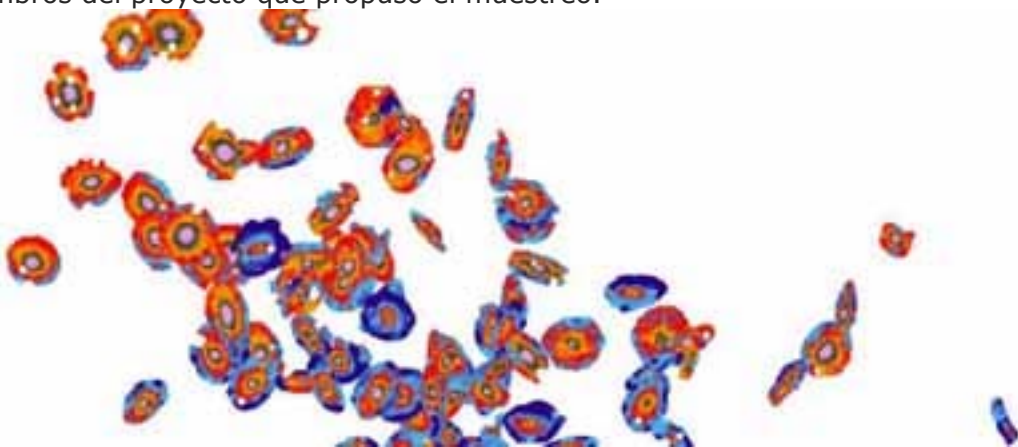


Califa. Una visión panorámica de las galaxias del universo local

DESARROLLADO DESDE EL OBSERVATORIO DE CALAR ALTO, EL MUESTREO CALIFA CONSTITUYE UN PROYECTO DE REFERENCIA PARA LA PRÓXIMA DÉCADA

Sebastián Sánchez (IA-UNAM/IAA-CSIC)

Buena parte del conocimiento que hemos adquirido sobre la arquitectura del universo y sus constituyentes proviene de grandes muestreos extragalácticos (2dFGRS, SDSS, VVDS, COSMOS...). Estos estudios no solamente han acotado parámetros como la tasa de formación estelar cósmica (esto es, cuánto gas se transforma en estrellas a lo largo de la evolución del universo), sino que han permitido relacionarlos con las propiedades individuales de las galaxias, como el tipo morfológico (espirales, elípticas, galaxias en colisión...), la masa estelar o la metalicidad (proporción de elementos más pesados que el helio). Comparados con métodos anteriores, los muestreos recientes presentan las siguientes ventajas principales: un alto número de objetos muestreados, del orden de millones, lo que permite un tratamiento estadísticamente significativo a escalas sin precedentes; la posibilidad de construir grandes muestras y sus correspondientes controles para cada tipo de galaxia, lo que permite comparar propiedades por diferentes grupos; un amplio cubrimiento de los subgrupos de galaxias y sus condiciones ambientales, que permite la obtención de conclusiones universales, independientes de la muestra; y la homogeneidad en el proceso de adquisición de los datos, reducción y análisis, lo que reduce los sesgos debidos a diferentes procesos de observación (lo que solía suceder en observaciones clásicas). Las características de estos proyectos hacen que, más allá de sus objetivos científicos principales, tengan un carácter de legado, siendo de utilidad a un amplio grupo de astrónomos y no solo a los miembros del proyecto que propuso el muestreo.



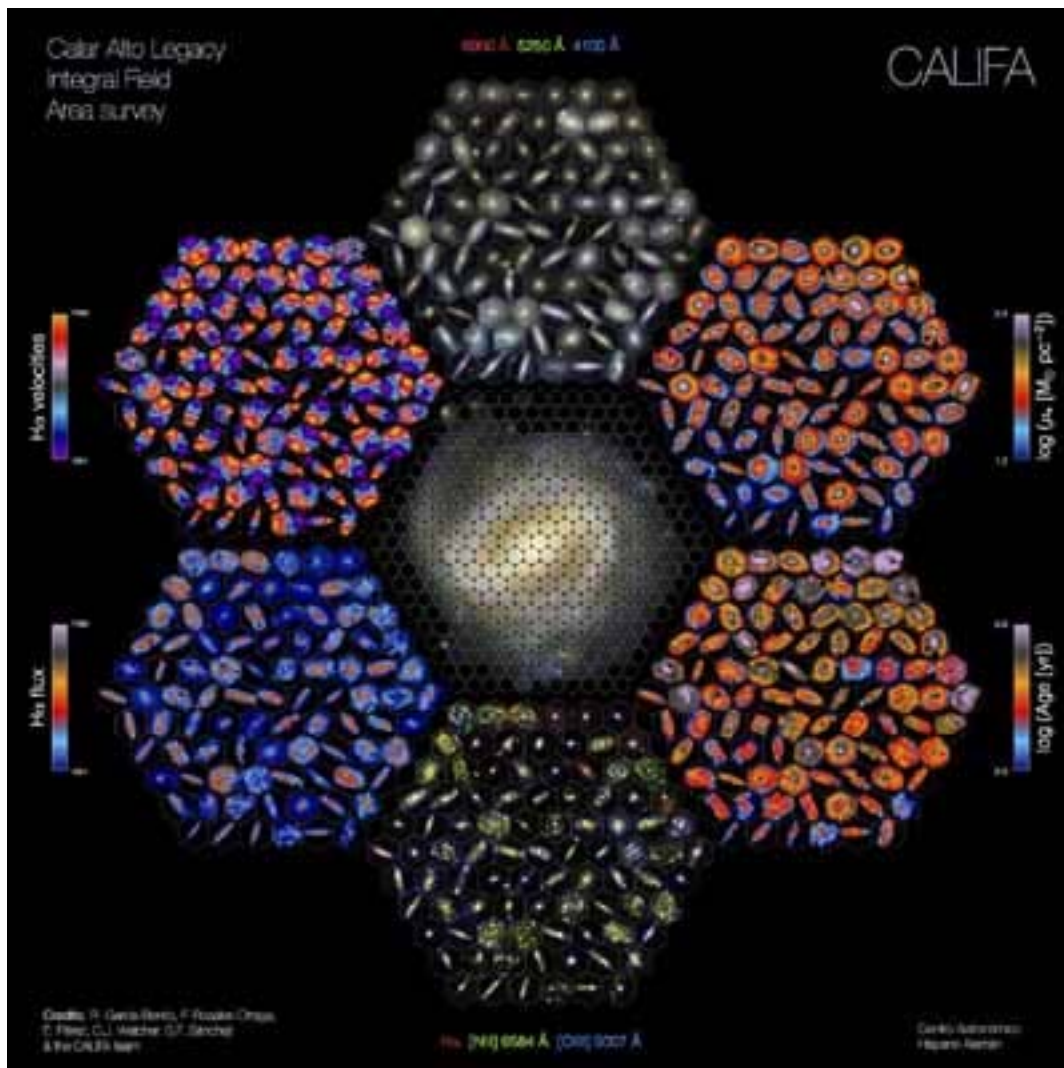
La tecnología actual permite en general la realización de muestreos en modo imagen, normalmente filtrando la luz en una banda de color determinada, o bien en modo espectroscópico, separando la luz en cada uno de sus colores. Mientras que los muestreos en modo imagen nos proveen de información bidimensional, su

información espectral es muy limitada, incluso en el caso de muestreos que cubren gran cantidad de bandas de color (COMBO-17, ALHAMBRA...). Los muestreos espectroscópicos, como SDSS o zCOSMOS, por otra parte, nos proveen de información astrofísica mucho más detallada, pero en general se limitan a un espectro por galaxia, que normalmente no cubre toda su extensión, sino una apertura o región fija (normalmente en el centro). Esto tiene el inconveniente añadido de que la región cubierta es diferente para galaxias a diferentes distancias cosmológicas, lo que implica una dificultad adicional al tratar de comparar los resultados de diferentes objetos a diferentes edades del universo.

Una técnica observacional que combina las ventajas de ambos modos es la espectroscopía de campo integral (IFS del inglés Integral Field Spectroscopy, o espectroscopía 3D). Dicha técnica combina la capacidad de obtener información espacial de las galaxias, tal y como hacen los muestreos con imágenes, e información espectral en cada región muestreada, tal y como hacen los muestreos espectroscópicos. En esencia, esta técnica permite obtener información espectroscópica espacialmente resuelta, y por tanto pone a nuestra disposición una visión panorámica total de las propiedades ópticas de los objetos observados.

Sin embargo, esta técnica no se ha utilizado frecuentemente para la realización de grandes muestreos. Al tratarse de una técnica intrínsecamente más compleja que la imagen directa o la espectroscopía clásica, y al proveer de una cantidad mucho mayor de información de cada uno de los objetos observados, la mayoría de los estudios realizados con la misma se centran en un solo objeto o en un número reducido de estos. Entre las pocas excepciones en las que se ha utilizado en modo muestreo (survey) hay que destacar el proyecto SAURON, enfocado al estudio de las regiones centrales de galaxias tempranas y bulbos de espirales, y su extensión, ATLAS3D, o PINGS, que ha realizado grandes mosaicos de galaxias espirales cercanas. Sin embargo, a pesar de las contribuciones significativas que han supuesto, algunos de estos muestreos están afectados por efectos de selección y/o cubrimientos incompletos de toda la extensión de las galaxias observadas. Por ejemplo, ATLAS3D solo observó galaxias elípticas (o tardías), cubriendo solamente las regiones centrales de las galaxias (un total del 20% de su extensión total).

Con el fin de cubrir el hueco existente entre los grandes muestreos en imagen multibanda y/o espectroscópicos de una sola apertura, tales como el SDSS, y los estudios con número de objetos limitado con espectroscopía 3D detallada, iniciamos en 2010 el proyecto CALIFA: Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey. Dicho muestreo propone obtener espectroscopía 3D de unas seiscientas galaxias del universo local (hasta ciento veinte megapársecs), abarcando gran parte de su extensión óptica hasta cubrir el 95% de intensidad de luz, y muestreando completamente la primera octava del rango óptico, desde el ultravioleta cercano al rojo. La muestra "madre" de CALIFA comprende unas mil galaxias extraídas del muestreo SDSS, seleccionadas por diámetro para que su extensión óptica fuera similar al campo efectivo del instrumento 3D utilizado, PPAK/PMAS, con un campo de visión hexagonal de un minuto de arco cuadrado. Sin más selección que el diámetro, la distancia cosmológica y un corte en luminosidad para excluir las galaxias enanas, cuya evolución es diferente al resto de galaxias, la muestra comprende un subconjunto significativo, estadísticamente bien seleccionado y representativo de todas las galaxias del universo local. Por tanto, incluye galaxias de todos los tipos morfológicos (espirales, espirales tempranas, lenticulares y elípticas), con o sin barras, con evidencias de interacción y/o claramente aisladas, y con todos los tipos de inclinación, desde galaxias completamente de cara hasta puramente de canto. Es por tanto la muestra con menos sesgos observada hasta la fecha utilizando la técnica descrita.



CALIFA permite estudiar las propiedades del gas y de las estrellas, como edad, movimientos, masa o cantidad de metales -elementos más pesados que el hidrógeno y el helio- que presentan. A partir de esos datos, se pueden derivar los trece millones de años de historia de cada galaxia y buscar patrones comunes. En la imagen: 1) imágenes en banda ancha; 2) densidad de masa estelar; 3) edad media de las estrellas; 4) líneas de emisión de diagnóstico; 5) emisión en hidrógeno alfa; 6) cinemática.

A fecha de hoy (abril de 2014), hemos observado un total de 555 galaxias, 421 de ellas incluidas en la muestra descrita inicialmente y 129 más comprendiendo estudios complementarios necesarios para entender la muestra principal (como, por ejemplo, las galaxias compañeras de la galaxias en proceso de colisión o mergers, o los estudios piloto de CALIFA). Los objetos se observan en dos configuraciones, de alta y baja resolución espectral, con el fin de derivar información sobre la cinemática de las poblaciones estelares y el gas -si rota y cómo lo hace-, por una parte, e información de la composición de las poblaciones estelares -su edad, metalicidad, historia de formación estelar...-, y del gas ionizado -fuentes de ionización, características de la misma-. De esta forma se obtienen finalmente unos dos mil espectros independientes de cada una de las galaxias estudiadas. El procesado (reducción, control de calidad, almacenaje y distribución), y análisis científico de los datos está a cargo de una extensa colaboración internacional en la que se integran más de ochenta astrónomos de quince países distintos, con un núcleo más importante en Alemania y España, pero que incluye centros en México, Estados Unidos, Canadá o Australia.

El objetivo final de CALIFA reside en comprender el origen de la diversidad observada en las galaxias y los mecanismos físicos, tanto intrínsecos como ambientales, que son responsables de las diferencias y similitudes observadas en las mismas (imagen dcha). El estudio en detalle de las galaxias más cercanas, tal y

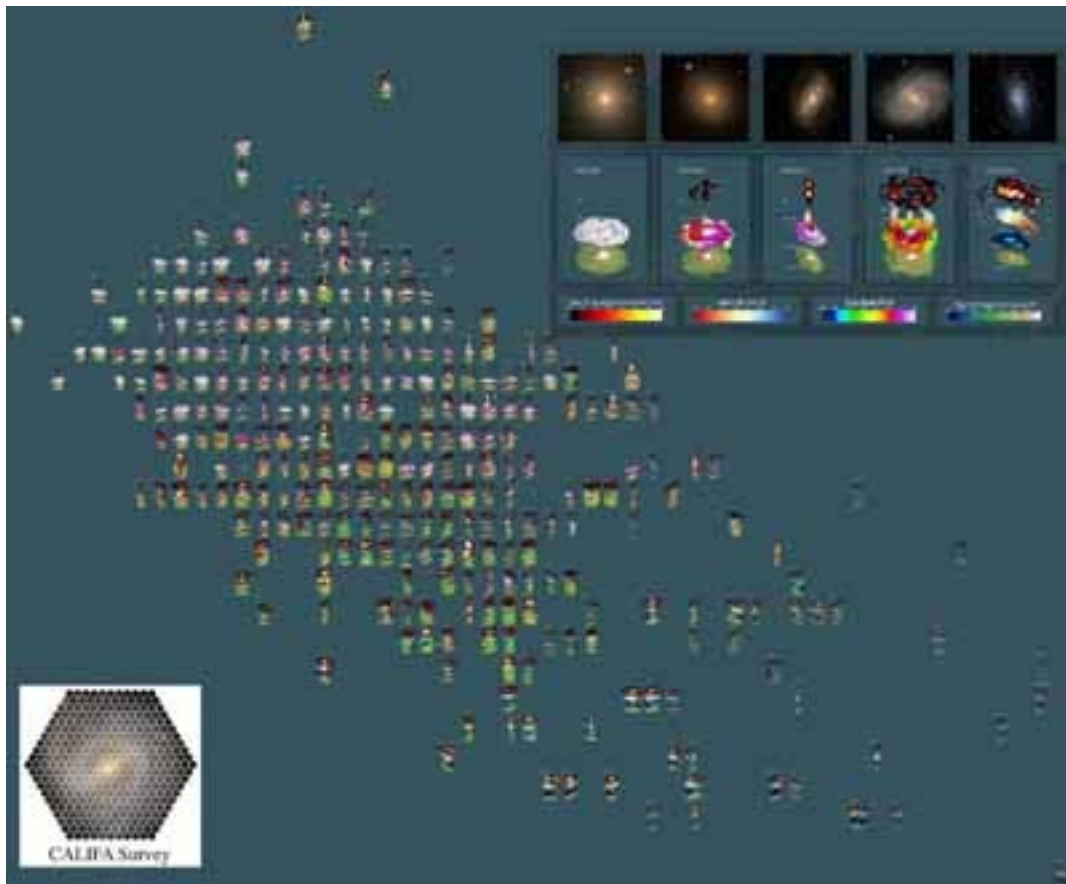
como hemos propuesto, nos ayudará a entender las propiedades estructurales que pueden ser interpretadas como los "registros fósiles" de los procesos de formación y evolución. Los primeros años se dedicaron casi por entero a preparar las estrategias de observación y los paquetes de software necesarios para la reducción y el análisis de los datos, y solo recientemente hemos empezado a obtener resultados científicos destinados a alcanzar los objetivos propuestos. Destacamos algunos resultados a continuación.

Estudios de la historia de formación estelar

Las galaxias son objetos del universo donde se forman estrellas a partir de gas. Podríamos decir que la vida de una galaxia es un proceso continuo de formación estelar, donde el gas atrapado en los pozos de potencial gravitatorio (de materia oscura), al alcanzar una densidad crítica, colapsa iniciando las reacciones termonucleares que llamamos estrellas. Cada estrella tiene un tipo de vida que es inversamente proporcional a su masa, esto es, las más masivas tienen una vida intensa, luminosa y breve, mientras que las menos masivas tienen una vida más prolongada y menos luminosa. La historia de formación estelar nos cuenta los episodios de la creación de nuevas estrellas a lo largo de las edades cosmológicas. Con CALIFA podemos estudiar cómo esta historia cambia en las distintas regiones de las galaxias, en particular desde el centro de las mismas, y por tanto cómo se va moldeando la galaxia a lo largo de su tiempo de vida. Después de intensos estudios técnicos sobre cómo abordar este problema, hemos podido determinar empíricamente que la masa de las estrellas crece desde dentro hacia fuera de las mismas. Igualmente, hemos encontrado que la historia de formación estelar en las galaxias de tipo disco está íntimamente relacionada con su densidad local de masa estelar, mientras que en las galaxias elípticas el parámetro que regula dicha formación estelar es la masa integrada de las galaxias.

Enriquecimiento químico de las galaxias

Todos los elementos químicos conocidos, aquellos que conforman la tabla periódica (salvo el hidrógeno y el helio), se forman debido a las reacciones termonucleares que tienen lugar en las estrellas. Dichos procesos de fusión nuclear, altamente energéticos, originan el brillo de las estrellas y dan lugar a elementos más y más pesados a partir del combustible esencial, el hidrógeno (el elemento más abundante en el universo). Estos elementos formados en las estrellas son expulsados de las mismas en las fases finales de su vida, ya sea de forma "suave", mediante vientos estelares producidos en estrellas poco masivas (las hermosas nebulosas planetarias), o de forma violenta, mediante las conocidas explosiones de supernovas que son la fase final de la vida de las estrellas muy masivas. En ambos casos cada generación de estrellas "poluciona" con metales (elementos más pesados que el helio) el gas circundante, y la nueva generación de estrellas hereda dicha componente metálica. Esto es, ya no se forman estrellas solo con hidrógeno, sino que hay toda una cascada de elementos más pesados producidos por la población anterior.



En la imagen superior se muestran las imágenes extraídas del muestreo SDSS, con un campo de visión similar al de CALIFA. En el panel inferior se muestra, de abajo a arriba: (i) la distribución de luz en la banda V; (ii) la distribución espacial la edad pesada por luminosidad de la población estelar; (iii) el mapa de velocidad de H α y (iv) la representación 3D de emisión de gas puro (una vez eliminada la contribución de la población subyacente) incluyendo, cuando se detecta, H α y el doblete de [NII], con mayores longitudes de onda hacia arriba. Para cada galaxia se muestra la misma información dentro del diagrama color-magnitud (debajo), ilustrando cómo las galaxias se vuelven más viejas, con menos gas, y sin presencia de rotación a medida que se hacen más luminosas (izda) y más rojas (arriba). Por el contrario, las galaxias son más jóvenes, con más gas ionizado, y clara rotación a medida que son menos luminosas (dcha) y más azules (abajo).

Debido a que dichos procesos son similares en todas las estrellas, la proporción de los diferentes elementos que se forman es prácticamente constante; así, si se conoce la fracción de uno de estos elementos puede determinarse, en una primera aproximación, la de todos ellos. El parámetro con el que se mide el enriquecimiento químico de un gas o una población estelar dada, inicialmente prístino, formado solamente por hidrógeno (y algo de helio), se conoce como metalicidad o abundancia química.

El estudio de cómo cada generación de estrellas incrementa la metalicidad y su relación con la evolución de las galaxias es de vital importancia si queremos entender cómo se forman todos los elementos que conforman nuestro entorno. De hecho, la abundancia química determina la capacidad de formar planetas extrasolares rocosos (como la tierra), su configuración y, por tanto, su capacidad de albergar vida. Se puede decir que solo en determinadas regiones de determinadas galaxias se podrían formar estrellas con la abundancia necesaria para formar planetas que pudieran ser compatibles con la vida.

Durante los últimos años hemos analizado la abundancia metálica en regiones de alta formación estelar, llamadas regiones HII. Se trata de zonas de las galaxias donde se forman estrellas, que por su masa y luminosidad ionizan (iluminan) el gas circundante, como lámparas fluorescentes, lo que nos permite estudiar la fracción de metales en dicho gas. Hemos desarrollado técnicas para la detección automática y el análisis de dichas regiones HII, calibrando de forma precisa las abundancias de

oxígeno en las mismas a partir de los datos observados, y hemos iniciado la exploración de las relaciones de dichas abundancias con las propiedades de las galaxias, tales como la densidad de masa estelar local. De esta manera trazamos una conexión entre la historia de formación estelar y el enriquecimiento químico en distintas zonas de las galaxias.

Recientemente hemos descrito la existencia de un patrón de distribución de las abundancias a lo largo de la distancia desde el centro galáctico que se repite en todas las galaxias observadas, independientemente de su tipo morfológico o del resto de sus propiedades. Dicho patrón universal nos indica que todas las galaxias se enriquecen de metales de la misma forma, lo que delimita de forma muy restrictiva los escenarios propuestos para este tipo de evolución. Hemos hallado el mismo resultado al analizar las abundancias metálicas de las estrellas en estas galaxias, lo que corrobora nuestro resultado anterior.

Origen de la ionización de baja intensidad

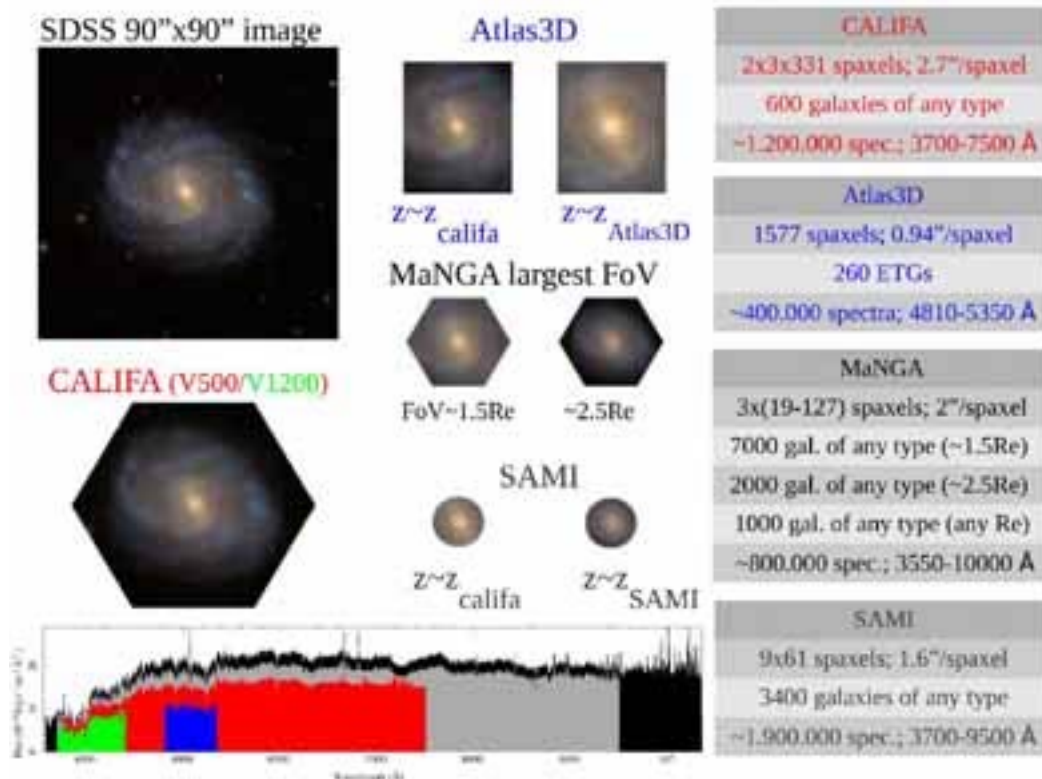
Igual que las estrellas jóvenes y masivas ionizan el gas circundante, lo que nos ayuda a entender sus propiedades, también se ha descrito una ionización de baja intensidad, entre cien y mil veces menos intensa que la de las regiones HII, que se distribuye de forma difusa a lo largo de las galaxias, sin aparente conexión con formación estelar reciente. La naturaleza de esta ionización ha sido objeto de debate durante las últimas dos décadas, sin saber a ciencia cierta cuál era la causa dominante. Estudios con datos de CALIFA han mostrado que esta ionización está dominada por un tipo de estrellas viejas, llamadas pos-AGB, que pueden ionizar el gas de forma poco intensa durante un corto periodo de vida. Estas estrellas se encuentran distribuidas de forma homogénea por todas las galaxias, y son más numerosas en las galaxias viejas, o elípticas. A pesar de ello, una fracción de estas regiones ionizadas debe de tener un origen diferente, muy probablemente un núcleo activo de baja intensidad (relacionado con un agujero negro central), que no es capaz de producir ionizaciones intensas debido a que parte de luz ionizante se pierde.

Propiedades cinemáticas de las galaxias

Los datos del proyecto CALIFA nos han permitido estudiar los patrones cinemáticos del gas ionizado y su relación tanto con la presencia de barras centrales como con procesos de colisión y fusión entre galaxias. Hemos podido explorar el momento angular (o impulso de la rotación) de las galaxias con respecto a otras propiedades de las mismas, e igualmente comparar la cantidad de masa total (estrellas, gas y materia oscura) con respecto a la masa estelar que medimos. Estos estudios nos permitirán comprender cómo el hecho de que las galaxias roten en discos ordenados (galaxias espirales clásicas) o presenten movimientos en órbitas tridimensionales (galaxias elípticas) puede influir tanto en su historia de formación estelar como en su enriquecimiento químico.

Como proyecto de legado, y atendiendo a la responsabilidad por el número de noches de observación destinadas al mismo, CALIFA está cumpliendo en plazo con su compromiso de distribución de datos. La primera distribución pública de datos, que tuvo lugar en noviembre 2012, puso a disposición de toda la comunidad científica los datos correspondientes a las primeras cien galaxias (doscientos cubos de datos o cuatrocientos mil espectros), con el control de calidad garantizado. Estos datos pueden descargarse de la página web: <http://califa.caha.es/DR1>. Hasta la fecha se han realizado más de siete mil descargas, y ya se han producido resultados científicos fuera de la colaboración CALIFA. La próxima distribución de datos se realizará después del verano de 2014 y comprenderá al menos doscientas galaxias (cuatrocientos cubos u ochocientos mil espectros), una cifra muy similar a las distribuidas por el proyecto SDSS.

Por todo ello CALIFA se configura como el referente internacional para la próxima generación de muestreos extragalácticos que harán uso de la espectroscopía de campo integral o 3D, tales como MaNGA o SAMI, así como aquellos que se iniciarán en los próximos años con instrumentos de última generación, tales como MUSE@VLT.



Comparación entre los diferentes muestreos de galaxias utilizando datos de espectroscopía 3D. Las imágenes muestran una comparación entre la resolución de imagen y el campo cubierto por muestreos de imagen directa desde telescopios en tierra (SDSS) y muestreos de espectroscopía 3D, tales como CALIFA (rojo y verde), Atlas3D (azul), MaNGA (negro) y SAMI (gris), junto con el rango espectral cubierto (abajo). Se puede apreciar que CALIFA comprende el mejor compromiso entre campo cubierto y capacidad de resolución espacial. El cuadro explicativo resume las características de cada muestreo.

Sebastián Sánchez (IA-UNAM/IAA-CSIC)
 Este artículo aparece en el número 43, junio 2014,
 de la revista *Información y Actualidad Astronómica*,
 del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)