

ARTÍCULO

EL COSMOS: ENERGÍA OSCURA Y MATERIA OSCURA

Axel de la Macorra y Jorge L. Cervantes Cota

El Cosmos: Energía Oscura y Materia Oscura

Resumen:

En este trabajo se presenta el conocimiento actual de nuestro universo así como su evolución desde el día de hoy a un inicio en donde el universo era mucho más pequeño y frío. Se argumenta que son tanto las observaciones cosmológicas como los modelos teóricos los que permiten interpretar a los mediciones. Se hace un énfasis especial en la Energía Oscura y la Materia Oscura que entre ambas conforman más del 96% del contenido de energía de nuestro universo hoy en día y se dan posibles explicaciones de estas sustancias.

Palabras Claves: Universo, Cosmología, Energía Oscura, Materia Oscura

Our Cosmos: Dark Energy and Dark Matter

Abstract:

We present the up to date knowldge of our Universe and its evolution from present day to its initial state when it was much smaller and colder. We argue that it is the cosmological observations together with the theroetical background that allows for a correct interpretation of the physical measurements. We put special interest in explaining Dark Energy and Dark Matter, which conform up to 96% of the energy content of our Uiniverse, at present time and we discuss diferent possible explanation of the nature of Dark Energy and Dark Matter.

Keywords: Universe, Cosmology, Dark Energy, Dark Matter

Introducción

La visión de nuestro universo ha ido cambiando conforme las ideas religiosas o filosóficas y las observaciones cosmológicas han ido evolucionando. La perspectiva del universo ha sufrido grandes cambios a lo largo de nuestra historia. Tan sólo hace doce años no sabíamos de la existencia de la Energía Oscura, que conforma al 74% de la energía de nuestro universo, ni que éste crece a pasos cada vez mayores. Hace cien años, nuestra imagen del universo era aún más incompleta y menos exacta. Los científicos en esa época creían que nuestra galaxia, La Vía Láctea, era todo el universo. Era como una isla, un gran conjunto de estrellas, inmersa dentro un espacio vacío e infinito. Se creía que el universo era eterno y estático. La idea de un universo en expansión era impensable. Hoy en día sabemos, gracias a poderosos telescopios, que nuestra galaxia es una más de las 400 mil millones de galaxias dentro de nuestro universo observable

y cada galaxia cuenta con aproximadamente 100 mil millones de estrellas. Un número nada despreciable.

La concepción del cosmos ha ido evolucionando a través de los siglos y través de los pueblos. En la historia occidental, con Aristóteles, y más tarde con Claudio Ptolomeo se creía que la Tierra era el centro del universo y que alrededor de ella se movían los planetas y estrellas, situados en cascarones esféricos, y más al fondo existían las estrellas lejanas fijas. Fue Nicolás Copérnico, hace cinco siglos, quien formuló que la Tierra no es el centro de nuestro sistema solar, sino el Sol. Con Copérnico se inicia la astronomía moderna, y fue pieza clave para el renacimiento científico, que estaba en ciernes en esa época. Poco después, Galileo Galilei, hace exactamente cuatrocientos años, construyó y observó por primera vez el firmamento a través de un telescopio, iniciando la época moderna de la astronomía. Sus primeras observaciones fueron los cuatro satélites más grandes de Júpiter, las llamadas lunas de Galileo – Ío, Europa, Ganímedes y Calisto – así como las montañas y valles de nuestra luna. Precisamente, han sido los nuevos telescopios y satélites equipados con instrumentos sensibles de alta tecnología que nos han dado una visión totalmente diferente de nuestro universo, no sólo desde de la visión de hace cien años sino inclusive a revolucionado nuestro entendimiento del universo en la última década. La cosmología moderna está basada en la famosa teoría de la Relatividad General (RG), formulada en 1915 por el físico más conocido del siglo XX, Albert Einstein, y es el pilar teórico para entender a nuestro universo. Esta teoría predice una interconexión estrecha entre la geometría del espacio y la materia-energía que éste contiene. La materia y la energía son originalmente dos conceptos diferentes, pero de acuerdo a la teoría de Relatividad Especial, también de Einstein, son convertibles el uno al otro, y esto se desprende de la famosa fórmula $E = mc^2$.

La teoría de la RG predice que la materia-energía deforman al espacio-tiempo y la curvatura de éste puede ser determinada ya sea por métodos geométricos o midiendo la cantidad total del contenido de materia-energía en el universo. Esta interrelación entre materia-energía y geometría es esencial en la descripción de nuestro universo. Cuando Einstein formuló la teoría de RG se creía que la gran estructura del cosmos estaba en reposo. Un universo estático de principio a fin. Einstein entonces intentó encontrar soluciones acordes con su nueva teoría, pero sólo encontraba modelos del universo en expansión. Las deseadas soluciones estáticas no se encontraron en la formulación original de la teoría, sino sólo si agregaba un elemento nuevo, permitido matemáticamente, pero no contemplado inicialmente: la constante cosmológica (CC). La CC permite varios tipos de soluciones a la RG, y entre ellas está la de un universo estático. La teoría así modificada, daba la explicación deseada de estaticidad. Sin embargo, pocos años más tarde, en los años 1920s, Edwin Hubble determinó que el universo estaba en expansión, mediante observaciones de dinámica galáctica. Esto le daba soporte a la formulación original de RG. Einstein después afirmó que la CC había sido el error más grande de su vida. Pero

veremos que a la postre Einstein estaba en lo correcto al introducir la CC, y ese “error” marcaría el advenimiento de una nueva física, que nos haría entender la evolución dinámica del universo presente. Sin embargo, la nueva CC postulada hoy en día tiene efectos notablemente diferentes a la idea original de Einstein, como veremos más adelante. A esta nueva constante cosmológica que domina hoy en día al universo la llamamos Energía Oscura.

Hubble midió las distancias y velocidades de galaxias cercanas y determinó que entre más lejos estaban mayor era su velocidad, y todas alejándose de nosotros. Si la distancia de una galaxia era el doble, entonces su velocidad de separación también. Esta velocidad se determina fácilmente midiendo el espectro de la luz de las galaxias, que no es más que el arco iris celeste, y Hubble observó que la luz tiene un desplazamiento hacia el rojo, indicando pérdida de energía, por lo que concluyó que estos objetos se alejan de nosotros. Este descubrimiento dio lugar al modelo de la Gran Explosión de nuestro universo. Todos los objetos se alejan de todos y nuestra posición no es ninguna particular dentro del universo. El aumento en la distancia entre los objetos no es debido al movimiento relativo sino al crecimiento del espacio entre ellos. Análogamente, si pintamos unos puntos en un globo y lo inflamos. Los puntos están fijos en el globo pero al inflarlo todos se separan. La expansión del universo no está en duda y dado que la fuerza de gravedad es atractiva la velocidad de expansión debería ser cada vez menor. La desaceleración quedaría determinada por la cantidad de materia en el universo. Entre mayor cantidad de masa, mayor fuerza de gravedad y mayor la desaceleración. Diez años atrás, el dilema que teníamos los cosmólogos era si la cantidad de masa en el universo era la suficiente para detener su crecimiento y para hacerlo recolapsar hasta llegar al Gran Colapso (Big Crunch) o si por el contrario, el universo crecería para siempre. Sin embargo, uno de los resultados más sorprendentes en la última década ha sido la observación de que nuestro universo no sólo está creciendo sino que lo hace de una forma acelerada. Esto se determinó en 1998 gracias a las mediciones de supernovas -que son grandes explosiones de estrellas-, realizadas simultáneamente por los grupos *Supernova Cosmology Project* (SCP) y por *High-Z Supernova Search Team* (HZT). Con las supernovas se pudieron determinar distancias y velocidades de objetos muy lejanos y esto permitió concluir que el universo se acelera desde hace relativamente poco tiempo. Este extraño comportamiento implica que debe haber algo muy diferente en el universo que lo domina y tiene una gran fuerza de repulsión antigravitacional. A este misterioso “algo” le hemos llamado energía oscura (EO). Energía porque es un ente no localizado en una región limitada del espacio -como sí lo hace la materia-, sino que está distribuida en todo el universo y constituye el 74% del total de la materia-energía del universo. Es oscura porque no la podemos ver, no emite luz, y esto nos obliga a inferir sus propiedades de forma indirecta, pero certera. La EO bien podría ser simplemente la famosa CC que Einstein había especulado “erróneamente” hace 90 años, pero sus consecuencias serían totalmente diferentes, no dejaría a un universo estático sino por el contrario le generaría un

crecimiento acelerado.

Pero, si la EO es tanto más cuantiosa que el resto de la materia-energía en el universo, ¿por qué no la habíamos percibido con anterioridad a 1998? ¿Por qué no la sentimos en la Tierra? La razón es que la EO, contrario a la materia ordinaria no forma grumos, no hay planetas ni asteroides de EO, y esto la hace mucho más difícil de ser observada. Aunque la EO representa un porcentaje muy alto de la energía del universo su densidad, ya sea que la midamos en el espacio sideral o en nuestras propias casas, es sumamente pequeña. Si, por ejemplo, la Tierra estuviera constituida en su totalidad por energía oscura, ésta pesaría menos que una pluma de canario (menos que una centésima de gramo). Por lo tanto la EO sólo se puede observar a distancias y volúmenes muy grandes. A pesar de que la EO no tiene grandes consecuencias dentro de nuestro sistema solar, y mucho menos en la Tierra, su efecto total genera la fuerza más intensa en el cosmos: genera espacio nuevo entre las estrellas, galaxias y cúmulos, alejándolos aceleradamente los unos de los otros.

Otra de las grandes incógnitas que ha surgido debido a la EO, es el porqué se manifiesta ahora; es decir, en tiempos cercanos, y no en el universo temprano ¿Es acaso una coincidencia? Si lo comparamos con otros sucesos importantes en la cosmología, como la formación de las primeras estrellas, átomos o núcleos atómicos, que se generaron cuando el universo tenía un tamaño de veinte, mil y 10 mil millones de veces más chico, respectivamente, la EO sólo se manifestó cuando éste tenía la mitad del tamaño actual. Parecería que vivimos en una época privilegiada y esto va en contra de nuestro principio cosmológico, a menos de que encontremos una explicación satisfactoria. De hecho si la EO oscura hubiera aparecido antes de la formación de las primeras estrellas, éstas no se hubieran podido formar nunca. Y por ende, ¡no estaríamos leyendo este texto! Nuestro planeta y sistema solar se formaron de polvo de estrellas que nacieron, vivieron y explotaron previamente en este mismo lugar del espacio. Estas estrellas generaron en su interior toda la gama de elementos pesados de la Tabla Periódica, como oxígeno, nitrógeno y carbono, y por supuesto a los átomos de nuestros cuerpos. Entonces nosotros somos estrellas, polvo de estrellas.

Historia del Universo

La estructura, el contenido de partículas y los diferentes tipos de energía en el universo han ido cambiando a lo largo de la historia del cosmos. En un principio no había estrellas ni planetas, ni siquiera átomos. Todo era mucho más pequeño y con una temperatura mucho más elevada. Hoy sabemos que la edad de nuestro universo es de aproximadamente 13.7 mil millones años. Si por ejemplo, la vida del universo fuera de un sólo día, en esta escala de tiempo el segundero tardaría 160 mil años en avanzar a la siguiente manecilla. Los primeros núcleos de los átomos se habrían formado en la primera billonésima parte de segundo, la primera estrella a los pocos segundos

de vida, las primeras galaxias habrían aparecido a la hora con 45 minutos y la Tierra a la 15va hora. Pero ¿Cómo podemos conocer la historia de nuestro universo? Por un lado sabemos, por las leyes de la física moderna, que no nos es posible viajar al pasado. Sin embargo, basta con mirar al cielo para que el pasado llegue a nosotros. Porque es eso precisamente lo que sucede cuando observamos a los objetos celestes. Tenemos la posibilidad de ver hoy en día, no sólo cómo es actualmente el universo cercano sino también podemos observar las diferentes etapas de su crecimiento. Ver al Sol es ir 8 minutos a atrás en el tiempo, ver el centro de nuestra galaxia es ir 50 mil años al pasado y ver a los quásares o galaxias más lejanas es ir casi a la infancia de nuestro universo, hace unos 13 mil millones de años. Entre más distancia haya recorrido la luz, nos trae información de tiempos más lejanos y de objetos que muy probablemente hoy en día ya no existen. Ver al espacio a diferentes distancias es tomar fotografías a diferentes tiempos, y esta información nos ha llevado a la reconstrucción de su historia. Hoy se observan grandes estructuras de materia en el firmamento: planetas, estrellas, agrupaciones de miles de millones o billones de estrellas -llamadas galaxias-, cúmulos de decenas y cientos de galaxias, y supercúmulos, extendidos en enormes volúmenes del espacio sideral del orden de 10^{23} km (10 con 23 ceros) que nos tomaría 100 mil millones de años en cruzarlo si pudiéramos viajar a la velocidad de la luz. Sin embargo, en un inicio el universo se encontraba constreñido en una región muy pequeña, con una gran cantidad de energía a una temperatura muy alta, formado por partículas elementales como electrones, quarks, neutrinos y fotones. Un estado inicial sui generis llamado la Gran Explosión (Big Bang, en inglés). A medida que el universo fue creciendo y enfriándose, los protones, luego los núcleos y después los átomos se formaron. Mucho tiempo después se crearon las estrellas, planetas y galaxias.

La luz del fondo cósmico

Posiblemente la medición de la luz de la radiación de fondo cósmica (RFC) es uno de los logros tanto observacional como teórico más importante. La RFC es la huella dactilar del universo y nos da información no sólo del tiempo en que se formó, sino también de las condiciones iniciales del universo mucho antes del primer segundo de vida. Como si fuera poco, dado que esta luz viene de distancias tan remotas y de momentos tan lejanos, en su viaje hasta nosotros va recabando a su paso información de las propiedades del universo. Las características generales de esta importantísima huella dactilar fueron calculadas teóricamente con anterioridad a su observación, usando el modelo de la Gran Explosión. La luz de la RFC proviene de la región más lejana y por lo tanto de la época más temprana de nuestro universo que podremos jamás ver, sin importar cuán potentes sean los telescopios o satélites futuros. Esto se debe a que toda la luz que había previamente interaccionaba con los electrones y protones de una manera muy eficiente y dejó de existir, aunque nueva luz se generaba. A medida que el universo se fue enfriando la temperatura bajó lo suficiente y la luz dejó de interaccionar, los electrones libres se combinaron con los

protones formando átomos neutros de hidrógeno (un protón y un electrón), los primeros átomos del universo, y cuando esto sucedió el universo tenía una edad de 380 mil años de vida. La RFC fue medida en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson. Ellos observaron un ruido en su antena de microondas, y después de examinar posibles fuentes de ruido, incluso hasta el ¡excremento de palomas! en la antena, dedujeron que era un *ruido* observado y proveniente de una fuente celeste, de origen extra galáctico. La interpretación correcta como radiación del fondo cósmico la dieron los científicos del grupo de Robert H. Dicke, que incluía a P. J. E. Peebles, P. G. Roll y D.T. Willkinsson, quienes habían estado buscando medirla en esa época; además del grupo de científicos rusos del grupo de Yaakov B. Zel'dovich de Moscú, que incluía a A. G. Doroshkevich y I. D. Novikov. La temperatura medida fue aproximadamente de -270° C, 3 grados sobre el cero absoluto. El tiempo pasó y hacia finales de los años 80s una versión moderna del experimento de Penzias y Wilson fue llevado a cabo. Este experimento fue comandado por uno de los autores de este artículo (GFS) y sus colaboradores y fue realizado con el satélite Explorador del Fondo Cósmico (COBE, por sus siglas en inglés). Así, comenzó una nueva era experimental, de alta precisión, en cosmología. El equipo de COBE a principios de los 90s reveló con gran exactitud que el universo es homogéneo e isotrópico, pero no totalmente. Las minúsculas anisotropías, de una parte en cien mil, descubiertas por COBE fueron las responsables de la posterior formación de estrellas, galaxias, cúmulos de galaxias, y de todas las macro-estructuras de nuestro universo actual. Además, COBE encontró un espectro de cuerpo negro de la RFC, lo cual indica que el universo temprano estuvo en equilibrio termodinámico, con (casi) la misma temperatura en todos lados y en un estado homogéneo. Estos fueron dos de los más importantes descubrimientos en la astronomía del siglo XX, motivo por el cual George F. Smoot -autor de este artículo- y John Mather se adjudicaron el Premio Nobel de Física 2006.

El origen de estas minúsculas anisotropías, predichas previamente por una etapa temprana de inflación y esenciales para la formación de estructura, se deben muy probablemente a las fluctuaciones primordiales de un campo cuántico el inflatón, el cual estaba presente en el universo temprano. Las teorías modernas de campos cuánticos, junto con modelos cosmológicos, ayudan a entender cómo es que las pequeñas fluctuaciones se desarrollaron para pasar a escalas cósmicas, permitiendo a COBE detectarlas ciento de miles de millones de años después. Este período temprano de inflación, es una etapa de crecimiento acelerado de nuestro universo, y no solo da origen a la formación de las perturbaciones primordiales, sino también, aunque parezca contradictorio, explica porque nuestro universo es tan homogéneo e isotrópico. La inflación fue postulada en la década de los 80's por Alan Guth y Andrei Linde y forma parte esencial del modelo cosmológico de la Gran Explosión.

El satélite COBE y otras pruebas cosmológicas, como los globos aerostáticos BOOMERANG y MAXIMA lanzados en la antártica a finales de los 90s, y más recientemente el satélite WMAP

lanzado en 2001, han confirmado estas características peculiares del origen de nuestro universo. La RFC no sólo trae información de las fluctuaciones primordiales sino también del comportamiento del universo en esa época. Diferentes regiones del espacio del universo sufrieron oscilaciones en su crecimiento, debido a la interacción entre los protones, electrones y luz justo antes de que se formaran los átomos de hidrógeno. La competencia entre la fuerza de gravedad, que trata de juntar a todas las partículas, y la fuerza de presión de la luz que lucha en contra, generó a estas oscilaciones. Por ejemplo, imaginemos que brincamos varias veces con unos resortes en los pies, nuestro peso comprime los resortes hasta que el resorte gana y rebotamos, para luego caer y volver a comprimir el resorte, y así sucesivamente. En este ejemplo, nuestro peso es la fuerza de gravedad, el resorte juega el papel de la presión de la luz y los brincos son las oscilaciones del cosmos. Así le sucedió al plasma primordial, imprimiendo en la luz y en la materia una huella dactilar única. Las oscilaciones de la luz fueron predichas mucho tiempo antes de que fueran medidas, pero las oscilaciones de la materia (BAO, por sus siglas en inglés) fueron calculadas recientemente y también ya fueron observadas en el año 2004. Otro éxito sorprendente y muy bello de la ciencia. Finalmente, uno de los principales resultados de las mediciones de la RFC es que se pudo establecer que la curvatura de nuestro universo es plana. Es decir, tres dimensiones espaciales rectilíneas. Esto se determinó al medir de manera precisa la distancia a la época de la emisión de la luz de la RFC y el tamaño del radio máximo en la primera oscilación (la altura del primer brinco), siendo el cociente de estas dos distancias la cantidad que determina la geometría del espacio.

En mayo de este año fue lanzado el satélite Planck, que realizará una labor similar a la de WMAP, y con el cual se pretende mejorar la precisión en al menos un orden de magnitud la medición de los parámetros cosmológicos, y así poder elucidar sobre los confines más recónditos de nuestra propia existencia: el origen mismo de nuestro universo. WMAP sólo puede analizar el 10% de la información contenida en la RFC y de la polarización de las ondas de luz, mientras que Planck tendrá tres veces más resolución y diez veces más sensibilidad, por lo que permitirá medir los diferentes modos polarizados de la luz de la RFC, entre ellos los famosos modos B de polarización, nunca antes medidos y que nos darán evidencias sobre la primera trillonésima de trillonésima de segundo (10^{-36} segundos, 0.0.....01 con 36 ceros) de vida de nuestro universo. En ésta época el universo entró en una época de expansión acelerada denominada inflación, muy parecida a la expansión acelerada de nuestro universo hoy en día. Durante la inflación no sólo se crearon las perturbaciones primordiales que posteriormente dieron lugar a la formación de estructura, sino también se perturbó el mismo espacio-tiempo, generando ondas gravitacionales. Mucho tiempo después, la luz de la RFC es entonces dispersada por las estas ondas gravitacionales, alterando así los modos B de polarización de la luz proveniente de la superficie de última dispersión. De esta sutil manera, Planck medirá indirectamente estas ondas primordiales que permitirán conocer

la dinámica del universo muy temprano. Por otro lado, también se esperaría determinar la posible existencia de defectos topológicos en el espacio que nos permitirían conocer las transiciones de fase en el universo temprano. Otro de las metas del satélite Planck es determinar con gran exactitud la estructura a gran escala y la expansión del universo a diferentes tiempos y esto nos llevará a determinar la evolución de las diferentes componentes de energía, su origen y naturaleza, y en especial de la energía y de la materia oscura.

Edad del universo, formación de núcleos de átomos y distribución de materia

La existencia de energía oscura ayuda a tener un universo un poco más viejo que lo sería sin su presencia, y por tanto es capaz de explicar la edad de algunos cúmulos globulares – estructuras esferoidales con millones de estrellas viejas- que se estiman en alrededor de 11 mil y 12 mil millones de años de edad. La edad del universo sin energía oscura sería de entre 10 mil y 11 mil millones de años lo cual contradeciría las observaciones de las edades de los cúmulos globulares, y gracias a la presencia de la energía oscura la edad del universo aumenta a 13.7 mil millones de años. Otro punto a favor de la EO.

La abundancia de los elementos químicos ligeros está determinada por la razón protón/neutrón, es decir, que tantos protones hay en relación al número de neutrones. Al mecanismo detallado de la formación de estos elementos y sus isótopos se la llama *nucleosíntesis*, y es un mecanismo que se dio durante los primeros tres minutos del universo. Los elementos formados aquí fueron el hidrógeno, helio, litio, y sus isótopos. La abundancia de estos elementos depende de la velocidad de expansión del universo durante el primer minuto de vida y de la intensidad de la fuerza débil. La fuerza débil da lugar a la radioactividad, y media la interacción entre los protones, neutrones, electrones y neutrinos. La determinación de la cantidad de elementos ligeros en el universo es la observación directa más antigua que tenemos de nuestro universo, y las leyes de la física explican cabalmente estos porcentajes. Resultado sorprendente porque conjunta a la macrofísica (la velocidad de expansión del universo) a distancias enormes y determinada al primer minuto de vida del universo, con la micro-física (mediante la intensidad de la fuerza débil) determinada 13.7 mil millones de años después en los laboratorios en la Tierra y a distancias subatómicas. Un gran triunfo para la ciencia.

Una galaxia tiene un tamaño de unos 100 mil años luz, y cúmulo de galaxias tiene decenas o centenas de galaxias ocupando un espacio de millones de años luz. Recientes catálogos de la estructura del cosmos han sido publicados, entre los que se encuentran el catálogo 2dF, 6dF (telescopios con dos y seis grados de ángulo de visión, respectivamente) y SDSS (Sloan Digital Sky Survey, en Inglés) en donde se muestran millones de galaxias con sus respectivas velocidades. Análisis estadísticos de esta distribución de materia así como resultados de

simulaciones cosmológicas de muchos cuerpos, donde se estudia la dinámica de la formación de estructura, desde que el universo estaba pequeñamente perturbado, al igual que la RFC – de una parte en cien mil,- en un estado casi homogéneo e isotrópico hasta la formación de las grandes estructuras que vemos hoy en día, indican que el universo observado es consistente con un modelo en el cual está compuesto por un 74% de EO, 22% de MO y 4% de materia ordinaria (protones y neutrones). Es decir, nuestro modelo cosmológico nos permite predecir a partir de las diminutas fluctuaciones primordiales la formación, cantidad y distribución de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias. Resultado nada trivial, y la existencia de EO y de MO son una vez más esenciales. Estudios futuros más detallados de la estructura a gran escala así como de simulaciones numéricas cosmológicas permitirán determinar las propiedades de la MO y EO a diferentes tiempos por lo que obtendremos señales inequívocas de su dinámica y naturaleza.

Energía y Materia Oscura dominan al Universo

Las estrellas, planetas, asteroides y gas interestelar forman sólo el 4% de la materia o energía de nuestro universo. La contribución de la luz es aún mucho menor, sólo una cien milésima de la cantidad total. La mayor parte del contenido del universo, el 96%, está conformado por dos enigmáticas sustancias que no nos son familiares en la Tierra. La materia oscura (MO) que corresponde al 22% y la energía oscura (EO) con el 74% de la materia-energía del cosmos. Ambas de gran relevancia para el desarrollo de nuestro universo pero sin que tengamos aún una comprensión cabal ni de su dinámica ni mucho menos de su origen o de sus consecuencias.

Probablemente este es el tema de mayor importancia y con mayor actividad en la física hoy en día. Por un lado se están construyendo nuevos poderosos telescopios y satélites para determinar con mucho mayor precisión las propiedades de nuestro universo y la dinámica de la EO y de la MO. Por otro lado, los científicos tratamos de elucidar el origen y naturaleza de este sorprendente 96% de energía-materia del universo. Y entonces, ¿Qué son la materia y energía oscura? ¿Podrían ser partículas elementales que no hemos podido observar en la Tierra? ¿Es la teoría de la Relatividad General incorrecta a escalas cósmicas y hay que modificarla? ¿Es acaso que el universo no es homogéneo y estamos en el centro de un gran burbuja cósmica con una densidad mucho menor que el resto del universo? ¿Son la EO y la MO manifestaciones de un espacio con más dimensiones espaciales, como predicen las teorías de branas (membranas) y supercuerdas? Históricamente las grandes incógnitas han tenido diferentes tipos de soluciones. Por ejemplo, en los años 30s la interacción entre las partículas elementales protones, neutrones y electrones no conservaba a la energía total, por lo que había una partícula no conocida llevándose la energía faltante, o las leyes de la física tenían que ser modificadas a estas escalas tan pequeñas de tal forma que la conservación de la energía no se cumpliera. Otro ejemplo, a finales del siglo XIX, fue la medición de la velocidad de la luz que no mostraba las variaciones predichas por la

teoría. En este caso, o las mediciones eran incorrectas o la teoría tenía que ser modificada. La solución a estos dos enigmas fue diametralmente opuesta y difícil de anticipar. En el primer caso se postuló una partícula extra para conservar a la energía, el neutrino (descubierto quince años después, en 1956), en el segundo caso la solución fue la postulación de una nueva teoría: la teoría de la Relatividad Especial de Einstein en 1905. En cosmología actualmente no contamos con la respuesta final, o postulamos la existencia de partículas de MO y de EO o modificamos las leyes de la física. Serán las futuras observaciones y datos cosmológicos, así como el poder de predicción de cada una de estas teorías, lo que permitirá determinar cuál es la solución correcta. Sin embargo, las evidencias hoy en día apuntan hacia la existencia de las partículas de MO y de EO.

Aunque parecidos en nombre, la materia oscura y la energía oscura, no podrían ser más diferentes. Por un lado, la materia oscura se postula para generar una mayor fuerza de gravedad entre los objetos celestes y por el otro lado la energía oscura tiene propiedades diametralmente opuestas, generando una gran fuerza repulsiva o antigravitacional. Este comportamiento aparentemente contradictorio no es lo único, la manifestación de cada una es a escalas muy diferentes. La materia oscura se manifiesta a distancias mucho menores que la EO. La MO es relevante a distancias menores a 30 millones de años luz mientras que la EO se manifiesta a distancias cien veces mayores que corresponde a una décima parte del tamaño de nuestro universo.

La postulación de la MO tiene su origen en la necesidad de explicar la diferencia entre la cantidad de masa gravitacional inferida por el movimiento de estrellas o galaxias con la cantidad de masa observada. Usando las leyes de gravitación podemos pesar al Sol, como si usáramos una báscula, conociendo la distancia de la Tierra al Sol y el tiempo de rotación que es de un año. Con el mismo principio podemos pesar a la Tierra usando la distancia y velocidad de rotación de la Luna, y también nos permite determinar la cantidad de masa de una galaxia usando el movimiento de las estrellas alrededor del centro de la galaxia. La conclusión del movimiento de los objetos celestes es que a nivel global del cosmos debe haber cinco veces más materia que la masa observada en los planetas, estrellas, gas interestelar, galaxias y demás estructuras del cosmos. Usando los resultados de la RFC y de nucleosíntesis, también se llega a la misma conclusión, la materia faltante no puede estar hecha de protones y neutrones, es decir de materia ordinaria, y corresponde al 22% del total. Esta es la materia oscura, que desde los años 30s del siglo pasado fue predicha por el radioastrónomo holandés Jan Oort (U. Leiden) y por el astrofísico Suizo Fritz Zwicky (Caltech), a diferentes escalas astronómicas. Ellos estimaron un exceso de “materia perdida” –hoy en día conocida como materia oscura- para entender los excesos en la velocidad de estrellas y galaxias, respectivamente. Esta nueva forma de materia no se ha podido detectar directamente en el laboratorio, no emite luz, y su única propiedad hoy conocida es que gravita en los cosmos, atrayendo a los cuerpos celestes.

¿Que son la Materia Oscura y Energía Oscura?

Además de las modernas observaciones, cada vez más precisas, es necesario contar con teorías científicas sólidas que permitan interpretar correctamente las observaciones. Estas teorías no sólo deben de explicar satisfactoriamente los datos sino también deben de tener de un alto poder de predicción que pueda ser comprobado con futuras observaciones. A continuación presentamos algunos esquemas teóricos que actualmente se debaten sobre el origen de las enigmáticas materia y energía oscura de nuestro universo.

Aunque existen diferentes propuestas para explicar que es la MO, como es la modificación a las leyes de la gravedad, la más aceptada es que se traten de partículas masivas que interactúan débilmente con nosotros. Estas partículas se pueden clasificar en calientes, tibias o frías, dependiendo de si su velocidad es cercana a la de la luz, intermedia o cercana a cero, respectivamente. La MO fría es la más establecida, sin embargo no se puede descartar a la MO tibia mientras que la caliente está descartada actualmente. Las características de la MO fría son parecidas a la materia conocida, como los protones, aunque como ya hemos mencionado previamente la MO no puede ser ni protones ni neutrones. Hay un número grande de candidatos de MO. Ejemplos de estas partículas son las partículas supersimétricas, que se están buscando en los aceleradores como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC por sus siglas en inglés) del CERN, en Ginebra, Suiza, inaugurado en 2008, y podrían ser producidas en el laboratorio en los próximos meses. Entre los candidatos más populares de MO está el neutralino, que es la superpartícula más ligera proveniente de una mezcla de estados cuánticos de las superpartículas del fotón (llamado fotino), bosón Z (zino) y del bosón de Higgs (Higgsino). El neutralino sólo interactúa a través de la fuerza débil y de la gravitacional y por lo tanto se le denomina partícula WIMP (del inglés, Weakly Interacting Massive Particle). Otro candidato popular es el axión. Esta partícula, postulada por R. D. Peccei and H. R. Quinn en la década de los 70s para evitar la violación de la simetría CP (simetría combinada de conjugación de carga y paridad) observada experimentalmente. La simetría C se refiere a que las leyes de la física se mantienen iguales si se intercambia una partícula por su antipartícula, y la simetría P se refiere a una simetría “espejo”, es decir al intercambiar derecha por izquierda.

La MO permea a toda nuestra galaxia incluyendo a nuestro sistema solar. Hoy en día hay experimentos para ver si en las diferentes épocas del año, cuando la Tierra se mueve con velocidad a favor o en contra de este “mar” de materia oscura, se puede detectar un cambio en las mediciones debido a la interacción con las partículas de la MO. El laboratorio DAMA (DARK MATter, en inglés), localizado debajo de los Alpes italianos, ha publicado la detección de la MO pero la comunidad científica no está aún convencida porque ningún otro laboratorio ha podido reproducir sus resultados.

Recientemente en 2006, usando el efecto de apantallamiento gravitacional de luz se observó en el Cúmulo Bala, un conjunto de galaxias, cómo se separaba la MO de la materia visible confirmando así la existencia de la MO en el universo. El apantallamiento de luz es la desviación en la trayectoria de la luz cuando ésta pasa cerca de objetos masivos debido a la atracción gravitacional. La atracción gravitacional de la luz ya había sido medida acorde con la teoría de la RG de Einstein en 1919. Este efecto es similar a la deformación que se ve cuando la luz pasa a través de un vaso con agua. Esta deformación nos permite determinar la cantidad y distribución de la MO y actualmente hay proyectos importantes para hacer un mapa de la MO en el universo utilizando esta técnica.

Por otro lado, las partículas que podrían dar origen a la EO, tienen propiedades totalmente diferentes a todas las partículas conocidas. El hecho que la EO, o las partículas de la EO, generen una intensa fuerza antigravitacional restringe mucho a los posibles candidatos. Un tipo de partículas es la quintaesencia, que son partículas con espín cero (los protones y electrones tienen espín $\frac{1}{2}$) y tiene sólo interacción gravitacional con el resto de las partículas. Hay una variedad de modelos que dan lugar a la EO y una característica esencial es que estas partículas tengan una fuerte autointeracción, es decir que interactúen consigo mismas. Esta propiedad está determinada por su autopotencial y bajo ciertas condiciones genera una fuerza repulsiva mayor a la fuerza de gravedad. Esta fuerza repulsiva o antigravitacional es el “motor interno” del universo que da lugar a la expansión acelerada del universo.

Otra posibilidad es que la EO sea sencillamente una densidad constante, una energía que crece igual que el volumen. Esta sería la famosa constante cosmológica de Einstein y aunque en principio es un buen candidato desde un punto de vista observacional, ya que se ajusta bien a los datos, desde un punto de vista teórico surgen muchas interrogantes sobre su origen que deben de ser respondidas. Por ejemplo, ¿De dónde viene esta energía? Si es constante y ha estado presente desde el comienzo del universo, entonces ¿Porqué es tanto más pequeña que la energía inicial en 10^{-120} (0.0.....01 con 120 ceros) veces? El estudio del origen de la EO es sin lugar a dudas uno de los principales enigmas de nuestro cosmos.

También existen modelos exóticos, como por ejemplo los “fantasmas”. Estas partículas fantasma han sido estudiadas porque las incertidumbres en los datos observacionales permiten su existencia aunque teóricamente no hay modelos matemáticamente consistentes que las sustenten. Sin embargo, sus predicciones son muy interesantes. Estos “fantasmas” serían partículas cuya energía total crece conforme crece el volumen y esto provocaría situaciones inesperadas. Por ejemplo, en un universo con fantasmas, el futuro cercano sería La Gran Muerte (The Big Rip, en inglés). Todos los objetos se irían dejando de ver, como si fueran fantasmas, y conforme pasara el tiempo se alejarían tan rápidamente que cada vez desaparecerían de nuestra vista objetos

más cercanos. Llegando eventualmente al punto de que no veríamos ni el Sol, ni la luna, ni el árbol más cercano. Finalmente, la sangre de nuestro cuerpo no llegaría de regreso a nuestro corazón, todos los átomos se acabarían separando y por supuesto dejaríamos de existir. Un final no muy halagador. Obviamente son escenarios extraños y aún sin fundamento teórico pero no necesariamente descartados por el momento.

¿Burbujas cósmicas?

En el lenguaje convencional, cuando hablamos de la expansión del universo nos referimos a la expansión global de éste, como si fuera una especie de globo de tres dimensiones espaciales y su crecimiento fuera parejo en todos lados. Este es el principio de homogeneidad e isotropía del universo que mencionamos al principio. Sin embargo, diferentes regiones del universo podrían crecer de forma diferente. Esta posibilidad fue sugerida por G. Ellis, N. Mustapha y V. Hellbay de la Universidad de Cape Town, Sudáfrica. La idea sería que el universo se sigue desacelerando pero nosotros vivimos en una burbuja cósmica gigante que tiene una densidad de materia mucho menor que el resto del universo. De acuerdo con la leyes de gravedad entre menor sea la cantidad de materia menor será la desaceleración por lo que la velocidad de expansión de la burbuja será mayor en su centro e irá disminuyendo conforme uno se acerca al borde de la burbuja. Con esta idea, la expansión de las diferentes partes del universo crecerán a velocidades diferentes. Imaginemos que algunas supernovas exploten cerca del centro de la burbuja y otras cercanas al borde. Si nosotros nos encontramos próximos al centro de esta gran burbuja la luz de las supernovas, que explotan lejanas al centro, pasarán por regiones en donde la velocidad de expansión del espacio irá aumentando y el efecto final nos dará justo la velocidad de alejamiento de las supernovas tal y como se observa. Esta idea de tener diferentes velocidades de expansión del universo para diferentes regiones nos permitiría entender la aparente aceleración de nuestro universo local sin tener que recurrir a la existencia de la EO. Sin embargo, la temperatura de luz de la RFC, producida mucho tiempo antes que las supernovas, sólo varía de región a región por una parte en cien mil y esto pone enormes restricciones al modelo de la burbuja. En particular, nos obliga a vivir en una posición muy privilegiada, es decir en el centro de esta inmensa burbuja. Por otro lado el tamaño necesario de la burbuja es demasiado grande y entra en fuertes contradicciones con nuestro entendimiento de cómo se formaron las galaxias y cúmulos de galaxias. La probabilidad de encontrar una burbuja del tamaño requerido es de una parte en 10^{100} (un uno con cien ceros). Otro problema de este modelo es que la aceleración de nuestro universo se da sólo en tiempos recientes, es decir a tiempos anteriores nuestro universo se estaba desacelerando, por lo que la forma de la densidad de la burbuja sería como una pirámide en medio de un gran llano pero visto al revés y nosotros estaríamos justo en el pico de la pirámide. Un lugar demasiado privilegiado. A pesar de todo esto, es necesario tener una mayor cantidad de supernovas de tal forma que sean las observaciones las que den la última palabra.

¿Modificaciones a las leyes de la física?

Las teorías físicas han sido comprobadas aquí en la Tierra, y la extrapolación de ellas a distancias muy lejanas, tiempos muy distintos o energías muy diferentes a las que tenemos acceso no está a priori garantizada. Sin embargo, la cosmología nos abre una ventana para comprobar su validez, por un lado, y por otro lado para descifrar las maravillas del cosmos. En todas las áreas de la física hay modelos alternativos que intenta explicar asignaturas pendientes de las teorías estándar. En cosmología no es una excepción. Aunque la Relatividad General de Einstein es una teoría con muy importantes predicciones, su límite de validez no está aún del todo establecido. Esta teoría está muy bien probada a escalas intermedias -de decenas de micrómetros hasta el sistema solar- pero a menor grado a muy grandes o muy pequeñas escalas, densidades de materia o aceleraciones. Una posibilidad que se ha considerado en los últimos años es modificar a la segunda ley de Newton ($F = ma$, fuerza igual a masa por aceleración) y por lo tanto también a la Relatividad General. La fórmula nos indica que las fuerzas aplicadas a un cuerpo generan una aceleración lineal a cualquier cuerpo masivo. Ahora bien, desde los principios de los años 1980s se propuso una fórmula que modifica esta ley dinámica. Esta teoría conocida como MOND (MODified Newtonian Dynamics, del inglés) postula que existe una aceleración con un límite inferior, que es una nueva constante de la naturaleza con valor de 10^{-13} km/s². Para aceleraciones mayores a este valor se obtiene la segunda ley estándar pero para aceleraciones más pequeñas que ese umbral existen modificaciones proporcionales a la aceleración entre su valor umbral. Esto parece funcionar muy bien como una alternativa para explicar la MO en las galaxias. Las curvas de rotación galáctica, que nos sugieren la existencia de la materia oscura, se pueden explicar ya que las estrellas en estas galaxias sufren aceleraciones del orden de ese umbral o menores y MOND entra en juego. Se puede demostrar que las curvas de rotación producidas por MOND se ajustan muy bien a los datos de velocidades de estrellas en galaxias espirales. Esto hizo de MOND por muchos años, y hasta hace poco, un modelo fenomenológico muy interesante y considerado en la literatura. Sin embargo, en los últimos años se ha aplicado MOND al estudio de la dinámica de estructuras más grandes que galaxias, como cúmulos de ellas. El resultado es que MOND no puede explicar la observada dinámica y es necesario postular MO en ellas. Sin embargo, la idea original de MOND era evitar tener que postular a la MO. Además, el descubriendo del Cúmulo Bala en 2006, en donde la posición de la materia bariónica está lejos del potencial gravitacional del sistema implica que es consistente con la existencia de MO pero no con una teoría tipo MOND. Se han hecho intentos por rescatar la idea de MOND a escalas más grandes que galaxias pero tienen muchas dificultades para explicar la dinámica observada.

Conclusiones

Para descifrar y entender la evolución de nuestro universo es necesario por un lado de observaciones

precisas y por otro lado de un lenguaje adecuado para interpretar estas mediciones y es ahí donde la física teórica tiene un papel fundamental. El cosmos es el único y por demás extraordinario laboratorio que delimita a las teorías en su conjunto, desde la microfísica (teoría cuántica de campos y partículas elementales) hasta la microfísica (Relatividad General). La precisión de las mediciones en los últimos años nos ha confirmado que el cosmos empezó muy pequeño, caliente, homogéneo y casi isotrópico, y con el paso del tiempo ha ido creciendo, enfriándose y se han ido formado grumos de materia (estrellas, galaxias y cúmulos de ellas). Un gran éxito para nuestro modelo de la Gran Explosión. Sin embargo, estas mismas observaciones nos han llevado a postular a la elusiva materia oscura y a la enigmática energía oscura. Seguramente el entendimiento de estas sustancias nos dará enormes sorpresas que hoy día y dejaremos que sean el poder de las teorías físicas en conjunto con las futuras observaciones las que den la última palabra.