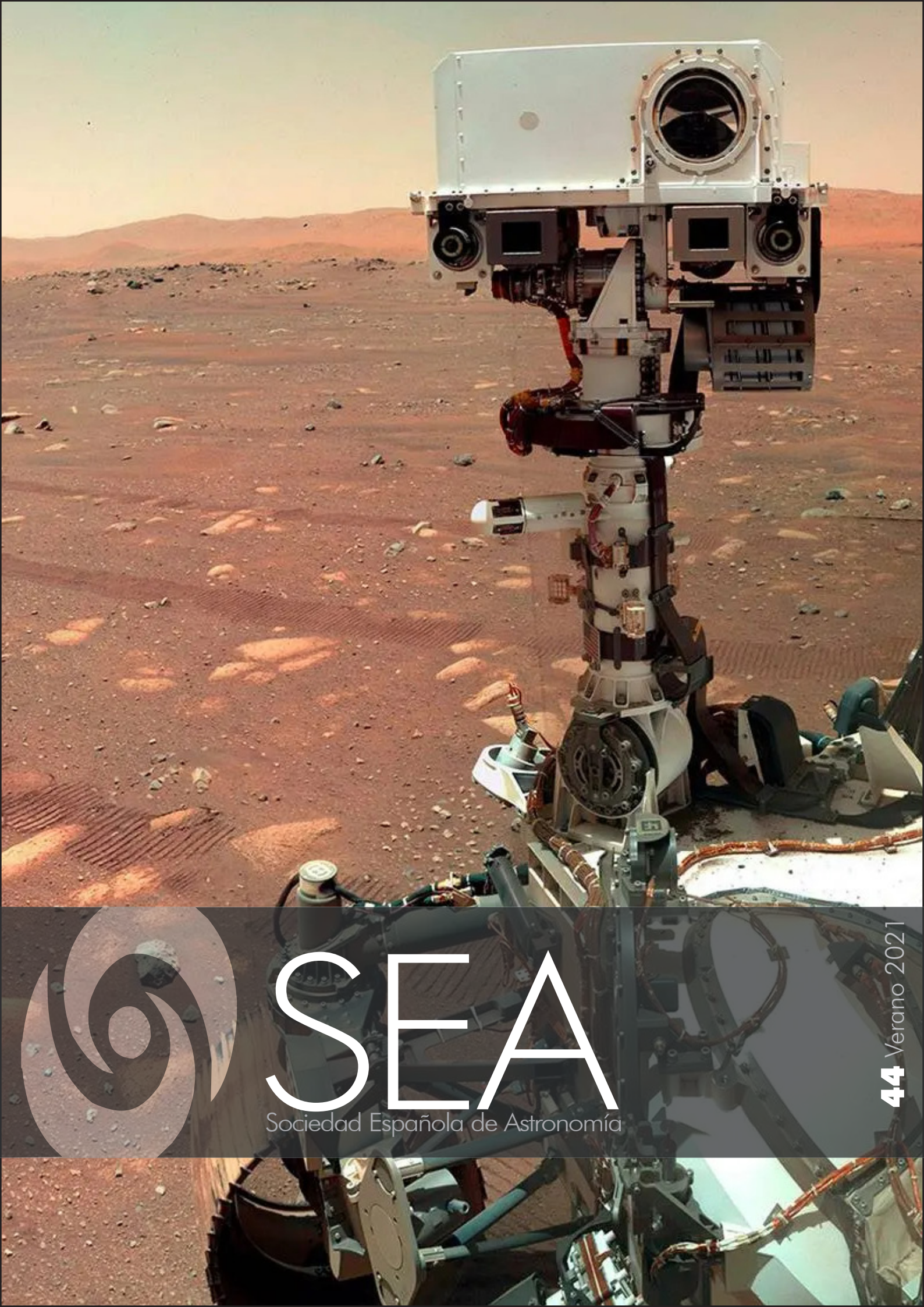
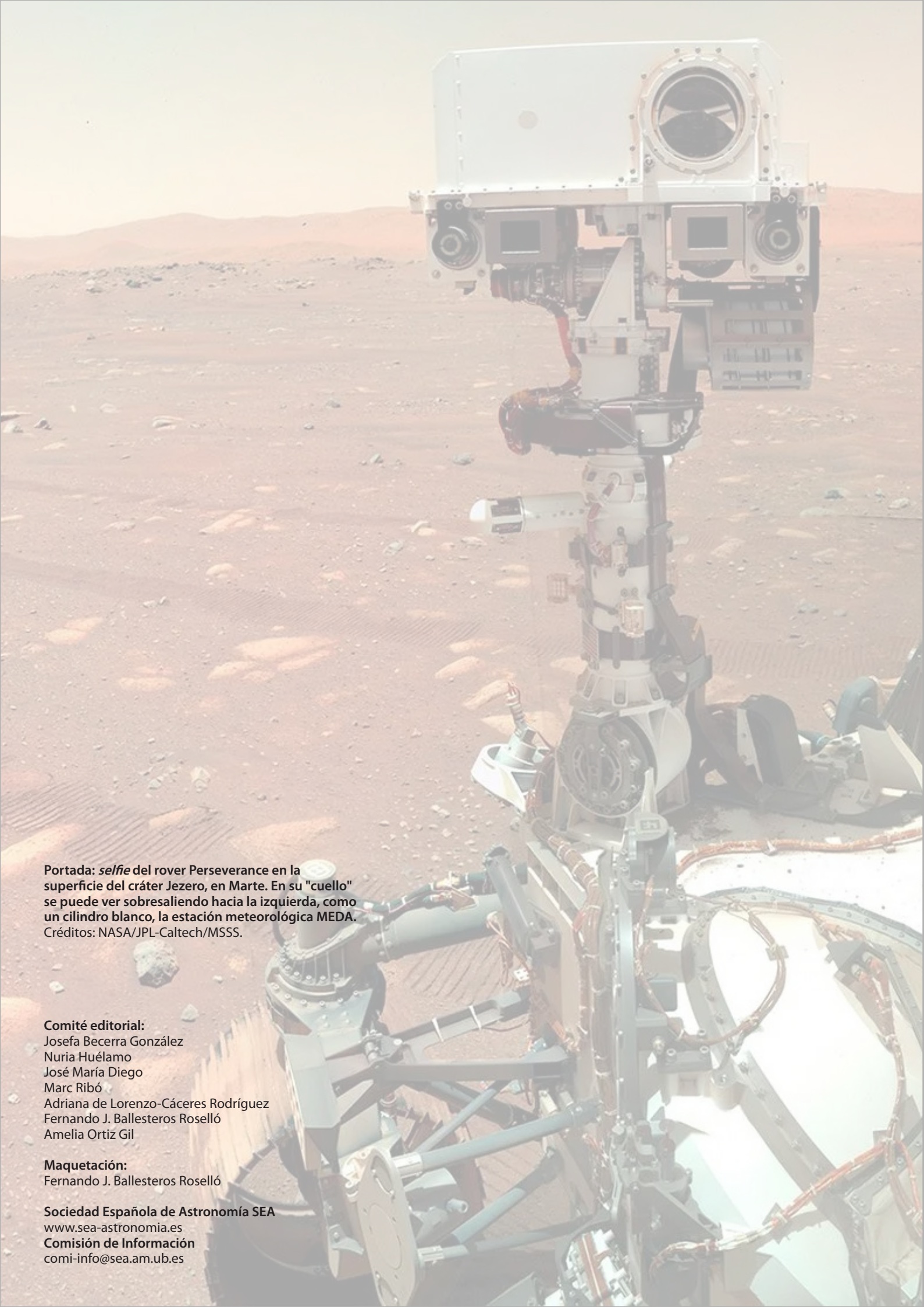


SEA

Sociedad Española de Astronomía

44 Verano 2021



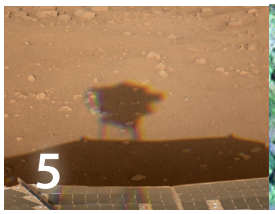
Portada: *selfie* del rover Perseverance en la superficie del cráter Jezero, en Marte. En su "cuello" se puede ver sobresaliendo hacia la izquierda, como un cilindro blanco, la estación meteorológica MEDA.
Créditos: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

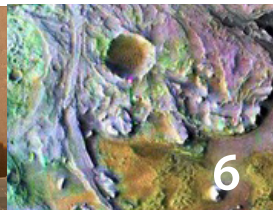
Comité editorial:
Josefa Becerra González
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

Maquetación:
Fernando J. Ballesteros Roselló

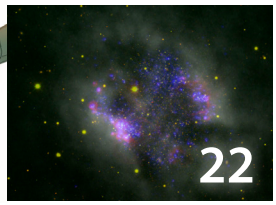
Sociedad Española de Astronomía SEA
www.sea-astronomia.es
Comisión de Información
comi-info@sea.am.ub.es

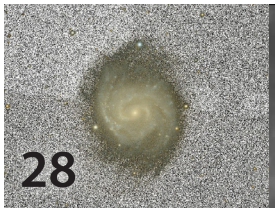
CONTENIDOS

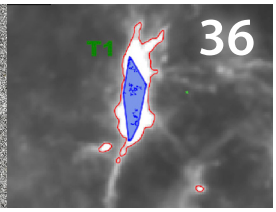










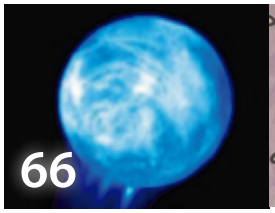






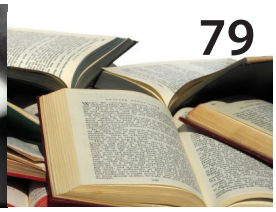


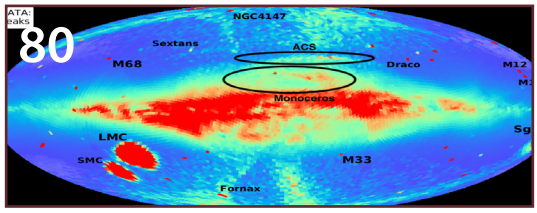












5 Editorial

6 La contribución española en la misión Mars 2020 / Perseverance para la exploración de Marte

12 Impacto del COVID-19 en la productividad de las astrofísicas en España

22 Estrellas masivas de baja metalicidad, mucho más que la conexión con el Universo primitivo

28 El resplandor de las tinieblas

36 La estructura espacial de la formación estelar

40 DRAGO: un pequeño instrumento, un gran camino

48 Si sueñas, sueña a lo grande

56 España participa en la constitución del SKAO

60 Sin SPICA el universo infrarrojo se antoja aún más oscuro y lejano

66 LUVOIR – ciencia y tecnología para un telescopio espacial de la generación 10-m

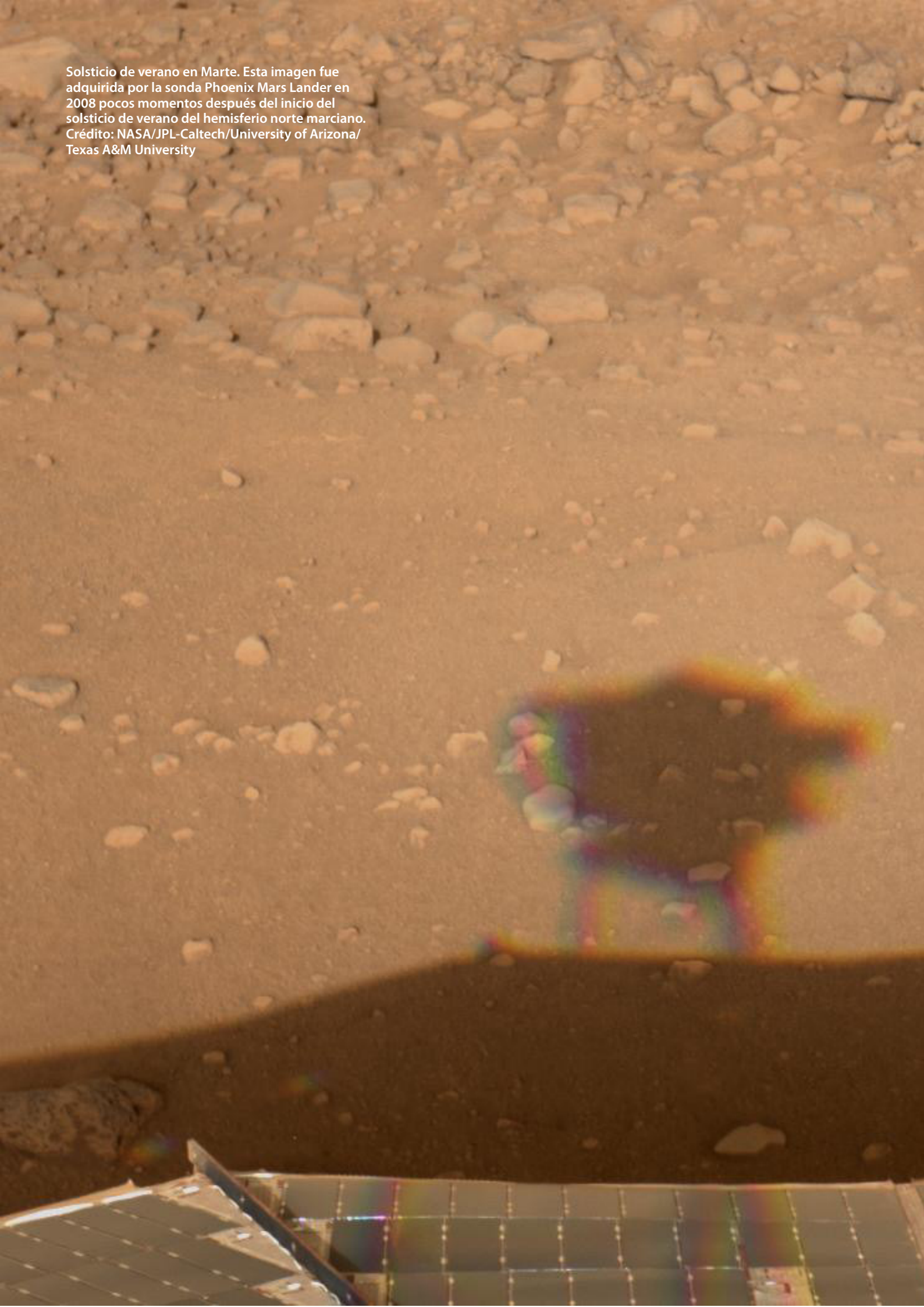
72 Concurso de relato corto 'Mujer y Astronomía' 2021

78 Ecos de (la) Sociedad

79 Libros

80 Tesis doctorales

Número 44, Verano 2021



Solsticio de verano en Marte. Esta imagen fue adquirida por la sonda Phoenix Mars Lander en 2008 pocos momentos después del inicio del solsticio de verano del hemisferio norte marciano. Crédito: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/ Texas A&M University



EDITORIAL

Como cada solsticio, en este nuevo ejemplar del boletín se incluyen retazos de ciencia puntera con firma española. La temática es variada, incluyendo tanto temas de investigación como instrumentación, y teniendo la enorme suerte de contar con la colaboración de expertos que nos hacen llegar su conocimiento y entusiasmo de una forma sencilla y amena.

Uno de los grandes logros científicos de los últimos meses ha sido sin duda la llegada a Marte del Perseverance (Percy para los amigos). Tres de los actores principales españoles nos cuentan las primeras impresiones y la contribución española a la misión.

Otro de los temas de actualidad es sin duda el impacto del COVID-19 en los distintos ámbitos de nuestra vida. La comisión de Mujer y Astronomía ha hecho un excelente trabajo para intentar cuantificar el efecto de la pandemia en la productividad de las astrofísicas españolas, que arroja resultados interesantes que habrá que comparar con estudios a más largo plazo.

Nos sumergiremos también en el campo de las estrellas masivas, cuyo estudio tiene importantes implicaciones más allá de la física estelar. Así como también conoceremos un poquito más sobre la estructura espacial de la formación estelar. En la frontera entre lo visible y lo invisible, nos encontraremos con los entresijos de los estudios de bajo brillo superficial.

En la segunda parte del boletín nos dejamos llevar por los sueños. Todo es un sueño, una idea, antes de que se convierta en realidad. Hablamos del desarrollo de instrumentación española para micro-satélites, del futuro del observatorio de Arecibo, de la participación de España en el gran proyecto SKAO y el desarrollo de LUVOIR. Sin embargo, a veces nos despertamos antes de tiempo, y algún sueño queda a medias. Nada más lejos que la vida misma, aprendemos un poco más sobre SPICA y su cancelación.

Y para seguir soñando junto a los más pequeños, podemos disfrutar de los relatos cortos ganadores del concurso organizado por la Comisión Mujer y Astronomía con motivo del Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia. La reseña del libro por parte de Enric Marco es en esta ocasión de especial relevancia para los amantes de los observatorios. Amelia Ortiz nos resume las buenas noticias de los últimos meses en la sección Ecos de Sociedad, y Adriana de Lorenzo nos recopila la información de las tesis recientes. Enhorabuena a todos los premiados y a los nuevos doctores.

Josefa Becerra González
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA EN LA MISIÓN

Después de la Tierra, Marte es sin lugar a dudas, el planeta más estudiado y mejor conocido del sistema solar. Sus semejanzas con el nuestro en el período de rotación (24,6 horas, duración el día marciano conocido como sol), inclinación de su eje en 25,2º respecto del plano orbital (y consiguientemente presencia de estaciones en un año de 687 días terrestres), así como la existencia de una atmósfera, densa en el pasado, con oportunidades para la vida, han hecho de Marte un laboratorio único de investigación de las ciencias planetarias y de la astrobiología.







Agustín Sánchez Lavega
Universidad del País Vasco
agustin.sanchez@ehu.eus

Manuel de la Torre
Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology
mtj@jpl.nasa.gov

José Antonio Rodríguez Manfredi
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
manfredi@cab.inta-csic.es

Marte es un planeta pequeño (radio 3.389 km, 53% del radio terrestre) y su atmósfera actual, esencialmente de dióxido de carbono, es muy tenue con una presión media en la superficie de apenas 750 Pascales (7,5 milibares). Unido esto a su distancia al Sol (semieje mayor de la órbita elíptica de 228 millones de km) hace que el rango de temperaturas extremas vayan de los -140ºC (inviernos polares) a los 19ºC (veranos ecuatoriales), con fluctuaciones entre el día y la noche de 40ºC a 80ºC. Debido a estas variaciones de temperatura, el dióxido de carbono atmosférico condensa en nieve carbónica en los inviernos polares, alcanzando gran extensión, y evaporándose por el contrario, casi completamente, en los veranos. Actualmente, la presencia de agua en forma de vapor es escasa (un 0.02% en volumen en la atmósfera), si bien condensa y forma nubes de cristalitos de hielo de acuerdo con el ciclo estacional. El agua en estado líquido no puede existir en su superficie, pero sí se sabe que se encuentra en depósitos líquidos bajo la superficie en algunas regiones del planeta. En el pasado remoto, hace unos 3.000 a 4.000 millones de años, las características geológicas sugieren que la atmósfera marciana era densa, y las temperaturas alcanzaron el valor suficiente para que el agua fluyese en estado líquido por su superficie. Y ese es uno de los ingredientes necesarios en la receta de la vida tal y como la conocemos en la Tierra.

El desvanecimiento del campo magnético primigenio del planeta, junto con otros factores, favorecieron la pérdida de gran parte de su atmósfera. Marte es hoy en día un planeta seco, polvoriento (el polvo está permanentemente en suspensión en la atmósfera), gélido en casi todos sus rincones la mayor parte del tiempo, y achicharrado por la radiación ultravioleta. No es precisamente el mejor lugar para la vida. Pero si se dio esa oportunidad, hay que buscarla. Además, el debate sobre la presencia o no de gas metano en su atmósfera (potencialmente con posible origen biológico), sigue abierto. Todo esto, junto con una atmósfera rica en fenómenos meteorológicos, semejantes a los terrestres en muchos aspectos, hacen del planeta un laboratorio natural en el que poder estudiar, comprender y mejorar la predictiva de los modelos. Particularmente en lo referente al ciclo del polvo y a la generación de las grandes tormentas, hoy en día impredecibles. Un conocimiento que será esencial para la futura visita de astronautas al planeta.

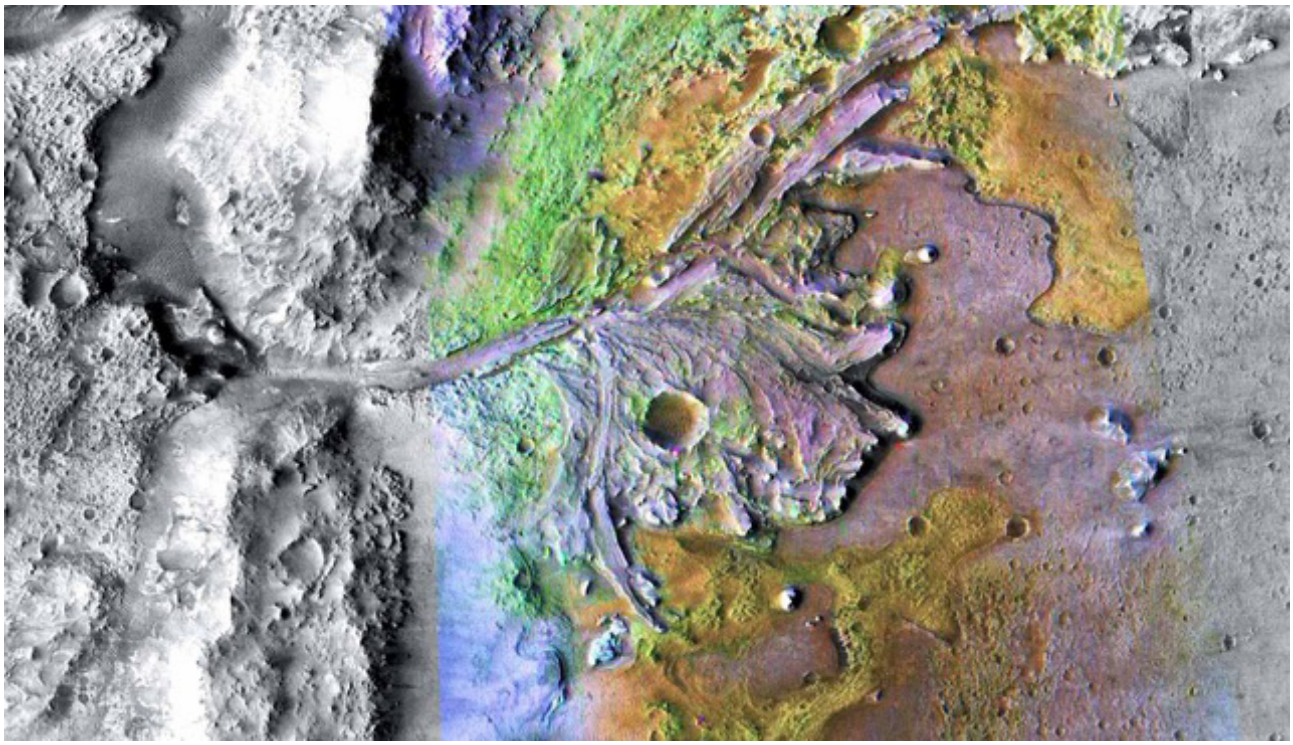
LA EXPLORACIÓN DE MARTE Y EL ROVER PERSEVERANCE

Hasta la fecha se han enviado 48 misiones espaciales a Marte por diferentes agencias, si bien muchas de ellas resultaron en fracaso. A día de hoy hay 8 misiones activas en órbita, una plataforma fija *InSight*, y los rovers *Curiosity* y *Perseverance* (todos ellos de NASA con la participación de varios países), a los que se ha unido el recién llegado *rover Tianwen-1* de la agencia espacial China.

Centrándonos en la misión Mars 2020 su lanzamiento tuvo lugar en Cabo Cañaveral el 30 de julio de 2020, posando al *rover Perseverance* el pasado 18 de febrero de 2021 en el cráter Jezero (Fig. 1), en el delta de un antiguo lago de 45 km de tamaño al norte del ecuador.

Perseverance es sin lugar a dudas el laboratorio móvil más complejo de exploración lanzado hasta la fecha (*Farley et al. 2020*). Su peso alcanza los 1.025 kg con un tamaño de 3 m de largo por 2,7 m de ancho y 2,2 m de alto, dotado de un brazo robótico extensible en su parte delantera. Lleva un generador termoeléctrico de radioisótopos que utiliza el calor producido en el proceso de desintegración natural del plutonio-238 para generar electricidad con una potencia de 110 W con la que alimentar sus instrumentos. Los objetivos principales de la misión son el estudio de las características geológicas de *Jezero*, evaluar las condiciones de habitabilidad en el pasado marciano y la búsqueda de "*biofirmas*" en rocas capaces de preservarlas y que pudieran delatar la presencia de vida pasada. Perseverance reunirá además muestras de rocas y de arenas y polvo de la superficie, que irá depositando en envases apropiados durante su recorrido, para ser potencialmente recogidas posteriormente por otra misión y traerlas a la Tierra con el fin de realizar un análisis detallado. Finalmente se pondrán a prueba en el *rover* nuevas tecnologías para su uso en futuras exploraciones robóticas y humanas. Una de ellas es el pequeño helicóptero *Ingenuity*, de tan solo 1,8 kg de peso y que ya ha realizado exitosamente varios vuelos.

Figura 1. Delta de entrada del cráter Jezero capturada por el Mars Reconnaissance Orbiter de NASA. Los colores representan la diversidad mineralógica del lugar de aterrizaje de Perseverance (Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/ASU).



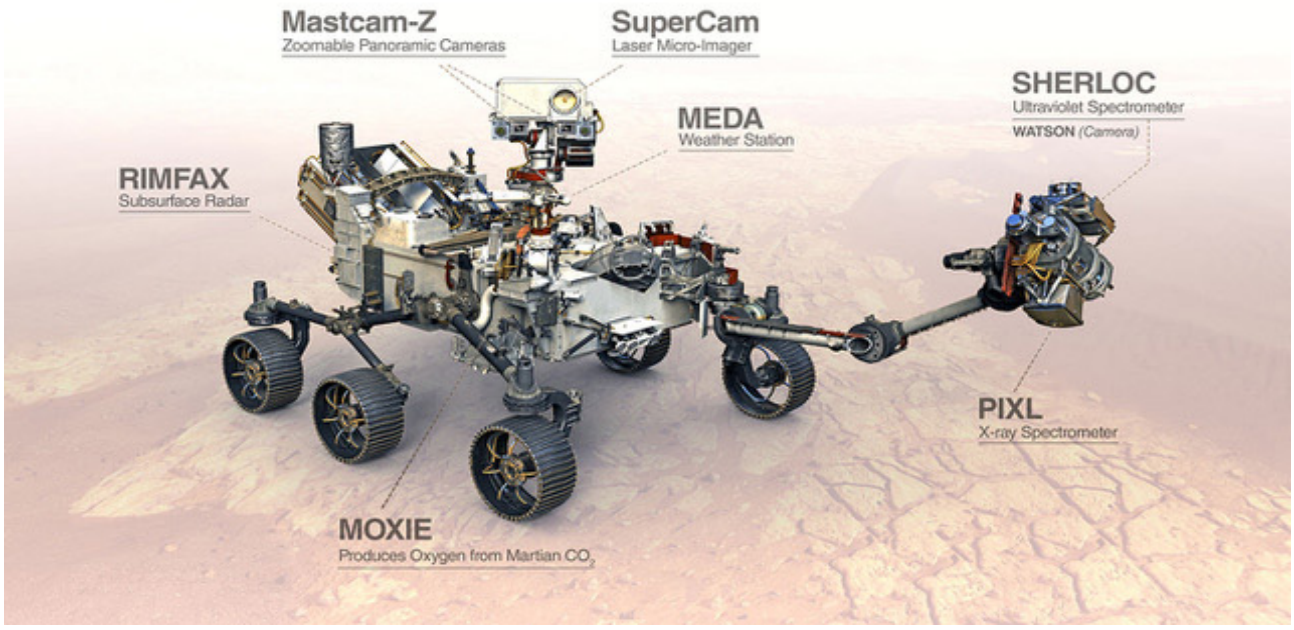


Figura 2. Detalle y ubicación de los 7 instrumentos científicos que lleva el rover Perseverance (Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech).

Son siete los instrumentos que Perseverance lleva a bordo (Fig. 2):

(1) **Mastcam-Z**, un sistema avanzado de cámaras con el que toma imágenes panorámicas, estereoscópicas y con capacidad de hacer zoom. Se está empleando para el estudio de la mineralogía de la superficie, captura de fenómenos meteorológicos como los remolinos de polvo (conocidas como "*dust devils*") y, junto a las cámaras de navegación (Navcams), para el control y manejo del *rover*.

(2) **SuperCam**, un instrumento dotado de un láser y con el que se obtienen además imágenes para el análisis de composición química y mineralogía. Lleva también un micrófono con el que se estudian las propiedades acústicas de la atmósfera.

(3) **PIXL** (*Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry*), situado en el brazo robótico, es otro analizador de la composición química de la superficie marciana mediante el empleo de un espectrómetro fluorescente de rayos-X que captura imágenes de alta resolución.

(4) **SHERLOC** (*Scanning Habitable Environments with Raman and Luminiscense for Organics and Chemicals*) que, también ubicado en el brazo robótico, persigue la detección de productos orgánicos y químicos mediante técnicas Raman y de luminiscencia empleando un láser ultravioleta. Incluye una cámara de alta resolución para capturar imágenes microscópicas a color de la superficie de Marte, denominado *WATSON*.

(5) **MOXIE** (*Mars Oxygen ISRU -In Situ Resource Utilization- Experiment*), es un novedoso experimento con el que se pretende la obtención de oxígeno directamente a partir del dióxido de carbono de la atmósfera. Tecnología que de resultar exitosa sería empleada en futuras visitas humanas a Marte.

(6) **RIMFAX** (*Radar Imager for Mars' subsurFAce eXperiment*), se trata de un radar de penetración para el estudio del subsuelo de Jezero con una resolución a la escala del centímetro.

(7) **MEDA** (*Mars Environmental Dynamics Analyzer*), formado por un conjunto de sensores para el estudio de las condiciones meteorológicas del medio ambiente y de las propiedades del polvo en suspensión en la atmósfera de Marte. En lo que sigue detallaremos las características de este último instrumento, contribuido por España a la misión (*Rodriguez-Manfredi et al. 2021*).

Desde que aterrizó en el lugar que se ha dado en denominar *Octavia E. Butler* en honor de la escritora de ciencia ficción estadounidense, el vehículo ha estado poniendo a punto sus sistemas y dando apoyo a los vuelos del helicóptero, esencialmente.

A los pocos días tras el aterrizaje, el software del ordenador del *rover* que le había llevado desde nuestro planeta hasta la superficie marciana, fue sustituido por una nueva versión especialmente diseñada para el control de los instrumentos y demás sistemas, quedando preparado para llevar a cabo las diversas investigaciones previstas sobre la superficie.

Así, en los casi 100 soles que lleva operando sobre la superficie marciana, todavía no ha tenido la oportunidad de recorrer una gran distancia (apenas unos pocos centenares de metros), pero ha realizado numerosas actividades de calibración de cada sistema, y comenzado el análisis de la mineralogía del entorno mientras esperaba pacientemente la conclusión de la campaña de vuelos de *Ingenuity*.

LA CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A LA MISIÓN

La exitosa relación entre la comunidad científica española y NASA se remonta a bastantes décadas a través de varias misiones.

En concreto, nuestro país participa en esta última misión de NASA para la exploración de Marte de una manera muy activa y destacada, tanto de manera científica, como tecnológica:

(1) con la **antena de alta ganancia** que *Perseverance* emplea para comunicarse con la Tierra, desarrollado por Airbus CASA Espacio - CDTI (como también hace *Curiosity* con un sistema similar desarrollado por la misma compañía);
(2) con el **sistema de calibración** que el instrumento franco-americano *SuperCam* usa para ajustar las imágenes y los espectros que registra, desarrollado por la Universidad de Valladolid, Universidad del País Vasco, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, la Universidad de Málaga, el Instituto de Geociencias, la Universidad Complutense de Madrid, y la empresa Added-Value-Solutions; y
(3) con el mencionado instrumento **MEDA**, liderado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial – Centro de Astrobiología, y que ha contado con la participación de un amplio consorcio internacional compuesto por CSIC, la Universidad de Alcalá, la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad del País Vasco, la Universidad de Sevilla y el Instituto de Microelectrónica de Sevilla, como socios nacionales, así como el Jet Propulsion Laboratory, Finnish Meterorological Institute, NASA Goddard Space Flight Center, Cornell University, Carnegie Institution, University of Michigan, Space Science Institute, Lunar and Planetary Institute, Aeolis Corporation, Soutwest Research Institute, John Hopkins APL, y la Università degli Studi di Padova como centros de investigación internacionales. Además, ha contado con la importante participación de las empresas Airbus-CRISA, Added-Value-Solutions (A-V-S), y ALTER Technology.

Como mencionábamos anteriormente, MEDA es la estación meteorológica más avanzada hasta el momento que estudiará la atmósfera marciana y el polvo que cubre la superficie. Conocer la dinámica atmosférica, y cómo son y se comportan las finas partículas de polvo, resulta de especial interés para NASA y la comunidad científica planetaria, no solo para entender el Marte actual o su evolución en el pasado, sino por las importantes implicaciones que tiene en la planificación y el diseño de las futuras misiones tripuladas.

Estos finos aerosoles juegan un papel más importante en la atmósfera marciana que el que tienen el vapor de agua o las nubes en nuestra Tierra, pudiendo incluso llegar a cubrir Marte enteramente con una macro tormenta planetaria de polvo. Las lecturas de los distintos sensores del instrumento nos permitirán caracterizar las propiedades físicas y ópticas de estas finas partículas, estimar la abundancia de éstas en suspensión en cada instante, entender la distribución de tamaños y su forma, así como las condiciones que deben darse para que sean elevadas y puestas en suspensión con tanta facilidad, y cómo estas propiedades se relacionan con los ciclos meteorológicos que acontecen en el planeta.

Para todo ello, el instrumento está compuesto en realidad por 6 sensores independientes que han sido especialmente diseñados, construidos y ubicados en el vehículo para registrar regular e ininterrumpidamente ciertos parámetros ambientales presentes en el entorno del rover (Fig. 3.):

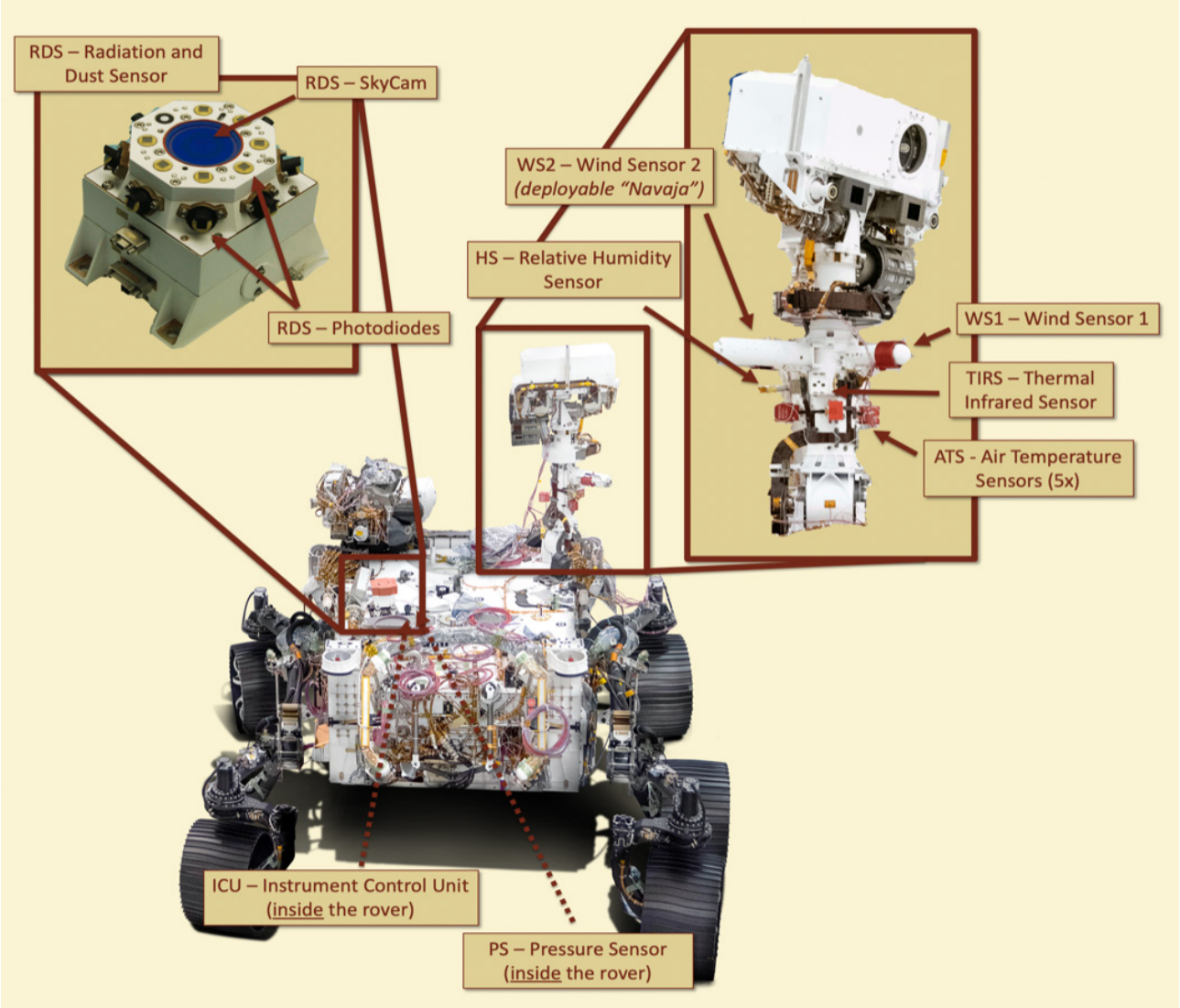


Figura 3. Detalle de los sensores de MEDA, ubicados sobre el rover Perseverance (Crédito de la imagen: NASA/JPL/INTA).

- las propiedades del polvo en suspensión, como comentábamos (mediante el sensor *Radiation and Dust Sensor* y la cámara *SkyCam*, dedicada a la observación exclusiva del cielo marciano -Fig. 4),
- la presión atmosférica (*Pressure Sensor*),
- la humedad relativa (*Humidity Sensor*),
- la temperatura del aire a cuatro alturas (*Air Temperature Sensor*),
- el balance de radiación térmica de la superficie (*Thermal IR Sensor*),
- la velocidad y dirección tridimensional de los vientos (*Wind Sensor*),
- y los ciclos de radiación solar (a través del sensor de radiación).

En suma, los datos que el instrumento MEDA proporcione, conjuntamente con los obtenidos de manera simultánea por los otros instrumentos operados por el INTA-CAB (los instrumentos *REMS -Rover Environmental Monitoring Station-* a bordo del rover *Curiosity*,

en Marte desde 2012 (*Gomez-Elvira et al. 2012*), y *TWINS -Temperature and Winds for InSight-*, en la misión *InSight*, y en Marte desde 2018), nos ayudarán a lograr un mayor y mejor entendimiento de la atmósfera marciana, de su dinámica y balance energético, así como de las posibles implicaciones que la meteorología y el clima local puedan tener sobre las formas de vida que pudieran haber existido (o ¿existan?) en el planeta.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha llevado a cabo en el Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, bajo contrato con National Aeronautics and Space Administration (80NM0018D0004).

REFERENCIAS

K.A. Farley et al., Mars 2020 Mission Overview. Space Sci. Rev. 216:8 (2020). https://doi.org/ 10.1007/s11214-020-00762-y

F.J. Gomez-Elvira et al., REMS: the environmental sensor suite for the Mars Science Laboratory rover. Space Sci. Rev. 170, 583–640 (2012). https://doi.org/10.1007/s11214-012-9921-1

J.A. Rodriguez-Manfredi et al., The Mars Environmental Dynamics Analyzer, MEDA. A Suite of Environmental Sensors for the Mars 2020 Mission. Space Sci. Rev. 217:48 (2021). https://doi.org/10.1007/s11214-021-00816-9

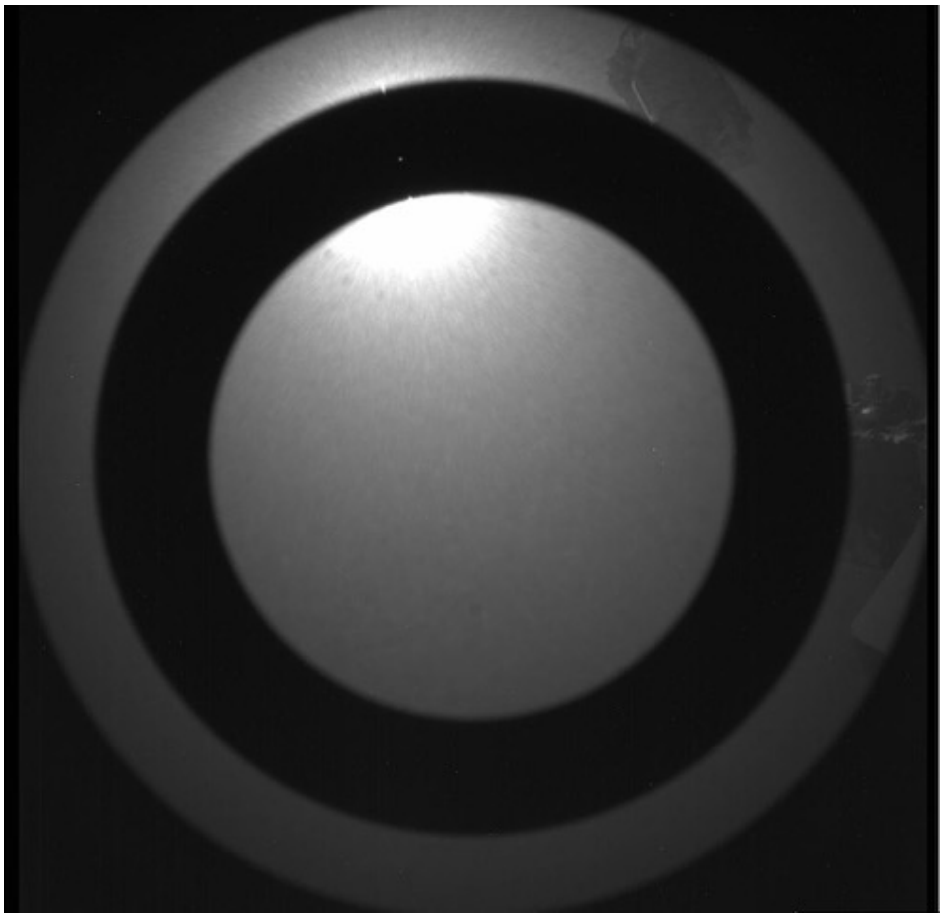


Figura 4. Imagen del cielo marciano tomada por la cámara del instrumento MEDA, en la que el sol queda oculto tras el anillo-máscara de densidad neutra (Crédito de la imagen: NASA/JPL/INTA).

IMPACTO DEL COVID-19 EN LA PRODUCTIVIDAD

El año 2020 será recordado como aquel en el que un virus recién aparecido (SARS-CoV-2) y su enfermedad relacionada (COVID-19) paralizaron la actividad de un mundo globalizado y, lo que es peor, segaron la vida de millones de personas en el mundo.



Jesús Varela López
Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón
jvarela@cefca.es

Nataly Ospina
Università degli Studi di Padova
nataly.ospina@unipd.it

Silvia Martínez Núñez
Instituto de Física de Cantabria, CSIC-UC
smartinez@ifca.unican.es

Miguel Cerviño Saavedra
Centro de Astrobiología, CSIC-INTA
mcs@cab.inta-csic.es

Naiara Barrado-Izagirre
Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea
naiara.barrado@ehu.eus

Almudena Alonso-Herrero
Centro de Astrobiología, CSIC-INTA
aalonso@cab.inta-csic.es

EL VIRUS QUE PARALIZÓ EL MUNDO

El año 2020 será recordado como aquel en el que un virus recién aparecido (SARS-CoV-2) y su enfermedad relacionada (COVID-19) paralizaron la actividad de un mundo globalizado y, lo que es peor, segaron la vida de millones de personas en el mundo.

En España, la fecha clave fue el 14 de marzo de 2020 cuando el Gobierno central decretó el estado de alarma y un confinamiento domiciliario que se prolongaría, en mayor o menor medida, durante más de tres meses. Por desgracia, esto no evitaría el contagio de millones de personas, la hospitalización de centenares de miles y, lo más dramático, el fallecimiento de decenas de miles de personas.

A esta tragedia humana hay que añadir las implicaciones económicas y sociales de la paralización de la mayoría de las actividades, incluyendo la investigación científica no relacionada con el combate a la pandemia. En el caso concreto de la investigación astrofísica, las medidas afectaron a la actividad de observatorios que tuvieron que suspender sus actividades durante semanas o meses, a la organización de reuniones científicas y congresos que también tuvieron que cancelarse o celebrarse en formato virtual y, particularmente, al día a día que durante meses se limitó al trabajo en casa.

En el caso de actividades profesionales no esenciales, fue el teletrabajo en casa, unido al cierre de centros escolares y guarderías, lo que introdujo una componente claramente diferencial de género en las medidas antiCOVID, al ser las mujeres las que en mayor medida se ocupan de tareas domésticas y del cuidado de menores (véase “Hombres y Mujeres en España”, INE, 2020).

Diversos artículos se han publicado estudiando el impacto de las medidas antiCOVID en la productividad científica y, más concretamente, en el número de publicaciones científicas, tanto desde un punto de vista multidisciplinar (Squazzoni et al., 2020) como centrados en campos o disciplinas específicas, sobre todo en el caso de ciencias de la salud (Wehner et al., 2020, Lerchenmüller et al., 2021). En la mayoría de estos estudios se observa un efecto diferencial negativo en las publicaciones de las mujeres aunque con amplia variabilidad en función del área de investigación.

Así, por ejemplo, Lerchenmüller et al. (2021) observan un claro impacto en las publicaciones relacionadas con ciencias de la salud pero no así en publicaciones relacionadas con ciencias biológicas.

En el campo particular de la astrofísica, Inno et al. (2020) realizaron un estudio sobre el impacto de las medidas antiCOVID en la comunidad astrofísica italiana durante el primer semestre de 2020. En dicho estudio se aprecia una caída del número de publicaciones enviadas a arXiv, respecto al mismo semestre de los tres años anteriores, con primera firma de una astrofísica mientras que se observa una subida cuando la primera firma es de un colega varón.

La "Comisión Mujer y Astronomía" de la SEA, inspirada por dicho trabajo, decidió llevar a cabo un análisis similar para la comunidad astronómica profesional española, poniendo el foco en la componente de género y el posible efecto diferencial entre astrofísicas y astrofísicos. Este artículo presenta los primeros resultados de dicho estudio.

DATOS, DATOS, DATOS

Como en cualquier investigación, lo primero que fue necesario hacer fue recopilar los datos que pudiesen ofrecernos una imagen del posible impacto de la pandemia en la productividad de la comunidad astronómica española. Para ello, se siguió la idea propuesta en Inno et al. (2020) de usar el envío de artículos al repositorio arXiv como medida de la productividad que más rápida y objetivamente podría mostrar los efectos de las medidas antiCOVID tomadas a partir de marzo de 2020. Aprovechando que el Astrophysical Data System de NASA (NASA/ADS)[1] recopila también los artículos enviados a arXiv y que su interfaz de búsqueda es mucho más potente que la proporcionada por el mismo arXiv, se decidió hacer la selección de artículos a través de esa plataforma.

Para tener una muestra manejable y a la vez representativa de la comunidad astronómica que investiga en España, se optó por trabajar solo con aquellos artículos en los que la primera firma fuese de una persona con afiliación a una institución española. La base temporal se extendió desde 2017 a 2021, siguiendo aquí el mismo procedimiento de análisis que Inno et al.(2020). Por último, se limitó la selección a aquellos artículos etiquetados por ADS como artículos de "astronomía".[2] El resultado de esta búsqueda fue de 2490 artículos de los que finalmente se seleccionaron aquellos en los que la fecha de envío a arXiv (obtenida a partir del código que da el repositorio) se encontraba entre 2017 y 2020, y se eliminaron aquellos en los que la lista de autores era evidentemente alfabética. La muestra final sobre la que se trabajó quedó en 2241 artículos.

UNA CUESTIÓN DE GÉNERO

El análisis no quedaría completo sin la asignación del género de la primera firma de cada artículo. En el caso de España y de la mayoría de países de nuestro entorno, el nombre de pila es un indicador bastante robusto del género de las personas. Gracias a esto, cruzando automáticamente los nombres de pila de las primeras firmas de cada artículo con un registro de nombres de mujer y de hombre fue posible identificar el género de un gran número de personas. Sin embargo, en muchos casos ADS solo ofrecía las iniciales, por lo que fue necesario realizar búsquedas más exhaustivas tanto en el mismo ADS como a través de internet para poder identificar a todas las personas de la muestra. Finalmente, se logró una asignación completa de género para los 2241 artículos, con una tasa de error que se estima inferior al 10% contabilizando diferentes fuentes de error, sobre todo en la asignación automática, y sin que esta incertidumbre afectase a los principales resultados de nuestro análisis.

PRIMEROS RESULTADOS, PRIMERAS SORPRESAS

En la Figura 1 se muestran los histogramas de todos los artículos enviados a arXiv desde 2017 a 2020 agrupados por semestres (barras grises), de aquellos enviados por mujeres[3] (barras moradas) y de los enviados por hombres (barras amarillas). Los mismos resultados se muestran en forma tabular en la Tabla 1a.

En promedio, de 2017 a 2019 la comunidad española envió ∼280 artículos/semestre a arXiv (en concreto, 278 ± 9) y en el primer semestre de 2020 se enviaron 306 (+9%, $+3\sigma$),[4] lo que representa una subida significativa respecto a los años anteriores (ver Tablas 1b,1c). Este incremento es compatible con los resultados obtenidos por Squazzoni et al. (2021) en una muestra mucho más amplia y englobando un gran número de campos de investigación y países.

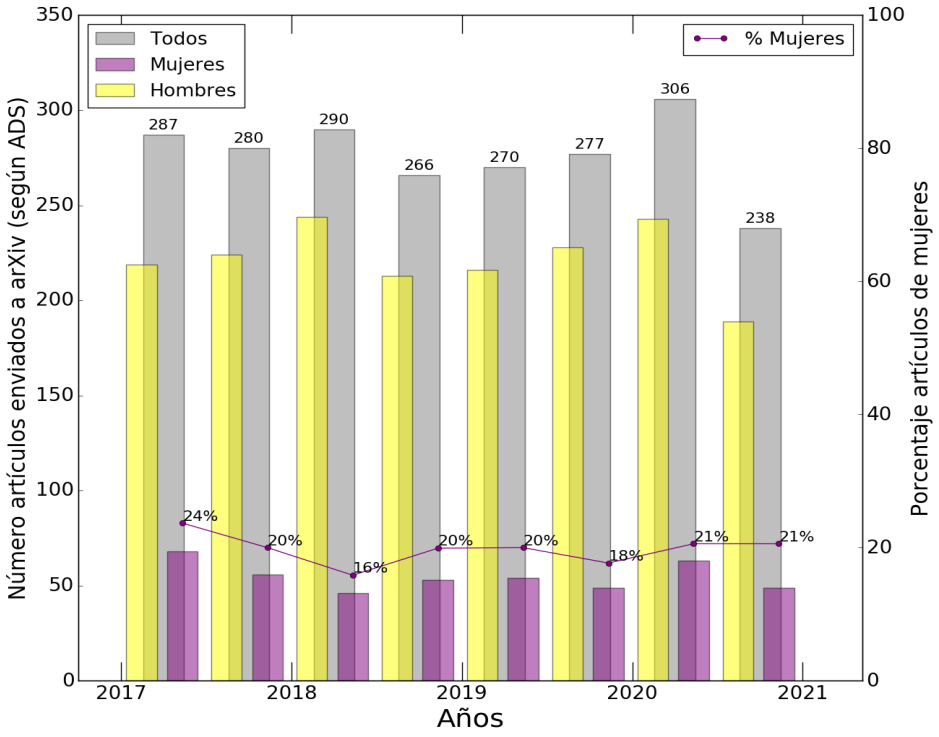


Figura 1. Número de artículos enviados a arXiv por semestres (barras grises), número de artículos enviados por astrónomos (amarillo) y por astrónomas (morado). La línea roja muestra la proporción de artículos enviados por mujeres en relación al total de artículos enviados. Ver Tablas 1a-c.

Semestre	N. Total	N. mujeres	N. hombres	% mujeres	% hombres
2017S1	287	68	219	24	76
2017S2	280	56	224	20	80
2018S1	290	46	244	16	84
2018S2	266	53	213	20	80
2019S1	270	54	216	20	80
2019S2	277	49	228	18	82
2020S1	306	63	243	21	79
2020S2	238	49	189	21	79
TOTAL	2214	438	1776	19.8	80.2

Tabla 1a. Estadísticas globales de artículos enviados a arXiv entre los años 2017 y 2020. Los porcentajes de mujeres y hombres hacen referencia al género de la primera firma de cada artículo.

Estadístico	Total	Mujeres	Hombres
<2017S1--2019S2>	278	54	224
σ(2017S1--2019S2)	9.4	7.6	11.2

Tabla 1b. Valor medio y desviación estándar del número de artículos enviados para los 6 semestres de 2017S1 a 2019S2.

	Variación porcentual (%)			Significancia estadística (Xσ)		
	Total	Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres
2020S1	9.9	16.0	8.5	3.0	1.1	1.7
2020S2	-14.5	-9.8	-15.6	-4.3	-0.7	-3.1

Tabla 1c. Variación porcentual de la cantidad de artículos enviados respecto a los semestres anteriores y significancia estadística (en unidades de σ) para los dos semestres de 2020.

Si se analizan los resultados de manera separada entre mujeres y hombres, para las primeras la media es de 54 ± 8 artículos, siendo el valor del primer semestre de 2020 de 62 (+15%,+1σ) y para los segundos la media es de 224 ± 11 artículos, enviando 243 (+5%,+2σ) artículos en el mismo semestre. Es decir, el aumento proporcional para las investigadoras es mayor pero, al ser mayores las incertidumbres, la subida es menos significativa. En cuanto a la fracción de artículos con primera autora, esta se mantiene más o menos constante en torno al 21%.[5]

Si nos fijamos en el segundo semestre de 2020, entonces cambian las tornas y se produce una caída significativa del número total de artículos enviados (238, -14%, -4.4σ), mucho más acusada entre los hombres (189, -16%, -3σ) que entre las mujeres (49, -9%, -0.6σ). Aun así, la fracción de artículos enviados por mujeres se mantiene invariable respecto al semestre anterior.

Todo este análisis fue realizado sobre la base de la etiqueta "astronomía" que proporciona ADS. Entendiendo que dicha etiqueta "astronomía" puede ser objeto de debate, especialmente, en lo que se refiere a incluir o no estudios de física teórica, decidimos hacer una selección por revistas limitando dicha selección a aquellas con mayor número de artículos enviados[6]. En la Figura 2 se muestra la distribución del número de artículos enviados a las ocho revistas con más de 50 envíos en los 4 años analizados. De ellas, en nuestro análisis consideramos *Astronomy and Astrophysics* (A&A), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (MNRAS) y *Astrophysical Journal* (ApJ) como revistas de "astrofísica", mientras que el resto las consideramos revistas de "física teórica".

Tras esta operación se mantienen 1771 trabajos, lo cual supone un 80% de la muestra inicial. Las primeras agrupan un total de 1231 artículos de los cuales 307 corresponden a mujeres (24.9%) mientras que en el segundo grupo de revistas el total asciende a 540 artículos de los cuales 73 corresponden a investigadoras (13.5%). Las Figuras 3a (astrofísica) y 3b (física teórica) replican el análisis de la Figura 1 distinguiendo entre estos dos campos.

Lo primero que se aprecia es la diferencia en la fracción de artículos enviados por mujeres entre ambas comunidades (∼25% para "astrofísica", ∼14% para "física teórica"), pudiendo esto reflejar las diferencias de composición de géneros entre ellas y, con ello, lo apropiado de analizar ambos grupos de manera independiente.

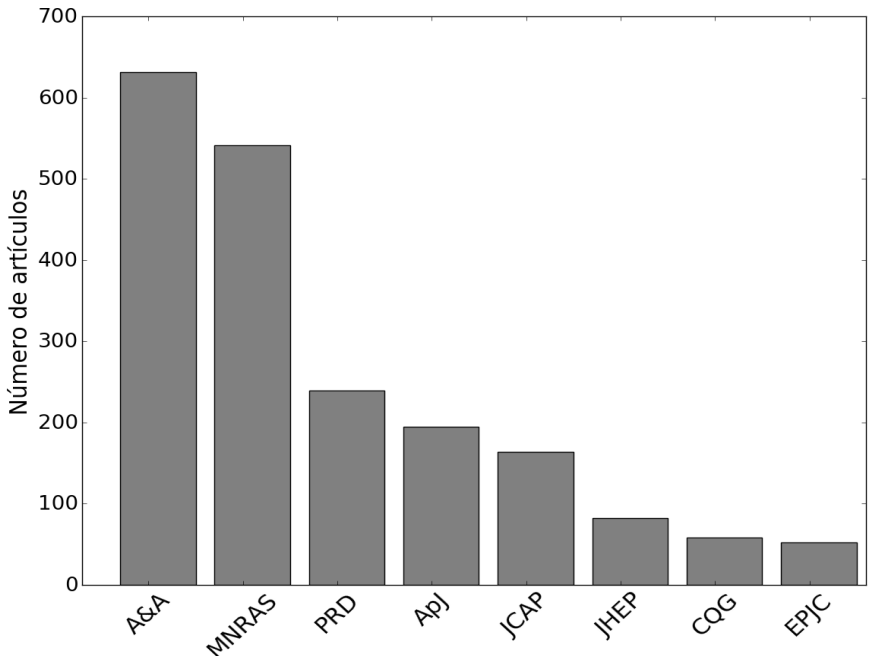


Figura 2. Distribución del número de artículos enviados a las 8 revistas con más de 50 artículos enviados a arXiv entre 2017 y 2020 (A&A: Astronomy and Astrophysics; MNRAS: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society; ApJ: The Astrophysical Journal; PRD: Physical Review D; JCAP: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, JHEP: Journal of High Energy Physics; CQG: Classical and Quantum Gravity; EPJC: European Physical Journal C.

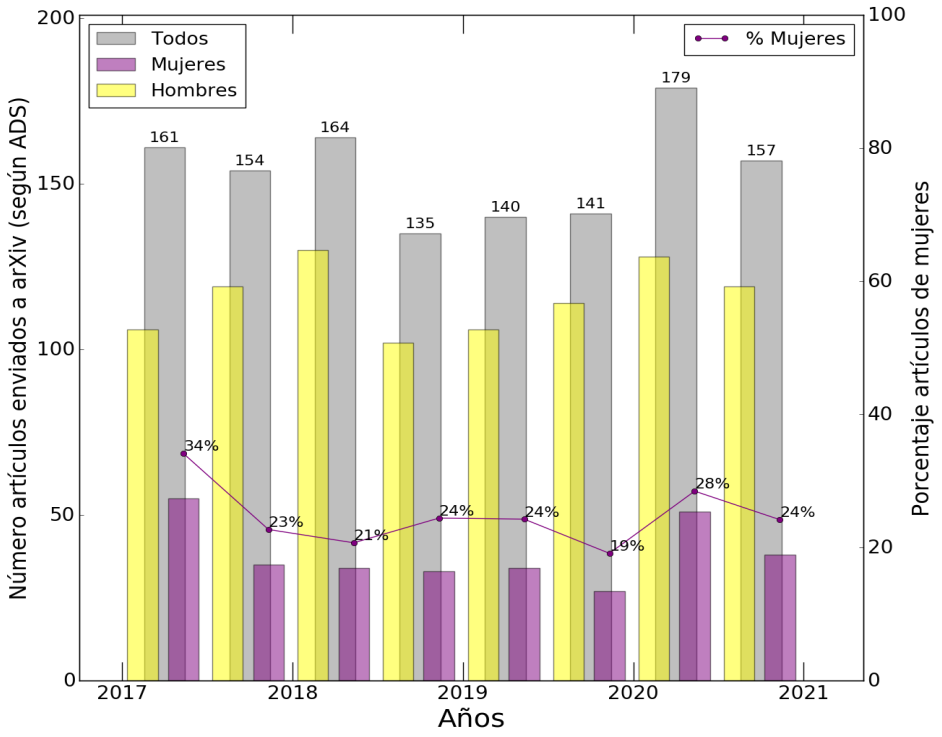


Figura 3a. Como Figura 1 pero solo para artículos enviados a revistas astrofísicas (A&A, MNRAS, ApJ). Ver Tablas 2a-c.

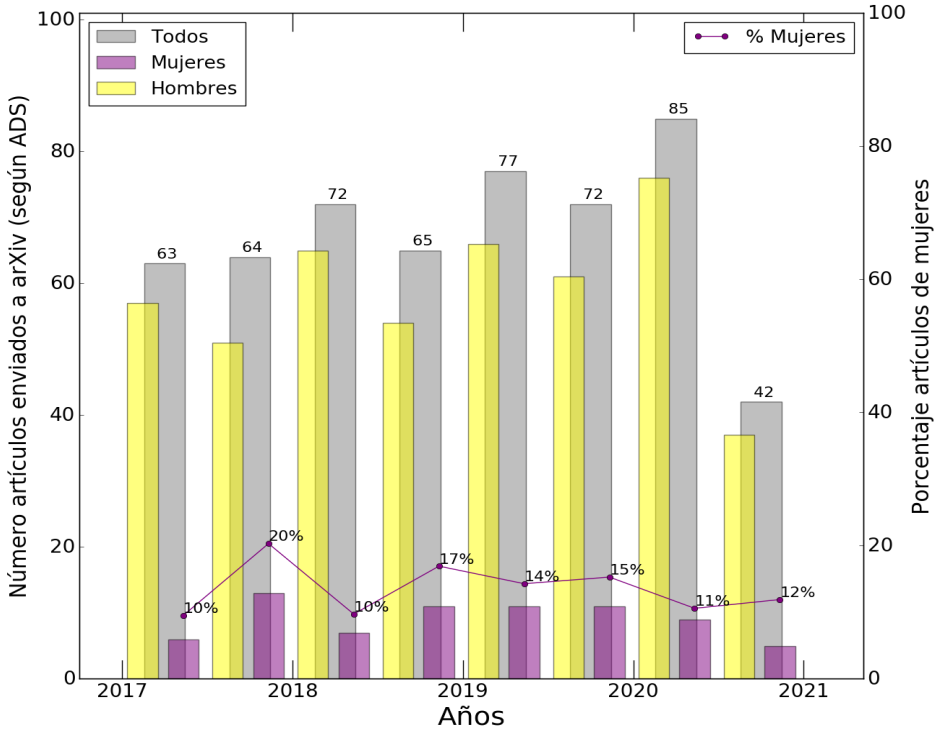


Figura 3b. Como Figura 1 pero solo para artículos (de astronomía según arXiv) enviados a revistas de física teórica (PRD, JCAP, JHEP, CQG, EPJC). Ver Tablas 3a-c.

Semestre	N. Total	N. mujeres	N. hombres	% mujeres	% hombres
2017S1	161	55	106	34	66
2017S2	154	35	119	23	77
2018S1	164	34	130	21	79
2018S2	135	33	102	24	76
2019S1	140	34	106	24	76
2019S2	141	27	114	19	81
2020S1	179	51	128	28	72
2020S2	157	38	119	24	76
TOTAL	1231	307	924	24.9	75.1

Tabla 2a. Como Tabla 1a pero solo para artículos enviados a revistas de astrofísica.

Estadístico	Total	Mujeres	Hombres
<2017S1--2019S2>	149	36	113
σ(2017S1--2019S2)	12.1	9.6	10.4

Tabla 2b. Valor medio y desviación estándar del n^0 de artículos enviados para los 6 semestres de 2017S1 a 2019S2 (solo artículos enviados a revistas de astrofísica).

	Variación porcentual (%)			Significancia estadística (×σ)		
	Total	Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres
2020S1	20.0	40.4	13.4	2.5	1.5	1.5
2020S2	5.3	4.6	5.5	0.6	0.2	0.6

Tabla 2c. Variación porcentual de la cantidad de artículos enviados respecto a los semestres anteriores y significancia estadística (en unidades de σ) para los dos semestres de 2020 (solo artículos enviados a revistas de astrofísica).

Semestre	N. Total	N. mujeres	N. hombres	% mujeres	% hombres
2017S1	63	6	57	10	90
2017S2	64	13	51	20	80
2018S1	72	7	65	10	90
2018S2	65	11	54	17	83
2019S1	77	11	66	14	86
2019S2	72	11	61	15	85
2020S1	85	9	76	11	89
2020S2	42	5	37	12	88
TOTAL	540	73	467	13.5	86.5

Tabla 3a. Como Tabla 1 pero solo para artículos (de astronomía según arXiv) enviados a revistas de física teórica.

Estadístico	Total	Mujeres	Hombres
<2017S1--2019S2>	69	10	59
σ(2017S1--2019S2)	5.6	2.7	6.0

Tabla 3b. Valor medio y desviación estándar del n^0 de artículos enviados para los 6 semestres de 2017S1 a 2019S2 (solo artículos de astronomía enviados a revistas de física teórica).

	Variación porcentual (%)			Significancia estadística (×σ)		
	Total	Mujeres	Hombres	Total	Mujeres	Hombres
2020S1	23.5	-8.5	28.8	2.9	-0.3	2.8
2020S2	-39.0	-49.2	-37.3	-4.8	-1.8	-3.6

Tabla 3c. Variación porcentual de la cantidad de artículos enviados respecto a los semestres anteriores y significancia estadística (en unidades de σ) para los dos semestres de 2020 (solo artículos de astronomía enviados a revistas de física teórica).

«Como conclusión principal de este análisis solo podemos señalar que los efectos negativos de la pandemia en 2020 no se reflejan de manera evidente en la productividad (medida como el número de artículos enviados)»

En cuanto al impacto de las medidas antiCOVID durante el año 2020, en ambos campos se producen incrementos del número total de artículos enviados a arXiv. Para el caso de revistas de "astrofísica", los dos semestres de 2020 muestran aumentos respecto a los semestres de los 3 años anteriores, siendo mayor el aumento en el primer semestre (total: $+20\%$, $+2.5\sigma$; mujeres: $+40\%$, $+1.5\sigma$; hombres: $+13\%$, $+1.5\sigma$). Aunque llama la atención el incremento del $\sim 40\%$ en los artículos enviados por astrofísicas en el primer semestre de 2020 este es, sin embargo, semejante al número de artículos enviados en el primer semestre de 2017. De manera similar, la cuota de artículos con primera firma femenina aumenta al 28% en ese mismo semestre después de haber descendido al 19% en el segundo semestre de 2019.

Si nos fijamos en los artículos (etiquetados por ADS como "astronomía") enviados a las principales revistas de física teórica, los resultados son más complejos. Por un lado, en el primer semestre de 2020 se produce un aumento significativo del número total de artículos ($+24\%$, $+2.9\sigma$) motivado fundamentalmente por el aumento en el número de artículos enviados por hombres ($+29\%, +2.8\sigma$) mientras que en el caso de las mujeres se mantiene prácticamente constante (-8.5%, -0.3σ). Por el contrario, en el segundo semestre se produce una caída total muy significativa (-39%, -4.8σ), de nuevo dominada por la caída en las publicaciones de los hombres (-37%, -3.6σ), aunque en este semestre las publicaciones de las mujeres también muestran una caída importante (-49%, -1.8σ).

ENTONCES, ¿CUÁL HA SIDO EL IMPACTO?

La interpretación de los resultados mostrados en la sección anterior no es trivial y un análisis detallado de los mismos que explique de manera rigurosa las diferencias observadas con respecto a otros trabajos tanto en el mismo campo (pero diferente país) como en contextos diferentes queda fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, sí se pueden aventurar algunas hipótesis que podrían explicar el menor impacto observado en la productividad de las astrónomas que trabajan en España durante los peores momentos de la pandemia del COVID-19. Por razones de espacio nos limitaremos a analizar los resultados en publicaciones de astrofísica.

En primer lugar y teniendo en cuenta la baja significatividad, nos podemos encontrar simplemente con una fluctuación estadística. Es decir, que la subida en el número de publicaciones de astrónomas que trabajan en España se podría haber producido incluso en una situación normal sin pandemia, como parece que ocurrió ya en 2017.

Por otro lado, aunque los efectos negativos de la pandemia y, en particular, del confinamiento domiciliario son innegables, sobre todo en el caso de familias con menores en casa, no es menos cierto que la limitación de movimiento impidió realizar muchas actividades (asistencia a congresos, viajes a observatorios, realización de seminarios, trabajos de laboratorio,...) siendo la preparación y escritura final de artículos una de las menos afectadas, pudiendo además dedicarle más tiempo sin interrupciones. Tampoco es descartable que habiéndose eliminado también los traslados diarios a los centros de trabajo y siendo la investigación un trabajo de gran contenido vocacional, en muchos casos se haya producido un aumento del tiempo dedicado al trabajo, incluyendo la preparación de artículos.

Aun así todo esto sería aplicable tanto para los hombres como para las mujeres y podría explicar la subida generalizada en el número de artículos enviados. Si nos fijamos en los cambios producidos a nivel de cuidados del hogar y de menores a los que, estadísticamente, las mujeres dedican más tiempo que los hombres en España, podrían enumerarse diferentes factores que podrían haber facilitado, en determinadas circunstancias, el trabajo de las investigadoras respecto a las condiciones habituales prepandemia.

Por un lado, muchas actividades relacionadas con el día a día de menores en edad escolar también desaparecieron, como los traslados a los colegios o la realización de actividades extraescolares, en la mayoría de los casos dependientes de las madres. Es cierto que aparecieron nuevas actividades como las clases on-line, pero quizás estando ambos progenitores en casa esto haya permitido, en ocasiones, repartir las cargas del hogar de manera menos desigual. Si este fuese el caso, nos encontraríamos con una tendencia positiva en cuanto a la concienciación social en España, al menos en el entorno familiar de las astrónomas.

La otra posibilidad es que el impacto negativo haya sido absorbido por las propias astrónomas en forma de más horas de trabajo, no reflejándose dicho impacto negativo en la productividad inmediata (medida como envío de artículos a arXiv) pero pudiendo tener un impacto a más largo plazo en dicha productividad y un impacto a corto plazo en su salud tanto física como psicológica.

A falta de la información y los recursos necesarios para validar cada una de estas hipótesis no podemos ir más allá de exponerlas, siendo conscientes de que la variedad de situaciones personales es mucho más amplia que lo aquí expuesto.

SIN EFECTOS NEGATIVOS.... POR AHORA

Como conclusión principal de este análisis solo podemos señalar que los efectos negativos de la pandemia en 2020 no se reflejan de manera evidente en la productividad (medida como el número de artículos enviados) de la comunidad astronómica española y esto es más evidente si el análisis se restringe a las principales publicaciones de astrofísica.

De igual manera, desde el punto de vista del análisis de género, no se aprecia que durante el año 2020 las astrofísicas que trabajan en instituciones españolas hayan reducido su productividad respecto a la productividad de sus colegas varones. Se aprecia un incremento importante, aunque no estadísticamente significativo, del número total de artículos enviados por astrofísicas como primeras autoras durante el primer semestre de 2020 coincidiendo con la fase más restrictiva de las medidas antiCOVID, en especial el confinamiento domiciliario, que sería aventurado achacar exclusivamente a efectos “positivos” de dichas medidas (por ejemplo, el no tener que asumir temporalmente otras cargas laborales ni dedicar tiempo al traslado casa-trabajo-casa), no pudiéndose descartar meros efectos estadísticos como muestra el número similar de artículos publicados en el primer semestre de 2017.

Por su parte, si nos restringimos a las publicaciones en revistas de “física teórica”, el comportamiento entre el primer y el segundo semestre de 2020 es muy dispar. En este caso, tanto el aumento como el descenso de 2020 son significativos respecto al comportamiento de los semestres anteriores y además sí se aprecia una componente diferencial de género,

mostrando los hombres un aumento muy significativo en su productividad durante el primer semestre que no comparten sus colegas femeninas. Ambos colectivos muestran, sin embargo, una caída considerable en el segundo semestre de 2020.

Por último, queremos recalcar que este estudio se ha centrado en el análisis de un único parámetro asociado a la productividad en un periodo de tiempo reducido. La aparente falta de impacto negativo que muestra este estudio puede ser un espejismo que muestre sus consecuencias en un plazo de tiempo más largo. Por este motivo, la "Comisión Mujer y Astronomía" considera que es relevante repetir este análisis anualmente, empezando por el actual 2021.

NOTAS

[1] Esta investigación ha hecho uso del NASA's Astrophysics Data System Bibliographic Services.

[2] La búsqueda exacta que se hizo en ADS fue: aff:" ^ Spain" year:2017-2021 collection:astronomy property:eprint_openaccess

[3] Aunque no se indique explícitamente, a lo largo de este artículo toda referencia al género del autor o autora de un artículo se referirá siempre y únicamente al género de quien firma en primera posición el artículo.

[4] De ahora en adelante, se indicará entre paréntesis la variación porcentual respecto al valor promedio de los 6 semestres de 2017-2020 así como la significancia estadística en unidades de la desviación estándar (σ) en el mismo periodo.

[5] Esta cifra es ligeramente menor que la fracción de mujeres en la comunidad astronómica española que, según el último estudio de recursos humanos llevado a cabo por la SEA, estaría en torno al 28%. El origen de esta diferencia es lo suficientemente complejo para necesitar una análisis independiente que queda fuera del objetivo principal de este artículo.

[6] Aquí es necesario indicar que, al exigir como condición la publicación en una revista, se impone implícitamente la condición de que el artículo haya sido no solo enviado a arXiv sino también publicado. Esto afectará en mayor medida a artículos enviados a arXiv en el segundo semestre de 2020 que en el primero, al haber tenido menos tiempo entre su envío y su posible publicación.

REFERENCIAS

- "Hombres y Mujeres en España", INE, 2020, https://www.ine.es/ss/Satellite?L=es_ES&c=INEPublicacion_C&cid=1259924822888&p=%5C&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout
- "Informe de Recursos Humanos en A&A en España (2002-2020)", https://www.sea-astronomia.es/sites/default/files/informe_sea_rrhh_2020.pdf
- Inno, L., Rotundi A., Piccialli A. (2020), COVID-19 lockdown effects on gender inequality, Nature Astronomy, Vol. 4, 1114
- Lerchenmüller C, Schmallenbach L, Jena AB, Lerchenmueller, M.J. (2021) Longitudinal analyses of gender differences in first authorship publications related to COVID-19, BMJ Open 2021;11:e045176. doi:10.1136/bmjopen-2020-045176
- Wehner, M.R.,Li, Y., Nead, K. T. (2020), Comparison of the Proportions of Female and Male Corresponding Authors in Preprint Research Repositories Before and During the COVID-19 Pandemic, JAMA Netw Open. 2020;3(9):e2020335. doi:10.1001/jamanetworkopen.2020.20335
- Squazzoni, F., Bravo, G., Grimaldo, F., Garcıa-Costa, D., Farjam, M, Mehmani, B., (2020) Only Second-Class Tickets for Women in the COVID-19 Race. A Study on Manuscript Submissions and Reviews in 2329 Elsevier Journals (October 16, 2020). Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=3712813 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3712813



Miembros actuales de la comisión Mujer y Astronomía de la SEA, por orden de fotografía desde la esquina superior izquierda y en sentido horario: Jesús Varela, Nataly Ospina, Silvia Martínez Núñez, Miguel Cerviño Saavedra, Naiara Barrado-Izagirre, Almudena Alonso-Herrero, Julia Suso, Mª Dolores Rodríguez Frías, Marina Rodríguez Baras, Isabel Rebollido, Amparo Marco Tobarra, Elena Manjavacas, Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez y Silvia Bonoli.

ESTRELLAS MASIVAS DE BAJA METALICIDAD, MUCHO

Comenzamos a trabajar en estrellas masivas pobres en metales para obtener prescripciones empíricas de sus propiedades físicas que pudieran implementarse en los modelos evolutivos. Estos, a su vez, proporcionarían estimaciones más realistas de la retroalimentación de estrellas masivas en poblaciones estelares a medio y alto desplazamiento al rojo, z. Diez años más tarde, esta línea es uno de los frentes punteros en el campo de estrellas masivas: las inminentes observaciones de galaxias en la infancia del Universo con el JWST, la detección de galaxias cercanas con intensa emisión en HeII1640 y la demografía de agujeros negros detectada por los observatorios de ondas gravitatorias, han traído a las estrellas masivas de baja metalicidad al primer plano. El campo está experimentando una revolución que se potenciará con la llegada del ELT y de futuras misiones visible-UV en el espacio.





Miriam García García
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
mgg@cab.inta-csic.es

Artemio Herrero Davó
Instituto de Astrofísica de Canarias /
Universidad de La Laguna
ahd@iac.es

PARA EMPEZAR, UN BREVE CONTEXTO

Desde su nacimiento, las estrellas masivas liberan gran cantidad de energía mecánica e ionizante al medio interestelar y lo enriquecen con nuevos metales en escalas de tiempo cortas. Su final está asociado a fenómenos altamente energéticos, supernovas (SN) y estallidos de rayos-γ (GRBs), que señalizan la formación estelar reciente hasta grandes distancias y siembran el Cosmos con agujeros negros y estrellas de neutrones. Son así grandes dinamizadoras de la evolución de las galaxias y el Universo, papel que comenzó durante el periodo de re-ionización con las primeras estrellas, posiblemente muy masivas y fuente de un intenso campo de fotones ultravioletas (UV).

Cuantificar el retorno multifacético de las estrellas masivas a las galaxias huéspedes requiere modelos evolutivos con predicciones precisas para sus temperaturas, luminosidades y distribuciones espectrales de energía a lo largo de su vida. También requiere predecir sus finales en términos de SN, GRB y resto compacto. Estos cálculos entran en los modelos de síntesis de poblaciones y quimiodinámica de galaxias, que a su vez alimentan las simulaciones cosmológicas. Todo ello debe sustentarse sobre estudios de estrellas masivas individuales en entornos con condiciones semejantes a las del Universo en épocas pasadas, siendo la escasez de metales la característica más determinante.

La evolución de dos estrellas con igual masa inicial pero diferente metalicidad será muy distinta debido a sus vientos estelares, flujos de masa impulsados por presión de radiación sobre iones metálicos. La pérdida de masa crece con la metalicidad, afecta al interior estelar y determina el tamaño final del núcleo, el tipo de SN y el resto compacto. Es pues fundamental constreñir la evolución y vientos de las estrellas masivas pobres en metales (EMPM) para proporcionar buenas prescripciones empíricas que permitan interpretar el Universo a alto z. El estándar actual lo constituyen las estrellas masivas de la Pequeña Nube de Magallanes (SMC). Sin embargo su metalicidad, ~1/5 Solar, no es representativa del Universo primitivo, ni siquiera de la metalicidad en el máximo de formación estelar a z=2 con 1/10 Solar [1].

INTENTANDO EXTENDER LA FRONTERA DE BAJA METALICIDAD

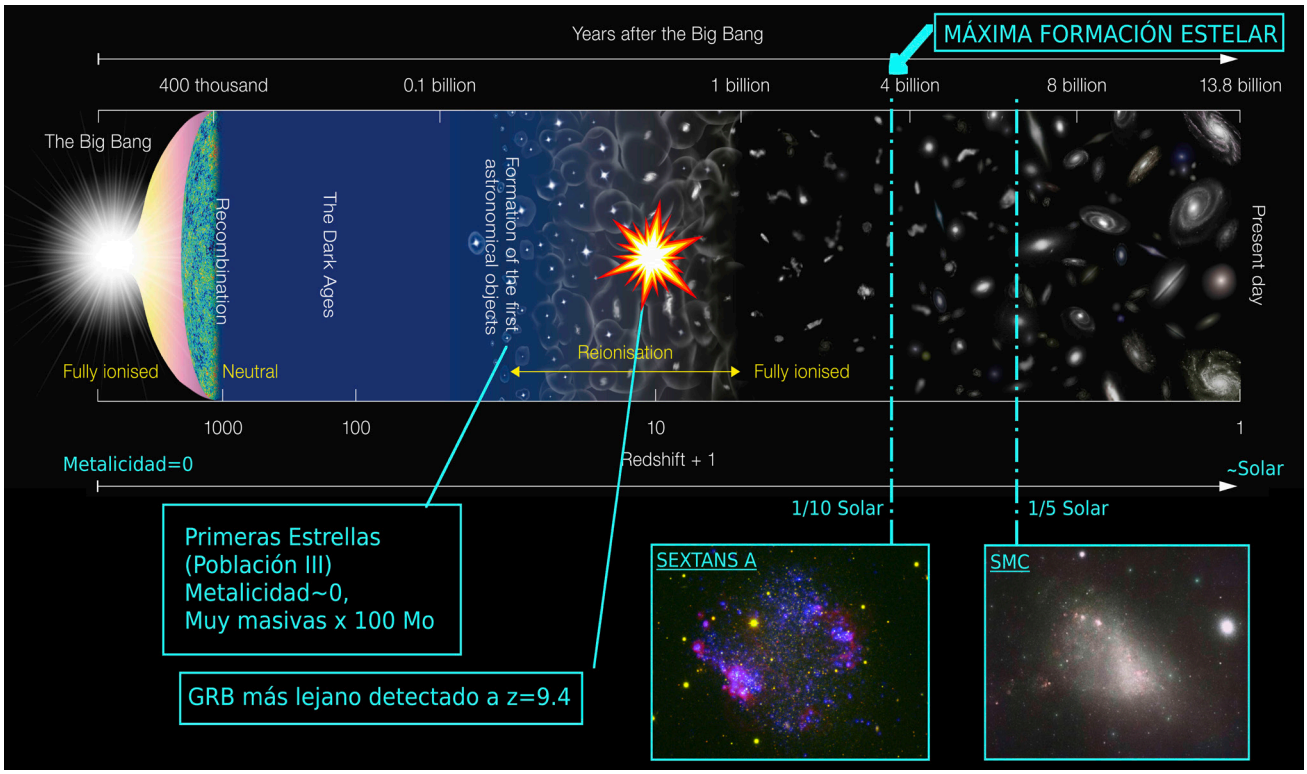
La puesta en marcha de GTC y el acceso de España al Very Large Telescope (VLT) propició que explorásemos galaxias del Grupo Local con metalicidad inferior a la de la SMC. Comenzamos con la más cercana, IC1613, a ~750 Kpc, donde estudios de regiones HII señalaban un contenido en Oxígeno de 1/7 Solar. Pronto surgieron dudas sobre la dependencia del viento con la metalicidad: junto a una conocida Wolf-Rayet (WR) de Oxígeno [2], descubrimos una estrella O con un viento demasiado fuerte para su metalicidad [3] y una variable luminosa azul (LBV), con altas pérdidas de masa [4]; otros grupos encontraron posteriormente resultados similares en estrellas O [5].

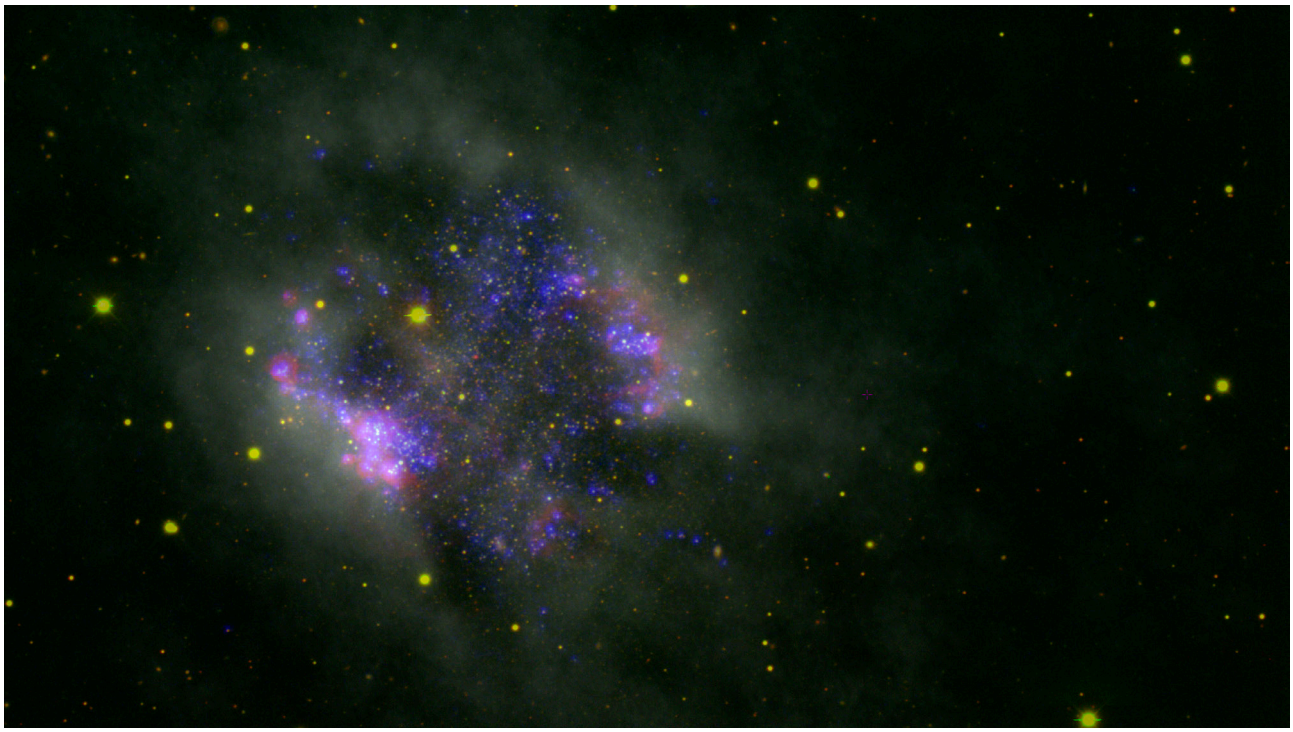
Con Hubble Space Telescope (HST) obtuvimos espectros UV, más sensibles a los vientos estelares que los espectros en el rango visible, que aportaron nueva información sobre la metalicidad de IC1613 [6]. El contenido de Hierro, principal portador del viento, resultó ser similar o superior al de la SMC[1]. No habíamos alcanzado el régimen de baja metalicidad.

AMPLIANDO LOS LÍMITES

Comenzamos así a trabajar en Sextans A, una galaxia irregular con abundancias nebulares de Oxígeno de 1/10 Solar y [α/Fe]=0. Pero con un precio: localizada en un filamento a punto de ser acretado por el Grupo Local, Sextans A se encuentra al doble de distancia que IC1613, 1.3 Mpc. Obtuvimos los primeros espectros de estrellas masivas con

El contenido en metales del Universo ha aumentado de manera continuada desde la explosión de las primeras supernovas hasta la actualidad. La metalicidad de la SMC, aproximadamente 1/5 Solar, es similar a la metalicidad promedio del Universo a z=1. Sextans A nos permite dar un salto atrás en el tiempo de unos tres mil millones de años. Su metalicidad, 1/10 Solar, se asemeja a la de z=2, una época muy interesante dado que corresponde al máximo de formación estelar del Universo. Esquema de la evolución del Universo adaptado de https://www.eso.org/public/images/eso1620a/, crédito NAOJ.





La galaxia irregular enana Sextans A. En esta composición de colores rojo codifica la imagen tomada con el filtro estrecho Hα, verde codifica la banda-V y azul la imagen UV. También se ha superpuesto la distribución de Hidrógeno atómico neutro en blanco. Sextans A contiene varias zonas de formación estelar señalizadas con grandes estructuras de HII, y las múltiples detecciones UV indican que es rica en estrellas masivas. Nuestro equipo ha confirmado muchas de esas candidatas mediante espectroscopía con GTC, demostrando la presencia de estrellas masivas también en las afueras de la galaxia.

GTC [7] y confirmamos su bajo contenido en Hierro con HST [8]. Después siguieron cuatro campañas de observación con GTC, que han resultado en unas 100 estrellas OB con el potencial de constituir el nuevo referente para el Universo a z intermedio. Es la única muestra de EMPM resueltas con metalicidad inferior a la SMC, y ya ha suscitado gran interés en la comunidad internacional. Constituye el núcleo de la sección de baja metalicidad de ULLYSES [9], un ambicioso programa para crear una librería espectral de referencia para estudiar la formación estelar a lo largo de la historia del Universo.

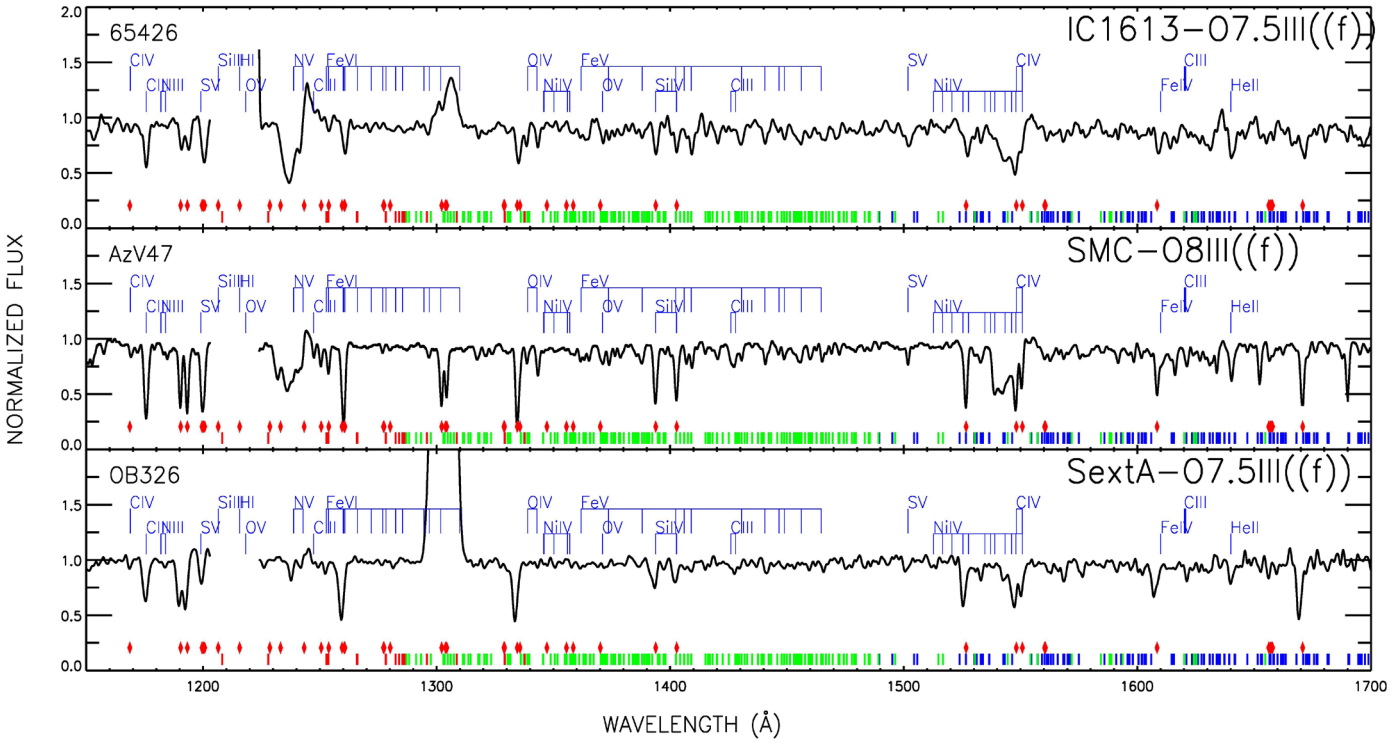
Las EMPM detectadas en Sextans A permiten un primer análisis de los mecanismos de formación estelar en una galaxia irregular enana pobre en metales, con contenido moderado de H I, y sin pruebas sólidas de la presencia de gas molecular. Nuestro censo es aún incompleto, pero las estrellas más jóvenes y masivas hasta el momento se encuentran aisladas en las afueras de la galaxia [10], donde la densidad de Hidrógeno roza el mínimo aceptado para la formación estelar. Este hallazgo estimula preguntas sobre la densidad de gas mínima para formar estrellas, o si se pueden formar a partir de H I como indican simulaciones a baja metalicidad, y abre el debate de la importancia relativa de diversos factores ambientales (metalicidad, tasa local de formación estelar, reserva de gas).

También emerge la pregunta de si existen estrellas muy masivas en Sextans A. Sin metales que ayuden a enfriar el gas, las nubes se fragmentarían en masas mayores, dando lugar a estrellas más masivas. Pendiente de reconciliar este supuesto con los modelos detallados de formación estelar, esto sugiere que las primeras estrellas del Universo (población III) pudieron tener cientos de masas solares. Las estrellas resueltas más masivas que se conocen, con

unas 150–200 $M_{\odot}$ [11], se encuentran en el corazón de la Nebulosa de la Tarántula y son moderadamente pobres en metales (2/5 Solar). Esperaríamos pues encontrar estrellas comparables en Sextans A, lo que no ha ocurrido aún, aunque a esta distancia la resolución espacial de la instrumentación actual dificulta el estudio de regiones análogas a la Tarántula. La masa estelar máxima que encontremos en Sextans A proporcionará un nuevo punto de baja metalicidad que será fundamental para reconstruir la IMF de las primeras estrellas.

LAS NUEVAS PERSPECTIVAS

En paralelo, los modelos teóricos de estrellas masivas también han avanzado. Por un lado, los modelos de evolución estelar han vuelto a dar protagonismo a la evolución química homogénea (CHE). Con una rotación suficientemente rápida los procesos de mezcla rompen el gradiente químico en el interior, y los productos de reacciones nucleares salen a la superficie. Las estrellas con CHE tendrán temperaturas mayores que las de la secuencia principal de edad cero, aumentando la producción de fotones ionizantes. Por su estructura interna, las EMPM pueden entrar en el canal CHE con velocidades de rotación moderadamente altas y, al no experimentar vientos fuertes que retiren el momento angular, las conservarán. Ello implica una mayor incidencia de la CHE en galaxias de baja metalicidad. Algunos modelos predicen para las estrellas más masivas y muy pobres en metales un régimen especial CHE de temperaturas y luminosidades altísimas (estrellas TWUIN) [12], con una copiosa producción de fotones ionizantes de HeII.



Comparación de los espectros UV que obtuvimos con el espectrógrafo COS a bordo del Hubble Space Telescope para estrellas-O en IC1613 y Sextans A, y una estrella de temperatura efectiva y luminosidad similares en la SMC. Las líneas verdes en la parte inferior de cada panel marcan una miríada de transiciones de átomos del grupo de Hierro que bajan el nivel del continuo de flujo y pueden usarse para constreñir el contenido en metales. El continuo entre 1350 y 1500 Å es más plano según bajamos en la figura, lo que define una secuencia de metalicidad decreciente. Figura tomada de [8].

La existencia de estrellas TWUIN y de estrellas muy masivas (>200 $M_{\odot}$) modificaría significativamente el presupuesto de fotones ionizantes de regiones de formación estelar a lo largo de toda la historia del Universo. Ayudaría también a explicar la emisión nebular de HeII1640 y HeII4686 detectada en IZw18 [13] y otras galaxias cercanas ($z < 0.01$) extremadamente pobres en metales [14]. Sin embargo, no todos los códigos de evolución estelar predicen el canal CHE o TWUIN, por diferencias en la implementación de los procesos de convección, rotación, mezcla, inflación, campos magnéticos y *overshooting*. Es crítico pues confirmar espectroscópicamente la existencia o no de estrellas CHE y estrellas TWUIN en galaxias de baja metalicidad y, de existir, acotar su frecuencia. Nuestro censo en Sextans A cuenta con candidatos para su seguimiento, pero aún no hemos confirmado ningún ejemplar.

Por otro lado, se están abriendo nuevas perspectivas con los modelos de evolución de sistemas binarios, una línea poco explorada en el pasado por disponer de una estadística limitada de sistemas y suponer un formidable reto computacional. En la última década se había aceptado que la mayoría de las estrellas masivas nace en sistemas binarios y que muchas de ellas interactuarán con su compañera [15], pero la relevancia de las binarias masivas ha quedado rotundamente constatada con la puesta en marcha de los observatorios de ondas gravitatorias.

La primera detección (GW150914) reveló la fusión de dos agujeros negros con unas 30 $M_{\odot}$ cada uno, excediendo la predicción máxima de todos los modelos de evolución estelar [16]. Este sistema inmediatamente sugiere un bajo contenido en metales para que los consiguientes vientos débiles permitan a las estrellas mantener gran parte de su masa hasta el final. Se torna pues, fundamental, modelar binarias de alta masa y baja metalicidad. GW150914 también impuso restricciones a la configuración orbital y a la interacción de las estrellas antes de su colapso. Estrellas que permanezcan dentro de su lóbulo de Roche y eviten la formación de una envoltura común, serán más propensas a formar agujeros negros masivos. Se invoca nuevamente el canal evolutivo CHE que soluciona la necesidad del régimen de baja metalicidad y de que la estrella se mantenga compacta [17].

La demografía de agujeros negros que LIGO está dibujando supone un increíble estímulo para los estudios de binarias masivas. Observaciones actuales indican que fases evolutivas post-secuencia principal como supergigantes rojas, LBVs y WRs podrían también alcanzarse por evolución en sistemas binarios o por fusión estelar [18]. La interacción binaria podría retirar completamente la capa más exterior de la estrella donante, exponiendo un núcleo caliente cuyo espectro podría asemejarse al de una WR [19]. Esta interacción cobra especial relevancia a baja metalicidad, al proporcionar un mecanismo adicional de pérdida de masa. Por ejemplo, podría explicar las SN-Ic con líneas anchas asociadas a GRBs largos, detectadas en galaxias pobres en metales [20].

HACIA EL FUTURO

Como espectroscopistas estamos en una posición privilegiada para realizar nuevos descubrimientos y acotar los modelos: confirmando (o no) estos nuevos tipos de objetos, encontrando las frecuencias relativas de las diferentes fases evolutivas, determinando parámetros estelares y del viento, midiendo abundancias químicas, y caracterizando sistemas binarios.

Un avance significativo requerirá espectroscopía de estrellas con magnitud V∼20-21 con resolución intermedia (R∼5000) y buena razón señal a ruido en el rango visible, junto con espectroscopía UV para estudiar sus vientos y una alta resolución espacial. Todo ello con tiempos de exposición ágiles que permitan observaciones multi-época para caracterizar sistemas binarios. Estamos avanzando en producir censos, realizar análisis individuales y localizar buenos candidatos para estudios exhaustivos, pero tales observaciones con grandes muestras son aún inviables.

El Telescopio Europeo Extremadamente Grande (ELT) pronto romperá este bloqueo. Su gran poder colector alcanzará las estrellas masivas hasta la secuencia principal en todo el Grupo Local. HARMONI resolverá las regiones de formación estelar más densas de las galaxias de baja metalicidad, lo que nos permitirá ir a la caza de las estrellas muy masivas. La caracterización exhaustiva que planeamos para el resto de población masiva será posible gracias a espectrógrafos multi-objeto tipo MOSAIC.

Con la puesta en marcha de ELT sólo quedará por caracterizar un aspecto, aunque fundamental, de las EMPM: sus vientos. Para ello se necesitará un telescopio con capacidad UV y, al menos, 4 m de diámetro. Tal telescopio podría materializarse en la próxima gran misión de NASA: dos de los cuatro conceptos de misiones propuestos para el *Decadal survey* iniciado en 2016, LUVOIR y HabEx, contemplan la puesta en órbita de un telescopio de gran diámetro y capacidades UV.

En definitiva, estamos presenciando una revolución en el campo de estrellas masivas que la instrumentación disponible a corto y medio plazo alimentará de manera exponencial. La conjunción de nuevos hallazgos y avances paralelos en los modelos de síntesis de poblaciones y evolución de galaxias van a cambiar sin duda nuestra visión e interpretación de la historia del Universo, desde el Grupo Local a la época de la re-ionización.

NOTA

[1] La razón de abundancias de elementos α (cuyo principal representante es el Oxígeno) frente al Hierro ([α/Fe]) se desvía frecuentemente de la Solar según la historia de formación estelar de una galaxia. Además, los átomos de Oxígeno pueden depositarse en granos de polvo en las regiones HII, resultando en abundancias nebulares inferiores al contenido real. Ambos efectos suelen ignorarse en estudios de galaxias lejanas, cuyos únicos diagnósticos de metalicidad son las líneas fuertes de Oxígeno, pero pueden tener un alto impacto en la interpretación de la población subyacente.

REFERENCIAS (POR ORDEN DE USO)

- [1] Madau, P., & Dickinson, M. 2014, ARA&A, 52, 415
- [2] Dodorico, S. & Rosa, M. 1982, A&A, 105, 410
- [3] Herrero, A., Garcia, M., Puls, J., et al. 2012, A&A, 543, A85
- [4] Herrero, A., Garcia, M., Uytterhoeven, K., et al. 2010, A&A, 513, A70
- [5] Tramper, F., Sana, H., de Koter, A., Kaper, L., & Ramírez-Agudelo, O. H. 2014, A&A, 572, AA36
- [6] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., Lennon, D. J., & Urbaneja, M. A. 2014, ApJ, 788, 64
- [7] Camacho, I., Garcia, M., Herrero, A., & Simón-Díaz, S. 2016, A&A, 585, A82
- [8] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., et al. 2017, The Lives and Death-Throes of Massive Stars, 329, 313
- [9] https://ullyses.stsci.edu/
- [10] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., Camacho, I., & Lorenzo, M. 2019, MNRAS, 484, 422
- [11] Crowther, P. A., Caballero-Nieves, S. M., Bostroem, K. A., et al. 2016, MNRAS, 458, 624
- [12] Szécsi, D., Langer, N., Yoon, S.-C., et al. 2015, A&A, 581, A15
- [13] Kehrig, C., Vílchez, J. M., Pérez-Montero, E., et al. 2015, ApJL, 801, L28
- [14] Senchyna, P., Stark, D. P., Charlot, S., et al. 2021, MNRAS, 503, 6112.
- [15] Sana, H., de Mink, S. E., de Koter, A., et al. 2012, Science, 337, 444
- [16] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 241102
- [17] de Mink, S. E. & Mandel, I. 2016, MNRAS, 460, 3545
- [18] Beasor, E. R., Davies, B., Smith, N., et al. 2020, MNRAS, 492, 5994
- [19] Götberg, Y., de Mink, S. E., Groh, J. H., et al. 2018, A&A, 615, A78
- [20] Modjaz, M., Bianco, F. B., Siwek, M., et al. 2020, ApJ, 892, 153

EL RESPLANDOR DE LAS TINIEBLAS

Guiados por la misma curiosidad que movió a nuestros antepasados por saber qué había más allá de la siguiente montaña, por conocer qué se escondía tras el siguiente valle, los astrónomos de todas las épocas hemos intentado vislumbrar, con la tecnología de cada momento, lo que se oculta tras la oscuridad de la noche. En el primer cuarto del siglo XXI, la tecnología y los nuevos métodos de observación nos han permitido dar un salto de gigante en nuestro empeño por sacar a la luz estructuras de brillo superficial tan débiles que eran impensables tan sólo hace unas pocas décadas. Este texto pretende describir dónde estamos y qué nos puede deparar el futuro más cercano en este campo.



Ignacio Trujillo
Instituto de Astrofísica de Canarias
trujillo@iac.es

Durante milenios, la humanidad ha visto limitada su visión de la noche a las capacidades que proporciona el ojo desnudo. Maravillosa herramienta que proporciona la naturaleza, el ojo humano es capaz de detectar contrastes en la oscuridad de la noche bastante sorprendentes. De hecho, la visión de nuestros ojos nos permite ver el centro de las galaxias más cercanas, cuyo brillo superficial está en torno a 16 mag/arcsec^2. Aun así, tuvimos que esperar a la revolución tecnológica del s. XVI para que, gracias al uso del telescopio, nuestra especie diera un salto de gigante en la exploración de los cielos. De este modo, con las continuas mejoras en los telescopios y la invención de las cámaras CCD se consiguió que a principio del siglo XXI tuviéramos observaciones rutinarias de todo el cielo (p.e. el SDSS) alcanzando brillos superficiales tan débiles como 26.5 mag/arcsec^2. Es decir, en cuatro siglos, habíamos conseguido un incremento en sensibilidad de un factor 10.000 respecto a las capacidades del ojo humano.

Antes de la época de los grandes cartografiados, trabajos pioneros, como los llevados a cabos por David Malin usando placas fotográficas, nos habían enseñado que podían alcanzarse brillos superficiales en las imágenes todavía dos magnitudes más débiles que los obtenidos por el SDSS. Motivados por estos trabajos, algunos equipos de astrónomos, como el liderado por David Martínez Delgado, consiguieron fotografiar el cielo hasta alcanzar brillos superficiales cercanos a 29 mag/arcsec^2 (cien mil veces más profundo que el ojo desnudo). La frontera de las 30 mag/arcsec^2, sin embargo, sólo se ha podido traspasar en los últimos años gracias al uso de telescopios de la clase 8-10m y tras muchas horas de integración [1]. En la figura 1, mostramos la comparativa entre imágenes de dos galaxias obtenidas con el telescopio Sloan y con el telescopio LBT exhibiendo el progreso en profundidad en los últimos 20 años.

Las imágenes muy profundas nos están revelando una visión del cielo nocturno bastante sorprendente. Casi sin excepción, cualquier lugar al que apuntemos nuestros telescopios está contaminado por la presencia de cirros de polvo de nuestra propia galaxia. Esta contaminación se da incluso a latitudes galácticas altas debido a la presencia de

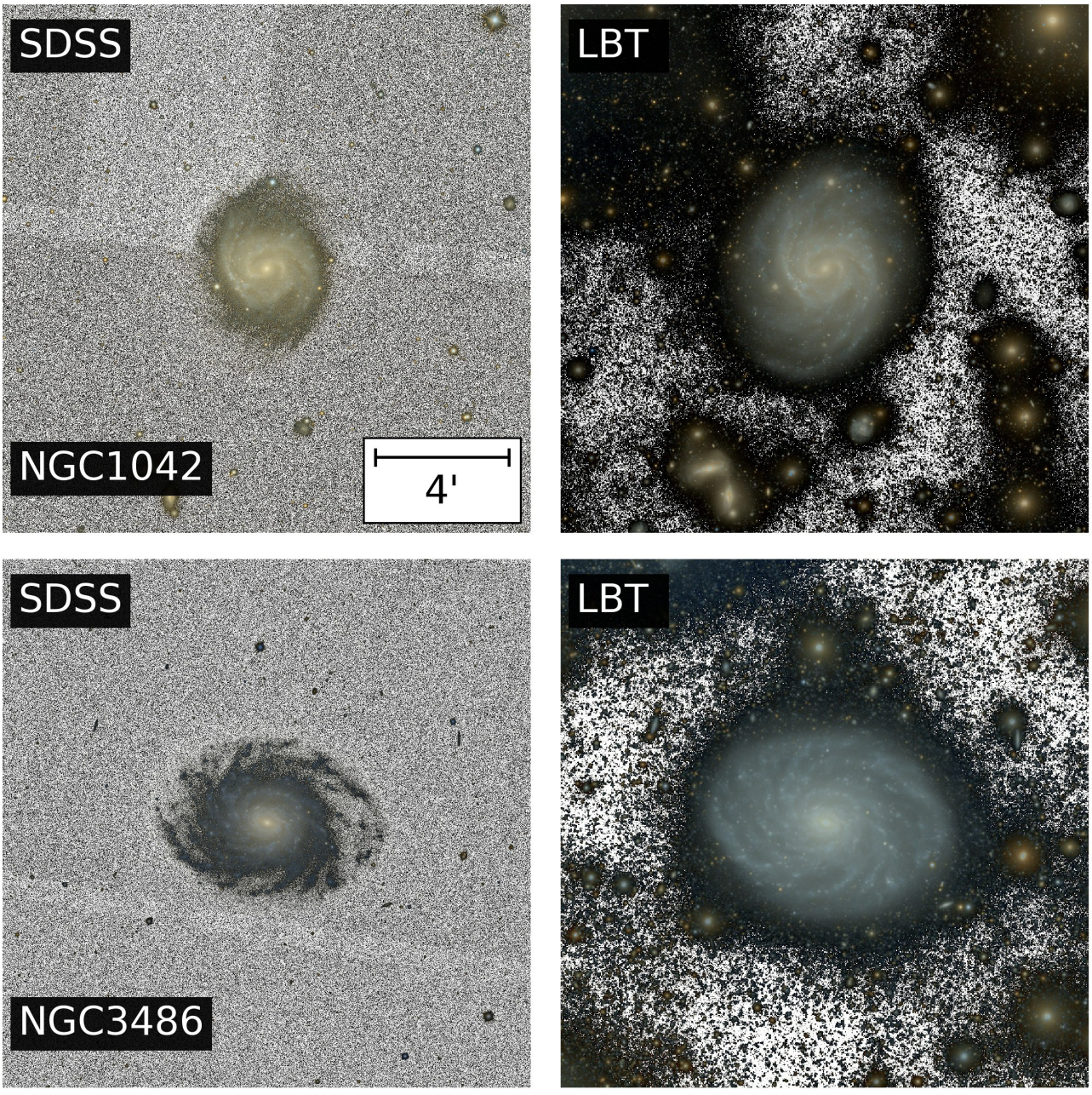


Figura 1. La imagen muestra el salto en profundidad ganado en los últimos 20 años para dos galaxias similares a M33 (NGC1042 y NGC3486). La columna de la izquierda corresponde a las imágenes del SDSS de estos objetos, mientras que la columna de la derecha muestra cómo se observan estas galaxias usando el Large Binocular Telescope (LBT). La profundidad de las imágenes de la derecha es similar a la que se espera obtener con el cartografiado LSST del telescopio Vera Rubin. Crédito Giulia Golini.



Figura 2. Grupo de cirros galácticos encontrado en el cartografiado Stripe82, tras ser procesado con las técnicas de nuestro grupo [3]. Estas sutiles estructuras de polvo del medio interestelar tienen unos colores ópticos que son diferentes a las poblaciones estelares de las galaxias [2]. Debido a esta propiedad es posible identificarlos y enmascararlos en las imágenes profundas. Crédito Javier Román.

gigantescas columnas de polvo cercanas a nuestra vecindad solar. En los últimos años nuestro grupo ha trabajado profusamente en el problema del polvo y como caracterizarlo para evitar que sus estructuras de bajo brillo sean confundidas con estructuras extragalácticas [2]. La figura 2 nos muestra una región de polvo de nuestra propia galaxia. Afortunadamente, todo parece indicar que los colores ópticos de los cirros de la Vía Láctea son diferentes de los colores de las poblaciones estelares de las galaxias lejanas. De esta forma, con una buena combinación de colores ópticos, podemos identificar el polvo de nuestra galaxia y, eliminar así, estas estructuras de bajo brillo de nuestros cartografiados.

Desde el punto de vista de la astrofísica extragaláctica, nuestras imágenes más profundas nos están permitiendo, por primera vez, estudiar en detalle varias cuestiones hasta la fecha inaccesibles. Algunos ejemplos de estas cuestiones son: ¿tienen las galaxias un borde definido?, ¿hay un límite a la masa y brillo superficial de las galaxias de más baja masa que pueden formarse? y, por último, ¿cuál es la estructura y cantidad de masa estelar en los halos alrededor de las galaxias más masivas? Todas estas preguntas están profundamente imbricadas con la formación de las galaxias y, por tanto, con el modelo cosmológico del Universo. En lo que sigue haré un breve resumen de los recientes avances en estas líneas de investigación.

EL BORDE DE LAS GALAXIAS

¿Tiene sentido hablar de borde de las galaxias? Las galaxias no parecen tener un borde claro, siempre es posible encontrar una estrella si miramos un poco más allá. Entonces, ¿a qué nos referimos cuando hablamos de encontrar el borde de las galaxias? Tanto los modelos teóricos como las observaciones sugieren que hay una densidad de gas mínima necesaria

para poder activar la formación estelar y, por tanto, la generación de nuevas estrellas. Este umbral para la formación estelar generaría poblaciones estelares con densidades del orden de 1 $M_{\odot}/pc^2$. Para explorar estas densidades es necesario obtener imágenes que nos permitan caracterizar brillos superficiales más débiles que 27 mag/arcsec^2. Con los nuevos cartografiados de gran campo (Stripe82, DECaLS, HSC SSP, etc.) podemos explorar los perfiles de miles de galaxias hasta estos brillos superficiales y, por lo tanto, investigar estos potenciales "truncamientos" en la distribución de masa de las galaxias. Esto, además, de forma natural, nos permite proponer una forma de medir el tamaño de las galaxias que esté asociada al umbral para la formación de estrellas.

Recientemente hemos investigado esta cuestión usando las imágenes profundas del cartografiado Stripe82 (http://research.iac.es/proyecto/stripe82/). Hemos encontrado que, con la anterior definición de tamaño motivada físicamente [4], la relación de escala de las galaxias entre la masa y el tamaño se vuelve espectacularmente estrecha ($\sigma \sim 0.06$ dex). Este resultado además se encuentra en las simulaciones cosmológicas de galaxias. Esto nos permite, por primera vez, utilizar el tamaño de una galaxia para inferir con precisión la cantidad de masa en el halo de materia oscura que contiene a dicho objeto. Se abre, por tanto, una nueva puerta observacional para explorar la materia oscura alrededor de las galaxias.

LAS GALAXIAS DE MÁS BAJA MASA

En astronomía extragaláctica es bien conocido el problema de los "satélites perdidos". Este problema surge de la fuerte discrepancia entre el número de satélites de baja masa que se localizan alrededor de la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda (M31) frente al mayor número de subhalos de materia oscura encontrado en las simulaciones cosmológicas. Esta discrepancia lleva varias décadas siendo fuente de grandes debates en la comunidad. Aunque se han propuesto muchas explicaciones para resolver este problema, es sólo en este momento cuando las imágenes profundas nos están permitiendo ampliar la búsqueda de satélites muy débiles alrededor de otras galaxias que no sean la nuestra y M31. Esto nos posibilita ver si el problema de los satélites perdidos es una anomalía de nuestro grupo Local o si, por el contrario, es un problema universal que requiere un estudio muy detallado.

Los cartografiados profundos actuales nos permiten explorar los satélites de baja masa ($10^6 M_{\odot}$) de las galaxias cercanas (<10 Mpc). Nuestro grupo de investigación está intentando dar un paso más allá usando el telescopio LBT. Como muestra la figura 1, estamos observando galaxias similares a nuestra Vía Láctea hasta distancias mayores (20 Mpc). Estas imágenes muy profundas con el LBT nos permiten explorar objetos de masas tan bajas como $10^5 M_{\odot}$ (e.d. la masa de un cumulo globular) alrededor de estas galaxias. Esto nos va a permitir tener una caracterización muy fina del problema de los satélites perdidos y su relación con las propiedades de las galaxias anfitrionas.

En el camino por detectar objetos cada vez menos masivos y más débiles nos hemos encontrado con un "nuevo" tipo de objetos llamados "galaxias ultra-difusas" (o UDGs en inglés). Estas galaxias han sido fuente de una enorme controversia debido a resultados donde se han indicado que las UDGs son o bien extraordinariamente masivas en términos de materia oscura o bien que carecen de ella. Debido a la excepcional atención que han provocado en la comunidad recientemente, conviene dedicar un poco de tiempo a entender mejor la naturaleza de estas galaxias.

GALAXIA ULTRA-DIFUSAS

Las UDGs son galaxias con una masa estelar de $\sim 10^8$ $M_{\odot}$, brillo superficial central más débil que 24 mag/arcsec^2 y con un radio efectivo mayor que 1.5 kpc [5]. Este radio efectivo es bastante mayor que el esperado (<1 kpc) para galaxias de masa similar. Objetos como éstos se conocen desde los años 80 del siglo XX, pero no fue hasta 2015 cuando un grupo de astrónomos de la Universidad de Yale publica un artículo donde encuentran decenas de estos objetos en el cúmulo de galaxias de Coma. Cautivados por el sugerente título de la publicación: *Cuarenta y siete galaxias extremadamente difusas del tamaño de la Vía Láctea en el cúmulo de Coma*, la comunidad se volcó al análisis de tan misteriosos objetos, grandes como nuestra galaxia, pero de muy bajo brillo superficial. ¿Estaríamos ante un nuevo tipo de galaxias, muy abundantes, pero hasta ahora invisibles para nuestros telescopios?

Es interesante notar que la clave por la que el anterior articulo llamó tanto la atención no es tanto por el brillo superficial de estos objetos, si no por la afirmación de que las UDGs tienen el *tamaño* de la

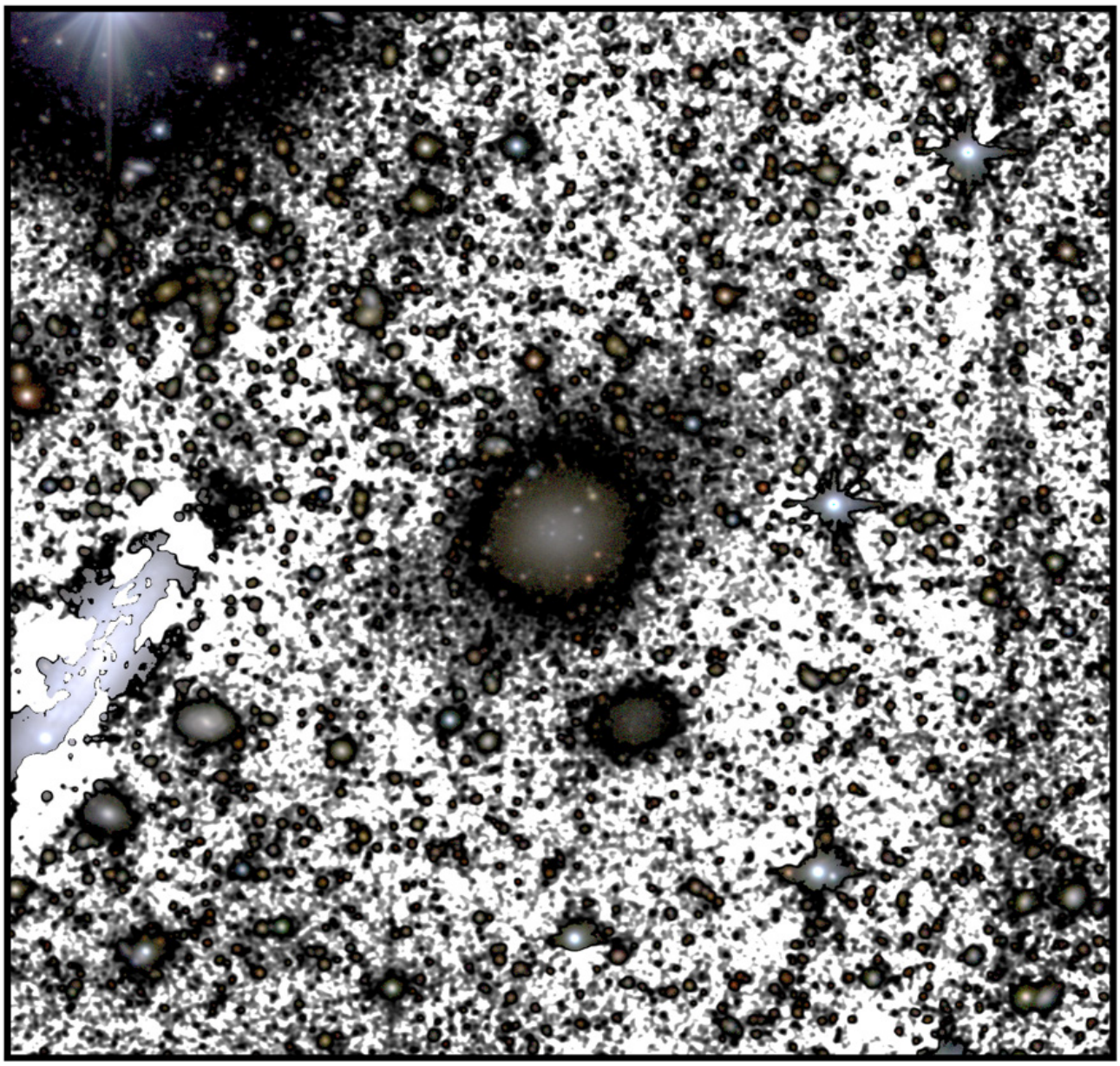


Figura 3. Imagen muy profunda de la galaxia UDG DF4 obtenida con el telescopio IAC80 en el observatorio del Teide [11]. La imagen es el resultado de un total de unas 60h de integración con este telescopio. La forma en S alrededor de la galaxia se corresponde a las colas de marea de las estrellas que están siendo arrancadas por la galaxia vecina NGC1035. Esta galaxia, a la izquierda de DF4, se ha sustraído de las imágenes para poder facilitar la observación de las colas de marea que han arrancado la materia oscura de este objeto y que en la actualidad están arrancando las estrellas de la periferia de la galaxia enana. Crédito Mireia Montes.

Vía Láctea. Hay ejemplos de satélites de nuestra galaxia y M31 con brillo superficial más bajo que los que presentan las UDGs, sin embargo, ninguno de estos satélites tiene un radio efectivo tan grande. Por lo tanto, es muy importante incidir en el concepto de tamaño de las galaxias para entender bien la naturaleza de las UDGs. Cuando vamos a los detalles, lo que vemos es que el tamaño de las UDGs se mide utilizando el radio efectivo. El radio efectivo (radio que contiene la mitad de la luz) es una forma de medir el tamaño de las galaxias que se ha popularizado en las últimas dos décadas. Esto se debe a su multitudinario uso para describir las galaxias en grandes cartografiados como el SDSS. Sin embargo, es precisamente ese uso intensivo el que ha hecho de alguna forma olvidar qué es lo que realmente describe el radio efectivo de un objeto. En realidad, este *tamaño* no nos habla de cómo es la extensión de una galaxia, si no de como de concentrada está la luz en ella. Por ejemplo, es bien conocido que nuestra galaxia tiene una extensión radial de al menos 25 kpc (estando nuestro Sol a 8.1 kpc del centro). Sin embargo, su radio efectivo (debido a la presencia del bulbo) es tan pequeño como unos 4 kpc. Por lo tanto, si quisiéramos caracterizar el *tamaño* de la Vía Láctea usando su radio efectivo, llegaríamos a la conclusión de que es una galaxia muy pequeña y, por lo tanto, comparable con estas galaxias difusas. De hecho, en las UDGs (debido a la falta de concentración de luz en el centro) sucede precisamente lo contrario. El radio efectivo de una UDG es tan "grande" porque su luz no se concentra hacia el centro. Cuando usamos otras medidas del tamaño para caracterizar las galaxias (como la propuesta anteriormente basada en el umbral de la formación estelar u otras como la tradicional localización de la isofota de 25 mag/arcsec^2) entonces las UDGs tienen el mismo tamaño que las galaxias enanas [6].

Las UDGs, sin embargo, también han sido noticia en los medios por su excepcional contenido en materia oscura. Por ejemplo, la galaxia DF44 fue portada de las revistas de divulgación por tener un 99.99% de su masa en forma de materia oscura. Un reanálisis cuidadoso de los datos ha demostrado, sin embargo, que ese valor estaba tremendamente exagerado y que su contenido en materia oscura es compatible con las galaxias enanas de su misma masa estelar [7]. Otras dos galaxias UDGs muy famosas, esta vez por su aparente ausencia de materia oscura, son DF2 y DF4 [8, 9]. En el caso de DF2 el misterio se resolvió porque se había sobreestimado significativamente la distancia [10]. Mientras que en el caso de DF4, tuvimos que esperar a tener imágenes muy profundas para resolver el enigma. En un trabajo liderado por Mireia Montes [11] se combinaron imágenes tomadas con el GTC, el HST y más de 60h con el IAC80 para explorar en detalle este objeto. En la figura 3 podemos ver la imagen tomada con el IAC80 donde se aprecian de forma clara las colas de mareas en forma de S que rodean a esta galaxia. Esta imagen es uno de los primeros ejemplos visuales de cómo se arranca la materia oscura en las galaxias. Las fuerzas de marea han eliminado primero la materia oscura y ahora se está procediendo al arranque de las estrellas en las partes más externas. Con el tiempo, este objeto terminará siendo completamente despedazo y absorbido por la galaxia cercana NGC1035.

El resumen por tanto de lo que hemos aprendido con respecto a las galaxias UDGs es que son galaxias enanas normales con una formación estelar muy disminuida. La baja tasa de formación estelar explica su bajo brillo superficial. Este bajo brillo ha impedido que las hubiéramos detectado en los catálogos previos de galaxias enanas. Los estudios de galaxias enanas antes del estudio de las UDGs estarían, por tanto, sesgados hacia la población de objetos más activa y brillante.

LOS HALOS ESTELARES DE LAS GALAXIAS MÁS MASIVAS

Para terminar, podemos hablar brevemente de los avances respecto a la detección de los halos estelares que, según el modelo cosmológico, deberían rodear las galaxias masivas. Esta predicción del modelo cosmológico aparece como resultado de la formación jerárquica de las galaxias. Por lo tanto, si estos halos no se detectaran alrededor de galaxias como la nuestra o con masas mayores, el modelo de formación de galaxias tendría que ser revisado en profundidad. Las simulaciones cosmológicas indican que estos halos deberían observarse casi de forma ubicua si las imágenes permiten el análisis de estructuras de brillo superficial más débiles que 30 mag/arcsec^2.

La estructura de estos halos estelares es una mezcla de una componente suave con forma esferoidal, sobre la que suelen encontrarse estructuras filamentarias en forma de corrientes de estrellas con un brillo

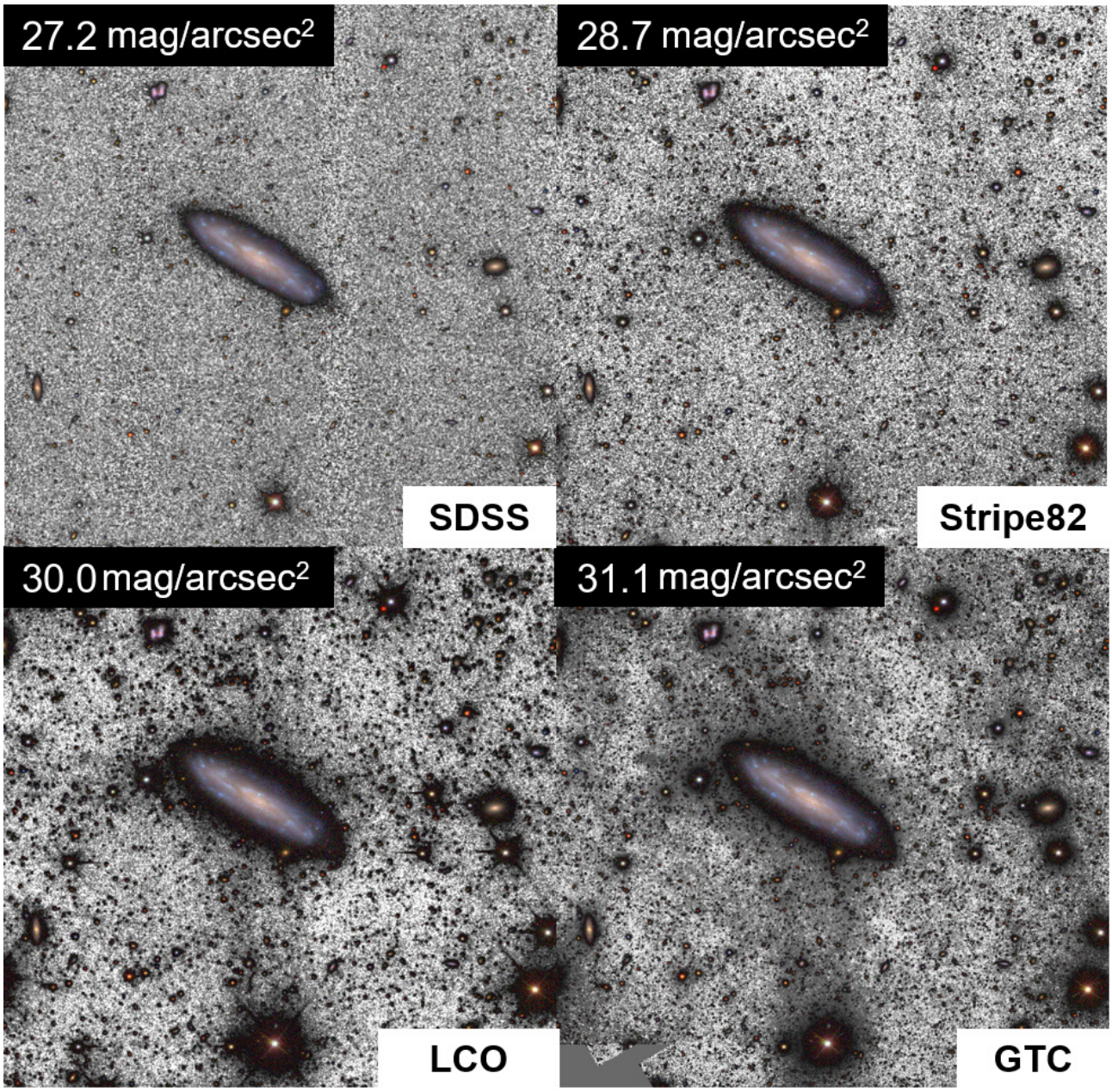


Figura 4. Efecto de la profundidad en la detección de los halos estelares que rodean las galaxias. Las imágenes se corresponden a la observación de la galaxia NGC493 (similar a M33) usando diferentes telescopios. La diferente profundidad de las imágenes se indica en cada panel. La estructura del halo estelar sólo empieza a ser evidente cuando las imágenes alcanzan brillos superficiales cercanos a 30 mag/arcsec^2 o más débiles. Este es el caso del telescopio de las Cumbres tras unas 50h, o el telescopio GTC tras 5h de integración. Crédito Raúl Infante-Sainz.

superficial mayor. En algunas ocasiones estos filamentos son bastante brillantes y su brillo superficial relativamente alto (~25-27 mag/arcsec^2), lo cual nos permite detectarlos en imágenes tomadas con telescopios modestos. Un ejemplo icónico es la corriente que circunda la galaxia NGC5907 [12]. Sin embargo, este tipo de ejemplos son la minoría, y la mayoría de las galaxias no revelan ningún tipo de estructura en los cartografiados profundos actuales. Por este motivo, es necesario dedicar tiempo en los telescopios más grandes para poder explorar la predicción del modelo cosmológico de forma sistemática. Un ejemplo de lo que podemos hacer hoy en día se presenta en la figura 4, donde se ha observado una galaxia como M33 usando varios telescopios y tiempos de exposición. Como podemos ver, es sólo cuando llegamos a niveles de brillo superficial cercanos a 30 mag/arcsec^2 cuando la estructura filamentaria alrededor de la galaxia se vuelve visible.

CONCLUSIÓN

Estamos viviendo una revolución en la astronomía de bajo brillo superficial. En las últimas dos décadas hemos mejorado cerca de un factor 100 nuestra capacidad de detectar estructuras de bajo brillo superficial. Esto representa una sensibilidad un millón de veces mayor que la proporcionada por el ojo desnudo. Los nuevos cartografiados de todo el cielo que se están planeando tanto desde tierra (LSST) como desde el espacio (Euclid, Roman) nos permitirán acceder a grandes regiones del cielo a profundidades (>30 mag/arcsec^2) que hasta ahora sólo están al alcance de nuestros grandes telescopios y en regiones del cielo muy limitadas. Se abre por lo tanto una época que promete descubrimientos en casi todos los ámbitos de la astronomía: desde el sistema solar (con el estudio de la luz Zodiacal), el medio interestelar (cirros galácticos), galaxias de muy bajo brillo superficial (galaxias "oscuras") hasta la luz intracumular de los grandes cúmulos de galaxias. Sin duda, un tiempo fascinante para la investigación de las fuentes de luz más tenue que nos regala la Naturaleza.

REFERENCIAS

- [1] Trujillo, I & Fliri, J., 2016, ApJ, 823, 123
- [2] Román, J, Trujillo, I. & Montes, M., 2020, A&A, 644, 42
- [3] Fliri, J. & Trujillo, I., 2016, MNRAS, 456, 1359
- [4] Trujillo, I, Chamba, N. & Knapen, J. H., 2020, MNRAS, 493, 87
- [5] van Dokkum, P. G., et al., 2015, ApJ, 798, L45
- [6] Chamba, N., Trujillo, I., & Knapen, J. H., 2020, A&A, 633, L3
- [7] Saifollahi, T., et al., 2021, MNRAS, 502, 5921
- [8] van Dokkum, P. G., et al., 2018, Nature, 555, 629
- [9] van Dokkum, P. G., et al., 2019, ApJ, 874, L5
- [10] Trujillo I., et al., 2019, MNRAS, 486, 1192
- [11] Montes, M., et al., 2020, ApJ, 904, 114
- [12] Martinez-Delgado, D., 2008, ApJ, 689, 184

LA ESTRUCTURA ESPACIAL DE LA FORMACIÓN ESTELAR

Según el paradigma actual, la formación estelar tiende a ocurrir en los filamentos densos de grandes nubes moleculares y particularmente en sus intersecciones. El colapso de las nubes para formar estrellas y cúmulos es extremadamente complejo ya que sucede tanto a escalas espaciales grandes como pequeñas y está inseparablemente ligado a procesos turbulentos y de fragmentación.






Marta González
marta.gonzalez-garcia@univ-grenoble-alpes.fr
Isabelle Joncour
Isabelle.Joncour@univ-grenoble-alpes.fr
Estelle Moraux
Estelle.Moraux@univ-grenoble-alpes.fr
Institut de Planétologie
et d'Astrophysique de Grenoble

Ana Ulla
Departamento de Física Aplicada,
Universidade de Vigo
ulla@uvigo.es

Además, la propia formación estelar es a la vez dependiente del medio e influye en el mismo a través de procesos de retroalimentación, particularmente cuando se forman estrellas masivas.

La naturaleza jerárquica de las nubes moleculares, que actualmente se describen mediante modelos multifractales, encuentra un paralelismo con las estructuras estelares, que desde sistemas binarios o múltiples hasta los super-complejos estelares, pasando por cúmulos y asociaciones, se encuentran anidados unos en otros. Estudiar los vínculos específicos entre las estructuras del gas y las estelares, requiere no solo una descripción robusta y objetiva, sino también evaluar la evolución dinámica de las estrellas. La población de objetos proto y pre estelares, dada su juventud, minimiza los efectos de esta evolución dinámica, y es la idónea para buscar posibles estructuras prístinas heredadas de la nube progenitora.

Recientemente los grandes cartografiados celestes proporcionan a la comunidad científica volúmenes de datos homogéneos en cantidad y calidad, permitiendo un estudio estadístico y sistemático de la distribución espacial de las estrellas. Esto requiere a su vez de técnicas robustas y homogéneas para describir y analizar los datos de la manera más objetiva posible, de modo que se explote todo su potencial.

A PEQUEÑA ESCALA: NESTS, LOS "NIDOS" DONDE SE FORMAN LAS ESTRELLAS

En este contexto hemos desarrollado S2D2 (*Significant, Small DBSCAN Detection* – González *et al*., 2021), una herramienta para la búsqueda de subestructuras significativas a pequeña escala en una distribución estelar. Esto nos ha permitido construir un catálogo homogéneo y consistente de subestructuras significativas a pequeña escala de objetos estelares jóvenes en varias regiones de formación estelar en la vecindad.

Joncour *et al*. (2017, 2018) demostraron que estas pequeñas estructuras significativas (a las que llamaron NESTs, – *Nested Elementary STructure*) podían trazar las localizaciones preferentes de formación estelar en regiones prístinas. En efecto, los NESTs de Taurus contienen la mayoría de los objetos menos evolucionados (protoestrellas de clase 0) de toda la población de objetos estelares jóvenes en la región.

Además se superponen a los filamentos densos de gas molecular presentes, señalando efectivamente los "nidos" donde nacen las estrellas.

S2D2 constituye la implementación final, robusta y calibrada, del método de búsqueda de NESTs. Se trata de una herramienta de clustering que escoge los parámetros para el algoritmo DBSCAN (Ester *et al*., 1996) utilizando estadística de vecinos cercanos para buscar subestructuras a pequeña escala, garantizando su nivel de significación. S2D2 está a disposición de la comunidad científica en varias implementaciones (https://starformmapper.org) y ha sido calibrado en cúmulos sintéticos con distribuciones espaciales subestructuradas, homogéneas y concentradas, produciendo resultados consistentes y robustos (González *et al*. 2021).

A GRAN ESCALA: MODOS DE FORMACIÓN ESTELAR

Durante la calibración de S2D2 se observó que los NESTs obtenidos en cúmulos de diferentes características presentaban ellos mismos diferentes distribuciones espaciales. Dicho de otro modo, los NESTs trazan la estructura significativa a gran escala presente en la muestra. Específicamente, se demostró que para distribuciones concentradas (que podrían representar por ejemplo un cúmulo abierto dinámicamente evolucionado) S2D2 típicamente recupera un NEST más grande y bien poblado, rodeado por un halo de ellos más pequeños.

Para estudiar la distribución espacial de los NESTs utilizamos el árbol de mínima expansión (MST) de los NESTs, utilizando como distancia la mínima entre los objetos de cada NEST. Al podar las ramas del MST mayores que un umbral asociado al tamaño de la región (específicamente un 25% del radio equivalente de la envolvente convexa), el MST se separa en árboles menores constituidos por agrupamientos de NESTs. Estos grupos definen las estructuras a gran escala presentes en la región, a las que nos referiremos como modos de formación estelar. En la Figura 1

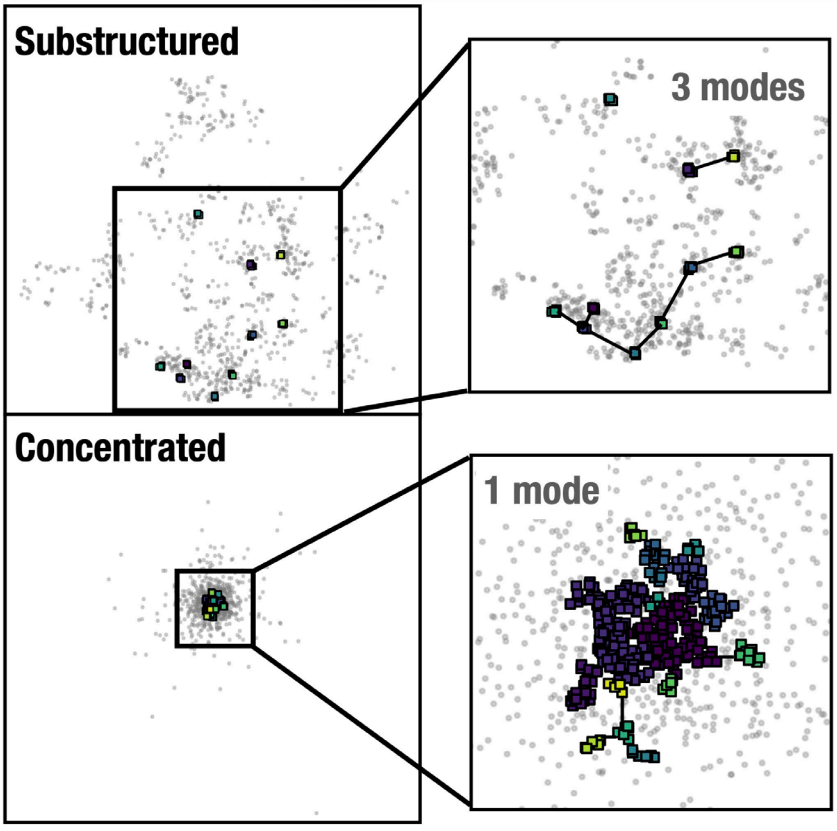


Figura 1. Ejemplo de los NESTs y modos recuperados en una región sintetica subestructurada (parte superior) y en una concentrada (parte inferior). Los puntos grises representan las estrellas en las regiones, los cuadrados coloreados las estrellas que pertenecen a NESTs, y las líneas en los recuadros (aumentados) a la derecha, muestran las ramas del árbol de NESTs menores que el umbral.

se pueden ver los diferentes NESTs y modos obtenidos en una región sintética subestructurada, multimodal, y en una concentrada, unimodal.

CATALOGANDO LOS NESTS EN REGIONES VECINAS

Estamos ya en condiciones de comparar de forma justa la estructura espacial de regiones de formación estelar, construyendo un catálogo de los NESTs y modos de sus objetos estelares jóvenes. Para ello necesitamos contar con una muestra homogénea y consistente, como la proporcionada por los catálogos de los proyectos MYStIX (Feigelson *et al*., 2013) y SFiNCs (Getman *et al*., 2017). Estos programas fueron diseñados específicamente para obtener la población de objetos estelares jóvenes de regiones formación estelar a distancias menores de 4 kpc de nosotros. Los miembros de las regiones se obtienen a partir de una combinación de fuentes con exceso IR, candidatos de rayos X, y una muestra de estrellas OB conocidas.

Encontramos 255 NESTs organizados en 68 modos en 37 de las 39 regiones que comprenden nuestra muestra inicial. En las dos regiones restantes no obtuvimos estructura con significación suficiente como para descartar que fuesen fluctuaciones aleatorias de una distribución homogénea de estrellas. Más de la mitad de las regiones con estructura significativa, 20, son unimodales, mientras las restantes 17 muestran subestructura compleja a gran escala con al menos dos modos de formación estelar significativa.

MODOS DE FORMACIÓN ESTELAR, GAS MOLECULAR Y ESTRELLAS MASIVAS

Ahora mostramos el potencial de los NESTs como herramienta de análisis, comparando la estructura significativa de nuestro catálogo con la distribución espacial de gas molecular y estrellas masivas.

En primer lugar, consideraremos que un modo de formación estelar está embebido en la nube natal si su envolvente convexa se superpone con el contorno del 99.5% de más intensidad de emisión de *Herschel* a 500 μm (Pilbratt, 2010). Por ello, este análisis se limita a las 33 regiones presentes en el archivo de *Herschel*.

La influencia potencial de estrellas masivas es evaluada para cada modo comprobando si los programas MYStIX y SFiNCs habían catalogado estrellas OB en el área. Clasificamos los modos de formación estelar en cuatro tipos según estos criterios, como se muestra en la Tabla 1.

Tipo	Embebido	Estrellas masivas	Número de modos
T1	Sí	No	21
T2	Sí	Sí	11
T3	No	No	10
T4	No	Sí	15
Total			**57**

Tabla 1. Tipos de modos de formación estelar, clasificados como se describe en el texto.

Los modos de tipo T1 (embebido, sin estrellas OB) parecen trazar áreas de formación estelar activa de estrellas de baja masa y son el tipo mayoritario en regiones unimodales. En modos T4 (no embebidos, con estrellas OB) esperamos que las estrellas masivas hayan contribuido a la expulsión del gas, potencialmente obstaculizando la formación estelar a nivel local. A pesar de la presencia de estrellas masivas en los modos T2 (embebidos, con estrellas OB) hay todavía gas muy denso en el entorno, y en una fracción significativa de modos T3 (no embebidos, sin estrellas OB) hay una superposición visual con un filamento o estructura de gas, a pesar de que no se hayan alcanzado los límites de intensidad requeridos. La interacción específica entre protoestrellas, gas y estrellas masivas en modos T2 y T3 no está de todo clara y necesita ser individualmente evaluada.

La Figura 2 muestra ejemplos específicos de cada uno de los modos en la Tabla 1 en cuatro regiones. Las dos regiones de la izquierda, DR21 y Orión, son unimodales, y embebidas, mientras que en las regiones de la derecha, NGC2264 y M16 hay subestructura rica y compleja, con varios modos de tipos diferentes dentro de la misma región.

El modo más poblado de NGC2264, en el sur, se corresponde con las áreas de gas denso en la zona, mientras que en el norte las subestructuras son pequeñas, contienen estrellas masivas, y no se solapan con gas molecular. El retrato que obtenemos de M16 es diferente, el de una región más evolucionada en la que gran parte de la formación estelar ya se ha producido. Su modo más poblado está asociado a

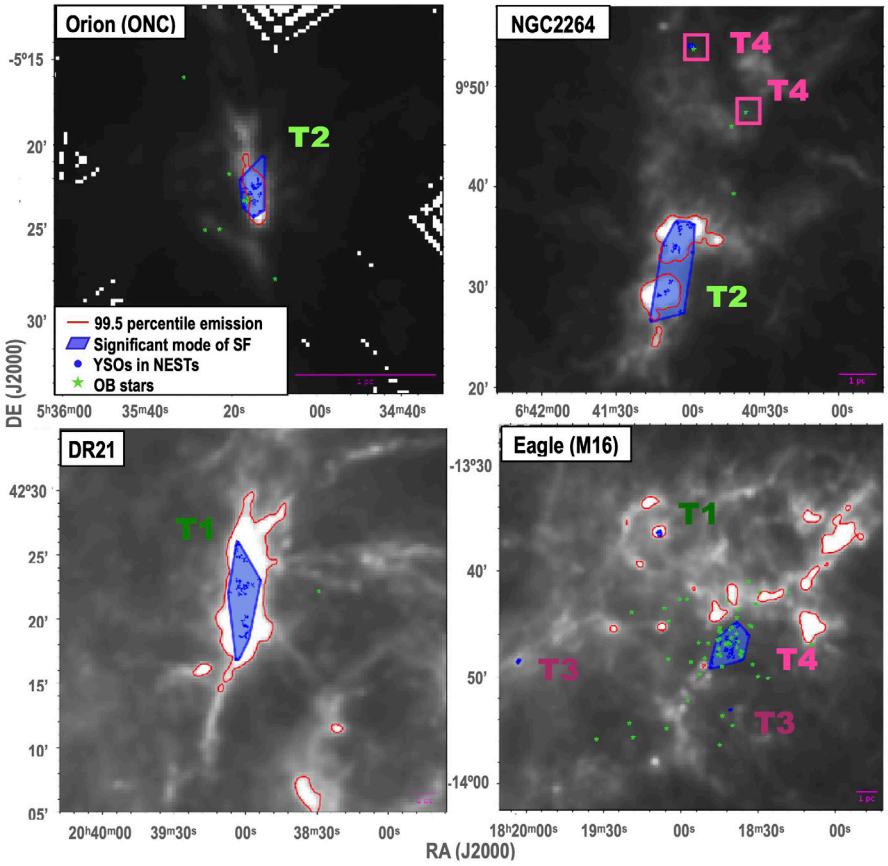


Figura 2. Modos significativos de formación estelar obtenidos en 4 regiones, superpuestos sobre la emisión de Herschel a 500 micras en escala de gris. La envolvente convexa de cada modo está representada como un polígono azul, y las estrellas en los NESTs de su interior como puntos azules. Las estrellas OB en la región están representadas en verde y en color rojo el contorno del percentil 99.5 en emisión. Cada modo está etiquetado según su tipo, como se explica en el texto.

numerosas estrellas masivas que probablemente han dispersado el gas de la zona. Los modos más pequeños de los alrededores se superponen con remanentes de gas molecular, que alcanzan mayores densidades hacia el norte.

La visión de estas regiones, obtenida a partir del análisis de la estructura significativa que hemos detectado, es consistente con el conocimiento obtenido por otros autores utilizando diferentes medios. Esto confirma el potencial de los NESTs como herramienta de análisis robusta y objetiva que nos permite estudiar la relación de los modos significativos de formación estelar con otras variables en su entorno. Hemos clasificado los modos de SF según su relación con el gas molecular y la distribución espacial de estrellas masivas, encontrando categorías que ayudan a entender la complejidad y variedad que la formación estelar puede mostrar incluso dentro de una única región. Una comprensión más profunda de las complejidades de la formación estelar requiere también estudiar la relación de la estructura con otras variables, como el estado evolutivo de los objetos estelares jóvenes (González *et al*. en prep.) o su cinemática.

REFERENCIAS

- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. 1996, In Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, KDD'96, pp. 226–231 (AAAI Press).
- Feigelson, E. D., Townsley, L. K., Broos, P. S., Busk, H. A., Getman, K. V., et al. 2013, ApJS, 209, 26.
- Getman, K. V., Broos, P. S., Kuhn, M. A., Feigelson, E. D., Richert, A. J. W., et al. 2017, ApJS, 229, 28.
- González, M., Joncour, I., Buckner, A. S. M., Khorrami, Z., Moraux, E., et al. 2021, A&A, 647, A14.
- Joncour, I., Duchêne, G., & Moraux, E. 2017, A&A, 599, A14.
- Joncour, I., Duchêne, G., Moraux, E., & Motte, F. 2018, A&A, 620, A27.
- Pilbratt, G. 2010, In JENAM 2010, Joint European and National Astronomy Meeting, p. 149.

DRAGO: UN PEQUEÑO INSTRUMENTO,

El pasado 24 de enero tuvo lugar la puesta en órbita de DRAGO (*Demonstrator for Remote Analysis of Ground Observations*), el primer instrumento desarrollado por IACTEC-Espacio. Semanas después llegaban sus primeras imágenes infrarrojas de la Tierra, con una calidad a la altura de las expectativas más optimistas. DRAGO es el resultado de cuatro años de esfuerzo del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) pero, ¿cómo se ha llegado hasta aquí y por qué este logro abre una ventana de oportunidad importante para el futuro de la comunidad astronómica nacional?



Álex Oscoz
Investigador Principal de IACTEC-Espacio
Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
aoscoz@iac.es

IAC, IACTEC Y EL NUEVO ESPACIO

El IAC lleva 60 años realizando astronomía de primer nivel y desarrollando instrumentación de calidad, y esta experiencia acumulada se ha convertido en la semilla de IACTEC. La iniciativa IACTEC, el espacio de colaboración tecnológico y empresarial del IAC, nace en 2016 para impulsar la transferencia de tecnología y conocimiento, así como generar tejido empresarial en torno a oportunidades relacionadas con la astrofísica y el espacio. IACTEC cuenta con apoyo financiero y de infraestructuras del Cabildo Insular de Tenerife, el Gobierno de Canarias, el Ministerio de Ciencia e Innovación y la UE, y ocupa un edificio de más de 4000 m^2, dotado de oficinas, salas de reuniones y salas blancas. En 5 años de existencia, la iniciativa IACTEC ha captado inversiones por valor de más de 20 millones de euros.

La aparición en la última década de los estándares dimensionales para pequeños satélites y la proliferación de ofertas de lanzamiento que esta estandarización ha facilitado han dado lugar a un sector, el "Nuevo Espacio", que ofrece oportunidades inauditas y muy interesantes para la ciencia.

Estos antecedentes conducen al nacimiento de IACTEC-Espacio, con la misión de crear instrumentación de altas prestaciones para pequeños satélites -tanto con fines astrofísicos como para la observación de la Tierra- y de avanzar en la tecnología de tratamiento de imágenes satelitales.

DRAGO

Bajo esta filosofía surge DRAGO, el primer proyecto de IACTEC-Espacio, con una doble finalidad. Primero, demostrar la posibilidad de observar en infrarrojo cercano desde un nano-satélite, abriendo un nicho por explotar en la tecnología disponible para pequeños satélites. Segundo, capacitar al equipo de IACTEC-Espacio para la realización de proyectos espaciales complejos, a través del desarrollo de principio a fin de un instrumento espacial siguiendo estándares espaciales internacionales.

DRAGO es un demostrador tecnológico orientado a la observación de la Tierra. La diferencia con otros instrumentos está en que observa en el rango de infrarrojos de onda corta, SWIR por sus siglas en inglés, prácticamente inexplorado en los pequeños



Equipo de IACTEC-Espacio.

satélites. Esta banda, entre 1 y 2,5 micras, es especialmente interesante ya que es posible tener buen contraste y resolución (gracias a su proximidad al rango visible) mientras proporciona información no disponible en el visible. Algunos ejemplos de aplicaciones son la determinación de índices de vegetación, detección de puntos calientes en incendios o de grandes vertidos de petróleo y la discriminación de iluminación antropogénica ineficiente.

DRAGO, gracias al conjunto de lentes reforzado, el filtro dual y el sensor InGaAs no refrigerado integrados en la cámara, es capaz de capturar imágenes en dos bandas (1,1 y 1,6 micras) con buena calidad (MTF > 40% y SNR > 100 cuando la reflectancia es 0,3) a alta velocidad (hasta 170 fps). La observación en dos bandas permite que la información no solo esté en las imágenes en sí, sino también en la comparación entre ambas. Además, lleva incorporado un bafle externo para eliminar los efectos de la luz difusa al observar la Tierra.

El instrumento incluye capacidades de procesamiento como la compresión (con y sin pérdida) y el cifrado de imágenes. También tiene capacidad de almacenamiento para guardar las imágenes obtenidas en varios ciclos orbitales (más de 250 ciclos en modo normal). Finalmente, incluye algoritmos de súper-resolución que pueden ejecutarse a bordo, mejorando significativamente la resolución de las imágenes sin incrementar la cantidad de información a descargar con respecto al caso en que dichos algoritmos se ejecutaran en Tierra.

Está preparado para operar en un nano-satélite orbitando en LEO (*Low Earth Orbit*) gracias a funciones que incluyen protecciones electrónicas y de radiación pasivas y activas, además de un sistema de control térmico pasivo. Todas se han implementado para incrementar la seguridad del instrumento y asegurar su funcionamiento en el entorno orbital.

DRAGO sigue el concepto *small SWaP* (tamaño, peso y potencia reducidos), y su diseño permite la operación fiable bajo las condiciones ambientales extremas esperadas en órbita (radiación, vacío y amplio rango de operación térmica).

Rango orbital (km)	500-700
Tecnología del sensor	InGaAs
Bandas de observación (μm)	1,1 & 1,6
Masa (g)	~1000
Consumo de potencia (W)	< 5,5
Envolvente (mm^3)	96x96x100

EN TIEMPO RECORD

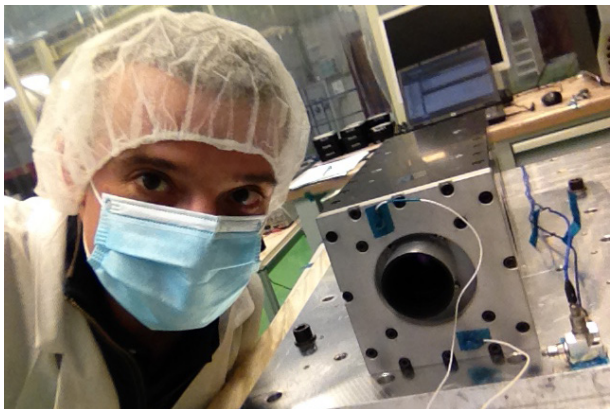
Tras tres años de desarrollo y pruebas en los laboratorios del IAC, en 2020 el instrumento estaba listo para la siguiente fase, demostrar que podría ser lanzado al espacio. Para ello, el modelo de vuelo debía superar toda una serie de pruebas: vibraciones, ciclados térmicos y ensayos ópticos realizadas a lo largo de varias semanas en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) en Madrid y ensayos de choque en el Centro de Tecnologías Aeronáuticas (CTA) en Álava.

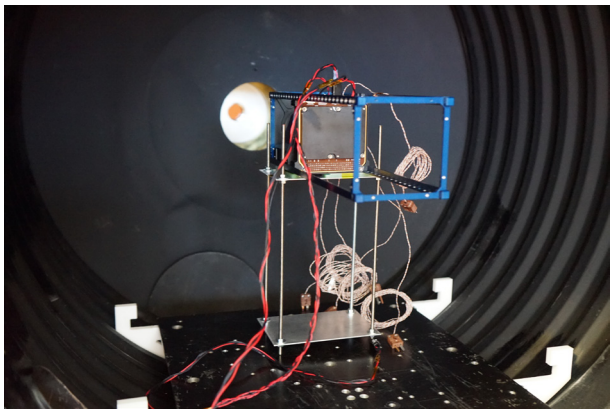
Una vez superadas con éxito todas las pruebas, llegó el momento de integrarlo en un satélite. Para ello, se firmó un acuerdo con la empresa de transporte espacial italiana D-Orbit, para incorporar DRAGO al portador de satélites ION. DRAGO se integró en un tiempo récord en una estructura CubeSat estandarizada que se conecta con la interfaz eléctrica y de datos de ION, lo que permite a los operadores terrestres probarlo como si fuera uno de los subsistemas del satélite.

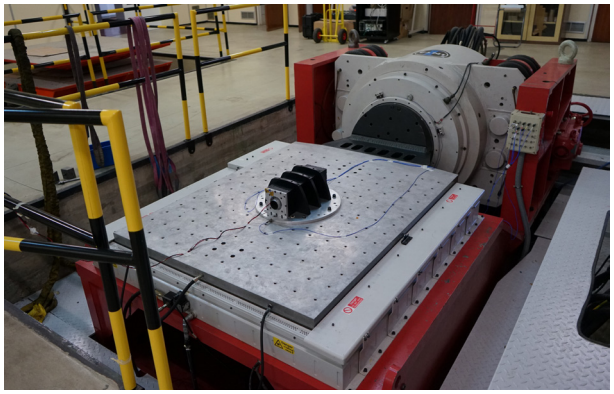
Tras varios aplazamientos debido al mal tiempo, DRAGO fue lanzada al espacio con éxito el 24 de enero de 2021 desde Cabo Cañaveral a bordo de un cohete Falcon 9 de la empresa SpaceX.

Una vez en órbita, el primer contacto con DRAGO ocurrió el 8 de febrero. En ese momento se comprobó su supervivencia al lanzamiento y el buen funcionamiento de las comunicaciones con los equipos en tierra. Posteriormente, tras probar uno a uno los distintos subsistemas de la cámara, llegó el momento más esperado: la primera luz.



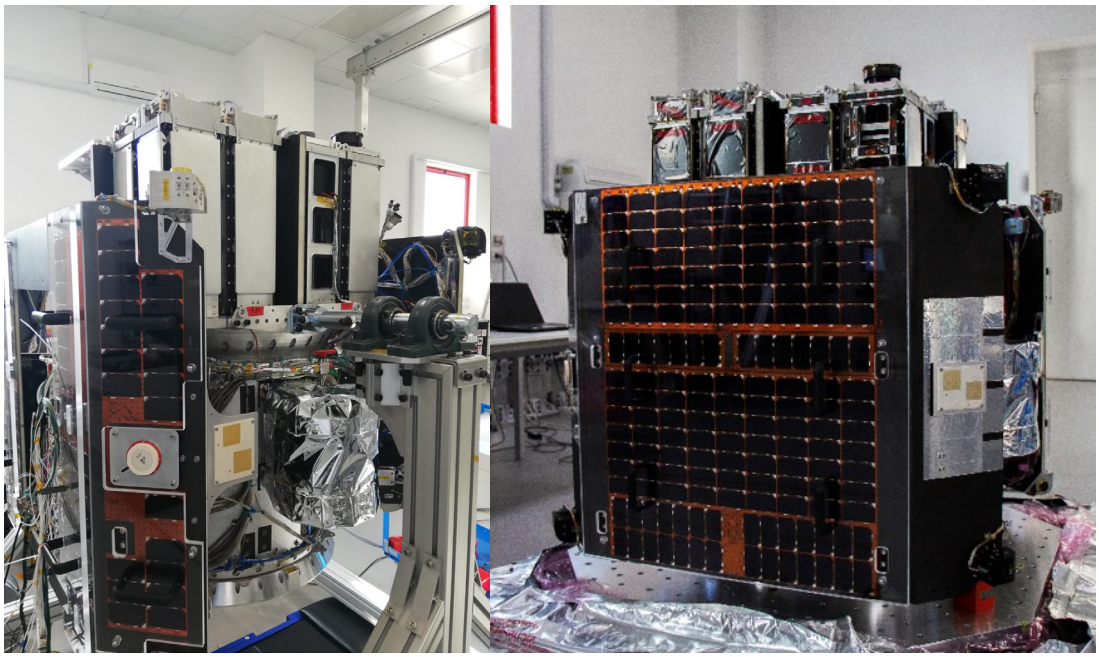






DRAGO antes del test de choque en CTA (arriba izquierda), el test de termovacío en INTA (arriba derecha) y los ensayos de vibraciones en INTA (abajo izquierda).

La plataforma ION donde se integró DRAGO.

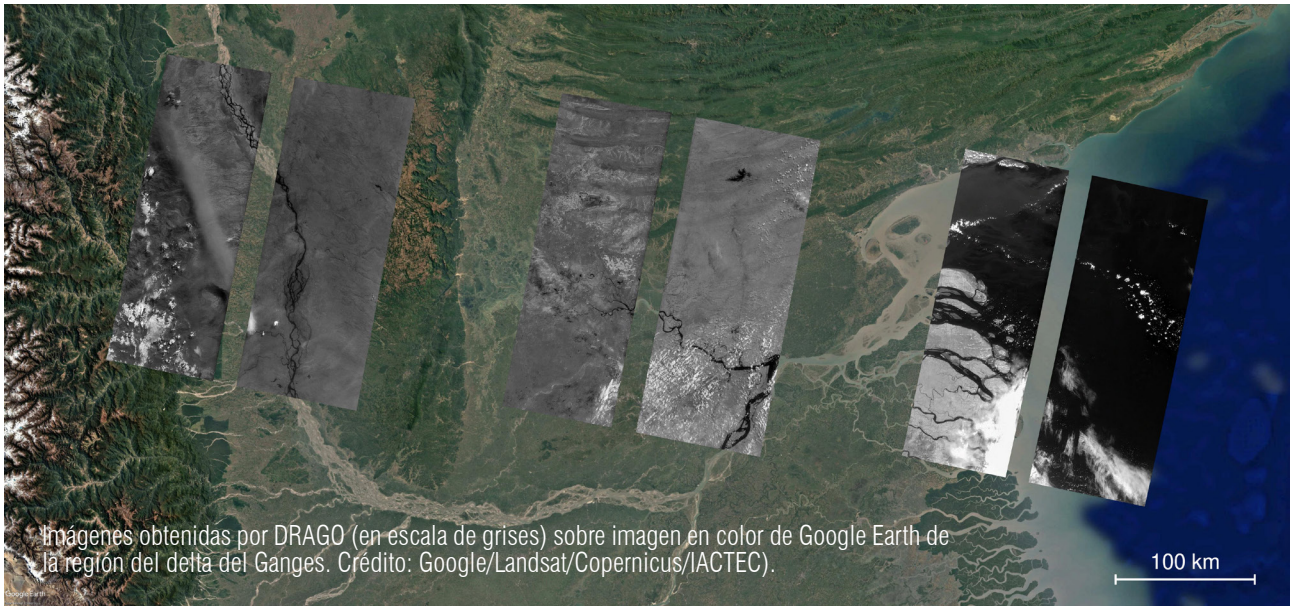




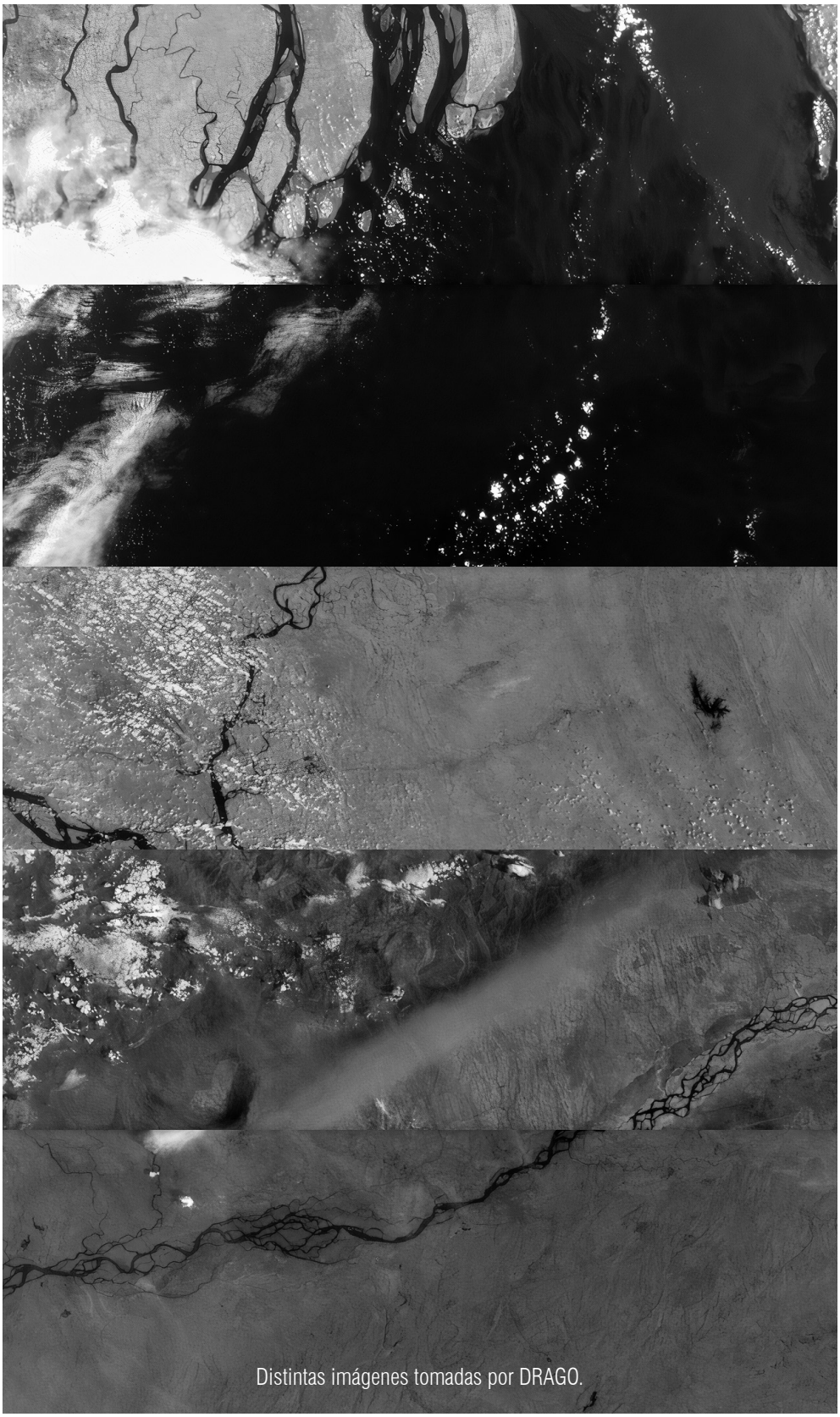
ION integrado en el cohete Falcon 9 (izquierda) y lanzamiento (derecha)).

El 15 de abril, a las 03:45 UTC, DRAGO obtuvo sus primeras imágenes desde el espacio. Se trata de una serie de instantáneas tomadas en las dos bandas de observación (1,1 y 1,6 micras).

Estas primeras imágenes corresponden a las regiones de Bangladés y la India, incluyendo la desembocadura del río Meghna en el delta del Ganges, zona que alberga el mayor bosque de manglares del mundo. Este lugar, patrimonio de la humanidad, se encuentra amenazado por una creciente actividad industrial. Los efectos de esta deforestación se aprecian en las imágenes tomadas por DRAGO: las zonas más oscuras de las islas indican regiones cubiertas de bosque, mientras que las más brillantes están asociadas a una pérdida de vegetación. La capacidad de DRAGO para calcular índices con sus dos bandas SWIR permitirá incrementar todavía más este nivel de contraste y detalle en futuras imágenes.



Imágenes obtenidas por DRAGO (en escala de grises) sobre imagen en color de Google Earth de la región del delta del Ganges. Crédito: Google/Landsat/Copernicus/IACTEC).



Distintas imágenes tomadas por DRAGO.

Las siguientes baterías de pruebas se realizarán durante los siguientes días. Finalmente, en las próximas semanas está programado que, como última prueba del plan de puesta en marcha, DRAGO obtenga sus primeras imágenes de Canarias.

LA ESTELA DE DRAGO

La observación en banda SWIR estaba limitada, hasta ahora, a satélites de grandes dimensiones. Sin embargo, diseños como DRAGO permiten complementar las capacidades de esos satélites con la incorporación de tecnologías de última generación, tiempos de desarrollo mucho más cortos y elaboración de aplicaciones a medida. Todo ello de manera mucho más sostenible económicamente, al poder hacerse con una cámara de poco más de 1 kg de peso, consumo inferior al de una bombilla LED y costes, al menos, unas 100 veces menos que lo que costaría una metodología "clásica". Esto convierte a DRAGO en un producto único en el mercado. En estos momentos, no existe una cámara SWIR de estas características que pueda embarcarse en un pequeño satélite.

Las mejoras en DRAGO no se harán esperar, y el equipo está trabajando en una versión mejorada del mismo, con una resolución varias veces superior, que se integrará en un CubeSat de 6 unidades. Se trata de la misión ALISIO (*Advanced Land-Imager Satellite for Infrared Observations*), que se espera poner en órbita en 2023.

Pero el viaje no termina ahí. El cumplimiento de los objetivos técnicos por parte de DRAGO ha sido clave para que el IAC se embarque en un nuevo proyecto de micro-satélite que incorporará a bordo un pequeño telescopio espacial multipropósito, esta vez ya con fines astronómicos, y que se desarrollará en los próximos 5 años: IACSAT-1.

IACSAT-1 persigue dotar al IAC de un telescopio de pequeño diámetro para la observación astronómica desde el espacio. El IAC ha asumido el reto estratégico de crear un estándar de observatorio espacial (IACSAT) que sirva para la observación de fenómenos astronómicos que no se pueden caracterizar apropiadamente desde la Tierra y como demostración tecnológica para futuros programas de monitorización de la superficie terrestre. En concreto, se pretende desarrollar un micro-satélite en órbita LEO que posea adecuada calidad de apuntado y de seguimiento de fuentes con el fin de realizar investigaciones astronómicas.

El telescopio tendrá una configuración Cassegrain, con un espejo primario entre 20 y 30 cm. Los instrumentos incluidos podrán ser variados, desde imagen a espectrógrafos, y se estudia la posibilidad de polarimetría e incluso coronografía. Tendrán prioridad aquellos proyectos astronómicos irrealizables desde Tierra, porque necesitan observar en longitudes de onda imposibles por la absorción de la atmósfera, como la banda ultravioleta (UV), o que requieran observaciones continuadas durante días. IACSAT-1 será un complemento perfecto para los Observatorios de Canarias y, por tanto, una gran oportunidad para la comunidad astronómica nacional.

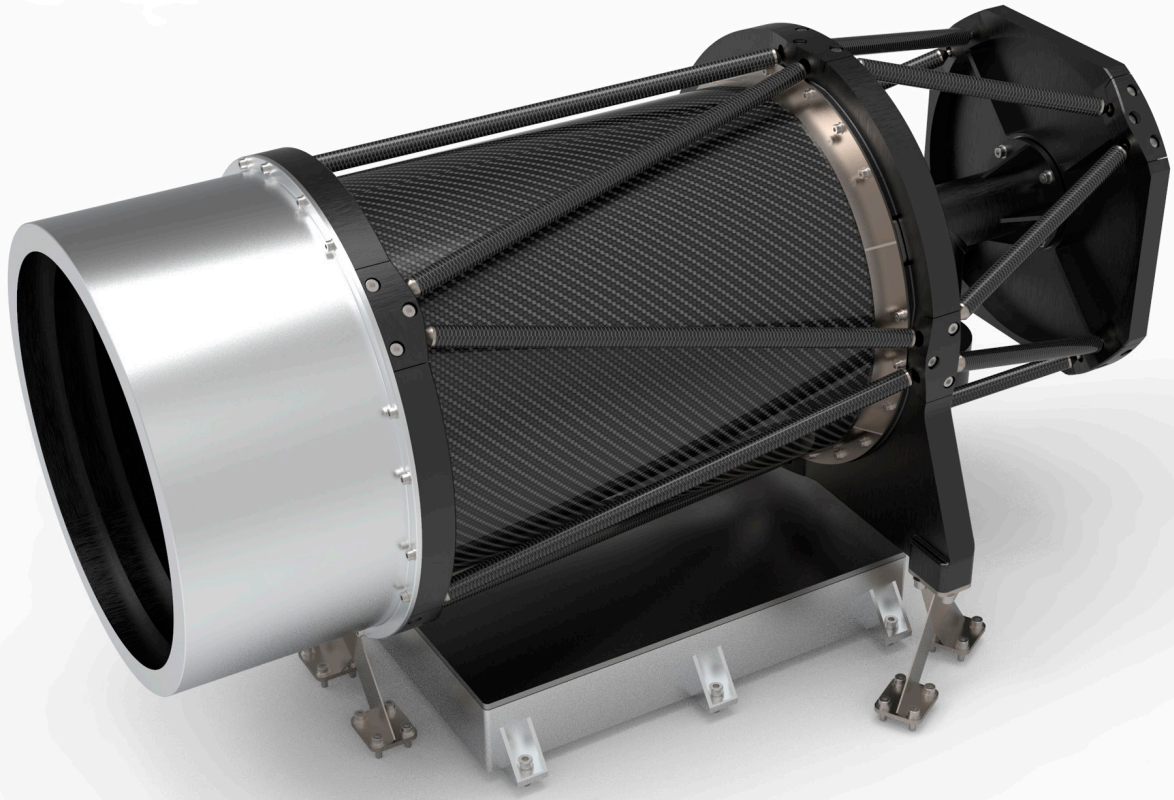
LA OPORTUNIDAD

IACSAT-1 conlleva una serie de retos tecnológicos importantes, tanto en el telescopio y la instrumentación como en la plataforma satelital. Con respecto a la instrumentación, se pretende realizar observaciones desde UV a Infrarrojo cercano, mientras que la plataforma deberá contar con apuntado de calidad y estabilidad suficiente para no afectar a las observaciones, muy superior a lo aportado por las plataformas actuales. Por todo ello, se está desarrollando en IACTEC un Laboratorio de Tecnología Espacial y, además, el proyecto necesita el apoyo y la participación tanto de la comunidad científica más ambiciosa a nivel nacional como de la industria española especializada en el diseño y fabricación de instrumentos científicos.

El proyecto contribuirá a crear un ecosistema de instituciones y de empresas de alta tecnología que puedan abordar, en una posición de liderazgo, nuevos proyectos en el futuro.

Es el momento de sumarse a esta apuesta.

Equipo IACTEC-Espacio: José Alonso, Ignacio Bustamante, Carlos Colodro, José Javier Díaz, Pablo González de Chaves, Roberto López, Alba Eva Peláez, Álvaro Pérez, Pablo Redondo, José Carlos Sanluis, Ignacio Sidrach-Cardona, Samuel Sordo, Alfonso Ynigo.



Diseño preliminar del telescopio para IACSAT-1.

SI SUEÑAS, SUEÑA A LO GRANDE

"Recupérate felizmente. Estamos contigo, vuelve fuerte, Siento que se rompiera porque era tan bonito". Con estas palabras, un grupo de estudiantes de primaria del área de Orlando, Florida, nos animaba a seguir adelante el pasado invierno. Cientos de cartas que su profesora nos hizo llegar. Y mientras las ojeaba, no podía dejar de preguntarme, ¿Qué tiene el observatorio Arecibo que lo hace tan especial?



Noemí Pinilla Alonso
Observatorio de Arecibo & Instituto del Espacio de Florida, Universidad de Florida Central
Npinilla@ucf.edu

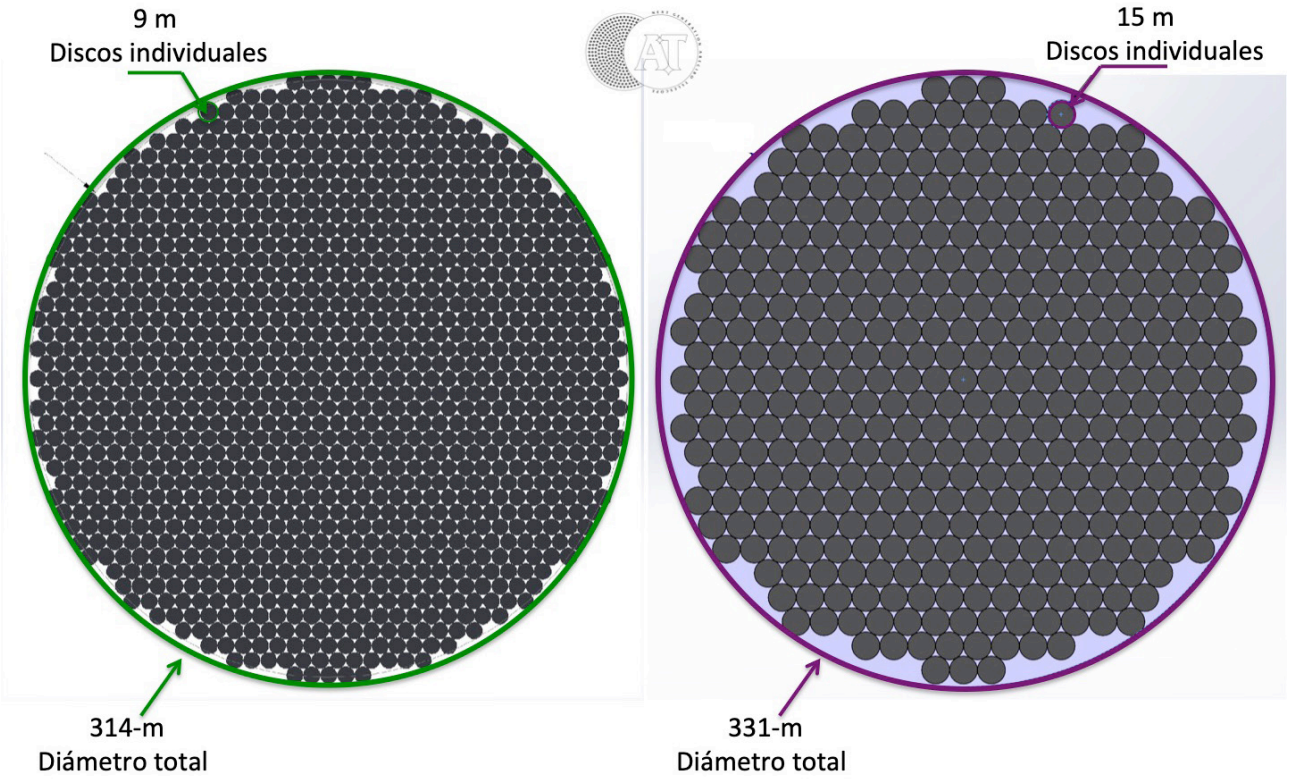
TRABAJANDO EN UN OBSERVATORIO

Lo observatorios son espacios de trabajo que, por el bien de su desempeño, se encuentran en parajes naturales alejados de las ciudades por lo cual, desplazarse a estos observatorios ya es una experiencia en sí misma, que nos aleja de los quehaceres diarios y nos sumerge, por unos días, en un estado de cierta quietud que favorece la reflexión y el ensimismamiento. En ellos conviven dos mundos en actividad, por un lado los usuarios, científicos, visitantes quizás más introvertidos, siempre mirando al cielo y pensando en objetos exóticos fuera de este mundo. Por otro lado los técnicos e ingenieros, personal fijo en cada observatorio, con los pies en la tierra, aquellos que nos dicen lo que se puede y no se puede hacer. Estos dos mundos también se entremezclan en Arecibo para garantizar el funcionamiento óptimo del telescopio y otras instalaciones. En los últimos años, 100 personas del grupo de operaciones, técnicos, operadores, ingenieros, informáticos, personal de administración, centro de visitantes, cafetería, se ocupan de que todo esté a punto para que una veintena de científicos del observatorio puedan realizar sus observaciones, algunas dedicadas a sus propios proyectos de investigación, la mayoría como soporte a investigadores de cualquier lugar del planeta que ganaron ese tiempo gracias al programa de "cielos abiertos", del que el observatorio de Arecibo (AO) y la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF, de sus siglas en inglés) se sienten tan orgullosos. Y ambos grupos han colaborado durante casi sesenta años alcanzando un nivel de integración tal que ha permitido al observatorio de Arecibo liderar descubrimientos únicos, siempre de primer nivel.

LA IMPORTANCIA DEL OBSERVATORIO DE ARECIBO, EL RADIOTELESCOPIO MÁS GRANDE DEL MUNDO

Durante 56 años, el telescopio William E. Gordon, de 305 m, fue el telescopio más grande del mundo. Pero no sólo eso, contaba con el sistema de radar más poderoso y fue el radio telescopio más sensitivo. También estaba acompañado de un buen número de instalaciones y laboratorios que complementaban y expandían su gran capacidad[1].

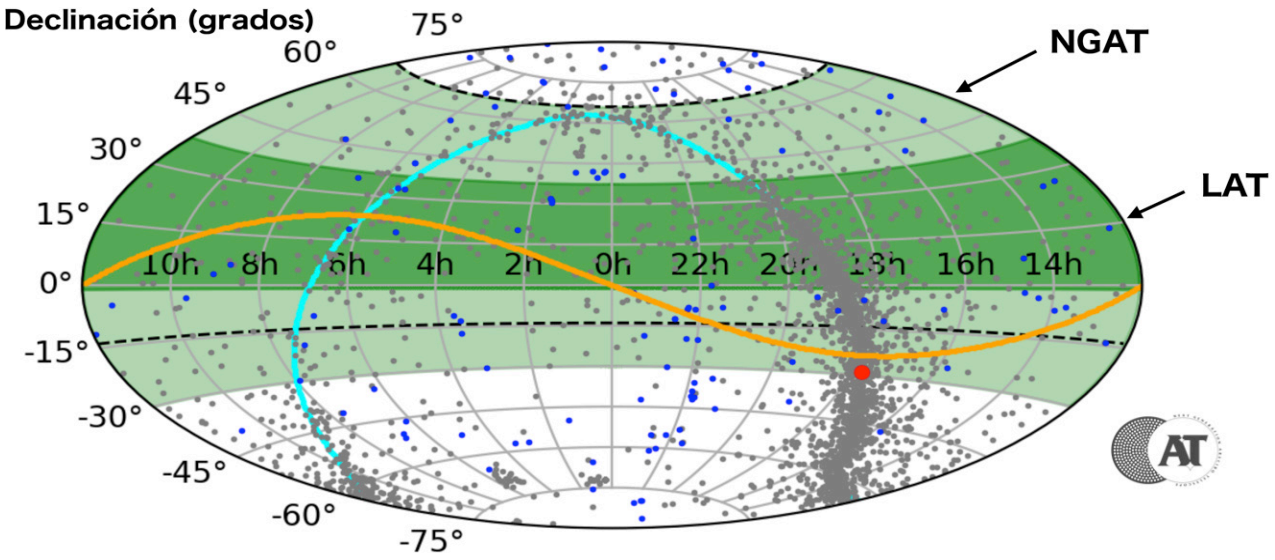
Por todo ello, el observatorio de Arecibo fue el origen de un gran número de descubrimientos científicos de valor único para la astrofísica, las ciencias planetarias



Dos posibilidades diferentes para el diseño de un disco de discos de más de 300m de diámetro. A la izquierda se muestra una matriz de 1112 platos de 9 m de diámetro dentro de un círculo de ∼ 314 m de diámetro. El número de platos podría reducirse aumentando el diámetro del plato, como se muestra en la figura de la derecha, donde hay una matriz de 400 platos de 15 m de diámetro dentro de un círculo de 331 m de diámetro. En ambos casos, la matriz proporcionará un área de recolección equivalente a un plato de 300 m de diámetro. Es evidente que la eficiencia de la disposición no es óptima cuando se aumenta el diámetro del plato por lo cual, en la fase de estudios de este concepto se evaluará la posibilidad de platos hexagonales para investigar si se puede lograr un área de recolección más alta con un número menor de platos (figura adaptada de Roshi et al., 2021).

y las ciencias de la atmósfera. El telescopio de Arecibo cuenta en su historia con varios de esos momentos "eureka" con los que todos los científicos soñamos.

¡Cómo no referirnos en este punto al descubrimiento, en 1974, del sistema binario compuesto por una estrella de neutrones y un púlsar por el que Joseph H. Taylor Jr. y Russell A. Hulse merecieron el reconocimiento en forma de Premio Nobel de Física en el año 1993! Pero hubo otros a lo largo de la historia. En el año 1965, Gordon H. Pettengill y Rolf B. Dyc mostraron, con observaciones realizadas desde Arecibo, que el período de rotación de Mercurio no era de 88 días, como se suponía hasta entonces, sino de 59 días. En el año 1992, Alexander W. Wolszczan y Dale Frail publicaron el descubrimiento del primer exoplaneta que, en este caso, orbitaba no en torno a una estrella sino a un púlsar, lo cual posibilitó su observación en ondas de radio. Más recientemente, en el año 2017, Lee G. Spitler y colaboradores publicaron la primera detección de una ráfaga rápida de radio que repetía su explosiva emisión, probando que, cualquiera que sea la fuente de estas energéticas ráfagas de milisegundos, no es destruída en el evento que le da origen sino que permanece activa. El año 2019, fue el año del record en detección de



Comparación de la cobertura del cielo de NGAT y de LAT (figura adaptada de Roshi et al., 2021). Observar como el centro de la galaxia, marcado con un punto rojo, que no entraba en el campo de observación de LAT, podrá ser cubierto con NGAT.

asteroides por el equipo de radar de Arecibo liderado por Anne K. Virkki, 126 asteroides cercanos a la tierra. El camino que empezó en la década de los 60 continúaba activo hasta agosto del 2020 en Arecibo, sin perder su capacidad de sorprender a la humanidad y nadie ya podrá saber cuántos más de esos "eureka" nos tenía reservados.

Pero esto es sólo una pequeña muestra, cuando se examinan de cerca los números de Arecibo, es cuando se revela su dimensión única como centro de investigación puntero y como inspiración de nuevas generaciones de científicos. Unas 250 instituciones internacionales han obtenido tiempo de observación a lo largo de los 60 años de historia de AO, con unos 300 usuarios al año. Casi 400 trabajos de máster y tesis doctorales se han basado en datos adquiridos en este observatorio, más de 3500 trabajos publicados en revistas con árbitro. Un millar de estudiantes no graduados han recibido entrenamiento a través de programas como el REU de NSF o como el programa STAR o AOSA, dedicado a estudiantes y profesores de secundaria y bachillerato.

ALGO MÁS QUE CIENCIA, PARTE DE LA CULTURA LOCAL

Siempre que miro hacia atrás y pienso en aquello que contribuyó a hacer único el centro de investigación de Arecibo, hay algo en lo que reparo que quizás no sea tan visible desde fuera. Este observatorio triunfó en aquello en lo que otros, aún a su pesar, naufragan. Con el paso del tiempo "la antena" de Arecibo pasó a ser un componente principal de la cultura puertorriqueña. Cada día, un amplio grupo de personas, a menudo mucho más visible que los trabajadores de la instalación, se adentraba en el recinto. Los visitantes se acercaban en decenas cada día, algunas veces centenas, y subían la pequeña y empinada carretera que comunica la entrada al recinto con el balcón desde el que se podía ver el plato y la plataforma. Familias, grupos de escolares, turistas. ¡Un millón y medio de ellos desde el nacimiento de este gran telescopio! Un millón y medio de personas que contenían su respiración cuando desde ese balcón podían ver a sus pies el plato de 305 metros, formado por 40000 paneles de aluminio preparados para recoger el eco de los pulsares más lejanos, las ráfagas

rápidas de radio, esos asteroides “peligrosos” que se acercan a la tierra, o porqué no, señales de otras civilizaciones. Y al mismo tiempo, aún conteniendo la respiración, elevaban la vista hacia la plataforma de 900 toneladas suspendida, por 18 cables, de tres torres de hasta 111 metros de altura, a 150 metros del suelo. ¡Otra vez los números de Arecibo! Son necesarios para hacernos una idea del gran éxito que este telescopio fue como diseño de ingeniería y también de la complejidad de su operación y mantenimiento.

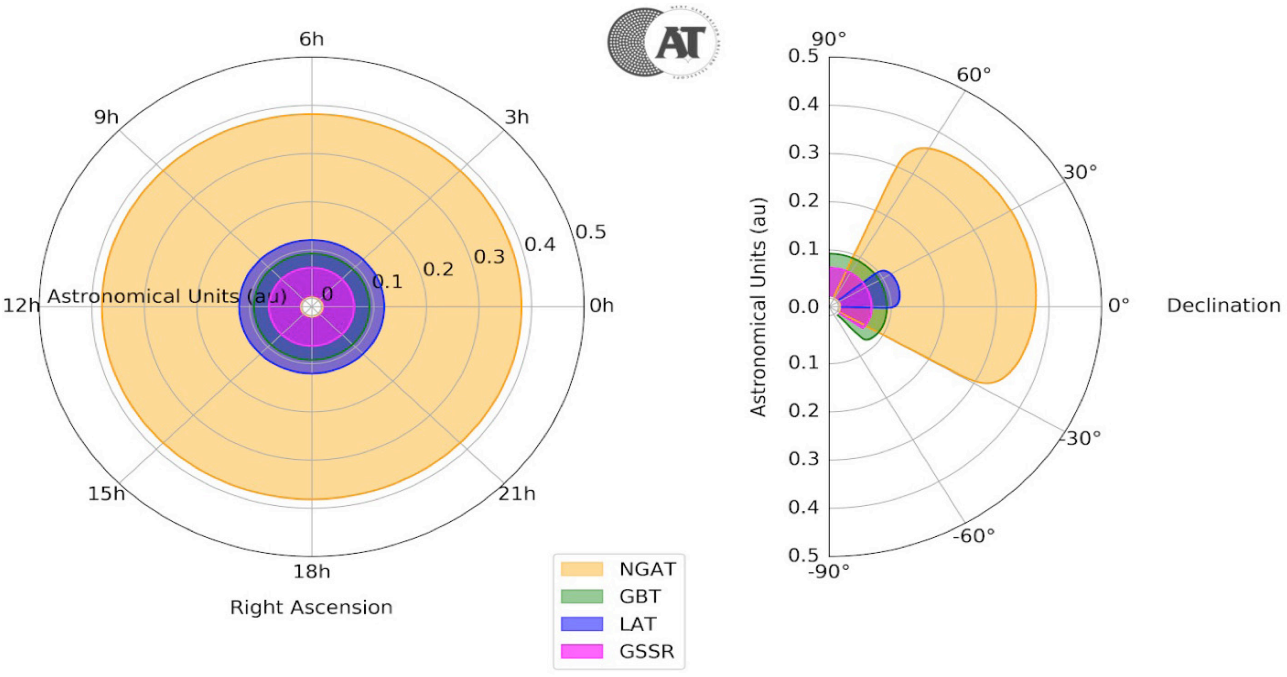
¿Y AHORA QUÉ?

Viví momentos muy emocionantes en los últimos años en Arecibo pero, por desgracia, me tocó vivir también uno de los más tristes el pasado diciembre, y eso que 2020 ya venía haciéndonos daño a todos. El 1 de diciembre del 2020, la plataforma y parte de las torres del telescopio principal colapsaron sobre la antena confirmando un destino que muchos nos negábamos a creer en las semanas anteriores.

¿Y ahora qué? Esa es la pregunta a la que los 120 trabajadores de Arecibo nos enfrentamos desde ese momento. Un pregunta que no puedo responder sin sentir el peso del gran legado del telescopio de Arecibo, el más grande del mundo durante mucho tiempo y, sin duda, el más productivo y multidisciplinar.

Ahora, y desde el pasado diciembre, el personal de Arecibo, con el apoyo de la comunidad de usuarios, se ha sacudido la enorme pena de presenciar el colapso del gigante y trabaja sin descanso en el diseño de un nuevo instrumento central, un nuevo telescopio, que tome el relevo de lo que el histórico telescopio de Arecibo (LAT de su nombre en inglés, Legacy Arecibo Telescope) ejecutó de tan impresionante manera durante casi 60 años. No se trata, está claro, de reconstruir o recuperar el antiguo telescopio sino de, contagiados por el espíritu pionero de William E. Gordon, construir una nueva joya que sirva de instrumento científico y de fuente de inspiración por al menos

Comparación del alcance de NGAT con el telescopio histórico de Arecibo (LAT), el radar para el sistema solar de Goldstone DSS-14 (GSSR) o el sistema proyectado para el Green Bank Observatory (GBT). Las áreas sombreadas corresponden a regiones de la esfera celeste donde cada telescopio podría detectar un objeto potencialmente peligroso (PAH) de 140 metros de diámetro con un período de rotación de 2.1 horas y un albedo de radar de 0.1, por encima del umbral de detección de SNR = 6 (7,8 dB) (figura tomada de Roshi et al., 2021).



Muestra de la colección de cartas enviada por los estudiantes de la escuela primaria Magnet Goldsboro, Florida, a los trabajadores del Observatorio de Arecibo tras el colapso de la plataforma. Imagen por cortesía del Observatorio de Arecibo, una instalación del NSF.



otras seis décadas. Y este sería el Telescopio de Arecibo de Próxima Generación (NGAT, de sus siglas en inglés). El concepto de NGAT nace de la decisión meditada y unánime de diseñar un instrumento que sirva, al máximo nivel posible, a las tres comunidades científicas que tradicionalmente han utilizado el Telescopio de Arecibo, estas son, la comunidad de radioastronomía, la comunidad de ciencias planetarias y la comunidad de ciencias atmosféricas. En las diferentes discusiones que tuvieron lugar entre el mes de noviembre y finales del mes de enero barajamos otras opciones o conceptos diferentes para NGAT pero siempre llegamos a la misma conclusión, ninguno de ellos podría cubrir esta necesidad.

¿EN QUÉ CONSISTE EL CONCEPTO DE NGAT?

Con el fin de lograr los objetivos científicos generales mencionados en las siguientes secciones, el pasado mes de febrero presentamos un concepto para el NGAT, una combinación innovadora de una matriz compacta, y en fase, de discos fijados a una estructura orientable similar a un plato, un “disco de discos”. Uno de los retos más importantes en este diseño es conseguir distribuir los discos de la manera más compacta posible para maximizar el área de recolección total. La forma de los platos individual podrá variar como consecuencia de los estudios de ingeniería que comenzarán este año (ej. platos hexagonales) si con ello se consigue

aumentar el área recolectora neta en comparación con platos circulares. Los parámetros individuales de los platos también deben optimizarse para conseguir una sensibilidad óptima en todo el rango deseado, de 200 MHz a 30 GHz, así como minimizar la amplitud del lóbulo, reducir el costo y proporcionar acceso de mantenimiento a la alimentación y la electrónica de entrada[2].

En este concepto, cada plato contaría con su propio transmisor y receptor, consiguiendo así evitar la construcción de una plataforma suspendida conteniendo el secundario, el terciario y la instrumentación.

En comparación con el LAT, el NGAT proporcionaría un campo de visión 500 veces más amplio, una cobertura de declinación 2.3 veces mayor, una cobertura de frecuencia 3 veces mayor, casi el doble de sensibilidad en la recepción de señales de radioastronomía y una potencia de transmisión más de cuatro veces mayor. El nuevo telescopio coexistirá con una instalación de alta frecuencia (HF) ampliada en sus prestaciones y un conjunto de instrumentación óptica y de radio que continúa en estos momentos operando en AO y en Isla Culebra y que, durante 2020 y 2021, pasa por un amplio proceso de renovación.

¿DE DÓNDE VIENEN ESTOS REQUISITOS?

Como comenté más arriba, el primer punto de la discusión que llevó a este concepto fue la motivación científica para un nuevo telescopio. ¿Qué ciencia queremos habilitar en las próximas décadas?¿Qué ciencia siempre quisimos hacer con LAT pero no podíamos? ¿Cómo podemos amplificar el potencial de nuevos descubrimientos en campos en los que ya trabajábamos? En las próximas secciones resumo la motivación científica que condujo al diseño del concepto NGAT.

CIENCIAS PLANETARIAS

Requisitos motivados por los objetivos científicos para ciencias planetarias:

5 MW de potencia de transmisión de onda continua de 2 a 6 GHz, apertura de haz de 1-2 minutos de arco y mayor cobertura del cielo.

Un papel clave del LAT como anfitrión del sistema de radar más poderoso del mundo fue caracterizar las propiedades físicas y dinámicas de los objetos cercanos a la Tierra (NEO, de sus siglas en inglés). Este trabajo se realiza en apoyo de la Oficina de Coordinación de Defensa Planetaria de la NASA, en línea con el interés nacional y seguridad. En los últimos años, AO observó cientos de objetos cercanos a la Tierra como parte del mandato de la NASA por parte del Congreso de los EE. UU. de detectar, rastrear, catalogar y caracterizar el 90% de todos los NEOs de más de 140 metros de tamaño. Aunque el descubrimiento de estos objetos se realiza con observaciones en visible, el seguimiento posterior con radar es una técnica incomparable para determinar con precisión su trayectoria futura y evaluar si representan una amenaza de impacto real para la Tierra.

Estas mediciones de radar aseguran la posición y la velocidad de los NEOs con una precisión de decenas de metros y milímetros por segundo, respectivamente. Durante décadas, también, LAT se usó para mapear las superficies de Mercurio, Venus, Marte y la Luna, apoyando su exploración humana y robótica. Una nueva instalación, con un sistema de radar más potente (5 MW a 2 a 6 GHz) y una gran cobertura del cielo, sería un gran apoyo para la oficina de Defensa Planetaria, la exploración del Sistema Solar y el programa de detección de residuos en órbita al como muestran los siguientes ejemplos:

- Cada año podría caracterizar el 90% de los asteroides descubiertos en el óptico con riesgo de impacto a la tierra.
- Tendría capacidad para probar las capas interiores más cercanas a la superficie de mundos helados en órbitas alrededor de Saturno y Júpiter, o de los cometas o centauros en regiones interiores a estos planetas.
- Detectaría residuos espaciales en órbita geoestacionaria u órbita cislunar de hasta 1 metro y llegaría a tamaños milimétricos para residuos en órbitas bajas.
- Daría soporte a misiones de exploración como la misiones de NASA, DART, Janus, Europa Clipper y Dragonfly, o como JUICE, una misión ESA.

CIENCIAS ATMOSFÉRICAS

Requisitos motivados por los objetivos científicos para ciencias atmosféricas:

0º a 45º de cobertura desde el cénit, 10 MW de poder de transmisión máxima a 430 MHz y superficie de gran sensibilidad.

Las Ciencias Espaciales y Atmosféricas en AO han utilizado tradicionalmente múltiples enfoques para la investigación atmosférica. El radar de dispersión incoherente (ISR, de sus siglas en inglés) de LAT, los laboratorios de lídar combinados con telescopios ópticos, las instalaciones ópticas pasivas remotas e in-situ y la instalación de alta frecuencia (HF) fueron las piedras angulares de la investigación de SAS en AO. El poderoso radar del LAT era el único instrumento de este tipo capaz de perfilar los parámetros ionosféricos más allá de los 2000 km de la atmósfera terrestre. Las observaciones de alta resolución de concentraciones de electrones, temperaturas, composiciones de iones y la inferencia de campos eléctricos en la ionosfera son vitales para las investigaciones de los procesos de acoplamiento entre diferentes regiones atmosféricas. Así mismo, proporcionan información valiosa en cuanto a la influencia de las perturbaciones meteorológicas solares en el medio ambiente de la Tierra y los procesos fundamentales del plasma, ya que la ionosfera actúa como un laboratorio de plasma natural. Sin embargo, la capacidad del ISR en LAT estaba limitada en cuanto a la dirección del haz. NGAT ha sido pensado para superar esa limitación con una mayor cobertura del cielo (cobertura cenital $\geq 45°$). Así mismo, una mayor potencia del radar ($\geq$ 10 MW a 430 MHz) abriría nuevas posibilidades de investigaciones y resultaría, muy probablemente, en descubrimientos innovadores. Algunos de los objetivos científicos definidos para NGAT son:

- Investigar el cambio climático global y su influencia en las zonas altas de la atmósfera.
- Investigar el caso de las perturbaciones de corto período en la ionosfera.
- Entender los fenómenos de acoplamiento de diferentes capas de la atmósfera para mejorar las comunicaciones por satélite y los pronósticos del tiempo.

ASTROFÍSICA

Requisitos motivados por los objetivos científicos para radioastronomía:

Excelente sensibilidad en un rango de frecuencia de 200 MHz a 30 GHz, mayor cobertura del cielo y permitir el apuntando del telescopio hasta 48° desde el cenit para observar el Centro Galáctico.

La versatilidad de LAT para las investigaciones en radioastronomía fue una de los factores principales que influyeron en la alta productividad de este telescopio. Los investigadores de púlsares, del entorno galáctico y extragaláctico, fueron los que con mayor intensidad sintieron la pérdida del instrumento. NGAT debería permitir observaciones complementarias con otras instalaciones de radio existentes y futuras. Por ejemplo, la nueva instalación proporcionaría un aumento sustancial en la sensibilidad para la interferometría de base muy larga (VLBI), de la cual el LAT ya fue un instrumento único en lo que a sensibilidad se refiere. Además, una mayor cobertura del cielo, una mayor área de recolección, una mayor cobertura de frecuencia y un mayor campo de visión aumentarían sustancialmente el potencial de investigación en una amplia gama de campos, algunos de los cuales se destacan a continuación.

- Realizar test de la teoría general de la relatividad observando púlsares en el centro de la galaxia.
- Aumentar la capacidad de investigar los procesos subyacentes a la física de los púlsares o las ráfagas rápidas de radio.
- Detectar moléculas de interés prebiótico en nuestra galaxia y más allá.
- Explorar la historia de formación estelar en el universo gracias la emisión de ^{12}CO en galaxias masivas a redshift > 3.
- Buscar exoplanetas y realizar estudios de habitabilidad en relación al campo magnético de la estrella huésped.

SUEÑA A LO GRANDE

Tomé prestada para el título de este artículo una frase del Dr. William E. Gordon, diseñador del observatorio de Arecibo. Él decía “Si sueñas, sueña a lo grande y ten colaboradores con talento que te ayuden”.

Puede que lo que he presentado más arriba suene como un gran sueño y esa palabra, *sueño*, tiene, desgraciadamente en nuestra cultura, tintes de irreal. Sin embargo, bebiendo de mi experiencia, sé que se puede soñar a lo grande y alcanzar esos sueños. Requiere mucho trabajo, requiere el esfuerzo mental de salir de la zona de confort, tan mentada por gurús pamplineros y, sin embargo, tan real como limitante. Y requiere, como decía Gordon, tener colaboradores y apoyos con talento. El equipo de Arecibo tiene ese talento, y tiene la pasión que te da trabajar en aquello que siempre soñaste. Ellos son los mismos que durante años se enfrentaron a presupuestos cada vez más limitados. Ellos son los mismos que en el 2017 recuperaron la instalación tras el huracán María. Los mismos que tras 24 horas en casa detrás de las ventanas viendo y sintiendo el viento y la lluvia con una fuerza descomunal, se echaron a la autopista, "la expresso", para comprobar daños y poner el telescopio en funcionamiento de nuevo. Y lo hicieron antes incluso de recuperar su casa. Ese equipo, con nuevas incorporaciones tan comprometidas y apasionadas como el que apoyó a Gordon hace 60 años, es el mismo que está trabajando ahora convencido de que hay un futuro para Arecibo, que pueden formar un equipo que diseñe y construya el mejor radiotelescopio del mundo, para el mundo y para la isla de Puerto Rico.

En realidad, sólo el tiempo y el dinero dirá si esto es posible, pero una cosa tengo clara, ¡Que no sea por no soñar! Por falta de talento y de trabajo ¡No será!

Nota final: No quiero cerrar este escrito sin agradecer el gran apoyo que el observatorio de Arecibo recibió de la comunidad de científicos y astrónomos aficionados españoles a principios de este invierno. Ese apoyo, que siempre es necesario, fue realmente un soplo de aire fresco especialmente este año en que hemos pasado tanto tiempo trabajando en soledad o hablando con una pantalla dividida en cuadrados gris oscuro.

NOTAS

[1] Un buen número de laboratorios y detectores aún están activos en el observatorio, que continúa abierto como centro de investigación, http://www.naic.edu/ao/scientist-user-portal/#sciencenow

[2] Otros detalles de este concepto, como la óptica de cada disco, el movimiento y la deformación del plato de soporte, las caracteríticas de los radio receptores y transmisores, o el procedimiento para co-fasear el vector de discos fueron puntos de discusión que pueden consultar en Roshi et al. 2021.



Foto del observatorio Arecibo. Imagen por cortesía del Observatorio de Arecibo, una instalación del NSF.

ESPAÑA PARTICIPA EN LA CONSTITUCIÓN DEL SKAO

En verano de 2018 celebrábamos en este boletín la entrada de España en la *SKA Organisation*, encargada del diseño de este radiointerferómetro que supondrá un antes y un después en la comprensión del universo y las leyes de la física, más allá de la propia radioastronomía: seguramente el proyecto científico más ambicioso de este siglo. Pues bien, 3 años después estamos de nuevo de celebración, ya que el pasado febrero tuvo lugar la primera reunión del Consejo del flamante nuevo Observatorio del SKA (*SKA Observatory* – SKAO), y como resultado del trabajo de nuestro ministerio y comunidad, España fue invitada a participar en dicho Consejo, lo cual nos ha hecho testigos de un hito en la historia reciente de la astronomía.






Lourdes Verdes-Montenegro
lourdes@iaa.es
Julián Garrido
jgarrido@iaa.es
Marcos Villaverde
mva@iaa.es
Julio Gallardo
gallardo@iaa.es
Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)

Nuestra presencia fue como país observador si bien, según declaraciones del propio Ministro de Ciencia e Innovación Pedro Duque, con firme intención de "participar, en primera línea, en esta magnífica aventura científica destinada a revolucionar la astronomía y otros campos científicos y tecnológicos". De hecho, el Ministerio ya ha iniciado el procedimiento para adherirse al *SKA Observatory*.

EL OBSERVATORIO DEL SKA (SKAO)

Este paso de la *SKA Organisation* al *SKA Observatory* abre la puerta al inminente comienzo de la construcción del SKA, dado que el Observatorio es la organización intergubernamental (segunda en el mundo dedicada a la astronomía tras ESO) encargada de su construcción y operaciones. La fase de construcción tendrá una duración estimada de 8 años, que se llevará a cabo por etapas, en cada una de las cuales se desplegará un conjunto de antenas (*Array Assemblies*) para cada telescopio. La implicación de la comunidad científica será progresiva, tanto en las fases de comisionado como de verificación científica. En la Figura 1 se listan los hitos más relevantes.

Recordemos que el SKAO estará constituido por dos radiointerferómetros que se complementarán entre sí (Figura 2) abarcando un amplio rango del espectro de radio. En su primera fase contará con 197 antenas parabólicas de 15 metros de diámetro con una línea de base máxima de 150 km (*SKA-mid*, 350 MHz-15.4 GHz) ubicadas en el desierto del Karoo en Sudáfrica, y más de 131.000 antenas de tipo dipolo de 2 m de altura localizadas en el oeste de Australia agrupadas en 512 estaciones, con separaciones máximas de 65 km (*SKA-low*, 50-350 MHz).

PREPARACIÓN CIENTÍFICA

La combinación de campo de visión, resolución angular, precisión en las medidas de tiempos y sensibilidad del SKAO permitirá abordar problemas científicos de interés para una comunidad española cada vez más amplia. Desde el verano de 2018 la participación de la comunidad nacional en el SKA no ha hecho sino aumentar. Esto se puso de manifiesto en la Reunión Abierta de la RIA celebrada en 2019 denominada "¡España en SKA!", con más de 80 participantes de 18 centros españoles y 7 instituciones internacionales. Su apertura fue presidida por el entonces Secretario General de Coordinación

Key project milestones

	SKA-Low	SKA-Mid
Start of construction (T0)	1ST JULY **2021**	1ST JULY **2021**
Earliest start of major contracts (C0)	AUGUST **2021**	AUGUST **2021**
Array Assembly 0.5 finish (AA0.5) SKA-Low = 6-station array SKA-Mid = 4-dish array	FEBRUARY **2024**	MARCH **2024**
Array Assembly 1 finish (AA1) SKA-Low = 18-station array SKA-Mid = 8-dish array	FEBRUARY **2025**	FEBRUARY **2025**
Array Assembly 2 finish (AA2) SKA-Low = 64-station array SKA-Mid = 64-dish array, baselines mostly <20km	FEBRUARY **2026**	DECEMBER **2025**
Array Assembly 3 finish (AA3) SKA-Low = 256-station array, including long baselines SKA-Mid = 133-dish array, including long baselines	JANUARY **2027**	SEPTEMBER **2026**
Array Assembly 4 finish (AA4) SKA-Low = full Low array SKA-Mid = full Mid array, including MeerKAT dishes	NOVEMBER **2027**	JUNE **2027**
Operations Readiness Review (ORR)	JANUARY **2028**	DECEMBER **2027**
End of construction	JULY **2029**	JULY **2029**

Figura 1. Calendario previsto para las distintas etapas en las que se divide la construcción del SKA. Fuente: SKAO Prospectus.

de Política Científica y actual Secretario General de Investigación Rafael Rodrigo. En dicha Reunión se expuso una perspectiva global sobre el SKA y sobre las actividades de nuestra comunidad, y tuvieron lugar 3 sesiones paralelas orientadas a facilitar las colaboraciones multifrecuencia/*multimessenger*, en las áreas *Our Galaxy*, *Planet/Star formation/Our Solar System*, *Extragalactic astronomy* y *Cosmology/Epoch of Reoionization*. Actualmente 50 investigadores españoles participan en 12 de los 13 grupos científicos del SKA (*Cosmology*, *Cradle of Life*, *HI Galaxy Science*, *Epoch of Re-ionization*, *Extragalactic Continuum*, *Gravitational Waves*, *Magnetism*, *Our Galaxy*, *Pulsars*, *Transients*, *Extragalactic Spectral Line* y *VLBI*) así como en el *Focus group* de *High Energy Cosmic Particles*.

En el trabajo preparatorio para el SKA es asimismo clave la participación en programas de legado de sus precursores y *pathfinders*, la cual aumenta día a día. En 2018 se inauguró MeerKAT, el precursor sudafricano del SKA, que ya ha proporcionado resultados impresionantes[1,2] debido a su gran campo de visión, así como una exquisita sensibilidad a estructuras extendidas gracias a la distribución de sus antenas. En Australia el precursor ASKAP aporta un campo de visión sin precedentes gracias a los detectores de última generación *Phased Array Feeds*

Figura 2. Imagen en la que se fusiona antenas reales ya instaladas en los dos emplazamientos con representaciones artísticas de las futuras. De izquierda a derecha: Antenas del SKA-mid y del radiotelescopio ya existente MeerKAT en Sudáfrica, y la estación prototipo AAVS2.0 junto con estaciones del SKA-Low en Australia. Crédito: SKAO, ICRAR, SARAO.



(PAFs), habiendo realizado ya su primer cartografiado del 83% del cielo [3]. En ambos hay amplia participación española, tanto en programas de tiempo garantizado como en observaciones en calidad de investigadores principales. A ellos hay que sumar los precursores a bajas frecuencias *Murchison Widefield Array* en Australia y HERA en Sudáfrica.

Participación tecnológica. Toda esta actividad científica ha ido desde un principio acompañada de un interés y trabajo en el área tecnológica por parte de centros de investigación y de la industria, con participación en 8 de los 12 consorcios de diseño establecidos por la *SKA Organisation*. Este año comenzará la licitación los contratos de construcción, que se corresponden con diferentes elementos del *SKA-mid* y *SKA-low*. El compromiso de España de contribuir en la construcción del Observatorio en los próximos 10 años, anunciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación [4], se traducirá en contratos para la industria española. Pero desde el final del diseño, el desarrollo tecnológico no se ha interrumpido, pues han tenido lugar una serie de actividades denominadas de *Bridging*, con objeto de completar o consolidar aspectos relevantes para la construcción del Observatorio. Esta etapa, que ha tenido lugar en 2019 y 2020, ha recibido en España apoyo de CDTI con dos proyectos de tipo INNOGLOBAL. Estos han llevado asociados la colaboración entre empresas españolas y centros académicos en dos áreas relevantes del proyecto: por una parte, la distribución de frecuencias, y por otra el apoyo a la Ciencia Abierta mediante la revisión de los metadatos que deberá registrar el telescopio desde el momento de la observación hasta la producción de los datos científicos.

LOS CENTROS REGIONALES DEL SKA

El SKA será el mayor generador de datos públicos del mundo. Su volumen y complejidad harán necesario un cambio radical en la forma en que actualmente realizamos la ciencia. Los datos generados por el SKA serán pre-procesados en dos centros de computación localizados en Sudáfrica y Australia y de ahí se enviarán para su análisis científico a una red interconectada de Centros Regionales (SRC por sus siglas en inglés). Será en estos Centros Regionales, externos al Observatorio, donde se llevarán a cabo las actividades científicas, y para ello deberán dar acceso a los datos, recursos computacionales y herramientas de análisis independientemente de la ubicación de los usuarios, proporcionándoles asimismo apoyo y formación. Los SRCs constituirán por tanto el núcleo científico del SKA.

En mayo de 2019 se creó el *SRC Steering Committe* (SRCSC), formado por representantes de aquellos países implicados en actividades de desarrollo de SRCs, contando por tanto con la presencia de España. El SKAO y el SRCSC tienen la misión de crear un sistema integral que comprenda desde la solicitud de tiempo de observación hasta el archivo científico, todo ello de forma unificada y transparente. Para ello, el SRCSC ha constituido 6 grupos de trabajo que aglutinan a más de 100 expertos, entre ellos 12 españoles, cubriendo las áreas de arquitectura, logística de los datos, operaciones, federación de la computación y datos, archivo científico, *hardware* e involucración científica.

En España, con el apoyo estratégico del programa Severo Ochoa del IAA-CSIC, se lleva a cabo desde 2018 el desarrollo de un prototipo de SRC, habiéndose desplegado en septiembre del pasado año el primer núcleo de la infraestructura. Dicho prototipo está comprometido con los principios de la Ciencia Abierta, un área en la que España está jugando un papel relevante en el marco del SKA. La Ciencia Abierta forma parte de los principios fundacionales del SKA [5,6] y será un elemento clave en la futura Red global de SRCs. Además de los "indicadores de éxito" al uso en instalaciones científicas, como son la demanda de tiempo de observación y la bibliometría, se añade por primera vez la reproducibilidad de su ciencia.

La evolución de dicho prototipo a un SRC español integrado en la Red global de SRCs, donde se fomente el intercambio de conocimiento, contribuirá a maximizar el retorno científico de la inversión en el SKA, preparando y posicionando a la comunidad española para la explotación de esta infraestructura científica. Los SRCs suponen asimismo una inversión que retorna en un 100 % al país, tanto en infraestructura y servicios, como en capacitación de personal en áreas de impacto social tales como *Big Data*, e-Ciencia, Ciencia Abierta, Ciencia de Datos o Computación Verde.

EL SKA Y LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Además de constituir el núcleo del método científico, la ciencia abierta y reproducible juega un papel clave en la democratización del conocimiento, ace-



Figura 3. Imagen de los ODS de las Naciones Unidas en que se ha señalado con una estrella aquellos a los que el proyecto SKA contribuye. Imagen adaptada de la web de las Naciones Unidas.

lerando su transferencia a la sociedad, y promoviendo la igualdad y la inclusión. Por ello, tal como ha destacado la UNESCO [7], juega un papel relevante en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Pero el compromiso del SKAO con los ODS (resumido en la Figura 3) es más amplio, y surge de su propia naturaleza multicultural y multinacional.

El SKAO tendrá impacto en cuatro áreas fundamentales: la economía, la sociedad, la sostenibilidad y la cultura. También la igualdad y la diversidad están recogidas en la Convención del SKAO, que compromete a la organización a adherirse a los valores de igualdad, diversidad e inclusión en su directiva y en general en todos los niveles del Observatorio, abarcando el equilibrio de género, la nacionalidad y la representación de grupos tradicionalmente infrarrepresentados.

Se abre por tanto una nueva etapa ilusionante para nuestra comunidad, en puertas de la adhesión de España al Observatorio del SKA. Se trata de una fase crucial de preparación para la explotación de una infraestructura científica de Big Data, con un fuerte compromiso con los ODS, y que nos traerá descubrimientos sin duda emocionantes por inesperados.

REFERENCIAS

1. "MeerKAT radio telescope inaugurated in South Africa – reveals clearest view yet of centre of the Milky Way". Nota de prensa de SARAO, julio de 2018.
2. "South Africa's MeerKAT discovers giant radio bubbles at centre of Milky Way". Nota de prensa de SARAO, septiembre de 2019.
3. "ASKAP's first all-sky survey opens a new era of Discovery". Nota de prensa de CSIRO, diciembre de 2020.
4. "España participa en la constitución del nuevo Organismo Internacional SKAO, el mayor observatorio de radioastronomía en el mundo". Nota de prensa del Ministerio de Ciencia e Innovación, febrero de 2021.
5. "SKA Observatory key document: Construction Proposal". SKA Observatory, marzo 2020.
6. "SKA Observatory key document: SKA Observatory Establishment and Delivery Plan". SKA Observatory, marzo de 2021.
7. "Un llamamiento conjunto en pro de la ciencia abierta". Llamamiento de los Directores Generales de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Alta Comisionada de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos, octubre de 2020.

SIN SPICA EL UNIVERSO INFRARROJO

El pasado mes de octubre ESA y JAXA resolvieron de forma conjunta apartar a SPICA de la competición a M5 del programa Cosmic Vision. SPICA había sido preseleccionada junto a Envision y Theseus en mayo de 2018 como candidata entre más de 25 propuestas y se procedía a su estudio de fase A en su puja hacia la selección final prevista para junio de 2021. Tanto la cancelación, tan solo unos meses antes de que tuviese lugar el Mission Selection Review, como la forma en la que se desarrollaron y precipitaron los hechos generaron gran estupor en la comunidad científica infrarroja, así como serias dudas sobre las razones y el proceso de decisión llevados a cabo.





Francisco Najarro
najarro@cab.inta-csic.es

Jesús Martín Pintado
jmartin@cab.inta-csic.es

Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

Oficialmente, ambas agencias adujeron que la estimación de coste a término de la misión excedía las envolventes económicas asumibles por ESA y JAXA. Dicho sobrecoste, alrededor de un 20%, saltó a la luz durante el MCR (Mission Consolidation Review) en julio de 2020. Mientras que la revisión técnica declaró la misión como viable, la revisión programática hizo saltar las alarmas al recibirse el presupuesto de la industria para el ensamblado del telescopio. Esta cantidad excedía significativamente la que se había estimado durante el CDF (Concurrent Design Facility) a finales de 2018 y que concluía que la misión era viable tal y como había sido presentada en la llamada a M5 y posteriormente preseleccionada. En un intento de mitigar sobrecostes, ESA propuso al consorcio de SPICA reducir el tamaño del telescopio de 2.5 m a 1.8 m como medida de urgencia. A pesar del nada desdeñable impacto en los objetivos científicos de la misión, el consorcio decidió seguir adelante con la reducción del tamaño del espejo y acomodar a marchas forzadas la suite de instrumentos al nuevo diseño y a la redefinición del programa científico. Sin embargo, todos estos ajustes resultaron infructuosos ya que, poco después, ambas agencias decidieron cancelar la misión y con ello el esfuerzo de más de 15 años de la comunidad infrarroja que buscaba dar un paso de gigante en la senda que han ido marcando a lo largo de las tres últimas décadas misiones como ISO, SPITZER, AKARI y HERSCHEL.

Este artículo está enfocado a reflexionar sobre el impacto que supone carecer de una misión en el infrarrojo lejano a corto y medio plazo, así como profundizar en las lecciones aprendidas en relación con misiones espaciales en las que co-participan varias agencias, tanto a nivel de interacción entre agencias como los diferentes interfaces entre los consorcios que construyen los instrumentos con las agencias.
Para ello, en primer lugar, realizaremos un breve recorrido histórico de SPICA. Posteriormente describiremos el diseño de la misión y su suite de instrumentos para finalmente presentar los principales objetivos científicos que cobran especial relevancia en el nicho del infrarrojo medio y lejano.

LA MISIÓN SPICA

La participación europea en SPICA (a SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics) se

propuso por primera vez en 2007 en la llamada del programa Cosmic Vision de la ESA. SPICA fue seleccionada como misión de oportunidad como contribución a la propuesta liderada por JAXA.

Tras una fase de evaluación de dos años, a principios de 2010 se concretó una propuesta europea en la que la ESA proporcionaba el ensamblado del telescopio, una estación de seguimiento de tierra, la colaboración en las operaciones de ciencia y la gestión de los interfaces entre JAXA y el consorcio europeo del instrumento SAFARI. Dicho consorcio, cuya responsabilidad fue asumida inicialmente por el Reino Unido, paso a ser liderado por Holanda a finales de 2010 con España y Francia como co-IPs. El esquema de misión de oportunidad fue revisado por ESA y JAXA resultando en una participación mayor de forma progresiva por parte de la ESA hasta que finalmente SPICA se volvió a proponer en 2016 (llamada a M5) como misión de clase M, esta vez liderada por ESA.

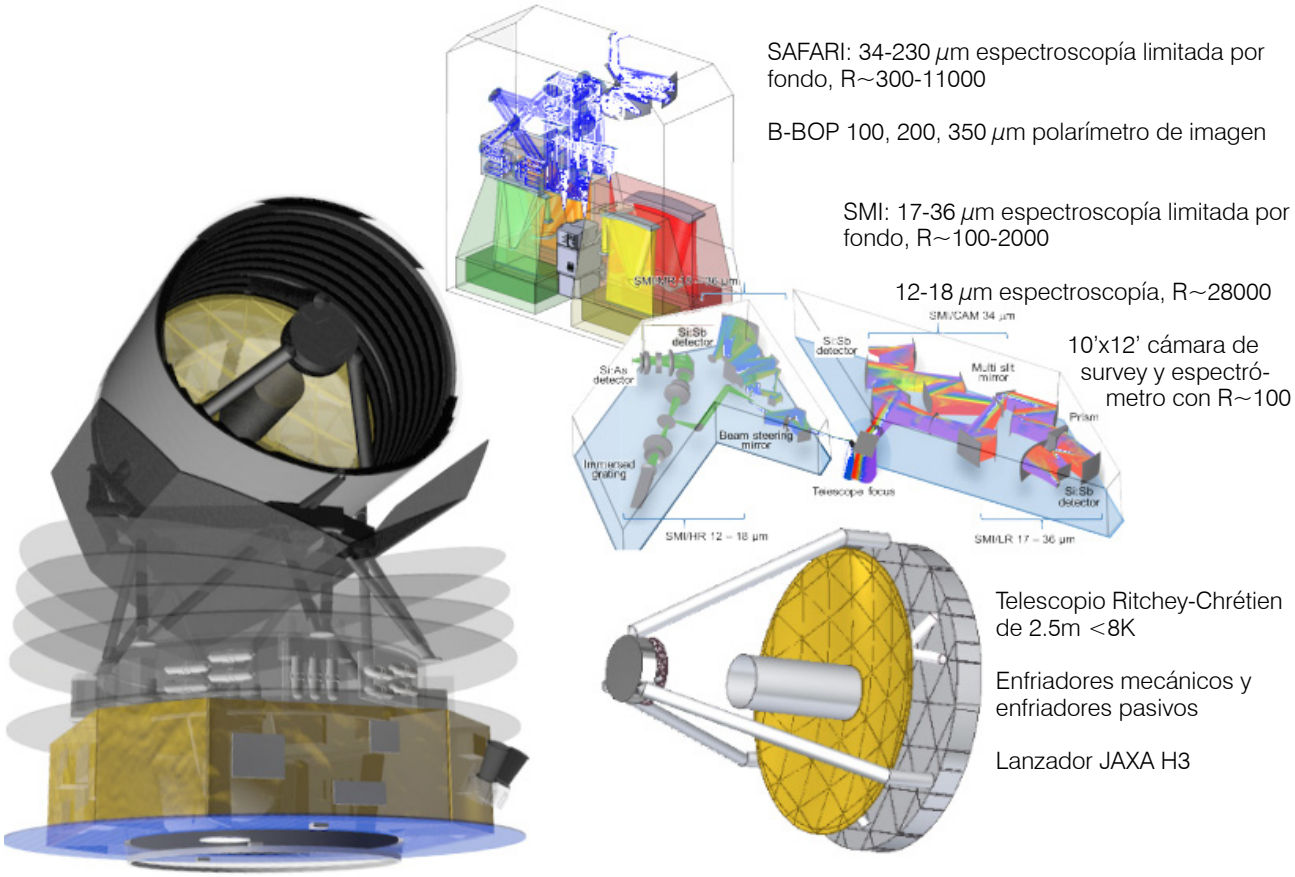


Figura 1. Esquema de SPICA, con el telescopio y la suite de instrumentos: SAFARI, B-BOP y SMI (adaptadas de la propuesta de SPICA a M5).

Desde el punto de vista tecnológico, SPICA se concibió como un Herschel enfriado por debajo de 8 K combinando enfriadores mecánicos con enfriadores pasivos (ver Fig. 1). La propuesta inicial contemplaba un telescopio de 3.5 m, un instrumento en el infrarrojo medio liderado por Japón (SMI) y un espectrógrafo de transformada de Fourier SAFARI en el infrarrojo lejano (similar a SPIRE/Herschel) y liderado por un consorcio europeo. La propuesta original sufrió una serie de cambios que se cristalizaron en la solicitud presentada finalmente a M5. Por un lado, debido al tamaño del lanzador japonés y a la capacidad de enfriado disponible, se produjo una reducción del tamaño del telescopio a ~2.5 m. Además, con el fin de aumentar la sensibilidad se optó por un espectrógrafo de tipo "grating" y se añadió un polarímetro de imagen, B-BOP, liderado por Francia. España, a través del CAB y del INTA era la responsable la estructura de SAFARI y B-BOP así como del diseño óptico de SAFARI.

CASOS CIENTÍFICOS DE SPICA

Con esta suite de instrumentos y un telescopio enfriado por debajo de 8 K, SPICA posibilitaba explorar el infrarrojo lejano como rango único a la vez que complementario mejorando en al menos dos órdenes de magnitud lo alcanzado por misiones previas. Gracias a esto, SPICA planteaba abordar tres objetivos claves:

- El primero consistía en revelar los procesos físicos que gobiernan la formación y evolución de galaxias y agujeros negros durante una gran fracción de la vida del universo. La espectroscopia de alta sensibilidad en el infrarrojo lejano que proponía el instrumento SAFARI, bien de galaxias individuales como mediante sondeos de áreas extensas, iba a permitir obtener las primeras medidas fiables tanto de la tasa de formación estelar como la de acrecimiento en agujeros negros en galaxias con polvo en durante las fases que abarcan el 90% de la edad del universo. Además desentrañaría los procesos que regulan el ciclo de bariones y formación estelar en galaxias, conectando la evolución estelar con los reservorios de gas y polvo a escalas que comprenden desde las nubes moleculares individuales hasta galaxias. Trazaría también la aparición y evolución de metales y polvo desde el universo primitivo hasta el actual (ver Fig. 2). Finalmente, sería capaz de detectar y caracterizar algunas de las galaxias más jóvenes y luminosas del universo temprano.

- El segundo buscaba resolver por primera vez la polarización en el infrarrojo lejano de los filamentos galácticos. Estos juegan un papel fundamental en la activación de los procesos de formación estelar en condensaciones de gas y polvo. De este modo se revelaría el papel que juegan los campos magnéticos dando forma a las estructuras del medio interestelar en las que se forman las protoestrellas y los núcleos pre-estelares. Estudios con alta resolución espectroscopia permitirían, asimismo, determinar el papel de la de dinámica del gas y la turbulencia en la transformación de gas difuso a estrellas.

- El tercer objetivo se centraba en entender la formación y evolución de sistemas planetarios. La formación de planetas está íntimamente ligada a la evolución de los reservorios de gas (ver Fig. 3) y esta puede trazarse óptimamente mediante observaciones de la molécula de deuterio. Asimismo, SPICA posibilitaba el estudio en múltiples fases del agua en las diferentes zonas de formación del sistema planetario. Además, se contemplaba: estimar las cantidades de gas templado en estas zonas, cuantificar los procesos de dispersión del gas (formación de huecos y fotoevaporación) y derivar propiedades de minerales, temperatura y contenido en hierro de los granos de polvo en sistemas solares nacientes.

IMPACTO DE LA CANCELACIÓN DE SPICA

La cancelación de la misión SPICA tiene un impacto directo en el avance de nuestro conocimiento en los nichos científicos descritos anteriormente y en la hoja de ruta de los desarrollos tecnológicos para futuras misiones en el IR lejano. No hay ninguna misión espacial u observatorio terrestre en fase de construcción o en operación que pueda cubrir los casos científicos de SPICA. En particular, ALMA podrá estudiar la evolución galáctica solo a alto redshift a través de las líneas atómicas de estructura fina y de CO en el IR lejano y se restringirá el estudio a los discos muy jóvenes donde se forman los sistemas planetarios. Sin embargo, no podrá acceder a la época del pico de la formación estelar (redshifts 2-3) crucial para entender la evolución de la galaxias ni a los discos de escombros, ni podrá estudiar el papel de la "snow line" en la formación y evolución de los planetas. Incluso el JWST,

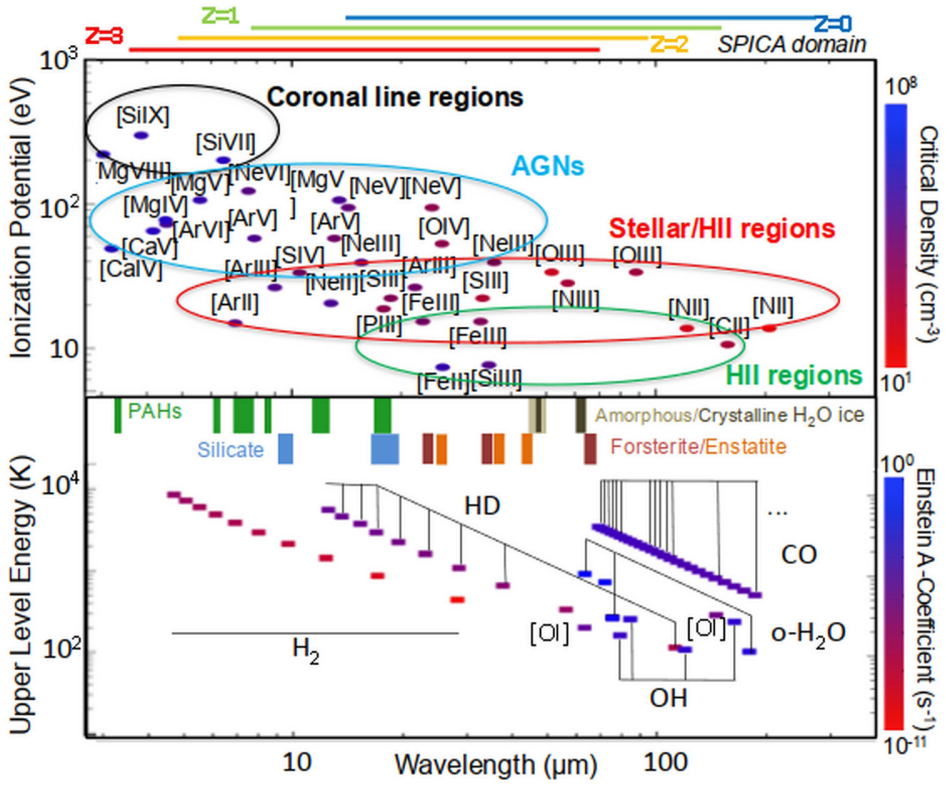
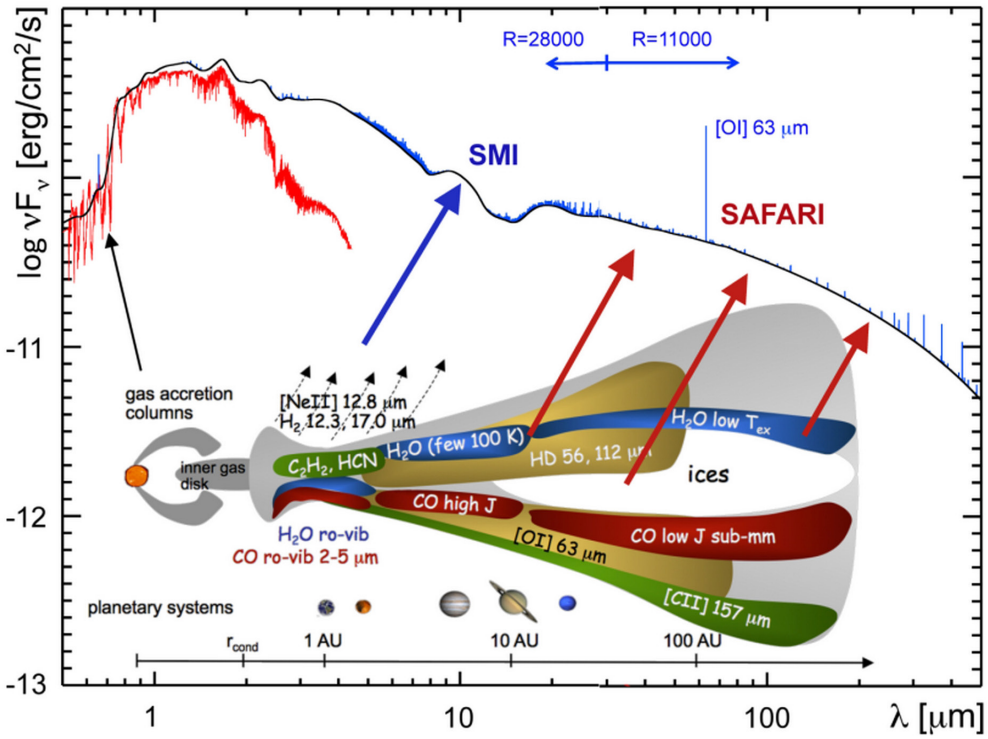


Figura 2. Panel superior: Potencial de ionización vs lambda para líneas de estructura fina de diagnóstico en el infrarrojo. (Spinoglio & Malkan 1992). Panel inferior: niveles superiores de energía de transiciones moleculares e improntas de PAHs, bandas de hielo de agua y otras especies vs longitud de onda. El rango de SPICA se indica para diferentes redshifts.

Figura 3. Modelo de distribución de energía para un disco protoplanetario. El infrarrojo medio y lejano proporciona la mejor ventana para estudiar el reservorio de material del que se formará el planeta (adaptadas de la propuesta de SPICA a M5).



«La cancelación de la misión SPICA tiene un impacto directo en el avance de nuestro conocimiento en los nichos científicos que abordaba y en la hoja de ruta de los desarrollos tecnológicos para futuras misiones en el IR lejano. No hay ninguna misión espacial u observatorio terrestre en fase de construcción o en operación que pueda explotar adecuadamente los casos científicos de SPICA »

que estudiará la regiones más internas de una gran variedad de discos proto-planetarios pero no logrará acceder la regiones de la zonas más externas de los discos. En cuanto al estudio del campo magnético en regiones de formación estelar, SOFIA realizará mapeados de las regiones más intensas pero no alcanzará la sensibilidad para medir la polarización en las regiones más difusas. Desde el punto de vista tecnológico, SPICA hubiera supuesto un salto crucial al validar las tecnologías de refrigeradores mecánicos para telescopios de 2-3 m enfriados a <8 K, fundamentales para el futuro de las misiones en el IR lejano con telescopios de aperturas más grande que SPICA como el Origins Space Telescope (OST) de la NASA o en el caso de interferómetros espaciales. Finalmente, desde el punto de vista de la comunidad, un gran número de astrónomos y tecnólogos han dedicado más de una década a conformar una misión y preparar su explotación científica. Con la cancelación de SPICA han tenido que abandonar dichas actividades y enfrentase a la trágica decisión de redirigir sus carreras profesionales.

EXPERIENCIA ADQUIRIDA: DEBILIDADES.

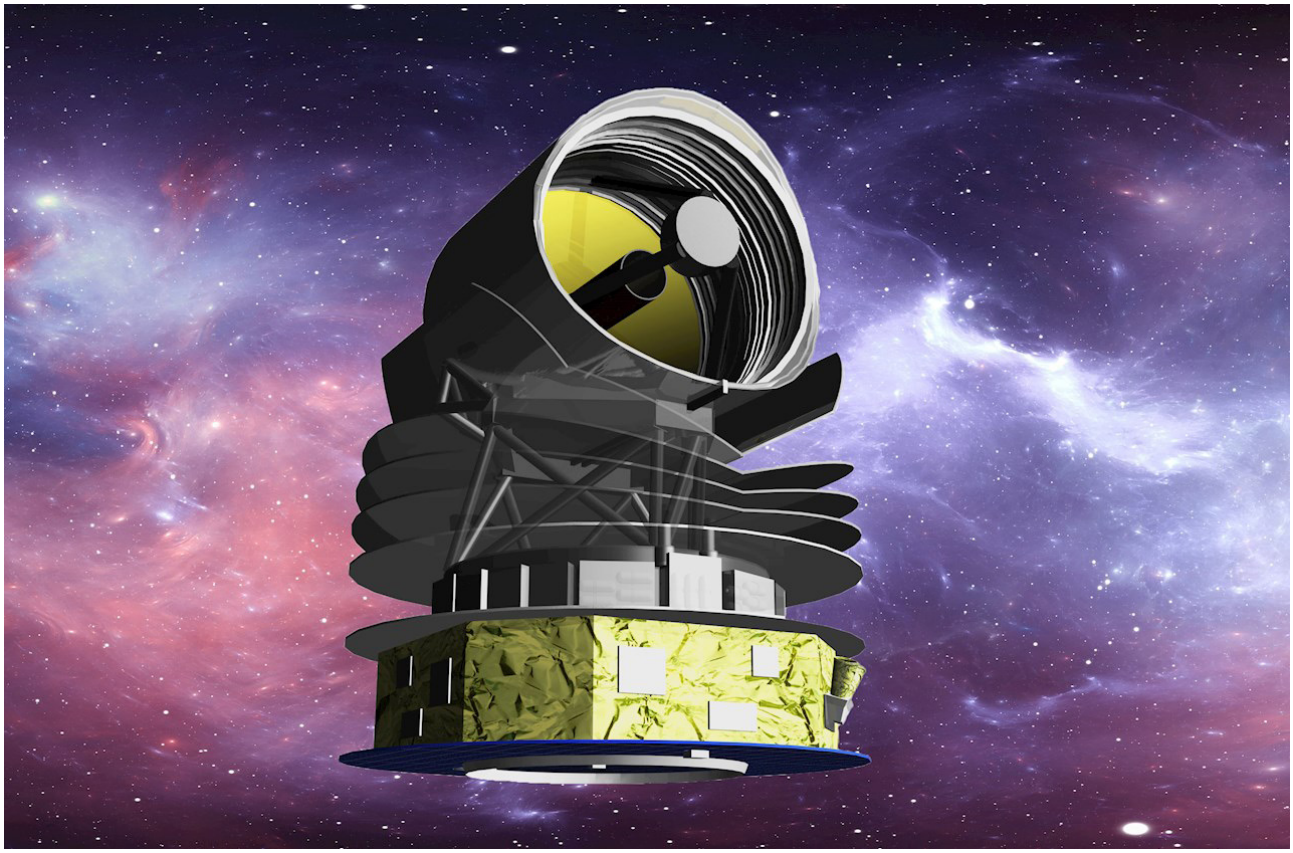
La cancelación de SPICA también ha mostrado que las agencias espaciales tienen una larga tradición de colaboración en misiones espaciales con un esquema en las que una de las agencias actúa como líder y el resto colaboran a nivel de socio minoritario. En este esquema la agencia líder garantiza la misión y los socios contribuyen con mejoras e instrumentación adicional. Este fue el esquema original en el caso de SPICA liderada por JAXA con una contribución sustancial de la ESA. La evolución hacia una misión liderada por la ESA con una contribución a nivel similar por parte de JAXA ha puesto de manifiesto que la gestión de este tipo de esquema de colaboración, que ha resultado muy exitosa en el caso ALMA, requiere de una implementación diferente a las que se usan en la actualidad en todas las agencias espaciales. El esquema de misiones de tipo M de la ESA y de tipo L de JAXA imponen una programación y una estructura de comités asesores científico-técnicos, programación temporal y de sincronización presupuestaria entre las agencias que se han mostrado insuficientes para acometer la implementación exitosa de este tipo de misiones. Teniendo en cuenta

los costes asociados a los grandes futuros observatorios espaciales, como el JWST que, claramente superaran los presupuestos asignados incluso a las misiones de tipo L de la ESA, la introducción de un esquema para misiones con otras agencias espaciales en la que se contribuye al mismo nivel es crucial para que la ESA lidere en modo compartido los futuros grandes observatorios espaciales.

EL FUTURO DEL INFRARROJO LEJANO

De cara al futuro, la implementación de un observatorio en el IR lejano con un telescopio de al menos 3 m refrigerado activamente requiere de al menos una misión de tipo L dentro del esquema de la ESA. En la actualidad la ESA dará a conocer el resultado del Vogage 2050, en el que se recomendarán los temas científicos que definirán la futuras misiones de tipo L. Asimismo, se indicará el modo en el que una misión o contribución a una misión en el IR lejano liderada por otra agencia puede ser incorporada a su programa científico. En particular, dentro de los cuatro estudios de concepto para misiones de tipo L que se están considerando en el contexto del NASA Decadal Survey para la Astrofísica, el OST, en caso de ser seleccionado, supone una oportunidad para la comunidad europea del IR-lejano y de la ESA para contribuir como socio minoritario. Teniendo en cuenta que en la actualidad las grandes agencias espaciales están definiendo sus programas científicos y tecnológicos de cara a las próximas décadas, es de esperar que, dado el enorme potencial científico del IR-lejano, a nivel internacional aparezcan oportunidades para implementar una misión del tipo de SPICA dentro de la próxima década.

Impresión artística de la cancelada misión espacial SPICA. Crédito: JAXA/ISAS



LUVOIR – CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA UN

LUVOIR es el acrónimo del Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor, el proyecto para construir un telescopio espacial capaz de operar en el rango espectral de 100 a 2.500 nm con una capacidad colectora equivalente a la de un telescopio de 8 m (LUVOIR-B) o 15 m (LUVOIR-A). Por su versatilidad, sensibilidad y cobertura espectral LUVOIR es el proyecto más ambicioso que se ha ideado nunca en astronomía espacial. Su objetivo fundamental es investigar la emergencia de la vida en los sistemas planetarios situados en la vecindad del Sistema Solar.



Ana Inés Gómez de Castro
Joint Center for Ultraviolet Astronomy
Universidad Complutense de Madrid
aig@mat.ucm.es

LUVOIR es uno de los cuatro estudios de concepto financiados por la Agencia Espacial Estadounidense NASA para estudiar su próxima gran misión (o *flagship*) astronómica. Los otros tres son Habex (Habitable Exoplanet Observatory), Lynx X-ray observatory y el observatorio infrarrojo OST (Origins Space Telescope). Los cuatro estudios están siendo evaluados por la Academia de Ciencias en la actualidad y la decisión final se hará pública a mediados de este año. Misiones flagship de NASA han sido: el Hubble Space Telescope (HST), el observatorio de rayos X Chandra y el James Webb Telescope (JWST).

Durante tres años y medio, el equipo de definición científica y técnica (STDT por sus siglas en inglés) y el equipo de ingeniería de LUVOIR han desarrollado el estudio de definición de dos proyectos sinérgicos, aunque diferentes: LUVOIR-A y LUVOIR-B. Tal y como se muestra en la Figura 1, presentan aproximaciones diferentes para operar con grandes superficies colectoras en el espacio lo que ha permitido evaluar el impacto de las diferentes decisiones técnicas en el retorno científico y en los costes. El estudio realizado muestra la factibilidad de LUVOIR y proporciona información fundamental de cara al desarrollo de un gran observatorio espacial UV/visible/IR desde el punto de vista tecnológico.

Las características fundamentales de LUVOIR son:

- El observatorio estaría situado en el L2 del campo gravitacional Tierra-Sol y su arquitectura es escalable y accesible para permitir cambiar instrumentos o hacer reparaciones en órbita.
- Cobertura espectral desde el UV (100nm) al infrarrojo (2.500 nm). LUVOIR aúna la capacidad de observar en el rango UV con la obtención de imágenes de alto contraste, requeridas para la observación de exoplanetas.
- Un gran espejo primario segmentado y desplegable diseñado para la nueva generación de lanzadores pesados de gran sección (p.e.: los SLS Block 2 y SLS Block 1B Cargo de NASA, el Starhip de SpaceX o el New Glenn de Blue Origins).
- Un parasol externo, en una nave independiente, para poder realizar observaciones coronagráficas. El parasol es más grande que el que ya se ha implementado para JWST, pero más sencillo al no poseer requerimientos térmicos tan fuertes.

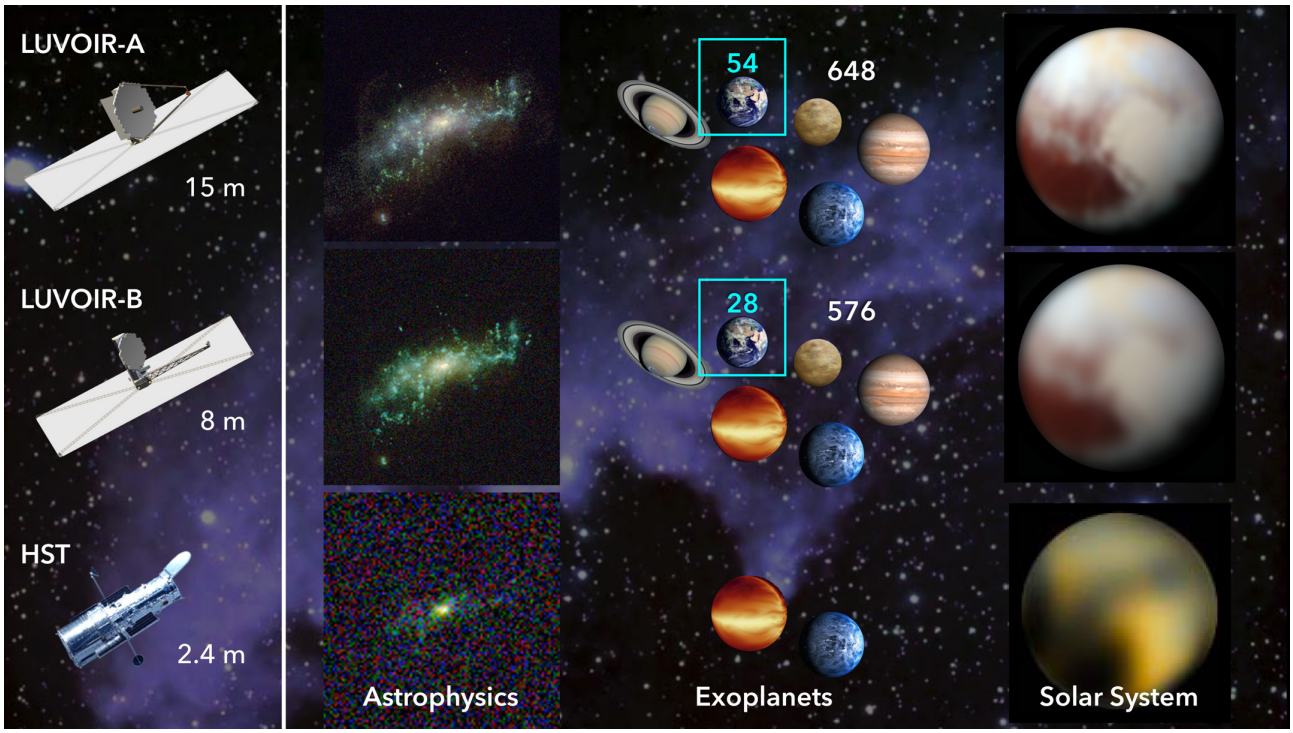


Figura 1. Comparativa entre HST, LUVOIR-B y LUVOIR-A. En el panel de la izquierda se muestra la arquitectura general de los telescopios y en los de la derecha su impacto en varias áreas de la astrofísica: la capacidad de detectar los discos extensos de las galaxias y el medio circungaláctico, la caracterización de la atmósfera de docenas de exoplanetas similares a la Tierra, el estudio sistemático de los exoplanetas gigantes, o la observación de objetos transneptunianos en el Sistema Solar. [Créditos: NASA / New Horizons / M. Postman (STScI) / A. Roberge (NASA GSFC); la imagen de Plutón obtenida por Hubble fue obtenida por Buie et al. 2010].

El informe final incluye la descripción de la ciencia y la tecnología de LUVOIR y consta de 425 páginas (y casi otras tantas en apéndices). En ellas se describe la estrategia para seleccionar fuentes tales como los exoplanetas que se observarían en el programa dedicado de búsqueda de evidencias de vida. También se analizan, en detalle, los retos técnicos de esta gran instalación; LUVOIR-A está diseñado para tener una masa de 30 Tn, un consumo de 20 kW, un espejo primario de 15 m de diámetro constituido por 120 segmentos planos y garantizar una estabilidad RMS del frente de ondas de ~10 picometros en escalas temporales de ~10 minutos.

LUVOIR está pensado para operar como un observatorio astronómico y su misión duraría al menos 10 años con lanzamiento a comienzos de los 2040; es un proyecto para la generación Z, los *post-millennials* y, a ellos en especial, invito a leerse el informe y encontrar en él todos los detalles que no se pueden incluir en este breve artículo.

LA DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE EXOPLANETAS CON LUVOIR

El principal objetivo de LUVOIR es detectar y caracterizar los exoplanetas similares a la Tierra situados en la vecindad solar. LUVOIR ha sido diseñado para poder medir la composición atmosférica, las propiedades de la superficie y posibles variaciones en la radiación producidas, por ejemplo, por patrones atmosféricos. LUVOIR abriría la puerta a la planetología comparada al obtener observaciones de muestras estadísticamente significativas y permitiría realizar el primer estudio sobre la probabilidad de emergencia de vida en la vecindad solar.

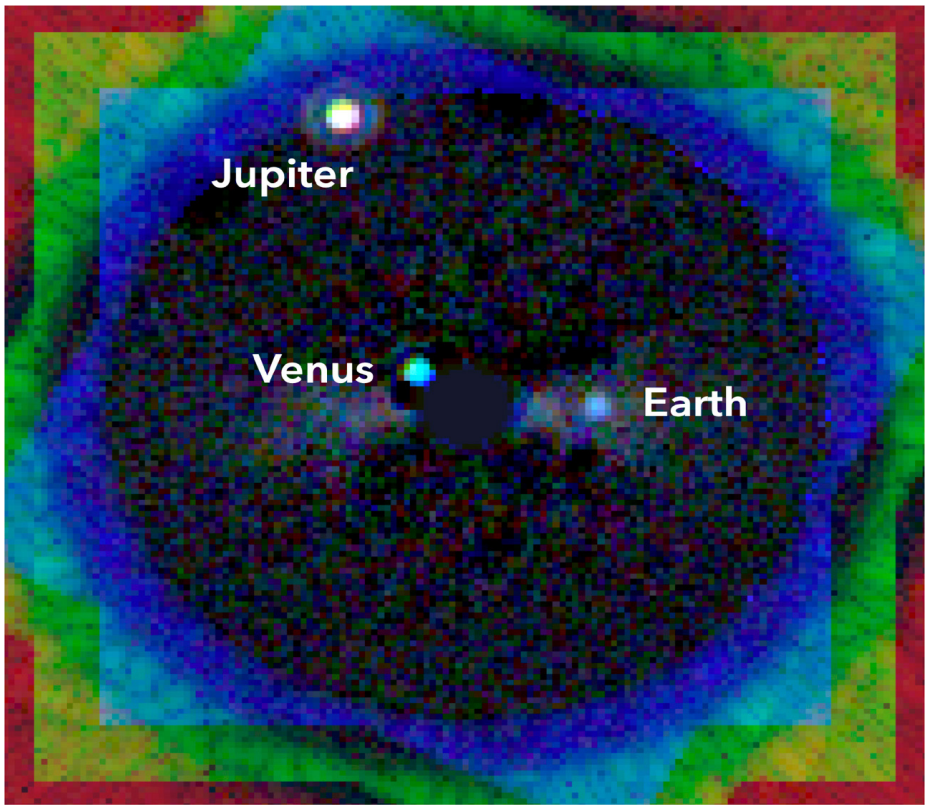


Figura 2. Simulación de una observación realizada con el instrumento ECLIPS y LUVOIR-A de un gemelo del Sistema Solar situado a 12.5 pc; las imágenes obtenidas en varias bandas fotométricas se han combinado para obtener esta representación en color (ver detalles de la simulación).

La detección de planetas terrestres en la zona de habitabilidad alrededor de estrellas de tipo G, similares al Sol, es imposible en la actualidad a causa de la debilidad de la señal y el largo periodo orbital. LUVOIR ha sido diseñado para poder obtener imágenes directas que permitan resolver la zona interna de sistemas planetarios como el nuestro tal y como se muestra en la simulación de la Figura 2.

En modo de espectroscopia de campo integral, ECLIPS está diseñado para obtener espectros con dispersión 140 en el rango de 515 a 1030 nm y dispersión 70 en el infrarrojo. Esta resolución permitiría estudiar la composición atmosférica y el estado evolutivo de la biosfera planetaria.

En la Figura 3, se muestra el impacto de la evolución de la vida en la atmósfera terrestre y en su espectro. La vida surge en la Tierra en el Precámbrico, hace 3,7 giga años en un periodo de fuerte bombardeo cometario. La atmósfera de la Tierra pasa de estar dominada por CO_2 y CH_4 en el eón Arcaico, a un incremento significativo del O_2 y el vapor de agua en el Proterozoico hasta llegar a los valores actuales. En dos años de observaciones continuadas se podrían caracterizar 54 exo-Tierras con LUVOIR-A y 28 con LUVOIR-B.

MONITOREO DEL SISTEMA SOLAR

LUVOIR obtendría también imágenes de gran sensibilidad y resolución angular en el ultravioleta lejano que permitirían monitorizar eyecciones de agua de lunas heladas como Europa (ver Figura 4), o estudiar los procesos de fotoevaporación en los cometas. LUVOIR-A está equipado con instrumentación para espectropolarimetría que permitiría la detección remota de alanina en cometas a través de su huella en la polarización lineal en el rango de 130 a 230 nm.

LUVOIR: DISEÑO E INSTRUMENTACIÓN

LUVOIR está diseñado para obtener imagen de alta calidad y sensibilidad desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR); este es el principal requerimiento de la investigación astronómica alrededor de la cual se define el proyecto (ver Figura 5).

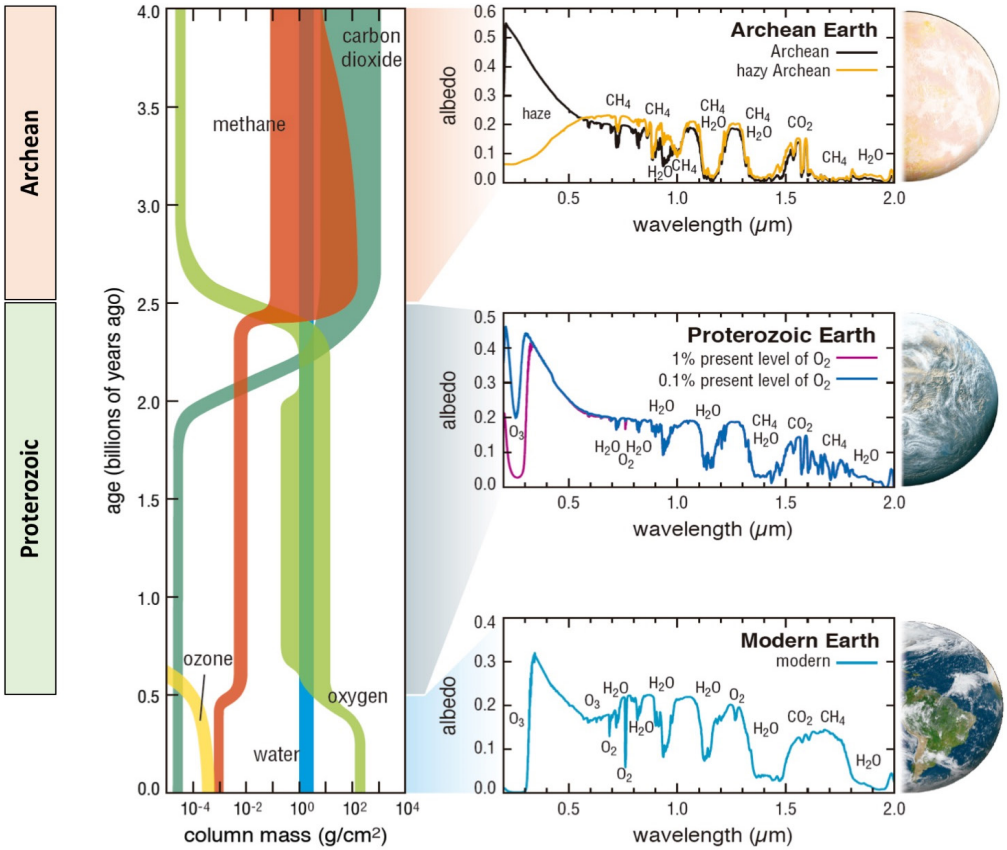
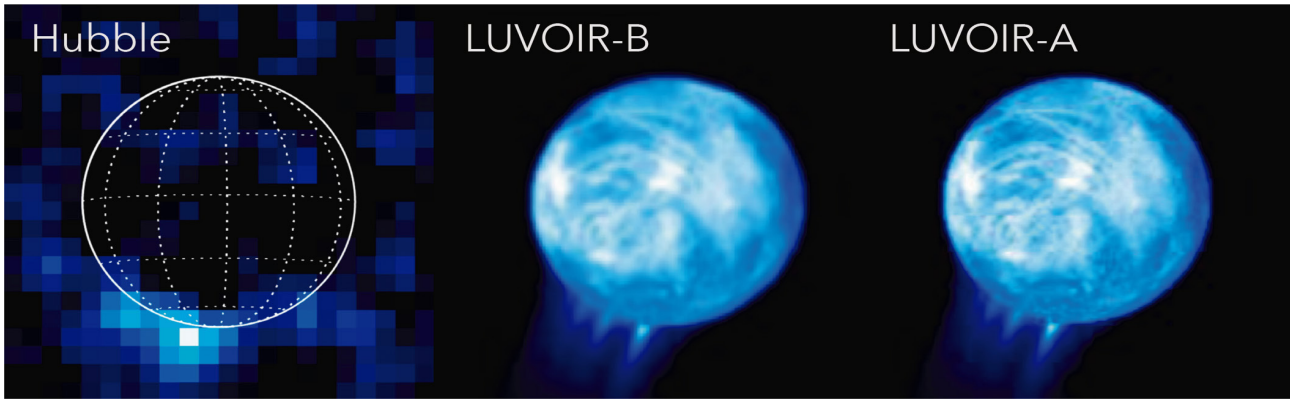


Figura 3. La composición de la atmósfera terrestre ha cambiado significativamente durante su evolución. Se precisa una gran cobertura espectral para poder caracterizar la atmósfera y evitar falsos positivos. El rango espectral seleccionado para LUVOIR recoge los principales trazadores atmosféricos de la Tierra a lo largo de su evolución: CH_4, CO_2, H_2O, O2, O_3 y permite detectar otros fenómenos tales como variaciones locales del albedo que pueden estar ligadas a la composición de la superficie, la presencia de nubes, océanos o a la presencia de vegetación. [Crédito: G. Arney (NASA GSFC) / S.Domagal-Goldman (NASA GSFC) / T. B. Griswold (NASA GSFC)].

Figura 4. Chorros de agua eyectados por Europa. A la izquierda está la imagen obtenida por el Hubble, en el panel central, la que obtendría LUVOIR-B y en el de la derecha LUVOIR-A. Hubble detectó los jets por su emisión UV, a 121 nm (en Lyman-α), ocasionada por la fotodisociación de la molécula de agua al ser expuesta a la radiación UV del espacio. En las simulaciones de LUVOIR se observa la reflexión de la radiación Ly-α del Sol en la superficie del satélite. LUVOIR producirá imágenes de gran nitidez de los cuerpos del Sistema Solar. [Créditos: LUVOIR final report].



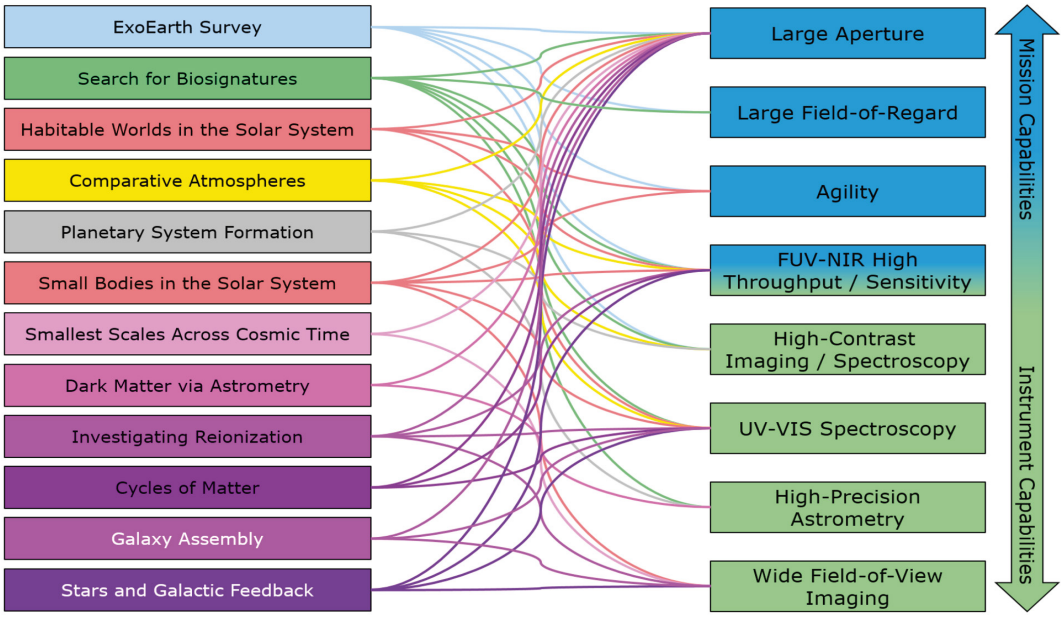


Figura 5. Requisitos científicos para LUVOIR. Los proyectos científicos que han definido la misión están en la columna de la izquierda. [Créditos: LUVOIR final report].

La exigencia de una gran superficie colectora lleva forzosamente a la utilización de un espejo desplegable, similar al implementado en el James Webb Space Telescope (JWST), pero con calidad óptica para operar a 100 nm. Este es el principal reto tecnológico de la misión, que solamente puede llevarse a cabo después de la experiencia única adquirida por NASA con el desarrollo del JWST. En la Figura 6, se muestra la imagen de los componentes principales de LUVOIR-A y cómo se empaquetarían para vuelo.

Los instrumentos estudiados para LUVOIR son:

- **ECLIPS**: un coronógrafo de alto contraste (10^{-10}) equipado para obtener imagen y espectroscopia de campo integral en el rango 200 a 2.000 nm, capaz de obtener imágenes de exoplanetas y espectroscopia de sus atmósferas.
- **HDI**: un instrumento para obtener imágenes de alta definición en el rango 200 a 2.500 nm. La resolución angular corresponde al límite de difracción a 500 nm y está diseñado para poder realizar astrometría de alta precisión.
- **LUMOS**: un instrumento para obtener imagen en el ultravioleta lejano (90-200 nm) con capacidad para realizar espectroscopia multiobjeto con varias dispersiones en el rango 100-1000 nm.
- **POLLUX**: un espectropolarímetro de alta resolución espectral para fuentes puntuales que cubre el rango 100-400nm.

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA Y EUROPEA

España no va a sufrir el apagón UV que se producirá al final de la misión de HST debido a su participación en el desarrollo de la misión Spektr-UF/WSO-UV perteneciente al programa científico de la Agencia Espacial de Rusia. El lanzamiento será realizado con un lanzador Angara desde la base de Vostochny en 2025. Sin embargo, Spektr-UF/WSO-UV es un telescopio de clase media (el primario tiene un diámetro de 170 cm) que, aunque está optimizado para la observación en el UV, no es comparable con la potencia de un telescopio equipado con un primario de 8 ó 15 m.

Desde el año 2006, la comunidad astronómica europea viene reclamando la construcción de un observatorio espacial dedicado a la astronomía UV-visible y equipado con una instrumentación lo suficientemente versátil como para acometer una amplia gama de proyectos científicos. En 2013 nació el concepto "European Ultraviolet Visible Observatory" (EUVO), un gran observatorio espacial europeo que operara desde 90 nm hasta 1,000 nm y con un amplio programa científico detrás, en cierta medida similar al

de LUVOIR, aunque no tan enfocado en el estudio de los exoplanetas. EUVO surgió como respuesta de la comunidad a la Solicitud de ideas de la Agencia Espacial Europea (ESA) para la definición de las nuevas misiones grandes (L2 y L3); la propuesta fue redactada por un equipo de 40 científicos y apoyada por casi 400 astrónomos. Aunque no fue seleccionada, la comunidad ha seguido activa y ha concurrido recientemente a la Solicitud de ideas hecha pública por la ESA en 2019 para el programa Voyage 2050.

El equipo de definición científica y tecnológica de LUVOIR abrió oficialmente las puertas a la comunidad internacional a través de la presencia de miembros internacionales sin derecho a voto en el STDT. Entre ellos hay representantes de varios países europeos, y también un representante de la Agencia Espacial Europea. Además, la Agencia Espacial Francesa (CNES) financió el estudio de uno de los instrumentos principales, POLLUX, con la colaboración de científicos de varios países europeos.

Si LUVOIR es finalmente seleccionado por la Academia de Ciencias de los Estados Unidos, el camino está ya trazado para facilitar una fuerte participación europea.

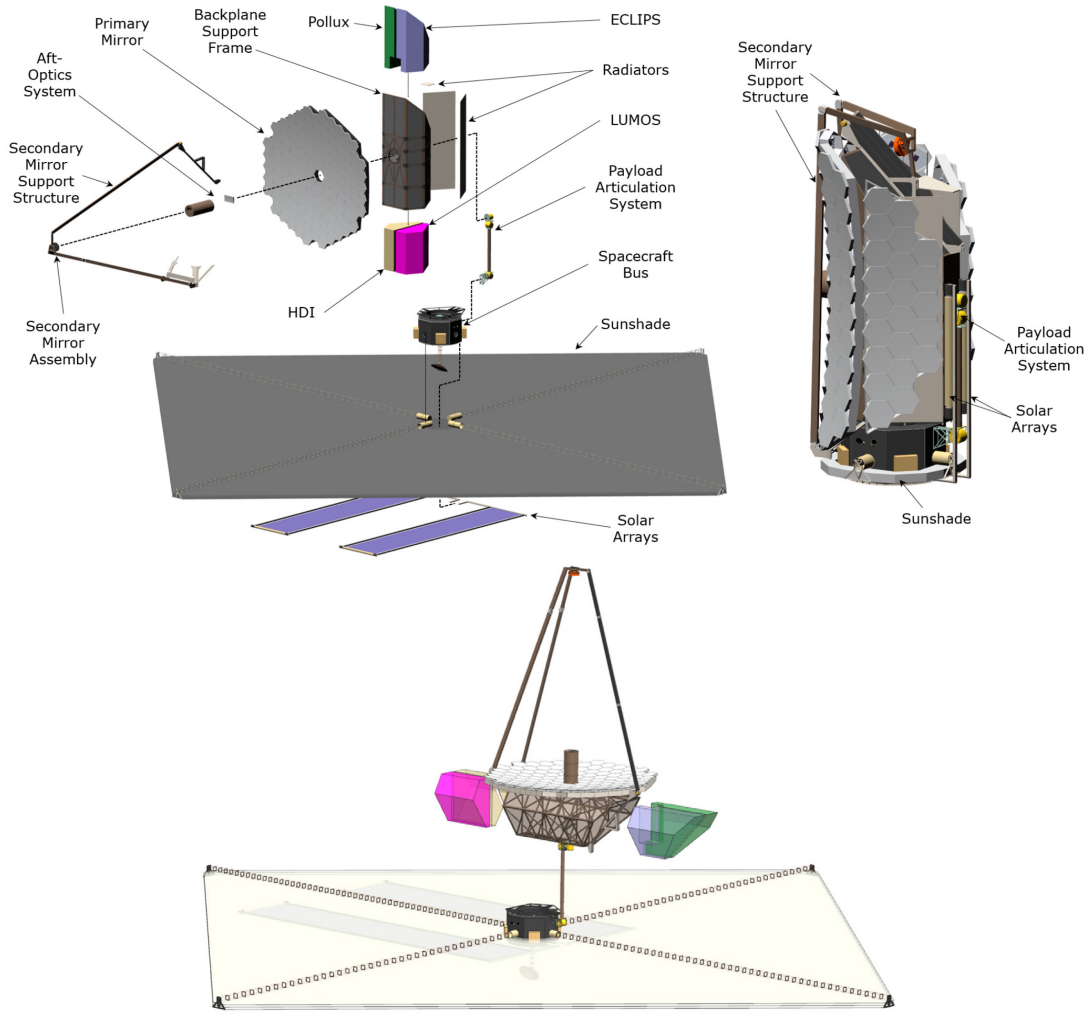


Figura 6. Componentes principales del observatorio (panel superior izquierdo); los instrumentos (ECLIPS, LUMOS, HDI y Pollux) aparecen indicados (ver descripción en el texto). En el panel superior derecho se muestra la configuración en el vuelo y en el panel inferior su disposición durante la operación en espacio. Los instrumentos están localizados en puertos externos para permitir su reemplazo y reparación. [Créditos: LUVOIR final report].

CONCURSO DE RELATO CORTO

El conocimiento científico, ese tan objetivo, racional y empírico que impulsa el avance de la humanidad, a menudo tiene su primer origen en los sueños. Se trata de esos sueños que tenemos cuando somos niñas y niños y que con suerte no perdemos del todo cuando somos mayores. Y que, además, sin atender aún a irrelevantes limitaciones establecidas por leyes físicas o humanas, nos hacen imaginar todo ese conocimiento que todavía no tenemos y sentirnos capaces de conquistar y disfrutar el universo entero.

A esos sueños, y a esa capacidad de imaginación desbordante que tienen las niñas y niños, les hemos abierto la puerta este 2021 con el Concurso de Relatos Infantiles "Mujer y Astronomía", organizado por la Comisión Mujer y Astronomía de la SEA con motivo del 11 de febrero, Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia. Han participado niños y niñas entre los 4 y los 15 años, en cuatro categorías: 4-7 años (en formato audio en los que narraban sus propios relatos), 8-9 años, 10-11 años y 12-15 años.

Tenemos la enorme satisfacción de que el concurso haya sido un gran éxito, ya que recibimos un total de 408 relatos enviados desde todos los rincones de nuestra geografía. A través de todas esas puertas abiertas a los sueños nos han llegado un número indecible de maravillas: estrellas que nos visitan en nuestras casas o se suben a los árboles, pizzas científicas, viajes a multitud de planetas, marcianos de colores que comen mucha fruta o se llaman Perico, celtas y aztecas, gatos y perros espaciales, superpoderes, astronautas capaces de todo, retos superados, grandes descubrimientos, agujeros verdes, viajes en el tiempo y un largo etcétera.

Le hemos dado, como debe ser, libertad absoluta a esos sueños, y solo les hemos pedido una cosa: que en ellos las protagonistas sean niñas o mujeres para que alcancemos esos espacios en los que hemos estado en minoría durante demasiado tiempo. Y ahí estamos: las niñas que sueñan con el cielo, las astrónomas que lo estudian o las astronautas que lo recorren son las protagonistas de estos relatos. En las mentes de las niñas y niños que los han escrito, todas ellas están dispuestas a conquistar, en igualdad, el conocimiento y el futuro.

Nos gustaría poder transmitiros la belleza y la frescura de todos los relatos que se han presentado al concurso. Como no es posible, os presentamos aquí los textos ganadores de cada una de las categorías. Un enorme gracias a todas las niñas y niños que han participado en el concurso, ¡el universo es vuestro!

Julia Suso López
Observatori Astronòmic
de la Universitat de València
Julia.Suso@uv.es

Jesús Varela López
Centro de Estudios de Física
del Cosmos de Aragón
jvarela@cefca.es

Marina Rodríguez Baras
Observatorio Astronómico Nacional
m.rodriguez@oan.es



CATEGORÍA 1 (4 a 7 años)

SENDERO AL DESCUBRIMIENTO
Transcripción del audio de Diana Badiola Ruvira, 6 años

Cuando sea grande ¡quiero ser astrofísica! para descubrir ¡nuevos planetas y estrellas! Haré cálculos para inventar un teletransportador usando agujeros de gusano.

Pero, para eso, tengo que estudiar mucho, porque quiero que todas las niñas sean científicas como yo estoy segura lo seré.

2042
Con mi equipo de investigación hemos descubierto un planeta habitable que tiene todo lo que necesitamos. Empezamos a trabajar en mi modelo de teletransportador.

2044
¡Por fin lo hemos conseguido!
Con mi grupo de científicas bautizamos el planeta como V, por Vida, y ya los humanos podemos visitarlo gracias a la teletransportación.



Diana Badiola Ruvira

CATEGORÍA 2 (8 y 9 años)

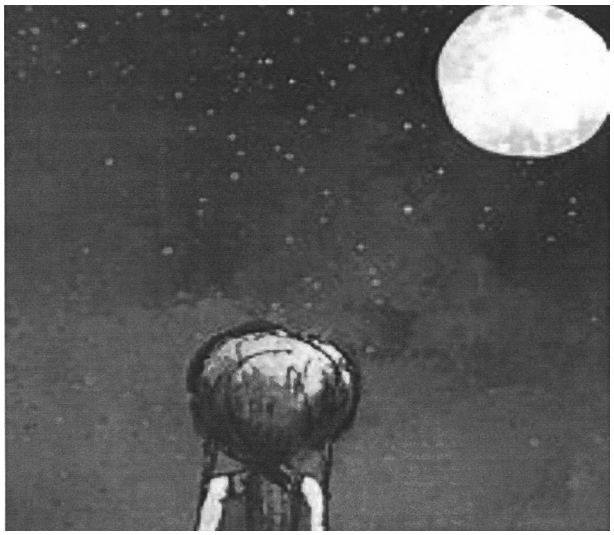
EL DÍA QUE LA LUNA SE CONVIERTE EN LA TIERRA
Escrito por Daniel Hernández Montesa, 9 años

Os voy a contar una historia de cuando la Luna se convirtió en la Tierra.

Había una vez una joven aldeana que se llamaba Alba, ella quería viajar y aprender, conocer lugares que leía en los numerosos libros de los que disponía, pero su padre Ismael no le dejaba, y una noche se escapó de la aldea donde vivía.

Viajó a Francia, donde quería aprender astronomía, porque desde pequeñita había soñado con viajar alrededor del universo, y allí se encontraban según se había informado, las mejores universidades.

Cuando llegó, enseguida se apuntó a una de esas famosas universidades. Fue aprendiendo mucho gracias a su profesora María, y así poco a poco, estudiando mucho se convirtió en una gran astronauta. Visitó todos los planetas, el que más le gustó, fue, Marte, ¡¡es alucinante!! Pensó, pero lo que me toca



hacer ahora, es ir a la Luna, así que se preparó lo mejor que pudo para poder hacer ese deseado viaje.

Cuando llegó a la Luna, después de un largo trayecto, se montó un gran campamento donde podía hacer experimentos, investigaciones, leer, etc... Hizo un gran hueco para poder jugar a futbol, su deporte favorito, en la Luna se sentía libre, podía hacer lo que quería, un día tras otro.

De repente, un día, notó que la Luna se estaba moviendo, Alba se estaba asustando de lo que estaba ocurriendo, no sabía porqué esos movimientos y esos ruidos tan fuertes, de repente de un cráter empezó a brotar un gran chorro de agua, ¡¡y era dulce!! Igual que el de la Tierra.

Al cabo de los días, de la Tierra salieron troncos de árboles y flores de diferentes colores.

A los meses ya se veían diferentes tipos de seres vivos, como pájaros, ciervos, perros, incluso pudo ver una gallina, ¡¡increíble!!

Decidió dar una vuelta alrededor de la Luna, y pudo comprobar que había ríos, mares, lagos y océanos.

La Luna se estaba transformando, se estaba pareciendo a la madre Tierra, como dice la canción. La Luna se estaba acercando al aspecto de la Tierra, y ella lo había podido ver la primera, vivir una sensación única, de la que podría hablar toda la vida.

Ahora tocaba contárselo a los habitantes de la Tierra, que supieran que ya se podía vivir en la Luna igual que en la Tierra.

Lo que no iba a permitir es que la maltrataran, como estaba ocurriendo en la Tierra, que hubiera contaminación, guerras, talas de árboles incontroladas, y todo lo que los hombres estaban haciendo.

Así fue la historia de la pequeña aldeana en la Luna, que me ha encargado que os cuente.



Daniel Hernández Montesa



Carla Carbó Pérez

CATEGORÍA 3 (10 y 11 años)

SARA, EN BUSCA DE UN SUEÑO

Escrito por Carla Carbó Pérez, 10 años

Sara era una niña que vivía con su padre; cumpliría los once en abril; tenía unos grandes ojos azules, como Urano, a veces azules, a veces grises y adoraba leer. La madre de Sara había fallecido cuando Sara solo tenía cuatro años, lo único que sabía Sara, es que un día se fue a trabajar, pero nunca volvió. Lo poco que recordaba de su madre, lo recordaba muy bien. Su madre no era de gran estatura, tenía el cabello castaño y rizado, un poco alocado como los anillos de Saturno y también tenía unos grandes ojos azules. Sara aún se acordaba de las tardes que pasaba en el trabajo de su madre, era un gran edificio blanco; con una cúpula en lo alto, desde la que se podía ver todo el sistema solar.

Sara soñaba con ser como su madre, una gran astrofísica. Pero su padre no se mostraba de acuerdo, se enfadaba mucho cuando se lo mencionaba. Su padre ganaba lo suficiente para comer, pero se levantaba muy temprano y llegaba a casa muy tarde. Cuando Sara salía de la escuela, como no tenía llaves de su casa, se pasaba horas en la biblioteca leyendo lo que no siempre le contaban en la escuela.

Había leído sobre Hipatia; una gran filósofa de Alejandría, sobre Caroline Hershel; una gran cazadora de cometas, sobre Cecilia Payne; la mujer que descubrió qué había dentro de las estrellas, sobre Vera Rubin, la mujer que descubrió la materia oscura... Y la lista continúa.

Un día, en la escuela, les habían preguntado qué querían ser de mayores. Cuando Sara contó lo que quería ser de mayor, la profesora le contestó:

-¡Las mujeres no pueden ser astrofísicas! Deberías trabajar en algo más femenino, como ser camarera, maestra o enfermera.

-Pero profesora, mire a Cecilia Payne o a Vera Rubin...

-Que sí, que alguna habrá, pero es muy difícil, por no decir imposible...Tienes que ser más realista.

La mayoría de los profesores se mostraban de acuerdo con aquello, pero un día Sara conoció a un profesor diferente. Le enseñaba muchas cosas a Sara sobre astronomía y Sara disfrutaba mucho aprendiendo.

Siete años más tarde, la habían aceptado en Vassar College, la universidad en la que había dado clases María Mitchel, una de las primeras profesoras de astronomía. Por suerte, ya no era la única chica de la clase, aunque a menudo aún se burlaban de ellas por ser chicas; pero no le importaba demasiado, porque sabía que era la mejor de la clase.

Cuando terminó la carrera, consiguió un puesto en el Observatorio Astronómico Nacional de España, allí se lo pasaba muy bien porque, al fin y al cabo, lo que más le gustaba a Sara era estudiar las estrellas.

Todas las chicas llevan una estrella en su interior, solo tienen que encontrarla en esta inmensa galaxia.



CATEGORÍA 4 (12 a 15 años)

LA CEFEIDA MÁS BRILLANTE

Escrito por Alaitz Otero Gómez, 15 años

"Nunca llegarás a ser científica". "Esa profesión no es para una mujer". Henrietta pensaba en eso mientras se preparaba para para el día más importante de su vida. Había escuchado terribles desprecios una y otra vez durante sus años de estudiante, y habían continuado durante su vida adulta. Continuamente incluso ella se preguntaba si no tendrían razón los hombres que le decían aquello. A veces pensaba en abandonar, cuando parecía que sus esfuerzos no daban ningún resultado. Pero aquel momento decidió olvidarse de todo. Recordó mejor el día en que había decidido ser astrónoma, cuando era tan pequeña, cuando desconocía el casi imposible camino que estaba destinada a recorrer. Ahora era ella la que medía los derroteros del universo.

Y allí estaba ella, año 1921, preparada para que el mundo se despertara con la noticia que cambiaría para siempre la ciencia. Gracias a una mujer. Mujer que aquella mañana se sentaba inquieta en el salón de su pequeña casa. Los estantes repletos de libros, los sofás grises, nada había cambiado. No parecían ser conscientes de lo que le esperaba al futuro.

A las 7 en punto, su amiga Maria entró en la casa corriendo. Llevaba en su mano un periódico doblado, y resoplaba tras haber corrido. Henrietta sabía lo que había escrito en ese periódico. Su nombre. El nombre que inspiraría a tantas niñas, quienes también tendrían que escuchar las irreverentes palabras de los que se creían dueños de su futuro. Henrietta sería la mujer científica, astrónoma, que ella nunca había podido admirar de pequeña. Cuando miró a su amiga, sin embargo, esta parecía preocupada. Cogió el periódico de sus manos y leyó. La noticia estaba en la primera página. Donde debía haber estado su nombre, el de aquel hombre destacaba sobre todo lo demás. No podía ser posible. El hombre, jefe, siempre se llevaba los méritos. El nombre de Henrietta figuraba solamente en una esquina de la página, como intentando ser invisible.

-Todavía hay más —habló por fin su amiga. —Me he enterado de que va a dar un discurso esta tarde en la Plaza. El alcalde no quería que lo supieses hasta que fuera demasiado tarde.

Henrietta se levantó rápidamente y se dirigió a la puerta.

-¿A dónde vas?

-A defender lo que es mío. Que me quiten todo, pero no me quitarán mi honor.

Los presentes en la Plaza se miraron extrañados cuando vieron a una mujer corriendo hacia el escenario. El científico, concentrado en su discurso, no se dio cuenta de lo que pasaba. Hasta que la mujer, con un rostro decidido que no tenía nada que perder, le arrebató el micrófono y dijo lo que le habían obligado a callar.

-Yo soy Henrietta. Soy mujer, científica y el verdadero motivo por el que estáis hoy reunidos. Nos habéis intentado silenciar tanto, que nuestra voz acumula rabia desde Hipatia hasta hoy. No nos recordaréis cuando nuestros logros os ayuden a subiros a este escenario y ser aplaudidos. Pero estamos aquí, y hemos estado siempre.



Alaitz Otero Gómez

AGRADECIMIENTOS

Este concurso de relatos ha sido patrocinado por la **familia Varela López**, en homenaje y recuerdo a **Angelines** y **Arturo**.

Asimismo agradecemos al grupo extendido su participación como jurado en la evaluación de los relatos.

A la derecha, miembros actuales de la comisión Mujer y Astronomía de la SEA, por orden de fotografía desde la esquina superior izquierda y en sentido horario: Jesús Varela, Nataly Ospina, Silvia Martínez Núñez, Miguel Cerviño Saavedra, Naiara Barrado-Izagirre, Almudena Alonso-Herrero, Julia Suso, Mª Dolores Rodríguez Frías, Marina Rodríguez Baras, Isabel Rebollido, Amparo Marco Tobarra, Elena Manjavacas, Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez y Silvia Bonoli.



En esta sección de nuestro Boletín pretendemos mostrar la cara más social de los miembros de nuestra sociedad: entradas y salidas de comités, nombramiento de nuevos directores de centros, cambios de afiliaciones, jubilaciones, premios, etc. Si cuando acabéis de leer la sección pensáis "Podían haber hablado también de…" os pedimos que nos enviéis vuestra entrada para incluirla en el próximo número. Gracias.

RAFAEL BACHILLER CONDECORADO CON LA ORDEN DEL MÉRITO CIVIL

Nuestro colega **Rafael Bachiller** (Observatorio Astronómico Nacional) ha recibido la condecoración de la Orden del Mérito Civil en su categoría de Comendador (Encomienda). La Orden del Mérito Civil tiene por objeto premiar los méritos de carácter civil adquiridos por las personas que presten o hayan prestado relevantes servicios al Estado, con trabajos extraordinarios, provechosas iniciativas o con constancia ejemplar en el cumplimiento de sus deberes. ¡Enhorabuena y gracias por tu dedicación durante todos estos años, Rafael!

LICIA VERDE, PREMIO JAUME I EN LA MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN BÁSICA, 2021

El jurado de la trigésimo tercera edición de los prestigiosos Premios Jaume I ha decidido otorgar a la cosmóloga **Licia Verde** (Universitat de Barcelona) el galardón correspondiente a la modalidad en Investigación Básica por "sus estudios en Astrofísica Teórica que abordan cuestiones complejas como el origen, la composición, la estructura y la evolución del Universo. El premio está dotado con medalla de oro, diploma y 100.000 euros, con el compromiso de reinvertir parte del importe en investigación y emprendimiento en España. ¡Muchísimas felicidades, Licia!

DANIEL NÓBREGA GALARDONADO CON EL 'EARLY CAREER RESEARCHER PRIZE'

Daniel Nóbrega Siverio, actualmente investigador postdoctoral en el IAC, ha sido galardonado por la División de Física Solar de la European Physical Society con el Early Career Researcher Prize. El premio se le ha concedido "por sus importantes contribuciones a la comprensión de los fenómenos cromosféricos solares y otros procesos relacionados, combinando teoría, observaciones y experimentación numérica". ¡Enhorabuena Daniel!

MIRJANA POVIĆ PREMIADA POR LA EAS

La European Astronomical Society (EAS) ha otorgado a **Mirjana Pović** (Ethiopian Space Science and Technology Institute, e Instituto de Astrofísica de Andalucía) la Jocelyn Bell Burnell Inspiration Medal, por su trabajo dedicado al uso la astronomía, la ciencia y la educación como herramienta desarrollo para paliar la pobreza y mejorar la calidad de vida de los jóvenes de África. ¡Enhorabuena por este reconocimiento tan merecido, Mirjana!

RICARDO HUESO, PREMIO GEMINI 2021

La Sociedad Astronómica de Francia (SAF) y la Sociedad Francesa de Astronomía y Astrofísica (SF2A) han otorgado el premio Gemini 2021 al "Proyecto colaborativo amateur-profesional para la detección y caracterización de impactos en Júpiter" de **Ricardo Hueso** (UPV/EHU) y Marc Delcroix. ¡Enhorabuena a Ricardo (y Marc)!

PREMIOS SEA TESIS 2021

Seguimos con premios, ahora con los de nuestra sociedad. El Premio SEA Tesis 2021 en la modalidad de Astronomía y Astrofísica ha sido para **Ana Escorza**, con la tesis "*Barium stars as tracers of binary evolution in the Gaia era*" realizada en la Katholieke Universiteit de Lovaina (KU Leuven) y la Université Libre de Bruselles (ULB), supervisada por el Prof. Hans Van Winckel y el Dr. Lionel Siess. El premio en la modalidad de Instrumentación, Computación y Desarrollo Tecnológico lo ha ganado **Diego Real**, con la tesis "*Electrónica de Adquisición de KM3NeT e Instrumentación de Calibración Temporal para Telescopios de Neutrinos Submarinos*", realizada en el Instituto de Física Corpuscular (IFIC) de la Universitat de València, bajo la dirección de los Drs. Juan Zúñiga y Juan Ramón Zornoza. La Junta Directiva también ha decidido otorgar dos menciones especiales como finalistas a **Marta Reina Campos**, por la tesis "*Formation and evolution of globular clusters in a cosmological context*", supervisada por el Dr. Diederik Kruijssen y a **Pau Ramos**, por la tesis "*Subestructure in the phase-space of the Galaxy with Gaia*", supervisada por la Dra. María Teresa Antoja. ¡Enhorabuena a todos ellos y felicidades a sus supervisores!

LAURA TORIBIO, FINALISTA EN FAMELAB ESPAÑA 2021

Laura Toribio San Cipriano (CIEMAT) es ya una de los ocho finalistas que competirán en septiembre en Madrid durante la final nacional del conocido certamen Famelab de monólogos con contenido científico. La persona ganadora tendrá la oportunidad de participar en la final internacional, durante el Festival de Cheltenham de Ciencia. También queremos felicitar a **Sara Cazzoli** (IAA – CSIC), que logró llegar a la semifinal. ¡Enhorabuena a ambas, y mucha suerte para Laura!

XAVIER BARCONS DE NUEVO DIRECTOR GENERAL DE LA ESO

En su última reunión el 8 y 9 de junio, el Consejo de ESO decidió unánimemente extender el mandato de **Xavier Barcons** como Director General de ESO hasta el año 2026. ¡Enhorabuena, Xavier, te deseamos lo mejor en esta "nueva" etapa!

POR QUÉ DORMIMOS

Matthew Walker

ISBN: 9788412064520
Editorial Capitán Swing



Muchos empezamos el día agotados. La vida moderna nos aboca a un sueño corto, recortado en su inicio por el ocio nocturno y en su final por los horarios fijos de entrada al trabajo. Si además, como astrónomos, hacemos observaciones nocturnas, la hora de acostarse puede alejarse indefinidamente. Así que no dormimos lo suficiente. Pero si te acuestas tarde y te levantas temprano aprovechas el tiempo, tienes más oportunidades para crear y estudiar. Eso parece, al menos.

Sin embargo si todos los animales duermen, cabe pensar que, desde el punto de vista evolutivo, alguna utilidad debe tener el dormir. ¿Qué nos reporta dormir? Durante los últimos años el estudio del cerebro ha hecho unos avances espectaculares y empezamos a entender los beneficios del sueño. Matthew Walker, neurocientífico de la Universidad de California/Berkeley nos lo explica en "Por qué dormimos".

Un buen sueño debería durar unas 8 horas. Pero es más importante todavía que este contenga todas las fases necesarias: fase no-REM, que consolida la información aprendida durante el día, transfiriéndola al almacén a largo plazo del cerebro y fase REM, generadora de los sueños y asociada a la creatividad, donde se crean nuevos vínculos entre fragmentos de información no conectados entre sí.

A lo largo del libro vamos descubriendo muchos errores que hemos cometido en nuestra vida. Por ejemplo, la ciencia del sueño ha demostrado que dormir después de estudiar consolida lo aprendido. Por ello el Dr. Walker ha abolido los exámenes en sus clases, para que sus estudiantes no se pasen la noche en vela el día anterior. Además dormir ayuda a mejorar la memoria motriz, por la que acciones de habilidad acaban siendo instintivas. Esto lo experimentan músicos, deportistas y científicos que automatizan rutinas de movimiento después de una buena noche de sueño. El autor asesora a la NBA y receta mejores sueños para lograr mejores resultados.

Pero lo más sorprendente ha sido descubrir que la fase REM y el soñar estimulan una forma de procesamiento asociativo de la memoria que fomenta la resolución de problemas y la creatividad. Algunos de los descubrimientos científicos más importantes han sido realizados después de un sueño. Dmitri Mendeléiev consiguió ordenar adecuadamente los elementos químicos después de verlo en sueños. August Kekulé descubrió la estructura en anillo del benceno gracias a que había soñado con átomos que bailaban y se convertían en una serpiente que se mordía la cola. Niels Bohr tuvo la idea del modelo atómico en un sueño donde vio el Sol rodeado por los planetas. Evidentemente esto ocurre solo si se ha pensado intensamente en el problema antes de dormir.

Llegados a este punto ¿necesitas despertarte con despertador? ¿durante el día lees y relees una misma frase en el ordenador? Si es así, entonces perteneces al grupo mayoritario de personas del primer mundo que sufre de privación del sueño. La consecuencia no es únicamente que estemos cansados a lo largo del día sino que el riesgo de sufrir algún tipo de daño físico o mental aumenta.

Pero una vez en la cama ¿por qué dormimos poco y mal? La exposición nocturna a la luz blanca, con un exceso de azul (tabletas, televisión, móvil, luz en casa o en la calle), es la causa principal pero también lo son el alcohol, la cafeína, el ambiente térmico inadecuado y el uso del despertador, al que el autor le dedica bastantes páginas del libro.

La falta crónica de sueño se ha relacionado con el alzhéimer, la ansiedad, la depresión y los accidentes cerebrovasculares, así como con distintos tipos de cáncer, la diabetes, la hipertensión y los ataques cardiacos, la obesidad y la infertilidad.

Además la fase REM se produce principalmente en las dos últimas horas del sueño. Por ello si solo se duermen 6 horas, se pierde la parte más creativa de la noche y renunciamos a disfrutar de esas ideas geniales que todos deseamos en nuestro trabajo.

Y si este texto os ha dado sueño habré logrado uno de mis objetivos. Dejad de leer e iros a dormir para ser más creativos mañana. No os lo tendré en cuenta.

Enric Marco
Departament d'Astronomia i Astrofísica de la Universitat de València

En busca de señales de nueva física en Cosmología

Autor: Nicola Bellomo
(nicola.bellomo@austin.utexas.edu)
Tesis doctoral dirigida por: Licia Verde
Centro: Institut de Ciencies del Cosmos - Universitat de Barcelona
Fecha de lectura: 24 de enero de 2020

La Cosmología es el estudio de las orígenes y la evolución de nuestro Universo como un todo. Aunque bajo el lado teórico la Cosmología nació hace un siglo, con la formulación de la teoría de la Relatividad General por Albert Einstein, ha sido únicamente en las ultimas décadas que ha habido un avance experimental tan importante que se ha transformado desde una ciencia "pobre de datos" a una ciencia "guiada por los datos". Estamos viviendo la que se dice ser la "Edad de Oro" en Cosmología: no solo tenemos suficientes evidencias experimentales para medir parámetros cosmológicos con una precisión alrededor del uno por ciento, sino que también podremos ir más allá de esa precisión con los experimentos planeados en las próximas décadas, que probarán por primera vez épocas de nuestro Universo nunca observadas directamente hasta ahora.

En esta tesis se analizan tres aspectos fundamentales del modelo estándar que se utiliza hoy en Cosmología, el modelo ΛCDM. Los ingredientes principales de este modelo son una teoría de la gravedad que describe cómo nuestro Universo evoluciona, en este caso la Relatividad General; las diferentes componentes que existen en nuestro Universo, es decir fotones, neutrinos, bariones, materia oscura fría (en inglés CDM) y energía oscura, descrita por una constante cosmológica Λ; y una teoría que explica las condiciones iniciales del Universo, que asumimos ser la teoría de la Inflación. Aunque décadas de investigación nos permiten describir muchos de estos aspectos en gran detalle, aún hay varios problemas en los tres ámbitos. El objetivo de esta tesis es explorar cómo estos problemas abiertos pueden encontrar una posible solución; en particular se discute cómo nuevas muestras experimentales y nuevos avances teóricos pueden jugar un papel en responder a estas preguntas abiertas.

La primera parte se centra en la posible degeneración entre efectos que neutrinos y teorías de gravedad modificada tienen en las observables cosmológicas. En el trabajo "Hiding neutrino masses in modified gravity cosmology" se investigó cómo la teoría de Horndeski, que es la teoría más general que incluye un campo escalar que tiene ecuaciones del movimiento del segundo orden y que obedece al principio de equivalencia débil, tiene suficiente libertad para reproducir una expansión como la que predice el ΛCDM y, al mismo tiempo, puede incrementar el crecimiento de las estructuras a grandes escalas. Dicho crecimiento, si se produjera a escalas del orden de 100 Mpc o más pequeñas, podría esconder los efectos que los neutrinos masivos tienen en el espectro de potencia de la materia.

En la segunda parte se debate uno de los candidatos a ser materia oscura, es decir, agujeros negros primordiales que se formaron en las primeras fracciones de segundo de nuestro Universo. Primero se enseña cómo, empezando desde los límites superiores que ya existen para agujeros negros primordiales que tienen una distribución de masa monocromática, es posible obtener límites superiores en la abundancia de agujeros negros primordiales que tienen una distribución de masa extendida. Además, se establece cómo validar si todas las asunciones hechas en la parte de modelización teórica se cumplen en el caso de distribuciones de masa extendidas. Luego se explica cómo, relacionando mapas de galaxias y mapas de ondas gravitatorias generadas por los sondeos de galaxias y los observatorios de ondas gravitatorias, se puede llegar a entender cuál es el origen de los agujeros negros que forman las binarias detectadas. Resulta que ya con experimentos que funcionan, como DESI para galaxias y ALIGO para ondas gravitatorias, se puede tener una primera indicación sobre el origen estelar o primordial, aunque se necesitarán los experimentos de la siguiente generación para tener la confirmación definitiva.

La tercera parte describe cómo se puede obtener nuevas pruebas sobre las primeras fracciones de segundo de nuestro Universo, y en particular sobre la teoría de la Inflación. En primer lugar enseñamos cómo se podría medir la escala energética de la Inflación mediante la medida de una específica señal de no-Gaussianidad primordial, llamada "graviton exchange". Esta no-Gaussianidad está generada por la interacción de dos campos escalares con un gravitón y depende directamente del parámetro *tensor-to-scalar ratio* r, lo cual, a cambio, está directamente relacionado con la energía de la Inflación en los modelos de campo escalar cuya energía cinética es muy pequeña en comparación con su energía potencial. En el trabajo se enseña cómo esta señal primordial resulta ser del mismo orden de magnitud de la función a tres puntos a escalas grandes, planteando una posibilidad de detección. Además se utilizan los agujeros negros primordiales para poner límites en la amplitud máxima que puede tener el espectro de potencia de la curvatura primordial. Más específicamente, se ha desarrollado un procedimiento que conecta las simulaciones numéricas de formación de agujeros negros primordiales a una correcta interpretación cosmológica de esas simulaciones, hasta el cálculo de la abundancia de estos agujeros negros primordiales utilizando la teoría de picos. Este desarrollo teórico permitió obtener límites significativamente más robustos respecto a la literatura anterior.

Tesis disponible en:
https://www.tdx.cat/handle/10803/668752#page=1

Una aproximación numérica de la formación de estrellas masivas

Autor: Raphaël Mignon-Risse
(raphael.mignon-risse@apc.in2p3.fr)
Tesis doctoral dirigida por: Matthias González
Centro: Laboratorio AIM (Astrofísica, Instrumentación, Modelización) Universidad de París
Fecha de lectura: 21 de septiembre de 2020

Entender la formación de estrellas de baja y gran masa es un reto fundamental de la astronomía moderna. Se forman a partir del colapso de núcleos gravitacionalmente inestables, en el medio interestelar, cuya modelización no resulta sencilla: las energías gravitacionales, turbulencias, campos magnéticos, radiación y rayos cósmicos están cerca de la equipartición. Por lo tanto, las simulaciones numéricas son de gran ayuda para el estudio de la formación de estrellas. En este trabajo nos hemos centrado en la formación de estrellas masivas, de gran luminosidad, que emiten una elevada fuerza de radiación lo que, a simple vista unidimensional, puede impedir la acreción de material. Las simulaciones multidimensionales y el tratamiento particular de la radiación estelar son dos ingredientes clave. En este sentido, la principal labor de esta tesis ha sido el acoplamiento numérico entre dos métodos de transporte radiativo. Con esta nueva herramienta nos hemos centrado en tres ejes: los mecanismos de acreción, de eyección y la formación de múltiples sistemas estelares.

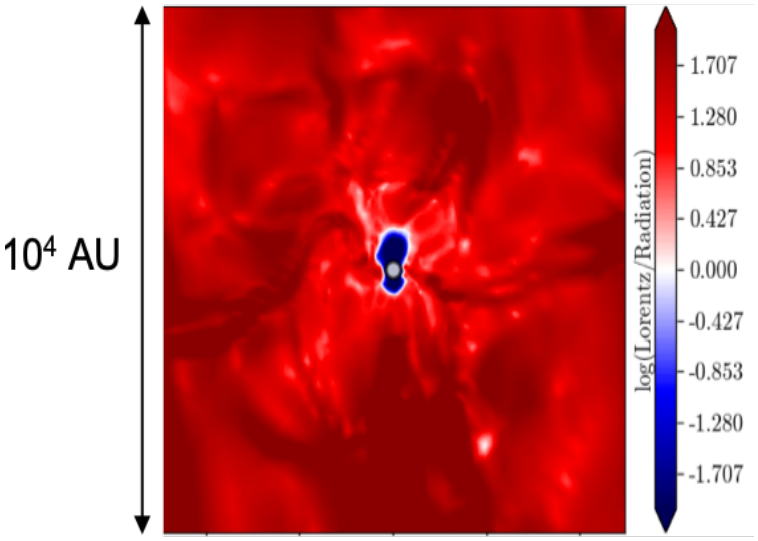
El núcleo de esta tesis ha sido el acoplamiento numérico entre dos métodos de transporte radiativo en el código RAMSES (Teyssier, 2002) y su validación a través de pruebas referentes de transporte. Seguidamente, hemos aplicado este método en un contexto de hidrodinámica radiativa de un colapso de núcleo preestelar masivo. Hemos demostrado que la fuerza de radiación mejora, con respecto a los métodos empleados previamente, terminando con la formación de cavidades radiativas mayores y de acreción menor. Lo más importante es que hemos probado la presencia y acreción a través de inestabilidades radiativas Rayleigh-Taylor en el borde de estas cavidades, cuya existencia era un debate activo en la comunidad. Hemos demostrado que su ausencia en nuestras simulaciones tiene un origen físico, no numérico.

En un proyecto en curso efectuado con la colaboración de A. Oliva y R. Kuiper (Universidad de Tubinga, Alemania) hemos realizado un estudio comparativo de nuestros respectivos códigos en lo que concierne a la modelización de la fragmentación de discos de acreción y la subsiguiente formación de sistemas estelares múltiples. Mediante el uso de un plano cartesiano (en lugar de su plano esférico), nuestros resultados muestran la formación de un sistema binario o triple, mientras que ellos obtenían una única estrella. Cuando un sistema múltiple está suficientemente dominado en masa por un único objeto, nuestros códigos muestran una concordancia correcta en el perfil del disco de rotación y la estructura de temperatura.

Por último, hemos dirigido simulaciones originales de núcleos turbulentos magnéticos con difusión ambipolar y el recientemente implementado método híbrido de transporte radiativo. Hemos identificado la torre magnética como mecanismo de flujo molecular dominante, salvo cuando se encuentra muy próximo a la protoestrella masiva, donde domina la fuerza de radiación. Hemos comparado las propiedades de estos flujos moleculares con los obtenidos de las muestras de observaciones estadísticas. Nuestros resultados tienden a mostrar una buena concordancia, dado que nuestras condiciones iniciales son representativas de los progenitores menos masivos de las estrellas de gran masa, y que la colimación no es intrínseca al flujo molecular, sino que también depende de factores ambientales. Por consiguiente, debe proseguirse la investigación de estas cuestiones. Hemos identificado a los discos de acreción como el único mecanismo de acreción, con tamaños de disco significativamente inferiores a lo predicho por las simulaciones de radiación hidrodinámica, lo que concuerda con los recientes resultados de formaciones de estrellas de baja masa. Asimismo, nos hemos preguntado acerca del área de alineación de los discos con los flujos y los campos magnéticos. Nuestros resultados son coherentes con un área de alineación de discos magnéticos arbitraria y un área de alineación de flujos ligeramente mejorada, siempre que el medio no sea demasiado turbulento.

Tesis (en inglés) próximamente disponible en: http://theses.fr

Fuerza de Lorentz vs. fuerza de radiación en un flujo protoestelar masivo. Su origen es fundamentalmente impulsado magnéticamente.



Interferometría en radio e infrarrojo de objetos estelares y subestelares

Autor: Juan Bautista Climent Oliver
(j.bautista.climent@uv.es)
Tesis doctoral dirigida por:
José Carlos Guirado Puerta
Centro: Universidad de Valencia
Fecha de lectura: 24 de septiembre de 2020

En esta tesis doctoral hemos usado la interferometría a modo de navaja suiza, lo cual nos ha permitido hacer contribuciones relevantes a diversos campos donde una gran resolución angular proporciona una gran ventaja.

El primer objeto que hemos investigado es el sistema triple subestelar VHS 1256-1257. Este sistema es relativamente joven (150-300 millones de años) y se encuentra próximo a nosotros (12,7-17,1 pc). Está compuesto por una binaria con separación de 0,1 arcsec cuyas componentes son dos objetos de tipo espectral M7.5. A 8 arcsec de esta, se encuentra un objeto muy frío con tipo espectral L7. Observamos este sistema usando el VLA (*Very Large Array*) a 8,4 GHz y 1,4 GHz. Además, también hicimos uso del EVN (*European VLBI Network*) a 1,4 GHz durante tres épocas diferentes. Gracias a estas observaciones descubrimos por primera vez radio emisión a 8,4 GHz proveniente de la binaria central VHS 1256-1257 AB. Además, pudimos estimar un índice espectral de acuerdo con un origen no térmico, sincrotrón o girosincrotrón. La falta de detección a 1,4 GHz nos llevó a formular la hipótesis de "auto-absorción", según la cual nuestros datos implicarían campos magnéticos muy fuertes en VHS 1256-1257 AB, con intensidades ~kG (ver figura, panel a). Finalmente, observaciones con el VLA a 26-40 GHz muestran una clara detección coincidente con la posición esperada para la binaria central. El flujo medido parece estar muy por encima del predicho por un modelo de disco de escombros, hipótesis que además no encaja con las no detecciones de observaciones de ALMA banda 7 (275-373 GHz) y NOEMA.

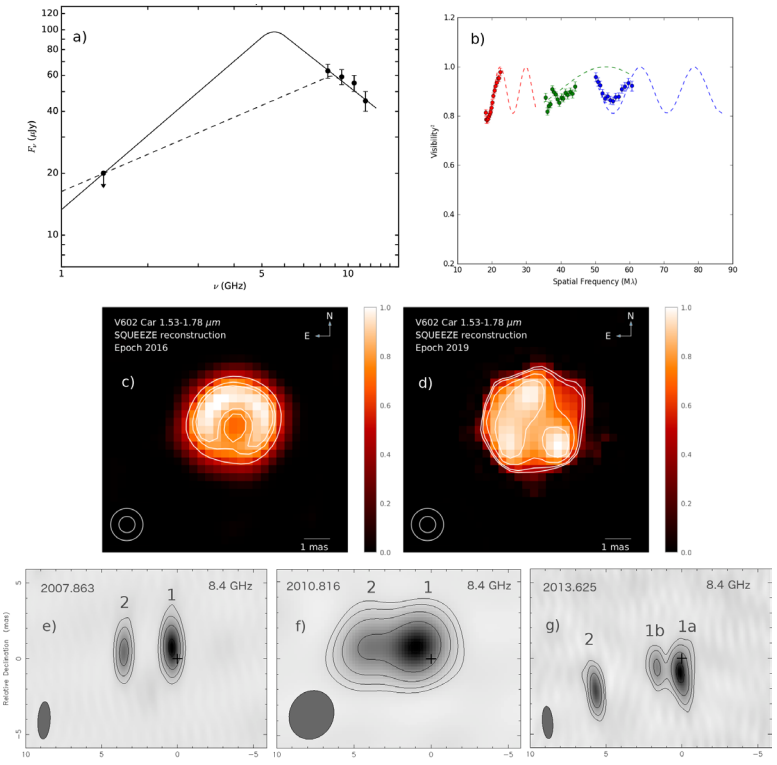
El siguiente objeto que hemos estudiado es AB Dor C, catalogado con tipo espectral M8 y situado a 15 pc. El estudio de la naturaleza de este objeto es especialmente relevante debido a que los modelos teóricos de evolución estelar muestran ciertas dificultades a la hora de predecir características físicas de objetos de baja masa en presecuencia principal. Solamente aquellos objetos bien conocidos y con masas debidamente determinadas pueden ser utilizados para comprobar las predicciones de estos modelos teóricos. AB Dor C es un candidato ideal para ser uno de estos objetos. Sin embargo, existe la hipótesis de que este objeto en realidad es binario. Nuestras observaciones con el instrumento AMBER en el VLTI revelaron que tanto las visibilidades como las clausuras de fase son compatibles con una binaria con cociente de flujo de un 5% (a 2,2 micrómetros) y con una separación de 38 mas (ver figura, panel b). Según los modelos, esto implicaría que AB Dor C estaría formado por una enana marrón cerca del límite de la quema de hidrógeno y por un objeto que se encontraría en la frontera entre las enanas marrones y los exoplanetas. Además comprobamos que esta binariedad aliviaría el desacuerdo visto entre las magnitudes observacionales y las predichas por las relaciones teóricas masa-luminosidad.

La tercera aportación de nuestro trabajo ha sido al campo de las estrellas supergigantes rojas (RSGs). Durante su vida, las RSGs pierden gran cantidad de masa. Sin embargo, los mecanismos físicos que contribuyen y dominan esta gran pérdida son un misterio para la comunidad científica actual. Para arrojar algo de luz sobre los posibles mecanismos y sabiendo que la convección en la fotosfera estelar puede ser un factor crucial a la hora de levitar las capas más externas de la atmósfera de una RSG, observamos la supergigante roja V602 Carinae (V602 Car) con el instrumento PIONIER en el VLTI. Nuestro estudio muestra que las simulaciones predicen correctamente las subestructuras vistas en la superficie de V602 Car en dos épocas diferentes (ver figura, paneles c y d). Sin embargo, no consiguen reproducir las visibilidades y, por tanto, necesitamos la presencia de una componente molecular extendida. Concluimos así que la convección solamente puede que no sea el único proceso relevante a la hora de hacer levitar las atmósferas de las RSGs.

La última aportación se centra en AB Dor A, con tipo espectral K0 y una rotación muy rápida. Solamente en un número limitado de objetos las observaciones de VLBI han conseguido resolver la emisión estelar en radiofrecuencias. Hemos observado este sistema usando el LBA (*Australian Long Baseline Array*) a 1,4 GHz, 8,4 GHz y 22,3 GHz a lo largo de más de una década. Nuestras imágenes a 8,4 GHz muestran una morfología *double core-halo*, similar en las tres épocas observadas a esta frecuencia, y con la emisión extendiéndose a alturas entre 5 y 18 radios estelares (ver figura, paneles e, f y g). Lo que resulta todavía más intrigante es que, en estas imágenes, existe una clara variación temporal de la estructura de la fuente durante el tiempo de observación. Hemos considerado varios modelos que tratan de explicar las características observadas en nuestros mapas, pero nuestras observaciones actuales solamente nos permiten descartar la presencia de una compañera. AB Dor A es, en consecuencia, uno de los pocos objetos donde hemos podido resolver la emisión estelar con un resultado intrigante que necesitará de futuras observaciones.

Tesis disponible en: https://roderic.uv.es/handle/10550/75452

a) Espectro de VHS 1256-1257 AB a partir de las observaciones del VLA. b) Visibilidades de AB Dor C observadas por AMBER. Colores diferentes representan diferentes líneas de base. Los datos observacionales (círculos) ajustan a un sistema binario (líneas discontinuas). c) y d) Reconstrucción de la superficie de V602Car en épocas diferentes. e), f) y g) Imágenes de AB Dor A obtenidas con el LBA mostrando la estructura intrínseca de la fuente.



Subestructura en el espacio de fase de la Galaxia con *Gaia*

Autor: Pau Ramos
Tesis doctoral dirigida por: Teresa Antoja
Centro: Institut de Ciències del Cosmos, Universidad de Barcelona
Fecha de lectura: 25 de septiembre de 2020

En esta tesis hemos explorado y caracterizado en detalle la subestructura cinemática de nuestra Galaxia, la Vía Láctea (VL), mediante la explotación del segundo catálogo de datos del satélite *Gaia* publicado en abril de 2018. Este catálogo nos ha permitido, por primera vez en la historia, acceder a las posiciones, velocidades, distancias y fotometría de más de mil millones de estrellas de la VL. Todo ello medido con la precisión necesaria para acceder a un nuevo nivel de detalle nunca visto y así, tal y como demostramos en este trabajo, avanzar en la comprensión de nuestra Galaxia.

La mera existencia de subestructura cinemática demuestra que nuestra Galaxia está viva. Cualquier acumulación significativa de estrellas en torno a un cierto tipo de órbitas se puede asociar con un evento pasado que todavía hoy perdura a pesar de la rotación diferencial, o bien, con los efectos persistentes en el tiempo de un elemento no axisimétrico como la barra Galáctica. Esto abarca desde cúmulos (abiertos o globulares), galaxias satélites, sistemas en proceso de evaporación y corrientes estelares, así como procesos dinámicos a gran escala tales como las resonancias con la barra o los mismos brazos espirales.

Así pues, hemos explorado el espacio de fases (posiciones y velocidades) completo de seis millones de estrellas del disco Galáctico de forma sistemática y robusta más allá de la vecindad Solar. Con ello hemos revelado de forma clara la existencia de estructuras cinemáticas con distintas morfologías conviviendo en el plano de velocidades, algunas de ellas con forma de arco de energía constante. Al seguir los cambios en morfología y velocidades de estas estructuras a lo largo y ancho de la VL hemos descubierto que no todas presentan los mismos gradientes: algunas tienden a preservar el momento angular mientras que otras la energía. Gracias a estos resultados nos ha sido posible proponer por primera vez una distinción entre las estructuras causadas por la barra y aquellas causadas por perturbaciones externas.

A continuación, con el fin de analizar los más de 700 millones de estrellas lejanas que hay en el catálogo de *Gaia*, diseñamos una estrategia que nos permitiese utilizar una metodología similar a la usada en el disco para la búsqueda de subestructura, pero ahora trasladada de forma eficiente al halo y los confines de la Galaxia. Nuestro método pionero en el uso masivo y paralelizable del archivo *Gaia* (gea.esac.esa.int/archive) nos ha permitido detectar de forma simultánea un gran número de cúmulos globulares, galaxias enanas, así como otros satélites de la VL como las nubes de Magallanes e incluso *ultra faint dwarf* galaxies. Adicionalmente, hemos podido detectar también varias estructuras extendidas en el cielo, las cuales hemos estudiado en detalle en esta tesis por su gran relevancia dentro de la historia de la VL.

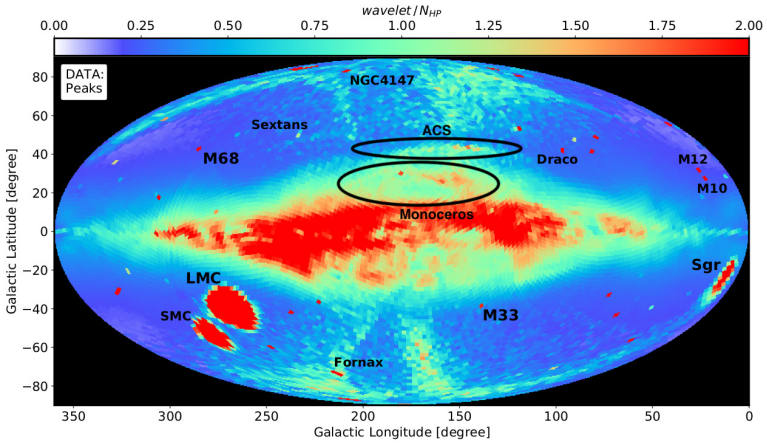
Dos de estas estructuras extensas son el Anticentre Stream (ACS, por sus siglas en inglés) y Monoceros, las cuales hemos aislado y caracterizado a un nivel de detalle sin precedentes. Ambas son estructuras situadas en el anticentro galáctico, inesperadas tanto por su densidad como por su color y su ubicación relativa al disco (respectivamente, a ∼6,5 kpc y ∼4,5 kpc del plano). Gracias a nuestro estudio de su morfología y poblaciones estelares, concluimos que antaño las estrellas que ahora forman ACS y Monoceros eran parte del disco, que sin embargo fueron "levantadas" por la prolongada interacción gravitatoria con la galaxia enana de Sagitario.

Nuestros datos también nos han permitido elaborar dos muestras distintas de, precisamente, la corriente estelar de Sagitario. Esto ha dado lugar a la primera determinación empírica precisa de los movimientos propios a lo largo de todo el corriente estelar, así como de su dispersión de velocidades gracias a la combinación de distancias y movimientos propios. Como resultado de la tesis, demostramos que los datos de la galaxia de Sagitario no son consistentes con los modelos actuales, requiriéndose otros elementos como las nubes de Magallanes para explicar las observaciones.

Este tipo de estudios no habían sido posibles hasta ahora por la falta de catálogos de todo el cielo y con la suficiente estadística. Esta tesis ha sido pionera tanto por su metodología como por su enfoque, tratando de unificar tres aspectos de nuestra Galaxia generalmente tratados como independientes pero que ahora los resultados nos obligan a interpretar como una sola pieza de la historia reciente de la VL: la subestructura en el disco, las estructuras del anticentro Galáctico y la corriente estelar de Sagitario.

Con este trabajo, se ha evidenciado la necesidad de avanzar en el modelaje dinámico de la Galaxia para poder tratar rigurosamente el acoplamiento entre distintos mecanismos dinámicos y desarrollar un marco teórico que nos permita reconstruir la evolución del potencial gravitatorio y la historia reciente de nuestra Galaxia a partir de nuestros resultados.

Tesis disponible en: https://www.tdx.cat/handle/10803/670916



Proyección Mollweide en coordenadas galácticas de la intensidad relativa de nuestras detecciones cinemáticas en el halo y los confines de la VL. Solo se muestra la estructura que domina el espacio cinemático a cada HEALpix del cielo. Con ello, podemos aislar decenas de cúmulos globulares, galaxias satélites, la corriente estelar de Sagitario y, en el centro de la figura, ACS y Monoceros.

Censo de estrellas Herbig Ae/Be: nuevos candidatos y análisis desde la perspectiva de *Gaia*

Autor: Miguel Vioque (miguel.vioque@alma.cl)
Tesis doctoral dirigida por:
René D. Oudmaijer, Ricardo Pérez-Martínez y Deborah Baines
Centro: University of Leeds/Isdefe-European Space Astronomy Centre (ESAC)
Fecha de lectura: 19 de octubre de 2020

Las estrellas presecuencia principal Herbig Ae/Be, canónicamente definidas como aquellas con masas $2M_{\odot} \leq M \leq 10M_{\odot}$, son cruciales para entender las diferencias entre los mecanismos de formación estelar de alta y baja masa. Históricamente, el estudio de las propiedades generales de estas estrellas ha estado obstaculizado por la falta de una muestra homogénea y bien definida. Muy pocas estrellas Herbig Ae/Be eran conocidas y estas habían sido mayormente descubiertas de forma azarosa. Como consecuencia, muchos de los estudios que tratan la formación estelar de alta masa sufren de importantes sesgos y falta de completitud.

En esta tesis hemos estudiado las propiedades generales de las 252 estrellas Herbig Ae/Be con paralajes en *Gaia* DR2 que eran conocidas o que habían sido propuestas al comienzo de esta tesis doctoral (Vioque et al. 2018, A&A, 620, A128). Encontramos que las estrellas más masivas de esta muestra tienen un exceso infrarrojo y una variabilidad óptica mucho menor que sus homólogas de menor masa, estando el límite entre ambos grupos alrededor de $7M_{\odot}$. Para explicar esta diferencia se propone la existencia de diferentes mecanismos de dispersión de discos (principalmente de dispersión de polvo), o mecanismos que actúen de forma diferente en cada intervalo de masas. El indicador de variabilidad fotométrica desarrollado en este trabajo muestra que aproximadamente el 25% de todas las estrellas Herbig Ae/Be son fuertemente variables en el óptico. Proporcionamos evidencia de que esta variabilidad es en la mayoría de casos debida a estructuras asimétricas del disco protoplanetario visto de costado.

Usando esta muestra bien caracterizada de estrellas Herbig Ae/Be como conjunto de entrenamiento, hemos construido un catálogo homogéneo y bien definido con 8470 nuevas estrellas presecuencia principal. Para lograr este fin hemos usado un algoritmo *machine learning* expresamente diseñado para este propósito. Al menos 1361 de estas estrellas son potencialmente nuevas candidatas a estrella Herbig Ae/Be dadas sus posiciones en el diagrama de Hertzsprung-Russell. Esto aumenta el número de objetos conocidos de la clase en un orden de magnitud (Vioque et al. 2020, A&A, 638, A21). Las técnicas estándares no son eficaces identificando estrellas Herbig Ae/Be por su similitud con las estrellas Be clásicas, con las cuales comparten muchas características. Al centrarnos en separar eficazmente estos dos tipos de fuentes, nuestro algoritmo también ha producido un catálogo de 693 nuevas candidatas a estrella Be clásicas.

Por último, discutimos los resultados de observaciones espectroscópicas independientes realizadas para una fracción de los nuevos catálogos. Un total de 120 nuevas estrellas Herbig Ae/Be y 14 nuevas estrellas Be clásicas fue observado. Estas observaciones independientes confirman aún más la calidad y precisión de la categorización realizada en esta tesis (ver figura). Este trabajo concluye con un análisis general de las propiedades de los nuevos catálogos que valida los resultados y las conclusiones obtenidas para el conjunto de estrellas Herbig Ae/Be previamente conocidas.

Tesis disponible en: http://etheses.whiterose.ac.uk/27872/

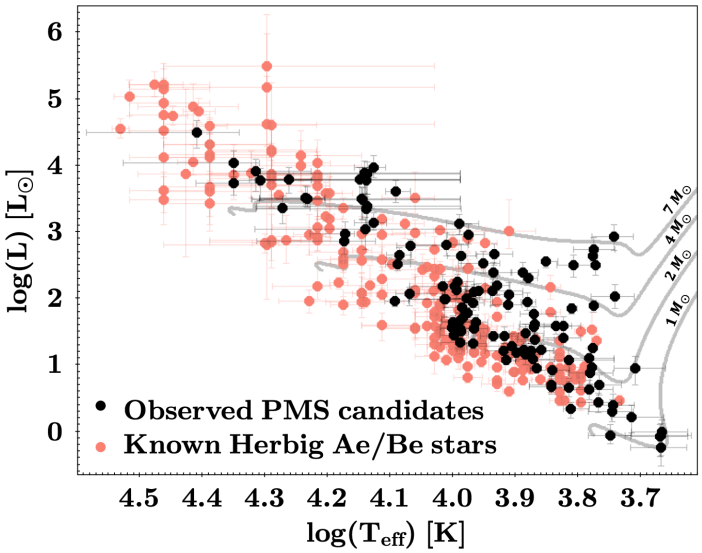


Diagrama de Hertzsprung-Russell. En rojo se muestran las estrellas Herbig Ae/Be conocidas al principio de esta tesis doctoral con una buena solución astrométrica en *Gaia* DR2 (218). En negro se muestran las nuevas estrellas Herbig Ae/Be identificadas espectroscópicamente en esta tesis (120 de los 145 candidatos observados del catálogo general que contiene 8470 fuentes). Nótese la distribución similar en masa, temperatura y luminosidad entre ambos grupos. Las trazas evolutivas de 1, 2, 4 y $7M_{\odot}$ fueron tomadas de Marigo et al. (2017, ApJ, 835, 77).

Formación y evolución de cúmulos globulares en un entorno cosmológico

Autora: Marta Reina-Campos
Tesis doctoral dirigida por:
J. M. Diederik Kruijssen
Centro: Astronomisches Rechen-Institut - Zentrum fuer Astronomie, Ruprecht-Karls-Universitaet of Heidelberg
Fecha de lectura: 22 de octubre de 2020

Los cúmulos estelares son grupos de estrellas ligadas gravitacionalmente y pueden ser encontrados en una gran variedad de entornos galácticos. Se observan tanto cúmulos jóvenes que se están formando en los discos gaseosos de las galaxias Antena, como poblaciones de cúmulos globulares viejos que, en la Vía Láctea, se encuentran preferentemente en el halo estelar. Esto nos sugiere que la evolución de estos objetos tan curiosos puede estar ligada a la evolución de su galaxia anfitriona.

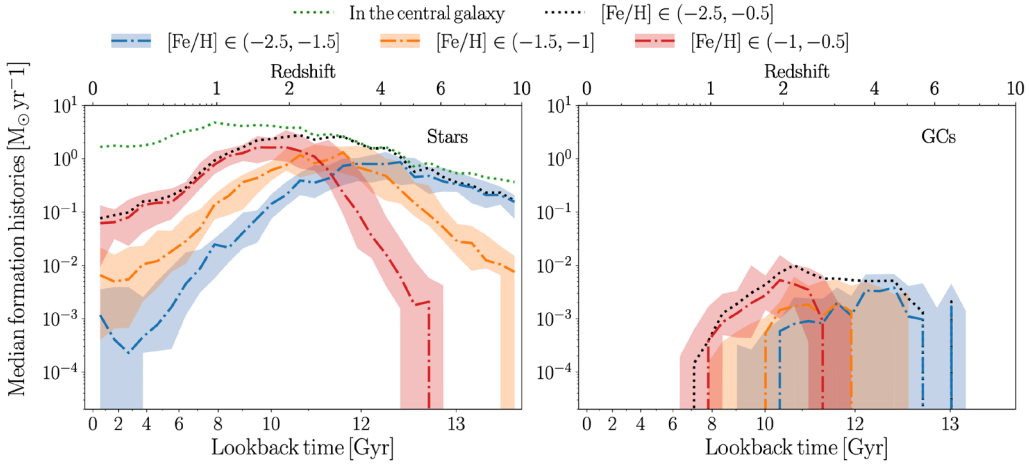
Esta tesis explora la formación y evolución de cúmulos estelares en un entorno cosmológico. Para ello, primero desarrollamos modelos analíticos que describen cómo el entorno galáctico es capaz de moldear la demografía de estos objetos. El primer modelo permite determinar la masa máxima en la formación de un cúmulo estelar, partiendo de una galaxia en equilibrio hidrostático con rotación diferencial. En este modelo encontramos que, para poder reproducir los datos observacionales, resulta crucial incluir la posible destrucción de la nube de gas debido al feedback estelar. El segundo modelo que exploramos describe la cantidad de masa perdida por un cúmulo debido a choques de marea con grandes nubes de gas. Para ello, por primera vez tenemos en cuenta que choques sucesivos desde un mismo eje alinean las velocidades de las estrellas, y esto facilita que los cúmulos pierdan masa más rápido que si los choques son aleatorios.
En la segunda parte de esta tesis usamos un conjunto de simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas del proyecto E-MOSAICS para estudiar en detalle la formación y evolución de estos objetos a la par que se forman y evolucionan sus galaxias anfitrionas. Con estas simulaciones, que representan galaxias con masas parecidas a la Vía Láctea, podemos estudiar cuándo se forman los cúmulos estelares y cuánta masa pierden durante casi 14 giga años de evolución. Los cúmulos globulares presentes en estas simulaciones se formaron principalmente hace entre 8 y 13 giga años, con los objetos con menor cantidad de metales formándose primero. Además, encontramos que los cúmulos más grandes eran solo entre dos y cinco veces más masivos en el momento en el que se formaron que actualmente. Esto impone restricciones a modelos teóricos que intentan explicar el origen de las diferentes poblaciones estelares que han sido observadas de manera ubicua en multitud de cúmulos globulares. Por último, usamos estas simulaciones también para estimar la contribución de la masa de cúmulos estelares al crecimiento de halos estelares.

Finalmente, en la tercera parte de esta tesis describimos los modelos numéricos incluidos en el proyecto EMP-Pathfinder. Este representa la nueva generación de simulaciones cosmológicas capaces de seguir la coformación y evolución de galaxias con sus poblaciones de cúmulos estelares en un entorno cósmico, a la par que describe la componente fría y densa del gas interestelar. Incluir esta componente del gas es esencial para poder modelar las nubes frías y densas donde se forman los cúmulos más masivos, y que dominan la evolución de los cúmulos debido a los choques de marea que generan.

De todos estos estudios se desprende que los cúmulos estelares están estrechamente ligados a sus entornos cósmicos, lo que implica que es necesario describir en detalle casi 14 giga años de evolución para entender las poblaciones de cúmulos que se pueden observar en el Universo Local.

Tesis disponible en: https://katalog.ub.uni-heidelberg.de/

Historia de formación estelar promedia (izquierda) e historia de formación de cúmulos globulares promedia (derecha) usando diferentes cortes en metalicidad en las 25 simulaciones cosmológicas del proyecto E-MOSAICS (Reina-Campos et al. 2019). Los cúmulos globulares se forman principalmente hace entre 8 y 13 giga años, con los objetos con menor cantidad de metales formándose primero.



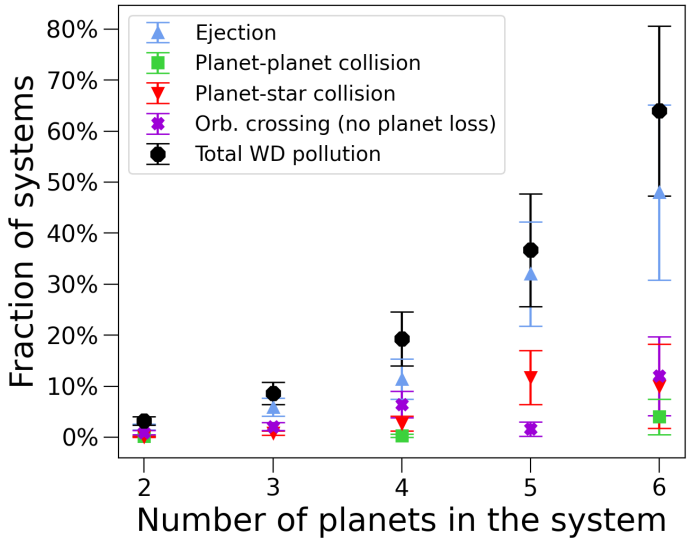
Acerca del origen de la contaminación por metales en las atmósferas de enanas blancas

Autor: Raúl Felipe Maldonado Sánchez
Tesis doctoral dirigida por: Miguel Chávez, Eva Villaver y Emanuele Bertone
Centro: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Fecha de lectura: 9 de diciembre de 2020

Esta tesis tiene el objetivo de entender el origen de la contaminación atmosférica por metales observada en el 25-50% de enanas blancas. Debido a que diversas evidencias observacionales respaldan la acreción de cuerpos rocosos como el mecanismo más aceptado para explicar este fenómeno y sabiendo que la evolución estelar naturalmente previene la existencia de material a pocos radios solares de la enana blanca, el paradigma actual involucra a los planetas que sobreviven la evolución de la estrella central y los cuerpos dispersados a órbitas cercanas de la enana blanca como los responsables de producir la contaminación atmosférica en la enana blanca. Tomando en cuenta la hipótesis de que los planetas sobreviven las diferentes etapas evolutivas de su estrella central orbitando a distancias lejanas y que la interacción dinámica entre ellos produce procesos de dispersión planeta-planeta que mandan cuerpos a las proximidades de la enana blanca, en donde las fuerzas de marea de la estrella pueden destrozarlos y así aumentar la probabilidad de que los escombros caigan a la atmósfera estelar, en esta tesis se simulan 5830 sistemas planetarios con dos y más planetas, cuyas arquitecturas orbitales se basan en los cientos de sistemas planetarios de múltiples planetas detectados orbitando estrellas de secuencia principal, escalados de una forma que su dinámica original se mantiene. Con este procedimiento restringimos y al mismo tiempo expandimos el espacio de parámetros físico y orbital de las configuraciones planetarias respecto a trabajos previos en la misma línea de investigación. Esta es la primera vez que se realizan simulaciones dinámicas restringidas por parámetros derivados de los sistemas observados. Las simulaciones dinámicas se han realizado mediante el uso de una versión actualizada del paquete de N-cuerpos MERCURY, que toma en cuenta los cambios de masa y radio de la estrella central en las diferentes etapas de la evolución estelar. Cada sistema se ha simulado desde la secuencia principal hasta la fase de enana blanca por 10 Gyr.

Como resultado principal, hemos encontrado que el 3,2% y 8,6% de simulaciones dinámicamente activas (con pérdidas de planetas, cruce de órbitas y/o dispersión orbital) en la fase de enana blanca con dos y tres planetas, respectivamente, no pueden reproducir el 25-50% de enanas blancas contaminadas por metales. Sin embargo, la fracción de sistemas inestables con cuatro, cinco y seis planetas (19,2%, 36,7% y 64%, respectivamente) sí reproduce la prevalencia observada de enanas blancas contaminadas. Por lo tanto, a mayor multiplicidad planetaria, mayor es la probabilidad de tener una inestabilidad dinámica capaz de lanzar planetas o planetesimales a distancias de pocos radios solares de la enana blanca (ver figura). También encontramos que sistemas con alta multiplicidad de planetas producen eventos de dispersión planeta-planeta que lanzan un número no despreciable de planetas (en el rango de masas de súpertierra a Saturno) a distancias ≤ 10 radios Roche o incluso cruzan el radio de Roche de la enana blanca hasta que algunos de ellos colisionan con la superficie estelar. La alta multiplicidad de planetas explica naturalmente la existencia de planetas con órbitas muy cercanas a la enana blanca, como el planeta joviano recientemente descubierto WD 1856 b, que tiene una órbita de 1,4 días, sin la necesidad de invocar mecanismos adicionales, tales como el von Zeipel-Lidov-Kozai o la fase de envolvente común. Entre otros resultados, tenemos que las inestabilidades dinámicas, tales como pérdidas planetarias o cruce de órbitas en los sistemas con múltiples planetas, ocurren en mayor número durante el primer Gyr del tiempo de enfriamiento de la enana blanca, y este número decrece a medida que la enana blanca envejece. Además, encontramos que simulaciones teniendo al menos un planeta gigante ($M > 100\ M_{\oplus}$) tienden a desestabilizarse más rápido que las simulaciones con planetas más pequeños ($M \leq 100\ M_{\oplus}$), las cuales presentan inestabilidades dinámicas en escalas de Gyr. Finalmente, obtenemos que la mayoría de las simulaciones inestables en la fase de enana blanca pierden planetas mediante eyecciones planetarias. Sin embargo, en sistemas con alta multiplicidad planetaria, los planetas remanentes en el sistema permanecen dinámicamente activos, aún después de la eyección planetaria, produciendo múltiples cruces de órbitas y dispersión orbital, eventos dinámicos capaces de desestabilizar cuerpos menores como planetesimales presentes en el sistema.

Los resultados derivados de esta tesis han sido publicados en tres artículos arbitrados (Maldonado et al., 2020a, MNRAS, 497, 4091; Maldonado et al., 2020b, MNRAS, 499, 1854; Maldonado et al., 2021, MNRAS, 501, L43).



Número relativo de sistemas con múltiples planetas con respecto al número total de simulaciones que pierden planetas por inestabilidades dinámicas así como simulaciones con cruce de órbitas que no pierden ningún planeta durante 10 Gyr. Además, presentamos el número total de simulaciones que pueden contribuir a la contaminación de enanas blancas. Las barras de error corresponden a la desviación estándar del método de resampleo Bootstrap. Cada tipo de inestabilidad es marcada con diferente símbolo y color (Maldonado et al. 2021).

Actividad estelar y exoplanetas de enanas M con espectroscopía en el visible y el infrarrojo cercano de CARMENES

Autora: Marina Lafarga Magro (lafarga@ice.cat)
Tesis doctoral dirigida por: Ignasi Ribas Canudas
Centro: IUniversitat Autònoma de Barcelona, Institut de Ciències de l'Espai (CSIC, IEEC)
Fecha de lectura: 10 de diciembre de 2020

Después del descubrimiento de los primeros exoplanetas hace unas tres décadas, la detección y caracterización de compañeros planetarios se ha convertido en un tema de investigación prominente, especialmente la búsqueda de planetas parecidos a la Tierra, cuerpos rocosos que orbitan en la zona habitable (HZ) de sus estrellas huéspedes. Uno de los principales métodos utilizados para encontrar y caracterizar exoplanetas es la técnica de la espectroscopía Doppler o velocidad radial (RV), basada en el uso de espectros estelares para medir cambios periódicos en la RV de una estrella causados por la atracción gravitatoria de un exoplaneta en órbita.

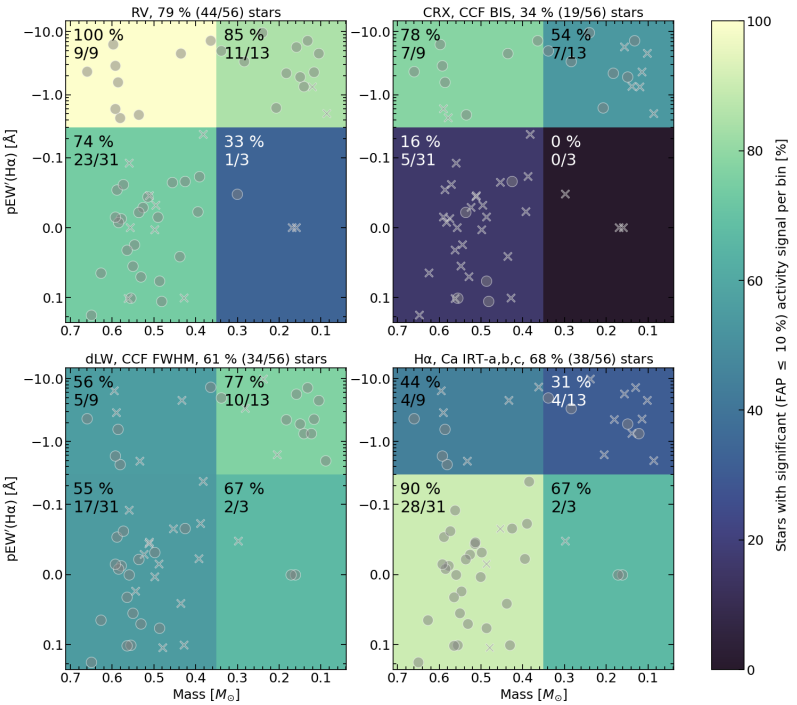
Actualmente, la variabilidad intrínseca de las estrellas huéspedes es el principal reto en el estudio de exoplanetas. Las estrellas no son cuerpos invariables ni homogéneos, sino que presentan variabilidad en distintas escalas de tiempo. La más relevante es la actividad magnética estelar, que incluye fenómenos como manchas o fáculas que aparecen en la superficie de la estrella y están moduladas por su rotación. Estos fenómenos distorsionan los espectros estelares, introduciendo sesgos en las RVs suficientemente grandes como para esconder o hasta imitar la señal causada por un planeta. Por lo tanto, para continuar detectando y estudiando exoplanetas de baja masa, una mejor comprensión de estos fenómenos estelares y sus efectos en nuestras observaciones es clave.

Esta tesis se centra en el estudio de los efectos de la actividad estelar en observaciones espectroscópicas de estrellas frías obtenidas con el instrumento CARMENES. CARMENES es un espectrógrafo de alta resolución capaz de observar en el rango de longitudes de onda visible e infrarrojo cercano. Está realizando un estudio de más de 300 enanas M, las estrellas con menor masa de la secuencia principal, con el objetivo primordial de detectar exoplanetas pequeños.

En primer lugar, hemos desarrollado un código que implementa el método de la función de correlación cruzada (CCF) para medir RVs e indicadores de actividad estelar en observaciones de alta resolución, y lo hemos aplicado a los datos de CARMENES. Este método usa máscaras binarias ponderadas, un *template* estelar simplificado construido seleccionando líneas espectrales. Hemos creado varias máscaras en función del subtipo espectral y de la velocidad de rotación de la estrella a analizar.

A continuación, hemos utilizado los indicadores de actividad derivados de la CCF, junto con otros indicadores de actividad espectroscópicos, para analizar sus variaciones temporales en una muestra de casi cien enanas M de varias masas y niveles de actividad. Aproximadamente la mitad de las estrellas analizadas muestran RVs con señales de actividad claros. Nuestros resultados muestran que distintos indicadores son sensibles a la actividad de forma diferente según las características de la estrella: indicadores cromosféricos son más útiles para estrellas de baja actividad, indicadores relacionados con el cambio de RV con la longitud de onda funcionan mejor para estrellas más activas, y otros indicadores relacionados con el cambio de anchura de las líneas fotosféricas proporcionan resultados similares en todo tipo de estrellas, pero son especialmente útiles para las más activas y de menor masa (ver figura).

Finalmente, hemos analizado los efectos de la actividad sobre líneas de absorción individuales presentes en el espectro de estrellas activas. Estudiando las correlaciones entre las RVs de las líneas individuales y los indicadores de actividad, podemos clasificar la líneas observadas según su sensibilidad a la actividad. Esto nos permite seleccionar líneas afectada de forma distinta por la actividad y usarlas para volver a calcular RVs. De esta forma obtenemos RVs para las cuales mitigamos o incrementamos el señal de actividad en diversos grados. También observamos que las misma líneas en distintas estrellas muestran diferente sensibilidad a la actividad.



Número de estrellas que muestran señal de actividad en distintos indicadores espectroscópicos: velocidades radiales (RV, panel superior izquierda), indicadores relacionados con la variación de RV con la longitud de onda (CRX, CCF BIS, panel superior derecha), indicadores relacionados con el cambio de anchura de las líneas fotosféricas (dLW, CCF FWHM, panel inferior izquierda) e indicadores cromosféricos (Halpha, Ca IRT, panel inferior derecha). Cada panel muestra el nivel de actividad medio de las estrellas (medido a partir de su pEWHalpha, eje y, de menos a más activas) en función de su masa (eje x, de mayor a menor masa). Las estrellas están divididas en cuatro grupos, dependiendo de su nivel de actividad medio y masa. Los colores de cada grupo indican el número de estrellas (en porcentaje) que muestran una señal periódica significativa (FAP menor o igual a 10 %) relacionada con la actividad estelar. Los números de cada grupo muestran este porcentaje, junto con el número absoluto de estrellas con detección de actividad. El título de cada panel muestra los mismos números, pero para todas las estrellas de la muestra. Los puntos grises indican la posición de las estrellas de la muestra en función de su nivel de actividad medio y su masa (los círculos indican las estrellas para las cuales detectamos alguna señal de actividad y las cruces, las que no muestran ninguna señal)..

COSMIC DANCE: un censo completo de regiones de formación estelar cercanas

Autora: Núria Miret Roig
(nuria.miret.roig@univie.ac.at)
Tesis doctoral dirigida por: Hervé Bouy
Centro: Universidad de Burdeos
Fecha de lectura: 17 de diciembre de 2020

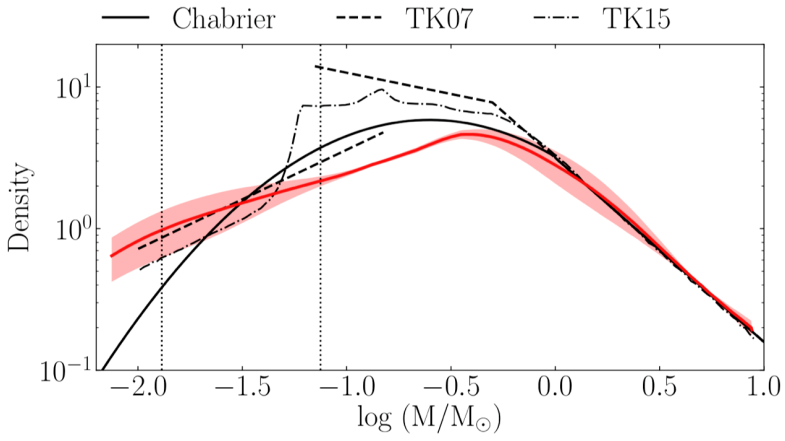
Comprender cómo se forman las estrellas y los planetas es una de las cuestiones fundamentales en astronomía. Actualmente se sabe que la mayoría de las estrellas se forman en grupos y el principal mecanismo de formación es el colapso gravitatorio de *cores* protoestelares. Sin embargo, la formación de objetos subestelares, enanas marrones y planetas errantes (planetas no ligados gravitacionalmente a otro cuerpo celeste) es un importante tema de debate actualmente. Distintos mecanismos se han propuesto para explicar la formación de enanas marrones y planetas errantes, por ejemplo, colapso gravitatorio (parecido a las estrellas), eyección de discos (debido a inestabilidades dinámicas) y fotoevaporación (en la cercanía de estrellas muy masivas OB). Sin embargo, la contribución de cada uno de estos mecanismos aún no está establecida.

El objetivo principal de esta tesis es determinar la función de masa, es decir, la densidad de objetos en función de la masa, en distintas regiones para constreñir las teorías de formación estelar. Hemos usado los datos del catálogo *Gaia* DR2 junto con observaciones desde Tierra del proyecto COSMIC DANCE para buscar miembros con alta probabilidad de pertenencia a asociaciones y cúmulos jóvenes. Hemos estudiado el cúmulo IC4665 (30 Ma) y la región de Upper Scorpius (USC) y ρ Ophiuchi (ρ Oph; 1-10 Ma), donde hemos encontrado grandes poblaciones de objetos subestelares que exceden las predicciones de las teorías de colapso gravitatorio. En USC, donde la sensibilidad es superior, hemos podido estimar que la fracción de planetas errantes formados debido a la eyección de sistemas planetarios es parecida a la fracción de planetas que se podrían haber formado debido al colapso gravitatorio.

La edad es un parámetro fundamental para estudiar la formación y evolución de las estrellas, así como para obtener masas precisas. En esta tesis, hemos actualizado y mejorado una estrategia para estudiar la edad dinámica de asociaciones jóvenes basada en el análisis de órbitas trazadas atrás en el tiempo asumiendo un potencial galáctico. Hemos determinado la edad de la asociación β Pictoris, 18,5±2,0 Ma, resultado muy importante para los estudios de planetas y discos alrededor de miembros de la asociación. Esta herramienta está lista para ser aplicada en el futuro a otras regiones como USC y ρ Oph.

Los miembros que hemos encontrado en IC4665, USC y ρ Oph son excelentes candidatos para estudios de discos, exoplanetas, caracterización de enanas marrones y planetas errantes. En esta tesis, hemos presentado un método basado en el estudio de la fotometría infrarroja para identificar discos. Combinando los datos de WISE y *Spitzer*, hemos encontrado seis discos en IC4665 para ser estudiados con profundidad con ALMA o el JWST en el futuro. Las herramientas desarrolladas están listas para ser empleadas en otras regiones como USC y ρ Oph donde esperamos encontrar más discos y podremos estudiar la presencia de discos en enanas marrones y planetas errantes.

Tesis disponible en http://www.theses.fr/2020BORD0327



Función de masa de la región de USC y ρ Oph (1-10 Ma) comparada con los modelos analíticos de Chabrier (2005), Thies and Kroupa (2007) y Thies et al. (2015). Las líneas verticales punteadas indican la frontera entre (de izquierda a derecha) planetas, enanas marrones y estrellas, asumiendo una edad de 5 Ma. Las funciones están normalizadas en el rango de masa (>1 $M_\odot$) donde todas tienen una pendiente de Salpeter. El pico de nuestra función de masa observacional está en 0,3-0,5 $M_\odot$, parecido a la masa característica propuesta por modelos analíticos (0,25 $M_\odot$, Chabrier 2005). En el rango de masas subestelares, nuestra función de masa observacional tiene una pendiente compatible con los modelos que consideran varios mecanismos de formación (Thies and Kroupa 2007 y Thies et al. 2015) mientras que los modelos que únicamente consideran la formación mediante core-collapse (Chabrier 2005) subestiman la fracción de planetas errantes encontrados por nuestras observaciones. Nuestro resultado, por tanto, indica que los objectos subestelares no se forman únicamente mediante core-collapse sino que hay otros mecanismos en juego como la eyección de sistemas planetarios.



Anochecer en el Allen Telescope Array, uno de los SKA pathfinder. Créditos: SETI Institute.

Sociedad Española de Astronomía

Universidad de Barcelona,
Facultad de Física
Av. Martí Franquès, 1
Barcelona 08028

Tfno: +34 91 394 5249
Fax: +34 91 394 5051