

## 100 Años de la Teoría General de la Relatividad por Tonatiuh Matos

Hace justo 100 años, Albert Einstein publicó la extensión de su teoría especial de la relatividad a fenómenos gravitacionales. A esta nueva teoría la llamamos la Teoría General de la Relatividad. Es tal vez la revolución más profunda que ha tenido el pensamiento humano y marcó una nueva era en la forma de hacer ciencia. Vamos a platicar un poco de porque esta afirmación tan atrevida es verdad. Para eso es conveniente primero hablar de la Teoría Especial de la Relatividad. Es interesante subrayar que Einstein tenía 26 años cuando publicó estas ideas.

Realmente Einstein quería resolver un problema epistemológico que seguramente le aturdió de su juventud [1]. Para explicar este problema, vamos primero a recordar una experiencia que seguro todos hemos tenido. Cuando vamos en un auto a gran velocidad y lanzamos una pelota desde el auto en dirección del movimiento, la pelota adquiere la velocidad a la que la hemos lanzado. Para el lanzador, la pelota lleva la velocidad de lanzamiento, pero para una persona que ve esta acción desde un lugar parado en la banqueta de la calle, la pelota adquiere la velocidad de lanzamiento más la velocidad del auto. Ambos observadores miden una velocidad deferente para la pelota, pero ambos ven el mismo fenómeno: la pelota es lanzada por el lanzador desde el auto. Esta es una experiencia trivial que todos podemos probar siempre. El resultado es que para el observador en la banqueta, la pelota adquiere una velocidad que es la suma de la velocidad del auto más la que le imprimió el lanzador. Sencillo, ¿no es cierto? Pero Einstein era un filósofo realista, para él los fenómenos no pueden depender del observador y el principio de causalidad es inviolable. A toda causa sigue un efecto y no al revés. Vamos a llevar nuestro experimento de lanzar una pelota de un auto a otro nivel. Vamos a suponer por un momento que los fotones, o sea, la luz se comporta como pelotas lanzadas de un auto. Veamos el fenómeno de la figura 1, tomada de la referencia [2]. Ahí observamos dos autos (los cuadros) que se mueven en dirección a los observadores que están justo enfrente de ellos. Los autos emanan fotones constantemente, rayos de luz, y por tanto los observadores ven el desarrollo del proceso todo el tiempo. Vamos a suponer que el proceso de superposición se lleva a cabo incluso con la luz. Entonces los rayos de luz que salgan en dirección del movimiento de los autos obtendrán la velocidad del auto más la velocidad de la luz. Pero los fotones o rayos de luz en dirección perpendicular a los autos, solo viajarán a la velocidad de la luz. Ahora supongamos que los autos viajan muy rápido y a la misma velocidad, como ambos están a la misma distancia del centro del cuadro, se encontrarán justo en el centro y chocarán. Pero analicemos que ve cada observador. Para la persona de la izquierda, los fotones del auto de enfrente viajan más rápido que los del auto de arriba. Entonces él verá que el auto de enfrente llega primero al centro del cuadro que el auto de arriba, se despedaza y luego choca con el auto de arriba. Evidentemente algo anda mal, pues la causalidad no se cumple, primero se ve el efecto y luego la causa. Aun más, para el observador de abajo son los fotones del auto de arriba los que viajan más rápido, de nuevo es la suma de la velocidad del auto más la velocidad de la luz. Este observador verá entonces que es el auto de arriba el que llega primero, se desbarata y luego llega el de la derecha y lo choca. Este observador también ve que se viola causalidad pero al revés. Es decir, los observadores no solo ven que se viola causalidad, sino que cada observador ve el fenómeno de una forma muy diferente. Para Einstein esto es inaceptable, se viola causalidad y los dos observadores ven un fenómeno distinto. Los principios del realismo filosófico son violados sin compasión. Einstein resolvió este problema epistemológico postulando que todos los sistemas de referencia ven la misma velocidad de la luz, no importa en donde se encuentran. La velocidad de la luz es absoluta. Pero esto causa otro

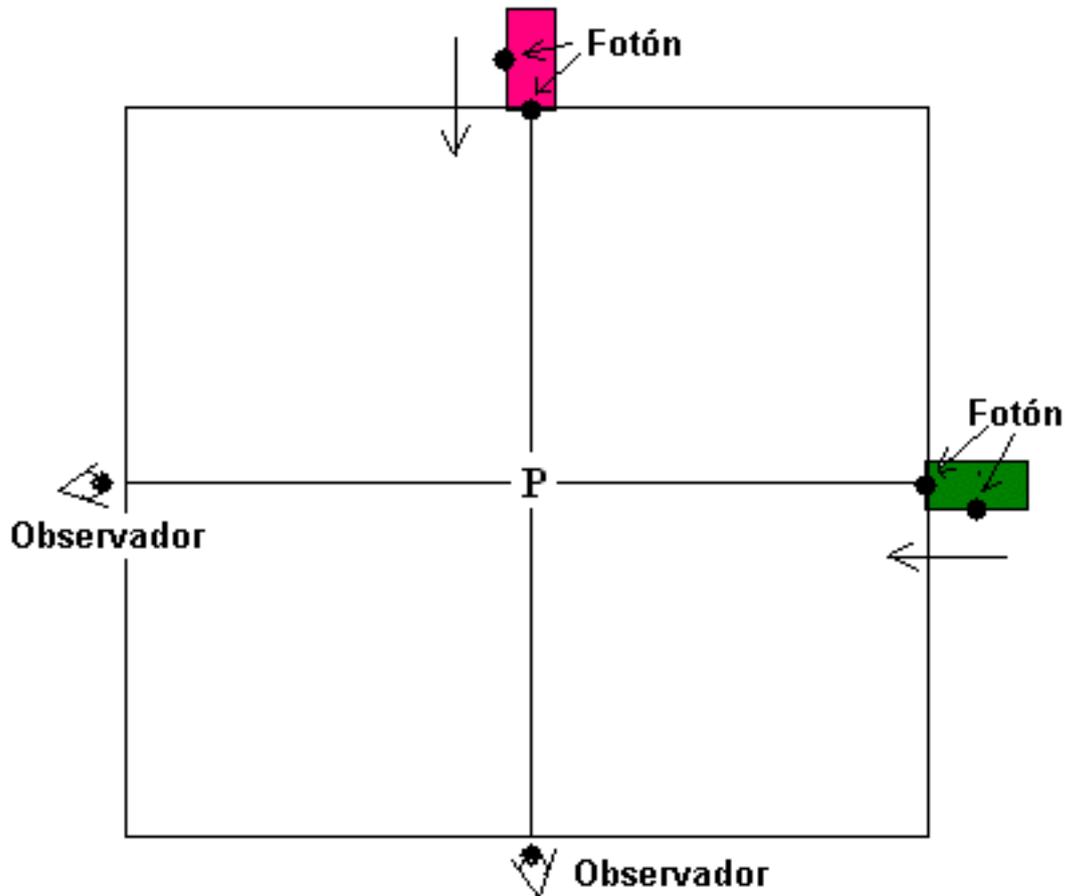


Figura 1.

problema, si esto es cierto y queremos que los observadores vean el mismo fenómeno, tenemos que aceptar que para cada observador las distancias y el tiempo son elásticos, cada observador los mide diferente. Para ver esto, hagamos un Gedanken Experiment (experimento mental). Supongamos que en un tren una persona pone un espejo en el techo y ilumina este techo con una lámpara. Obviamente el rayo de luz sube y se refleja en el techo llegando a la lámpara de nuevo. Pero para una persona que está fuera del tren y ve el fenómeno desde la banqueta el rayo de luz viaja una distancia mucho mayor, pues se tiene que tomar en cuenta el movimiento del tren, como en la figura 2. Entonces, para que los dos observadores vean el mismo fenómeno, es decir, que el rayo de luz sube al techo y se refleja para llegar a la lámpara, la distancia que debe medir el observador de afuera debe ser menor y el tiempo mayor que la que mide el observador en el tren. La conclusión de Einstein fue que las distancias medidas de tiempo y espacio no son absolutas, son relativas al observador para que ambos vean el mismo fenómeno. Por supuesto esta idea causó gran revuelo en toda la comunidad científica y de pensamiento.

Pero el problema no quedó ahí, entre los años 1908 a 1915 Einstein trabajó en las consecuencias de esta idea. Hagamos otro Gedanken Experiment. Imaginemos un círculo de diámetro  $D$  y circunferencia  $C = \pi D$  en el cual ponemos una varillas en el diámetro y otras en la circunferencia y colocamos un reloj en el centro y otro sobre el círculo mismo y lo hacemos girar a una gran velocidad (para una explicación más amplia, vean la

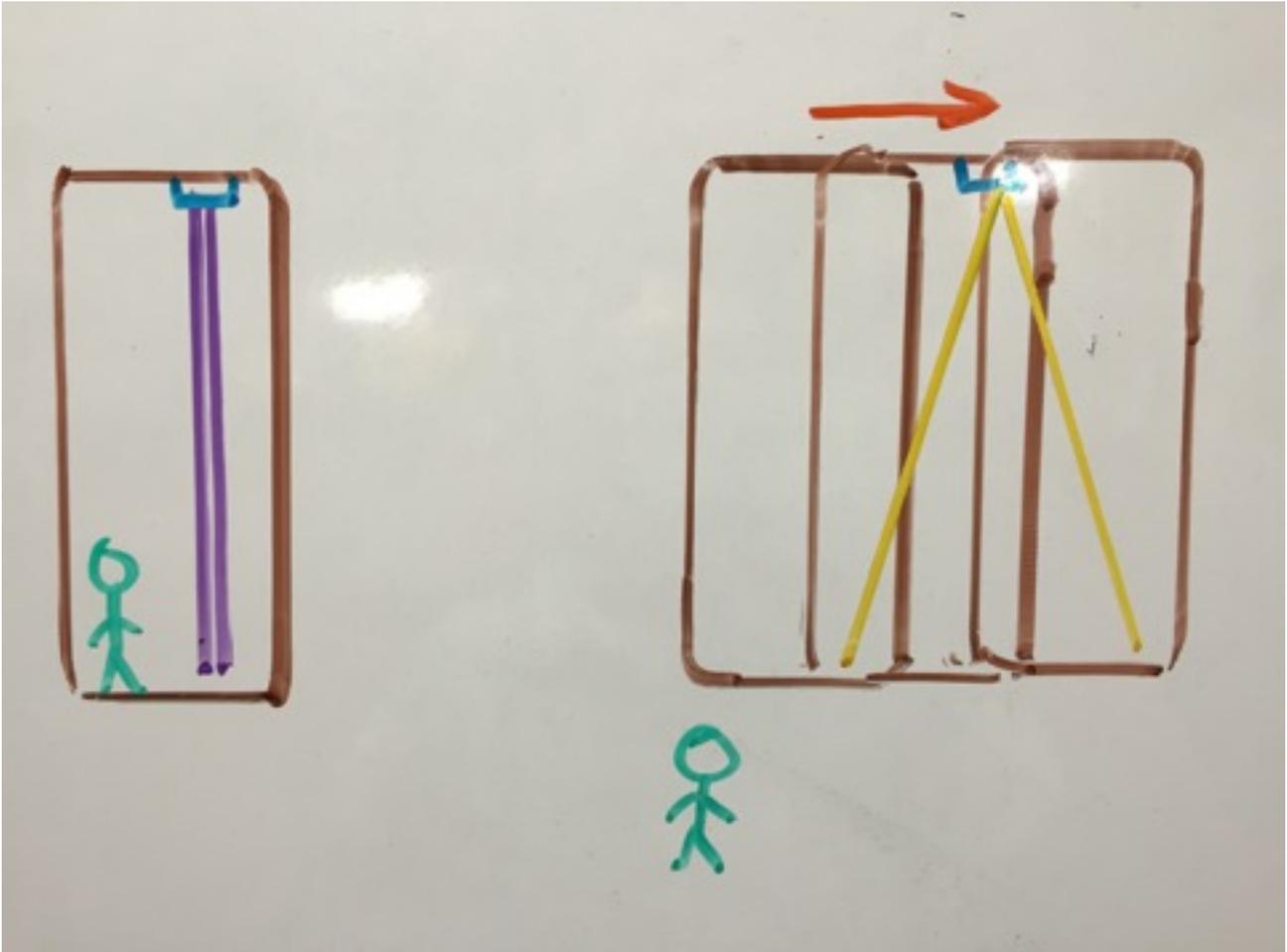


Figura 2.

referencia [3]). Las varillas sobre la circunferencia están sujetas a una aceleración centrípeta constante. Imaginemos que sobre la circunferencia la velocidad de las varillas es cercana a la de la luz. Entonces, como ya vimos según la teoría de la relatividad especial de Einstein, las varillas sobre la circunferencia se contraen con respecto a las varillas que están sobre el diámetro, pues estas últimas se mueven perpendiculares a la circunferencia. Por otro lado, el reloj sobre la circunferencia se atrasa respecto del que está en el centro. Esto es, la relación  $C = \pi D$  ya no se cumple, el espacio se modificó y el tiempo sobre la circunferencia cambió. Es decir, un sistema sujeto a aceleración constante modifica su espacio y su tiempo. Pero en la tierra todos estamos sujetos a una aceleración constante, la de la gravedad. Einstein concluyó entonces que la gravedad modifica el espacio-tiempo. En otras palabras, las interacciones gravitacionales entre objetos se dan porque cada objeto modifica el espacio tiempo de su alrededor.

La otra parte de esta teoría consiste en la siguiente observación. Si un objeto no está sujeto a ninguna fuerza este se mueve en una línea recta, la cual es la trayectoria más corta entre dos puntos en un espacio plano. El espacio plano es el espacio no modificado, es decir, en donde no hay fuerzas de gravedad. Einstein postuló que los objetos se mueven en las trayectorias más cortas en los espacio modificados y los comparó con los sistemas en donde hay fuerzas con gravedad. Se tardó varios años hasta encontrar las ecuaciones que gobiernan a los espacio-tiempo modificados por

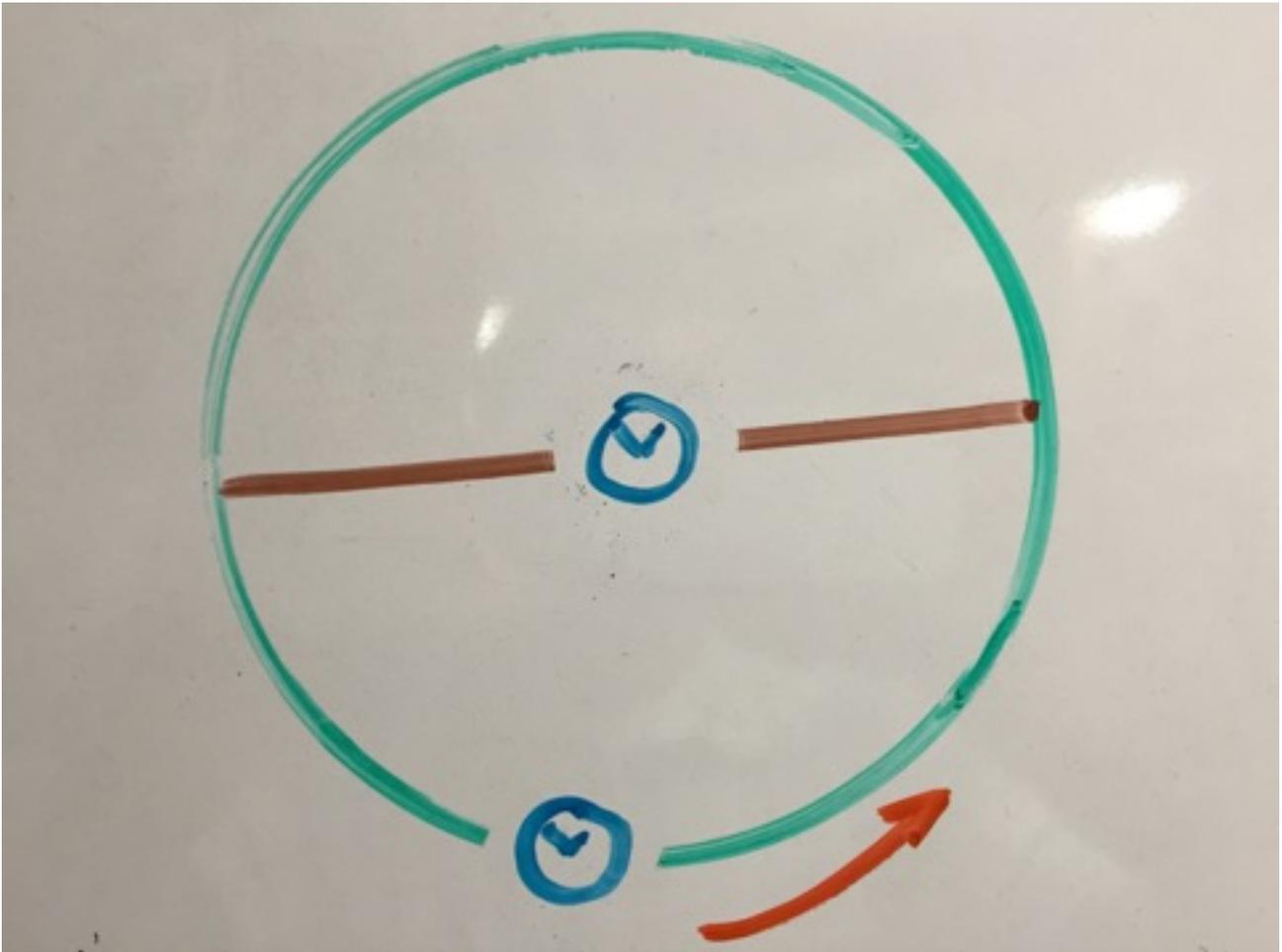


Figura 3.

cuerpos que modelaran la gravedad. El resultado fue una nueva forma de entender las interacciones entre cuerpos: todo objeto material (o energético) modifica el espacio tiempo, haciendo que los cuerpos de alrededor se muevan en las trayectorias mínimas entre dos puntos. Es decir, en esta teoría ya no existen las fuerzas (al menos la de la gravedad), la interacción entre cuerpos se da por la curvatura del espacio tiempo provocada por la existencia de la materia. Para esto, materia se entiende como todo lo que existe (fuera de la conciencia), como las partículas, los campos o la energía. La revolución de esta teoría consiste en postular que las interacciones entre la materia son debido a la geometría, las fuerzas no existen.

Por supuesto, todas estas afirmaciones e ideas son muy bonitas, pero tienen que estar de acuerdo con la realidad. La primera prueba que se dio a esta teoría tiene una historia muy interesante. Hace 100 años Alemania se encontraba en guerra contra el resto del mundo, entre ellos el Reino Unido. Un astrónomo inglés llamado Arthur Eddington, quien laboraba en la Universidad de Cambridge, estudió la teoría de Einstein, se dice, mucho en contra de las opiniones de sus colegas, pues en ese momento la teoría de Einstein era ciencia alemana, ciencia enemiga. Eddington le escribió a Einstein si su teoría podía resolver una anomalía que los astrónomos habían observado hacía tiempo que consistía en que el planeta Mercurio no se movía exactamente como lo predecía la teoría de Newton. Recordemos que Isaac Newton era el Dios de la física en aquel entonces y había sido inglés. Resultaba ser que Mercurio se movía en elipses, como

predecía la segunda ley de Newton, pero la elipse giraba sobre uno de sus focos, en donde se encuentra el Sol. Parte era porque Mercurio está muy cerca del Sol y la gravedad debido a la estructura del Sol ya tiene que ser considerada. Aun así, había una pequeña diferencia que no podía ser explicada. Los astrónomos intentaron de varias formas resolver la anomalía, por ejemplo, postularon la existencia de otro planeta, justo detrás del Sol, por eso no lo podíamos ver, pero lograba modificar la órbita de Mercurio. A este planeta le llamaron Vulcano, supuestamente donde nació el Sr. Spock. Sin embargo, resultaba demasiada casualidad que el planeta estuviera justo donde no lo podemos ver siempre detrás del Sol y además ni eso resolvió la anomalía. Por eso Eddington le propuso a Einstein que investigara eso utilizando su nueva teoría. Entonces Einstein hizo los cálculos junto con Max Planck y le mandaron los resultados a Eddington, quien se sorprendió al ver que los cálculos de Einstein eran justo lo que explicaba la rotación de la elipse de Mercurio. Esta fue la primera muestra de que posiblemente la teoría de Einstein podría tener razón. Al terminar la primera guerra mundial, el mismo Eddington se propuso checar si había alguna otra repercusión observable de la teoría. La gravedad según Newton, los cuerpos se atraen debido a su masa, entre más grande es la masa de los cuerpos, mayor es la fuerza de gravedad entre ellos. Pero para Einstein no hay fuerzas, el Sol curva el espacio tiempo a su alrededor y todo se mueve sobre las trayectorias mínimas en este espacio, incluso la luz. Esto implicaba que un rayo de luz, aunque no tenga masa, si pasa cerca del Sol deberá cambiar su trayectoria recta. Eddington propuso ver las estrellas que están muy cerca del Sol y ver si su luz se desviaba, el problema es que la corona solar es tan enorme y tan luminosa que es imposible ver una estrella a su alrededor. Entonces se le ocurrió que durante un eclipse solar la luna tapa justo la enorme luminosidad del Sol (lo cual es una increíble coincidencia) y en ese momento él puede ver las estrellas justo detrás del Sol. Realizó este experimento en 1919 llevando un telescopio a la isla de Príncipe, cerca de África, en donde un eclipse de Sol sería más intenso y tomó una serie de fotografías a la posición de las estrellas más cercanas al Sol y luego las comparó con la foto de la misma región pero sin la presencia de este. El resultado fue asombroso, todas las estrellas cercanas se veían en posiciones diferentes. En una conferencia en la universidad de Cambridge anunció que Einstein tenía razón sobre Newton. Esto fue un duro golpe para la ciencia inglesa, aunque les quedó el consuelo de que Alemania había perdido la guerra.

En 1920 el matemático ruso Alexander Friedman encontró que la teoría de Einstein predecía que el universo tenía que ser dinámico. En esos años Rusia vivía una serie de movimientos sociales que no permitieron que esta noticia fuera propagada con la fuerza de su implicación. Pero el resultado fue confirmado por el sacerdote católico belga, el físico George Lemaitre. Lemaitre y Einstein tuvieron una controversia que se manifiesta en una serie de cartas entre ellos en donde Einstein le reprochaba estos resultados. Einstein introdujo entonces una nueva componente a sus ecuaciones, llamada la constante cosmológica, justo para que el universo que se predecía en su teoría fuera estático, como él lo imaginaba. La controversia no terminó sino hasta que el abogado y astrónomo norteamericano Edwin Hubble observó que las galaxias se alejaban unas de otras, y que su velocidad de alejamiento era proporcional a la distancia entre ellas. Esto se puede explicar solo si el universo está en expansión, justo como las ecuaciones de Einstein lo predecían y en contra de los deseos de Einstein. Einstein viajó a Los Angeles a visitar a Hubble, en donde el abogado le demostró sus observaciones. Al regresar Einstein de esta visita, este aceptó que la constante cosmológica era "la peor metida de pata de su vida". En la actualidad creemos que la constante cosmológica tal vez no sea una metida de pata, tal vez haberla quitado de sus ecuaciones, si lo sea. En 1933, los matemáticos norteamericanos Howard Robertson y Arthur Walker re-descubrieron los resultados de Friedman y Lemaitre y desde entonces la métrica que explica la expansión del universo se

llama la métrica de Robertson-Walker. Actualmente la métrica de Friedman-Lemaitre-Robertson-Walker y sus perturbaciones, conjuntamente con la hipótesis de la existencia de la materia y la energía oscura son capaces de explicar con una precisión impresionante las mediciones de la estructura a gran escala del universo y las fluctuaciones de temperatura de un cienmilésimos de grado Kelvin de la radiación de fondo proveniente del origen del universo. Resultados decididamente espectaculares.

Los hoyos negros son sin duda una de las predicciones de la teoría de Einstein que más se han vuelto populares. En 1916, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild demostró que, según la recién publicada teoría de Einstein, debería de haber estrellas que por su enorme gravedad, la luz no sería capaz de escapar. Esta idea ya había sido analizada años atrás usando las ideas de las de Newton, en donde se veía que para escapar de una estrella o de un planeta, se necesitaba una velocidad mínima llamada la velocidad de escape. Pero si la velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz, según la teoría de Einstein nada podría salir de la estrella, ni la luz. Karl Schwarzschild muere joven de una enfermedad siendo soldado durante la primera guerra mundial. El resultado de Schwarzschild quedó desapercibido y como algo curioso hasta que el físico norteamericano John Wheeler se dio cuenta de la importancia del espacio tiempo descubierto por Schwarzschild y llamó a estos objetos agujeros negros. En la actualidad se cree que los agujeros negros pueden existir debido al colapso de estrellas viejas muy masivas a las que se les acaba su combustible y se colapsan por su gravedad. En el centro de casi todas las galaxias se han encontrado vestigios de regiones extremadamente densas de materia. La región de este tipo mejor estudiada es el centro de nuestra galaxia, en donde se ve que hay un punto extremadamente denso, de más de 3.6 millones de masas solares, en una región tan pequeña que la forma más simple de explicarla es que ese punto es un agujero negro.

Sin embargo la prueba más dura que ha pasado la teoría de Einstein es sin duda la predicción de la pérdida de energía debido a emanaciones de ondas gravitacionales que provocan las órbitas de dos estrellas de neutrones. Muchas estrellas de neutrones tienen un campo magnético enorme que no está alineado con el movimiento de rotación de la estrella. Entonces el movimiento de rotación de la estrella funciona como un dispositivo de radio mandando ondas electromagnéticas en una dirección que cambia con la rotación. Un receptor lejano lo que escucha es una señal que llega periódicamente, de la misma intensidad y tono, por eso a estas estrellas también se les llama Pulsares. Estas estrellas se descubrieron en 1964 y desde entonces se conocen algunos miles de ellas. El campo gravitacional de estas estrellas es muy intenso porque sus masas deben ser mayores a 1.4 masas solares y son del tamaño de una ciudad. Es decir, en una ciudad está metida la masa de un Sol y medio. La emanación de la onda electromagnética es debido al movimiento de estas estrellas sobre su eje, pero si dos estrellas giran una alrededor de otra, estas emanarán además ondas gravitacionales. Esta es una predicción exclusiva de la teoría de Einstein, ya que para Newton la interacción entre las estrellas son debido a una fuerza, pero para Einstein la interacción es un campo que al moverse pierde energía en forma de ondas, en este caso, de ondas gravitacionales. En 1974 los astrónomos norteamericanos Russell Hulse y Joseph Taylor usando la antena de Arecibo, en Puerto Rico, descubrieron un pulsar binario, es decir, dos pulsares girando uno alrededor del otro con un periodo de rotación de algo como 8 horas. Claramente los pulsos varían conforme se encuentran los pulsares en diferentes posiciones de su órbita y con esto los astrónomos pueden determinar con mucha precisión el periodo de la órbita. Pero si estos pulsares pierden energía por emanar ondas gravitacionales, el periodo va a disminuir poco a poco. Usando la teoría de Einstein ellos calcularon la pérdida de energía debida a esta emanación y la compararon durante varios años con el periodo de los pulsares. La

correspondencia entre teoría y observación volvió a ser extraordinaria. En la actualidad esta medición es la constricción más fuerte que tiene cualquier teoría alternativa a la de Einstein. Se puede decir con todo rigor que si la teoría de Einstein no es la teoría final, y seguro no lo es, la teoría que la extienda tiene que ser muy parecida a la de Einstein, sobre todo a las escalas de los planetas y las estrellas.

Sin embargo, en los últimos 18 años se han descubierto cosas que ni la teoría de Einstein ni la mecánica cuántica pueden explicar. Observaciones con nuevos instrumentos han revelado que las galaxias necesitan 10 veces más materia a la que se observa con simples telescopios para poder ser estables. Es decir, necesitan más materia dentro de ellas para que las estrellas que giran a su alrededor no salgan disparadas, a esta materia se le llama en la comunidad científica materia oscura. Por otro lado, la fuerza gravitacional es siempre atractiva, al menos esa era nuestra creencia, por eso se espera que si el universo está en expansión, la fuerza de gravedad frene esta expansión constantemente. En 1998 el mundo científico se conmocionó al saber que el universo hace 5mil millones de años se expandía más lentamente que ahora. Es decir, el universo no solo no se enfrena, se acelera. ¿Que puede haber en el universo que acelera a tanta materia? Si gente supone que es algún tipo de materia a la que llama energía oscura. Estos dos tipos de materia desconocida suman más del 96% de la materia del universo. Es decir, si el objetivo de la ciencia es entender el universo y la materia es todo lo que existe, entonces solo entendemos mucho menos del 4% del universo, o sea, nada.

En la actualidad existen varias líneas de investigación fundamental concernientes a la gravitación. Estas involucran encontrar la naturaleza de la materia oscura, de la energía oscura y entender el carácter microscópico de la gravedad. Este último problema nos regresa al problema original. El mundo microscópico se explica actualmente utilizando la mecánica cuántica, la cual ha sorprendido por su poder predictivo, tanto como la relatividad general. Sin embargo, un observador es el que determina el colapso de la función de onda que a su vez determina la predicción del fenómeno que observa. Este punto nunca le gusto a Albert Einstein debido a que el observador interviene en el fenómeno, este ya no es independiente del observador. Regresamos al problema epistemológico que dio origen a la relatividad especial. El resultado es que la teoría cuántica no puede ser compatible con la relatividad general así como la conocemos. Hay varios intentos por hacerlas compatibles, pero aun no se puede decir mucho sobre la viabilidad de alguna de ellas. Son temas intensos de investigación. Los problemas fundamentales abiertos en estos momentos son estos, materia oscura, energía oscura y gravedad cuántica. Seguro dentro de poco tendremos noticias sobre estos descubrimientos.

Desde los años 1920's ha habido en todo el mundo grupos que estudian sistemáticamente la teoría de la relatividad general. En México este tipo de investigaciones se iniciaron con la llegada de Polonia del Dr. Jersy Plebanski al Cinvestav, en 1962. Este grupo se compuso del Dr. Plebanski y su estudiante polaco Bogdan Mielnik hasta la década de los 70's cuando se les unió Alberto García, un chileno que se doctoró en la Universidad de los Pueblos Patricio Lumumba en la entonces Unión Soviética. El grupo se amplió con el Dr. Tonatiuh Matos en 1987, egresado de la Universidad de Jena, Alemania y desde entonces el grupo ha crecido hasta llegar a 6 miembros que investigan en temas de gravitación. En la UNAM y en la UAM también se formaron desde los años 70's grupos de investigación, siendo el más numeroso el de la UNAM. En 1992 Alfredo Macias de la UAM, Tonatiuh Matos y Darío Núñez de la UNAM, fundaron la División de Gravitación y Física Matemática de la Sociedad Mexicana de Física que ha jugado una importante rola en el desarrollo de la gravitación en México, siendo el foro mexicano más

importante que discute estos temas. En 1987 Alberto Carramiñana del INAOE, Tonatiuh Matos, José Valdéz y Dany Page de la UNAM, entre otros, fundaron la Escuela Mexicana de Astrofísica, que organizó importantes eventos hasta 2005, cuando la mayoría de los organizadores se volvieron funcionarios en sus respectivas universidades. Actualmente el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica de la UNAM, en Morelia, organiza una escuela de astrofísica anualmente. Más recientemente en 2007 y con el propósito principal de atacar el problema de la naturaleza de la materia y la energía oscuras, Axel de la Macorra de la UNAM, Tonatiuh Matos, Jorge Cervantes del ININ y Darío Núñez fundaron el Instituto Avanzado de Cosmología, que junto con el premio Nobel (2006) George Smoot y el Berkeley Center for Cosmological Physics organizan cada año una escuela de cosmología en México en donde han participado los cosmólogos más importantes del mundo y asiste gente de todo el orbe. Este instituto es actualmente el foro de discusión de estos temas más importante de Latinoamérica y la escuela que organiza se ha convertido ya en una referencia mundial.

La investigación de la relatividad general en México está adquiriendo poco a poco madurez. En nuestro país ya se investigan los temas más sobresalientes relacionados con esta disciplina y en algunas directrices ya existen grupos de investigación bien formados. Por ejemplo, para atacar el problema de la naturaleza de la materia y la energía oscura hay grupos grandes y bien formados en el Instituto de Astronomía (IA), en el Instituto de Ciencias Nucleares (ICN) y en el Instituto de Física (IF) de la UNAM. También existe un grupo bien formado en la Universidad de Guanajuato y en el Instituto de Investigaciones Nucleares (ININ). En la Universidad Michoacana se están desarrollando códigos numéricos para hidrodinámica relativista y relatividad numérica, igual que en el ICN de la UNAM. En la UAM, en el ICN de la UNAM, así como en la Universidad de Guanajuato, hay grupo estudiando el problema de la gravedad cuántica. Así como en el IPN, el Cinvestav, la Universidad de Guadalajara, la Autónoma de Chiapas, la Veracruzana, etc. hay gente de gravitación que realizan investigación de vanguardia, en la mayoría de los casos con investigadores formados en México. Es claro que la década de los 1990's fue un detonante de la investigación en la Teoría General de la Gravitación en México, y aunque aún nos falta mucho, no cabe duda de que México está adquiriendo presencia en el mundo en este tipo de investigación.

#### Bibliografía.

- [1] Albert Einstein. The meaning of Relativity. Princeton University Press, 1922.
- [2] Tonatiuh Matos y Luis Ureña. La Radiación de Fondo del Universo. eBook en iTunes (2014).
- [3] Tonatiuh Matos ¿De que Esta Hecho el Universo? Seria “La ciencia para todos” número 212 del Fondo de Cultura Económico, (2004).