

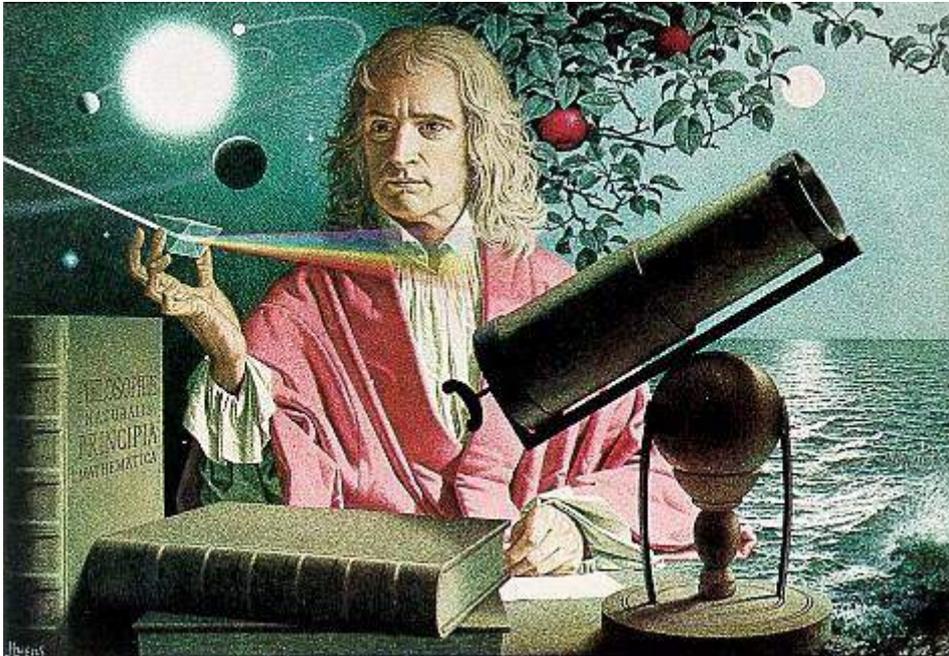
ONDAS GRAVITACIONALES

Materia: 381010703. **Primer Curso**
CIENCIA FACIL
Profesor: Don Luis Felipe Miranda
Programa de Mayores. Universidad de Vigo
Mayo de 2013

INDICE

- 1.- Ley de gravitación universal. Isaac Newton.**
- 2.- Intensidad del campo gravitatorio.**
- 3.- Campo gravitatorio terrestre.**
- 4.- El experimento de Cavendish.**
- 5.- Ondas gravitacionales, teoría y experimento**
- 6.- Ondas Gravitacionales en Cosmología**
- 7.- Ondulación del espacio-tiempo**
- 8.- La gravedad ¿Cómo afecta a los seres vivos?**
- 9.- Conclusiones**

1.- Ley de gravitación universal. Isaac Newton.



Isaac Newton nació el 25 de diciembre de 1642, en Woolsthorpe, Lincolnshire. Cuando tenía tres años, su madre viuda se volvió a casar y lo dejó al cuidado de su abuela. Al enviudar por segunda vez, decidió enviarlo a una escuela primaria en Grantham. En el verano de 1661 ingresó en el Trinity College de la Universidad de Cambridge, donde recibió su título de profesor.

Durante esa época se dedicó al estudio e investigación de los últimos avances en matemáticas y a la filosofía natural. Casi inmediatamente realizó descubrimientos fundamentales que le fueron de gran utilidad en su carrera científica. También resolvió cuestiones relativas a la luz y la óptica, formuló las leyes del movimiento y dedujo a partir de ellas la ley de la gravitación universal.

La ley formulada por Newton y que recibe el nombre de ley de la gravitación universal, afirma que la fuerza de atracción que experimentan dos cuerpos dotados de masa es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa (ley de la inversa del cuadrado de la distancia). La ley incluye una constante de proporcionalidad (G) que recibe el nombre de constante de la gravitación universal y cuyo valor, determinado mediante experimentos muy precisos, es de: $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

Para determinar la intensidad del campo gravitatorio asociado a un cuerpo con un radio y una masa determinados, se establece la aceleración con la que cae un cuerpo

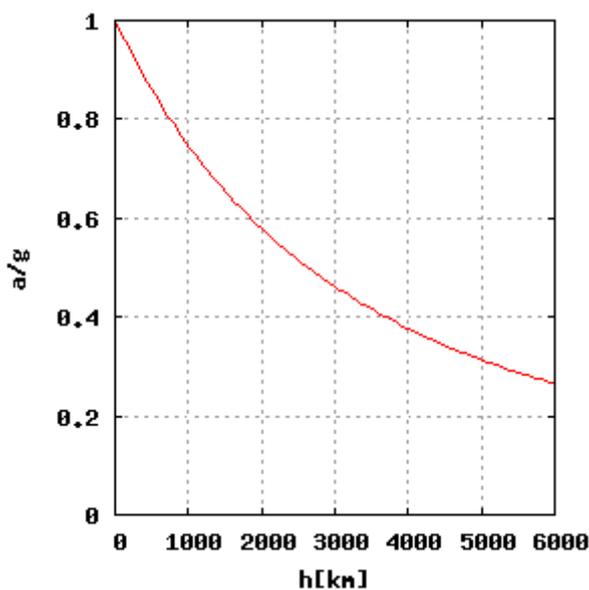
de prueba (de radio y masa unidad) en el seno de dicho campo. Mediante la aplicación de la segunda ley de Newton tomando los valores de la fuerza de la gravedad y una masa conocida, se puede obtener la aceleración de la gravedad.

Dicha aceleración tiene valores diferentes dependiendo del cuerpo sobre el que se mida; así, para la Tierra se considera un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ (que equivalen a $9,8 \text{ N/kg}$), mientras que el valor que se obtiene para la superficie de la Luna es de tan sólo $1,6 \text{ m/s}^2$, es decir, unas seis veces menor que el correspondiente a nuestro planeta, y en uno de los planetas gigantes del sistema solar, Júpiter, este valor sería de unos $24,9 \text{ m/s}^2$.

En un sistema aislado formado por dos cuerpos, uno de los cuales gira alrededor del otro, teniendo el primero una masa mucho menor que el segundo y describiendo una órbita estable y circular en torno al cuerpo que ocupa el centro, la fuerza centrífuga tiene un valor igual al de la centrípeta debido a la existencia de la gravitación universal.

A partir de consideraciones como ésta es posible deducir una de las leyes de Kepler (la tercera), que relaciona el radio de la órbita que describe un cuerpo alrededor de otro central, con el tiempo que tarda en barrer el área que dicha órbita encierra, y que afirma que el tiempo es proporcional a $3/2$ del radio. Este resultado es de aplicación universal y se cumple asimismo para las órbitas elípticas, de las cuales la órbita circular es un caso particular en el que los semiejes mayor y menor son iguales.

2.- Intensidad del campo gravitatorio



Variación de la aceleración de la gravedad en función de la distancia a la superficie de la Tierra.

La gravedad sobre la superficie de un planeta típicamente esférico viene dada por:

$$\mathbf{g}_{\text{sup}} = \frac{GM}{R^2} \mathbf{u}_r$$

donde G es la constante de gravitación universal, M es la masa del planeta, R es el radio del planeta y \mathbf{u}_r es un vector unitario (es decir, de módulo 1) dirigido hacia el centro del planeta.

Equivalentemente, puede definirse como el peso por unidad de masa de un objeto que se encuentra sobre la superficie del planeta:

$$\mathbf{g} = \frac{\mathbf{P}}{m}$$

En el caso de la Tierra, a nivel de la superficie del mar su módulo vale:

$$g_{\text{sup}} \approx 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

valor que se ha definido como el correspondiente a la gravedad estándar.

El valor de la aceleración de la gravedad tiene su valor máximo en la superficie del planeta, disminuyendo de forma aproximadamente parabólica con la altura y de forma lineal con la profundidad:

$$g(h) \approx \begin{cases} g_{\text{sup}} \left(1 - \frac{2h}{R} + \frac{3h^2}{R^2} \right) & h > 0 \\ g_{\text{sup}} & h = 0 \\ g_{\text{sup}} \left(1 + \frac{2h}{R} \right) & h < 0 \end{cases}$$

La aceleración de la gravedad en la Tierra varía según la altura. En la superficie está definida por $9,80665 \text{ m/s}^2$.

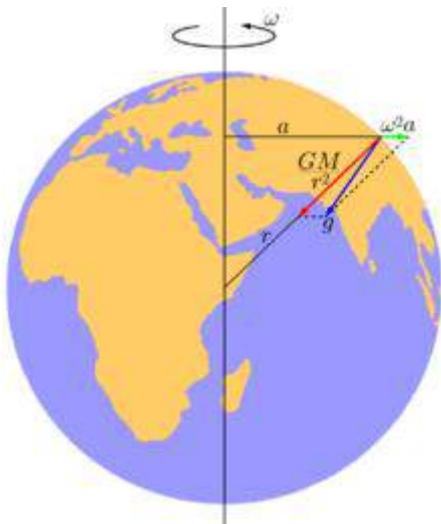
3.- Campo gravitatorio terrestre

La fuerza de gravedad en la superficie de la Tierra no es exactamente igual en todos los sitios. Existen pequeñas variaciones de un lugar a otro. Hay varios factores que intervienen para que así ocurra:

Latitud

Debido a la rotación de la Tierra, los cuerpos experimentan una fuerza centrífuga que varía según la latitud: es nula en los polos y máxima en el ecuador. Esta fuerza centrífuga hace disminuir el efecto de la atracción gravitatoria, y la desvía de su dirección original hacia el centro de la Tierra. A nivel del mar, la siguiente fórmula nos da el valor de g a una latitud ϕ :

$$g_{\phi} = 9.780327 (1 + 0.0053024 \sin^2 \phi - 0.0000058 \sin^2 2\phi) \text{ m/s}^2$$

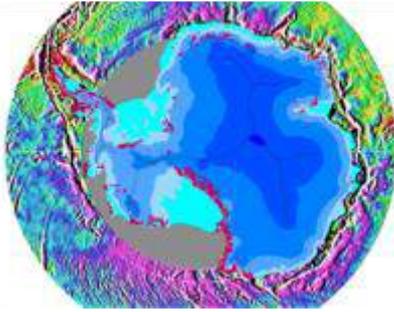


Contribución de las aceleraciones centrífugas y de atracción mutua en la *gravedad*.

donde

g_{ϕ} = aceleración de la gravedad en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ en la latitud : ϕ

La forma de la Tierra



Variación de la gravedad en el hemisferio Antártico.

Además, el campo gravitatorio aumenta con la latitud debido a otro efecto: el achatamiento de la Tierra en los polos (también como consecuencia de la fuerza centrífuga) hace que la distancia r se reduzca a medida que la latitud aumenta. La fuerza de atracción es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual significa que estando en el ecuador la fuerza de gravedad es menor que en otras latitudes, y a medida que nos vayamos desplazando al sur o al norte, la fuerza de gravedad se va incrementando. Entre los dos efectos, la fuerza centrífuga y el achatamiento de los polos, hacen que la gravedad en el ecuador sea un 0,5 % menor que en los polos.

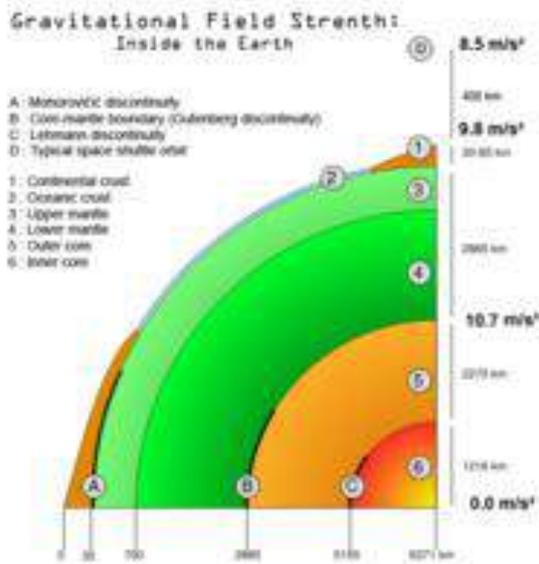
Estos dos factores influyen además en la dirección de la gravedad. La atracción gravitatoria no está dirigida al centro de la Tierra, sino perpendicular a la superficie del geoide, lo que representa una pequeña desviación hacia el polo del hemisferio opuesto. Aproximadamente la mitad de esa desviación se debe a la fuerza centrífuga, y la otra mitad a la masa adicional alrededor del ecuador, que provoca un cambio en la dirección de la fuerza de la gravedad con respecto a lo que sería su dirección en una Tierra perfectamente esférica.

A efectos de los cálculos del campo gravitatorio de la Tierra, generalmente se considera que su forma es una esfera de densidad uniforme. La forma de la superficie de la Tierra es en realidad más próxima a un esferoide oblató, que además no tiene una densidad uniforme, por lo que su campo gravitatorio no es un campo central exacto, y esto se refleja en un momento cuadrupolar no nulo. El efecto del momento cuadrupolar por ejemplo es importante en el diseño de satélites artificiales.

Los valores de $|\mathbf{g}|$ (la fuerza específica de la gravedad) en el ecuador y en los polos son respectivamente:¹

$$|\mathbf{g}_{ec}| = 9,78 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad |\mathbf{g}_{po}| = 9,8322 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Altura



intensidad del campo gravitatorio de la Tierra

La aceleración de la gravedad disminuye con la altura, ya que a mayor altura, es mayor la distancia al centro de la Tierra. La variación de la gravedad con respecto a la altura está expresada en la siguiente fórmula:

$$g_h = g_0 \left(\frac{r_e}{r_e + h} \right)^2$$

donde

g_h es la aceleración de la gravedad a la altura h con respecto al nivel del mar.

r_e es el radio medio de la Tierra (6.371.000 m).

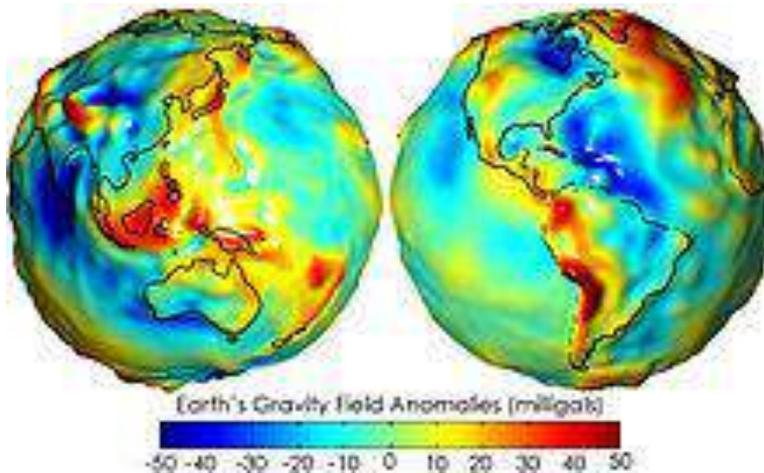
g_0 es la aceleración de la gravedad al nivel del mar.

Profundidad

La fuerza de la gravedad en el centro de una esfera homogénea es nula, ya que es suma de fuerzas que, por simetría, se cancelan las unas a las otras. Además, del teorema de Gauss se deduce que la fuerza de la gravedad en el interior de una esfera homogénea es proporcional a la distancia al centro. Por tanto si la Tierra fuese homogénea la aceleración de la gravedad a una distancia r de su centro sería $(r/r_e)g_0$.

Pero como la densidad de la Tierra no es constante, la aceleración de la gravedad toma su valor máximo, $10,7 \text{ m/s}^2$, en la superficie del núcleo de la Tierra, debido a la gran densidad del mismo.

Topografía local y geología



Anomalías del campo gravitacional terrestre (expresado en miligal²) respecto del valor estimado, considerando la variación del radio terrestre.

Las variaciones locales en topografía (como la presencia de montañas) y geología (como la densidad de las rocas en las inmediaciones) son las responsables de que existan pequeñas variaciones en un lugar sin que tenga que ver la latitud. A veces hay una pequeña variación en una zona que dista pocos kilómetros de otra. Estas variaciones se deben a que cerca de la superficie pueden existir rocas de densidad mayor a la normal (llamadas mascón), lo que produce que sea mayor la gravedad sobre esos lugares. Esas irregularidades fueron causantes de sorpresivos cambios de dirección en satélites artificiales, motivo por el cual se empezó a estudiar el fenómeno. Las variaciones mencionadas son tan pequeñas que sólo se las puede detectar con instrumentos de gran precisión.

Además, las irregularidades de la superficie y ciertas homogeneidades continentales provocan pequeñas perturbaciones del campo a lo largo de la superficie.

Esas pequeñas irregularidades respecto de los valores medios pueden utilizarse para estudiar la distribución de densidad en la corteza terrestre empleando técnicas de gravimetría). La gravedad ejercida sobre los objetos que están sobre la superficie tiende a disminuir al alejarse del planeta, por aumentar la distancia r entre las masas implicadas. Sin embargo, también disminuye al adentrarse en el interior de la Tierra, ya que cada vez una porción mayor de masa del planeta la rodea, contrarrestándose las fuerzas ejercidas en direcciones opuestas. En el centro de la Tierra la gravedad es nula porque se contrarrestan todas las fuerzas de atracción, aunque está sometido a una enorme presión por el peso de las capas superiores del planeta.

4.- El experimento de Cavendish

El experimento de Cavendish constituyó la primera medida de la fuerza de gravedad entre dos masas, utilizando una balanza de torsión. Por ende, a partir de la Ley de

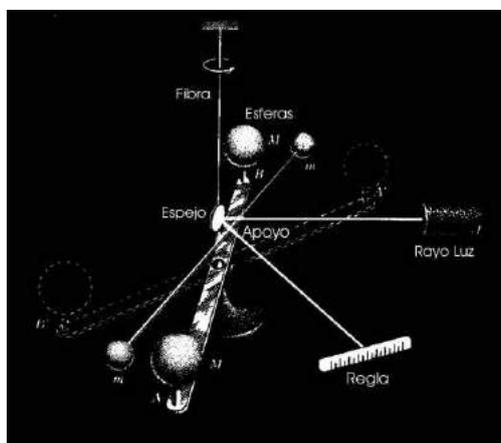
gravitación universal de Newton y las características orbitales de los cuerpos del Sistema Solar, fue también la primera determinación de la masa de los planetas y del Sol.

Una versión inicial del experimento fue propuesta por John Michell, quien llegó a construir una balanza de torsión para estimar el valor de la constante de gravitación universal. Sin embargo, murió en 1793 sin poder completar su experimento y el instrumento que había construido fue heredado por Francis John Hyde Wollaston, quien, a su vez, se lo entregó a Amadeo Cavendish.

Cavendish se interesó por la idea de Michell y reconstruyó el aparato, realizando varios experimentos muy cuidadosos con el fin de determinar la densidad media de la Tierra. Sus informes aparecieron publicados en 1798 en la publicación Philosophical Transactions de la Royal Society.



El instrumento reconstruido por Cavendish consistía en una balanza de torsión con una vara horizontal de seis pies (4,80 m) de longitud en cuyos extremos se encontraban dos esferas de cristal de idéntica masa. Esta vara colgaba suspendida de un largo hilo. Cerca de las esferas, Amedeo Cavendish dispuso dos esferas de goma de unos 175 kg cada una, cuya acción gravitatoria debía atraer las masas de la balanza produciendo un pequeño giro sobre ésta. Para impedir perturbaciones causadas por corrientes de aire, Cavendish emplazó su balanza en una habitación a prueba de viento y midió la pequeña torsión de la balanza utilizando un microscopio.



Es común encontrar libros que señalan erróneamente que el propósito de Cavendish era determinar la constante gravitacional, G , [1] [2] [3] [4] [5] y este error ha sido señalado por diversos autores. [6] [7] [8] [9] En realidad, el único propósito de Cavendish **era determinar la densidad de la Tierra**. Él llamaba a esto «pesar el mundo». El método de Cavendish utilizado para calcular la densidad de la Tierra consistía en medir la fuerza sobre una pequeña esfera debida a una esfera mayor de masa conocida y comparar esto con la fuerza sobre la esfera pequeña debida a la Tierra. De esta forma se podía describir a la Tierra como N veces más masiva que la esfera grande sin necesidad de obtener un valor numérico para G . [7] La constante gravitacional no aparece en el artículo de Cavendish y no hay indicio de que él haya vislumbrado esto como propósito experimental. Una de las primeras referencias a G apareció en 1873, 75 años después del trabajo de Cavendish. [10] En la época de Cavendish, G no tenía la importancia entre los científicos que tiene actualmente. Esta constante era simplemente una constante de proporcionalidad en la ley de la gravitación universal de Newton. [11] En vez de eso, el propósito de medir la fuerza de gravedad era determinar la densidad terrestre. Esta cantidad era requerida en la astronomía del siglo XVIII, dado que, una vez conocida, las densidades de la Luna, el Sol y el resto de los planetas se podrían encontrar a partir de ella. [12] Una complicación adicional fue que a mediados del siglo XIX, los físicos no utilizaban una unidad específica para la fuerza. [7] Este hecho vinculó innecesariamente G a la masa de la Tierra, en vez de reconocer a G como una constante universal. Sin embargo, aunque Cavendish no reportó un valor para G , los resultados de su experimento permitieron determinarlo. A finales del siglo XIX los científicos comenzaron a reconocer a G como una constante física fundamental, calculándola a partir de los resultados de Cavendish. Por lo tanto: [13]

Después de convertir a unidades del Sistema Internacional, el valor obtenido por Cavendish para la densidad de la Tierra, $5,45 \text{ g/cm}^3$, así como del resto de los datos recabados se obtuvo el valor $G = 6,74 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, lo cual se encuentra dentro de un 1% del valor actualmente aceptado. [10]

El objetivo del experimento es medir el giro en la balanza de torsión producido por la fuerza de gravedad ejercida entre las esferas externas y las masas dispuestas en los extremos. La fuerza de recuperación en la balanza puede escribirse en función del ángulo girado sobre la posición de equilibrio, θ

El ángulo θ puede ser medido mediante un espejo situado en la fibra de torsión. Si M representa la masa de las esferas exteriores y m la masa de las esferas en la balanza de torsión, se puede igualar la fuerza de torsión con la fuerza de la gravedad ejercida por las esferas mediante la fórmula:

donde G es la constante de gravitación universal, L la distancia entre el hilo de torsión y las esferas m y r la distancia entre los centros de las esferas M y m . Por lo tanto. Dado que k puede medirse a partir del periodo de oscilación de la balanza de torsión, T , G puede escribirse de la siguiente manera:

donde " r " es la distancia entre el centro de la masa al centro de la otra masa

Tabla comparativa de la aceleración de la gravedad

Astro	g	m/s ²
Sol	27,90	273,70
Mercurio	0,37	3,70
Venus	0,88	8,85
Tierra	1,00	9,81
Luna	0,16	1,62
Marte	0,38	3,72
Júpiter	2,64	26,39
Saturno	1,15	11,67
Urano	1,05	11,43
Neptuno	1,22	11,07

La lista adjunta muestra los valores relativos de la aceleración de la gravedad en el Sol, en la superficie de cada planeta del Sistema Solar y en la superficie de la Luna, tomando como unidad el valor de la gravedad estándar en superficie de la Tierra y en valor absoluto, expresada en m/s², con dos dígitos decimales de aproximación. Así, para la Tierra la aceleración de la gravedad es 9,81 metros sobre segundo al cuadrado

5.- Ondas gravitacionales, teoría y experimento

El estudio de las ondas gravitacionales es interesante debido a que si se llegan a detectar, podremos verificar completamente la teoría de la Relatividad General de Einstein [1], y esto conlleva a entender mejor las leyes fundamentales de la física. Las ecuaciones de campo de Einstein describen la interacción gravitacional a través de la curvatura del espacio tiempo generada por la relación masa-energía. Dentro de las ecuaciones de campo de Einstein, también están incluidas las identidades de Bianchi, las cuales contienen las ecuaciones de movimiento de la materia y los campos. Einstein predijo la existencia de las perturbaciones de la curvatura, las cuales se propagan con velocidad "c" sobre un espacio-tiempo plano y en vacío: las ondas gravitacionales [2]. Las ondas gravitacionales son propagaciones de campos, ondulaciones en la curvatura del espacio tiempo, generadas por los movimientos de partículas masivas. Las ondas gravitacionales

en la teoría de Einstein es una teoría linearizada que trata ondas débiles como perturbaciones débiles en un espacio-tiempo plano de fondo [3]. La teoría linearizada de las ondas gravitacionales tiene sus límites debido a que la aproximación lineal no es válida para fuentes donde la energía propia gravitacional no puede ser negada. Entender teóricamente las ondas gravitacionales implicara una nueva ventana a la astronomía observacional.

La comparación de tiempos de arribo de la luz y las ondas gravitacionales desde supernovas, por ejemplo, serán una prueba clara de que la luz y las ondas gravitacionales deben viajar a la misma velocidad. Las ondas gravitacionales presentan un comportamiento muy similar a las ondas electromagnéticas [1], lo cual implica que las ondas gravitacionales puedan analizarse de una manera similar al estudio electromagnético, la diferencia entre ambos tipos de ondas nos proporcionará información diferente para la astrofísica observacional. Teóricamente se predice que las ondas gravitacionales solo cambian en la dirección perpendicular a la propagación de la onda. Los movimientos relativistas de la materia y de los campos gravitacionales fuertes, están enfocados a los más grandes proyectos teóricos sobre la actividad violenta en supernovas, núcleos galácticos y quásares. Cuando las ondas gravitacionales de estos objetos sean detectadas, se tendrán las primeras observaciones del interior de regiones con gravedad-fuerte y velocidades-altas.

Las ondas gravitacionales son difíciles de detectar debido a que son extremadamente débiles lo cual hace que actúen débilmente con la materia. Pero lo importante de que sean débiles, **es que les permite propagarse por todo el espacio-tiempo sin cambios significativos desde que salieron de la fuente que las generó:** la información detallada sobre el tiempo de evolución de las fuentes durante los eventos violentos se conserva, y la información no cambia por la subsecuente absorción o dispersión. (Esto las hace diferentes de las ondas electromagnéticas, las cuales pueden ser dispersadas por la materia que interviene. Aun así los neutrinos producidos en supernovas son dispersados muchas veces mientras dejan los núcleos de las explosiones).

Las ondas gravitacionales causan variaciones de tensión en el espacio tiempo, que da lugar a cambios en las distancias entre puntos. **Estas ondas pueden ser detectadas por instrumentos (interferómetros láser) que midan los cambios inducidos en la longitud.** Ondas de diferentes frecuencias son causadas por diferentes movimientos de la masa; la diferencia en las fases de las ondas nos permite percibir la dirección de la fuente y la forma de la materia que las genero. Existen diferentes tipos de interferómetros: los que están localizados en tierra (**LIGO, VIRGO, GEO, etc.**) y otro en el espacio (**LISA**). Los interferómetros en tierra están destinados a detectar colapsos de estrellas masivas (supernovas), estrellas de neutrones que rotan rápidamente y posiblemente ondas gravitacionales estocásticas de fondo creadas en el universo temprano. LISA detectara fuentes, tales como binarias galácticas de periodo corto, así como también rotaciones y colapsos de hoyos negros súper masivos, y fuentes en universos tempranos.

Los interferómetros están calibrados a cuatro diferentes bandas de frecuencias:

- Extremadamente baja frecuencia (10^{15} a 10^{18} Hz). Se verá la huella de polarización de la radiación cósmica de fondo (CMB), las fuentes generadoras son primordialmente fluctuaciones gravitacionales amplificadas por la inflación del universo.
- Muy baja frecuencia (10^7 a 10^9 Hz). Las ondas son vistas usando alta-estabilidad en los pulsares, la fuente generadora es procesada en los universos muy tempranos y en sistemas binarios extremos de hoyos negros masivos.
- Baja frecuencia (10^4 a 1 Hz). Rango de frecuencia de LISA.
- Alta frecuencia (1 a 10^4 Hz). Rango para los interferómetros en la tierra y detectores de masas resonantes (**ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER**, etc.).

La fuerza fundamental de la gravedad es más débil por unidad de masa que la fuerza fundamental electromagnética por unidad de carga. Esta debilidad de las ondas gravitacionales tiene dos consecuencias importantes:

- Las ondas gravitacionales son generadas en niveles potencialmente perceptibles solamente por fuentes muy masivas que experimentan dinámicas muy violentas (esto es, por fuentes astrofísicas).
- Las ondas así producidas se propagan esencialmente sin cambio de su fuente, inafectada por la dispersión o absorción debido a la materia que interviene.

Actualmente, el estudio de ondas gravitacionales desde el punto de vista teórico y experimental es uno de los temas de principal investigación en relatividad y gravitación. La astronomía de ondas gravitacionales traerá un mejor conocimiento de nuestro universo al observar nuevos y exóticos fenómenos tales como la formación y colisión de hoyos negros, la transformación de estrellas a hoyos negros súper masivos, ondas gravitacionales emitidas unos pocos segundos después del big-bang. Después de 88 años de la predicción de las ondas gravitacionales, existe solo una detección indirecta y viene de la observación de la pérdida de energía del pulsar binario PSR 1913+16, descubierto en 1974 por Hulse y Taylor [4]. La energía perdida por el pulsar binario esta de acuerdo con la predicción teórica de la relatividad general, la pérdida de energía por radiación gravitacional emitida por un sistema binario tiene un margen de error del 3%.

6.- Ondas Gravitacionales en Cosmología

Las ondas gravitacionales estocásticas de fondo (SGWB), son ondas gravitacionales de fondo sin una componente específica de frecuencia que pueda darnos información sobre etapas muy tempranas de nuestro universo. Es importante notar que los restos de ondas gravitacionales cosmológicas emitidas cerca del big bang pueden proveer información única de nuestro universo a etapas muy tempranas. Como recuerdos de la radiación cósmica de fondo, las ondas electromagnéticas se desacoplaron a unos pocos años después del big bang (10^5), mientras que restos de ondas gravitacionales cosmológicas vienen de tiempos más tempranos, a unos 10^{44} segundos [5]. En teoría electromagnética, las ondas de radio cósmicas lograron descubrir la radiación cósmica de fondo (restos del

big bang caliente).

Dentro de la teoría cuántica de las ondas gravitacionales, encontramos que la cuantización de las ondas gravitacionales es paralela a la cuantización de las fluctuaciones métricas escalares en cosmología [6]. Ambas teorías pueden ser cuantizadas sobre el mismo fondo cosmológico determinado por el factor de escala cosmológico y la materia de fondo. A través de la acción encontramos la ecuación de movimiento que es muy similar a la ecuación para inhomogeneidades escalares gravitacionales, la variación en ambas ecuaciones radica en el término de masa para el factor de escala, el cual permite una evolución muy diferente de escalares y los modos del tensor durante la fase de recalentamiento en cosmología inflacionaria, tal que la ecuación de estado de la materia de fondo cambia dramáticamente.

Relatividad numérica en Ondas Gravitacionales.

Desafortunadamente, solo se pueden resolver las ecuaciones de Einstein (ecuaciones diferenciales parciales no-lineales acopladas) en los más simples casos. Para encontrar soluciones a las ecuaciones de Einstein, por ejemplo en un sistema con emisión de radiación de ondas gravitacionales, se necesitan encontrar soluciones numéricas de estas ecuaciones de campo, es decir, se necesita relatividad numérica [7]. Sin embargo, aun las aproximaciones numéricas de la emisión de ondas gravitacionales en campos fuertes es extremadamente difícil y consumen demasiado tiempo en las computadoras. Sin embargo, existen códigos especiales que resuelven el grupo completo de las ecuaciones de Einstein, y han sido diseñados para correr muy eficientemente a grandes escalas en un sistema de computadoras en paralelo, en particular, uno de estos códigos es CACTUS [8]. Después de una descripción de la formulación numérica de la teoría general de la relatividad, las ecuaciones de constricción y las ecuaciones de evolución, las técnicas numéricas pueden resolver las ecuaciones de evolución. Varios resultados han sido reportados en recientes aplicaciones, incluyendo ondas gravitacionales en la evolución y colisión de hoyos negros.

7.- Ondulación del espacio-tiempo

En física, una onda gravitacional es una **ondulación del espacio-tiempo** producida por un cuerpo masivo acelerado. Las ondas gravitacionales constituyen una consecuencia de la teoría de la relatividad general de Einstein y se transmiten a la velocidad de la luz. Hasta ahora no ha sido posible detectar ninguna de estas ondas, aunque sí existen evidencias indirectas de ellas, como el decaimiento del periodo orbital observado en un púlsar binario. Actualmente existen grandes proyectos de observatorios interferométricos que deberían ser capaces de detectar ondas gravitacionales producidas en fenómenos cataclísmicos como la explosión de una supernova cercana o una radiación de fondo gravitacional remanente del Big Bang. La detección de ondas

gravitacionales constituiría una nueva e importante validación de la teoría de la relatividad general.

Las ondas gravitacionales son fluctuaciones generadas en la curvatura del espacio-tiempo que se propagan como ondas. La radiación gravitacional se genera cuando dichas ondas son emitidas por ciertos objetos o por sistemas de objetos que gravitan entre sí.

Estimaciones teóricas

Las ondas gravitacionales son muy débiles. Las más fuertes que se podría esperar observar en la Tierra serían generadas por acontecimientos muy distantes y antiguos, como la colisión de dos estrellas de neutrones o la colisión de dos agujeros negros súper masivos, en los cuales una gran cantidad de energía se movió violentamente. Tal onda debería causar cambios relativos en distancia por todas partes en la Tierra, pero estos cambios están en un orden de menos de una parte en 10^{21} .

La existencia y ubicuidad de las ondas gravitacionales es una predicción de la teoría de la relatividad general de Einstein. Todas las teorías competentes y viables sobre la gravitación, en concordancia al nivel de precisión de toda evidencia hallada hasta el momento, hacen predicciones sobre la naturaleza de la radiación gravitacional; estas predicciones son a veces diferentes de las predicciones de la relatividad general.

Sin embargo, en la actualidad no ha sido posible confirmar directamente la existencia de la radiación gravitacional y, mucho menos, estudiar sus propiedades.

Primeras evidencias de ondas gravitacionales

Aunque la radiación gravitacional no ha sido aún detectada directamente, hay evidencia indirecta significativa de su existencia. En una gran cantidad de estudios, astrofísicos de todo el mundo han podido observar, en grupos de estrellas súper masivas, fenómenos que sólo pueden ser explicados con la existencia de dicha teoría.

Los físicos Russell Alan Hulse y Joseph Hooton Taylor Jr. descubrieron en 1974 el primer púlsar binario (PSR1913+16). Las observaciones durante varios años han confirmado que el período de rotación de ambos objetos aumenta con el tiempo de la manera predicha por la teoría de la relatividad general, perdiendo energía en forma de ondas gravitacionales. *(La órbita del púlsar se está reduciendo con el tiempo, en la actualidad, la órbita se reduce en alrededor de 3,1 mm por órbita. Las dos estrellas deberían fusionarse en unos 300 millones de años a partir de ahora.)* Aunque estas ondas no han sido detectadas de forma directa, Taylor y Hulse demostraron que la rotación del sistema binario se aceleraba a medida que las estrellas giraban en espiral cada vez más juntas, exactamente tal y como se predecía si estuviera emitiendo energía en forma de ondas gravitacionales. Un estudio realizado por O. Laudani, sobre la base de no a diferencia de los tiempos de marea de sol y la luna muestra, de manera directa, que la velocidad de gravedad es igual a la velocidad de la luz. Esto significa que la fuerza de gravedad es una onda que, al igual que las electromagnéticas viaja a casi 300.000 km por segundo.

Este descubrimiento se considera como la demostración de la existencia de ondas gravitacionales. Por este motivo, Hulse y Taylor recibieron el Premio Nobel de Física del año 1993. Más recientemente se ha descubierto un segundo púlsar binario, **PSR J0737-3039**, cuyo comportamiento parece confirmar también las predicciones de la relatividad general con respecto a la energía emitida en forma de ondas gravitacionales.



El púlsar binario tiene una órbita cuya distancia decae en unos 7 mm por día.

(XMM-Newton tiene, por primera vez, las señales detectadas de los dos protagonistas de un sistema de púlsar binario en los rayos X, revelando una mina de oro científica. Cada estrella del sistema estrechamente empaquetada es una densa estrella de neutrones, girando muy rápido, irradiando rayos X en pulsos. El púlsar binario PSR J0737-3039 fue vista por primera vez por los astrónomos en 2003, en longitudes de onda de radio. Los rayos X pueden ser utilizados para sondear más profundo y estudiar el sistema más a fondo. Para ver dos púlsares que orbitan entre sí en un sistema binario es extremadamente raro en sí mismo. PSR J0737-3039 contiene un 'perezoso' estrella de neutrones que giran lentamente (pulsar B) orbitando un compañero enérgico rápido y más (pulsar A). Cada púlsar o estrella de neutrones es el rápido giro, corazón muerto de una estrella una vez masiva. "Estas estrellas son tan densas que una taza de la estrella de neutrones pesaría más cosas monte. Everest ", dice Alberto Pellizzoni, autor principal del artículo en el que se presentan los resultados. "A esto se añade el hecho de que las dos estrellas se orbitan muy cerca uno del otro, separados por sólo 3 segundos luz, cerca de tres veces la distancia entre la Tierra y la Luna.")

Objetos emisores de ondas gravitacionales

La amplitud predicha para estas ondas y los efectos observables que podrían producir son muy débiles, de modo que su detección directa es extremadamente difícil. Si existen las ondas gravitacionales su amplitud sería muy inferior al ruido vibracional procedente de otras fuentes. Tan sólo los fenómenos más violentos del Universo podrían producir ondas gravitacionales susceptibles de ser detectadas.

Los objetos que deberían emitir ondas de gravedad detectables de manera directa son objetos muy masivos sometidos a fuertes aceleraciones o cuerpos masivos no homogéneos rotando a gran velocidad. Se espera poder encontrar ondas gravitacionales producidas en fenómenos cataclísmicos como:

- La explosión de una supernova.
- La formación de un agujero negro.

- El choque de cuerpos masivos como estrellas de neutrones o la coalescencia de agujeros negros.
- La rotación de una estrella de neutrones inhomogénea.
- Radiación gravitacional remanente del Big Bang. Este último caso ofrecería datos únicos sobre la formación del Universo en el periodo anterior a la edad oscura del Universo en la que el Universo era opaco a la radiación electromagnética.

Observatorios de ondas gravitacionales

Actualmente existen diferentes proyectos de observación de ondas gravitacionales, como **LIGO** (Estados Unidos), **TAMA 300** (Japón), **GEO 600** (Alemania y Reino Unido), o **VIRGO** (Francia e Italia). Los más pesimistas consideran que la detección real de ondas gravitacionales sólo podrá ser realizada desde el espacio. Una misión espacial denominada LISA se encuentra en fase de estudio para constituir el primer observatorio espacial de ondas gravitacionales y podría estar operativo alrededor del 2020.

TRES hechos predijo Einstein en 1916 con su nueva teoría de la gravitación. Uno de ellos, **el corrimiento hacia el rojo**, ya lo mencionamos. Como dijimos, no fue sino hasta 1960, cuando los físicos ya contaban con el efecto Mössbauer, que la teoría general de la relatividad pudo saltar limpiamente este valladar. Las otras dos pruebas, hoy conocidas como clásicas, **son el corrimiento del perihelio de Mercurio** y la **desviación de la luz al pasar cerca de una gran masa**. Veamos primero lo referente a Mercurio.

Hacia finales de 1915, Einstein le escribe a otro físico famoso, Arnold Sommerfeld. Le cuenta que en el último mes ha vivido el periodo más emocionante de su vida, pues había logrado mostrar que su nueva teoría se reducía a la de Newton en una primera aproximación y que, como una segunda aproximación, podía explicar el corrimiento del perihelio de Mercurio, problema famoso que había resistido hasta entonces los embates de físicos y astrónomos.

Según hemos relatado, la teoría gravitacional de Newton predice que un planeta alrededor del Sol se mueve en una elipse, curva cerrada. La distancia r del planeta al Sol oscila entre una mínima, llamada perihelio, y otra máxima, que se conoce como afelio. Lo notable, cuando la fuerza es, como la de Newton, que varía inversamente con el cuadrado de r , es que esa distancia va del perihelio al afelio en un tiempo idéntico a la mitad del periodo. La trayectoria del planeta se cierra y, si no fuera perturbado, recorrería la misma elipse una y otra vez, por los siglos de los siglos.

En la mecánica clásica, sólo la fuerza universal de la gravitación y otra, la del resorte, que produce una fuerza lineal con r , conducen a órbitas cerradas, siempre y cuando la energía del cuerpo sea tal que éste no escape a una distancia infinita del centro de fuerzas. Tal resultado se conoce como el teorema de Bertrand y tiene su origen en las llamadas simetrías ocultas.

Si la acción del Sol se perturba —por la presencia de otros planetas, por ejemplo—, la trayectoria no se ajusta exactamente a una elipse, y el perihelio se corre un poco, vuelta tras vuelta. Tal efecto es más fácil de observar para los pacientes astrónomos

mientras más rápido sea el planeta —pues entonces el corrimiento se acumula más a lo largo de los años—, y mientras más oblonga (o excéntrica) sea la órbita, pues en este caso el perihelio es más notable. Ambas propiedades las tiene Mercurio, que es el más rápido de los planetas y el que tiene la órbita más excéntrica. Por ello, la atención de físicos y astrónomos se centró en este planeta, para observar detenidamente su órbita, su perihelio, y para calcular las perturbaciones de otros planetas.

El conocimiento sobre este fenómeno planetario era, mientras Einstein sufría con su amigo Grossmann para hallar sus ecuaciones de campo, el siguiente: El perihelio de Mercurio se corre cada cien años por un ángulo igual a 574" de arco. Los cálculos teóricos, que tomaban en cuenta la perturbación de otros planetas, llevaban sólo a un corrimiento de 532" cada siglo. En tales cálculos se tenía una confianza ilimitada, sobre todo después de que Leverrier predijo la existencia de Neptuno con la misma técnica. Este mismo físico francés, llevado del entusiasmo que sólo da el éxito, había incluso propuesto la existencia de otro planeta —que bautizó prematuramente con el nombre de Vulcano—, para explicar la divergencia entre teoría y observación. Empero, Vulcano nunca hizo acto de presencia y el enigma del perihelio de Mercurio y su corrimiento quedó ahí como un reto insalvable para la física de Newton: la divergencia de 42" de arco cada siglo era inexplicable.

Cuando surgió la teoría especial de la relatividad, varios físicos aplicaron las ecuaciones de movimiento relativistas al caso planetario. Encontraron, en efecto, que el perihelio de la órbita se corría por un ángulo del orden de $v^2/2c^2$, donde v es la velocidad promedio del planeta. Esto, una vez más, no basta para alcanzar los famosos 42" de arco, siempre faltantes. Entonces vino Einstein, con su teoría del campo relativista de la gravitación. Lo que sigue de la historia ya lo sabemos. Como él lo cuenta a Sommerfeld, su nueva teoría explica el misterio de Mercurio y predice los corrimientos correctos para la Tierra y Marte, según se ha visto después.

Hacia 1919, la superioridad de la teoría einsteniana sobre la de Newton radicaba sólo en ese minúsculo corrimiento de la órbita de Mercurio. Ventaja magra en verdad, sobre todo si tenemos claro el enorme cambio conceptual que significa la teoría general de la relatividad. No es fácil dejar caer una teoría tan precisa como la newtoniana, creer que el espaciotiempo es curvo y abandonar el significado de las coordenadas, tan claro a los físicos, por sólo una minucia, un corrimiento de 42" a lo largo de cien años. Una comprobación más espectacular de la nueva teoría sería, pues, necesaria. La suerte estaría del lado de Einstein, como ahora veremos.

Arthur Eddington, astrónomo inglés, debió ser un hombre muy pagado de sí mismo. Según cuentan, allá cuando terminaba la primera Guerra Mundial, alguien mencionó en su presencia que sólo tres personas entendían la teoría general de la relatividad. Eddington contestó preguntándole a su interlocutor: ¿Y quién es el tercero? En todo caso, el astrónomo inglés estaba consciente de la importancia de las ideas einstenianas y se hallaba dispuesto a comprobarlas.

Ya se mencionó un artículo de Einstein, escrito en 1911, en el que se predice que la luz se desvía al pasar cerca de un objeto masivo, como el Sol. En aquel entonces, Einstein predijo una desviación de 0.87" de arco si la luz de una estrella pasara rozando el Sol, resultado que coincide con el de la mecánica clásica de Newton, si en ella se hacen

algunos ajustes. Ya con su nueva teoría bien desarrollada, el gran físico relativista volvió a calcular la desviación de la luz, ahora desde la nueva perspectiva. Si la masa del Sol curva el espacio y todo ente material —incluida la luz— debe seguir las geodésicas del espaciotiempo curvado, la luz ha de desviarse. Las ecuaciones de la teoría general de la relatividad nos proveen con un nuevo valor para esa desviación, que es el doble del predicho clásicamente: la luz de una estrella lejana que pasa rozando al Sol se desvía un ángulo de 1.75" de arco.

Ya que la luz es tan rápida, podemos descartar todo experimento terrestre para medir su desviación. Por otro lado, para poder ver la luz de las estrellas, se requiere que la proveniente del Sol no las oculte. Tendremos, pues, que observar durante un eclipse total de Sol. Más no basta un eclipse cualquiera; es necesario que éste ocurra cuando alineadas con el Sol podamos ver muchas estrellas, para así medir con más confianza y exactitud cómo se dobla la luz estelar. Sin duda, algo habrían dicho sobre la fortuna de Einstein los astrólogos, pero el Astrónomo Real de Inglaterra sabía más: la mejor conjunción de estrellas se tiene cada 29 de mayo y en el año de 1919 ¡habría en ese preciso día un eclipse total de Sol!

Los ingleses, ya superadas las vicisitudes de la guerra contra Alemania, se aprestaron a poner a prueba las conclusiones del gran Einstein, que por ese entonces trabajaba en Berlín, la capital del enemigo. Se organizaron dos expediciones, como una acción conjunta de la Royal Astronomical Society y de la Royal Physical Society. Una de ellas se dirigiría a Sobral en Brasil, y la otra, dirigida por Arthur Eddington, a la isla del Príncipe, en el golfo de Guinea. En estos dos sitios, el eclipse de Sol sería total y de larga duración, con inmejorables condiciones para observar la desviación de la luz.

Eddington mismo relata en su libro *Space, Time and Gravitation* la gran aventura científica. La expedición que fue al Brasil estaba mejor equipada que la otra. Además, el día 29 de mayo de 1919, en la Isla del Príncipe, el clima fue adverso; impertinentes nubes hicieron más arduo el trabajo de los fatuos británicos. Tomaron éstos, de cualquier forma, una serie de placas, donde podía medirse la desviación de la luz proveniente de las constelaciones de las Híadas. Sus resultados preliminares indicaban que la desviación era de 1.61" de arco y el revuelo comenzó a generarse. Sin embargo, los ingleses también son cautos y decidieron esperar a los mejores datos provenientes de Sobral.

Las primeras placas tomadas en Brasil que fueron reveladas indicaron algo desconcertante: la desviación medida de la luz parecía estar acorde con la calculada mediante la física de Newton. Había en ellas, sin embargo, varias características —qué tan sesgadas, nadie lo sabrá— para eliminarlas. Las restantes placas, una vez reveladas, descubrieron algo maravilloso: ¡La observación astronómica confirmaba la teoría general de la relatividad! Así, Einstein se volvió famoso.

La historia anterior constituye una de las grandes ironías en la historia de la ciencia. Los experimentos de Eddington tenían sólo una precisión del 30%, y aun aquellos que los sucedieron no fueron experimentos mejores: los resultados se hallan dispersos entre el valor de la desviación predicha por Einstein y la mitad de ese valor. Las malas condiciones meteorológicas dificultaron siempre la observación. Sin embargo, Eddington hizo que Einstein se volviera famoso.

Albert Einstein busca una teoría del campo unificado, un marco conceptual único que englobara al electromagnetismo y a la gravitación. Este sueño de Einstein no se ha convertido en realidad hasta ahora, aunque la guía del gran maestro fue seguida por otros físicos. En los setentas se logró unificar, no la electricidad y el magnetismo con la gravedad como quería Einstein, sino las interacciones débiles con las electromagnéticas. Surgió así en 1970 la teoría electrodébil de Weinberg y Salam y la posibilidad de incluir también a las interacciones fuertes, para llegar a la gran unificación.

Vimos antes que las tres pruebas clásicas de la relatividad general involucran efectos minúsculos; de ahí que requieran mediciones muy precisas, no siempre factibles con los equipos experimentales con que en su momento cuentan los físicos. El corrimiento del perihelio de Mercurio requiere acumularse durante todo un siglo para ser apreciable; la pequeñísima desviación de la luz al pasar cerca del Sol necesitó un eclipse y una conjunción de estrellas; el corrimiento hacia el rojo hubo de esperar más de cuarenta años a que los experimentadores contaran con la nueva arma provista por el efecto Mössbauer. Los minúsculos efectos de la teoría general de la relatividad son, pues, difíciles de formular y, si cabe, más difícil resulta aún medirlos con la precisión adecuada.

A pesar de ello, **otras tres consecuencias de la teoría de Einstein** pueden ponerse a prueba: **el retraso temporal de los ecos del radar, la existencia de hoyos negros y las ondas gravitacionales**. Habría, además, otros efectos relativistas de carácter cosmológico; de ellos no nos ocuparemos aquí, pues nos alejaríamos del objetivo principal de este relato.

Cuando tratamos la desviación de la luz al pasar cerca del Sol, mencionamos que aquélla se curvaba siguiendo una geodésica en el espaciotiempo. Esto implica que la luz se retrasa al pasar junto a un objeto masivo. Si pudiéramos enviar radiación electromagnética desde la Tierra a otro planeta y observar su eco, lograríamos medir el tiempo de viaje. En diferentes posiciones relativas de ese planeta, la radiación pasaría a veces cerca, a veces lejos del Sol. Según Einstein, en el primer caso debería haber un retraso temporal que puede calcularse. El máximo valor se tendría cuando la Tierra, el Sol y el planeta estuvieran alineados y con el astro en medio de los dos planetas. Si consideramos a Venus, la luz toma en el viaje de ida y vuelta a la Tierra cerca de media hora; el retraso, temporal máximo sería de 200 microsegundos, es decir, una parte en 10 millones. Una vez más, nos hallamos frente a un pequeñísimo efecto que requiere, sin duda, de técnicas experimentales muy delicadas y de observaciones muy precisas.

A principios de los setentas, Shapiro uso el eco del radar sobre el planeta Venus para comprobar, por cuarta vez, las predicciones de la teoría general de la relatividad. Ello requiere conocer las distancias importantes con errores que no excedan de unos cuantos kilómetros. Tomada en cuenta la distancia astronómica entre la Tierra y Venus, lo anterior exige conocer las órbitas planetarias y aun la topografía de Venus con un detalle nunca antes alcanzado. **A pesar de lo difícil de esta empresa, el esfuerzo se hizo y las mediciones del retraso temporal, cuyo error no excede unos pocos microsegundos, concuerdan espectacularmente con lo predicho por la teoría**

einsteniana. He aquí, pues, una cuarta prueba experimental de la gravitación relativista.

Pasemos ahora a discutir someramente esos nuevos objetos del universo, que posiblemente existan y que captan la atención de todos los amantes de la ciencia ficción hecha ciencia: los hoyos negros. Ya Laplace, el gran físico y matemático francés, sospechaba de su existencia: "...a consecuencia de su atracción, ese cuerpo no permitiría a ninguno de sus rayos escapar; es pues posible que los cuerpos luminosos más grandes del universo fueran, por esta causa, invisibles." Sin embargo, con la teoría de Einstein la existencia de estos cuerpos muy masivos —que no dejan escapar la luz, que curvan abruptamente el espaciotiempo, que ninguna información puede librarse de su influencia, que no se ven pues son negros— adquiere una nueva perspectiva.

Si usamos coordenadas polares (r, φ) , el intervalo en el espaciotiempo se escribe así:
 $ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 d\varphi^2$

En presencia de una masa m , el espacio tiempo se curva, aparece un tensor métrico g_{un} diferente que corresponde a un tensor de curvatura no nulo. En tal caso, Einstein nos dice que la fórmula anterior ha de modificarse y que ahora debe ser:

$ds^2 = g(r) c^2 dt^2 - (dr^2 / g(r)) - r^2 d\varphi^2$, donde la función g lo es sólo de la distancia r a la masa m y vale $g(r) = 1 - (2GM/c^2r)$. Cuando $2GM/c^2r$ es igual a 1, g se hace cero y la métrica contiene infinitos, se vuelve singular como dicen los matemáticos. A este valor de r, R_s , se le conoce como el radio de Schwarzschild, y define un volumen del cual no puede salir la luz o ente alguno. Si m fuera la masa del sol, R_s valdría tres kilómetros y la densidad de este cuerpo sería inimaginablemente alta. Por ello, durante mucho tiempo no se tomó totalmente en serio a estos hoyos negros. No obstante, desde los sesentas empezaron a descubrirse nuevos objetos en el cielo. En 1967 se vio el primer pulsar que emite ondas de radio con gran regularidad. Se concluyó pronto que estos pulsares eran estrellas de neutrones, con masas del orden de la solar y una decena de kilómetros de radio, y que resultaban del colapso gravitacional de una estrella normal, cuando ésta moría al haber gastado su combustible nuclear. Tales objetos ya no estaban muy lejos de uno que cumpliera con la condición de Schwarzschild. El hoyo negro aparecía en lontananza...

Aunque el hoyo negro no puede verse, sus efectos sí son detectables. Supongamos que un hoyo negro forma una pareja con una estrella normal; por su gran atracción gravitatoria, el hoyo negro extrae materia de su estrella compañera. Ello produce fuertes emisiones de rayos X, que son característicos y que bien podrían ser la señal de que el hoyo negro anda por ahí. Muchos astrónomos creen que tales condiciones se dan en ciertas fuentes conocidas de rayos X, como la Cygnus X-1. Más aún, muchos piensan que existen hoyos negros gigantescos en el centro de las galaxias pues, según las teorías astronómicas modernas, suponiéndolos se explicarían varias observaciones, como los chorros de gas ionizado que vemos en las radiogalaxias. Tal vez pronto sabremos si estos cuasares son también hoyos negros.

Los hoyos negros podrían formarse cuando una estrella muy masiva termina su evolución, después de haber explotado como una supernova. La formación de un hoyo negro supone, pues, enormes aceleraciones de masas muy grandes. Deberían, según

Einstein, generarse entonces pulsos enormes de ondas gravitacionales. Esta ilusión de la física moderna no ha podido convertirse en realidad. Igual que el monopolo magnético o los cuarks, las ondas gravitacionales no han sido descubiertas aún. Sin embargo, casi ningún físico duda de su existencia y por ello las continúan buscando.

Toda teoría relativista de cualquier campo de fuerzas físico predice la existencia de ondas. El electromagnetismo requiere de ondas como la luz, y la gravitación relativista tiene sus propias ondas. No es difícil entender por qué, cuando nos damos cuenta de que la relatividad prohíbe la transmisión instantánea de señales. En el caso electromagnético, por ejemplo, los campos pueden ser independientes del tiempo sólo si las cargas están en reposo o se mueven con velocidad uniforme. En la última afirmación está oculta la hipótesis de que la partícula ha permanecido en su estado de movimiento desde siempre y para siempre. Cualquier perturbación a él, es decir, cualquier aceleración que sufran las cargas ha de propagarse con velocidad finita, en forma de pulso que viaja con la velocidad de la luz c . Este es el origen de las ondas electromagnéticas que se producen cuando aceleramos una carga eléctrica. Tales ondas surgen de inmediato de una teoría relativista de los campos eléctricos y magnéticos, como es la de Maxwell. De sus ecuaciones emerge la ecuación de ondas y de ahí las importantes consecuencias tecnológicas que todos atestiguamos día con día.

Como las ecuaciones de campo de Maxwell llevan a la existencia de ondas electromagnéticas, así las ecuaciones de campo de Einstein predicen las ondas gravitacionales. Las primeras implican oscilaciones de los campos eléctricos y magnéticos, las gravitacionales son alteraciones de la geometría del espaciotiempo. Cuando una carga eléctrica se acelera se produce un pulso de luz, un chorro de fotones. En igual forma, al acelerar una masa, fuente del campo gravitacional, se produce un pulso de ondas gravitacionales, un chorro de gravitones. A semejanza de las electromagnéticas, las ondas de Einstein llevan con una velocidad c la información de que algo ha ocurrido; c es la máxima velocidad permitida. Pero a diferencia de las ondas de luz, las gravitacionales son muy débiles. Esto se debe a que la fuerza gravitacional es mucho menos intensa que la eléctrica, como sabemos, pues la constante de la gravitación universal G es pequeñísima. Por ello, habrá que esperar a que masas enormes sufran aceleraciones gigantescas, como en la formación de un hoyo negro, para poder detectar esas ondas gravitacionales.

Aparte de su debilidad relativa, existe una diferencia más entre los dos tipos de ondas. En el caso eléctrico podemos generar ondas periódicas haciendo oscilar una carga positiva y una negativa en fase opuesta, una contra la otra; esto es lo que llamamos la radiación dipolar. El dipolo, conjunto de dos cargas de signo opuesto, es el radiador electromagnético básico. Empero, la gravitación es diferente, pues no hay masas de signo opuesto. Aunque no sepamos por qué, el principio de equivalencia impone masas de un solo signo. No es posible, en consecuencia, producir un dipolo oscilante que radie ondas gravitacionales. Según se deduce de la teoría einsteniana, el radiador básico es ahora lo que se conoce como un cuadrupolo. (En el lenguaje cuántico, tal diferencia entre los dos tipos de ondas se expresa así: los cuantos de luz, los fotones, tienen espín $h/2p$, donde h es la constante de Planck; los cuantos de la onda gravitacional, los gravitones, por su parte, tienen espín $2(h/2p)$, el doble del fotón.)

Es interesante, llegados a este punto, mencionar que los físicos no se han dormido en sus laureles desde 1916, cuando Einstein publicó su teoría general de la relatividad. Muchas otras ideas sobre la gravitación han generado otros científicos; algunas de estas teorías predicen efectos distintos a la de Einstein. En particular, se cree hoy que toda teoría relativista de la gravitación debe ser una teoría métrica, es decir, que sus ecuaciones deben caracterizar g_{mn} . Se conocen varias de estas teorías métricas, además de la general de la relatividad. En cuanto a las ondas gravitacionales, sólo la última lleva a la conclusión de que el cuadrupolo es el radiador básico. Por ello, resulta de la mayor importancia detectar las ondas gravitacionales, pues con ello sabríamos cuál idea sobre la gravedad, de las varias hoy posibles, se acerca más a lo que observamos.

Con estos preámbulos, relatemos los esfuerzos recientes para detectar las ondas de Einstein, esfuerzos que son herederos directos de los que Weber y sus colaboradores realizaron hace ya veinte años, cuando creyeron detectar por primera vez las ondas gravitacionales. Por cierto, todavía hoy no sabemos con certeza cuál fue el fenómeno que Weber observó.

La teoría de la relatividad general de Einstein prevé la existencia de ondas gravitacionales, es decir de vibraciones que, análogamente a las ondas electromagnéticas, deberían propagarse en el espacio a la velocidad de la luz.

Los astrofísicos consideran que así como en el pasado, del estudio del cielo surgieron muchas confirmaciones a las teorías einstenianas, también las ondas gravitacionales, con el tiempo, serán descubiertas.

Hoy se piensa que las ondas gravitacionales deben ser de **dos tipos: periódicas e impulsivas. Las primeras, muy débiles, se deben a cuerpos de gran masa en movimiento: por ejemplo dos estrellas que giran la una alrededor de la otra, estrellas de neutrones o agujeros negros rotando,** etc. **Las segundas, más intensas,**

Desde un punto de vista físico, **las ondas gravitacionales deberían modificar la geometría del espacio en el que propagan y, embistiendo a un cuerpo sólido, deberían producir vibraciones en el propio cuerpo. Sin embargo interactúan muy débilmente con la materia, en el sentido de que la pueden atravesar de lado a lado siendo sólo absorbidas en una mínima parte,** resultando por lo tanto de difícil intercepción.

Para revelar las ondas gravitacionales, los astrofísicos han inventado aparatos denominados antenas gravitacionales que consisten, habitualmente, en cilindros de aluminio que tienen una masa variable desde algunas decenas de kilos a varias toneladas, conectados a delicadísimos aparatos electrónicos capaces de determinar la más mínima variación. El principio de funcionamiento es el siguiente: si desde alguna parte del Universo llegara una onda gravitacional, la antena debe ponerse a vibrar y los instrumentos de amplificación indicar el fenómeno.

Sin embargo, las interferencias causadas sobre antenas por fenómenos sísmicos, electromagnéticos, acústicos, etc., han perturbado hasta ahora el trabajo de los

astrofísicos, a pesar de las muchas precauciones tomadas para reducir al mínimo estos llamados ruidos de fondo.

8.- La gravedad ¿Cómo afecta a los seres vivos?

A lo largo de la historia de la tierra la vida ha evolucionado para sobrevivir a las condiciones cambiantes del sistema solar, a las dinámicas internas del planeta, cambios climáticos etc. pero el único factor que se ha mantenido relativamente constante en la evolución desde que la vida comenzó en la tierra es la fuerza de la gravedad.

Como resultado tanto la vida de las plantas, como la de los animales han evolucionado para depender y hacer frente a esta fuerza de diferentes formas.

La gravedad puede considerarse como una de las fuerzas más importantes en el desarrollo de nuestro planeta ya que interactúa con factores ambientales, es responsable del peso de los objetos en la tierra, de la caída de la lluvia, de la disipación de calor, del movimiento de los gases, de la mantención de la atmósfera, etc. y desde el punto de vista biológico la gravedad representa una restricción física frente a la cual, los seres vivos, tanto bacterias como el ser humano, durante su evolución han debido desarrollar mecanismos adaptativos y compensatorios.

Hace más de 5 décadas el hombre ha tratado de entender **cómo la gravedad afecta la vida de los seres vivos**, es decir, cómo cambios en su magnitud podrían afectar la reproducción, desarrollo y/o la fisiología de los organismos. Para responder esta pregunta **se han desarrollado 2 áreas principales de estudio, una enfocada a evaluar cómo la gravedad afecta a los fenómenos físicos de la materia y así podría afectar a los sistemas biológicos**, y la otra **enfocada a estudiar los mecanismos de detección de la gravedad y los efectos biológicos de cambios en su magnitud**. Para esto se han desarrollado varios experimentos como mantener organismos en un clinostato o llevarlos en un viaje espacial para obtener una condición de gravedad menor a la de la tierra (microgravedad = μg); o someter organismos a centrifugación para obtener una condición de gravedad mayor a la de la tierra (hipergravedad = hg). La variedad de organismos utilizados en estos experimentos es muy amplia y abarca casi toda la escala evolutiva, desde organismos unicelulares hasta organismos multicelulares invertebrados y vertebrados.

Efectos de la gravedad en Organismos unicelulares.

La gravedad ha tenido un efecto en el desarrollo de la vida animal desde el primer organismo unicelular. El tamaño de las células biológicas individuales es inversamente proporcional a la intensidad del campo gravitacional que ejerce sobre las células. Es decir, en los campos gravitacionales más fuertes el tamaño de las células disminuye, y en campos gravitacionales débiles el tamaño de las células aumenta.

La gravedad es entonces un factor limitante en el crecimiento de las células individuales. Células que son naturalmente más grandes que lo que en la gravedad es

permitida, solo permitiría desarrollar métodos para protegerse de la sedimentación interna. Varios de estos métodos se basan en el movimiento protoplasmático, la forma delgada y alargada del cuerpo celular, aumento de la viscosidad del citoplasma, y una amplia reducción de la gravedad específica de los componentes de la célula en relación con el plasma de suelo.²

Los efectos de la gravedad en muchos organismos unicelulares son aun más drásticos. Durante el periodo en que los primeros animales evolucionaron para sobrevivir en la tierra mediante algún método de locomoción dirigida y por lo tanto una forma de esqueleto interno o esqueleto externo habría sido necesario para hacer frente al aumento de la fuerza de gravedad debido a que la fuerza se debilito por el alza de la flotabilidad. Antes de este punto, la mayoría de las formas de vida eran pequeñas y tenían una apariencia tipo lombriz o medusa, y sin este paso en la evolución no hubieran sido capaz de mantener su forma o de moverse en la tierra.

La mayoría de los organismos multicelulares contienen una gran cantidad de bacterias con las cuales conviven de manera simbiótica, tanto así que se cree que hay más bacterias en el cuerpo de una persona que células humanas, sin embargo bajo determinadas condiciones estos organismos podrían ser patogénicos. Dados los planes de la NASA de reenviar personas a la Luna o enviarlas a Marte ha surgido la pregunta de ¿cómo los cambios en la gravedad afectarían a los microorganismos? El número de microorganismos que han sido investigados durante vuelos espaciales es grande, sobre 100 cultivos diferentes fueron evaluados antes de 1990. Los resultados muestran que frente a condiciones de μg se acorta la fase lag de crecimiento bacteriano y se incrementa la fase de crecimiento exponencial en comparación a controles expuestos a condiciones de 1g. Se cree que en condiciones de μg durante la fase de crecimiento exponencial la distribución de bacterias podría cambiar, esto tendría 2 efectos: aumentaría la disponibilidad de nutrientes y una disminución de productos tóxicos debido a la ausencia de sedimentación, esto favorecería la multiplicación de las células. Así mismo, se ha observado un aumento de la resistencia a antibióticos de microorganismos; es de vital importancia determinar cuál es el mecanismo que da cuenta del aumento de resistencia a antibióticos, ya que además se ha observado que bacterias crecidas bajo condiciones de μg presentan un aumento en la virulencia, lo cual podría ser un factor de riesgo para los astronautas que realicen vuelos espaciales largos ya que en el espacio se han observado cambios negativos en la respuesta inmune humana. Para determinar si los resultados obtenidos se debían a un efecto biológico directo de la gravedad o a un efecto físico indirecto sobre el ambiente, se evaluó el crecimiento bacteriano pero ahora en medio de cultivo sólido no observándose cambios en la cinética de crecimiento de las bacterias sometidas a μg versus aquellas sometidas a condiciones de 1g. Por lo tanto, en condiciones de μg , cambios en la dinámica del fluido y transporte extracelular, darían cuenta de cambios en el metabolismo celular que podrían de alguna manera tener un efecto a nivel de expresión génica (Nickerson y cols., 2004).

Efectos de la gravedad en organismos multicelulares.

Así como los organismos unicelulares, los multicelulares invertebrados y vertebrados utilizan diversos mecanismos para detectar la dirección y magnitud de la gravedad y así

orientarse, por lo tanto cambios en la magnitud o dirección de la gravedad deben tener sin duda algún efecto.

Efectos de la gravedad en Invertebrados: Plantas.

Todos sabemos que las plantas tienen un crecimiento vertical, los brotes hacia arriba buscando la luz mientras las raíces hacia abajo buscando agua, nutrientes y soporte estructural. Aunque los estudios sobre el gravitropismo comenzaron hace aproximadamente 2 siglos, la naturaleza molecular de la detección de la gravedad por las plantas permanece ampliamente desconocido. El gravitropismo, tanto para vegetales como animales, puede ser dividido en 3 etapas:

percepción del vector de gravedad, transducción de la señal, y flexión del órgano o célula en la dirección apropiada. En plantas, la percepción de la gravedad está dada por el movimiento hacia abajo de los amiloplastos (gránulos de almidón). La subsecuente flexión de los órganos es mediada por una distribución asimétrica de la hormona de crecimiento auxina, esta hormona estimula el crecimiento de los tallos e inhibe el crecimiento de las raíces (Haswell 2003). Se cree que proteínas que participan en el transporte de auxina determinan la dirección del crecimiento ya que se ha observado que plantas sometidas a μg la localización celular de estas proteínas cambia lo cual conlleva un cambio en la dirección del crecimiento de la planta (Friml y cols., 2002), además en estas condiciones **se han observado cambios en la estructura y composición de la pared celular** (Hoson y cols., 2004) y **cambios estructurales a nivel de citoesqueleto**, plantas sometidas a **clinorotación (μg) presentan un aumento en la cantidad de microfilamentos** los cuales podrían hacer más rígido el citoesqueleto de actina (Shevchenko y col., 2005). **Además de los efectos biológicos de la μg , se han observado efectos físicos, en ausencia de gravedad debido a la ausencia de convección el transporte en intercambio de gases por las plantas se ve limitado lo cual también afectaría su crecimiento** (Porterfield 2002).

Por otra parte plantas sometidas a condiciones de hg presentan una inhibición del crecimiento de los tallos dada por un aumento en la rigidez de la pared celular por un cambio en la composición de sus azúcares (Soga y cols., 2004).

Insectos. Experimentos realizados con *Drosophila melanogaster* muestran que adultos expuestos a μg **detectan los cambios en la gravedad aumentando su motilidad**, y posiblemente debido a este cambio en el comportamiento **las moscas envejecen más rápido luego de volver a condiciones de 1g** (Marco y cols., 1999).

Efectos de la gravedad en Vertebrados: Peces.

Uno de los objetivos de la NASA con respecto a la biología gravitacional corresponde al estudio del desarrollo del sistema vestibular el cual se localiza en el oído interno y detecta entre otras cosas la gravedad, esto podría ayudar a entender de mejor manera los efectos de vivir, trabajar y crecer en ausencia de gravedad. Cada sistema sensorial es específico para el estímulo, y se cree que en ausencia del estímulo el sistema no se desarrolla correctamente. Embriones de pez Zebra en distintos estados de desarrollo fueron sometidos a condiciones de μg durante diferentes intervalos de tiempo y luego se evaluaron los efectos en los peces adultos. Se observó que peces sometidos a fuerzas gravitacionales inestables durante 24 a 72 horas post fertilización presentan

defectos en el funcionamiento del sistema vestibular. Estos resultados fueron los primeros que muestran la existencia de un período crítico de desarrollo del sistema vestibular.(<http://weboolife.nasa.gov/earthBased.htm>). Además, **se han observado cambios en el patrón natatorio de peces frente a alteraciones en la gravedad** lo cual estaría **dado por mal funcionamiento del oído interno, debido a un desbalance en la posición de los receptores de gravedad** (Rahmann y cols., 2002).

Efectos de la gravedad en Anfibios.

Se ha observado que en condiciones de μg , tanto la fertilización como la maduración temprana de los huevos de *Xenopus* ocurre en condiciones normales, por lo tanto condiciones de gravedad de 1g no serían necesarias para la formación temprana del eje anteroposterior. En etapas posteriores del desarrollo condiciones de μg evitan la inflación de los pulmones y tráquea y provoca malformaciones de la cola lo cual **conlleva cambios en el comportamiento y crecimiento retardado de las larvas** (Rahmann y cols., 2002).

Efectos de la gravedad en Aves.

Se ha observado que codornices se adaptan rápidamente al ambiente espacial, y la embriogénesis de huevos fertilizados ocurre normalmente. Sin embargo, se observó que una vez que las aves regresaban a la tierra **presentaban problemas de orientación y serios problemas para volar**, con la consecuencia de no poder alimentarse por si solas una vez liberadas en su habitat natural (Morey-Holton., en prensa).

Efectos de la gravedad en Mamíferos.

Relativamente poca información se tiene acerca de cómo **cambios en la gravedad afectan la reproducción y desarrollo de los mamíferos**. Sin embargo, en los últimos se ha avanzado en el conocimiento de estos procesos mediante el uso de ratas como modelos de investigación. Hasta la fecha se han realizado 5 misiones que han llevado al espacio parejas de ratas para cruce, ratas preñadas, o camadas lactantes con la rata madre. Estas misiones revelaron que luego de la exposición a μg durante la última mitad de la preñez las ratas parieron dentro del tiempo esperado y dieron similares números de crías comparado con los controles expuestos a 1g. Sin embargo, estas ratas presentaron el doble en frecuencia de contracciones y un menor contenido de conexina 43 en el miometrio post parto, respecto de las ratas controles. **Esto sugiere que cambios en la gravedad podrían alterar la síntesis y ensamblaje de proteínas asociadas al proceso de contracción uterina.**

Experimentos con ratas expuestas a condiciones de hg muestran que también parieron dentro del tiempo esperado y dieron similares números de crías comparado con los controles expuestos a 1g. Sin embargo al contrario de las ratas expuestas a μg , estas ratas presentaron una menor frecuencia de contracciones en el momento del parto comparadas con las ratas controles expuestas a condiciones de 1g. En conjunto estos resultados muestran que μg y hg producen efectos opuestos en la frecuencia de contracciones durante el trabajo de parto. Además, se ha descrito que el

comportamiento maternal y relaciones madre-cría pueden ser alteradas en el espacio (Ronca y cols., 2003).

Desde el primer viaje espacial en que llevó a un ser humano, en 1957, se han tenido registros de los efectos fisiológicos de la gravedad, como por ejemplo **cambios en la fisiología muscular y ósea, sistema nervioso, cardiovascular, pulmonar y hematológico** (West 2000). Estos cambios se observaron en individuos completos, sin embargo, **diversos cambios tanto a nivel celular como génico han sido observados en el espacio, por ejemplo células renales humanas sometidas a condiciones de μg o hg cambian su patrón de expresión génica** (www.tmc.tulane.edu/astrobiology/microarray), así como también se observaron **cambios morfológicos en las células crecidas en el espacio**. Estos resultados sugieren que **de alguna manera la gravedad regula la expresión de genes específicos**, lo cual lleva a modificaciones en la cantidad de determinadas proteínas y finalmente en el organismo completo. Resultados obtenidos con cultivos de células óseas sugieren que vuelos espaciales, es decir, condiciones de μg inducen una diferenciación celular retardada y cambios en el citoesqueleto, morfología nuclear y expresión génica, lo cual concuerda con la descalcificación observada en los astronautas. También se ha observado que células musculares en condiciones de μg son un 10 - 20% más delgadas comparadas con las células controles, debido a una disminución en la síntesis de proteínas. Interesantemente, la atrofia observada en fibras musculares en cultivo coincide con la atrofia muscular observada en animales sometidos a vuelos espaciales.

Con respecto al sistema inmune, se ha observado que en el espacio células T no se multiplican de la misma manera a como lo hacen en la tierra y su morfología cambia. Frente a condiciones de μg estas células tienden a mantener una forma esférica, lo cual reduce la comunicación con otras células y evitaría su capacidad de viajar a través del organismo. Este efecto sumando al aumento en la tasa de crecimiento bacteriano podría ser un riesgo para los futuros astronautas que emprendan viajes a lugares más lejanos.

Por otro lado, se han realizado experimentos con espermatozoides para evaluar si la gravedad afecta la motilidad de estas células, se observó que en condiciones de g los espermatozoides se movían mejor. Al contrario se observó que en condiciones de hg la motilidad de los espermatozoides era reducida a un 50%. En ambas condiciones, g y hg , se observó que la actividad de las enzimas que participan en la maquinaria que genera el movimiento de estas células se encontraba afectada, pero el mecanismo por el cual los espermatozoides detectan la gravedad aun sigue siendo totalmente desconocido.

9.- Conclusiones

En un principio se creía que cambios en la gravedad no causarían cambios en los organismos o en las células debido a que esta fuerza es muy débil comparada con las otras fuerzas que actúan en o dentro de las células.

Nuclear strong force 10^{40}
Electromagnetic force 10^{38}
Nuclear weak force 10^{26}
Gravitational force 10^1

En esta exposición se ha mostrado una amplia variedad de efectos que presenta la gravedad en los seres vivos, tanto a nivel fisiológico, reproductivo, desarrollo o del comportamiento. Estos efectos se observaron en organismos tan distintos como bacterias, plantas, peces, mamíferos, personas, etc. Aún no están muy claros los mecanismos celulares o moleculares por los cuales actúan los cambios en la gravedad, pero se conoce por la experiencia que al modificar la gravedad artificialmente ya bien sea a menos o más, les afecta de una forma decisiva.

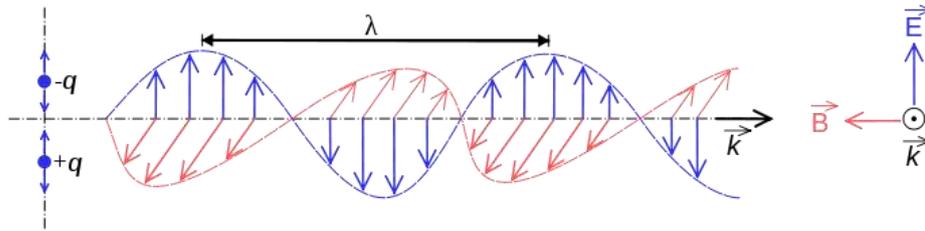
La vida tal y como la conocemos es el resultado de la influencia de una determinada gravedad, si fuera otra los seres tendrían otro tipo de formación, tendrían otras reacciones, se reproducirían de otra manera etc. como hemos apreciado experimentalmente. Podemos afirmar sin error que los seres vivos son sensores de la gravedad y que el alcance de sus comportamientos nos indica el grado de sensibilidad que tienen a una cierta magnitud y dirección de la gravedad, si tuviésemos otra gravedad el resultado biológico sería bien diferente.

Laboratorios biológicos espaciales con gravedad artificial, podrían ser otros sensores de las ondas gravitatorias, las emisiones de ondas de gravedad procedentes del espacio, alterarían el normal desarrollo y comportamiento celular.

Polarización electromagnética

La **polarización electromagnética** es un fenómeno que puede producirse en las ondas electromagnéticas, como la luz, por el cual el campo eléctrico oscila sólo en un plano determinado, denominado plano de polarización. Este plano puede definirse por dos vectores, uno de ellos paralelo a la dirección de propagación de la onda y otro perpendicular a esa misma dirección el cual indica la dirección del campo eléctrico.

En una onda electromagnética no polarizada, al igual que en cualquier otro tipo de onda transversal sin polarizar, el campo eléctrico oscila en todas las direcciones normales a la dirección de propagación de la onda. Las ondas longitudinales, como las ondas sonoras, no pueden ser polarizadas porque su oscilación se produce en la misma dirección que su propagación.



Polarización gravitacional

¿Se podría polarizar las ondas gravitacionales? La **polarización gravitacional** sería el fenómeno parecido a la polarización de las ondas electromagnéticas y si se consigue polarizar el campo gravitacional en un solo plano o dirección y de igual forma hacerlo con el tiempo caso que la teoría fuera cierta, se lograría unos efectos muy interesantes.

Hay diferentes formas de conseguir la polarización de la luz

Polarización por absorción selectiva]

Algunos materiales absorben selectivamente una de las componentes transversales del campo eléctrico de una onda. Esta propiedad se denomina *dicroísmo*. La luz experimenta una absorción en ciertos estados de polarización. El término *dicroísmo* proviene de las observaciones realizadas en épocas muy tempranas de la teoría óptica sobre ciertos cristales, tales como la turmalina. En estos cristales, el efecto del dicroísmo varía en gran medida con la longitud de onda de la luz, haciendo que aparezcan diferentes colores asociados a la visión de diferentes colores con diferentes planos de polarización. Este efecto es también denominado *pleocroísmo*, y la técnica se emplea en mineralogía para identificar los diferentes minerales. En algunos materiales, tales como la herapatita (sulfato de iodoquinina) o las capas Polaroid, el efecto no es tan fuertemente dependiente de la longitud de onda, y ésta es la razón por la que el término *dicroico* se emplea muy poco.

El dicroísmo ocurre también como fenómeno óptico en los cristales líquidos debido en parte a la anisotropía óptica que presentan las estructuras moleculares de estos materiales. A este efecto se le denominó posteriormente "efecto huésped-invitado" (*guest-host effect* en inglés).

En el mundo mineral hay cuerpos que presentan anisotropía, esta característica indica que **sus cristalizaciones las han efectuado de una manera ordenada dentro de la gravedad** y conforme a unas propiedades moleculares, **luego las diferentes propiedades moleculares podrían quizás servir para desviar o polarizar las ondas gravitacionales. Sería un tema para tratar en el futuro.**