gravitação de Newton

Acção à distância

Acção instantânea (contradiz RR)

Todos os objectos caem de igual forma

Ioannes Philliponus (~600AC): “... deixe-se cair da mesma altura dois corpos, um muito mais pesado que o outro ... A diferença entre os tempos é muito pequena”

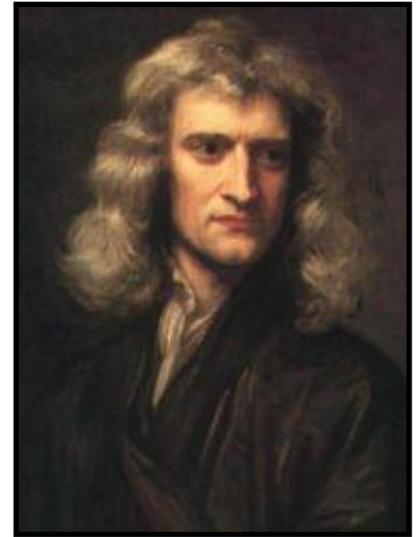
Simon Stevin (1548-1620):
Demonstração experimental (1586)



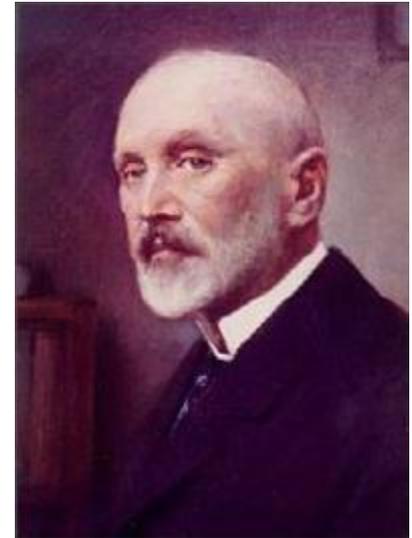
Galileo (1564-1642)



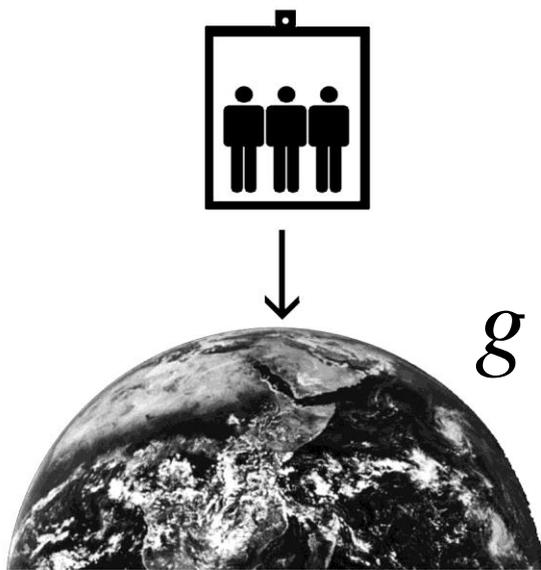
Newton (1643-1727): pêndulo de madeira, ouro, prata, chumbo, etc.



Roland von Eotvos (1848-1919):
balança de torção (1889, 1908)
demonstra equivalência $\sim 10^{-9}$.



Princípio de Equivalência



Elevador caindo livremente

=



Elevador em espaço vazio com velocidade constante

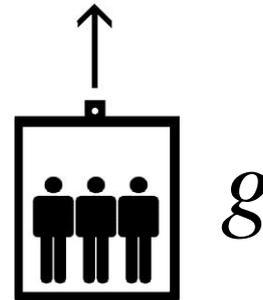


Princípio de Equivalência

Elevador
parado em
campo
gravítico



=

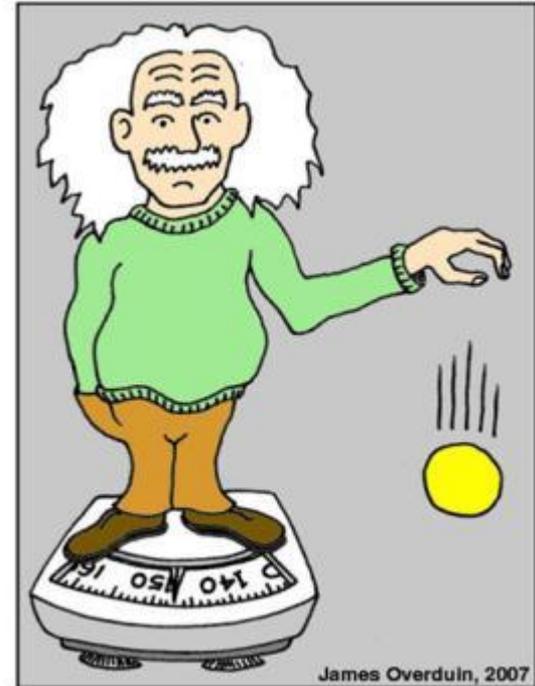


Elevador
acelerado
no espaço vazio

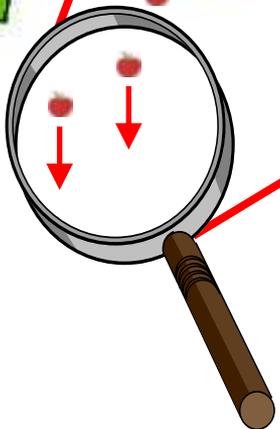
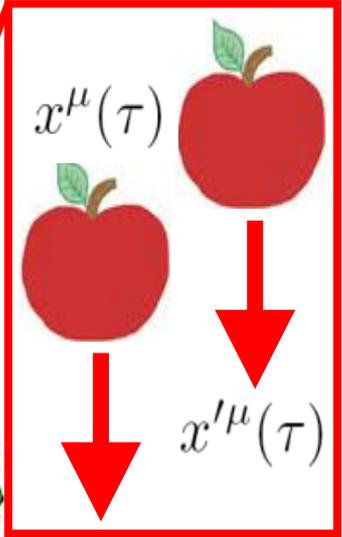
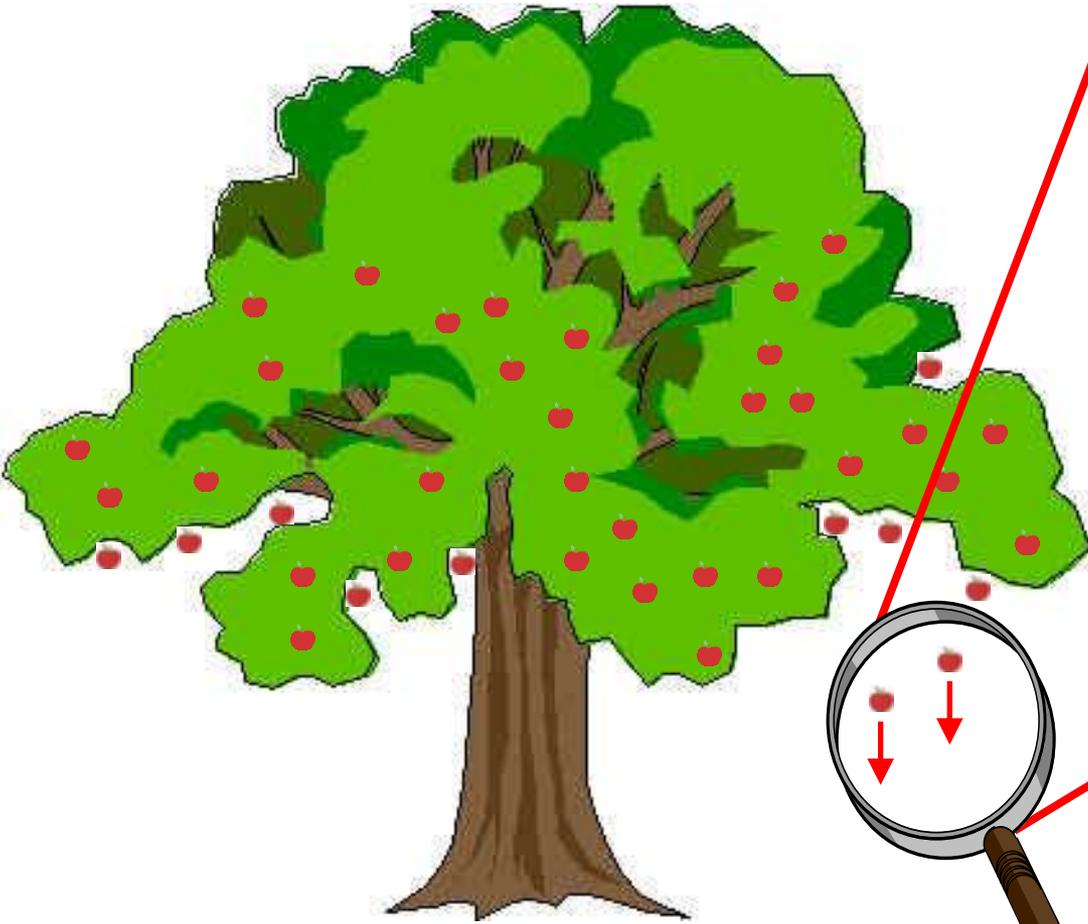


g

Einstein: Não há nenhuma experiência que consiga distinguir entre um campo gravítico e um campo de acelerações



P: Einstein está no espaço vazio ou num campo gravítico?
R: Não sabemos!



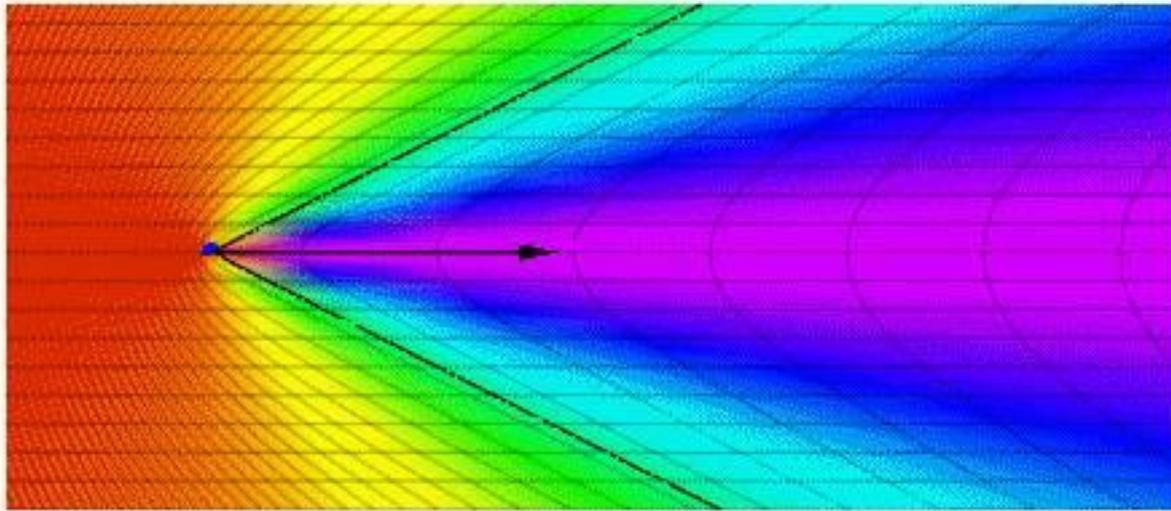
Efeito Doppler

•

•



Luz



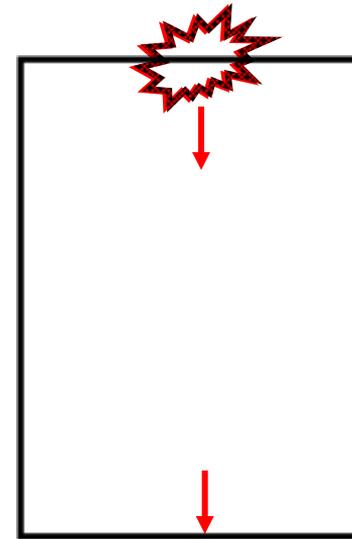
Onda electromagnética

Velocidade $c=300.000$ Km/s

Efeito Doppler:

Desvio para o vermelho

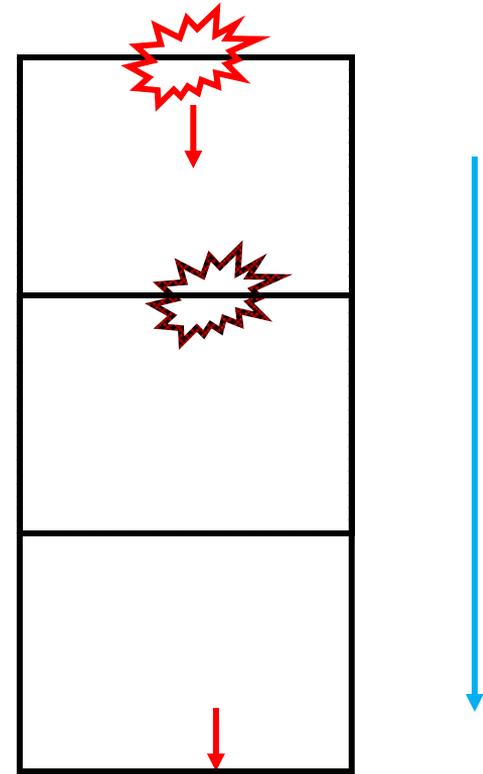
Observador em queda livre:
vê luz com a mesma frequência (cor)



Queda livre

Desvio para o vermelho

Princípio da Equivalência:
gravidade provoca desvio
para o vermelho da luz.



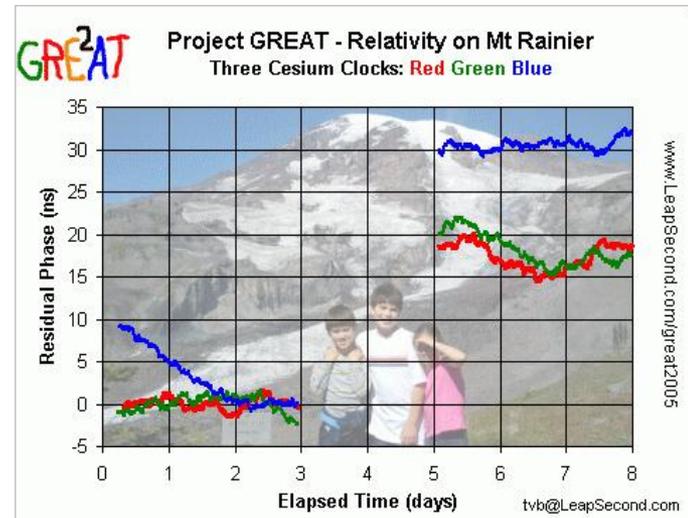
Observador acelerado

Pound-Rebka (1959)



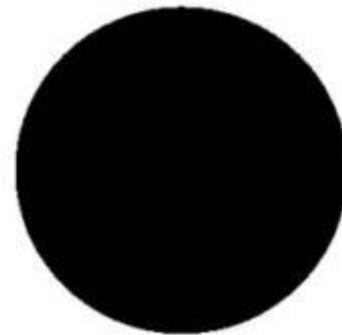
Laboratório de Jefferson, Harvard

Dilatação do tempo

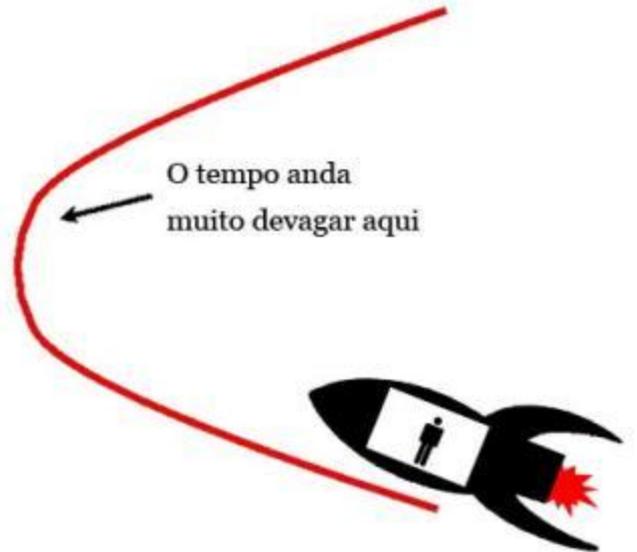


Como viver durante 1000 anos!

Ir para onde a gravidade é muito forte! Por exemplo, buraco negro...



Buraco Negro



Global Positioning System (GPS)

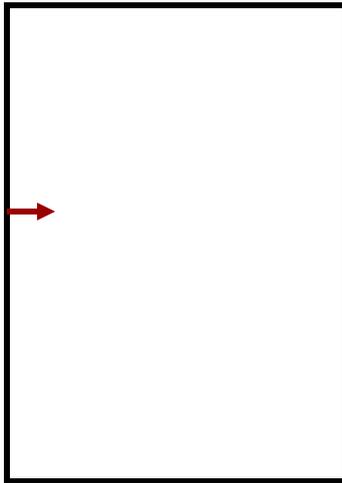


Gravidade atrai a luz



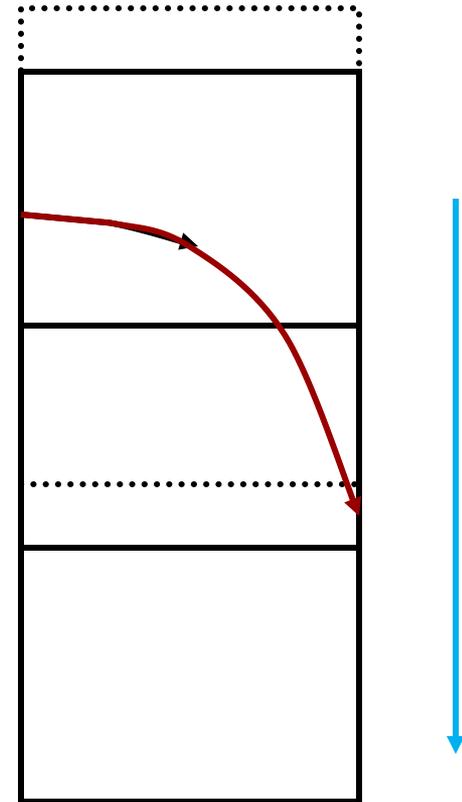
Observador num referencial em queda livre

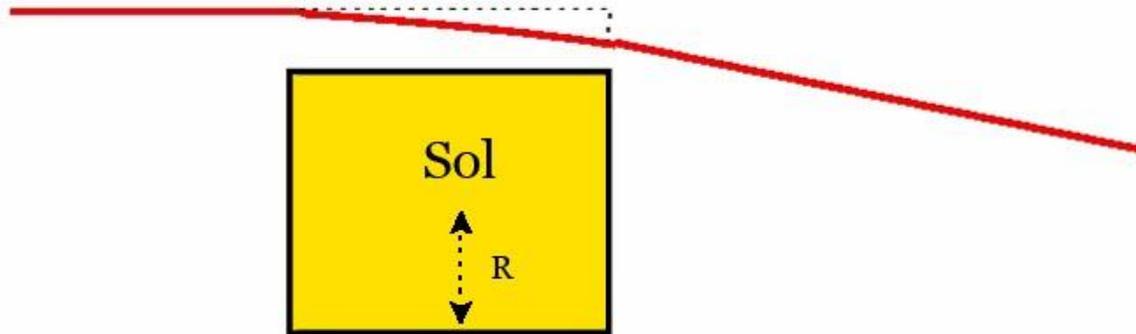
Gravidade atrai a luz



Princípio Equivalência:
Referencial acelerado é
equivalente a gravidade

Observador no exterior





Tempo que leva a percorrer $2R$: $2R/c$

Distância que cai nesse tempo: $1/2 g t^2 = 2g R^2/c^2$

Logo, ângulo: $gR/c^2 = GM/Rc^2$

Para o Sol ($M= 2 \times 10^{30}$ Kg e $R=7 \times 10^8$ m): $1.7''$ (segundos d'arco)

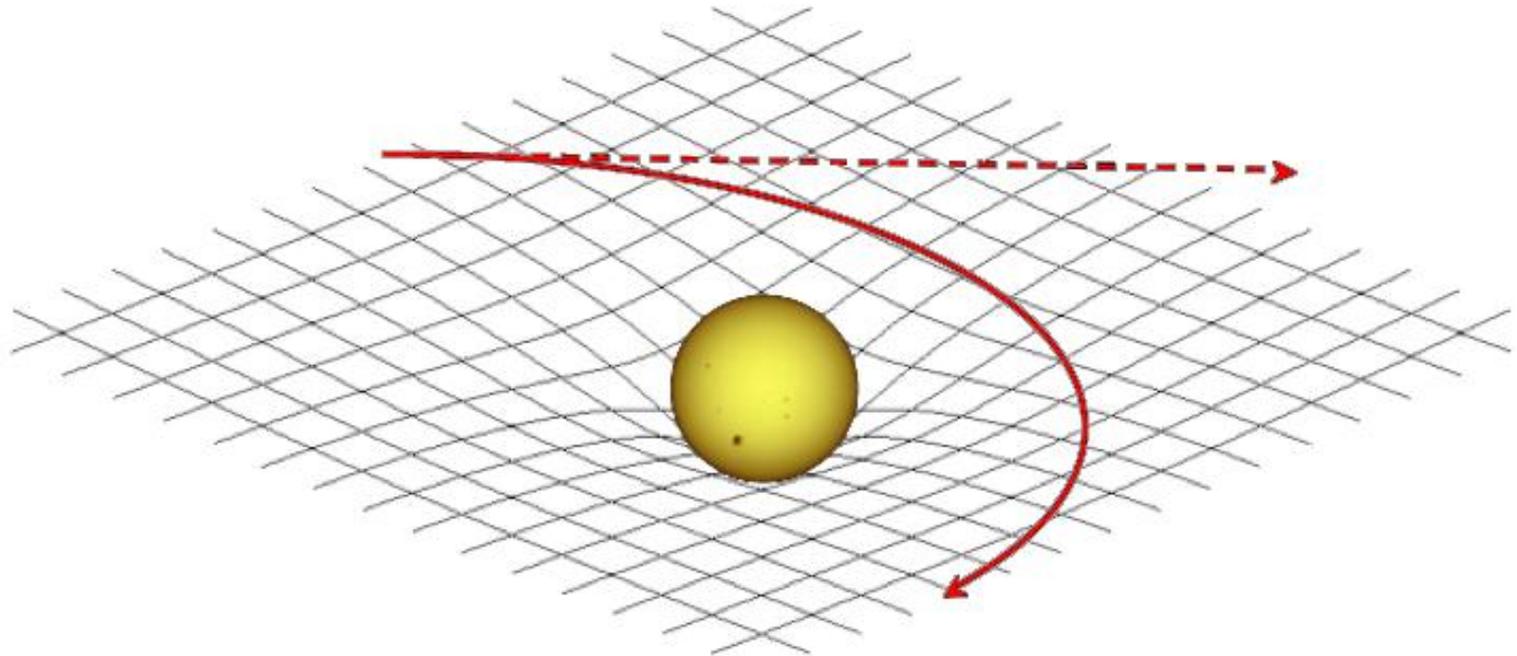
1915. Albert Einstein completa a teoria da gravitação, conhecida com a teoria da relatividade geral, em Nov. 25, 1915.

1919. O eclipse de 29 Maio confirma que a gravidade afecta a trajectória da luz. Os resultados foram divulgados em Novembro; com 40 anos, Albert Einstein torna-se uma celebridade.

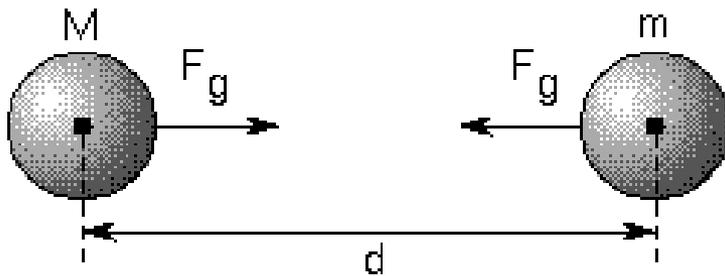


Roça Sundy, Ilha do Príncipe

Gravidade atrai a luz!



Newton: “Acção à distância”



$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$

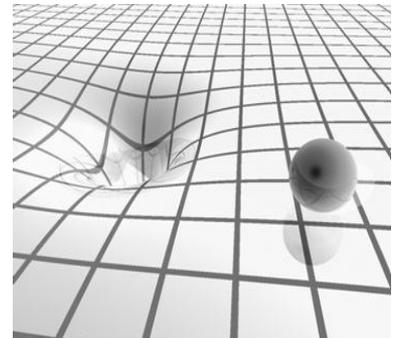
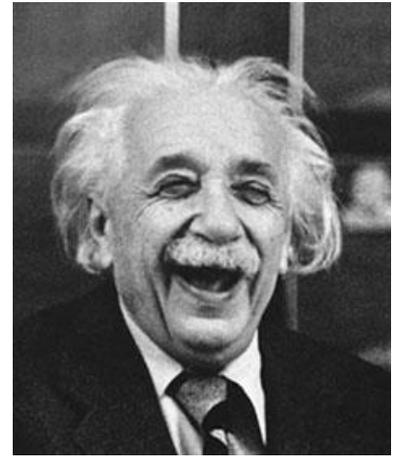


Einstein: Gravidade é curvatura

*“O espaço-tempo diz à matéria como mover,
a matéria diz ao espaço-tempo como curvar”*

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

*Qualquer massa-energia curva o espaço-tempo;
objectos livres seguem a curvatura*



Buracos Negros

1971. O primeiro objecto a ser reconhecido e aceite como sendo um buraco negro é Cygnus X-1, uma binária de raios-X na constelação do Cisne, com uma massa de cerca de 8 vezes a massa do Sol. (O termo 'buraco negro' tinha sido cunhado 2 anos antes pelo americano **John Wheeler**).

2002. No centro da nossa própria galáxia está um buraco negro com cerca de 4 milhões a massa do Sol...

A Via Láctea:

~ 100,000 de anos-luz de comprimento

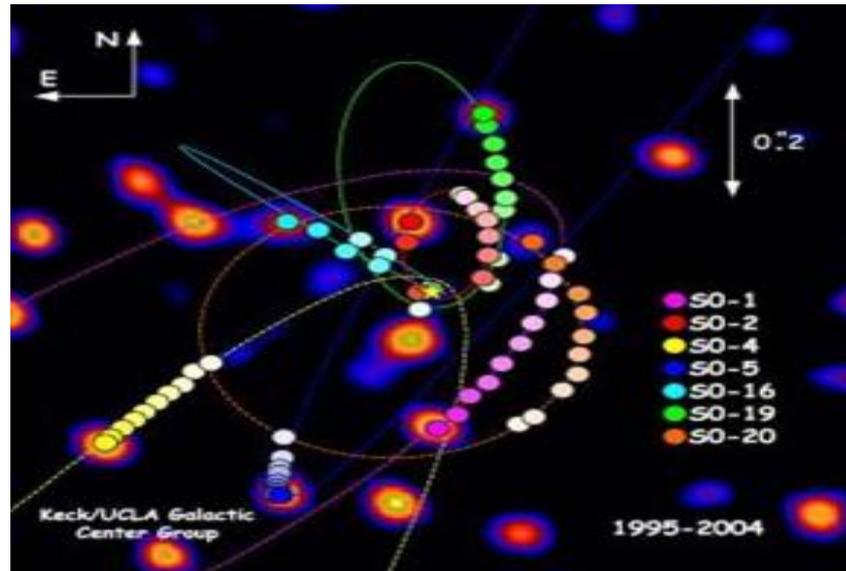
Sistema Solar: 0.01 anos-luz

Distância típica inter-estelar: 1 ano-luz

Massa BN Central: 4 milhões M_{sol}
~ milhões de BNs com $10 M_{\text{sol}}$

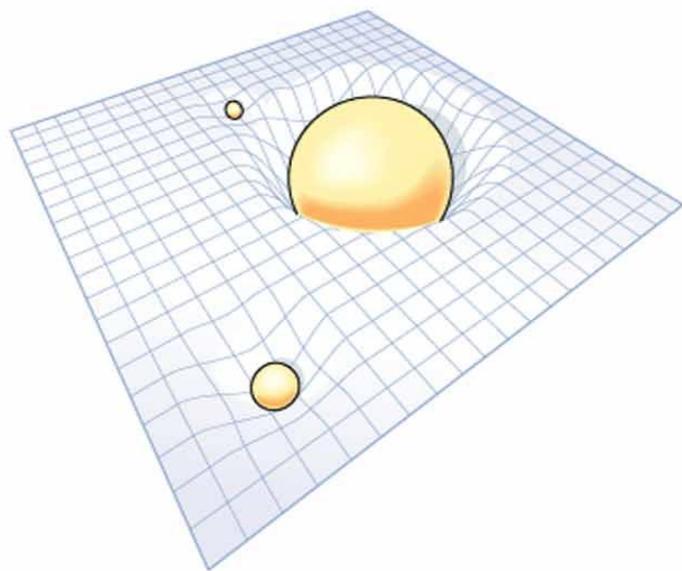


O nosso buraco negro

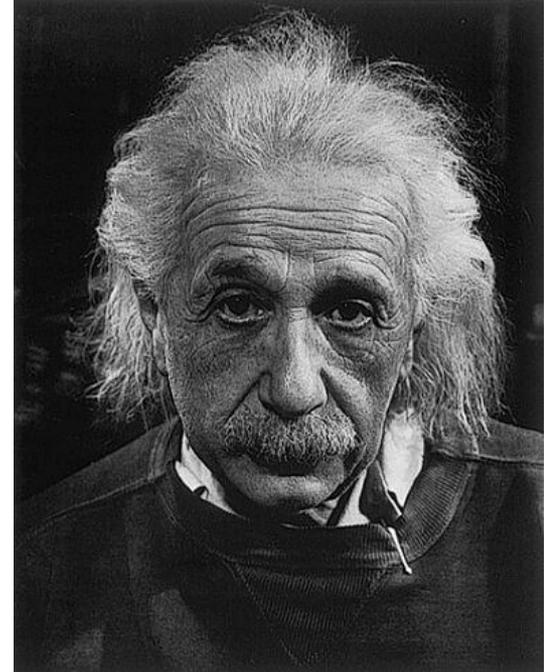


**O próximo filme é cortesia de
Ralf Kaehler (AEI/ZIB) e Bruno Giacomazzo, LR (AEI)**

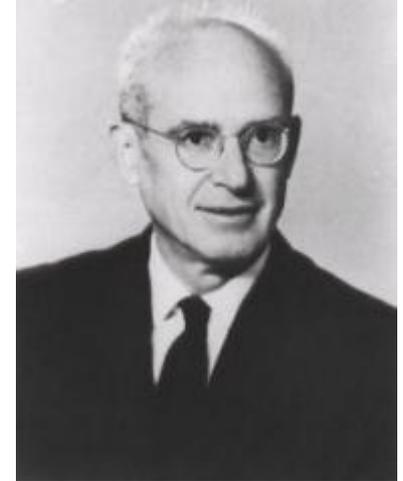
Qual é o **som** dos buracos negros?



Em 1916, **Einstein** mostra que ondas gravitacionais são uma consequência da teoria linear.



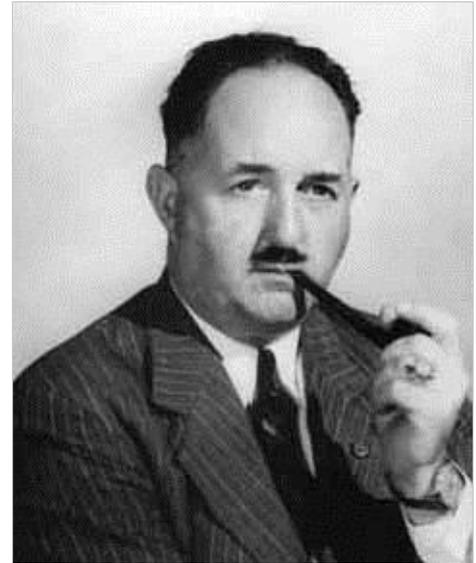
Em 1936, com **Nathan Rosen**, submete o artigo **Do gravitational waves exist?** para a Physical Review.



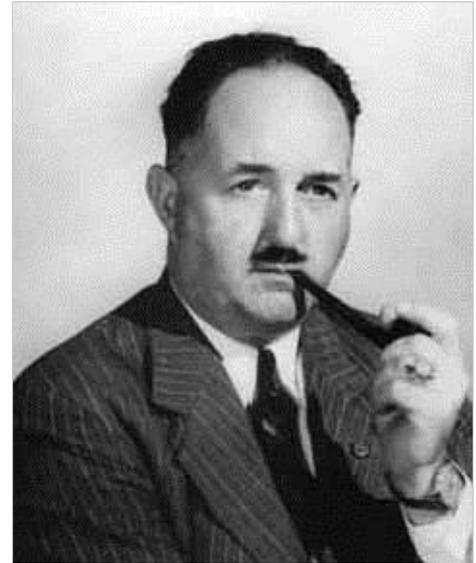
“Juntamente com um jovem colaborador, mostrei que ondas gravitacionais não existem, apesar de terem sido dadas como garantidas [...] Isto mostra que a teoria tem muito mais para mostrar.”

Einstein em carta para Born, 1936

O artigo foi rejeitado (por Robertson), e Einstein teve uma reacção pouco diplomática:



O artigo foi rejeitado (por Robertson), e Einstein teve uma reacção pouco diplomática:



“Não vejo razão para perder tempo com a opinião – errada – dos vossos editores ou árbitros”

Resposta de Einstein ao Editor da Physical Review

Chapel Hill Conference, 1956

Feynman propõe experiência para mostrar que OGs transportam energia.



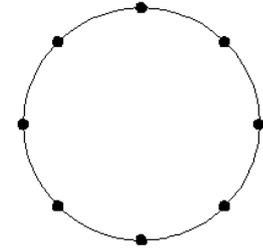
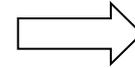
1960. No dia 1 de Janeiro (há 50 anos), a Physical Review D publicou um artigo de **Joseph Weber** intitulado "Detection and Generation of Gravitational Waves". Este artigo foi a primeira proposta prática para detectar ondas gravitacionais.



$$\delta L = h_+ L$$

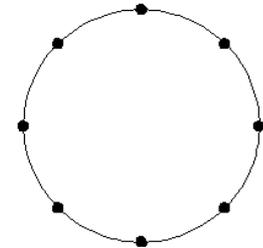
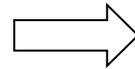
Polarização “+” :

$$h_+$$



Polarização “x”:

$$h_x$$



Ou, se preferirem...



...experimentem aqui mesmo...

Ondas gravitacionais:

Viajam à velocidade da luz

Interagem muiiiiito fracamente

$\lambda \sim$ Tamanho da fonte

Detectores “ouvem” em qualquer direcção

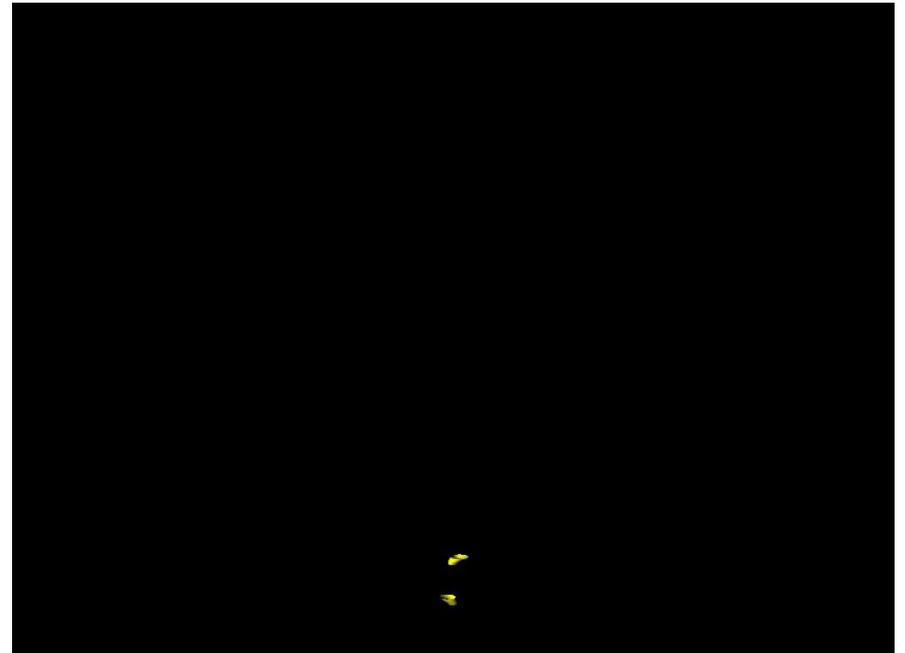
Fontes de OGs

Binárias de buracos negros

Explosões gravitacionais
(e.g. supernovae)

Estrelas de nêutrons em rotação

Ecos do Big bang



Courtesy M. Thierfelder and B. Bruegmann



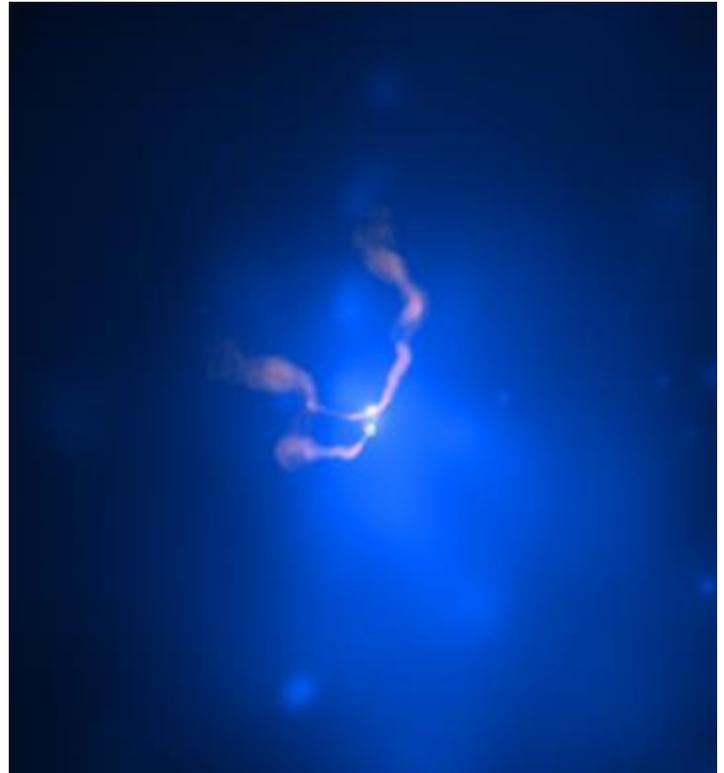
Fontes de OGs

Binárias de buracos negros

Explosões gravitacionais
(e.g. supernovae)

Estrelas de nêutrons em rotação

Ecos do Big bang

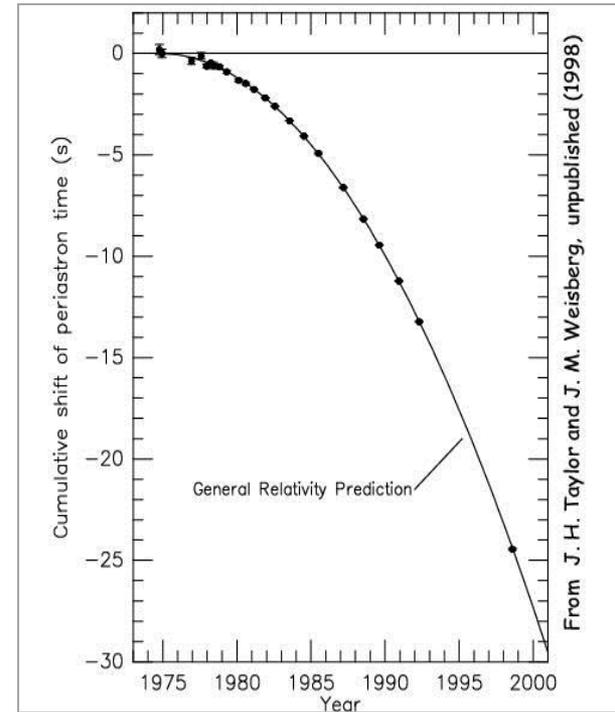


Intensidade

Distância Terra-Sol....

...varia por uma fracção de um átomo!

Será que existem?



LIGO



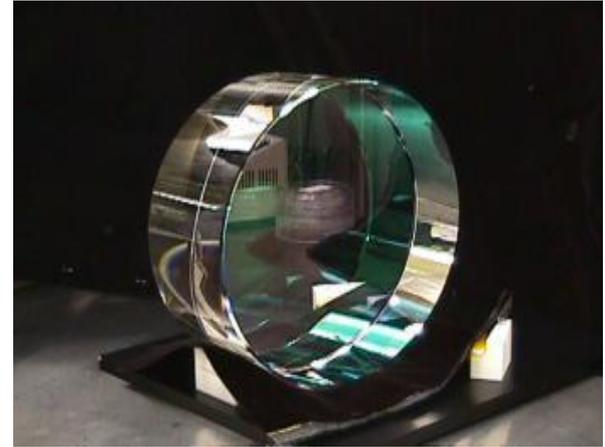
Hanford, Washington



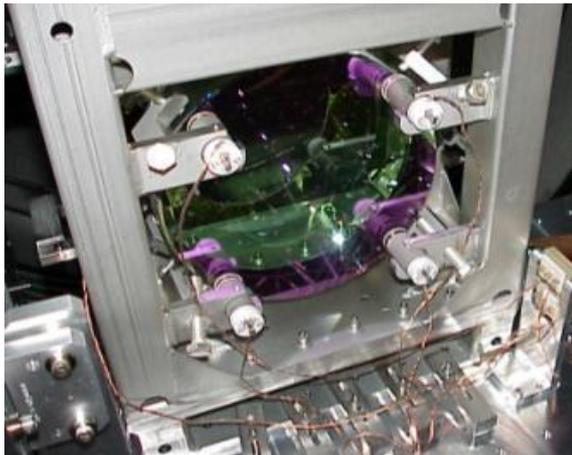
Livingston, Louisiana



Equipamento vácuo



óptica



Suspensão óptica



Suspensão sísmica

E quando as detectarmos?



Big Jay Mc Neely, Fotografia de Bob Willoughby

“Imaginem que conseguem ver mas são surdos, nunca conseguiram ouvir, e de repente adquirem a capacidade de ouvir – ganham um sentido de percepção extra”

B. Schutz, BBC