

TELESCOPIOS NATURALES DE LENTES OSCURAS

Desgranando la eficiencia de las fábricas de estrellas en el universo distante

ITZIAR ARETXAGA

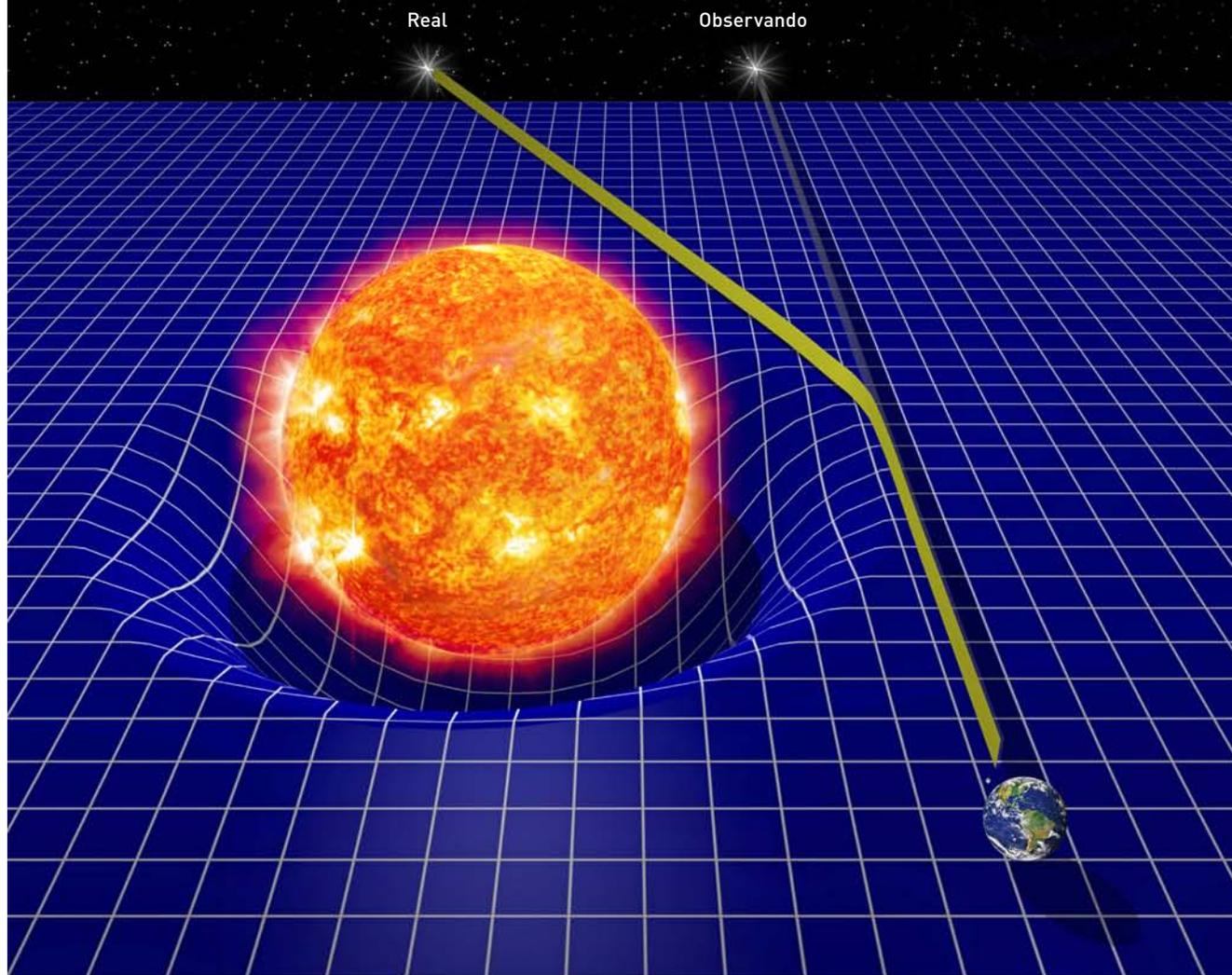


FIGURA 1. Esquema de lente gravitatoria. El observador percibe que una estrella que se encuentra cerca del disco solar tiene una distancia angular proyectada mayor a la real, debido a la deflexión de la luz producida por el espacio curvo cerca del Sol. [ESA/Hubble & NASA]

Los cúmulos de galaxias, dominados por materia oscura de carácter exótico, se puede decir que ejercen como lentes oscuras magnificadoras para las galaxias que se encuentran detrás de ellos. Estas lentes gravitatorias amplifican objetos débiles y distantes que de otra forma no seríamos capaces de observar.

Probablemente todos los ciudadanos hemos experimentado los beneficios de artefactos ópticos que nos permiten manipular la luz. Llámense gafas, lupas, binoculares, microscopios o telescopios, los dispositivos ópticos que modifican la trayectoria de la luz a través de lentes para obtener imágenes amplificadas de aquello que es pequeño o distante, o hacer nítida una imagen borrosa producida por un ojo humano deforme, no nos son ajenos.

Al igual que los vidrios de las lentes ópticas, la gravedad también puede desviar la luz y producir efectos ópticos de amplificación y distorsión. Este fenómeno, conocido como lente gravitatoria, permite ayudar a los telescopios construidos por los humanos para ver objetos que de otra forma serían demasiado débiles para ser registrados por la tecnología actual, proveyendo de auténticos telescopios naturales que vienen a socorrer al astrónomo que se interesa por el universo distante y primitivo.

AMPLIFICACIÓN GRAVITATORIA

El efecto gravitatorio sobre la luz es bien conocido y está predicho por la teoría de la rela-

tividad general de Albert Einstein (1879-1955), que este año cumple un siglo. En el eclipse solar de 1919 Arthur Eddington (1882-1944) y sus colaboradores corroboraron que la posición aparente de las estrellas sufría una deflexión que las alejaba de su posición natural con respecto al resto de las estrellas cuando estas se encontraban

En ondas (sub-) milimétricas, de 500 μm a 2 mm, se pueden seleccionar eficientemente lentes gravitatorias solamente por el excepcional brillo aparente de las galaxias amplificadas

en proyección cerca del disco solar. La interpretación natural era que, según lo predicho por la teoría, la luz en su camino al observador terrestre sentía el campo gravitatorio solar, que curva ligeramente el espacio a su alrededor. La luz siempre sigue la trayectoria más corta, que en el caso de un espacio

curvo, como el que atraviesa cerca del Sol, es una curva. La posición angular aparente de la estrella que el observador percibe es la extensión de la trayectoria ya prácticamente lineal cercana al observador, y alejada de su posición angular real (véase la Figura 1).

Hoy en día conocemos cientos de lentes gravitatorias, muy especialmente entre objetos extragalácticos, que producen efectos de arcos, anillos o imágenes múltiples de galaxias que se encuentran mucho más distantes. Estas, sin embargo, no son fáciles de encontrar en búsquedas en el visible. A pesar de que fueron ya predichas en los años 40 del siglo pasado, el primer sistema extragaláctico amplificado gravitatoriamente lo descubrieron fortuitamente Dennis

Walsh (1933-2005), Robert Carswell y Ray Weyman en 1979, SBS 0957+561, un cuásar a 13 899 millones de años luz (corrimiento al rojo $z = 1,41$) que es amplificado por la galaxia elíptica gigante YGKOW G a 4587 millones de años luz ($z = 0,355$) y produce dos imágenes gemelas separadas 6 segundos de arco en

el cielo^[5]. Fue la similitud de colores y espectros de las dos imágenes gemelas del cuásar las que lo delataron como un solo objeto astronómico.

No es sencillo predecir qué sistema del cielo tiene la distancia y posición precisa entre una galaxia y otra y el observador para producir efectos notables de lente gravitatoria. Por lo tanto, no es sencillo predecir en qué zona del cielo nos encontraremos con una lente gravitatoria. La salvedad son las búsquedas de amplificaciones alrededor de los sistemas más masivos que conocemos en el Universo, los cúmulos de galaxias.

LAS LENTES OSCURAS MÁS PODEROSAS DEL UNIVERSO

Los cúmulos de galaxias son agrupaciones de miles de galaxias gravitatoriamente ligadas entre sí. Los más cercanos ya eran conocidos como aglomeraciones de nebulosas en el siglo XVIII, cuando Charles Messier (1730-1817) y William Herschel (1738-1822) trazaron los primeros catálogos de estos difusos objetos. Los cúmulos más cercanos y notorios, Virgo (a 54 millones de años luz), Fornax (a 62 millones de años luz), y Coma (a 333 millones de años luz), son solo algunos de las decenas de miles de cúmulos de galaxias que hoy en día conocemos.

Tan pronto se estableció la naturaleza extragaláctica de gran parte de las nebulosas recogidas en los catálogos de Messier, los cúmulos de galaxias se reconocieron como las mayores estructuras del Universo. La masa de estas estructuras excede por mucho la masa de las propias galaxias que contiene. Los te-

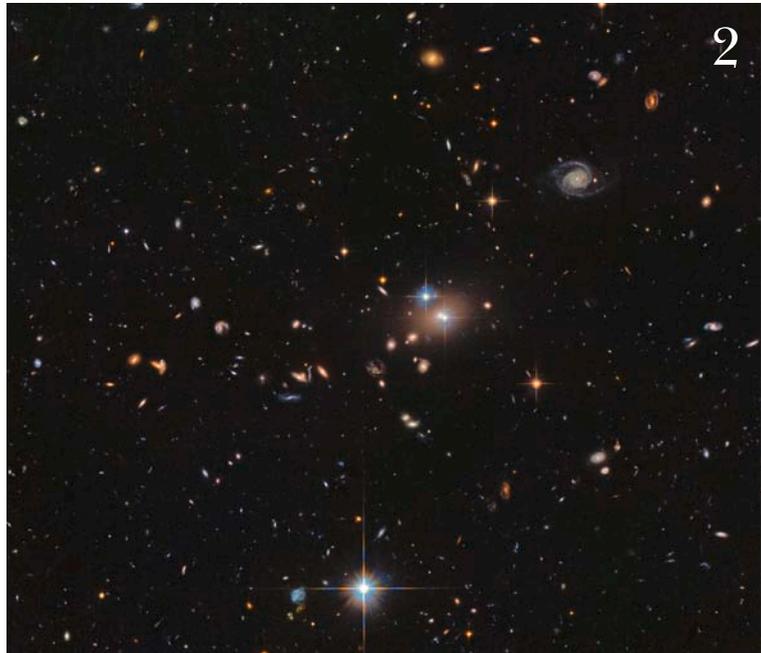


FIGURA 2. Cuásar gemelo SBS 0957+561, a 13 899 millones de años luz, identificado a través de sus dos imágenes azules de apariencia estelar separadas 6 segundos de arco en el cielo, que rodean a la galaxia elíptica gigante roja YGKOW G a 4587 millones de años luz. (ESA/Hubble & NASA).



FIGURA 3. El cúmulo Abell 2218, a 2345 millones de años luz, magnífica y distorsiona la luz proveniente de galaxias más distantes, que aparecen en la imagen en forma de arcos. Los arcos azules son galaxias que se encuentran a distancias de unos 19 mil millones de años luz. (NASA, ESA y Johan Richard-Caltech-)

lescopios de rayos X han permitido trazar una componente de gas difuso a grandes temperaturas, de 10 a 100 millones de grados Kelvin, que supone el contenido más abundante de materia ordinaria (hecha de átomos y sus componentes) en estos sistemas. Aproximadamente hay diez veces más materia ordinaria en el gas intracúmulo que en las propias galaxias.

Ya en los años 30 del siglo pasado Fritz Zwicky (1898-1974) se percató de que las velocidades de las galaxias en el cúmulo de Coma con respecto a su centro, típicamente de unos 1000 km/s, eran demasiado grandes para que el cúmulo fuera estable. Las velocidades excedían la velocidad a la cual las galaxias escaparían de la atracción gravitatoria de la agrupación. La única forma de mantener el cúmulo estable era si existía más masa que no brillara. Sin embargo, la cantidad de masa necesaria para mantener el sistema estable no puede ser completada por el medio intracúmulo, falta más masa aún. A esta componente faltante se le conoce como materia oscura.

El trabajo de Vera Rubin y colaboradores en los años 70 sobre las curvas de rotación de las galaxias espirales es el que ha apuntalado mejor en el imaginario astronómico la existencia de esta exótica componente. Al igual que en los cúmulos, en las galaxias también hay materia no luminosa faltante. Las estrellas y el gas en las órbitas más externas de las galaxias espirales no tienen velocidades más pequeñas que las de las más interiores, como por ejemplo tienen los planetas exteriores con res-

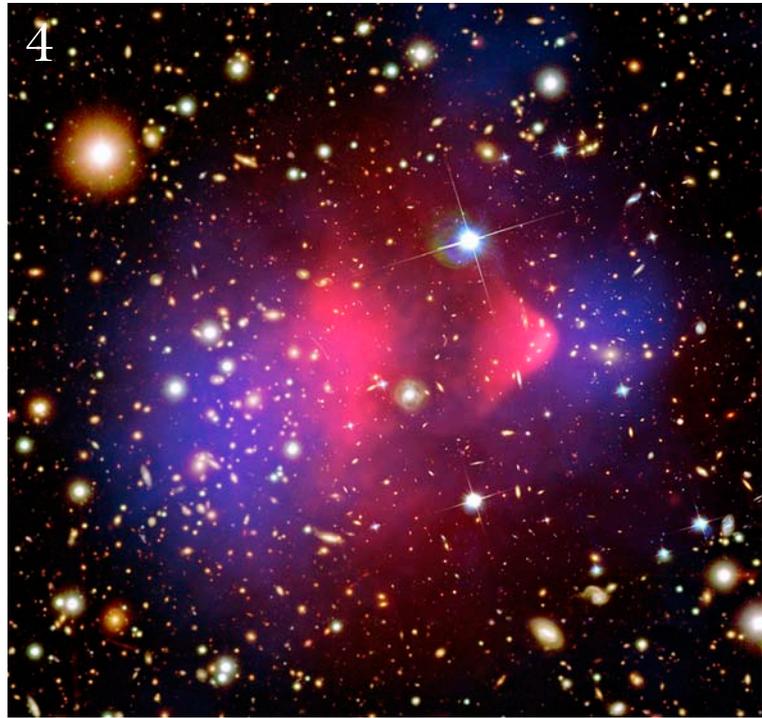
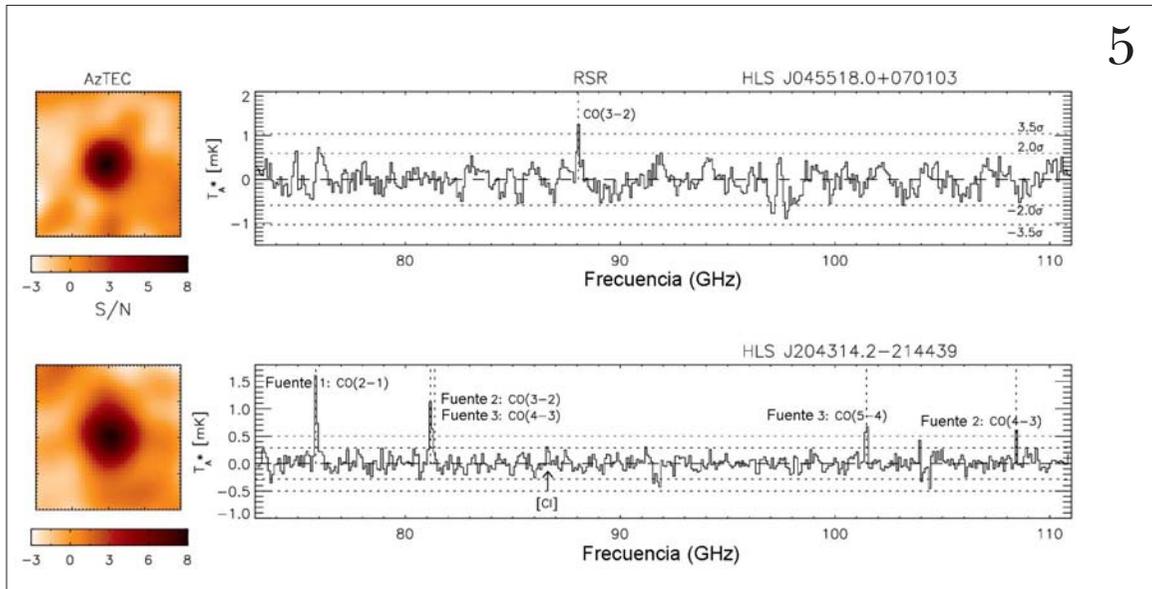


FIGURA 4. La Bala, a 3830 millones de años luz, es un sistema de dos cúmulos en colisión. En amarillo se representa la luz visible emitida por las galaxias, en rojo la emisión de rayos X del gas difuso intracúmulo y en azul el contenido de materia oscura inferido. [Rayos X: NASA/CXC/M. Markevitch et al. Óptico: NASA/STScI; Magellan/U. Arizona/D. Clowe et al. Lensing Map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U. Arizona/D. Clowe et al.]

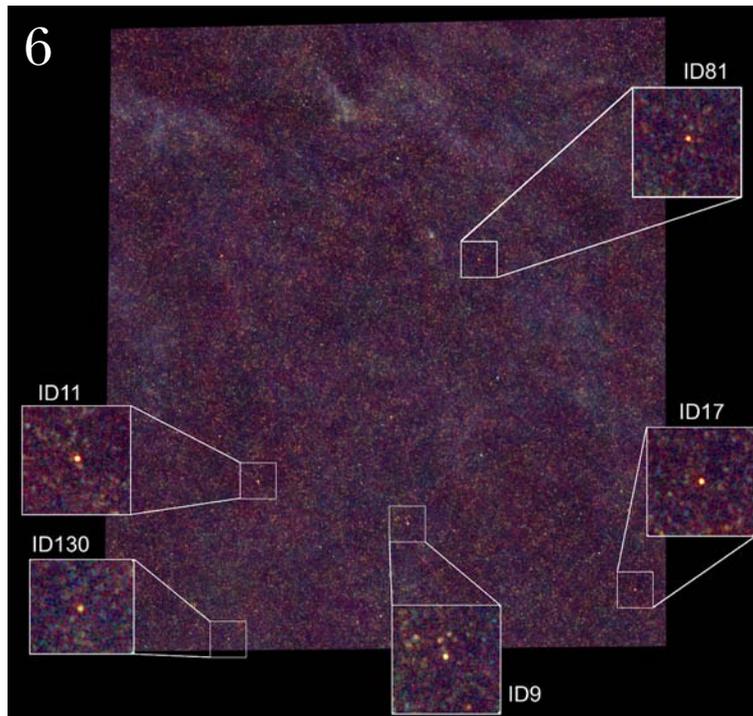
pecto a los interiores en nuestro Sistema Solar. Las velocidades de las estrellas más externas tienen la misma velocidad que las de estrellas más interiores. Si toda la materia que existe en la galaxia fuera la luminosa, estas estrellas y gas exterior escaparían, porque excederían la velocidad a la que la gravedad balancea la fuerza centrífuga que las permite mantenerse ligadas a la galaxia. La inferencia es que de mantenerse válida la ley de gravedad que experimentamos en el Sistema Solar, debe existir materia oscura.

El contenido de materia oscura es mayor cuanto mayor sea la estructura gravitatoriamente ligada que se estudia, así su con-

centración es máxima en cúmulos de galaxias: el cociente es $\sim 6/1$ materia oscura a materia ordinaria (tanto la emitida por las galaxias como por el gas intracúmulo). Además, la abundancia de elementos químicos ligeros como el helio o el deuterio, que se deduce se generan en los primeros minutos de vida del Universo, y se pueden medir en astros poco evolucionados, implica que la densidad promedio del Universo hoy en día debe ser de tan solo unos cuatro protones (o neutrones) por metro cúbico. Esta densidad es unas seis veces menor que la densidad promedio derivada a través de los movimien-



5



6

FIGURA 5. Imagen a 1,1 mm y espectroscopia del Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano de dos candidatos a sistemas amplificados identificados en censos del Observatorio Herschel. El segundo espectro revela que la imagen (sub-)milimétrica está compuesta por tres galaxias en la línea de visión de la lente no relacionadas entre sí. (GTM/J Zavala-INAOE-)

FIGURA 6. Censo H-ATLAS a 500 μm del Observatorio Espacial Herschel. Se destacan cinco galaxias amplificadas con excepcional brillo, a distancias entre 15 mil y 21 mil millones de años luz. Las galaxias que en ondas (sub-)milimétricas son excepcionalmente brillantes se perfilan como candidatos de amplificaciones por lentes gravitatorias. (ESA/SPIRE/Herschel-ATLAS/SJ Maddox)

tos de las galaxias en cúmulos, por lo que se deduce que la materia oscura tiene una naturaleza exótica, y no está compuesta de materia ordinaria como las partículas elementales que conforman los átomos y sus parien-

tes cercanos. Es así que se puede decir que los cúmulos de galaxias, dominados por materia oscura, hacen las veces de lentes oscuras magnificadoras para las galaxias que se encuentran detrás de ellos.

BÚSQUEDAS DE AMPLIFICACIONES GALAXIA-GALAXIA

Si bien es relativamente fácil encontrar galaxias amplificadas alrededor de cúmulos de galaxias, encontrar la amplificación de una galaxia por otra que se encuentre en la línea de visión del observador es mucho más difícil, y frecuentemente se hace de forma fortuita, como en el caso de

SBS 0957+561, al identificar distorsiones o multiplicidad en imágenes de alta nitidez. Sin embargo, el Observatorio Espacial Herschel y el telescopio milimétrico *South Pole Telescope*^{3,4)}, entre otros, permitieron hace cinco años probar un concepto de búsqueda de lentes a ciegas en grandes censos del cielo trazados en ondas (sub-)milimétricas, guiados solamente por el brillo de la galaxia amplificada.

Las galaxias que típicamente se encuentran en los censos del cielo a estas longitudes de onda (500 μm - 2 mm) tienen propiedades extraordinarias por comparación con las que se encuentran en censos del visible al infrarrojo cercano: tasas de formación estelar que rebasan las quinientas masas solares al año

(por referencia, la Vía Láctea forma aproximadamente una masa solar al año), luminosidades integradas que superan los diez billones de soles, masa en estrellas que excede los cien mil millones de soles y distancias que superan los quince mil millones de años luz. Estas fábricas de estrellas se encuentran fuertemente oscurecidas por el polvo cósmico de su medio interestelar. Denominamos polvo a las agregaciones de silicatos, carbono y otros elementos pesados en granos que van de unas pocas moléculas a aproximadamente 0,1 mm, que absorben fuertemente la luz visible y a su vez facilitan la formación de estrellas.

Estos sistemas extremos se pueden encontrar con relativa facilidad en censos amplios del cie-

lo, pero la abundancia de las galaxias más brillantes, que corresponden a tasas de formación estelar que superan los 1500 soles al año, es escasa, de unas diez por grado cuadrado del cielo.

Los censos (sub-)milimétricos probaron que si se buscaban sistemas que excedieran un brillo umbral por encima del de estos ya extraordinarios objetos, digamos un factor tres por encima, y se descartaban las detecciones (sub-)milimétricas correspondientes a galaxias cercanas y cuásares fuertemente radio-emisores, el 100 % de los objetos con brillo sobresaliente eran galaxias polvorientas a grandes distancias cósmicas, amplificadas frecuentemente por otras galaxias intervinientes que se encuentran en la línea de visión

Alpha Cygni... más lejos están las estrellas.
Envíos gratuitos. Consulte condiciones.



Baader Hyperion

BORG 36ED

ATIK 460EX

Vixen
VIXEN SG 2.1X42

Importadores Oficiales de VIXEN y BORG.

www.alphacygni.com



FIGURA 7. El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano, situado a 4600 metros sobre el nivel del mar, en la cima del volcán extinto Tliltépetl, Puebla, México. (GTM/J Reyes -INAOE-)

del observador y ejercen como lentes gravitatorias^[3].

El censo H-ATLAS levantado por el Observatorio Herschel (por sus siglas en inglés *Herschel Astrophysical Terahertz Large Area Survey*^[2]) es uno de estos grandes mapas del cielo en ondas sub-milimétricas en los que se ha probado el concepto. La galaxia SDP81 se identificó en uno de los primeros campos observados por el censo, que en su totalidad cubre 550 grados cuadrados, como uno de los objetos más brillantes de la muestra. Con ayuda de los flujos observados a diferentes longitudes de onda se pudo predecir a qué distancia estaba la galaxia amplificada^[1] y sintonizar los espectrómetros milimétricos disponibles en el momento para verificar que la imagen registrada por Herschel corresponde a una galaxia lejana ($z = 3,04$, a una distancia de 21 mil millones de años luz) amplificada por una galaxia

elíptica más cercana en la línea de visión^[3]. Este sistema ha sido recientemente estudiado por el interferómetro *Atacama Large Millimeter Array* para probar sus capacidades de mayor resolución angular, poniendo de manifiesto la casi perfecta alineación entre galaxia lente y galaxia amplificada, que llega a formar un anillo en el plano de la imagen, formalmente conocido como anillo de Einstein. Decenas de sistemas galaxia-galaxia están siendo estudiados en estos momentos por diferentes telescopios para medir las distancias entre lente y galaxia amplificada, y así poder caracterizar la distribución de masa oscura de la galaxia lente y conocer mejor las propiedades de las galaxias amplificadas que, frecuentemente, son poblaciones que de otra manera no se podrían estudiar.

LA EFICIENCIA DE FORMACIÓN ESTELAR EN GALAXIAS EN FORMACIÓN

Una de las muestras de candidatos a galaxias amplificadas por lentes gravitatorias encontradas por el Observatorio Herschel se está estudiando en la actualidad con el Gran Telescopio Milimé-

trico Alfonso Serrano (GTM), situado a 4600 m de altitud sobre el volcán extinto Tliltépetl en el estado de Puebla, México. El espectrómetro que opera en este telescopio tiene la característica novedosa de cubrir completamente y de forma simultánea toda la banda de 3 mm. Su gran cobertura en frecuencia, 73-111 GHz, permite la búsqueda eficiente de líneas de emisión de las galaxias aún sin saber la distancia a las mismas. La expansión del Universo alarga la longitud de onda a la que se observan las transiciones atómicas y moleculares del material que compone los objetos astronómicos, de tal manera que sin saber cuándo fue emitida la luz, no se sabe *a priori* a qué longitud de onda las medirá el observador. En particular la búsqueda de corrimientos al rojo en galaxias polvorientas se centra en las líneas de monóxido de carbono (CO), que son especialmente intensas en galaxias con formación estelar virulenta.

Uno de los objetos analizados en la muestra, HLS J204314.2-214439, es especialmente peculiar, al mostrar líneas de emisión que no son consistentes con una



sola galaxia, sino con tres diferentes galaxias en la línea de visión^[6]. La imagen de mayor resolución angular tomada con el GTM, de 8 segundos de arco, muestra un solo objeto, sin embargo el espectro tomado por el mismo telescopio muestra nítidamente emisión de la molécula de CO a corrimientos

al rojo 2,040, 3,252 y 4,681, correspondientes a distancias entre 17 mil y 25 mil millones de años luz. Las tres galaxias en la misma línea de visión hacia el cúmulo MACS J2043.2-2144 a $z = 0,204$ (2740 millones de años luz), tienen amplificados sus brillos intrínsecos por factores 3 a 5.

Esta amplificación nos permite estudiar la eficiencia de formación estelar en las galaxias en formación más lejanas con una inversión de tiempo relativamente modesta, de un par de horas por objeto. Conocer esta cantidad es crucial: el ritmo al cual una galaxia puede formar estre-

Astrocity.es

Curso de iniciación a la fotografía de cielo profundo
Sábado 19 septiembre / 20 plazas / 69€ / 4h aula + 4h práctica.
Más información en productos destacados de www.astrocit.es

Patrocinado por:
Sky-Watcher[®]
Be amazed.

www.astrocit.es / info@astrocit.es / Tel.att.cliente: 678918836
Sigue nuestros 50 tutoriales de youtube: <https://www.youtube.com/user/astrocities>

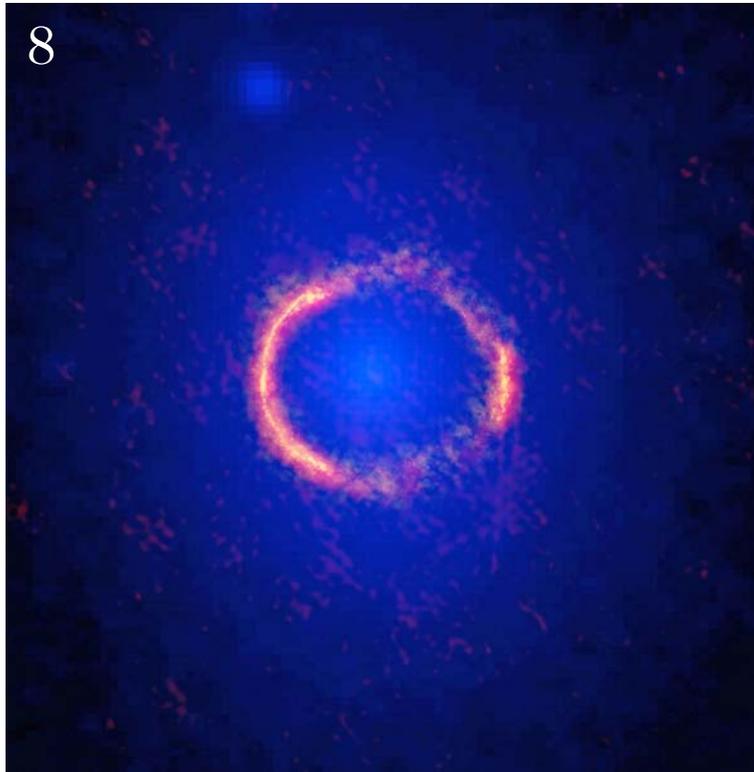


FIGURA 8. SDP81, una de las galaxias amplificadas descubiertas por el censo H-ATLAS, en el que se muestra la galaxia elíptica que ejerce de lente en azul, vista por el Telescopio Espacial Hubble, y la emisión de polvo y CO de la galaxia amplificada en rojo vista por el interferómetro ALMA. (ALMA –NRAO/ESO/NAOJ–; B. Saxton –NRAO/AUI/NSF–; NASA/ESA Hubble, T. Hunter –NRAO–)

llas está limitado por la cantidad de gas molecular que contiene, ya que las estrellas se forman por el colapso gravitatorio de regiones ricas en gas molecular y polvo, las llamadas nubes moleculares. Debido a alguna clase de inestabilidad, como puede ser la explosión de una supernova cercana o el paso por los brazos espirales, estas nubes se vuelven inestables gravitatoriamente, fragmentándose y colapsando. Cuando esto ocurre, la nube aumenta enormemente su densidad hacia el centro, y es ahí donde, con el tiempo, nacerán las nuevas estrellas. La intensa radiación de las estrellas recién nacidas calienta el polvo que hay en el medio que las rodea, provocando una enorme emisión de radiación infrarroja, cuya medición nos permite estimar la tasa a la que las estrellas se están formando.

No obstante, conocer la tasa de formación estelar no nos dice cuán eficientes son las fábricas estelares estudiadas. Para eso tenemos que saber cuánto gas molecular hay del que todavía se pueden formar estrellas. La emisión de CO viene así a nuestra ayuda, y es el cociente entre la luminosidad infrarroja total y la luminosidad de CO el que tomamos como indicador de productividad. Las eficiencias medidas en las muestras estudiadas hasta el momento son muy parecidas entre ellas, y están muy cerca de los valores medidos por otros investigadores en galaxias más cercanas. Este resultado es muy importante, ya que sugiere que la eficiencia a la que el gas molecular se convierte en estrellas podría ser un proceso global y que, al contrario de lo sugerido por otros autores, no dependería del

tipo de objeto ni de la época de formación.

Espectroscopia como esta no está siendo fácil de obtener en galaxias lejanas sin amplificación gravitatoria con los 32 m de diámetro de superficie primaria del GTM actualmente operativos, siendo necesaria su expansión programada a 50 m. Analizar la multiplicidad espectroscópica de fuentes milimétricas extragalácticas y trazar la distribución de distancias cósmicas a las que se encuentran las galaxias polvorientas en formación es uno de los retos que atenderemos en los próximos años. (A)

Referencias

- [1] Aretxaga, I. et al. 2003, MNRAS, 342, 759.
- [2] Eales, S. et al., PASP, 2010, 122, 499.
- [3] Negrello, M. et al. 2010, Science, 330, 880.
- [4] Vieira, J. D. et al. 2010, ApJ, 719, 763.
- [5] Walsh, D., Carswell, R. F., Weymann, R. J., 1979, Nature, 279, 381.
- [6] Zavala, J. et al., 2015, MNRAS, en prensa [arXiv: 1506.04747].

Itziar Aretxaga (itziar@inaoep.mx) es Investigadora Titular C en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), México, y miembro del Sistema Nacional de Investigadores de este país con nivel III (profesora de investigación).

