

ARTÍCULO

MATERIA Y ENERGÍA OSCURAS

Juan A. Magaña Zapata, Francisco Javier Sánchez-Salcedo y Alfredo J. Santillán González

Instituto de Astronomía -UNAM

Materia y Energía Oscuras

Resumen

Nadie se queda indiferente cuando escucha las palabras de materia oscura y energía oscura por las connotaciones de misterio que conlleva el adjetivo oscuro. ¿Son la materia oscura y la energía oscura una rareza de la naturaleza, o son un cajón de sastre donde dejamos todo lo que no entendemos? En este artículo se intentará dar una nueva perspectiva de los claroscuros de la materia y de la energía oscuras y de los desafíos que presentan. Ciertamente, lo esencial es invisible para los ojos. Falta por ver si lo oscuro es esencial para el Universo.

Palabras clave: materia oscura, energía oscura, cosmología, astrofísica

Dark energy and dark matter

Abstract

Nobody remains indifferent when he hears the words of dark matter and dark energy because of the connotations of mystery that involves the adjective dark. Are dark matter and dark energy a freak of nature, or is a hodgepodge where we put everything that we do not understand? This article attempts to give a new perspective of the chiaroscuro of the dark matter and dark energy and the challenges they present. Indeed, what is essential is invisible to the eye. Remains to be seen if the darkness is essential for the Universe.

Keywords: dark matter, dark energy, cosmology, astrophysics

Introducción

Las observaciones astronómicas, que soportan la necesidad de la existencia de materia oscura y de energía oscura, son tan diversas, y vienen de tantos frentes, que resulta imposible que el problema sea un error de tipo observacional. Debemos retroceder casi 100 años para encontrar el momento en el cual se hizo necesario hablar de materia oscura. Fueron Opik (1915) y Jeans (1922) los que, de forma bastante natural, acuñaron ese término. En esos momentos había gran interés en conocer una incógnita: cuál es la densidad de material del Universo local si se toma un volumen lo más grande posible. Querían tomar un volumen suficientemente grande (de tamaño astronómico, pero conocido) y determinar la masa total contenida en ese volumen. Para tener una idea del volumen al que nos estamos refiriendo, Oort (1932) fue capaz de determinar la masa total dentro de una esfera de un radio de 700 pc (es decir, 2,300 años-luz), alrededor del Sol. Encontró que la masa total era aproximadamente cuatro veces mayor a la masa de las estrellas y del gas contenidos en ese volumen. Por lo tanto, Oort concluyó que había una fracción importante

de materia que no se estaba detectando de manera directa y que podría estar constituida por remanentes de estrellas de muy baja luminosidad, como enanas blancas, enanas marrones, Júpiteres, o cualquier otra componente que emitiera muy poca luz como para tener registro de ella. A este tipo de materia oscura se le conoce como bariónica, pues estaría compuesta de materia ordinaria. El resultado de que la masa total fuera mayor a la masa censada se tomo con bastante naturalidad. Antes de pasar al siguiente punto, debemos entender como Oort (1932) determinó la masa total si hay una componente que no brilla.

En Astronomía, la forma tradicional de determinar la masa total de un cierto sistema es a través de estudiar su dinámica interna. Es muy común referirse a la masa dinámica cuando se usan argumentos dinámicos para determinarla. En el caso particular del trabajo de Oort (1932), el observó la velocidad a la que se mueven las estrellas de tipo F. Más concretamente, usó la velocidad de las estrellas en la dirección perpendicular al disco galáctico. En esa dirección, las estrellas, también nuestro Sol, describen un movimiento oscilatorio en el que la fuerza restauradora no es otra más que la fuerza gravitacional que generan las demás estrellas del disco. Para estrellas que tengan una oscilación de pequeña amplitud, su movimiento corresponde al del oscilador armónico con frecuencia $[4\pi G\rho(0)]^{1/2}$, donde G es la constante universal de Newton y $\rho(0)$ es la densidad total de material en el plano galáctico. Por lo tanto, si fuéramos capaces de medir la frecuencia vertical de oscilación de las estrellas podríamos derivar de manera directa el valor de $\rho(0)$. Hasta la fecha la frecuencia vertical no se puede medir directamente, por lo que se usan métodos estadísticos de muchas estrellas para determinar el valor de la densidad total de material en el plano galáctico.

Afortunadamente, para el caso de las galaxias espirales, la determinación de la masa dinámica es todavía más directa y fácil que en el caso anterior. En efecto, se puede determinar empíricamente la velocidad a la que el gas rota en su órbita circular alrededor de la galaxia. Ya que el gas está muy frío, el soporte por la presión es despreciable y, por lo tanto, el gas se puede considerar como una partícula prueba, en órbita circular, en el potencial gravitacional creado por toda la masa de la galaxia. La fuerza centrípeta que mantiene el gas en rotación a un cierto radio galactocéntrico R (distancia del centro de la galaxia a cualquier punto del disco galáctico), debe ser la fuerza gravitacional, la cual depende principalmente de la masa total contenida en la esfera de radio R. Observando la velocidad de rotación del gas, se ha podido determinar la masa total de una muestra de miles de galaxias hasta una distancia galactocéntrica típica de 20-40 kpc (recordemos que un parsec es igual a 3.08×10^{18} cm).

Las primeras observaciones de la velocidad de rotación de las estrellas las hizo Babcock (1939) para determinar la masa de la galaxia espiral Andrómeda (figura 1), más tarde Mayall y Aller (1940) para la galaxia compañera M33 (figura 2). Un poco antes, Zwicky (1933) había estudiado la dinámica del cúmulo de galaxias de Coma (Figura 3) y había encontrado que su masa era 100

veces mayor que la masa contenida en las galaxias que lo forman. Por lo tanto, supuso que otras galaxias enanas no detectadas y el gas intergaláctico (que él no pudo estimar su masa) deberían constituir la masa faltante. Es importante notar que aunque Oort (1932) y Zwicky (1933) usaban el término de material oscuro para referirse a la masa faltante, no tenía por qué ser el mismo ingrediente o tener la misma composición en la vecindad solar que en los cúmulos de galaxias. Se abría pues un nuevo reto para la Astronomía: el de determinar la naturaleza de la materia oscura a diferentes escalas.



Figura 1a.



Figura 1b.

Del lado izquierdo (figura 1a) se muestra a la galaxia espiral de Andrómeda (M31), observada en dos longitudes de onda, infrarrojo y rayos-X, por dos telescopios espaciales, Herschel y XMM-Newton, respectivamente. Mientras que la figura 1b muestra a la misma galaxia pero observada en el óptico. Créditos: ESA/Herschel/PACS/SPIRE/J.Fritz(U. Gent) /XMM-Newton/EPIC/W.Pietsch(MPE) y Martin Pugh (APOD; óptico).

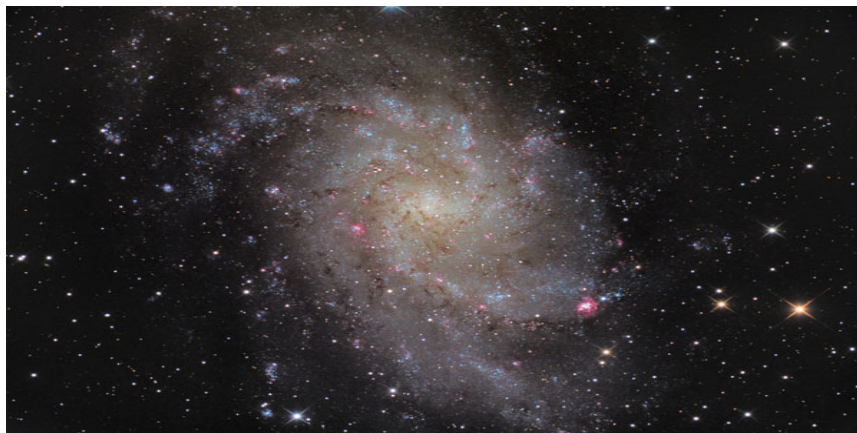


Figura 2. Galaxia espiral M33, también conocida como la Galaxia del Molinete o, simplemente la Galaxia Triangulum. M33 es la tercera galaxia más grande del Grupo Local de galaxias después de Andrómeda (M31) y nuestra propia Vía Láctea. Créditos: Manfred Konrad (APOD)

Fue en la década de los 70 del siglo XX, cuando la idea de la existencia de grandes cantidades de materia oscura en el Universo empezó a ser incuestionable. No sólo se necesitaba para explicar la dinámica de las galaxias y los cúmulos de galaxias, sino que también era necesaria desde un punto de vista teórico. Si no existiera una componente de materia oscura que interactuara con la materia ordinaria (protones, electrones, fotones...), no se podría explicar la formación de la gran cantidad de estructura que presenta el Universo, como filamentos, paredes, grandes vacíos, galaxias, etcétera. Es decir, un Universo formado íntegramente por materia bariónica no hubiera sido capaz de formar galaxias en la edad del Universo. Eso se debe a que el acoplamiento entre la radiación y la materia es tan fuerte que hace que la radiación borre las perturbaciones en densidad y, por lo tanto, se inhiba su crecimiento.

A finales de la década de los 70 y comienzos de la década de los 80 del siglo XX, la necesidad de materia oscura no bariónica para explicar la formación de estructuras cosmológicas, junto con una muestra cada vez mayor de curvas de rotación de galaxias que mostraban un comportamiento plano, consolidaban la hipótesis de la existencia de materia oscura en el Universo. En los 90 se da un paso de gigante; se llevan a cabo dos proyectos de detección de objetos compactos masivos en el halo de nuestra Galaxia (MACHOs; <http://wwwmacho.anu.edu.au>), a través del efecto de lente gravitacional, con el propósito de determinar qué fracción de la masa del halo oscuro es de naturaleza bariónica y qué fracción está compuesta por partículas no bariónicas. Las estrellas enanas blancas o los planetas de tipo Júpiter son ejemplos de MACHOs. Los resultados del proyecto MACHO (Alcock *et al.* 2001) y EROS (Afonso *et al.* 2003) fueron concluyentes; la masa en MACHOs de entre 0.001 masas solares y 10 masas solares no contribuye más del 30% de la masa de materia oscura en el halo de nuestra Galaxia. Combinando estos resultados con otros estudios dinámicos que descartaban objetos compactos mayores de 1000 masas solares,

se determinó que lo más probable era que al menos el 70% de la materia oscura en nuestra Galaxia debía estar constituida por un mar de partículas elementales exóticas (no bariónicas) y desconocidas. La Ciencia se iba a enfrentar a un nuevo desafío científico y tecnológico que sigue vivo: la detección directa de las partículas de materia oscura provenientes del Cosmos usando detectores en la Tierra.

No obstante, aunque desconocemos qué partícula constituye la materia oscura, ésto no significa que no entendamos cómo se comporta. Al contrario, estamos seguros de que no sufre colisiones y, por lo tanto, se comporta como un fluido donde las partículas solo interaccionan con el resto de las partículas a través de la fuerza gravitacional. Así que se pueden hacer modelos numéricos que nos describan como, a partir de un mar de partículas casi homogéneo, se fueron creando las estructuras en el Universo. La simulación cosmológica de mayor resolución que se ha hecho hasta la fecha se conoce como la simulación del Milenio (<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium>). La resolución de esta simulación permite tener una estadística fiable de cuantas galaxias esperamos tener en cada rango de masa y saber cómo se agrupan, y de cómo y cuando se forman los cúmulos de galaxias. Además, se puede saber cómo se distribuye la materia oscura en las galaxias.

¡Qué no es la materia oscura!

Casi 100 años después de que se empezara a hablar de materia oscura, la realidad es que no sabemos lo que es, pero afortunadamente sabemos qué no es. Sólo una fracción de ella puede estar constituida por objetos compactos de tipo estelar, como enanas blancas o Júpiteres. Sabemos que la materia oscura no es un elemento de la tabla periódica, ni tampoco un elemento por descubrir más allá del ununocio, porque si estuviera formada por un conglomerado de protones o neutrones ya la habiéramos detectado.

¿Por qué no se ha detectado todavía si estamos siendo bombardeados continuamente por partículas de materia oscura que vienen del halo de la galaxia? Los experimentos actuales ponen cotas superiores a la sección eficaz de interacción entre las partículas de materia oscura y la materia ordinaria, principalmente con los nucleones. Sin embargo, nadie se lleva las manos a la cabeza al hablar de partículas que interaccionan muy poco; estamos acostumbrados a escuchar que los neutrinos pueden atravesar la Tierra sin sufrir apenas interacción, y nadie duda de ellos. Pauli (1930) dedujo que existían los neutrinos porque necesitaba una partícula, por aquel entonces invisible, que se llevara parte del momento lineal en el proceso de decaimiento. El hecho de que no haya habido detección directa de partículas de materia oscura no debilita su existencia puesto que las extensiones actuales del modelo estándar de partículas predicen la existencia de una gran variedad de partículas que, con los detectores actuales, pasarían completamente

desapercibidas. Eso no quiere decir que todas las partículas de las extensiones del modelo estándar son buenas candidatas a materia oscura. Un requerimiento muy importante que tiene que pasar cualquier candidato a materia oscura es que se haya podido generar de forma eficiente, esto es, en cantidades importantes al comienzo del Universo. Nótese que el 85% de la materia del Universo es materia oscura.

¿Es la materia oscura una rareza de la naturaleza? No necesariamente. El hecho de que no sepamos qué es, no significa que sea rara. Ciertamente, los fotones nos invaden por todas partes, incluso cuando es de noche, y estamos familiarizados a usarlos hasta cuando vemos la televisión. Sin embargo, son realmente unas partículas muy curiosas y sofisticadas: ¡no tienen ni masa! ¿Por qué los fotones, estas partículas tan caprichosas, deberían interactuar con la materia oscura? Todo lo que se le pide a la materia oscura es que no interactúe con los fotones, no tenga carga eléctrica y que sea altamente no-relativista.

Hay quienes piensan que después de tanto tiempo sin detectar a la materia oscura es momento para explorar otras hipótesis alternativas. La ciencia como tal no se opone a la exploración de otras posibilidades; un ejemplo lo constituye la búsqueda del planeta Vulcano que duró 75 años hasta que, finalmente, se llegó a la conclusión correcta de que tal planeta no existe. Hasta la fecha se han propuesto varias alternativas a la materia oscura y ninguna de ellas ha sobrevivido, excepto la de modificar la ley de la gravitación de Newton a aceleraciones bajas, conocida como Dinámica Newtoniana Modificada (MOND, por sus siglas en inglés). Esta teoría propone que el comportamiento plano de la velocidad circular orbital de las estrellas o nubes de gas a diferentes distancias galactocéntricas (conocido como curva de rotación; figura 4) es un reflejo de que la ley de gravitación de Newton no es válida en esos sistemas. Sin embargo, no hay razones teóricas suficientes para pensar que la ley universal de Newton tiene que dejar de ser válida a distancias de 1 kpc. Se ha comprobado experimentalmente que la ley de Newton es correcta desde escalas de .001 m hasta la periferia del Sistema Solar. Eso significa que ha sido comprobada en un rango de escalas de más de 12 órdenes (la distancia de Neptuno al Sol es de 4.5×10^{12} m). Ya que 1 kpc son 3.08×10^{19} m, significa que estamos extrapolando la ley de Newton a una escala 7 órdenes mayor. No parece tan descabellado. Pero lo que hace menos atractivas a las teorías que proponen modificar la ley de la gravitación es que generan más problemas de los que son capaces de resolver. Por ejemplo, MOND no puede explicar la dinámica de los cúmulos de galaxias.

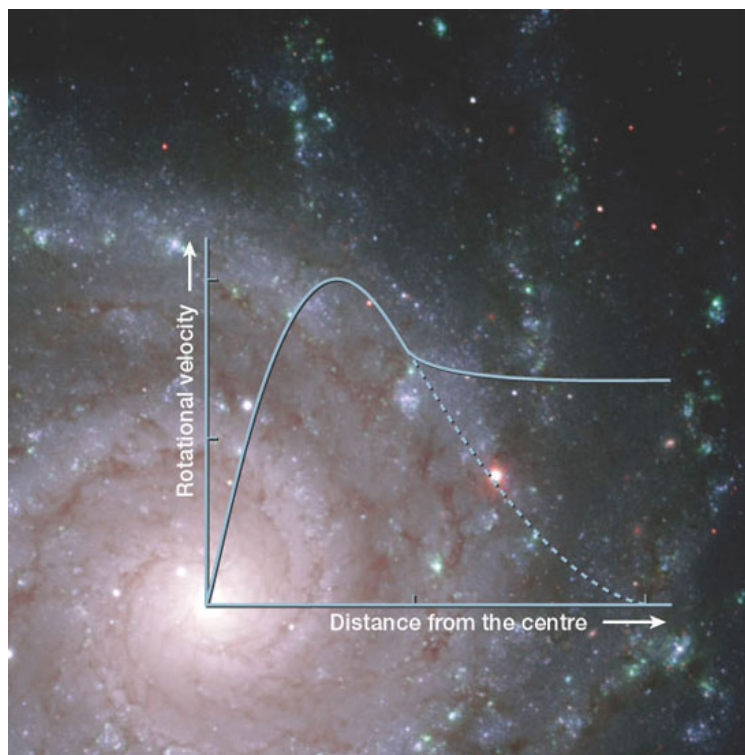


Figura 4. Se conoce como curva de rotación a la variación de la velocidad angular del material de una galaxia respecto al radio galactocéntrico. A partir de observaciones uno esperaría que la velocidad de rotación del material en los brazos de una galaxia espiral, como la que se muestra en esta figura (M74) presente un descenso exponencial hacia las partes externa de la galaxia (línea discontinua). No obstante, esto no sucede, la curva se aplanan (línea continua), lo que sugiere que la galaxia está rodeada por un halo de materia invisible y oscuro. Curva de rotación (Masataka, Fukugita, Nature 422, 489-491).

Qué queda por hacer

El primer reto para el siglo XXI es la detección directa o indirecta de la materia oscura. Nos referimos a detección directa cuando usando detectores en Tierra se puede determinar las propiedades de la partícula en cuestión, y por lo tanto, se puede caracterizar. Por otro lado, la detección indirecta se refiere a que son los subproductos o huellas generadas por la materia oscura lo que se detecta, por lo que se necesita un modelo teórico para interpretar las observaciones.

La detección directa de partículas de materia oscura depende, lógicamente, de la densidad local de materia oscura y de su densidad local en el espacio-fase (espacio en el que está representadas todas las variables dinámicas del sistema). Los experimentos EDELWEISS (<http://edelweiss.in2p3.fr/>), ZEPLIN (<http://www.hep.ph.ic.ac.uk/ZEPLIN-III-Project/>) y CDMS2 (<http://cdms.berkeley.edu/>) buscan detectar el retroceso de los núcleos atómicos de sus dispositivos como consecuencia de la colisión con partículas de materia oscura. El retroceso de los átomos se detecta combinando centelleo en redes de cristal (como los detectores de NaI), y la detección de los fonones o de la

ionización que se generan. Debe tenerse en cuenta que aunque la velocidad típica a la que viaja una partícula de material oscuro es relativamente pequeña, de unos 300 km/s, se cree que son masivas, por lo que su momento lineal es elevado. Uno de los candidatos más prometedores, predicho por las teorías supersimétricas, es el neutralino, que se piensa puede tener una masa de 100 GeV y que tiene que sufrir interacciones elásticas con la materia ordinaria, por lo que sería posible su detección directa. Sin embargo, hay otros candidatos supersimétricos, como el gravitino, que sólo interactúan gravitacionalmente y cuya detección directa es, pues, imposible.

Todavía más difícil y costoso será la generación *in situ* de partículas de materia oscura en los aceleradores de partículas. El éxito de fabricar partículas de materia oscura dependerá de la masa que tenga una partícula de materia oscura. Parece que en los próximos 30 años se podrá llegar a fabricar partículas de masa de hasta 1 TeV (10^{12} electrón-volts); cabe señalar que en física de partículas el electrón-volt se utiliza indistintamente como unidad de masa y energía, ya que, en relatividad ambas cantidades están relacionadas por la ecuación de Einstein $E=mc^2$ siendo la unidad de masa eV/c^2 , por lo tanto, el lector podrá convertir energías a masas de las partículas utilizando la siguiente relación $1 eV/c^2 = 1.783 \times 10^{-36}$ kg. En la actualidad, el acelerador de partículas de 27 km de largo del CERN conocido como Large Hadron Collider (LHC; <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>; movie: <http://www.youtube.com/watch?v=rgLdily2Xtw>, figura 5) podría producir neutralinos, si es que pueden existir. Por ahora, los resultados previos no indican ninguna huella de partículas supersimétricas, aunque la interpretación de los resultados se está haciendo con modelos muy simplificados, y no necesariamente realistas. En cualquier caso, si se tuviera algún indicio indirecto de algún candidato que tuviera una masa por debajo de 1 TeV, este tendría que venir respaldado por los experimentos venideros en los futuros aceleradores de partículas.

Para masas de la partícula de materia oscura por encima de 1 TeV, la detección directa parece muy difícil por lo que se piensa que la detección sería de forma indirecta, probablemente detectando su emisión de rayos gamma.

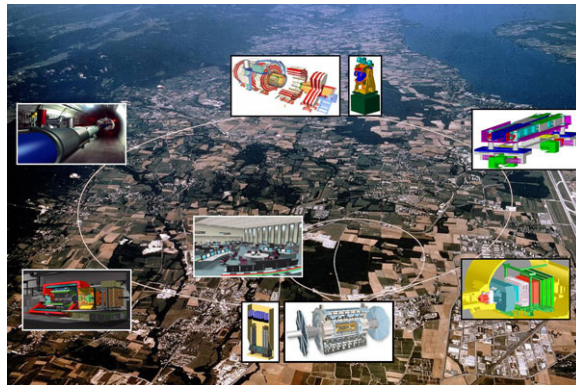


Figura 5. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) es el acelerador de partículas más grande y energético del mundo. Más de 2000 físicos de 34 países y cientos de universidades y laboratorios han participado en su construcción.

Las expectativas están puestas ahora mismo en la aniquilación de partículas supersimétricas y WIMPs (Weak Interacting Massive Particles). Si la densidad de WIMPs y de antiWIMPs es comparable, o bien, si la partícula antiWIMP y la WIMP son la misma, los electrones y positrones que se generarían como resultado de la aniquilación de WIMPs se comportarían como rayos cósmicos que a su vez podrían emitir fotones de rayos gamma. En la actualidad, PAMELA (<http://pamela.roma2.infn.it/index.php>) y AMS2 (http://www.esa.int/SPECIALS/DAMA_mission/SEMNL4SZLG_0.html) se dedican a la detección de positrones, mientras que GLAST (<http://www-glast.stanford.edu/mission.html>; figura 6), HESS (<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>; figura 7) y VERITAS (<http://veritas.sao.arizona.edu/>; figura 8) están dedicados a la observación de rayos gamma. Se espera que la búsqueda de los subproductos de la aniquilación de partículas de materia oscura se intensifique en las próximas décadas. Los astrónomos quieren entender si el flujo de rayos gamma se puede explicar enteramente por los rayos cósmicos galácticos o se necesita también una contribución debida a la aniquilación de partículas de materia oscura. Aunque la interpretación de los datos no es tarea fácil, Bertone *et al.* (2001) pudieron ajustar los datos de la emisión en radio y rayos gamma de Sagitario A, a través de modelos de aniquilación de WIMPs.



Figura 6. La figura muestra la concepción artística del Telescopio Espacial de Rayos Gamma Fermi, también conocido como Gamma-ray Large Area Space Telescope (GLAST), este es un observatorio espacial diseñado para estudiar las fuentes de rayos gamma del universo con el objetivo de detallar un mapa de las mismas. Crédito: NASA/Goddard Space Flight Center.



Figura 7. HESS (High Energy Stereoscopic System), es uno de los principales observatorios que se utiliza para estudiar la astrofísica de rayos-gamma de muy alta energía.



Figura 8. VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) es el observatorio de rayos gamma más grande que existe actualmente en la Tierra.

Si la materia oscura en el halo no está distribuida de forma homogénea, sino que presenta grumos o condensaciones, entonces, la probabilidad de detectar rayos gamma aumenta hacia esas regiones de mayor densidad. Es un reto el hacer cada vez modelos más refinados y precisos de la posible distribución de la materia oscura en el halo galáctico y en las galaxias del Grupo Local para tener mapas con los que comparar observaciones de futuros telescopios con las predicciones teóricas. Por ejemplo, el telescopio Fermi podría confirmar la hipótesis de que la materia oscura son neutralinos en los próximos tres años, ya que, como hemos dicho, la probabilidad de detección de la materia oscura depende de la densidad local, en la próxima década se continuarán los proyectos dirigidos a determinar la densidad local de materia a través de estudios de muestras de decenas de millones de estrellas a distancias del Sol de varios kpc. En particular, la combinación de los estudios dinámicos estelares junto con las observaciones de la distribución de hidrógeno neutro, ayudarán a determinar la existencia o no de un hipotético disco de materia oscura en nuestra Galaxia predicho por los modelos más recientes.

A escalas galácticas, uno de los retos más importantes es la determinación de la densidad de materia oscura en función del radio galactocéntrico para galaxias enanas de bajo brillo superficial. La interpretación de las curvas de rotación de las galaxias de bajo brillo superficial en las partes centrales es compleja debido a que la hipótesis de que el gas describe movimientos circulares podría no ser correcta. Se requiere hacer modelos autoconsistentes de la dinámica del gas en el potencial de la galaxia para obtener una distribución de masa realista de las galaxias.

Como ya dijimos, si el paradigma cosmológico actual es correcto, la materia oscura fue la responsable de generar la red cósmica de estructuras de densidad, que ha sido como el esqueleto donde posteriormente se formarán las galaxias como las vemos ahora. Conforme seamos capaces de detectar galaxias más y más lejanas (y, por lo tanto, más y más jóvenes), más cerca estaremos de ver al Universo en sus etapas tempranas y la acción de la materia oscura en su estado puro. Por ejemplo, el proyecto HerMES (<http://hermes.sussex.ac.uk/>; youtube: <http://youtu.be/vgwddjCLWac>, figura), actualmente en operación, está haciendo un mapa de la distribución espacial de galaxias masivas en el Universo temprano a través de observaciones en el infrarrojo. Buscan tener una fotografía de la distribución probablemente filamentaria de estas galaxias que están formando estrellas a un gran ritmo. Sin duda, los estudios a alto corrimiento al rojo del próximo siglo nos darán una visión cinematográfica de la distribución espacial de la materia oscura (y de las galaxias) en la red cosmológica.



Figura 9. HerMES (Herschel Multi-tiered Extragalactic Survey) es un proyecto astronómico para estudiar la evolución de galaxias en el universo distante.

El reto actual en el marco teórico de la formación de galaxias es incluir la materia ordinaria (bariónica) que es realmente de la que están compuestas las estrellas y el gas, y es lo que observamos con nuestros telescopios ópticos. Una de las limitaciones que tiene el modelo actual de formación de galaxias es que no está teniendo capacidad predictiva a escalas galácticas. La dificultad estriba en que se requieren muchos recursos computacionales para tener acceso a un rango tan grande de escalas. Por ejemplo, la galaxia vecina Andrómeda, esta a una distancia de medio megaparsec. Para resolver con cierto grado de confianza la formación de estrellas en el disco de una galaxia se requiere una resolución de unos 20 pc. Esto significa que si queremos tener un modelo realista de un grupo de galaxias necesitaríamos ser capaces de resolver un rango espacial de 25,000.

Es difícil predecir los derroteros que tomarán las investigaciones en un campo tan abierto y multidisciplinar como el de la naturaleza de la materia oscura, pero seguramente estará marcado por sorpresas y sobresaltos. Si todas las pruebas de detección directa o indirecta son negativas, no hay que preocuparse, siempre estará el *gravitino*.

Energía Oscura

Durante los últimos siete años, el satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, figura 10) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América, ha estado midiendo las fluctuaciones de temperatura de la radiación cósmica de fondo. Dicha radiación fue emitida cuando nuestro Universo tan sólo tenía 380,000 años de vida, actualmente tiene una temperatura aproximada de 2.72 grados Kelvin con pequeñas variaciones del orden de una cienmilésima de grados (10^{-5}). Gracias a las observaciones realizadas de estas variaciones en la temperatura de la radiación cósmica de fondo, los astrofísicos han sido capaces de estimar el contenido de materia y energía del Universo. Las conclusiones son sorprendentes y confirman lo que se sospechaba al final de la década de los 90; aproximadamente el 73% del contenido energético del Universo corresponde a una desconocida forma de energía que provoca que nuestro Universo se esté expandiendo aceleradamente. Esta componente del Universo ha sido llamada energía oscura y su naturaleza es una de las grandes interrogantes de la astrofísica, cosmología y física moderna.

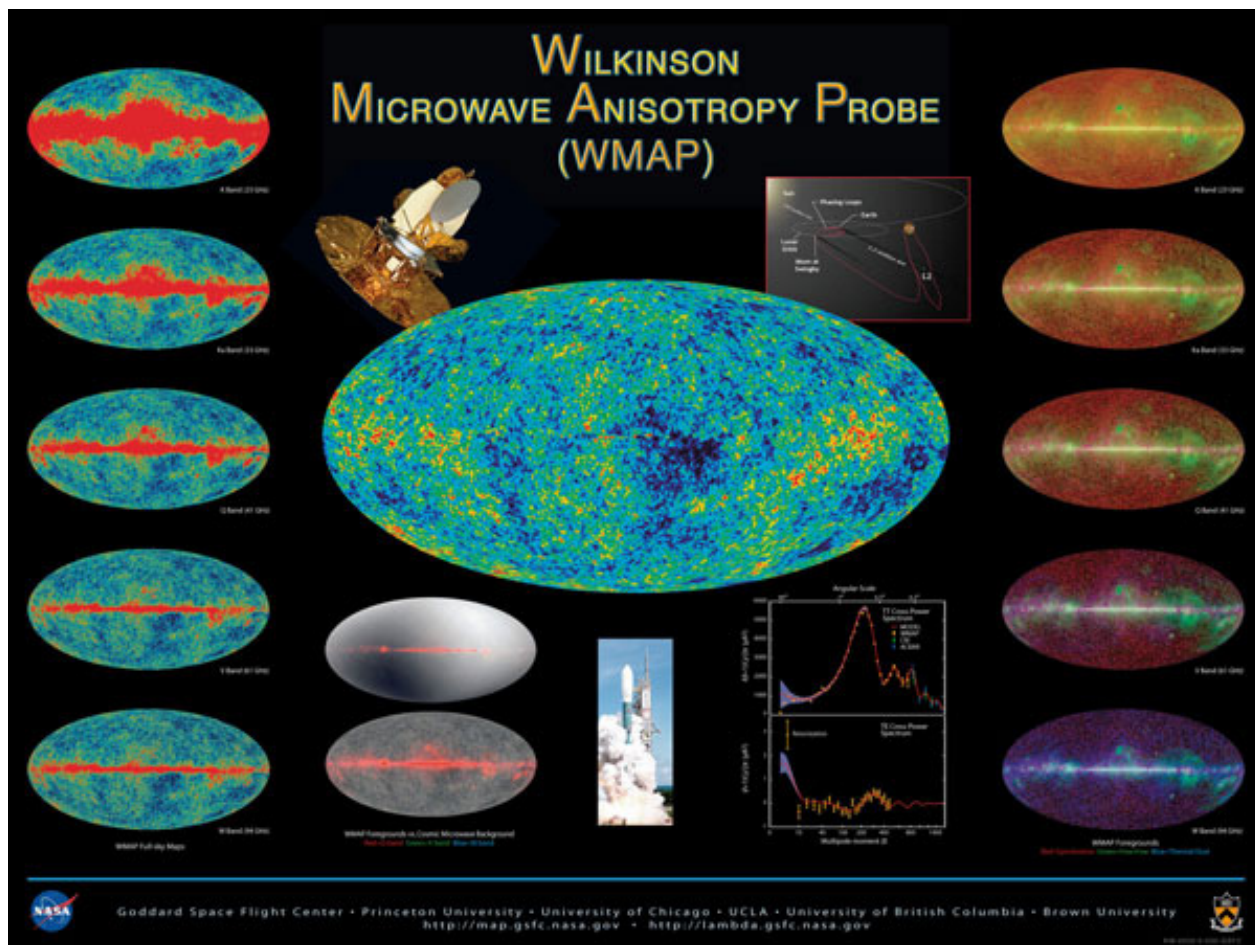


Figura 10. WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) es una sonda de la NASA cuya misión es estudiar el cielo y medir las diferencias de temperatura que se observan en la radiación de fondo de microondas, un remanente de la Gran Explosión

Supernovas tipo Ia (SNIa)

La primera evidencia observacional, que sugiere la existencia de la energía oscura en el Universo, se remonta al año de 1998, cuando el astrofísico Adam Riess y su equipo de colaboradores observaron la curva de luz de 16 supernovas del tipo Ia (figura 11) así como también su distancia y, por lo tanto, su corrimiento al rojo (un tipo de efecto Doppler ocasionado por la expansión del Universo). Las supernovas del tipo Ia, son el resultado de la explosión termonuclear de las estrellas denominadas enanas blancas de carbono que llegan a superar una masa límite, conocida como la masa de Chandrasekar, masa a la cual, este tipo de estrellas explotan. Esta detonación libera una gran cantidad de energía, del orden de 10^{52} ergios (10^{45} Joules), el equivalente a la energía liberada por una gran cantidad de bombas atómicas, por lo cual este tipo de objetos son tan brillantes en el Universo que pueden ser observados aun si se encuentran en galaxias muy alejadas de nosotros. Además, Riess y colaboradores usaron el hecho de que este tipo de Supernovas pueden considerarse “candelas estándares” en el Universo, ya que, todas las

supernovas de este tipo presentan la misma curva de luz después de hacer ciertas correcciones. Así, aprovechando esta característica de las SNIa y dado que pueden observarse a distancias lejanas, estas pueden usarse para determinar la ley de expansión del Universo mediante gráficas de luminosidad vs corrimiento al rojo. Al hacer este tipo de gráficas, el equipo de Riess se dio cuenta de que los modelos existentes, que consideraban que el Universo estaba compuesto únicamente de materia, no ajustaban lo suficientemente bien los datos observacionales. Esta inconsistencia, entre observaciones y teoría, llevaron a este grupo de investigación a considerar modelos teóricos que incluyen una componente energética asociada a la energía del vacío conocida como constante cosmológica. Riess *et al.* (1998) encontraron que si se toma que esta constante cosmológica contribuye con el 73% a la energía del Universo, la curva predicha tenía un mejor ajuste a los datos observacionales que las curvas obtenidas para el caso de considerar modelos con 100% de materia. Este resultado fue de gran relevancia, ya que la inclusión de una constante cosmológica en el Universo implica no solamente su expansión, sino que también lo hace aceleradamente, es decir, se expande cada vez más rápido conforme transcurre el tiempo.

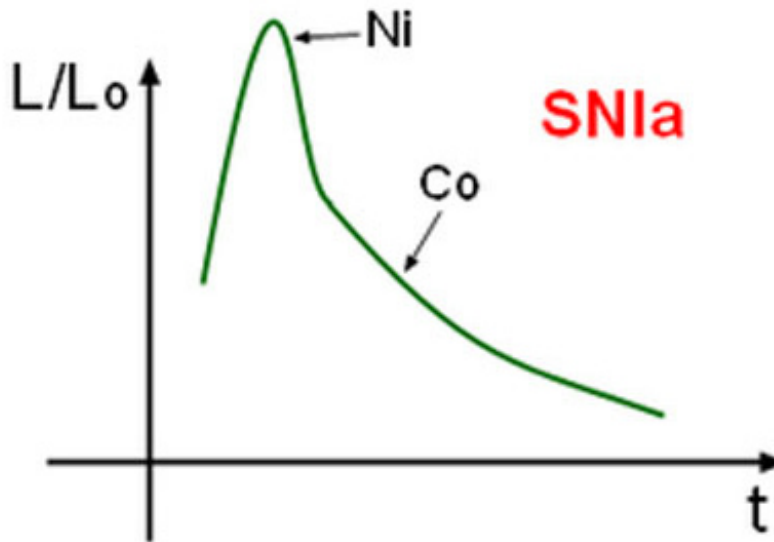


Figura 11. Curva de luz de una supernova de tipo Ia. Su máximo de emisión es el mayor entre todos los tipos de supernova. Se aprecia perfectamente la fase de emisión del níquel diferenciada de la del cobalto.

En 1999, un año después de haber sido publicado este importante resultado de la cosmología observacional, el equipo de astrofísicos liderado por S. Perlmutter confirmó el resultado de Riess, era necesaria la presencia de un nuevo tipo de componente energética en el Universo. En este caso la constante cosmológica, para que los datos observacionales obtenidos de las SNIa fueran consistentes con los modelos teóricos. Como resultado de las investigaciones de Riess y Perlmutter, la comunidad científica se ha dado a la tarea de determinar si esta componente exótica que ha sido llamada energía oscura y que ocasiona la expansión acelerada de nuestro

Universo realmente existe y de ser confirmada su existencia determinar cuál es su naturaleza. Así, los principales esfuerzos para determinar qué es la energía oscura han sido dirigidos hacia una constante cosmológica, la cual puede ser asociada a la energía del vacío cuántico.

Constante cosmológica

El origen de la constante cosmológica se remonta al año de 1917 cuando la comunidad científica pensaba que el Universo era estático. Por esta razón, el físico alemán Albert Einstein propuso introducir una constante cosmológica (denotada usualmente con la letra griega Lambda) en sus ecuaciones de campo de la relatividad general con el propósito de obtener un Universo estático, dado que esta constante tendría un efecto repulsivo contrario al efecto atractivo de la fuerza de gravedad. Algunos años después, en 1929, el astrónomo Edwin Hubble midiendo las distancias, corrimientos al rojo y velocidad de algunas galaxias lejanas, encontró una relación lineal entre la velocidad y el corrimiento al rojo de las galaxias que hoy en día se conoce como ley de Hubble (figuras 12a y 12b). Esta ley nos dice que las galaxias se alejan unas de otras con una velocidad mayor a mayor distancia. Este hecho se traduce en que nuestro Universo se encuentra en expansión. Inicialmente, Albert Einstein no admitió este resultado observacional de Hubble. Sin embargo, no le quedó de otra que aceptar el hecho de que el Universo no era estático, por lo que llegó a decir que la introducción de la constante cosmológica en sus ecuaciones de campo había sido el mayor error de su vida. No obstante, en la actualidad, la constante cosmológica introducida por Einstein es uno de los mejores candidatos para la naturaleza de la energía oscura, ya que parece ser consistente con las diversas observaciones cosmológicas que indican la existencia de esta extraña componente del Universo, como las observaciones de las SNIa y las observaciones de las pequeñas fluctuaciones a la temperatura de la radiación cósmica de fondo. A pesar de que la constante cosmológica se considera actualmente el mejor candidato a ser la energía oscura del Universo, tiene algunas incongruencias de gran relevancia desde el punto de vista de física teórica. Si la constante cosmológica se asocia con la energía del vacío cuántico, la teórica cuántica de campos predice que esta energía sería 120 órdenes de magnitud mayor al valor obtenido a través de las diferentes observaciones cosmológicas. Esta inconsistencia entre las predicciones teóricas del valor de la constante cosmológica y las observaciones es uno de los grandes retos a explicar dentro de la física moderna. Otra de las interrogantes que surge de suponer que la constante cosmológica es la energía oscura del Universo, es el llamado problema de la coincidencia, que consiste en entender por qué la constante cosmológica empieza a regir predominantemente la dinámica del Universo a épocas recientes, además haciéndolo con una densidad cercana a la densidad de la materia oscura. Estas cuestiones aún siguen abiertas y tendrán que ser contestadas

próximamente con la llegada de mejores restricciones observacionales, y con mayores esfuerzos dentro del campo de la física y cosmología teórica, para que la constante cosmológica siga siendo una candidata viable a la energía oscura del Universo.

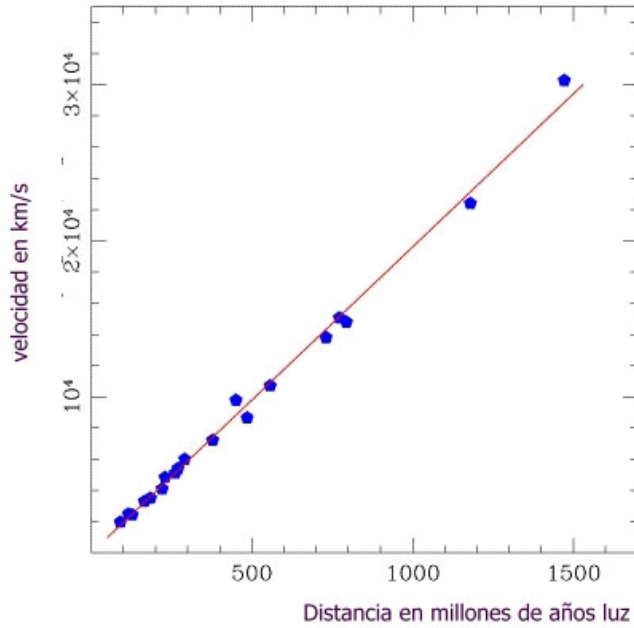


Figura 12a.

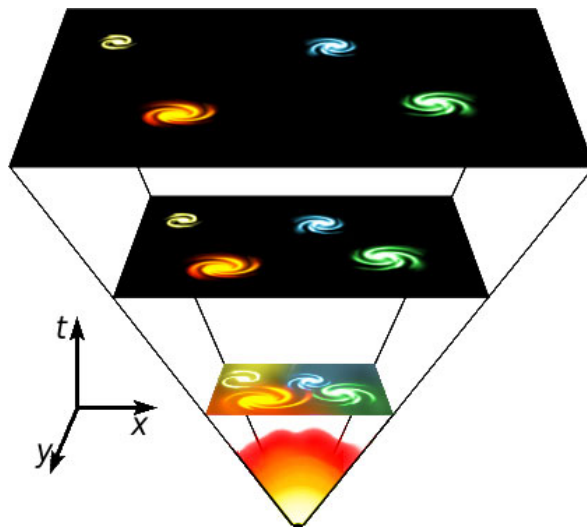


Figura 12b.

Ley de Hubble. En la figura se muestra la representación de 1996 de la distancia frente a velocidades de más de 30,000 Km/s ($z = 0.1$) de diferentes galaxias. Como se ve la relación permanece lineal con gran aproximación (12a). También vemos una representación de como se van alejando las galaxias una respecto a la otras conforme evoluciona el Universo (12b).

Desde el descubrimiento, con las supernovas del tipo Ia, de la expansión acelerada del Universo
18 -xx

o la presencia de una energía oscura, muchos han sido los esfuerzos para inferir la existencia y cantidad de esta componente en nuestro Universo, entre los cuales destacan las observaciones de las fluctuaciones a la temperatura de la radiación cósmica de fondo, observaciones de lente gravitatoria débil, cúmulos de galaxias, oscilaciones acústicas bariónicas, etcétera. A continuación describiremos brevemente algunas de estas observaciones.

Radiación cósmica de fondo. Como ya hemos mencionado anteriormente, esta radiación fue emitida cuando el Universo tenía tan sólo algunos cientos de miles de años de vida. A esas épocas, la temperatura del Universo era muy alta lo que permitía que hubiera un acoplamiento entre los fotones y los electrones a través de lo que se conoce como la dispersión de Thomson, impidiendo de esa manera la formación de átomos estables de hidrógeno. Conforme el Universo se iba expandiendo, su temperatura iba disminuyendo, llegando a una temperatura tal que los electrones dejaron de estar acoplados con los fotones y podían recombinarse con los núcleos atómicos para formar átomos de hidrógeno. Al recombinarse dichos electrones, los fotones energéticos quedaron libres, propagándose así por todo nuestro Universo, los cuales se conocen hoy en día como radiación cósmica de fondo. La temperatura de esta radiación de fondo tiene fluctuaciones muy pequeñas que pueden medirse, resultando en un espectro de variaciones de temperatura con varios picos. La amplitud y la posición de estos picos no se podrían explicar sin una componente de energía oscura en el Universo con una cantidad de aproximadamente del 70% del contenido total.

Lente gravitatoria débil. Desde el punto de vista de la teoría de relatividad general de Albert Einstein, la gravedad es un efecto geométrico de la curvatura del espacio-tiempo, es decir, un objeto astrofísico muy masivo curva más el espacio-tiempo que un objeto con poca masa, de tal manera que la fuerza de atracción que siente otro objeto cercano al primero será consecuencia de que tan curvado esté el espacio-tiempo. Una consecuencia inmediata de esta interpretación de la gravedad es la existencia de las llamadas lentes gravitatorias (figura 13). Una lente gravitatoria es una gran aglomeración de materia que curva el espacio-tiempo provocando que un rayo de luz, emitido por un objeto dado, pasando por dicha aglomeración sea desviado dando la impresión de ser emitido por otra fuente, es decir, nosotros los observadores percibimos que este fotón se emitió en un lugar distinto al verdadero, provocando la aparición de imágenes como en el caso óptico y de ahí el nombre de lente gravitatoria. Durante los últimos años, se han estado observando este tipo de imágenes, en particular, las provocadas por las llamadas lentes débiles que distorsionan débilmente la forma de las galaxias ubicadas detrás de grandes distribuciones de materia. Los astrofísicos han encontrado que las lentes gravitatorias ponen cotas a la cantidad de materia en el Universo, obteniendo que esta sólo contribuye con un 30% al contenido total del Universo. Este resultado es consistente con las estimaciones de la radiación cósmica de fondo, lo cual resulta ser un indicativo de que el restante 70% del contenido total del Universo no se

encuentra en forma de materia.

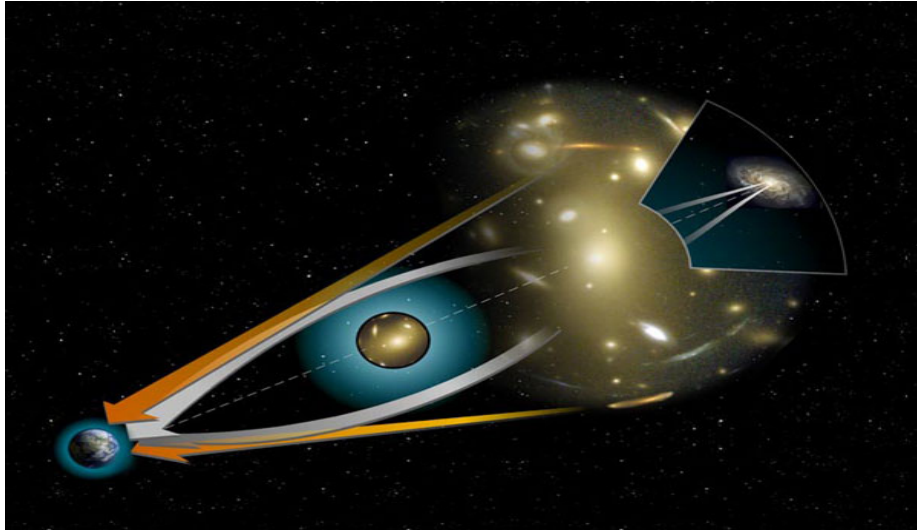


Figura 13. Una lente gravitacional se forma cuando la luz procedente de objetos distantes y brillantes como los cuasares se curva alrededor de un objeto masivo (como una galaxia masiva) situado entre el objeto emisor y el receptor.

Cúmulos de galaxias. Los cúmulos de galaxias son grandes agrupaciones de miles de galaxias de diferentes tipos (figura 14) y son los objetos astrofísicos ligados más grandes que existen en el Universo. Estos cúmulos de galaxias resultan ser ideales para estimar la densidad de materia en el Universo estudiando su dinámica. Los astrónomos han estimado que la cantidad de materia presente en el Universo es alrededor del 30%. Nuevamente se llega al mismo valor aproximado que con otro tipo de observaciones como los ya mencionados. Esto se puede considerar como evidencia indirecta de la existencia de un 70% de energía oscura.

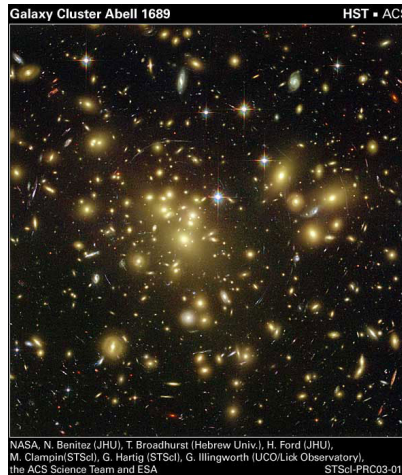


Figura 14. Cúmulo de galaxias Abell 1698. Créditos: Hubble Space Telescope.

Oscilaciones acústicas bariónicas. Como hemos mencionado previamente, en el Universo
20 -xx

temprano, la temperatura era lo suficientemente alta para permitir el acoplamiento entre las diferentes componentes del Universo. La materia ordinaria que conocemos formaba parte de un plasma oscilante compuesto de fotones y de la propia materia bariónica. Esas oscilaciones eran debidas a la presión de las componentes del plasma. Cuando los fotones se desacoplan de la materia bariónica dejan una huella en la estructura a gran escala del Universo. Esta huella que dejan las pequeñas oscilaciones de la materia bariónica durante el proceso de formación de galaxias en el Universo es lo que se conoce como oscilaciones acústicas bariónicas. Estas oscilaciones acústicas se pueden medir a través de las observaciones de grandes muestras de galaxias, como las obtenidas por el proyecto SDSS (Sloan Digital Sky Survey: <http://www.sdss.org/>) y posteriormente se pueden dar estimaciones de la cantidad de materia y energía en el Universo. Los resultados concuerdan con que el 30% del contenido total del Universo es materia y un 70% es energía oscura, posiblemente una constante cosmológica.

Combinando todas las observaciones cosmológicas previas (y otras como las observaciones de los estallidos de rayos gamma, las observaciones de rayos X, etcétera) se puede concluir que el Universo está compuesto alrededor de un 30% de materia oscura y un 70% de energía oscura (posiblemente constante cosmológica), confirmando las primeras evidencias observacionales obtenidas por Riess y Perlmutter. A pesar de que la constante cosmológica es el candidato favorito a ser la energía oscura en el Universo, existen diferentes alternativas y propuestas para la naturaleza misma de la energía oscura y la expansión acelerada del Universo. Muchas de estas alternativas incluyen campos escalares fundamentales (como el famoso Bosón de Higgs) que aún no han sido observados en los aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés), o incluso campos escalares con energías cinéticas negativas. Otras alternativas sugieren que no existe la energía oscura en el Universo y lo que se mide en las observaciones son los efectos de modificaciones a la gravedad propuesta por Einstein, o los efectos de la presencia de universos paralelos conocidos como branas, o los efectos de un Universo no-homógeno, etcétera. Así, el problema de la energía oscura en el Universo seguirá abierto durante algunos años más, a la espera de tener observaciones cosmológicas más precisas y de nuevos proyectos de detectores y satélites enfocados a estimar las cantidades de materia y energía oscura del Universo, así como también a discernir entre los diferentes modelos teóricos que se tienen en la actualidad.

Agradecimiento:

Este trabajo fue parcialmente financiado por el proyecto PAPIIT IN121609-3 de la DGAPA, UNAM.

Bibliografía

Afonso et al. 2003, *Astronomy and Astrophysics*, v.400, p.951

Alcock *et al.* 2001, *Nature*, Volume 414, Issue 6864, pp. 617

Babcock, 1939, *Lick Observatory bulletin*; no. 498, 41

Bertone, G., Sigl, G., & Silk, J., 2001, *MNRAS*, 326, 799

Durrer, R., arxiv: 1103.5331v1, 2011, What do we really know about dark energy?

Jeans 1922, *MNRAS*, 82, 122,

Mayall, N.U.; Aller, L.H. 1940, *PASP*, 52, 278

Oort, 1932, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, Vol. 6, p.249

Öpik, E. J. 1915, *Bull. Russ. Astron. Soc.*, 21, 150

Perlmutter S. et al., *ApJ*, 517, 565, 1999. MEASUREMENTS OF Ω AND Λ FROM 42 HIGH-REDSHIFT SUPERNOVAE.

Riess A. et al., *ApJ*, 116, 1009, 1998. OBSERVATIONAL EVIDENCE FROM SUPERNOVAE FOR AN ACCELERATING UNIVERSE AND A COSMOLOGICAL CONSTANT.

Weinberg, S., 1989, *Reviews of modern physics* Vol. 61, No 1

Zwicky, 1933, *Helvetica Physica Acta*, Vol. 6, p. 110