

¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL UNIVERSO?

Plática en el Cinvestav para muchacho de secundaria.

Tonatiuh Matos

I. El Modelo de la Gran Explosión

El objetivo de esta charla es platicar sobre los últimos acontecimientos relacionados con los descubrimientos del origen del Universo. Es por eso que esta charla es también una plática filosófica, porque lo que esta de tras de la pregunta sobre el origen del Universo son preguntas como: ¿qué hago aquí?, ¿de dónde vengo?, ¿a dónde voy?, ¿para qué estoy aquí?, ¿para qué existo? Seguramente ustedes se han hecho algunas de estas preguntas. De una vez les anticipo que ustedes no son los únicos en haberse hecho estas preguntas, sabemos que desde los griegos y seguramente mucho antes, los hombre ya se habían preguntado esto. Después de miles de años de conocimiento, aun no tenemos una respuesta convincente a estas preguntas, pero esta charla les dará una aproximación a sus respuestas.

El descubrimiento mas impresionante de los últimos años, es sin duda el hecho de que más de 96% de la materia del cosmos es desconocida, algo que flota por doquier y no se deja ver, pero cuya fuerza gravitacional se siente con gran intensidad. Este descubrimiento es verdaderamente notable, ya que está cambiando nuestra idea del cosmos de una manera radical. Ya no es válida la idea romántica de que estamos hechos de la misma materia que el cosmos. La materia de la que nosotros estamos hechos, así como la Tierra, el Sol, las estrellas, etc., es menos de 4% de la materia del Universo, es como si en un auto grande caminando en una avenida solo viéramos al chofer, pero no al auto. Imaginemos las consecuencias. En el siglo XVI, Copérnico descubrió que la Tierra no era el centro del Universo, sino que giraba en torno al Sol. Poco después los astrónomos descubrieron que el Sol no se hallaba en el centro del Universo, sino que nuestro sistema solar forma parte de una galaxia con miles de millones de soles. No pasó mucho tiempo para que se dieran cuenta de que nuestra galaxia es una entre miles de millones de galaxias en el Universo. Ahora llegamos a la conclusión de que la materia de esas miles de millones de galaxias, cada una con miles de millones de estrellas, no es más que una insignificante porción del cosmos, casi nada en un mar gigantesco. Así de insignificantes aparecemos en el inmenso cosmos. Pero entonces, ¿de qué está hecho el Universo?, ¿de qué es el cosmos?

Esta charla pretende ser un detonador de la curiosidad de los oyentes. Cada nueva puerta que se abre en el formidable edificio de la ciencia, conduce siempre a muchas otras puertas, a muchas nuevas preguntas. En estos momentos se han abierto algunas puertas que nos han proporcionado algunas respuestas, pero, a la vez, nos han abierto muchas preguntas más.

Para iniciar, voy a relatarles la historia de cómo se llevo a la idea del universo que ahora tenemos. Imagínense que durante **1 200** años, en el mundo cristiano prevaleció la idea de un Universo como lo había concebido Ptolomeo en la época de los griegos. Ptolomeo había supuesto que el Universo consistía de una serie de esferas concéntricas en las cuales la Tierra era el centro. Alrededor de la primera esfera giraba la Luna; alrededor de la segunda giraba el Sol en torno a la Tierra. En las siguientes cinco esferas giraban los cinco planetas conocidos en aquel entonces: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Una estrella, la del norte, era la única que no giraba, y al final se encontraba la esfera donde estaban pegadas todas las estrellas, todas juntas inmutables girando en la misma esfera. Esta idea estaba, además, en concordancia con la cosmogonía cristiana: el hombre a imagen y semejanza de dios, en el centro del Universo. Durante más de **1 200**

años esta idea cambió poco. Los hombres se hacían muchas preguntas sobre el Universo, pero no ponían en duda este modelo (o no lo decían, pues si lo hacían corrían el peligro de que la inquisición los quemara vivos).

En la antigua Polonia del siglo XVI, fueron las observaciones de Nicolás Copérnico las que provocaron las primeras dudas sobre el modelo de Ptolomeo. Copérnico observó que los planetas no seguían trayectorias circulares sino que, en ocasiones, algunos daban marcha atrás de su trayectoria. Por lo tanto, su experiencia no concordaba con el modelo de Ptolomeo. Poco tiempo después, Johannes Kepler, un joven inquieto que estudiaba en la universidad de Tübingen en Alemania, y que vivió en una época de efervescencia de ideas nuevas, se enteró por sus maestros de las ideas de Copérnico. En esos momentos, el padre Martín Lutero ponía en tela de juicio el poder de la iglesia católica que predominaba en toda Europa, y discutía nuevas ideas sobre la religión. Kepler, que para entonces ya era maestro de matemáticas en Praga, encontró que había la misma relación entre las órbitas de Júpiter y Saturno y la de un triángulo equilátero dibujado entre dos círculos concéntricos. Esto le hizo suponer que las órbitas de los planetas tenían alguna relación con las cinco figuras sólidas perfectas de la geometría euclidiana. Esta idea estaba en concordancia con la premisa de que si Dios era perfecto, entonces debería utilizar figuras perfectas para establecer sus leyes de movimiento. Kepler pasó prácticamente toda su vida tratando de encontrar la relación de las órbitas con estos sólidos perfectos, pero nunca logró ajustar sus ideas a las observaciones. Sin embargo, en un día de inspiración, Kepler ensayó una elipse como posible trayectoria de los planetas alrededor del Sol. El ajuste fue perfecto. Kepler logró explicar las observaciones de Copérnico sobre las trayectorias de los planetas, utilizando un modelo en el que la Tierra ya no estaba en el centro del Universo, sino era el Sol el que estaba en el foco de la órbita de la Tierra. Al poco tiempo, Kepler enunció sus tres leyes del movimiento de los astros. Estas tres leyes tan simples explican completamente el movimiento de los astros en el cosmos. Lo importante de esta historia es que esta acción condujo al hombre al desarrollo moderno de la sociedad y de la tecnología. Kepler fue el primer hombre en anteponer sus observaciones sobre sus creencias. Luchó toda su vida para que su creencia en las figuras perfectas funcionara como modelo del cosmos, pero con esto demostró que la naturaleza no es lógica, no sigue patrones lógicos preestablecidos como las matemáticas, la naturaleza es sutil y siempre llena de sorpresas. Estas observaciones y estas leyes condujeron a una revolución total del pensamiento y de la ciencia, cuya cúspide fue el descubrimiento de las leyes de Newton; una teoría general que explicaba las observaciones del Universo; un concepto totalmente revolucionario basado en una teoría matemática que aparentemente podía explicar todo; unas cuantas fórmulas matemáticas que explican todo el universo, todo lo que observamos.

El nuevo brinco se dio a principios del siglo XX, básicamente después de la formulación de la teoría especial de la relatividad por el joven científico Albert Einstein. Un logro realmente notable de un hombre. Einstein formuló la teoría especial de la relatividad en 1905, a los 26 años de edad. Ésta es la teoría dinámica de los objetos que se mueven a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. Una de sus consecuencias es la famosa fórmula de Einstein: $E = mc^2$. Aquí, E es la energía en reposo de un cuerpo, m su masa y c la velocidad de la luz. Esta fórmula es fundamental en todas las teorías modernas. La teoría contenía implícitamente las leyes dinámicas de las interacciones electromagnéticas, pero no una formulación equivalente para las interacciones gravitacionales. En 1909, con la ayuda de su amigo matemático Marcel Grossman, Einstein empezó a formular una teoría gravitacional consistente con su teoría especial, que estuvo lista en 1915. Básicamente la teoría general de la relatividad de Einstein dice

que las interacciones gravitacionales son debidas a la curvatura del espacio tiempo, esta curvatura es causada por la existencia de la materia. Esta teoría cambia completamente nuestro concepto de interacción. Para Einstein no hay fuerzas, como en la teoría de Newton, la interacción entre dos cuerpos se da por la modificación de la geometría del espacio tiempo debido a la existencia de los cuerpos.

Muy bien, pero si la existencia de un cuerpo dobla, curva, modifica la geometría del espacio tiempo, esto debería verse. Así es, ésta es una de las predicciones más extraordinarias de la teoría general de la relatividad. En 1919, el físico inglés Sir Arthur Eddington realizó una expedición al Atlántico sur, al occidente de África, donde se llevaba a cabo un eclipse total de Sol. Ahí Eddington observó las estrellas más cercanas a la corona solar en el momento del eclipse; seis meses después volvió a medir la posición de las mismas estrellas, ya sin la alteración gravitacional causada por nuestra estrella, cuando la Tierra estaba del otro lado de la órbita solar. Lo que observó fue que las estrellas aparentemente habían modificado su posición debido a la presencia del Sol. Que equivale a que el Sol había modificado la trayectoria de la luz proveniente de estas estrellas, debido a que éste había curvado su espacio alrededor. Es más, la modificación coincidió muy bien con la predicha por Einstein. Así que, Einstein tenía razón, la interacción gravitacional se da por la modificación de la geometría del espacio tiempo alrededor. Este resultado espectacular implica que las interacciones entre cuerpos se dan debido a la modificación que los cuerpos ejercen sobre la geometría del espacio tiempo. Pero ¿y qué implicaciones tiene esta nueva teoría sobre nuestro modelo del Universo? ¡Mucha!

El primero en hacerse esta pregunta fue el físico soviético Alexander Friedmann en la segunda década del siglo XX. Investigó las consecuencias de la teoría de Einstein sobre el modelo del Universo. Según el modelo derivado de la teoría de Newton, todas las estrellas se atraen entre sí debido a su fuerza gravitacional. El Universo de Newton debía de haber sido infinito para poder estar en equilibrio. Si era infinito en el espacio, entonces debería serlo también en el tiempo. Aunque esto estaba en contradicción con la idea religiosa de un inicio del Universo: de la existencia de un momento de la Creación. Por otro lado, y en contradicción con las predicciones de la teoría de Newton, los físicos, Alexander Friedmann, en la Unión Soviética, y casi al mismo tiempo el padre católico George Lémétre, en Bélgica, llegaron a la conclusión de que, según la teoría de Einstein, el Universo debería tener un principio y debería estar en expansión. Sin embargo, Einstein buscaba desesperadamente que su teoría le diera un Universo estático e infinito, como decían los paradigmas de la época. Incluso, Einstein llegó al extremo de modificar las ecuaciones de su teoría, agregándoles una constante, que llamó la constante cosmológica, para poder llegar a la solución estática del Universo, algo que ni aun así logró. La constante cosmológica no sirvió para explicar un Universo estático e infinito; de hecho, el Universo no es ni estático ni infinito.

Así pues, todo parece indicar que el universo se origino en una gran explosión, una explosión tan enorme, que lanzo toda la materia del Universo, hacia el espacio, seguramente la gran explosión también inicio el espacio y el tiempo. Imagínense de que tamaño es la explosión, que lanzo la materia de miles de millones de galaxias, cada una con miles de millones de soles, cada uno con decenas de planetas y asteroides, todo, a velocidades gigantescas. A este modelo de la creación del Universo se le llama “El modelo del big bang caliente”. Y como llegaron los científicos a esta idea tan descabellada? Vamos a ver. Todo comenzó a principios de la década de 1920, los astrónomos observaban astros luminosos que los telescopios de entonces no podían enfocar bien, se veían nebulosos, por lo que se les llamó nebulosas. Con esas herramientas, los astrónomos no eran capaces de identificar la naturaleza de estas

nebulosas, eran un misterio. Mediante un trabajo largo y sistemático, Edwin Hubble descubrió que estas nebulosas eran en realidad concentraciones de miles de millones de estrellas. La diferencia sustancial es que Hubble utilizó un telescopio de 1.5 m de diámetro y luego otro de 2.5 m. A estas concentraciones se les conoce ahora como galaxias. Aún más inesperado, al estudiar los espectros provocados por la descomposición de la luz al pasarla por un prisma, Vesto Slipher descubrió también que estos espectros de luz estaban corridos hacia el rojo. En un principio Slipher observó sólo algunas galaxias con esta característica. Más tarde, sin embargo, Hubble observó que este corrimiento era sistemático en un vasto número de estas galaxias. Las sorpresas no terminaron ahí. Al obtener las distancias de estas galaxias con espectros corridos al rojo, también observó que había una relación entre el tamaño del corrimiento y la distancia a la que se encontraba la galaxia de nosotros. Hubble encontró que entre más lejos estaba una galaxia, más roja se veía (su espectro luminoso mostraba un corrimiento hacia el rojo).

Hubble notó que entre más lejos de nosotros estuviera una galaxia, ésta presentaba proporcionalmente un espectro más corrido hacia el rojo, lo cual quiere decir que entre más alejada esté de nosotros una galaxia, más rápido se alejará de nosotros. El fenómeno lo observó Hubble en muchas galaxias (este fenómeno se observa incluso entre otras galaxias que no incluyen la nuestra). Si dos galaxias se encontraban a cierta distancia, se alejaban unas de otras a gran velocidad. Esto era terriblemente contradictorio con el sentido común. Imagínense lo que esto significa: la fuerza gravitacional es atractiva e inversamente proporcional al inverso de la distancia al cuadrado. Esto es, entre más masa tengan dos cuerpos, más se atraen (por ello, la Tierra atrae con más fuerza a los gorditos, por eso pesan más), y entre más cerca estén dos cuerpos, éstos se atraen mucho más (la Tierra atrae a la Luna, y el Sol las atrae a ambas, pero la fuerza depende también de la enorme distancia a la que estemos del Sol). La fuerza gravitacional entre dos galaxias debe de ser intensa debido a la cantidad de estrellas que tiene cada galaxia, ya que las galaxias contiene unas **100 000** millones de estrellas como el Sol y, por lo tanto, implicaría que dos galaxias deberían de estar acercándose entre sí debido a la fuerza de gravitación atractiva. Pero Hubble descubrió que esto no es así, sino al contrario: se están alejando. ¡Y entre más lejos, más rápido! ¿Cómo puede ser posible?

Mediante este esquema, al retroceder en el tiempo podemos entender que algún día las galaxias estuvieron más y más cerca entre ellas. Más y más cerca significa también que su materia se atraía con más y más fuerza, lo que haría que se juntaran más y más. Pero, ¿se están alejando? ¿Qué hace que se alejen unas de otras? La solución que presentaron Hubble y los científicos de aquella época a este problema fue que una gran explosión causó la expansión del Universo. Debe de haber sido una explosión tan enorme que causó que toda la materia del Universo saliera disparada en todas direcciones. Imaginen la naturaleza de la explosión para poder provocar que toda la materia del Universo se esté alejando. Se conocen cientos de miles de galaxias, cada una con cientos de miles de soles, cada uno con decenas de planetas y miles de asteroides y cometas. Y en vez de acercarse unas a otras, se alejan. La gran explosión es la mejor explicación que se encontró a la expansión del Universo, aunque no fue la única. Muchas otras hipótesis se han ido descartando poco a poco.

En 1929 Einstein viajó a los Estados Unidos a visitar a Edwin Hubble, quien había anunciado que había evidencias de que el Universo estaba expandiéndose. Después de convencerse de que las observaciones del Universo afirmaban su expansión, Einstein pronunció una frase que se hizo célebre: “La constante cosmológica es el peor error de mi vida”. Sin embargo, como veremos más adelante, nuevas observaciones indican que

es muy probable que exista esta constante cosmológica o algo muy parecido. También en esto, Einstein tuvo razón.

A partir de los descubrimientos de Hubble y la base teórica que la teoría de la relatividad general daba a las observaciones de la expansión del Universo, nuestro paradigma sobre el origen del cosmos cambió de nuevo. Ahora pensamos que el Universo tiene un origen y se expande, y que esta expansión fue causada por una gran explosión que lanzó toda la materia del Universo en todas direcciones. Sin embargo, como la fuerza de gravedad es atractiva, se esperaría que el Universo se estuviera desacelerando. Es decir, se esperaría que el Universo se expandiera más rápido antes en comparación a como lo hace ahora, ya que la fuerza de gravedad lo debería estar frenando.

Sin embargo, de nuevo, la naturaleza es muy sutil y no es lógica. Lo que sucedió en los últimos 20 años del siglo XX y los primeros del siglo XXI lo demuestran. Como veremos más adelante, la sorpresa es que el Universo no se está frenando; por el contrario, el Universo se está expandiendo cada vez más rápido. Este descubrimiento trae consigo, una vez más, un cambio revolucionario de nuestro paradigma del origen del cosmos.

II. Materia oscura

Los últimos años han sido muy importantes para la cosmología, han ocurrido muchas cosas nuevas. En este capítulo resumiremos los hallazgos de los últimos años sobre la materia oscura y veremos cómo no es posible evitar la postulación de dos tipos de materia exóticos que puedan resolver el problema de la formación de estructura del Universo. Es necesario postular algo diferente a la materia común que conocemos, que logre formar la estructura del Universo. Lo primero que podemos preguntarnos es si hay evidencias observacionales, si alguien realmente ha visto algo que se parezca a este tipo de materia. La respuesta es sí. Esta evidencia se vio primero, hace mucho tiempo, en cúmulos de galaxias y luego en galaxias, pero no se le prestó mucha atención. Las galaxias son objetos gravitacionales puros; es decir, en ellos sólo interviene la fuerza gravitacional y la inercia. A diferencia de otros objetos celestes, como las estrellas, en donde el equilibrio del objeto se logra combinando la fuerza gravitacional con las fuerzas nucleares, en la galaxia sólo interviene la fuerza gravitacional. Las estrellas, alrededor de 100 000 millones en una galaxia, forman un campo gravitacional que las atrae, pero al estar girando alrededor de sí mismas, la fuerza centrífuga del movimiento en torno a la galaxia compensa con exactitud esta fuerza centrífuga. Así que las estrellas están en equilibrio estable, girando alrededor de la galaxia. Así se ven las galaxias, y en cuanto a los astrónomos sólo era cuestión de tiempo analizar este fenómeno. Cuando se hizo, se provocó una tremenda sorpresa.

A fines de la década de 1970, Vera C. Rubin, W. Kent Ford, Jr. y Norbert Thonnard obtuvieron las curvas de rotación (velocidades de rotación de las estrellas alrededor de la galaxia) de 10 galaxias espirales de diferentes tipos, basados en la clasificación de Hubble. Vera Rubin y colaboradores observaron algo semejante en otras galaxias. Utilizando un telescopio, midieron la cantidad de estrellas que había en una galaxia. Si se cuentan las estrellas en la galaxia, puede obtenerse una estimación muy buena de cuánta materia hay en la galaxia. En un sistema estelar como el nuestro la masa de casi todo el sistema está concentrada en las estrellas. Si se sabe cuánta materia

hay, puede conocerse la fuerza gravitacional que ejercen todas estas estrellas sobre sí mismas.

Para que la galaxia esté en equilibrio con su rotación, es decir, que las estrellas giren durante mucho tiempo alrededor de la galaxia sin chocar o ser lanzadas al exterior, se debe cumplir que la fuerza gravitacional de todas estas estrellas sea igual que la fuerza centrífuga de su rotación. Por otro lado, para medir la velocidad a la que se mueven las estrellas, para saber su fuerza centrífuga, Vera Rubin utilizó el mismo método que utilizó Hubble para medir la velocidad con la que se alejan las galaxias unas de otras, es decir, el corrimiento al rojo debido a su velocidad con respecto a nosotros. Vera Rubin observó galaxias que estuvieran lo más de canto con respecto a nosotros, para poder observar las estrellas que “entran” a la galaxia y las que “salen” de la galaxia. Usando el corrimiento al rojo del movimiento de las estrellas que “entran” y “salen” de la galaxia debido a su rotación, pudieron calcular con mucha precisión las velocidades tangenciales (velocidades de rotación) de las estrellas. Obviamente, las estrellas que entran en la galaxia tienen un corrimiento al rojo, y las que salen hacia nosotros se verán más azules.

Si el corrimiento al azul se resta del corrimiento al rojo, lo que se obtiene es la velocidad de las estrellas alrededor de la galaxia. Más tarde, Vera Rubin comparó el resultado de las velocidades obtenidas según la fuerza gravitacional y el resultado observado con el corrimiento al rojo. Lo que encontró es que ambas observaciones tenían una marcada discrepancia entre sí. Para su sorpresa, las curvas de rotación eran aproximadamente planas, es decir, estrellas a muy diferentes distancias del centro de la galaxia giran con la misma velocidad circular, siendo que la distribución de materia luminosa indica que esta velocidad debe decaer rápidamente entre más alejada esté una estrella del centro de la galaxia. Esta “planicidad” resultó muy evidente en las curvas de rotación de un sinnúmero de galaxias, lo cual implica que un incremento en el radio conlleva a un crecimiento lineal en la masa. Sin embargo, todas las galaxias tienen materia luminosa con un comportamiento muy diferente: después de un cierto radio, un incremento en el radio implica un decrecimiento en la materia luminosa. Esta aproximada planicidad de las curvas de rotación llevó a los astrónomos a considerar que las galaxias contienen materia no luminosa no detectada y que trasciende los límites visibles de las galaxias, cuyos efectos gravitacionales causan la planicidad de las curvas de rotación. Además, observaron que para galaxias de la misma luminosidad la velocidad tangencial (también llamada velocidad circular, o curvas de rotación) decrece: es mayor en las galaxias más ovaladas y menor en las galaxias más extendidas. Así también, para galaxias del mismo tipo, pero de diferente luminosidad, la velocidad circular decrece con la intensidad luminosa. Éste ha sido quizás uno de los mejores, por no decir el mejor de los trabajos que dan gran evidencia de la presencia de materia oscura en el Universo.

Después de los resultados de Vera Rubin y colaboradores, una enorme cantidad de trabajos han demostrado que las galaxias están hechas principalmente de materia oscura, es decir, de algún tipo de materia que no se ve, que no radia. En todos los casos estudiados, la curva de rotación obtenida fue aproximadamente plana, como las logradas para otras galaxias años antes.

Obviamente, una de las galaxias más estudiadas es la nuestra. En la actualidad se han observado miles de galaxias que comprueban que la discrepancia es diferente en cada galaxia, pero ésta existe normalmente. Asimismo, en cúmulos galácticos la discrepancia es semejante al que hay en las galaxias, pero más pronunciada.

En el ámbito cosmológico también tenemos evidencias muy sólidas de la existencia de la materia oscura. Dos de estas evidencias son las siguientes. La primera

consiste en la observación de la radiación de fondo del Universo. En los últimos años, varios grupos de astrónomos han identificado con mucha precisión la forma del espectro de fluctuaciones de dicha radiación. Al espectro de fluctuaciones de la radiación de fondo se le llama espectro angular de potencias. Este espectro de radiación coincide con el espectro teórico solo si al teórico se le agrega una gran cantidad de materia extra no luminosa, aun sin saber que es esta materia realmente. Y, ¿qué es esto? Para entender que es un espectro, vamos a hacer una analogía. Cuando vamos al mar, es fascinante ver el movimiento de las olas y, si observamos bien, veremos que las olas no son de un solo tamaño. Es más, sobre una ola grande siempre vienen olas pequeñas. Desde muy alto, en avión por ejemplo, lo que veremos es que el mar es una superficie muy plana y muy homogénea. Pero si estamos en el mar, observamos todas estas olas de todos tamaños, unas sobre otras. Podríamos, por ejemplo, contar las olas grandes, las olas medianas y las olas chicas, y hacer una gráfica. En el eje inferior ponemos el tamaño de la ola y en el eje superior, ponemos el número de olas de cada tamaño respectivo que encontramos. Éste sería el espectro de las olas en el mar. La segunda evidencia se deriva de las fluctuaciones de masa del Universo, y se le llama espectro de potencias de masa. En la época de la recombinación, las fluctuaciones más grandes que el tamaño del horizonte en ese momento no se vieron afectadas por ningún fenómeno externo debido a que no se podía poner en contacto causal a toda la fluctuación en ese momento. Sin embargo, las fluctuaciones que eran casi del tamaño del horizonte en ese momento, empezaron a sentir poco a poco las vibraciones debido a intercambios “sonoros” en la fluctuación. Esto estimula el tamaño de la fluctuación que está cerca del tamaño del horizonte. Pero para las fluctuaciones que son menores que el tamaño del horizonte en ese momento, el fenómeno de destrucción debido a la radiación hace que esas fluctuaciones decrezcan, por lo que se obtiene que las fluctuaciones que están cerca del tamaño del horizonte en el momento de la recombinación serán las de mayor tamaño. Se obtiene entonces un pico en el espectro de fluctuaciones. Este pico en el espectro angular depende única y fundamentalmente del contenido total de materia del Universo. Cuando se midió de manera independiente por los grupos Maxima y Boomerang a principios de 2000, el resultado fue que la densidad del Universo está muy cerca de ser la densidad crítica, es decir, el Universo es casi plano. Pero, como veremos más adelante, los bariones, o sea, la materia hecha fundamentalmente de protones y neutrones, sólo pueden representar 5% de la densidad crítica del Universo y los cúmulos muestran un contenido de 35% de materia respecto de la densidad crítica del Universo. ¿Qué es el resto de la materia?

Por si fuera poco, existe una observación independiente de las dos anteriores que nos da un resultado semejante. Esta observación en la misma dirección consiste en observar la curvatura de la luz que pasa cerca de una galaxia. Como ya vimos, según la teoría de la relatividad general de Einstein, la luz curva su trayectoria debido a la masa total del objeto cercano a su trayectoria. Lo que los astrónomos hacen, es fijarse en cúmulos de galaxias lejanos y buscar alguna galaxia muy luminosa que esté detrás del cúmulo. La luz de la galaxia pasará por el cúmulo de galaxias y, debido a la gran masa del cúmulo, la trayectoria de la luz de la galaxia detrás del cúmulo se curvará, dándonos una idea de la masa del cúmulo, ya que la curvatura de la trayectoria de la luz es mayor entre mayor sea la masa del cúmulo. A este fenómeno se le llama lente gravitacional. Mediante estas observaciones en lentes gravitacionales, se ha llegado exactamente a la misma conclusión: la contribución de la materia contenida en cúmulos de galaxias a la materia del Universo es de 35% de la densidad crítica del Universo.

Los resultados de estos trabajos, y de otros que no hemos mencionado, muestran que el Universo cuenta con grandes cantidades de materia que aún no han detectado los potentes telescopios con los que contamos en la actualidad. Por sus efectos

gravitacionales, podemos saber que esta enorme cantidad de materia está presente, o debería estarlo, a menos que las leyes que conocemos de la naturaleza sean incorrectas, algo que realmente suena ilógico si ponemos como prueba la gran cantidad de fenómenos que estas teorías describen exitosamente. Si aceptamos las evidencias de la presencia de la materia oscura en el Universo, faltaría saber lo más importante: ¿De qué está hecha la materia oscura? Como veremos más adelante, la respuesta a esta pregunta no es fácil, es más, nadie conoce aún la respuesta.

III. Energía Oscura

Otra sorpresa llegó a fines de los años noventa. Cuando el combustible de una estrella se acaba, la estrella termina su vida en una gran explosión llamada explosión de supernova. Dependiendo de las condiciones de los alrededores, del tamaño de la estrella final, etc., la luminosidad final de la explosión es muy diferente y muy variable. También si la masa final de la estrella no supera el límite de Chandrasekhar, es decir 1.4 masas solares, la estrella acaba en un estado llamado enana blanca. Pero si el núcleo final de la estrella supera este límite, la estrella termina como pulsar o estrella de neutrones. Sin embargo, en el cosmos abundan las estrellas binarias, es decir, los sistemas estelares con dos estrellas, una que gira alrededor de la otra. Es más, estos sistemas son más comunes que las estrellas solitarias, como el Sol. En ocasiones puede ocurrir que en un sistema binario, una de las estrellas termine su combustible antes que su compañera. También suele pasar, que el núcleo de la estrella que terminó su combustible primero no supere el límite de Chandrasekhar y termine como una enana blanca. Estos sistemas se conocen en el Universo, son sistemas binarios de una estrella normal y una enana blanca, dando vueltas una con otra. Cuando esto pasa, la estrella compacta, la enana blanca, tiene un campo gravitacional muy intenso y comienza a tragarse a su compañera. Parte de la materia de la estrella va pasando a la enana blanca poco a poco. Si esto continúa, llega un momento en que la enana blanca crece su masa hasta que alcanza el límite de Chandrasekhar, lo cual provoca que la enana blanca se desestabilice y se colapse de nuevo, convirtiéndose ahora en un pulsar. Sólo que ahora sabemos que se colapsará justamente con la masa que da el límite de Chandrasekhar, 1.4 masas solares. Si conocemos la masa de la estrella que se colapsa, sabremos con qué luminosidad lo hace. A este tipo de supernovas, en donde se conoce bien la luminosidad de su colapso, se le llama supernovas del tipo Ia o SNIa (SN es la abreviatura de Súper Nova). Esto es muy apropiado porque, si se conoce la luminosidad del colapso de esta estrella, podremos saber su distancia. Seamos más claros. Cuando vemos una luz en una noche sin Luna, es muy difícil determinar la distancia a la que se encuentra la luz si no sabemos de qué tipo de foco se trata. Si la luz viene de una lámpara de mano y está muy cerca de nosotros, podríamos confundirla con un faro de puerto que está a mucha distancia. Claro que si nos dicen que se trata de un faro de puerto, podríamos decir que la luz es muy lejana. Es más, si tuviéramos los instrumentos adecuados para medir luminosidad y si supiéramos de antemano la luminosidad del foco de faro, podríamos saber con cierta exactitud la distancia a la que está el faro. Pues esto se puede hacer también con las estrellas. Por lo general, no sabemos si una estrella es grande o pequeñas, a menos que sepamos su distancia. Si en el firmamento, por ejemplo, vemos en ocasiones estrellas pequeñas, se debe a que están muy lejos y en otras ocasiones a que están cerca, pero son realmente pequeñas.

A fines de los noventa, dos grupos independientes, uno dirigido por Saul Perlmutter, en California, y el otro por Brian Schmidt, en Australia, encontraron algo sorprendente. Lo que observaron fue lo siguiente. En noches de Luna nueva (para que el cielo estuviera más despejado y oscuro), con un telescopio especial con apertura muy grande, observaban una región amplia del Universo y la fotografiaban. Al día siguiente tomaban otra fotografía del mismo lugar y, con una computadora, detectaban todos los cambios, por pequeños que fueran, comparándola con la fotografía del día anterior. La mayoría de los cambios eran fenómenos triviales, ya conocidos. Sin embargo, en ocasiones detectaban la explosión de una supernova. En el caso de que se tratara de una supernova normal no hacían nada, pero cuando era una supernova del tipo Ia, la seguían diariamente con el telescopio espacial Hubble. La luminosidad provocada por la explosión de las supernovas se mantiene durante varios días y se va graficando diariamente. Al final de su observación, los astrónomos conocían bien la luminosidad detectada en la Tierra de esta explosión y con ello su distancia de nosotros. Por otro lado, como tenían los datos de su luz, conocían bien el corrimiento al rojo de la supernova. Con esto, sabían bien el corrimiento al rojo de la galaxia a la que pertenecía la supernova y por tanto la velocidad con la que se aleja de la Vía Láctea, así como su distancia de nosotros. Estos dos ingredientes son suficientes para poder comprobar la ley de Hubble, $d = H_0 z$. El resultado fue que la ley de Hubble y la expansión frenada lentamente de las galaxias no se daban. Por el contrario, estos dos grupos encontraron independientemente que entre más lejos estuvieran las galaxias, la velocidad de expansión era menor, contrariamente a lo que debería esperarse; es decir, el Universo se expande cada vez más rápido.

El llamado modelo Lambda CDM, parece entonces ajustarse a las observaciones que se tienen del Universo. Observaciones más recientes del satélite WMAP, en el año 2003, han dado ya cotas para la existencia de todas estas materias raras con mucha precisión. El resultado que hoy se tiene es que 23% de la materia del Universo es materia oscura. Setenta y tres por ciento de la materia del Universo es energía oscura, y sólo 4% de la materia puede ser materia bariónica. También se llegó a la conclusión de que la materia total del Universo tiene prácticamente la densidad crítica. Así que no sabemos si el Universo se expandirá por siempre, o algún día se recolapsará. Con seguridad, el lector se preguntará ¿cómo puede el Universo recolapsar algún día si la energía oscura es 73% de la materia del Universo y es repulsiva? ¿Acaso esto no implica que el Universo debe expandirse por siempre? La respuesta es que esta energía oscura, que es realmente otro tipo de materia, también contribuye a la masa total del Universo y, por lo tanto, a evitar su expansión, por lo que esta materia (la energía oscura) también contribuye a que el Universo se frene lentamente, sólo por el hecho de ser materia.

Bueno, ya tenemos un modelo que resuelve nuestros problemas teóricos sobre el Universo. Sin embargo, de nuevo surge la pregunta fundamental, ¿qué es esta materia rara en el Universo que actúa repulsivamente contra el resto de la materia? No tenemos una respuesta. En la actualidad hay varias hipótesis sobre la naturaleza de la energía oscura. La primera y más aceptada consistió en suponer que existe una constante cosmológica que provoca justamente este efecto en el Universo. Como ya se mencionó varias veces, Einstein dijo que la introducción de la constante cosmológica a sus ecuaciones había sido el peor error de su vida. Y ahora parece ser que realmente no fue un error, sino un acierto.

IV. El Modelo del Universo

La teoría de la gran explosión también se le conoce como la teoría del big bang (por su nombre en inglés). Pero ¿puede ser cierta? La teoría adquirió gran aceptación entre la comunidad científica ya que, además, estaba de acuerdo con las predicciones de la teoría de la relatividad general de Einstein. En los años veinte, el científico soviético Alexander Friedmann encontró precisamente que la teoría de Einstein de la relatividad general, predecía un momento de la creación del Universo, caracterizado por una densidad infinita de materia. Esto también provocaba una temperatura infinitamente grande en ese instante.

Esto implica que en un principio, todas las partículas se movían a velocidades cercanas a la de la luz, incluso las más pesadas, lo que provocaba que las partículas no pudieran unirse con otras para formar compuestos. La sopa cósmica estaba hecha principalmente de las partículas elementales como quarks libres, electrones libres, fotones, etc. Pero al enfriarse el Universo, los quarks lograron confinarse, es decir, juntarse entre sí, y se formaron entre otras partículas, los protones y los neutrones. El Universo siguió expandiéndose y, al enfriarse más, estos protones y neutrones se unieron para formar núcleos atómicos. Ahora sabemos que los núcleos atómicos que se formaron principalmente fueron los del hidrógeno (protones solos) y los del helio 4, dos protones con dos neutrones. Los núcleos atómicos de las demás sustancias se formaron principalmente en los núcleos de las estrellas. Se cocinaron sobre todo poco antes del estallido final de las estrellas. Es decir, la materia de la que estamos hechos todos nosotros y casi todo lo que tocamos fue cocinado en el centro de las estrellas. El hecho es que, conforme el Universo se iba enfriando, las partículas tendían a unirse para formar partículas más estables. Cuando el Universo fue suficientemente frío, su sustancia era principalmente una sopa de núcleos de hidrógeno y de helio 4, de fotones, de electrones libres, etcétera.

Poco después de la recombinación, la temperatura del Universo descendió a un nivel en el cual los electrones fueron atrapados por los núcleos atómicos. Así nacieron los átomos, en este caso, los átomos de hidrógeno y helio, principalmente. Si el Universo hubiera sido completamente homogéneo, después de este momento ya no habría pasado nada. Pero, afortunadamente, el Universo no era completamente homogéneo. Desde muy temprano, existió una serie de inhomogeneidades que fueron creciendo con el tiempo, ayudadas por la fuerza gravitacional. Como veremos después, estas inhomogeneidades provocaron que partes del gas se colapsaran y formaron objetos densos, con características muy peculiares. Dependiendo de sus tamaños, estos objetos son los cúmulos de galaxias y las galaxias mismas. El colapso gravitacional fue lo que logró que estos objetos cósmicos nacieran y se desarrollaran.

Después de la recombinación y la formación de átomos, empezó la formación de galaxias debido a la fuerza gravitacional. Dentro de las galaxias viven enormes volúmenes de gas. Como la galaxia es un sistema donde habita una gran cantidad de gas, este gas empezó a ser atraído constantemente debido a su fuerza gravitacional. Es semejante a lo que pasa en la Tierra y la Luna. Cuando la Luna aparece por el horizonte, ésta atrae un poco a la Tierra. Pero más que atraer a la Tierra, atrae al mar, provocando que suba la marea en las orillas. Este fenómeno es bien conocido por la quienes viven en las orillas del mar. Cuando aparece la Luna, la marea sube, la Luna atrae al mar con su fuerza de gravedad. A estas fuerzas se les conoce como fuerzas de marea. De la

misma forma como en el mar, la presencia de mucho gas en la galaxia provoca fuerzas de marea dentro de la galaxia y debido, entre otras circunstancias, a las fuerzas de marea de la galaxia, el gas se colapsa para formar estrellas. La formación de estrellas en las galaxias es muy común.

Las estrellas no son otra cosa que masas de gas en equilibrio gravitacional y térmico. En un proceso más o menos complicado, pero ya conocido, el gas empieza a colapsarse por su fuerza gravitacional, girando alrededor de un eje. Al colapsarse, el gas disminuye su volumen, lo que provoca un aumento de la temperatura del gas, sobre todo en el centro del colapso. Al aumentar suficientemente la presión del gas en el centro de la estrella, que es principalmente hidrógeno, a presiones y temperaturas muy altas el hidrógeno inicia una reacción de fusión nuclear; a grandes rasgos, los núcleos de hidrógeno, o protones, se unen para formar dos protones unidos, es decir, helio. Esta reacción nuclear es la misma que se lleva a cabo en la explosión de una bomba de hidrógeno y es exotérmica, aumenta la temperatura del gas. Al mismo tiempo, el aumento de esta temperatura provoca a su vez un aumento en la presión del gas en dirección contraria al colapso gravitacional. Pero, entre más se colapse el gas, más aumenta la temperatura del centro y mayor es la intensidad de las reacciones termonucleares. Por lo tanto, entre mayores sean las reacciones termonucleares, más aumentará la temperatura y mayor será la presión que compense el colapso, hasta llegar un momento en el que los dos procesos se equilibren. La formación de una estrella puede durar varios millones de años, pero después de este proceso las fuerzas dentro de la estrella se equilibran, lo cual da origen a una estrella estable. Y este equilibrio es tan estable que suele durar miles de millones de años. Claro, entre más grande sea una estrella más presionará su centro, más rápido se consumirá su hidrógeno y lo convertirá en helio. Así que una estrella gigante suele durar menos tiempo que una más pequeña. La nuestra, el Sol, es una estrella mediana que ha “quemado” hidrógeno durante 5 000 millones de años, y lo seguirá haciendo durante otros 5 000 millones de años.

Pero la cantidad de hidrógeno es finito, por lo que llega un momento en que se acaba. Cuando esto sucede, el gas vuelve a colapsarse y el centro vuelve a disminuir su tamaño, por lo tanto se calienta mucho más. Si la presión del gas aumenta de nuevo lo suficiente, es el helio el que se empieza a fusionar. Como es obvio, ahora el centro de la estrella es básicamente un gas de helio y un poco de hidrógeno y éstos, al fusionarse con otro helio o con otro hidrógeno, forman litio y berilio. La fusión del helio es más caliente y, por consiguiente, la presión en el centro de la estrella es mayor, lo cual compensa de nuevo el colapso gravitacional de la estrella, pero este combustible se termina más rápidamente que el de hidrógeno y la estrella vuelve a colapsarse un poco más; al aumentar su temperatura, es el litio el que se fusiona y establece un equilibrio, y así sucesivamente. Al final, se han producido prácticamente todos los elementos en el centro de la estrella en un proceso que puede durar varios miles de millones de años; la estrella acaba con todo su combustible, con todos los elementos que al fusionarse forman una reacción exotérmica, terminando con el hierro. Entonces ya no hay nada que detenga el colapso. El último de estos colapsos es muy violento, y depende fundamentalmente del tamaño de la estrella; el colapso final es acompañado de una gran explosión, iluminando con ella todo el firmamento; en ocasiones alumbra tanto como la galaxia misma. A estas explosiones se les conoce como supernovas y su tamaño depende fundamentalmente de la masa final de la estrella. Después de esa gran explosión de supernova, la estrella se convierte en algún tipo de estrella muy compacta y opaca, según la masa final después de la explosión. A saber, si la masa final de la estrella después de la explosión es menor de 1.4 masas solares, la estrella final será una enana blanca. A este límite de masa dado por 1.4 masas solares se le conoce como el

límite de Chandrasekhar, en honor al físico hindú Subrahmanyan Chandrasekhar, quien lo encontró en la década de 1930. Si el producto final de la explosión de supernova es mayor que el límite de Chandrasekhar, pero menor que algo más que dos masas solares, el producto final será una estrella de neutrones, llamada así porque es básicamente un sistema de neutrones puros (tal vez con una superficie de hierro). El campo magnético de estas estrellas es tan intenso que es capaz de lanzar señales electromagnéticas, ondas de radio fundamentalmente, a enormes distancias. Estas ondas de radio son captadas aquí en la Tierra en forma de pulsos, y es por ello que a estas estrellas se les conoce también como pulsares. Si la masa final de la estrella es mayor que 2.5 masas solares, el producto final será tal vez un hoyo negro, un objeto tan denso (ya que nada ha podido detener su colapso) que ni la luz es capaz de salir de él. En la actualidad hay buenos indicios de que en los centros de muchas galaxias (incluso en la nuestra,) existen hoyos negros supermasivos, es decir, hoyos negros con masas de millones de masas solares. Se ha reconocido que galaxias mayores tienen hoyos negros más masivos en sus centros que las galaxias de menor tamaño.

El punto más interesante es que, al llevarse a cabo la explosión de supernova, la mayor parte de esta estrella es lanzada al exterior, sólo el núcleo permanece en la estrella. Pero ésta ha transformado prácticamente todo su hidrógeno en elementos más pesados, en los elementos que ahora conocemos. Entonces, estos elementos cocinados en el centro de la estrella son lanzados al exterior para convertirse de nuevo en polvo interestelar, que después podrá ser captado por otra estrella en formación. Esto es seguramente lo que sucedió con nuestra estrella. El Sol es una estrella de la segunda generación, o tal vez de la tercera, formada en nuestra galaxia. El Sol captó los elementos remanentes de otra u otras estrellas que envejecieron antes, después de vivir su ciclo completo hasta transformarse en supernovas. Los elementos captados por el Sol fueron también captados por sus planetas, como la Tierra, elementos que han servido para iniciar el proceso de la vida en nuestro planeta. Es decir, estamos hechos de elementos cocinados en el centro de las estrellas en miles de millones de años, después de los cuales el Sol ha servido como foco de energía para que la Tierra y los demás planetas del sistema solar tengan condiciones para su desarrollo. En la Tierra, estas condiciones han dado lugar a un desarrollo orgánico muy intenso. Hay que reconocer que debido al colapso gravitacional la vida existe en la Tierra. Más aún, debido a la formación de las galaxias y luego de las estrellas el Universo pudo crear la conciencia, a un ser que sabe de su existencia y de la existencia del Universo; somos esa parte del universo que se pregunta: Y que lucha incansablemente para dar una respuesta a estas preguntas (aunque esto no siempre sea totalmente posible).

Después de unos 4 000 millones de años, los elementos químicos de la Tierra, en condiciones propicias, han dado pie a un número enorme de especies animales y vegetales. Ahora sabemos que la formación de los discos planetarios es muy común en el Universo, por lo que la existencia de planetas debe de ser algo típico, algo común en el cosmos. Particularmente, en nuestro sistema solar, este disco planetario ha dado lugar a una especie que ha adquirido conciencia de sí mismo, de su entorno y del Universo: el hombre. En otras palabras, estamos hechos de Universo, nuestra sustancia fue cocinada en miles de millones de años en los núcleos de las estrellas, somos materia del Universo que evolucionó en un planeta para ser conciente de su existencia y de la existencia del cosmos; somos los ojos, los oídos, el cerebro del Universo, es decir, somos la parte del Universo que pretende conocerse a sí mismo.