



COLEGIO DE BACHILLERES

FISICA MODERNA I

FASCÍCULO 5. TEORIA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

Autores: Francisco Javier Rodríguez Méndez



Colaboradores

Asesoría Pedagógica

Ma. Elena Huesca del Río
José Manuel López Estrada

Revisión de Contenido

Salvador Godoy Salas

Diseño Editorial

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
PROPÓSITO	7
1. GENERALIDADES	9
1.1 PRINCIPIOS DE EQUIVALENCIA	9
1.2 VERSIÓN NEWTONIANA DE LA GRAVITACIÓN	11
1.3 VERSIÓN EINSTENIANA DE LA GRAVITACIÓN	13
1.4 CONCEPTOS DE ACELERACIÓN (LEYES DE NEWTON)	14
2. PRINCIPIOS DE MACH (INERCIA)	17
2.1 RELACIÓN ENTRE MASA INERCIAL Y MASA GRAVITACIONAL	17
3. TEORÍA DEL ESPACIO-TIEMPO-GRAVITACIÓN	21
3.1 GEODÉSICAS	21
3.2 CAMPO GRAVITACIONAL	22
3.3 ESPACIO-TIEMPO CURVO	23
3.4 MODELOS COSMOLÓGICOS (ESTRUCTURA DEL ESPACIO)	25
3.5 CURVATURA DE LA LUZ	26
3.6 MOVIMIENTO GRAVITATORIO HACIA EL ROJO	27

4. CONSECUENCIAS DE LA TEORÍA GENERAL DE EINSTEIN	29
RECAPITULACIÓN	32
ACTIVIDADES DE CONSOLIDACION	34
AUTOEVALUACIÓN	36
ACTIVIDADES DE GENERALIZACIÓN	38
GLOSARIO	39
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	41

INTRODUCCIÓN

Einstein fue un físico que cambió algunos de los conceptos de la Física tradicional como es el espacio, el tiempo y la interrelación mas a como una cosa única. Antes de explicar en que consiste la teoría de la relatividad general es importante conocer sus aportaciones a la Física Moderna.

En el año de 1901 Einstein publicó su primer trabajo que trata sobre el estudio de la atracción capilar, pero dicho trabajo pasó desapercibido.

Entre los años 1902 y 1903 da a conocer da a conocer a la comunidad científica dos aportaciones sobre una teoría relevante que trataba sobre “Los fundamentos estadísticos de la termodinámica”, que consistía en una nueva derivación de la mecánica estadística.

Fue hasta 1905 cuando sale a relucir el genio de Einstein en es año salieron a la luz tres trabajos: el efecto fotoeléctrico con el cual gana el premio Nóbel en 1921, cuyos principios contribuyen al desarrollo de la televisión, dispositivos para abrir y cerrar puertas y sonidos de las películas.

En el segundo trabajo trata sobre el movimiento browniano que contribuye a comprobar experimentalmente la existencia de las moléculas.

Y por ultimo su trabajo a la relatividad, la cual posteriormente se llamó relatividad especial o restringida que describe la mecánica del mundo físico a partir de tres variables: tiempo, espacio y masa. Posteriormente en 1916 se publicó otra que es derivada de ésta y se conoce como teoría de la relatividad general.

Lo que se pretende en este fascículo es explicar la teoría de la relatividad general sin tanta complicación.

PROPÓSITO

Antes de leer el presente fascículo te recomendamos consideres las siguientes preguntas ya que con base en ellas podrás organizar tu estudio sobre la asignatura.

- ¿Qué voy a aprender?
 - Con el estudio de este fascículo te introducirás al conocimiento de la Teoría de la Relatividad General que propuso Albert Einstein al considerar los efectos gravitacionales
 - Identificarás las variables de las que depende la fuerza de gravedad
- ¿Cómo lo voy a lograr?
 - A través de los principios y teorías sobre la equivalencia entre un sistema inercial y un sistema acelerado;
 - Utilizando el concepto de gravitación (que retoma las leyes de Newton) y el de aceleración y
 - Considerando las teorías del espacio-tiempo-gravitación.
- ¿Para que me va a servir?
 - Para conocer fenómenos que se dan en el espacio como la curvatura de un rayo cuando pasa por un campo gravitacional; la información que se puede obtener de los eclipses, o la demostración de la curvatura del universo.
 - Para comprender el comportamiento de sistemas acelerados como es el efecto que se produce sobre los objetos dentro de un elevador; y que la distancia más corta entre dos puntos no es una recta como establece Euclides sino una geodésica la cual se puede demostrar en la Tierra.

1. GENERALIDADES

1.2 PRINCIPIO DE EQUIVALENCIA

Uno de los pilares que se fundamenta la relatividad general es el principio de equivalencia de la gravitación y la inercia, el cual menciona que las observaciones echas en un marco de referencia acelerado no puede diferenciarse de las que se hagan en un campo gravitacional newtoniano.

Esta equivalencia no tendría importancia si sólo se aplicara a los fenómenos mecánicos, pero Einstein fue más allá y afirmó que el principio se cumple para todos los fenómenos naturales.

Einstein se imaginó así mismo subiendo a una nave espacial la cual antes de despegar cuelga de una gran altura. No se percata que el cable se rompe y no tiene idea del desastre ocurrido, saca de su bolsillo una pluma y sorprendido se da cuenta que permanece suspendida en el aire esto sucede por que el objeto cae junto con la nave y Einstein con la misma aceleración lo que concuerda con la Ley de gravitación de Newton. Einstein pudo pensar que fue transportado a un campo de gravedad fuera de la tierra. Si pegara un salto flotaría suavemente hacia el techo igual que les pasa a los astronautas en el espacio. Esto obedece a la ley inercial de Newton, con lo cual la nave se ha convertido en un sistema inercial y Einstein que va adentro no tiene posibilidad de establecer si está cayendo en un campo de gravedad o está flotando en le espacio.

Ahora imaginemos otra situación: Einstein sigue en la nave pero esta vez se encuentra en el espacio, los motores de la nave se activan y la nave se acelera y se desplaza "hacia arriba" y como Einstein no tiene la más remota idea de donde se encuentra, se pone a realizar experimentos para estimar su situación. Lo que primero percibe es que sus pies se aprietan contra el piso de la nave, cuando da un salto nota no flota hacia el techo de la nave percibiendo que el suelo viene detrás de él y cuando deja caer dos bolas, una de plomo y otra de madera éstas no se mueven en dirección horizontal, sino que caen al suelo. (Figura 1).

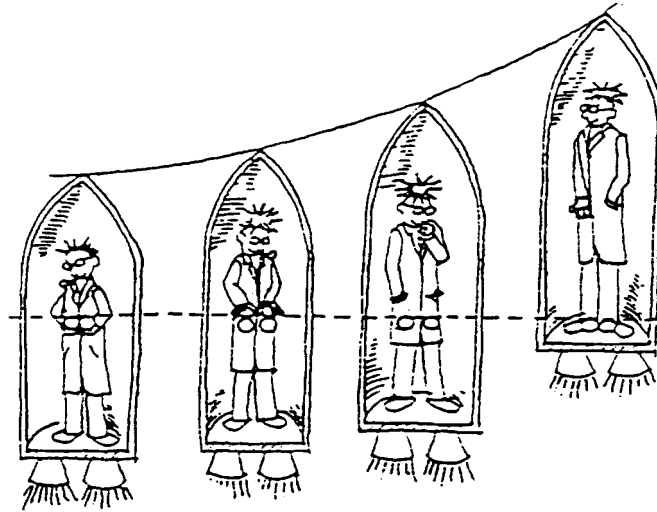


Figura 1. Las dos bolas sin importar sus masas llegan al piso al mismo tiempo. Al recordar la demostración de Galileo, en la torre inclinada de pisa, Einstenio atribuye sus observaciones al fuerza de gravitación. Las dos demostraciones son igualmente válidas y Einstenio incorporó esta equivalencia, o la imposibilidad de distinguir entre la gravitación y la aceleración, en su fundamento de la teoría general de la relatividad.

1.2 VERSION NEWTONIANA DE LA GRAVITACION

Uno de los logros más grandiosos de la mecánica newtoniana, fue el haber servido para describir correctamente el movimiento de los planetas en el sistema solar atraídos a la acción de la fuerza de gravedad. A partir de sus observaciones de los cuerpos que caen (y, como cuenta la leyenda, de la caída de la manzana), Newton propuso una teoría de la gravitación universal.

De acuerdo con ella, todos los cuerpos materiales en el universo se atraen unos a otros con una fuerza gravitatoria. Algunas de las manifestaciones de esta fuerza gravitatoria pueden ser deducidas de las experiencias diarias. El cordón de una plomada atraída hacia la superficie del planeta por la fuerza gravitacional de la tierra será una línea vertical, esto indicará que la fuerza entre cuerpos materiales de forma esférica está aplicada a lo largo de la línea que se une a sus centros.

La fuerza de gravedad que existe entre cuerpos puede ser atribuida a una "carga" gravitatoria, de la misma manera que existen fuerzas eléctricas entre objetos cargados eléctricamente. Una ojeada a la segunda ley de Newton. (1)

$$\text{FUERZA} = (\text{MASA INERCIAL}) \times (\text{ACELERACIÓN}). \dots (1)$$

Muestra que para dar lugar a aceleraciones iguales bajo los efectos de la gravedad es preciso que la fuerza gravitacional sea proporcional a la masa inercial del cuerpo. Dicho en otras palabras simples, es más difícil acelerar hacia abajo un cuerpo muy pesado que otro menos pesado, pero la fuerza gravitacional que actúa es mayor en proporción directa a la masa, por eso se presenta una compensación exacta. Podemos manifestar este hecho diciendo que la carga gravitacional es proporcional a la masa inercial, y este hecho demostrará ser de la mayor importancia.

Un conocimiento elemental del comportamiento de los planetas en sus recorridos estelares indica que los más distantes del sol emplean más tiempo en girar en torno en comparación con los que se hallan más cercanos al mismo. En consecuencia la fuerza de la gravitación debe disminuir con la distancia.

La fuerza de la gravitación propuesta por Newton estableció que la magnitud de la fuerza de atracción F entre dos cuerpos (compactos) de masas gravitacionales m_1 y m_2^* separados entre sí por una distancia r , está dada por la ecuación (2)

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \dots\dots\dots(2)$$

En donde G una constante que tiene el mismo valor para todos los cuerpos del universo, es conocida con el nombre de constante gravitacional de Newton y es la constante de proporcionalidad necesaria para convertir unidades de masa en unidades de carga gravitatoria.

* Nótese la diferencia entre masa inercial en la 2ª. Ley de Newton y la masa gravitacional en la definición de la fuerza de gravedad.

Ejemplo:

G = Constante de gravitación universal.

Encontrar la distancia a que hay al colocar dos masas de un kilogramo cada una para que se atraiga con una fuerza de un newton.

DATOS	FORMULA
F = 1 Newton	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
G = $6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{Newton} \cdot \text{metro}^2}{\text{Kg}^2}$	$r^2 = \frac{G m_1 m_2}{F}$
$m_1 = 1 \text{ Kg}$	$r = \sqrt{\frac{G m_1 m_2}{F}}$
$m_2 = 1 \text{ Kg}$	$r = \sqrt{\frac{6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \times 1 \text{ kg} \times 1 \text{ Kg}}{1 \text{ N}}}$
	$r = 8.2 \times 10^{-6} \text{ m}$

Newton estableció una hipótesis fundamental y de gran relevancia respecto a la fuerza expresada por la ecuación anterior: que la fuerza actúa instantáneamente a través del espacio vacío que hay entre los dos cuerpos. Se trata, por consiguiente, de una teoría de acción instantánea a distancia. La instantaneidad es un concepto bien definido según el modelo newtoniano del tiempo porque la noción de un “mismo tiempo” aún para puntos que estén separados por una distancia r , tiene un significado absolutamente claro. El tiempo medido en las vecindades de cada uno de los cuerpos es el mismo tiempo universal.

Al combinar su ley de la gravitación con su ley fundamental del movimiento, Newton pudo predecir que la trayectoria de un planeta en torno del Sol tendría que ser elipse, pues demostró que aún los “cuerpos celestes”, como se les calificaba entonces, obedecían a leyes físicas “terrestres” que podían ser establecidas en laboratorios terrestres. Además, esta ley restaura el principio causal en la física, y de ella se desprenden explicaciones para otros fenómenos que en apariencia no tenían vinculación alguna; por ejemplo, logra explicar las mareas, el recorrido irregular de la tierra alrededor del Sol, y la precisión del eje de rotación terráqueo.

La confirmación experimental de la ley de la gravitación Newton fue tan amplia y precisa que relegó por completo su controvertida propagación instantánea a distancia.

1.3 VERSIÓN EINSTEINIANA DE LA GRAVITACIÓN

Así en el siglo XX Einstein lanza al mundo científico su teoría especial de la relatividad, la cual nace con el propósito de explicar la ausencia de un sistema absoluto de referencia. Tomando como único constante la velocidad de la luz, y aceptando el movimiento relativo como la única referencia válida. De ésta surgen el tiempo, el espacio y la masa como funciones del movimiento; el tiempo y la masa se dilatan y el espacio se contrae para alguien en movimiento con respecto a un observador. El tiempo y el espacio se fusionan en un solo “continuo” conocido como el continuo espacio-tiempo. En contraste con el espacio y el tiempo absolutos, que usó Newton en la derivación de sus teorías, el continuo einsteiniano está internamente ligado, el tiempo no existe sin el espacio. Esto quiere decir que el tiempo depende ahora del espacio y el espacio depende del tiempo, y que ambos son distintos para dos o más personas en movimiento relativo uniforme.

La mecánica derivable de la relatividad especial es idéntica a la mecánica newtoniana sólo bajo la condición de velocidades pequeñas en comparación con la velocidad de la luz.

Innumerables experimentos han confirmado la correcta formulación de la teoría especial de la relatividad, que adopta ese nombre porque su aplicación se restringe a movimientos constantes o, en otras palabras, cuando no hay aceleraciones relativas.

Con el propósito de abarcar situaciones regidas por aceleraciones uniformes, Einstein generalizó su teoría ordinaria creando la teoría general de la relatividad.

Su primer gran paso para concluir, por medio de un “experimento mental”, el cual consiste en imaginar el comportamiento de varios objetos confinados en un elevador (sistema de referencia). Suponiendo que hay un pasajero junto a los objetos, si el elevador cae libremente dentro de un campo gravitacional, tanto éstos como el pasajero caerán con la misma aceleración que la del elevador. Si el pasajero no está enterado de que va en caída libre, pensará que está en una zona del universo donde todas las fuerzas gravitacionales se cancelan. Por lo tanto, las leyes de la física, como se conocen, se aplicarán sin mayor problema al comportamiento mismo de los objetos. Un sistema de referencia en caída libre dentro de un campo gravitacional es equivalente a otro sistema localizado en una región del universo libre de influencias gravitatorias. Este experimento mental, conocido como “principio de equivalencia”, está sujeto en la actualidad a dos interpretaciones:

- La primera se conoce como el “principio fuerte de la equivalencia” y afirma que las leyes ordinarias de la física como se observan localmente en un laboratorio en caída libre, son independientes de la posición que tenga el laboratorio con relación al tiempo y al espacio.
- La segunda interpretación se conoce como “el principio débil de la equivalencia” y establece que la aceleración gravitacional de cualquier objeto es independiente de su composición material.

Cualquiera de las dos interpretaciones conduce a una misma formulación geométrica de gravitación. Por ejemplo, el principio fuerza de equivalencia se infiere que la masa inercial de un cuerpo es igual a su masa gravitacional.

Por masa inercial se entiende la utilizada en las leyes de la mecánica newtoniana, por masa gravitacional, la que reacciona a las atracciones gravitacionales.

Que la masa inercial sea igual a su masa gravitacional significa que la energía asociada a un campo gravitacional induce efectos de atracción gravitatoria, al igual que la materia, en virtud de la equivalencia entre masa y energía, según los resultados de la relatividad especial. De manera similar, el hecho de que todo objeto dentro de un campo gravitacional tenga una aceleración de caída libre que es independiente a su masa, como lo supone el principio débil de la equivalencia, significa que tal aceleración es un propiedad del campo mismo. Si se considera el continuo espacio-tiempo como un espacio geométrico de cuatro dimensiones, entonces las trayectorias naturales que siguen los objetos se adoptan como líneas geométricas.

1.4 CONCEPTO DE ACELERACIÓN (LEYES DE NEWTON)

La aceleración es el cambio de la velocidad con respecto al tiempo. Si la velocidad aumenta la aceleración es positiva, si la velocidad disminuye la aceleración es negativa.

La aceleración debida a la gravedad es el problema más importante al que se aplican las ecuaciones del movimiento con aceleración constante y es el de caída libre de los cuerpos. Experimentalmente se encuentra que, en ausencia del aire, todos los objetos situados en un mismo lugar caen a la tierra con la misma aceleración. La aceleración está dirigida, naturalmente hacia abajo. El valor de esta aceleración varía ligeramente con su posición geográfica, pero su valor es aproximadamente de 9.8 m/seg^2 . Se representan por **g**.

Leyes de Newton

1. Un cuerpo permanecerá en estado de reposo o de movimiento rectilíneo y uniforme a menos que esté sometido a la aceleración de una fuerza neta externa.
2. Cuando actúa una fuerza no balanceada sobre un cuerpo, éste se acelerará. (Figura 2)

$$F = ma \dots(1)$$

3. Ley de la acción y la reacción.

Cuando un objeto A ejerce una fuerza sobre otro objeto B, el objeto B ejerce otra fuerza igual y opuesta sobre A.

Como recordarás:

1. En la mecánica clásica, todos los sistemas inerciales son equivalentes, bajo las transformaciones de Galileo
2. En la relatividad general, localmente los sistemas acelerados son equivalentes a los sistemas en campos gravitacionales.
3. En la relatividad especial todos los sistemas inerciales son equivalentes bajo las transformaciones de Lorentz.

Dentro todo lo anterior podemos observar la importancia de la aceleración no solamente desde el punto de vista del cambio de velocidad de un objeto material en un campo gravitacional como lo establecieron experimentalmente Newton y Galileo sino también cuando la aceleración actúa fuera de dicho campo tal como lo hace Einstein. La reflexión sobre este hecho relevante nos hace ver el significado que en su momento le dieron Galileo, Newton y Einstein a la aceleración.

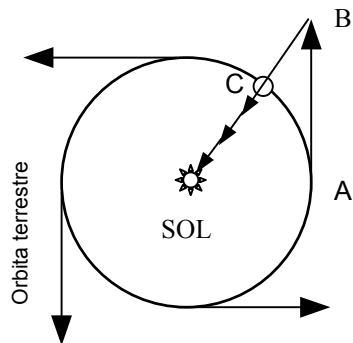


Fig.2. El movimiento circular es acelerado. La tierra se mueve en torno al Sol con velocidad constante en una órbita casi circular. Pero la dirección de la velocidad de la tierra cambia continuamente, Cuando está en A, la tierra se está moviendo hacia el punto B pero la curvatura de la órbita se desvía hacia el punto C. La dirección del movimiento cambia hacia el Sol a lo largo de BC. Este cambio en la velocidad, es decir, la aceleración es causado por la fuerza gravitacional del Sol, puesto que atrae a la tierra en la dirección BC (flecha doble). No hay ninguna fuerza que actúe en la dirección de la velocidad orbital (flechas sencillas).

EJEMPLO:

Encontrar la fuerza de atracción gravitacional entre un protón y un electrón en el átomo de hidrógeno si la distancia media que los separa es 5.3×10^{-11} m

DATOS

$$m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$r = 5.3 \times 10^{-11}$$

m_p = masa protón
 m_e = masa electrón

FÓRMULA
$F = G \frac{m_p m_e}{r^2}$

RESOLUCIÓN

$$F = \frac{6.667 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2} (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}) (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$F = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$

ACTIVIDAD DE REGULACIÓN

1. ¿Experimentará un astronauta alguna aceleración respecto a la nave? Justifica tu respuesta _____

2. Un elevador que cae libremente sería un marco tal para una persona que esté en interior ¿Por qué? _____

3. Aplicando la ley de la gravitación universal, encuentra la aceleración con que caen todos los cuerpos colocados sobre una superficie terrestre. Los datos de masa y radio de la tierra son respectivamente: 5.98×10^{24} kg y 6.37×10^6 m y la constante de proporcionalidad o constante de la gravitación universal su valor depende del sistema de unidades que se use, y en S.I.U. que estamos empleando vale $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg seg}^2$.

2. PRINCIPIO DE MACH (INERCIA)

El principio de Mach se ocupa de la inercia y su idea básica es la siguiente: Consideremos un cuerpo rotatorio. Podemos medir su rotación en dos formas independientes:

1. De un modo local absoluto, midiendo las tensiones en ese cuerpo requeridas para evitar que las partes externas se desprendan.
2. Con relación a la materia distante (las "estrellas fijas") ¿Cómo es que concuerdan estas dos nociones de rotación? La idea de Mach era que acaso la materia distante en el universo determina efectos inerciales, como la rotación. Por lo tanto, si alguien acelerase de algún modo la materia distante en el universo, ello afectaría nuestras determinaciones locales de la no aceleración y de la no rotación. Si no existiera ninguna materia en el resto del universo, no habrían cosas tales como la inercia o la rotación.

Einstein estuvo de acuerdo con la idea básica del principio de Mach. Empero, las ideas de Mach no tienen ninguna expresión en la relatividad especial, donde la estructura del espacio-tiempo no es afectada por la materia que éste presente. En consecuencia Einstein fue seducido a buscar una nueva teoría en la cual los efectos de la gravitación se expresaran en función de la estructura del espacio-tiempo (principio de equivalencia), y la estructura del espacio-tiempo se determinase por la materia presente en el espacio-tiempo (principio de Mach). Su logro a este respecto fue probablemente el más grande logro aislado ocurrido hasta hoy en la física teórica.

Es muy relevante que, aunque algunas de las ideas de Mach se reflejan en la teoría einsteniana de la relatividad general, no es cierto entonces que la relatividad general, incorpore plenamente todas ellas. Puede decirse, en la relatividad general, que el movimiento de la materia distante afecta a ciertas propiedades inerciales locales, pero no que las fije completamente. En particular, la rotación siempre puede determinarse localmente aun cuando no hay materia distante.

2.1 RELACION ENTRE MASA INERCIAL Y MASA GRAVITACIONAL

Que en un punto A de espacio existe un campo eléctrico significa sencillamente que, al colocar allí un cuerpo cargado, éste experimentará una fuerza cuyo valor depende de la carga. Si el cuerpo está descargado, no actuará fuerza eléctrica alguna. Si está cargado, la fuerza será proporcionalmente mayor en cuanto mayor sea su carga. La fuerza, a su vez, imprimirá al cuerpo una aceleración, cuyo valor dependerá de la masa del cuerpo. Es importante percibir que quien decide el valor de la fuerza es la carga, mientras que el valor de la aceleración depende de la masa

Un cuerpo de gran masa, poco cargado, aumentará su velocidad muy lentamente; en cambio, un pequeño cuerpo muy cargado lo hará con gran velocidad. En otras palabras, la masa y la carga eléctrica de un cuerpo son independientes.

Admitamos que una pared de nuestra habitación está eléctricamente cargada y que, por lo tanto, atrae a una esfera colocada sobre el piso y cargada con electricidad de signo opuesto. Podemos obtener comportamientos muy diversos de las esferas, modificando su masa y su carga. Una esfera descargada permanece inmóvil, no importa cuál sea su masa. Una pequeña esfera, muy cargada, es atraída hacia la pared con gran aceleración. Una gran esfera, apenas cargada, se acerca a la pared aumentando casi imperceptiblemente su velocidad; lleva muy poca aceleración. Las distintas aceleraciones de estas esferas tienen su origen en la independencia existente entre la masa y la carga eléctrica de los cuerpos. Supongamos, sin embargo, que un buen día alguien decide jugaros una broma y prepara una serie de esferas de distinto tamaño, cargándolas adecuadamente de tal modo que se muevan hacia la pared con la misma aceleración. Ahora sí, nos parece, debe existir alguna relación entre masa y carga. Si una esfera de gran masa es atraída por la pared con igual aceleración que otra masa pequeña, significa que la fuerza atractiva sobre la masa grande es mayor sobre la pequeña; lo cual se logra cargando más a una esfera grande. Una esfera de 10 kilogramos de masa requiere diez veces más fuerza para alcanzar la misma aceleración que una esfera de un kilogramo. Entonces, a la esfera cuya masa es 10 veces mayor, habrá que entregarle diez veces más carga eléctrica. Hemos descubierto la “receta” empleada por el bromista para lograr que las aceleraciones de las esferas sean iguales: le ha dado a cada una de ellas una carga que es proporcional a su masa.

Consideremos ahora el caso gravitatorio. La “pared cargada” es la Tierra; las “esferas”, cuerpos cualesquiera en proximidades de la superficie terrestre. Se le puede asignar a cada cuerpo una “carga gravitatoria” a la que los físicos llaman masa gravitatoria. Todo cuerpo tiene, pues, dos clases de “masa”: una de ellas la masa inercial (que hemos considerado hasta ahora), mide el grado de inercia de un cuerpo, es decir, la resistencia a ponerse en movimiento si se halla en reposo; la otra, masa gravitatoria, mide la capacidad del cuerpo de ser influido en mayor o menor medida por un campo gravitatorio. A dos metros del suelo, un ladrillo es atraído por la Tierra con mayor fuerza que un corcho (el ladrillo pesa más); en otras palabras, el campo gravitacional allí ejerce más influencia sobre el ladrillo que sobre el corcho. Vemos aquí que la masa gravitatoria desempeña, en el estudio de la gravitación, el mismo papel que la carga eléctrica en el caso electrostático.

¿Son independientes la masa inercial y la masa gravitatoria? ¡De ningún modo! A diferencia del caso eléctrico, en el caso gravitatorio todos los cuerpos caen con la misma aceleración. No fue la comprobación del viejo Galileo, si se desdén la influencia perturbadora del rozamiento con el aire. Pero sus experimentos de caída libre pueden ser vistos ahora bajo una nueva luz, pues prueban que la más inercial y la gravitatoria son proporcionales. Comparemos la caída de una esfera de madera y la de una esfera de plomo. La de plomo tiene masa inercial diez veces mayor, pero está sometida a una fuerza (peso) diez veces mayor, y por eso ambas caen con igual aceleración. Si la esfera de plomo es atraída con una fuerza diez veces mayor, se debe precisamente a que su masa gravitatoria es diez veces mayor que la de la esfera de madera.

En suma, la relación que guardan las masas inerciales de dos cuerpos es la misma que guardan sus masas gravitatorias: dichas cantidades son proporcionales.

De hecho, por una elección adecuada de las unidades de medición, ambas masa pueden ser identificadas y consideradas iguales para el mismo cuerpo.

La proporcionalidad entre ambas masa fue interpretada por la física clásica como un singular “coincidencia”. No derivada de ningún supuesto de la mecánica newtoniana. En realidad, parecería obra de un bromista, como aquel que cargaba previamente las esferas para que se moviera hacia la pared con igual aceleración. Fue Einstein quien sospechó por primera vez que es “coincidencia” ocultaba, en realidad, una clave esencial para su proyecto de generalización del principio de la relatividad a todo sistema. Pensemos nuevamente en la plataforma giratoria analizada por Newton y Mach. El observador de la plataforma comprueba que los cuerpos son intervenidos por fuerzas “centrífugas”, a las que puede, según Mach identificar como gravitatorias si considera que la plataforma está en reposo. ¿Es posible distinguir entre ambas situaciones? La fuerza centrífuga, detectada por un observador no inercial cuyo sistema rota en respecto a un Sistema Inercial, depende de la masa inercial del cuerpo sobre el que se presenta. Una fuerza gravitacional en cambio, depende de la masa gravitatoria del cuerpo. Si ambas masas fuesen independientes (como la masa inercial y la carga eléctrica) sería suficiente un simple experimento, realizado por el observador de la plataforma, para decidir entre las dos posibilidades. Al poner en un mismo punto de la plataforma cuerpos de igual masa inercial pero distinta masa gravitatoria, la fuerza medida sobre ellos sería igual si la plataforma girase, pero distinta si existiese un campo gravitatorio.

En el primer caso, se observaría sobre todos los cuerpos una misma aceleración; en el segundo, cada cuerpo tendría una aceleración distinta. Las situaciones no serían equivalentes. Algo parecido ocurriría con un vagón que se haya en reposo sobre las vías y que de pronto se pone en movimiento. Un pasajero que se haya dentro del vagón, herméticamente cerrado, puede atribuir a algunas de estas causas el brusco tirón que lo ha arrojado hacia atrás:

- a) El vagón ha sido acelerado con respecto a un sistema inercial.
- b) Fuera del vagón se ha manifestado sorpresivamente una gran masa gravitatoria.

Nuevamente, si las masas inerciales y gravitatorias no fuesen iguales, un simple experimento permitiría al pasajero decidir cuál de esas dos situaciones es la que corresponde. Einstein, comprendió que la igualdad de ambas masa era una simple consecuencia de la incertidumbre de escoger entre las hipótesis anteriores.

Si un sistema acelerado con respecto a un SI (Sistema Internacional) es equivalente a un campo gravitacional, las masa inercial y gravitatoria de un cuerpo deben ser iguales.

Cuando un astronauta está bajo la acción de la aceleración de gravedad terrestre manifiesta un cierto peso ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$) y cuando se encuentra fuera del influjo de la fuerza de gravedad ($g = 0$) entonces deja de ser atraída y flota o tiende a flotar en la nave.

La ecuación que establece esto es $w = mg$

Siendo $w = \text{peso}$
 $m = \text{masa}$
 $g = \text{aceleración de la gravedad}$

ACTIVIDAD DE REGULACIÓN

1. ¿Qué relación existe entre masa inercial y masa gravitacional?
2. ¿Cuándo pesa y cuándo no pesa un astronauta durante un viaje espacial?
3. Un cuerpo tiene una masa de 2 Kg. mientras otro tiene una masa de 5 Kg. ¿Cuál tiene mayor inercia y por qué?

3. TEORIA DEL ESPACIO-TIEMPO-GRAVITACION

3.1 GEODÉSICAS

Una Geodésica es una línea que se curva tan poco como sea posible. En la esfera, a las geodésicas se les llama también círculos máximos; el ecuador es un ejemplo del círculo máximo. Es posible demostrar que el camino más corto para unir dos puntos cualesquiera debe ser una geodésica, así pues, resulta económico para las líneas aéreas seguir rutas por círculos máximos (geodésicas) entre las ciudades. Las geodésicas se pueden definir en el espacio-tiempo como líneas, en el propio espacio-tiempo, que se curvan lo mínimo posible.

Las geodésicas en el espacio-tiempo se clasifican como espaciales, nulas (lumínicas) o temporales.

El significado físico de cada uno de estos tipos de geodésicas es el siguiente:

Si dos observadores inerciales que están en reposo, uno respecto del otro, estiran una cuerda entre ambos, la configuración de la cuerda sobre una superficie de simultaneidad (según la determinan esos observadores inerciales) será una geodésica espacial. Las geodésicas nulas y las geodésicas temporales tienen una significación mucho más directa. La trayectoria de un rayo luminoso en el espacio-tiempo se describe mediante una geodésica nula. Los observadores inerciales son precisamente los observadores que hacen que se muevan las geodésicas temporales de la métrica espacio temporal. En otras palabras, el movimiento más directo posible de un observador en el espacio-tiempo es el movimiento no acelerado (inercial). El hecho que los movimientos de observadores inerciales se identifiquen con geodésicas temporales de la métrica del espacio-tiempo desempeña un papel muy importante en la formulación de la relatividad general. Así como el camino más corto entre dos puntos sobre una esfera es una geodésica, en el espacio-tiempo la ruta con el tiempo transcurrido más largo entre dos eventos relacionados temporalmente es una geodésica temporal.

En la geometría euclidiana, las geodésicas inicialmente paralelas permanecen siempre paralelas, es decir, las líneas rectas paralelas nunca se encuentran, ni se apartan una de otra. Se describe esta situación diciendo que la geometría euclidiana es plana. Por otra parte, geodésicas inicialmente paralelas sobre la esfera empiezan a converger entre sí y finalmente se cruzan. Decimos, por consiguiente, que la geometría de la esfera es curva. Según este criterio, ¿es la geometría del espacio-tiempo plana o curva?

Como se mencionó anteriormente, las geodésicas temporales en el espacio-tiempo son simplemente las trayectorias de observadores inerciales. Dos geodésicas temporales, inicialmente paralelas, corresponden a dos observadores inerciales que inicialmente están en reposo (velocidad cero) cada uno respecto al otro. En la relatividad especial, los observadores inerciales que se hallan inicialmente en reposo permanecen siempre en reposo uno con respecto al otro, es decir, conservan una separación espacial constante. En consecuencia, las geodésicas temporales inicialmente paralelas permanecen siempre paralelas. Es fácil demostrar que el otro tanto debe ocurrir con las geodésicas nulas y con las espaciales. Por lo tanto, en la relatividad especial la geometría del espacio-tiempo es plana.

En cuanto a la relatividad general, la presencia de un campo gravitatorio se refleja en el hecho de que las geodésicas –inicialmente paralelas– de la métrica de espacio-tiempo, no se mantiene paralelas. En otros términos, el espacio-tiempo es curvo

Si se observa el papel doble de la métrica del espacio-tiempo en relatividad general:

- a) Tal como en la relatividad especial, la métrica contiene toda la información acerca de la relación espacio-temporal de los eventos.
- b) La misma describe completamente el campo gravitatorio al especificar, por medio de sus geodésicas temporales, el movimiento de todos sus observadores que caen libremente.

Así pues, la descripción de la gravitación está íntimamente vinculada a las propiedades del espacio y del tiempo en cuanto éstas son descritas mediante una sola cantidad: la métrica del espacio-tiempo. La presencia de un campo gravitatorio corresponde a la curvatura de la geometría del espacio-tiempo.

3.2 CAMPO GRAVITACIONAL

Generalmente, a la pregunta de: “ ¿por qué cae a la tierra una piedra que elevamos a cierta altura y luego la soltamos?”: se contesta: “Por qué es atraída por la tierra”. La física moderna formula una contestación un tanto diferente, por la siguiente razón. Mediante un estudio más preciso de los procesos electromagnéticos, se ha llegado a la concepción de que no existen acciones directas a distancia. Por ejemplo, si un imán atrae a un trozo de fierro, no debemos contenernos con la concepción de que el imán actúa directamente sobre el fierro, a través del espacio vacío que los separa, sino que, de acuerdo con Faraday, debemos imaginarnos que el imán produce siempre, en el espacio que lo rodea, algo físicamente real a lo que se denomina “campo magnético”. Ese campo magnético actúa, a su vez, sobre el trozo de fierro, de tal suerte que este tiende a moverse hacia el imán. De un modo análogo es como se conciben los efectos de la gravitación.

La acción de la tierra sobre la piedra se realiza de una manera indirecta. La tierra engendra a su alrededor un campo gravitatorio, que actúa sobre la piedra y causa su movimiento de caída. Como es sabido por la experiencia, la intensidad de esta acción disminuye de acuerdo con una ley bien determinada, a medida que el cuerpo se encuentra más alejado de la tierra. Esto significa, según nuestra concepción, que la ley que gobierna las propiedades espaciales del campo gravitatorio debe estar muy bien determinada para representar con exactitud la disminución de la fuerza de gravitación, cuando aumenta la distancia del cuerpo. Podemos imaginarnos, aproximadamente, que el cuerpo (por ejemplo, la tierra) engendra directamente el campo en su vecindad inmediata; a mayor distancia, la intensidad y el sentido del campo se encuentran determinados por la ley que rige las propiedades espaciales de los propios campos gravitacionales.

El campo gravitatorio, a diferencia de los campos eléctricos y de los magnéticos, muestra una propiedad sumamente notable, que es de importancia fundamental. Los cuerpos que se mueven bajo la influencia exclusiva del campo gravitatorio sufren una aceleración que no depende, en modo alguno, de la materia, ni del estado físico del cuerpo. Un trozo de plomo y un trozo de madera, por ejemplo, caen justamente con la misma velocidad dentro del campo gravitatorio (en el vacío), ya sea que se dejen caer con la misma velocidad inicial o con velocidades iniciales diferentes. Esta ley rigurosamente válida se puede formular también de otra manera, en virtud de la siguiente consideración.

De acuerdo con la ley del movimiento de Newton, tenemos que:

$$(\text{fuerza}) = (\text{masa inercial}) \times (\text{aceleración}), \dots (1)$$

En donde la “masa inercial” es una constante característica del cuerpo acelerado. Ahora bien, si la gravitación es la causa de la aceleración, por otra parte resulta que:

$$(\text{fuerza}) = (\text{masa gravitatoria}) \times (\text{intensidad del campo gravitatorio}) \dots (2)$$

En donde la “masa gravitatoria” es igualmente una constante característica del cuerpo. De esas dos relaciones se obtiene:

$$(\text{aceleración}) = \frac{(\text{masa gravitacional})}{(\text{masa inercial})} \times \text{intensidad del campo gravitatorio} \dots (3)$$

Pues bien, si, como lo demuestra la experiencia, la aceleración producida por un cierto campo gravitatorio es siempre la misma, independientemente de la naturaleza y el estado del cuerpo, entonces la relación entre la masa gravitatoria y la masa inercial debe ser también la misma para todos los cuerpos. Por lo tanto, eligiendo convenientemente las unidades, se puede hacer que dicha relación sea igual, a la unidad, obteniéndose entonces el enunciado siguiente: La masa gravitatoria de un cuerpo es igual a su masa inercial.

Aun cuando es cierto que la mecánica ya había registrado ese enunciado, también es cierto que no lo había interpretado. Solamente se puede llegar a establecer una interpretación satisfactoria mediante el reconocimiento de este hecho: una y la misma propiedad del cuerpo se manifiesta, según las circunstancias, ya sea como “masa inercial”, o bien, como masa gravitacional. Anteriormente se manejó la igualdad entre dichas masas.

3.3 ESPACIO–TIEMPO CURVO

Ecuación de Einstein: “Curvatura del espacio–tiempo” = densidad
energética
de la materia

Hay que describir el campo gravitatorio en función de la geometría curva del espacio-tiempo. Para completar la especificación de la teoría falta especificar qué geometría espacio-temporal (es decir campo gravitatorio) está asociada a una determinada configuración de la materia. Einstein lo hizo al postular una ecuación que, en esencia dice:

“Curvatura del espacio–tiempo” = densidad energética de la materia.

Einstein, de este modo, nos proveyó de una teoría de la gravitación verdaderamente notable y hermosa. Los efectos de la gravitación se expresan plenamente desde el punto de vista de la estructura y, de conformidad con algunas de las ideas de Mach, a la estructura del espacio-tiempo, a ésta se le relaciona con la distribución de la materia mediante la ecuación de Einstein.

Esta descripción de la ecuación de Einstein tiene algo de simplificación, y debe hacerse algunas advertencias. En primer lugar, el lado izquierdo de la ecuación no es la curvatura total del espacio-tiempo, sino sólo una parte de ésta. Por lo tanto, fuera de la distribución de la materia (donde el lado derecho de la ecuación de Einstein será cero) el espacio-tiempo será en general todavía curvo, es decir, estará presente un campo gravitatorio. Además, la radiación gravitatoria ondula en la curvatura que se propagan por todo el espacio-tiempo puede existir. Enseguida, el lado derecho contiene contribuciones de otras propiedades de la materia además de la densidad de energía. En particular las presiones y las tensiones contribuyen a la curvatura del espacio-tiempo de la relatividad general.

Si no hay materia presente, el lado de la ecuación de Einstein desaparece y una sola solución, perfectamente válida, es la geometría espacio-temporal plana de la relatividad especial. (Sin embargo, existen también muchas otras soluciones que describen posiblemente campos gravitatorios exteriores de cuerpos, ondas gravitatorias, etc.) En este sentido, la relatividad general incluye a la relatividad especial como un caso particular.

En nuestra descripción de la relatividad general se postuló que los cuerpos que caen libremente, siguen las geodésicas de la métrica del espacio-tiempo. Resulta, no obstante, que como se descubrió más de diez años después de la formulación de la relatividad general la ecuación de Einstein determina realmente el movimiento de la materia en el espacio-tiempo. La hipótesis geodésica se deriva en verdad como una consecuencia de la ecuación de Einstein y no tiene que postularse por separado

Debe mencionarse, por último, que en la práctica ha resultado muy difícil obtener soluciones exactas de la ecuación de Einstein. Por fortuna se conocen muchas soluciones de gran interés para la física (por ejemplo, soluciones que describen los agujeros negros) y se han investigado detalladamente las propiedades de estos espacios-tiempos. Pero el estudio de que posibles estructuras del espacio-tiempo se permiten en la relatividad general, continúa obstaculizando por nuestra incapacidad general para resolver la ecuación de Einstein.

3.4 MODELOS COSMOLÓGICOS (ESTRUCTURA DEL ESPACIO)

De acuerdo con la teoría de la relatividad generalizada, las propiedades geométricas del espacio, no son independientes, sino que están condicionadas por la materia. Por lo tanto, solamente se puede afirmar algo acerca de la estructura geométrica del universo, cuando se supone conocido el estado de la materia. Sabemos por experiencia que, para un sistema de coordenadas elegido convenientemente, las velocidades de las estrellas son pequeñas en comparación con la velocidad de propagación de la luz. Por consiguiente, podemos conocer, en una primera aproximación, la estructura del universo en su conjunto, considerando a la materia como si estuviera en reposo.

Ya sabemos, por nuestras reflexiones anteriores, que el comportamiento de las reglas de medir y de los relojes es influido por los campos gravitatorios, es decir, por la distribución de la materia. De lo cual se desprende que, en nuestro universo, no se puede hablar que nuestro universo se distinga poco de un universo euclidiano; y esta concepción es todavía más probable por el hecho de que el cálculo nos muestra que, incluso las masa de la magnitud de nuestro sol, solamente ejercen una influencia mínima sobre la métrica del espacio que las rodea. Podríamos considerar que nuestro universo se comporta, desde el punto de vista geométrico, como una superficie encorvada irregularmente en sus detalles, pero que, en su conjunto, no se distingue apreciablemente de una superficie plana; como ocurre, por ejemplo, con la superficie de un lago ondulada por las olas pequeñas. Podríamos decir adecuadamente que se trata de un universo cuasi-euclidiano. Espacialmente, este universo sería infinito. Sin embargo, el cálculo nos muestra que, un mundo cuasi-euclidiano, la densidad media de la materia sería nulo. Por lo tanto, semejante universo no podría estar poblado por todas partes como materia.

En cambio si en el universo la densidad media de la materia difiere de cero, aunque sea muy poco, entonces el universo no es cuasi-euclidiano. Por lo contrario, el cálculo nos muestra que, si la materia se encuentra distribuida uniformemente, entonces el universo debe ser necesariamente esférico (o elíptico). Pero, como en la realidad la materia se encuentra distribuida irregularmente en detalle, entonces el universo se aparta en el detalle de la forma esférica, siendo cuasi-esférico. No obstante, el universo será necesariamente finito. La teoría suministra inclusive una relación simple entre la extensión espacial del universo y la densidad media de la materia que lo constituye.

$$R^2 = \frac{2}{x p} \dots (4)$$

Para el "radio" R del universo, se obtiene la ecuación:

Utilizando el sistema c.g.s., tenemos: $\frac{2}{x} = 1.08 \times 10^{27}$; p es la densidad media de la materia.

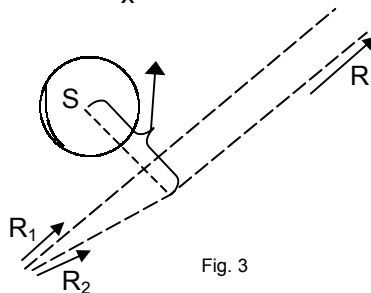


Fig. 3

La verificación de ese importante resultado, se la debemos a la Astronomical Royal Society. Dicha sociedad, sin detenerse por la guerra, ni por las dificultades de orden psicológico suscitadas por ella, envió a varios de sus astrónomos más descartados (Eddington, Crommelin, Davidson) y organizó dos expediciones que tomaron fotografías durante el eclipse total de sol que se produjo el 29 de mayo de 1919, en Sobral, (Brasil) y en la Isla Príncipe (África Occidental). Las desviación entonces que se habían previsto entre las fotografías tomadas durante el eclipse de Sol y las fotografías de comparación eran solamente de unos cuantos centésimos de milímetro. Por lo tanto, eran extraordinarias las exigencias que se requerían tanto en la precisión de las fotografías como en su medición.

El resultado de las observaciones confirmó las previsiones de la teoría de un manera completamente satisfactoria. En la tabla siguiente tenemos componentes rectangulares de las desviaciones de las estrellas, tanto las observadas como las calculadas, medidas en segundos de arco.

Número de la estrella	Primera coordenada		Segunda coordenada	
	Desviación observada	Desviación calculada	Desviación observada	Desviación calculada
11	-0.19	-0.22	+0.16	+0.02
5	-0.29	-0.31	-0.46	+0.43
4	-0.11	-0.10	+0.83	+0.74
3	-0.20	-0.12	+1.00	+0.87
6	-0.10	-0.04	+0.57	+0.40
10	-0.08	+0.09	+0.35	+0.32
2	+0.95	+0.85	-0.27	-0.09

3.5 LA CURVATURA DE LA LUZ⁽¹⁾

“De acuerdo con la teoría de la relatividad generalizada, un rayo luminoso, al pasar por un campo gravitatorio, debe sufrir una encorvadura a la que experimenta la trayectoria de un cuerpo lanzado a través de un campo gravitatorio. Conforme a la teoría, un rayo luminoso que pasa cerca de un cuerpo celeste es desviado hacia dicho cuerpo; el ángulo de desviación α para un rayo luminoso que pasa a una distancia del sol igual a Δ radios de éste es:

$$\alpha = \frac{1.7 \text{ segundos de arco}}{\Delta} \dots (5)$$

⁽¹⁾ ALBERT EINSTEIN. La relatividad. Editorial Grigalbo (1960)

Debemos agregar que, de acuerdo con la teoría, la mitad de esa desviación es producida por el campo de atracción (newtoniana) de Sol, y la otra mitad por la modificación geométrica (“curvatura”) del espacio, producida por el Sol.

Ese resultado permite hacer una verificación experimental, por medio de fotografías de las estrellas tomadas durante un eclipse total de Sol. Es necesario esperar a que se produzca un eclipse, por que en cualquier otro momento, la atmósfera está iluminada tan intensamente por la luz del Sol, que las estrellas vecinas son invisibles. En la figura 3 se muestra claramente cuál es el efecto esperado. Si no estuviese presente el Sol S, se podría ver una estrella que estuviera prácticamente a una distancia infinita, en la dirección R_1 . Pero, en virtud de la desviación producida por el Sol, la estrella se ve en la dirección R_2 , es decir, a una distancia del centro del Sol, un poco mayor de la que corresponde a la realidad.

En la práctica, la verificación se realiza del modo siguiente. En el momento en que el Sol es eclipsado totalmente, se toman fotografías de las estrellas que se encuentran en su vecindad. Además, se toma una segunda fotografía de las mismas estrellas, cuando el Sol se encuentra en otra posición en el cielo (es decir, unos meses antes o después del eclipse). Las imágenes de las estrellas en las fotografías tomadas durante el eclipse de Sol deben tener un desplazamiento radical hacia el exterior (alejándose del centro del Sol), con respecto a sus imágenes en las fotografías de comparación, en una magnitud correspondiente al ángulo α .

3.6 EL MOVIMIENTO GRAVITATORIO HACIA EL ROJO

Supongamos que un observador O_1 envía dos señales, con intervalo Δt_1 entre éstas, y que el observador O_2 recibe esas señales. En el espacio-tiempo curvo –o a un espacio-tiempo plano si hay movimiento relativo entre O_1 y O_2 – no existe razón por la cual el intervalo de tiempo Δt_2 entre la recepción de las señales por O_2 deba ser igual a Δt_1 . Por tanto, en particular, si O_1 emite luz en la frecuencia V_1 , O_2 observará, en general, que la frecuencia –de aquella es $V_2 \neq V_1$. Si O_1 y O_2 están “en reposo”, y $V_2 \neq V_1$, –este efecto se conoce como el desplazamiento gravitatorio hacia el rojo. Se puede demostrar que la luz emitida en una región de intensa atracción gravitatoria será vista por un observador distante con una frecuencia más baja.

No es difícil ver, en verdad, que el desplazamiento gravitatorio hacia el rojo debe ocurrir si se conserva la energía. La teoría de los cuanta nos dice que la energía, E , de un fotón (es decir, la luz) es proporcional a su frecuencia, $E = hV$, donde h es la constante de Planck. Si la frecuencia de la luz permaneciera invariable al abandonar una región de fuerte atracción gravitatoria, su energía no decrecería. Podríamos entonces convertir la energía de los fotones en un rayo de luz para conservar la energía de la masa y disminuir de nuevo la masa en la región del campo fuerte, utilizando la atracción gravitatoria para operar. Si ahora convertimos nuevamente los fotones la restante energía de la masa, habremos vuelto a la misma configuración con la que empezamos, pero se habría ganado energía en el proceso de reducir la masa. Por lo tanto, la fórmula cuántica $E = hV$, junto con la conservación de la energía, requiere la existencia del fenómeno del desplazamiento gravitatorio hacia el rojo predicho por la relatividad general. Este efecto ha sido confirmado exactamente mediante la experimentación.

ACTIVIDAD DE REGULACIÓN

1. ¿A qué se le llama línea geodésica? Y ¿cómo demuestras que existen?
2. ¿Por qué es necesario que el Sol se encuentra eclipsado al medir la deflexión de las estrellas cercanas?

4. CONSECUENCIAS DE LA TEORIA GENERAL DE EINSTEIN

La verificación de la teoría general de Einstein ofrece dificultades en grado mucho mayor que la especial, ya que los efectos que predice desviaciones con respecto a la teoría Newtoniana obligan a emplear una técnica experimental u observacional altamente perfeccionada. “Toda especulación”, escribe Einstein, “tiene que ser controlada por la experiencia, y la más hermosa de las teorías tiene que ser rechazada si no se ajusta a los hechos”.

La teoría de Newton es excelente aproximación a la de Einstein (válida en caso de fuerzas gravitacionales débiles) y por ello las discrepancias son relativamente pequeñas. Sin embargo, ellas han sido detectadas y avalan la teoría relativista.

De la leyes de la mecánica clásica se infiere una descripción cinemática del movimiento planetario que asigna a cada planeta una trayectoria elíptica (cerrada). Tal descripción no coincide exactamente con la que deriva de la Relatividad Generalizada, ya que ésta prevee órbitas elípticas que al mismo tiempo rotan lentamente alrededor del Sol, resultando así una trayectoria semejante a una roseta. Es decir que el punto de la elipse más cercana al Sol (perihelio) sufre un desplazamiento gradual a medida que transcurren los años planetarios. Ahora bien, las fuerzas gravitatorias entre el Sol y los planetas son débiles, y por ello el desplazamiento del perihelio predicho por Einstein es prácticamente inobservable, salvo en el caso de planeta más interior: Mercurio. La atracción gravitatoria, por su proximidad al Sol, es lo suficientemente elevada como para que el valor teórico resulte significativo 42.9" por siglo. Según ello la elipse de Mercurio describiría una vuelta alrededor del Sol en ¡tres millones de años! En realidad, el efecto ya era conocido desde los tiempos de Leverrier (mediados del siglo pasado) sin que nadie hubiera podido hallar una explicación razonable del mismo. El valor medio era 42.5". Actualmente se ha logrado constatar el desplazamiento del perihelio de Marte, de la Tierra y de Venus (1960).

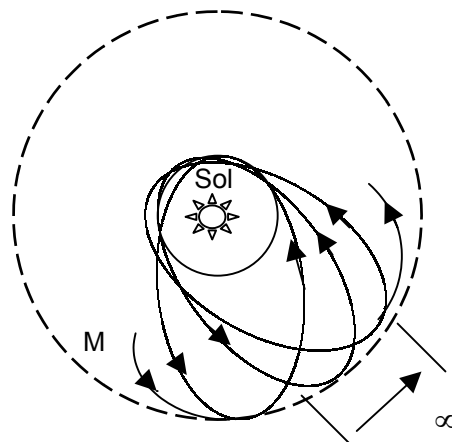


Fig 4

Ya en 1911 Einstein solicitaba de los astrónomos que prestasen atención a la posibilidad de detectar la reflexión de los rayos luminosos por efectos de la gravitación. La oportunidad podría ser propicia durante un eclipse de Sol; si realmente se produce tal desviación al pasar cerca del disco solar un rayo proveniente de unas estrella, la imagen de ésta en una placa fotográfica debe mostrar un ligero desplazamiento con respecto a la posición habitual (cuando el disco solar no se encuentra allí). Poco antes de finalizada la primera guerra mundial, fueron enviadas dos expediciones de científicos británicos a Sobral (Brasil) y Guinea con el objeto de fotografiar un eclipse total de Sol, el fenómeno era particularmente adecuado para verificar el “efecto Einstein”, ya que el disco solar, oscurecido, se vería proyectado sobre la constelación de Hayas, un grupo de estrellas muy brillantes.

La concordancia de la desviación observada con la predicción de Einstein resultó notable, y los resultados fueron expuestos por el director del proyecto, Arthur Eddington, ante los miembros de la Real Sociedad de Londres a fines de 1919.

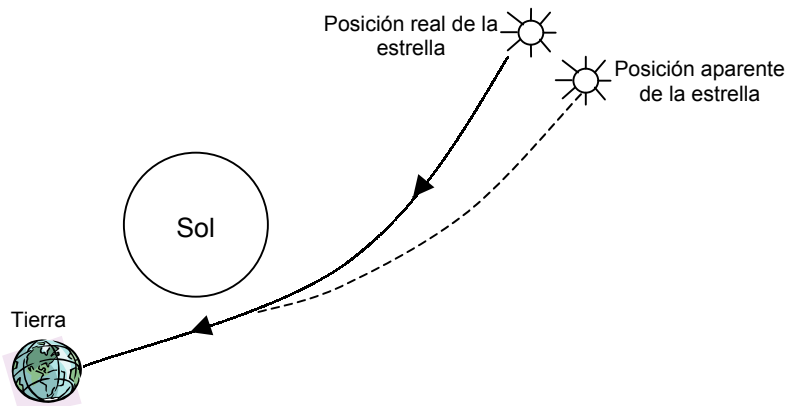


Figura 5

Una tercera consecuencia verificable de los supuestos de la relatividad Generalizada se refiere a la posibilidad de detectar la influencia de la gravitación sobre la marcha de los relojes. Tal cosa es particularmente difícil porque el efecto sólo admitiría ser comprobado bajo campos gravitatorios muy intensos. La relatividad predice que una persona que habitara en la planta baja de un gran edificio de departamentos envejecería más lentamente que otra instalada en el piso más alto, ya que en la superficie terrestre la gravitación es ligeramente mayor. No hay esperanzas de detectar la diferencia con relojes disponibles: en diez años, estima George Gamow, la persona de la planta baja habrá envejecido unas millonésimas de segundo menos que la otra. Tampoco podemos llevar reloj hasta el Sol o una estrella, para cotejar su marcha con la de otro ubicado en la tierra. Sin embargo, como ya hemos dicho, disponemos de relojes muy precisos distribuidos en los cuerpos celestes: los átomos. Cuando se quema un trozo de cloruro de sodio en la llama de un mechero, el color amarillo intenso que se observa indica la presencia de átomos de sodio que emiten dicha luz. Al pasar ésta a través de un prisma, se obtendrá un espectro cuya línea amarilla revela inequívocamente la presencia del elemento sodio en sustancia luminosa. La longitud de onda de la luz amarilla del sodio está vinculada con la frecuencia con que vibran los átomos de ese elemento, o sea con

el número de oscilaciones que efectúan por un segundo. Un átomo es capaz de emitir solamente ondas luminosas de frecuencias bien definidas; un atraso en el “ritmo” de vibración de los átomos se traducirá en una disminución de dichas frecuencias.

Por lo tanto, las líneas correspondientes del espectro sufrirán un corrimiento en el sentido violeta-rojo del espectro. (El color rojo es el mínima frecuencia en el espectro visible). En resumen, deberá compararse la posición de las líneas del espectro de un elemento, obtenido en un laboratorio terrestre, con las del mismo elemento en el espectro de la luz solar o de una estrella cualquiera. Dichas líneas, si la mayor gravitación del astro incide sobre el “ritmo” de vibración de los átomos, mostrarán un desplazamiento hacia el rojo, tanto mayor cuanto mayor sea el campo gravitatorio.

El efecto ha sido verificado de modo bastante concluyente durante el estudio de los espectros emitidos por ciertas estrellas muy particulares, las enanas blancas, que presentan una densidad asombrosa; la de algunas de ellas es tal, que una cuchara de materia pesaría en la Tierra unas 100 toneladas.

Ante un campo gravitatorio de tanta intensidad, el corrimiento hacia el rojo previsto por la relatividad generalizada es considerable y las observaciones realizadas no sólo confirman su existencia sino que se ajustan razonablemente a las previsiones teóricas.

En la actualidad se dispone de medios experimentales para revelar el “enrojecimiento” de las líneas en laboratorios terrestres por efectos de las variaciones de la gravitación en proximidades de nuestro planeta. Experiencias realizadas con rayos gamma lanzados hacia abajo desde lo alto de una torre, por aplicaciones del llamado efecto Mössbauer, permitieron verificar en 1960 con excelente precisión el corrimiento relativista.

RECAPITULACIÓN

La relevancia del presente fascículo fue el hecho de mostrar en la forma más fácil y amena posible, la teoría de la Relatividad General. La Relatividad General es la teoría que Einstein propuso para considerar los efectos gravitacionales que la Relatividad Especial no describía.

Para considerar la vigencia de estas ideas podemos adoptar al menos dos puntos de vista diferentes y complementarios:

- Uno es la relación de estas teorías con el mundo físico, es decir, su comprobación experimental,
- El otro es la relevancia de estas ideas para la formulación de otras teorías, ya sea que éstas incluyan o no las interacciones gravitacionales descritas por la Relatividad General.

La evidencia experimental que se ha acumulado hasta la fecha para confirmar cuantitativamente las predicciones de la relatividad puede en su forma más somera, clasificarse en evidencia directa e indirecta. La equivalencia entre las masas y la energía ha sido confirmado en múltiples observaciones como son, por ejemplo, la fusión nuclear y los experimentos con aceleradores. Otros experimentos que ha servido para confirmar las predicciones de la teoría son la observación en la presesión del perihelio de Mercurio, el fenómeno de corrimiento al rojo que ha sido verificado con extrema precisión utilizando el efecto Mossbauer, y el fenómeno de las desviación de la luz por campos gravitacionales que ha sido confirmado en observaciones durante eclipses.

En cuanto a la evidencia indirecta, uno de los más notables descubrimientos recientes ha sido el de las observaciones astrofísicas relativas a un par de pulsares que parecen la emisión de ondas gravitacionales predichas por la teoría.

La influencia de las ideas mencionadas con anterioridad en la elaboración de teorías físicas es enorme. Mencionamos a continuación algunos de los aspectos teóricos en los que se trabaja activamente en la actualidad y que están íntimamente relacionados con las ideas de Einstein. Algunas de las extensiones de la teoría de la gravitación de Einstein con las llamadas teorías gravitacionales con torsión. Estas teorías, además de considerar la curvatura del espacio-tiempo como producida por las masas gravitacionales, toman en cuenta otros aspecto de la geometría del espacio-tiempo que es el de la torsión, producida o ligada a la rotación de estos cuerpos (spin).

La llamada teoría de súper gravedad es otra teoría que contiene a la de Einstein y pretende lograr una unificación de las interacciones gravitacionales con otro tipo de interacciones.

Es esencialmente del estilo de la de Einstein, pero a ella se han agregado otros campos cuyas propiedades matemáticas son más complejas que las de los campos gravitacionales.

Existen teorías que, en esencia contiene la misma idea manifiesta, pero están referidas a otra clase de transformaciones asociadas con diversos tipos de simetrías. Dentro de este tipo de teorías se está tratando de obtener una unificación de la descripción de las interacciones conocidas hasta el momento, o sea, interacciones gravitacionales, débiles, electromagnéticas y nucleares o interacciones fuertes. En este rubro se ha conseguido un gran éxito recientemente, al construirse una teoría unificada de interacciones electromagnéticas débiles.

Existe en el programa de muchos investigadores el problema de unificar interacciones fuertes electromagnéticas y débiles (llamado proyecto de gran unificación o el proyecto de súper unificación), que reúne a los cuatro tipos de interacciones. Una teoría de este tipo, de lograrse constituiría la culminación del sueño de Einstein de entender en forma única todos los tipos de interacciones conocidas hasta el momento.

Las teorías son, en última instancia, una aproximación a algunos tópicos del comportamiento de la naturaleza y, por tanto, el hecho de que existan teorías que abarquen otros aspectos de este comportamiento no considerado en la Relatividad General no resta importancia a esta teoría. En efecto, cualquier teoría que pretenda explicar otros fenómenos además de la gravitación deberá, en algún límite, reducirse a la teoría de la Relatividad General, cuya explicación de la naturaleza, en lo que a los fenómenos gravitatorios se refiere, es muy satisfactoria.

Por otro lado, no es posible hablar de una unificación teórica sin incluir en este formalismo la otra teoría fundamental del siglo XX: la teoría cuántica.

ACTIVIDADES DE CONSOLIDACIÓN

1 ¿Dónde pesa más una persona?

- a) En la luna
- b) En la Tierra
- c) En Júpiter

¿Por qué? _____

2 ¿Flotará libremente un astronauta durante todo el viaje o únicamente cuando las fuerzas de atracción se igualan?

3 Si se da la masa y el radio de un planeta X ¿Cómo se calcularía la aceleración de la gravedad sobre la superficie de ese planeta?

4 A un cuerpo de 15 kg de masa situado sobre el piso se le aplica una fuerza horizontal de 40 Newtons. ¿Qué aceleración se le produce si la fuerza de fricción entre el cuerpo y el piso es de 10 Newtons?

- 5 Si pudiera cavar un túnel hasta el centro de la Tierra ¿Piensas que la fuerza que actúa sobre una masa m todavía obedecería a la ecuación:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- 6 Encontrar cuál es el valor de la aceleración de la gravedad lunar en la superficie de dicho cuerpo celeste, sabiendo que la masa de la luna es $m = 7.34 \times 10^{22}$ kilogramos y el radio de superficie $r = 1.74 \times 10^6$ m.
- 7 Una persona en un elevador observa que su peso se reduce a la mitad. ¿Estará subiendo o bajando?
- 8 ¿A qué se debe que un rayo de luz se desvíe cuando pasa cerca de la superficie del Sol?
- 9 ¿Qué es el corrimiento hacia el rojo?
- 10 De todos los planetas ¿por qué es Mercurio el mejor candidato para hallar la evidencia de la relación de la gravitación en el espacio?.
- 11 Aplicando la ley de la gravitación universal, encuentra la aceleración con que caen todos los cuerpos colocados sobre la superficie terrestre. Los datos de masa y radio de la Tierra son respectivamente: 5.98×10^{24} kg y 6.37×10^6 m; y la constante de proporcionalidad o constante de gravitación universal su valor depende del sistema de unidades que se use, y en el S.I.U. que estamos empleando vale $\frac{6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3}{\text{kg seg}^2}$.

AUTOEVALUACIÓN

Las respuestas siguientes son las que debiste dar a las preguntas anteriores. Son similares a las tuyas felicitades, de no ser así, repasa los contenidos correspondientes y ubica dónde estuvo la falla.

1. b) Una persona pesará más un planeta o cuerpo que tenga mayor masa. Por lo tanto pesará más en Júpiter, menos en la Tierra y mucho menos aún, en la Luna.

2. Flotará únicamente en ausencia de campos de atracción de gravitacional.

3. A partir de la ecuación $g = \frac{Gx}{R^2}$

4. $F_t^2 = F_n^2 + F_v^2$

$$F_T = \sqrt{F_n^2 + F_v^2} = \sqrt{(40 \text{ N})^2 + (10 \text{ N})^2} = \sqrt{1600 \text{ N}^2 + 100 \text{ N}^2}$$

$$\sqrt{1700 \text{ N}^2} = 41.23 \text{ N}$$

$$F = ma \quad F_T = 41.23 \text{ N}$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{41.23 \text{ N}}{15 \text{ kg}} = 2.75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

5. La ecuación $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ ya no sería válida por que la fuerza en ese punto es cero.

La fuerza sería nula, pues al estar en el centro de la Tierra ya no hay atracción.

$$6. a = \frac{Gm}{r^2} = \frac{(6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2})(7.34 \times 10^{22} \text{kg})}{(1.74 \times 10^6 \text{m})^2}$$

$$a = 1.62 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}^2}$$

7. El elevador está bajando y es por eso que un a balanza registrará un disminución en el peso de una persona.
8. Esto se debe a que la luz tiene masa y por ese motivo se desvía al acercarse a un campo gravitacional, curvándose ligeramente.
9. El corrimiento hacia el rojo es la longitud de onda que experimenta la luz de una estrella que se está alejando de nosotros.
10. Mercurio es el planeta más cercano al Sol, es pequeño y se desplaza a gran velocidad en una órbita elíptica irregular debido a la distorsión a su alrededor del espacio-tiempo como consecuencia de la intensidad del campo gravitacional del Sol. Por esta razón la órbita elíptica sufre una desviación de 43 segundos de arco por siglo.

$$11. a = \frac{Gm}{R^2} = g$$

g = aceleración de la gravedad ($9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) valor constante

$$g = \frac{(6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2})(5.98 \times 10^{24} \text{kg})}{(6.37 \times 10^6 \text{m})^2} = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

ACTIVIDADES DE GENERALIZACIÓN

1. lee el libro de Einstein (Relatividad Fácil) por Javier Cobo T. Producción Editorial Dante, S.A. pag. 95 a la 159. Coméntalo con tus compañeros.
2. Visita la "SALA UNIVERSUM" que se encuentra en el Museo Universum en Ciudad Universitaria.
3. Visita el Planetario "Luis Enrique Erro". Localizado en la Unidad profesional Zacatenco del IPN.
4. Lee los periódicos y colecciona artículos donde se den a conocer los problemas actuales que se traten temas relacionados con la Teoría de la Relatividad General.

GLOSARIO

Espacio. Está constituido por tres dimensiones, también se le denomina coordenadas espaciales las cuales son latitud (o anchura), longitud(o largo) y altitud (o altura).

Marco de referencia. Sistema de coordenadas que especifica la posición de un punto en el espacio y en el tiempo.

Aceleración. Ritmo al que cambia la velocidad de un objeto.

Gravitación. Cambio en la “curvatura” normal del espacio–tiempo ocasionada por la presencia de cuerpos materiales.

Inercia. Oposición o resistencia al cambio de movimiento o reposo de un cuerpo.

Masa. Cantidad de materia de un cuerpo, su inercia o resistencia a la aceleración.

Peso. La fuerza ejercida sobre un cuerpo por un campo gravitacional. Es proporcional pero no igual a su masa.

Geodésica. Distancia más corta entre dos puntos.

Segundo–luz (Año luz). Distancia recorrida por la luz en un segundo (o en un año).

Relatividad General. Teoría de Einstein basada en la idea de que las leyes de la ciencia deben ser las mismas para todos los observadores, no importa como se está moviendo. Explica la fuerza de la gravedad en términos de la curvatura de un espacio–tiempo de cuatro dimensiones.

Espacio–tiempo. El espacio de cuatro dimensiones, tres formadas por las coordenadas espaciales y la cuarta es el tiempo, cuyos puntos son los sucesos.

Desplazamiento hacia el rojo. Enrojecimiento de la luz de una estrella que se está alejando de nosotros, debido al efecto Doppler.

Cosmología. Estudio del universo como un todo.

Constante cosmológica. Recurso matemático empleado por Einstein para dar al espacio-tiempo una tendencia inherente al expandirse.

Campo. Algo que existe a través de todo el tiempo y el espacio en oposición a una partícula que existe en un solo punto en un instante.

Principio de equivalencia. Las observaciones locales hechas en un marco de referencia acelerado, no pueden distinguirse de las observaciones hechas en un campo gravitacional newtoniano.

Constante de gravitación universal. Denotada por G la cual tiene el siguiente valor $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg seg}^2 = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$. La aceleración de la gravedad = constante denotada por (g) tiene un valor de $9.8 \text{ m}/\text{seg}^2$ que es diferente a G (constante de gravitación universal).

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

M.WALD ROBERT. Espacio, tiempo y gravitación. Fondo de Cultura Económica.

MENDEL SACHS. El concepto de Tiempo en Física y Cosmología. Ciencia y Desarrollo. Julio-Agosto (1978) No. 21. pag. 102-110.

L. BARNET. El Universo y el Doctor Einstein. Fondo de Cultura Económica.

P.C.W. DAVIES. El Espacio y el Tiempo en el Universo Contemporáneo. Fondo de Cultura Económica.

EINSTEIN ALBERT. El Significado de la Relatividad. Editorial Planeta.

JERZY F. PLEBAŃSKI. ALBERT EINSTEIN. Reflexiones en el Centenario de su nacimiento. Ciencia y Desarrollo. Marzo-Abril (1979) No. 25 pag. 5

FELIZ. OYARZABAL. VELASCO. Lecciones de Física. C.E.C.S.A. (1972).