

Tras la Huella de un Genio*.

Octavio José Obregón Díaz** y Luis A. Ureña-López**.

RESUMEN

En el presente ensayo se da una revisión histórica de la influencia del pensamiento y del trabajo científico de Albert Einstein en la concepción moderna de la Cosmología, y por tanto, de la visión moderna que tenemos del Universo. Al final, se comenta sobre algunos de los tópicos más interesantes de la Cosmología cuyo estudio será importante en este siglo XXI que comienza.

ABSTRACT

In this essay, the influence of the insight and the scientific work of Albert Einstein in shaping modern Cosmology, and therefore the actual image we have of the universe, is reviewed from a historical perspective. At the end, we shall briefly present some topics that will play a major role in the Cosmology of the newly born XXI century.

INTRODUCCIÓN

El **2005** ha sido llamado el **Año Internacional de la Física**, debido a que en este año se cumple el centenario del llamado *annus mirabilis* (**1905**) del físico más conocido de todos los tiempos: **Albert Einstein**. Diez años después, en 1915, Einstein formula la que es considerada actualmente la teoría moderna de la gravitación, la llamada **Teoría General de la Relatividad** (TGR). Esta última permitió a los físicos proponer modelos del Universo que pudiesen ser considerados teorías científicas en el sentido amplio del término. Nuestra intención en este artículo es presentar un pequeño recuento de la historia de la **Cosmología** hasta nuestra época, mostrando al mismo tiempo la gran influencia de Einstein en nuestra concepción actual del Universo.

ANTES DE EINSTEIN

Es inevitable comenzar nuestro recuento con la Grecia antigua, ya que con los griegos comenzó el estudio del Universo propiamente dicho, que para ellos sólo consistía en una parte del Sistema Solar con un fondo fijo de estrellas ubicado a una gran distancia de la Tierra, la cual, por cierto, era ubicada como el centro de este Universo. El punto culminante de la Cosmología griega es el sistema de Ptolomeo para el movimiento de los planetas en el cielo, el cual alcanzó un grado excelente de precisión y predicción.

La siguiente etapa importante de la Cosmología se presenta hasta el siglo XVI, cuando Copérnico postula un modelo del Sistema Solar con el Sol en su centro y la Tierra girando alrededor como uno más de los planetas. A pesar de que reconocemos en este sistema copernicano nuestra visión moderna del Sistema Solar, lo importante para los astrónomos de aquella época (como también actualmente), era la capacidad del modelo de hacer predicciones precisas; y en esto el sistema copernicano no era rival del sistema de Ptolomeo.

Palabras clave:

Albert Einstein; Cosmología; Gravitación.

Keywords:

Albert Einstein; Cosmology; Gravitation.

El siglo XVII fue un paso importante y fundamental para el entendimiento del Sistema Solar; lo que sucedió entonces sigue siendo uno de los ejemplos más nítidos del método científico según su acepción moderna. Por un lado, está el trabajo experimental de recolección y estudio de datos ob-

* Artículo Invitado.

** Profesor-Investigador del Instituto de Física de la Universidad de Guanajuato. A.P. E-143. C.P. 37150. León, Gto. Tel.: (477) 788-51-00. Exts: 8405 y 8436. Correos electrónicos: octavio@fisica.ugto.mx y lurena@fisica.ugto.mx.

servacionales (con Tycho Brahe y Johannes Kepler); y por otro lado está la gran síntesis intelectual sobre las leyes del movimiento de los cuerpos y la fuerza de atracción gravitatoria (con Galileo y Newton). Como consecuencia de esto se dio el primer reconocimiento de la gravitación como la fuerza determinante en el movimiento de los objetos celestes.

EL TRABAJO DE EINSTEIN

La concepción de la Teoría General de la Relatividad, comenzó en 1905 con la formulación de la **Teoría Especial (o Restringida) de la Relatividad**, pero no fue sino hasta 11 años después que Einstein pudo formularla en su versión final. El por qué de esta dificultad reside en el hecho de que la fuerza gravitatoria no distingue entre cuerpos más masivos o menos masivos; la manifestación más simple de este hecho es que todos los cuerpos caen con la misma aceleración por la atracción gravitatoria de la Tierra. Este hecho tiene en la Física actual un lugar y un nombre especial, se le llama el **Principio de Equivalencia**.

Esto orilló a Einstein a formular una teoría **geométrica** de la fuerza gravitatoria en un **espaciotiempo de 4-coordenadas** (3 coordenadas espaciales + 1 coordenada temporal), que se resume en la famosa frase “*la materia le dice al espaciotiempo cómo curvarse, y el espaciotiempo le dice a la materia cómo moverse*”, es decir, el espaciotiempo es un ente deformable y sobre el cual se puede ejercer cierta acción. Huelga decir que la TGR sustituyó, después de una larga jornada en el siglo XX, a la **Teoría de la Gravitación Universal de Newton** como nuestra teoría *fundamental* de la interacción gravitatoria.

En 1917, Einstein consideró la aplicación de la TGR al Universo, es decir, puso atención al problema de la Cosmología. Como aún se hace hoy, para aplicar la TGR al Universo es necesario primero hacer ciertas consideraciones sobre el Universo que habitamos. Como Einstein, suponemos que el Universo cumple con lo siguiente: que es **homogéneo**, es decir, que ningún lugar del Universo puede distinguirse de otro en lo que se refiere a las observaciones cosmológicas; y que es **isotrópico** alrededor de cualquier punto, es decir, se ve igual en todas las direcciones. Estas dos características se conocen actualmente como el **Principio Cosmológico** (de Einstein, debiéramos agregar). Este principio fue tan acertado que sigue siendo el punto de partida de la Cosmología teórica.

Sin embargo, Einstein pensaba que el Universo era **estático**, es decir, no había ni expansión ni con-

tracción del mismo, esto a pesar de que sus propias ecuaciones mostraban en forma contundente que el Universo debía estar en movimiento, y más que eso, que el Universo debía estar en **evolución**.

EL LEGADO DE EINSTEIN

En el siglo XX, en lo que a la Cosmología se refiere, una serie de acontecimientos importantísimos configuraron nuestra visión actual del Universo. Sin embargo, para no correr el riesgo de cansar a nuestros lectores, en esta última parte de nuestro artículo nos referimos sólo a los acontecimientos más recientes para así hablar también de los retos a los que se enfrentarán las nuevas generaciones.

Hasta antes de la década de los noventas, la Cosmología parecía ser más un ejercicio teórico que un estudio serio del Universo. En retrospectiva, esto era debido a la falta de observaciones precisas que pudiésemos llamar propiamente como *cosmológicas*.

Obviamente, todos los libros que trataban la TGR presentaban, en aquel entonces, la indudable riqueza teórica de las ideas de Einstein en lo que a modelos cosmológicos se refiere. Existían pruebas bien cimentadas (observaciones) de la **expansión** del Universo, del proceso de **nucleosíntesis** de los elementos químicos más ligeros en el Universo temprano, así como de la existencia de la **Radiación Cósmica de Fondo** (RCF). Sin embargo, por sí solas ellas no permitían la selección de un **modelo estándar cosmológico** de entre todas las posibilidades permitidas por la TGR. Por ejemplo, no podían hacer distinción de entre los 3 tipos diferentes de Universos homogéneos e isotrópicos que son los *caballos de batalla* de la Cosmología teórica.

Es hasta principios de la década de los noventas que las observaciones de las anisotropías de la RCF, y posteriormente de las así llamadas **supernovas tipo Ia^a** (a finales de la misma década), producen una revolución lo suficientemente fuerte como para elevar a la Cosmología al estatus de **ciencia observacional**.

Las **anisotropías** de la RCF^b, como su nombre lo indica, son pequeñísimas desviaciones de temperatura de la RCF (1 parte en 10⁵) en cada punto del cielo con respecto a la temperatura promedio de la misma (2.723° K). Las mediciones, iniciadas con el lanzamiento del satélite **COBE** (Cosmic Background Explorer, por sus siglas en inglés), han rendido ya sus frutos más maduros. Y es que las anisotropías guardan información de la evolución del Universo desde un tiem-

^a Para mayor información sobre las supernovas tipo Ia puede consultarse el sitio <http://www-supernova.lbl.gov/public/>.

^b Las observaciones más recientes sobre la RCF pueden consultarse en LAMBDA (Legacy Archive for Microwave Background Data), en el sitio <http://lambda.gsfc.nasa.gov/>.

po de 300 mil años después del **Big Bang** hasta nuestros días, es decir, 14 mil millones de años después.

Por otro lado, esta información puede ser entendida sólo si se tiene a la mano un marco teórico adecuado. La TGR ofrece una explicación sencilla de las anisotropías entendidas como *perturbaciones lineales* de las ecuaciones de Einstein.

En lo que concierne a las supernovas tipo Ia, su curva de luminosidad intrínseca es conocida, por lo que han sido utilizadas como objetos luminosos de referencia estándar. Esto ha permitido seguir la expansión del Universo por los últimos 10 mil millones de años. En otras palabras, esto permite la construcción de **diagramas de Hubble** (aquellos que permitieron a Edwin Hubble descubrir la expansión del Universo en los años de 1920's) con una precisión no conocida antes.

Estas observaciones, interpretadas dentro del marco teórico de la TGR, indican que el Universo en el cual vivimos es un Universo con geometría espacial **euclídeana** (la posibilidad más sencilla de entre los modelos cosmológicos), donde la **materia bariónica** (de la cual nosotros mismos estamos hechos, y que es descrita por el llamado Modelo Estándar de Física de Partículas, MEFP) es sólo el **4.5 %** del contenido material actual del cosmos.

Con esto concluimos que el **96.5 %** del Universo es un tipo de materia no conocido para la ciencia actual, llamada generalmente como **materia oscura**. Más sorprendente, es el hecho de que **70 %** de esta materia desconocida parece tener el mismo comportamiento que la **constante cosmológica** (un término *gravitatoriamente repulsivo*) que Einstein introdujo en sus ecuaciones de campo originales para lograr el Universo *estático* que deseaba.

Hay muchas más observaciones cosmológicas que complementan y refuerzan las conclusiones primeramente obtenidas mediante las anisotropías de la RCF y las supernovas tipo Ia (el *bosque* de Lyman- α , las observaciones del SDSS, galaxias, clusters de galaxias, lentes gravitacionales, el llamado *lensing* y *microlensing*, etc.) que no será posible mencionar en detalle por su extenso contenido. Sirva el mencionarlas para mostrar que la **cosmología observacional** es un campo vivo y de enorme crecimiento en la actualidad.

Los avances en la Cosmología moderna nos permiten juzgar, en retrospectiva, el genio de Einstein. Baste con decir que todo curso moderno de la misma asume como *axiomas* el **Principio Cosmológico** y la **TGR**, ambos de la autoría de Einstein. Es impresio-

nante como, después de casi 90 años y después del advenimiento de una revolución en la Cosmología actual, estos axiomas nos permiten aún entender las observaciones cosmológicas; que al mismo tiempo, parecen confirmar la validez de la TGR para describir la evolución gravitatoria del Universo a partir del primer segundo después del Big Bang.

LA HUELLA DE UN GENIO

La teoría gravitatoria Newtoniana, permaneció incólumne por más de 300 años y fue una guía invaluable en la comprensión del Sistema Solar. Esto no obstante que, a pesar del soporte empírico de los experimentos terrestres sobre la ley del inverso de la distancia al cuadrado, siempre fueron evidentes sus limitaciones para la descripción del Universo más allá del Sistema Solar.

Algo similar sucede con la TGR de Einstein en la actualidad. La TGR cambió de manera fundamental nuestro entendimiento de la fuerza gravitatoria, y ahora creemos conocer de manera más completa el Sistema Solar. No obstante, toda la evidencia empírica que tenemos a la mano hoy en día no es *aún* suficiente para cimentar en definitiva la validez de las ecuaciones de Einstein en toda su extensión.

Ya hablamos de la Cosmología contemporánea y de su relación con la TGR. Sin embargo, la Cosmología nos ofrece la oportunidad de probar algunas de las predicciones más interesantes derivadas del trabajo de Einstein.

GEOMETRÍA Y DESTINO

¿Cómo fue el nacimiento del Universo? Esta pregunta ancestral de la humanidad aún persiste en la Cosmología actual. La TGR predice una singularidad del espaciotiempo para el nacimiento del Universo, de modo que no puede decirnos entonces cuáles fueron las condiciones iniciales tan especiales que dieron comienzo al cosmos que conocemos.

La detección indiscutible de las anisotropías de la RCF planteó la cuestión del nacimiento de un Universo altamente isotrópico pero inhomogéneo como condición inicial necesaria para la formación de la **estructura cosmológica**, como son las galaxias, grupos de galaxias, etc.

Siguiendo la directriz filosófica de que nuestro Universo comenzó con condiciones iniciales altamente probables y no necesariamente especiales, se ha propuesto una etapa de **inflación** que sería la responsable

de colocar las semillas primordiales para la formación de esta estructura. Una de las hipótesis principales de inflación es asumir la validez de la TGR en el Universo temprano, más allá de donde las observaciones cosmológicas directas nos permiten llegar. Éstas últimas no contradicen las predicciones teóricas de inflación, pero ellas mismas no pueden probar todos los aspectos del modelo. Inflación seguirá siendo un tema de gran interés en este nuevo siglo.

Una de las predicciones de la TGR que más ha llamado la atención es a su vez la solución exacta más sencilla de las ecuaciones de Einstein, los llamados **hoyos negros**. Según el consenso actual, éstos constituyen los objetos más compactos que se pueden encontrar en la naturaleza. Sin embargo, su existencia siempre fue puesta en duda ... hasta ahora.

Muchas de las galaxias que observamos parecen tener, en su centro, un objeto masivo tan compacto que la única posibilidad a la mano es que sean hoyos negros. Sin embargo, estas observaciones más que mostrar parecen sólo indicar la posible existencia de estos objetos, ya que una detección definitiva de un horizonte de eventos, una característica muy particular de un hoyo negro, todavía está fuera de nuestro alcance.

Las ecuaciones de Einstein predicen, de manera más que natural, la existencia de **ondas gravitatorias**^c, ondulaciones del espaciotiempo que se propagan a la velocidad de la luz. Estas ondas son un aspecto de la TGR que tiene mucha relevancia en nuestros días y la prueba definitiva de su existencia sólo puede llegar una vez que sean detectadas directamente.

Y por último, la cuestión es... **¿cómo es el Universo?**^d Hemos dicho líneas arriba que el Universo sigue la geometría euclidiana que nos es tan familiar. Sin embargo, aún nos queda la duda sobre la forma exacta del Universo. ¿Vivimos en un Universo que es cerrado, de forma parecida a la superficie de un globo o de un cilindro? ¿Es nuestro Universo finito o infinito?

El responder estas preguntas, es decir, el descubrir la **topología** de nuestro Universo, es y será otro de los temas relevantes de la Cosmología del siglo XXI.

AGRADECIMIENTOS

Este ensayo fue parcialmente patrocinado por PRO-MEP UGTO-CA-3 y por CONCYTEG (05-16-K117-032).



Fuente: Image © The Albert Einstein Archives, The Jewish National & University Library, The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

^c Uno de los experimentos más ambiciosos y espectaculares para la detección de ondas gravitatorias es LISA (Laser Interferometer Space Antenna), el cual puede consultarse en el sitio <http://lisa.jpl.nasa.gov/>.

^d El Telescopio Espacial Hubble ha hecho posible tomar imágenes increíbles de nuestro Universo; éstas pueden consultarse en el sitio <http://hubblesite.org/>.