



**BIBLIOTECA**



# Relatividade Especial e Xeral para profanos

Dr. Willy H. Gerber

-

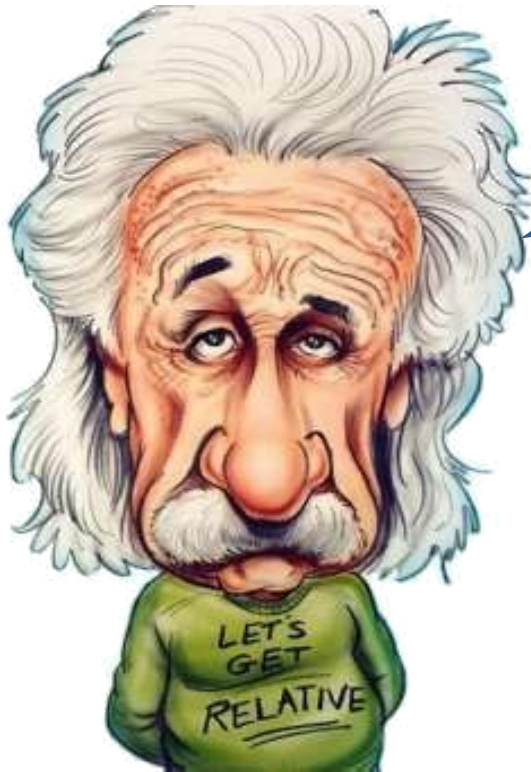
Socio Achaya

-

Instituto de Física

Universidade Austral de Chile, Valdivia





Hola,  
son Albert!

O noso obxectivo é explicar a Teoría Especial e Xeral da Relatividade na forma máis sinxela posible.

## Ondas e medios



Se guindamos unha pedra á auga observaremos ondas que se propagan pola superficie. O medio no que se propagan é a auga.



A onda  
propágase no  
medio auga



En 1905 moitos científicos intentaban demostrar a existencia do éter lumínico, o medio no que se propagaba a luz polo espazo.

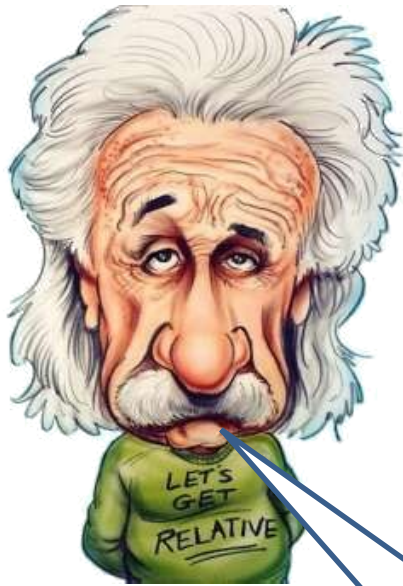


En 1905 todos buscaban o medio no que se propagaba a luz.

## Ondas e medios



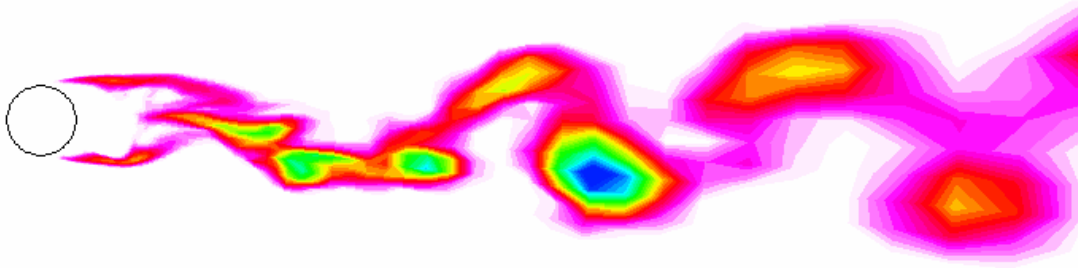
Desde había tempo, asumíase que ese elemento era o chamado “éter”, que debía encher o espazo permitindo que a luz das estrelas chegase a nós. O noso planeta debería “navegar” por el no seu movemento polo espazo.



Isto  
complícase

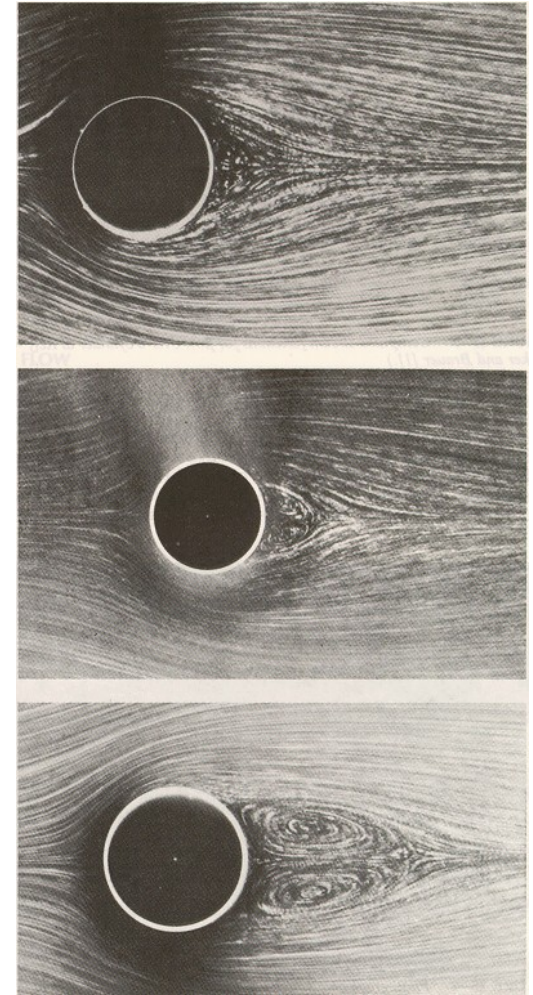






O comportamento do éter  
arredor da Terra podia ser  
complexo, pero ante todo  
deberiamos observar que se  
move a distintas velocidades  
segundo a posición desde a  
que observásemos.

Éter con  
turbulencias  
???



## Ondas e medios



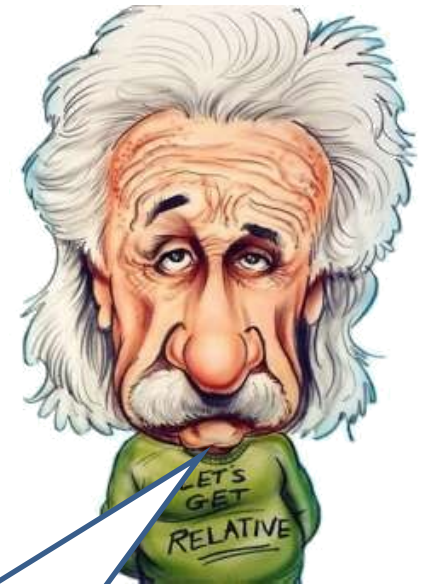
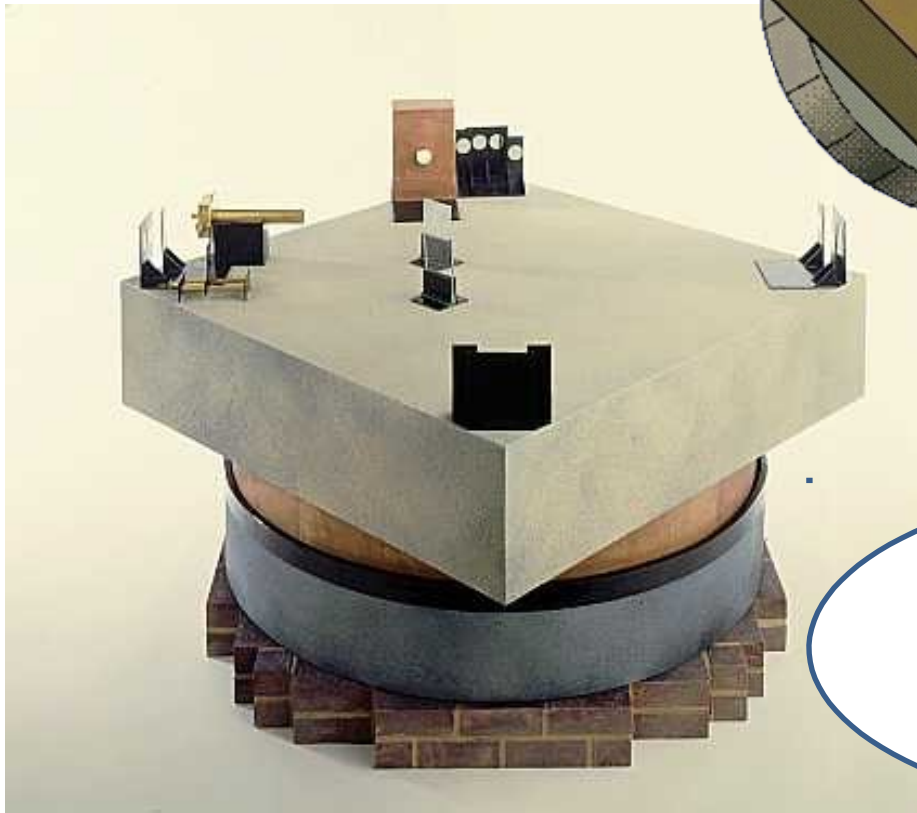
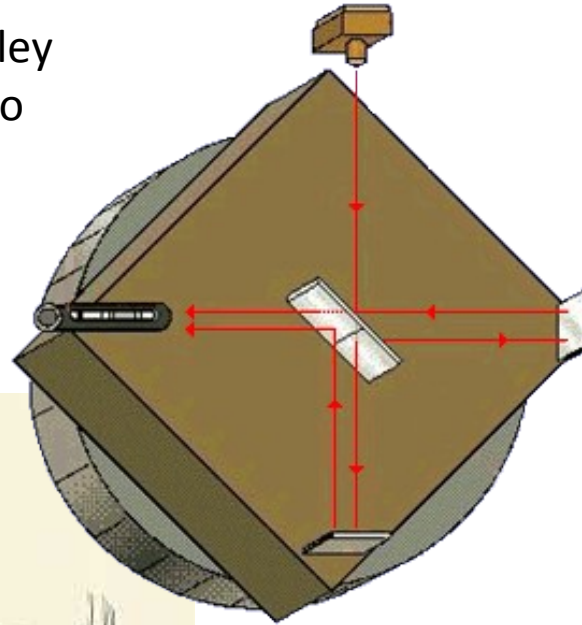
Como un obxecto que viaxa contra a corrente é máis lento que un que vai a favor dela, a velocidade da luz debería ser distinta segundo a dirección en que se desprazase o éter.





O interferómetro de Michelson-Morley mediu a velocidade da Terra respecto do éter lumínico.

O resultado foi desconcertante: a velocidade da luz é, en todas as direccións, exactamente igual.



Ha! A velocidade da luz é constante en todo sistema

## Un *Gedankenexperiment* (experimento mental)



Einstein preguntouse o que pasaría se viaxaba á velocidade da luz.



# Un *Gedankenexperiment* (experimento mental)

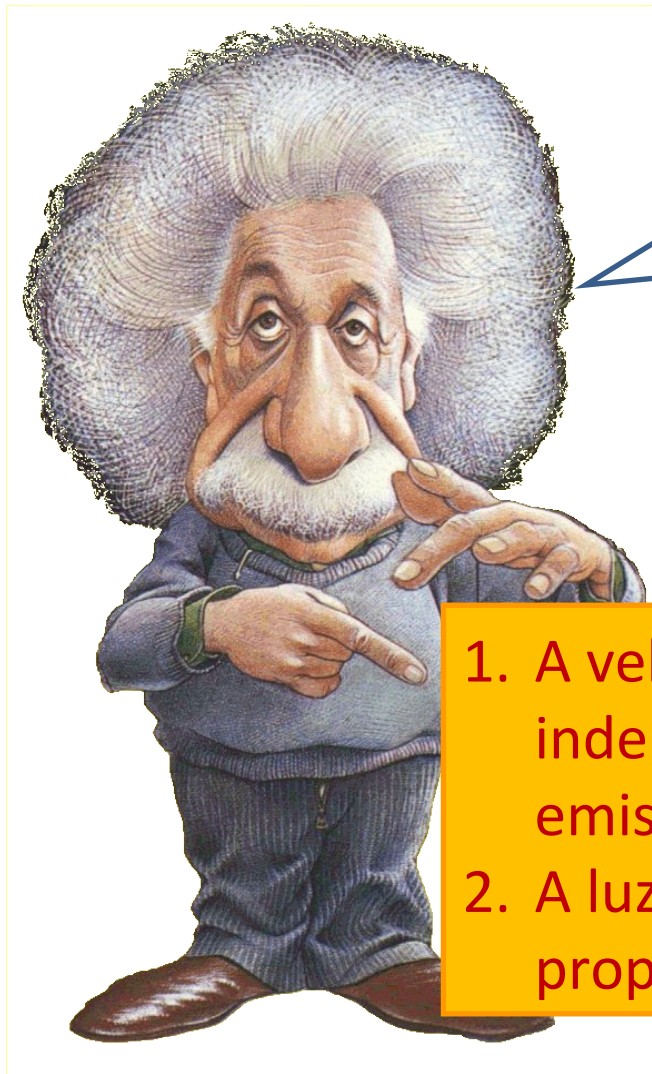


No modelo definido pola Física clásica a luz nunca alcanzaría o espello.

A luz nunca  
alcanzaría o  
espello!



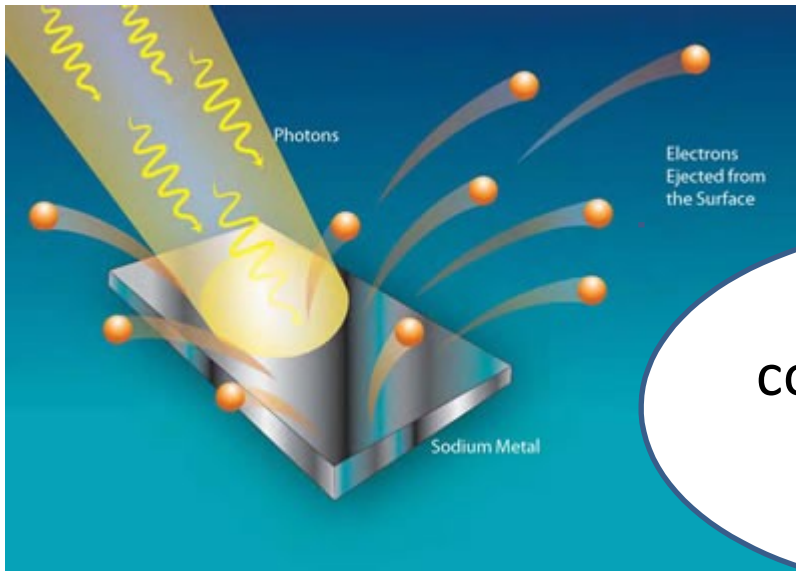
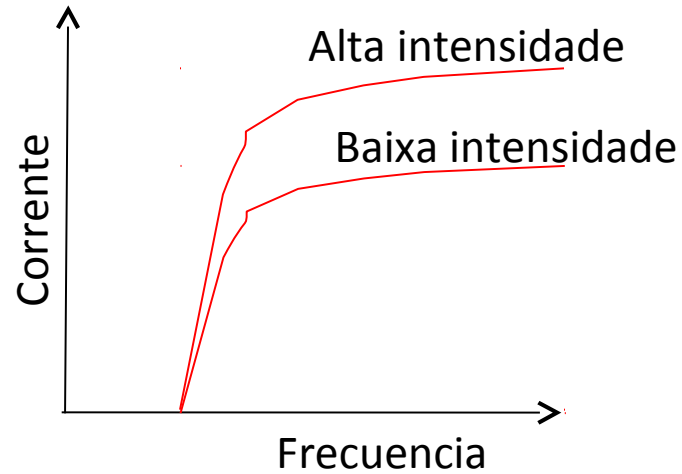
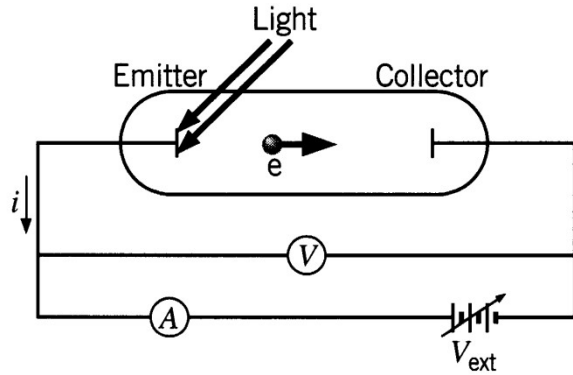
Aquí viñeron as primeiras dúas “herexías” de Einstein:



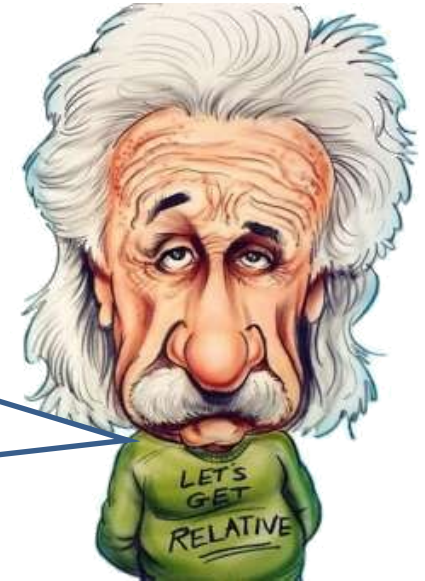
Tomen  
nota!

1. A velocidade da luz é constante, independente da velocidade do emisor e o receptor.
2. A luz non necesita medio para propagarse (o éter non existe).

# Paréntese: o efecto fotoeléctrico



Por isto  
concedéronme  
o Premio  
Nobel



# Dous puntos de vista



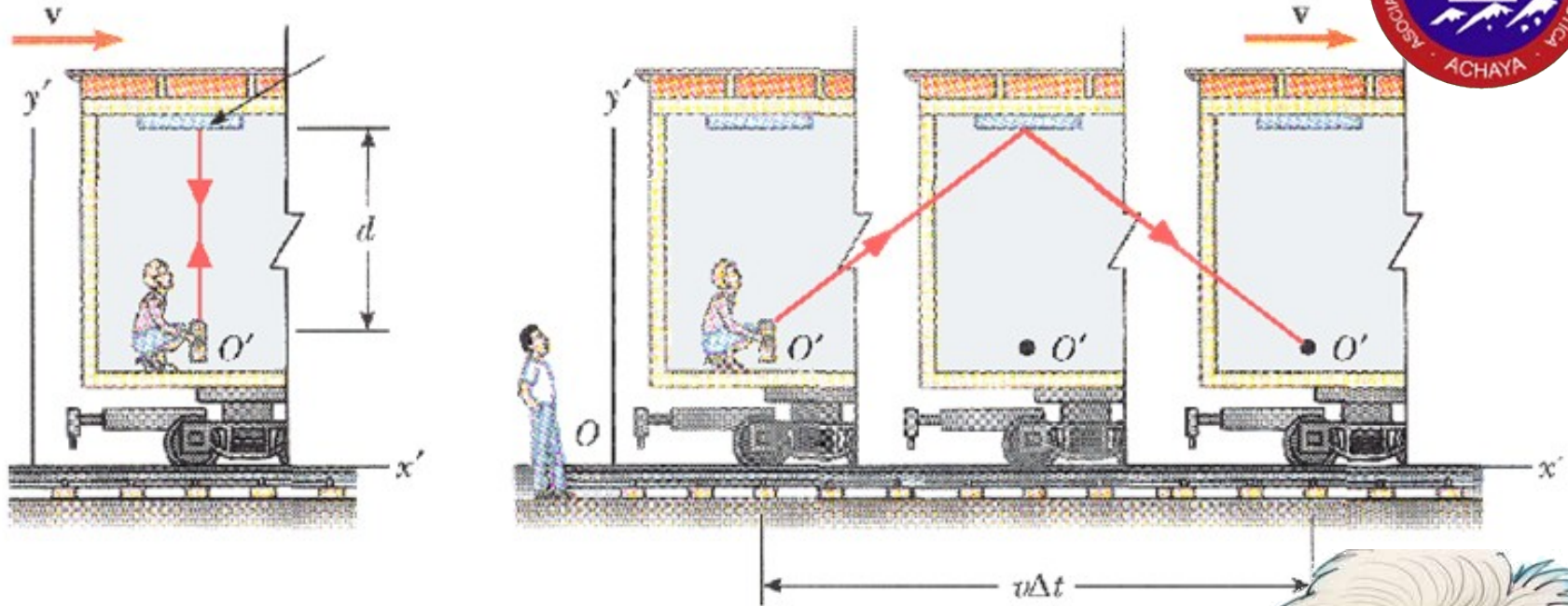
O mesmo evento, visto primeiro desde a camioneta e logo visto desde o bordo da rúa.

Dous puntos de vista dun mesmo evento





# O problema do tempo



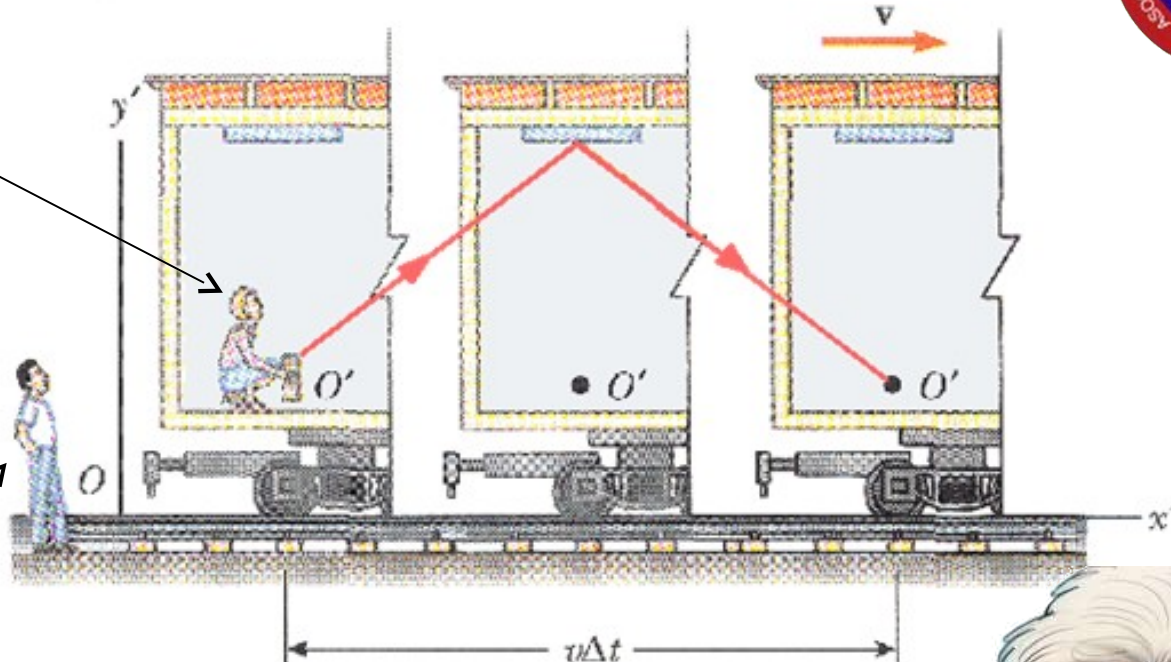
Agora con luz.

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Espazo}}{\text{Tempo}}$$

Mmm... o espazo alóngase: mesma velocidade da luz e o tempo?

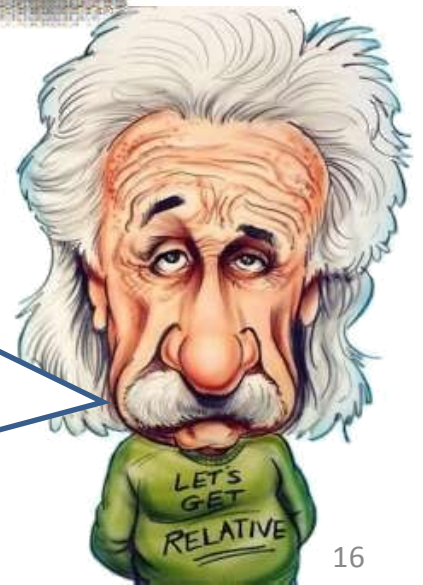


# Dilatación do tempo



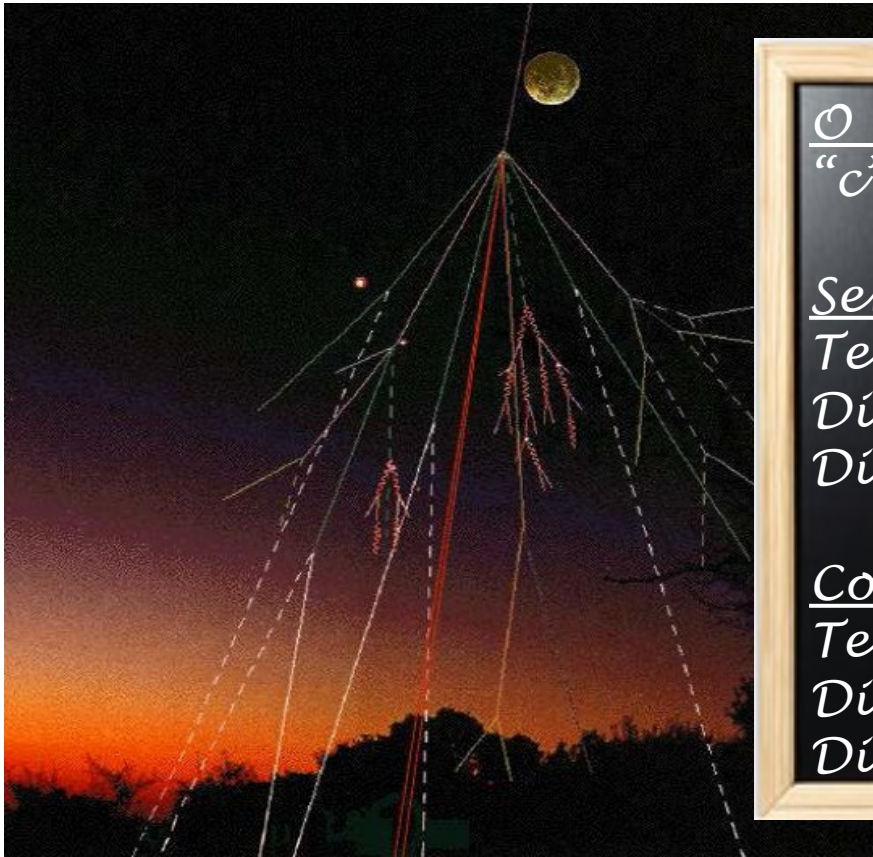
Os dous reloxs miden tempos distintos!!!  
Para un observador externo o tempo dos pasaxeiros avanza máis lento.

Non queda outra: o tempo non é absoluto, senón que se dilata





# Comprobación experimental: o decaemento do muón



*O muón viaxa a  $0.998 c$  (sendo "c" a velocidade da luz)*

*Sen dilatación temporal:*

*Tempo de decaemento:  $2\mu s$*

*Distancia que percorre:*

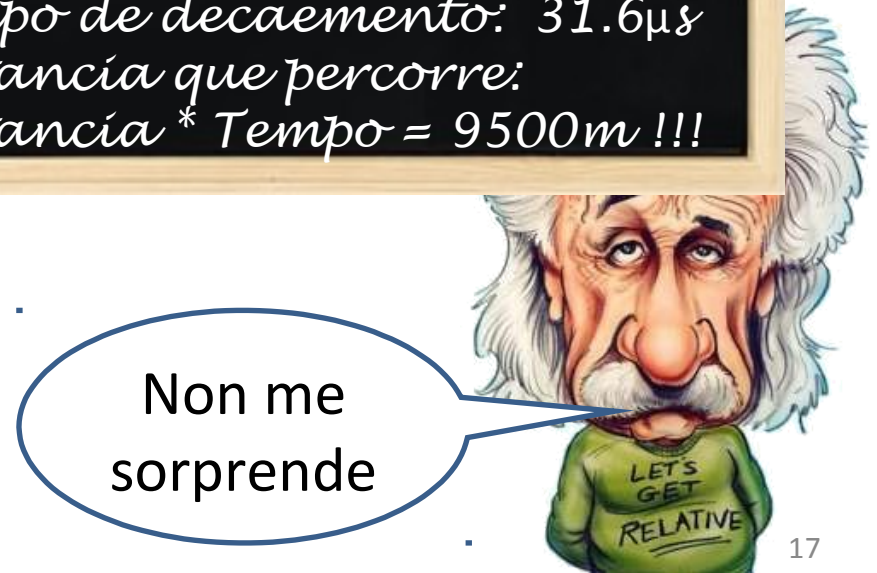
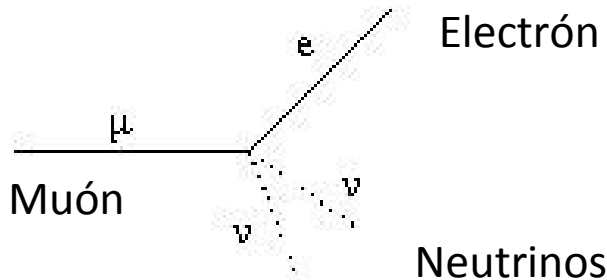
*Distancia \* Tempo =  $600m$  ???*

*Con dilatación temporal:*

*Tempo de decaemento:  $31.6\mu s$*

*Distancia que percorre:*

*Distancia \* Tempo =  $9500m$  !!!*





# Pero, como o ve o muón?



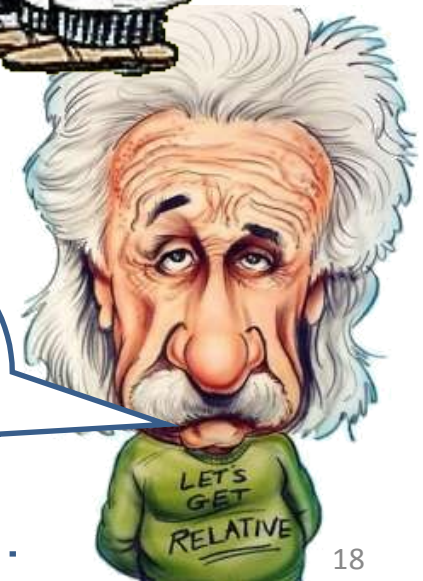
A nosa  
troposfera  
mide uns  
15.000 m



Os terrícolas  
están tolos: a  
súa troposfera é  
de só 1.000 m



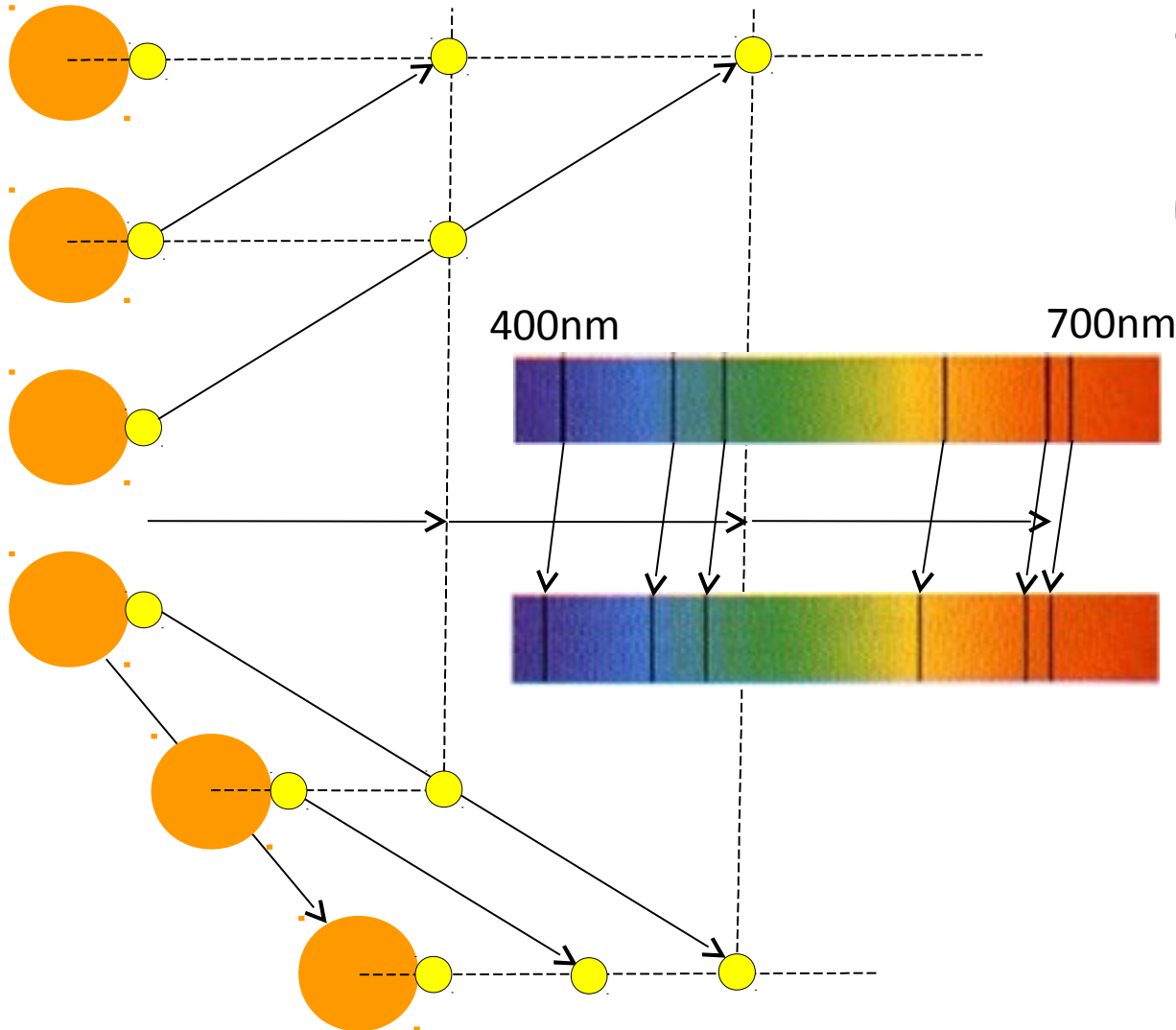
Vale: o  
espazo  
contráese



# Efecto Doppler tradicional



Cando un corpo se achega a nós prodúcese, na nosa percepción do mesmo, un deprezamento cara o azul no espectro lumínico:



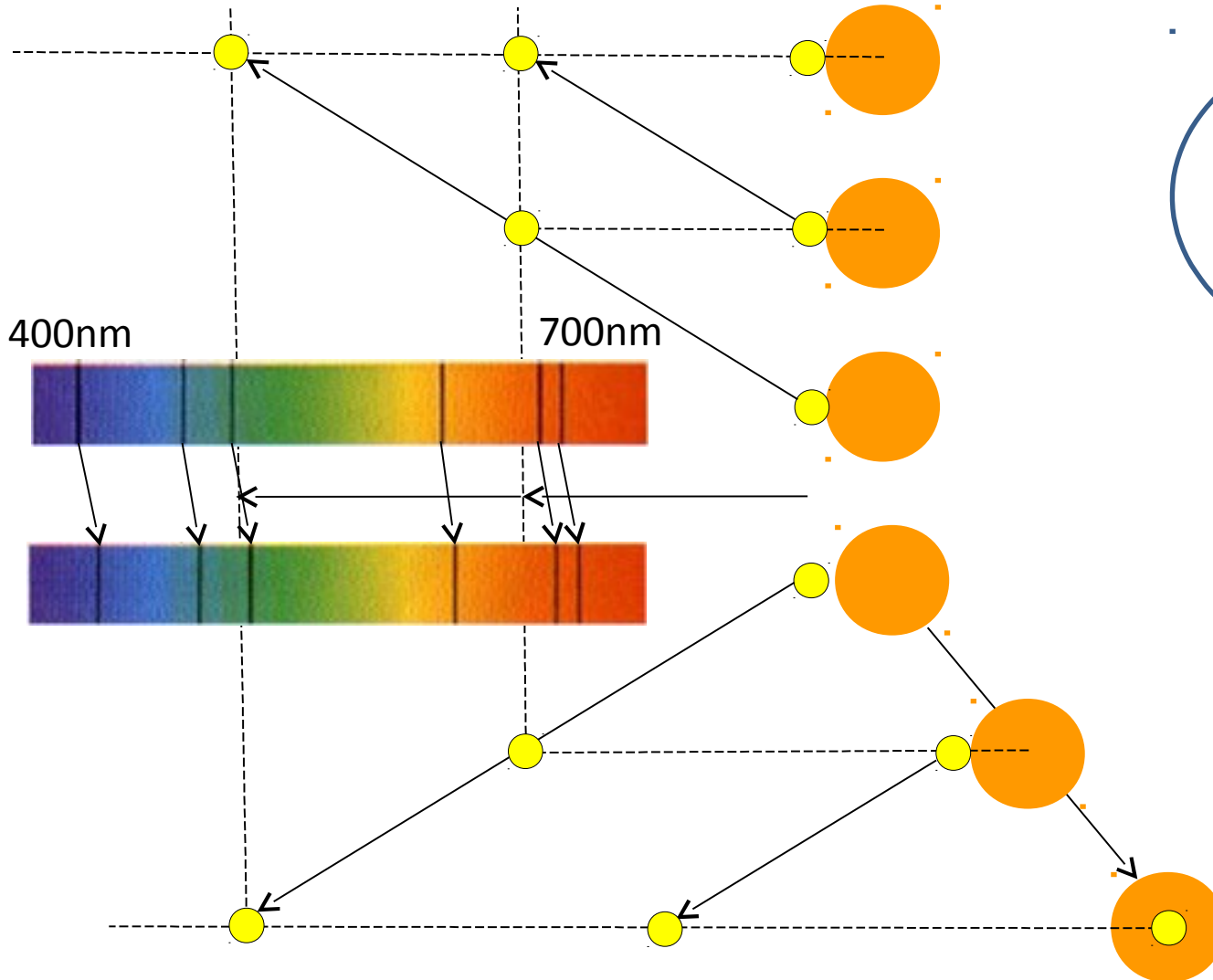
Isto non é  
Relatividade



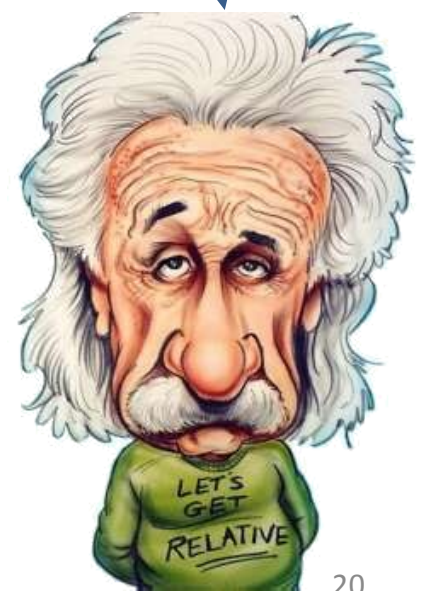
# Efecto Doppler tradicional



Cando o corpo se afasta prodúcese un desprazamento cara o vermello:



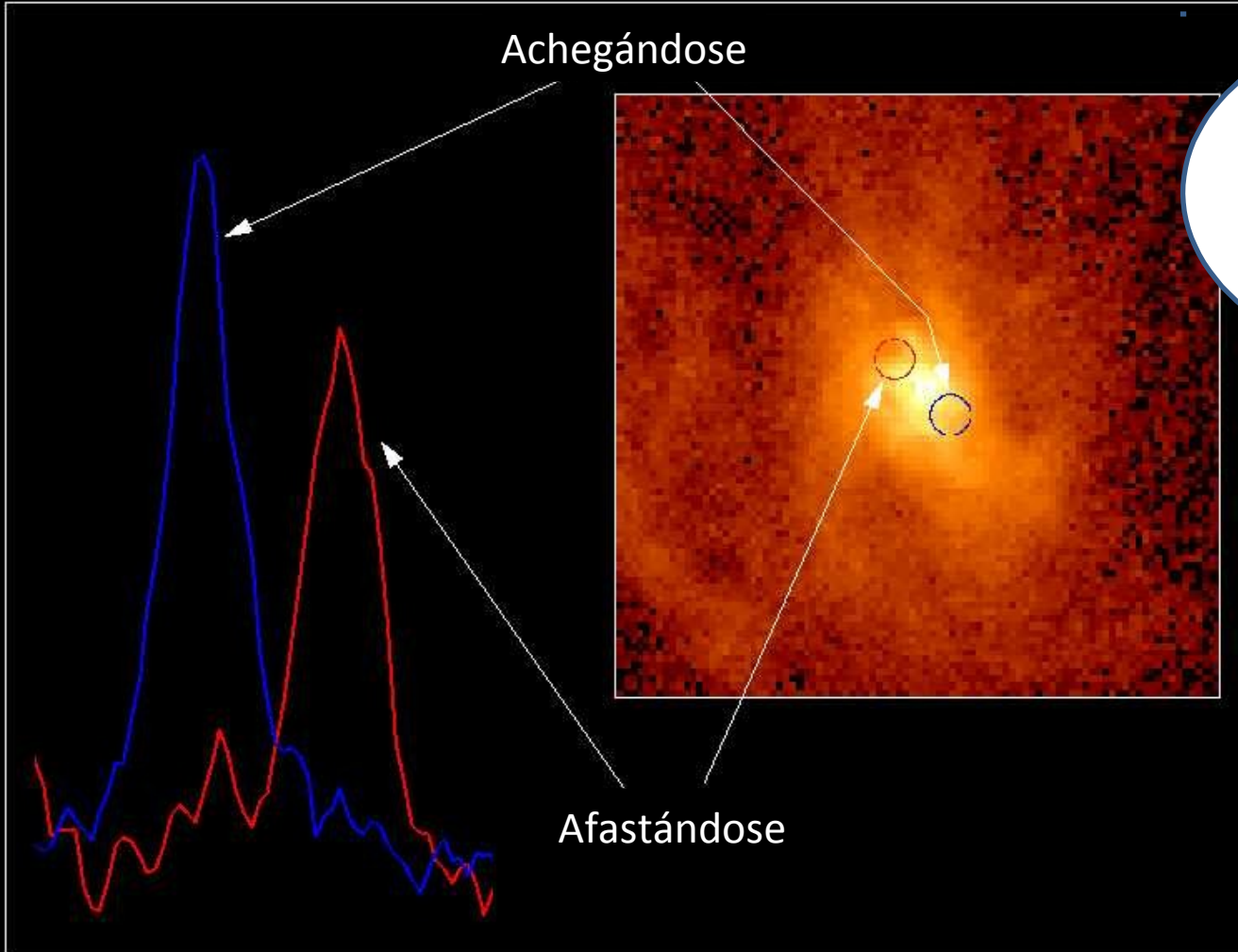
Isto tampouco



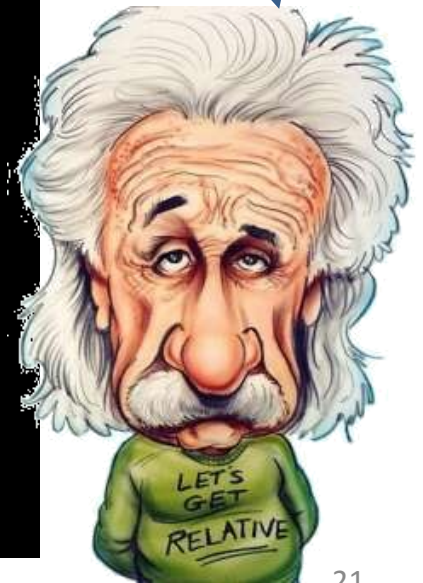




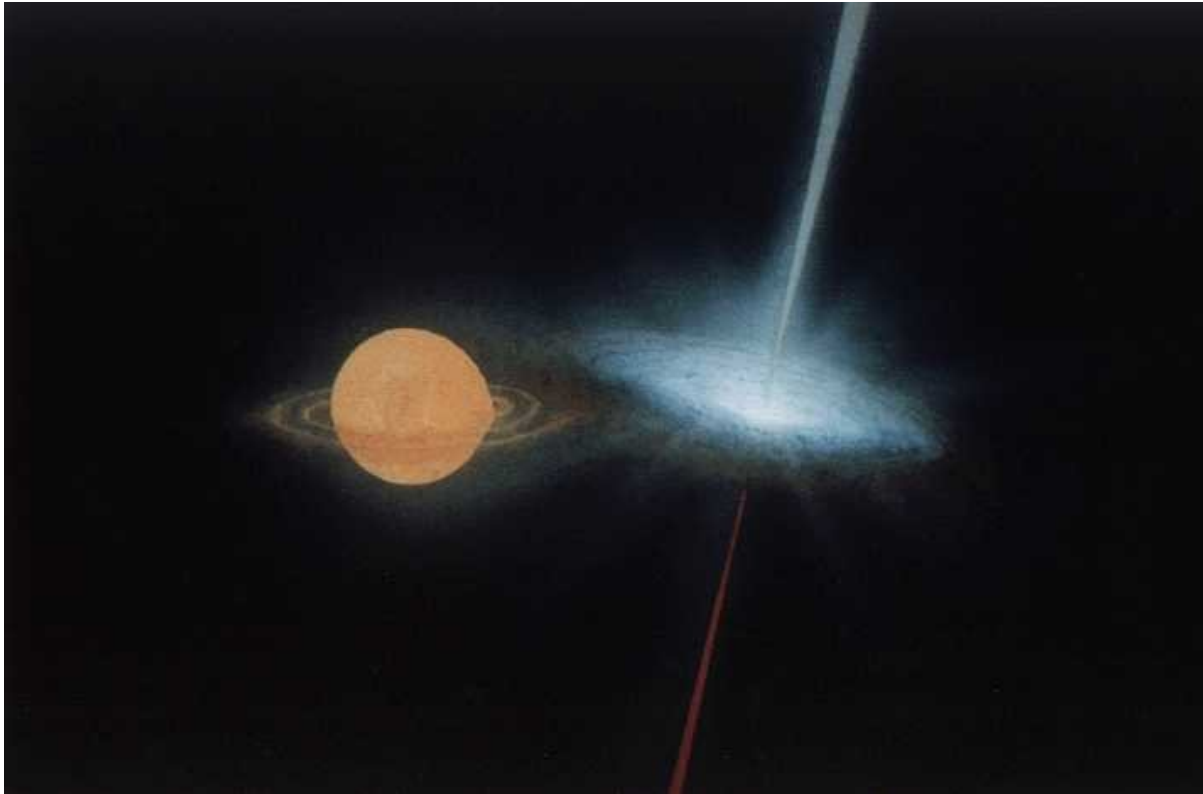
## Espectro de disco de gas na Galaxia M87



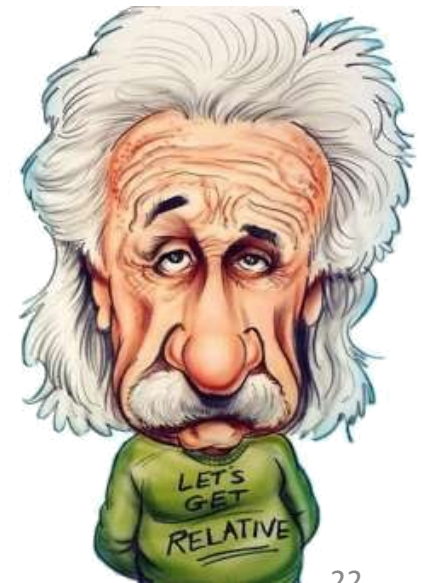
Vale.  
Volvamos á  
Relatividade



## Efecto Doppler por dilatación do tempo

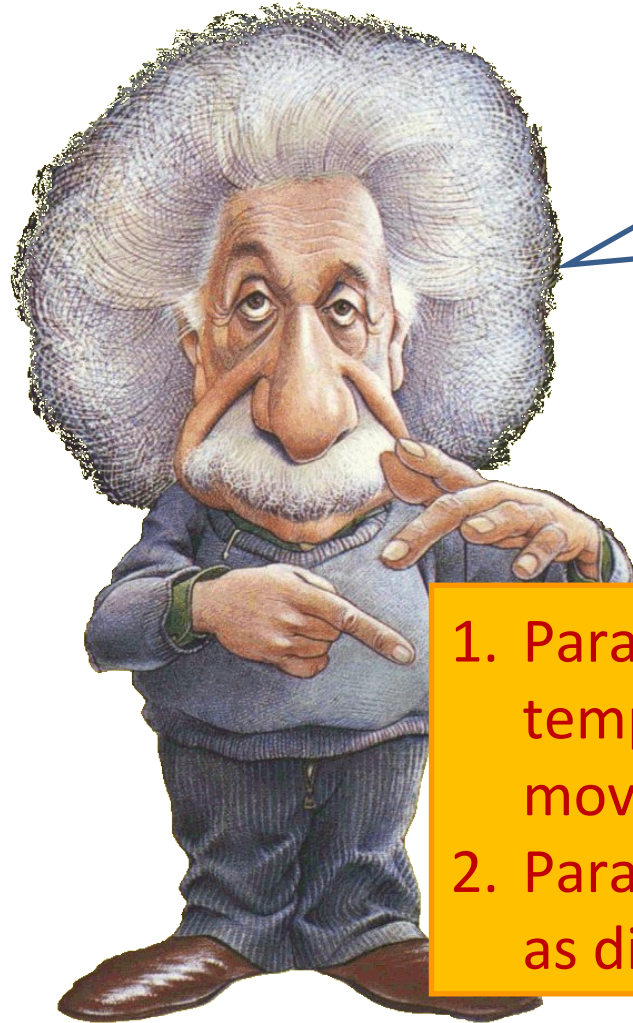


Isto é, xa de novo,  
Relatividade



No movement transversal a alta velocidade pódese tamén observar un desprazamento ó vermello por efecto da dilatación do tempo (contracción da lonxitude de onda). Un exemplo é o sistema binario SS433, no que un furado negro ou estrela de neutróns emite dous *jets* en dirección oposta.

Velaquí as primeiras dúas conclusións de Einstein:



Tomen nota!

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

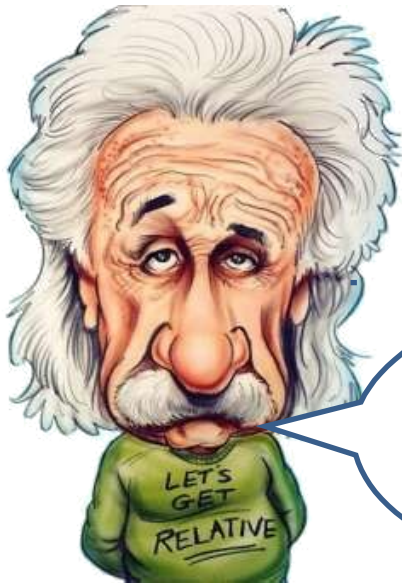
$$L = \frac{L'}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

1. Para un observador en repouso o tempo dun observador en movemento dilátase.
2. Para un observador en movemento, as distancias externas contráense.



Estas leis non só están comprobadas empiricamente; ademais, están a empregarse na nosa actual tecnoloxía de satélites. O sistema GPS funciona cun número de satélites sincronizados. A devandita sincronización debe ter en conta os efectos relativistas da dilatación do tempo.



Para que vexan  
vostedes!



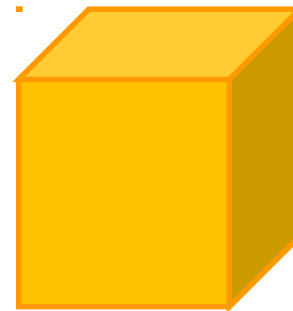
O tempo dilátase ata que se detén cando a velocidade do sistema é igual á velocidade da luz.



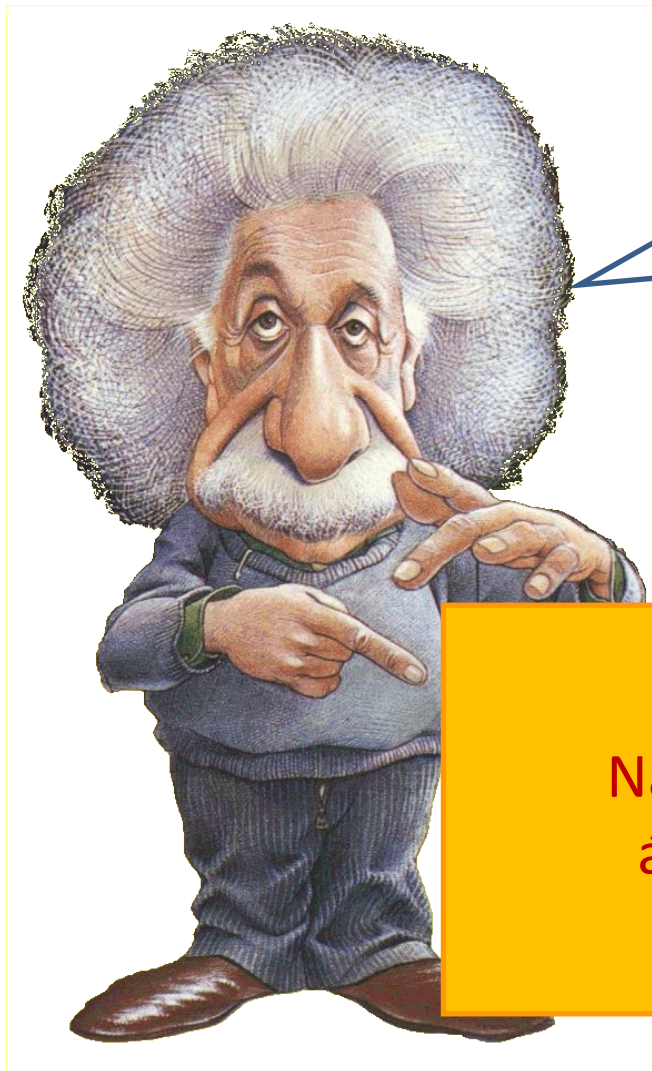
A velocidade da  
luz é unha  
barreira natural



E os corpos contráense ata quedar planos.



E velaquí a seguinte conclusión de Einstein:



Tomen nota!

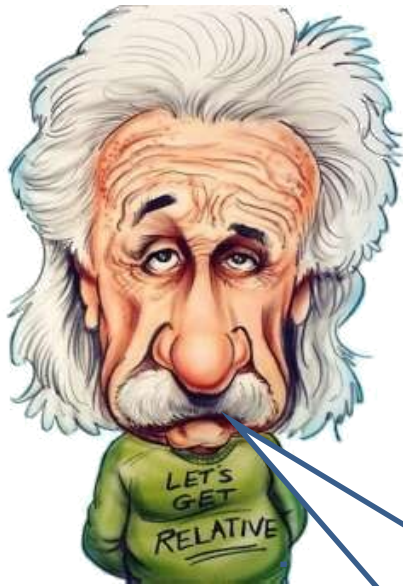
**Nada nin ninguén pode viaxar á mesma velocidade da luz.**



# Límites no espazo-tempo

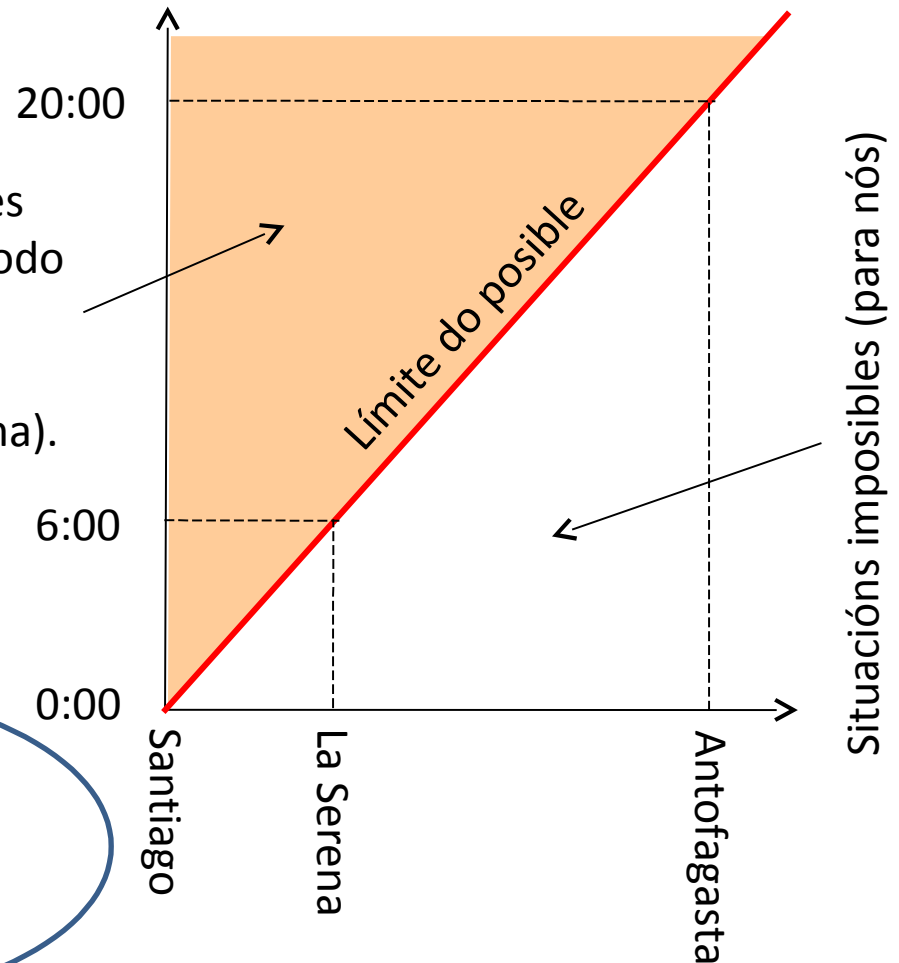


Se relacionamos nun gráfico o tempo e a distancia percorrida, obteremos unha área susceptible de alcanzar e unha área “fóra das nosas posibilidades”:



Situacións posibles (lugares ós que podo chegar sen sobrepasar a velocidade máxima).

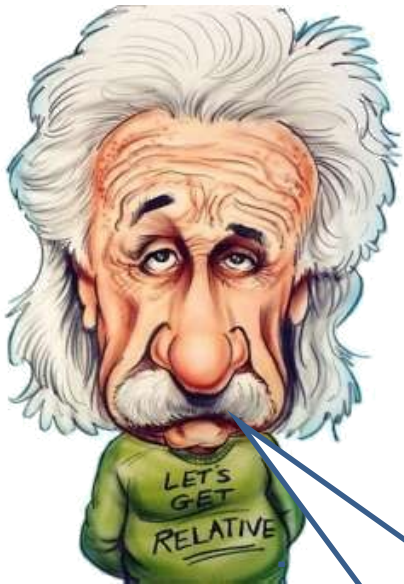
O diagrama espazo-tempo



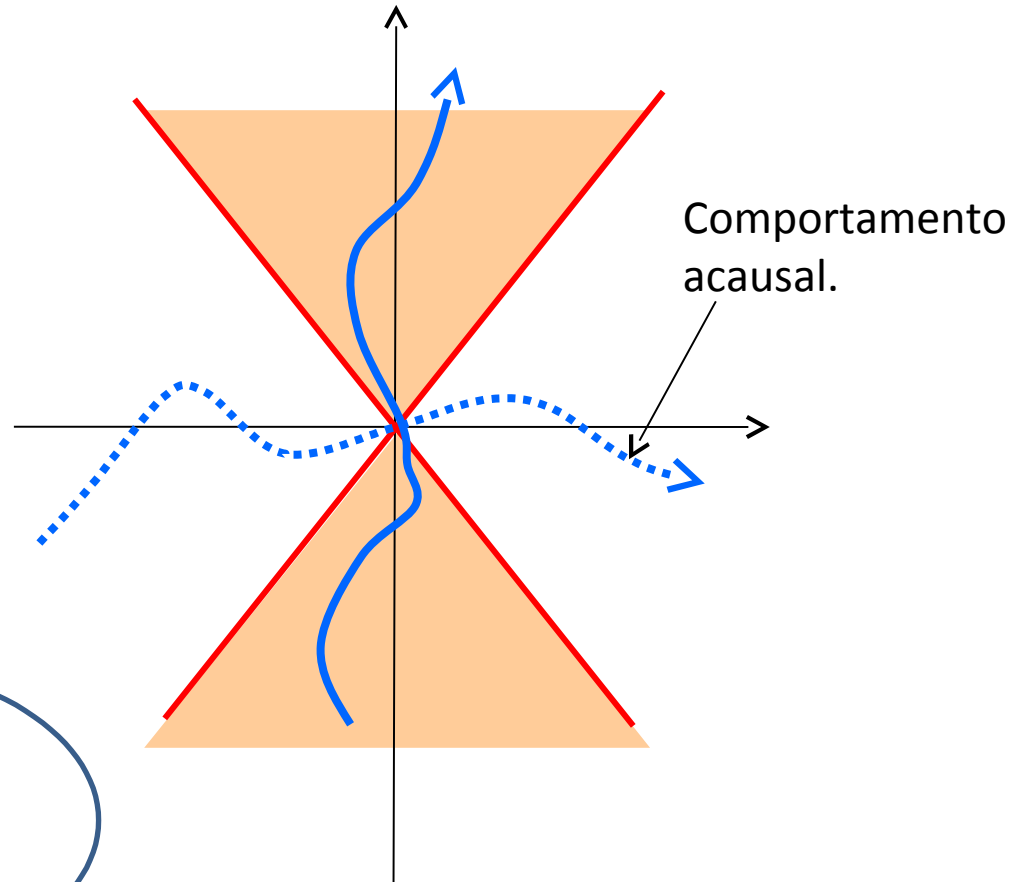
# Límites no espazo-tempo



Nota: a teoría di que non é posible viaxar á velocidade da luz, pero non exclúe a posibilidade de que existan obxectos que viaxen a unha velocidade maior que a da luz.



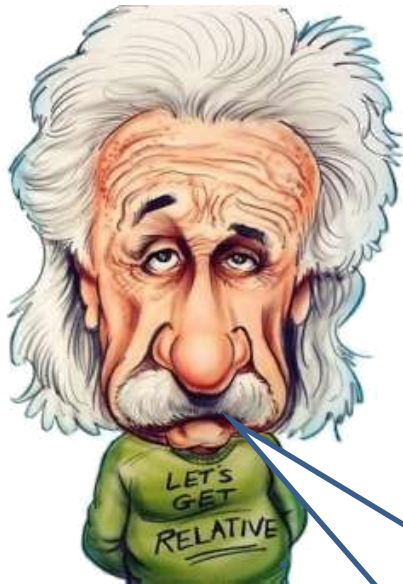
Mmm... os "taquións": non creo que existan.



# Límites no espazo-tempo – en dúas dimensións

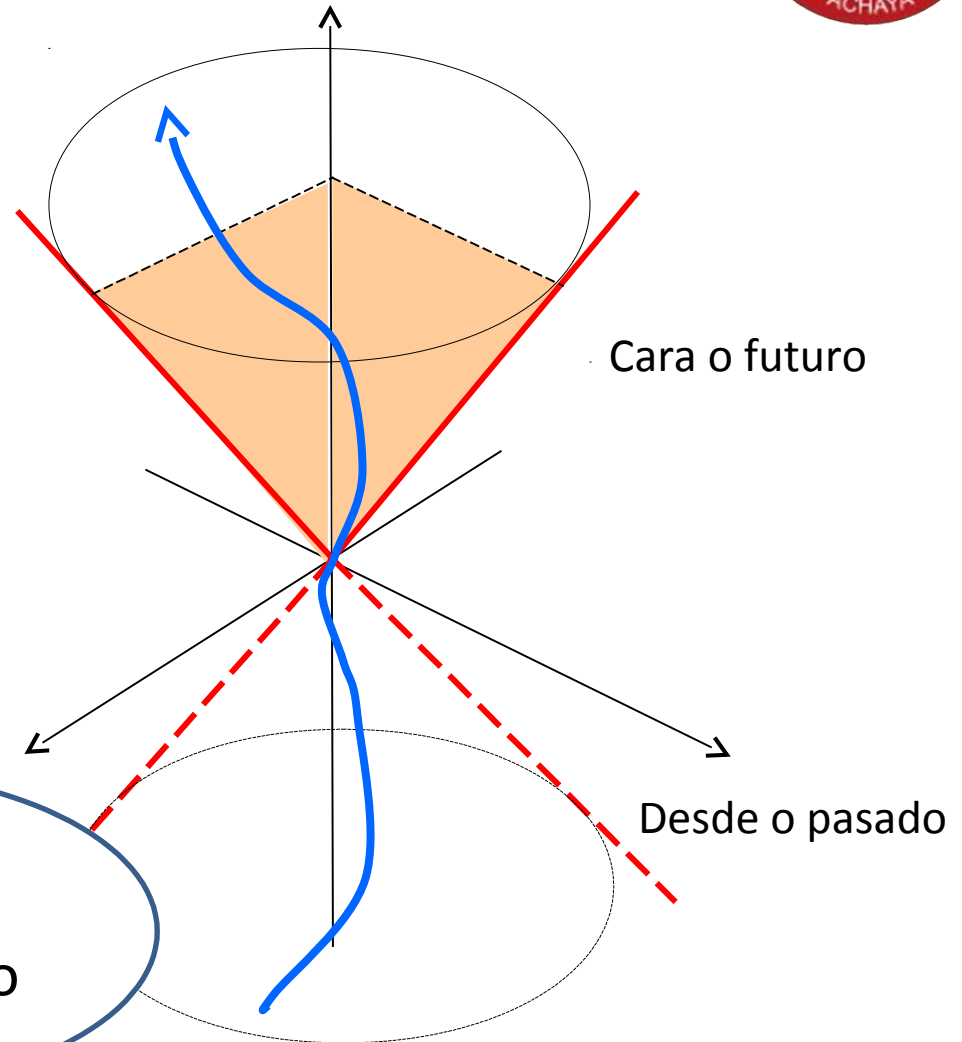


O límite do posible forma un cono nun espazo de dúas dimensións:



LET'S  
GET  
RELATIVE

O cono do  
espazo-tempo

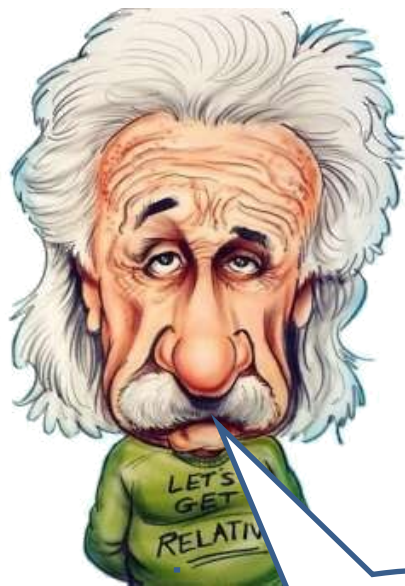




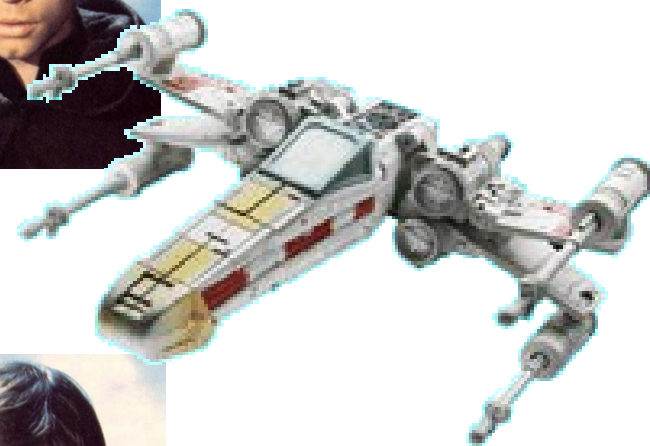
## A paradoxa dos xemelgos



Na saga *Star Wars*, Luke e Leia Skywalker son xemelgos. Os personaxes destas películas viaxan en varias ocasións á velocidade da luz. Supoñamos que Luke fai unha viaxe deste tipo, mentres Leia permanece nunha estación espacial todo o tempo que dura a viaxe de Luke.



Como Luke viaxa, para el o tempo transcorre máis lentamente.



Mmm... Eu son pacifista!

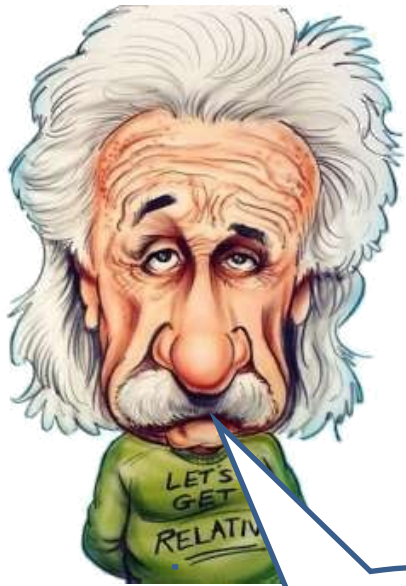


Cuando volva, Leia será unha anciá, mentres que el apenas será máis vello que cando partiu.

# A paradoxa dos xemelgos



Como a Leia non lle gusta a idea de envellecer antes, alega que iso non vai pasar, pois todo se reduce á relatividade: ela pode afirmar que é a súa estación espacial a que se afastou da nave de Luke, para logo voltar onda el.



Eu sigo a ser pacifista!



Por iso Leia conclúe que é Luke o que vai envellecer.

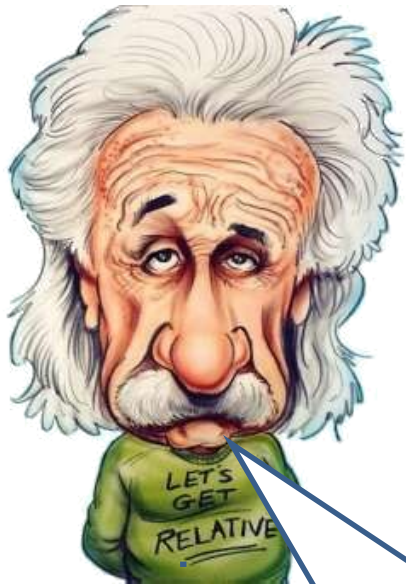


# A paradoxa de los xemelgos

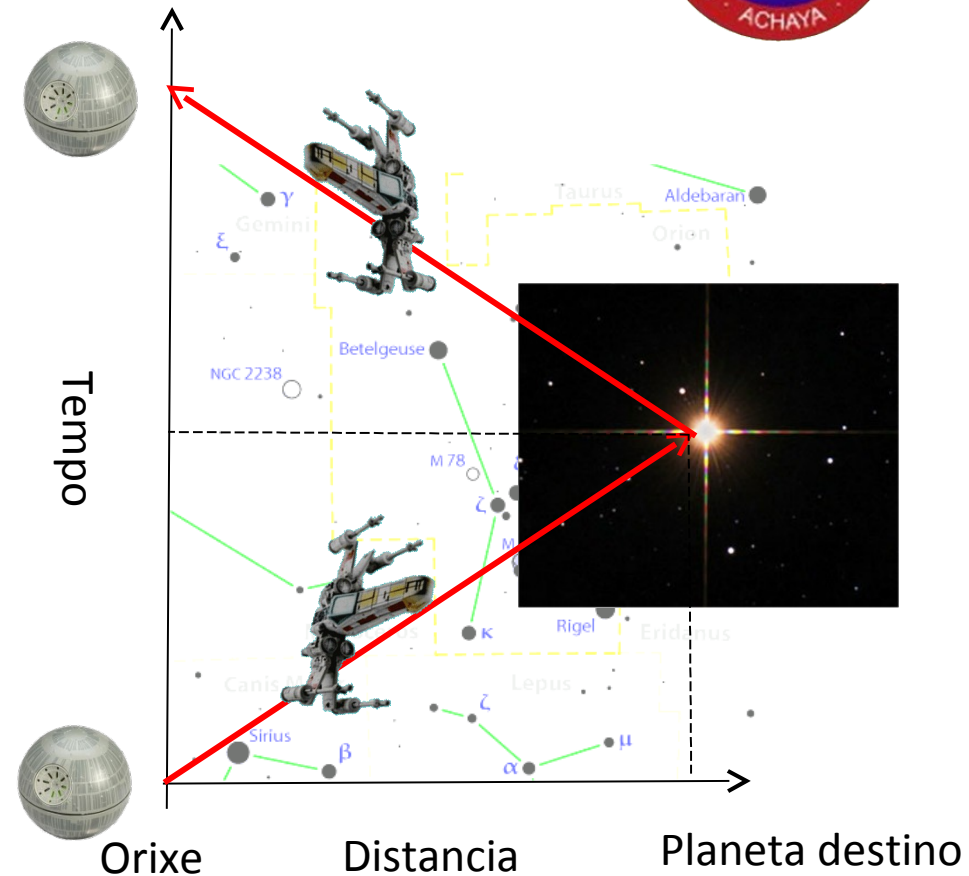


Quen ten a razón?

A clave está en que Luke debe frear e acelerar para volver ... co que se decatara de que é el o que vai e volve.



Vese moi ben no diagrama espazo-tempo!





Unha advertencia de Einstein:



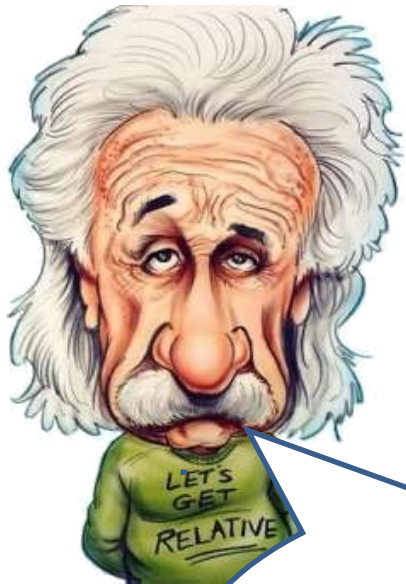
Tomen nota!

Coidado! Estamos a ver aínda a **Relatividade Especial**, que só vale para sistemas que non aceleran, ou sexa, viaxan a unha **velocidade constante**.

## A conservación da aceleración



Que se conclúe se consideramos que se debe conservar a aceleración?



Mmm... isto é complicado.. coa dilatación do tempo a velocidade hase ver reducida

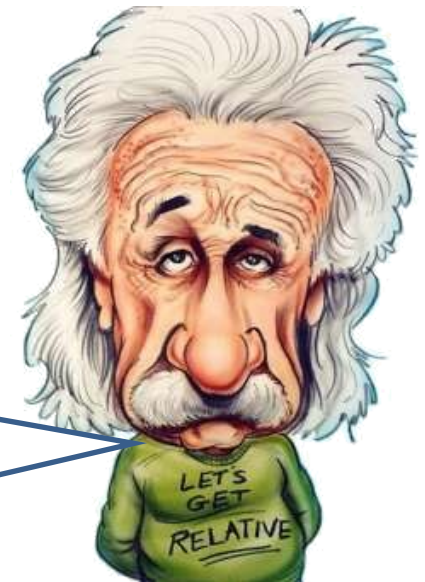
# A conservación da aceleración



Debido á dilatación do tempo, a velocidade da pelota observada pola persoa no bordo da rúa redúcese.

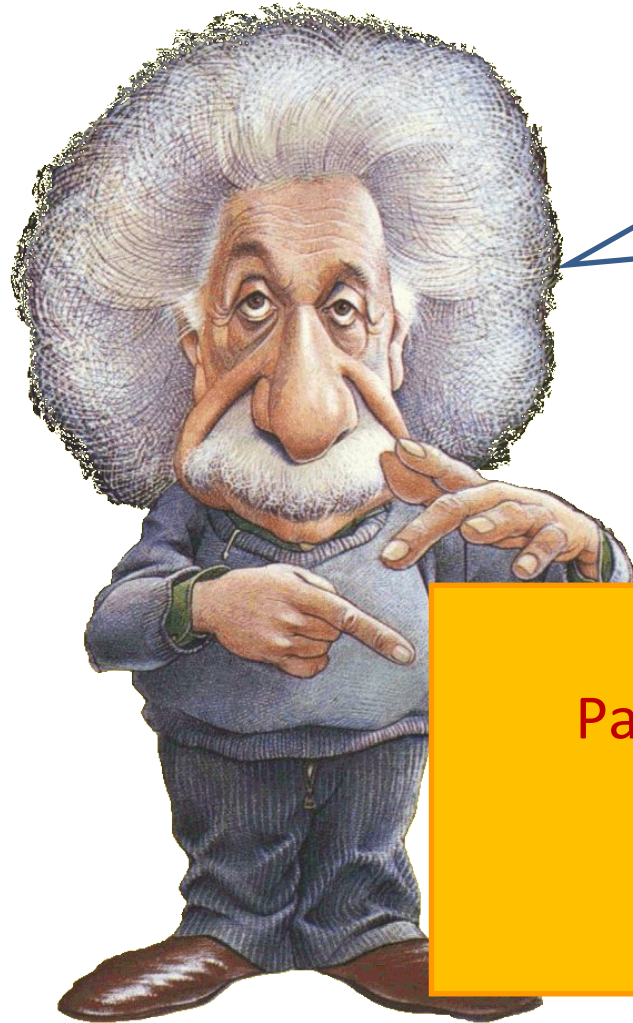
Para que a aceleración se conserve, a masa debería aumentar!!!

A masa dun corpo en movemento aumenta!





Outra conclusión de Einstein:

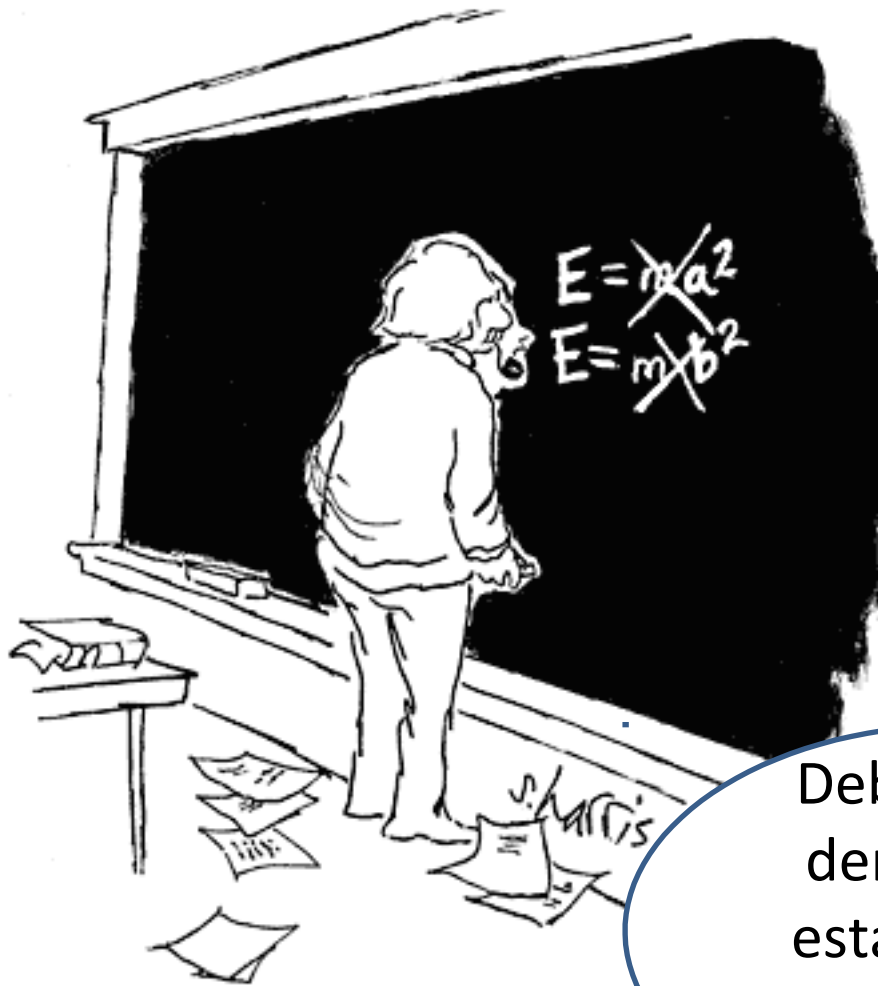


Tomen nota!

$$m = \gamma m_0$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

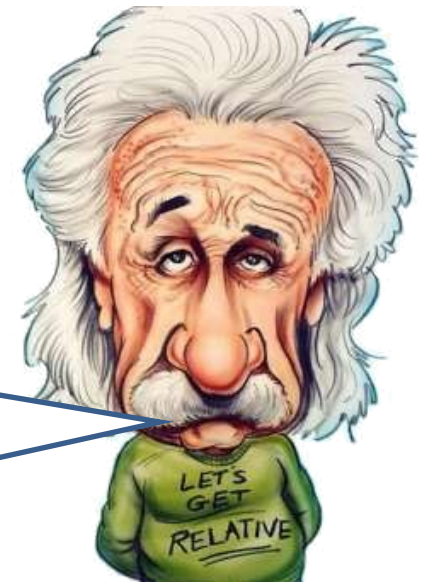
Para o observador en repouso,  
a masa dun obxecto en  
movemento aumenta.



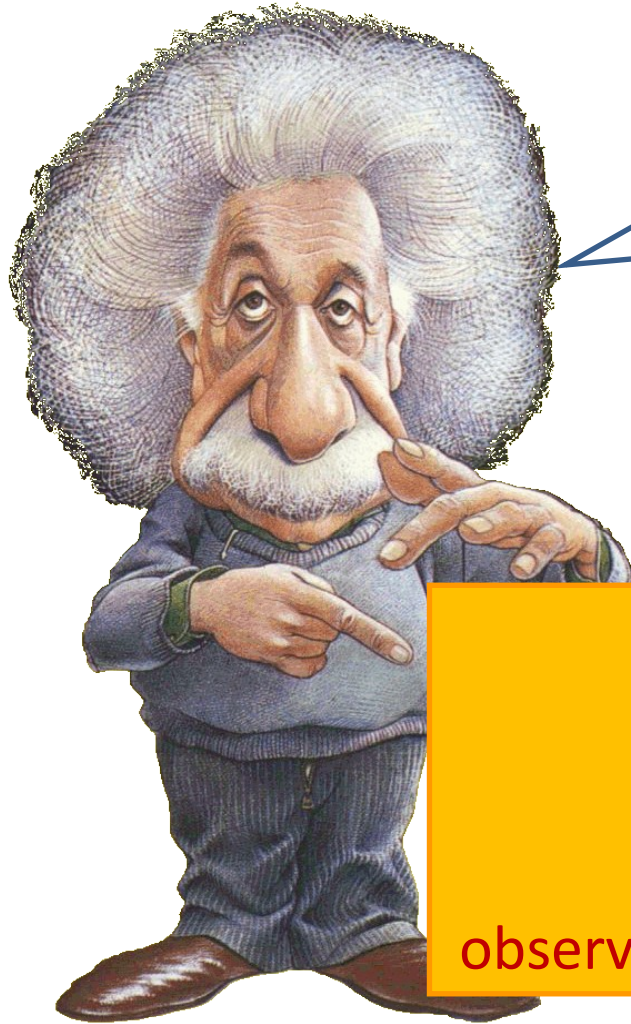
E así, a necesidade da conservación da enerxía leva á famosa fórmula:

$$E = mc^2$$

Debín cobrar dereitos por esta fórmula: agora sería millonario.



Outra conclusión de Einstein:



Tomen nota!

$$E = mc^2$$
$$= \gamma m_0 c^2$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Na fórmula  
 **$E = mc^2$**   
**m** é a masa do obxecto  
no sistema en movemento  
observada desde o sistema en repouso.

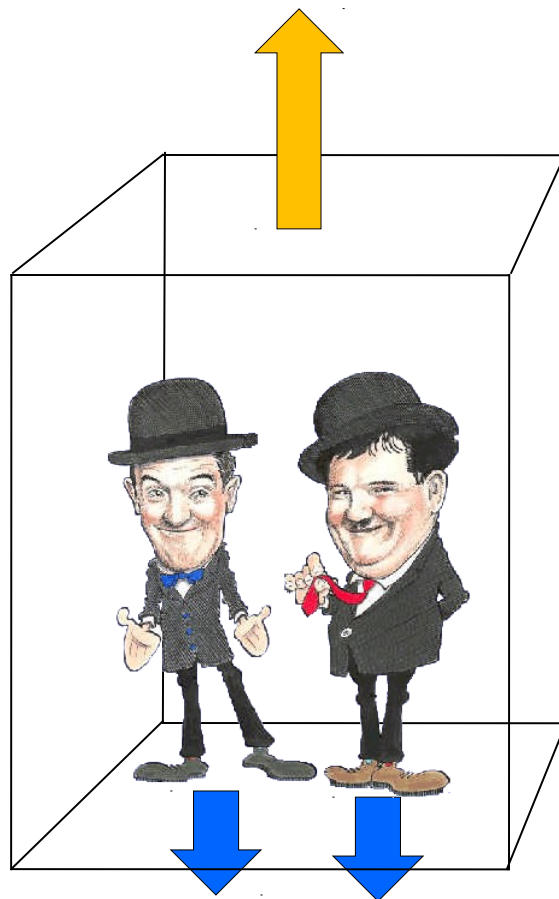
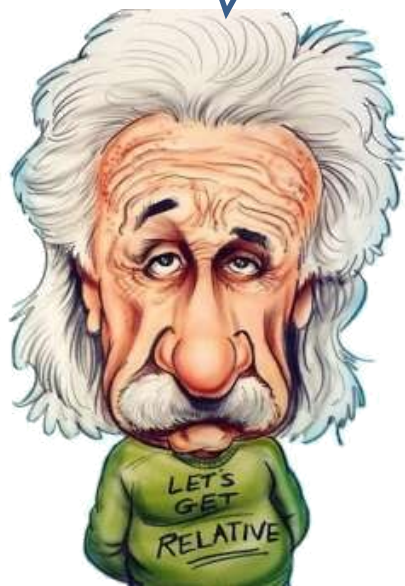


## O Gedankenexperiment do ascensor



Vaiamos agora ó caso no que a aceleración non é igual a cero. Entramos agora no que se denomina Relatividade Xeral.

Isto ponse interesante



Subamos nun ascensor

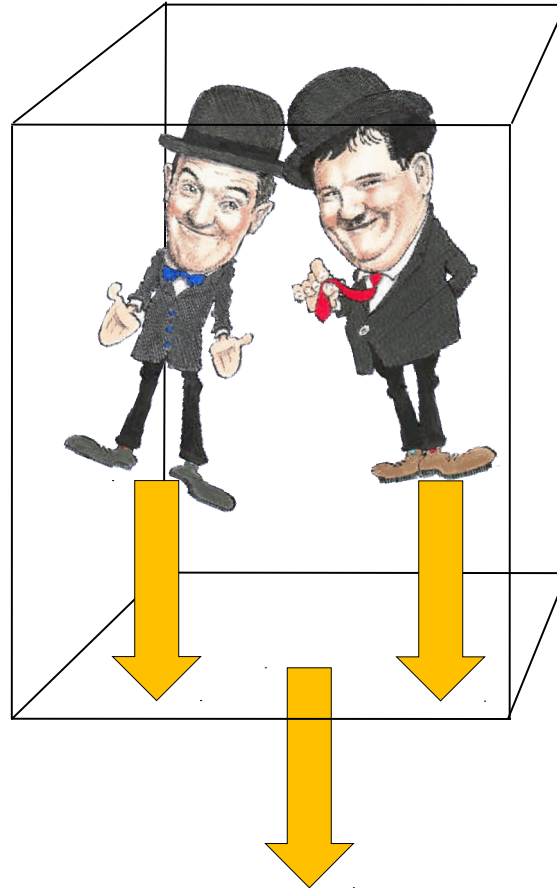
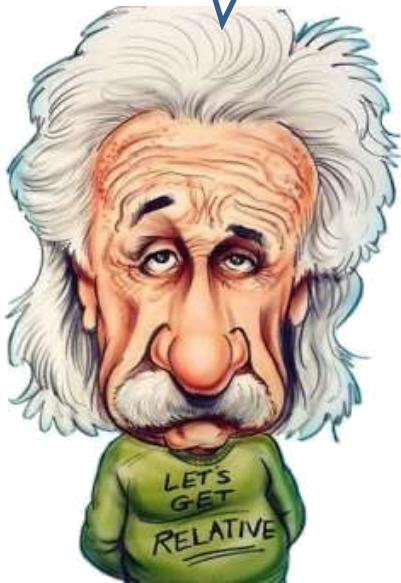
Ó subir, os nosos amigos experimentan a atracción terrestre e a tracción do ascensor.

# O Gedankenexperiment do ascensor



Se caese o ascensor ... tanto o Gordo como o Fraco caerían do mesmo xeito.

Isto é curioso: non depende da masa!



Subamos nun ascensor

A razón é que as masas inerciais e gravitacionais son iguais.

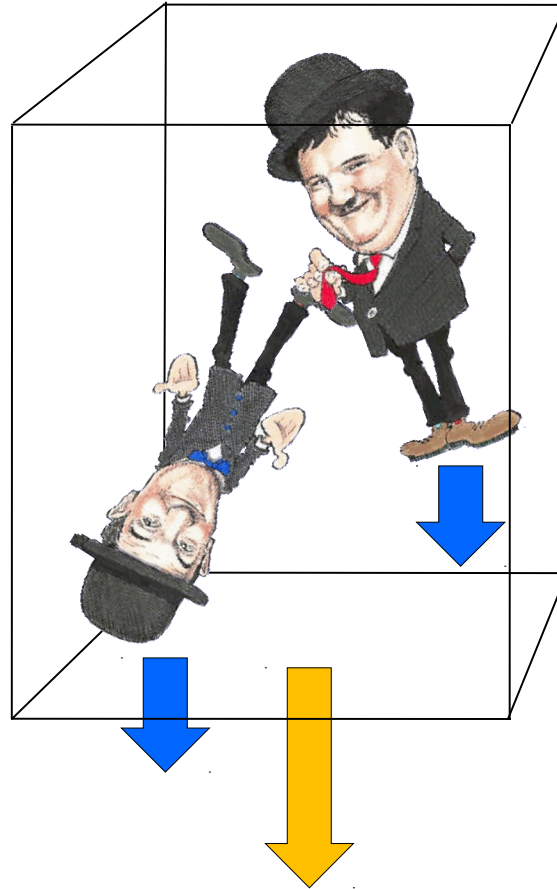
É o Principio de Equivalencia de Newton.

# O Gedankenexperiment do ascensor



Ó caer o ascensor ...

Ou sexa: ó caer, para eles é como se non houbera gravidade!



Subamos nun ascensor

...os nosos amigos teñen a sensación de que non hai gravidade.

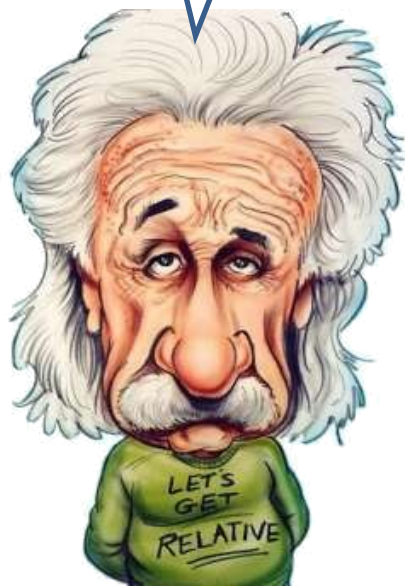


# O Gedankenexperiment do ascensor



Se os motores funcionan ...

Vexamos  
esta nova  
situación



Voemos cun foguete

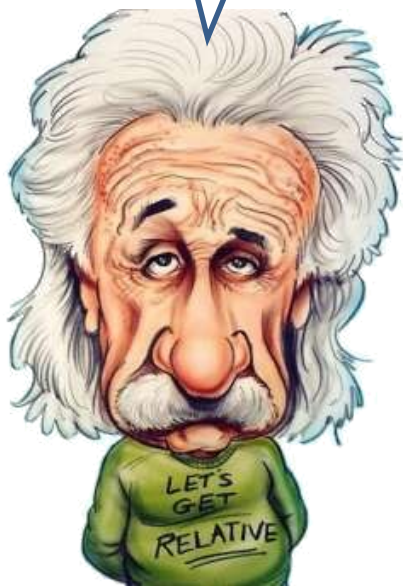
... os nosos amigos  
experimentan a tracción  
do foguete como  
se fose a gravidade.

# O Gedankenexperiment do ascensor



Detense o foguete no espazo ...

Ou sexa: as  
situacións  
son  
idénticas!



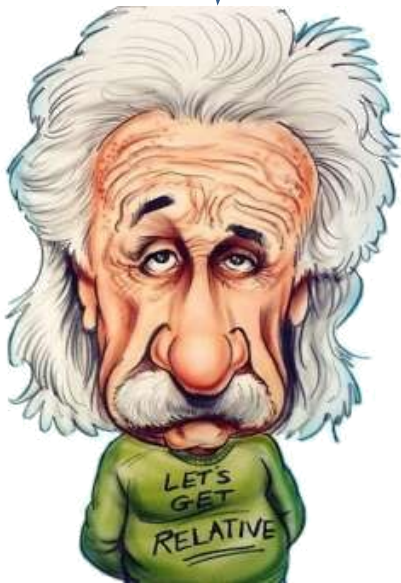
Voemos cun foguete

... e os nosos amigos  
experimentan a falta de  
gravidade.

# O Gedankenexperiment do ascensor

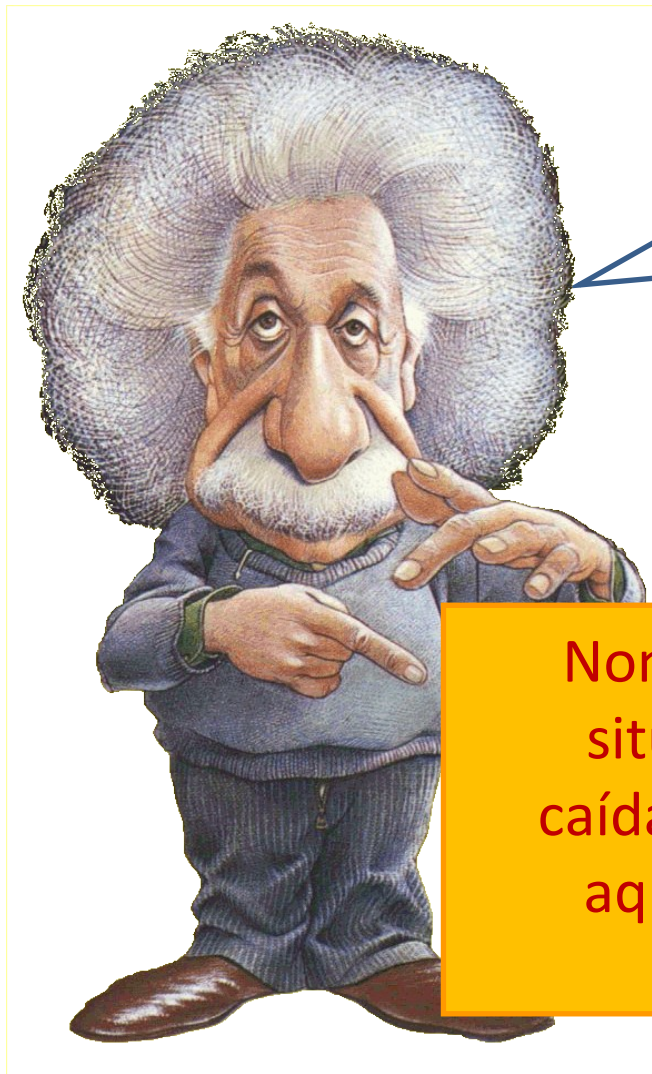


Esta é a  
esencia da  
Relatividade  
Xeral



A caída libre nun campo gravitacional compórtase igual  
que no espazo, onde non hai gravidade.

Unha nova conclusión de Einstein:



Tomen nota!

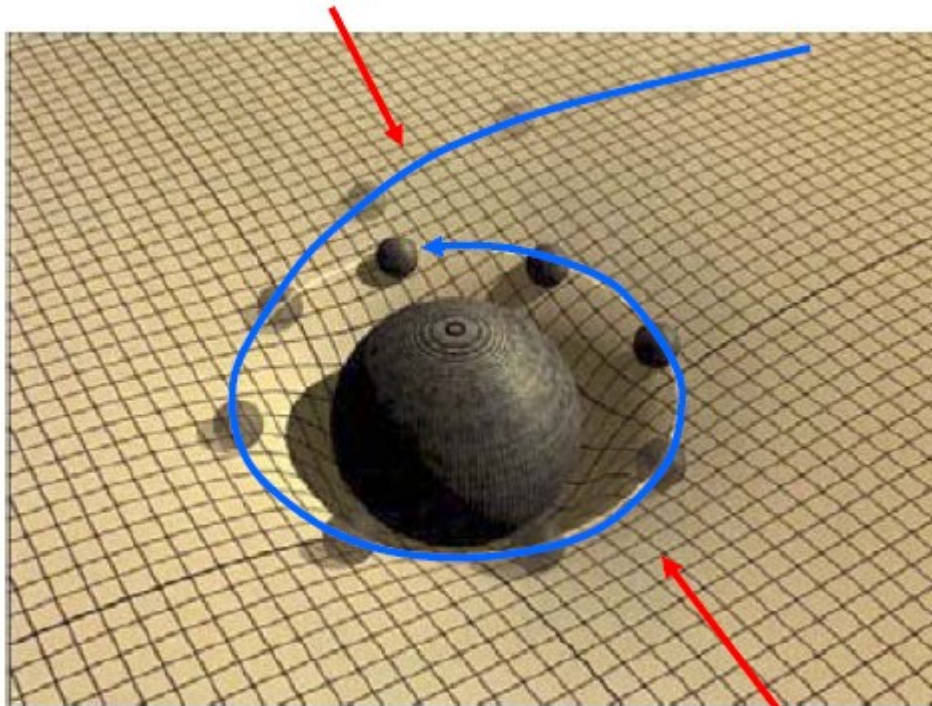
Non podemos diferenciar entre a situación na que nos atopamos en caída libre nun campo gravitacional, e aquela na que estamos no espazo, libre de gravidade.



## Implicacións da teoría sobre a concepción do espazo

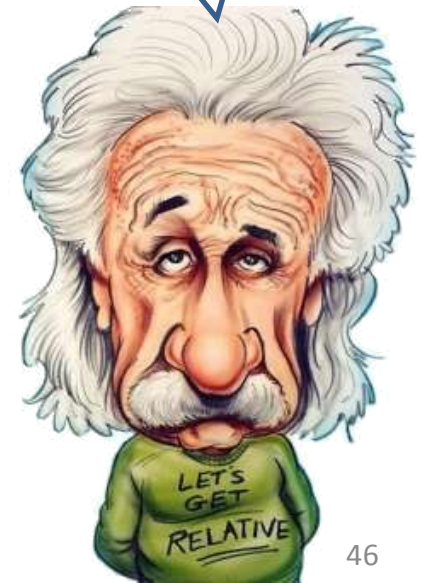


Einstein chegou á conclusión de que, para que as súas hipóteses fosen correctas, precisaba concebir un espazo curvado, e non plano, tal como se definía na Física clásica.



Espazo curvado

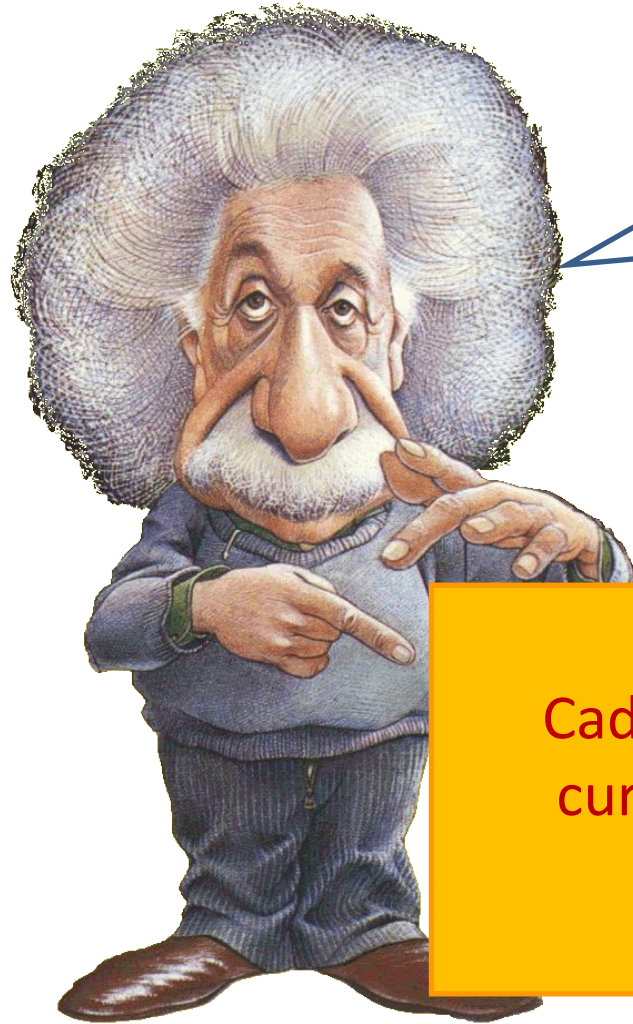
Cómpre  
traballar cun  
espazo  
curvado



# A Ecuación de Einstein



A clave da Relatividade Xeral de Einstein:



Tomen nota!

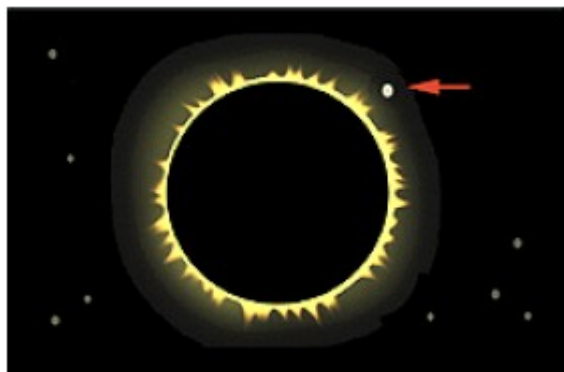
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Curvatura do espazo

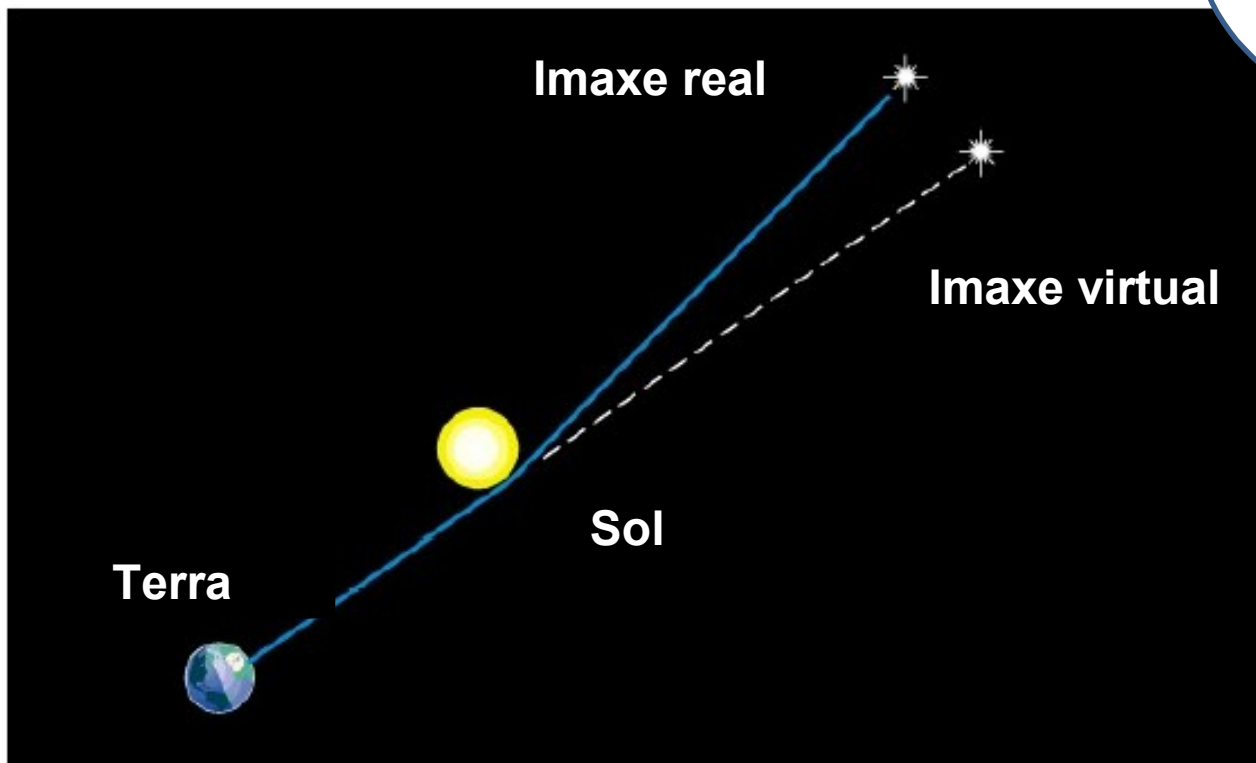
Distribución da masa

Cada obxecto dille ó espazo como curvarse, e o espazo curvado dille ó obxecto como moverse.

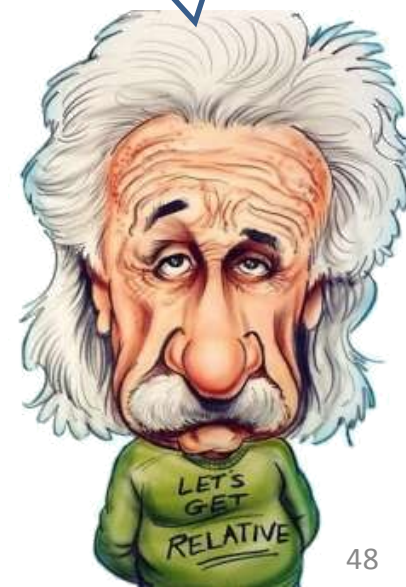
# A luz no espazo curvado



Estrela visible  
(posición detrás do  
Sol – observado durante  
Unha eclipse solar).



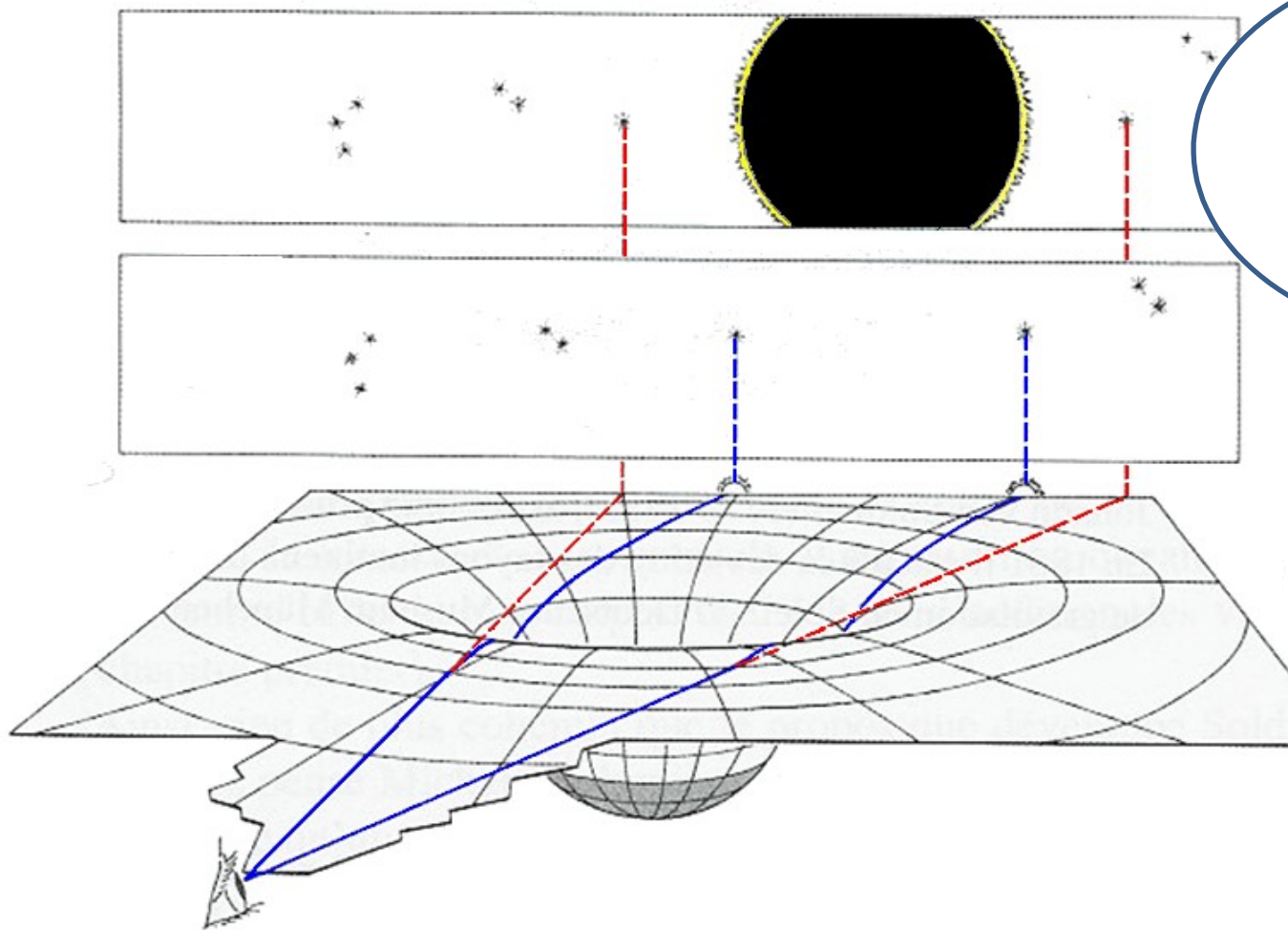
A curvatura  
actúa tamén  
sobre a luz,  
que non posúe  
masa





Posición visible

Posición real



O Sol actúa como unha “lupa gravitacional”

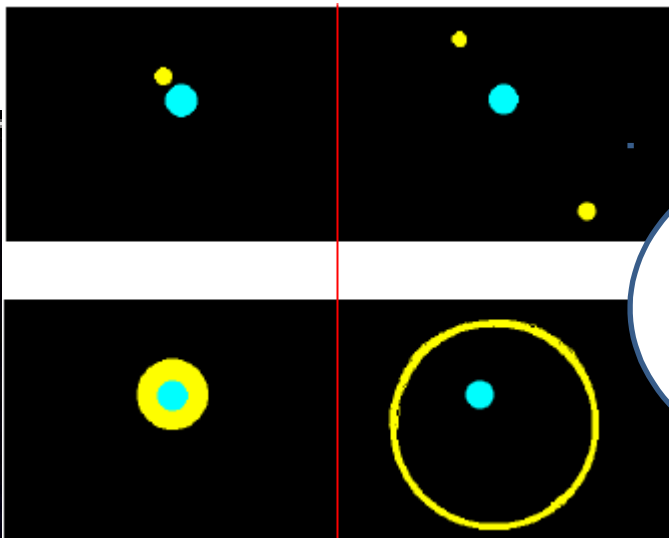




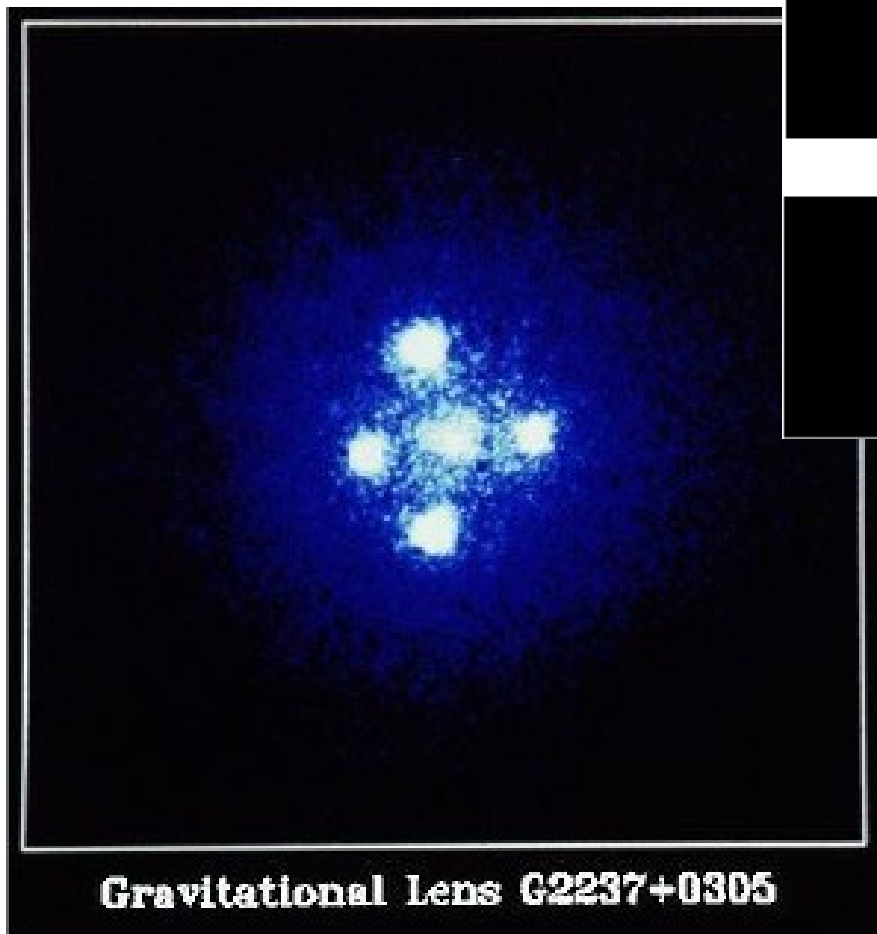
# A luz no espazo curvado



sen Gravitación    con Gravitación

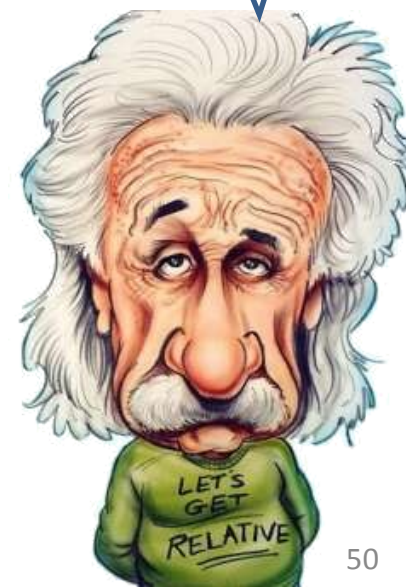


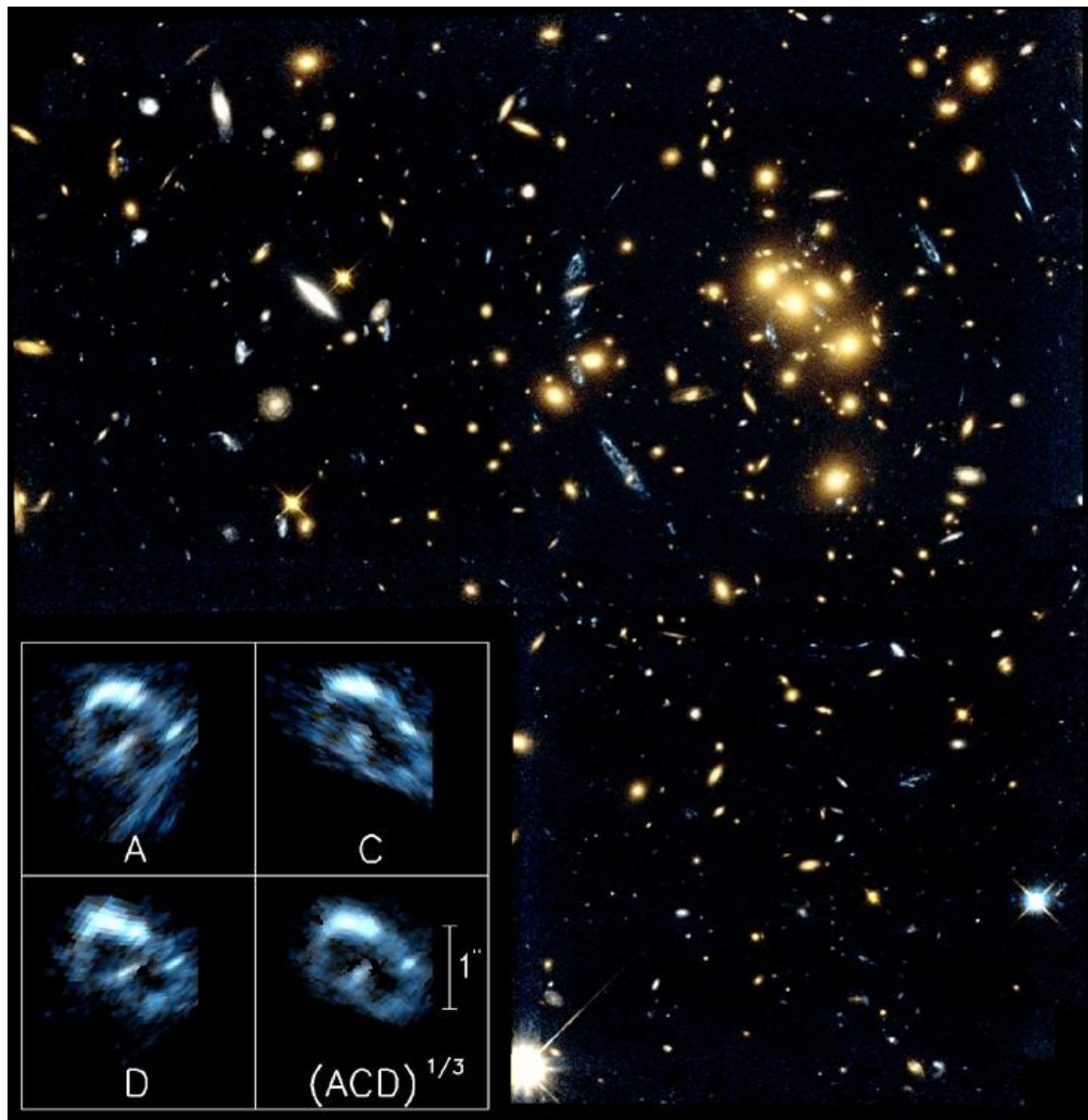
Isto  
pódese  
verificar



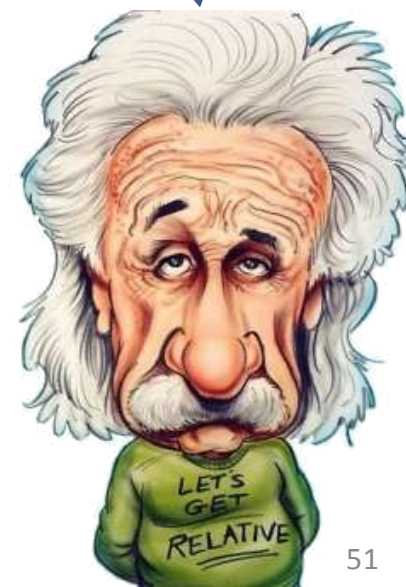
**Gravitational Lens G2237+0305**

“Cruzamentos de Einstein” (dúas estrelas)





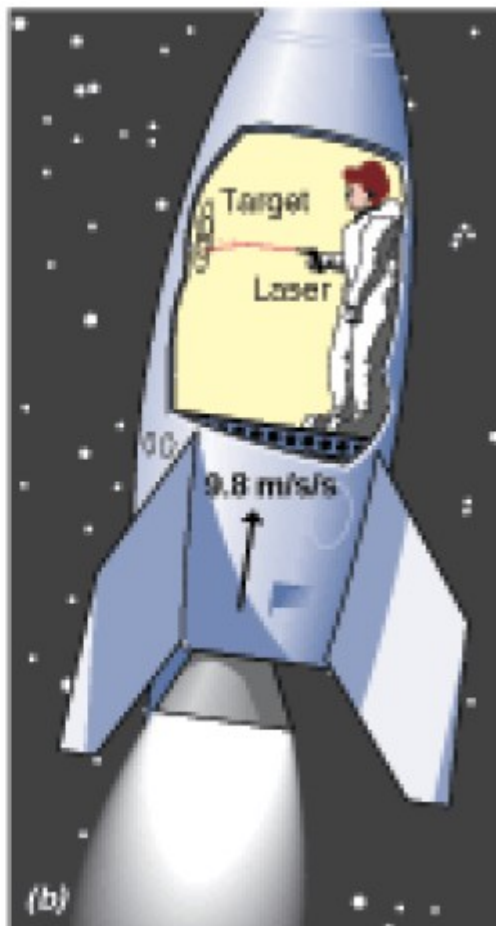
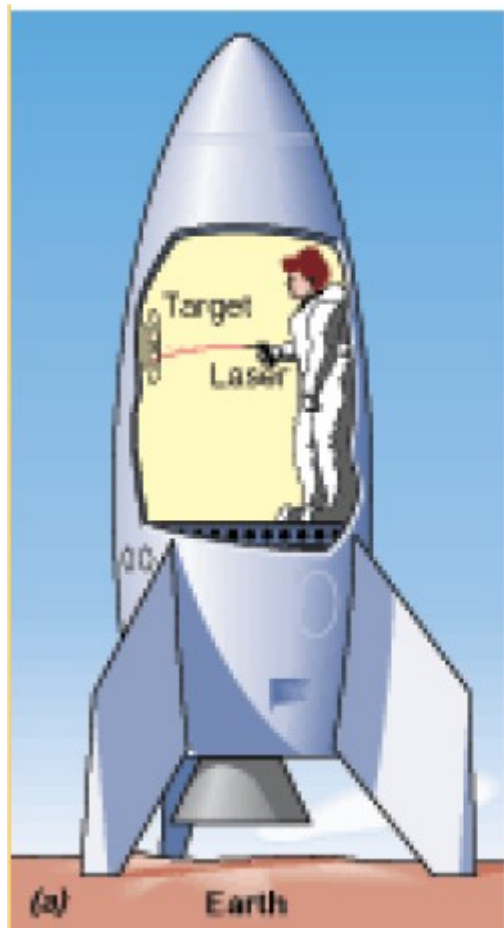
Algunhas  
galaxias que  
vemos son só  
“espellismos”



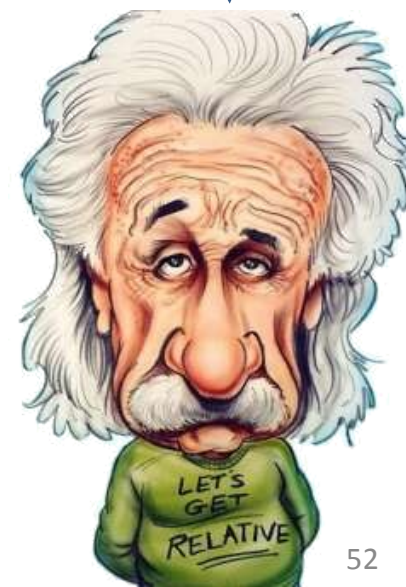
## A equivalente nun sistema non gravitacional



A luz desvíase, xa pola curvatura, xa pola aceleración do sistema desde o que se lle observa.

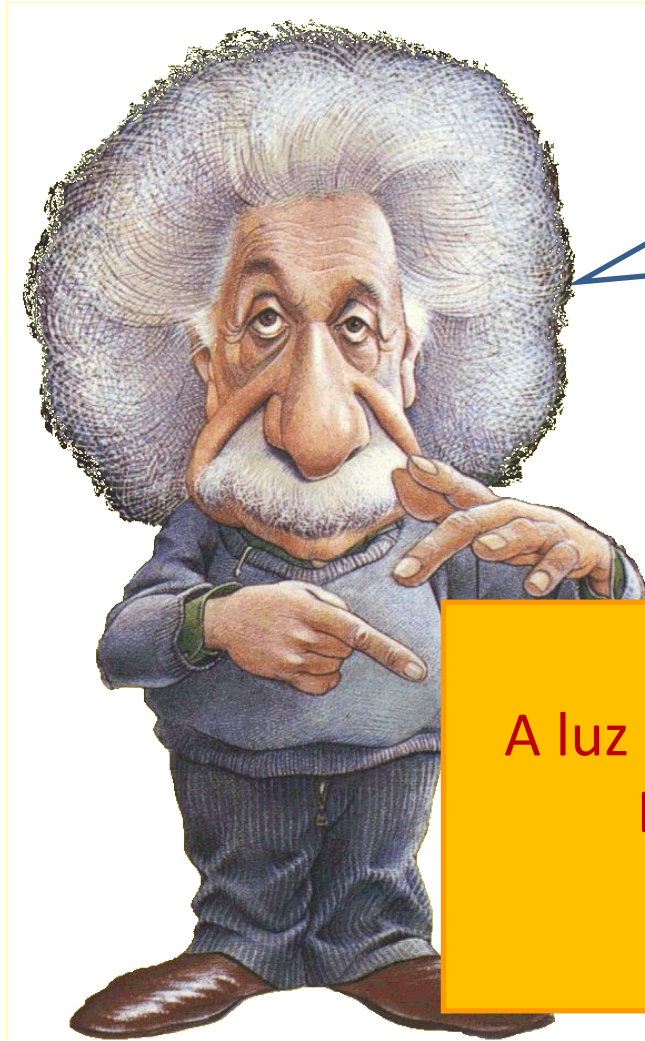


Aínda que  
sorprenda!





E Einstein conclúe respecto da luz:

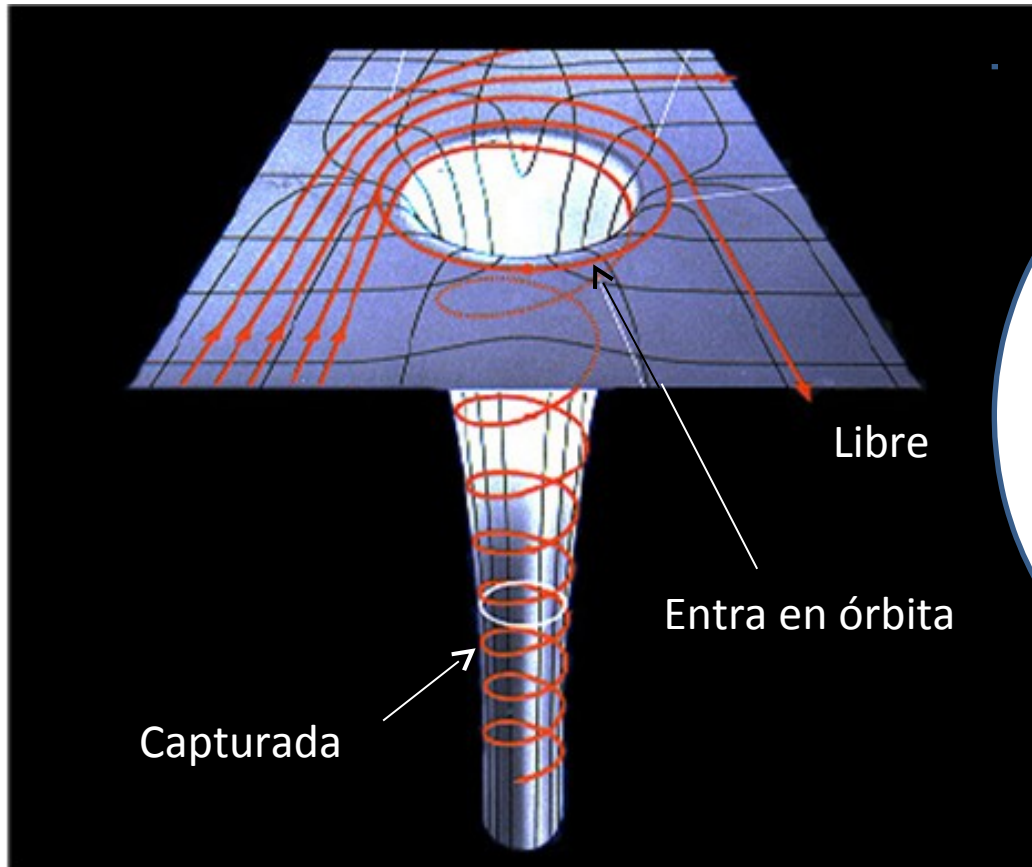


Tomen nota!

A luz é desviada polo espazo curvado.  
De igual forma é desviada nun  
sistema acelerado.

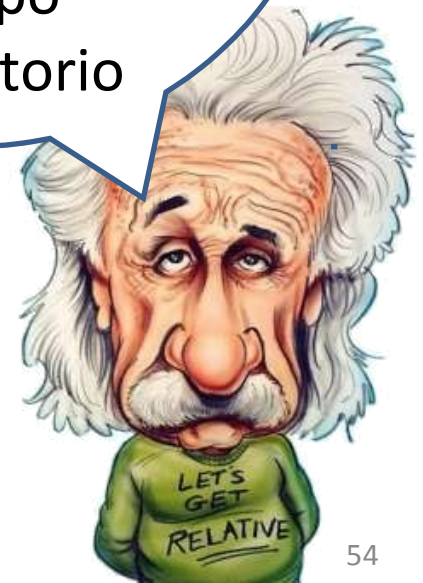


# A Métrica ou Solución de Schwarzschild



Esta métrica (solución) presenta un caso límite no que nada pode escapar do campo gravitatorio

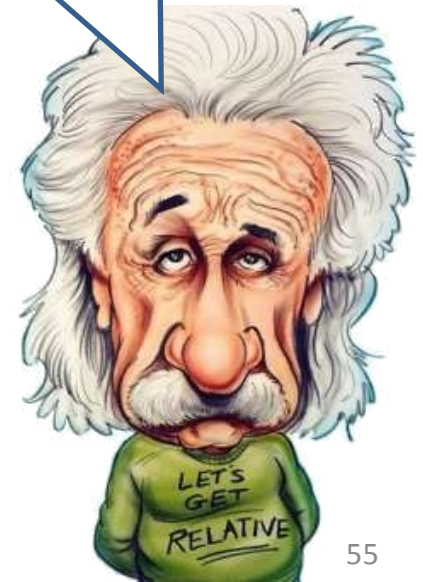
Karl Schwarzschild deu en 1916 unha solución exacta das ecuacións do campo gravitatorio de Einstein. Esa solución describe o campo gravitatorio xerado por unha estrela ou outra masa esférica.



# A Métrica ou Solución de Schwarzschild



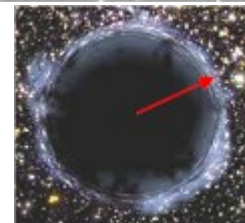
Se a densidade da masa que xera o campo gravitatorio é suficientemente grande, fórmase unha singularidade espazo temporal que chamamos “furado negro”



Nota: Lente gravitacional no bordo do chamado “horizonte visible”

$$r_s = \frac{2Gm}{c^2},$$

Radio de Schwarzschild



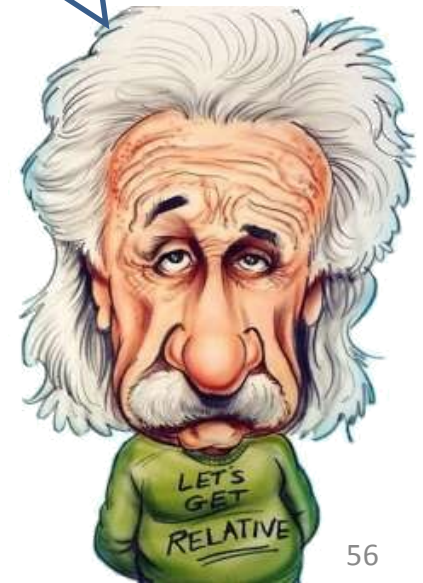
# A Métrica ou Solución de Schwarzschild



Como de alta debe ser a densidade?



A nosa Terra  
tería que ser  
como unha  
boliña



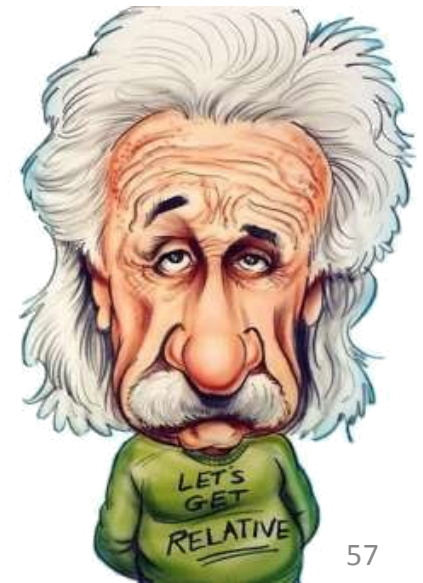


# A Métrica ou Solución de Schwarzschild



Poderíamos viajar a un furado negro?

Non soportaríamos  
o gradiente  
gravitatorio (a  
“espaguetización”)

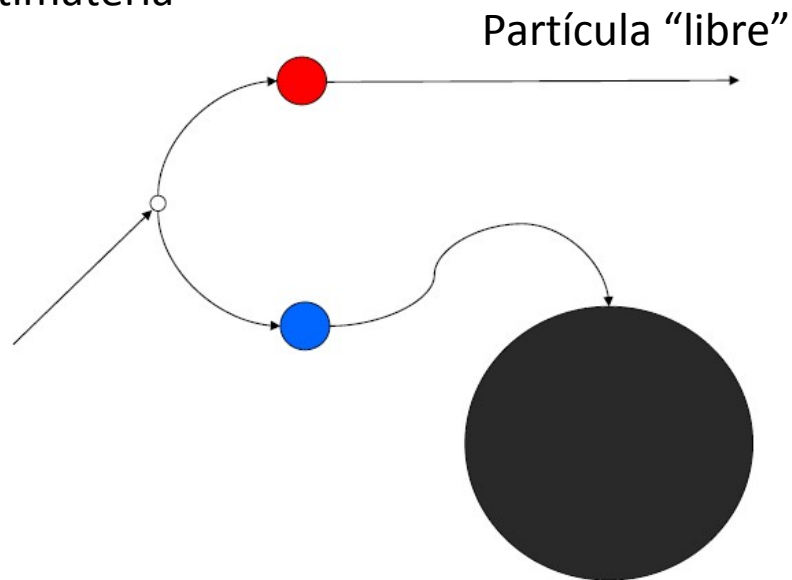
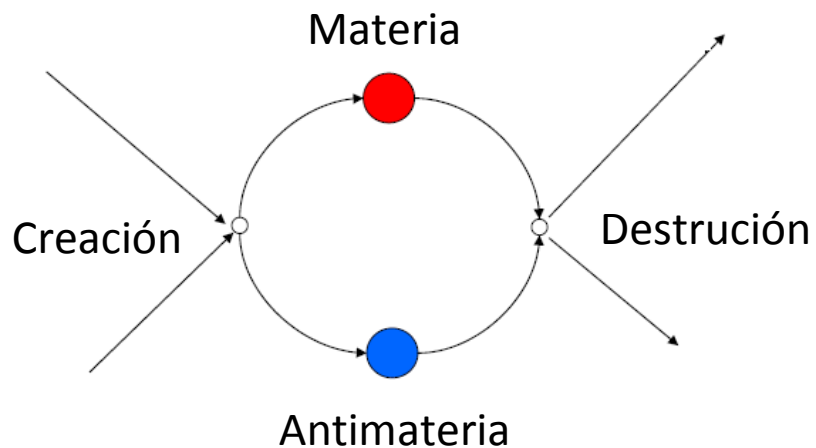
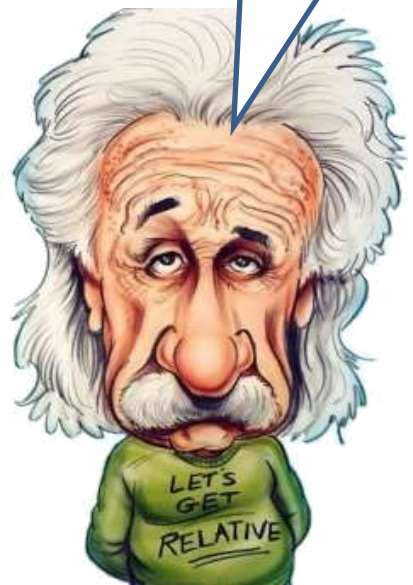






É totalmente negro?

Non debería existir a chamada "radiación de Hawking"

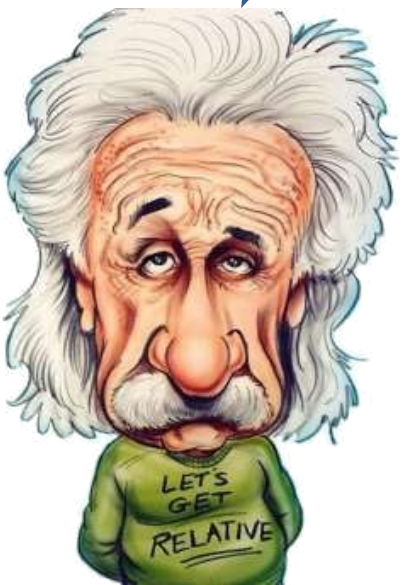
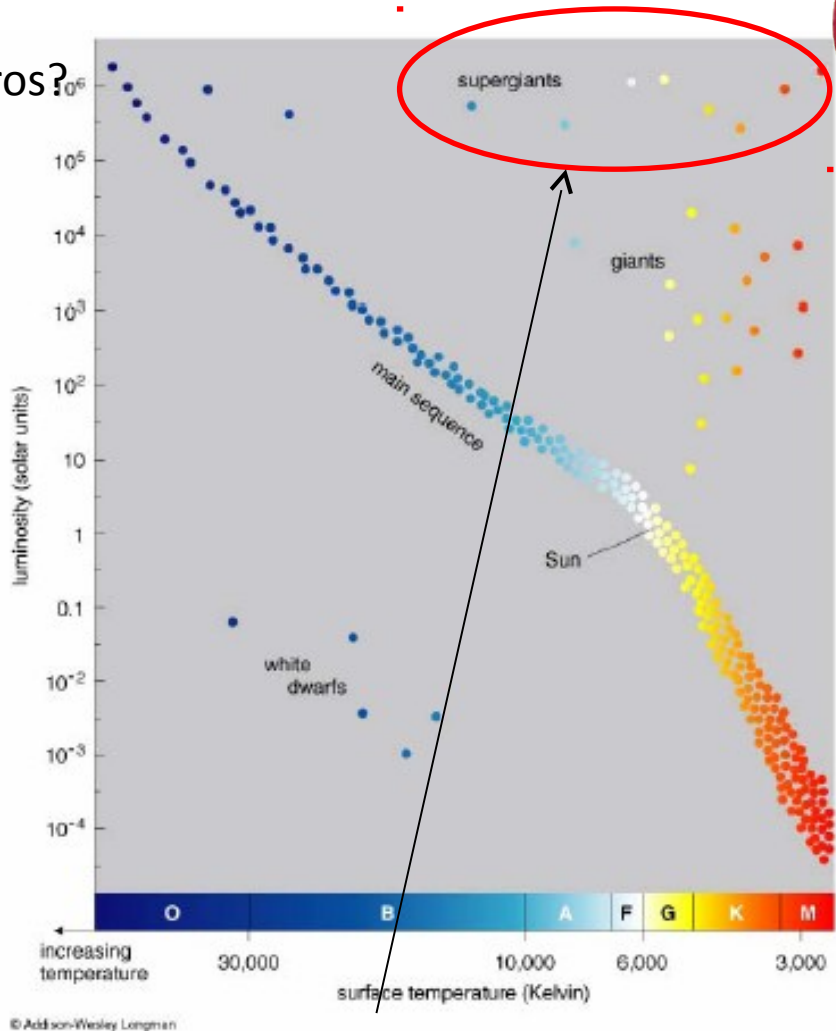




Existen realmente os furados negros?

Observáronse varios nos últimos anos

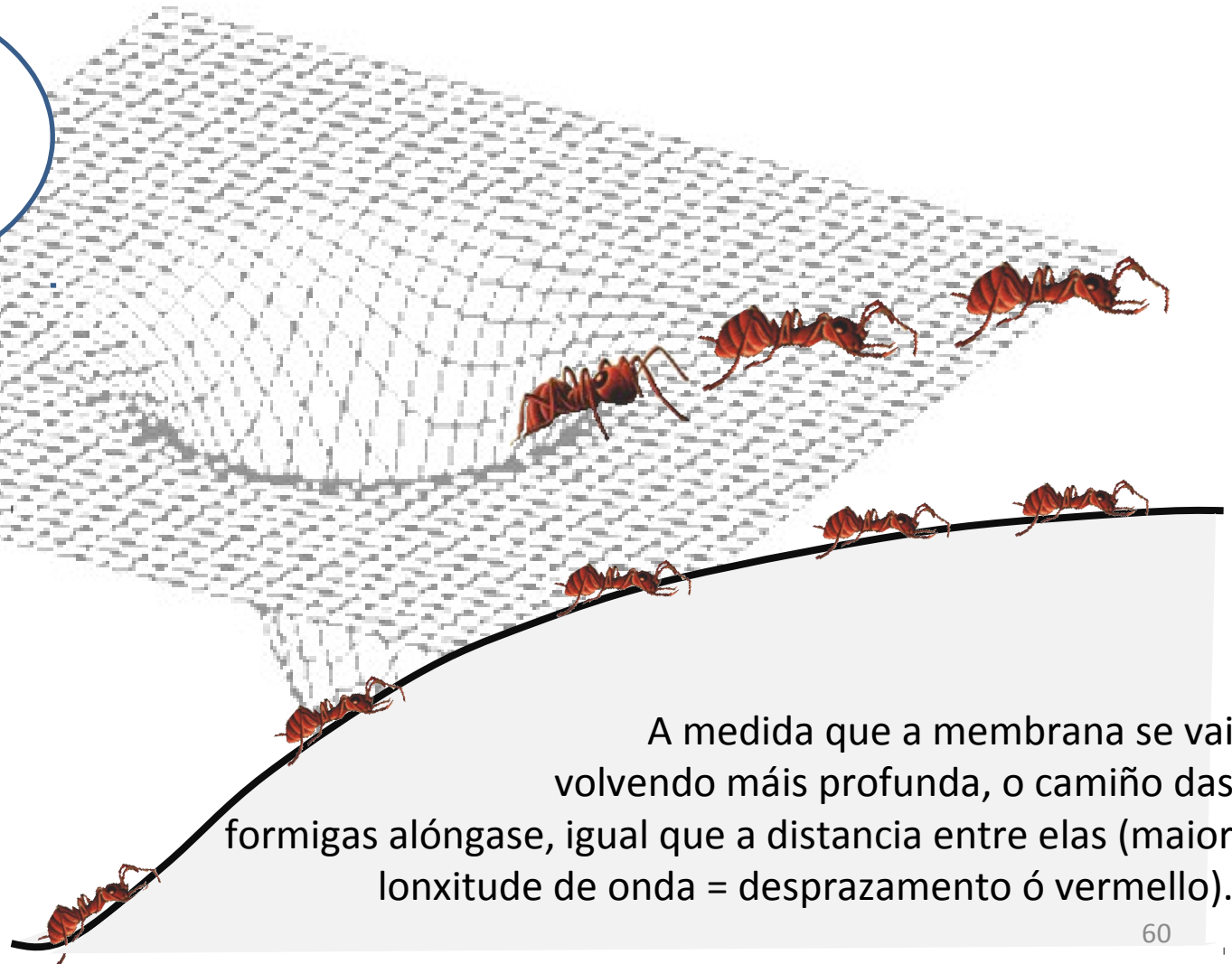
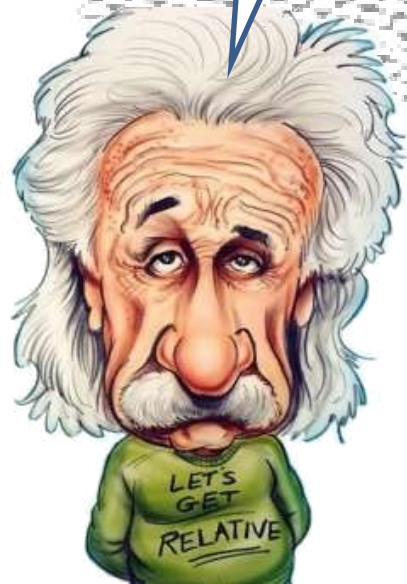
Diagrama de Hertzsprung Russell



A situación propicia para a súa aparición é a morte dunha estrela.

Poderíamos observar a súa formación?

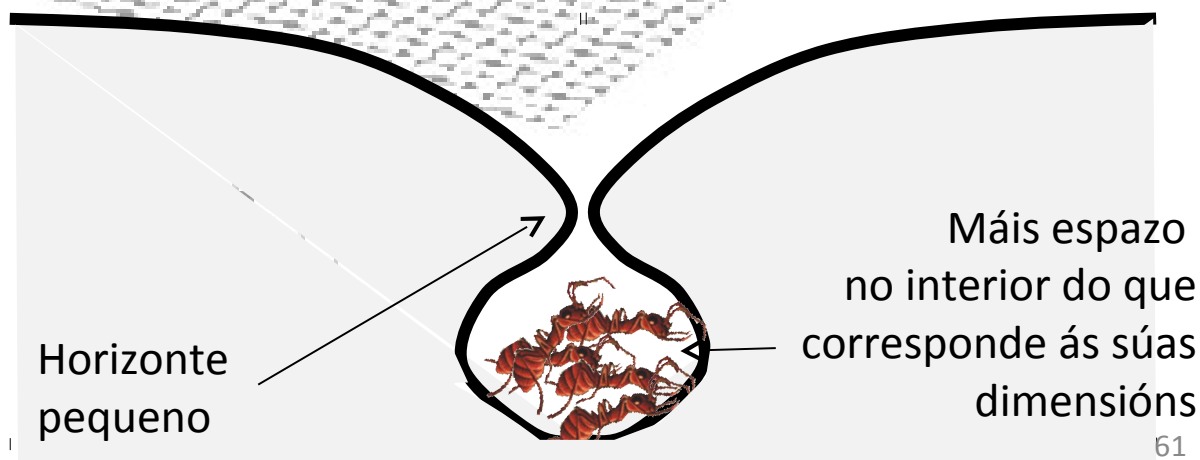
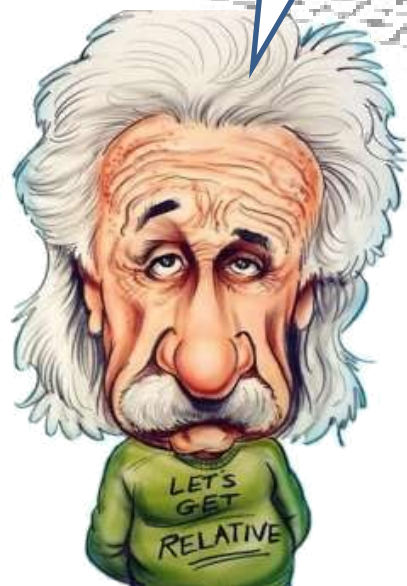
Pódese  
usar a  
analogía de  
Thorne

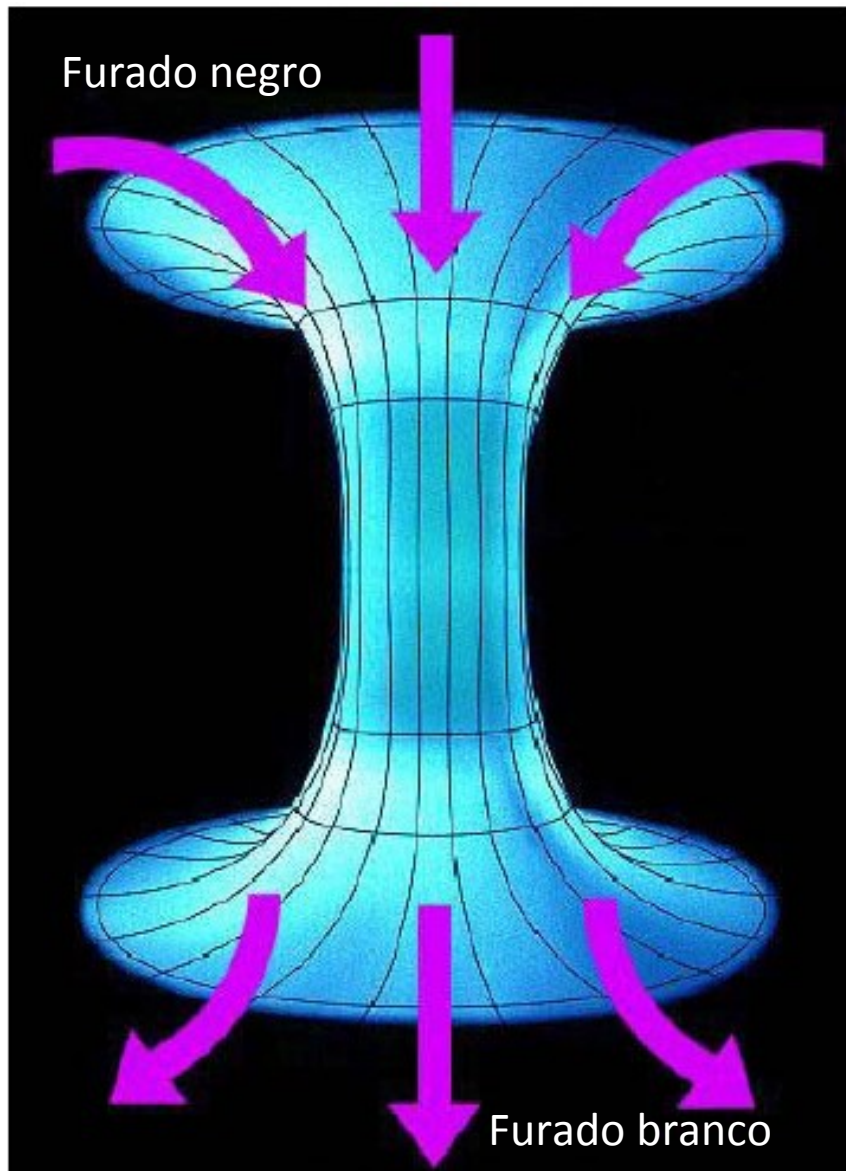


A medida que a membrana se vai volvendo máis profunda, o camiño das formigas alóngase, igual que a distancia entre elas (maior lonxitude de onda = desprazamento ó vermello).



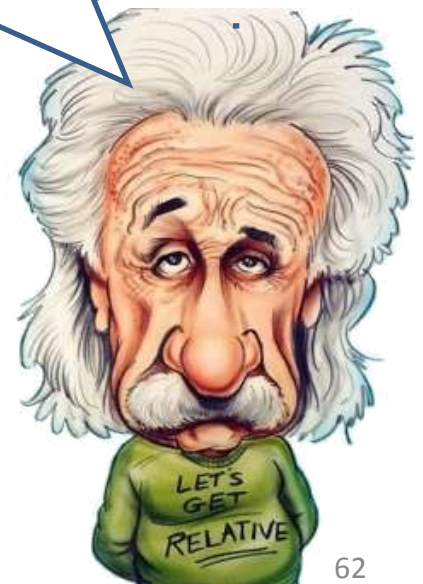
Ó final,  
ningunha  
formiga pode  
escapar





De lograrse acoplar dúas singularidades, podería ser que unha actúe como furado negro, e a outra como furado branco.

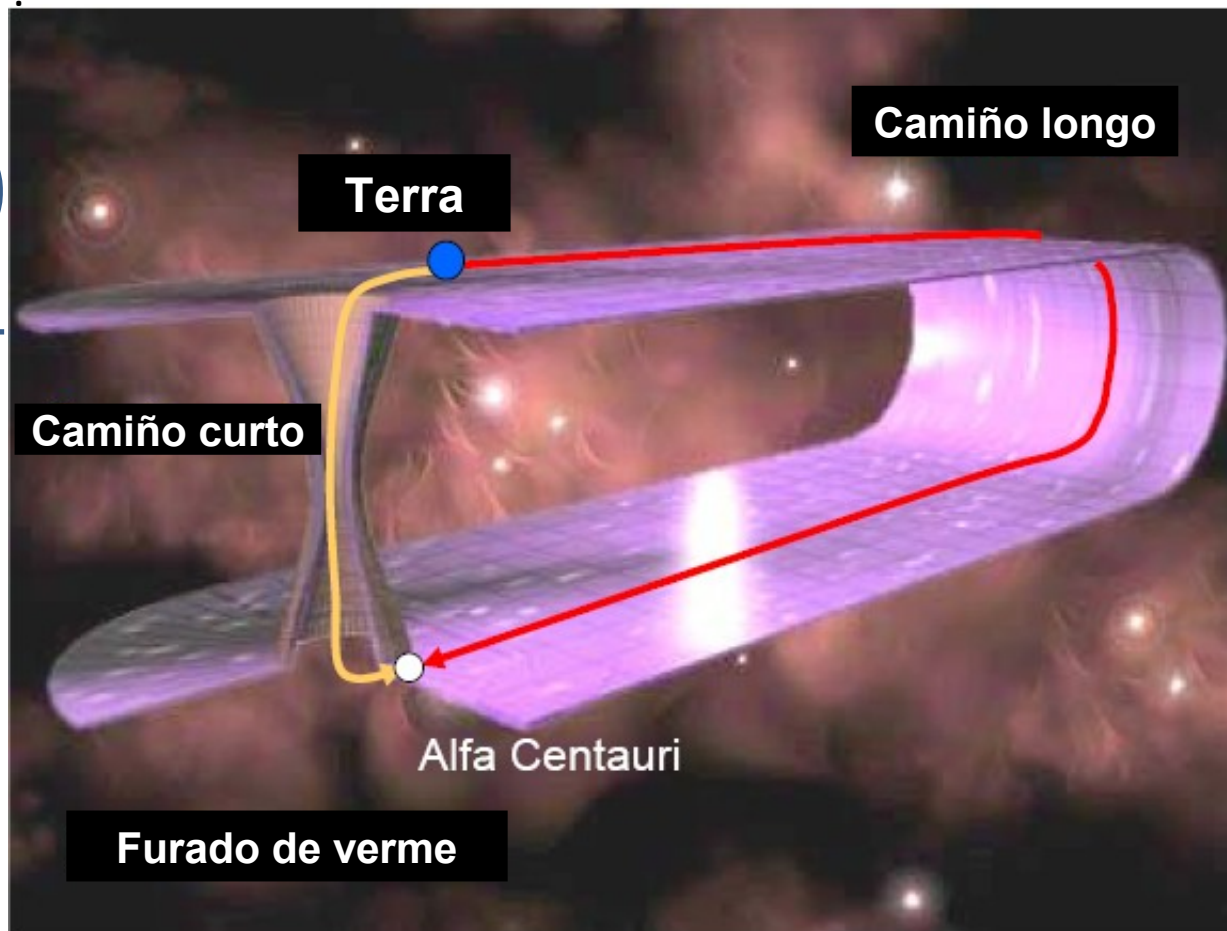
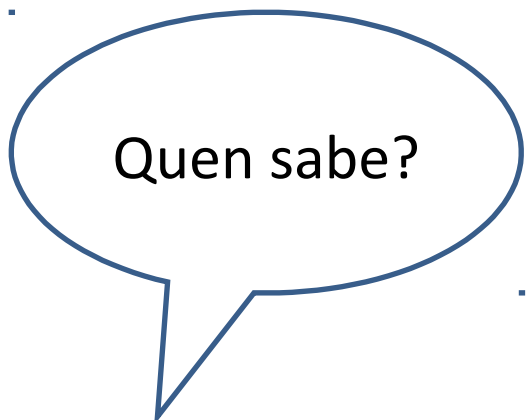
Mmmm... Algúns indicios, mais sen verificación



## A Métrica ou Solución de Schwarzschild



Especúlase con que estas posibles conexións, chamadas “furados de verme”, poderían comunicar dous puntos afastados, constituíndo “autopistas intergalácticas”.

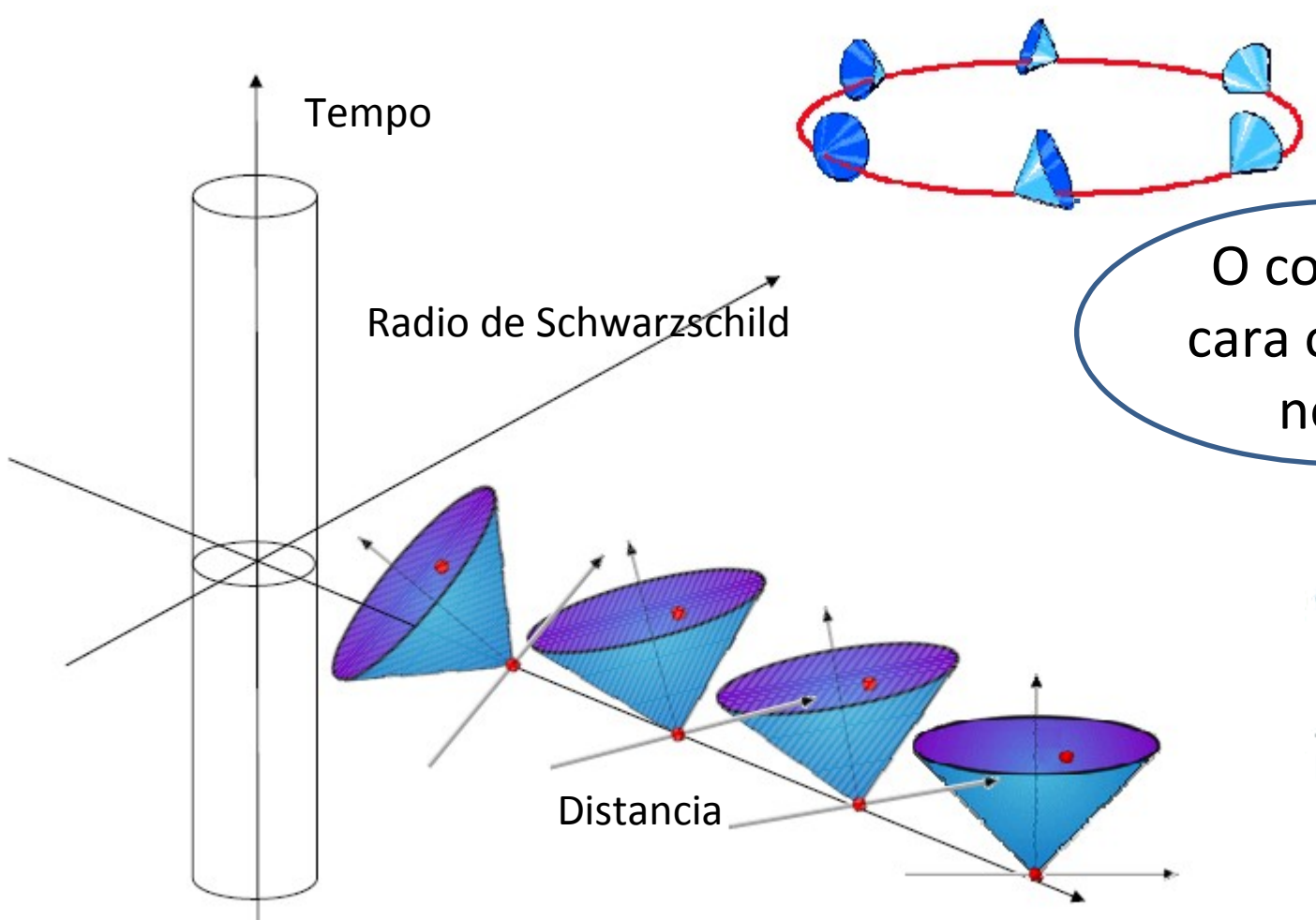




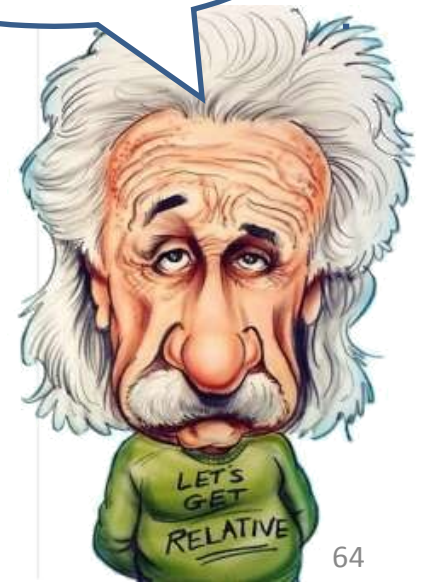
# Posibilidades de viajar no tempo



Pódese estudar un cono de espazo-tempo no bordo dun furado negro:



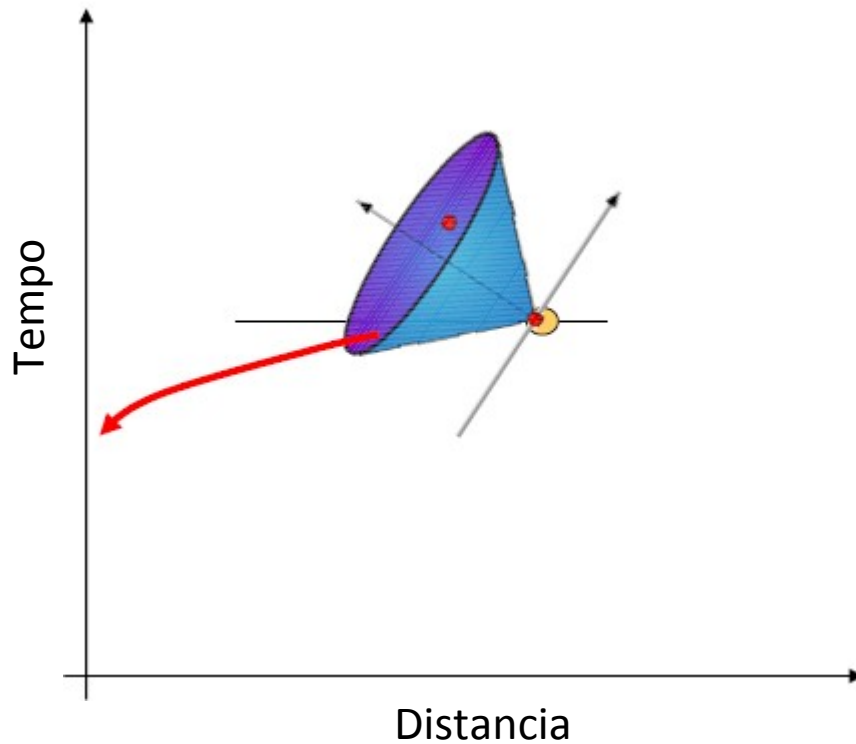
O cono vira cara o furado negro



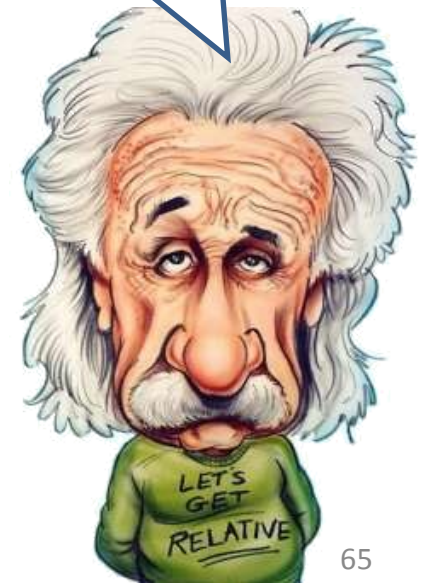
# Posibilidades de viajar no tempo

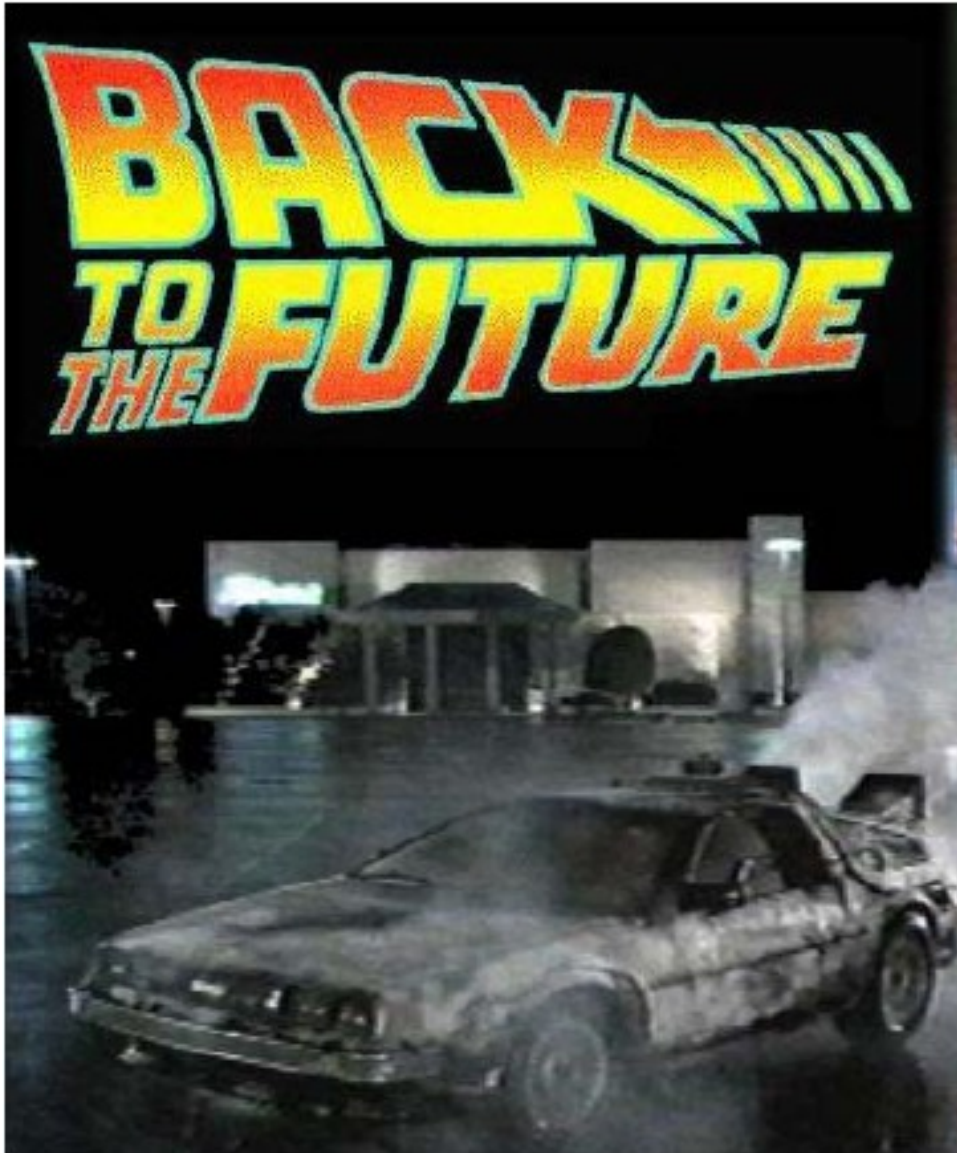


De inclinarse lo suficiente, podría permitir ir a tiempos negativos, o sea, retroceder no tempo.



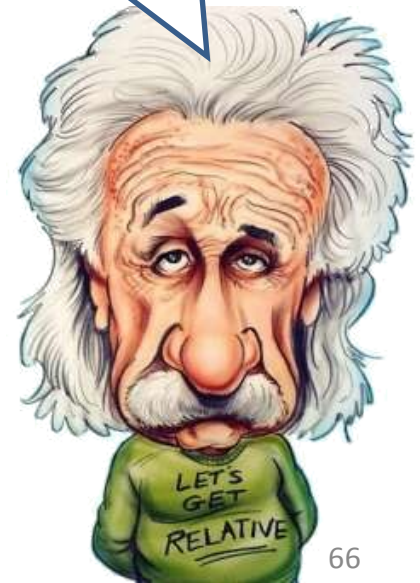
Será posible?



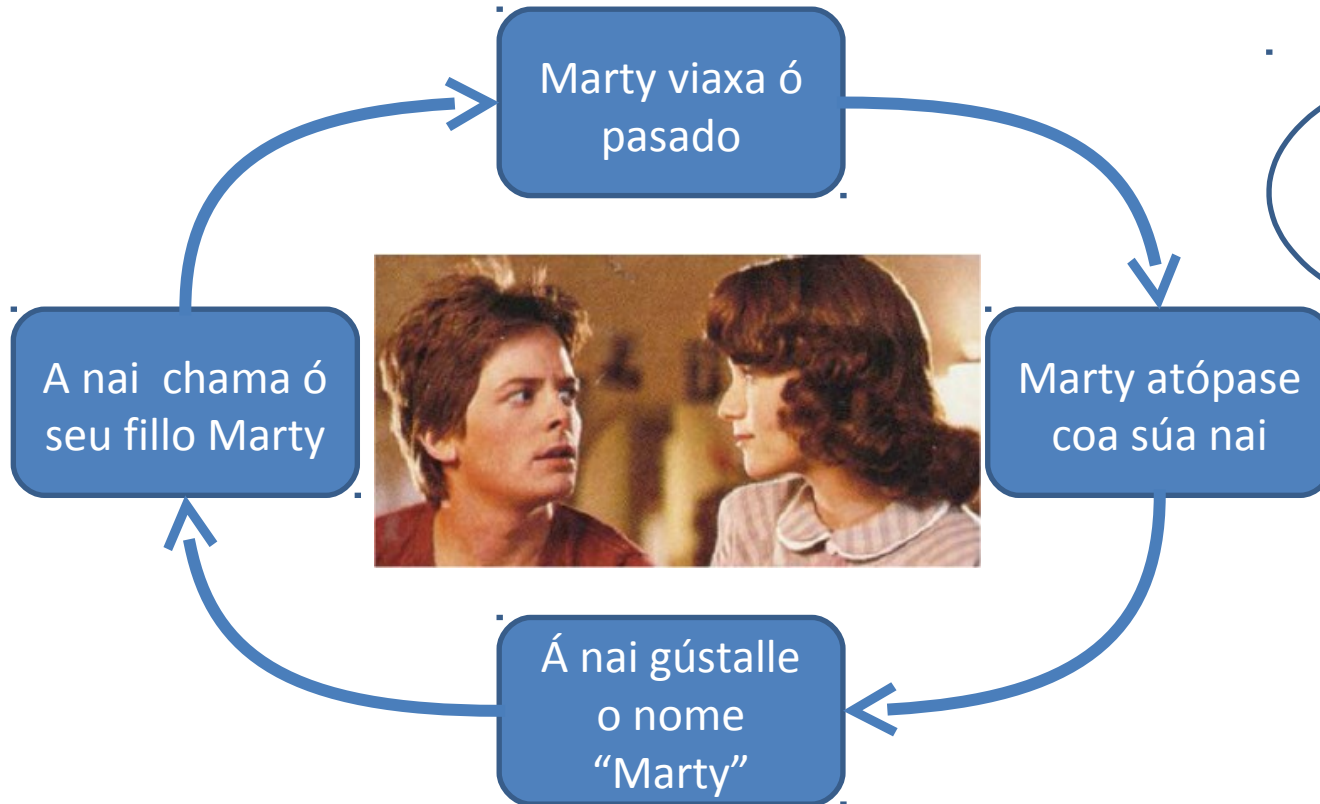


Existen dúas situacións posibles:  
un sistema aberto ou un pechado.

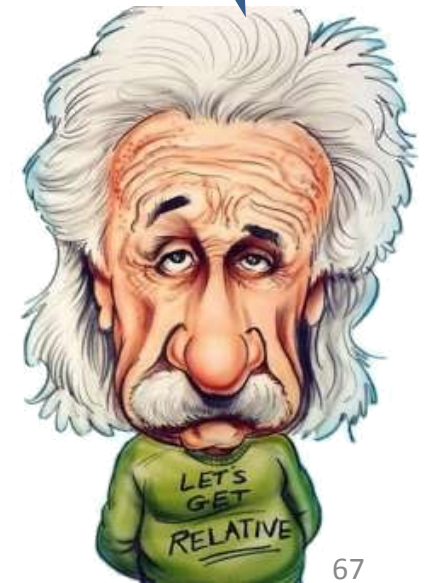
OK.  
Especulemos







Podería ser un sistema pechado



## Posibilidades de viaxar no tempo



Se os sistemas estivesen pechados, a Historia estaría xa escrita e a vontade humana sería unha ilusión.

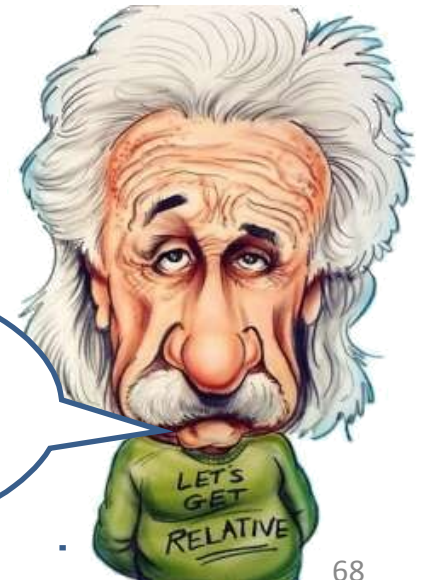


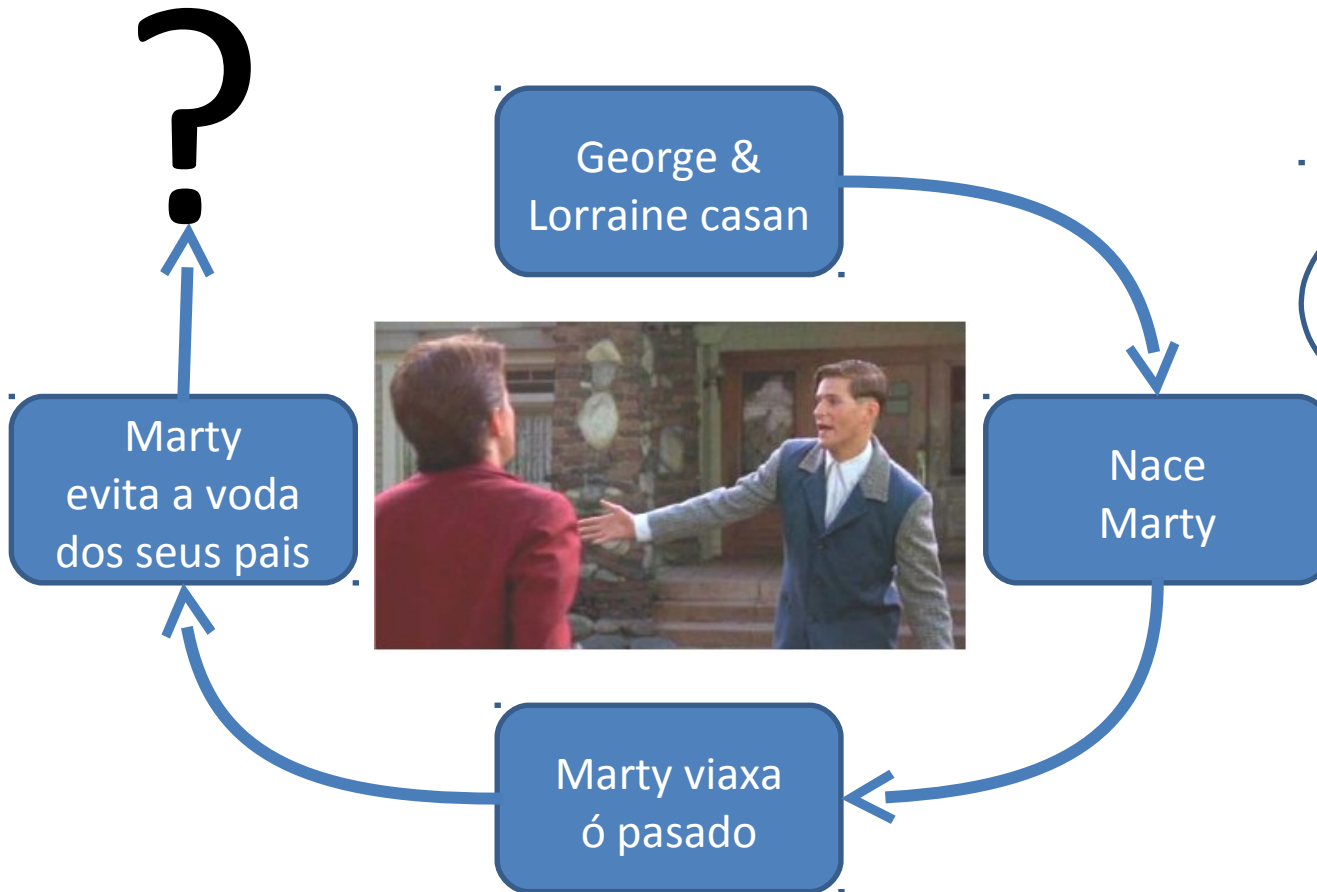
Stephen Hawking, Isaac Newton, Data e Albert Einstein xogando ó póker en 2300 d.n.e.

Paradoxa de Hawking:

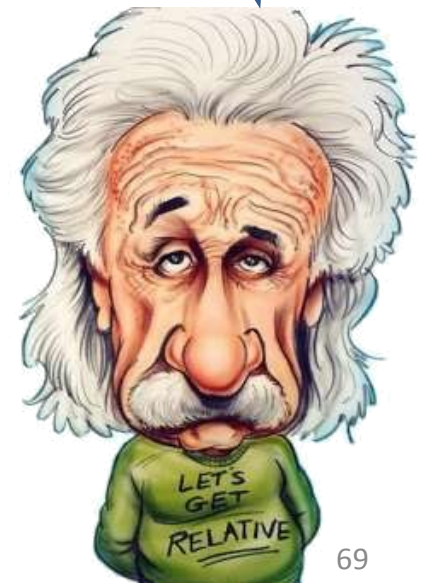
*Por que non vemos turistas, cazadores de lembranzas, estudosos da Historia, arqueólogos, fuxitivos e criminais que nos visitan vindo desde o futuro?*

Quen di que me gusta o póker?





E se o sistema é aberto?





## Posibilidades de viajar no tempo



*Se os sistemas fosen abertos, a Historia sería una ciencia experimental.*

*(Carl Sagan)*



Teremos  
que aguardar  
por novos  
estudos





E Einstein conclúe respecto da viaxe no tempo:



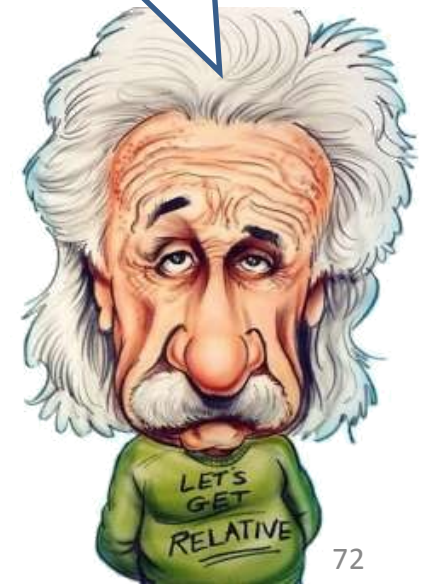
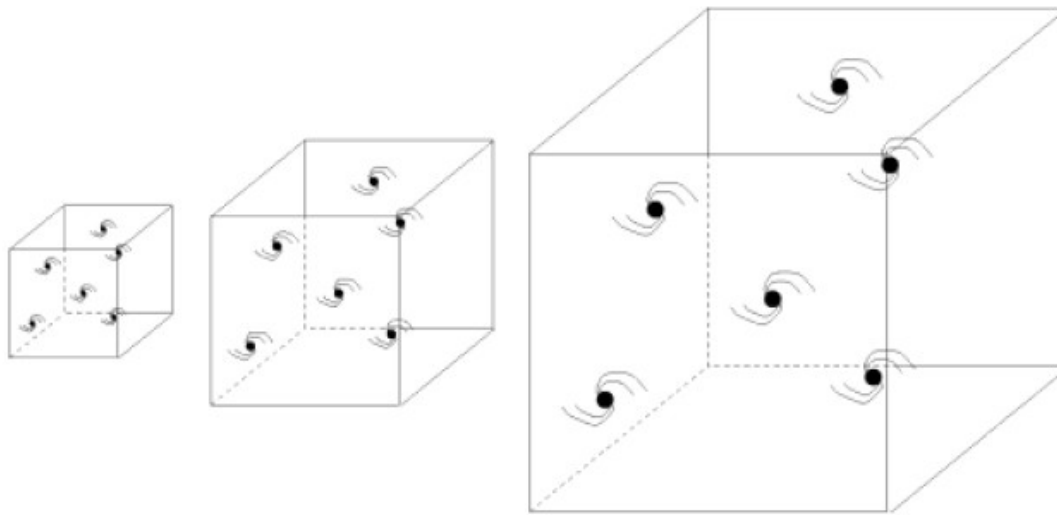
Tomen nota!

Síntoo, pero aínda non sabemos se é posible. Tampouco temos idea de se os sistemas son abertos ou pechados.

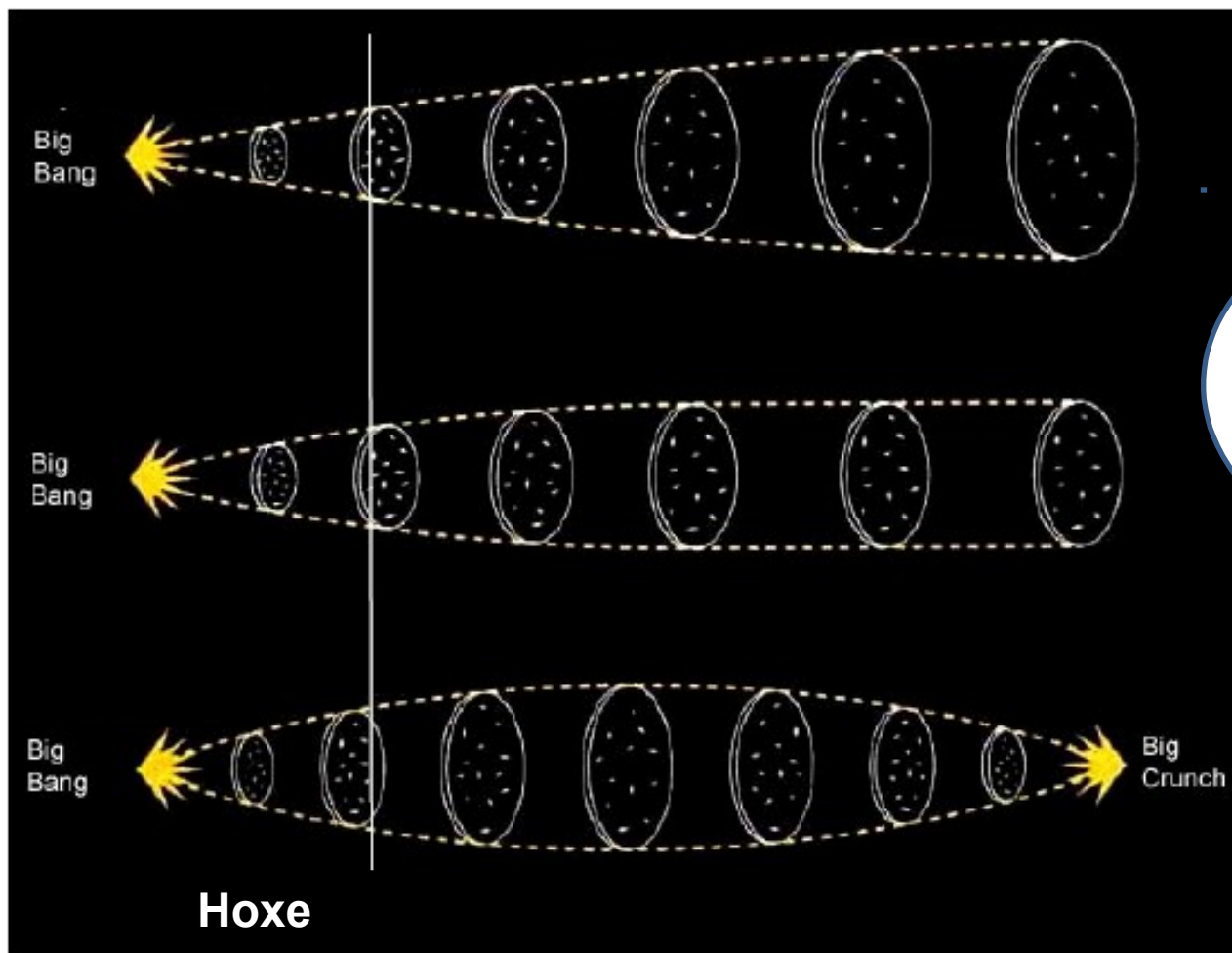
# A expansión do Universo



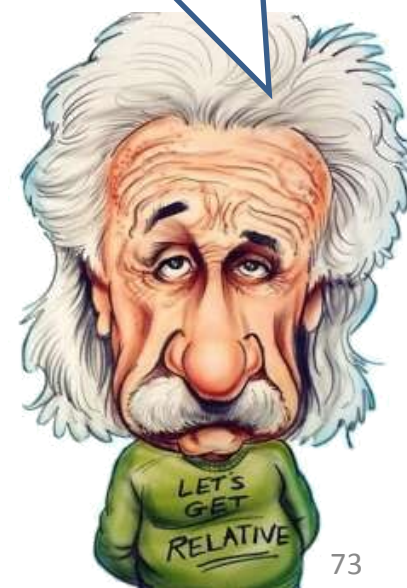
Polo desprazamento ó vermello sabemos que as galaxias se están afastando entre si. O Universo “ínchase”.



# A expansión do Universo

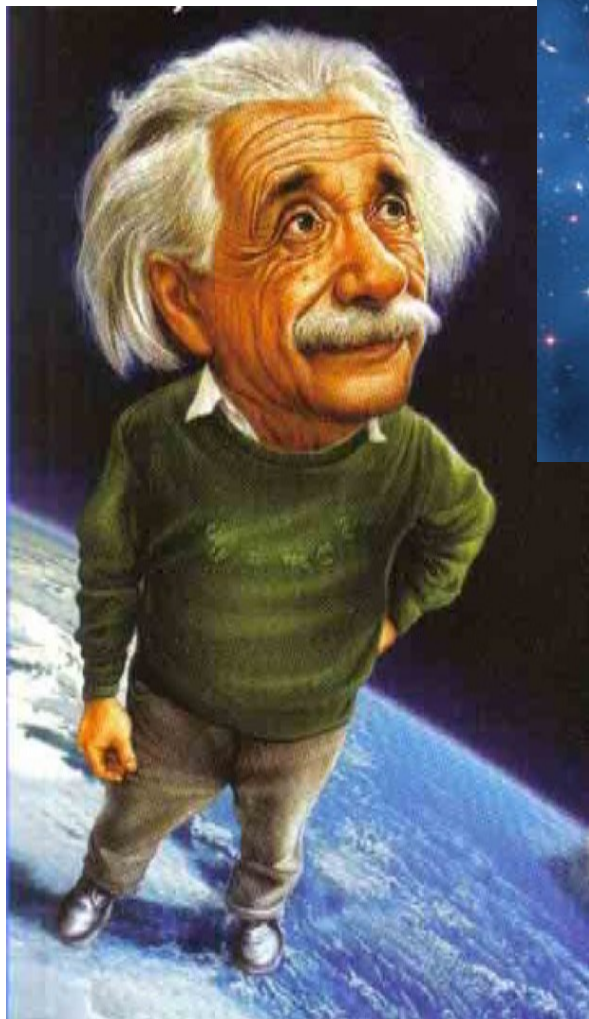


A masa “observada” non alcanza para que sexa pechado



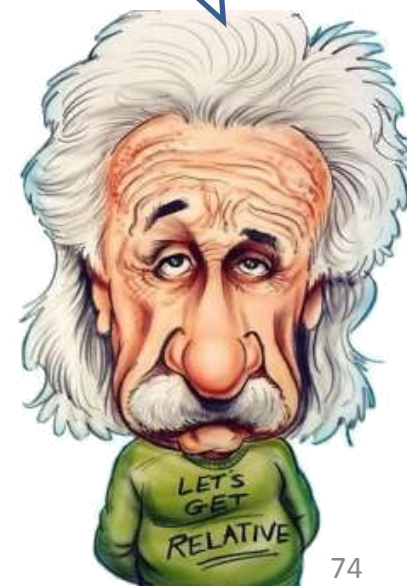
Dependendo da masa que exista, o Universo volverá colapsar ou expandirse ata o infinito.





En todo caso, existen lentes gravitacionais e comportamentos de galaxias que fan pensar que existe materia “non visible”. Fálase, xa que logo, de

## Materia Escura

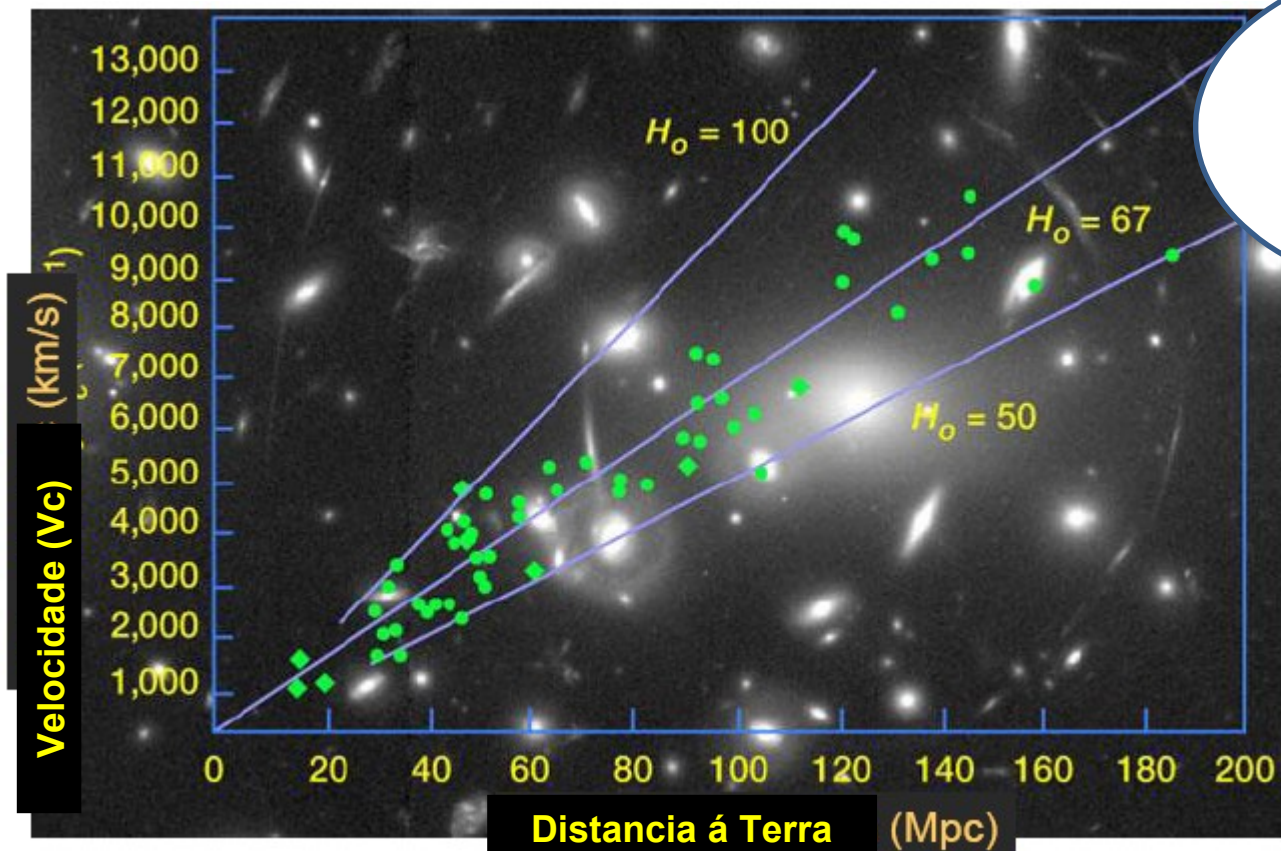




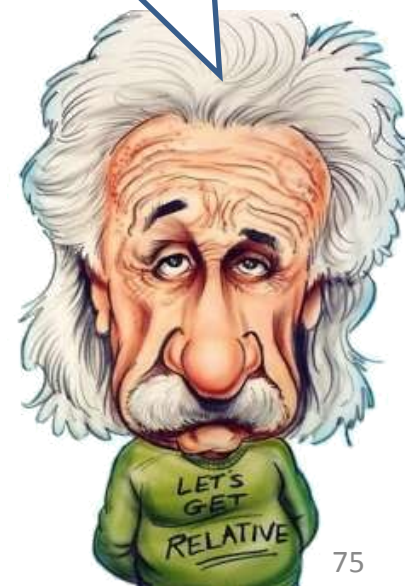


A expansión é cada vez máis rápida. Pero, de onde procede a enerxía?  
En forma análoga, fálase de

## Enerxía Escura



Quen sabe?





Isto foi todo...  
polo de agora

Hai moito aínda por descubrir.  
Espero que comprendesen algo en  
relación con todo isto e entendesen  
algo da Relatividade Especial e Xeral.