

EL FUTURO DE LA COSMOLOGÍA

— Alejandro González-Sánchez* **

RESUMEN

El estudio del Universo como un todo enfrenta grandes retos como son la explicación de la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura que domina el 97% de lo que existe en el Universo. Otras preguntas fundamentales son sobre el destino final del Universo; si éste se expandirá para siempre o si en un futuro colapsará y explotará una vez más; sobre el origen de las inmensas burbujas que dominan el Universo y de si están realmente vacías o albergan una gran cantidad de galaxias enanas difíciles de detectar por su bajo brillo . Descubrimientos importantes, recientes como son la detección de la partícula de Higgs, la detección de ondas gravitacionales, evidencias de la colisión de hoyos negros, su evaporación, la detectabilidad de la radiación de Hawking, evidencias de la variación en la velocidad de la luz, la existencia de una gran cantidad de galaxias enanas, todo ello conjuntado con las simulaciones numéricas más grandes nunca antes generadas por la humanidad sobre la formación de la estructura del Universo a muy grandes escalas, nos coloca como humanidad pensante en una posición de nuevos retos físicos y tecnológicos.

ABSTRACT

The study of the Universe as a whole faces great challenges to give explanation to, for example the existence of dark matter and energy. Those components represent the 97% of the total mass. Some other fundamental questions wait to be answered such as the final fate of the Universe, if this will keep expanding forever or if it will collapse some time? what is the origin of the big voids and if they are empty or galaxies, or if they are dominated by a huge amount of dwarf galaxies hard to detect as they have low surface brightness? We discuss on recent important discoveries such as the Higgs boson, gravitational waves detection, evidences of the collision of black holes, their evaporation, the possibility to measure the Hawking radiation, evidences of the variation of the light speed, the details of the cosmic structure formation supported by the most important numerical simulations. All this places us, as a thinking race, in a position to widely discuss new challenges in physics and technology.

* Departamento de Investigación, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. 21 Sur 1103, Col. Santiago, C.P. 72410, Puebla, México. Email: alejandro.gonzalez@upaep.mx

** Facultad de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas. Av. Solidaridad esq. Paseo a la Bufa, s/n. C.P. 98060, Zacatecas, México.

I. INTRODUCCIÓN

Esta contribución no pretende ser una revisión del Cosmos, ni técnica ni exhaustiva, sino una revisión comprensible de los principales retos que enfrenta la cosmología contemporánea, y de los avances provenientes de la cosmología física misma, y de la Física, los cuales nos ayudan a entender las observaciones y los procesos físicos que dan forma al Universo actual. Por tanto, son dos nuestros principales objetivos; primero, hacer una breve revisión del contenido material del Universo y de sus ingredientes fundamentales, los cuales, aunque ya conocidos desde hace una par de décadas, son en general de difícil acceso al conjunto de los no especialistas. Logrando esto, espero se pueda motivar la discusión

entre los filósofos y los teólogos, basados en los hechos cosmológicos apegados al conocimiento que la Física nos da de ellos.

El segundo objetivo discutir la relevancia, y las consecuencias de cinco grandes descubrimientos hechos en los últimos cuatro años. Estos importantes descubrimientos son, en orden cronológico; a) la detección del bosón de Higgs, d) la detección de ondas gravitacionales, c) la medición de la radiación de Hawking, d) la posible variación de la velocidad de la luz, y e) la existencia de una gran cantidad de galaxias enanas que cambia radicalmente nuestro concepto de galaxia y de su formación.

1.1 EL UNIVERSO VISIBLE

Es necesario enfatizar que nuestro conocimiento del Universo está fundamentado además de la Física misma; en grandes herramientas como son las bases de datos observacionales recopiladas durante muchos años, día y noche, por cerca de 85 telescopios espaciales que observan en diferentes tipos de luz (ver ref. 1); otros 5000 telescopios terrestres, y una gran cantidad de supercomputadoras que a través de simulaciones numéricas jamás concebidas, como *Illustris* (e.g. Nelson et al., 2015), han podido recrear las características de la estructura del Universo a muy grandes escalas, hasta del orden de cientos de millones de años luz. A partir de estas simulaciones se han podido predecir resultados

que hoy en día están bajo estudio observacional, como por ejemplo la existencia de galaxias enanas, y la existencia de objetos de baja luminosidad en los espacios gigantescos donde aparentemente no hay nada y que llamaremos "burbujas". Los grandes aceleradores de partículas juegan también un papel fundamental en la cosmología. A esto se agregan y contribuyen, los avances en los diferentes campos fundamentales de la física, como por ejemplo la física de las partículas elementales, teorías que pretenden unir en una sola las fuerzas fundamentales de la naturaleza.. En suma, lo que hoy conocemos no es el logro de un grupo de científicos, o de países, es por el contrario el conocimiento adquirido por la

comunidad científica a lo largo de la historia del mundo.

El Universo, al que calculamos unos trece mil quinientos millones de años de existencia, se encuentra organizado de manera jerárquica, es decir, las galaxias que son las estructuras fundamentales se agrupan y dar lugar a estructuras cada vez más grandes. Aunque el tamaño de una galaxia puede variar, una galaxia típica mide unos 130 mil años luz de diámetro. Existen galaxias aisladas, pero debido a la fuerza de atracción gravitacional las galaxias también pueden encontrarse en sistemas binarios, triples y aún en cúmulos que pueden contener desde unas decenas de galaxias hasta miles de galaxias; sus masas son equivalentes a unas 10 mil veces nuestra galaxia, y tienen diámetros de unos 30 millones de años luz. Existen también los grandes supercúmulos de millones de galaxias. Estos supercúmulos tienen formas filamentosas que pueden llegar a medir hasta 100-200 millones de años luz de longitud, como

lo sería el cúmulo de Virgo. Los cúmulos más grandes generalmente se encuentran en la intersección de estas estructuras filamentosas e incluso pueden encontrarse a lo largo de ellas. También existen paredes de galaxias, las cuales son estructuras bidimensionales donde se aglomeran las galaxias. Hoy en día se han detectado aproximadamente unos 50 supercúmulos que conforman una red intrincada de galaxias. Coexistiendo con estas, hay "otras estructuras" aún más grandes que dominan las grandes escalas, estas son las llamadas burbujas o 'voids' por su nombre en inglés. De formas elipsoidales, son regiones con diámetro promedio de hasta 250 millones de años luz, aparentemente vacías, donde no se han detectado galaxias. Actualmente se conocen alrededor de 40 'voids' (Gottlöber et al. 2003; Tinker y Conroy 2009). Adelante discutiremos los avances más recientes a la respuesta de si estas desconocidas burbujas están vacías o no, y sus implicaciones cosmológicas.

1.2 EL UNIVERSO INVISIBLE

El ojo humano está capacitado para detectar la parte visible del espectro electromagnético, de unos 4000 a 7500 Å (1 armstrong Å = 10⁻¹⁰m), por tanto muchos de los fenómenos físicos que ocurren en el Universo son imperceptibles para nosotros. Sin telescopios equipados para detectar diferentes tipos de luz (radio, infrarrojo, ultravioleta, X, Gama, Microondas) nos revelan más sobre la composición del Universo. Por ejemplo, es un hecho am-

pliamente confirmado es que el universo está permeado por una radiación de fondo, proveniente de la radiación térmica de los fotones al inicio del universo generada por la llamada Gran Explosión. Su espectro electromagnético corresponde al de un cuerpo negro a una temperatura de 2.7K, detectada en forma *serendipiti* en 1969, por Penzias y Wilson. La idea de la ocurrencia de una gran explosión fue concebida durante los años 1915-1960, etapa en la

que Edwin Hubble detectó la expansión del Universo utilizando el corrimiento al rojo; determinó que mientras más distantes las galaxias se alejaban más rápido, hecho que Einstein había predicho con su teoría de la Relatividad General. Más adelante por los años 50, Gamow infiere que si las galaxias se encuentran alejándose unas de otras, en el pasado deberían estar cada vez más y más cerca, y por tanto el Universo debió originarse de una gran explosión. Sus cálculos mostraban que la temperatura de la radiación del Universo debía ser menor a 20k. Entonces propone la existencia de dicha radiación, la posible existencia de una fase primordial del Universo de temperatura y densidad casi infinitas. Más adelante, para 1992, el COBE (Cosmic Background Explorer; Smooth et al., 1992) confirma con altísima precisión esta temperatura, su forma de espectro de cuerpo negro (emisor y absorber ideal) y variaciones en la temperatura del orden de 10^{-6} ligadas al nacimiento de las primeras estructuras cósmicas formadas. Y más recientemente WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe; e.g. Dunkley, 2009), con observaciones acumuladas durante cinco años, analiza las fluctuaciones de 10^{-6} en la temperatura de esta radiación, y determina con altísima precisión el valor de diversos parámetros cosmológicos como son la constante de Hubble, la cantidad de mate-

ria oscura, la cantidad de energía oscura y la cantidad de materia bariónica; 71.9 ± 2.6 , $\Omega_{DM} = 23 \pm 2.8$, $\Omega_{DE} = 74.2 \pm 3$, $\Omega_B = 2.2 \pm 0.06$, respectivamente. Equivalentemente, y sin considerar las incertidumbres, los números de arriba arrojan una edad del Universo de unos 13×10^{11} años, 23% de la masa total del Universo es materia oscura, 74 % es energía oscura, y un 3% en materia constituida por átomos. La materia oscura es materia no constituida por bariones (protones, neutrones, ni electrones). Al ser materia no ordinaria, no emite luz, y solo se le puede detectar por sus efectos gravitacionales; por ejemplo, la multiplicación de imágenes de un mismo objeto en el espacio, la alta velocidad con la que se mueven las galaxias dentro de los cúmulos de galaxias, y la constancia de la velocidad de rotación objetos satélite de galaxias espirales, en regiones muy alejadas del centro de la galaxia, donde la rotación debería caer a cero (e.g. Spiro, 1995).

Incluso la detección indirecta de una gran cantidad de hoyos negros, la mayoría asociados a los centros de galaxias, solo ha sido posible gracias a las observaciones en rayos X. Actualmente, su existencia y aun evidencia de colisiones entre ellos ha sido posible gracias a la detección de ondas gravitacionales (ver Abbot, 2016).

2.1 EL ORIGEN DEL UNIVERSO Y LA MATERIA CONOCIDA

El modelo estándar de la Gran Explosión, era un modelo elegante que explicaba mucho sobre el origen y la evolución térmica

del Universo, sin embargo Gamow identificó varios problemas fundamentales que presentaba la teoría y a los cuales no pudo

dar solución. i) El problema de la homogeneidad o del horizonte; si la radiación de fondo era homogénea e isotrópica, cómo le había hecho el Universo para que regiones “diametralmente” opuestas pudieran intercambiar información y llegar a homogeneizar sus características. Para lograrlo, dichas regiones tendrían que haber intercambiado información a una velocidad mayor que la velocidad de la luz. Este punto lo abordaremos más adelante: ii) El problema de la planitud; de las miles de formas que tiene el universo en expansión, como lo explicó Hubble, las galaxias parecen seguir una forma muy especial que parece que el Universo parecería no tener curvatura. Es como si el Universo empezara con las únicas condiciones iniciales posibles (de entre una infinidad) que podrían llevar a ese comportamiento: iii) ¿Si el Universo es homogéneo e isótropo como pudo originarse la existencia de la gran gama de estructuras cósmicas, resultando en una distribución altamente inhomogénea a escalas pequeñas?

Poco después de la muerte de Gamow, Guth (1981), propone un mecanismo físico llamado de “inflación cósmica”, el cual da solución a estos problemas. La idea fue reforzada por Linde (1982) y Steinhardt y Albrecht (1982). Este es un período de expansión acelerada, exponencial en las primeras fracciones de vida del Universo, y mucho antes de que el Universo evolucione conforme al modelo estándar. En esta fase el tamaño del Universo aumenta unas 10²⁶ veces en una fracción de segundo, permitiendo intercambio de información. El resultado de esta rápida expansión es borrar

cualquier curvatura inicial, pero además es generadora de las primeras fluctuaciones de la densidad que posteriormente darán origen a las estructuras cósmicas. En este punto debe hacerse notar que la teoría es muy ambiciosa y da solución a varios problemas fundamentales. En lo general la teoría funciona aunque no se ha podido determinar qué tipo exacta de inflación ocurrió; eterna o no eterna. Este es uno de los bloques fundamentales que falta por confirmar en la teoría de la Gran Explosión.

El modelo de la Gran Explosión asume que en el pasado remoto el universo tuvo su origen con altas densidades y temperaturas de centenas de millones de grados Kelvin, de las cuales la radiación de fondo a 2.7K es solo el remanente de esta fase caliente. Sin embargo, si realmente existió tal fase, o si hubo un momento de una Gran Explosión es una pregunta que ha permanecido sin respuesta. En forma muy abreviada, el procedimiento que se sigue para construir un modelo de Universo es considerar ambos lados de las ecuaciones de campo, del lado derecho corresponde al contenido material que se supone tiene en forma de materia y energía, y el lado izquierdo nos daría la geometría del espacio-tiempo.

El teorema de la singularidad de Hawking-Penrose establece que una vez que elegimos, *a mano*, el contenido material y energético del Universo, su evolución queda definida (Garfinkle & Senovilla, 2015; Hawking & Ellis 1974; Penrose, 1965). Sin embargo, cuando se interpola a tiempos remotos se encuentra siempre que la densidad y la temperatura tienden a ser infini-

tas, lo que resulta de querer compactar hasta ser una singularidad del espacio-tiempo, aquello que supusimos desde el principio. Dicho de otro modo, necesitamos invertir una gran cantidad de energía para desaparecer justo lo que se metió a mano en forma muy razonable, pero arbitraria. El problema de llegar al momento justo de la Gran Explosión, y el problema de extraer información más allá del horizonte de eventos de los hoyos negros son problemas similares. Habría en principio, dos formas de lograr esto, sin embargo son dos formas que quedan bajo estudio. La primera de ella

es detectar y analizar la llamada radiación de Hawking, la cual discutiremos más adelante. Esta forma nos daría información del horizonte de eventos, y de la física de cómo se produce los pares partícula-anti-partícula en esta frontera. La segunda, que resulta más prometedora es contar con una teoría cuántica de la gravedad. De la cual, hay indicios de que puede ser construida, pero aun no contamos con ella. En tal caso, la información puede ser extraída en forma similar a cómo se hace en los procesos cuánticos microscópicos; recurriendo al efecto túnel.

2.1.2 EL BOSÓN DE HIGGS

Otro factor que nos imposibilita observar las fases tempranas del universo es que a 3000K la materia se encuentra completamente ionizada. Bajo estas condiciones, los fotones, o radiación electromagnética, son dispersados eficientemente por los electrones y protones, lo que hace que se encuentren en equilibrio térmico. En años subsiguientes, varias implicaciones de la teoría de la Gran Explosión fueron complementadas con la implementación del Modelo Estándar de Partículas Elementales (e.g. Pottgen, 2016). Esta teoría describe la relación entre las cuatro fuerzas fundamentales conocidas en el universo y las partículas elementales que componen apenas el 3% de la materia conocida; las cuatro fuerzas fundamentales son la fuerza gravitacional, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil. El Modelo Estándar de Partículas consiste de tres familias: una de seis quarks diferentes, una familia de

seis leptones (electrón, muón, tauón, y sus tres neutrinos respectivos) y cinco bosones (fotones, gluones, Z^0 y W^\pm) que son los portadores de estas interacciones. Una partícula importantísima en el modelo es el bosón de Higgs, el cual mediante el mecanismo de Higgs da masa a las partículas. En julio del 2012, el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) dio a conocer el descubrimiento de esta partícula que confirmaba con más de un 99% de confiabilidad la existencia del bosón de Higgs. Este mecanismo operó durante las primeras fracciones de segundo después de la Gran Explosión para fijar la masa de las partículas conocidas, quarks y leptones y de ahí empezar su evolución hasta nuestros días. Posteriormente, alrededor de los primeros tres minutos de la Gran Explosión la unión de tres quark empieza a formar neutrones y protones, con masas y

cargas eléctricas necesarias para formar los primeros átomos de H, ^3He , ^4He , ^7Be y Li.

Así, con estas teorías fundamentales se predice exitosamente a) la expansión del espacio-tiempo, b) la existencia de una radiación térmica que permea el universo, con un espectro Planckiano, c) se explica la producción y abundancia de elementos químicos primordiales (la llamada nucleosíntesis donde se produce el H, ^3He , ^4He , ^7Be , Li, Deuterio y Tritio). E, indirectamente, se prueba la existencia de fases muy calientes en el universo primitivo y la existencia de la última capa de dispersión, mencionada arriba. La relatividad general agregaba además nuevas predicciones, como la existencia de lentes gravitacionales, pruebas de

la curvatura del espacio-tiempo y la existencia de agujeros negros.

En principio, todas las propiedades de la materia conocida pueden explicarse con este modelo. En forma muy simplista el modelo de Higgs es un campo de energía que permea todo el espacio y cuando una partícula con ciertas propiedades interactúa con él, le transfiere la propiedad de masa. Es el mecanismo que le infiere una masa fija, a un conjunto de partículas de la misma especie.

Peter Higgs recibió en 2013 el Premio Nobel de Física por el hallazgo junto a François Englert, quien contribuyó a desarrollar la teoría en los años 60.

2.1.3 NUEVOS PROBLEMAS MÁS ALLÁ DEL BOSÓN DE HIGGS

A pesar de que la detección del bosón de Higgs por el ATLAS y CMS Collaborations (2012) ha sido un gran logro en el entendimiento de la origen de la materia compuesta por protones, neutrones y electrones y de que ha completado el esquema general del llamado Modelo Estándar de Partículas Elementales, teoría que explicaría la existencia de toda la materia existente en el Universo; estrellas, planetas, conductores, semiconductores, termoeléctricos, grafeno, por mencionar solo algunos, esta sin embargo falla en diversos puntos.

Mencionaremos solo cuatro problemas fundamentales que el Modelo Estándar no ha podido explicar;

- a. La naturaleza de la energía oscura que domina el 70 % del total del Universo: su existencia se infiere de las distancias y luminosidades de supernovas de Tipo Ia. Estas cantidades son cruciales y dependen de si las supernovas Ia son o no, emisores estándar de la misma cantidad de energía. Encontrar diferentes cantidades de energía emitida, en dos supernovas Ia en las mismas condiciones ambientales, sería catastrófico para la existencia de la energía oscura. Lo impresionante es que esto no ha ocurrido. Por otro lado, se ha podido inferir que debido a la existencia de la energía oscura el universo está entrando en una nueva fase de expansión acelerada.

- b. La naturaleza de la materia oscura que representa un 27% del Universo: su existencia se infiere de la planitud de la curva de rotación de galaxias espirales, a distancias grandes de su centro. Pero esto es reforzado por la velocidad con la que se mueven las galaxias en los cúmulos. Mientras más masa exista en los cúmulos, independientemente de si es o no visible, es mayor la velocidad con la que se mueven las galaxias que lo componen. Y la prueba más fehaciente de que hay más masa de la que podemos observar en galaxias brillantes es el efecto de lente gravitacional. Es decir, la multiplicidad de las imágenes del mismo objeto producida por una región donde la masa total es mayor que la suma de las masas de sus galaxias visibles. Tal efecto, ha sido bien entendido y es uno de los pilares más importantes a favor de la existencia de materia que no brilla y que domina la dinámica del universo. Este problema es fundamental y es objeto de estudio de la física de partículas elementales, en modelos extendidos como el 331, y little Higgs entre otros.
- c. No explica el mecanismo que rompe la simetría entre la materia y la antimateria: El Universo, poco después del llamado tiempo de Planck, 10-32 segundos, debió contener una misma cantidad de materia que antimateria. Estando en interacción estas partículas se originan, conservando la energía total del Universo. Hoy en día sin embargo, observamos un Universo dominado por materia. En qué momento, y qué conduce a la aniquilación asimétrica de materia y antimateria es un tema actual de estudio.
- d. No explica la naturaleza de la oscilación de la masa de los neutrinos: El Modelo Estándar incluye tres tipos distintos de neutrinos; neutrino del electrón, neutrino del muón y neutrino del tau. De acuerdo con la teoría propuesta por el Eddington, en 1920, la energía del Sol proviene de reacciones de fusión nuclear que ocurren en su interior. Más tarde, con la hipótesis de Pauli (1930) sobre la existencia del neutrino, se llegó, a la conclusión de que tales reacciones producirían neutrinos del electrón en abundancia. Sin embargo, desde principios de los años 60 y hasta principios de este siglo, los experimentos para detectar esos neutrinos solares siempre daban resultados significativamente inferiores lo que se conoció como el *problema de los neutrinos solares* (Aardsma et al., 1987). Para 2002, físicos del observatorio de Neutrinos Sudbury, en Ontario, resolvieron este problema confirmando experimentalmente la hipótesis de Gribov y Pontecorvo (1969); los neutrinos producidos en el interior del Sol cambian de especie antes de llegar a la Tierra. Es decir, el número de neutrinos del electrón producidos en las reacciones de fusión nuclear, calculados previamente, estaba bien, pero el número detectado en la Tierra tendría que ser menor si los neutrinos del electrón se convirtieran en otros neutrinos diferentes por

ejemplo del tau o del muon. La confirmación experimental de que los neutrinos oscilan en su masa, lleva a modificaciones importantes del Modelo Estándar. Incluso hoy en día un tipo especial de neutrino llamado estéril, ya que no interacciona con la materia en alguna de las formas dentro del Modelo

estándar, excepto mediante la gravedad y puede incorporarse como parte los neutrinos oscilantes. Debido a esto, los neutrinos están siendo reconsiderados como un buen candidato a ser la materia oscura (e.g. Adhikari, Agostini et al., 2017).

2.2 EL PODER PREDICTIVO DE LA RELATIVIDAD GENERAL

La teoría de la relatividad general fue publicada por Albert Einstein en 1915, y a partir de ahí su validez y su poder predictivo han sido probados por múltiples observaciones y mediciones; por ejemplo, la aplicación de su teoría al Universo predecía que el espacio-tiempo debía estar en expansión, hecho que era muy difícil de explicar pues muy pocos científicos dominaban los conceptos manejados por la teoría y en especial el del espacio-tiempo en expansión. El propio Einstein no creyó en la expansión del Universo e introduce a sus ecuaciones, de manera arbitraria, una constante que contrarrestaba la expansión. Esa constante se conoce como constante cosmológica y al carecer de significado físico fue olvidada por muchos años. Hoy en día, se ha recobrado el interés por esa constante pues ella o algunas variantes de ella podrían dar solución al problema de la energía oscura. No obstante de haber introducido esa constante a sus ecuaciones, hecho que fue calificado por el propio Einstein “como el error más grande de su vida”, en 1929 Edwin Hubble determina con datos astronómicos que las galaxias cuanto más distantes están se alejan a mayor velocidad. Esto solo

se podía deber a la expansión del espacio-tiempo en todas direcciones y no al movimiento propio de las galaxias. A partir de entonces, múltiples grupos de astrónomos han confirmado este hecho, es decir se ha confirmado la expansión del espacio-tiempo y de paso la propiedad de isotropía.

En una segunda gran predicción, si la interpretación de la gravedad es correcta en esta teoría el espacio-tiempo alrededor de objetos masivos debería curvarse. Cuanto más masivo es un objeto es más marcada la curvatura. Si esto era cierto, podríamos ver objetos muy distantes e incluso localizados detrás de grandes conglomerados de materia debido a que la luz ya no viajaría en línea recta sino en trayectorias curvas. Fue en 1919, durante un eclipse total de Sol cuando Eddington realizó mediciones de cómo se curvaba la trayectoria de la luz provenientes de estrellas lejanas al pasar cerca del Sol, produciéndose un desplazamiento aparente de sus posiciones en el cielo, lo que permitió ver estrellas que de otra forma hubiesen sido eclipsadas también. Efectos de curvatura más grandes producidos por objetos muy masivos inclu-

so producen múltiples imágenes del mismo objeto. Este fenómeno se conoce como de lente gravitacional. El telescopio espacial Hubble ha observado miles de lentes gravitacionales que van desde cuasáres, galaxias y cúmulos de galaxias.

Poco después de la publicación de la relatividad general, el físico Schwarzschild encontró otro tipo de soluciones a las ecuaciones de campo en el cual un objeto masivo podría absorber toda la luz de su entorno hasta un cierta distancia del objeto hoy conocido como radio de Schwarzschild u horizonte. Ningún objeto incluyendo la luz, podría escapar de esa región una vez cruzando dicho radio. De aquí el concepto de hoyo negro. En 1967, Hawking y Penrose demostraron que los agujeros negros son soluciones posibles de las ecuaciones de Einstein. Lo que en esencia mostraron es que si una estrella puede permanecer el mayor tiempo de su vida en una fase de equilibrio entre la gravedad que tiene a comprimir la estrella y la presión hacia fuera de la estrella generada por la radiación de la fusión nuclear del hidrógeno, entonces en el caso en que no se generara presión de la radiación hacia afuera, el objeto podría sufrir un colapso hasta un hoyo negro. En el Universo, se han detectado muchas galaxias espirales que emiten chorros de material que salen del centro

de sus discos, detectables en rayos X, altamente energéticos cuya existencia no es posible explicar si no se recurre a un hoyo negro. Otro ejemplo de este fenómeno es el chorro de material, finamente colimado que sale de la galaxia elíptica M87, que viaja a una fracción cercana a la velocidad de la luz alejándose de la galaxia. El estudio de estos chorros de material ha llevado a consensar entre la comunidad astronómica que las galaxias, o una buena parte de ellas, deben estar dominadas por hoyos negros que van desde 102Mo hasta 1011Mo. Nunca se ha observado un hoyo negro en forma directa. Sin embargo, se piensa que son indirectamente detectables por la existencia de un disco de acreción de material a su alrededor y la emisión de chorros de material arriba y abajo del disco.

Einstein fue el primero en entender el espacio-tiempo y que este no es un simple espacio donde todas las cosas existen, sino que es dinámico que puede expandirse, y doblarse. Sus ecuaciones mismas predecían ondas o distorsiones del espacio tiempo producidas por colisiones cósmicas colosales entre objetos muy masivos. Su teoría predice la existencia de estas ondas llamadas gravitacionales que son distorsiones del espacio-tiempo que viajan por el Universo.

2.2.1 ONDAS GRAVITACIONALES Y HOYOS NEGROS

En esta parte describiremos dos descubrimientos de extrema relevancia científica directamente relacionados con las dos últi-

mas predicciones significativas de la teoría de Einstein: la detección directa en la Tierra de ondas gravitacionales y la primera

observación de la colisión y fusión de un par de agujeros negros.

El 14 de septiembre de 2015, los dos detectores del Observatorio de interferometría Láser de Ondas Gravitacionales (LIGO, por sus siglas en inglés) captaron la onda gravitacional GW150914 producida por un evento colosal que tuvo lugar en una galaxia a más de mil millones de años luz de distancia (Abbott, 2016). Se ha determinado que dicha onda fue producida en las etapas finales de la fusión de dos hoyos negros probablemente situados en el centro de sus respectivas galaxias. En esta detección, LIGO estimó que la energía liberada en forma de ondas gravitacionales durante los momentos finales de la fusión de los agujeros negros fue diez veces mayor que la luminosidad combinada de todas las galaxias en el universo observable.

Como mencionamos antes, se cree que la mayoría de las galaxias, incluyendo la Vía Láctea, contienen un agujero negro supermasivo en su centro - con masas de millones o incluso miles de millones mayores a la masa del Sol. También existen candidatos a agujeros negros con masas más pequeñas (desde unas pocas veces, hasta unas docenas de veces la masa del Sol) que podrían proceder de los restos de estrellas muertas que han sufrido una explosión catastrófica conocida como supernova al colapsar su núcleo. Aunado a este substancial progreso en la observación indirecta de agujeros negros, nuestro conocimiento teórico de ellos ha sido drásticamente mejorado. Por ejemplo, en años recientes se han logrado avances importantes en la

capacidad numérica para modelar pares de agujeros negros con órbitas cercanas hasta su fusión final. De hecho, son estos modelos numéricos los que han permitido crear patrones de ondas gravitacionales muy precisos - es decir, modelos de ondas gravitacionales emitidas por agujeros negros que evolucionan a medida que se acercan para finalmente fundirse en un único y mayor agujero negro - de acuerdo con las predicciones de la relatividad general.

El procedimiento para extraer información física de los objetos que colisionan, de cuál es su masa, la trayectoria seguida por los objetos, y a qué distancia ocurre dicha colisión? es una muestra del entendimiento que hemos logrado de las leyes físicas de la naturaleza; LIGO cuenta con un extenso banco de datos de modelos de colisiones de hoyos negros de diferentes masas y órbitas. Cada uno de estos modelos tiene asociado un patrón de las ondas gravitacionales que se van generando a medida que se va produciendo la fusión de ellos, hasta la fusión completa. Los espectros son diferentes entre sí, sin embargo hay patrones comunes a toda colisión sobre todo en las etapas primeras y finales de la fusión. Estos patrones se usan para identificar una primera señal, que podría considerarse promisoria. Las primeras detecciones, permitieron descubrir el evento candidato solo tres minutos después de que la señal llegase a los detectores. Los datos más importantes como son la forma del espectro y la amplitud de la onda gravitacional fueron comparados con los espectros del banco de modelos de onda predichos de forma teórica con el objetivo de encontrar el modelo

de onda más similar a los datos observados. Cuando se compara el espectro de la onda gravitacional GW150914 detectada con una onda gravitacional generada en la coalescencia de dos binarias de agujeros negros consistentes con los predichos por los cálculos usando la relatividad general, la coincidencia es asombrosa.

El análisis de los espectros de ondas gravitacionales muestra una fase de evolución suave, cuando los dos agujeros negros se aproximan; la fusión y la fase final de estabilización en la que el nuevo agujero negro remanente oscila brevemente hasta su estabilización. Más aun, los análisis de GW150914 corresponderían a la fusión de dos agujeros negros con masas de aproximadamente 36 y 29 veces la masa del Sol respectivamente y en el que el nuevo agujero negro tendría una masa alrededor de 62 veces la del Sol. Se infiere también que el agujero negro remanente está rotando. Finalmente, los resultados muestran que GW150914 ocurrió a una distancia de más de mil millones de años luz, hace mil millones de años.

Si se comparan las masas de los agujeros negros antes y después de la fusión, resulta que la coalescencia convirtió aproximadamente 3 veces la masa del Sol (seis millones de billones de billones de kilogramos) en energía en forma de onda gravitacional, liberada en una fracción de segundo. Por comparación, el Sol emite aproximadamente cuatro mil millones de kilogramos de radiación electromagnética por segundo. Por tanto, el pico de energía liberado por GW150914 fue más de seis veces ma-

yor que la luminosidad de todas las galaxias en el universo observable.

Un análisis más profundo del espectro indica que los dos objetos involucrados en esta fusión estuvieron separados a unos cientos de kilómetros justo antes de fusionarse, es decir, cuando la frecuencia de la onda gravitacional era aproximadamente de unos 150 Hz. Los agujeros negros son los únicos objetos conocidos lo suficientemente compactos como para estar tan cerca sin fusionarse. Así pues, una pareja de estrellas de neutrones no sería lo suficientemente masiva, y una pareja compuesta por una estrella de neutrones y un agujero negro se habría fusionado a una frecuencia menor que 150 Hz.

Este importante descubrimiento marca el inicio de una excitante nueva era en la astronomía y, al mismo tiempo, abre una ventana de observación al universo totalmente nueva en forma de ondas gravitacionales. Es posible entonces estudiar una especie de radiación gravitacional de fondo que nos dé información de cómo ha sido la evolución de las galaxias dominadas por hoyos negros masivos en el centro. Con el gran número de detecciones de ondas gravitacionales que se espera lograr en el futuro, se puede hacer el análisis del espectro de masas de los hoyos que colisionan y cuantificar la tasa de colisiones en función del tiempo. Esta tasa podría estar estrechamente ligada a la historia de fusión de galaxias e incluso de cuásares. Por otra parte, estas detecciones abren la posibilidad de poder construir una teoría gravitacional cuántica que nos ayude a resolver el misterio

rio del origen mismo de la Gran Explosión, y entender qué pasa con la materia en el interior de los hoyos negros (Penrose, 2003; Thorne, 2003).

A la fecha se han hecho al menos otras tres detecciones de ondas gravitacionales que se han asociado a la fusión de hoyos negros en las etapas tempranas del Universo. Esto en si mismo es relevante pues las colisiones entre galaxias, cuyos centros parecen

estar dominadas por hoyos negros supermasivos, e incluso la formación de nuevas galaxias en interacción sigue hoy en día. Una conclusión importante de la detección de ondas gravitacionales es que provee una evidencia más, aunque indirecta, de la existencia de hoyos negros. Esto nos conduce a otro descubrimiento de los últimos años muy importante en la teoría de formación de galaxias.

2.3 LA RADIACIÓN DE HAWKING: EVAPORACIÓN DE HOYOS NEGROS

Dos grandes teorías de la naturaleza, la Relatividad General y la Mecánica cuántica, han sido dos de los logros más impresionantes del intelecto humano. La primera describe a la perfección el macro universo y fenómenos asociados a masas grandes. La segunda describe el micro universo, a escalas subatómicas. El sueño de muchos físicos es poder unir estas dos teorías en una sola; la gravedad cuántica. Una unificación similar a la unificación del electromagnetismo y la fuerza nuclear débil. La gravedad cuántica nos ayudaría a estudiar mejor el origen del Universo, así como los fenómenos que ocurren en la periferia de un hoyo negro, e incluso extraer información de su interior.

Recordando que un hoyo negro es un objeto, o un espacio-tiempo asociado a él, cuya atracción gravitacional es tan intensa que ni la luz escapa de él. O en términos del equivalente geométrico de la gravedad, la curvatura del espacio tiempo es tan grande que ni siquiera la luz puede escapar.

La frontera entre la posibilidad de escapar y ser tragado por el hoyo negro, es el que hemos llamado horizonte de eventos. Es justamente en esta frontera donde se han dado los primeros pasos para unir la Relatividad General y la Mecánica Cuántica. Para lo que sigue es importante considerar que las propiedades importantes que describen un hoyo negro son; su masa, su carga eléctrica, y su momento angular (rotación).

En su visita a Moscú en 1973, Stephen Hawking tuvo la oportunidad de discutir con dos físicos soviéticos de gran renombre Zeldovich y Starobinski, sobre el principio de incertidumbre y sus implicaciones para la física de hoyos negros en rotación. Los físicos soviéticos habían llegado a la conclusión de que debido al principio de incertidumbre (de Heisenberg) los hoyos negros en rotación deberían crear y emitir partículas. Sin embargo Hawking (1975, 2003) fue más allá, y concluye que en el horizonte de eventos se produce radiación electro-

magnética que tiene una temperatura asociada que va como el inverso de la masa del hoyo negro. La radiación es generada por la producción de pares de partículas-anti partículas, que poseen cargas eléctricas opuestas, como por ejemplo el caso del electrón-positrón. En forma semántica decimos que se forma un par de materia-anti materia. Debido a ello, el cruce del horizonte de eventos de un flujo de antipartículas hace que estas se aniquilen con las partículas del hoyo negro, por lo que se esperaría una aniquilación de una fracción de la masa del hoyo negro, fenómeno propuesto por Hawking y conocido como evaporación del hoyo negro.

El principio de incertidumbre nos dice que propiedades como momento y posición de una partícula, por ejemplo no pueden conocerse al mismo tiempo. También existe un principio de incertidumbre entre la energía y el tiempo, que presentamos brevemente para resaltar la relevancia de las cantidades:

$$\Delta E \Delta t \simeq \frac{\hbar}{2}, \quad \hbar = 6.588 \times 10^{-22} \text{ MeV}$$

Donde ΔE es la indeterminación en la energía y Δt es la indeterminación en el tiempo. Por ejemplo, si la vida media de una partícula es de 10^{-22} seg, la indeterminación en su energía es de unos 3,3 MeV. Ahora, para entender la radiación de Hawking hay que entender que el vacío cuántico no se refiere al vacío (o ausencia de materia) de una región cualquiera del espacio. Donde vacío se entiende como los niveles más bajos de

energía que puede tener un sistema. Este aparente vacío, en realidad está lleno de pares de partícula-antipartícula, las cuales llegan a condensarse en un instante tan corto de tiempo que no violarían los límites de la conservación de energía. Por ejemplo, un protón y un antiprotón pueden existir solo 10^{-24} segundos antes de desaparecer otra vez en el vacío.

En suma, el campo gravitacional tan intenso de los hoyos negros puede crear una gran cantidad de partículas y antipartículas sin violar la conservación de la energía. Cuando se crea una partícula y antipartícula, y debido a la carga eléctrica de los hoyos la antipartícula es atraída hacia dentro del horizonte. Esta antipartícula ya no puede volver a salir y por tanto no se podrá aniquilar con su partícula. La que escapa es la que produce justamente la radiación de Hawking. La otra, generalmente la antipartícula interacciona con el hoyo negro formado de materia y empieza a aniquilarse. El hoyo empieza a perder masa. En consecuencia la radiación de Hawking significa que el agujero negro pierde masa y se hace cada vez más pequeño, se evapora y desaparece del universo.

Durante cerca de 40 años se ha debatido sobre la posibilidad real de detectar esta radiación. El problema radica en que su temperatura depende del inverso de la masa, y generalmente los hoyos negros equivalen a varias veces la masa del Sol. Suponiendo que un hoyo negro tuviera la masa del Sol, la temperatura de su radiación Hawking sería de apenas de $6 \times 10^{-9} \text{ K}$, mientras que para un hoyo negro con la masa de la luna

de 4.5×10^{22} kg la temperatura sería de 2.7K. Al recordar que la temperatura de la radiación de fondo es de 2.7K, por lo que la radiación sería imperceptible y sería opacada por la radiación de fondo. Y la situación empeora para hoyos negros supermasivos con masas arriba de 30 masas solares.

Ante la imposibilidad de poder observar la radiación de Hawking directamente, Unruh (1981) sugirió probar la existencia de dicha radiación experimentalmente creando el equivalente de un horizonte de eventos, de tal forma que este horizonte estuviera sujeto a las fluctuaciones cuánticas del vacío. Recientemente, Steinhauer (2014, 2016) ha logrado “construir” la versión acústica de tal horizonte de eventos experimentalmente utilizando un gas superfrío de átomos de Rb. La temperatura del gas, apenas arriba del cero absoluta, garantiza que los átomos tengan desplazamientos muy pequeños de tal forma que la velocidad del sonido en este medio está apenas arriba de de 0.5 mm/seg. Debido a esto, “partículas” llamadas fonones (perturbaciones de sonido) son atrapadas en el fluido que se mueve más rápido que el sonido. Imposible de escapar.

Es posible crear los llamados hoyos negros acústicos a través de la condensación de Bose-Einstein, que es un estado físico donde la materia se comporta como un

todo y no como aglomeración de elementos individuales, fenómeno que se da a temperaturas muy cercanas al cero absoluto. La gravitación desde el punto de vista de la Relatividad General y el condensado de Bose-Einstein son dos conceptos completamente diferentes, cuya única coincidencia es la formación de un horizonte de eventos. El horizonte de eventos asociado a los hoyos negros, *predice* la producción de pares de partículas debido a fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo, mientras que el horizonte de eventos del llamado hoyo negro acústico explica la aparición de perturbaciones de sonido, por fluctuaciones cuánticas del vacío, de las cuales, algunas escapan de la frontera que limita la velocidad del sonido, y otras que quedan atrapadas sin poder escapar. Este último experimento da una probabilidad muy grande de la existencia de la radiación de Hawking y de la evaporación de hoyos negros, por ser las fluctuaciones cuánticas del vacío el único requisito para la producción de pares.

En el futuro tendrá que estudiarse si las fluctuaciones cuánticas del vacío están supeditadas a solo la vecindad de hoyos negros, o campos gravitacionales muy intensos, y si ese mecanismo es universal siempre que exista una frontera de donde no podamos extraer información más allá del horizonte de eventos.

2.4 LA RELEVANCIA DE LA CONSTANCIA DE LA RAPIDEZ DE LA LUZ Y SUS RETOS

Un problema fundamental de la cosmología física es determinar, de manera precisa,

la distancia a los objetos que observamos a través de telescopios terrestres y espa-

ciales, en diversos tipos de luz. Mucha de nuestra concepción moderna del Universo proviene justamente de estudiar estos objetos y su evolución a través del tiempo, asociado ineludiblemente a la determinación de distancias. Mientras más distantes, más viejos serán los objetos cósmicos bajo observación. Más allá del método del paralaje y el rebote de señales de radio y microondas que son buenos determinadores de distancia a escalas de planetas y estrellas, no contamos con un método infalible, libre de errores, libre de toda suspicacia que nos determine la distancia a las fuentes de luz que emanan fotones. Incluso el método, muy preciso por cierto, de determinar la distancia a un objeto rebotando un láser o una onda de microondas y midiendo el tiempo que tarda en ir y regresar descansa en uno de los postulados más firmes en los que Einstein basa sus teorías de la relatividad especial y general; no hay señal que pueda propagarse más rápido que la velocidad de la luz. Este postulado cuya validez a sido cuestionada largo tiempo ha perdurado durante más de un siglo, aunque actualmente se encuentra bajo un riguroso escrutinio científico. Buena parte de lo que hemos discutido aquí descansa en el hecho de la invariabilidad de la rapidez de la luz en el vacío.

Hoy en día los astrofísicos han entendido las condiciones generales iniciales que forman las estrellas, y que su evolución hasta su muerte, depende de la masa con la cuál se forman. Esto nos ha llevado a clasificar a las estrellas en diversos grupos, por su edad, su composición química, su formación aislada, en brotes lentos o violentos

en cúmulos. A través de la termodinámica y la mecánica cuántica se sabe que una estrella no puede considerarse como tal si no genera energía propia a través de reacciones nucleares que generen energía para transformar Hidrógeno en elementos más pesados. Conocemos los límites inferiores y superiores en la masa que pueden formar estrellas. Estos límites son aproximadamente $1.4M_{\odot} < M^* < 100M_{\odot}$, donde M_{\odot} es la masa de nuestro Sol. Mientras más masiva nazca una estrella es menor su tiempo de vida pues quema rápidamente el H en He para evitar su colapso. Así, hemos aprendido de la existencia de estrellas en equilibrio como el Sol, enanas blancas, gigantes rojas, T-tauri, Haro-Herbing, δ -scuti, estrellas de neutrones, blue stragglers, enanas cafés, supernovas y hoyos negros, de regiones y mecanismos para mantener la formación de estrellas constantemente o disparar un brote violento de nuevas estrellas.

Para determinar con exactitud la distancia a los objetos cósmicos, necesitamos conocer fuentes de luz estándar, cuyo brillo solo se vea afectado por la distancia a nosotros. Las supernovas del tipo Ia se caracterizan por ser una fuente luminosa que tiene un brillo intrínseco debido a que ha gastado toda su fuente de energía que es el hidrógeno, necesaria para poder detener el colapso y eventual explosión de la estrella en una nova. Como hemos dicho antes, estas novas forman la base fundamental en la cual inferimos la existencia de energía oscura y la expansión acelerada del espacio-tiempo.

¿Es la velocidad de la luz constante en

tiempo y en espacio?

La historia sobre trabajos experimentales y teóricos tratando de probar o desmentir uno de los postulados de la Teoría Especial y General de la Relatividad, la constancia de la luz en el vacío, tiene una larga y rica historia (e.g. Guo y Guo, 2013; Rouf, 2009). De acuerdo a las ecuaciones de Maxwell que describen todos los efectos electromagnéticos la velocidad de la luz resulta de forma natural de dos constantes fundamentales; la permitividad eléctrica ϵ_0 y la permeabilidad magnética μ_0 . Estas son dos "propiedades inherentes" al vacío o al espacio-tiempo donde se propagan. Por supuesto, el valor de la velocidad de la luz puede cambiar al considerar su propagación en medios diferentes como el agua, o de otro tipo que tendrían valores diferentes ϵ y μ . Esto es un hecho bien entendido. Desde el punto de vista más fundamental de la derivación de la ecuación de onda, se encuentra que la velocidad de propagación de la luz queda determinada por $c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$. Si se llegara a determinar que la velocidad de la luz varía, significaría que las "constantes fundamentales" ϵ_0 y μ_0 tendrían que cambiar, lo que sugeriría que las propiedades inherentes al espacio-tiempo deberían cambiar con el tiempo.

Hasta hace pocos años, los trabajos teóricos han mostrado lo robusto del postulado de Einstein y no se ha posible determinar la razón fundamental de su validez. Por el contrario, desde hace muchos años diversos estudios observacionales de cuasares, radiogalaxias y otros objetos han mostrado la potencial existencia de fuentes superlumínicas incluso dentro de nuestra galaxia

(Rodríguez y Mirabel, 2004; Gubbay, 1969). Los datos observacionales han sido sometidos a rigurosos análisis estadísticos y se ha determinado su validez en muchos casos. En otros, los puntos más frágiles para llegar a la conclusión de la existencia de fuentes que se mueven más rápido que la velocidad de la luz parece provenir de los límites de detectabilidad de los aparatos usados y la incertidumbre en la dirección de movimiento de las fuentes. En este punto, debemos recordar que el efecto Doppler nos permite hacer mediciones de la velocidad de un objeto solo en la dirección que une al observador con la fuente (velocidad radial). Si el objeto se mueve en otra dirección, solo veremos la componente de su velocidad en la dirección radial. Este es el punto crucial sobre la interpretación de los movimientos superlumínicos. Suponga por un momento que los objetos detectados son superlumínicos, el postulado de Einstein no sería válido y cambiaría mucha de la física con la que se ha llevado a comprender el Universo. Aunque este fuera el caso, las observaciones lo único que nos dirían es que necesitamos nuevas teorías pero ¿no darían explicación al porque la velocidad de la luz debería cambiar y en qué forma? Si por el contrario, las observaciones tienen sesgos estadísticos y de mediciones, la velocidad de la luz seguirá siendo considerada como constante.

Recientemente, Giovannini et al. (2014) han hecho un descubrimiento muy importante en el muestran que la velocidad de la luz, que es de 300 000 km/seg, podría ser un límite superior. Las ondas electromagnéticas están descritas por un campo

eléctrico y un campo magnético oscilatorios que se desplazan siguiendo su llamado vector de onda o de propagación. Estos son los parámetros estructurales de la luz. Lo que han hecho Giovannini et al., es modificar dicha estructura con condiciones que potencialmente podrían encontrarse en diferentes regiones del Universo. Si bien, el experimento se llevó a cabo utilizando pulsos muy pequeños de luz (en duración) da origen a nuevas preguntas sobre la constancia de la velocidad de la luz.

Otros dos trabajos muy importantes, de Urban et al. (2013) y de Sánchez-Soto (2013), muestran también que la velocidad de la luz puede ser variable en el tiempo. Ambos trabajos intentan derivar la velocidad de la luz a partir de las propiedades cuánticas del espacio mismo. Aunque ambos proponen mecanismos diferentes, la idea central es que la velocidad de la luz puede cambiar al cambiar las suposiciones de cómo las partículas elementales interactúan con la radiación. En ambos casos el espacio-tiempo se supone como un espacio lleno de partículas “virtuales”. Recordemos que estas son pares partícula-antipartícula surgidas de fluctuaciones del vacío, cuya vida media es de fracciones de segundo lo suficiente para no violar el teorema de conservación de energía, y que al separarse se vuelven partículas reales, detectables. Si no se separan se aniquilan y no es posible detectarlas directamente. Los fotones libres pueden ser capturados y re-emitidos por las partículas virtuales. Por tanto, las energías de estas partículas, específicamente la cantidad de carga eléctrica que portan, afectan la velocidad de la

luz. Es decir, el fotón es frenado o acelerado en pequeñas cantidades por la interacción con las partículas virtuales. En este proceso, los fotones pueden ser acelerados o desacelerados siendo el resultado neto variaciones de 0.05 femtosegundos (un femto es 10^{-15}) por metro cuadrado de vacío. Estas variaciones, o incluso mayores solo pueden ser detectadas si se consideran escalas cosmológicas de fuentes muy energéticas, por lo cual se han propuesto los estallidos de rayos gama.

Por otra parte, en el trabajo de Sánchez-Soto y Leuchs (2013) muestra que el número de especies existentes de partículas elementales con carga eléctrica en el Universo es lo que da origen a la velocidad de la luz. De acuerdo al Modelo Estándar de Partículas Elementales deben existir solo 9 especies; electrón, muon, tauon, seis tipos de quarks, fotones y el bosón W. En su teoría, Sánchez-Soto calcula que debe haber del orden de 100 especies diferentes de partículas cargadas eléctricamente. La carga es el elemento primordial dentro de su teoría ya que existe una cantidad llamada impedancia que depende de la suma de todas las cargas. Esta impedancia a su vez depende de la permitividad ϵ_0 y de la permeabilidad μ_0 del vacío. Es decir, cambiando estas cantidades cambiará la velocidad de la luz. Aparte de predecir una mayor cantidad de especies de partículas, hecho que ya hemos abordado arriba en el texto, sugieren que una gran cantidad de partículas cargadas, masivas, puede existir. Estos fenómenos solo serían detectables a escalas cosmológicas e involucrando niveles de energía a los que aun no se tiene acceso.

2.4 LA COSMOLOGÍA DE PRECISIÓN: DIALOGO ENTRE LA TEORÍA Y LAS OBSERVACIONES

En la historia reciente de la cosmología computacional, o de simulaciones numéricas, se han realizado simulaciones como Bolshoi (Klypin et al. 2011), MultiDark, Millenium, etc., y a finales del 2013 se liberaron los datos de Illustris, la simulación numérica más grande realizada con 10^{10} partículas (Genel et al. 2014). Se realizó en supercomputadoras de Francia, Alemania y Estados Unidos y tomó 19 millones de horas de CPU. Con estos resultados, es posible estudiar la evolución del universo desde que tenía unos 300 mil años de existencia, hasta nuestros días.

Todas las simulaciones reproducen muchas de las características observables del universo, como son su homogeneidad y su isotropía, la formación de filamentos y paredes de galaxias y de burbujas. Su precisión permite hacer predicciones como las que discutimos en seguida. De aquí se acuña el término cosmología de precisión, debido a que los cosmólogos observacionales y los teóricos han empezado a determinar resultados razonablemente concordantes.

Por ejemplo, Illustris sugiere la existencia de una gran cantidad de subestructuras orbitando los pozos de potencial gravitacional producidos por los objetos más masivos. La manera como se ensamblan estos sistemas, y la cantidad de galaxias enanas y sus propiedades es parte de la evolución temporal que se desea entender. Tales agregados de galaxias pueden ser tan pequeños como en nuestro Grupo Local

que contienen decenas de miembros, hasta grandes cúmulos que contienen del orden de diez mil subestructuras mucho más pequeñas. Adicionalmente, se ha medido la distribución de satélites en función de la distancia, a los 10 objetos más masivos de la simulación, y se encuentra que difiere sustancialmente de la distribución sólo de materia oscura. Es decir, muchos satélites sobreviven en la región central ante la presencia de gas y estrellas que las hace más resistentes a ser destruidas por fuerzas de marea. En este punto, Illustris predice que la distribución de satélites no cambia mucho con el tiempo.

Al ser Illustris una simulación de alta resolución numérica, se tiene toda la información evolutiva de las estructuras formadas. Por eso mismo la información se puede sesgar para reproducir 'errores' involuntarios producidos de las observaciones terrestres o espaciales, y a qué tipo de información resulta más difícil acceder. También, se podrá hacer una determinación detallada de los parámetros cosmológicos de nuestro modelo de universo, y se podrá experimentar con dichos 'sesgos controlados' que permitirán establecer qué parámetros son más propensos a errores. Más aún, con la implementación de gas (y por tanto de flujos de material, y turbulencia) en la simulación, la próxima generación de Illustris será hidrodinámica. Podremos ver la evolución del gas a grandes escalas y en un tiempo de Hubble. Se podrá investigar si los espacios entre los voids están real-

mente vacíos, o como se sospecha pueden estar ocupados por una gran cantidad de subestructura de muy bajo brillo superficial. Es decir, podrían estar dominados por galaxias enanas que al parecer son las que

más favorecen la formación de estructura. La última evidencia que se tiene es que están ocupados por objetos enanos que podrían ser galaxias enanas o bien en vías de formación.

3. CONCLUSIONES

La cosmología moderna ha hecho sus avances más significativos en los últimos 100 años, que en toda la historia de la humanidad. Vivimos tiempos privilegiados en los cuales somos testigos de detecciones o descubrimientos que nos ayudan a construir nuevas concepciones del Universo. Hoy contamos con la tecnología capaz de permitir realzar los sentidos que tenemos como seres humanos. Muchos científicos creemos que distamos mucho de tener una visión completa del Universo, pero estamos convencidos que en lo general nuestras teorías son correctas. Es imposible no imaginar lo qué será la cosmología dentro de otros 100 años, dado que en la actualidad se planean nuevos experimentos, nuevos colisionadores, nuevos telescopios, etc. El Universo es tan grande y complejo que permite y exige un análisis completo de él ya sea desde el punto de vista científico, humano, filosófico y teológico por parte de los expertos de cada área. Y debe ser responsabilidad nuestra transmitir estas ideas de forma honesta a las nuevas generaciones, o a los que no tienen fácil acceso

a estas discusiones. Es necesario transmitir este conocimiento aceptando las limitaciones que a cada uno de estas áreas nos corresponde en dialogo abierto.

Agradecimientos:

Agradezco profundamente al Comité Organizador de este IX Congreso Latinoamericano de Ciencia y Religión (UPAEP, Puebla, 2017), quienes con su invitación a hablar de cosmología me obligan a aprender los conceptos básicos pero fundamentales de la física, a veces muy abstractos, y hacerlos accesibles a un auditorio interdisciplinario. Espero haberlo logrado, sino que el Universo me lo demande y le pediría disculpas por haber dicho tanta insensatez en su nombre. En este encuentro tuve la fortuna de reencontrarme con amigos filósofos muy entrañables. De uno de ellos, Del Pomposo, aprendí que para facilitar el diálogo entre científicos, filósofos y teólogos es necesario cultivarse como un poliglota epistémico. ¡Y a trabajar que los secretos del Universo no se descubren solos!

REFERENCIAS:

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_space_telescopes#References

AARDSMAA, G., ALLEN, R.C., ANGLINC, J.C., BERCOVITCH, C., CARTER, L.C., CHEN, N., ET AL. (1987)

"A HEAVY WATER DETECTOR TO RESOLVE THE SOLAR NEUTRINO PROBLEMA". PHYSICS LETTERS B, 194, No. 2: 321-325.

ABBOT, B.P., ET AL. (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger". Physical Review Letters, 116, 061102.

ADHUKARI, R., AGOSTINI, M., ANH KY, N., ET AL. (2017). "A white paper on KeV sterile neutrino Dark Matter," submitted to Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. arXiv:1602.04816v2

ALBRECHT, A. Y STEINHARDT, P.J. (1982). "Cosmology for Grand Unified Theories with Radiatively Induced Symmetry Breaking," Phys. Rev. Lett. 48, 1220.

ATLAS COLLABORATION, "OBSERVATION OF A NEW PARTICLE IN THE SEARCH FOR THE STANDARD MODEL HIGGS BOSON WITH THE ATLAS DETECTOR AT THE LHC". (2012). Phys. Lett. B, 716(1): 1-29.

CMS COLLABORATION, "OBSERVATION OF A NEW BOSON AT A MASS OF 125 GeV WITH THE CMS EXPERIMENT AT THE LHC," (2012). Phys. Lett. B, 716(1): 30-61.

DUNKLEY, J., KOMATSU, E., NOLTA, M. R., SPERGEL, D. N., LARSON, D., HINSHAW, D., PAGE, L., C. BENNETT, C., GOLD, B., Y JAROSIK. N. (2009). "Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe". The Astrophysical Journal Supplement Series, 80, No. 2: 306-329.

GARFINKLE, D. Y SENOVILLA, J. M. M (2015), "The 1965 Penrose singularity theorem", Class. Quant. Grav., 32 (12): 124008.

GENEL S., M. VOGELSBERGER, V. SPRINGEL, D. SIJACKI, D. NELSON ET AL. (2014). "Introducing the Illustris Project: the evolution of galaxy populations across cosmic time". ArXiv: 1405.3749v2[astro-ph.CO]

GIOVANNINI, D., ROMERO, J., POTOCEK, V., FERENCZI, G., SPEIRITS, F., , BARNETT, S.M., FACCIO, D., Y PADGETT, M.J. (2014). "Photons that travel in free space slower than the speed of light". arXiv:1411.3987v1.

GRIBOV, V., Y PONTECORVO, B. (1969). "Neutrino astronomy and lepton charge," Physics Letters B, vol. 28, no. 7:493-496.

- GOTTLÖBER, S., LOKAS, L. E., KLYPIN, A., AND HOFFMAN, Y. (2003). The estructure of Voids. *Monthly Notices of the RoyL Astronomical Society*. 344: 715-724.
- GUBBAY, J.S., LEGG, A.J., ROBERTSON, D.S., MOFFET, A.T., ETERS, R.D. Y SEIDEL, B. (1969). "Variations of Small Quasar Components at 2,300 MHz". *Nature*. 224 (5224): 1094–1095.
- GUTH, A.H. (1981). "The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", *Phys. Rev. D* 23, 347.
- GUO, K. Y GUO, C. (2013) "Review of the Constancy of the Velocity of Light from Innate Character of Lorentz "Local time" , *JOIRES* 4(2), pp. 472-475. ISSN: 2141-8225.
- HAWKING, S. W. (1975). "Particle creation by black holes", *Commun. Math. Phys.* 43: 199–220
- HAWKING, S. W. (2003). "Sixty years in a nutshell". *The Future of theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Sthepen Hawking's 60th Birthday*. Gibbons, G. W., Shellard, E. P. S. And Rankind, S. J. Editors. Cambridge University Press, 2003. ISBN: 0-521-82081-2.
- HAWKING, S., Y ELLIS, G. F. R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-09906-4.
- KŃYPIŃ, A. A., TRUJILLO-GÓMEZ, S., Y PRIMACK, J. (2011). "Dark matter halos in the standard cosmological models: Results of the Bolshoi simulation". *ApJ.*, 740: 102. 17 Pp.
- LINDE, A. (1982). "A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution Of The Horizon, Flatness, Homogeneity, Isotropy And Primordial Monopole Problems", *Phys. Lett. B* 108, 389.
- NELSON, D., PILLIPICH, A., GENEL, S., VOGELSBERGER, M., SPRINGER, V., TORREY, P., RODRÍGUEZ-GÓMEZ, V., SIJACKI, D., SNYDER, G. F., GRIFFEN, BENDRAN., MARINACCI, F., BLECHA, L., SALES, L., XU, DANDAN AND HERNQUIST, L. (2015). *The Illustris Simulation: Public Data Release*. arXiv: 1504.00362v02 [astro-ph.CO].
- PENROSE, R. (1965), "Gravitational collapse and space-time singularities", *Phys. Rev. Lett.*, 14: 57.
- PENROSE, R. (2003). "The problem of spacetime singularities: implications for quantum gravity?". *The Future of theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Sthepen Hawking's 60th Birthday*. Gibbons, G. W., Shellard, E. P. S. And Rankind, S. J. Editors. Cambridge University Press, 2003. ISBN: 0-521-82081-2.
- POTTGEN, R. (2016). "The Standard Model Particle Physics". En *Serch for Drak Matter with*

- ATLAS. Springer International Publishing Switzerland, 2016. Springer Theses. DOI 10.1007/978-3-319-41045-6_2
- RODRÍGUEZ, L. F. Y MIRABEL, F. (1995). "Movimientos superlumínicos en nuestra galaxia". Ciencias E-journal, 40. Pp 20-25.
- ROULF, A. (2009). "On the constancy of the light speed". arXiv0911.2878v1.
- SÁNCHEZ-SOTO, L. L., Y LEUCHS, G. (2013). "A sum rule for charged elementary particles". Eur. Phys. J. D. DOI: 10.1140/epjd/e2013-30578-8
- SMOOT, G. F., BENNETT, C. L., KOGUT, A., WRIGHT, L., AYMÓN, J., BOGCESS, N., CHENG, E., DE AMICI, C., GULKIS, S., HAUSER, M., HINSHAW, G., JACKSON, P., JANSSEN, M., KAITA, E., KELSALL, T., KEEGSTRÁ, P., LINEWEAVER, W., LOEWENSTEIN, K., LUBIN, P., MATHER, J., MEYER, S., MOSELEY, S., MURDOCK, T., ROKKE, L., SILVERBERG, R., TENORIO, L., WEISS, R., Y WILKINSON, D. (1992). "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps". The Astrophysical Journal, 396, L1-L5.
- SPIRO, M. (1995). "Dark Matter". Nuclear Physics B- Proceedings Supplement. 43, Vol. 1-3: 100-107.
- STEINHAEUER, J. (2014). "Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analogue black hole laser". Nature Phys. 10: 864-869
- STEINHAEUER, J. (2016). "Observation of quantum Hawking radiation and its entanglement in an analogue black hole". Nature Phys. (2016).
- THORNE, K. (2003). "Warping spacetime". The Future of theoretical Physics and Cosmology: Celebrating Stephen Hawking's 60th Birthday. Gibbons, G. W., Shellard, E. P. S. And Rankin, S. J. Editors. Cambridge University Press, 2003. ISBN: 0-521-82081-2.
- LEDERMAN, L. AND TERESI, D. (1993). The God particle. If the universe is the question, what is the answer. New York: Dell Publishing. 434p.
- MCDONALD, A. B., KLEIN, J. R. AND WARK, D.L. (2003). "Solving the neutrino problema". Scientific American, April: 22-31.
- TINKER, J. L., Y CONROY, C. (2009). "The void phenomenon explained". The Astrophysical Journal 691: 633-639.

URBAN, M., COUCHOT, F., SARAZIN, X., Y DJANNATI-ATAI, A. (2013). "The quantum vacuum as the origin of the speed of light". Eur. Phys. J. D. DOI: 10.1140/epjd/e2013-30578-7

UNRUH, W. G. (1981). "Experimental black hole evaporation?". Phys. Rev. Lett. 46: 1351.

