

Resumen en Castellano

Somos sólo una clase avanzada de monos en un planeta menor en una estrella cualquiera. Pero podemos entender el Universo. Eso nos hace algo muy especial.

– Stephen Hawking

El Universo a gran escala

Al mirar al cielo en una noche oscura, podemos notar que las estrellas no están distribuidas aleatoriamente sino que, en su mayoría, se ubican en una delgada banda que cruza el cielo. Esta banda corresponde a la *Vía Láctea*, la galaxia espiral en la que se encuentra el Sol. Junto con el Sol, se estima que la Vía Láctea contiene unos 100 millones de estrellas. El panel izquierdo de la Figura 1 muestra una típica galaxia espiral, denominada Messier 81, a unos 12 millones de años luz de la Vía Láctea. Su color azul, característico de las galaxias espirales, corresponde al color de la luz que emiten las estrellas “jóvenes”, formadas hace unos 100 millones de años o menos. Nuestra Galaxia es parte del llamado *Grupo Local*, que corresponde a un aglomerado de unas 50 galaxias dominado por la Vía Láctea y la galaxia Andrómeda, situada a unos 2,5 millones de años luz de la Vía Láctea.

La mayoría de las galaxias en el Universo viven en agrupaciones, y el Grupo Local es sólo un ejemplo de éstas. Como convención, llamamos *grupos* de galaxias a agrupaciones más bien pequeñas, de unas 50 galaxias o menos, y llamamos *cúmulos* a las agrupaciones más grandes. Estos cúmulos de galaxias son los objetos más grandes que se han formado hasta ahora en el Universo. Un cúmulo de galaxias puede llegar a tener más de mil galaxias visibles, y una masa equivalente a 10^{15} (es decir, 1.000.000.000.000.000) veces la masa del Sol. El panel derecho de la Figura 1 muestra el cúmulo de galaxias Abell 2218 (descubierto por el astrónomo estadounidense George Abell). En la imagen se distinguen decenas de galaxias elípticas de color anaranjado, la mayoría de ellas pertenecientes al cúmulo. Este enorme cúmulo se encuentra a unos 2 mil millones de años luz de nosotros.

Las galaxias en un cúmulo se ven anaranjadas y no azules como las galaxias espirales, que típicamente se encuentran más bien aisladas. La razón es que la gravedad del cúmulo, además del gas que lo permea y las otras cientos de galaxias en el cúmulo, se encargan de remover todo el gas que Sin poder formar nuevas estrellas, la galaxia toma el color rojizo de sus estrellas viejas.

Materia oscura

Las galaxias que podemos ver, incluyendo sus estrellas, gas y polvo, además de todos los átomos del Universo, sólo componen aproximadamente un 20 por ciento de la materia del Universo. La mayoría de la materia corresponde a un componente misterioso al que llamamos



Figura 1: **Izquierda:** galaxia espiral Messier 81. La imagen es una combinación de observaciones hechas por el telescopio Subaru en Hawái y el Telescopio Espacial Hubble. El color azul muestra la luz emitida por estrellas jóvenes, mientras que el color rojo muestra polvo en la galaxia. *Crédito: Ken Crawford (Rancho del Sol Observatory).* **Derecha:** cúmulo de galaxias Abell 2218, observado con el Telescopio Espacial Hubble. La mayoría de los objetos de color anaranjado son galaxias pertenecientes al cúmulo. También se distinguen múltiples arcos alrededor de las galaxias principales; éstos corresponden a galaxias deformadas por el efecto de lente gravitacional fuerte. *Crédito: NASA, Andrew Fruchter y el Equipo ERO [Sylvia Baggett (STScI), Richard Hook (ST-ECF), Zoltan Levay (STScI)] (STScI).*

materia oscura. Aunque no podemos ver la materia oscura directamente, podemos inferir su presencia por su influencia en la materia que sí vemos, a través de la gravedad.

El descubrimiento de la materia oscura se remonta al año 1933, cuando el astrónomo búlgaro Fritz Zwicky mostró que los cúmulos de galaxias deben contener una gran cantidad de materia no visible que mantenga las galaxias unidas, porque éstas se mueven demasiado rápido y, de otra manera, escaparían del cúmulo. En 1980, un estudio liderado por la astrónoma estadounidense Vera Rubin mostró que las estrellas en galaxias espirales también se mueven más rápido de lo esperado, y que se requieren grandes cantidades de materia oscura para mantener a las estrellas dentro de la galaxia. A partir de entonces, la evidencia a favor de la materia oscura ha ido creciendo y, aunque aún no se ha confirmado su existencia, la mayoría de los astrónomos acepta la hipótesis de la existencia de la materia oscura.

Por lo tanto, para poder entender la formación y evolución de las galaxias, debemos estudiar también la materia oscura que las rodea. Existen dos técnicas para investigar directamente la materia oscura a través de su efecto gravitatorio: los movimientos de las estrellas y galaxias, y las lentes gravitacionales.

Los movimientos de las estrellas y galaxias

La relación entre los movimientos de las estrellas en galaxias y la masa de las últimas es en teoría relativamente sencilla. Tal como un cohete necesita alcanzar una cierta rapidez para escapar la atmósfera terrestre (conocida como la *velocidad de escape*), existe una máxima velocidad que las estrellas pueden tener antes de escapar de su galaxia huésped. Esta velocidad está directamente relacionada con la masa total del sistema. Por lo tanto, midiendo la velocidad máxima de las estrellas en una galaxia se obtiene una medida de la masa de dicha galaxia.

En el caso de galaxias espirales, podemos usar las *velocidades rotacionales* de las estrellas (es decir, la velocidad con la que orbitan la galaxia) para medir la *curva de rotación* de la galaxia: la velocidad rotacional de sus estrellas en función de la distancia al centro de la

galaxia. Sin materia oscura, las estrellas más alejadas del centro deberían tener velocidades rotacionales menores que las estrellas en un radio “pivote”. Sin embargo, como mostraron por primera vez Vera Rubin y sus colaboradores en 1980, la velocidad de rotación de las estrellas se mantiene constante hasta que termina la galaxia. Esto puede explicarse por la mayor extensión de la materia oscura, que logra mantener a las estrellas dentro de la galaxia.

En el caso de grupos y cúmulos de galaxias sus galaxias no rotan coherentemente, y lo mismo ocurre con las estrellas en una galaxia elíptica. En cambio, las galaxias en un cúmulo de galaxias siguen trayectorias aleatorias, y su *dispersión de velocidades*—es decir, la velocidad típica de las galaxias en un cúmulo—está directamente relacionada con la masa del cúmulo a través del *Teorema del Virial*. Éste fue el método utilizado por Fritz Zwicky en 1933, que lo llevó a proponer la existencia de materia oscura por primera vez.

Lentes gravitacionales

El efecto de lente gravitacional corresponde a la aparente deformación de objetos lejanos, debido a la materia que se encuentra entre estos objetos y nosotros. Este efecto es una consecuencia de la íntima conexión entre la geometría del espacio y su contenido de materia, descrita en la famosa Teoría General de Relatividad, publicada por Albert Einstein hace exactamente 100 años. De acuerdo a esta teoría, la materia curva el espacio, de manera que la luz viaja a través de caminos curvos en lugar de rectos, y por lo tanto las galaxias que están detrás de otra galaxia o cúmulo de galaxias se ven deformadas. Por lo tanto, al observar una lente gravitacional se puede inferir directamente la distribución de materia del objeto que la produce.

En el panel derecho de la Figura 1 se distingue un gran número de arcos alargados y muy finos que rodean las galaxias principales. Estos arcos corresponden a galaxias detrás del cúmulo que se ven deformadas por la lente gravitatoria producida por el cúmulo. Cuando el efecto es tan notorio, se conoce como lente gravitacional *fuerte*, y sólo se puede observar en la zona central de cúmulos de galaxias o galaxias muy masivas. Más lejos del centro, sólo se puede observar el efecto de lente gravitacional *débil*, en el que la luz de cada galaxia de fondo sufre sólo una pequeña distorsión. En este caso, la distribución de materia en el cúmulo es revelada por la deformación promedio de miles de galaxias de fondo.

Ambos efectos permiten medir directamente el contenido de materia de la galaxia o el cúmulo que produce la lente gravitacional. Idealmente, estos efectos se deben combinar para determinar de manera completa y detallada la distribución total de materia en la galaxia o el cúmulo. En la práctica, esto requiere de observaciones muy detalladas en regiones grandes del cielo, y sólo ha sido posible hasta ahora en unos pocos cúmulos de galaxias.

La conexión entre masa y luz en galaxias y cúmulos de galaxias

Como primer paso para estudiar la conexión entre materia oscura y materia luminosa (o simplemente entre “masa” y “luz”), es importante distinguir dos clases de galaxias: las galaxias *centrales* y las galaxias *satélites*. En general, los cúmulos (o grupos) de galaxias contienen una galaxia dominante en el centro, más brillante que todas las demás galaxias, a la que se denomina galaxia central. Las demás galaxias se denominan satélites. En Abell 2218, mostrado en el panel derecho de la Figura 1, se identifica claramente la galaxia central dominante a la derecha de la imagen, rodeada por arcos producidos por lentes gravitacionales.



Figura 2: Masa y luz en el cúmulo de galaxias El Gordo, un gigantesco sistema compuesto por al menos dos cúmulos en proceso de colisión. La imagen de fondo fue tomada con el Telescopio Espacial Hubble. El tono azul muestra la distribución de materia oscura, determinada con el método de lentes gravitacionales débiles, mientras que el tono rojizo muestra la distribución de gas, determinada con observaciones de rayos X. Dada la enorme distancia a este cúmulo, de unos 7 mil millones de años luz, es difícil identificar las galaxias a simple vista, pero destaca la galaxia central justo a la izquierda de la zona con mayor concentración de gas. Debido a la enorme colisión, la materia oscura y la luz en El Gordo están claramente disociadas. *Crédito: NASA, ESA, J. Jee (Univ. of California, Davis), J. Hughes (Rutgers Univ.), F. Menanteau (Rutgers Univ. & Univ. of Illinois, Urbana-Champaign), C. Sifón (Leiden Obs.), R. Mandelbaum (Carnegie Mellon Univ.), L. Barrientos (Univ. Católica de Chile), y K. Ng (Univ. of California, Davis).*

Esta distinción es importante porque ambas clases de galaxias se ven afectadas de manera muy distinta por su entorno. La razón es que las galaxias satélite caen hacia la galaxia central, y la galaxia central crece a través de sucesivas fusiones con galaxias satélite. Para cada galaxia, se debe determinar si está aislada y es por lo tanto una galaxia central, o si es parte de un grupo, en cuyo caso podría ser también una galaxia satélite. En la práctica, resulta difícil diferenciar ambos tipos de galaxias; para esto se requieren mediciones precisas de las distancias de las galaxias. Las galaxias centrales son en general más fáciles de identificar, ya que son las galaxias más brillantes en su vecindad, y la mayoría de los estudios de la conexión entre masa y luz hasta ahora se han centrado en ellas. La conclusión principal es que las galaxias más luminosas son también más masivas (algo no del todo sorprendente), y que las galaxias en los extremos (las menos y las más luminosas) tienden a tener una mayor fracción de materia oscura, mientras que las galaxias intermedias tienen una menor fracción. Sin embargo, la relación entre masa y luz en galaxias satélite prácticamente no ha sido explorada. Dada la transformación radical que sufren las galaxias al convertirse en satélite de otras galaxias (como se puede apreciar comparando los paneles izquierdo y derecho de la Figura 1), se puede esperar una transformación similar en su contenido de materia oscura. La segunda mitad de esta tesis está dedicada precisamente a estudiar la conexión entre masa y luz en galaxias satélite en grupos y cúmulos de galaxias.

Las galaxias en un cúmulo de galaxias componen sólo un 20% de la masa luminosa del cúmulo (es decir, aproximadamente un 4% de su masa total). El 80% restante es un gas caliente, a una temperatura de unos 10^7 grados o más, que permea el cúmulo. Dada su temperatura, este gas se puede observar en ondas de rayos X. La Figura 2 muestra la distribución de masa en el cúmulo de galaxias “El Gordo”, a unos 7 mil millones de años

de distancia. En este cúmulo se distinguen dos regiones con grandes cantidades de materia (principalmente materia oscura, en azul en la Figura), que no coincide con la distribución de gas (mostrada en rojo). Esta imagen muestra que este cúmulo está compuesto por dos sub-cúmulos muy masivos que están en proceso de colisión. Dado que la mayoría de la materia luminosa corresponde precisamente al halo de gas, esta separación entre materia luminosa y masa total provee evidencia directa de la existencia de materia oscura. En la primera mitad de esta tesis estudiamos la relación entre la masa total de un número de cúmulos de galaxias y su halo de gas caliente.

Esta tesis

Esta tesis comienza explorando la conexión global entre la cantidad de masa y luz en cúmulos de galaxias combinando observaciones del gas de los cúmulos con determinaciones de su masa total, para luego estudiar más directamente esta conexión en las galaxias pertenecientes a estos cúmulos.

En el **Capítulo 2** estudiamos el cúmulo de galaxias PLCK G004.5–19.5 (llamado así por sus coordenadas en el cielo). Usamos el efecto de lente gravitacional fuerte para medir la cantidad de masa total en el cúmulo, y encontramos que es menor que la esperada a partir de las propiedades del halo de gas. La razón de esta diferencia no queda clara con los datos disponibles. Además, usando datos en ondas de radio pudimos concluir tentativamente que el cúmulo está en proceso de colisión con un sistema más pequeño. Esta colisión podría explicar la diferencia en la masa inferida usando el gas del cúmulo y la masa medida con lentes gravitacionales, ya que estas determinaciones de la masa asumen que el cúmulo está aislado. En el futuro usaremos nuevas observaciones para obtener mayor información sobre este cúmulo.

En el **Capítulo 3** tomamos una perspectiva más estadística para comparar la cantidad de masa estimada usando las propiedades del gas, y la inferida a través de la dispersión de las velocidades de las galaxias en 44 cúmulos de galaxias. Parte importante de este capítulo es una discusión detallada de las fortalezas y debilidades inherentes al uso de las velocidades de galaxias para determinar la masa de los cúmulos. Encontramos que la masas inferidas usando las velocidades de las galaxias son, en promedio, consistentes con aquéllas inferidas a partir del halo de gas. Sin embargo, existen demasiados factores que afectan estos resultados. Estos factores limitan la posibilidad de usar las velocidades de las galaxias para medir masas de cúmulos de galaxias con precisión.

En el **Capítulo 4** tornamos la atención hacia las galaxias que componen los cúmulos, y exploramos otro aspecto de la conexión entre masa y luz: la orientación de ambos componentes. Un cúmulo ejerce un fuerte efecto de marea sobre sus galaxias satélites, y en este capítulo exploramos si es que esta fuerza de marea es capaz de alinear estas galaxias hacia el centro del cúmulo. Este efecto se observa claramente en simulaciones de materia oscura, pero hasta hace poco no había observaciones directas. Usando unas 14.000 galaxias en 100 cúmulos distintos, no observamos ninguna señal de alineamiento de las galaxias hacia el centro del cúmulo, ni con las demás galaxias.

Un aspecto importante de los resultados del **Capítulo 4** es la conexión entre la alineación de las galaxias y las mediciones de lentes gravitacionales, ya que este efecto se observa a través de la alineación de galaxias detrás de las lentes. Nuestras mediciones sugieren que cualquier alineamiento de las galaxias en cúmulos debe ser muy débil, y no afecta de manera significativa las mediciones de lentes gravitacionales con experimentos actuales. Habrá que obtener resultados aún más precisos para sacar conclusiones sobre proyectos futuros que

medirán lentes gravitacionales con mayor precisión.

En el **Capítulo 5** medimos el efecto de lentes gravitacionales débiles que producen las galaxias satélites en grupos de galaxias. Ésta es sólo la segunda vez que se logra tal medición. Encontramos que estas galaxias tienen una masa total aproximadamente 20 veces mayor que su masa estelar, similar a las masas de galaxias centrales. También mostramos cómo se podrían utilizar mediciones más precisas de este efecto incluso para examinar modelos cosmológicos.

Finalmente, en el **Capítulo 6** extendimos el estudio del **Capítulo 5** a cúmulos más masivos—aquéllos usados en el **Capítulo 4**. Usamos la misma técnica de lentes gravitacionales débiles para medir la cantidad de materia oscura en galaxias en estos cúmulos. Aprovechando la mejor calidad de los datos usados en este capítulo (comparado con los datos del **Capítulo 5**), comparamos nuestros resultados con predicciones teóricas. Por el momento, nuestros resultados son consistentes con las predicciones: en promedio, todas las galaxias en cúmulos masivos tienen más o menos la misma fracción de materia oscura: aproximadamente un 95%. Para investigar los mecanismos físicos que dan origen a estos resultados, en el futuro exploraremos mediciones similares en simulaciones computacionales, que podremos contrastar con nuestras observaciones.