

NEWTON TO EINSTEIN: To debate the fate of the universe

DE NEWTON A EINSTEIN: A debate el destino del universo

Rogelio Parreira Y., Bianca Yanuba P.

Grupo Phisika, Portugal.

Phisika@accountant.com

(Artículo de REVISIÓN) (Recibido el 27 de diciembre de 2009. Aceptado el 30 de marzo de 2010)

Abstract – *This article describes the history of scientific thought in terms of theories of inertia, absolute space, relativity and gravitation; as Newton used the work of the first researchers in their theories, and Einstein Newton's theories in his, to try to explain the fate of the universe. It is the description of a revolutionary process of scientific knowledge and its contribution to development in many other fields of knowledge.*

Keywords: *gravity, scientific revolution, relativity, universe.*

Resumen – En este artículo se describe la historia del pensamiento científico en términos de las teorías de la inercia, el espacio absoluto, la relatividad y la gravitación; de cómo Newton utilizó el trabajo de los primeros investigadores en sus teorías, y Einstein las teorías de Newton en la suya, para tratar de explicar el destino del universo. Es la descripción de un proceso revolucionario del conocimiento científico, y sus aportes al desarrollo de muchos otros campos del saber.

Palabras clave: *gravedad, relatividad, revolución científica, universo.*

INTRODUCCIÓN

En 1543, al proponer una arquitectura para el universo centrada en el Sol, Nicolás Copérnico dio inicio a la era moderna de la astronomía, un giro de 180° respecto del cosmos centrado en la Tierra que dominaba la época. En su libro –*Sobre la revolución de los orbes celestes*– planteó una original teoría que modificó para siempre el lenguaje y el pensamiento; revolución que significó desde entonces un cambio completo o radical.

Su obra impresionó a pensadores como Kepler y Galileo, quienes examinaron el espacio y confirmaron que la Tierra se mueve alrededor del Sol. El primero también demostró que los planetas siguen órbitas elípticas, que se pueden calcular con detalle si se aplican simples reglas matemáticas: las leyes de Kepler (Osserman, 2001). Galileo, por su parte pudo demostrar que los cuerpos

al caer, sin la resistencia del aire y sin importar su tamaño o peso, se comportan idénticamente (MacLachlan, 1997).

Los trabajos de estos científicos sirvieron como punto de partida para la labor de uno de los mejores intelectuales en la historia, Isaac Newton, quien tomó las enseñanzas científicas como su propia vida, condensó los avances realizados hasta entonces y fue más allá de todos aquellos que lo precedieron, hasta el punto que por más de dos siglos sus teorías regieron la definición del funcionamiento del universo. Además, desarrolló la primera versión funcional del telescopio de reflexión –utilizaba un espejo curvo en vez de lentes para enfocar la luz–, definió y desarrolló el cálculo como una rama poderosa de las matemáticas y promulgó su trabajo fundamental, una verdadera revolución: la Teoría de la Gravitación Universal (Bravo, 1995).

A comienzos del siglo XX, un joven pensador entró en escena. Einstein comenzaba a postular la velocidad de la luz como una constante independiente del movimiento de la fuente o del observador (Bohm, 1996). Para eliminar el conflicto con la física clásica, Einstein amplió las ideas de Newton sobre la física del movimiento. Newton había invalidado el concepto de movimiento uniforme absoluto y demostró que el único estado de movimiento detectable es aquel en que un objeto se mueve con relación a un observador (Kragh, 2007); el gran salto de Einstein era invalidar también el espacio y el tiempo absolutos. Según su teoría, las dimensiones de un objeto y la duración de un acontecimiento no son valores fijos, y sólo pueden determinarse considerando el movimiento de su marco de referencia con relación al observador. Con sus ideas y teorías generó otra revolución científica.

En este artículo se analiza el debate científico de los procesos en el transcurso de

ambas revoluciones, la de Newton y la de Einstein, y sus aportes al desarrollo del conocimiento y la ciencia en general, en relación con el pasado, el presente y el futuro del universo.

PRIMERA REVOLUCIÓN: NEWTON

Los cimientos de toda la obra de Newton sobre la gravitación fueron su comprensión del movimiento, que expresaría finalmente como un conjunto de leyes. La primera de ellas describe la inercia, o la tendencia de cualquier cuerpo, en ausencia de una fuerza externa, a permanecer en descanso, y si se está moviendo a seguir un movimiento uniforme, viajando a una velocidad constante y en línea recta. La segunda ley sostiene que, cuando una fuerza causa un cambio en la velocidad de un objeto, el índice de cambio, o aceleración, es proporcional a la fuerza (Scheck, 2004). Los experimentos de Galileo demostraron que los cuerpos que caen aceleran de hecho a una velocidad constante; esto, para Newton significaba que el objeto estaba sometido a una fuerza de magnitud constante, que atribuyó a la gravedad.

Comparó el camino de un objeto que cae libremente con el de uno propulsado de forma paralela al suelo, como lanzado por una honda. El objeto influenciado sólo por la gravedad, cae a lo largo de una línea recta que si se prolongara llegaría hasta el centro de la Tierra. Pero el objeto afectado por la fuerza de la honda además de la gravedad, sigue un camino curvo, moviéndose horizontalmente, al tiempo que cae hacia la Tierra. Su velocidad horizontal inicial determina lo lejos que viajará.

Si un objeto fuera lanzado a una velocidad lo suficientemente alta, podría recorrer todo el camino alrededor de la Tierra y golpear a quien lo lanzó en la nuca. Y si el lanzador se agacha, el proyectil seguirá su órbita alrededor de la Tierra (Guicciardini, 2003).

Sabía además que la resistencia del aire impediría que esto realmente ocurriera, pero se dio cuenta que había descubierto cómo explicar por qué la Luna gira alrededor de la Tierra:

[...] está capturada por la gravedad de ésta, y cae eternamente hacia el planeta, pero su velocidad horizontal es suficiente para hacerla girar por siempre (Anstey, 2004).

Estos mismos principios deberían explicar el hecho de que la Tierra y los demás planetas giran en torno al Sol: “[...] *la gravedad tiene que ser una fuerza universal que actúa entre todos los cuerpos del universo*” (Brackenridge, 1996). Newton llegó a esta conclusión aplicando el proceso conocido como experimento de pensamiento: utilizar un escenario imaginario para enfocar las reglas que gobiernan el mundo real. Newton tenía a su disposición otro poderoso medio de comprobación, las matemáticas; pero primero tenía que formular una expresión exacta que relacionara fuerza gravitatoria, masa y distancia (Guicciardini, 2004).

Presumió que la fuerza de la propulsión gravitatoria de un objeto es directamente proporcional a su masa; cuanto más pesado es un planeta o estrella, más atrae a otro cuerpo. Utilizó la penetración matemática de las leyes de Kepler, para inferir que la fuerza gravitatoria del Sol sobre un planeta es igual al cuadrado inverso de la distancia del planeta al Sol. Es decir, un planeta dos veces más lejos del Sol que otro de igual masa experimentará una cuarta parte de la fuerza de atracción. Esta ley, conocida como del cuadrado inverso, le permitió estimar el período de la órbita de la Luna y el radio de la Tierra. Los resultados obtenidos, de 29,3 días, distaban mucho del valor real de 27,3, por lo que Newton decidió dejar de lado el trabajo sobre la teoría gravitatoria (Kochiras, 2009).

Aunque tuvo este tipo de contratiempos, su obra completa –“*Principia*”–, fue sin lugar a dudas un logro titánico. Además de anunciar la ley universal de la gravitación y las leyes del movimiento, contenía, página tras página, sorprendentes análisis matemáticos que no sólo explicaban las órbitas de los planetas y cometas alrededor del Sol y la órbita de la Luna alrededor de la Tierra, sino que también demostraba cómo las mareas oceánicas eran causadas por los efectos gravitatorios (Yilmaz, 1975). Newton calculó la masa del Sol, de la Tierra y de Júpiter, explicó el aplastamiento observado de los polos de Júpiter como un resultado de su rotación, y predijo el aplastamiento de los polos de la Tierra. Incluso, hizo aportes a la discusión sobre un método para lanzar satélites artificiales.

Faltantes en la teoría

Por efectiva que fuera la teoría gravitatoria para explicar la dinámica del universo, su autor admitía sus deficiencias, “[...] *explicar toda la naturaleza es una tarea demasiado difícil para un hombre o incluso para una época*” (Yamamoto, 1985); intentar comprender la naturaleza real de la gravedad y del espacio fue uno de sus mayores problemas. Aunque su teoría podía predecir los efectos de la gravedad en la práctica, no pudo decir nada acerca del mecanismo por medio del cual actúa esa gravedad. De hecho, creía que era el resultado de acciones divinas, una piedra cae porque el dedo de Dios la empuja.

En sus explicaciones matemáticas de los movimientos planetarios, Newton había trabajado sobre la suposición de que la gravedad actúa instantáneamente a través del espacio. No le gustaba esta idea, pero no podía pensar en ninguna alternativa, y, además, no parecía tener ninguna importancia práctica para sus cálculos. Por el contrario, la velocidad de la acción de la gravitación, si le resultaba de importancia crítica cuando consideraba el universo como un conjunto. Creía que el universo era infinito:

[...] de otro modo, tendría un borde y en consecuencia un centro gravitatorio, como cualquier otro objeto finito. La atracción entre sus partes haría que el universo “cayera hacia el centro del espacio”, lo cual evidentemente no ocurriría. Como contraste, cada fragmento de materia en un universo infinito se halla sometido a fuerzas iguales desde todas direcciones y, en consecuencia, permanece estable (Susanto and Karjanto, 2009).

El científico estaba un poco preocupado por la fragilidad de un universo gobernado por el equilibrio de estas fuerzas opuestas:

[...] si la gravedad actúa instantáneamente sobre distancias infinitas, entonces las fuerzas sobre cada fragmento de materia serán no sólo iguales sino también infinitas, en todas direcciones (Peterson, 1993).

El más mínimo desequilibrio en la distribución de la materia podría alterar el equilibrio de la atracción, sometiendo a los cuerpos a enormes fuerzas asimétricas, más fuertes que la gravitación ordinaria que mantiene a los planetas en sus órbitas o retiene a las estrellas. Las consecuencias serían catastróficas: los planetas se verían

arrancados de sus órbitas y lanzados al espacio interestelar a velocidades increíbles. Sin embargo, ya que el universo parecía estar bien cohesionado, llegó a la conclusión de que la distribución de la materia era de hecho perfectamente uniforme, y que el efecto gravitatorio neto de los objetos distantes era cero (Ghosh, 2000).

Otro tema planteó un nuevo rompecabezas a Newton. Esto sucedió cuando consideró las circunstancias de los cuerpos no sometidos a ninguna fuerza externa. La ley de la inercia, establecida primero por Galileo y apropiada por Newton como la primera de sus leyes del movimiento, afirma que un objeto continúa en un estado de reposo o de movimiento uniforme a menos que sea impulsado a cambiar de movimiento por fuerzas que actúen sobre él.

Pero no existe ningún estándar claro con el cual juzgar si un objeto está o no en reposo. Por ejemplo, un pasajero en un barco, en una noche perfectamente tranquila, puede ver luces que pasan en la oscuridad; estas luces pueden ser interpretadas como un signo de que el barco se mueve hacia delante mientras se cruza con otro que está parado, pero también pueden significar que el barco del observador permanece estacionario mientras que el otro barco es el que pasa; o ambos barcos pueden estar moviéndose. Siempre que estos movimientos sean uniformes, no es posible determinar la condición estacionaria (Yilmaz, 1973).

Newton resolvió esta abstracción con otra abstracción: “[...] *un objeto está en reposo si no posee ningún movimiento en relación con el “espacio absoluto”, que permanece siempre igual e inamovible*”. Imaginó al espacio absoluto como un enrejado invisible sobre el que es posible trazar cualquier movimiento. No estaba preocupado al concluir que los observadores humanos no podrían distinguir entre movimiento absoluto y reposo, ya que para él era suficiente con que Dios fuese capaz de indicar la diferencia (Barbour and Pfister, 1995).

En cualquier caso, la teoría de Newton funcionaba muy bien con respecto al comportamiento de las cosas que los humanos podían percibir, desde las balas de cañón hasta las cometas. Uno de los éxitos más sensacionales de la física newtoniana

llegó a mediados del siglo XIX, cuando las irregularidades observadas en la órbita del planeta Urano condujeron a dos jóvenes matemáticos, Urbain Leverrier en Francia y John Adams en Inglaterra, a una sorprendente conclusión: tenía que existir otro planeta mucho más grande y más distante que Urano (Lodge, 2003). De forma separada utilizaron las leyes del movimiento y de la gravitación newtoniana para calcular la posición del nuevo planeta, y en 1846 fue descubierto Neptuno, exactamente donde lo habían previsto. La ley de la gravitación de Newton parecía ser un instrumento científico de incomparable poder y perfección.

Otro gran aporte

En la segunda mitad del siglo XIX, los físicos —que creían que la gravedad y el movimiento eran temas ya resueltos— dirigieron su atención a dos fenómenos más misteriosos, la electricidad y el magnetismo. Se sabía que estaban relacionados:

[...] una carga eléctrica en movimiento puede producir una fuerza magnética que desviará la aguja de una brújula cercana, y un imán en movimiento puede producir una corriente eléctrica en un cable cercano (DiSalle, 2002).

Pero, aunque era evidente que formaban dos caras de la misma moneda, no se sabía exactamente cuál era esa moneda.

James Maxwell publicó en 1865 una descripción matemática de la relación entre ambos fenómenos. Sus fórmulas —ecuaciones de Maxwell— mostraban que un objeto con carga eléctrica que vibra, irradia ondas electromagnéticas, como las que se extienden por la superficie del agua al arrojar un objeto. Estas ecuaciones predecían que la velocidad de dichas ondas tenía que ser de 300.000 km/s; exactamente la velocidad que se había determinado para la luz. Maxwell concluyó que estas ondas electromagnéticas eran similares a la luz, de la que se conocía su naturaleza ondulatoria.

[...] de hecho, la luz visible es simplemente una de muchas formas de energía electromagnética, que se distingue de otras sólo por su diferente longitud de onda (Bohm, 1996).

La teoría de las ondas electromagnéticas revivió un dilema surgido por primera vez cuando los experimentos señalaron la naturaleza ondulatoria de la luz: los físicos pensaban que todas las ondas requerían

algún medio que las transportara, del mismo modo que el agua transporta las olas en el océano; también creían que el espacio, a través del cual viaja la luz, era vacío. Esta cuestión se solucionó al postular la existencia de un medio transportador de las ondas, llamado éter, definido como una materia insustancial e invisible que no se oponía al movimiento de los cuerpos celestes (DiSalle, 1990).

En 1847 Albert Michelson y Edward Morley realizaron un experimento para detectar el éter. Utilizaron el principio de interferencia de las ondas de luz para medir su velocidad en diferentes direcciones:

[...] si la Tierra se mueve a través del éter, un rayo de luz apuntado en la dirección de este movimiento viajará a una velocidad diferente de la de un rayo que se mueva perpendicularmente al mismo, el movimiento de la Tierra y el de la luz que apunta hacia delante se sumarán, mientras que el otro no obtendrá impulso alguno del movimiento del planeta (Michelson and Morley, 1847).

Los resultados del experimento indicaron que, sin importar la dirección a la que se apuntara el rayo, su velocidad era siempre la misma. Desconfiando de estos resultados, repitieron el experimento varias veces, y con mayor precisión, pero los resultados fueron los mismos. Entonces concluyeron: “[...] *la velocidad de la luz no resulta influenciada por el movimiento de su fuente o el de un observador, es siempre la misma*” (Friedman, 2007).

Durante las dos décadas siguientes los físicos lucharon en vano por reconciliar estos descubrimientos con la definición del espacio inherente en las leyes de Newton. Si el espacio y el tiempo son absolutos, entonces no es posible para dos observadores, el uno en movimiento y el otro en reposo, percibir que un rayo de luz se mueve a la misma velocidad relativa con respecto a ellos; es decir, precisamente lo que los resultados de Michelson-Morley demostraban. Entonces, o Newton o Maxwell estaban equivocados, aunque cada una de sus teorías parecía funcionar a la perfección al describir todo lo demás a lo que se aplicaban.

SEGUNDA REVOLUCIÓN: EINSTEIN

La salida a este dilema empezó a tomar forma en 1895 en la mente de un estudiante de dieciséis años. Desde joven imaginaba los

efectos del movimiento, a la velocidad de la luz, como un rompecabezas cuya resolución cambiaría para siempre la física y la cosmología. Aunque Einstein era esencialmente un solitario, empezó a publicar los resultados de sus investigaciones en uno de los principales diarios científicos, y enfocó sus poderes intuitivos y analíticos sobre las implicaciones de la cuestión que lo había intrigado años atrás: ¿cómo sería cabalgar en un rayo de luz?

Primero consideró la situación de un observador en reposo, con las ondas de luz pasando junto a él, vería un esquema regular de picos y valles moviéndose en el espacio. Si el mismo observador aceleraba para igualar la velocidad del rayo, presumiblemente el esquema de ondas desaparecería. Sin embargo, las ecuaciones de Maxwell necesitaban que las ondas se mantuvieran ondulando, sin importar la acción del observador. Entonces, o las ecuaciones estaban equivocadas, o era imposible para un observador moverse a la velocidad de la luz. Pero la teoría de Maxwell funcionaba bien en todas sus aplicaciones de la vida real, y la física clásica no contemplaba prohibición alguna contra el hecho de moverse a la velocidad de la luz..., o incluso más aprisa (Trautman, 1976).

Relatividad especial

En su ensayo en *Annalen der Physik*, Einstein (1905) propuso una forma revolucionaria de salir de este dilema, e introdujo el principio que más tarde lo haría famoso: la Teoría de la Relatividad Especial. Postulaba la velocidad de la luz como una constante, independiente del movimiento de la fuente o del observador, y para eliminar el conflicto con la física clásica, ampliaba las ideas de Newton sobre la física del movimiento. Este último, a todos los efectos, invalidaba el concepto de movimiento uniforme absoluto, demostrando que el único estado de movimiento detectable es aquel en el que un objeto se mueve con relación a un observador. El gran salto de Einstein fue invalidar también el espacio y el tiempo absolutos:

[...] las dimensiones de un objeto y la duración de un acontecimiento no son valores fijos, sólo pueden determinarse si se considera el movimiento de su marco de referencia con relación al observador (Einstein, 1905).

Mientras dicho movimiento sea sólo una pequeña fracción de la velocidad de la luz, los cambios en espacio y tiempo serán casi imperceptibles. En un objeto que se mueva a velocidades cercanas a la de la luz, sin embargo, los cambios se harán muy evidentes. Un rayo de luz seguirá viajando a velocidad constante, pero según los estándares de un observador en descanso, el metro utilizado para medir la distancia recorrida por la luz será más corto, y el reloj usado para marcar el paso de la luz funcionará más despacio.

Trabajando sobre estos fundamentos —velocidad de la luz constante y relatividad del espacio y del tiempo—, utilizó un álgebra simple para extender la teoría. Demostró que si un objeto se mueve a una velocidad cercana a la de la luz su masa se incrementa proporcionalmente a su energía cinética, y de esta relación dedujo que las dos propiedades son intercambiables. Conclusión que expresó con su ecuación $E=mc^2$, en la que E es la energía contenida en un objeto, m su masa, y c la velocidad de la luz.

Esta ecuación fue fundamental para la primera prueba sobre la relatividad, con experimentos que se iniciaron en 1901 —es decir, antes de que Einstein propusiera su teoría. El físico alemán Walter Kaufmann, al medir la masa de partículas radiactivas de alta energía, no había detectado ningún cambio cuando las partículas se aceleraban (Kaufmann, 1901). Einstein estaba convencido que las hipótesis subyacentes de la teoría eran válidas, y que la teoría en sí era tan sensata que tenía que ser correcta. Cuando los experimentos de partículas radiactivas fueron repetidos por otros científicos a lo largo de los siguientes diez años, se comprobó que los resultados iniciales eran erróneos.

Pero su teoría, tal como estaba formulada originalmente, se aplicaba tan sólo a sistemas en movimiento uniforme, con un movimiento relativo de unos con respecto a los otros en líneas rectas y a velocidades constantes. Luego de diez años, quiso generalizarla para incluir el movimiento no uniforme, ampliando las leyes de la física de tal forma que fueran las mismas para todos los sistemas, acelerados o uniformes. Para hacerlo tenía que examinar la relación entre la aceleración producida por la gravedad y la

generada por otras fuerzas. Se imaginó, en uno de sus experimentos de pensamiento, una habitación como un cajón que se movía en el espacio a velocidad constante con un observador en su interior, lejos de estrellas o planetas. Su contenido sería ingravido y flotaría libremente, sin existir arriba o abajo, ni techo ni suelo. Si a uno de sus lados se aplica una fuerza constante, se acelerará uniformemente, y una de las paredes se apretará hacia adentro. Para el observador en su interior, esa pared se convertiría en el suelo, y se podría ajustar la fuerza de aceleración de tal forma que el observador sintiera un leve empuje hacia abajo, igual al que se siente en la superficie de la Tierra. Por tanto, el observador no sabría si el empuje es producto de la gravitación o de la aceleración, por lo que Einstein concluyó que gravedad y aceleración son equivalentes (Euler, 1748).

Relatividad General

Este principio de equivalencia apareció por primera vez en un ensayo de Einstein (1911), y se convirtió en la premisa fundamental de la Teoría de la Relatividad General que completaría cuatro años más tarde. Durante ese periodo, desarrolló descripciones matemáticas de la interacción entre materia, radiación y fuerzas gravitatorias. En contraste con los cálculos que había usado para apoyar la relatividad especial, estas ecuaciones de campo de la relatividad general —llamadas así porque describían la naturaleza de los campos gravitatorios— eran complejas. Recurrió a la geometría no euclidiana, ya que toda la relatividad general se basaba en curvas.

La teoría predecía que cualquier objeto masivo, debido a su atracción gravitatoria, curvaría la trayectoria de cualquier cosa que pasara cerca de él. Las trayectorias curvas de los planetas y cometas se conocían bien, y Newton parecía haberlas explicado enteramente; pero Einstein creía que la gravedad también curvaba las trayectorias de las ondas electromagnéticas: “[...] *un rayo de luz se curva cuando viaja por las inmediaciones de una estrella muy masiva*” (Einstein, 1911).

Con su teoría pretendía brindar una explicación única para todos los fenómenos físicos, incluido cómo la luz recorre el camino más corto entre dos puntos. Mientras

que en la geometría euclidiana este camino es una línea recta, él pensaba que era curva. La geometría no euclidiana le permitió describir una forma nueva de mirar al universo: “[...] *los rayos de luz no se curvan, es el propio entramado del espacio que se comba por efecto de la gravedad*” (Einstein, 1911). El concepto de espacio curvo, basado en unas complejas matemáticas, puede ilustrarse con una analogía bidimensional: la superficie de una esfera. La geometría de las superficies planas no se aplica a las superficies curvas, las líneas paralelas trazadas sobre una superficie plana nunca se encuentran, pero siempre se interceptan cuando se trazan sobre la superficie de una esfera (Geroch, 1981).

Para la relatividad general el universo se describe en términos de cuatro dimensiones, tres en el espacio y una en el tiempo, y la gravedad es una propiedad geométrica de este espacio-tiempo tetra-dimensional. Según Newton, la masa del Sol irradia a su alrededor una fuerza de gravedad cuyo efecto es hacer que los planetas giren a lo largo de trayectorias curvas y no de líneas rectas; pero para Einstein, la masa del Sol curva el espacio-tiempo, y los planetas giran en sus órbitas en una trayectoria orbital porque se mueven a lo largo de geodésicas —los caminos más cortos en el espacio-tiempo curvo— (Misner et al., 1973).

Aunque se basaba en matemáticas abstractas, la relatividad general tenía un gran número de aplicaciones concretas. Por un lado, explicaba una desconcertante discrepancia en la órbita de Mercurio: el perihelio del planeta avanzaba cada año en una cantidad significativamente más grande que la predicha por Newton; la relatividad general demostró que ese fenómeno era una consecuencia del espacio intensamente curvo en las inmediaciones del Sol. Una prueba mucho más convincente de la teoría sería la confirmación de la predicha curvatura de la luz, específicamente la curvatura de la luz de las estrellas por parte del Sol. Este efecto sólo podía observarse durante un eclipse solar, cuando las posiciones relativas de un grupo de estrellas cerca del Sol se pudieran registrar en fotografías; estas posiciones se compararían luego con las posiciones previas relativas del mismo grupo, cuando la Tierra estuviera entre el Sol y las estrellas.

Los primeros cálculos de Einstein predecían una desviación de 0,83 segundos de arco, equivalente al ancho de una cabeza de alfiler vista a 300 metros. Luego descubrió que era aproximadamente la mitad del valor al que llegó en la teoría final. En 1916, trabajando con todo el esquema matemático de la teoría, predijo una desviación de la luz estelar igual a 1,7 segundos de arco. El eclipse elegido probó la teoría de la relatividad general ocurrió el 29 de mayo de 1919, cuando el Sol pasó frente a las Híadas, un denso conglomerado de estrellas en la constelación de Tauro. Eddington, el jefe de la expedición, escribiría luego de analizar los resultados:

Tres días después del eclipse, cuando alcancé las últimas líneas de los cálculos, supe que la teoría de Einstein había superado la prueba y que la nueva imagen del pensamiento científico era la que prevalecería (Eddington, 1920).

Nuevos aportes

Muy poco afectado por su nueva celebridad, Einstein había empezado a explorar ya las implicaciones de la relatividad general con referencia al universo como un todo. Como Newton, rechazaba por completo la idea de un universo con límites. Su razonamiento se basaba en el dogma de que *“todos los lugares en el universo son parecidos”*; una suposición ampliamente compartida que se conoció como *“el principio cosmológico”*, en el que el universo es en general el mismo, sin importar desde dónde se mire; ninguna parte es exactamente igual a otra, pero su aspecto general es el mismo en todas partes.

Desde la Tierra se observa el mismo número de estrellas en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, y un observador muy lejos en el espacio debería observar un cuadro celeste similar; pero, si se observara desde el borde de un universo con límites, la vista sería radicalmente distinta a una cerca del centro (Flores, 1999). Si el universo no tiene límites, es evidente que es infinito. Einstein propuso otra posibilidad: el universo curvo, en cuatro dimensiones y que puede ser finito y sin límites a la vez. Lo comparó con la superficie de una esfera: un observador limitado a esa superficie, incapaz de percibir una tercera dimensión vertical, viajará a cualquier lado y no encontrará un borde; puede incluso regresar al punto de partida desde la dirección opuesta. La superficie de la esfera

no tiene límites ni centro, pero es finita; esto también puede ser cierto para el espacio-tiempo tetra-dimensional.

Pero, cuando se concentró en desarrollar las soluciones a las ecuaciones del campo que describiría al universo real, encontró que las observaciones lo describían como una entidad estática: *“[...] sus partes móviles ni se alejan ni chocan entre sí, y su tamaño no cambia aparentemente con el tiempo”* (Kolb and Turner, 1990); las soluciones a las ecuaciones de campo no producían un modelo estático del universo, todos sus cálculos indicaban que el universo se expandía o contraía. Einstein no estaba convencido de eso y prefirió modificar las ecuaciones. Les añadió un término extra que correspondía a una fuerza repulsiva del cosmos que actuaba en contra de la gravedad. Ese término —constante cosmológica—, le pareció que hacía más manejable el problema de la descripción del universo, ya que estaba directamente relacionada con su tamaño y masa; incluso pensó que era posible determinar esos valores mediante observaciones astronómicas.

Friedmann, un científico ruso intrigado por el trabajo de Einstein en gravitación y cosmología, y por el desafío matemático de sus ecuaciones de campo, se dedicó a encontrar las soluciones sin preocuparse por sus efectos en el universo real. En su trabajo logró demostrar que con esas ecuaciones era posible hallar una amplia gama de universos; descubrió que al dejar de lado la constante cosmológica, era posible encontrar universos en expansión llenos de materia, por lo que concluyó que existían dos posibilidades explicativas: o el universo se expande eternamente, o la atracción gravitatoria de la materia, al superar la expansión, causa una contracción en la que el universo colapsa (Friedman, 1992).

Lo que hace que los resultados se inclinen para uno u otro lado, expansión o colapso, es el factor de la densidad media de la masa en el universo. Si este factor es menor a un valor crítico de densidad —no calculado por Friedmann—, el universo se expandirá eternamente, su espacio-tiempo tendrá una curvatura negativa, y será infinito. Pero, no aparece el problema de equilibrar con exactitud la distribución de la materia en

este universo infinito regido por la gravedad newtoniana. Además, en la relatividad general se estipula que la gravedad, al igual que lo demás en el universo, está limitada por la velocidad de la luz; por lo que no puede, como suponía Newton, ejercer su influencia instantánea a cualquier distancia. Entonces, un campo gravitatorio en distancias infinitamente amplias requiere una cantidad igualmente infinita de tiempo para ejercer su influencia (Ferguson, 1991).

Por otro lado, si esa densidad media de masa es mayor al valor crítico, el universo colapsará en una pesada concentración de materia, y volverá a explotar para expandirse y luego colapsará nuevamente. Este universo tendrá una curvatura positiva, será finito, y contendrá una cantidad de masa igualmente finita (Hawking, 1991). Friedmann también encontró que entre ambos universos existe otro, en el que el factor de la densidad media de su masa es igual a la densidad crítica. Tal universo tendrá curvatura cero y su espacio-tiempo será plano, ya que en él sólo es posible aplicar geometría euclidiana para espacios planos; es infinito y se expande eternamente (Friedman, 1922).

Las soluciones de Friedmann a las ecuaciones de campo son matemáticamente correctas; sin embargo, al parecer no tienen validez física, ya que para generar un universo curvo, con las características aparentemente estáticas que observan los astrónomos, se necesita algo parecido a la constante cosmológica (Gamow, 1948).

La gravedad obstaculiza el tiempo

Si un movimiento acelerado es relativo, tendrá todo el espacio y el tiempo disponibles y, al igual que un movimiento uniforme a velocidad cercana a la de la luz, afecta la longitud de los objetos o la permanencia de los acontecimientos; por lo que un movimiento acelerado, por el principio de equivalencia, también afecta la gravedad (Alpher and Herman, 1988). En varios experimentos, posteriores a lo expuesto por Friedmann, se determinó que un reloj a cierta altura sobre el nivel del mar ganaba una quince mil millonésima de segundo al día respecto de otro a nivel de mar, y se atribuyó el fenómeno a las distancias de ambos lugares del centro de gravedad del planeta.

Otra cuestión aparentemente extraña de la Teoría de la Relatividad, es que aceleración y gravedad afectan la medida del tiempo, pero también las dimensiones y geometría del espacio. Ya que la gravedad es una propiedad de la masa, la ciencia suele buscar las distorsiones espaciales cerca a cuerpos masivos como estrellas o galaxias. Debido a que una geometría curva es muy difícil de detectar directamente, los científicos intentan observarla indirectamente al monitorear fenómenos como el paso de la luz por regiones sospechosas, ya que en condiciones ordinarias la luz sigue una línea recta, pero al observar una alteración en dicha línea en el que ya no es recta sino curva, se sospecha que el espacio está curvado en esa área (Dicke et al, 1965).

EL UNIVERSO TIENE UN NUEVO DESTINO

Una consecuencia de la descripción de la gravedad que hace la relatividad general, así como de sus relaciones con el espacio-tiempo, es que permite a los científicos encontrar respuestas a interrogantes que hasta hace poco eran dominio de la religión, el misticismo y la filosofía: ¿finalizará el universo alguna vez, y si es así, cómo será? (Green, 2006). La respuesta de la ciencia supone que el universo se está expandiendo como consecuencia del Big Bang, y que debe tomar uno de los tres modelos que Friedmann calculó (Sagan, 1996). El asunto es decidir cuál de esos modelos se debe tomar como correcto, ya que la decisión depende de encontrar el valor de la densidad media de la materia en el universo, que es la que determina si la gravedad acelera o detiene la expansión (Garriga et al., 2004).

1. Si el valor está por debajo del valor crítico de tres átomos de hidrógeno por metro cúbico, el universo será abierto, con una forma difícil de imaginar en tres dimensiones, y continuará su expansión hasta que los átomos que lo conforman se separen tanto que se enfriaría al consumir totalmente su energía.
2. Si el valor está por encima del mismo valor crítico, el universo será cerrado, y la fuerza de gravedad de toda su masa detendrá la expansión y lo contraerá sobre sí mismo hasta que explote nuevamente.
3. Por último, si el valor es igual a ese valor crítico, el universo será plano y la gravedad frenará la explosión, pero no podrá detenerla eternamente.

Algunos científicos creen que el universo se clasifica en el tercer modelo, por lo que es plano; otros afirman que la densidad media de la materia es diez a mil veces inferior que el valor crítico, y entonces el universo es abierto (Stone, 1977). La ciencia sospecha que el hecho de no poder hallar más materia en el universo se debe a que la mayoría radia de una forma que aún, con la actual tecnología, no se puede detectar. Mientras no se pueda determinar claramente la densidad media de la masa del universo, su destino seguirá como una de las cuestiones más investigadas y debatidas (Adams and Laughlin, 2000).

CONCLUSIONES

- Las contribuciones de Einstein a las ideas de espacio y tiempo, y del conocimiento del universo en general, son de naturaleza tan trascendental que pueden fácilmente tomar su lugar entre los dos o tres más grandes logros del siglo XX (Visser, 1996).
- Si el resultado de estas revoluciones fuera sólo descubrir que la luz se ve afectada por la gravedad, ya eso habría sido de la mayor importancia; pero tal conclusión no es un caso aislado, sino, parte de todo un continente de ideas científicas que afectan los conceptos más fundamentales de la física. Es, en fin, el resultado más importante obtenido en relación con la teoría de la gravitación desde la época de Newton.
- La diferencia entre las revoluciones de Einstein y Newton se da sólo en casos especiales. La importancia real de la teoría de Einstein no reside tanto en sus resultados como en el método por el que se logran, y ofrece una visión nueva y totalmente diferente de la gravitación. Si se sostiene que su razonamiento es válido y que ha sobrevivido a dos pruebas muy severas en relación con el perihelio de Mercurio y un eclipse, entonces puede afirmarse que tal resultado es uno de los mayores logros del pensamiento humano (Yurov et al, 2008).
- El punto débil de la teoría de la relatividad es la gran dificultad para expresarla. Parece que nadie pudiera entender esta ley sin un conocimiento profundo de la teoría de invariantes y del cálculo de variaciones (Goldstein and Inge, 1993).
- Otro punto de interés para la física, surgido de esta revolución, es que la luz se desvía al pasar cerca de grandes cuerpos de materia; lo que implica alteraciones en el campo eléctrico y magnético, y la existencia de fuerzas eléctricas y magnéticas fuera de las fuerzas de la materia, asunto todavía cuasi-desconocido, aunque se pueda desprender una idea de su naturaleza (Harrison, 2003).
- Desde cualquier punto de vista razonablemente empírico, Newton no podría haber demostrado que el espacio, el tiempo y el movimiento son infinitos. Con independencia de lo que podría haber mostrado sólo era posible establecerse en el contexto de las mismas leyes de Newton del movimiento, y así, con el fin de establecer una concepción de espacio y de tiempo, se habrían tenido que constituir esas mismas leyes; una tarea que él mismo reconoció era imposible, ya que las leyes, tal como se conocen, siempre pueden llegar a tener "*excepciones responsables*", y su procedimiento completo podría tener que cederse a algunos métodos más "*verdaderos*" de la filosofía (Linde, 1990).
- No obstante, es posible señalar un logro filosófico en el trabajo de Newton: demostró que la comprensión filosófica del espacio y el tiempo tiene que surgir, no de los principios generales filosóficos, sino de un análisis crítico de lo que suponen a partir de la observación y el razonamiento sobre la física del movimiento. El derrocamiento de la teoría de Newton fue posible gracias a la consecución, en un contexto teórico y empírico diferente, del mismo tipo de análisis (Guth, 1997).

REFERENCIAS

1. Adams, F. and Laughlin G. (2000). The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity. Australia: Simon & Schuster.
2. Alpher, R. A. and Herman R. (1988). Reflections on early work on "big bang" cosmology. Physics Today, Vol. 41, No. 8, pp. 24-34.
3. Anstey, P. R. (2004). The methodological origins of Newton's queries. Studies In History and Philosophy of Science Part A, Vol. 35, No. 2, pp. 247-269.

4. Barbour, J. and Pfister H. (Eds.) (1995). *Mach's Principle: From Newton's Bucket to Quantum Gravity*. Boston: Birkhäuser.
5. Bohm, D. (1996). *The Special Theory of Relativity*. London: Taylor & Francis Ltd.
6. Brackenridge, J. B. (1996). *The Key to Newton's Dynamics: The Kepler Problem and the Principia*. California: University of California Press.
7. Bravo, S. (1995). Historia de la teoría de la gravitación universal. *Ciencias*, No. 37, pp. 33-41.
8. Dicke, R. H., Peebles P. J. E., Roll P. G. and Wilkinson D. T. (1965). Cosmic Black-Body Radiation. *Astrophysical Journal*, Vol. 142, pp. 414-419.
9. DiSalle, R. (1990). The "essential properties" of matter, space, and time. *Philosophical Perspectives on Newtonian Science*, P. Bricker and R. I. G. Hughes (Eds.). Cambridge: MIT Press, pp. 203-211.
10. DiSalle, R. (2002). Conventionalism and Modern Physics: A Re-Assessment. *Noûs*, Vol. 36, No. 2, pp. 169-200.
11. Eddington, A. S. (1920). *Report on the Relativity Theory of Gravitation*. London: Fleetwood Press.
12. Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, Vol. 322, No. 6, pp.132-148.
13. Einstein, A. (1911). Über den Einfluss der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes. *Annalen der Physik*, Vol. 35, No. 10, pp. 898-908.
14. Euler, L. (1748). Reflexions sur l'espace et le temps. *Histoire de l'Academie Royale des sciences et belles lettres*, Vol. 4, pp. 324-33.
15. Ferguson, K. (1991). *Stephen Hawking: Quest For A Theory of Everything*. New York: Bantam Books.
16. Flores, F. (1999). Einstein's theory of theories and types of theoretical explanation. *International Studies in the Philosophy of Science*, Vol. 13, No. 2, pp. 123-34.
17. Friedman, A. (1922). Über die Krümmung des Raumes. *Zeitschrift für Physik*, Vol. 10, No. 1, pp. 377-386.
18. Friedman, M. (2007). Understanding space-time. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, Vol. 38, No. 1, pp. 216-225.
19. Gamow, G. (1948). The Origin of Elements and the Separation of Galaxies. *Physical Review*, Vol. 74, No. 4, pp. 505-506.
20. Garriga, J., Mukhanov V. F., Olum K. D. and Vilenkin A. (2004). Eternal Inflation, Black Holes, and the Future of Civilizations. *The future of the universe and the future of our civilization*, V. Burdyuzha and G. Kohzin (Eds.). Budapest: World Scientific Publishing Company, pp. 42-55.
21. Geroch, R. (1981). *General Relativity from A to B*. Chicago: University of Chicago Press.
22. Ghosh, A. (2000). *Origin of Inertia: Extended Mach's Principle and Cosmological Consequences*. London: C. Roy Keys Inc.
23. Goldstein, M. and Inge F. (1993). *The Refrigerator and the Universe*. USA: Harvard University Press.
24. Green, B. (2006). *El tejido del cosmos: Espacio, tiempo y la textura de la realidad*. Barcelona: Crítica.
25. Guicciardini, N. (2003). Conceptualism and contextualism in the recent historiography of Newton's Principia. *Historia Mathematica*, Vol. 30, No. 4, pp. 407-431.
26. Guicciardini, N. (2004). Isaac Newton and the publication of his mathematical manuscripts. *Studies In History and Philosophy of Science Part A*, Vol. 35, No. 3, pp. 455-470.
27. Guth, A. (1997). *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins*. Manchester: Addison Wesley.
28. Harrison, E. (2003). *Masks of the Universe: Changing Ideas on the Nature of the Cosmos*. Cambridge: Cambridge University Press.
29. Hawking, S. W. (1991). *Historia del tiempo: del Big Bang a los agujeros negros*. Barcelona: Círculo de Lectores.
30. Kaufmann, W. (1901). Die Entwicklung des Elektronenbegriffs. *Physikalische Zeitschrift*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-15.
31. Kochiras, H. (2009). Gravity and Newton's Substance Counting Problem. *Studies In History and Philosophy of Science Part A*, Vol. 40, No. 3, pp. 267-280.

32. Kolb, E. W. and Turner M. S. (1990). *The Early Universe*. London: Addison-Wesley. 592 p.
33. Kragh, H. (2007). *Generaciones cuánticas: una historia de la física en el siglo XX*. Barcelona: Ediciones AKAL.
34. Linde, A. (1990). *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. London: Taylor & Francis.
35. Lodge, O. (2003). *Pioneers of Science*. London: Kessinger Publishing.
36. MacLachlan, J. (1997). *Galileo Galilei: First Physicist*. USA: Oxford University Press. 128 p.
37. Michelson, A. A. and Morley E. E. (1887). On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether. *American journal of science*, Vol. XXXIV, No. 203, pp. 333-345.
38. Misner, C., Thorne K. and Wheeler J. A. (1973). *Gravitation*. New York: W. H. Freeman.
39. Osserman, R. (2001). Kepler's Laws, Newton's Laws, and the Search for New Planets. *American Mathematical*. Vol. 108, No. 9, pp. 813-820.
40. Peterson, I. (1993). *Newton's Clock: Chaos in the Solar System*. UK: W. H. Freeman & Co.
41. Purcell, E. M. (2005). *Electricidad y magnetismo*. Madrid: Reverte.
42. Sagan, C. (1996). *Cosmos*. Barcelona: Omnis Cellula.
43. Scheck, F. (2004). *Mechanics: From Newton's Laws to Deterministic Chaos*. USA: Springer.
44. Stone, M. (1977). Semiclassical methods for unstable states. *Physics Letters B*, Vol. 67, No. 2, pp. 186-183.
45. Susanto, H. and Karjanto N. (2009). Newton's method's basins of attraction revisited. *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 215, No. 3, pp. 1084-1090.
46. Trautman, A. (1976). A classification of space-time structures. *Reports on Mathematical Physics*, Vol. 10, No. 3, pp. 297-310.
47. Visser, M. (1996). *Lorentzian Wormholes from Einstein to Hawking*. USA: American Institute of Physics.
48. Yamamoto, T. (1985). A unified derivation of several error bounds for Newton's process. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 12-13, pp. 179-191.
49. Yilmaz, H. (1973). New approach to relativity and gravitation. *Annals of Physics*, Vol. 81, No. 1, pp. 179-200.
50. Yilmaz, H. (1975). Gravitation and source theory. *Annals of Physics*, Vol. 90, No. 1, pp. 256-265.
51. Yurov, A. V., Astashenok A. V. and Yurov V. A. (2008). The Dressing Procedure for the Cosmological Equations and the Indefinite Future of the Universe. *Gravitation and Cosmology*, Vol. 14, No. 1, pp. 8-16.

Ω