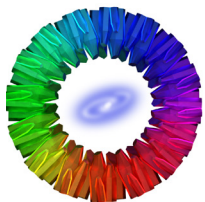


EXPLORANDO GALAXIAS EN VACÍOS CÓSMICOS:

El 15 de julio de 2024, el proyecto CAVITY realizó su primera distribución pública de datos (Data Release 1, DR1), poniendo a disposición de la comunidad científica espectros bidimensionales de 100 galaxias situadas en vacíos cósmicos, observadas con el telescopio de 3,5 metros y el espectrógrafo PMAS/PPak del Observatorio de Calar Alto. CAVITY, que es uno de los proyectos de Legado del Observatorio de Calar Alto, se centra en estudiar cómo el entorno a gran escala influye en el ensamblaje de masa, la evolución estelar y el contenido de materia oscura de estas galaxias.



Calar Alto Void Integral-field Treasury survey

Isabel Pérez
isa@ugr.es

Simon Verley
simon@ugr.es

Laura Sánchez Menguiano
lsanchezm@ugr.es

Tomas Ruiz-Lara
ruizlara@ugr.es

Universidad de Granada

Rubén García-Benito
rgb@iaa.es

Instituto de Astrofísica de Andalucía

En futuras distribuciones públicas de datos, CAVITY proveerá a la comunidad científica con información para una muestra de entre 300 y 400 galaxias. El proyecto se ha ampliado además con CAVITY+, que añade observaciones de gas molecular y atómico, así como imágenes ópticas profundas, permitiendo una visión completa del contenido bariónico de estas galaxias. Con el lanzamiento de DR1 y las futuras extensiones, CAVITY permitirá a la comunidad científica profundizar en el papel del entorno cósmico en la evolución de las galaxias y contrastar modelos de formación galáctica en los entornos más aislados del universo.

CAVITY es un proyecto que busca analizar las propiedades espaciales de las galaxias que habitan las regiones menos densas del Universo, conocidas como vacíos cósmicos. Sus objetivos principales son: 1) determinar cómo el entorno a gran escala influye en la acumulación de masa de las galaxias en vacíos; 2) comprender cómo la formación y las propiedades de las galaxias dependen de ese entorno; 3) identificar los factores que impulsan la transformación galáctica; y 4) analizar el contenido de materia oscura de las galaxias en vacíos (Pérez et al. 2024).

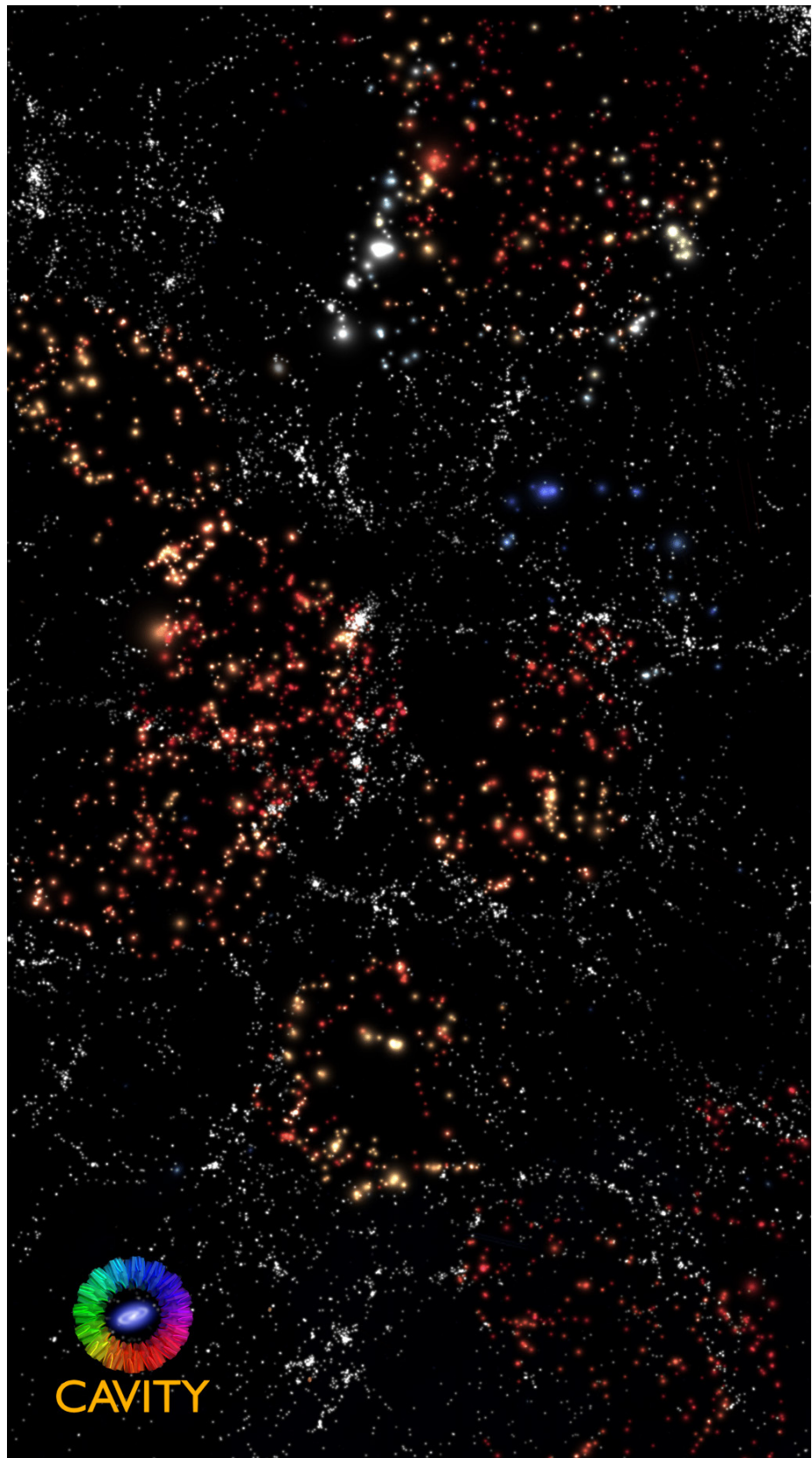
La colaboración de CAVITY está formada por más de 50 investigadores de instituciones internacionales repartidos en una decena de países. Actualmente, tres estudiantes de doctorado trabajan con datos de CAVITY para sus tesis, y otros tres en proyectos relacionados. Una tesis doctoral basada en el proyecto CAVITY fue defendida exitosamente en 2022 (Domínguez-Gómez, 2022).

CAVITY comenzó en enero de 2020, justo antes de la pandemia de COVID-19, a raíz de una convocatoria abierta del Observatorio de Calar Alto en busca de proyectos de Legado de gran impacto. CAVITY fue uno de los tres proyectos seleccionados, otorgándosele 110 noches de observación en el telescopio de 3,5 metros con el espectrógrafo PMAS. El observatorio inició la observación del proyecto en enero de 2021. En 2023, se concedió una extensión de 70 noches adicionales.

Hasta la fecha, se han generado 240 cubos de datos de galaxias, 100 de los cuáles se pusieron ya a disposición de la comunidad científica en el primer lanzamiento de datos de CAVITY (DR1, García-Benito et al. 2024) que tuvo lugar el 15 de julio de 2024. Los

CAVITY Y SU PRIMERA DISTRIBUCIÓN DE DATOS

Figura 1. Figura mostrando la distribución a gran escala el Universo. Las galaxias en vacíos están codificadas por tamaño y color, según su diámetro y corrimiento al rojo, respectivamente. Los puntos blancos de fondo representan las galaxias dentro de las Estructuras a Gran Escala del universo en el rango de corrimiento al rojo de 0.025-0.030, según los datos del Sloan Digital Sky Survey (imagen cortesía del CAVITY team).



datos están listos para su uso inmediato y pueden descargarse desde la base de datos del proyecto en <https://cavity.caha.es/>. En la segunda distribución pública de datos, prevista para julio de 2026, se espera distribuir a la comunidad una muestra ampliada de 300 cubos de galaxias en vacíos junto con mapas detallados de sus propiedades.

VACÍOS CÓSMICOS Y SU IMPORTANCIA EN EL ESTUDIO DE LAS GALAXIAS

La distribución de la materia a gran escala en el Universo, es decir, a escalas superiores a los 10 Mpc, no es uniforme; en cambio, se caracteriza por una estructura similar a una esponja, donde destacan filamentos, paredes, cúmulos y vacíos.

Estos vacíos son parte fundamental de la red cósmica, representando alrededor del 70% del volumen del Universo, aunque contienen solo el 10% de su masa. Los vacíos surgen de las fluctuaciones de densidad del campo primordial, y debido a su baja densidad, son regiones de gravedad débil que se expanden más rápido que el flujo de Hubble. A medida que se expanden, la materia es empujada hacia los filamentos que se contraen más rápidamente por su propia gravedad.

Cautun y colaboradores (2014) demostraron, a través de simulaciones numéricas cosmológicas de materia oscura, la compleja evolución de las estructuras del Universo, donde las subestructuras forman parte de la naturaleza jerárquica de la red cósmica. Los vacíos están poblados por halos de baja masa en comparación con los halos de las paredes, filamentos y cúmulos. A medida que el Universo evoluciona, las regiones de menor densidad tienden a expandirse y vaciarse aún más, ya que la materia fluye de las regiones menos densas hacia entornos más densos debido al efecto de la gravedad.

Los vacíos juegan un papel clave para entender la estructura a gran escala de la red cósmica. Aunque su nombre sugiera lo contrario, estos vacíos albergan galaxias, las cuales ofrecen valiosas pistas sobre cómo ensamblaron su masa en el Universo primitivo. Además, ayudan a esclarecer en qué momento los mecanismos internos comienzan a dominar la evolución galáctica y cómo estos procesos están influenciados por la estructura cósmica en la que se encuentran. Las observaciones parecen indicar que

las galaxias en vacíos son similares a las galaxias en regiones más densas, pero tienden a ser más azules y a tener morfologías de tipo más tardío (e.g. Rojas et al. 2004, 2005; Park et al. 2007; Constantin et al. 2008), aunque aún queda por determinar si las propiedades relacionadas con la tasa de formación estelar, las historias de formación estelar y las metalicidades tanto del gas como estelares y el contenido de materia oscura son similares a las de galaxias que habitan entornos más densos.

En un estudio reciente, realizado sobre los espectros del Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de una muestra bien definida de galaxias en vacíos de CAVITY, junto con otras muestras de galaxias en paredes/filamentos, se concluye que la acumulación de masa estelar en las galaxias de los vacíos ocurre más lentamente que en entornos más densos (Domínguez-Gómez et al. 2023a). En el análisis de las metalicidades estelares de la misma muestra, Domínguez-Gómez et al. (2023b) encontraron que, en promedio, las galaxias de los vacíos tienen metalicidades estelares más bajas que las galaxias en entornos más densos. Aunque estos trabajos son pioneros, carecen de la información bidimensional crucial para discernir entre los distintos procesos físicos que impulsan las diferentes historias de formación estelar en diversas densidades.

Para poder caracterizar en detalle las posibles diferencias entre la evolución y formación de las galaxias en los diferentes entornos a gran escala del Universo se necesita caracterizar las propiedades de las galaxias en 2D ya que los diferentes caminos evolutivos dejarán huellas diferentes en las diferentes zonas de las galaxias. El espectrógrafo PMAS/PPak ofrece una poderosa herramienta para obtener datos de espectroscopía de campo integral, o IFS, por sus siglas en inglés (Integral Field Spectroscopy). Este tipo de tecnología permite capturar un espectro detallado en cada píxel de la imagen, lo que en el lenguaje de la IFS se denomina "spaxel". Gracias a esta capacidad podemos explorar propiedades espaciales en detalle, desde las variaciones químicas hasta la cinemática de galaxias u otras estructuras cósmicas extendidas. Todos estos factores impulsaron la necesidad de un estudio detallado y espacialmente resuelto sobre el ensamblaje de masa de las galaxias situadas en las regiones más vacías de la red cósmica, lo que motivó el desarrollo del proyecto CAVITY.

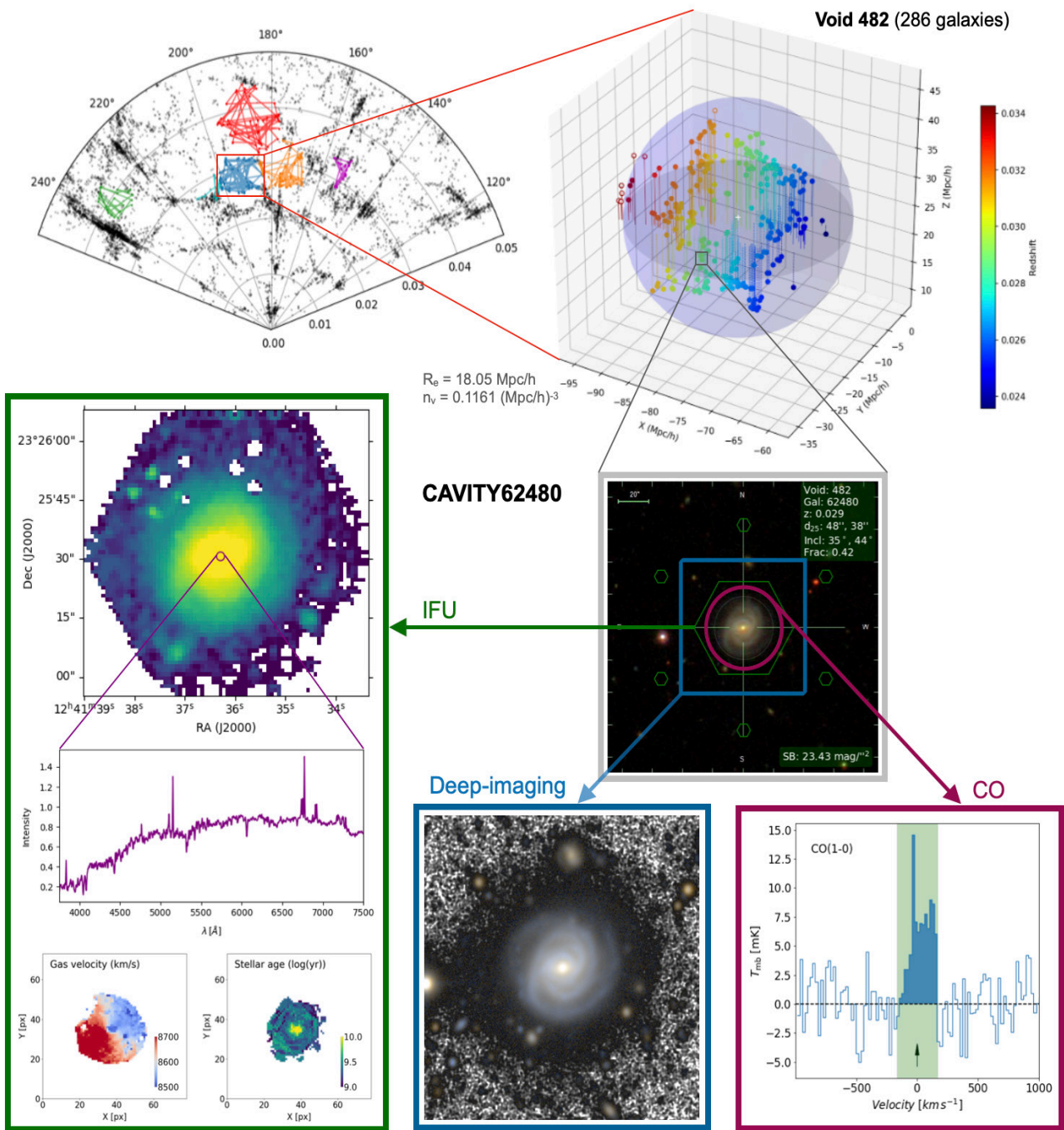


Figura 2. Resumen del proyecto CAVITY y su extensión CAVITY+. El panel de la derecha en el centro (enmarcado por un cuadrado gris) hace zoom en CAVITY62480, muestra una galaxia ubicada en el vacío 482 como ejemplo, mostrando su imagen en color del SDSS con la huella del instrumento PMAS (hexágono verde), el recorte del INT (cuadrado azul) y el haz de IRAM (círculo morado) superpuestos. La siguiente sección principal (enmarcada por el rectángulo verde) está dedicada a ilustrar los datos IFS. Representamos la luz integrada de la galaxia dentro del rango de longitudes de onda cubierto por el instrumento (en la parte superior), el espectro del spaxel central (en el centro) y los mapas de velocidad del gas y de la edad estelar (en la parte inferior) como ejemplos del potencial de los datos IFS para derivar distribuciones espacialmente resueltas de las propiedades de la galaxia. También mostramos una imagen en color utilizando la imagen profunda de las bandas g y r del INT (enmarcada por el rectángulo azul, panel inferior central) y el espectro integrado de CO(1-0) de las observaciones de IRAM (rectángulo morado, panel inferior derecho) para CAVITY62480 (Figura tomada de Pérez et al. 2024).

CAVITY+

Una visión completa del contenido bariónico de las galaxias en vacíos también debe incluir el gas atómico y molecular, así como información detallada sobre la cantidad y distribución de estrellas en las regiones exteriores de las galaxias. Por ello, con el objetivo de maximizar el impacto del proyecto y abordar plenamente los objetivos científicos propuestos, CAVITY se ha expandido para incluir observaciones dedicadas de gas molecular y atómico y obtención de imágenes ópticas profundas del estudio IFS.

Hasta la fecha, CAVITY+ cuenta con datos de CO(1-0) y CO(2-1) del radio telescopio IRAM para 106 galaxias de la muestra. Datos interferométricos de CO(1-0) con una resolución similar a la de los datos IFs provenientes del instrumento ALMA también están siendo obtenidos para una submuestra de 41 galaxias. Respecto al gas atómico, disponemos de datos del Telescopio de Green Bank (GBT) de todas aquellas galaxias de CAVITY que no contaban con datos públicos de HI de estudios previos (como ALFALFA). Por último, existe una campaña todavía en ejecución que abarca varios semestres para obtener imágenes profundas con la Cámara de Campo Amplia (INT), que hasta la fecha incluye 141 galaxias. Un ejemplo del potencial de CAVITY+ para caracterizar las galaxias de vacío se muestra en la Figura 2.

LA CIENCIA DE CAVITY+

La base de datos IFS para las 300 galaxias del estudio CAVITY, junto con toda la información adicional proveniente del proyecto ampliado CAVITY+, ofrecerá una oportunidad única para explorar las propiedades de las galaxias que residen en vacíos cósmicos. Esto permitirá a la comunidad científica abordar una gran cantidad de cuestiones astrofísicas. Dentro del ámbito de especialización del equipo de CAVITY, existe un interés particular en investigar aspectos como la acumulación de masa bariónica; el impacto del entorno a gran escala en la acreción de gas, la tasa específica de formación estelar y el contenido de gas molecular y atómico en galaxias de vacíos. Además, el equipo está particularmente interesado en obtener las historias de fusiones y acreciones de galaxias a partir de la distribución de luz en las regiones exteriores de las galaxias; la influencia del entorno local frente al entorno a gran escala en las propiedades generales de las

galaxias. Otro aspecto de interés y en el que trabajamos de manera activa es en caracterizar los efectos de la estructura a gran escala en la prevalencia de AGNs y su papel en el cese o la intensificación de la formación estelar en galaxias de vacíos. Por último, las propiedades y formación de galaxias enanas en estos entornos forman parte de uno de los proyectos clave de la colaboración.

En trabajos previos del equipo de CAVITY (Domínguez-Gómez et al. 2023a,b) concluimos que el ensamblaje de masa estelar en galaxias de vacíos ocurre más lentamente que en las galaxias de filamentos y paredes, y mucho más lentamente que en cúmulos, lo que sugiere la influencia de diferentes factores físicos en la evolución de las galaxias según su entorno a gran escala. Además, el análisis de la relación entre masa estelar y metalicidad en la misma muestra revela que el enriquecimiento ocurre de manera distinta según el entorno.

Hemos publicado recientemente los primeros artículos mostrando el potencial de los datos espacialmente resueltos de CAVITY donde se presentan las propiedades estelares de galaxias de vacíos usando cubos de datos de galaxias de CAVITY (Conrado et al. 2024, Sánchez et al. 2024). En este trabajo se descubrió que las galaxias espirales en vacíos tienden a tener densidades superficiales de masa menores y edades estelares más jóvenes que las galaxias situadas en entornos más densos, lo que sugiere la presencia de discos menos evolucionados en los vacíos cósmicos. Asimismo, en un artículo reciente sobre el contenido molecular de las galaxias en vacíos, Rodríguez et al. (2024) demostraron que el contenido total de gas molecular de las galaxias de CAVITY es similar al de las galaxias ubicadas en entornos más densos.

Con la publicación de cubos de las primeras 100 galaxias de CAVITY, con el desarrollo de la base de datos para CAVITY+, y los análisis científicos en marcha, es ahora cuando la explotación de los datos de CAVITY comenzará a ofrecer sus mejores resultados científicos. Estos datos proporcionarán nuevas perspectivas sobre cómo el entorno cósmico afecta a la evolución de las galaxias, contribuyendo de manera significativa al avance de nuestra comprensión del universo.

REFERENCIAS

- Cautun, M., van de Weygaert, R., Jones, B. J. T., & Frenk, C. S. 2014, MNRAS, 441, 2923
- Conrado, A. M., González Delgado, R. M., García-Benito, R., et al. 2024 A&A, 687, 98
- García -Benito, R., Jiménez, A.; Sánchez-Menguiano, L.; et al. 2024, accepted A&A, arXiv:2410.08265
- Domínguez-Gómez, J., Pérez, I., Ruiz-Lara, T., et al. 2023b, Nature, 619, 269
- Domínguez-Gómez, J., Pérez, I., Ruiz-Lara, T., et al. 2023a, A&A 680, 110
- Pérez, I., Verley, S., Sánchez-Menguiano, L., et al. 2024 A&A 689, 213
- Rodríguez, M.I.; Lisenfeld, U.; Duarte-Puertas, S.; et al. 2024, accepted A&A arXiv:2410.18078
- Rojas, R. R., Vogeley, M. S., Hoyle, F., & Brinkmann, J. 2004, ApJ, 617, 50
- Rojas, R. R., Vogeley, M. S., Hoyle, F., & Brinkmann, J. 2005, ApJ, 624, 571
- Sánchez, S.F.; García-Benito, R.; González Delgado, R.; et al. 2024 RmxAA, 60, 323

Figura 3. Foto de grupo del equipo CAVITY.

