

El Mundo de la Relatividad Especial

El genio de Einstein consistió en no dudar en llevar a sus últimas consecuencias lo que la naturaleza nos decía, abandonando prejuicios dictados por la experiencia cotidiana.

¿Pero cómo podemos entender el que todos los observadores, independientemente de su movimiento relativo, midan exactamente la misma velocidad de propagación de las fuerzas y de la luz?



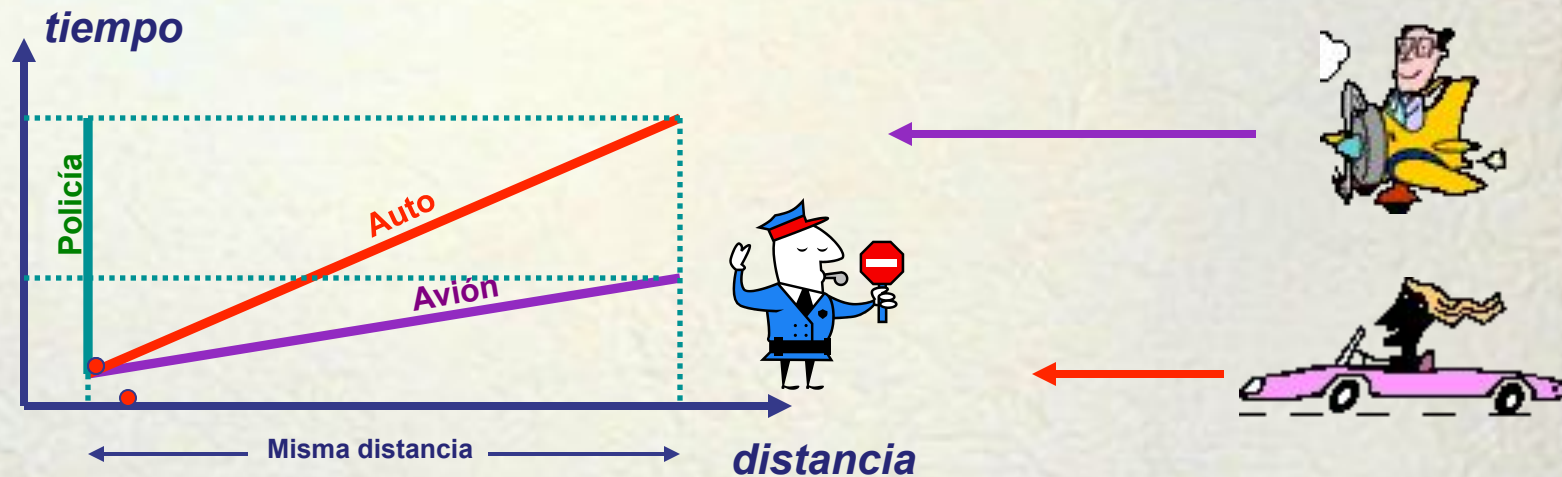
El Mundo de la Relatividad Especial

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo}$$



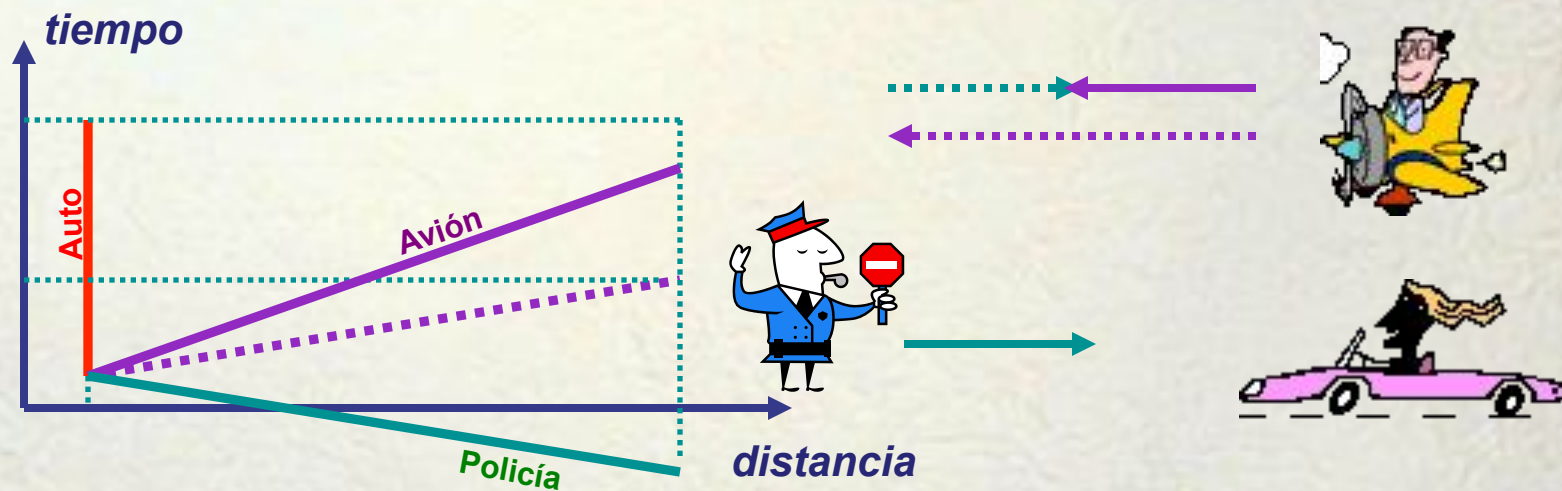
La velocidad no se mide directamente. Lo que medimos son distancias y tiempos, la velocidad se obtiene entonces como el cociente de estas dos cantidades.

El Mundo de la Relatividad Especial



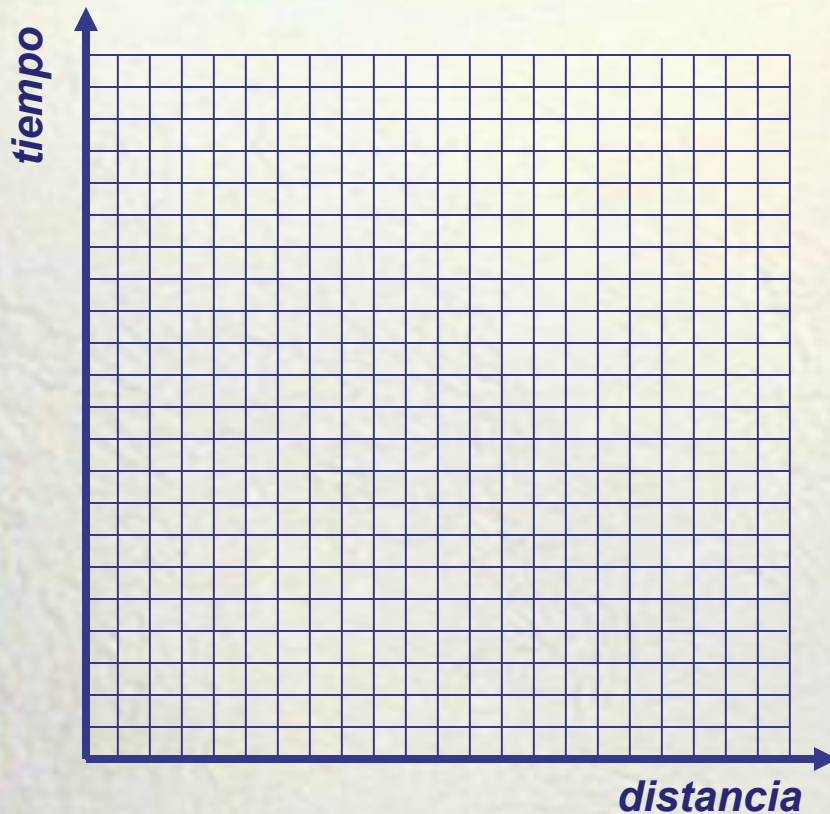
Así por ejemplo, si un policía quiere medir las velocidades de un auto y un avión, él puede hacer que ambos recorran la misma distancia. El policía encontrará que el avión hace el recorrido en un tiempo menor que el auto. El policía concluirá entonces que el avión se mueve a mayor velocidad. Obviamente que el policía piensa que él no se mueve.

El Mundo de la Relatividad Especial



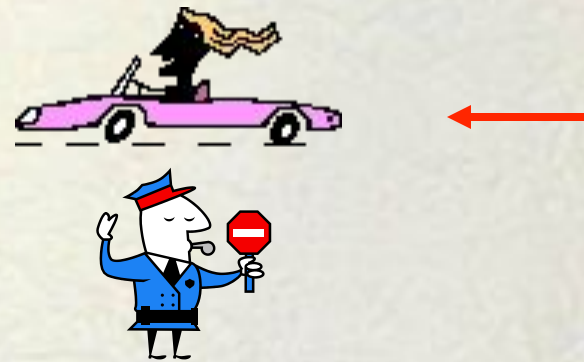
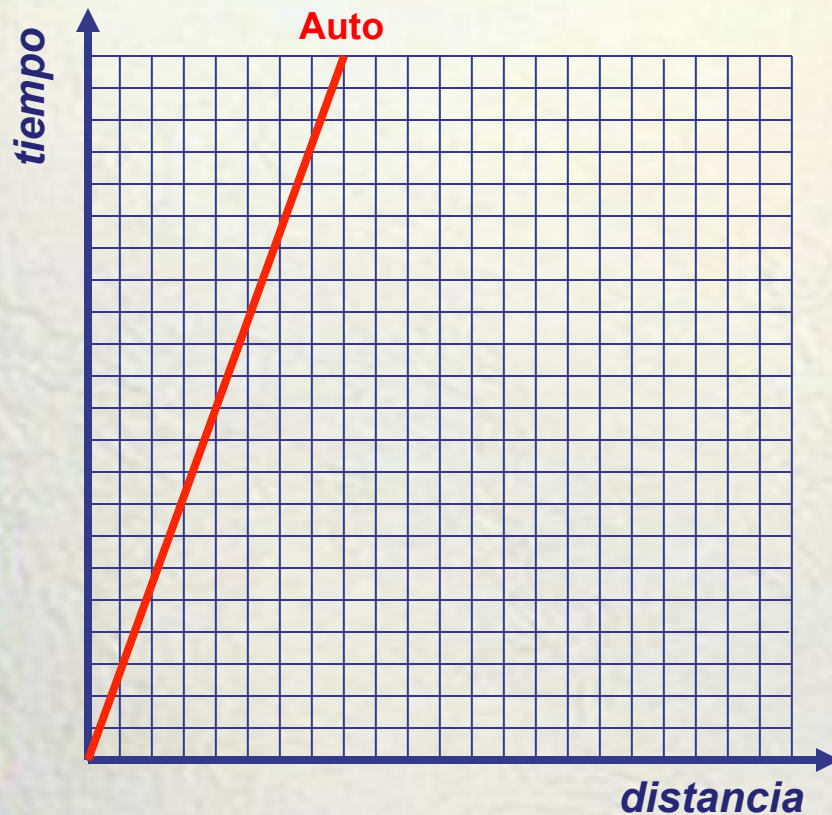
Si ahora describimos la situación desde el punto de vista de la señora que va en el auto, para ella el auto no se mueve (con respecto a ella, claro esta), el policía se mueve hacia ella y el avión se mueve mas lentamente que la velocidad que ve el policía.

El Mundo de la Relatividad Especial



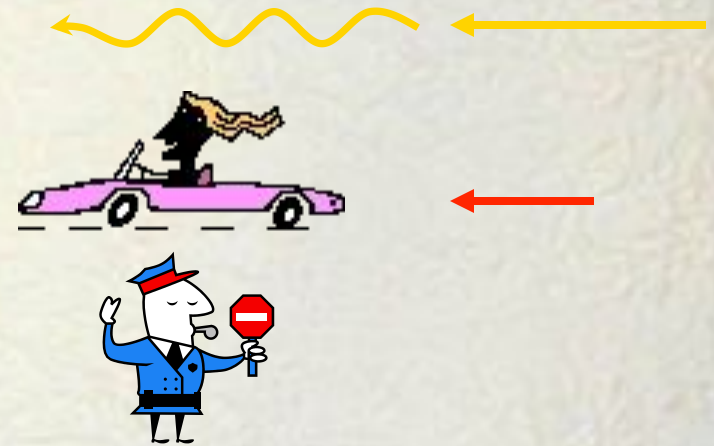
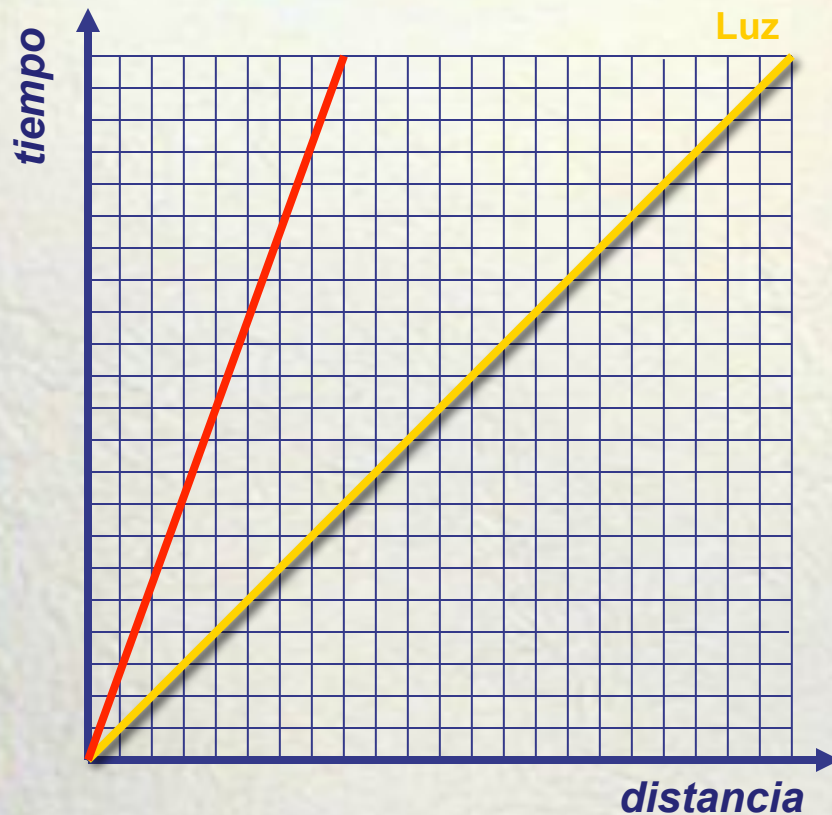
Vamos a describir lo que ocurre desde el punto de vista de un observador estacionario con respecto a nosotros, digamos el policía. El puede hacer un llamado *diagrama espacio-temporal*

El Mundo de la Relatividad Especial



Si él ve ahora pasar un auto a cierta velocidad constante, el graficará la trayectoria del auto en su diagrama espacio-temporal como una línea recta inclinada.

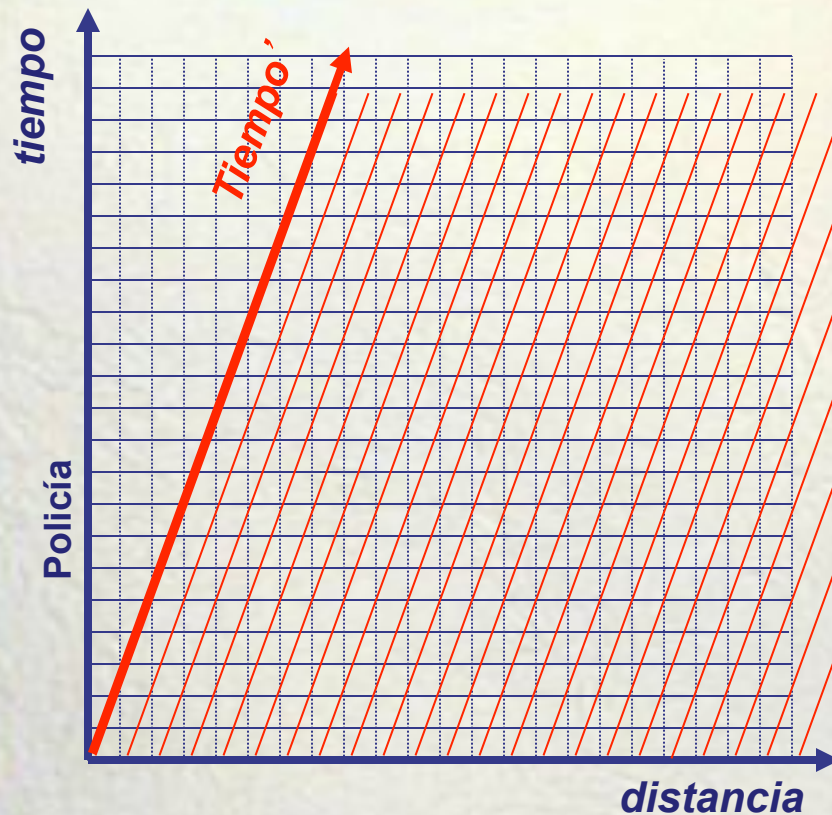
El Mundo de la Relatividad Especial



Un rayo de luz se mueve con velocidad mayor y por esto aparece como una recta más acostada en el diagrama espacio-temporal.

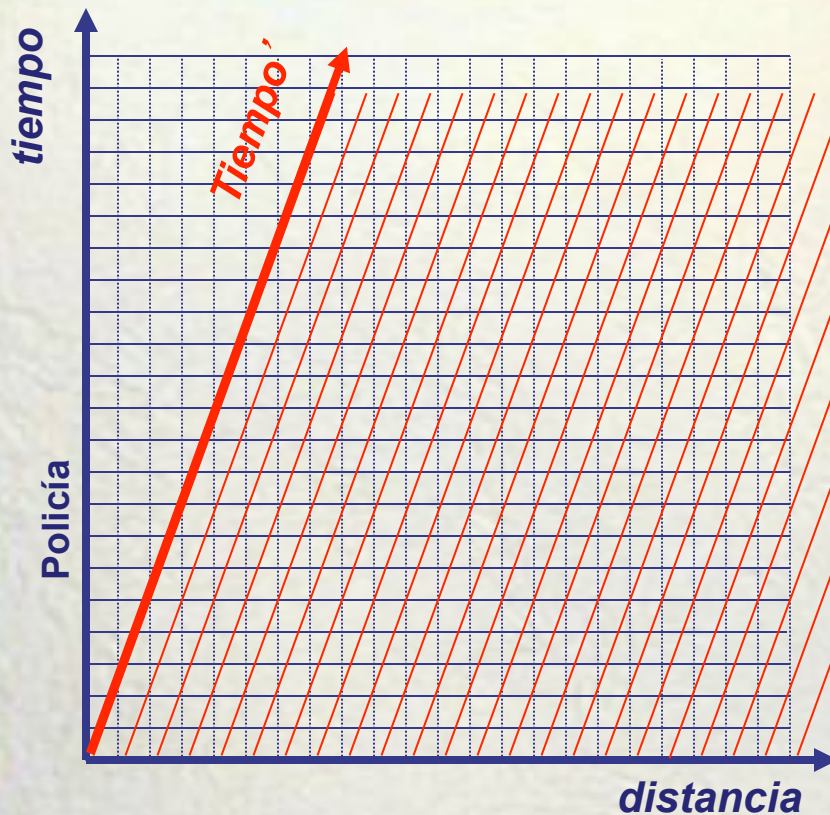
Si ajustamos las unidades de los ejes del diagrama, podemos hacer que la luz aparezca como una línea a 45° .

El Mundo de la Relatividad Especial



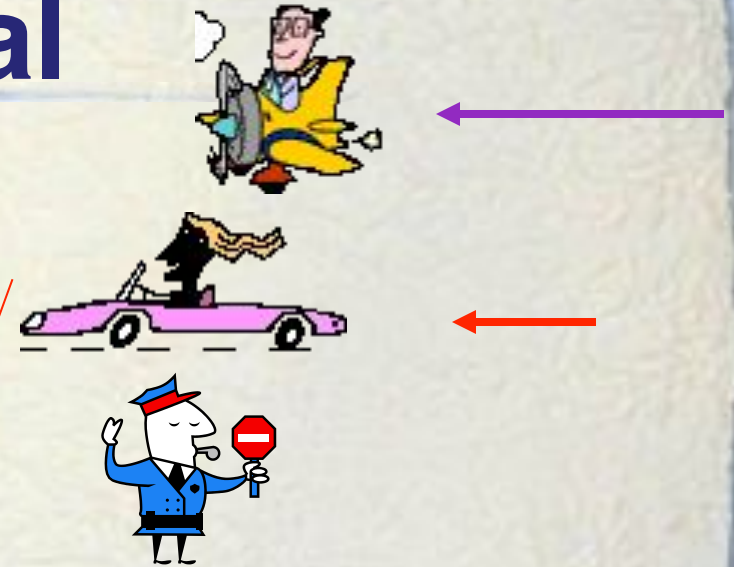
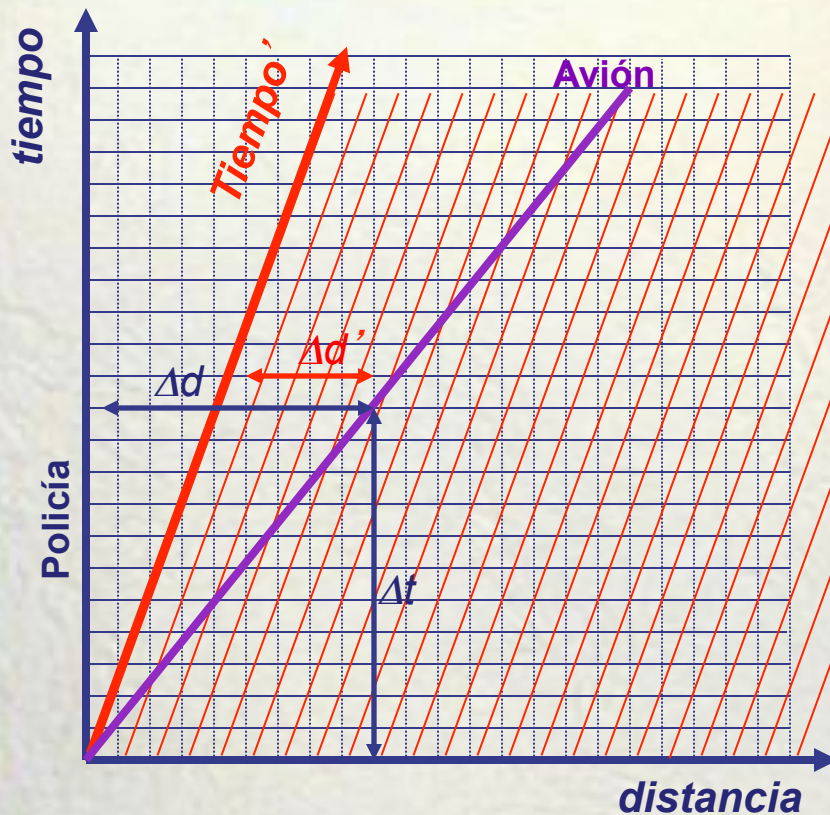
Describamos ahora la situación desde el punto de vista de la señora en el auto. Para ella, ella esta sin moverse y el policia se mueve para atrás. Esto quiere decir que en el diagrama espacio-temporal de ella, su eje temporal coincide con la trayectoria que el policia dibujó para ella. Con respecto al nuevo eje temporal, vemos que la trayectoria del policia se mueve hacia atrás con velocidad constante.

El Mundo de la Relatividad Especial



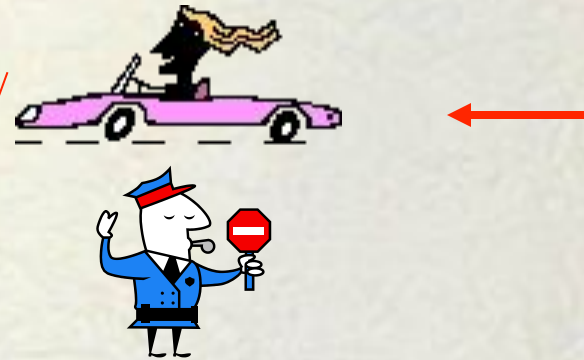
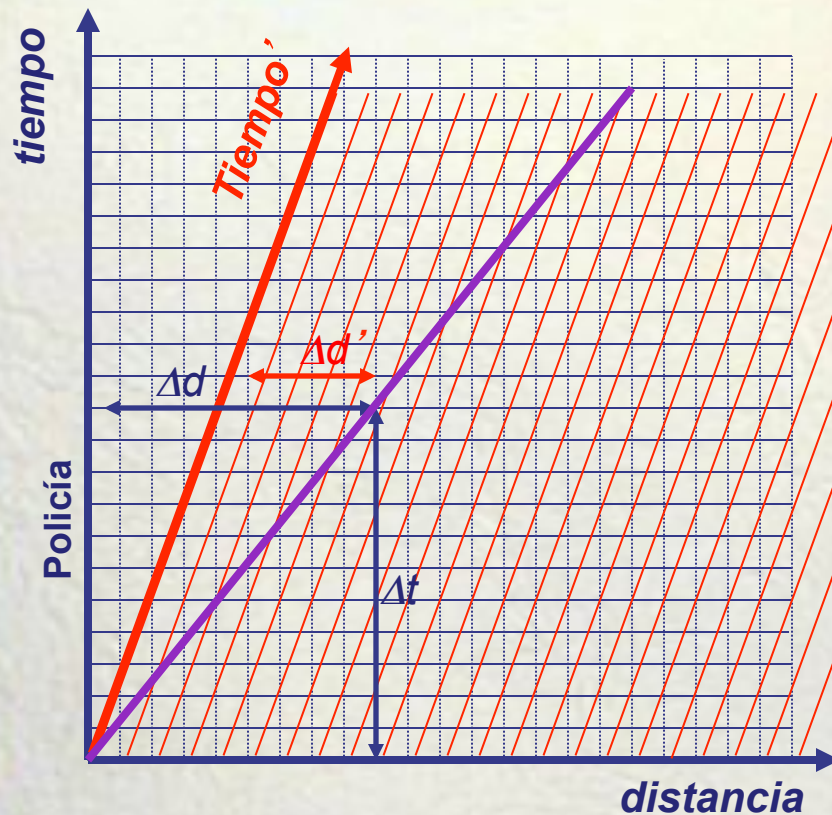
Notemos que las líneas horizontales, que representan intervalos de tiempo, coinciden en ambos diagramas, esto quiere decir que el tiempo transcurre exactamente de la misma manera para ambos observadores. Las líneas verticales del diagrama del policía, sin embargo, se han inclinado en el diagrama de la señora. Estas líneas representan intervalos espaciales. Es obvio que los observadores miden de manera diferente los intervalos espaciales.

El Mundo de la Relatividad Especial



Así, por ejemplo, un avión que parece moverse muy rápido para el policía, parecerá moverse más lentamente para la señora y esto puede verse en sus diagramas. La línea que representa el avión aparece menos inclinada (o sea con menor velocidad) de acuerdo al diagrama rojo.

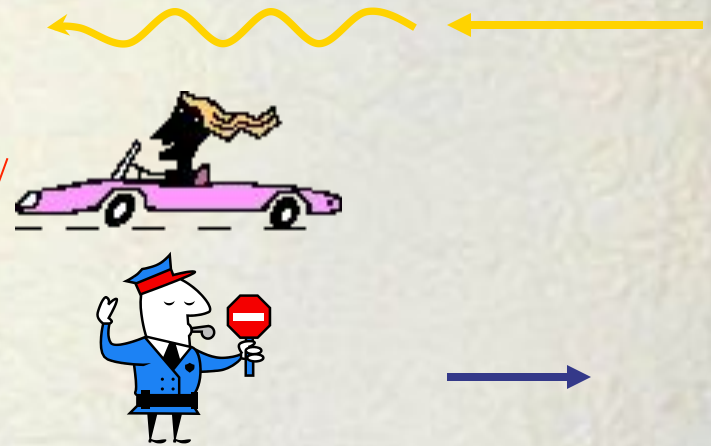
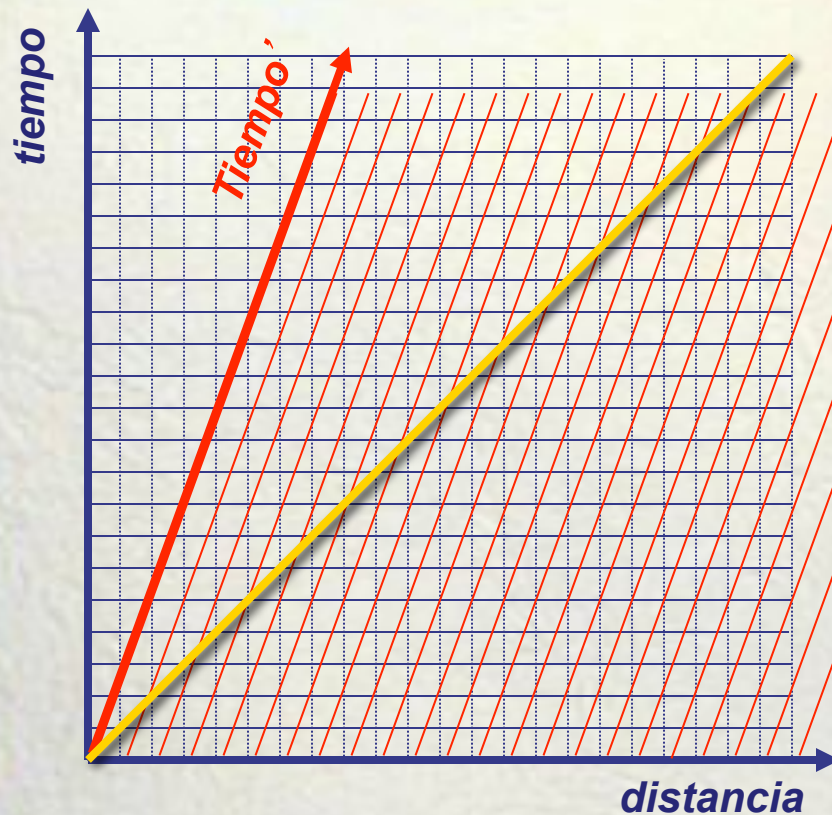
El Mundo de la Relatividad Especial



Lo anterior quiere decir que mientras el tiempo es absoluto (corre de igual manera para ambos observadores), el espacio es relativo (lo miden diferente cada observador).

En el Universo de nuestro sentido común, el tiempo es absoluto y el espacio es relativo.

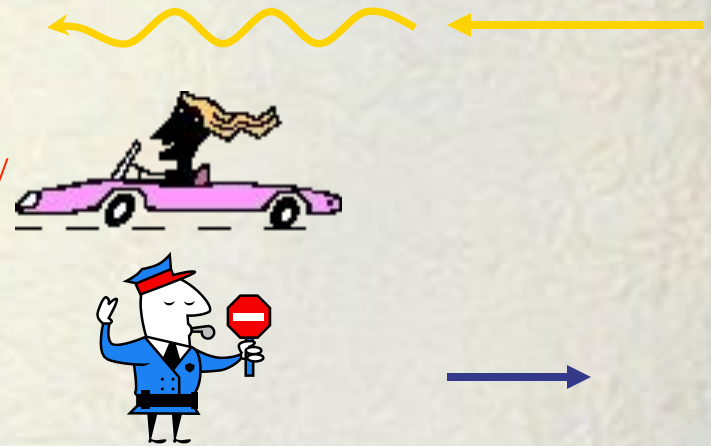
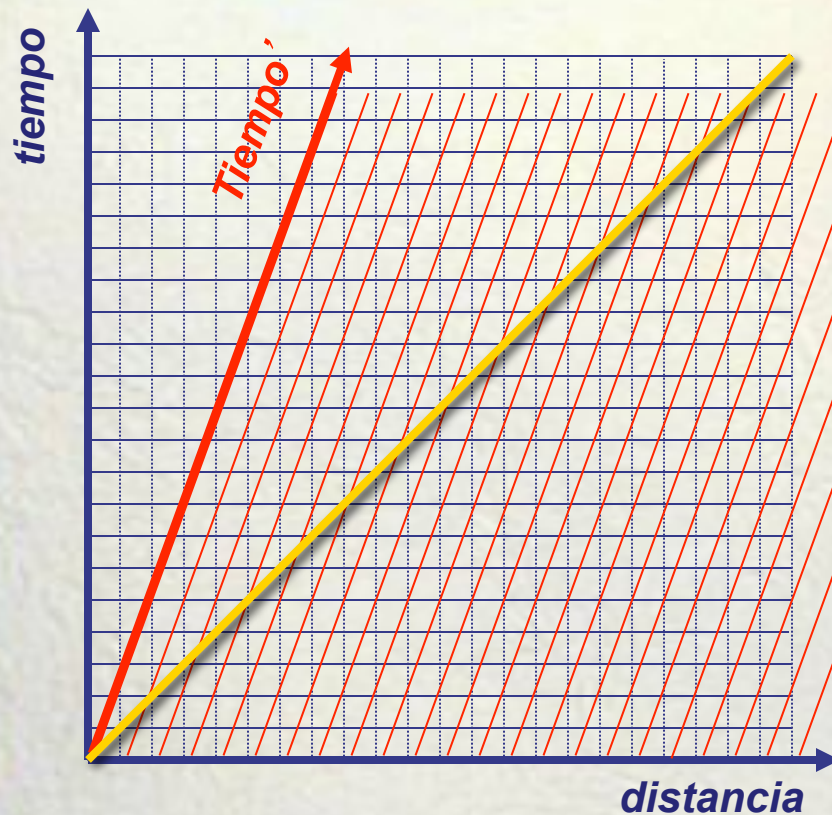
El Mundo de la Relatividad Especial



Esta situación corresponde a lo que nos dice el sentido común: la señora está "alcanzando" al rayo de luz.

Sin embargo, según vimos, tanto los experimentos como el Principio de Relatividad, nos dicen que la señora debe medir ¡la misma velocidad de la luz!

El Mundo de la Relatividad Especial

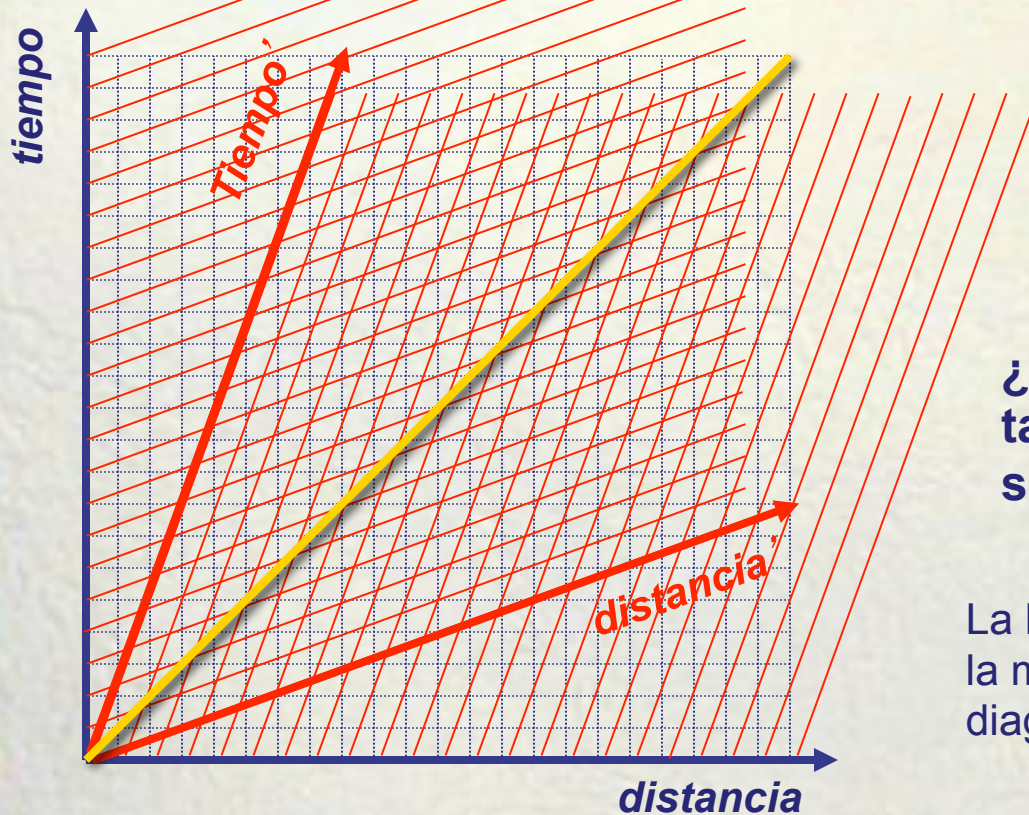


¿Cómo le hacemos para que la trayectoria de la luz aparezca a 45° (misma velocidad) con respecto a los dos diagramas?

A piece of aged, textured paper with a blue question mark in the center. The paper has a fibrous, mottled appearance and is set against a solid blue background. A thin red line is visible at the bottom right corner of the paper.

?

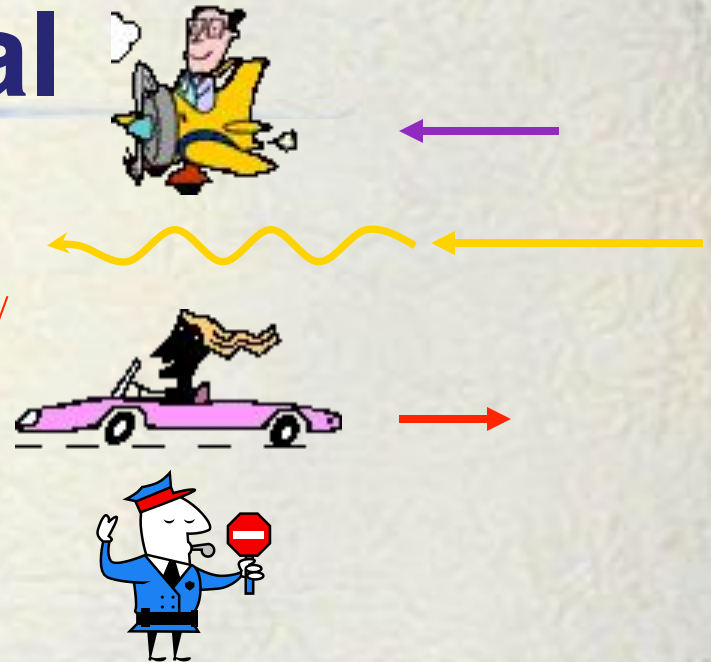
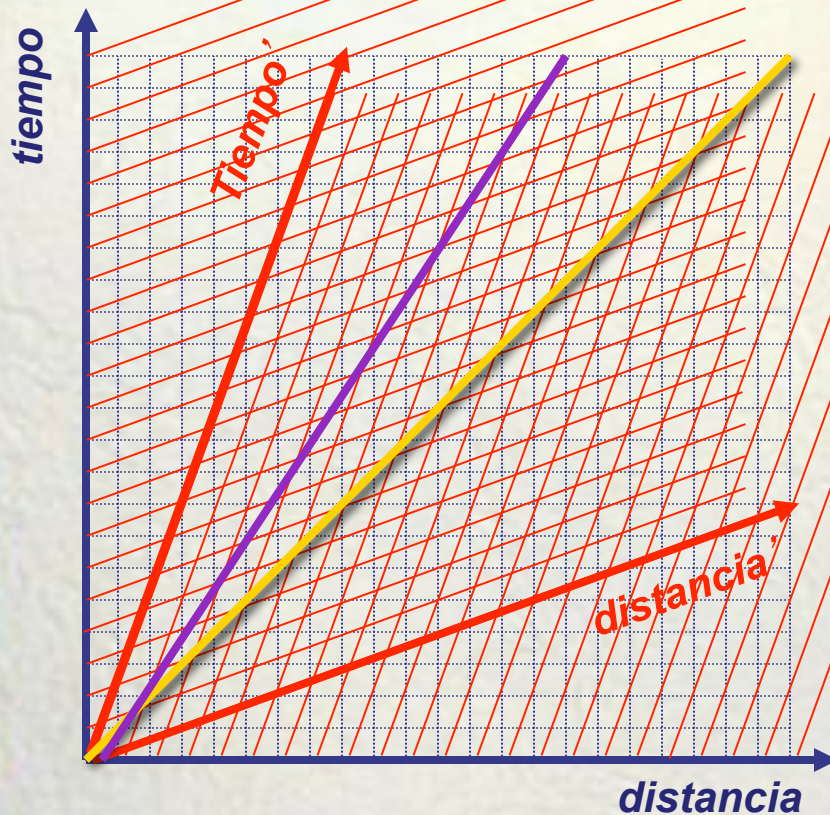
El Mundo de la Relatividad Especial



¿Qué tal si inclinamos también el eje espacial del segundo diagrama?

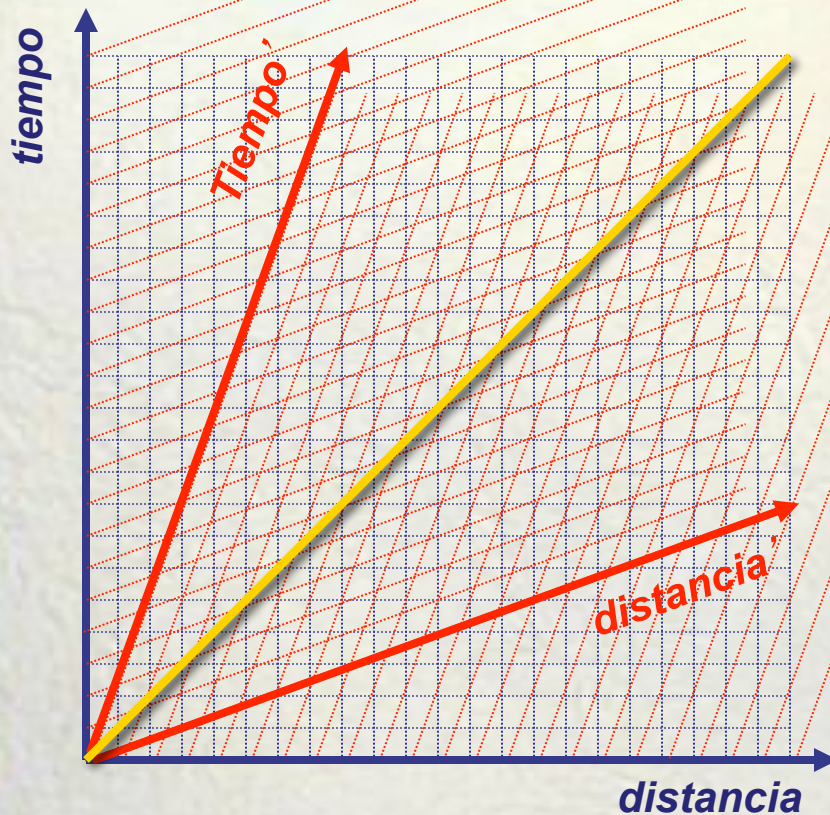
La línea amarilla aparece ahora con la misma inclinación en los dos diagramas.

El Mundo de la Relatividad Especial



Además es solo la línea de 45° (luz) la que aparece con la misma inclinación en los dos diagramas. Cualquier otra línea aparecerá con inclinaciones diferentes (velocidades distintas).

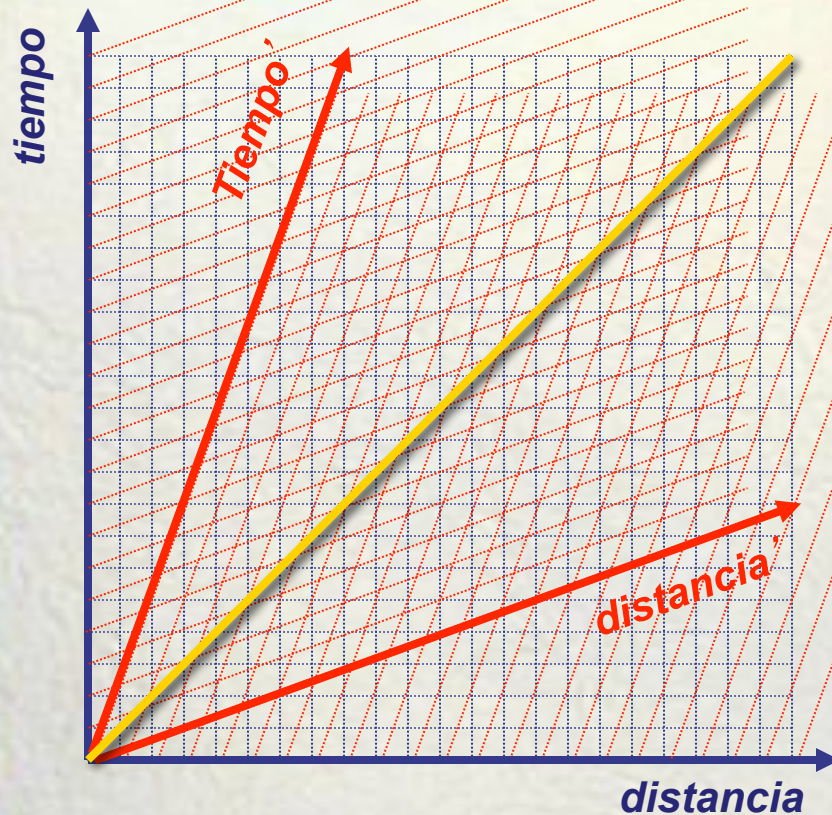
El Mundo de la Relatividad Especial



Así que aquí tenemos la respuesta: si inclinamos ambos ejes logramos que ambos observadores midan la misma velocidad para la luz, y solamente para la luz.

Pero, ¿qué significa que las líneas paralelas al eje espacial ya no coincidan en ambos diagramas?

El Mundo de la Relatividad Especial



Recordemos que éstas líneas corresponden a intervalos constantes de tiempo.

Si ahora inclinamos éstas líneas, ¡el tiempo deja de ser absoluto!

¿El tiempo no es absoluto?
(no corre de igual manera)



El Mundo de la Relatividad Especial

Recordemos que la velocidad se obtiene como el cociente de la distancia entre el tiempo:

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo}$$

En el Universo de Newton y de nuestro sentido común, el tiempo es absoluto pero las distancias son relativas.

Esto significa que observadores distintos miden los mismos intervalos temporales pero diferentes intervalos espaciales.

Si queremos que todos los observadores midan exactamente la misma velocidad de la luz, tenemos entonces que hacer que el tiempo, al igual que las distancias, sean relativas y dependan del observador.

El Mundo de la Relatividad Especial

¿Pero no es absurdo pretender que el tiempo no es absoluto?

Pues si, pero es solo absurdo porque es contrario a nuestro sentido común. ¿En qué debemos confiar?, ¿en nuestro sentido común, que recordemos no da explicaciones y solo sirve en nuestro entorno inmediato, o en lo que dicen los experimentos (que indican que la velocidad de la luz es universal)?

Además recordemos que la elección es entre:

- a) **Tiempo absoluto, pero entonces no hay una Física única, sino que hay una para cada observador, o**
- b) **Tiempo relativo y entonces existe una sola Física universal.**

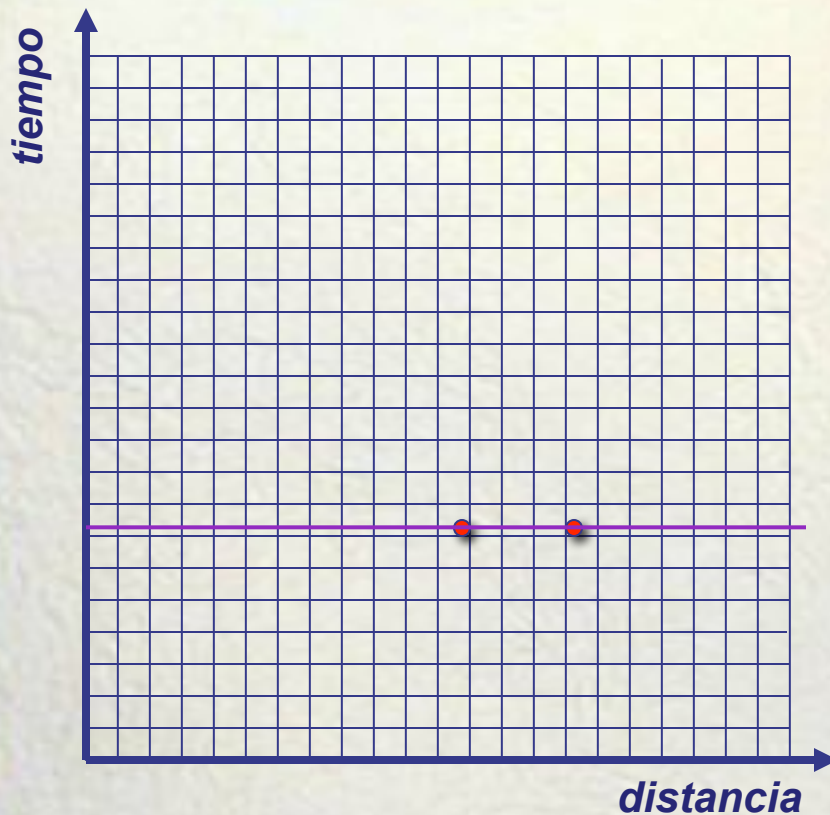
El Mundo de la Relatividad Especial

Einstein tuvo la audacia intelectual de romper con las barreras del sentido común y elegir lo que la razón y los experimentos le decían:

Tiempo relativo y entonces existe una sola Física universal.



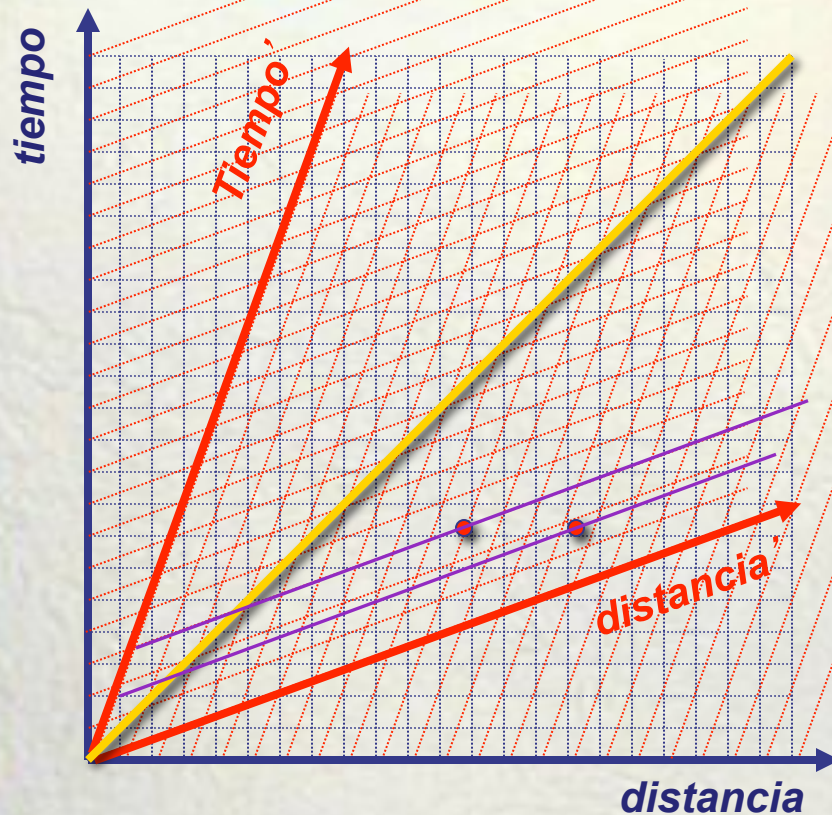
El Mundo de la Relatividad Especial



Examinemos algunas de las consecuencias del descubrimiento de Einstein.

Los eventos marcados con los puntos rojos representan dos eventos que ocurren al mismo tiempo de acuerdo al primer observador.

El Mundo de la Relatividad Especial



Sin embargo los mismos eventos ocurren a tiempos distintos de acuerdo al segundo observador.

¡El concepto de simultaneidad deja de ser absoluto!

El Mundo de la Relatividad Especial

Notemos que el concepto de no simultaneidad espacial, o no coincidencia espacial, es algo que no nos molesta y que tenemos incorporado dentro del sentido común: dos eventos que ocurren en el mismo lugar para un observador, pueden ocurrir en lugares diferentes para otro observador.



Por ejemplo, un pasajero de un tren que se sienta a comer dentro del coche comedor, al terminar de comer, se encuentra aun en el mismo lugar de acuerdo a un observador que va en el tren, pero termina de comer en un lugar distinto para un observador que se quedó parado en la estación.

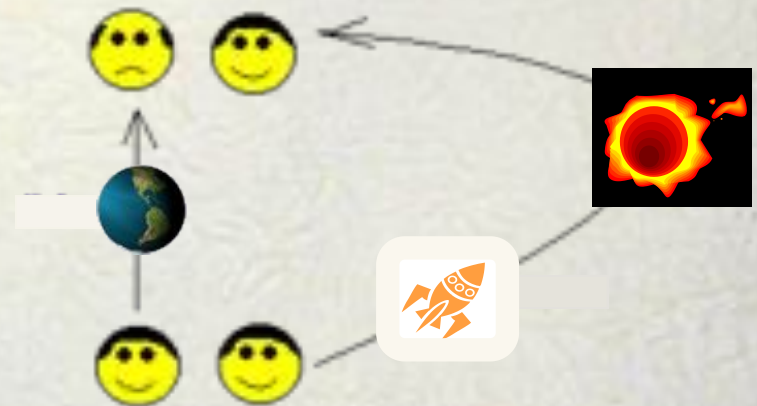
Si aceptamos la no coincidencia espacial, ¿por qué nos resistimos a aceptar la no simultaneidad temporal?

El Mundo de la Relatividad Especial

El abandono del concepto de tiempo absoluto da lugar a consecuencias aparentemente desconcertantes, como la llamada “*paradoja de los gemelos*”.

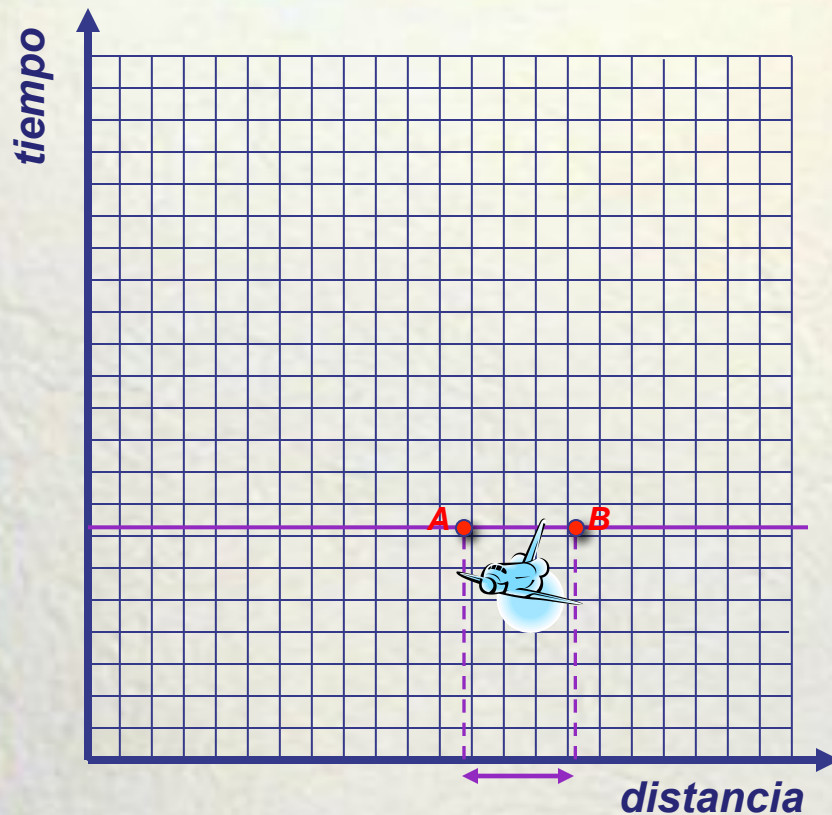
La idea es que dos hermanos gemelos se separan cuando son jóvenes. El primero se queda en la Tierra, mientras que el segundo viaja a una estrella lejana a velocidades cercanas a la de la luz.

A su regreso a la Tierra, el gemelo viajero descubre que si bien para él ha transcurrido poco tiempo, en la Tierra ha pasado mucho tiempo y su hermano gemelo, ¡es un anciano!



Esta aparente “paradoja” no lo es y, de hecho, este efecto ya ha sido comprobado experimentalmente con relojes atómicos de gran precisión puestos en órbita. De hecho, el sistema de localización GPS tiene que tomar en cuenta este efecto para hacer correcciones.

El Mundo de la Relatividad Especial



Veamos otro resultado sorprendente de las ideas de Einstein.

Supongamos ahora que los dos puntos (*A* y *B*) indican la posición de la punta y la cola de una nave espacial. La distancia entre los puntos (línea horizontal), representa la longitud de la nave que mide el primer observador, que esta fuera de la nave y la ve pasar a gran velocidad.

El Mundo de la Relatividad Especial

Esto implica que la nave espacial aparece más corta para el observador externo. Entre mayor sea la velocidad más corta aparecerá la nave. A este fenómeno se le llama *contracción de Lorentz*.

10%



87%



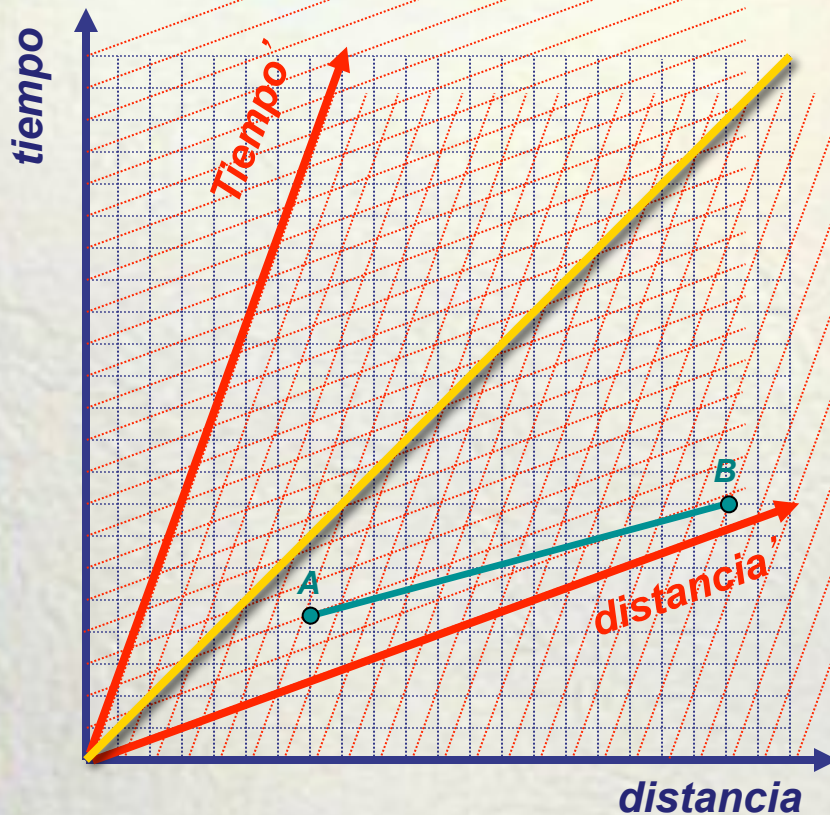
99%



99.9%



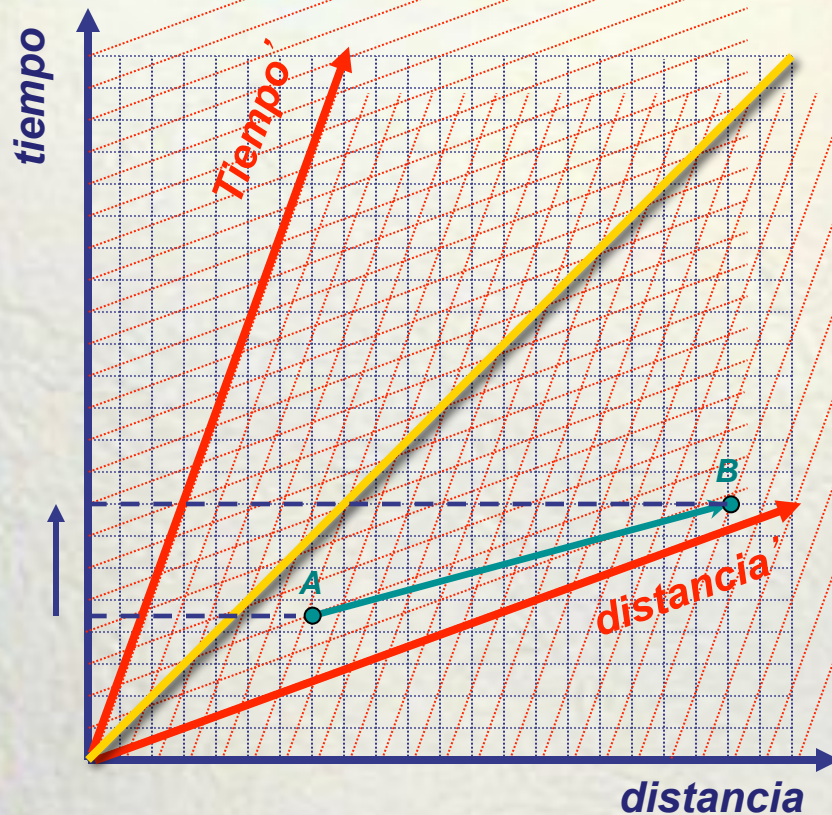
El Mundo de la Relatividad Especial



Como un último ejemplo del mundo del Principio de Relatividad, veamos que ocurriría si un objeto viajara a una velocidad mayor que la de la luz.

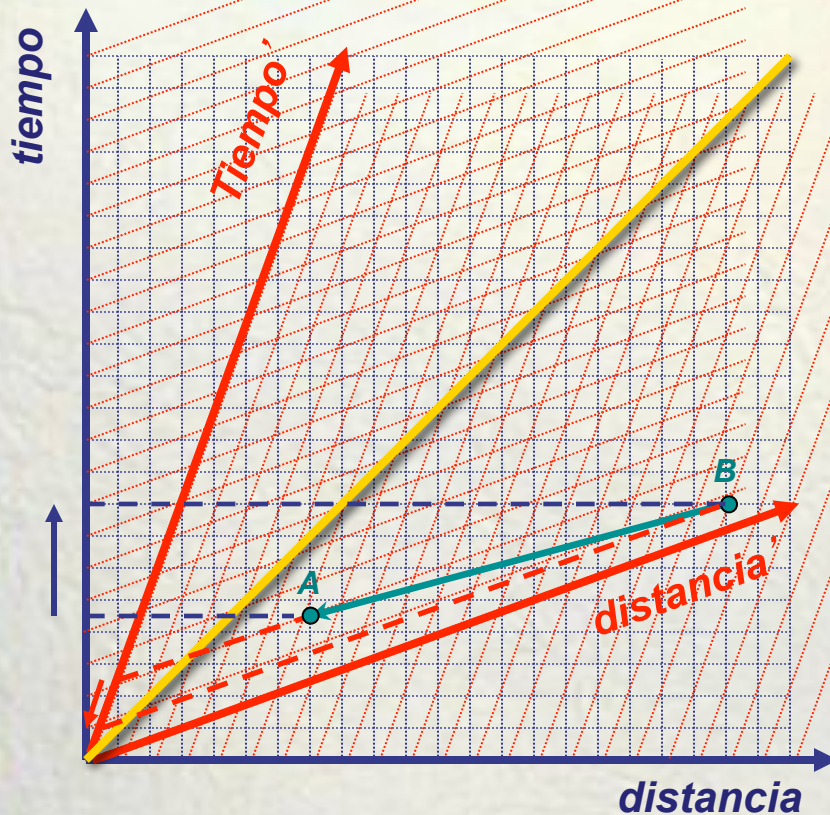
Supongamos que existe una partícula (llamémosla "taquión") que viaja más rápido de la luz. La línea verde representa al taquión. Notamos que ésta línea está más acostada que la línea amarilla a 45° que representa a la luz.

El Mundo de la Relatividad Especial



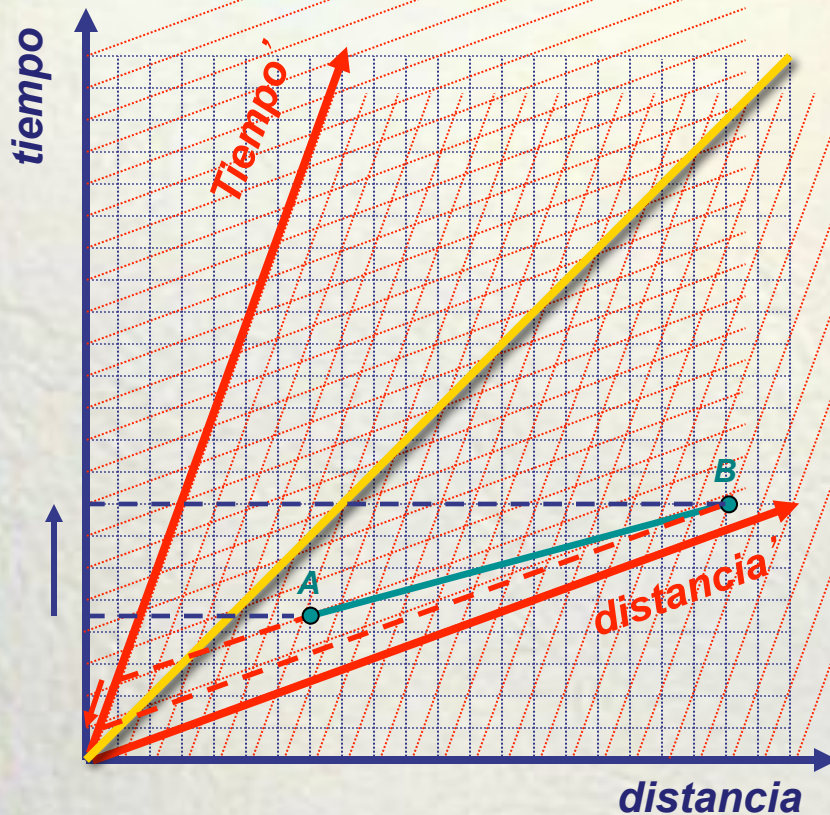
Para el primer observador (ejes azules) el punto **A** ocurre antes que el punto **B**. Este observador dirá que el taquíón ha viajado desde **A** hacia **B**.

El Mundo de la Relatividad Especial



Sin embargo, para el segundo observador (ejes rojos) el punto **A** ocurre *después* que el punto **B**. Este observador dirá que el taquión ha viajado desde **B** hacia **A**.

El Mundo de la Relatividad Especial



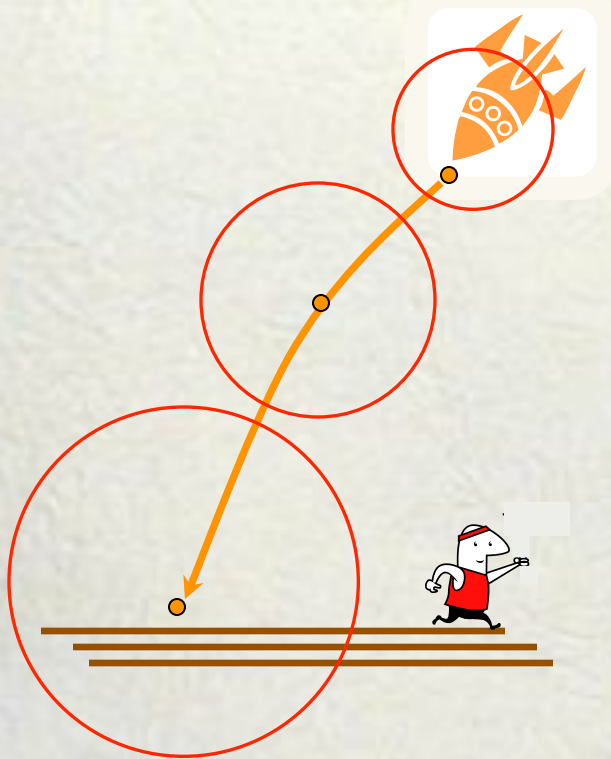
Entonces, ¿de dónde a dónde viajó el taquíon?

Viajar a velocidades mayores a la de la luz, abre la posibilidad de viajar hacia atrás en el tiempo, sin embargo, esto trae consigo la violación del **principio de causalidad**, que nos dice que las causas preceden a sus efectos.



El Mundo de la Relatividad Especial

Cuando algo viaja más rápido que la señal que emite a un observador externo, este observador puede percibir que ese algo viaja hacia atrás en el tiempo.



Durante el bombardeo de Londres con cohetes V2 al final de la II Guerra Mundial, testigos llamaban al V2 la “bomba fantasma”, pues al contrario a como ocurría con bombas convencionales, en las cuales se oía un silbido que producía la bomba al caer, antes de la explosión, con el V2, primero ocurría la explosión sin previo aviso y después se escuchaba un silbido que subía al cielo.

La razón es que el V2 alcanzaba velocidades supersónica y le ganaba a su propio sonido.

El Mundo de la Relatividad Especial

Por esta razón, en el mundo relativista de Einstein, nada que tenga un efecto causal con nosotros puede viajar a velocidad mayor a la de la luz.



Límite
de
Velocidad

**300,000
km/s**

El Mundo de la Relatividad Especial

A esta teoría se le conoce como la **Teoría Especial de la Relatividad**.



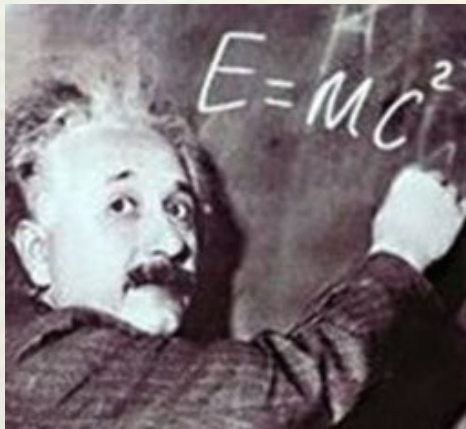
Límite
de
Velocidad

**300,000
km/s**

El Mundo de la Relatividad Especial

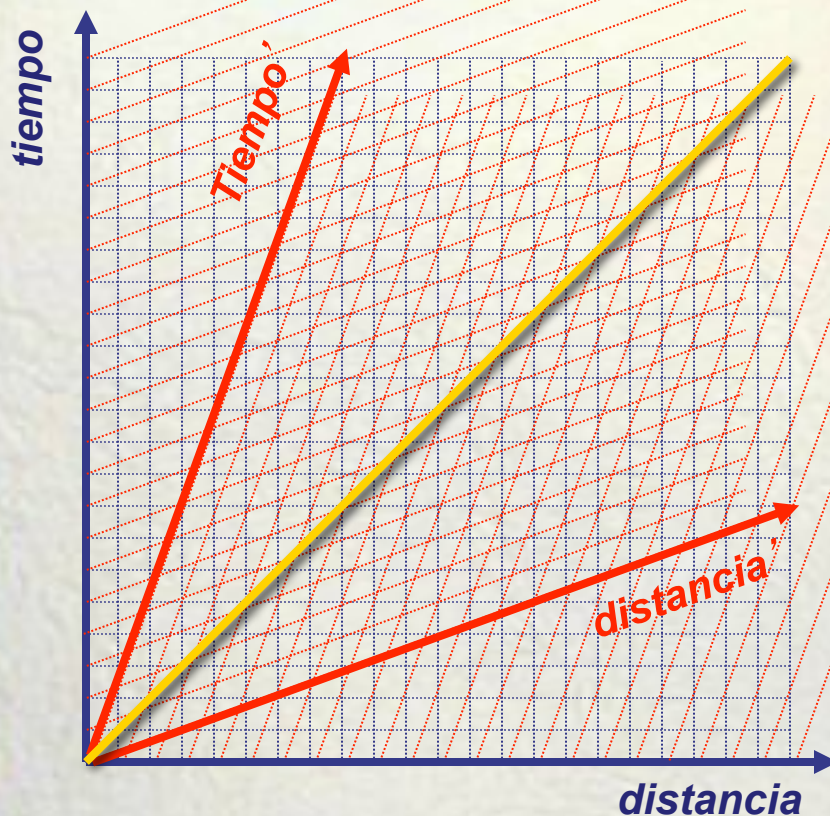
Otra consecuencia de la Teoría Especial de la Relatividad es la equivalencia entre materia y energía.

$$E = mc^2$$



Esta equivalencia, expresada en una relación muy sencilla, nos dice que si bien la materia y la energía son cosas distintas, se pueden transformar una en la otra. Este resultado es el que se usa en las bombas y reactores nucleares.

El Mundo de la Relatividad Especial



Otro resultado sorprendente es que todos los objetos se mueven por el espacio tiempo, y lo hacen a la misma velocidad.

Solo que un objeto en reposo se mueve solo a lo largo del eje temporal, mientras que un objeto en movimiento se mueve en parte sobre el eje del tiempo y en parte sobre los ejes espaciales.

Como ambos llevan la misma velocidad, el objeto en reposo se “mueve” más rápidamente por el tiempo (su tiempo pasa más rápido). El objeto en movimiento divide su velocidad entre el eje temporal y los espaciales, y por esto su tiempo fluye más lentamente.

La luz sólo se mueve por el eje espacial y no por el temporal (el tiempo no fluye).

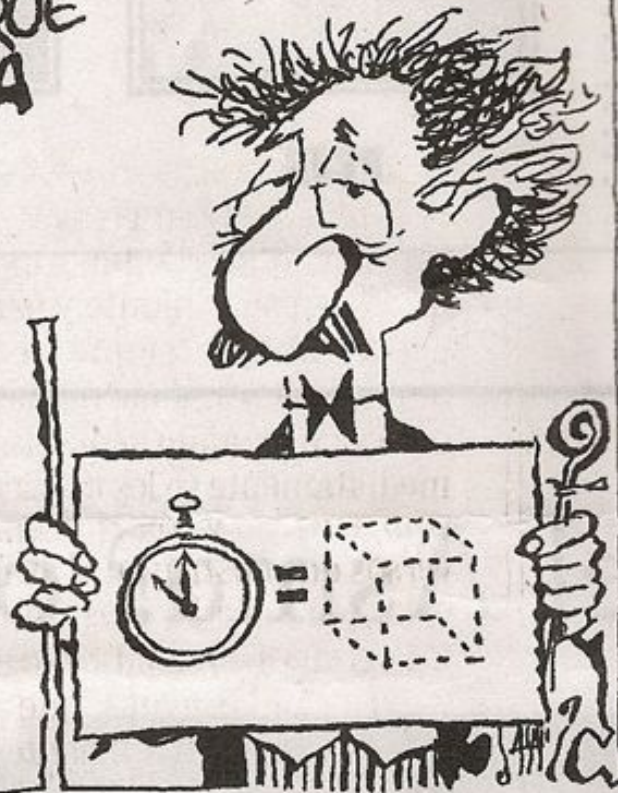
El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

SIRVE QUE LES ACLARO A LOS
LECTORES POR QUÉ SOY
MÁS VELOZ QUE
ANA GABRIELA
GUEVARA:

SEGÚN
EINSTEIN,
EL TIEMPO Y
EL ESPACIO
SON LO
MISMO.



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

TODOS ESTAMOS VIAJANDO
ININTERRUMPIDAMENTE
EN EL ESPACIO-TIEMPO.



MIENTRAS MÁS RÁPIDO
AVANZAMOS EN EL ESPACIO,
MÁS LENTO LO HACEMOS
EN EL TIEMPO, Y
VICEVERSA.



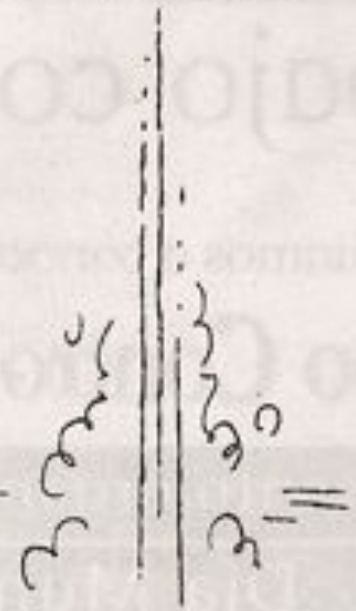
El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

LA MAYOR VELOCIDAD POSIBLE ES
LA VELOCIDAD DE LA LUZ...

... YA SEA EN
EL ESPACIO,
CORRIENDO
COMO
LOCOS...



... O EN
EL
TIEMPO,
QUEDANDONOS
EN TOTAL Y
ABSOLUTO
REPOSO.



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

CON BASE EN ELLO, VEO MÁS DIFÍCIL QUE ANA GABRIELA GUEVARA -POR RÁPIDA QUE SEA - ALCANCE CORRIENDO LA VELOCIDAD DE LA LUZ...



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

... A QUE LA ALCANCE
YO EN TOTAL Y
ABSOLUTO REPOSO
(ME SALE MUY BIEN).

LUEGO, SOY
MÁS
VELOZ
QUE ANA.



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

UN
DETALLITO:



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón



El Mundo de la Relatividad Especial de acuerdo a Calderón

... CON LO QUE, PARA EFECTOS PRÁCTICOS, TANTO ANA COMO TÚ Y YO SOMOS IGUAL DE VELOCES:

CORREMOS POR EL ESPACIO-TIEMPO

... A LA VELOCIDAD DE LA LUZ.

... ANA SE CANSA MÁS, ESO SÍ.



www.pacoalderon.com nigoleto@avantel.net

Tlacotalmaya
TLACOTALMAYA

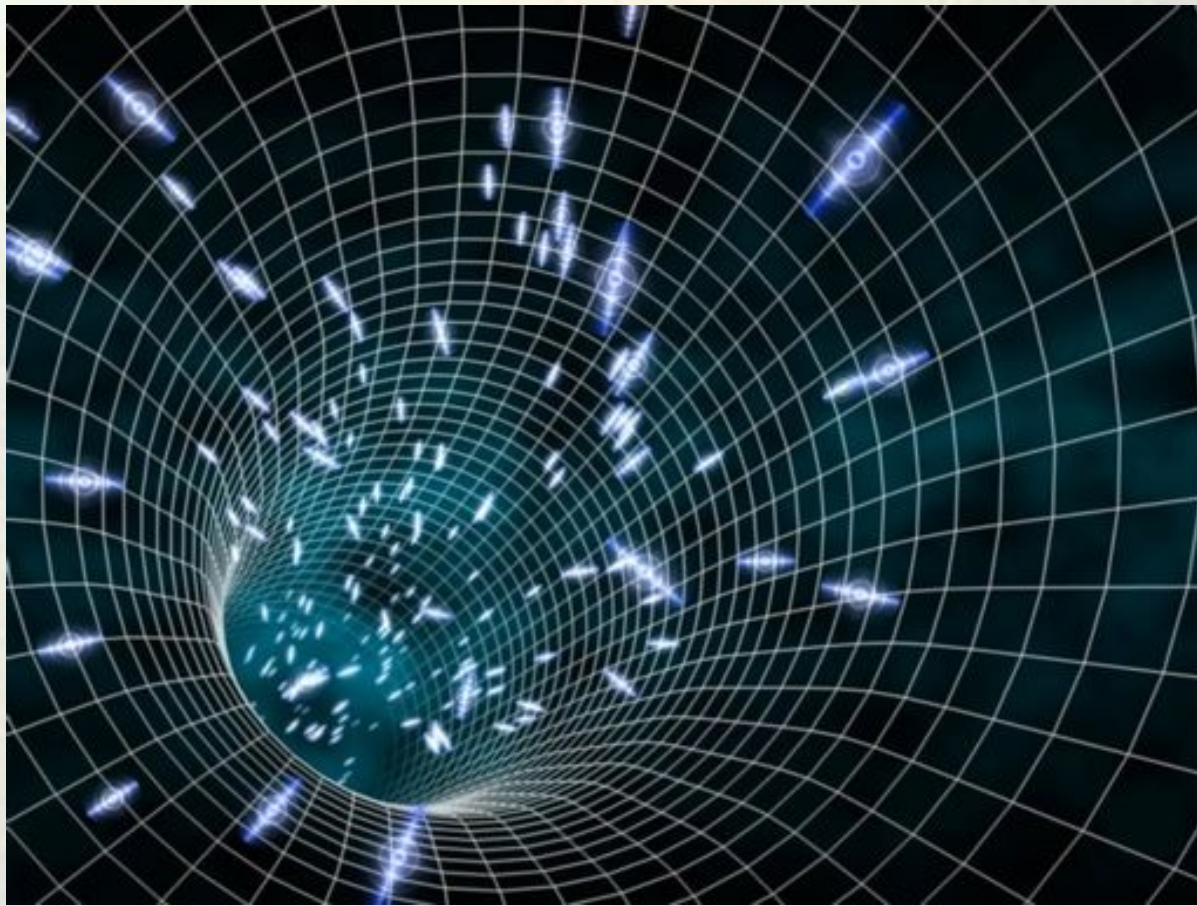
Fin de la tercera parte

Discusión de la tercera parte

- 1) ¿Por qué es tan difícil pensar en un tiempo relativo, si aceptamos el espacio relativo?
 - a) El sentido común como un impedimento para el entendimiento
 - b) Las Matemáticas y los resultados experimentales como únicas guías válidas.
 - c) Otros científicos ya habían formulado algo parecido a la Relatividad Especial, pero sus propios prejuicios les impidieron aceptar lo que sus propias ecuaciones les decían.

- 2) La acción a distancia no instantánea como la clave de efectos relativistas
 - a) Dicotomía entre leyes universales de la Física y el sentido común.
 - b) No es posible quedarnos con la Física Clásica, las ecuaciones de Maxwell ya son incompatibles con la Mecánica Clásica.
 - c) La Relatividad Espacial es usada cotidianamente en sistemas como los geoposicionadores GPS.

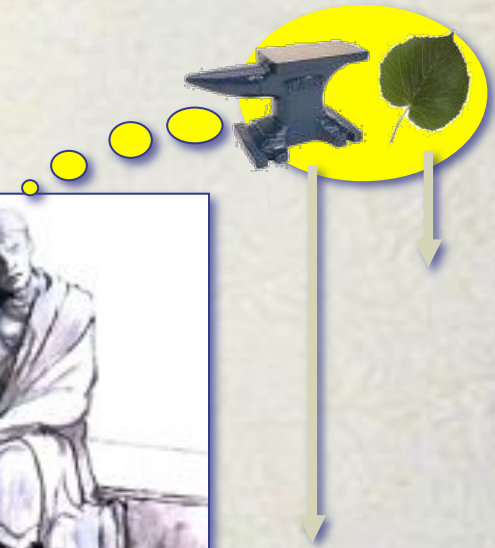
El Mundo de la Relatividad General



El Mundo de la Relatividad General

¿Caen todos los objetos de la misma manera?

En la antigüedad (y aún hoy en día), mucha gente pensaba que los objetos pesados caen más rápido que los ligeros



El Mundo de la Relatividad General

¿Caen todos los objetos de la misma manera?

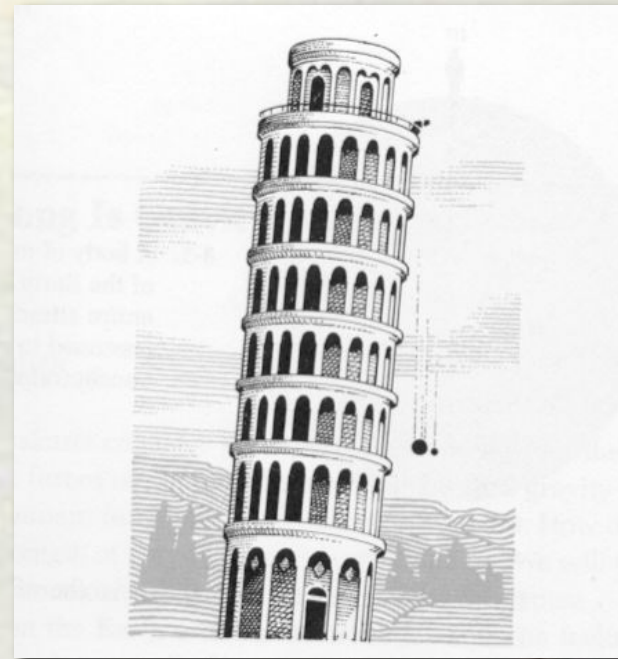
Galileo Galilei, un científico italiano del siglo XVII pensaba que esto no era así ...



El Mundo de la Relatividad General

¿Caen todos los objetos de la misma manera?

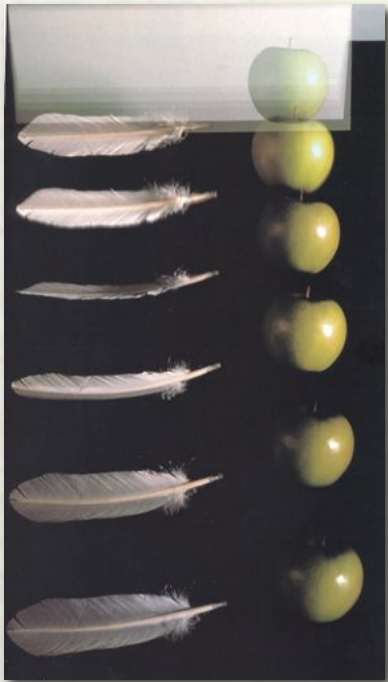
... de acuerdo a la historia popular, el dejó caer objetos pesados y ligeros desde el último piso de la torre inclinada de Pisa y demostró **¡que todos los objetos caen de igual manera!**



El Mundo de la Relatividad General

¿Caen todos los objetos de la misma manera?

Hoy en día sabemos que Galileo tenía razón: Todos los objetos caen con la misma aceleración (¡incluso la plumas!).

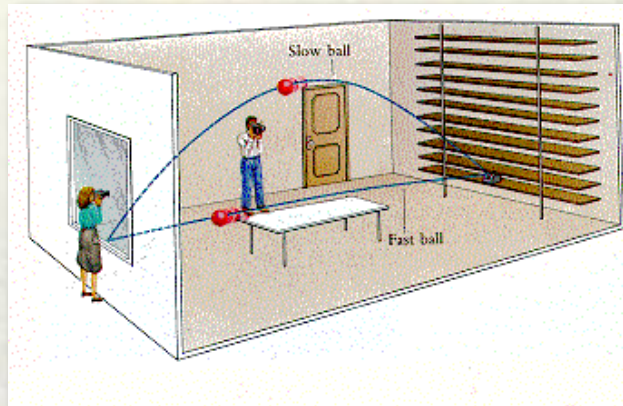


Como veremos, este resultado aparentemente trivial, tiene consecuencias profundas.

El Mundo de la Relatividad General

¿Qué pasa cuando un objeto no cae verticalmente?

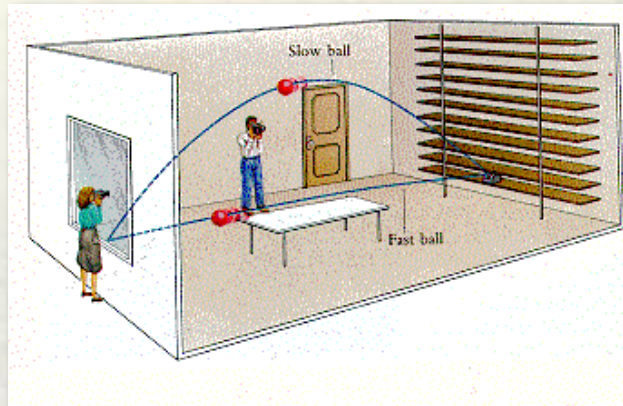
Si ahora lanzamos una pelota, notamos que sigue una trayectoria curva, o más recta, dependiendo de si lanzamos la pelota con poca, o mucha velocidad



El Mundo de la Relatividad General

¿Qué pasa cuando un objeto no cae verticalmente?

Si ahora lanzamos una pelota, notamos que sigue una trayectoria curva, o más recta, dependiendo de si lanzamos la pelota con poca, o mucha velocidad

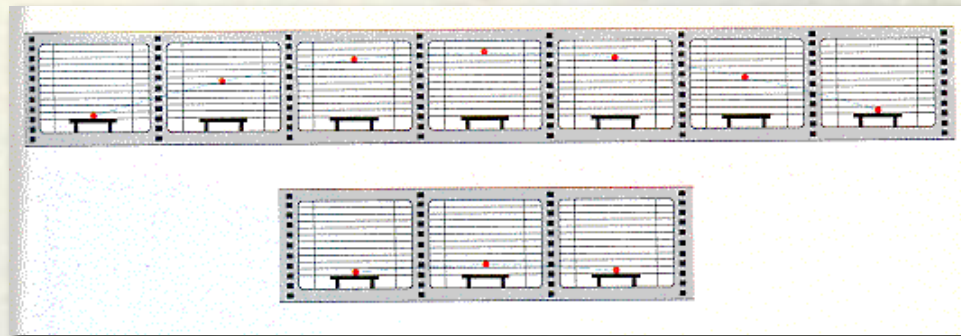
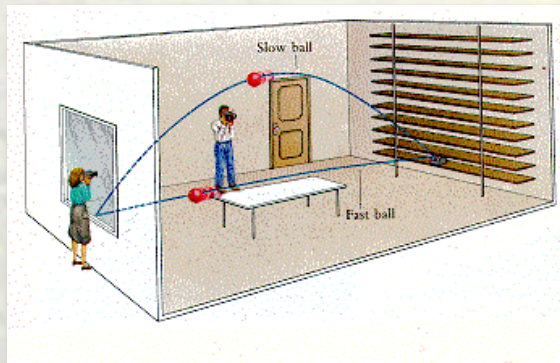


Pero, ¿són realmente diferentes estas trayectorias?

El Mundo de la Relatividad General

¿Qué pasa cuando un objeto no cae verticalmente?

Examinemos esto en cámara lenta

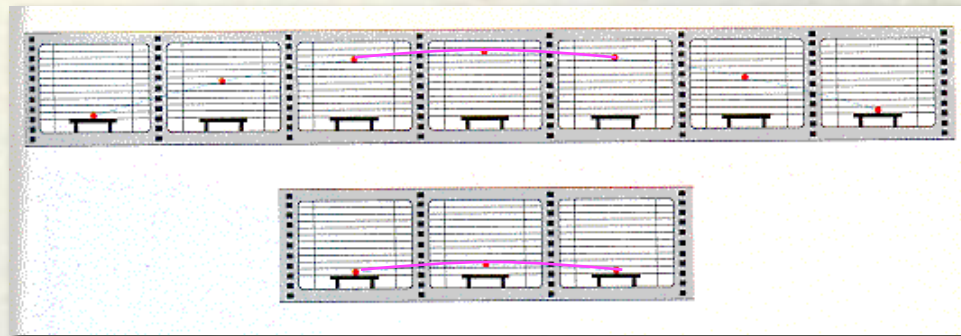
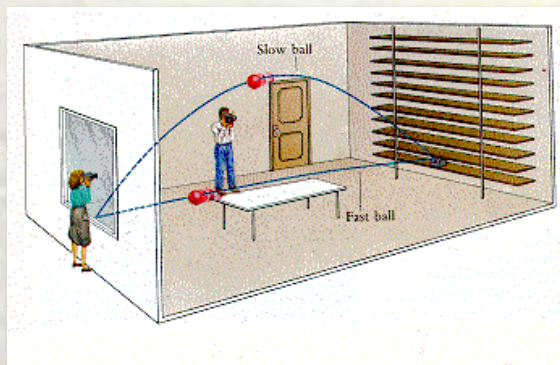


Imaginemos que tomamos película de ámbos lanzamientos y ponemos los cuadros de las dos películas, al lado unos de otros, de manera que los puntos más altos coinciden

El Mundo de la Relatividad General

¿Qué pasa cuando un objeto no cae verticalmente?

Examinemos esto en cámara lenta

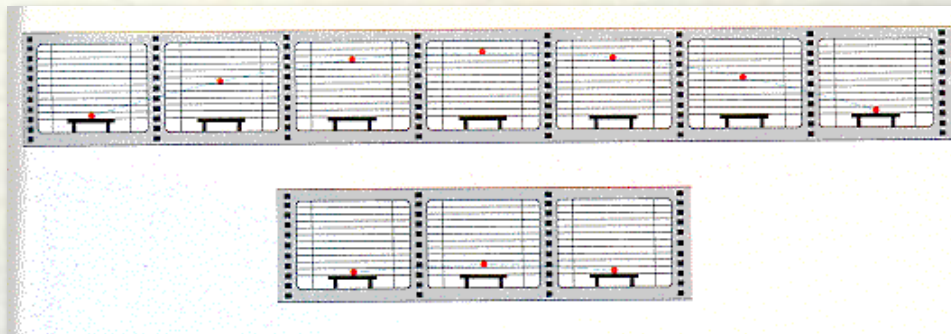


Imaginemos que tomamos película de ámbos lanzamientos y ponemos los cuadros de las dos películas, al lado unos de otros, de manera que los puntos más altos coinciden

Descubriremos que, ¡ámbas trayectorias coinciden!

El Mundo de la Relatividad General

¿Qué pasa cuando un objeto no cae verticalmente?



Descubriremos que, ¡ámbas trayectorias coinciden!

De manera que todos los objetos que se mueven bajo la influencia de la gravedad, lo hacen siguiendo trayectorias idénticas, si las observamos no sólo en el espacio, sino en el espacio y el tiempo.

El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?

Esto es un hecho realmente asombroso que debe decirnos algo muy profundo sobre la gravedad, ya que ninguna otra fuerza actúa así

El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?

Esto es un hecho realmente asombroso que debe decirnos algo muy profundo sobre la gravedad, ya que ninguna otra fuerza actúa así



En los primeros años del siglo XX, había un empleado en la oficina suiza de patentes que pensaba que este hecho debía tener una explicación

Su nombre era Albert Einstein

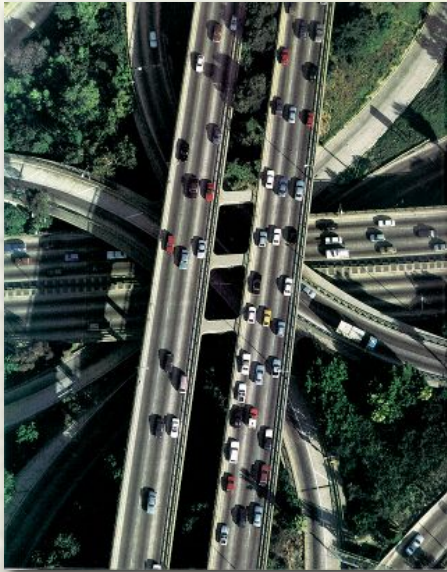
El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?

Veamos si podemos encontrar el significado de esto por medio de una analogía

El Mundo de la Relatividad General

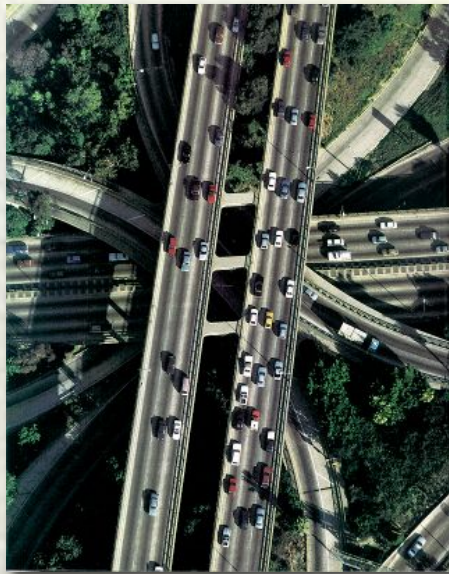
¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?



Cuando un camino está despejado, podemos ver que los vehículos transitan a velocidades diferentes: los autos, por ejemplo, se mueven a mayor velocidad que los camiones.

El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?



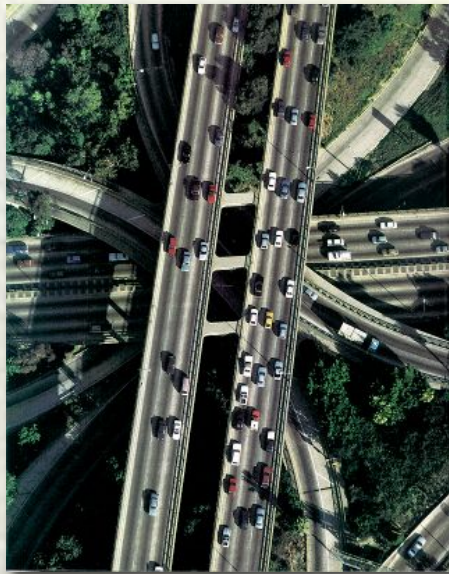
Cuando un camino está despejado, podemos ver que los vehículos transitan a velocidades diferentes: los autos, por ejemplo, se mueven a mayor velocidad que los camiones.

Pero a veces, todos los vehículos se mueven a la misma velocidad, sin importar de que tipo son.



El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?



Cuando un camino está despejado, podemos ver que los vehículos transitan a velocidades diferentes: los autos, por ejemplo, se mueven a mayor velocidad que los camiones.

Pero a veces, todos los vehículos se mueven a la misma velocidad, sin importar de que tipo son.



Cuando esto ocurre, la causa no está en los vehículos, sino en el camino: están arreglando el camino, hay un accidente, un obstáculo, o un bache en el camino.

El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?



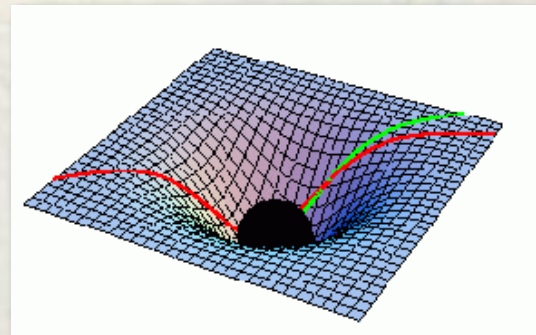
Albert Einstein fue el primero en darse cuenta que la gravedad es un "bache" en el camino

El Mundo de la Relatividad General

¿Por qué todo se mueve de igual manera bajo la acción de la gravedad?



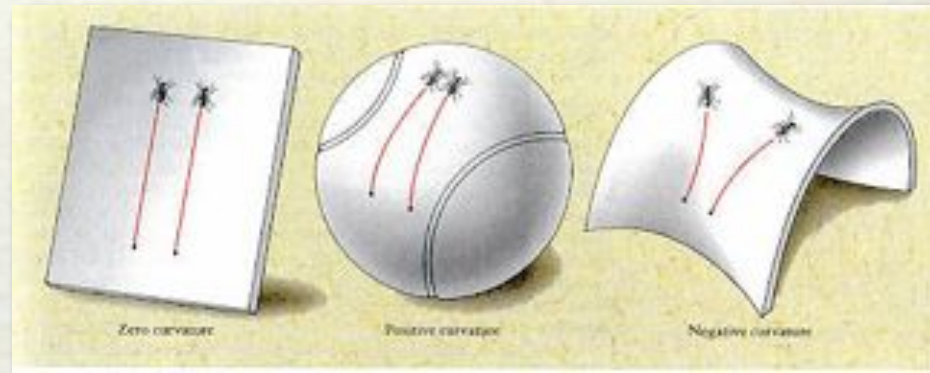
Albert Einstein fue el primero en darse cuenta que la gravedad es un "bache" en el camino



Solo que en este caso, el "bache" está en el espacio-tiempo.

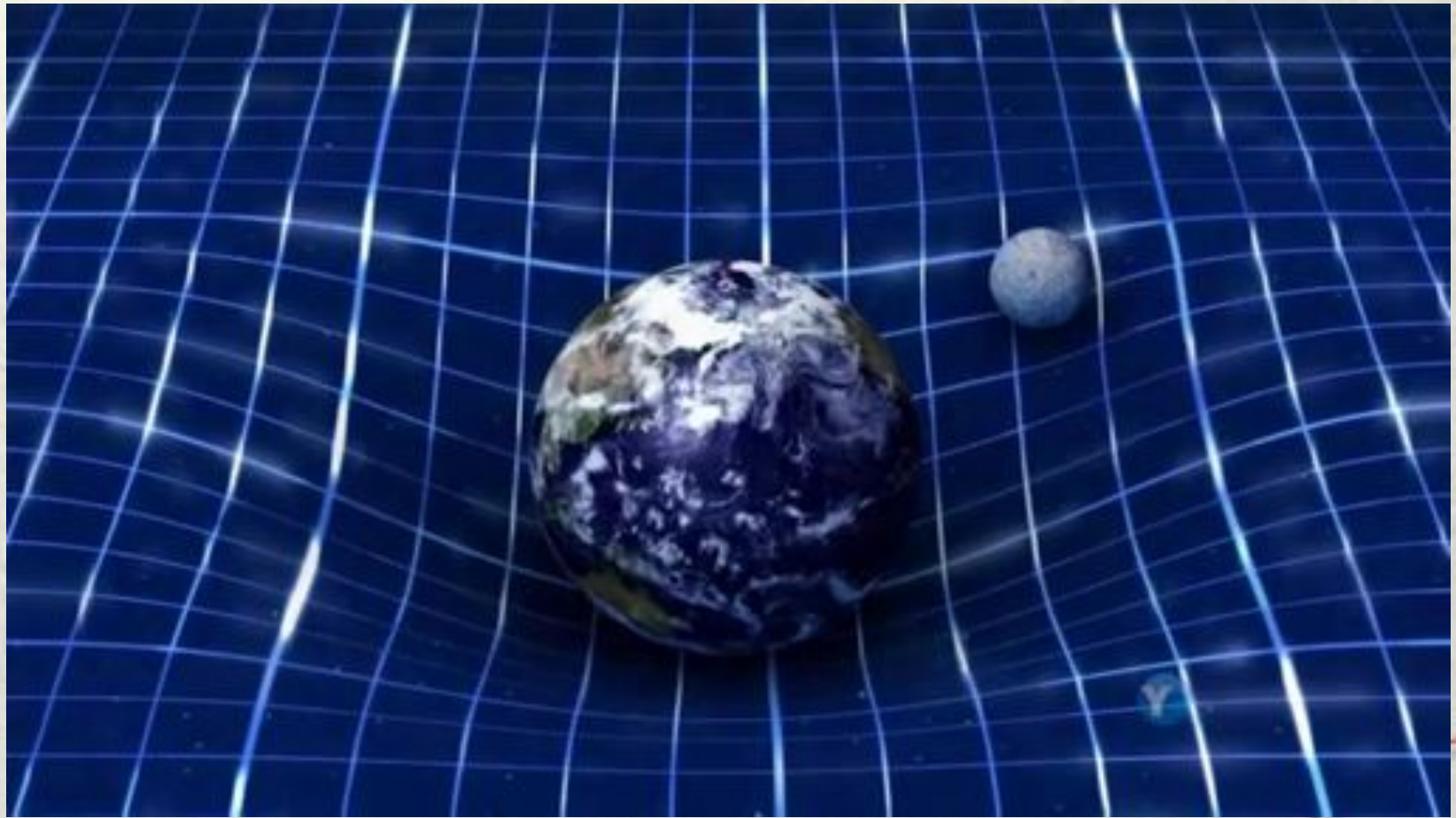
Entonces, ¿qué es la gravedad?

Cuando nos movemos sobre una superficie curva, nuestras trayectorias pueden converger o diverger, dependiendo de la forma de la superficie



Si no nos damos cuenta de que nos movemos sobre una superficie curva, pensaremos que hay una fuerza atractiva o repulsiva, dependiendo de la superficie sobre la que andamos.

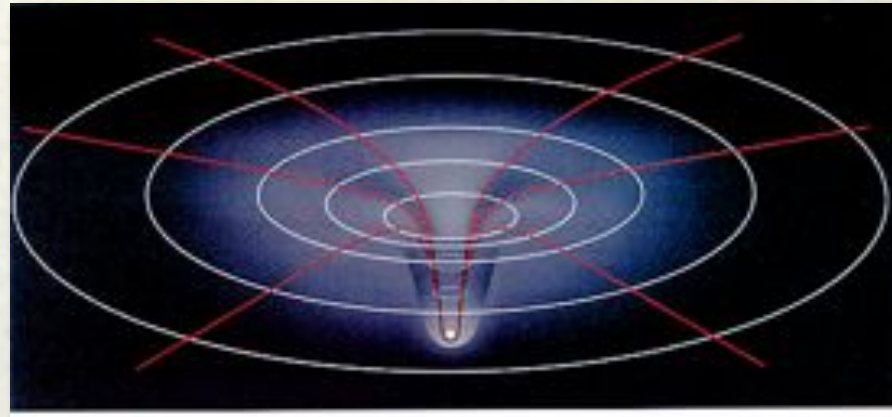
Entonces, ¿qué es la gravedad?



Entonces, ¿qué es la gravedad?

¡Y esto es la gravedad!

No una fuerza, sino una curvatura en el espacio y el tiempo

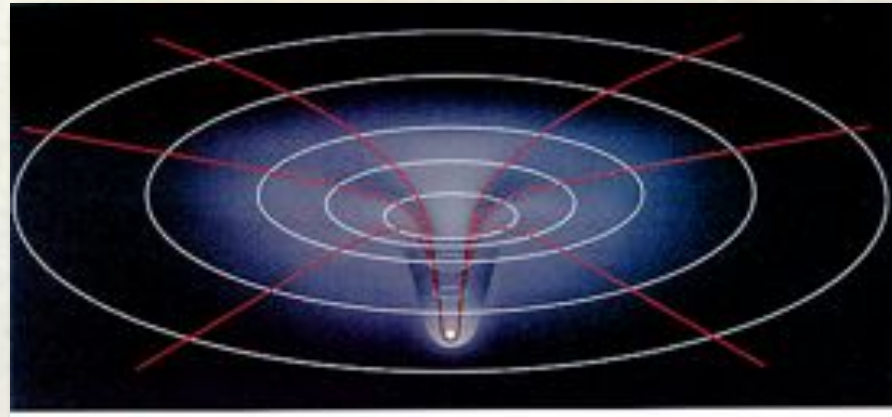


Einstein se dió cuenta de que los objetos en el Universo curvan el espacio y el tiempo alrededor de ellos, y esta curvatura es lo que percibimos como una fuerza atractiva.

Entonces, ¿qué es la gravedad?

¡Y esto es la gravedad!

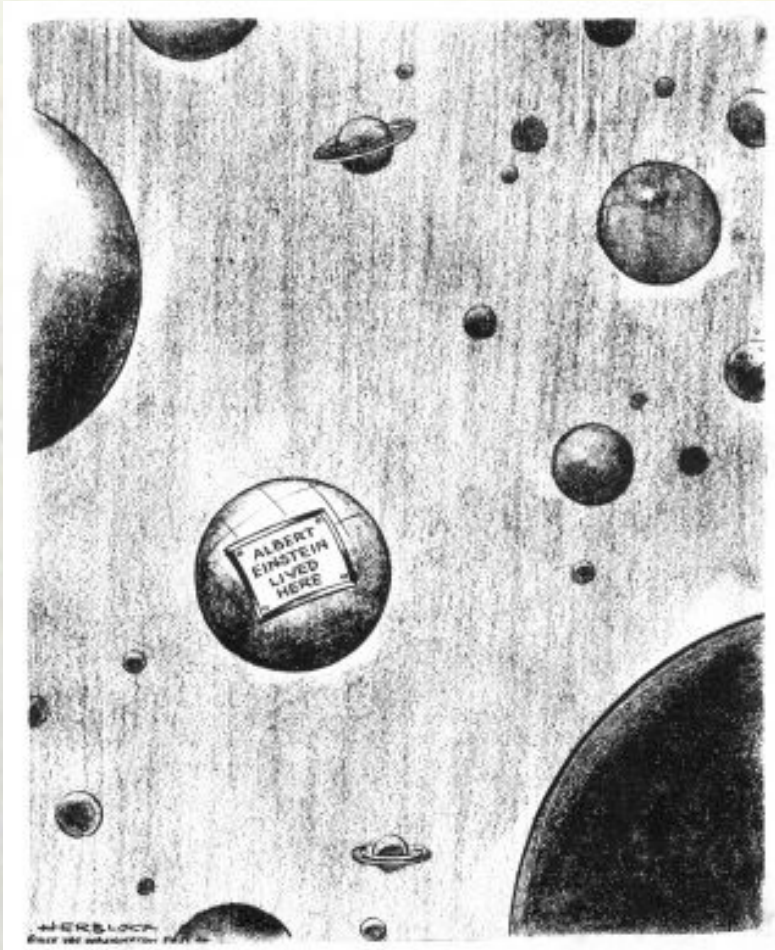
No una fuerza, sino una curvatura en el espacio y el tiempo



Como veremos en las próximas lecciones, la gravedad es la que literalmente le da forma al Universo.

La Teoría General de la Relatividad nos permite por vez primera construir modelos del Universo.

Las contribuciones de Einstein



Son muy contados los casos en la historia de la ciencia, cuando un solo individuo, trabajando en gran medida por sí solo, puede generar todo un cuerpo de ideas que revoluciona por completo nuestra visión de la realidad a nuestro alrededor.

Fin de la cuarta parte

Discusión de la cuarta parte

- 1) ¿Qué tan radical fue la idea de interpretar una fuerza como una curvatura del espacio-tiempo?
 - a) La Geometría Diferencial ya estaba desarrollada, pero su uso no había sido incorporado a la Física.
 - b) Einstein tenía dificultades con las Matemáticas requeridas, pero sabía que es lo que necesitaba hacer.
 - c) La interpretación de una fuerza como una curvatura sigue siendo inédita, excepto por la Relatividad General.
 - d) Este concepto nos obliga a considerar algo que no es fácil visualizar y que abre la puerta a dimensiones adicionales.

- 2) Einstein como un revolucionario aislado de la comunidad científica
 - a) La comunidad científica promueve el intercambio libre de ideas, pero a veces puede rechazar violentamente a los que piensan muy diferente.
 - b) Sin embargo, la ciencia sigue teniendo como estándar de aceptación la comprobación experimental.