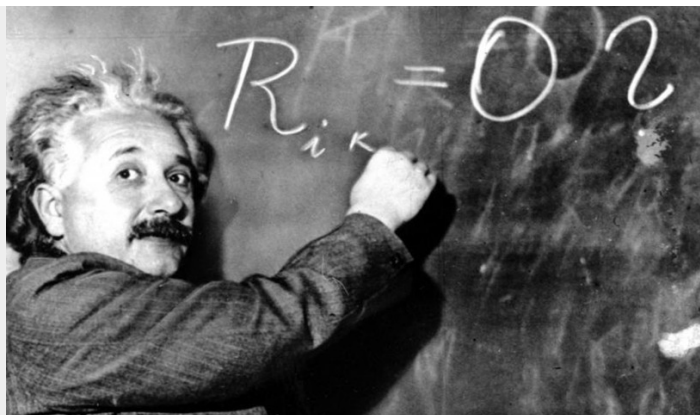


# LA RELATIVIDAD EINSTEINIANA

Posted on 14 marzo, 2017 by Daniel E. Sudarsky Saionz



Es extremadamente común poner a Albert Einstein como el mayor exponente de la genialidad humana, y sin embargo la gran mayoría de la gente no sabe bien por qué se le considera así.

Category: [Ciencia](#)

Tag: [Ciencias Exactas](#)



**Es extremadamente común poner a Albert Einstein como el mayor exponente de la genialidad humana, y sin embargo la gran mayoría de la gente no sabe bien por qué se le considera así.**

*La Teoría de la Relatividad, consiste en realidad de dos teorías: la Relatividad Especial y la General.*

Tal vez su mayor logro ( y ciertamente aquel con el que es más popularmente identificado, a pesar de tener varias otras importantísimas contribuciones en su haber) es la teoría de la relatividad, que, como veremos más adelante, consiste en realidad de dos teorías: la Relatividad Especial y la

General. El objetivo de este escrito es contribuir a difundir, entre los no expertos en el tema, las ideas básicas detrás de estas teorías, compartiendo así, con quienes tenemos el privilegio y la fortuna de dedicarnos a estos asuntos, la oportunidad de maravillarse con la profundidad del pensamiento de Einstein. En otras palabras, lo que busco es que, aparte de que todos sepamos que Einstein fue un gran genio, también apreciemos el porqué. Como se puede imaginar el lector, esto será un poco demandante, así que le suplico armarse de paciencia. Es más, le sugiero leer esto en un momento muy tranquilo en el que tenga al menos un par de horas, para tomarse la lectura con mucha calma.



Para empezar, hay que notar el cambio radical de nuestro entendimiento de la naturaleza que surge de la teoría de la relatividad, y que tiene implicaciones que van desde lo eminentemente filosófico, hasta lo relativamente práctico y mundano. En cuanto a lo último, cabe mencionar simplemente el ejemplo del cada vez más popular sistema de posicionamiento global o GPS usado por conductores de auto, así como pilotos de avión y navegantes marinos. El punto es que éste simplemente no funcionaría si en su diseño no se hubieran analizado e incorporado ciertos

efectos relativistas: El sistema funciona mediante unos satélites que emiten señales cada cierto tiempo según lo marcan los relojes que lleva a bordo, mientras que el aparatito que llevamos con nosotros, detecta esas señales y calcula en base a los distintos tiempos de llegada de cada una de ellas nuestra distancia a cada satélite y de ese modo nuestra ubicación geográfica con una gran exactitud. El asunto es que, en un sentido que veremos más adelante, "el tiempo en los satélites corre de manera diferente que acá en la tierra" y ese desfase se explica y se predice con notable precisión en base a la teoría de la relatividad (de hecho, para hacerlo se necesita incluir efectos tanto de la Relatividad Especial como la Relatividad General). En cuanto a lo primero, basta con notar que dentro de las concepciones espaciales y temporales (en el marco conceptual Newtoniano imperante hasta 1905 y que sigue vigente en la visión de la mayoría de la población no especialista), se considera a las dos entidades: espacio y tiempo, como cosas absolutas, separadas e inamovibles. El espacio es visto como un simple escenario tridimensional fijo con geometría euclidiana (la geometría que aprendemos en la escuela), en el cual se desarrolla la realidad, mientras que al tiempo se le ve como una especie de flujo universal que enmarca dicho desarrollo.

*Las cosas pasan en algún lugar, y en algún determinado momento.*

Esta visión permite, por ejemplo, posturas filosóficas según las cuales lo que existe es el presente, mientras que el pasado ya se fue y el futuro aún no ha llegado. Hoy en día dicha postura es simplemente insostenible a la luz de nuestro entendimiento de la física del espacio-tiempo. De

hecho, las cosas cambian radicalmente ya con la Relatividad Especial propuesta por A. Einstein en 1905.

Pero veamos con más detalle que es lo que pasa y por qué. El problema al que se enfrentaba la física de fines del siglo XIX era el aparente conflicto entre i) la equivalencia, según las concepciones newtonianas, de todos los sistemas inerciales para la formulación de las leyes de la física, y ii) la conclusión, derivada de las leyes del electromagnetismo, de que la velocidad de la luz tendría un valor fijo y predicho de 300,000 km/segundo. La equivalencia mencionada en i) de hecho estaba detrás de las mismas ideas de Galileo y de la misma física Newtoniana. Para Galileo era fundamental entender cómo era posible que la Tierra se moviera en su órbita alrededor del Sol, y que sin embargo, en la Tierra no nos percatáramos de eso. Muchos, en su época, argumentaban que si la Tierra se movía como explicaba Galileo (emulando a N. Copérnico), entonces los vasos y platos se estarían cayendo de las mesas continuamente y los objetos no caerían al suelo sobre el lugar en que se les soltara (ya que mientras iban en vuelo la Tierra se desplazaría). Sin embargo, todo esto se lograba aclarar (gracias también a la visión de Galileo) al considerar que el movimiento en si era algo relativo: dentro de un barco navegando por un lago tranquilo (argumentaba el ilustre renacentista italiano) no se podría inferir el movimiento de éste respecto a la orilla si uno permanecía encerrado en su camarote sin mirar por las ventanas. Hoy esto mismo lo experimentamos cada vez que volamos en un avión, ya que salvo durante el despegue y aterrizaje ( y si tenemos mala suerte durante las turbulencias), uno no siente que se mueve la gran mayoría del tiempo, aun cuando vamos a casi 1,000 km/hora respecto a la superficie de la Tierra. Al servirnos una copa de vino (cuando uno tiene la suerte de que se la ofrezcan) el líquido no cae fuera de la copa.

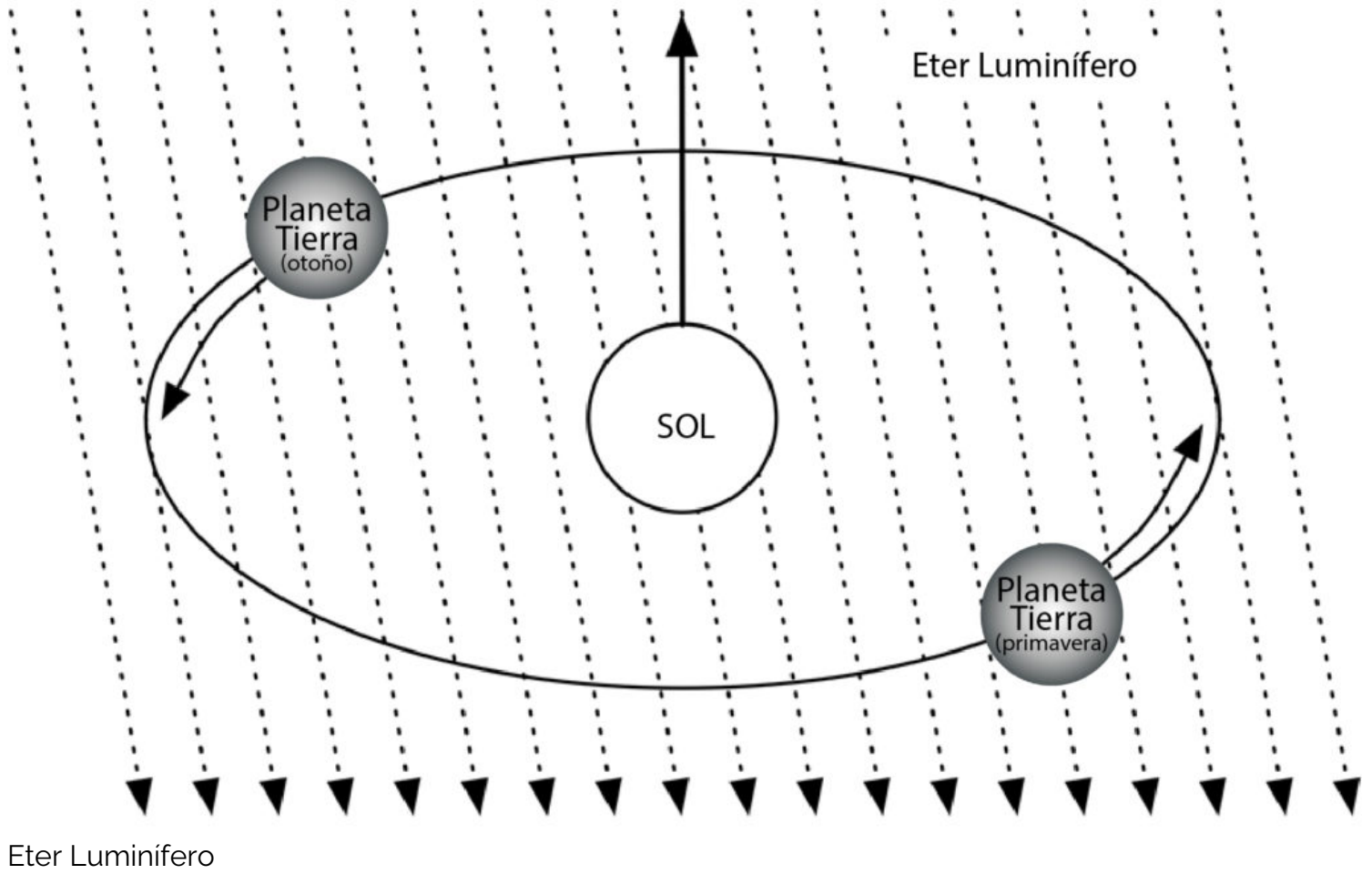
La mecánica Newtoniana incorpora este hecho haciendo hincapié en que todas las leyes de movimiento se ven exactamente igual en cualquier marco de referencia (a un marco de referencia lo podemos considerar como una persona real o imaginaria dotada de reglas y relojes que mide tiempos y distancias, y determina entonces velocidades y aceleraciones de los objetos que, según la Física Newtoniana han de seguir unas ciertas reglas sencillas: las tres leyes de Newton), siempre y cuando se trate de un marco inercial.

*¡Ya!, dirá e lector, todo iba bien hasta que nos salió con esto de "los marcos inerciales".*

Pues si, efectivamente estas cosas tienen sus bemoles: Es claro por ejemplo que si para usted, lector, un objeto se mueve en línea recta y con velocidad constante (con lo que me refiero a que es constante tanto en dirección y magnitud), entonces también lo hará para alguien que se mueve respecto a Ud. igualmente con velocidad constante, aunque, claro, el movimiento de aquel objeto tendrá para él, posiblemente, otra velocidad y otra dirección. Pero ciertamente, para una persona que con respecto a Ud. esté, digamos, rotando sobre su eje, el movimiento de dicho objeto no parecerá ni remotamente rectilíneo, ni con velocidad uniforme (tendrá al menos un cambio continuo de dirección). Por lo tanto hay ciertos sistemas de referencia en que se valen las leyes de Newton y

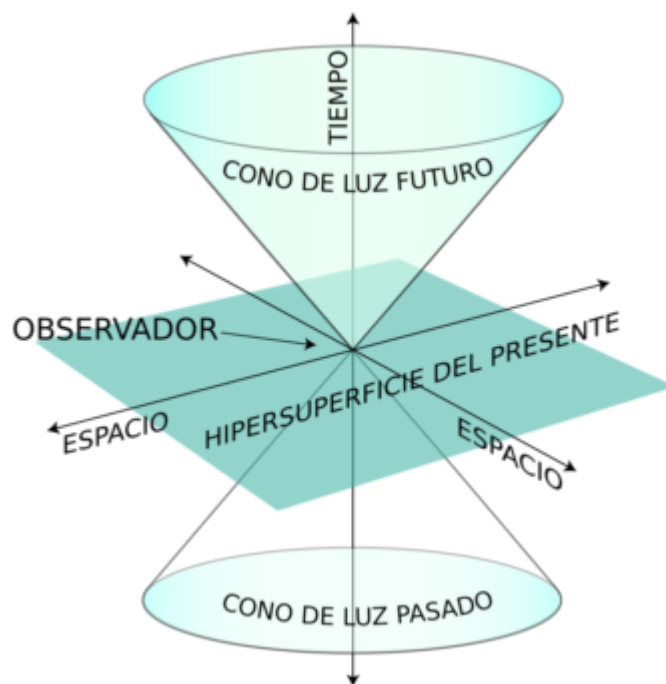
otros en los que no: Los primeros se llaman sistemas inerciales, y se pueden identificar, y realizar (en el sentido de determinarlos en la práctica) simplemente tomando un objeto libre de fuerzas externas (lo que se logra al considerar objetos sin carga eléctrica, sin momento magnético y sin contacto directo con los demás objetos, y (\*) asegurándonos de algún modo, de que en nuestra situación no juega ningún papel la gravitación), y moviéndonos junto con él. También estaremos en un sistema inercial al movernos de manera de ver a dicho objeto moverse con velocidad constante. La ley de inercia dice entonces que todo otro objeto sobre el que no hay fuerzas se moverá con velocidad constante siempre y cuando su movimiento se describa desde un sistema inercial. Suena un poco enredado, pero paciencia.

En el siglo XIX ya se entendían también muy bien las leyes del electromagnetismo, y con ellas se podían predecir la existencia de ondas electromagnéticas, explicando que la luz era un tipo particular de éstas. Se pudo predecir exactamente la velocidad de propagación de dichas ondas: 300,000 km/segundo. La dificultad conceptual a la que se enfrentaban los físicos era que, si en un cierto marco inercial, la luz se movía efectivamente con esa velocidad, parecía claro que en otro marco cualquiera, en movimiento respecto al primero, la luz se movería, en general, con alguna velocidad diferente. De manera que si las leyes del electromagnetismo resultaban válidas en el primer marco, estas mismas leyes no serían entonces válidas en aquel último marco. Sin embargo, toda la evidencia empírica indicaba que sí lo eran. De hecho, un punto de vista muy popular en aquel tiempo era que las leyes del electromagnetismo eran válidas solamente en el marco que se encontrara en reposo respecto a un cierto medio hipotético al que se le denominó el *Eter Luminífero*. Esto pondría a las ondas electromagnéticas a la par, digamos, de las ondas de sonido cuya velocidad respecto al medio en que se propaga tiene un valor específico y único, velocidad que cambia para el observador que se mueve respecto a ese medio. El medio determina un marco de referencia especial, el que está en reposo respecto a dicho medio. En el caso de la luz el problema radicaba en que todas las búsquedas experimentales indicaban que dicho marco inercial especial, y el Eter Luminífero simplemente no existían.



Con la Relatividad Especial Albert Einstein resuelve esta paradójica situación, modificando las nociones de espacio y tiempo, afirmando que en realidad no había ningún conflicto entre las dos aseveraciones i) y ii) hechas arriba. El aparente conflicto se desarticulaba considerando que, la relación espacial y temporal entre dos eventos depende del estado de movimiento del marco inercial en que se describen. Si en un marco de referencia la longitud de un objeto (que nos habla de la relación entre sus extremos) es un metro, en otro marco de referencia dicha longitud sería 90 cm (la relación exacta está dada por una fórmula que involucra la velocidad relativa entre los

marcos). Si en un cierto marco de referencia el tiempo transcurrido entre dos eventos es 10 segundos, en otro marco dicho tiempo podría ser 12 segundos (una vez más la Relatividad Especial nos da la fórmula exacta para calcular este cambio). Todo esto "conspira" para que las leyes de la física, incluyendo las del electromagnetismo, sean válidas en todo marco inercial, y en particular, para que, al considerar a la propagación de la luz, en todo marco se coincida en que ésta se mueve a 300,000 km por segundo. Extraño, muy extraño, pero respaldado hoy por millones de pruebas experimentales de la Relatividad Especial. Pero lo que es tal vez aún más chocante de esta nueva visión es que, si en un cierto marco dos eventos ocurren simultáneamente (es decir al mismo tiempo) en otro marco de referencia inercial, en general la cosa no será así: uno ocurre antes que el otro. Esto claramente atenta contra nuestra muy querida noción del "ahora". Las entidades espacio y tiempo se reemplazan por un ente único, el espacio-tiempo, cuya descomposición se puede hacer únicamente en cada marco inercial por separado.



De acuerdo a la Relatividad Especial, la relación entre espacio y tiempo tiene, de hecho, mucho en común con la descomposición que hacemos habitualmente, del "espacio" en "alto", "ancho" y "profundo". Es decir, que así como estos conceptos son claramente relativos a nuestra orientación, los de espacio y tiempo se vuelven relativos a nuestro movimiento. Esto claramente hace insostenible la postura filosófica de "lo que existe es el presente", pues esto nos lleva a preguntarnos, ¿el presente de acuerdo a quien? o ¿de acuerdo a qué marco inercial? Claramente entonces, el asumir dicha noción acerca de lo que existe (el ahora), requeriría adoptar una especie de solipsismo (la idea de que la única realidad es aquella que yo y sólo yo percibo directamente, que mi mente es la medida de todas las cosas y lo demás es todo secundario) como postura filosófica básica.

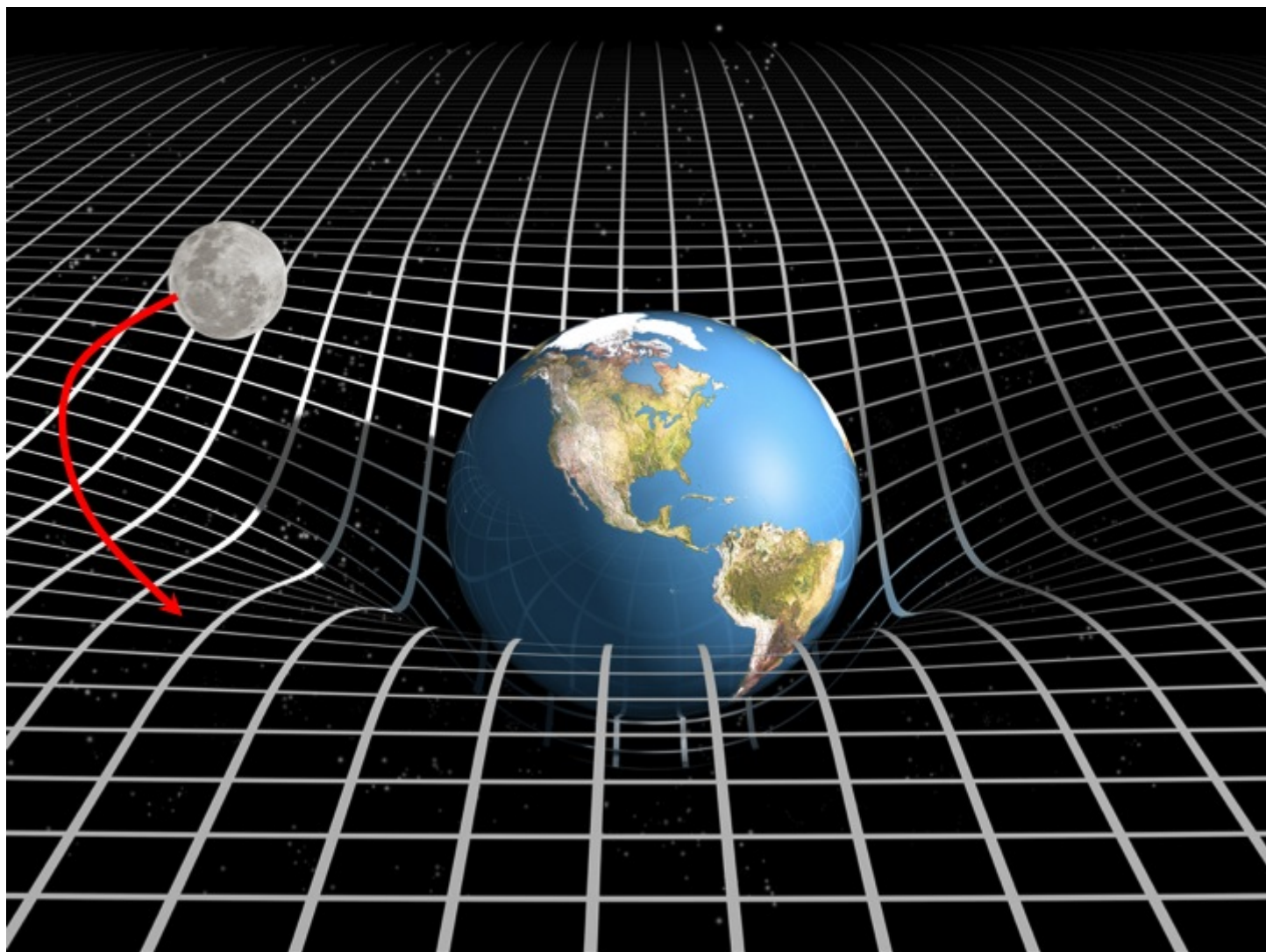
La Relatividad General está ligada a cambios aún más radicales.

Pero si lo anterior nos hace dar vuelta la cabeza preparémonos, porque la Relatividad General está ligada a cambios aún más radicales y revolucionarios en nuestras ideas. Esta teoría surge de los intentos del mismo Einstein de adaptar la Teoría de la Gravitación Newtoniana con su acción instantánea a distancia (la fuerza gravitacional que un objeto ejerce sobre otro depende de su separación en ese instante), claramente incompatible con la nueva concepción espacio-temporal de

la relatividad especial (¿ese instante... según quien?). Esta teoría nos presenta un mundo físico en que el espacio-tiempo mismo se vuelve dinámico, afectando y siendo afectado por los objetos materiales, sustituyendo de este modo la calidad inamovible del espacio y tiempo Newtonianos, calidad que comparte el espacio-tiempo de la Relatividad Especial.

Una vez más lo que queremos es ver como surge todo esto. Para llegar a la Relatividad General Einstein empieza por explorar un notable aspecto de la gravitación Newtoniana y es que afecta a todos los objetos con masa. De hecho, éste es un aspecto que nos lleva de vuelta a un punto marcado con (\*) en un párrafo arriba. El punto álgido de todo esto es que, dado que en la práctica no podemos generar situaciones en que se pueda estar seguro que la gravedad no juega ningún papel, nos es imposible seguir cabalmente las instrucciones para determinar cual sería exactamente un sistema inercial. Un astronauta flotando en el espacio cerca de la Tierra no correspondería a un marco inercial, puesto que su movimiento estaría afectado por la gravitación terrestre, y si estuviera lejos de la Tierra, aun estaría afectado por la gravitación Solar. Incluso muy lejos del Sol, sería afectado por la gravitación de otras estrellas y la de la misma Galaxia. No podemos apagar la gravitación, así que nos vemos ante la dificultad de escoger algo que, con total precisión, se le pueda llamar un marco inercial. Uno podría pensar que si sabe exactamente donde están todos los objetos que pueden generar efectos gravitacionales podría en principio tenerlos en cuenta y resolver el asunto. El problema es que para hacer esto tendríamos que basarnos en la gravitación Newtoniana, que es justamente la teoría que necesitamos reemplazar.

Einstein se dio cuenta de la importancia de un hecho fundamental de la gravitación Newtoniana, aspecto que usará como piedra angular de su razonamiento. Veámoslo.



La Luna en caída libre alrededor de la Tierra. Según Einstein, el espacio se curva por la presencia de la Tierra y esta curvatura es responsable de la trayectoria cerrada de la Luna, siguiendo una geodésica.

Uno se puede preguntar lo siguiente: ¿por qué se puede, en la práctica, ignorar casi completamente los efectos de la gravitación solar al considerar los fenómenos físicos en la Tierra? Einstein nota que esto se debe a la "universalidad de la caída libre": el hecho de que aunque la fuerza gravitacional sobre un objeto es mayor mientras más masivo es el objeto, la aceleración que una piedra adquiere por la atracción solar es la misma con la que toda la Tierra está cayendo hacia el Sol (estar en órbita alrededor del Sol es una manera de caer hacia él). De esta manera la aceleración relativa entre la roca y la Tierra en dirección al Sol, se anula, de modo que en la práctica, la podemos ignorar. Esto, de hecho, aclara la utilidad de la identificación práctica de los sistemas inerciales: Uno puede en general simplemente ignorar la cláusula (\*). En otras palabras, para escoger un sistema inercial tómesese un objeto (libre de fuerzas electromagnéticas y que no está en contacto directo con ningún otro objeto), y ajuste su movimiento de manera de ver a este objeto moviéndose respecto a Ud. con



velocidad constante (en dirección y magnitud). Considere Ud., mi estimado lector, seguir estas instrucciones: Tome un objeto en su mano y suéltelo, éste está libre de fuerzas (ignoremos por un momento el efecto despreciable del aire, a menos que el objeto sea una pluma o algo así). Claramente el objeto empezará a caer hacia el suelo. La instrucción es entonces que Ud. se mueva siguiéndolo. Esto lo podría lograr entre otras maneras simplemente dejándose caer (levantando sus piernas para que no estén tampoco en contacto con el suelo). Este es ahora un sistema inercial. La ley de inercia dice ahora que todo otro objeto, que no está sujeto a fuerzas externas (no tiene carga eléctrica o momento magnético y no está en contacto con otro objeto) se moverá también rectilíneamente y con velocidad constante visto desde ese marco de referencia, y todo esto sería válido a pesar de haber ignorado completamente los efectos de la gravitación. En esta manera de ver las cosas la gravitación no es una fuerza. Esto se estaría garantizado desde el punto de vista Newtoniano, simplemente por el hecho de que la gravitación produce en todos los objetos la misma aceleración.

*¡La gravedad simplemente desaparece cuando vemos al mundo desde un sistema verdaderamente inercial!*

Pero ¡cuidado!, esto funciona mientras los distintos objetos estén muy cercanos unos a los otros. Cuando consideramos objetos muy distantes entre sí en general lo anterior no se cumple (Plutón cae hacia el Sol con una aceleración distinta que aquella con la que la Tierra cae hacia el astro rey). Todo esto se resume diciendo que los sistemas inerciales son ahora simplemente lo mismo que los sistemas en caída libre. Esta idea es la que tomó Einstein como guía fundamental, es decir, la elevó al nivel de principio básico al que denominó el Principio de Equivalencia, que entre otras cosas identifica claramente a los sistemas inerciales y a su vez indica que éstos tienen únicamente una validez local. Un sistema inercial correspondiente a dejarse caer libremente sobre la Ciudad de México, no se puede extender a un sistema inercial cayendo libremente sobre Madrid. La limitación de la extensibilidad del sistema inercial local es ahora una medida del aspecto central de la gravitación. Si los sistemas inerciales así considerados se extendieran infinitamente, la gravitación simplemente se podría eliminar de toda consideración. En el hecho de que esto no ocurre reside entonces la verdadera naturaleza de la gravitación.

Esto nos lleva a las siguientes consideraciones: Pensemos que la Relatividad Especial, que seguiría siendo válida localmente en los marcos inerciales, nos provee de una especie de descripción local del espacio-tiempo; La descripción global requeriría entonces de una colección de dichas descripciones locales y de instrucciones para su pegado. Esto claramente se asemeja a tener un mapa por pedacitos de alguna región geográfica. Por ejemplo, en la Ciudad de México uno solía (antes de los Waze y los GPS) usar la famosa Guía Roji para guiarse. Ésta consistía en una colección de mapitas locales que se pegaban bien unos con otros, al punto de que en principio uno podría cortar todas las paginas (y fotocopiar las contra-páginas) para armar un gran mapa de la ciudad. El

punto es que claramente dicho mapa no se podría extender a todo el planeta, puesto que la Tierra es curva mientras que dicho mapa sería necesariamente plano. Si generáramos mapas locales muy pero muy precisos veríamos que estos no encajan bien al tratar de pegarlos todos. Si la precisión de éstos fuera infinita podríamos de hecho notar los desfases incluso al pegar sólo dos. Ese desencaje es un reflejo de la curvatura de la superficie terrestre. El problema de desencaje que tenemos al tratar de generar entonces un mapa del espacio-tiempo a nivel global (es decir la limitación de extensibilidad de los sistemas inerciales locales) lo podemos ver entonces como un reflejo de la curvatura del espacio-tiempo.

La gravitación es, entonces, en esencia la curvatura del espacio-tiempo, y dado que la gravitación está ligada a la distribución de materia y ésta es dinámica, la geometría del espacio-tiempo es entonces igualmente dinámica. Esto nos lleva a un visión de la naturaleza del espacio-tiempo aún más lejana de la intuición, que la que nos daba la ya de por sí contra-intuitiva Relatividad Especial.

En resumen, el gran logro de Einstein, en esta nueva teoría, empieza por aclarar la noción de marco de referencia inercial, entender su gran utilidad, y por reconocer el carácter geométrico del principio de equivalencia. Al aclarar que los marcos inerciales no son sino los marcos en caída libre, la gravitación se vuelve geometría, y esta unificación requiere que la geometría sea dinámica. La imagen del espacio-tiempo que nos daba la relatividad especial preserva su validez dentro del contexto más general de la nueva teoría, pero lo hace únicamente a nivel local: Los marcos inerciales de la Relatividad Espacial corresponden a los marcos en caída libre, cuya extensión es limitada por la curvatura. Por otro lado, a nivel global, el espacio-tiempo tendría que verse como una concatenación de dichos marcos inerciales locales, que conjuntamente nos ayudan a describir al espacio-tiempo como un todo, que es, genéricamente, curvo. Cabe aclarar que la curvatura de la que hablamos acá es una generalización de las nociones usuales, a las cuatro dimensiones del espacio-tiempo, y es por lo tanto muy difícil de visualizar, aunque su tratamiento matemático sea semejante a aquel con que se describen, digamos superficies en dos dimensiones. Éste es el espacio-tiempo que nos presenta la relatividad general, curvo, y dinámico, deformado por la presencia en él de la materia, y a su vez rigiendo la evolución y comportamiento de ésta. Se trata de una revolución dramática de nuestras concepciones, la cual entre otras cosas, nos permite considerar el estudio de la evolución, la geometría y la correspondiente dinámica del universo mismo: la cosmología, lo que sería simplemente imposible sin el marco teórico de la Relatividad General (aunque se puedan contemplar tratamientos simplistas que a veces dan resultados no muy diferentes del tratamiento apropiado), así como concebir y estudiar los más fascinantes de todos los aportes de la teoría a la cultura popular: los agujeros negros, profundas deformaciones del espacio-tiempo simplemente inconcebibles fuera de la Relatividad General.

No es sorprendente entonces que esta teoría haya sido considerada por grandes pensadores, como la obra intelectual más profunda de la humanidad.

Cabe también decir que desde su formulación la teoría ha recibido un enorme soporte empírico

mediante la confirmación de muchas de sus predicciones, como la curvatura de la propagación de la luz cerca de objetos muy masivos, los detalles del movimiento planetario, la emisión de ondas gravitacionales por los pulsares binarios y la reciente e impactantemente clara detección directa de dichas ondas por el experimento LIGO ( el mayor detector interferométrico de ondas gravitacionales localizado en los estados de Washington y Luisiana en EEUU), así como la cada vez más convincente evidencia directa de la existencia de agujeros negros, incluyendo la evidencia indirecta de que lo que detectó LIGO fueron ondas gravitacionales generadas por el choque de dos agujeros negro de decenas de masas solares cada uno, en una galaxia muy distante, hace unos mil millones de años (según nuestro sistema de referencia en la Tierra).

Confío, mi estimado lector, a quien le agradezco su paciencia si es que llegó hasta acá, que lo anterior contribuya a acercarle a estas ideas maravillosas, descabelladamente impactantes y a su vez sustentadas por una creciente masa de evidencia empírica. Lo hago en la convicción de que para disfrutarlas no es necesario ser especialista en el tema, y a la vez como un modesto homenaje a Albert Einstein al cumplirse algo más que un siglo de haber revolucionado nuestra forma de pensar acerca de las leyes de la naturaleza y la estructura del universo en el que vivimos.  $C^2$