

Chasqueando los dedos y jugando con linternas y espejitos: una revisión de nuestras concepciones del Espacio–Tiempo.¹

1. Introducción

En esta charla trataré de darles un pantallazo rápido del área de la física llamada Relatividad General, cuales son las ideas básicas que se manejan en ella, como se llegó a estas y finalmente que es lo que estas aportan a la descripción de nuestro universo.

Nuestro esqueleto conceptual cotidiano, es decir nuestro punto de vista en que basamos los pensamientos de la vida diaria es el de Aristóteles y Euclides! Este esta profundamente arraigado en nuestra mente y por lo tanto para comprender mejor las ideas básicas de la relatividad general, para poder confrontarlas con nuestro sentido común, es necesario rever estos antiguos puntos de vista. Tomar el camino histórico de como fueron apareciendo estas ideas nos llevaría demasiado tiempo, son más de 2000 años de historia! Por lo tanto en esta charla tomaremos otra ruta, primero introduciremos algunos conceptos modernos para luego re-expresar los puntos de vista clásicos con estas nuevas herramientas.

El concepto básico a partir del cual edificaremos este andamiaje será el de un **evento**. Un evento es un suceso que no tiene ni extensión espacial ni temporal. Es una idealización, por ejemplo, del chasquido de nuestros dedos, en el sentido que pensamos en hacerlo cada vez más rápido -de menor duración- y cada vez con dedos de menor tamaño a tal límite que lo pensamos como "*un instante de tiempo*" en "*un punto en el espacio*". Pero es importante para lo que sigue que no hagamos esta última distinción entre espacio y tiempo.

El segundo concepto que introduciremos será el de **espacio-tiempo**, el conjunto de todos los eventos posibles. Este parece ser un concepto simple, en el sentido de que es simplemente un conjunto de cosas iguales, de puntos. Pero a su vez es algo increíblemente complicado: en el están todos los eventos de nuestra historia, el asesinato de Arquímedes en las playas de Siracusa, el último golpe de cincel sobre el David de Miguel Ángel, etc, etc, eventos en nuestro pasado remoto como el encendido del sol y en nuestro futuro lejano como el de la extinción de nuestro sol y por sobre todo infinitos eventos donde absolutamente nada ocurrió. Ponemos todo esto en una sola bolsa, el espacio-tiempo. El resto de esta charla será sobre este conjunto, específicamente sobre su estructura básica, pues ése es el objeto de estudio de la relatividad general.

¿Que sabemos sobre este conjunto?

Primero notemos que tenemos una noción de cercanía, o de inmediatez, es decir los eventos "nacimiento de Alejandro Magno", "muerte de Alejandro Magno" son cercanos, tanto temporalmente como espacialmente si los comparamos con los eventos "nacimiento del sol", "muerte de α Centauri"². Esto estará traducido en los diagramas o representaciones del espacio-tiempo

¹Charla dada en la ciudad de Paraná en 1992.

²La estrella más cercana al sol.

[Ver figura 1], en el hecho de que eventos cercanos entre si serán dibujados como próximos entre sí.

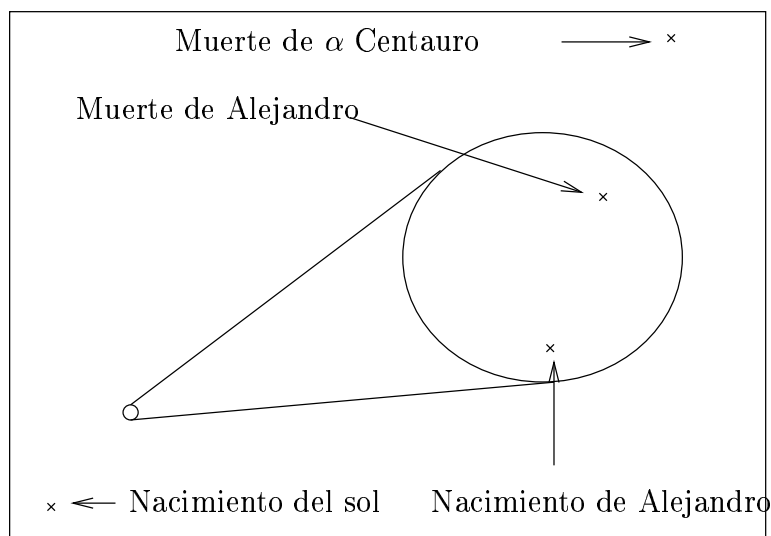


Figura 1: Algunos eventos

Segundo notemos que los eventos forman un continuo, arbitrariamente cerca de un evento tenemos otro: por ejemplo podemos chasquear los dedos dos veces consecutivas con un intervalo de tiempo entre chasquidos arbitrariamente corto. Esto estará traducido en que nuestro diagramas deberán ser sobre un continuo, como esta hoja de papel. Tercero notemos que entre ciertos eventos hay una noción inequívoca de precedencia temporal: en el ejemplo anterior es claro de que un chasquido precedió a otro. Esta noción es fundamental en nuestro esquema de pensamiento para la descripción del mundo, ya que es necesaria para discernir entre causas y efectos. Esto estará representado en nuestros diagramas al colocar puntos en el futuro de un evento más arriba que este. Pero esto será solamente indicativo, ya que como veremos no siempre entre eventos hay una relación causal. Finalmente veamos cuantos números debemos dar si queremos caracterizar un evento con relación a otros. Supongamos que queremos encontrarnos con un amigo y concertamos una cita. Para ello daremos una hora, el nombre de una calle, el número del edificio, y el piso, cuatro números³ Esto es lo que aseveramos cuando decimos que la **dimensión** del espacio-tiempo es cuatro. Ni más ni menos, y por lo tanto no hay nada más profundo que este hecho en esta afirmación. Ustedes saben ahora tanto como cualquier relativista sobre la cuarta dimensión!

En la figura 2 utilizamos los latidos del corazón de un hombre para denotar eventos en su vida, los eventos dibujados más arriba indican latidos posteriores a los de los eventos inferiores. De esta forma podemos, por ejemplo representar el fenómeno cita (versión simplificada o

³Por supuesto que podemos dar más números y en algunos casos menos, pero eso es solo por conveniencia o convención sobre casos particulares. Lo que es claro es que en todos los casos basta con cuatro números y que hay casos en menos de cuatro no son suficientes.

idealizada) con el siguiente gráfico. [Ver figura 3].

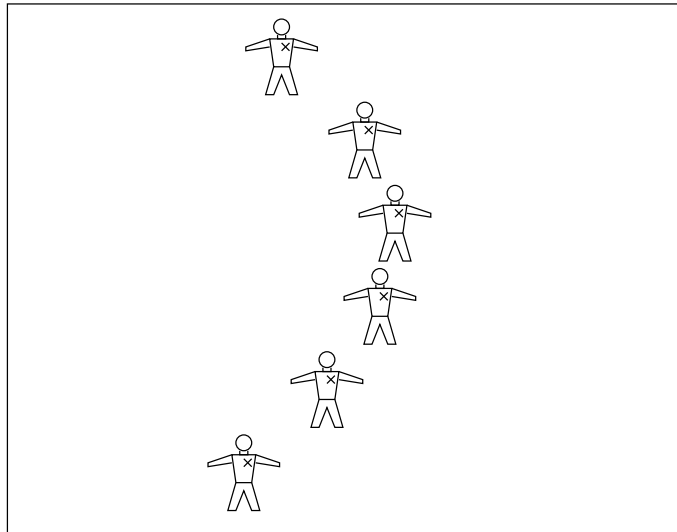


Figura 2: Historia de un hombre

Podemos imaginarnos corazones con ritmos cardíacos cada vez más rápidos hasta formar un continuo, es decir líneas. Vemos así que la posición de un cuerpo (en este caso un cuerpo humano) en el espacio-tiempo está dada por una línea, figura 4, el de una “cita.^o sea a la colisión de dos cuerpos por dos líneas que se cortan en un punto, el evento “cita” (figura 5).

¿Cómo representaremos a un cuerpo externo, por ejemplo una regla? Podemos chasquear los dedos en cada centímetro de la regla y representar estas en un diagrama espacio-tiempo, tomando el límite de chasquidos más y más seguidos y a menos distancia entre ellos podemos ver que en suma tenemos que la regla describe una superficie 2-dimensional [Ver figura 6].

Ya hemos dado un gran paso, hemos adquirido el concepto de evento y de espacio-tiempo, como un conjunto de eventos y en el podemos describir cuerpos puntuales, citas de cuerpos puntuales y algunos cuerpos extensos.

Ahora veremos distintos marcos conceptuales que el pensamiento ha creado a partir de los conceptos arriba descritos. ¿Qué es un marco conceptual, o punto de vista? Esta es una pregunta difícil, esencialmente es un pre-lenguaje que nos permite formular las teorías físicas. Ya veremos algunos ejemplos como para que esto quede más claro.

2. Concepción Aristotélica / Euclídea del Espacio–Tiempo

Esta es la concepción del espacio-tiempo que usamos casi siempre en nuestra vida cotidiana y nos parece natural pues vivimos en la superficie de la tierra. En ella tenemos familias de observadores (trayectorias de cuerpo virtuales en el espacio-tiempo) que declaramos especiales

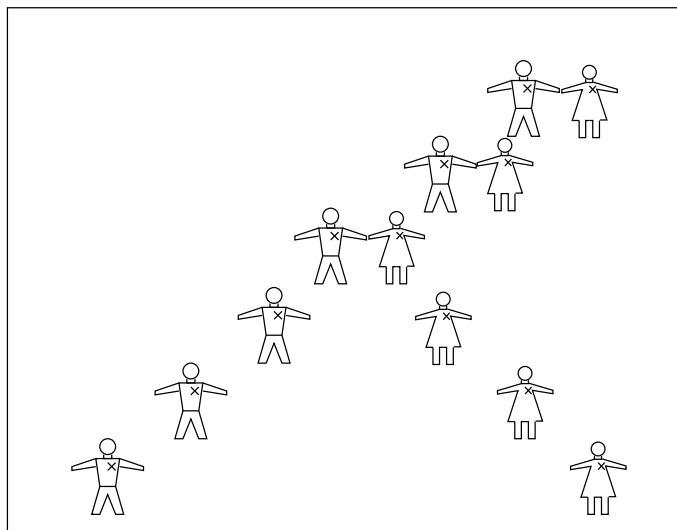


Figura 3: Fenómeno cita

al decir que estas están “*en reposo*” (En nuestro caso con respecto a la superficie de la tierra). Cada uno de ellos con un reloj, todos ellos sincronizados entre sí. ¿Para qué sirve esta familia privilegiada? Supongamos que queremos describir un fenómeno cita en esta pieza. Para ello reclutamos un grupo de voluntarios y a medida que entran en la pieza les damos un reloj (todos ellos con la misma hora) y les decimos que se paren uniformemente en la pieza, cada uno en el centro de una baldosa y que cuenten el número de baldosas desde la pared Sur y desde la pared Oeste hasta la baldosa donde están parados. Ahora dejamos entrar a las dos personas que van a protagonizar la cita o encuentro. Al dirigirse al lugar del encuentro irán tocando nuestros voluntarios y en ese momento estos nos gritarán el tiempo que marca su reloj, el número de baldosas desde el Sur y el número de baldosas desde el Oeste. [Ver figura 7] Nosotros anotamos en nuestros cuadernos todos estos números. Hemos así coordinado nuestro experimento. Ahora podemos responder a varias preguntas:

- a) ¿Cuándo fue la cita?
- b) ¿Dónde?⁴
- c) ¿Qué velocidad tenía la persona 1 ($\frac{\text{numero de baldosas} \times 20\text{cm}}{\text{tiempo entre dos gritos}}$) al momento del encuentro?
- d) ¿Qué velocidad tenían las personas entre sí al momento del encuentro?
- e) ¿A qué distancia entre sí se encontraban 1 minuto después del encuentro? etc.

Estas preguntas son interesantes en lo que respecta a citas en nuestra vida cotidiana, pero en realidad muchas de ellas no tienen sentido físico preciso y por lo tanto no nos dicen nada

⁴En el sentido de los N° de baldosas dadas.

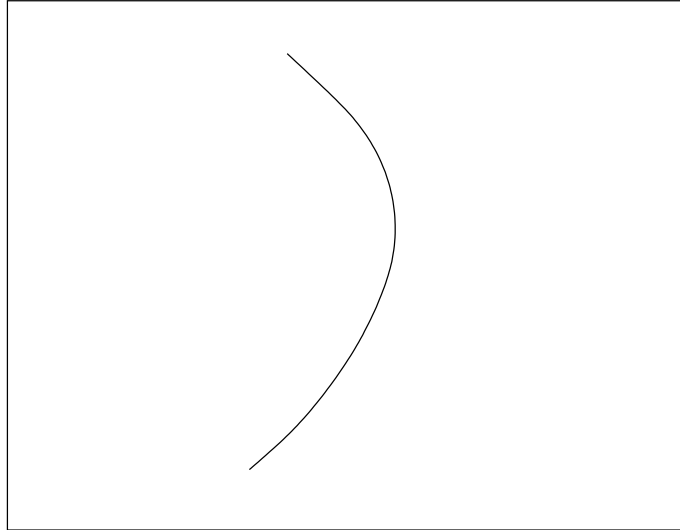


Figura 4: Historia de un hombre, versión idealizada.

fundamental acerca del fenómeno “encuentro” ni acerca del Espacio–Tiempo en sí. Estas sólo dicen cosas relacionadas a nuestra particular familia de observadores. En efecto, si estuviéramos en el vacío, es decir sin ningún cuerpo de referencia a nuestro alrededor, no podríamos determinar con ningún experimento si estamos en reposo o no y por lo tanto no tendríamos ninguna familia privilegiada para hacer nuestras observaciones. El punto de vista Aristoteliano es personalizado o elitista, necesitamos un punto de vista más universal, más democrático.

3. Concepción Galileana / Euclídea del Espacio–Tiempo

Galileo resolvió este problema de forma magistral. Propuso: Tomemos todas las familias de observadores sin declarar a ninguna privilegiada hagamos un experimento, anotemos los resultados en nuestros cuadernos y contestemos las preguntas y finalmente comparemos los resultados. Las preguntas que siempre tengan el mismo resultado serán los que son independientes de familias de observadores y por lo tanto las que tendrán significado intrínseco. Esta es la concepción Galileana / Euclídea del Espacio–Tiempo.

Para ver sus implicaciones repitamos nuevamente el experimento “encuentro”, pero ahora tomando otra familia de observadores.

Como antes al ingresar nuestros voluntarios les damos un reloj a cada uno, como antes les hacemos memorizar el números de baldosas desde el Sur y desde el Oeste. La diferencia es que ahora los hacemos mover, como desfilando digamos, hacia el Oeste y digamos a un paso de una baldosa por segundo. [Ver figura 8] Como antes dejamos entrar las personas que protagonizaron el encuentro, anotamos los números que nos gritan los voluntarios y luego contestamos las preguntas.

Veamos que las preguntas **b)** y **c)** dan resultados diferentes.

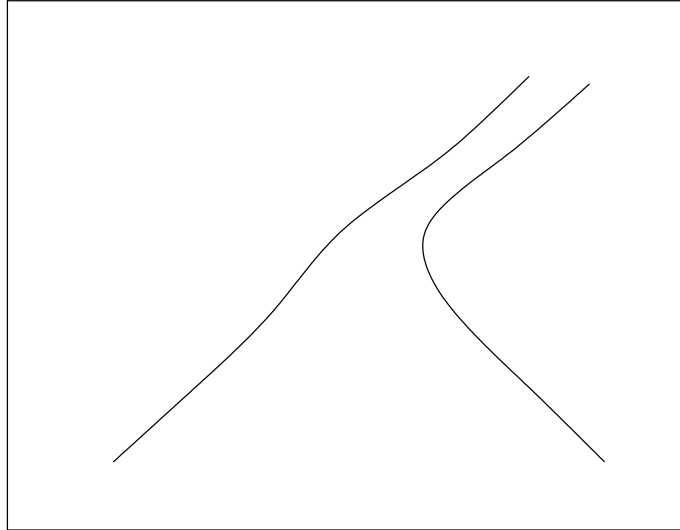


Figura 5: Fenómeno cita, versión aun más idealizada.

Al moverse el observador que estuvo presente en el evento cita llevó consigo los números de baldosas que tenía al comenzar el experimento y por lo tanto, como la cita fue presenciada por otro observador y no el que originalmente estuvo parado en esa baldosa, el resultado a la pregunta **b)** será otro.

La velocidad medida en **c)** es la “relativa” al observador y por lo tanto diferirá: No es lo mismo la velocidad de un auto relativa a la ruta que a otro auto que se está moviendo, del mismo modo la velocidad relativa de una de las personas asistiendo a la cita con respecto a dos observadores con velocidades distintas será también distinta.

Está claro entonces que dar número de baldosas desde el Sur y el Este como respuesta a la pregunta ¿donde? no es relevante, lo mismo que tampoco lo es hablar de velocidades relativas.

¿Qué quedó de concepción Aristotélica / Euclídea? Nota que todavía tenemos un tiempo absoluto (ya que podemos contestar la pregunta **a)**), en efecto si les pedimos a nuestros voluntarios que chasqueen sus dedos a las 20hs tenemos una **superficie de simultaneidad** en nuestro Espacio-Tiempo.

Esta es común a todas las familias y es el porque de que pregunta **e)** tenga sentido desde este punto de vista.

Visualmente tomamos estas superficies como “copias” de nuestro espacio y a este le asignamos un carácter Euclídeo, es decir suponemos que las axiomas de la geometría euclídea valen en él.

4. Algunos Experimentos

El punto de vista Galileano es lógicamente consistente, intuitivo y universal -o democrático-, es “bello”. ¿Qué más puede pedirse? Es por ello que aún domina con nuestra sociedad, ¡aunque

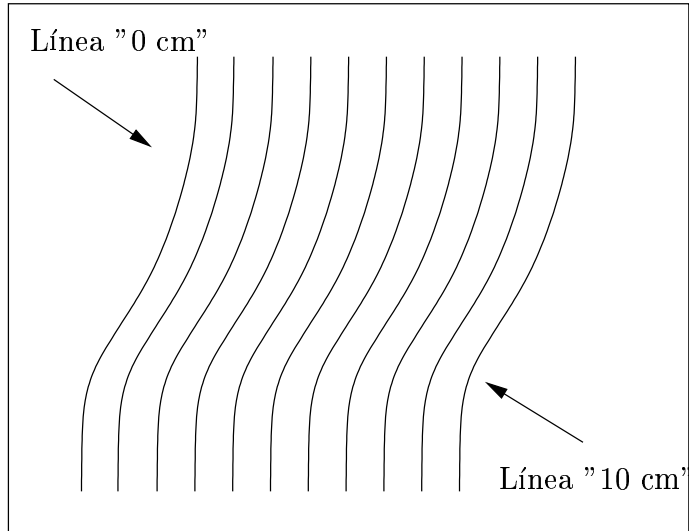


Figura 6: Historia de una regla.

está en contradicción con la naturaleza! Para ver esto último “hagamos” un experimento:

Miremos un sistema binario de estrellas, es decir un par de estrellas que orbitan una alrededor de la otra. Habrá momentos en que una estrella se está moviendo hacia nosotros y la otra se está alejando. Por lo tanto la luz emitida por la primera estrella debería tener una velocidad mayor que la proveniente de la otra estrella y así llegar antes a nuestros ojos. [Ver figura 10]

Por lo tanto en cada *instante* veríamos un movimiento bastante distinto al de rotación uniforme. ¡Pero eso no es lo que se observa! Lo que se observa es consistente con la afirmación de que la velocidad de la luz es independiente de la velocidad del emisor. O, dicho de otro modo, si emitimos luz desde un evento en una dirección dada esta solo lo hará a “su” velocidad, es decir, nos dará una única trayectoria en el Espacio-Tiempo. Por lo tanto, el diagrama real del experimento anterior es siguiente [Ver figura 11]

La luz se comporta de manera diferente a los cuerpos masivos, *tiene un arreglo especial* con el espacio-tiempo: *Ya tiene trayectorias preestablecidas en él.*

¿Pero qué implicaciones tiene este experimento sobre el punto de vista Galileano? Supongamos que hacemos un experimento para medir la velocidad de la luz. [Ver figura 12]

Para ello contamos 30 metros = 150 baldosas desde un observador A (al cual de damos una linterna y un reloj) y allí ponemos otro observador con un espejo. Al evento p el observador A prenderá la linterna y gritará el tiempo que marca su reloj, t_p . El observador B reflejará la luz, y esta vuelve al observador A, quien ahora gritará el tiempo en su reloj, t_q .

Luego

$$C = \frac{2d(A, B)}{t_q - t_p} = \frac{300 \text{ baldosas}}{\frac{1}{10,000,000} \text{ seg}} = 300,000 \frac{Km}{seg}$$

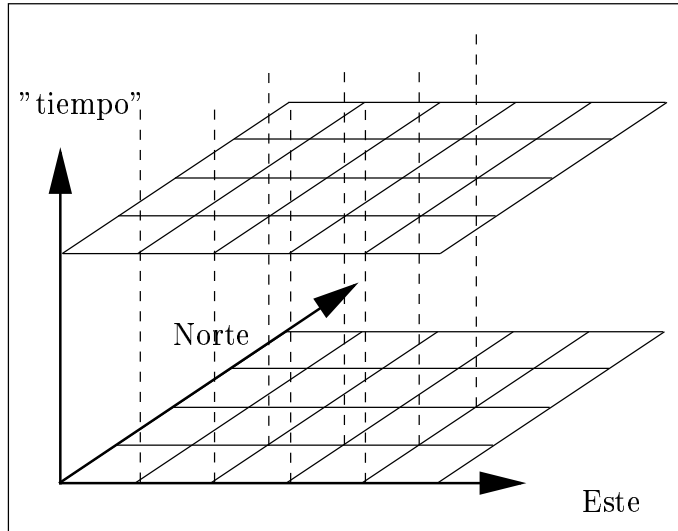


Figura 7: Observadores privilegiados.

¿Qué velocidad medirán observadores que estén en movimiento con respecto a los primeros? Veámoslo en un diagrama 13.

Como vimos la trayectoria de la luz no depende de los observadores y por lo tanto es lo que permanece invariante en el gráfico. Nótese que $t_{i,q} > t_q$ y por lo tanto la velocidad según el sistema en movimiento parece ser menor.

Tenemos así un *dilema*: O el gráfico es verás y las velocidades medidas son distintas (con lo cual violaríamos uno de pilares fundamentales del punto de vista Galileano, es decir que por medio de experimentos locales no podemos determinar si estamos en movimiento o en reposo).

O el gráfico -y así el punto de vista Galileano- es erróneo y las velocidades medidas son las mismas.

Nótese que cualquiera sea el resultado la concepción Galileana debe caer. Nuestra observación de las estrellas binarias nos dice que este no es el punto de vista correcto para describir la realidad. El resultado de nuestro segundo experimento, el cual es irrelevante en lo que concierne a nuestra conclusión de que el punto de vista Galileano es incorrecto, es que la velocidad de la luz es la misma para todo observador y por lo tanto el pilar del que hablábamos antes sigue siendo válido y en realidad es también de los pilares básicos de la relatividad general: No existe tal cosa como el estado de reposo.

¿Qué es lo incorrecto en la concepción Galileana?

En realidad hicimos varias suposiciones incorrectas, aunque puede pensarse que todos provienen de una misma:

La imposición de que los relojes llevan el ritmo de las superficies de igual tiempo que dibujamos. O dicho de otro modo, la suposición de que esas superficies de simultaneidad tenían significado propio.

Lo que realmente pasa es que cada reloj se comporta de la única forma en que debe hacerlo

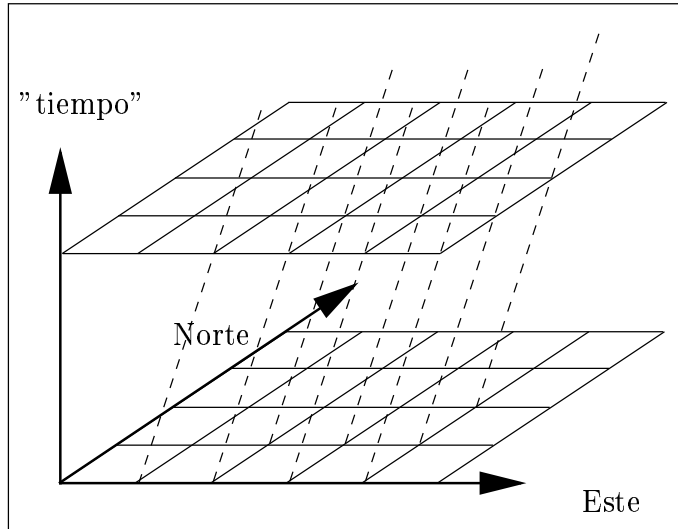


Figura 8: Observadores en movimiento.

-de acuerdo a la marca- y lleva el ritmo que le enseñaron. Por lo tanto si dos observadores recorren trayectorias distintas, cuando se vuelven a encontrar sus relojes no tienen porque marcar el mismo intervalo de tiempo. Cada observador mide su **propio tiempo**, no hay un **tiempo universal**. Ver figura 14

Tampoco hay **superficie de simultaneidad universales** y por lo tanto tampoco existe eso que usualmente llamamos **espacio**. Sólo nos queda nuestro viejo amigo, el espacio-tiempo. Esto no es sólo una conclusión proveniente de meras elucubraciones mentales, hay resultados experimentales concretos que así lo afirman.

¿Qué significa esto? ¿Debemos abandonar todas nuestras concepciones anteriores (Galileanas o Aristotélicas) y comenzar a expresarnos en otro lenguaje? La respuesta es negativa, si nos referimos a los experiencias de la vida cotidiana. El error que cometemos en nuestros cálculos es muy muy pequeño como para que lo notemos y nos lleve a contradicciones. De lo contrario, Aristóteles o el genial Galileo hubiesen creado directamente la concepción relativista. Pero es afirmativa si queremos ser precisos y usar los conceptos correctos.

Hemos llegado a la conclusión que no podemos hablar del intervalo temporal entre dos eventos, ni del intervalo espacial entre dos eventos. ¿Hay algo de lo que podamos hablar que sea propio del espacio-tiempo? La respuesta es **si**, y es lo que los relativistas llamamos el "intervalo", a secas.

Nos llevaría demasiado tiempo probar que este objeto es realmente una propiedad del espacio-tiempo (en este momento supongo que todos estarán un poco incrédulos de que en realidad haya algo propio del espacio-tiempo), por lo que sólo lo presentamos, veremos que se puede medir y que al menos algunas de sus propiedades son realmente invariantes, es decir no dependen del observador.

El lector interesado, con un poco de conocimiento de la geometría euclídea, y algunas

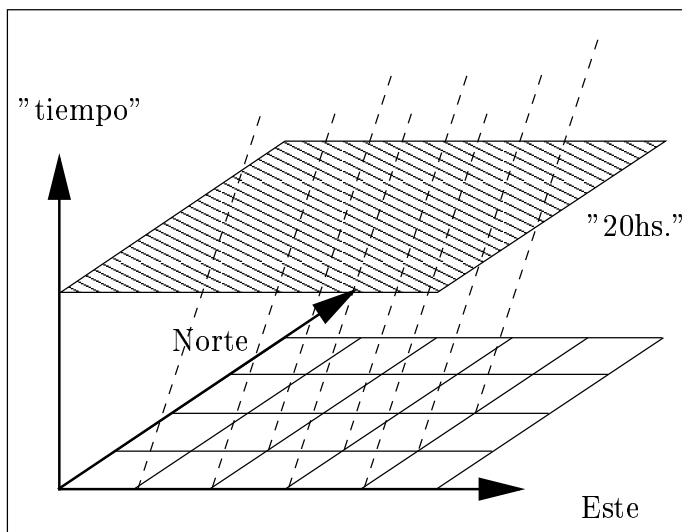


Figura 9: Observadores en movimiento.

suposiciones podrá convencerse de este hecho.

Supongamos dos eventos en el espacio-tiempo, p y q y un observador que pasa por p . Supondremos este solo tiene su reloj como instrumento de medida y una linterna. A lo largo de su trayectoria elige el punto (evento) e desde el cual puede iluminar el evento q , lo hace y luego espera en su trayectoria hasta que la luz que rebota de q le llega. Tienen así evento y observador dos tiempos asociados: t_{ep} tiempo entre el evento emisión de luz e y el evento p ; t_{pr} = tiempo entre evento p y el evento recepción. (15a) Ahora bien, los eventos e y r y los respectivos tiempos tienen mucho que ver con la trayectoria del observador y poco con los eventos p y q .

Por ejemplo "el intervalo espacial entre p y q es $\Delta x = C \frac{t_{ep} + t_{pr}}{2}$ ", (donde C = velocidad de la luz) es un concepto claro en la concepción Aristotélica: "la luz tardó $t_{ep} + t_{pr}$ en ir y volver al punto q y por lo tanto ...". O también, "el intervalo temporal entre p y q es $\Delta t = \frac{t_{pr} - t_{pe}}{2}$ ", basado en "el tiempo entre e y q es igual al tiempo entre q y r y por lo tanto $2t_{eq} = t_{eq} + t_{qr} = t_{er} = t_{er} + t_{pr}$ y $t_{pq} - t_{ep} = \frac{t_{ep} + t_{pr}}{2} - t_{ep} = \frac{t_{pr} - t_{ep}}{2}$ ". Estos son intervalos que por lo discutido anteriormente no pueden ser invariantes, dependen de la trayectoria del observador.

.....!!!! (Agregar por aquí sup. de simultaneidad para 2 observadores)

Para guiarnos en la busca del intervalo notemos la siguiente **estructura** en el espacio-tiempo. Diremos que dos intervalo están **relacionados temporalmente** si por medio de estos eventos desde el otro y para hacerlo necesito el menos 1 espejo. [Ver figura 16]

Si no se necesita de espejos diremos que estos están **relacionados lumínicamente**. [Ver figura 17] Si no se pueden iluminar entre si entonces diremos que están **relacionados espacialmente**. [Ver figura 18]

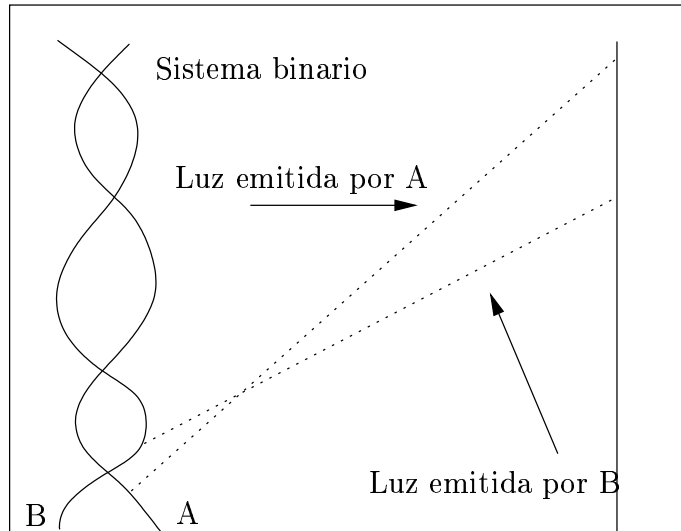


Figura 10: Luz emitida por sistema binario de acuerdo a Galileo.

Pero note entonces que si hacemos nuestras mediciones de t_{ep} y t_{pr} para estas tres circunstancias, viendo el signo de $t_{ep} \cdot t_{pr}$ podemos distinguir entre estos tres casos. Por lo tanto el signo de este producto no depende del observador (ya que en la definición de estos tres casos no se menciona al observador). En realidad aún más es cierto: el producto en sí es independiente del observador y es la única combinación que lo es. Este es el intervalo que andábamos buscando.

Supongamos que tenemos un espacio-tiempo, es decir una colección de eventos junto con una gran tabla con dos entradas, en cada una de ellas hay un evento y en la intersección el valor del intervalo . [Ver figura 19]

¿Podemos describir todos los fenómenos físicos con estos datos más las leyes físicas correspondientes apropiadamente formuladas?

La respuesta es **sí**, excepto por una de ellas, los fenómenos **gravitatorios**, si insistimos en usar la ley de atracción de Newton:

“la fuerza gravitacional entre dos cuerpos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa (en ese instante de tiempo)”.

Esta ley es contraria al punto de vista relativista pues nos habla de distancias con respecto a superficies de simultaneidad, algo que sabemos no tiene existencia propia en el espacio tiempo.

¿Podemos reformularla de tal manera que la contradicción desaparezca?

La respuesta es **no**. La presencia de objetos gravitantes nos cambia nuestra tabla de intervalos, o dicho de otro modo la gravedad ya está contenida en nuestra tabla. ¡No se necesita otra ley para ella!

Para ver esto comparemos las tablas que obtendríamos de una región del Espacio-Tiempo

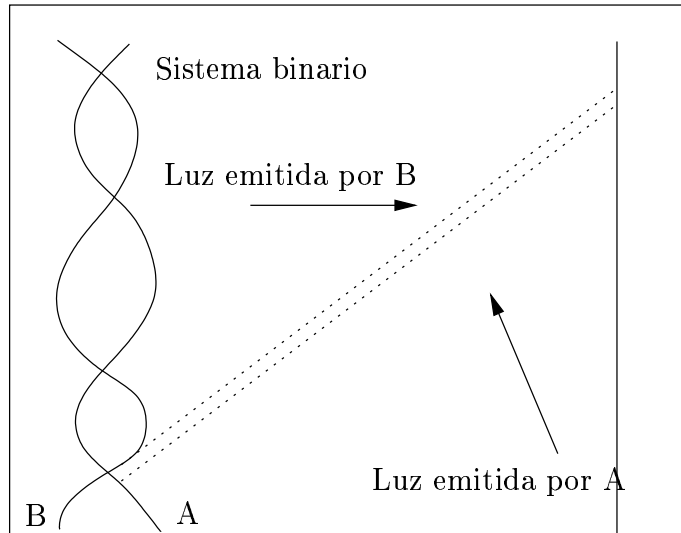


Figura 11: Luz emitida por sistema binario.

con y sin la presencia de un cuerpo gravitatorio.

Obtendríamos resultados distintos si las trayectorias de los rayos de luz no fueran la mismas o nuestros relojes marchasen a ritmo distinto.

La única manera de saber que pasa es hacer un experimento.

Para ello le pedimos a un astrónomo que tome una foto de las estrellas en una parte del cielo con y sin la presencia del sol. Para que la luz del sol no lo moleste le pedimos que lo haga durante un eclipse. Si las trayectorias de los rayos de luz no es perturbada por el sol las fotos “conz “sin” deberían ser iguales de lo contrario tendríamos un efecto del sol en el espacio-tiempo.

Tal experimento se hizo y dió fotos distintas! Nuestra tabla depende de los cuerpos gravitatorios. El **Espacio–Tiempo** no es algo absoluto, *depende de lo que pongamos en él.* [Ver figura 20]

Este experimento tiene también otra consecuencia: debemos re-examinar otra serie de conceptos que tenemos inducidos a partir del mundo particular en que vivimos: la geometría euclídea.

Si alguien nos alcanza un listón de madera y nos pregunta si es recto lo primero que hacemos es alzarlo delante de nuestros ojos de tal manera que podamos decidir al mirarlo si la luz proveniente de cada punto de su superficie nos llega a lo largo de la misma línea. Es decir, usamos la “*rectitud*” de los rayos de luz para definir rectitud de otras cosas.

El espacio-tiempo no es euclídeo, en él dos rectas que en algún punto son paralelas se cortan si algún cuerpo gravitatorio está en su vecindad!

En resumen, hemos visto que lo único que depende del **Espacio–Tiempo** en sí y no de

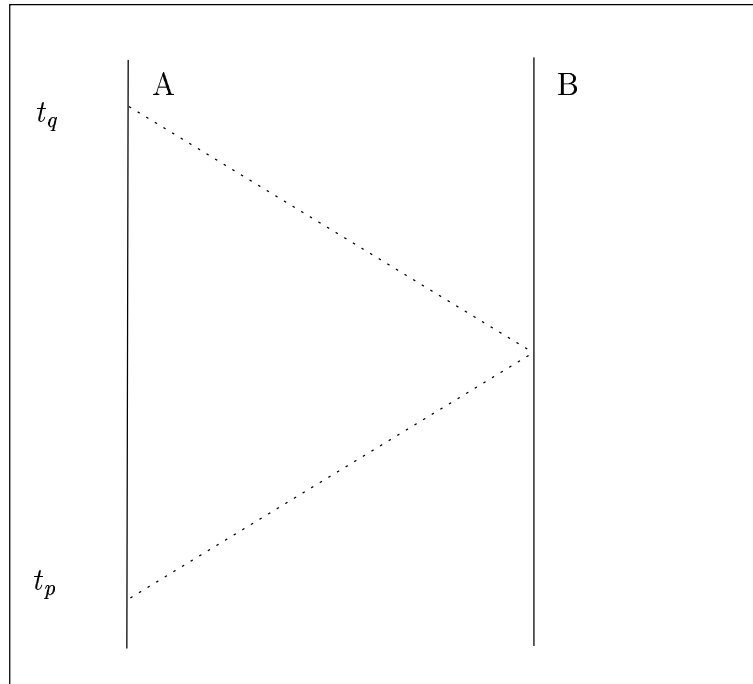


Figura 12: Midiendo la velocidad de la luz.

los observadores se lo que llamamos el intervalo entre eventos.

Además hemos visto que este, a diferencia de lo que se suponía para dos intervalos temporales o espaciales no es absoluto: depende del contenido de materia en la región. Esta falta de invariancia implica que el **Espacio-Tiempo** no será en general Euclídeo.

Intervalo \iff (No Euclídeo = Curvatura) \iff Materia Gravitante

La teoría que nos dá la relación exacta (matemáticamente) entre estas cosas es la teoría de la Relatividad General.

Ustedes saben ahora tanto sobre R.G. como cualquier persona puede llegar a saber sin tener un conocimiento íntimo de las matemáticas que ésta utiliza en su detalle.

Veamos ahora que consecuencias tiene esta nueva concepción del **Espacio-Tiempo**.

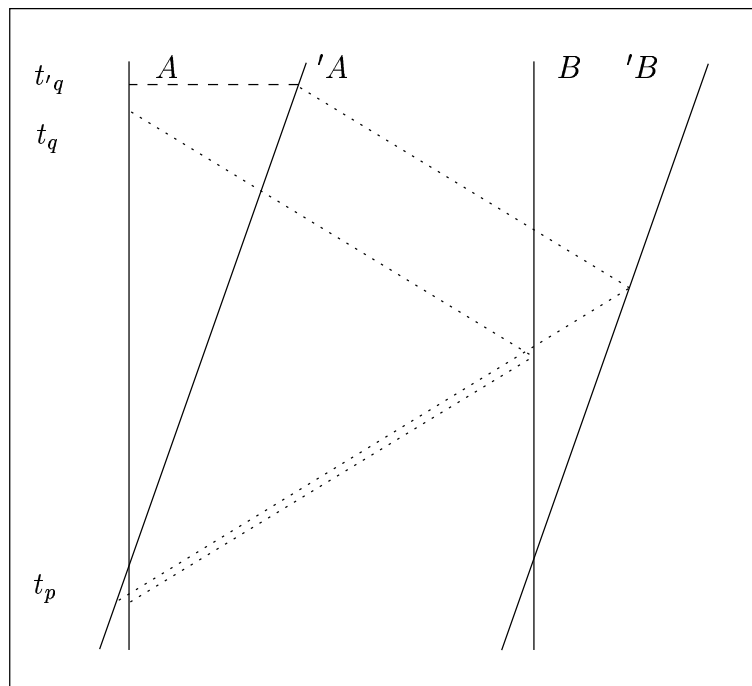


Figura 13: La velocidad de la luz de acuerdo a un observador en movimiento.

5. Algunos Espacio–Tiempos

5.1. La velocidad máxima de propagación de sucesos físicos es la de la luz. ¿Otro concepto sólido o un prejuicio?

Uno de los postulados básicos que usualmente se agregan a nuestra concepción del espacio–tiempo es el de que la velocidad máxima de propagación de cualquier ente físico coincide con la de la luz. Hay dos argumentos a favor de tal suposición:

- 1.- En la naturaleza no se observan velocidades superiores a la de la luz.
- 2.- La dinámica de partículas relativistas no permite que estas puedan ser aceleradas a velocidades superiores a la de la luz.

El primero de éstos es el más fuerte si le agregamos una máxima de economía científica: No aventurarse en generalizaciones innecesarias.

El segundo no lo es tanto. Por un lado la teoría de la dinámica de partículas es solo válida en el dominio clásico, no así en el cuántico, y aún en éste es incompleta si pretendemos con ella explicar interacciones relativistas. Por otro lado existen teorías matemáticamente consistentes y que respetan los requerimientos físicos de causalidad e invariancia que tienen velocidades de propagación superiores a la de la luz. Este último hecho adquiere fuerza si le agregamos otra máxima científica: Toda teoría matemáticamente consistente tarde o temprano aparece jugando un rol en la descripción de la naturaleza.

Una discusión más profunda de este postulado merecería un tratamiento individual. Pero

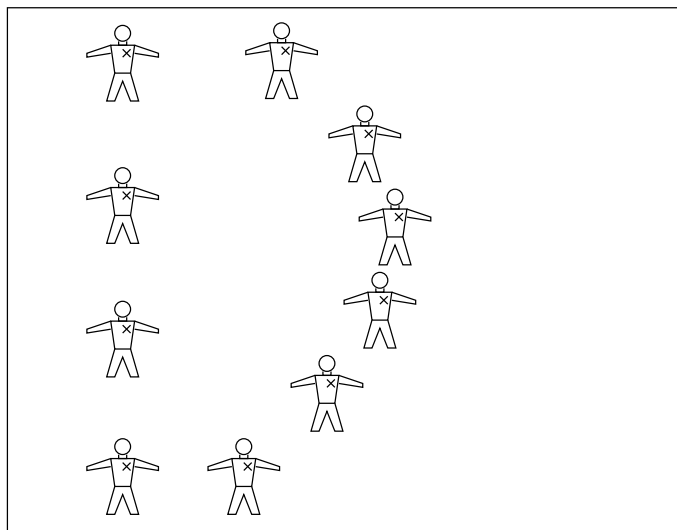


Figura 14: Observadores con latidos al mismo ritmo.

no quería suponerlo sin más, como haremos en lo que sigue, pues personalmente me parece muy importante. Si algún día nos diéramos cuenta que la naturaleza no lo respeta tendríamos que tirar a la basura más de la mitad de toda la literatura científica que concierne a la relatividad general.

5.2. Agujeros Negros

Si tiramos una piedra al aire, hacia arriba, esta vuelve a caer. Si lo hacemos con más fuerza, es decir si damos a la piedra más velocidad inicial esta llega más alto y tarda más en caer. Si pudiésemos darle suficiente velocidad esta no volvería a caer. La mínima velocidad en que esto ocurre se llama velocidad de escape, y depende del cociente, $\frac{MG}{r}$, más precisamente, $v_e^2 = \frac{2MG}{r}$, donde en este caso M es la masa de la tierra y r su radio.

Notemos dos cosas:

i) La velocidad de escape no depende de la masa de la piedra, es la misma si ésta pesa 1 Kg. que si pesa 1g. o si no tiene masa. Esto es simplemente la observación que realizó Galileo en Pisa.

ii) Para una dada masa podemos hacer crecer la velocidad de escape compactando la materia en un radio menor.

Conclusión:

Si consideramos a la luz como partículas sin masa ya vimos que esta es atraída gravitacionalmente y como también vimos que su velocidad es siempre la misma, luego para una dada cantidad de materia habrá un radio tal que si logramos meter toda la materia en dicho radio ($r = \frac{2MG}{C^2}$) luego la luz no podrá escapar⁵. Estamos ante un agujero negro.[Ver figura 21]

⁵Note que esta analogía es malísima desde el punto de vista Galileano o Aristotélico. Si tiene velocidad

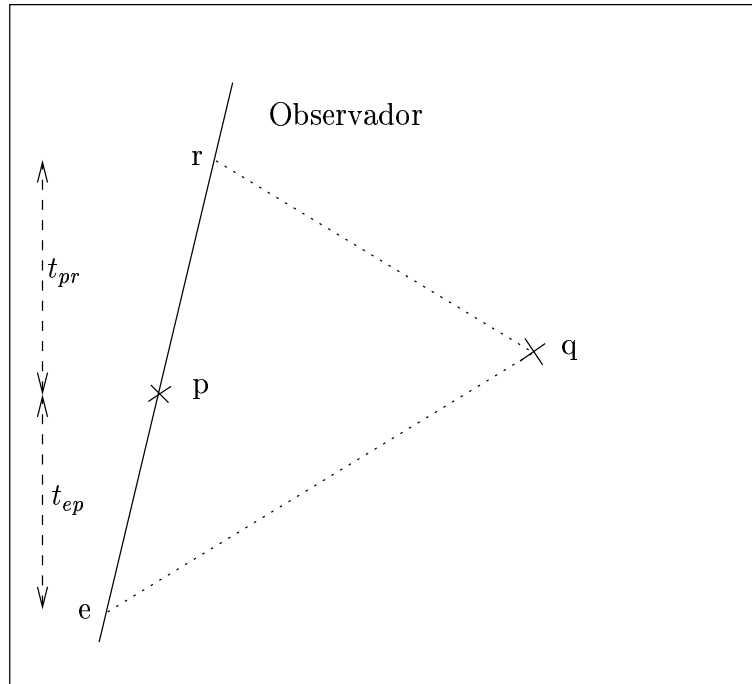


Figura 15: Observadores con latidos al mismo ritmo.

Si enviamos un observador hacia el agujero con una linterna apuntando radialmente hacia afuera, cuanto este llegue a la superficie la luz que parte desde ese instante en más de su linterna no nos llegará jamás. Nunca podremos explorar su interior y volver para contarlo. ¿Existen tales objetos?

Supongamos que alguien nos presta su terreno y nos propone construir uno de estos objetos allí, pronto veríamos que necesitamos más material que el de toda la tierra y que a este deberíamos compactarlo a presiones que ningún material sólido conocido resistiría. En suma no lo podemos hacer en ningún laboratorio. Solo podemos observar el espacio y ver si vemos algunos. Para colmo de males su propia definición implica que estos pueden ser muy difíciles de detectar: no los podemos ver, solo podemos inferir que están allí por su interacción (gravitatoria) con objetos cercanos. Hasta el presente tenemos un buen número de observaciones de fenómenos que solo pueden ser explicados (con la física que hasta hoy conocemos) por la presencia de cuerpos muy masivos en una región muy pequeña del espacio, $r < \frac{2MG}{C^2}$, o sea cuerpos que deberían ser agujeros negros, pero que en esa región no se observa cuerpo alguno.

5.3. Un modelo de nuestro universo

Pongamos una hormiga sobre un globo he inflémoslo lentamente. Si esta es una buena observadora y además pretenciosa llegará a dos conclusiones:

constante entonces no se frena y escapa.

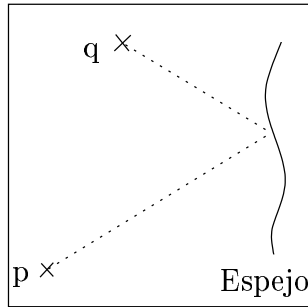


Figura 16: Observadores con latidos al mismo ritmo.

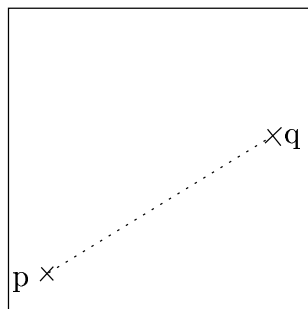


Figura 17: Observadores con latidos al mismo ritmo.

i) El universo (la superficie del globo) es homogéneo o isotrópico. Es decir todos sus puntos son de caucho rojo, con la misma tensión y mire en la dirección que mire solo veo lo mismo.

ii) El universo se expande. Al inflarse el globo todos los puntos de la superficie se alejan unos de otros, los más lejanos parecen tener una (velocidad con respecto a nosotros) mayor.

Nótese que no hay contradicción entre i) y ii) desde cualquier punto veremos a todos los demás alejarse y con velocidades proporcionales a la distancia que nos separa de ellos.

Lo interesante de todo esto es que nuestros astrónomos observan lo mismo: donde miren ven lo mismo y todas las cosas (galaxias) se alejan de nosotros, las más lejanas más rápido que las más cercanas. Sin moverse de la tierra los astrónomos llegan a las mismas conclusiones sobre nuestro universo que la hormiga su globo. La diferencia radica en que mientras nos es fácil pensar en el globo inflándose en el espacio nos es difícil pensar en el universo en sí como un todo expandiéndose. Más interesante aún es que si suponemos al universo con una distribución de materia homogénea entonces la teoría de la relatividad general nos dice que éste debe estar expandiéndose o contrayéndose durante casi toda su existencia. Del mismo modo que cuando tiramos una piedra hacia arriba esta estará subiendo o bajando la mayor parte de su trayectoria. Es más, la Relatividad General predice que, dada la presente expansión, nuestro universo comenzó como una gran explosión -de ahí la expansión- llamada el Big Bang.

Miremos ahora la película en orden reverso de nuestro universo, ello nos dará el **Espacio**—

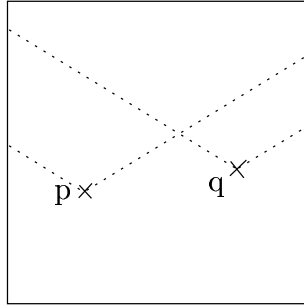


Figura 18: Observadores con latidos al mismo ritmo.

	Nacimiento Sol	Nacimiento α C	Rev. Mayo	
Nacimiento Sol	0	$-0,5 \text{ years}^2$	$9 \cdot 10^{18} \text{ years}^2$	
Nacimiento α C	$-0,5 \text{ years}^2$	0		
Rev. Mayo	$9 \cdot 10^{18} \text{ years}^2$		0	
...				

Figura 19: Espacio tiempo como tabla entre eventos

Tiempo desde el presente hasta el Big Bang.

Cuando vamos hacia atrás en el tiempo

[Ver figura 22]

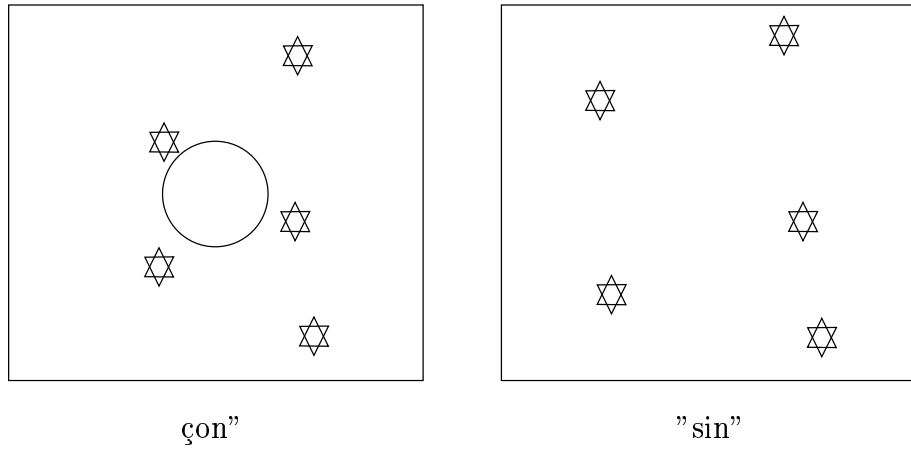


Figura 20: Fotos del cielo con y sin el sol

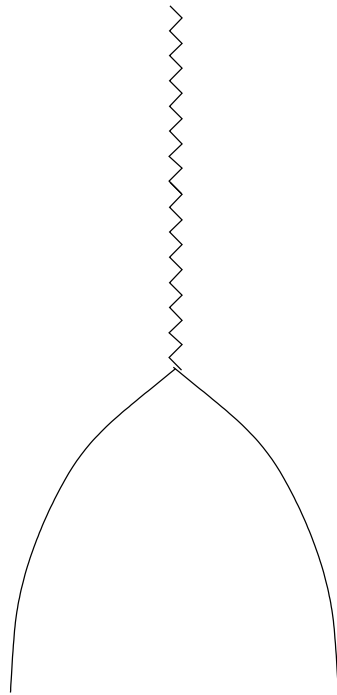


Figura 21: Agujero negro

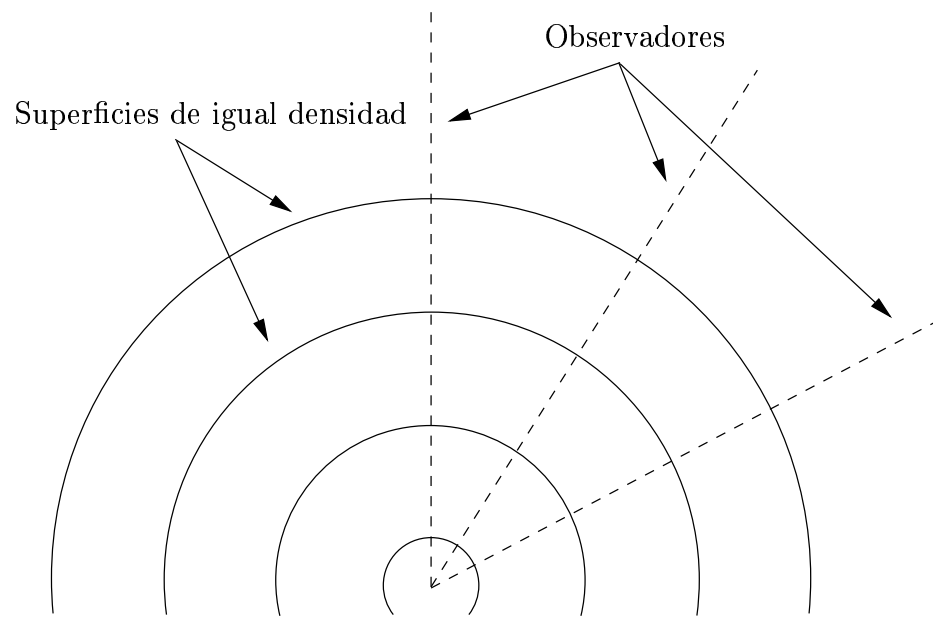


Figura 22: Historia de nuestro universo