

Relatividad General – Una Explicación

George G. Cuevas

Resumen: Comenzamos con la ley de la Inercia que enunció Isaac Newton; mencionando como ejemplo la Novela de Julio Verne hablamos de un viaje a la Luna y la idea de flotar en el espacio. Damos una definición de lo que constituye un marco lorentzeano. Caída libre y eliminación del efecto de gravedad. Hablamos de cómo substituir los efectos de gravedad por una aceleración del marco de referencia.

Afirmamos que la gravedad se manifiesta por efectos de marea. Aspecto local de marcos de referencia – marco local versus marco global. Introducimos el concepto de movimiento inercial de Einstein. Este es un nuevo movimiento y hay necesidad de definir nuevamente lo que **constituye "movimiento inercial."** Damos una definición de lo que son efectos gravitacionales y comparamos las diferencias del punto de vista de Newton versus el punto de vista de Einstein. Conciencia inercial. Estructura del tiempo-espacio, explicación del concepto de curvatura.

Palabras Clave: Marco lorentzeano. Caída libre. Principio de equivalencia. Movimiento inercial. Curvatura. Estructura del espacio-tiempo

Abstract: First we describe Newton's law of Inertia (First Law). We cite Jules Verne's novel "Trip to the Moon" as an example of "free float." We define the prerequisites that are necessary for a reference frame to qualify as "inertial." Free fall as a method to eliminate gravity. We speak of how we can substitute gravitational effects by an equivalent acceleration that is applied to the reference frame.

We assert that gravitational effects are manifested by tidal effects. Deformation. Influence of Mom-energy on tidal effects Local aspect of reference frame. Multitude of local frames versus single global frame. We introduce **Einstein's inertial motion. This is a new type of motion not described by Einstein and there is a need to modify Newton's law of Inertia. We describe gravitation and compare Newton's views versus Einstein's views.** Finally we introduce the concept of curvature of time-space.

Key words: Lorentzean Frame of Reference, free fall equivalence principle, inertial motion, curvature, structure of time-space.

Relatividad General, Una Explicación

Marco Inercial

Sir Isaac Newton enunció su primera ley de la Mecánica y dice: “ *Todo cuerpo material permanece en su propio estado de reposo o estado de movimiento uniforme en línea recta y dicho estado no cambia a menos que el cuerpo material fuera sujeto a fuerzas **exteriores...*** ” Esta es la ley de la inercia. Nosotros vamos a invertir esta ley y con ello vamos a definir el concepto de marco de referencia inercial. Pero antes vamos a comentar acerca del tema de la inercia.

En la segunda parte del Siglo XIX, el famoso novelista francés Julio Verne escribió sus novelas “Un Viaje de la Tierra a la Luna” y “Viaje Alrededor de la Luna.” Aquí el Sr. Verne nos dice que un eminente diseñador de armamentos construyó un cañón gigantesco. El cañón fue empotrado en medio de unas montañas y apuntaba al cielo. En el momento oportuno el cañón disparó una cápsula espacial que pesaba 10 toneladas. En ella iban 3 personas y varios animales.

Durante el viaje (la nave es un proyectil balístico), Julio Verne nos dice que los pasajeros podían caminar cómodamente en la aeronave de manera que el piso era la superficie al lado que mira directamente con la Tierra. Los pasajeros notan que a medida que se alejan de la Tierra, la presión del suelo contra los pies disminuye y llega un punto en el cual los pasajeros pueden flotar libremente en la aeronave. Más tarde durante el viaje, los pasajeros comienzan a notar que el lado opuesto a la Tierra comienza a empujar y ejercer presión y de repente ellos notan que pueden caminar en la superficie del lado opuesto a la tierra.

Temprano durante el viaje los pasajeros notan que un perro sufrió golpes durante el impulso y murió. El cadáver del perrito emite aroma desagradable y no se puede soportar. Los pasajeros deciden deshacerse del cadáver y por medio de una ventana echan el cuerpo afuera de la nave. Durante el resto del viaje los pasajeros notan que el cuerpo del perro flota en el espacio al lado de la cápsula y nunca se separa. Quiere decir que el cadáver del perrito perseveró en su proximidad a la nave durante todo el viaje.

La moral de esta historia es que Julio Verne estaba acertado cuando se imaginó que el perro flotaba en el espacio y seguía la misma trayectoria de la aeronave. Después de todo, el perro recibió el mismo impulso del cañón como recibió la aeronave y es creíble que el perro siga flotando a la par de la nave durante el viaje. Lo inesperado es que Julio Verne falló en lo que se refiere a los pasajeros. Igualmente, al perrito, los pasajeros debían de haber flotado

libremente todo el tiempo adentro de la aeronave lo mismo que el perrito afuera de la aeronave. Nuestra experiencia el día de hoy con plataformas en el espacio confirma este hecho. Esto no quiere decir que los pasajeros no son capaces de empujarse contra las paredes y recibir impulso que los lleva en línea recta a la pared opuesta. Lo que quiero decir es que durante el viaje, los pasajeros flotan libremente y no se nota aceleración alguna entre ellos a pesar de que el campo gravitacional de la Tierra o de la Luna permanece activo durante la mayor parte del viaje. Lo que ocurre es que la aeronave y todos los ocupantes recibieron el mismo impulso inicial y después de este impulso ellos y la aeronave van en la misma trayectoria y no se nota aceleración alguna entre ellos mismos. ¿Que les parece? Es como si el campo gravitacional se haya cancelado. ¡No existe aceleración entre ellos mismos! Durante la primera etapa del viaje los pasajeros y la aeronave flotan en el campo gravitacional de la Tierra y durante la etapa final flotan (caen) en el campo gravitacional de la Luna, pero entre ellos mismos no hay aceleración. La Aeronave califica como una plataforma inercial. Esto constituye una violación a la ley de Ley de Inercia de Isaac Newton y la única manera de resolver este dilema es decir que el efecto gravitacional no consiste en una fuerza.

Temprano en el Siglo XVII Galileo Galilei llevo a cabo experimentos para estudiar la aceleración de la gravedad. Nos dice la historia que Galileo subió a la Torre de Pisa y desde allí dejo caer cuerpos de diferente masa y material. Supuestamente, los cuerpos de mayor masa deberían recibir mayor aceleración y caer más rápidamente. Sin embargo y para su propio asombro Galileo observó que todos los cuerpos caen con la misma velocidad y toman el mismo tiempo en atravesar la altura de la torre. Esto sucede a pesar de que son cuerpos de diferente masa. Ciertamente todos ellos están sujetos al efecto gravitacional, pero como todos ellos reciben el mismo efecto (aceleración con respecto al suelo), dicho efecto se cancela y no hay aceleración relativa entre ellos mismos. Entonces estos cuerpos califican como plataformas inerciales. Esto es contrario a la primera ley de Newton.

Experimentos llevados a cabo en plataformas espaciales y lo mismo aquí en el Planeta Tierra confirman que:

- Cuerpos no sujetos a fuerzas externas preservan su estado de reposo o se mueven en trayectoria rectilínea con velocidad fija
- Verificación del estado de reposo o verificación de movimiento rectilíneo y con velocidad fija se debe llevar a cabo por medio de observación usando una plataforma (marco) inercial.
- La masa inercial es la misma que la masa gravitacional (esto se sabe a través de experimentos)

Movimiento inercial como el que describe la primera ley de Newton significa movimiento en dirección fija y con velocidad fija. La masa inercial es responsable por la rigidez de este tipo de movimiento porque es la misma masa la que resiste a cambios de dirección y velocidad. La masa gravitacional da lugar a la fuerza de gravedad y también a otro tipo de fuerza externa que se aplica. Hemos enunciado la ley inercial de Newton y corresponde a la Mecánica Clásica. Por cierto, la Física Moderna (relatividad) disputa ciertos aspectos de esta ley. Más adelante vamos a resolver estas diferencias. Por el momento quiero que estemos de acuerdo en el tema de cuáles son los requisitos para que un marco **de referencia sea certificado como "inercial."**

Se puede decir que un marco es inercial si el movimiento de partículas de prueba (test particles) es rectilíneo y con velocidad fija o si el estado de reposo permanece en efecto por un periodo de tiempo sujeto al grado de exactitud del experimento. El marco tiene que ser suficientemente pequeño de manera que si hay efectos gravitacionales presente, estos efectos no son perceptibles dentro del rango de exactitud requerido por la experimentación en progreso.

Esta prueba se puede llevar a cabo en espacio lejano y no sujeto a efectos de gravedad y también se puede llevar a cabo en presencia de gravedad. Cuando no hay gravedad, el movimiento de partículas de prueba es rectilíneo y de velocidad fija. Partículas en reposo continúan en reposo por una eternidad. Observando cada partícula, las distancias entre una y otra son conservadas y no se nota aceleración de una u otra partícula con respecto a las demás. Cuando hay efectos gravitacionales dentro del marco, el movimiento de cada partícula o el estado de reposo continúa de la misma manera de cuando no había efectos gravitacionales. Tampoco hay aceleración mutua entre las mismas partículas. Es cierto que la gravedad ejerce su efecto adentro del marco, pero estos efectos no se notan ya que se aplican igualmente a todas las partículas dentro del marco. Hay aquí una ambigüedad que necesitamos explicar:

Ambigüedad

No es posible distinguir por medio de observación si hay un campo gravitacional dentro del marco o si el marco está libre de efectos gravitacionales. El comportamiento de las partículas de prueba es el mismo en estos 2 casos. Este dilema nos causa consternación y hay necesidad de modificar la ley de inercia de Isaac Newton. Esto lo llevó a cabo Albert Einstein.

Por supuesto, si el experimento de prueba fuese observado desde una plataforma en tierra firme, el observador vería que el marco (con todas sus

partículas dentro de dicho marco) acelera hacia la tierra y es posible discernir cuál es el marco que está sujeto a efectos gravitacionales. Sin embargo, hay que notar que de acuerdo con el principio de equivalencia de Einstein, un marco de referencia en tierra firme no constituye una plataforma inercial. Esto es porque al estar en tierra firme el observador recibe en sus pies una aceleración equivalente al peso del observador que lo empuja hacia arriba y cancela el efecto gravitacional. Por otro lado, Newton considera a un marco en tierra firme libre de fuerzas externas (aceleración) como una plataforma inercial. Aparentemente, Newton y Einstein no están de acuerdo en lo que se refiere a marco inercial. Esto lo vamos a resolver más tarde.

Sin embargo, nuestra experiencia de cada día nos dice que el comportamiento de masas en movimiento es más simple cuando se observa desde una plataforma inercial que va en caída libre si hay gravedad. En cambio, cuando se observan estos mismos movimientos desde tierra firme, la partícula que se pone en reposo no flota, pero cae contra el suelo inmediatamente. La partícula que recibe el impulso inicial describe una trayectoria curva y cae finalmente en el suelo (por favor ver Figura 17 ^[Nota 1]).

Eliminar los efectos de gravedad.

Dejar ir en caída libre el marco de observación es una manera de eliminar los efectos de gravitación y simplificar el estudio de la mecánica. También es posible introducir efectos de gravitación adonde no los hay. Por ejemplo, en una nave espacial que flota en una región libre de fuerzas gravitacionales. En esta nave digamos flota libremente un astronauta y de repente el motor de propulsión arranca y propulsa la nave con una aceleración equivalente a la fuerza de gravedad [$9,8 \text{ metros}/(\text{segundo})^2$]. De inmediato el astronauta va a percibir aceleración (fuerza) que lo va a presionar contra el lado de la aeronave que recibe la propulsión. El astronauta ya no puede flotar, pero puede caminar exactamente en la misma manera que si hubiese fuerza de gravedad dentro de la nave. Si el astronauta fuera a cerrar sus ojos y reflexionar, allí notaría que es imposible discernir si ha entrado a un campo adonde hay gravitación o si es la misma propulsión de la aeronave que aplica impulso a sus pies y lo sostiene como si hubiera gravedad. También hay que notar que si el astronauta fuera a soltar una masa (por ejemplo, una moneda) a cierta altura del piso de la aeronave, esta moneda caería inmediatamente contra el piso debido a la aceleración del piso de la nave. El astronauta también no podría distinguir si este efecto es debido a gravitación o si es la aceleración de la nave lo que causa que la moneda no se sostenga en el espacio. Por esta razón decimos que efectos gravitacionales se pueden substituir por aceleración del marco de referencia que es proporcionada por causas externas.

¿Por qué cae la moneda cuando está suelta? Hay 2 versiones que explican este fenómeno:

- Isaac Newton nos diría que la moneda cae porque la tierra aplica una fuerza de atracción (gravedad) que va en dirección hacia el centro de la tierra. Dicha fuerza es $F = mg$
- Albert Einstein nos diría que la moneda no está sujeta a fuerza alguna. La **moneda cae porque perdió al soltarse el impedimento a "caída libre."** Este impedimento consiste en una fuerza inercial equivalente al peso de dicha moneda y aplicada no a la moneda, pero sí al marco inercial que la sostenía

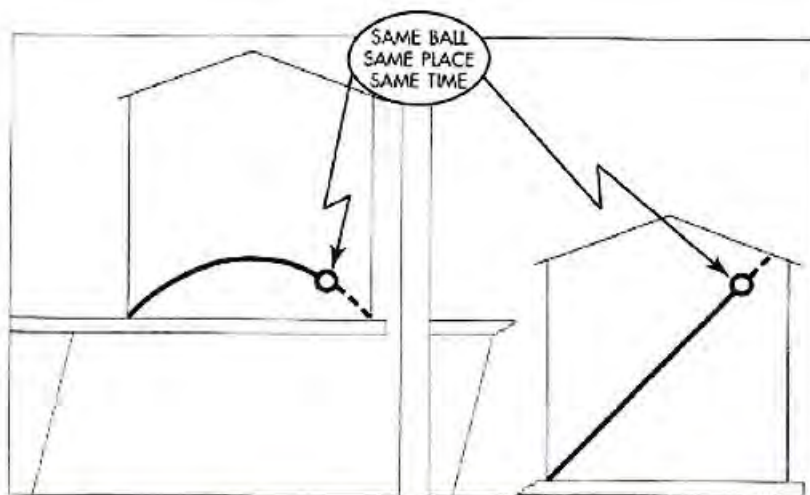


Figura 17. Aquí están 2 versiones de la trayectoria de una pelota. ¿Cuál es la verdadera versión? La pelota recibe un impulso inicial y después sigue su trayectoria. Al lado izquierdo aparece la versión del observador fijo en tierra firme. Al lado derecho aparece la versión del observador que flota en el campo gravitacional que va en caída libre después que la habitación se desprendió de la tierra firme. Ambas versiones de la trayectoria son válidas pero la versión mas simple es la de línea recta.

Como testigo, para resolver el dilema podemos llamar al astronauta. Este señor sería testigo de que estando en una región libre de efectos de gravitación (en la aeronave), la moneda flotaba en el espacio y no caía. Sin embargo, cuando se activó la propulsión de la aeronave, la moneda cayó contra el suelo. Con esta respuesta sería absurdo el proponer que al activar el motor de propulsión de la aeronave, una fuerza misteriosa aplicada directamente a la moneda impulsó dicha moneda contra el piso de la aeronave. Por el otro lado, si decimos que la propulsión de la aeronave al ser activada lanzó la misma aeronave (el piso) contra la moneda y por esta razón el piso se estrelló con la moneda.

La segunda respuesta es más acertada.

Es más, ahora podemos explicar el por qué objetos que se sueltan caen contra el suelo inmediatamente. Esto es porque al soltar dicho objeto pierde la **fuerza (inercial) que impedía "caída libre" del mismo.**

Fuerzas inerciales

Fuerzas inerciales son fuerzas que residen en la plataforma de observación. Generalmente hay que compensar y extraer de los resultados de experimentación los efectos de estas fuerzas ya que son ajenas al experimento. Ejemplo de fuerzas inerciales es la fuerza de Coriolis. Esta fuerza causa desplazamiento lateral en proyectiles y se debe a la rotación de la tierra. La fuerza de Coriolis también depende en latitud, y el desplazamiento lateral es en sentido opuesto en el Hemisferio Norte comparado al que ocurre en el Hemisferio Sur. La mira de cañones montados en tierra firme o en barco destructor ("**destroyer**") **tiene que ser ajustada para corregir este error.**

Durante la primera guerra mundial hubo encuentros navales cerca de las Islas Malvinas entre barcos alemanes e ingleses. La historia nos dice que los cañones ingleses tenían la mira ajustada para operaciones en el Hemisferio Norte a 50 grados de latitud. Por supuesto, se les olvido reajustar la mira cuando fueron al Hemisferio Sur. Precisamente, las Islas Malvinas se encuentran a latitud de 50 grados al sur. De esta manera, la sorpresa para los ingleses fue que los proyectiles no daban con el blanco y el error era el doble del ajuste que llevaban para operación en el hemisferio norte. Nunca supe quién ganó en este encuentro naval. Por supuesto, Eddy nos va a decir que los alemanes ganaron.

No quiero decir que la fuerza de gravedad es ficticia. La fuerza de gravedad es real y hay 2 versiones que la explican. La versión de Newton y la versión de Einstein. Einstein nos dice que la gravedad no se debe tratar como un campo de fuerza, pero es parte del ambiente geométrico del espacio-tiempo. Todo esto lleva extraña apariencia. La versión de Einstein es más compleja y difícil de entender, pero lleva más alcance que la teoría de Newton porque explica muchos de los fenómenos en el cosmos que la versión de Newton no puede explicar. La teoría de Newton es más sencilla y se explica en términos de un campo de fuerza debido a la concentración de masas en el centro y alrededor del Planeta Tierra. La versión de Newton es simple y produce resultados que llevan suficiente exactitud para resolver la mayoría de problemas que encontramos con el desplazamiento de satélites y cuerpos celestiales en el espacio. En el límite de simplificación de un problema cuando una solución exacta no es necesaria, las aproximaciones que se obtienen usando el método de Einstein convergen a la solución rendida por Newton. Sin embargo, cuando se trata de efectos mayores de gravedad como por ejemplo, en la vecindad de un "White Dwarf" (estrella gigantesca que consumió toda su fuente de energía) o en próxima cercanía a una

estrella de neutrones, la Teoría de Einstein prevalece y nos da resultados que están de acuerdo con la realidad.

Cuando Einstein nos dice que hay que eliminar la fuerza de gravedad, lo que quiere decir es que no hay tal cosa como una fuerza de gravedad (tiene razón) pero sin embargo hay efectos gravitacionales que son parte de la geometría del ambiente. Pero estos efectos se pueden eliminar cuando el observador va en caída libre. La gravedad y sus efectos persisten, pero si no son de interés en el problema es mejor ponerlos en segundo plano y reducir la complejidad de la escena. Tiene mucha razón el Señor Einstein. Después de todo, las criaturas terrestres vamos montados en el planeta Tierra y caemos libremente en el campo gravitacional de nuestra estrella: el Sol. ¿Quién se preocupa por efectos gravitacionales del Sol?

Figura 17 (Nota 1) nos demuestra que el movimiento de cuerpos es más simple cuando se observa dicho movimiento desde un marco de referencia que va en caída libre. Cuando se observa el mismo fenómeno desde una plataforma en tierra firme las cosas se complican. Esto es, el movimiento rectilíneo se convierte en una trayectoria curva y objetos que se sueltan libres caen y se estrellan contra el piso en lugar de permanecer fijos. Todas estas complicaciones no son necesarias ya que son solamente artefactos que resultan de nuestra mala fortuna de haber seleccionado una plataforma de observación que no va en caída libre.

Albert Einstein nos dice que para poder entender los efectos de gravedad hay que deshacerse de la fuerza de gravedad. Vamos entonces a usar marcos de referencia que van en caída libre. ¿Cómo se manifiestan entonces los efectos de gravedad? La respuesta es: La gravedad se manifiesta por medio de **“efectos de marea.”**

Efectos de marea

Primeramente, vamos a usar un bus que va en caída libre en posición horizontal cerca de la superficie de la Tierra (Por favor mirar Figura 18 (Nota 1)). Al momento de soltar el bus, se sueltan también 2 balines de acero que están a distancia de 20 metros de separación (mirar las 2 flechas). De acuerdo con Newton, estos 2 balines están sujetos a la fuerza de gravedad que apunta en dirección al centro de la Tierra. Al mismo tiempo que va cayendo el bus se nota que los balines se van acercando el uno al otro, no porque hay una fuerza de atracción entre los balines, sino porque las líneas que demarcan la trayectoria convergen a medida que el bus cae. El efecto que vemos aquí es entonces la disminución de la distancia de separación de los balines.

Ahora vamos a dejar caer el bus en posición vertical. Los balines van a llevar la misma distancia de separación, pero esta vez van alineados en la misma

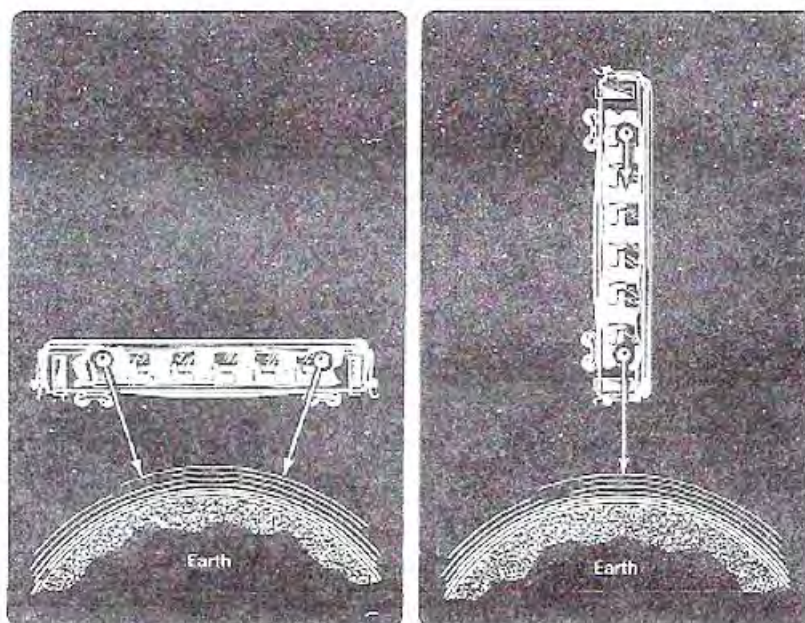


Figure 18. Efectos de marea consisten en reducción de distancia (horizontal) mientras la separación vertical aumenta

dirección que apunta hacia el centro de la Tierra. Esto es, en la misma dirección a la fuerza de gravedad (de acuerdo con Newton). Al soltar el bus, soltamos también los balines y notamos esta vez que el balín que lleva más proximidad a la Tierra cae más rápido y esto causa que la separación aumente a medida que va cayendo el bus. El efecto es entonces que la distancia de separación aumenta durante la caída. Newton por supuesto explicaría las cosas en términos de que el balín de abajo lleva más proximidad a la Tierra y por eso cae más rápidamente que el balín de arriba.

En resumen, hemos visto que en la dirección horizontal hay reducción de espacio; mientras que en la dirección vertical hay incremento de la distancia.

El mismo efecto de convergencia de las líneas de fuerza se puede notar en Figura 19 (Nota 1). Dicha figura nos enseña cómo un conjunto de partículas de prueba que inicialmente formaban un círculo al comenzar el proceso de caída libre, dicho círculo se encoge en la dirección horizontal mientras que en la dirección vertical el diámetro estira de manera que el círculo llega ser un ovaloide. **Esto es lo que se llama "efectos de marea." Esta deformación conserva intacto el volumen porque la figura se estira en dirección vertical pero al mismo tiempo se encoge en la dirección horizontal.**

Efectos de marea son pequeños y hay que usar instrumentos de alta precisión para notar su presencia. El cambio de tamaño es proporcional al tamaño original. Por ejemplo, una distancia radial de 20 metros se estira 2 milímetros. Si se dobla la distancia, el cambio de tamaño crece proporcionalmente.

Falla de uniformidad en la dirección que apunta la fuerza de Gravedad

A este aspecto del campo de gravedad también lo llamamos **“inhomogeneidad direccional.”** Vemos que el campo de gravedad cerca de la Tierra no es homogéneo porque las fuerzas apuntan en dirección al centro de la Tierra y esta dirección cambia de acuerdo con la posición de cada partícula. Este cambio de dirección es lo que causa la falta de homogeneidad. Para que un marco califique como marco inercial hay que evitar estos efectos ya que el movimiento de partículas de prueba dentro de dicho marco debe ser rectilíneo (la trayectoria debe ser uniforme y homogénea). Entonces nos vemos obligados a limitar el tamaño de dicho marco, o limitar la precisión del equipo con que medimos distancias de manera que si hay efectos de gravedad, estos no son perceptibles y entonces el marco califica como marco inercial.

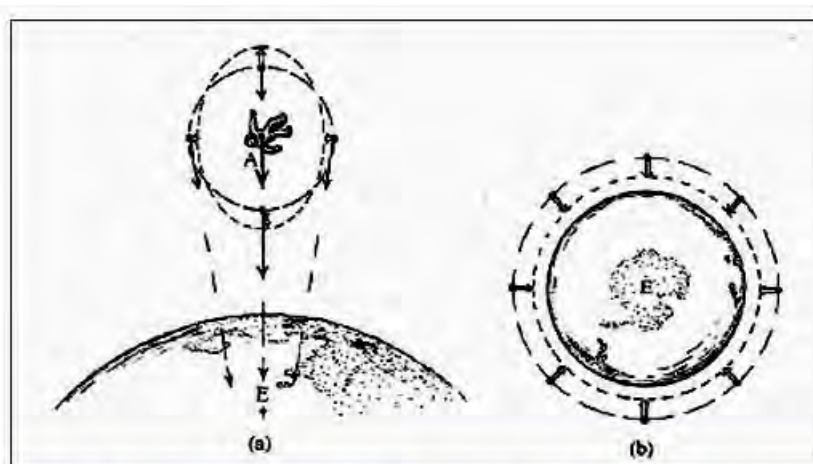


Figure 19. (a) Deformación de un círculo de partículas de prueba. La nueva figura es un ovaloide. La reducción en diámetro en el plano horizontal es acompañada por un aumento de diámetro en el plano vertical de manera que el volumen se conserva.

Aspecto local del marco de referencia

Marcos de Referencia al estilo “Einstein” tienen aspecto local y generalmente contienen la estructura del espacio-tiempo en la localidad en donde reside el punto de observación. Esto es directamente opuesto al concepto newtoniano en donde hablamos de un marco global en donde reside la fuente del campo de gravedad. Los marcos al estilo Einstein son pequeños porque el tamaño es limitado por la adherencia, con la condición de que partículas de prueba lleven movimiento rectilíneo y que los efectos de marea sean imperceptibles.

En este sentido, miramos los efectos gravitacionales como un efecto local que se desarrolla en un marco sencillo. Este es un marco lorentzeano. Un marco de la familia de marcos lorentzeanos de los cuales hablamos anteriormente. La gravedad entonces tiene un aspecto local. De esta manera no es necesario llevar cuenta de dónde o en qué dirección está el centro de la Tierra. Es necesario solamente observar el comportamiento de masas de prueba dentro del marco.

Les recuerdo que nuestro marco de observación va en caída libre. Efectos de gravedad se han eliminado y el movimiento de masas dentro de nuestro marco es rectilíneo y uniforme.

Esto es lo que se llama también “movimiento inercial” y es un genuino producto de Albert Einstein ya que las leyes de Newton no anticiparon este tipo de movimiento. Hay necesidad entonces de incorporar este tipo de movimiento en la estructura de tiempo-espacio y modificar las leyes de Newton (inercia) para que estén de acuerdo con el movimiento inercial de Einstein.

Movimiento Inercial de Einstein

Anteriormente habíamos dicho que movimiento inercial era un tipo de movimiento en el cual una masa se desplaza con velocidad fija o permanece en estado de reposo cuando no hay fuerza alguna actuando en dicha masa. Pero en vista de que partículas de prueba en un marco inercial que está bajo efectos gravitacionales exhibe precisamente este tipo de movimiento inercial, la misma fuerza de gravedad constituye una fuerza externa y ahora la definición de Newton es inválida. Es más, en vista del Principio de Equivalencia, la fuerza de gravedad puede ser substituida por una aceleración externa aplicada al marco de referencia y no se sabe si el efecto gravitacional se debe a aceleración externa o si son efectos gravitacionales los que causan que una partícula de prueba se estrelle contra el suelo. De todas maneras, el efecto gravitacional se puede eliminar al llevar a cabo el estudio del comportamiento de masas en un marco de referencia que va en caída libre. Nos parece que hubo necesidad del genio de Einstein para notar estas diferencias. De manera que la nueva definición de movimiento inercial es:

“Movimiento inercial es aquel movimiento en el cual el total de fuerzas externas que actúan en dicha masa, excluyendo la

gravedad es "cero." Esto quiere decir que la masa va en caída libre porque de esta manera la fuerza de gravedad también se reduce a **"cero."**

Esta nueva definición de movimiento inercial modifica la ley de inercia de Newton y resuelve el dilema que mencionamos anteriormente. Por supuesto la idea de caída libre ha de causar preocupación y no los culpo. Si fuera posible perforar un túnel que pasa por el centro de la Tierra y conecta 2 puntos en la superficie y si nuestro marco en lugar de chocar con la superficie fuera a penetrar a través de dicho túnel, nos encontraríamos con que a medida que continuamos la caída libre (no hay amortiguación debida a compresión del aire) y pasamos por el centro de la Tierra, el marco comienza a decelerar. El viaje a través del túnel duraría 42 minutos y llegaría un momento en el cual no vamos en caída, pero vamos ascendiendo hasta que el marco sale en el lado opuesto. Por supuesto, hemos ignorado el movimiento de rotación y traslación de nuestro planeta. Durante todo este tiempo de caída libre nos encontraríamos con que las masas de prueba conservan su estado de reposo o se mueven con trayectoria rectilínea. ¡No hay gravedad!

La influencia de la masa local en los efectos de marea

Este es un momento propicio para explicar que los efectos de marea consisten en deformación en la cual hay preservación de volumen. El sistema de masas de prueba que originalmente tenía forma de esfera ha perdido la simetría y se ha transformado en un elipsoide. Las dimensiones laterales se han encogido (son 2 dimensiones laterales) y las dimensiones verticales (en dirección al centro de la Tierra) se han estirado. La deformación que ocurre conserva el volumen. Cuando estudiamos la Mecánica Relativista vimos que el Mom-Energía (la masa) se conserva. Precisamente, estamos hablando del Mom-Energía del sistema de masas en el marco de referencia que va en caída libre en tiempo-espacio adonde hay efectos de gravedad. La gravedad es un efecto local y el marco de referencia contiene cierta cantidad de energía y momento. Si hablamos de masa ($E^2 - P^2 = m^2$) podemos decir que la cantidad de masa es densidad multiplicada por el volumen del marco. La masa se conserva y lógicamente, el volumen del marco tiene que conservarse también. Esto ocurre en el espacio vacío donde la única masa presente es la masa contenida en el propio marco. La masa local (el mom-energía) causa deformación de manera que el volumen local se conserva.

Descripción de la fuerza de gravedad desde el punto de vista de Isaac Newton

La gravedad es una fuerza a distancia que penetra a través del espacio y se trasmite instantáneamente. La fuerza es mutua atracción entre dos o más masas y es en dirección a la línea que une el centro de gravedad. La intensidad **es el producto de cada masa multiplicado por una "constante"** (G = constante gravitacional) y dividida por el cuadrado de la distancia que separa cada par de masas. $F = GmM/r^2$. Por supuesto, la validez de esta fórmula se ha confirmado plenamente en el estudio de órbitas de planetas. Esta fórmula es exacta y describe los fenómenos de movimiento planetario con exactitud de más $+10^{-7}$.

Hay también otros teoremas que relacionan la intensidad de la fuerza de gravedad con la masa que causa estos efectos. El Teorema de Gauss nos dice que el flujo neto y total de la fuerza gravitacional calculado en la superficie de un cuerpo geométrico (por ejemplo, una esfera) que contiene o totalmente rodea una masa es igual a **$4\pi GM$** , donde "**M**" significa la masa contenida adentro de la superficie del mismo cuerpo geométrico. Aquí estamos diciendo que solamente tomamos en cuenta la masa contenida adentro de la esfera **(Área de la esfera) x (Fuerza de gravedad) = $4\pi G$ (Masa contenida** en el volumen de la esfera) Vamos a explicar esta fórmula de manera que sea fácil de aplicarla más tarde cuando hablemos de las fuerzas gravitacionales en el interior de una masa.

- Flujo quiere decir el producto de Fuerza multiplicada por Área. El flujo es **equivalente a "presión."** Quiere decir que es equivalente a Kilogramos por metro cuadrado.
- G es la constante de gravitación = 6.67×10^{-11} (m³/Kg. Sec²)
- **$\pi = 3.1416$**
- M = masa contenida adentro del volumen de la superficie gaussiana
- El área de una esfera es **$4\pi R^2$** en donde R es el radio de dicha esfera.
- El volumen de una esfera es **$(4/3)\pi R^3$**

Lo que nos dice el Teorema de Gauss es lo siguiente:

- Si estamos en la superficie de la tierra y rodeamos la masa del planeta Tierra con una superficie gausseana de forma esférica, el Flujo total es **$(4\pi R^2) F = 4\pi GM$** La utilidad de esta fórmula es que nos permite calcular la Fuerza de gravedad = $F = GM/R^2$ donde R = radio de la Tierra. A veces es conveniente relacionar la fuerza con el volumen que ocupa la masa. En este caso debemos usar la expresión **$M = \rho V$ donde ρ** = densidad, V = volumen ocupado por la masa.
- Si en vez de estar en la superficie ahora penetramos la distancia R/2 en el túnel a través de la Tierra y calculamos la fuerza de gravedad a esta distancia el resultado es **$(4\pi R^2/4) F = 4\pi G(0,125M)$** y la Fuerza de gravedad se ha reducido el 50%, $F = (0,5) GM/R^2$. Esta reducción es porque la masa que el volumen gausseano incluye es 1/8 de lo que era antes y el área de la esfera gausseana es 1/4 de lo que era antes.

- Si penetramos en el túnel de manera que la distancia radial es ahora $0,1R$, la cantidad de masa que el volumen gausseano envuelve es $1/1000$ de lo que era en la superficie. En cambio, el área de la superficie gausseana es ahora $1/100$ de lo que era. El efecto neto es que la fuerza de gravedad se ha reducido a $1/10$ de lo que era en la superficie de la Tierra.
- **Si el radio de la esfera gausseana se reduce a "cero" allí notaríamos que el volumen que corresponde a la esfera gausseana es también "cero" y el volumen gausseano no incluye masa. Quiere decir que en el centro de la Tierra la fuerza de gravedad se reduce a "cero."**
- Hay que tener en mente que cada vez que descendemos en el túnel y nos paramos para medir el flujo en esta localidad hay necesidad de construir una superficie gausseana. De manera que a medida que vamos descendiendo a tomar medidas también construimos en cada localidad una esfera gausseana. Dicha esfera va disminuyendo en tamaño hasta llegar al centro de la tierra. Una vez en el centro de la tierra la esfera gausseana es tan pequeña que en el límite incluye cero masa.

Lo que nos dice el Señor Gauss es que las capas de masa que son exteriores a la esfera gausseana no cuentan en el cálculo de la fuerza. Solamente la masa contenida en el interior del volumen gausseano contribuyen a la fuerza de la gravedad.

Efecto gravitacional de reducción de volumen

Aquí por supuesto nos referimos al volumen de la superficie gausseana que rodea la masa. A medida que penetramos al interior de un volumen que contiene masa nos cercioramos de que el volumen de la superficie gausseana va disminuyendo y con ello, los efectos gravitacionales (la fuerza) también sufre reducción. Comenzando en la superficie y descendiendo a través de la masa hasta llegar al centro de gravedad es posible llegar a un punto en que la superficie gausseana se reduce a cero y con ello la fuerza de gravedad pierde su intensidad. Esto ocurre en el centro de la Tierra. Esto es lo que se conoce como efecto de reducción de volumen. Este efecto ocurre cerca de la superficie de la tierra (o cualquier otro cuerpo de gran masa) y es cuando la proximidad al cuerpo de gran masa da lugar a que los efectos de marea caigan en segundo plano y son dominados completamente por los efectos de reducción (contráctil) de volumen. Este efecto lo vamos a describir en detalle más adelante.

Por supuesto, a larga distancia de un cuerpo de gran masa solamente vemos los efectos de marea porque los efectos del cuerpo de gran masa son diluidos por la gran distancia. Por ejemplo, la luna está a distancia equivalente a 60 radios terrestres (el radio de la tierra es $6,37 \times 10^6$ metros). Aquí el volumen

de la superficie gausseana es 216 000 veces mayor que en la superficie de la tierra y los efectos de reducción de volumen son reducidos por el mismo factor, También la gran masa de la luna ayuda a que los efectos locales (marea) dominen.

Newton y Galileo formularon las leyes de la Mecánica Clásica en la cual el espacio es euclidiano y el movimiento de masas se considera en referencia a un marco global. Esto es que incluye todo el espacio y permanece fijo a través de todo tiempo. La Mecánica Relativista nos dice que marcos globales con punto fijo en el espacio a través de todo tiempo no existen. El espacio y el tiempo son como una corriente que está perpetuamente en movimiento. Todo cuerpo material **flota en esta corriente. No hay punto “cero” en tiempo y espacio.**

Concepto de un Marco global versus el concepto de un grupo de marcos locales

De acuerdo con Galileo y Newton, dentro del espacio Euclidiano existe un campo de fuerza gravitacional que a través de enormes distancias trasmite su efecto instantáneamente y controla el movimiento de masas. Einstein en cambio nos dice que la gravedad es un efecto local y se puede observar en un marco pequeño. En el espacio adonde no hay gravedad estos marcos flotan libremente en el espacio y el estudio del movimiento de masa en dichos marcos es simple. Todo lo que tenemos que hacer es observar el movimiento rectilíneo de masas o el estado de reposo de las mismas. Cuando hay gravedad, los efectos **de gravedad se manifiestan por medio de “efectos de marea que son fáciles de observar.** Einstein nos dice que la gravedad no se manifiesta como un campo de fuerza, pero los efectos gravitacionales están **“encapsulados” en la estructura (geometría) del tiempo-espacio.** Vamos a explicar esto más adelante.

Ciertamente, los marcos inerciales de Einstein son pequeños (para evitar efectos de gravedad) y solamente describen el movimiento de masas en una región local del espacio. Está también la complicación de que los efectos de gravedad son direccionales (apuntan hacia el centro de la tierra) y el cambio de dirección se nota cuando uno va de un marco al otro. Como vimos anteriormente esto se debe a la falla de uniformidad en dirección. Einstein explica este problema (la falta de conexión de un marco al otro) como debido a la curvatura del tiempo-espacio y nos dice que debido a la curvatura es imposible cubrir 100% un campo gravitacional con un marco global y Euclidiano.

La conciencia inercial

Para ilustrar cuán sencillo llega a ser el movimiento de masas cuando se observa en marcos inerciales de Einstein voy a citar el caso de la conciencia

inercial. Esta la voy a describir usando términos locales ya que no tengo los permisos necesarios para enseñar fotos.

Imagínense Uds. 2 huacalitos contruidos no de jícaro, pero sí de metal. Adentro del primer huacalito instalamos una esfera sólida de metal con toda clase de instrumentos y un sistema de wi-fi para poder comunicarse. El segundo huacalito lo vamos a usar como una tapa y vamos a cerrar herméticamente las dos mitades de manera que la esfera queda adentro de los huacales. Por supuesto, la esfera es de menor diámetro (2 pulgadas de diferencia en diámetro) que los huacales y si no hubiese gravedad, la esfera podría flotar libremente adentro de los huacalitos. Precisamente, esto es lo que vamos a hacer. La conciencia inercial va a ser instalada a bordo de un satélite que va a ser lanzado al espacio a altitud de 600 km. El uso de la conciencia inercial va ser el siguiente: Satélites que flotan libremente en el espacio no mantienen la posición que deberían llevar (de acuerdo con la órbita programada) y hay necesidad de corregir de vez en cuando la posición. Para ejecutar estas maniobras de corrección hay que detectar el error y después activar el sistema de propulsión instalado en dicho satélites. Al cabo de cierto tiempo el combustible se acaba y no hay manera de corregir el error. Los errores de posición a que me refiero son causados por fricción de las capas residuales de aire y también por el empuje de la radiación solar.

Efectivamente, una vez que el satélite lleo a estabilizarse en su órbita, el sistema a bordo ajustó la posición de la conciencia inercial de manera que la esfera sólida flotaba adentro de los huacalitos. Hay también un sistema electrónico que mide la separación entre la esfera y las paredes que la contienen. Cuando el satélite ha incurrido efectos que no son gravitacionales, este efecto se nota por cambios (diminución) en velocidad del satélite. Esto afecta también la distancia entre los huacalitos y la esfera. Esto es porque la esfera flota y mantiene la órbita programada. En cambio, el satélite y los huacalitos sufren reducción en velocidad y no pueden mantener paso con la esfera. Automáticamente la conciencia inercial manda que el sistema de propulsión del satélite se active para aumentar la velocidad y así mantener paso con la esfera (corregir el pequeño error). La ejecución de estas pequeñas correcciones mejoró la figura de estabilidad de la órbita por un factor de 5000 y permitió que el satélite mantuviera su posición correcta sin necesidad de intervención terrestre.

Ahora nos damos cuenta de este sencillo mecanismo y de cómo es capaz de guiar el satélite y corregir errores de navegación. La esfera no es más que un cuerpo sólido de metal. No lleva instrumentos de navegación. No lleva memoria electrónica capaz de mantener códigos de navegación, está totalmente ciega en lo que se refiere a posición espacial y coordenadas de tiempo-espacio. ¿De dónde obtiene esta esfera sus direcciones? ¿Cómo sabe la esfera qué curso mantener?

Einstein tiene razón. El movimiento de masas es local. En marcos inerciales einsteinianos el movimiento de masas es simple, preciso y exacto. Cuando el satélite y la conciencia inercial flotan libremente en el espacio, el mismo ritmo, la misma trayectoria rectilínea y fija permanece, y se mantuviera intacta si no fuera por fuerzas externas. Cuando fuerzas externas causan interrupción de este ritmo, la esfera mantiene sus órdenes de marcha, y para regresar al movimiento programado hay que activar el sistema de propulsión y usar la esfera como guía para corregir el curso. ¡Qué maravilla! Un mecanismo simple en donde la inercia se usa como guía para mantener la misma órbita programada. Aquí no hay brújula, no hay giróscopo, no hay sextante. Solamente la armonía del movimiento rectilíneo y la propiedad de la inercia que mantiene el rumbo fijo.

¿Cómo sabe la esfera cual es el curso que debe mantener? La respuesta de Newton sería: La fuerza de gravedad transmitida a distancia desde la tierra obliga a la esfera a seguir el mismo curso. Einstein diría: No. La esfera no sabe dónde ni en qué dirección está la tierra. La esfera en cambio detecta la estructura geométrica del tiempo-espacio y así sabe cómo mantener su curso.

Les debo una explicación: La esfera y el satélite observan movimiento inercial y lorentziano aun cuando están sujetos a efectos de gravedad. El movimiento del satélite en su propia órbita no es rectilíneo en el sentido euclidiano. Pero si es rectilíneo en el espacio curvo. Me explico diciendo que la órbita es un geodésico en tiempo-espacio. Los geodésicos en espacio curvo son equivalente en todo sentido a las líneas rectas en el espacio euclidiano (espacio plano). Esto lo vamos a aprender en el próximo capítulo. Por el momento quiero que tengan en cuenta que cuando el satélite se desplaza en su órbita alrededor de la tierra, esto constituye movimiento rectilíneo y por supuesto califica como movimiento lorentzeano que quiere decir que es dirección fija con respecto a la trayectoria (la trayectoria es una curva geodésica). ¡Esta es la maravilla del tiempo-espacio curvo!

La ecuación de campo (espacio-tiempo) de Einstein

En las mismas palabras de Einstein cuando enuncio su teoría de **Relatividad General en 1915: "El tiempo-espacio agarra la masa diciéndole cómo moverse y al mismo tiempo la masa agarra el tiempo-espacio diciéndole como curvarse..."** *Edwin F. Taylor and John Archibald (Reference [1]) nos dice "Por cada acción hay una reacción, tiempo-espacio que actúa sobre el mom-energía y le dice cómo moverse, mom-energía hace reacción y le dice al espacio-tiempo como curvar..."* **"Este apretón de mano que ocurre entre el mom-energía y el tiempo-espacio es el origen de la conservación del mom-energía y es la fuente de la curvatura del tiempo-espacio. Esto nos lleva a la gravedad."**