

ARRAKIHS: UNA NUEVA LUZ

El 2 de noviembre de 2022 la Agencia Espacial Europea (ESA) anunció la nueva misión espacial de clase F para su programa científico: ARRAKIHS (Analysis of Resolved Remnants of Accreted galaxies as a Key Instrument for Halo Surveys). ARRAKIHS se propone desentrañar el enigma de la naturaleza de la materia oscura que conforma más de un 80% de la materia que hay en el universo, según los modelos teóricos actuales.



M. Angeles Gómez Flechoso
Universidad Complutense de Madrid
magflechoso@ucm.es

Santi Roca-Fàbrega
Observatorio de Lund
santi.roca_fabrega@fysik.lu.se

Rafael Guzmán Llorente
Instituto de Física de Cantabria
guzman@ifca.unican.es

David Martínez Delgado
Instituto de Astrofísica de Andalucía
dmartinez@iaa.es

Para ello ARRAKIHS observará el universo local a niveles muy bajos de brillo superficial nunca antes alcanzados en longitudes de onda visible e infrarroja, utilizando un conjunto de cámaras de gran precisión a bordo de un satélite que orbitará en torno a la Tierra a 800 km de altura. Actualmente, ARRAKIHS ha sido aprobada para la fase A/B que culminará con la Revisión de Diseño Preliminar (PDR) al final del 2025. Tras pasar con éxito la PDR, ARRAKIHS será formalmente adoptada como la misión F2 de la ESA con un lanzamiento previsto en 2029-30. ARRAKIHS es la primera misión científica de la ESA liderada por España.

EL ENIGMA DE LA MATERIA OSCURA DEL UNIVERSO

El modelo cosmológico estándar Λ -CDM predice que el contenido de energía y materia en el universo está dominado por las enigmáticas “constante cosmológica” (Λ) y “materia oscura fría” (CDM), cuyas naturalezas se desconoce. Este modelo describe la formación de galaxias en el marco de formación jerárquica del universo mediante fusiones de halos de materia más pequeños que se agrupan, aumentando el contenido en materia oscura, gas y estrellas hasta obtener galaxias como las observadas en el universo local. Este proceso es continuo e implica que en torno a cualquier galaxia se deberían observar objetos de menor masa (galaxias satélite enanas, o GSE) que están siendo acretadas en el halo de la galaxia mayor, presentando en sus fases finales la formación de estructuras elongadas y difusas (corrientes estelares de marea, o CEM) que contienen estrellas arrancadas de dichas GSE.

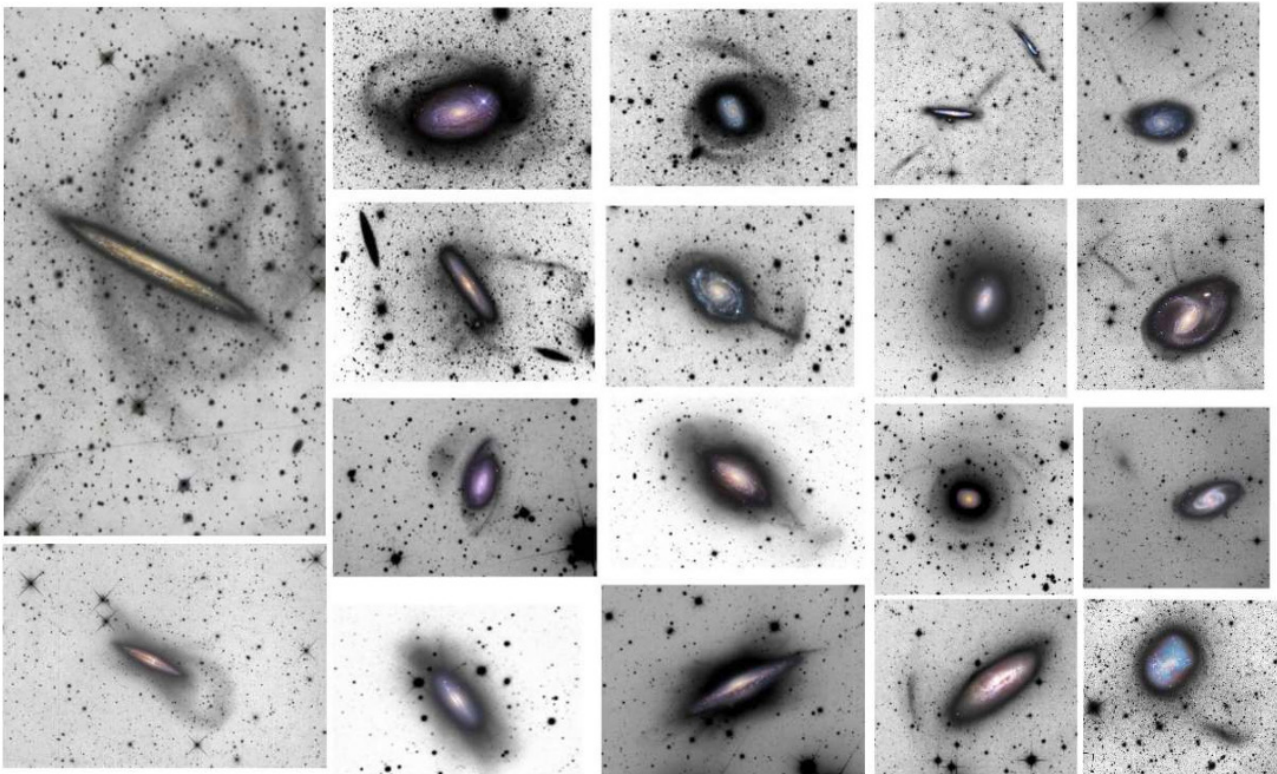
Las simulaciones numéricas realizadas en el marco del modelo Λ -CDM confirman que debe haber un gran número de GSE y CEM en los halos de galaxias similares a la Vía Láctea. La presencia de GSE y CEM en halos de galaxias ha sido corroborada en numerosas ocasiones con observaciones de galaxias del universo local, incluyendo el Grupo Local (Fig. 1). Sin embargo, existe una gran discrepancia sobre la estadística de estos sistemas en relación con las observaciones, ya que las simulaciones predicen una mayor abundancia de GSE y CEM que las que se observa. Actualmente, no se sabe si esta discrepancia es debida a que el modelo estándar necesita ser revisado o si, por el contrario, es debida a una limitación en las observaciones por la cual no se han detectado la mayoría de GSE y CEM al tener muy bajo brillo superficial.

SOBRE LA MATERIA OSCURA

El número de CEM y GSE que se forman en los halos de galaxias depende principalmente de la naturaleza de la materia oscura. Si en lugar de ser “fría” (partículas masivas moviéndose lentamente), la materia oscura fuera “templada” (partículas más ligeras moviéndose más rápidamente) o estuviera formada por partículas de materia oscura interactuantes, se impediría la formación de halos poco masivos mientras se mantendría la formación de halos mayores. Así se explicarían tanto la baja frecuencia de CEM y GSE en los halos de galaxias como la estructura a gran escala del universo. Un efecto parecido podría conseguirse modificando el mecanismo de “feedback” bariónico debido a explosiones de supernovas o a la presencia de agujeros negros súper-masivos. En ambos casos, ello implicaría cambiar o el modelo cosmológico estándar que se ha venido adoptando desde finales del siglo pasado o la implementación más reciente del “feedback” bariónico en los últimos modelos de formación de galaxias.

Por otro lado, sería posible que las observaciones actuales no hayan detectado todavía la mayoría de los CEM y GSE con muy bajo brillo superficial. Actualmente, solo un 10% de las galaxias observadas presentan al menos una CEM. La observación de estos objetos en galaxias del universo local se ve muy limitada en observatorios terrestres por la atmósfera, que hace muy difícil la observación de estructuras con brillos superficiales más débiles que 29 mag/arcsec² en el visible y prácticamente imposible observarlas en el infrarrojo al ser la atmósfera ~1000 veces más brillante. Es precisamente en el infrarrojo donde se espera que las GSE y las CEM sean más brillantes, ya que ambas presentan poblaciones estelares viejas. Según los últimos estudios, si se lograra alcanzar brillos superficiales más bajos que 30 mag/arcsec² debería observarse al menos una CEM en prácticamente todas las galaxias similares a la Vía Láctea. Si no es así, estas observaciones impondrían la necesidad de cambiar o bien la teoría de materia

Figura 1. Imágenes de galaxias del universo local obtenidas con telescopios de pequeña apertura mostrando la detección de las CEM de diferentes morfologías. El límite de brillo superficial de estas imágenes es 28-29 mag/arcsec² (crédito: D. Martínez-Delgado).



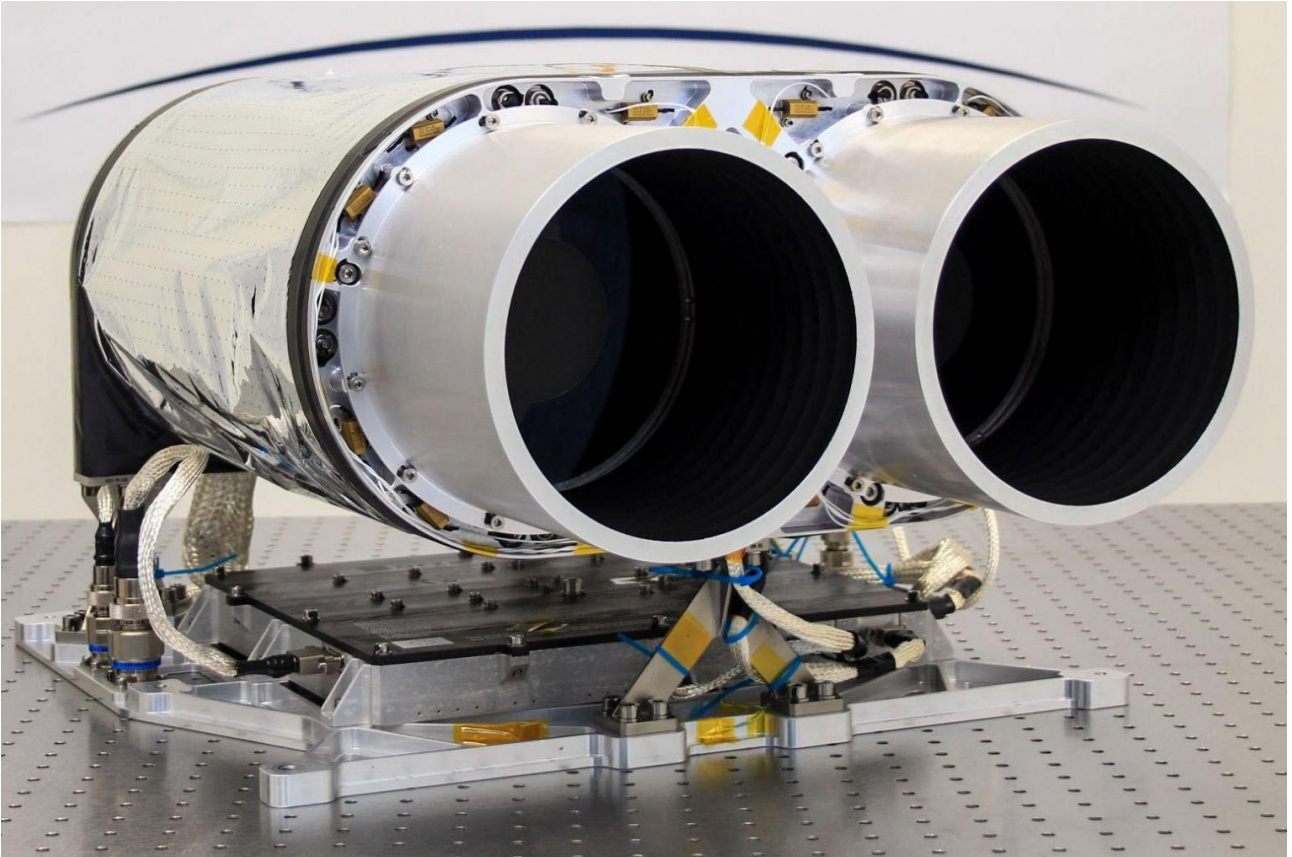


Figura 2. Modelo de vuelo de la cámara binocular iSIM-170 validada en el módulo japonés KIBO de la ISS en 2020 (crédito: Satlantis).

oscura fría o bien el mecanismo de “feedback” bariónico utilizado en las simulaciones. La determinación de las funciones de luminosidad de las GSE observadas a este mismo límite en brillo superficial permitirá deshacer la ambigüedad entre ambos efectos.

LA MISIÓN ESPACIAL ARRAKIHS

El consorcio científico-tecnológico responsable de ARRAKIHS está liderado por el Dr. Rafael Guzmán (Instituto de Física de Cantabria, IFCA) en colaboración con investigadores del IFCA, el Instituto de Ciencias del Espacio (ICE), la Universidad Complutense de Madrid (UCM), el Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA), el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y el Centro de Astrobiología (CAB). Los equipos de in-

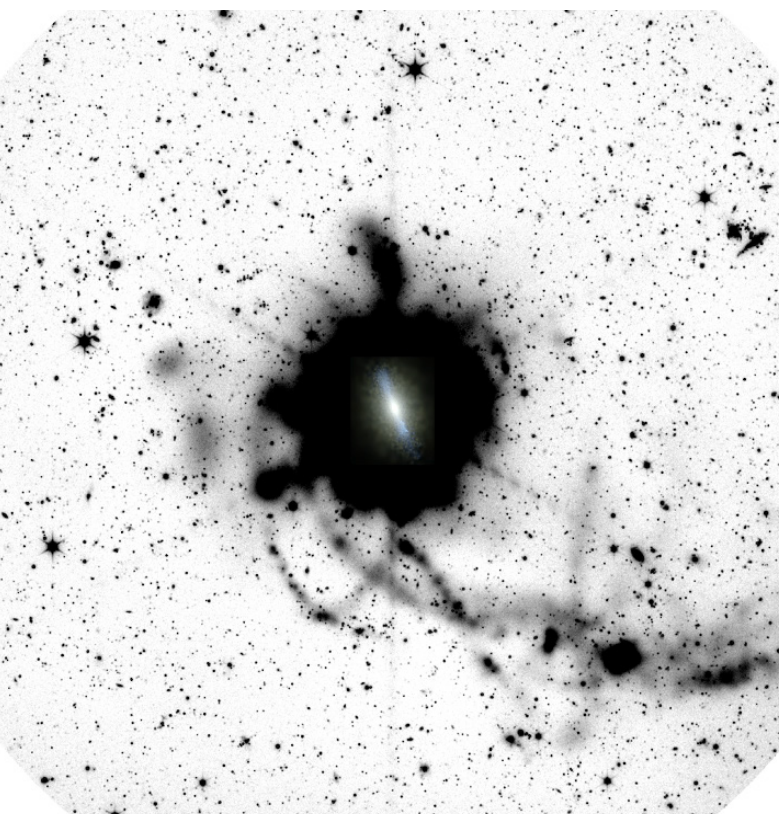
vestigación españoles que participan en ARRAKIHS están coordinados por la Dra. M. Angeles Gómez-Flechoso (UCM). A día de hoy, el consorcio de ARRAKIHS incluye a más de 50 investigadores de 20 centros de investigación y universidades en Suiza, Suecia, Austria, Bélgica, Reino Unido, Estados Unidos, Taiwan y Tailandia. El consorcio incluye también a empresas europeas del sector aeroespacial en Suiza, Bélgica y el Reino Unido lideradas por la empresa española Satlantis, que es la principal responsable de proporcionar la carga útil del satélite, en colaboración con el IFCA, ICE, CEFCA, la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El equipo de desarrollo tecnológico del consorcio ARRAKIHS está coordinado por el Dr. Santiago Serrano (Satlantis/ICE).

El objetivo principal de ARRAKIHS es dilucidar la naturaleza de la materia oscura y el mecanismo de “feedback” bariónico mediante observaciones desde el espacio de las GSE y CEM en los halos de una muestra estadísticamente representativa de galaxias similares a la Vía Láctea en el universo local a brillos superficiales más bajos que 30 mag/arcsec^2 . Para llevar a cabo esta misión, se utilizarán dos innovadoras cámaras binoculares iSIM-170 (Fig. 2) desarrolladas por la empresa Satlantis. Cada una de estas cámaras consta de dos telescopios con $f/10$ y 150 mm de diámetro que alojan cuatro filtros cubriendo el rango completo de 400 nm a 1700 nm . El diseño de cámara iSIM ha sido validado con éxito en el espacio tanto en

la Estación Espacial Internacional (ISS) como a bordo de micro-satélites, demostrando la mejor calidad de imagen disponible para satélites por debajo de 500 kg . En esta fase inicial de ARRAKIHS, se utilizará una versión de iSIM-170 para observaciones desde el Observatorio de Javalambre para demostrar su calidad de imagen y refinar tanto la estrategia observacional como el procesado de imagen con un equipo liderado por el Dr. Antonio Marín (CEECA).

En la definición de la misión no sólo ha sido clave el acceso a la tecnología, sino también disponer de modelos cosmológicos que nos permitan simular e interpretar los resultados que se obtengan

Figura 3. Imagen simulada del halo de una galaxia tipo Vía Láctea tal y como se vería en ARRAKIHS tras 900 exposiciones de 10 minutos con iSIM-170 en el filtro Euclid VIS (izquierda) y combinando los cuatro filtros HST F418X y Euclid VIS, Y, J (derecha). La simulación parte de un modelo Garrotxa de galaxia tipo Vía Láctea e incluye la contribución de la luz zodiacal, la extinción galáctica y el fondo cosmológico de Illustris, la contaminación de luz dispersa debido a la Tierra, la Luna y las estrellas para una órbita heliosíncrona a 800 km , así como el modelizado de la calidad de imagen y los efectos sistemáticos de la opto-electrónica de iSIM-170 (crédito: Alejandro Camazón).



independientemente de los efectos numéricos asociados al código de simulación utilizado. El consorcio ARRAKIHS tiene acceso a las simulaciones de la colaboración AGORA a través del Dr. Santi Roca-Fàbrega (Observatorio de Lund), quien coordina el equipo de simulaciones cosmológicas del consorcio. Dicha colaboración analiza una misma simulación con las mismas condiciones iniciales modelizada con la mayor parte de los códigos numéricos disponibles en la comunidad, lo que permite establecer la varianza en las características de la población de GSE y de las CEM debida a efectos numéricos y distinguirlos de las características reales de estos objetos. Finalmente, ARRAKIHS ha optimizado su estrategia observacional a partir de la gran experiencia del equipo de observadores coordinado por el Dr. David Martínez-Delgado (IAA), quien lidera el censo más completo de GSE y CEM observados desde tierra hasta la fecha. Combinando estos modelos e incorporando todos los efectos observacionales e instrumentales se han podido simular imágenes “mock” (Fig. 3; Camazón et al. 2023, en preparación) que reproducen fielmente los resultados que obtendrá ARRAKIHS. El análisis de estas imágenes “mock” comparadas con las observaciones nos permitirá interpretar los resultados según las predicciones de los diferentes modelos cosmológicos y últimamente discernir cuál es la naturaleza de la materia oscura.

Esta combinación de teoría, observación e instrumentación en la frontera del conocimiento sitúan al consorcio científico-tecnológico de ARRAKIHS en la vanguardia tanto de los estudios de materia oscura como de la formación de las GSE y CEM en los halos de galaxias tipo Vía Láctea. ARRAKIHS ofrece además a España una posición de liderazgo mundial en el aún inexplorado universo de muy bajo brillo superficial.

EL ORIGEN DE ARRAKIHS

Nuestra historia comenzó en 2010 durante la reunión científica de la SEA en Madrid, donde nos encontramos tres viejos amigos y comenzamos a debatir cómo juntar nuestros conocimientos para poder desentrañar la naturaleza de la materia oscura. Veíamos el problema desde puntos de vista complementarios pues cada uno aportaba su experiencia en los ámbitos observacional, teórico y tecnológico. Al terminar la reunión de la SEA, los

tres coincidimos en un mismo sueño: colaborar en una misión espacial que permitiera contestar a la pregunta: “¿Qué es la materia oscura?”. En los años que siguieron a este encuentro incorporamos nuevos amigos y colaboradores a nuestro proyecto, disfrutamos de muchas y buenas discusiones científicas y comenzamos el desarrollo de la tecnología necesaria para competir en futuras misiones al espacio. Finalmente, en 2022 presentamos dos propuestas: DUNES a la NASA y ARRAKIHS a la ESA (cada nombre tiene su propia historia para ser contada en otra ocasión...). No conseguimos DUNES, pero ARRAKIHS venció a otras 19 propuestas de consorcios europeos en un proyecto muy competitivo que duró 9 meses para ser finalmente seleccionada como la nueva misión de clase F.

En estos 13 años, hemos pasado momentos intensos discutiendo de ciencia hasta altas horas de la noche. Hemos pasado días ilusionantes diseñando, perfeccionando y verificando nuestra cámara, nuestra estrategia observacional y nuestros modelos teóricos. Hemos pasado horas estresantes para llegar a tiempo con todo listo dentro de los plazos de entrega de las propuestas y para hacer frente a la inmensa presión durante el bautismo de fuego de toda misión espacial de la ESA en la CDF (la “temible” Concurrent Design Facility). Pero sobre todo, estamos disfrutando con una aventura que no ha hecho nada más que comenzar. Tenemos un largo e intenso camino hasta el lanzamiento de ARRAKIHS y después viviremos grandes emociones analizando los datos y descubriendo un poco más cómo es nuestro universo. ¿Llegaremos a desentrañar la naturaleza de la materia oscura? Confiamos en que sí. También estamos convencidos de que esta misión nos llevará a nuevos descubrimientos en este universo aun inexplorado a muy bajo brillo superficial que a día de hoy ni nos imaginamos y que podremos explorar con ARRAKIHS. Queremos que la comunidad astronómica de la SEA en la que surgió este sueño, así como las agencias estatales españolas que tanto nos han apoyado para hacer realidad ARRAKIHS, compartáis con nosotros esta aventura. Desde aquí, os agradecemos vuestro apoyo y os invitamos a uniros a ARRAKIHS para colaborar juntos en esta nueva etapa de descubrimiento y exploración del universo a muy bajo brillo superficial desde el espacio.



Figura 4. Cohete de lanzamiento Vega-C de la Agencia Espacial Europea despegando, que será el vehículo que pondrá en el espacio la misión ARRAKHS dentro de unos seis años.