

Relatividad Especial y Relatividad General:

Relatividad Sin Einstein:

El espacio tiempo constituye el escenario donde ocurren fenómenos de la naturaleza. Se trata de la base de toda descripción física. Hablar hoy del espacio tiempo. Desde el punto de vista científico, nos obliga a tomar como referencia el comienzo del siglo XX que marco un cambio conceptual revolucionario y fundamental en las ideas que acompañan al hombre hasta este momento.

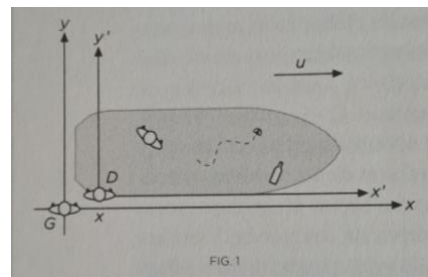
La discusión del espacio y del tiempo cambia cuando se incorpora el análisis del movimiento de los cuerpos. Al estudiar el movimiento se toma el espacio como la base de descripción, pues los cuerpos al moverse cambian de posición en ese espacio y lo hacen durante el transcurso del tiempo. Aparece entonces la idea clara de espacio y de tiempo, dando lugar al escenario donde ocurren estos procesos de cambio. Cuando se describen estas experiencias, se lo hace a partir de la idea de espacio y el tiempo heredada de la cultura griega: un espacio plano tal como se conocía desde Euclides. En ese espacio se ubican los objetos y se los acompaña de un reloj que marca el tiempo definiendo una secuencia absoluta común a cualquiera de los observadores posibles. Con estos elementos se describen los movimientos de los cuerpos. Así, primero Galileo Galilei (1564-1642) y luego Isaac Newton (1643-1727) establecen las Leyes Físicas de la Mecánica Clásica.

Un sistema de referencia es un conjunto de convenciones usado por un observador para poder medir la posición y otras magnitudes físicas de un sistema físico. Las trayectorias medidas y el valor numérico de muchas magnitudes son relativas al sistema de referencia que se considere, por esa razón, se dice que el movimiento es relativo.

En mecánica clásica el término para referirse a un sistema de coordenadas ortogonales para el espacio euclídeo (dados dos sistemas de coordenadas de ese tipo, existe un giro y una traslación que relacionan las medidas de esos dos sistemas de coordenadas).

Si un sistema de referencia se mueve esta en reposo o se desplaza a velocidad constante en relación con otro se denomina Sistema Inercial, ya que en el, en ausencia de fuerzs no hay cambios en el estado de movimiento.

Supongamos que un barco se mueve a velocidad constante u hacia la derecha, manteniendo la borda paralela al muelle. Instalamos un sistema de referencia G (con coordenadas x e y) en el muelle y otro en el barco D (con coordenadas x' e y'). La relación entre las coordenadas de los sistemas de referencia para cualquier suceso dentro de la bodega del barco (fig. 1), están dadas por las transformaciones de Galileo:



$$x' = x - u \cdot t$$

$$y' = y$$

$$t' = t$$

De esas leyes se desprenden la de aditividad de las velocidades. Esta enseña como se suman las velocidades de móviles que se mueven a su vez respecto de otros móviles. Recordemos el

caso del bote que recorre un río mientras el pasajero camina sobre el bote. La persona que observa desde la orilla va a percibir que el pasajero del bote se está moviendo con una velocidad que es la suma de la velocidad del bote respecto a la orilla más la velocidad con que aquel se desplaza sobre el bloque ($v = v_b + v_{sb}$). Esto es evidente pues la distancia total recorrida por el pasajero vista por el observador desde tierra, es la suma de distancia que recorrió el bote más la que el pasajero camina sobre el bote, todo ello en el mismo lapso de tiempo. Pero cuidado, esta conclusión surge de presuponer que el tiempo que transcurre para el hombre que está en el bote es exactamente el mismo que el del observador en tierra. Es decir, que hay un tiempo absoluto y que rige la evolución en el Universo para todos. Esta idea sobrevivió hasta fines del siglo XIX, cuando aparece un conflicto en el estudio del comportamiento de la luz.

Tradicionalmente la luz era considerada como un fenómeno de propagación instantánea. Alrededor de 1700, los científicos se dieron cuenta de que un rayo luminoso tardaba un cierto tiempo en llegar de la fuente al objeto luminoso. Comenzó entonces la preocupación por describir con mayor precisión el fenómeno luminoso y determinar como está constituida la luz, sobre que medio se mueve, que característica tiene, etc. El desarrollo de Maxwell sobre la teoría electromagnética de la luz en 1864, y su verificación experimental por Hertz en 1887, privaron al éter (medio elástico) de la mayoría de sus propiedades, pero nadie de esa época se mostró deseoso de rechazarlo. A fin de encontrar respuestas a estos interrogantes se realizaron una serie de experimentos. Uno de ellos, de Albert Michelson (1852-1931) y Edward Morley (1838-1923), de fines del siglo XIX, indaga acerca del soporte sobre el cual la luz se movía. Buscaba caracterizar el llamado éter. El resultado fue sorprendente, la luz se movía con la misma velocidad en cualquier sistema de referencia inercial. A diferencia de lo que pasa cuando un hombre camina en bote, donde su velocidad cambia si se la mide desde el bote o desde la orilla. Para el que se observa en el bote o para el que observa en tierra, la velocidad es ciertamente diferente. A la luz no le ocurre esto. El resultado experimental fue que su velocidad de propagación es la misma, cualquiera sea el sistema de referencia o el estado de movimiento de la fuente. Esta fue precisamente la conclusión de los experimentos. El análisis teórico de los resultados de Michelson y Morley realizado por Albert Einstein (1879-1955) en 1905 le permitió interpretar a esa experiencia como una demostración de que la velocidad de la luz es constante, independientemente del observador. La consecuencia inmediata de esta propiedad es la no existencia del éter. De existir este éter, el movimiento relativo de los observadores respecto del mismo cambiaría la velocidad resultante de la luz. Debido a esta propiedad de la luz, las leyes de movimiento y de la Física en general, deben ser modificadas. Ellas son diferentes a las expresadas por las Leyes de Newton. Ya no se pueden mantener que las velocidades se suman simplemente y como consecuencia trascendente surge la Ley fundamental: el tiempo no es absoluto. Einstein desarrolla entonces una nueva concepción del tiempo que inevitablemente se mezcla con el espacio pues depende de como se mueva el observador.

La Ciencia del Siglo XIX quedó embriagada con la revolución que trajo la electricidad: Las Leyes de Maxwell no eran como las de Newton que cambiaban bajo transformación de Galileo. En cualquier sistema inercial se puede expresar la Fuerza como el producto de la masa por la aceleración, sin necesidad de añadir términos nuevos debidos al cambio de coordenadas como en las ecuaciones de Maxwell. Para resolverlo había que corregir las transformaciones de

Galileo, por mucho que contradiga el sentido común. En 1904, el científico neerlandés Hendrik Lorentz (1853-1928) propuso unas ecuaciones para traducir las coordenadas entre sistemas separados por una velocidad constante. La comunidad científica celebró el acontecimiento bautizándolas con su apellido: así nacían las transformaciones de Lorentz. Si se aplicaban a las ecuaciones de Maxwell, estas conservaban su estructura. Además para velocidades mucho más bajas que la luz se reducían a la de Galileo. Como las velocidades a las que nos desplazamos son muy pequeñas si se comparan con las de la luz, no era de extrañar que nuestro sentido común no acertara a la primera con las expresiones de Lorentz y se conformara durante unos cuantos siglos con la aproximación de Galileo.

Si un sistema de referencia se mueve a velocidad constante con respecto a otro que está en reposo. Las transformaciones de Lorentz pueden expresarse:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{1}{\beta}(x - u \cdot t) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \frac{1}{\beta}\left(t - \frac{u}{c^2} \cdot x\right) \\ \text{Donde } \beta &= \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}\end{aligned}$$

A un tiempo dado del sistema en reposo, t , le corresponden distintos valores de t' , según el punto del espacio donde nos situemos (es decir, para los distintos valores de x). Dos sucesos que se perciben al mismo tiempo en puntos separados del muelle dejan de ser simultáneos desde la bodega del barco.

Relatividad Especial:

La construcción de la Teoría de la Relatividad (Restringida o Especial) que se refiere a lo que ocurre entre sistemas inerciales surge de postular la universalidad de las Leyes Físicas.

La Teoría de la Relatividad especial se basa en dos postulados. El primero establece que las Leyes Físicas se pueden expresar mediante ecuaciones que tienen la misma forma en todos los sistemas de referencia inerciales: los que se mueven a velocidad constante unos con respecto a otros. Este postulado expresa la ausencia de un sistema universal de referencia. Si las leyes de la física fueran diferentes para observadores distintos en movimiento relativo, se podría determinar, partiendo de estas diferencias, que objetos están “estacionarios” en el espacio y cuáles están en movimiento. Pero como no hay un sistema universal de referencia, esta distinción no existe en la Naturaleza.

El segundo postulado establece que la velocidad de la Luz en el espacio libre tiene el mismo valor para todos los observadores, independiente de su estado de movimiento. Este postulado es consecuencia directa de los resultados del experimento de Michelson y Morley y de otros resultados. Max Planck: “La Teoría de la Relatividad atribuye sentido absoluto a una magnitud

que en la Teoría Clásica solo posee carácter relativo: la velocidad de la Luz". La constancia de su valor se desprende de las ecuaciones de Maxwell.

El propio Einstein hacía notar que el primer postulado "también se satisface en la mecánica de Galileo y Newton". Las transformaciones de Lorentz se podían deducir directamente del segundo postulado sin hacer referencia a las ecuaciones de Maxwell.

Para comprobar las distorsiones que introduce la constancia de la velocidad de la luz, veremos una serie de experimentos que mostraremos de acuerdo con las Leyes de Newton (versión mecánica) y con las de Maxwell (versión electromagnética). Los resultados nos dará una imagen de la realidad mucho más exacta que la que proporciona el sentido común. Y por ello mismo, mas intrigante y extraordinario.

Fin de la simultaneidad:

Experimento Mecánico:

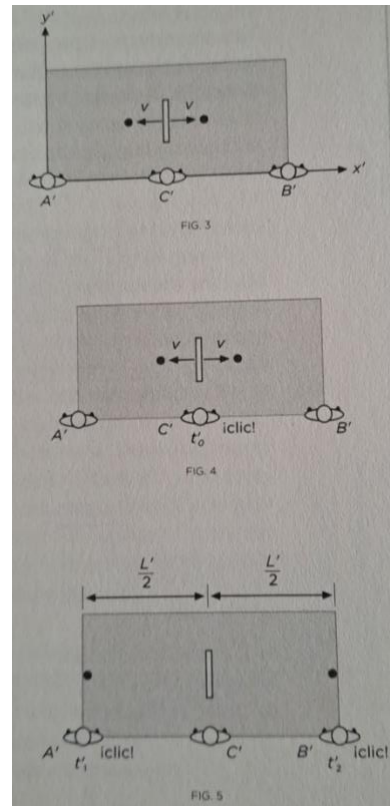
Consideremos dos sistemas G: **muelle** (con coordenadas x e y) y D: **bodega del barco** (x' e y'). Habitan en un universo donde el tiempo fluye igual en todos sus puntos, así que los observadores de uno y otro sistema pueden comparar sus relojes y comprobar que marchan al mismo ritmo.

Desde el interior de la bodega:

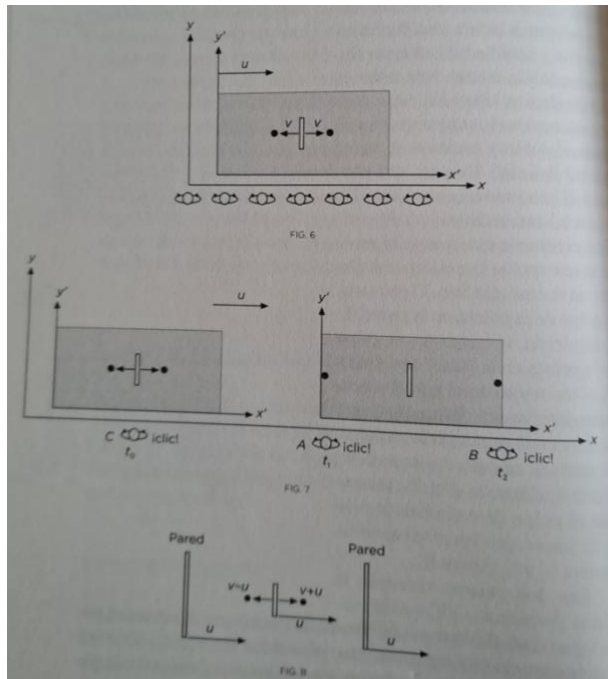
Dos personas que llamaremos A' y B' , se sitúan en las esquinas de la bodega, mirando en el sentido positivo del eje y' . En el centro se encuentra un dispositivo que dispara dos pelotas a la vez, una hacia la derecha y la otra hacia la izquierda, las dos con la misma velocidad v . Despreciando la acción de la gravedad curvando su trayectoria hacia el suelo y también rozamiento con el aire. Una tercera persona C' se coloca entre A' y B' , frente al mecanismo. A' , B' y C' han sincronizado sus relojes y cada uno recibe la misión de registrar un suceso distinto. El primero, el golpe de la pelota en la pared de la izquierda, el segundo, el golpe de la pelota en la pared derecha, y C' , el momento en el que el mecanismo las dispara (fig. 3). Cuando el mecanismo lanza las pelotas, C' marca el tiempo, t_0' , en su reloj (fig. 4). Cuando A' y B' contemplan el golpe de cada pelota contra la pared que les corresponde, marcan t_1' y t_2' (fig. 5)

Las dos pelotas recorren la misma distancia ($L'/2$) con la misma velocidad. Si los tres observadores ponen en común los registros de sus relojes y comparan los valores $t_2' - t_0'$ y $t_1' - t_0'$, obtienen el mismo resultado y concluyen que las pelotas llegan a la pared al mismo tiempo. Son dos sucesos simultáneos.

Desde el muelle



Dispondremos a lo largo del muelle una fila de observadores, cada uno armado con un reloj, que solo darán cuenta de lo que sucedía justo enfrente de ellos (fig. 6).



El barco se desliza a lo largo del muelle con velocidad u . llamaremos C al observador situado delante del mecanismo justo en el momento en el que este dispara las dos pelotas. Registrará el tiempo t_0 en su reloj. A y B son los observadores que presencian los choques contra cada una de las paredes. Anotarán los tiempos t_1 y t_2 (fig. 7).

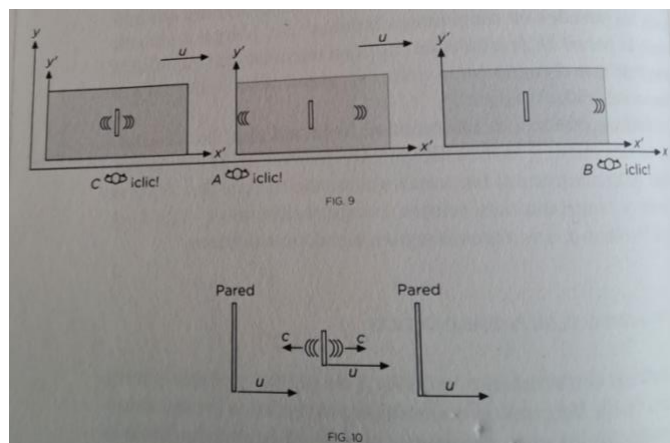
El movimiento del barco rompe la simetría entre el recorrido de la pelota que viaja hacia la izquierda, i, y la que corre hacia la derecha, d. Antes del disparo, los observadores, los observadores ven que el lanzador se mueve a velocidad u hacia la derecha. El

aparato comunica esa velocidad a i y d, ya que antes del lanzamiento las dos viajan en su interior. En un momento dado, el mecanismo dispara las pelotas en sentidos opuestos con velocidad v . En el muelle observan que i se dirige hacia la izquierda con velocidad $v-u$ y que d lo hace hacia la derecha con $v+u$. desde su punto de vista i es más lenta y d, más rápida. Para A' y B' eran igual de veloces. Esta diferencia de velocidades ¿Hará que golpeen las paredes en momentos distintos? No, porque i advierte como la pared de la izquierda sale a su encuentro a velocidad v , mientras que d comprueba como su pared se aleja de ella a la misma velocidad (fig. 8).

Ambos efectos se compensan: la pelota más lenta recorre menos distancia, y la más rápida recorre distancia mayor. Al final alcanzan las paredes al mismo tiempo. Si A, B y C se reúnen y comparan sus relojes, comprobarán que $t_2 - t_0$ y $t_1 - t_0$ valen lo mismo. Los sucesos siguen siendo simultáneos.

Experimento Electromagnético:

Sustituimos el mecanismo lanzador y las pelotas por una linterna con una doble lámpara. Al encenderse proyecta dos haces luminosos (radiación electromagnética): uno de ellos se dirige hacia la derecha y el otro, hacia la izquierda.



Desde el interior de la bodega:

En esencia, el experimento es muy similar al anterior. De nuevo: $t_2' - t_0' = t_1' - t_0'$. los sucesos son simultáneos.

Desde el muelle:

La constancia de la velocidad de la luz impedirá que se compense la asimetría que se producía en el desplazamiento del barco. El movimiento de la doble linterna no se comunica a la luz, ni para aumentarla ni para disminuirla. Los observadores del muelle llegan a la conclusión de que los haces i y d son iguales de veloces (fig 9). Eso si, contemplan como la pared de la izquierda sale al encuentro del haz i, y como la pared de la izquierda sale al encuentro del haz, y como la pared de la derecha se aleja del d. por tanto, i alcanza su destino antes que d. **Los sucesos ya no son simultáneos** en G. (fig 10).

De la contracción del espacio:

Plantearemos una situación donde los dos observadores, G y D, asistirán al mismo conjunto de fenómenos, desde perspectivas diferentes, y les pediremos que extraigan de ellos un valor de una distancia. Como el experimento anterior, describiremos desde cada punto de vista y al final compararemos sus resultados.

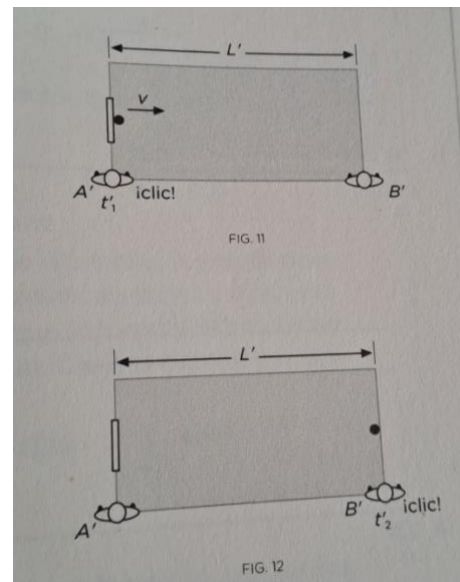
Experimento mecánico:

Dos personas A' y B' se sitúan en las esquinas de la bodega, mirando en el sentido positivo del eje y'. En la pared izquierda instalamos un lanzador automático que, cuando se active, arrojará una pelota con una velocidad v. el fenómeno físico que estudiaremos (en este caso mecánico) consiste en el lanzamiento y la parada de la bola y nos vamos a servir de el para medir la longitud de la bodega, esa distancia será el espacio que recorra la pelota desde que sale del disparador hasta que choca contra la pared de la derecha.

Desde el interior de la bodega:

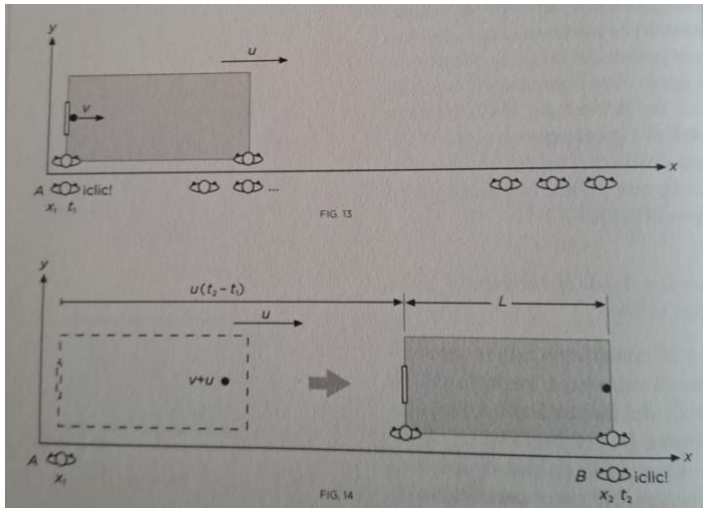
A' y B' consideran que se encuentran en reposo. A' registra el momento del lanzamiento en su cronometro t_1' . (fig 11).

Cuando la pelota choca contra la pared, B' marca el instante en su reloj t_2' (fig 12). Con el valor de v y los tiempos registrados, en D se puede deducir la distancia recorrida multiplicando la velocidad por el tiempo transcurrido. En este caso: $L' = v \cdot (t_2' - t_1')$



Desde el muelle:

Organizamos de nuevo una fila de observadores a lo largo del muelle, cada uno armado con un reloj. Llamamos A al individuo que se encuentra frente al lanzador cuando este se dispara. A registra en su cronometro el momento en que ve asomar la pelota t_1 (fig 13). Entre todos los testigos de la travesía del barco B es aquel que observa como la pelota rebota contra la pared. En ese momento marca el tiempo t_2 (fig 14).



Los observadores consideran que la pelota ya que llevaba una velocidad dentro del lanzador, antes del disparo, la del barco: u . Después del lanzamiento, la pared derecha tampoco se queda en su sitio: se aleja de la pelota con velocidad u , obligándola a recorrer mas distancia. Por tanto, aunque los observadores de G midan los mismos tiempos que los de D, para ellos el espacio recorrido y la velocidad de la

pelota son distintos. $L + v \cdot (t_2 - t_1)$ (el segundo término indica la distancia que se aleja la pared derecha durante el vuelo de la pelota).

Si nos abstraemos por un instante de la presencia del barco y solo nos fijamos en la pelota, veremos que con su velocidad $v + u$, en un intervalo de tiempo $t_2 - t_1$ recorrerá: $(v + u) \cdot (t_2 - t_1)$

Las dos cantidades tienen que ser iguales: $L + v \cdot (t_2 - t_1) = (v + u) \cdot (t_2 - t_1)$

De donde obtenemos la misma relación que antes para la longitud de la bodega: $L = v \cdot (t_2 - t_1)$

Podemos concluir que, vista desde el muelle, la pelota tiene que recorrer más distancia, porque la pared se aleja de ella, pero al mismo tiempo va más deprisa, porque incorpora la velocidad del barco. Ambos efectos se compensan. Los dos sistemas miden la misma longitud para la bodega.

Experimento electromagnético:

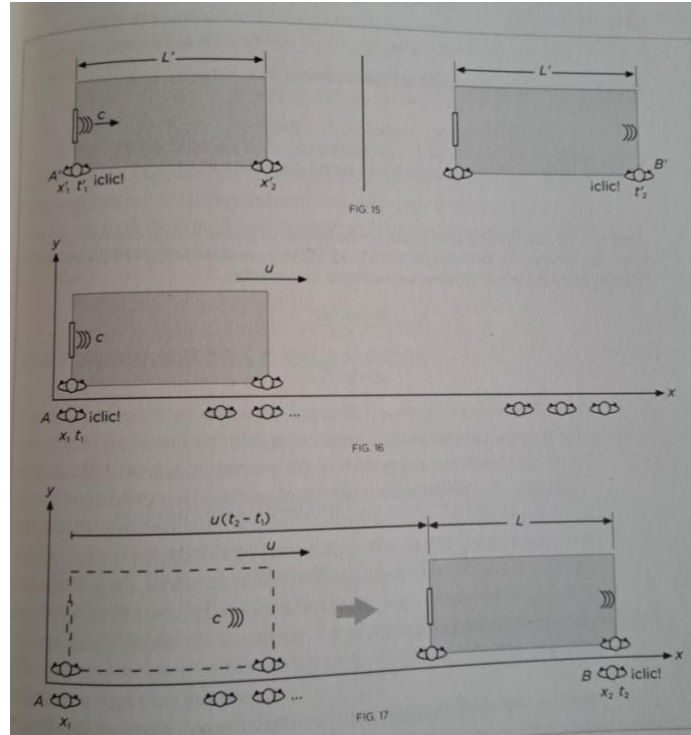
Sustituimos el lanzador por una linterna, y la pelota, por un haz luminoso. El único elemento común para los sistemas G y D será el valor de la velocidad de la luz. Todos los relojes que participan en la experiencia han salido de la cadena de montaje, pero solo podremos asumir que dos mecanismos marcan la misma hora si coinciden en el mismo marco de referencia. Para traducir coordenadas de un sistema a otro, ya sean espaciales o temporales, tendremos que recurrir a la transformación de Lorentz.

Desde el interior de la bodega:

Como en la versión mecánica del experimento, A' registra el momento en que la onda escapa de la linterna, y B', cuando alcanza la pared opuesta (fig 15). Para ellos: $L' = c \cdot (t'_2 - t'_1)$

Desde el muelle:

Los observadores ven que en la pared derecha se aleja, pero que la onda luminosa corre con la misma velocidad c (fig 16). Advierten que, antes de tocar la pared, la luz tuvo que recorrer la longitud de la bodega más la distancia que recorrió el barco entre t_1 y t_2 (fig 17): $L + u \cdot (t_2 - t_1)$



Por otro lado, si nos olvidamos del barco, en un intervalo de tiempo $(t_2 - t_1)$ la luz recorrió un espacio: $c \cdot (t_2 - t_1) = x_2 - x_1$

Igualando una y otra expresión, como antes: $L + u \cdot (t_2 - t_1) = c \cdot (t_2 - t_1) = x_2 - x_1$

De modo que: $L = x_2 - x_1 - u \cdot (t_2 - t_1)$

Los cálculos se simplifican haciendo un cambio de notación

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad \Delta t = t_2 - t_1 \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}$$

Entonces nos queda: $L = \Delta x - u \cdot \Delta t$

Como ahora suponemos que el tictac de los relojes se puede marcar con ritmos distintos, en función del sistema, para traducir las coordenadas de G y D tendremos que recurrir a las transformaciones de Lorentz:

$$\Delta x = \frac{\Delta x' + u \cdot \Delta t'}{\beta}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t' + u \cdot \frac{\Delta x'}{c^2}}{\beta}$$

Si introducimos estos valores en la expresión para L:

$$L = \Delta x - u \cdot \Delta t = \frac{\Delta x' + u \cdot \Delta t'}{\beta} - u \cdot \frac{\Delta t' + u \cdot \frac{\Delta x'}{c^2}}{\beta} = \beta \cdot L'$$

Y aplicando las transformaciones de Lorentz, se obtiene el sorprendente resultado: $L = \beta \cdot L'$

Como la velocidad del barco es menor que la velocidad de luz ($u < c$), el factor β es menor que 1 y la magnitud de L es menor que L' , es decir, el G llegan a la conclusión de que **el valor de la longitud de la bodega es menor** que el que han deducido en D. esta es la llamada Contracción de Lorentz.

Podemos plantear otra situación donde los observadores asistan al mismo conjunto de fenómenos desde sistemas de referencia inerciales distintos, para pedirles que extraigan de ellos el valor de un intervalo de tiempo. A partir del electromagnetismo, Einstein se basó en el siguiente razonamiento: partiendo de dos sistemas G y D, donde D se desplaza con respecto a G con una velocidad constante u , situó un reloj justo en el origen de coordenadas de D y se preguntó (fig. 18): ¿Cuál será el ritmo de este reloj cuando se considere el sistema en reposo?

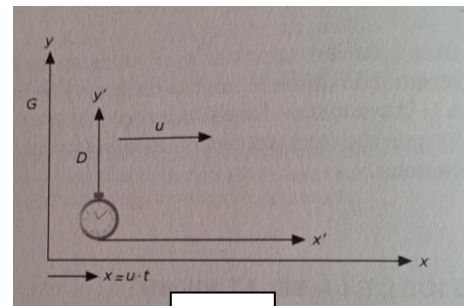


Fig. 18

Recurrió a la ecuación que relaciona los tiempos:

$$t' = \frac{t - u \cdot \frac{x}{c^2}}{\beta}$$

Para G la posición del reloj (x), es decir, el origen de coordenadas de D, se desplaza hacia la derecha con velocidad constante, $x = u \cdot t$. Sustituyendo en t' .

La respuesta que obtuvo, después de aplicar una transformación de Lorentz, fue: $t' = t - (1 - \beta) \cdot t$

A la vista de la ecuación, concluía “{...} se sigue que la lectura del reloj, considerado desde el sistema en reposo, se retrasa cada segundo en $1 - \beta$ segundos”. De ahí la percepción, para quien esta en reposo, de que el **tiempo transcurre más lentamente en el sistema en movimiento**.

La ecuación más famosa: $E = mc^2$

Esta ecuación, en algún sentido sinónimo de Einstein, expresa que la masa (cantidad de inercia), m , es equivalente a la energía, E , y nace de la Teoría de la Relatividad. El cuadrado de la velocidad de la luz, c^2 , que es una constante, actúa de coeficiente de proporcionalidad ajustando correctamente las dimensiones de energía con las masas.

La ecuación impresiona, pero los fenómenos que describe pueden pasar desapercibidos a nuestra escala. Una lámpara de 11 w, por ejemplo pierde 0.0000000000000012 kg cada segundo por la energía que la luz emite.

Como consecuencia de esta ecuación, la masa de las partículas pueden cambiar en la forma de radiación y movimiento. Inversamente, una dada energía puede dar lugar a partículas masivas.

Teniendo presente que la energía carece de rótulos (como el que posee una dada carga eléctrica: positiva o negativa), la materialización de energía conduce a la aparición de masa en forma de una partícula y simultáneamente de su antipartícula, de modo que los rótulos se cancelen, la radiación electromagnética da lugar, por ejemplo a un electrón-positrón (antipartícula del electrón) y por lo tanto la energía disponible en la radiación debe superar a la que corresponde a dos veces la masa del electrón (ya que el positrón posee exactamente la masa del electrón).

La equivalencia entre energía y masa se manifiesta en la curvatura de la trayectoria de un rayo de luz cuando viaja cercano a cualquier masa, produciéndose el llamado efecto de lente gravitacional. Otra manifestación evidente del contenido de la ecuación se presenta en los experimentos llevados a cabo en los aceleradores de partículas durante las colisiones a altas energías que dan lugar a la aparición de diferentes partículas y antipartículas, en número y calidades relacionadas con la magnitud de la energía en juego.

Relatividad General:

La estrella polar que siguió a Einstein a lo largo de su ardua travesía hacia la relatividad general – que duro casi 8 años marcados por la incertidumbre – se encendió en noviembre de 1907. Una anécdota sitúa su origen en la caída de un pintor desde lo alto de un andamio. Al interesarse Einstein por su estado, el hombre le conto que en un momento de su descenso, durante un brevísimo instante, había sentido que flotaba en el aire. “una persona en caída libre –recordaría años más tarde- no sentirá su propio peso. Me quede sobrecogido. Esa idea tan simple me dejo una profunda huella y me impulso hacia una teoría de la gravitación”. La historia por desentrañar la gravedad escribía así un nuevo capítulo de su particular mitología, protagonizada por tres físicos legendarios. Primero Galileo había dejado caer una bola de madera y otra de plomo desde lo alto de la torre inclinada de Pisa. Después vino Newton con su manzana y, por fin, se incorporó el accidente laboral del pintor de Einstein. Casi con seguridad, ninguno de los tres episodios sucedió en realidad.

Einstein descubrió la ilusión que anida en algo tan sólido, en apariencia, como nuestra sensación de gravedad. La ambigüedad entre aceleración y gravedad se extiende a cualquier valor de peso. En un ascensor, sus cambios de velocidades nos hacen sentir más ligeros o más pesados. Una incertidumbre que cabe llevarlo al extremo: si una taza de café se nos cae de las manos, se rompe contra el piso. Si las soltamos en el momento en el que se abre un pozo, nos acompañaría en nuestro descenso, flotando a nuestro lado. Si una persona sube en un ascensor con una aceleración tal que produzca una sensación exacta a su peso, este será incapaz de decidir si se encuentra en la Tierra o en espacio. Einstein llega a la siguiente conclusión: cualquier efecto gravitatorio se puede imitar mediante una aceleración y viceversa. Llamo a esta relación: principio de equivalencia.

A partir de 1905 el gran desafío que se le presentaba consistía en ampliar en marco de la Relatividad Especial. Esta admitía con naturalidad la descripción de Maxwell de los fenómenos electromagnéticos, pero no se podía decir lo mismo de los gravitatorios, tal como los

consideraba la Física Clásica. La Ley de Gravitación Universal tenía dos problemas al incorporarlo en la Relatividad Especial:

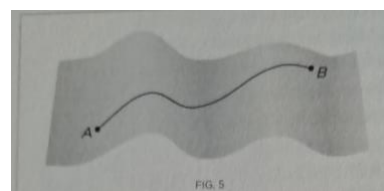
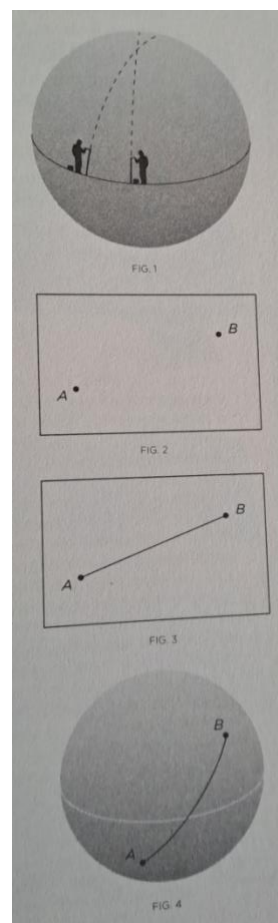
Formula:
$$F = \frac{Gm_1.m_2}{r^2}$$

En el denominador aparece r , la distancia que separa las masas. Pero Einstein sabía que, debido a la contracción de Lorentz, dos observadores, uno en movimiento y otro en reposo, no tiene porque medir las mismas distancias ¿Cuál de ellas se debía introducir en la ecuación? Por otro lado, y quizás más importante, en la expresión no figura el tiempo. Esto implica que la acción a distancia es simultánea. Si m se desplaza con respecto a m' , las fuerzas cambian de modo inmediato, sin que importe que distancia las separe. Al advertir la equivalencia entre gravedad y aceleración, Einstein abrió la vía que le iba a permitir insertar la interacción gravitatoria en la Relatividad.

En el movimiento donde alcanzamos el punto más alto, justo antes de iniciar el descenso, y nos borran la memoria, durante una fracción de segundo seremos incapaces de distinguir nuestra caída de la ingravidez. En esta ambigüedad descansa el principio de equivalencia. Sin embargo si dejamos pasar el tiempo, observamos una desviación de la ingravidez. Existe un símil geométrico: recorriendo una distancia corta no podemos discernir si la Tierra es plana o redonda. En un largo viaje acabaremos por detectar alguna desviación de la línea recta, es decir, la curvatura del planeta. Esta analogía esconde la clave para acomodar la gravedad en el seno de la teoría relativista.

En una superficie plana, dos individuos que tracen perpendiculares a una misma recta dibujaran dos paralelas, que no se encontraran. Si se mudan al ecuador, la situación cambia (fig. 1). En función del tamaño, se terminarían encontrando. Imaginemos que tenemos una hoja de papel y se dibujan dos puntos (fig. 2). Si nos piden que unamos mediante el trazo continuo más corto, escogeremos la línea recta (fig. 3). En el caso de una esfera, la respuesta se convierte en un arco de circunferencia. (Fig 4).

Estos trazados que los distingue del resto de las trayectorias se llama Geodésica. No importa la forma de la superficie, seguiremos encontrando Geodésicas aunque tengan que serpentear superando todas clases de irregularidades (Fig 5).



Para determinar la distancia entre dos puntos, sea una superficie plana u ondulada: Gauss construyó una función matemática (la métrica, que se representa mediante la letra g) que mostrase la información, para cada punto de una superficie, de cuanta distancia se recorre al dar un paso pequeño, según en qué dirección nos desplazamos. Esta información cambia con la orientación y de punto a punto en una superficie accidentada pero no plana.

La métrica puede ser considerada como el manual de instrucciones para armar una superficie, puesto que encierra todos los datos que queremos extraer de ella. Las propiedades geométricas de un espacio deben ser independientes del sistema de coordenadas que escojamos para describirlo: la distancia entre dos puntos no puede ser afectada por una transformación de coordenadas. En el lenguaje algebraico se dice que la distancia es un invariante. A partir de la métrica se puede calcular la distancia entre dos puntos de una superficie. También permite construir otros invariantes, como la curvatura, una magnitud que indica cuanto se desvía una superficie del “recto comportamiento” euclideo.

Einstein encuentra una analogía entre uno de los postulados “Las Leyes físicas adoptan la misma forma en cualquier sistema de referencia que consideremos a velocidad constante” con el enunciado geométrico: “Los invariantes como la distancia y la curvatura adoptan la misma forma desde cualquier sistema de coordenadas”. Este paralelismo, sumado la analogía del principio de equivalencia, lo situaba a un paso de ensamblar por fin física y geometría.

Según el propio Einstein, la Teoría de Relatividad General se resume en que la presencia de un campo gravitatorio (la presencia de masas) altera las reglas de la geometría del espacio-tiempo. El efecto es hacer aparecer a ese espacio-tiempo curvado. Minkowski (1864-1909) dió el tratamiento matemático: El espacio-tiempo es una descripción tetradimensional del universo que incluye las tres dimensiones espaciales (largo, ancho y alto) y al tiempo como cuarta dimensión.

El espacio-tiempo de Minkowski ofrece cierto rigor porque es plano, como corresponde a un escenario donde los cuerpos se desplazan libres de perturbaciones gravitatorias. Desde la perspectiva de las cuatro dimensiones, los sistemas inerciales, que se desplazan a velocidad constante, se pueden representar mediante puntos o líneas rectas. Al introducir la gravedad las rectas se tuercen. La gravedad acerca los cuerpos igual que la curvatura de la esfera aproxima a los dibujos de paralelas. Del mismo modo que la línea recta de un mundo plano se transforma en un arco al recorrer una esfera. Las trayectorias se convierten en geodésicas curvas al deformarse en espacio-tiempo de la relatividad general.

La Relatividad General toma el espacio plano de Minkowski para deformarlo ¿Quién es el responsable de la distorsión? La presencia de la masa. Cuanta más masa (energía) “inyectemos” en su interior, más se separa el espacio de la planitud. En palabras del físico estadounidense John Wheeler: “La gravedad no es una fuerza ajena y física que actúa en el espacio, sino una manifestación de la geometría del espacio justo allí donde se encuentra la masa”.

Podemos sintetizar el núcleo de la relatividad general en dos enunciados:

La trayectoria de un cuerpo en un campo gravitatorio adopta la forma de una geodésica del espacio tetradimensional.

La relación entre la presencia de masa y la forma del espacio tetradimensional viene dada por la ecuación:

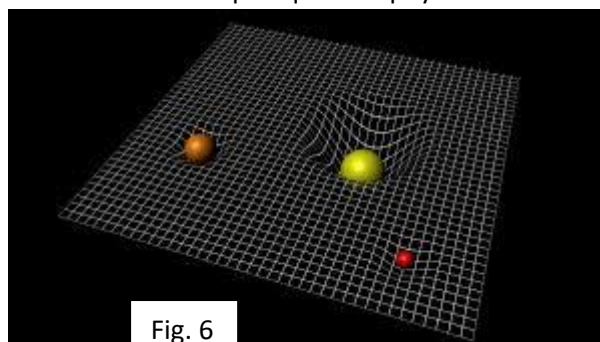
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Recurrimos de nuevo a Wheeler para traducir esta expresión al lenguaje coloquial: “El espacio le dice a la materia como moverse, y la materia le dice al espacio como debe curvarse”. El lado izquierdo de la expresión representa el espacio de la planitud minkowskiana, es decir, miden su curvatura en cada punto. El segundo término se relaciona con la masa.

La ecuación de Einstein conserva una propiedad geométrica decisiva. Esta construida con invariantes, y por lo tanto, mantiene su forma para cualquier observador. Si la distancia y la curvatura no dependen del sistema de coordenadas, los fenómenos físicos también pueden depender del punto de vista que elija un observador para describirlos. Es una generalización de uno de los dos postulados de la relatividad especial y afirmar: Las Leyes de la Física adoptan la misma forma en cualquier sistema de referencia que consideremos en movimiento acelerado.

El movimiento de los cuerpos en un campo gravitatorio:

Supongamos una sábana extendida. A continuación, se sitúan en su centro una esfera pesada, como una bola de bowling. Al agitar con suavidad la sábana, desatarán sobre la tela un oleaje de surcos y pliegues, que pondrá la bola en movimiento. La inercia impulsará a dibujar toda clase de trayectorias, a medida que evita pequeños montículos, rueda cuesta abajo en las pendientes o se frena al trepar un declive. La forma que adopta la superficie de la tela, su geometría, que las personas pueden alterar a su antojo, dicta el recorrido de la bola. Sin embargo, la esfera no se limita a interpretar un papel pasivo, puesto que su peso y movimiento también modelan la forma de la sábana. Su presencia también perturbaría, por ejemplo, la trayectoria de una bolita que se lanzara en línea recta sobre la tela. ¿Qué ocurriría en una sábana en calma, que además se volvería transparente? Un espectador newtoniano vería como una fuerza misteriosa, cuyo origen situaría en el centro de la bola, atrae a la bolita, con una acción que, en apariencia, se ejerce de manera inmediata y a distancia. Seguramente no se le ocurriría achacar la curva que dibuja la bolita de cristal a una deformación de una sábana invisible, que transmite con un cierto retardo cualquier cambio en su geometría, provocada por la presencia y el movimiento de todos los cuerpos que se apoyen sobre ella. Esta analogía se puede extender a los campos gravitatorios, donde la presencia de masa (también energía) deforma el tejido del espacio tiempo, y así se frena y acelera, desvía de su trayectoria o atrapa a los cuerpos en una coreografía dinámica, en cuya creación colectiva participan todas las masas. (fig 6)



La fecha clave que determina el triunfo de la Relatividad General es 1919 cuando Arthur Eddington (1882-1944) se propuso llevar a cabo un experimento para estudiar el cielo durante el eclipse solar que ocurrió el 19 de mayo de ese año. Para ello había conseguido, a pesar de la situación de crisis en Inglaterra y en toda Europa, un apoyo económico de unas mil libras esterlinas para poder realizar la experiencia. La experiencia consistía en estudiar imágenes del cielo, detrás del Sol durante un eclipse, tomando fotografías en dos puntos cercanos al Ecuador para aumentar la precisión. Uno de los puntos elegidos fue la Isla de Principe cerca de

la Costa Occidental Africana, y el otro Sabral en Brasil. Cuando finalmente se pudieron estudiar las imágenes, se consiguió confirmar la Teoría Relatividad General era correcta. Es decir, la observación experimental coincidía con sus predicciones. La validación de la Teoría elevó no solo la mirada de los periodistas y de sus lectores hacia el firmamento, también la de los científicos. Einstein se convierte en una celebridad.