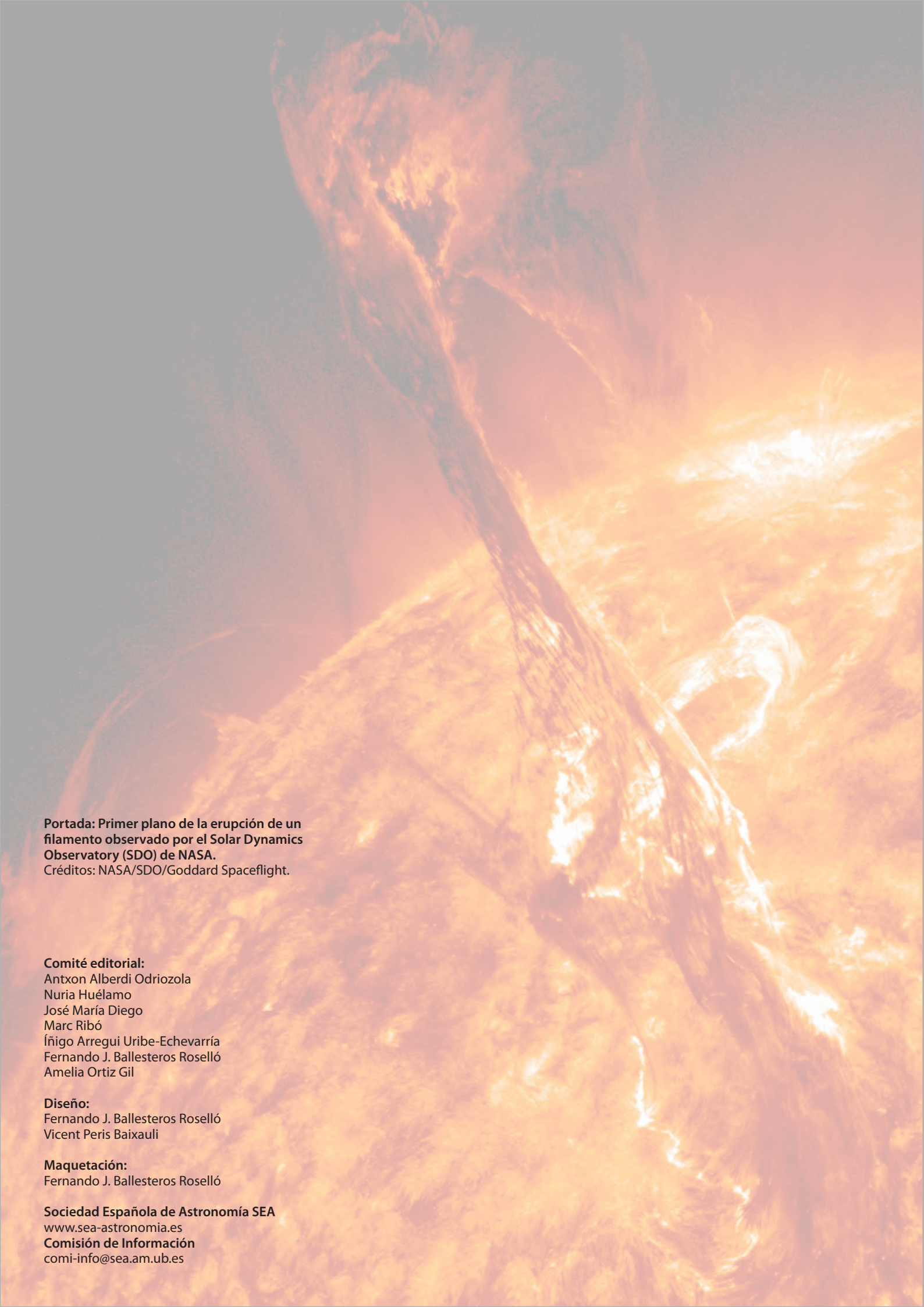




SEA

Sociedad Española de Astronomía

38 Verano 2018



Portada: Primer plano de la erupción de un filamento observado por el Solar Dynamics Observatory (SDO) de NASA.

Créditos: NASA/SDO/Goddard Spaceflight.

Comité editorial:

Antxon Alberdi Odriozola
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Íñigo Arregui Uribe-Echevarría
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

Diseño:

Fernando J. Ballesteros Roselló
Vicent Peris Baixauli

Maquetación:

Fernando J. Ballesteros Roselló

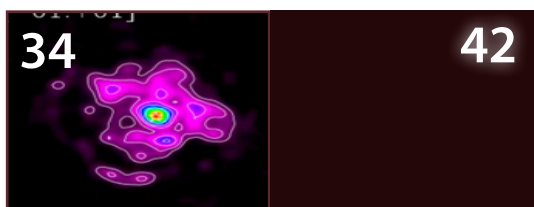
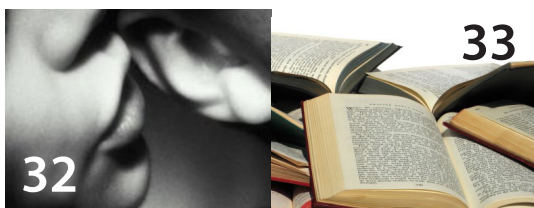
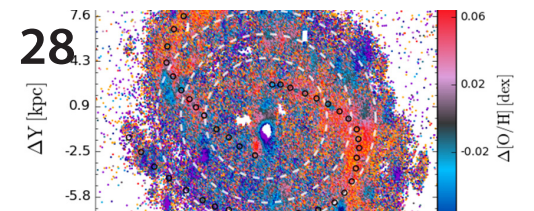
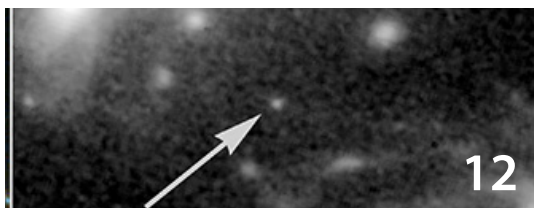
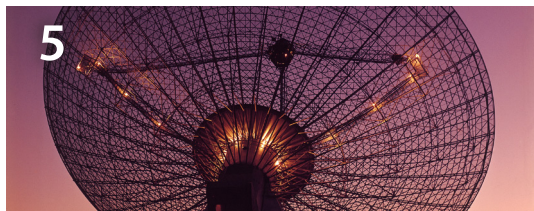
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

Comisión de Información

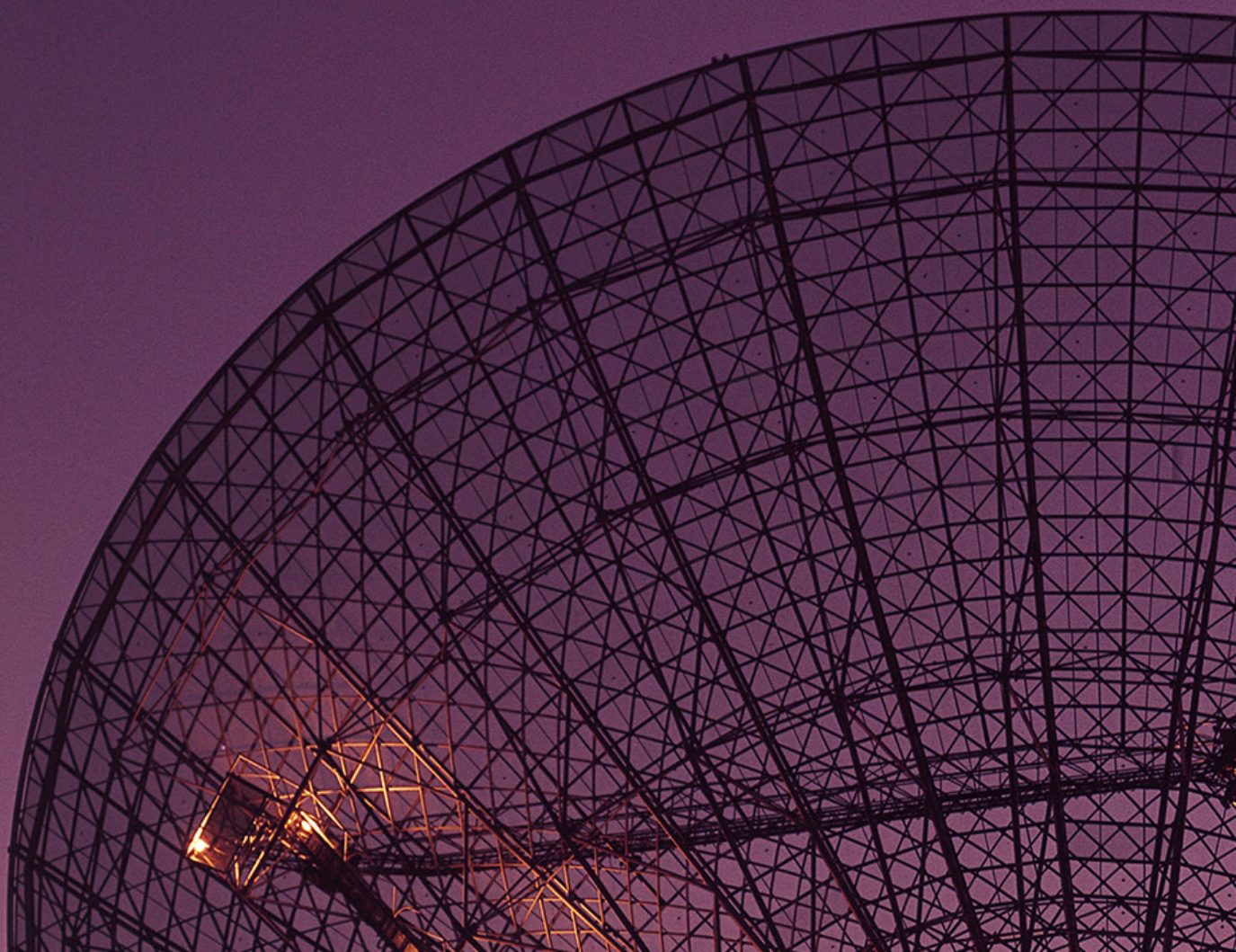
comi-info@sea.am.ub.es

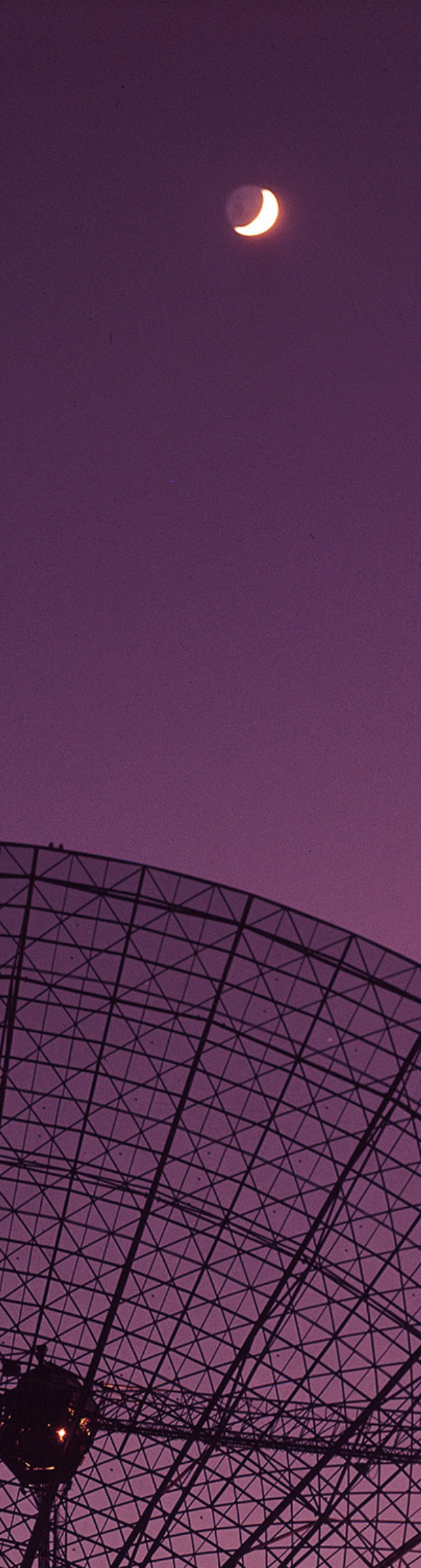
CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 España, país miembro de SKA
- 8 CTA: Estado actual
- 12 Ícaro. Una estrella con buena estrella
- 16 Resultados de la ocultación estelar por el planeta enano Haumea el 21 de Enero de 2017
- 28 Caracterizando la distribución de oxígeno del gas ionizado en galaxias espirales
- 32 Ecos de (la) Sociedad
- 33 Libros
- 34 Tesis doctorales
- 42 Obituario

Radiotelescopio de Parkes
escuchando la Luna durante
las maniobras del Apollo XI.
Fotografía tomada en 1969,
cortesía de CSIRO.





EDITORIAL

Coincide la publicación de este Boletín con una gran noticia para la Astronomía española: el 19 de junio nuestro nuevo “Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades” y la oficina central del “Square Kilometer Array (SKA)” han anunciado la adhesión de España a SKA. SKA será una de las grandes infraestructuras internacionales de investigación en los próximos años, y España será parte de ella. Lourdes Verdes-Montenegro, coordinadora nacional de SKA, hace en el Boletín una breve descripción de SKA y de los grandes retos que abordará.

Recoge también este Boletín dos artículos sobre resultados científicos recientes de gran impacto. Por un lado, dentro de nuestro Sistema Solar, José Luis Ortiz presenta la detección de un anillo en torno al planeta enano Haumea. Haumea es muy peculiar, con una forma extremadamente alargada y una rotación muy rápida. A través de una ocultación estelar, se ha podido determinar la existencia de un anillo ecuatorial, de origen no bien definido. Este resultado publicado en Nature le ha valido a Ortiz el Premio “Vanguardia de la Ciencia 2018”, otorgado por el diario “La Vanguardia”. Es la primera vez en su historia que se otorga a un astrónomo. Por otro lado, yéndonos más lejos en el Universo, Chema Diego y sus colaboradores han podido detectar la estrella más distante jamás observada ($z=1.49$). Pudo ser observada gracias a una microlente que estaba muy cerca de la curva crítica de un cúmulo de galaxias. El efecto combinado cúmulo+microlente ha resultado en una magnificación de un factor de al menos 2000 (es decir al menos 8 magnitudes). La estrella es muy brillante y muy caliente, y ha podido detectarse gracias a la utilización de GTC. Presentamos también los detalles sobre la instalación del prototipo de los “Large Size Telescope (LST)” de CTA Norte, junto a los dos telescopios MAGIC en el Roque de los Muchachos. Si todo va según lo previsto, el primer LST estará observando el cielo de muy altas energías (VHE) en 2019. Incluimos también una reseña del trabajo doctoral de Laura Sánchez-Menguiano, recientemente ganadora del “Premio Tesis SEA” de 2018.

Estamos ya a menos de un mes de la celebración de la “Reunión Científica de la SEA” en Salamanca. Será una excelente oportunidad para tener una visión global de la Astrofísica que hacemos en España. Allí nos veremos. Feliz verano para todos.

Antxon Alberdi
*Instituto de Astrofísica
de Andalucía (CSIC)*

ESPAÑA, PAÍS MIEMBRO DE SKA

España se ha convertido en el undécimo miembro de la Organización del Square Kilometre Array (SKA), formada hasta ahora por Australia, Canadá, China, India, Italia, Nueva Zelanda, los Países Bajos, Reino Unido, Sudáfrica y Suecia. El proyecto reúne a más de mil científicos e ingenieros de unos veinte países y 270 instituciones, con objeto de construir el que será el radiotelescopio más potente del mundo, operando a longitudes de onda centimétricas y métricas (rango de frecuencias: ~50 MHz - 25 GHz). Su Oficina Central se encuentra en el Observatorio de Jodrell Bank (Mánchester, Reino Unido).



Lourdes Verdes-Montenegro
Coordinadora de SKA en España
lourdes@iaa.es

El Observatorio del SKA estará constituido por dos telescopios consistentes en una concentración central de antenas en Sudáfrica y otra en el oeste de Australia, y grupos remotos de miles de antenas extendidas en distancias de hasta 3.000 kilómetros distribuidas en dos continentes (África y Oceanía), y conectadas al procesador central de datos a través de una red de fibra óptica. Dichas localizaciones han sido escogidas por el bajo nivel de contaminación electromagnética generado por actividades humanas.

El radiointerferómetro SKA tiene potencial para realizar contribuciones revolucionarias a la Astrofísica, Astrobiología y Física fundamental. Sus temas de estudio engloban áreas como la investigación de la formación de las primeras galaxias tras el Big Bang, poner a prueba la teoría de la Relatividad general hasta precisiones hasta ahora imposibles, o el estudio de discos protoplanetarios y la presencia en ellos de aminoácidos y otros biomarcadores fundamentales para la presencia de vida. Los casos científicos de SKA se encuentran descritos en detalle en el Libro de Ciencia de SKA publicado en 2015, con más de 2000 páginas y unos 1300 autores.

Este radiointerferómetro se desarrollará en dos fases. En la primera (SKA1), estará formado por dos tipos de antenas. En Australia se planea instalar unas ciento treinta mil antenas tipo dipolo de baja frecuencia (SKA1-low, 50-350 MHz), con separaciones máximas de 65 km. En Sudáfrica se instalarán aproximadamente unas doscientas antenas parabólicas (SKA1-mid, 350 MHz-14 GHz) de unos 15 metros de diámetro, distribuidas en un área de unos 150 km. La segunda fase, SKA2, combinará las señales de cientos de miles de antenas repartidas en zonas desérticas de África (~2500 platos) y Oceanía (~500.000 dipolos). El diseño de SKA1 está en la actualidad en su última etapa, y entre finales de 2018 y principios de 2019 se llevará a cabo el Critical Design Review de los diseños producidos por los consorcios internacionales que actualmente están trabajando en dicha fase. Se espera que las licitaciones para la construcción de SKA1 comiencen en 2020 y que las primeras observaciones se inicien en 2026.

España viene participando en actividades relacionadas con SKA desde 1990. Desde 2011 el IAA-CSIC es la institución que coordina la participación



Recreación artística de todos los instrumentos de SKA bajo un mismo cielo nocturno. Crédito: SKA Organisation.

española en el proyecto. Actualmente 26 astrofísicos españoles de 10 centros de investigación son miembros de 9 de los 11 SKA Science Working Groups, con participación activa asimismo en la preparación de los Key Science Projects, a los que se les asignará, de forma competitiva, entre el 50% y el 75% del tiempo de los primeros 5 años de operaciones de SKA. En 2015 se publicó el Libro Blanco Español del SKA, fruto de un esfuerzo coordinado de 120 investigadores españoles, con contribuciones articuladas en un total de 30 capítulos, en todas las áreas de interés del SKA. Asimismo, se participa en numerosos programas de observación de los telescopios precursores y pathfinders de SKA. En el ámbito tecnológico, un total de 11 centros de investigación y 12 empresas españolas han participado en 8 de los consorcios internacionales de diseño de SKA: Dishes, Signal & Data Transport, Central Signal Processor, Science Data Processor, Telescope Manager, Infraestructure-SA, Infraestructure-AUS y Phased Array Feeds. Esto nos posiciona para optar a contratos especializados de alto nivel de innovación en su construcción. Se puede

encontrar más información sobre las actividades de España en SKA en la página web española .

A nuestra comunidad corresponde obtener el máximo retorno científico y tecnológico de nuestra participación en el proyecto. Como ha declarado el ministro de Ciencia, Innovación y Universidades, Pedro Duque, la adhesión de España a la organización SKA «es una inversión estratégica para nuestro país, ya que el Observatorio SKA será una de las infraestructuras internacionales de investigación más importantes en los próximos años».

En definitiva, ser miembros de SKA nos proporciona una gran oportunidad científica, tecnológica e industrial no exenta de desafíos, y España forma ya parte de este reto.

NOTAS

- 1 www.skatelescope.org
- 2 Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14). Giardini Naxos, Italy, June 9-13, 2014.
- 3 E.g. MeerKAT, ASKAP, LOFAR, EVLA, GMRT, etc.
- 4 spain.skatelescope.org

Los rayos gamma de energías superiores a unos 10 GeV pueden observarse desde la superficie terrestre. Esto es posible gracias a los llamados telescopios de imagen de Cherenkov atmosférico. Estos telescopios detectan el flash de luz Cherenkov de unos nanosegundos de duración que produce un rayo gamma cuando entra en nuestra atmósfera.

El espectro de esta luz pica en torno a 350 nm con lo que los telescopios de Cherenkov son esencialmente reflectores ópticos, pero con espejos enormes (típicamente de más de 10 metros de diámetro, porque el flash es muy débil) y con cámaras que responden en tiempos extremadamente cortos y cubren un área de unos grados cuadrados para registrar la extensa imagen del rayo gamma. En los últimos 25 años la técnica de imagen Cherenkov ha abierto la ventana astronómica de los rayos gamma de muy alta energía o VHE.

El cielo VHE es el cielo de los aceleradores cósmicos de partículas. Las aproximadamente 200 fuentes conocidas aceleran rayos cósmicos, bien electrones o positrones, bien protones o núcleos más pesados, a energías de hasta PeV, y estos producen a su vez rayos gamma VHE mediante emisión de Compton inverso o desintegración de piones neutros. Son fuentes galácticas como restos de supernova, a veces en interacción con nubes moleculares, púlsares y muchas de las nebulosas que estos generan ("pleriones" como la nebulosa del Cangrejo), o bien extragalácticas como starbursts, radiogalaxias, BL Lacs y quásares. En el rango VHE podrían encontrarse también señales de la aniquilación de partículas de materia oscura, e intentar encontrar evidencias de la naturaleza cuántica de la gravedad.

El Cherenkov Telescope Array (CTA) lidera los desarrollos en observatorios de rayos gamma de muy alta energía (VHE). A CTA le dan prioridad máxima tanto la hoja de ruta de las Astropartículas Europeas (ASPERA) como la de la Astrofísica Europea (Astro-net). Ha sido también incluido en la hoja de ruta de grandes infraestructuras europeas (ESFRI) y se le considera proyecto de alta prioridad en la estrategia española de infraestructuras científicas de 2010.

CTA será un observatorio con dos emplazamientos, uno en cada hemisferio (CTA-Norte y CTA-Sur) y consistente en grandes matrices de telescopios Cherenkov con espejos de diversos tamaños (grandes, medianos y pequeños). Este diseño le permitirá mejorar la sensibilidad, resoluciones angular y espectral y expandir el rango de energía. La mejora en sensibilidad le pone en pie de igualdad con desarrollos recientes en rayos X y gamma de más baja energía (20 MeV-50 GeV). Gracias a las 1000 fuentes que se espera detecte durante su



Juan Cortina
cortina@ifae.es



Manel Martínez
martinez@ifae.es

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE)

vida útil, CTA está llamado a producir un gran impacto tanto en Astrofísica como en Física Fundamental.

El proyecto CTA, que inició su singladura hacia 2008 con una muy importante participación española desde su concepción, ha ido ampliando el tamaño de la comunidad científica implicada que, hoy en día está constituida por un Consorcio (CTAC) de 1420 miembros en 210 instituciones de 32 países.

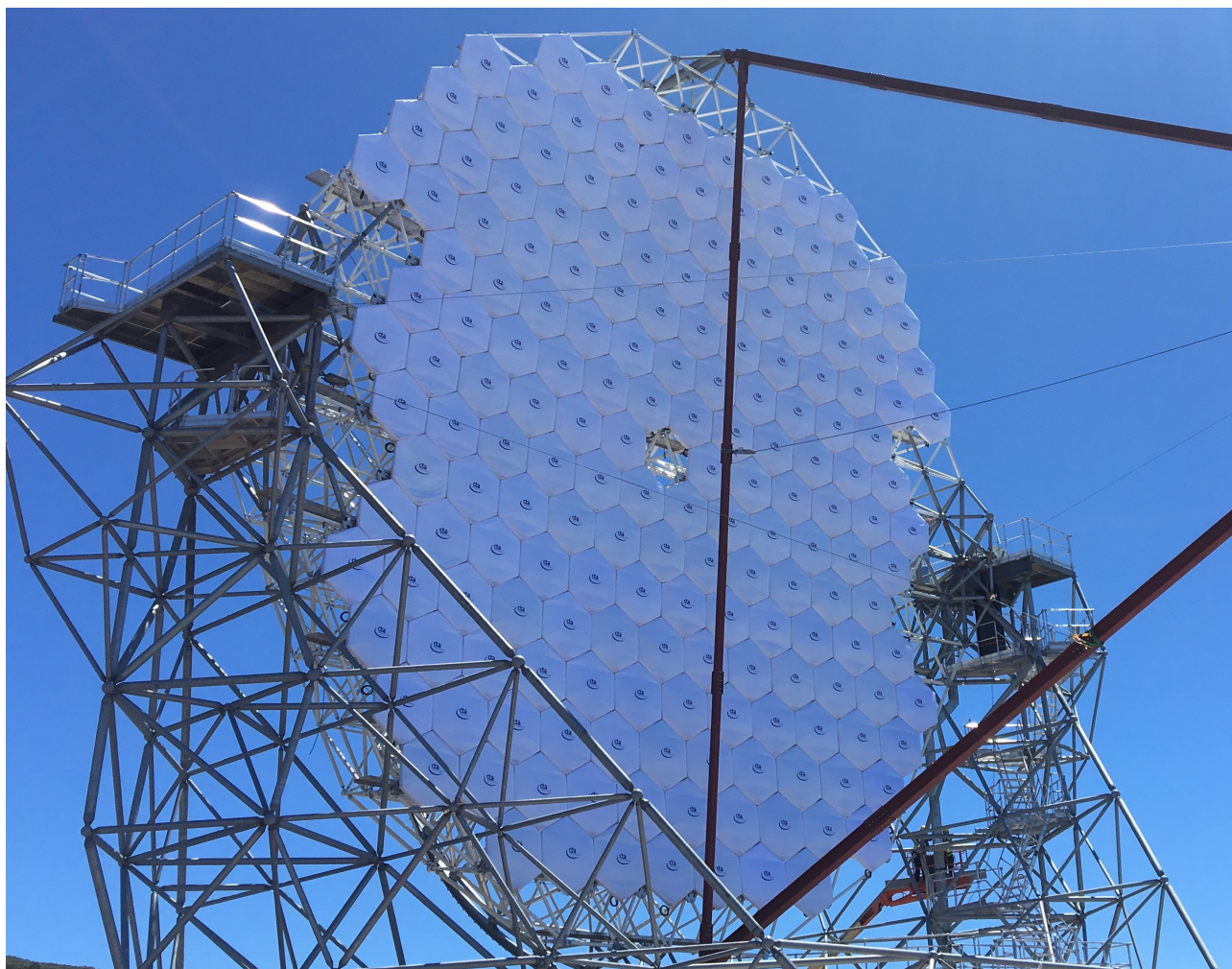
CTA está completando la fase de Pre-Construcción, en la que se finalizó un Informe Técnico de Diseño (TDR), y se ha escogido que el futuro Observatorio CTA (CTAO) sea constituido como una ERIC (European Research Infrastructure Consortium) establecida en Bolonia (Italia) y con un centro de gestión de datos (Science Data Management Center) en Zeuthen-Berlín (Alemania).

Pero una de las decisiones clave para el futuro del proyecto ha sido establecer que el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM) en las Canarias será el emplazamiento de CTA-Norte y el observatorio de ESO-Cerro Paranal constituirá el emplazamiento de CTA-Sur. El esfuerzo está dirigido ahora a iniciar la fase de Pre-Producción en los dos emplazamientos.

Por razones científicas, el observatorio en territorio español (CTAN) estará integrado por 4 Large Size Telescopes (LSTs, de 23 metros de diámetro) y 15 Mid Size Telescopes (MSTs de 12 metros de diámetro) con un coste estimado de unos 150 MEuros, mientras que en observatorio en Chile (CTAS) contará con 4 LSTs, 25 MSTs y unos 70 Small Size Telescopes (SSTs, de unos 6 metros de diámetro) con un coste estimado de unos 300 MEuros.

Montaje del plato que soporta los espejos del primer LST sobre la sub-estructura de giro en azimuth en Diciembre de 2017. Tanto el plato como la sub-estructura están formados por una malla espacial de tubos de, respectivamente, acero y fibra de carbono. El peso total del telescopio es de solo 100 toneladas y eso permitirá reposicionarlo en solo 20 segundos. A la izquierda de la foto se distinguen también uno de los telescopios MAGIC y uno de los telescopios HEGRA.





La mayor parte de las teselas del reflector del primer LST fueron montadas sobre el plato en Mayo de 2018. Cada tesela tiene 2 metros cuadrados de área, cumple requisitos estrictos de peso y coste, y se fabrica mediante un recubrimiento multicapa sobre base de vidrio.

La comunidad española de VHE ("CTA-Spain"), gracias a su impacto en proyectos como HEGRA y MAGIC, se cuenta entre los líderes del campo y ha desempeñado un papel clave en CTA desde su concepción. En la actualidad CTA-Spain está integrada por 12 instituciones y unos 80 miembros.

Durante los últimos años, gran parte de la actividad de la comunidad española de CTA se ha centrado en los LSTs. Los cuatro LSTs constituirán el mayor sistema de telescopios Cherenkov jamás construido. Gracias a sus espejos de 23 metros de diámetro, esperan detectar rayos gamma de energías tan ba-

jas como 30 GeV, en un rango que solapa con detectores a bordo de satélites, pero con un área de colección de decenas de miles de metros cuadrados. De esta forma los LSTs serán los instrumentos más sensibles a nuestra disposición para el estudio de fuentes gamma variables en escalas de tiempo de minutos, segundos o incluso milisegundos en el caso de Gamma Ray Bursts.

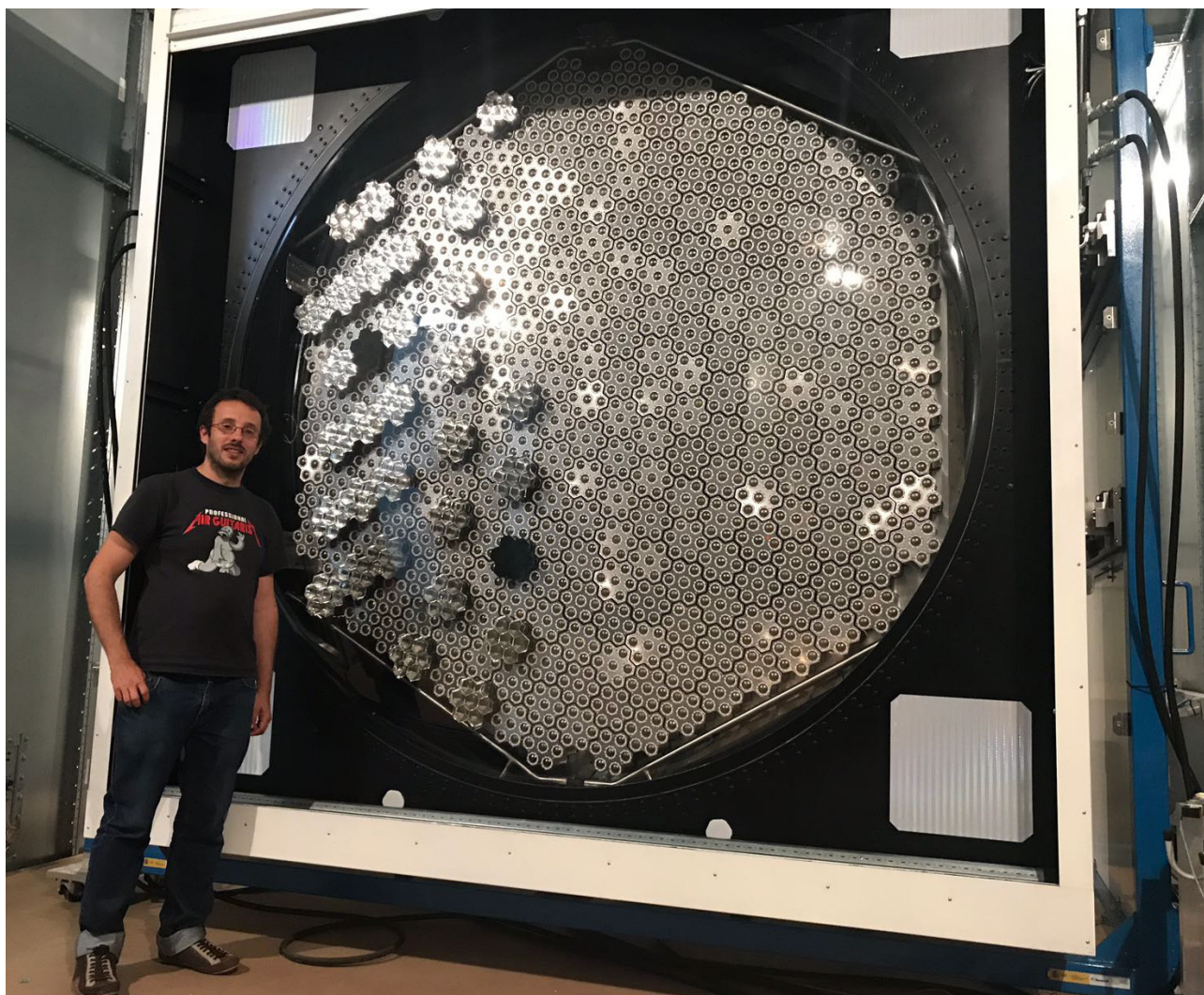
El sub-consorcio internacional que construye los LSTs está instalando ahora mismo un prototipo en el Roque, justo al lado de los dos telescopios MAGIC. El prototipo de LST tendrá de hecho todas las pres-

taciones de un LST y se convertirá probablemente en el primero de los cuatro LSTs que se levantarán en CTA-Norte. La obra civil se inició en 2016, la mecánica se instaló durante los pasados 12 meses y el espejo de unas 200 teselas de 2 m² está prácticamente instalado. El telescopio se completará al final del verano con el montaje de una cámara situada en el foco primario a una distancia focal de 28 m. La cámara ha sido fabricada en buena parte en España y, tras la integración mecánica en Madrid, está

acabando la integración electrónica en Barcelona. Si todo va según lo previsto, el primer LST estará observando el cielo VHE en 2019.

Los siguientes tres LSTs lo acompañarán probablemente a partir de 2022. Para estas fechas debería estar también en marcha el prototipo de uno de los 15 MSTs de 12 metros de diámetro que albergaría CTA-Norte, junto con buena parte de la infraestructura del observatorio.

Cámara del primer LST durante la integración final de la electrónica en el IFAE en Junio de 2018. Son visibles los 1855 fotomultiplicadores que ya están instalados cubren un campo de 4.5 grados de diámetro o 2.2 m de dimensión física. Cada módulo de 7 fotomultiplicadores realiza in-situ el trigger local y la digitalización de los pulsos Cherenkov. En la foto varios módulos están ya completamente equipados con colectores de luz



ÍCARO. UNA ESTRELLA CON BUENA ESTRELLA

A más de 9000 Millones de años luz de la tierra se encuentra Ícaro, la estrella más distante jamás observada. La luz que nos llega hoy en día de Ícaro partió de esta estrella cuando el universo tenía menos de una tercera parte de su edad actual. La estrella más alejada que se podía observar antes del descubrimiento de Ícaro estaba unas 200 veces más cercana. Este nuevo record fue posible gracias a la confluencia (fortuita) de varios eventos que hacen de Ícaro una estrella con mucha fortuna (o con buena estrella).



José M. Diego
Instituto de Física de Cantabria
jdiego@ifca.unican.es

Pablo G. Pérez-González
Universidad Complutense de Madrid
pgperez@ucm.es

Ismael Pérez Fournon
Instituto de Astrofísica de Canarias
ipf@iac.es

Ícaro es una estrella muy brillante que se encuentra en uno de los brazos más externos de una galaxia espiral a un desplazamiento al rojo $z=1.49$. La zona del brazo espiral donde se haya Ícaro se encuentra perfectamente alineada con una zona de magnificación extrema producida por el cúmulo de galaxias MACSJ1149-2223, un objeto muy masivo que actúa como una potente lente gravitatoria. La distancia de Ícaro a una de las cáusticas (zonas donde un objeto luminoso puede ser amplificado por factores que pueden alcanzar miles de veces) es de tan solo unos pocos pársecs. Dichas distancias tan cortas son muy improbables pero no imposibles. A estas distancias, una estrella puede ser amplificada por factores extremos gracias al efecto de lente gravitatoria del cúmulo. A pesar de esta magnificación extrema, una estrella brillante con luminosidades miles de veces la del Sol estaría fuera del alcance de telescopios actuales. Para poder ver estrellas individuales a estas distancias, es necesario no solo que la magnificación sea extrema sino también que la estrella que se está magnificando sea muy brillante, con luminosidades de al menos un millón de veces la del Sol. Ícaro, efectivamente, es una estrella muy luminosa, una supergigante azul con una magnitud absoluta estimada de aproximadamente -9 en la banda visible, lo cual la equipara con las estrellas más brillantes conocidas (por ejemplo Rigel). A un desplazamiento al rojo de 1.49, y con una magnificación en torno a un factor 600 (valor estimado de la magnificación producida por el cúmulo MACSJ1149) Ícaro presentaría una magnitud aparente de aproximadamente 27 o 28 magnitudes en banda V. Observaciones profundas con el telescopio espacial Hubble pueden alcanzar la sensibilidad necesaria para ver objetos puntuales con estas magnitudes. La fortuna se alineó con los astrónomos una vez más ya que el cúmulo MACSJ11489 fue uno de los cúmulos seleccionados como parte del programa Hubble Frontier Fields que observaría seis cúmulos de galaxias hasta alcanzar magnitudes 28 o 29 en la banda roja. En estas observaciones, Ícaro apareció como un objeto con magnitud aproximadamente 27.

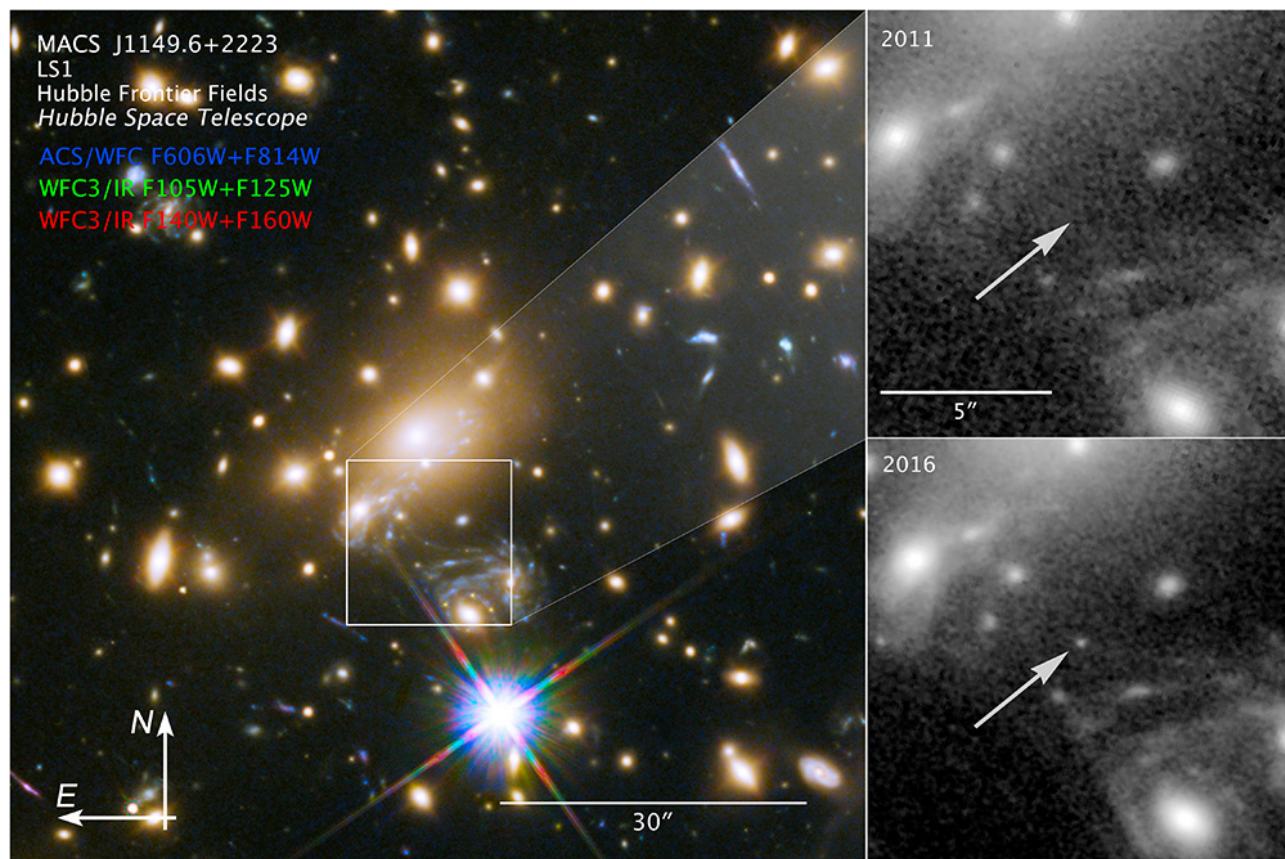
En un principio Ícaro no fue reconocida como una estrella individual extrema que estaba siendo magnificada por factores de cientos. Simplemente aparecía como uno de tantos objetos no resueltos en las imágenes del Hubble. Para que Ícaro fuese reconocida como una estrella hacía falta aumentar nuestra fortu-

na una vez más. El cúmulo MACS1149 ha sido una fuente constante de sorpresas entre las cuales cabe destacar la observación de SN Refsdal, la primera supernova observada múltiples veces gracias al efecto lente gravitatoria. Dicha supernova fue descubierta en MACS1149 en 2014 como una imagen cuádruple alrededor de una de las galaxias del cúmulo. Modelos precisos de la lente gravitatoria fueron capaces de predecir que una quinta imagen iba a aparecer un año mas tarde cerca de otra galaxia en el mismo cúmulo. Como parte del seguimiento de SN Refsdal y a la espera de su reaparición (en la quinta imagen), el cúmulo MACS1149 fue observado repetidas veces a lo largo de un periodo de casi dos años. A finales de 2015, la quinta imagen de SN Refsdal reapareció fiel a su cita y en el lugar señalado tal y como varios modelos habían predicho. El legado de observaciones que había permitido hacer el seguimiento de la

SN Refsdal y presenciar la reaparición de la última imagen de la SN (y su posterior seguimiento) permitió estudiar la posible variación en flujo de los distintos objetos contenidos en las imágenes. Con la esperanza de encontrar otras SNe más débiles que SN Refsdal, el análisis de las diferencias de imágenes reveló que en la posición de Ícaro el flujo estaba aumentando a lo largo de 2016. La razón de la variación del flujo no era más que otra obra de la diosa fortuna.

El cúmulo MACSJ1149 (como cualquier otro cúmulo) contiene multitud de objetos estelares en el medio intracúmulo orbitando en el potente potencial gravitatoria del cúmulo. Estos objetos estelares son, entre otras cosas, los responsables de la débil luz intracúmulo. Entre estos objetos se pueden encontrar estrellas y remanentes que han sido expulsados de las galaxias de los cúmulos por fuerzas de marea o que se han originado

Cúmulo de galaxias MACSJ1149. La zona en el cuadrado blanco muestra la posición donde se observó la estrella Ícaro en 2016 (marcado con una flecha en los paneles a la derecha). Créditos: NASA, ESA y P. Kelly (University of Minnesota)



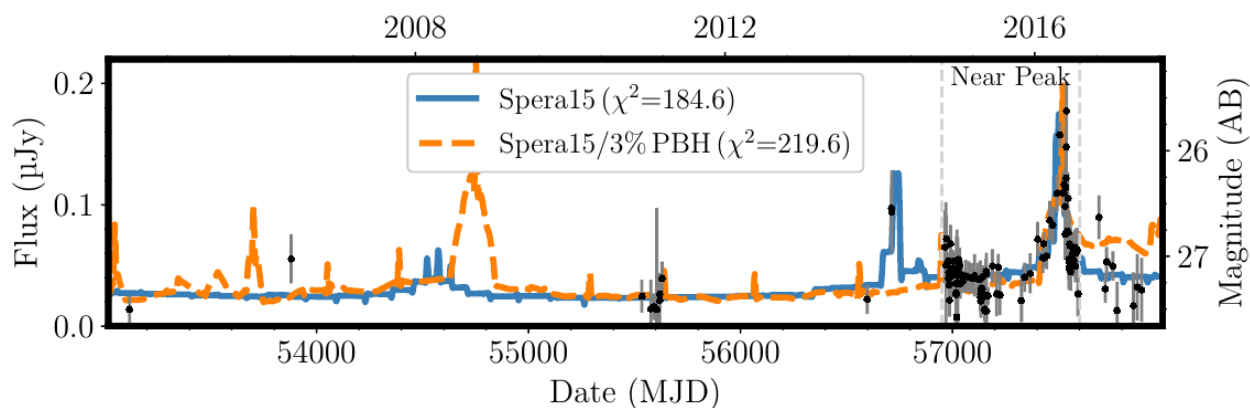
en los filamentos que alimentan la formación de estos cúmulos. Ocasionalmente, uno de estos objetos puede alinearse perfectamente con una estrella como Ícaro y dar lugar a un efecto de microlente, que se distingue del efecto lente gravitatoria normal porque la lente es mucho mas pequeña, por ejemplo una estrella, agujero negro o estrella de neutrones. La combinación de lente macroscópica (cúmulo de galaxias) con lente microscópica (estrella, agujero negro, etc) da lugar a un *sistema óptico* que puede magnificar momentáneamente objetos distantes por factores de varios miles o incluso decenas de miles. Inicialmente se había interpretado que Ícaro se aproximaba a la cáustica del cúmulo y que ninguna microlente se interponía en su camino. Según esta interpretación, el flujo de Ícaro debiera haberse incrementando no solo durante 2016 sino durante un periodo mas largo de varios años. Los datos sugerían que el cambio repentino en flujo sucedía únicamente en una escala temporal relativamente pequeña de varios meses, lo cual podía ser debido al impacto de una microlente. Además, un estudio detallado de la luz intracúmulo en torno a la posición de Ícaro reveló que la densidad estelar en esa posición era de varias masas solares por pársec cuadrado por lo cual el impacto de las microlentes no solo era posible sino que era inevitable.

Cabe destacar que de entre todos los telescopios que realizaron el seguimiento de Ícaro, aparte del telescopio espacial Hubble que llevo a cabo las observaciones más detalladas, solo un telescopio en tierra fue capaz de alcanzar la profundidad necesaria para ver Ícaro. Este telescopio es el GTC. Tras de-

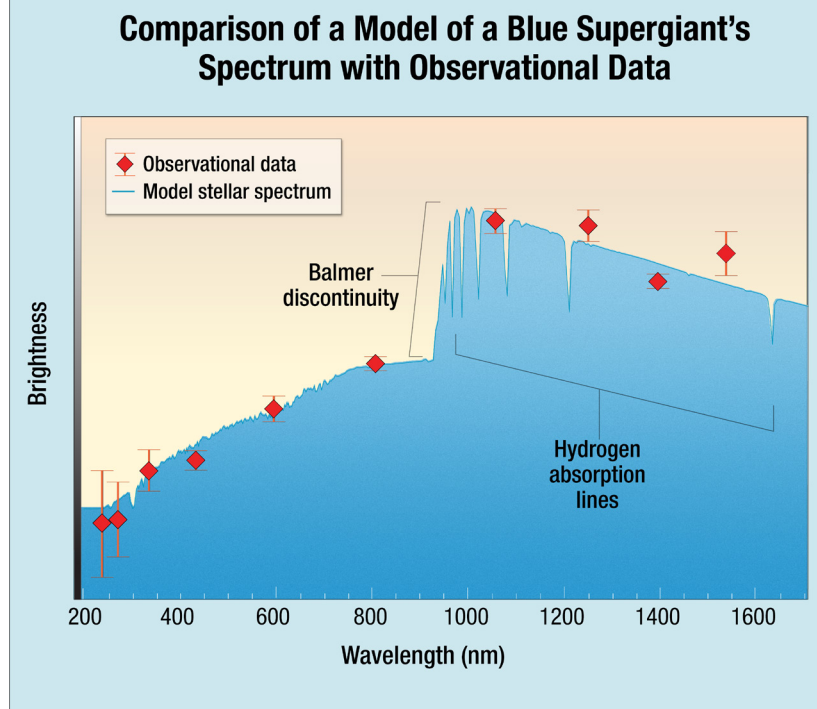
tectarse por primera vez un aumento de brillo considerable en Ícaro hubo una llamada internacional para seguir este evento tan singular. Atendiendo a esta llamada, y beneficiándonos de que MACS1149 es uno de los objetos observados por el programa de larga duración de GTC "SHARDS Frontier Fields", un grupo de investigadores españoles solicitamos tiempo de director para observar Ícaro alrededor del momento predicho para su máximo. En un solo día la propuesta fue aprobada y pudimos tomar 4 horas de imágenes con el instrumento OSIRIS, en las que conseguimos detectar Ícaro en 2 noches diferentes, midiendo una magnitud en la banda I en torno a 27.5-28.0, a un nivel de 3-sigma en cada observación. Con estas observaciones no solo demostramos que la fuente había pasado el máximo y estaba haciéndose más débil sino también que se pueden usar telescopios desde tierra como GTC para detectar y estudiar este tipo de eventos.

El observar una estrella individual a $z=1.49$ es un hito espectacular, y además abre la posibilidad de detectar en el futuro objetos como planetas (que actúen como microlentes) en galaxias muy lejanas. Otro resultado relevante que nos ha proporcionado Ícaro (además de lo que hemos podido aprender sobre la estrella en sí), es la información que hemos obtenido sobre las microlentes que influyen sobre el flujo observado en función del tiempo. En un cúmulo de galaxias, la mayor parte de la masa está en forma de materia oscura. A pesar de que los WIMPs siguen siendo el candidato más popular para la materia os-

Curva de luz de Ícaro (puntos negros) comparada con curvas de luz simuladas que incluyen el efecto microlente suponiendo dos modelos para la población de microlentes. El modelo con la curva azul contiene estrellas y remanentes consistentes con la amplitud de la luz intracúmulo. El modelo naranja incluye además un 3% de la materia oscura en forma de agujeros negros con 30 masas solares. Figura extraída de P. Kelly, J.M. Diego et al. 2018, Nature Astronomy, 2, 334.



Medidas fotométricas de Ícaro comparadas con el espectro típico de una estrella azul supergigante. Créditos: NASA, ESA y A. Feild (STScI).



cura, modelos alternativos consideran que la materia oscura puede estar compuesta por objetos macroscópicos. Uno de los candidatos más populares en este contexto son los agujeros negros primordiales (ANP) que se formaron durante los primeros instantes del universo. Los ANP pudieron estar rodeados de discos de acreción en una etapa temprana del universo, pero es ampliamente aceptado que esos discos de acreción no perduraron y que los ANP se transformaron rápidamente en objetos invisibles (ignorando efectos minúsculos como la radiación de Hawking) que interactuaban con el resto del universo únicamente a través de la gravedad. La fracción de materia oscura que puede estar en forma de ANP se ha acotado con múltiples observaciones limitando el rango posible de masas en el cual los ANP pueden contribuir significativamente. Uno de los intervalos de masa en el cual ANPs pueden aun contribuir significativamente a la materia oscura es el rango de decenas de veces la masa solar. La detección por parte de LIGO de más agujeros negros en este rango de masas de los que originalmente se esperaba encontrar despertó un inusitado interés en ANP con masas de 20-50 masas solares como candidatos a explicar (al menos en parte) la materia oscura. Observaciones del cambio en flujo en Ícaro como consecuencia de múltiples interacciones con microlentes puede acotar este rango de masas con cierta precisión. Si toda la materia

oscura estuviese compuesta por ANP con varias decenas de masas solares, las fluctuaciones en flujo en Ícaro hubieran sido más numerosas y pronunciadas que las observadas. A pesar de que los datos sobre los cambios en flujo en Ícaro son escasos, estos son suficientes para penalizar significativamente modelos donde ANP contribuyen con más de un 10% a la materia oscura en el cúmulo MACS1149. Contribuciones más modestas de unos pocos por ciento son aun compatibles con las observaciones pero futuras medidas de las fluctuaciones de Ícaro y objetos amplificados similares permitirán reducir esta cota aun más.

El equipo internacional que realizó este estudio cuenta con la participación de miembros del Instituto de Física de Cantabria (José M. Diego), Universidad del País Vasco (Thomas Broadhurst), Universidad Complutense de Madrid (Pablo G. Pérez-González) e Instituto de Astrofísica de Canarias (Ismael Pérez Fournon).

REFERENCIAS

Extreme magnification of an individual star at redshift 1.5 by a galaxy-cluster lens. P. Kelly, J.M. Diego, S. Rodney, N. Kaiser, T. Broadhurst et al. 2018, *Nature Ast.* 2, 334.

NOTA: Mientras se finalizaba este artículo, una observación realizada el 5 de Junio de 2018 con el LBT reveló un nuevo evento de microlente en Ícaro.

RESULTADOS DE LA OCULTACIÓN ESTELAR POR EL

Nuestro sistema solar alberga 8 planetas y 5 planetas enanos reconocidos por la Unión Astronómica Internacional a día de hoy. Los 8 planetas del sistema solar han sido visitados por naves espaciales y sus características físicas básicas se conocen bastante bien. De los 5 planetas enanos, 2 (Ceres y Plutón) han sido visitados por naves espaciales recientemente y otros 2 (Eris y Makemake) habían sido bien caracterizados en cuanto a sus propiedades físicas básicas mediante la técnica de ocultaciones estelares. Hasta el año pasado, quedaba un planeta enano por caracterizar bien: el planeta enano (136108) Haumea. Este trabajo ha merecido el "Premio Vanguardia de la Ciencia".



José Luis Ortiz
ortiz@iaa.es



Pablo Santos Sanz
psantos@iaa.es

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

Haumea no solo es interesante por ser uno de los 5 planetas clasificados como enanos por la IAU, sino que también es un objeto transneptuniano (o TNO). Estos cuerpos son muy interesantes, porque son restos sobrantes de la construcción de los planetas y de la formación del sistema solar. Gran parte del material que no quedó agregado formando un planeta o no fue expulsado por la acción gravitatoria de los planetas en formación, pasó a formar parte de un gran número de cuerpos pequeños del sistema solar, y en particular, los TNOs son los restos que quedaron de la parte de la nebulosa solar más allá de la línea del hielo, donde el agua se supone que estaría en fase sólida. Por ello, albergan información valiosa e importante sobre el proceso de formación y evolución del sistema solar. Además, son los progenitores de los cometas de corto periodo (aquellos cometas que tienen un periodo orbital menor de 200 años).

Los TNOs son objetos muy fríos, porque a la distancia a la que se encuentran del sol, y para albedos geométricos medios del orden del 10%, la temperatura de equilibrio está alrededor de los 40 K (-230° C). Esto les permite conservar hielos de agua y otros hielos primordiales, a diferencia de los asteroides situados en regiones mucho más calientes. Los TNOs comparten algunas características con los asteroides, ya que estos últimos también son restos del proceso de formación del sistema solar, pero los asteroides son rocosos y mucho más pequeños en general.

Los objetos transneptunianos, son, por tanto, cuerpos helados, distantes y por lo general bastante oscuros que residen, por definición, más allá de la órbita de Neptuno, y se concentran en un disco o cinturón conocido como cinturón transneptuniano o de Kuiper cuya extensión exacta no conocemos bien todavía. Las poblaciones más importantes dentro del cinturón transneptuniano son las de "objetos clásicos", "objetos resonantes", "objetos del disco disperso", y "objetos separados". Los objetos clásicos son cuerpos con excentricidades orbitales pequeñas y también inclinaciones orbitales no muy altas, con semiejes mayores entre 35 y 50 AU. Los objetos resonantes son las poblaciones que se encuentran en resonancias orbitales de movimiento medio con Neptuno. El propio Plutón se encuentra en resonancia 3:2 con Neptuno, lo que significa que Plutón gira 2 veces alrededor del sol en el tiempo en que Neptuno completa

PLANETA ENANO HAUMEA EL 21 DE ENERO DE 2017

exactamente 3 órbitas. Los objetos del disco disperso son cuerpos con excentricidades orbitales relativamente altas y que también pueden tener grandes inclinaciones orbitales, esto los lleva o los ha llevado a tener encuentros cercanos con Neptuno. En algunos de esos encuentros los objetos pueden llegar a ser perturbados de forma que se inyectan hacia el interior del sistema solar, dando lugar a los llamados Centauros, muchos de los cuales pueden evolucionar dinámicamente por interacción con Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno hasta dar lugar a cometas de corto periodo, aunque otros son eyectados. Hay otra clase, que es la de los objetos “separados”, constituida por TNOs que no tienen distancias perihélicas suficientemente cercanas a Neptuno como para haber tenido encuentros con él. Este tipo de TNOs extremos es el peor conocido, ya que hay pocos miembros detectados en esta subclase.

Haumea pertenecería a priori a la población clásica, pero su dinámica parece estar gobernada por la resonancia 12:7 con Neptuno. En la actualidad, se conocen unos 2700 objetos transneptunianos, y sabemos que tienen que existir del orden de unos 100000 objetos de este tipo con diámetros menores o iguales a 100km con semiejes orbitales entre 35 y ~ 100 AU. Es llamativo que una población tan numerosa y grande, mucho mayor que la del cinturón de asteroides hubiera pasado completamente desapercibida hasta el año 1992, cuando se descubrió el primero de sus miembros aparte de Plutón.

Pero Haumea, además de ser un planeta enano y un TNO, tiene otras características que lo hacen muy interesante y singular, independientemente de lo anterior. Por ejemplo, su periodo de rotación es muy corto para un objeto tan grande, y, de hecho, rota en 3.92 horas. Como consecuencia de esta rápida rotación, se aleja mucho de la forma esférica. Otro de los aspectos interesantes de Haumea es que se le conocen al menos 2 satélites que orbitan alrededor del cuerpo principal, y otra de sus peculiaridades es que existe un grupo de TNOs con órbitas muy parecidas y con características espectroscópicas similares a las de Haumea, formando una especie de familia que es difícil de explicar. Es de hecho el único objeto transneptuniano para el que se ha encontrado un grupo de objetos relacionados dinámicamente, si bien no tiene las características habituales de las familias de asteroides del cinturón asteroidal entre Marte y Júpiter.

Todas estas peculiaridades nos habían motivado con fuerza, desde hace años, a intentar predecir y detectar una ocultación estelar por Haumea, que nos permitiera caracterizarlo bien. Aunque lo ideal hubiera sido mandar una misión espacial a Haumea, esto es extraordinariamente complejo, habría requerido décadas, y es muy costoso, sólo abordable por la agencia espacial NASA. Por ello nos centramos en predecir y observar una ocultación estelar. Finalmente tuvimos éxito y en enero de 2017 detectamos una ocultación estelar por Haumea cuyos resultados fueron publicados en Ortiz et al. (2017). Aquí se explican algunos de esos resultados y se ponen en cierto contexto.

Las ocultaciones estelares causadas por cuerpos del sistema solar ofrecen una técnica muy potente para determinar tamaño y forma con una gran precisión. La idea es simple, porque basta con observar cómo una estrella es eclipsada por el cuerpo que pasa exactamente por delante de la estrella, vista desde el observador terrestre. Si esto se hace desde varios lugares de la Tierra, se consigue determinar la forma y tamaño con gran precisión. Y, además, la técnica permite descubrir la presencia de atmósferas, y hasta determinar el perfil de presión-temperatura con la altura. Pero predecir y observar ocultaciones por objetos transneptunianos es extremadamente difícil. Las ocultaciones producidas por asteroides son simples y relativamente fáciles, pero las de los TNOs no.

Hay varias razones para esta dificultad. El diámetro angular proyectado en el cielo de incluso los TNOs más grandes resulta ser muy pequeño. Los TNOs más grandes, quitando Plutón, tienen diámetros angulares de apenas 0.03 segundos de arco, o 30 milisegundos de arco (mas). Esto significa que tenemos que conocer las posiciones de las estrellas y de los TNOs con niveles de exactitud de ese orden, o mejor, si queremos poder predecir y observar ocultaciones por TNOs. Gracias a la misión GAIA de la Agencia Espacial Europea, desde hace muy poco tiempo empezamos a tener posiciones de una inmensa cantidad de estrellas con la exactitud necesaria, y gracias a la segunda liberación de datos de GAIA (el catálogo llamado GAIA DR2), tenemos información sobre el movimiento propio de las estrellas, lo que nos permite, en teoría, hacer buenas previsiones. Pero el problema principal para los TNOs es que sus órbitas no se conocen suficientemente bien

y como resultado, sus posiciones absolutas en el cielo tienen errores típicos de unos 400 mas en promedio. Esto es unas 40 veces más de lo deseable para poder predecir una ocultación estelar por un TNO.

Entonces, ¿cómo podemos predecir y observar ocultaciones por TNOs? En nuestro grupo de investigación en Granada hemos desarrollado una metodología que permite hacer predicciones fiables a pesar de la aparente imposibilidad. Uno de los factores clave es que, aunque las posiciones absolutas de los TNOs en el cielo no se conocen bien, las posiciones relativas sí tienen suficiente precisión, de forma que si anclamos las órbitas con mucha precisión respecto a un sistema de referencia y podemos usar ese sistema de referencia también con las estrellas que se van a ocultar, se pueden conseguir predicciones suficientemente precisas. Pero no podemos hacerlo con antelaciones de muchos años ni con mucho margen de tiempo.

El proceso consta de varios pasos en la práctica, en primer lugar hay que buscar posibles ocultaciones con posiciones absolutas usando un radio de búsqueda amplio (en un intervalo de tiempo de típicamente uno o dos años), e identificar eventos candidatos potenciales con diferente grado de probabilidad. Una vez seleccionados los mejores candidatos, llega el momento de refinar las predicciones usando las técnicas mencionadas más arriba, que siempre pasan por tener que observar el TNO en cuestión con telescopios suficientemente potentes. Usando medidas astrométricas de muy alta precisión podemos “anclar” la órbita del TNO y extrapolar sus posiciones hasta el momento de la ocultación prevista. Si la previsión da una predicción no favorable, se concluye el proceso, y si sale una predicción favorable, se sigue mejorando. Esta es la idea simple, pero en la práctica hay multitud de detalles importantes. Y todo esto requiere mucho trabajo. Gran parte del esfuerzo es llevado a cabo en nuestro equipo de Granada, pero hay una intensa colaboración con otros dos equipos en París y en Río de Janeiro para coordinar todos los aspectos necesarios a la hora de predecir y observar una ocultación por un TNO. La colaboración internacional ha sido clave para poder tener éxito en casi una treintena de ocultaciones por TNOs que hemos observado desde 2010.

Para el caso particular de la ocultación de Haumea que estamos tratando aquí, en el equipo de Granada empezamos a hacer las primeras predicciones ya en 2015, con diferentes catálogos estelares (en esa época no contábamos aún con GAIA). Uno de los catálogos que usamos fue URAT1, que es muy denso, ya que llega a estrellas más débiles de magnitud 18. Con él obtuvimos varios posibles eventos dignos de seguimiento.

La predicción nominal para la ocultación del 21 de Enero de 2017 fue la que se muestra en el mapa de la figura 1. La franja de paso de la sombra en la Tierra no era muy favorable porque ocurría en una zona de la Tierra donde era de día. En las ocultaciones estelares, como en los eclipses de sol, la sombra pasa solo por una franja de la Tierra, por lo que la ocultación es sólo visible desde una zona concreta y hay que predecir con mucha precisión dónde va a caer.

3h 16m to 3h 33m UT
Max Duration = 136.5 secs
Mag Drop = 0.46
Sun : Dist = 96 deg
Moon: Dist = 30 deg
illum = 39 %
E 0.078"x 0.098" in PA 90

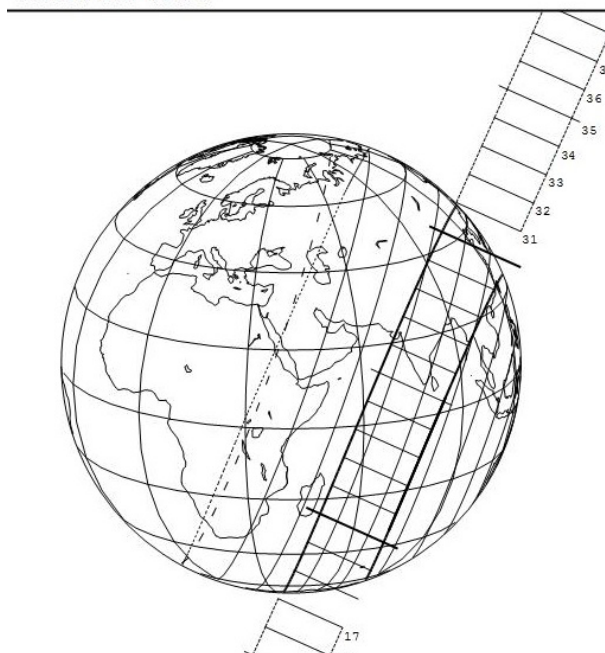


Figura 1. Mapa de la Tierra en el que se muestra la franja donde la ocultación por Haumea sería detectable en la predicción inicial hecha en 2015. Las zonas de la Tierra donde es de día se marcan con líneas de elevación local del sol. La predicción indicaba que la ocultación tendría lugar en zona diurna y por tanto, no se podría realizar la observación.

Pero sabíamos por experiencias anteriores que de la predicción inicial a la final habría una considerable variación. La sombra podría irse completamente fuera de la Tierra, o podría adentrarse hacia regiones favorables del planeta. Así que en 2016 empezamos un seguimiento astrométrico muy preciso de Haumea. Obtuvimos más de 1000 medidas astrométricas en un intervalo de tiempo de 3 meses, usando nuestro telescopio de 0.77m en el observatorio de La Hita, en la provincia de Toledo. Tuvimos que hacer un seguimiento tan detallado porque sospechábamos que además de la incertidumbre típica debida al conocimiento impreciso de la órbita, había que añadir la posible perturbación debida a la presencia de un satélite relativamente grande de Haumea, llamado Hi'iaka. Este satélite podría estar causando una oscilación en la astrometría, y como la órbita de Hi'iaka alrededor de Haumea es de 49.5 días, necesitábamos hacer estas medidas con gran precisión y en un intervalo temporal que cubriera al menos un ciclo orbital del satélite. Ya en 2011 habíamos observado este tipo de fenómeno para el caso del TNO denominado Orcus, que tiene un satélite relativamente grande que perturba considerablemente las medidas astrométricas, causando una oscilación (Ortiz et al. 2011). Además, eso podría explicar por qué habíamos fallado en algunos intentos preliminares de observar ocultaciones por Haumea en años anterior-

es. Hay que destacar que el satélite Hi'iaka está tan cerca de Haumea que no se puede resolver desde tierra con observaciones telescópicas normales.

Las medidas astrométricas tuvieron que hacerse con mucho cuidado, cuando el objeto culminaba, para minimizar posibles efectos de Difracción Cromática Diferencial debidas a la atmósfera. Comparamos estas medidas con posiciones teóricas de Haumea usando diferentes fuentes para las órbitas. Usando una órbita del sistema Horizons de JPL, obtuvimos los residuos. Un periodograma de estos residuos orbitales usando técnicas de análisis para datos no equiespaciados nos permitió obtener un periodo de 49.5 días en los datos, que coincide con el periodo orbital de Hi'iaka. Un ajuste sinusoidal a los residuos se muestra en la figura 2. Lo que estamos viendo en esa gráfica es el movimiento del fotocentro de Haumea debido a la presencia del satélite Hi'iaka. Este fotocentro está entre el centro de masas y la posición del satélite; la posición de este fotocentro rota alrededor del centro de masas debido al movimiento orbital del satélite. Además, los residuos muestran una correlación clara con las posiciones teóricas de Hi'iaka con respecto a Haumea. Los residuos en declinación mostraban ese comportamiento, si bien los de ascensión recta no. Creemos que la razón estriba en que la órbita de Hi'iaka está principalmente orientada en la dirección Norte-Sur.

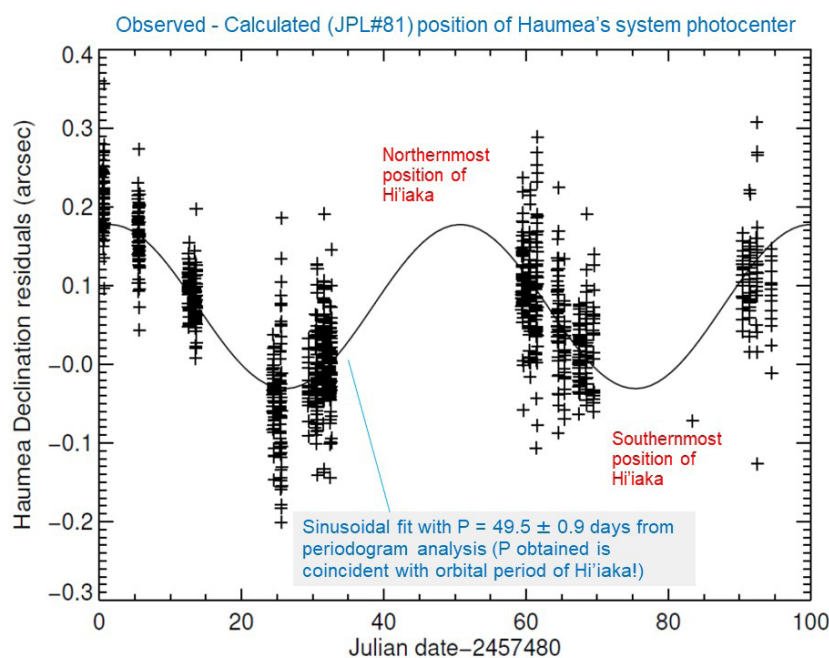


Figura 2. Las cruces representan los residuos de la astrometría de Haumea en 1000 medidas realizadas durante 2016, a lo largo de 3 meses. La línea sinusoidal representa un ajuste con el periodo obtenido del periodograma de los residuos, que se corresponde con el periodo orbital del satélite Hi'iaka.



Figura 3. Mapa que delimita con líneas azules continuas los lugares donde se produjo la ocultación. Los puntos verdes marcan donde la ocultación del cuerpo central fue positiva. El punto azul corresponde a un observatorio donde se detectó solamente la ocultación producida por el anillo de Haumea, pero no por el cuerpo principal. Los puntos rojos marcan la localización de dos observatorios próximos donde la ocultación fue negativa. La flecha indica la dirección de movimiento de la sombra de Haumea. La línea azul discontinua indica el centro de la franja de sombra.

Teniendo en cuenta estos resultados astrométricos, la predicción cambiaba mucho y resultaba favorable para gran parte de Europa. Pero como necesitábamos estar seguros con un grado de certeza mayor, a final de 2016 y en los primeros días de 2017 tomamos imágenes de Haumea con telescopios más grandes, con objeto de hacer astrometría de mayor precisión. Usamos los telescopios de 1.2m de Calar Alto, el 1.5m de Sierra Nevada, el telescopio 2m Liverpool y el 2.5m NOT de la Palma. Los residuos de la astrometría usando la misma órbita de JPL estaban claramente correlacionados con las posiciones teóricas de Hi'iaka con respecto a Haumea y pudimos determinar la posición real de Haumea para el momento de la ocultación. La predicción daba resultados casi idénticos a la previsión basada en el conjunto de 1000 datos obtenidos meses antes, y era favorable para una gran parte de Europa. Para estos últimos cálculos pudimos usar ya los datos de Gaia DR1, tanto para rehacer la astrometría del conjunto de observacio-

nes de 3 meses con el telescopio de La Hita como para los últimos. Además, hicimos nuestra propia estimación del posible movimiento propio de la estrella que se iba a ocultar, usando los datos de Gaia DR1 comparados con datos del catálogo PPMXL.

Antes de enero de 2017 habíamos “pre-alertado” a varios colegas en algunos grandes observatorios en Europa para reservar tiempo de observación, y finalmente solicitamos que se ejecutaran las observaciones. También se hicieron observaciones desde bastantes lugares en España y Turquía, que estaban al oeste y este de la predicción nominal, con objeto de asegurarnos el éxito en las observaciones incluso si hubiera habido algún sesgo observacional o si algún efecto sistemático no tenido en cuenta o no conocido pudiera haber afectado a las predicciones. Pero al final, la franja de sombra se correspondió muy bien con la predicción. Los preparativos, la planificación, coordinación y ejecución de la campaña observacional resultaron ser tareas

muy arduas, con muchos equipos internacionales involucrados. La figura 3 muestra donde se produjo finalmente la ocultación.

La estrella que fue ocultada era ligeramente más débil que el propio Haumea (algo menos brillante que la 17.5 mag en V) por lo que esperábamos una caída del flujo del orden del 40% en el momento de la ocultación. En la mayoría de las ocultaciones estelares que observamos, la estrella ocultada suele ser mucho más brillante que el cuerpo que la oculta, y la caída del brillo suele ser de muchas magnitudes, pero en este caso fue sólo de unas 0.4 magnitudes. El movimiento relativo de Haumea con respecto a las estrellas, visto desde la Tierra era del orden de 13.1 km/s. En otras palabras, el movimiento angular de Haumea, traducido a movimiento lineal, dada la distancia conocida a Haumea, correspondía a unos 13 km/s.

En la figura 4 se muestran las curvas de luz que fueron obtenidas una vez se extrajo la fotometría de los diferentes conjuntos de imágenes de los diferentes telescopios. Las curvas de luz se muestran en negro, en rojo se muestran los modelos que ajustan los datos. Los modelos corresponden a pozos cuadrados convolucionados con el tiempo de integración, teniendo en cuenta los tiempos muertos de los detectores y el diámetro angular de

la estrella ocultada. En azul se muestran los pozos cuadrados que indican el comienzo y el final de la ocultación. De esos ajustes obtenemos los tiempos de desaparición y reaparición de la estrella, a partir de los cuales determinamos lo que se denominan cuerdas de una ocultación. Los tiempos de desaparición y reaparición también se denominan ingreso y egreso, respectivamente. Las cuerdas son segmentos que representan el movimiento del TNO durante la desaparición y reaparición de la estrella, proyectado en el plano del cielo y visto desde cada lugar de observación.

Volviendo a la figura 4, en ella se muestran 11 curvas de luz (todas aquellas donde se apreciaba la ocultación, excepto la del observatorio de Crni Vrh, que es demasiado ruidosa y emborronaría el resto). Las curvas de luz en la figura se muestran en flujo relativo normalizado (que es el flujo dividido por el flujo medio de la estrella) y han sido desplazadas en valores enteros para que se muestren sin solapamiento.

Antes de la ocultación por Haumea, la ocultación por un TNO mejor observada había sido la del también planeta enano Makemake, en la que habíamos obtenido 7 curvas de luz desde 5 observatorios distintos, en 2011. El caso de Haumea sobrepasa con holgura el récord anterior, ya que hubo 12 observaciones

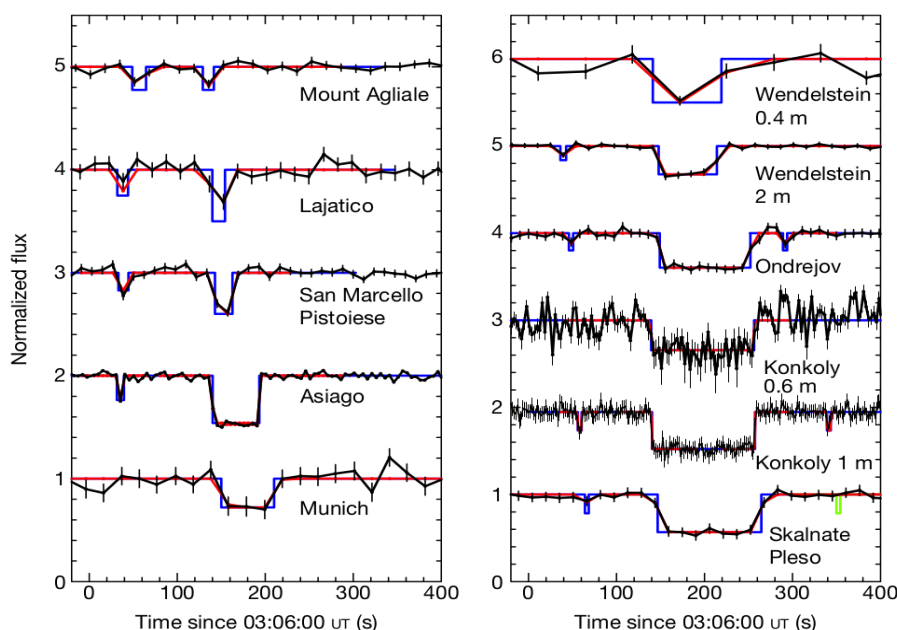


Figura 4. Curvas de luz positivas obtenidas desde los diferentes observatorios que participaron en la campaña de observación. En negro se representan las observaciones, en rojo el resultado del modelo y en azul los pozos cuadrados que marcan los momentos de desaparición y reaparición de la estrella, ajustados a los datos. En verde se representa el evento secundario no detectado en Skalnaté Pleso debido a que la cámara CCD estaba siendo leída en ese momento.

telescopicas exitosas desde 10 sitios diferentes, por lo que la ocultación estelar causada por Haumea es la mejor ocultación jamás observada hasta la fecha y constituye un triunfo sobresaliente de ciencia y técnica.

En las curvas de luz se aprecian claramente las caídas de brillo largas, producidas por el paso de Haumea delante de la estrella. Pero como se puede ver en las mismas, aparte de los fenómenos de ocultación principal, hay fenómenos muy breves de caída de brillo. En la figura 5 vemos una ampliación de algunas de las curvas de luz donde se muestran claramente estas caídas breves del brillo. Estos fenómenos podrían haber sido causados, en principio, por pequeños satélites orbitando alrededor de Haumea, pero tendría que haber habido muchos satélites, y muy juntos. La explicación más razonable a estos fenómenos es que hay un anillo alrededor de Haumea, como hay un anillo alrededor de Saturno. En los planetas del sistema solar, sólo cuatro de ellos, los más grandes, tienen anillos. Esta ha sido la primera vez que se ha detectado un anillo alrededor de un planeta enano y la primera vez que se ha encontrado un anillo en un objeto transneptuniano.

Cuando los tiempos correspondientes a estos breves fenómenos se llevan a pequeños trazos en el plano del cielo, se puede apreciar fácilmente que estos fenómenos secundarios se organizan en una configuración de elipse (Figura 6). Los segmentos rojos indican los eventos secundarios, y la longitud de los segmentos tiene que ver con la duración de los fenómenos. En el observatorio de Skalnate Pleso no se detectó el egreso del anillo porque ocurrió durante uno de los momentos en los que la cámara CCD del telescopio estaba siendo leída. Lamenta-

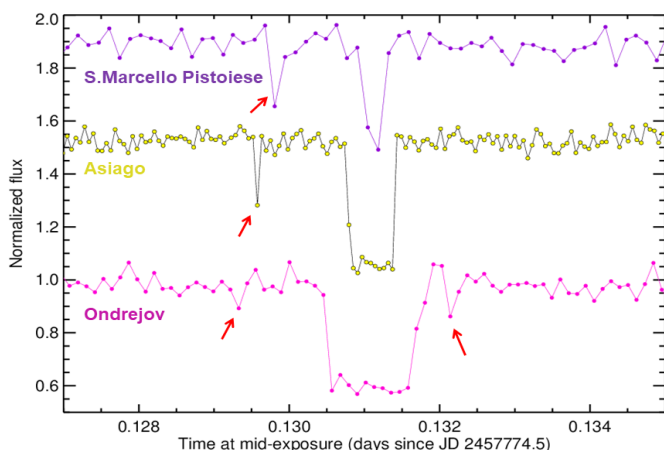


Figura 5. Ampliación de algunas de las curvas de luz donde se aprecian claramente los fenómenos secundarios debidos a la presencia de un anillo alrededor de Haumea.

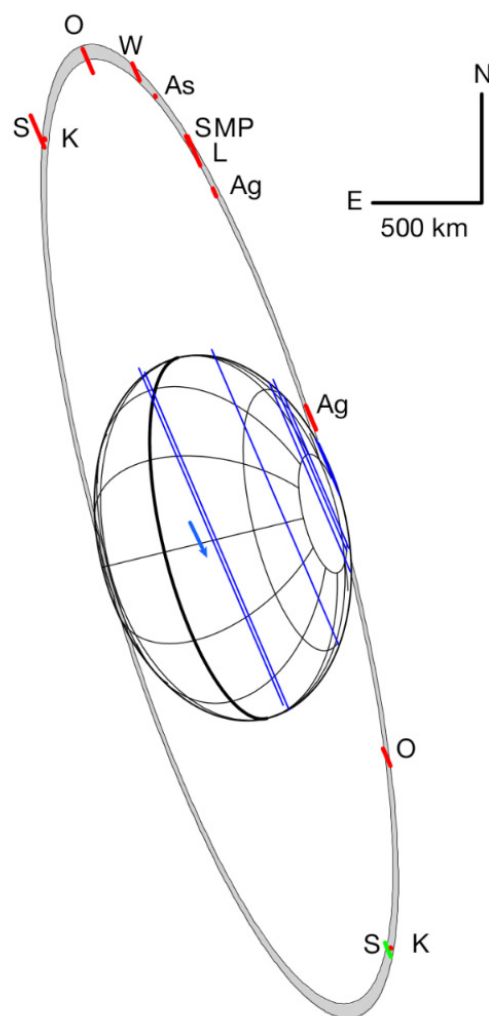


Figura 6. Geometría del anillo de Haumea. Ajuste a los eventos del anillo (segmentos rojos). En azul se muestran las cuerdas de la ocultación principal, que se tratan más adelante (figura 8). Las dos elipses alrededor de Haumea con el sombreado gris delinear el anillo de 70km de anchura con una opacidad de 0.5 (sombreado gris). Las etiquetas S,K,O,W,As,SMP,L,Ag representan los observatorios de Skalnate Pleso, Konkoly, Ondrejov, Wendelstein, Asiago, San Marcello Pistoiese, Lajatico y Monte Agliale. La flecha azul indica la dirección y sentido del movimiento de la sombra de Haumea durante la ocultación.

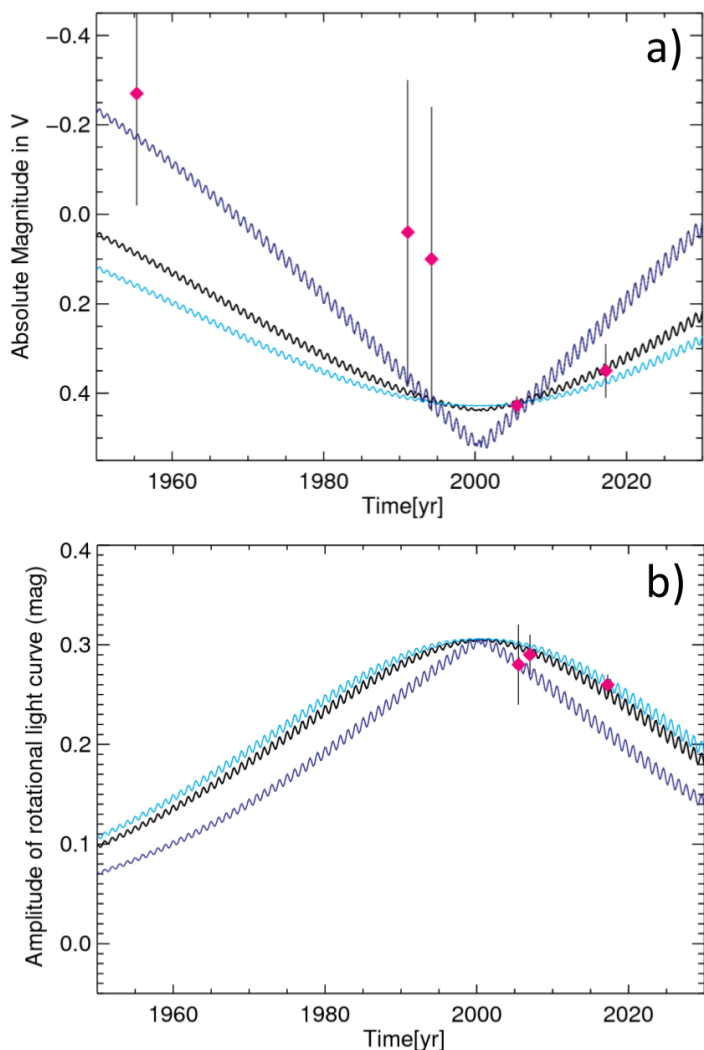


Figura 7. Modelos fotométricos para a), la magnitud absoluta del sistema de Haumea en función del tiempo. Los diamantes representan las observaciones y las líneas son los modelos. La línea delgada celeste representa un modelo sin anillo, la línea negra un modelo con anillo de 70km de anchura y albedo geométrico 0.09. La línea azul corresponde a un modelo con un anillo más ancho y brillante. Este puede descartarse porque produce un cambio en la amplitud de la curva de luz que es demasiado pronunciada para ser compatible con las observaciones (panel b). b) Amplitud de la curva de luz para los mismos modelos que en a).

blemente, la mayoría de las cámaras CCD de los grandes telescopios no tienen tiempos de lectura cortos y en este caso concreto el tiempo de lectura era de 5s, que comparado con el tiempo de integración de 10s, corresponde al 50% del tiempo. Por tanto, la probabilidad de no captar el ingreso o el egreso debido al anillo era alta en este telescopio.

A partir de un ajuste a la posición de los fenómenos secundarios en el plano del cielo, se obtiene un anillo de radio 2287 km, con una incertidumbre de unos 60 km (figura 6). Por otro lado, un ajuste a los perfiles de ingreso y egreso de estos fenómenos secundarios desde el observatorio de Konkoly (el único observatorio donde la cámara era suficientemente rápida para poder tomar una imagen por segundo sin tiempos muertos) da como resultado una anchura del anillo de unos 70km, con una opacidad de alrededor del 50%. Los 2287km de distancia caen completamente dentro del límite de Roche, lo que significa que la interacción de marea con Haumea no permite que el material del anillo pueda agregarse y dar lugar a que se forme un satélite. Por supuesto, los anillos observados en los cuatro planetas gigantes del sistema solar, están todos dentro del límite de Roche.

Para que un anillo circular, que es lo que esperamos, muestre una proyección elíptica, tiene que haber un cierto ángulo de inclinación. Ese ángulo de inclinación con respecto al observador tiene que ser de 13.8 grados para explicar la razón de ejes de la elipse que ajusta al anillo (o -13.8 grados). Como los anillos y los discos son siempre ecuatoriales, eso significa que el cuerpo central de Haumea también tiene una inclinación de 13.8 grados (o -13.8).

Además, el polo del anillo coincide con el polo de la órbita del satélite Hi'iaka. En otras palabras, el anillo y el satélite se encuentran en el mismo plano, lo que puede dar ideas sobre sus orígenes. Y otro aspecto muy interesante del anillo es que está situado en una posición donde las partículas del anillo orbitan alrededor de Haumea en exactamente 3 veces su periodo de rotación. En otras palabras, Haumea rota exactamente 3 veces alrededor de su eje en el tiempo en que una partícula del anillo completa una revolución orbital alrededor de Haumea. Esto es un típico fenómeno resonante que indica que el anillo parece estar situado en una resonancia 3:1 con la rotación de Haumea. Esto podría ser una mera coincidencia, pero lo más probable es que no sea así.

Usando modelos de la luz reflejada por el anillo, resulta que el mismo no puede contribuir con mucha luz, o habríamos detectado un cambio de brillo de Haumea mayor que el observado en unos 15 años desde su descubrimiento. Además, estos modelos permiten descartar una de las dos posibles orientaciones del anillo (la de inclinación -13.8 grados). En otras palabras, una de las dos orientaciones posibles del anillo es completamente incompatible con la serie histórica

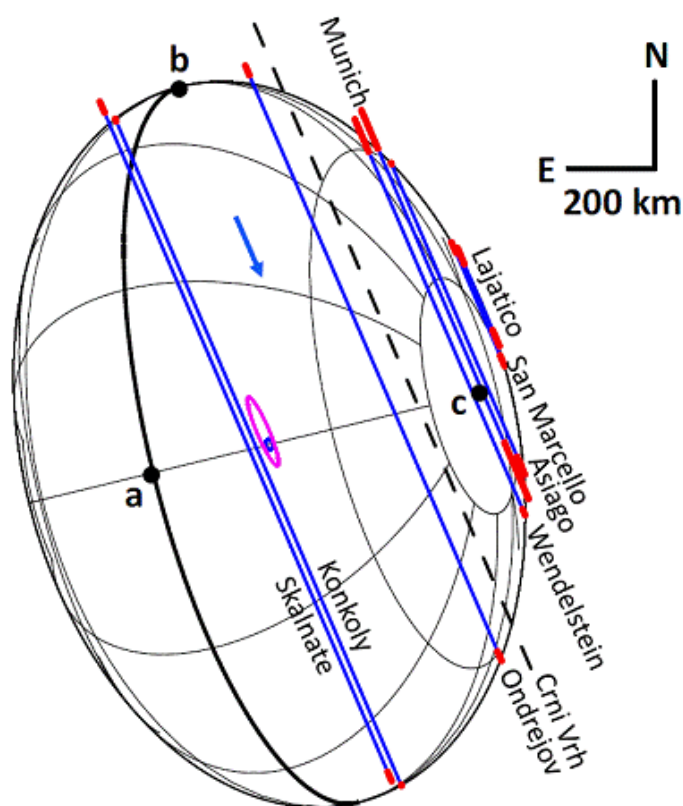


Figura 8. Ajuste elíptico a los extremos de las cuerdas de ocultación. En rojo se indica la incertidumbre de las cuerdas. La elipse roja indica el centro de la elipse del anillo, con su error. La pequeña elipse central azul muestra el centro de la elipse (con sus errores) que mejor ajusta a los extremos de las cuerdas.

de datos fotométricos de Haumea. Por otro lado, un anillo brillante, más brillante del 5% del total del brillo de Haumea, no puede explicar los datos obtenidos de la bibliografía y de observaciones propias (diamantes de color rosa en la figura 7). Por tanto, este tope implica que el albedo geométrico del anillo es considerablemente menor que el de la superficie de Haumea, del orden de 5 veces menor. Este albedo obtenido para el anillo de Haumea es similar al del anillo de Chariklo.

Chariklo, un cuerpo de unos 250km de diámetro con una órbita del tipo Centauro (entre Júpiter y Neptuno) fue el primer objeto del sistema solar aparte de los planetas gigantes en el que encontramos anillos, precisamente con la técnica de las ocultaciones (Braga-Ribas et al. 2014). Y poco después, detalles similares a los producidos por los anillos de Chariklo, fueron encontrados en ocultaciones antiguas producidas por el Centauro Chiron (Ortiz et al. 2015). Todo esto dirigió la atención hacia los centauros y a la fenomenología específica de éstos para explicar el sorprendente descubrimiento de anillos en objetos de tamaño no pla-

netario. El descubrimiento de un anillo alrededor de Haumea, un cuerpo mucho mayor que Chariklo, mucho más distante, en una clase dinámica muy distinta, con satélites y con una forma triaxial muy ovalada, tiene importantísimas implicaciones, y es de una gran trascendencia. Quizá incluso los anillos sean bastante comunes en la región transneptuniana, de donde provienen los centauros, y se abren muchas líneas nuevas de investigación en el sistema solar más externo.

Tras el análisis del anillo, nos centramos ahora en la forma del cuerpo principal que se obtiene a partir de la ocultación y de otros datos. Resulta que, a los extremos de las cuerdas producidas por el cuerpo principal, podemos ajustarles una elipse, ya que la forma proyectada de Haumea esperamos que siga esa figura. El ajuste nos da 1704 ± 4 km y 1138 ± 26 km para los ejes mayor y menor de la elipse (figura 8). El ángulo de posición del eje menor es de -76.3 ± 1.2 grados, que coincide bastante bien con el ángulo de posición de la elipse del anillo, dentro de un margen de un grado,

confirmando la idea inicial de que el anillo está en el plano ecuatorial de Haumea, con una indeterminación de poco más de un grado.

Usando el área proyectada y conociendo el brillo de Haumea en el momento de la ocultación, pero descontándole la contribución de los satélites y del anillo, obtenemos un albedo geométrico para Haumea bastante preciso, que resulta ser de 0.51 ± 0.02 , muy inferior a lo que se pensaba hasta la fecha, ya que con modelos térmicos aplicados a datos del observatorio espacial Herschel se había obtenido un valor de 0.8 ± 0.1 (Fornasier et al. 2013), pero esta modelización no había tenido en cuenta la presencia del anillo ni otros aspectos clave lo que dio lugar a un valor del albedo muy sobreestimado. Con la cifra obtenida en la ocultación, Haumea tiene un albedo muy parecido al de Caronte, el satélite de Plutón, y esto tiene sentido ya que espectralmente Haumea y Caronte se parecen mucho. Además, al igual que Caronte, Haumea tampoco tiene una atmósfera global, según hemos podido determinar durante la ocultación. Si Haumea hubiera tenido una atmósfera como la de Plutón, ésta habría producido una disminución gradual del brillo en el ingreso de la ocultación, y una recuperación gradual en el egreso. Pero no fue así, y podemos dar cotas de 15 nbar y 50 nbar para las presiones de posibles atmósferas de nitrógeno o metano, respectivamente.

De la forma proyectada durante la ocultación se puede obtener la forma tridimensional de Haumea, si la combinamos con datos de curvas de luz rotacionales de Haumea y modelos simples. Sabiendo la fase rotacional a la que se produjo la ocultación (mediante datos tomados días antes y después de la ocultación), que resultó caer prácticamente en un mínimo de brillo (momento en que Haumea exhibe su menor sección transversal), podemos reconstruir la forma 3D.

La amplitud de la curva de luz rotacional de Haumea, determinada por el telescopio espacial HST, es de 0.32mag (Lockwood et al. 2014). El telescopio espacial permite separar Haumea de Hi'iaka, y por eso se puede obtener la mejor estimación de esta amplitud. Usando la siguiente ecuación (Binzel et al. 1989)

$$\Delta m = -2.5 \log \left(\frac{b}{a} \left(\frac{a^2 \cos^2(\theta) + c^2 \sin^2(\theta)}{b^2 \cos^2(\theta) + c^2 \sin^2(\theta)} \right)^{1/2} \right)$$

en la que Δm es la amplitud, a , b , c son los semiejes mayores del elipsoide triaxial y θ es el ángulo de inclinación del eje de rotación con respecto al observador, empleando el valor de este ángulo para 2009, que es cuando se hicieron las observaciones del HST y usando los valores de la elipse de la ocultación, obtenemos $a = 1,161 \pm 30$ km, $b = 852 \pm 4$ km y $c = 513 \pm 16$ km. Hay que tener en cuenta que el semieje mayor (a') de la elipse de la ocultación da el valor de b directamente porque la ocultación se produjo en el mínimo de la curva de luz. Y el semieje menor de la elipse de la ocultación (b') está relacionado con los semiejes a y c de la siguiente manera $b'^2 = c^2 \sin^2(\theta) + a^2 \cos^2(\theta)$ que permite determinar c . Es llamativo que en su eje más largo ($2a = 2322$ km), Haumea es prácticamente tan grande como Plutón.

La densidad de Haumea, usando la masa (bien conocida a partir de las órbitas de sus satélites) junto con el volumen determinado a partir de la forma 3D de nuestro trabajo, resulta ser de 1885 ± 80 kg/m³, y el diámetro equivalente de una esfera con el mismo volumen es de 1595 ± 11 km. Todos estos cálculos se basan en la suposición de que el anillo no contribuye en nada al brillo total de Haumea. Para un límite superior del 5% que establecimos con modelos fotométricos, la amplitud real de la curva de luz sería mayor aún del valor 0.32 mag y por tanto el semieje a sería aún mayor de lo determinado aquí. El diámetro equivalente sería de 1632 km y la densidad de 1757 kg/m³ en este caso. Estos dos valores de la densidad (1885 y 1757 kg/m³) son significativamente menores que la cota inferior de 2600 kg/m³ basada en las formas de equilibrio hidrostático o basada en determinaciones previas del volumen de Haumea que manejaba la comunidad científica antes de nuestro trabajo. Esta densidad tan alta representaba un puzzle difícil de explicar y requería ideas exóticas.

La nueva densidad está mucho más de acuerdo con la densidad de otros TNOs grandes, como el propio Plutón, y también es mucho más acorde con la tendencia de aumento de densidad con el tamaño del TNO que se está empezando a esbozar con unas pocas medidas directas e indirectas de densidades de TNOs (obtener densidades de cuerpos del sistema solar es muy complicado y en la práctica solo se conoce con precisión para un grupo muy reducido de cuerpos). Por tanto, nuestro trabajo aclara también el puzzle de la densidad de Haumea.

Hay que destacar además que las razones de ejes obtenidas para el elipsoide triaxial no son consistentes con las que se esperan de las formas de equilibrio hidrostático de un objeto homogéneo (Chandrasekhar 1987) para la velocidad de rotación y para la densidad de Haumea obtenida de la ocultación.

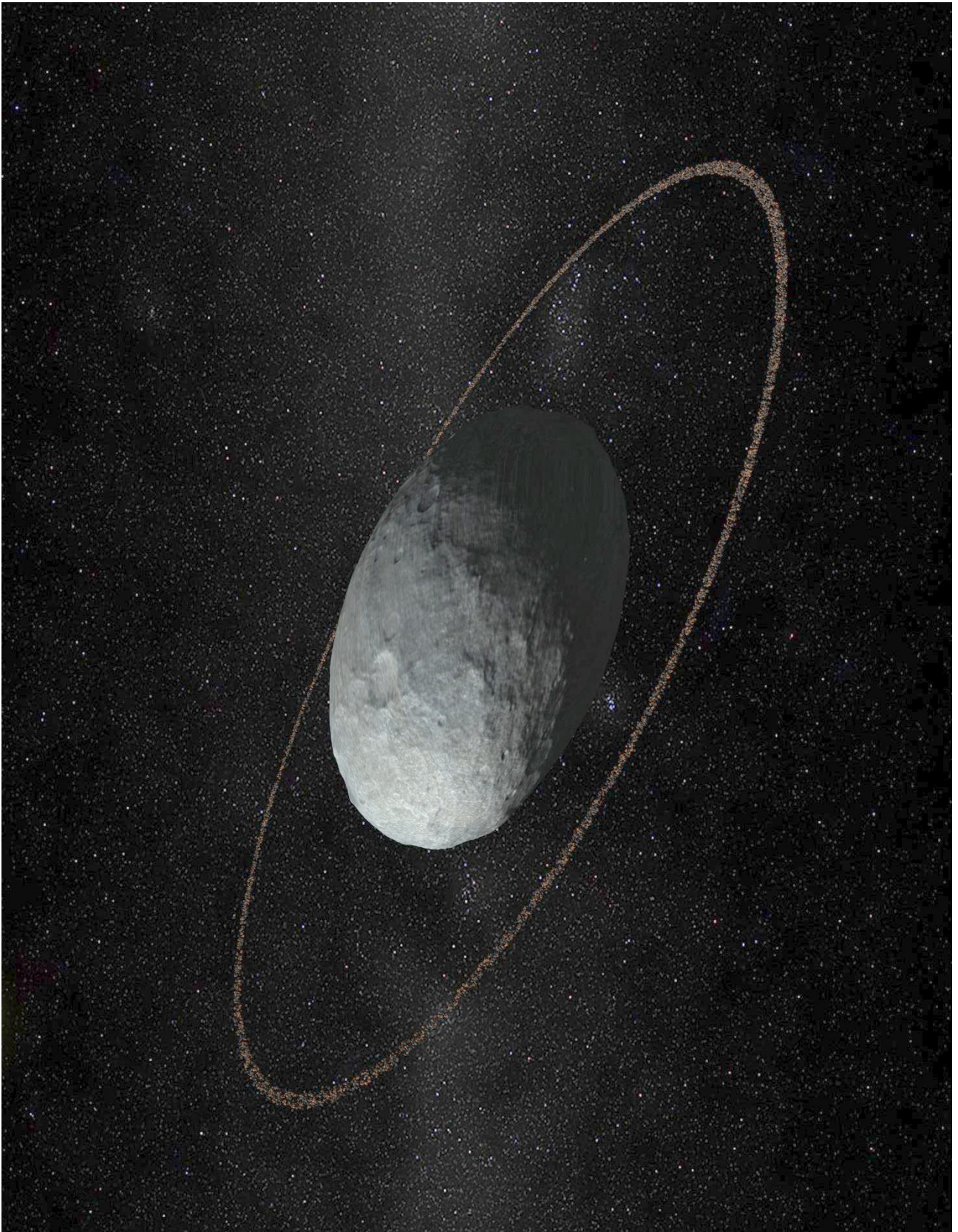
En la condición de equilibrio hidrostático, para la secuencia de Jacobi el parámetro rotacional $\omega^2/\pi G\rho$ debe estar acotado entre 0.284 y 0.374 (Chandrasekhar 1987). En esta expresión ω es la frecuencia rotacional, G la constante gravitacional y ρ la densidad. Usando el periodo de rotación de 3.915341 h de Haumea, se obtiene la condición $2530 < \rho < 3340$ kg/m³. Esto está muy lejos del límite de $1885 + 80 = 1965$ kg/m³. Por tanto, la forma de Haumea no puede ser la de un elipsoide homogéneo en equilibrio hidrostático.

Un trabajo anterior al nuestro (Holsapple 2007) ya había presentado la hipótesis de que Haumea podría tener mucha menor densidad que la cota mínima de ~ 2600 kg/m³ si se usa física de medios granulares para determinar la forma del cuerpo, en lugar de la hipótesis simple de comportamiento fluido. En este caso, el parámetro principal para los medios granulares, que es el ángulo de fricción, resultaría estar comprendido entre 10° y 15° para dar lugar a una razón de ejes $c/a = 0.4$ como la obtenida de la ocultación. Como referencia, el ángulo máximo de fricción de las rocas sólidas en la Tierra es de unos 45° y el de un fluido de 0°. A la luz de todo esto, la condición de equilibrio hidrostático, presente en la definición de planeta y de planeta enano podría tener que replantearse o repensarse. No obstante, la diferenciación (cambio de densidad hacia el interior) y otros efectos también pueden estar desempeñando algún papel en la forma final de Haumea. Todos estos aspectos han de investigarse en el futuro.

REFERENCIAS

1. Binzel, R. P., Farinella, P., Zappala, V. & Cellino, A. Asteroid rotation rates –Distribution and statistics. IN Asteroids II. University of Arizona Press, Tucson, AZ, 416-441 (1989).
2. Braga-Ribas, F. et al. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature* 508, 72-75 (2014).
3. Chandrasekhar, S. Ellipsoidal Figures of Equilibrium. Dover Books on Mathematics, Dover, New York (1987).
4. Fornasier, S. et al. TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. VIII. Combined Herschel PACS and SPIRE observations of nine bright targets at 70-500 μ m. *Astron. Astrophys.* 555, id.A15, 22 (2013).
5. Holsapple K. A. Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61. *Icarus* 187, 500-509 (2007).
6. Lockwood, A. C., Brown, M. E. & Stansberry, J. The Size and Shape of the Oblong Dwarf Planet Haumea, Earth, Moon, and Planets 111, 127-137 (2014).
7. Ortiz, J. L. et al. A mid-term astrometric and photometric study of trans-Neptunian object (90482) Orcus. *Astron. Astrophys.* 525, A31 (2011).
8. Ortiz J. L. et al. Possible ring material around Centaur (2060) Chiron. *Astron. Astrophys.* 576, id.A18 (2015).
9. Ortiz, J. L. et al. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *Nature*, 550, 219 (2017).

Figura 9. En la página opuesta, concepción artística de Haumea con las proporciones correctas del cuerpo principal y del anillo. El anillo se encuentra a una distancia de 2287 kilómetros respecto al centro del cuerpo principal y es más oscuro que la propia superficie del planeta enano.



CARACTERIZANDO LA DISTRIBUCION DE OXIGENO

Alrededor del 10% de la materia visible que encontramos en galaxias espirales típicas como la nuestra se encuentra en forma de gas. Gas compuesto por átomos, moléculas e iones que se encuentran entre las estrellas y que, probablemente, algún día fueron o serán parte de éstas. Gas cuyas propiedades y distribución espacial es consecuencia de los procesos que han tenido lugar en las galaxias en las que se encuentra. Por lo tanto, su estudio es fundamental para entender y comprender la formación y evolución galáctica.



Laura Sanchez

Investigadora postdoctoral en el
Instituto de Astrofísica de Canarias
lsanchez@iac.es

Premio a la mejor tesis doctoral
de 2017 en Astronomía y Astrofísica

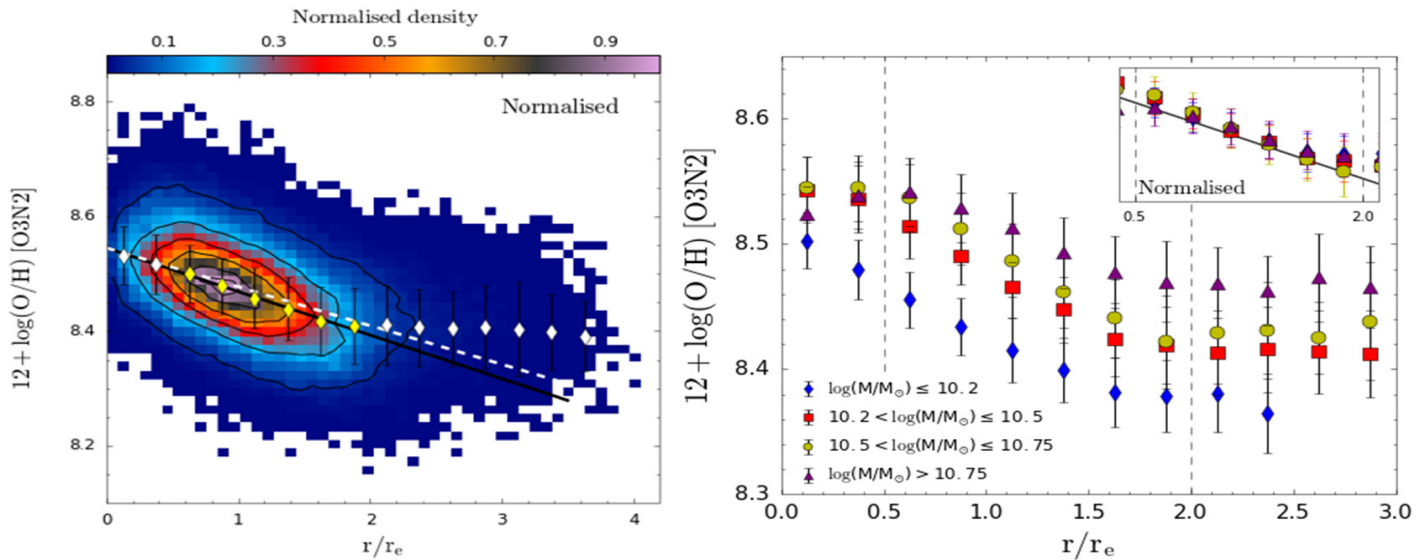
De especial interés es el estudio de las regiones HII, regiones de gas ionizado asociadas con formación estelar, cuya composición química queda reflejada en la forma característica en que estas regiones HII emiten. Su estudio nos permite saber qué elementos las forman y en qué cantidad. Aprovechando que podemos encontrar regiones HII prácticamente en cualquier lugar dentro de las galaxias espirales, en esta tesis hemos caracterizado, como nunca se había hecho antes, la distribución de la cantidad de oxígeno (uno de los constituyentes de este gas) en estos sistemas.

Los primeros trabajos que estudiaron esta distribución pronto vieron que el oxígeno era mucho más abundante en las partes centrales que en la periferia, asociándolo rápidamente con un crecimiento de dentro hacia afuera de estos sistemas. Sin embargo, la cobertura en dos dimensiones de un gran número de galaxias que nos daban los datos de cartografiados como CALIFA (usando datos de PMAS/CAHA) o AMUSING (MUSE/VLT) nos colocaban en una situación inmejorable para abordar el problema con mucho mayor detenimiento.

En esta tesis demostramos que esta primera distribución caracterizada por un simple decrecimiento radial no era más que una primera descripción de la distribución real. Además de este comportamiento, las galaxias espirales más masivas presentan claras caídas en la abundancia de oxígeno en sus zonas más centrales, caídas que son cada vez menos pronunciadas a medida que nos movemos a sistemas menos masivos. Pero no sólo eso, este decrecimiento no llega hasta el final de la galaxia, sino que hay una distancia radial, más o menos común a todas las galaxias, a partir de la cual la cantidad de oxígeno se aplanan. De esta manera, para una correcta caracterización de la distribución de oxígeno en galaxias espirales necesitamos tener en cuenta desviaciones respecto a un simple decrecimiento, desviaciones probablemente ligadas al hecho de que una galaxia es un sistema "vivo", afectada de movimientos internos y migraciones radiales de material.

Sin embargo, para llevar a cabo una descripción completa de la distribución de oxígeno en galaxias espirales no debíamos limitarnos a estos estudios radiales. Recientes simulaciones numéricas empezaban a predecir que debían existir además variaciones no radiales como consecuencia de la presencia de brazos espirales o de migración radial. Así, decidimos hacer

DEL GAS IONIZADO EN GALAXIAS ESPIRALES



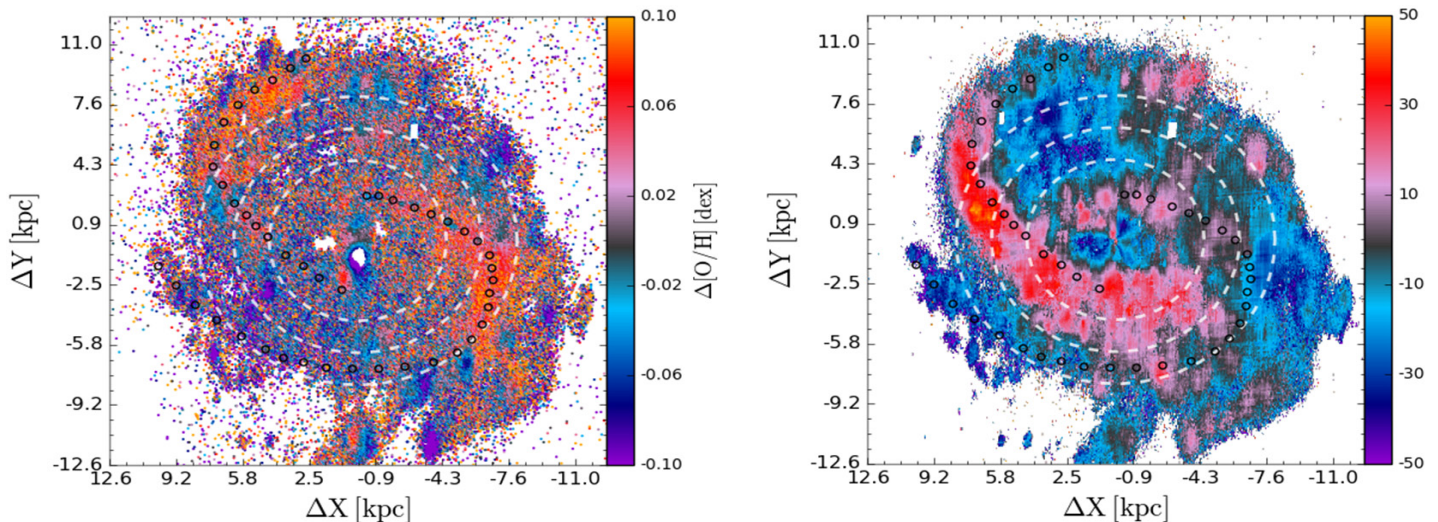
Izquierda: Distribución radial de densidad normalizada de la abundancia de oxígeno en la muestra de galaxias espirales de CALIFA, donde se aprecia el gradiente común y el aplanamiento externo. Derecha: Perfiles radiales medios de abundancia de oxígeno para cuatro bins diferentes de galaxias de distinta masa, donde se aprecia la existencia de la caída interna de abundancia de oxígeno y su dependencia con la masa.

un estudio mucho más pormenorizado de nuestras galaxias encontrando que, además de ser las partes internas más ricas en oxígeno que las partes más externas, también las zonas más brillantes (asociadas con los brazos) presentaban en general mayor cantidad en oxígeno que el resto de zonas (a un radio dado). En particular, para una de las galaxias en las que obtuvimos mayores diferencias (NGC6754), además estudiamos cómo se movía este gas. Claramente pudimos asociar que las zonas más ricas en oxígeno (de nuevo, a un radio dado, para evitar el ya conocido decrecimiento radial), además parecían corresponder con zonas que se movían, a lo largo de la zona delantera de los brazos, de las partes centrales de la

galaxia hacia afuera. De la misma manera, en la zona posterior de los mismos, material menos metálico se movía de fuera hacia adentro, en perfecto acuerdo con modelos teóricos que proponen que los brazos espirales son realmente fenómenos cuyos patrones de velocidad decrecen con el radio.

Con esta tesis ponemos de manifiesto la compleja naturaleza de la distribución de abundancia de oxígeno en galaxias espirales, necesitando desviaciones radiales internas y externas así como variaciones no radiales que nos dan pistas sobre el origen de los brazos espirales. Se trata de un paso más hacia nuestra comprensión de la formación y evolución galácticas.

Distribución deproyectada en 2 dimensiones de los residuos de abundancia de oxígeno (izquierda) y de velocidad (derecha) de NGC 6754 utilizando datos de AMUSING (MUZE/VLT) una vez sustraídos el gradiente radial y la curva de rotación, respectivamente



XIII REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA SEA



XIII REUNIÓN SOCIEDAD ASTRONOMICA SALAMANCA, HOSPEDADO

COMITÉ CIENTÍFICO:

Andrés Asensio (IAC)
Fernando Atrio (USAL)
Paula Benavidez (UA)
Fernando Buitrago (IA, Lisboa)
Benjamín Montesinos (CAB) (Coordinador)
Rainer Shoedel (IAA)
Alicia Sintès (UIB)
Licia Verde (ICCUB)
Eva Villaver (UAM)



CIENTÍFICA DE LA ESPAÑOLA DE ONOMÍA

16-20 JULIO DE 2018

DERÍA FONSECA

COMITÉ LOCAL:

Fernando Buitrago (IA, Lisboa) (Coordinador)

Juan Manuel Corchado (USAL)

Fernando de la Prieta (USAL)

Belén Pérez (USAL)

María Ángeles Pérez (USAL)

Inés Rodríguez (Museo de la Ciencia, Valladolid)



UNIVERSIDAD
DE SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL



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.

PREMIO A LAS MUJERES CIENTÍFICAS DE GALICIA

Nuestra colega **Begoña Vila Costas** ha conseguido el Premio María Josefa Wonenburger Planells 2017 que concede la Xunta De Galicia. Este premio quiere reconocer a las mujeres científicas de Galicia. Originaria de Vigo, Begoña trabaja actualmente en el centro Goddard de la NASA en Washington D.C. ¡Enhorabuena, Begoña!

PREMIO VANGUARDIA DE LA CIENCIA

José Luis Ortiz, investigador científico del IAA, ha sido galardonado con el Premio *Vanguardia de la Ciencia*, un premio en el que los lectores de La Vanguardia votan los descubrimientos más importantes del año realizados en España. Esta es la primera vez que una investigación de astronomía gana el premio Vanguardia de la Ciencia ¡Muchas felicidades, José Luis!

LAURA SÁNCHEZ MENGUIANO PREMIO SEA TESIS 2017

La Junta Directiva de la Sociedad Española de Astronomía ha decidido conceder el Premio a la mejor Tesis Doctoral Española en Astronomía y Astrofísica 2017 a **Laura Sánchez Menguiano**, con su tesis "The shape of the ionised gas abundance distribution in spiral galaxies", realizada en el Instituto de Astrofísica de Andalucía y en el Departamento de Física Teórica y del Cosmos de la Universidad de Granada y supervisada por los doctores Sebastián Sánchez Sánchez (UNAM) e Isabel Pérez Martínez (UdG). ¡Enhorabuena, Laura!

JOSÉ ANTONIO CABALLERO, HIJO PREDILECTO

La Leal Villa de El Escorial ha nombrado recientemente a nuestro colega **José Antonio Caballero** Hijo Predilecto (pues caballero ya era) de la dicha Villa. ¡Felicitaciones, el título nobiliario dentro de nada!

XAVIER BARCONS, EN EL CINTURÓN DE ASTEROIDES

El asteroide **327943 Xavierbarcons** recibió el pasado 29 de mayo el nombre del actual director de ESO y colega nuestro Xavier Barcons. Previamente designado como 2007 EQ26, fue descubierto en marzo de 2007 por V.S. Casulli desde Vallemare di Borbona (Italia). Gira alrededor de nuestra estrella con una órbita de 2.76 UA de semieje mayor y un periodo de 4.58 años. ¡Muchas felicidades, Xavier!

PREMIOS GRANADA, CIUDAD DE LA CIENCIA Y LA INNOVACIÓN

Nuestros colegas **Josefa Masegosa** y **Juan Pedro Cobo**, ambos del Instituto de Astrofísica de Andalucía, han sido distinguidos con sendos galardones en la primera edición del premio Granada, Ciudad de la Ciencia y la Innovación, organizados por el ayuntamiento de dicha ciudad. ¡Nuestras más calurosas felicitaciones a los dos!

NUEVO NOC EN ESPAÑA DE LA OFICINA DE DIVULGACIÓN DE LA IAU

Amelia Ortiz Gil, del Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia, ha pasado en junio a ser el punto nacional español de contacto (NOC) de la Oficina de Divulgación de la Astronomía de la IAU, sustituyendo a Benjamín Montesinos que desarrolló una gran labor como NOC durante tres años. ¡Muchas gracias Benja!

OBITUARIOS

Durante el primer semestre de 2018 hemos despedido con gran dolor y de forma inesperada en ambos casos a nuestros compañeros y amigos Diego Pascual Sáez Milán y Javier Montojo Salazar. Descansen en paz.

A RAS DE CIELO

David Galadí-Enríquez

Fotografías de

Juan Carlos Casado

ISBN: 978-84-460-4595-3

Editorial Akal

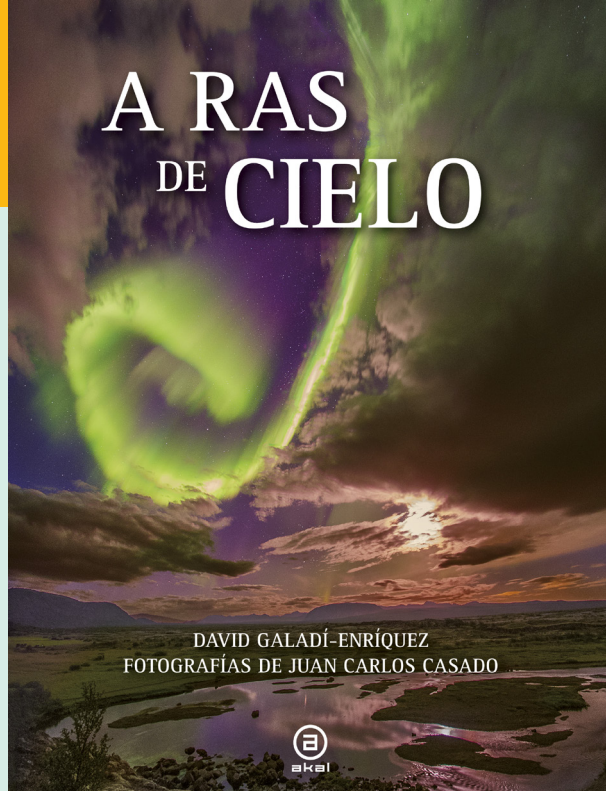
Inmersos en la vorágine comunicativa actual, la divulgación astronómica de consumo se ha convertido en una mera contemplación de imágenes de fenómenos cada vez más espectaculares, más coloridos y más violentos. El telescopio espacial Hubble, que tanto ha aportado al conocimiento científico, paradójicamente ha contribuido a potenciar esta visión superficial de la astronomía sofisticada y, en cierto modo, elitista y alejada de la gente.

Sin embargo la astronomía es mucho más que imágenes impactantes. Mediante el uso de instrumentos cada vez más complejos, permite contestar las eternas preguntas sobre nuestro pasado y nuestro futuro como especie en este planeta. Además los astrónomos aficionados sobre todo, pero también numerosos profesionales, acercan las maravillas celestes a la población para que las valoren y las sientan también como parte de la cultura humana.

Hace muchos años, antes incluso de la invención del telescopio, los humanos se maravillaban ante el cielo estrellado y trataban de entenderlo. Grandes astrónomos como Tycho Brahe o Johannes Kepler consiguieron grandes logros con la mera contemplación metódica del firmamento, observando el cielo con ojos curiosos.

La visión detallada del cielo a simple vista, lejos de la contaminación lumínica de las ciudades, es asequible a cualquier observador habitual o esporádico interesado, y continúa aportando información y conocimiento. Sin embargo ahora, a diferencia de la época en que vivieron los astrónomos citados, disponemos de un bagaje intelectual que permite interpretar correctamente los fenómenos observados. Fenómenos cotidianos como el arco iris, el azul del cielo, el movimiento de los objetos celestes, el brillo de las estrellas, la cara de la Luna, los eclipses, etc, son fuentes de preguntas, cuyas respuestas sugieren nuevas preguntas más profundas sobre el universo. Y si hay alguien que se haya detenido a intentar contestarlas, éste ha sido el astrónomo David Galadí-Enríquez, que en su libro **A ras del cielo**, recientemente publicado en la editorial Akal, nos demuestra haber mirado el cielo con los medios del pasado para interpretarlos a la luz de la ciencia moderna.

La aportación de David es singular. Sorprende cómo es capaz de explicar en pocas líneas y de manera rigurosa un fenómeno celeste complejo. Para ello el autor va a la raíz del problema, lo trocea en sus partes constituyentes, analiza cada parte en detalle, y con todo despiezado, da su visión científica de ma-



nera clara, sin saltos en el vacío. Además, extiende su explicación a otros escenarios más lejanos para ofrecernos finalmente una visión general del fenómeno estudiado. En definitiva, aplica perfectamente los métodos de la ciencia de manera sencilla, sin acudir al principio de autoridad tan usual en muchos libros de divulgación científica.

El autor no desaprovecha la ocasión para cargar contra el cáncer de las pseudociencias, tan incrustado en nuestra sociedad. Es paradójico que, en una época en la que la tecnología es omnipresente en nuestras vidas, estas falacias tengan tanta aceptación. En cambio, la claridad y la rapidez con que son desmontadas estas falsedades en este libro permiten que *A ras de cielo* también pueda aportarnos ideas para rebatir los argumentos de los amigos de las energías negativas, del agua con azúcar, de los planetas influencers y demás supercherías.

Y para acabar, desearía destacar la faceta de David como narrador de historias. Así, el capítulo dedicado a las auroras boreales puede leerse también como un cuento científico. En él conoceremos al capitán Pérez, defendiendo la República desde las trincheras de Extremadura, y a otros personajes, mientras brillan en la noche unas luces de colores en una Europa ya en guerra.

Necesitamos volver a ver el cielo nocturno con ojos curiosos y, como hizo el capitán Pérez, aplicar la razón para explicarlo. Debemos volver a la astronomía próxima, al alcance de todos, popular, de primera línea, en definitiva, a una astronomía de trincheras.

Y para animarnos a ello, nada más sugerente que las imágenes que acompañan al texto. Espectaculares imágenes del cielo a simple vista obtenidas por el astrofotógrafo Juan Carlos Casado, que ha sabido estar en el lugar y en el momento adecuados para captar los fenómenos descritos en el texto y compartirlos con los lectores.

Enric Marco
 Dept. Astronomia i Astrofísica
 Universitat de València

Explorando radio púlsares con nueva tecnología

Autor: Pablo Torne Torres (ptorne@mpifr.de)

Tesis doctoral dirigida por:

Michael Kramer y Frank Bertoldi

Centro: IMax Planck Institute for Radio

Astronomy / Universidad de Bonn

Fecha de lectura: 20 de Diciembre de 2016

Esta tesis presenta una investigación sobre la aplicación de nuevos receptores y técnicas de observación a diferentes longitudes de onda de radio para la búsqueda y el estudio de púlsares.

En general, los púlsares más interesantes son aquellos en sistemas binarios, por su potencial de permitir pruebas con alta precisión de la teoría de la relatividad general y de otras teorías de gravedad alternativas, y también para restringir la ecuación de estado de la materia ultra densa. Se presenta en este trabajo una búsqueda de púlsares en el centro galáctico, donde las posibilidades de encontrar púlsares binarios, incluyendo el deseado sistema púlsar-agujero negro, son altas. Los datos fueron tomados con el telescopio de 100-m en Effelsberg, con frecuencias entre 4.85 y 18.95 GHz para disminuir en lo posible el efecto del fuerte *scattering* en esta dirección particular. Con aproximadamente el 50% de los resultados revisados, no se encontraron nuevos púlsares. Analizamos en detalle la calidad de las observaciones, hallando que nuestra sensibilidad a púlsares en el centro galáctico está altamente reducida por la contribución a la temperatura total del sistema de la radiación de propio centro galáctico, y también por la opacidad atmosférica. Concluimos que la escasez de detecciones de nuevos púlsares en esta y posiblemente también en búsquedas similares anteriores es debido a una carencia de sensibilidad de las observaciones, y no necesariamente a una falta de púlsares en la región.

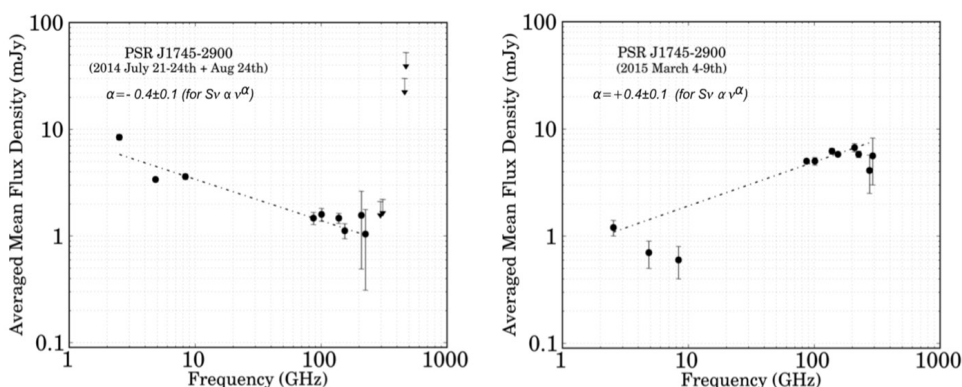
En Marzo de 2013, un radio magnetar, uno de los tipos más raros de púlsares, se volvió repentinamente visible desde el centro galáctico. Se llevaron a cabo dos campañas de observación multifrecuencia para esta fuente, SGR J1745-2900, con el objetivo de estudiar las propiedades de su emisión en radio. Cuatro observatorios fueron utilizados (incluyendo observaciones simultáneas): el telescopio equivalente a 94-m de Nançay, en Francia, el de 100-m de Effelsberg, el 30-m de IRAM en Pico Veleta, y el telescopio de 12-m APEX, en Chile. Estos instrumentos nos permitieron una cobertura muy amplia en frecuencia, de 2.5 a 472 GHz. Las observaciones en el rango milimétrico hicieron uso de nuevos *backends* de continuo nunca antes utilizados para la observación de púlsares. Como resultado, se consiguió la detección de SGR 1745-2900 de 2.54 a 291 GHz, permitiendo la medida de su variable densidad de flujo, su también variable índice espectral, y evidencia de un alto grado de polarización lineal en la emisión hasta 154 GHz. Las detec-

ciones por encima de 144 GHz son las detecciones de emisión pulsada de estrellas neutrones a mayor frecuencia hasta la fecha en el rango de radio, poniendo nuevas limitaciones a los modelos que tratan de explicar el todavía desconocido mecanismo de emisión en radio de los púlsares.

Dado que el estudio de las propiedades de la emisión de los púlsares a muy altas frecuencias de radio es relevante para comprender el proceso de emisión, se llevaron a cabo observaciones adicionales de una muestra de seis púlsares entre 87 y 154 GHz utilizando el telescopio de 30-m de IRAM. Los resultados iniciales de este proyecto incluyen las detecciones de PSR B0355+54 hasta 138 GHz, junto con estimaciones de su densidad de flujo. Para los otros cinco púlsares no hay detecciones convincentes. Por encima de 87 GHz, nuestras detecciones de PSR B0355+54 son las de mayor frecuencia en radio de cualquier púlsar normal (excluyendo los magnetares), y demuestran que las estrellas de neutrones continúan emitiendo en el rango milimétrico. No se encontraron indicios de un aplanamiento o cambio de tendencia en el espectro, una característica que predicen ciertos modelos y que podría ayudar a identificar el mecanismo de emisión.

Además de la explotación científica de estos cuatro telescopios, se llevó a cabo una investigación de los aspectos técnicos de dos receptores de radio de nueva generación para el telescopio de 100-m de Effelsberg: el receptor *Ultra-Broad-Band* (UBB) y el *Phased Array Feed* (PAF), ambos precursores de receptores para el *Square Kilometre Array* (SKA). Las pruebas con el UBB incluyeron la investigación de su punto focal óptimo y su temperatura de sistema a través de toda la banda de operación. Concluimos que su punto focal óptimo es aquel que optimiza la ganancia de la parte alta del rango de frecuencias. También mostramos como la sensibilidad del UBB es significativamente menor cuando el receptor se instalaba en el telescopio (por un factor 3) comparado con las medidas en el laboratorio, debido a las fuertes interferencias producidas por el ser humano. También se llevó a cabo el primer experimento científico con el UBB para su comisionado: una búsqueda de púlsares en fuentes de rayos gamma detectadas por el *Large Area Telescope* (LAT) del satélite Fermi, sin contrapartida conocida. No se detectaron nuevos púlsares, pero el análisis de los datos demostró que grandes partes de la banda de operación del UBB (entre el 50 y el 80%) estaban corrompidas por las constantes interferencias recibidas por el receptor. También se mostró que la interferencia llegaba a saturar el receptor, haciéndolo trabajar a menudo en el régimen no lineal. Por otro lado, se realizaron pruebas con una antena de muestra del PAF que se planea instalar en el 100-m. Las pruebas confirmaron que el receptor debería ser capaz de operar en Effelsberg sin una saturación permanente debido a la interferencia. En general, nuestros resultados concluyen que estos nuevos receptores pueden ser utilizados en entornos altamente afectados por señales electromagnéticas locales, pero que requieren de un diseño muy cuidadoso en la electrónica para suprimir aquellos rangos de frecuencia especialmente contaminados por las interferencias externas de radio.

Tesis disponible en: <https://zenodo.org/record/820584>



Espectro de emisión del magnetar del centro galáctico SGR 1745-2900 obtenido durante dos de las campañas de observación, en Julio y Agosto de 2014 (izquierda, Torne et al. 2015), y Marzo de 2015 (derecha, Torne et al. 2017). Se puede ver como su emisión alcanza los 291 GHz, su espectro es casi plano (a diferencia de la mayoría de los púlsares), y cómo varía con el tiempo su intensidad a diferentes frecuencias, cambiando a su vez el índice espectral del púlsar.

Técnicas de detección y caracterización de la materia interplanetaria próxima a la Tierra desde observatorios en tierra

Autor: Francisco Ocaña González
(focana@sciops.esa.int)

Tesis doctoral dirigida por: África Castillo-Morales y Jaime Zamorano

Centro: Universidad Complutense de Madrid
Fecha de lectura: 5 de Junio de 2017

Bajo el término de materia interplanetaria se engloban objetos en un gran rango de masas y tamaños en el Universo, desde el polvo micrométrico hasta los asteroides de centenares de kilómetros de diámetro. Esta materia toma parte de innumerables procesos en las ciencias planetarias. En las cercanías de nuestro planeta la materia interplanetaria es también relevante para el estudio de las ciencias de la Tierra y en la exploración espacial. El polvo extraterrestre participa en muchos procesos que tienen lugar en las capas más altas de la atmósfera. Asimismo, los asteroides son una amenaza para la humanidad debido a la energía que pueden liberar en caso de impacto contra la Tierra. Se considera que los asteroides mayores de 1 km podrían provocar una catástrofe de proporciones globales en caso de colisión, y por ello el 90% de ellos ya ha sido identificado. Actualmente los esfuerzos se centran en los objetos mayores de 140 m, con consecuencias sólo a nivel regional en caso de impacto. Fuera de la atmósfera terrestre estos cuerpos suponen un peligro para las naves espaciales, especialmente las partículas pequeñas que son las más numerosas y que pese a ello transportan energía suficiente como para comprometer su funcionamiento.

Partiendo del análisis de la distribución en frecuencia de tamaño (SFD) de la materia interplanetaria a 1 UA se han diseñado varias soluciones instrumentales para el estudio de asteroides y meteoroides, bajo la premisa de desarrollo sobre productos comerciales, listos para su reproducción en redes globales.

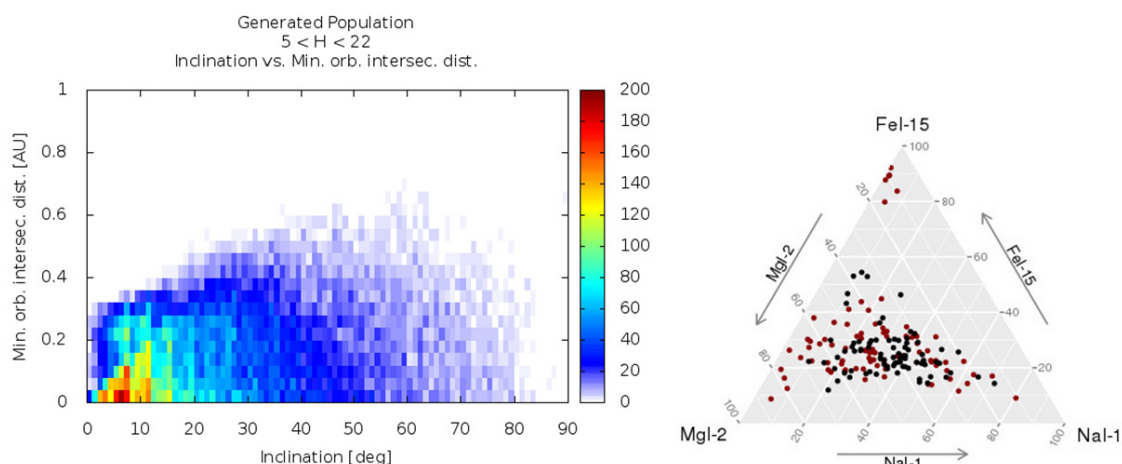
En este trabajo se presenta el diseño de un sistema robótico (los telescopios TBT) para la Agencia Espacial Europea (ESA), como prototipo de una futura red de detección de objetos próximos a la Tierra (NEOs). Para el estudio de asteroides se ha calculado el rendimiento de los telescopios TBT con una simulación de observación de una población realista de NEOs, que confirma su capacidad de descubrimiento y seguimiento de objetos > 400 m. El comisionado del primer telescopio ha verificado las características de diseño y por tanto está preparado para ser un programa de búsqueda muy competitivo cuando entre en funcionamiento.

Paralelamente, los objetos más pequeños que los asteroides se pueden observar usando la atmósfera como detector. Por ello el estudio de los meteoroides se hace principalmente a través del análisis de los meteoros. En particular este trabajo se centra en dos propiedades distintas de los meteoroides. Por un lado se investiga la distribución en frecuencia de tamaño/masa usando como observable la densidad de flujo de meteoroides que entran en nuestra atmósfera. El método desarrollado emplea observaciones en vídeo y analiza las propiedades de los meteoros para optimizar la detección. El resultado son tres aproximaciones observacionales desde tierra que hemos transformado en tres desarrollos instrumentales. Primero se ha diseñado y construido una estación de vídeo de todo el cielo para el Observatorio UCM, y se han analizado los datos de las Dracónidas de 2011 como ejemplo para demostrar la validez del sistema, con muy buenos resultados. Después se ha investigado la posibilidad de observar meteoros desde la estratosfera para salvar inconvenientes como la extinción o el tiempo atmosférico. Para ello se ha diseñado y probado en vuelo una instrumentación adecuada, y como demostración se ha medido la densidad de flujo de meteoroides para el vuelo en globo de las Gemínidas 2016. Este es un gran paso adelante en este campo al ser la primera vez que se usan datos tomados desde globo para determinar la densidad numérica espacial de meteoroides.

Por otro lado, para la caracterización en composición de los meteoroides se ha diseñado un juego de filtros para un sistema fotométrico de banda estrecha, equivalente a un sistema espectroscópico de baja resolución. Haciendo uso de fotometría sintética sobre los espectros de un catálogo se han reproducido algunos índices de clasificación de los meteoroides. Entre los resultados se puede destacar que el color V-R tiene una dependencia significativa con la velocidad y con la composición de los meteoroides. Esto significa que los sistemas de detección sin filtro o con filtros anchos pueden tener un importante sesgo en la detección de las diferentes poblaciones de meteoroides.

Tesis disponible en: <http://eprints.ucm.es/47590/>

Izquierda (Capítulo 2 – Detección de NEOs): Distribución de la distancia mínima orbital (MOID) frente a la inclinación para objetos con $5 < H < 22$ de la población empleada para la simulación con NEOPOPEI. El instrumento diseñado se ha optimizado para una estrategia de observación que da como resultado un sesgo observacional a objetos con MOID < 0.3 UA. Como resultado el programa de rastreo no muestrearía la población fuera del plano de la eclíptica. Se encuentra que este sesgo también aplica para los NEOs con mayores semieje mayor y excentricidad. Derecha (Capítulo 3 – Observación óptica de meteoros): Diagrama ternario con la intensidad de las líneas de Fe I(15), Mg I(2) and Na I(1) de Vojáček et al. (2015) en puntos rojos, y en puntos negros los flujos en las bandas definidas en este trabajo: F^{1a}, M¹ y D¹. Estas bandas no reproducen bien esta clasificación espectral pues líneas de elementos distintos al hierro se mezclan en la banda F^{1a}. Esta es una limitación del sistema fotométrico de banda estrecha propuesto frente a la espectroscopia de mayor resolución



Complejidad molecular en envolturas de estrellas evolucionadas: estudio detallado de la emisión molecular de los objetos IK Tau, OH231.8+4.2 e IRC+10216

Autor: Luis Velilla Prieto (lvelilla@icmm.csic.es)

Tesis doctoral dirigida por: Carmen Sánchez Contreras y José Cernicharo

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 9 de Junio de 2017

Las estrellas evolucionadas cuyas masas durante la secuencia principal estaban comprendidas aproximadamente entre 1 y 8 masas solares, como lo será el Sol dentro de aproximadamente 4500 millones de años, son las principales responsables del enriquecimiento del medio interestelar. En la fase llamada rama asintótica de las gigantes, estas estrellas crean una envoltura a su alrededor compuestas principalmente por granos de polvo y moléculas, y que se forma debido a intensos procesos de pérdida de masa.

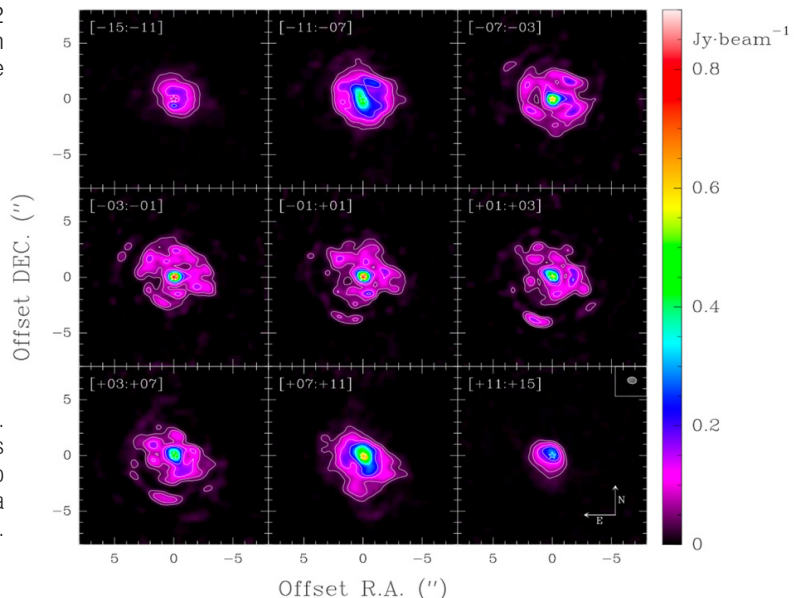
Las estrellas AGB se cuentan entre los objetos del Universo más activos en cuestión de formación molecular. Las observaciones de sus envolturas prueban su composición, temperatura, densidad y estructura en función de la distancia a la estrella, y muestran que son objetos más complejos de lo que se pensaba. Dentro del contexto de esta tesis, nos ocupamos de la componente molecular de estas envolturas que se analiza comúnmente mediante el estudio de las líneas espectrales en el rango de longitud de onda milimétrico, producidas principalmente por el cambio en el estado rotacional de las moléculas. Hasta la fecha, las estrellas ricas en carbono, como IRC+10216, han sido estudiadas con mayor detalle, produciendo así un importante sesgo observacional que deja peor caracterizadas a las estrellas ricas en oxígeno.

En esta tesis, se presentan los resultados obtenidos del estudio de la emisión molecular de tres envolturas circunestelares: IK Tau, OH231.8+4.2 e IRC+10216. IK Tau y OH231.8+4.2 son objetos ricos en oxígeno cuyas propiedades físicas están relativamente bien determinadas. Sin embargo, no se conoce

el inventario molecular completo de ambas fuentes dado que su estudio ha estado limitado a observaciones de pocas líneas pertenecientes a las especies más abundantes y con limitada resolución espacial. IRC+10216 es una envoltura rica en carbono, que por sus características es la envoltura más estudiada del Universo. En el caso de las envolturas ricas en oxígeno, hemos llevado a cabo dos barridos espectrales en el rango milimétrico utilizando la antena de IRAM 30m y también observaciones de OH231.8+4.2 con el instrumento HIFI de Herschel. Este trabajo nos ha permitido obtener el inventario molecular, caracterizar las propiedades físicas de la emisión molecular, y determinar las abundancias de las moléculas presentes en ambos objetos. Respecto a IRC+10216, presentamos las primeras observaciones de algunas especies con alta resolución espacial obtenidas con ALMA, además de otros resultados obtenidos con IRAM 30m.

Los resultados obtenidos muestran que la química de los objetos ricos en oxígeno no es tan pobre como se podía anticipar. Hemos obtenido para las dos estrellas ricas en oxígeno el censo molecular más completo hasta la fecha además de haber caracterizado las propiedades de la emisión mediante el uso de códigos de transferencia radiativa y química. Entre las especies detectadas, hemos descubierto por primera vez emisión de moléculas como HNCO, HNCS, HC_3N , NO, o SO^+ , en la envoltura de OH231.8+4.2. También hemos descubierto líneas de emisión de H_2CO , NS, o NO en IK Tau, además de haber detectado por primera vez sin ambigüedad emisión de SO_2 caliente (290 K) en la región más interna de la envoltura, lo que no se esperaba de acuerdo a los modelos químicos actuales. Nuestros estudios apoyan la idea de que la química de OH231.8+4.2 ha sido probablemente alterada debido a los choques de alta velocidad causados por la interacción entre el viento AGB lento y los vientos rápidos bipolares altamente colimados típicos de objetos más evolucionados. En el caso de IRC+10216 hemos detectado líneas de emisión de SiS de niveles vibracionalmente excitados hasta $v=7$, que provienen de la región más interna y caliente de la envoltura, donde se forman los granos de polvo. Mediante las observaciones con ALMA, hemos determinado también que el SiC_2 es la molécula portadora de enlaces de Si-C más abundante (en fase gas) en la región de formación de polvo de IRC+10216, entre otros resultados.

Esperamos que nuestro trabajo sirva como futura referencia para los estudios de envolturas circunestelares de estrellas evolucionadas.



Envoltura circunestelar de IRC+10216 trazada por el ^{29}SiO observado con ALMA. En la esquina superior izquierda de cada panel se muestra el rango de velocidades correspondiente respecto a la velocidad sistémica de la estrella en km s^{-1} . El tamaño del haz sintético así como la orientación se muestran en el panel inferior derecho. La escala de colores representa la densidad de flujo en unidades de Jy beam^{-1} .

Poblaciones estelares, formación y evolución de galaxias quiescentes a desplazamientos al rojo intermedios a partir de cartografiados multifiltro

Autor: Luis Alberto Díaz García (diaz@cefca.es)

Tesis doctoral dirigida por:

Andrés Javier Cenarro Lagunas

Centro: Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA) / Universidad Complutense de Madrid (UCM)

Fecha de lectura: 12 de Junio de 2017

En esta tesis doctoral buscamos ampliar nuestro conocimiento en torno a la evolución de las galaxias quiescentes desde $redshift\ z \sim 1$, con el objetivo final de dar una visión global de la formación y evolución de estos objetos a lo largo de la historia del Universo. Haciendo uso de los datos procedentes del cartografiado ALHAMBRA y del código de ajuste espectral o *SED-fitting* llamado MUFFIT, desarrollado como parte de este trabajo. Esta tesis lleva a cabo por primera vez un extenso estudio observacional que recoge la evolución temporal y la densidad numérica de las galaxias quiescentes, así como sus masas, poblaciones estelares (edades, metalicidades y extinciones), para finalmente construir un modelo fenomenológico evolutivo basado en fusiones de galaxias, *frosting* (remanescentes de formación estelar), y el *progenitor bias* (nuevas incorporaciones en la población quiescente), tratando de reconciliar las tendencias observacionales para estos parámetros.

La obtención de las poblaciones estelares de galaxias quiescentes se lleva a cabo por el código MUFFIT, el cuál se ha desarrollado para este trabajo. Este código nace con el objetivo específico de analizar el contenido estelar de galaxias procedentes de cartografiados multifiltro. MUFFIT lleva a cabo un test de χ^2 pesado con errores para comparar los flujos de las galaxias con la fotometría sintética de mezclas de dos modelos SSP, y así obtener sus parámetros poblacionales: edad, metalicidad, extinción, desplazamiento al rojo, masa estelar y sus incertidumbres. Para la obtención de la muestra de galaxias quiescentes, se combina la eficiencia de los diagramas color-color tipo *UVJ* y las extinciones obtenidas por MUFFIT, para construir un diagrama *UVJ* corregido de extinción libre de galaxias con formación estelar y enrojecidas por polvo. Para aumentar la pureza de la muestra de galaxias quiescentes, se realizó una inspección visual para eliminar las detecciones espúreas o con fotometría errónea, y un análisis para la eliminación de estrellas frías. Para la completitud en masa, se desarrolló un método basado en funciones de masa, dando lugar a una muestra final de 8547 galaxias quiescentes a $0.1 \leq z \leq 1.1$ con una precisión de desplazamientos al rojo fotométricos en torno a $\sigma_{NMAD} = 0.006$.

Gracias a las poblaciones estelares de las galaxias quiescentes obtenidas por medio de MUFFIT y de los datos de ALHAMBRA, encontramos que existe una clara correlación entre la posición que ocupa una galaxia en un diagrama *UVJ* y los parámetros de sus poblaciones estelares (ver figura). Gracias al gran número de galaxias quiescentes y a la calidad de la muestra, somos capaces de construir por primera vez las funciones de probabilidad de edad y metalicidad (pesadas en masa y luminosidad) y extinción, para estudiar de una forma más precisa la evolución de la población quiescente, así como

sus correlaciones con la masa estelar. Las galaxias quiescentes muestran edades más viejas en épocas más recientes y metalicidades solares y subsolares predominantemente, junto con extinciones bajas ($A_V \sim 0.2$). Como se esperaba, existe una estrecha relación entre la masa estelar y la edad y metalicidad de las galaxias quiescentes: cuanto más masiva es la galaxia, más vieja y metálica es. También, podemos afirmar que encontramos que las galaxias quiescentes no evolucionan pasivamente desde $z \sim 1$ y la mediana de la metalicidad experimenta un ligero descenso de $0.1 - 0.2$ dex desde $z \sim 0.6 - 1.0$.

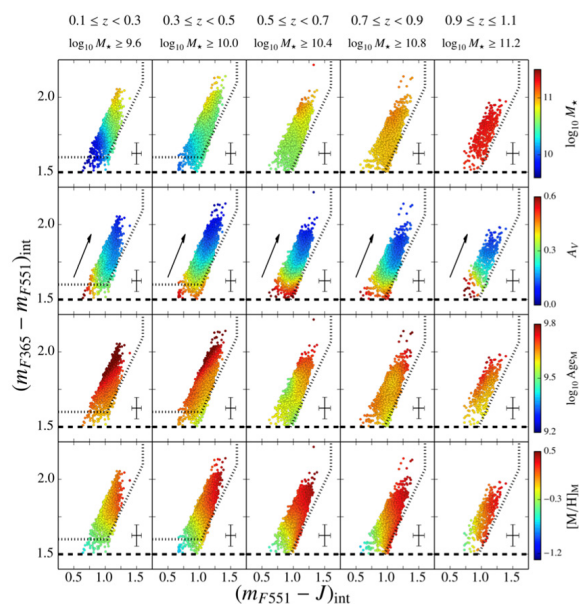
Desarrollamos un modelo fenomenológico para esclarecer cuál es el papel desempeñado por las fusiones de galaxias (*mergers*), *frosting* y el *progenitor bias* en la evolución de las galaxias quiescentes masivas ($\log_{10} M_* > 11.2$ dex) desde $z = 1$ hasta $z = 0.2$. Encontramos que el *frosting* es totalmente necesario para reproducir la evolución de las galaxias quiescentes masivas, que junto con *mergers* y *progenitor bias* son capaces de reproducir, por primera vez, la evolución con *redshift* de la edad, metalicidad y densidad numérica de las galaxias quiescentes masivas.

Por medio de una submuestra de galaxias con medidas de su tamaño, descubrimos que existen correlaciones entre el tamaño de la galaxia quiescente y sus poblaciones a una masa fija, en el sentido de que: las galaxias quiescentes más compactas a una masa dada son más viejas, más metálicas y presentan SFR/sSFR menores que las más extensas. También existe una ligera correlación con la extinción. De forma complementaria, revelamos que la probabilidad de hallar galaxias compañeras en torno a galaxias esferoidales masivas es independiente del tamaño de los esferoides masivos para una masa fija, ya que estos compañeros no se encuentran preferentemente en torno a las galaxias más compactas o más extensas.

A la vista de estos resultados, escenarios que involucran fusiones, *frosting*, y el *progenitor bias* son capaces de reproducir la evolución observada para las galaxias quiescentes. Además, encontramos evidencias que apoyarían que la masa estelar desempeña un papel en la evolución y formación de las galaxias, donde el tamaño de la galaxia también puede jugar un papel relevante.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=426726>



Distribución de parámetros de poblaciones estelares (masa estelar, extinción, edad y metalicidad) en diagramas *UVJ*. Presentamos a diferentes desplazamientos al rojo los colores rest-frame intrínsecos (m_{F551-J}) y ($m_{F365}-m_{F551}$) tras corregirlos de extinción para la muestra completa en masa de las galaxias quiescentes de ALHAMBRA. Los diferentes parámetros están codificados en función de su color (ver barras en el lateral).

Contenido molecular en la región de fotodisociación de la Barra de Orión

Autora: Sara Cuadrado Prado
(s.cuadrado@csic.es)

Tesis doctoral dirigida por:

Javier R. Goicoechea y José Cernicharo

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 15 de Septiembre de 2017

En esta tesis doctoral se presenta un estudio detallado de la emisión molecular de la región de fotodisociación (PDR) de la Barra de Orión, el borde iluminado de la nube molecular de Orión 1 (OMC-1). Las PDRs son las zonas de transición entre el gas caliente atómico e ionizado iluminado por campos de radiación UV, y el gas frío y neutro (moléculas en su mayoría) protegido de la radiación. En estas regiones, la radiación FUV incidente (*Far-UV*; fotones con energías entre $6 < h\nu < 13.6$ eV emitidos por estrellas masivas de tipo O y B) condiciona fuertemente el estado fisicoquímico del gas y del polvo. Las PDRs incluyen objetos como las nubes difusas, las interfases entre las regiones HII y las nubes moleculares densas, las nebulosas planetarias, galaxias con brotes de formación estelar, etc. Todos estos ambientes presentan una química particular inducida por una activa fotoquímica, y comparten características comunes en el sentido de que su física (cinemática, termodinámica) y su química (disociación e ionización del gas, procesamiento del polvo) están determinadas por la presencia de radiación FUV.

El Complejo de Orión alberga la región de formación de estrellas masivas más cercana (~ 414 pc), y es una región muy apropiada para estudiar, en alta resolución espacial, los efectos de la radiación FUV sobre el medio interestelar circundante. La PDR conocida como la Barra de Orión es la interfase entre la nube molecular OMC-1 y la región HII alrededor del cúmulo del Trapecio. Las estrellas del Trapecio iluminan la Barra con un campo de radiación FUV aproximadamente 10000 veces mayor que el campo interestelar medio en la Galaxia, proporcionando a la región unas propiedades físicas y químicas características y convirtiéndola en un excelente laboratorio para investigar y establecer los límites de la complejidad química en entornos irradiados. El principal objetivo de esta tesis doctoral ha sido establecer las condiciones fisicoquímicas, el contenido molecular y los procesos químicos dominantes en PDRs altamente irradiadas. Para ello se ha realizado el primer barrido espectral a 3, 2, 1 y 0.8 mm (entre 80-359 GHz) del frente de disociación de la Barra de Orión (i.e. el borde irradiado y caliente de la PDR) utilizando el radiotelescopio IRAM-30m. Tradicionalmente, las PDRs han sido consideradas regiones demasiado hostiles para albergar una química compleja, y por lo tanto, abundancias significativas de especies orgánicas poliatómicas. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta tesis doctoral desafían este para-

digma tan ampliamente aceptado. De hecho, nuestras observaciones muestran una química mucho más rica de lo que se esperaba, con varios distintivos químicos únicos: iones reactivos (e.g. CO^+ , SH^+ , HOC^+ ; Müller et al. 2014, Goicoechea et al. 2017), iones de hidrocarburos (C_3H^+ ; Cuadrado et al. 2015) e incluso isómeros menos estables de especies orgánicas (cis- HCOOH , Cuadrado et al. 2016) que no se observan en ninguna otra región protegida de la radiación FUV estelar. Además, nuestras observaciones revelan la presencia de moléculas orgánicas complejas (e.g. CH_3OH , CH_3CN , CH_3CHO) que no se esperaban en un ambiente tan hostil (Cuadrado et al. 2017). En total se han identificado más de 850 líneas pertenecientes a las transiciones rotacionales de ~ 60 especies moleculares (incluidos isotopólogos) con hasta siete átomos.

Se han realizado también cartografiados de líneas rotacionales excitadas a 0.8 mm con IRAM-30m (con una resolución angular de $\sim 7''$), con el objetivo de situar la posición observada del frente de disociación en el contexto de la emisión a gran escala de la Barra y estudiar la estratificación química. Además, mediante observaciones realizadas con el interferómetro ALMA se han obtenido las primeras imágenes espectrales en alta resolución angular ($\sim 1''$) para estudiar la morfología y actividad en el borde iluminado de la Barra de Orión.

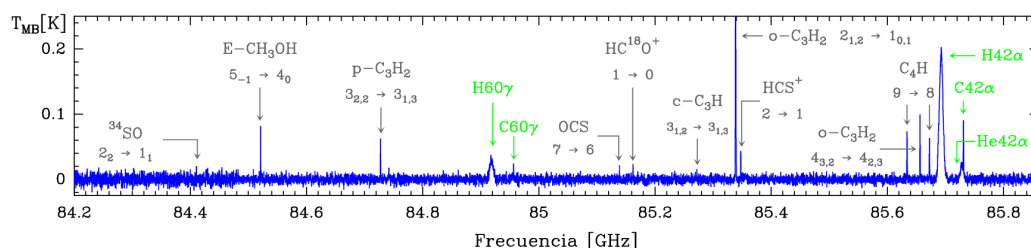
Los principales resultados de esta tesis incluyen:

- (i) La primera detección de las líneas de rotación de menor frecuencia del ion reactivo SH^+ (con observaciones de IRAM-30m y ALMA) y la corrección de sus frecuencias de línea y constantes espectroscópicas (Müller et al. 2014).
- (ii) Por primera vez se ha observado en el espacio el proceso de fotoisomerización (la isomerización debido a la absorción de fotones FUV) y se ha detectado una nueva especie en el medio interestelar: el conformero menos estable del ácido fórmico, cis- HCOOH (Cuadrado et al. 2016).
- (iii) La obtención de las primeras imágenes espectrales con el interferómetro ALMA de la Barra de Orión en la región donde tiene lugar la transición del gas atómico al molecular ($\text{C}^+/\text{C}/\text{CO}$). Estas observaciones proporcionan una visión sin precedentes de la PDR y revelan morfologías y cinemáticas del gas mucho más complejas de lo que predecían los modelos de PDR estacionarios (Goicoechea et al. 2016; *Nature*).
- (iv) La obtención de las primeras imágenes en alta resolución angular de la emisión de iones reactivos en el medio interestelar utilizando el interferómetro ACA-ALMA (Goicoechea et al. 2017).
- (v) El estudio detallado de la abundancia, distribución espacial y química de hidrocarburos (Cuadrado et al. 2015) y moléculas orgánicas complejas (Cuadrado et al. 2017), revelando el grado de complejidad química alcanzado en una región irradiada por campos de radiación FUV intensos.

Publicaciones:

- Cuadrado, Goicoechea, Pilleri, et al. *A&A*, 575, A82 (2015)
- Cuadrado, Goicoechea, Roncero, et al. *A&A*, 596, L1 (2016)
- Cuadrado, Goicoechea, Cernicharo et al. *A&A*, 603, A124 (2017)
- Goicoechea, Pety, Cuadrado et al. *Nature*, 537, 207 (2016)
- Goicoechea, Cuadrado, Pety, et al. *A&A*, 601, L9 (2017)
- Müller, Goicoechea, Cernicharo, et al. *A&A*, 569, L5 (2014)

Espectro del borde iluminado de la Barra de Orión entre ~ 84 -86 GHz observado con el radiotelescopio IRAM-30m con una resolución espectral de 200 kHz. A pesar de ser un ambiente altamente iluminado con radiación FUV, se han identificado más de 850 líneas en todo el barrido espectral que pertenecen a transiciones rotacionales de ~ 60 especies moleculares (incluidos isotopólogos).



Emisión en altas energías de las novae recurrentes

Autora: Laura Delgado Pardo (delgado@ice.cat)

Tesis doctoral dirigida por:

Margarita Hernanz Carbó

Centro: Instituto de Ciencias del Espacio (ICE) / Universitat Autònoma de Barcelona

Fecha de lectura: 9 de Octubre de 2017

En los últimos años muchas novae -ocho clásicas y dos recurrentes- han sido detectadas por Fermi/LAT a $E > 100$ MeV. En la mayoría de los casos esta emisión se observa pronto después de la explosión, alrededor del máximo en óptico, y por un corto periodo de tiempo. La emisión en rayos γ a muy altas energías es una consecuencia del decaimiento del π^0 y/o del Compton Inverso, los cuales están relacionados con la aceleración de partículas (p y e^-) en el choque que produce el material eyectado al encontrarse con el medio circumestelar. RS Oph (2006) fue la primera nova para la cual la aceleración de partículas fue predicha. Esta predicción mostró que la onda de choque se desaceleró más rápido de lo esperado como consecuencia de la aceleración de partículas en el choque y su posterior fuga. El objetivo de nuestra tesis es el estudio de la evolución de las novae simbióticas recurrentes los primeros días después de la explosión. Este trabajo tiene el propósito de realizar un amplio estudio sobre el último estallido de RS Oph y V745 Sco en varias longitudes de onda diferentes.

RS Oph es una nova recurrente en un sistema simbiótico compuesto por una enana blanca y una gigante roja con un periodo de recurrencia de ~ 21 años. En este trabajo presentamos un nuevo análisis de las observaciones realizadas por el satélite XMM-Newton a RS Oph los primeros días después de la explosión de 2006 con los instrumentos EPIC-MOS y RGS. Comparamos estos resultados con la temperatura, absorción, flujo y *emission measure* obtenidos por las observaciones realizadas con RXTE, Swift y Chandra, y los resultados de los estudios previos sobre las observaciones de RGS. Hemos estudiado la evolución de los primeros días de la emisión en radio e IR. La

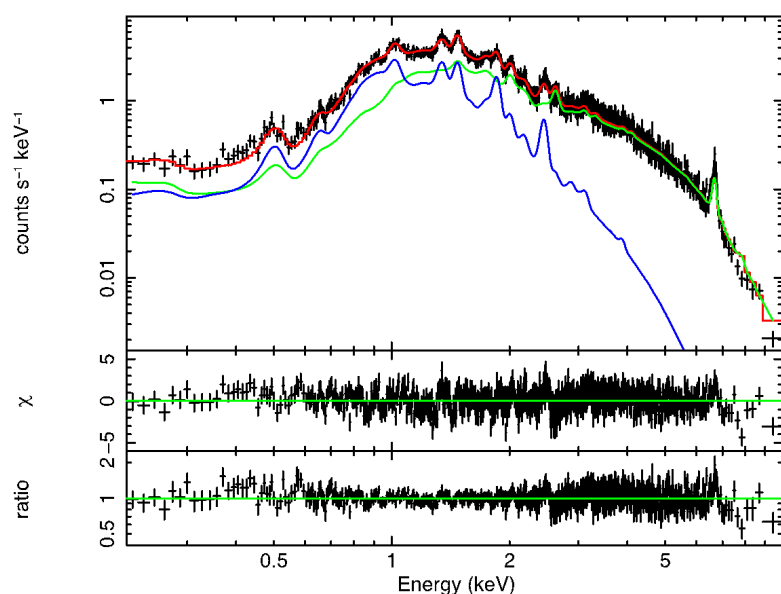
combinación de los estudios de las diferentes longitudes de onda nos permite tener una visión global del plasma chocado en RS Oph y su relación con la aceleración de partículas.

V745 Sco es también una nova recurrente en un sistema simbiótico con un periodo de recurrencia de ~ 25 años. Presentamos el análisis de las observaciones de V745 Sco los primeros días después de la explosión realizadas por el satélite Swift/XRT simultáneas a la detección de Fermi. Combinamos estos resultados con los obtenidos del análisis de las observaciones de NuStar y Chandra para tener una imagen global de la evolución del material eyectado por la nova. Al igual que en el caso de RS Oph recopilamos toda la información que hay sobre las observaciones en IR y en radio de los primeros días después de la explosión. Finalmente, la aceleración de partículas en V745 Sco puede ser explicada con un modelo de choque difuso en la onda de choque y la posterior fuga de partículas a muy altas energías como en el caso de RS Oph.

Con el estudio de RS Oph y V745 Sco y su comparación, demostramos por primera vez que las novae recurrentes en un sistema simbiótico tienen características comunes en los primeros días. Los resultados de los estudios en diferentes longitudes de onda proporcionan nuevas perspectivas sobre la evolución del plasma y la interacción con el material circumestelar siendo estos una poderosa herramienta para conocer la naturaleza de la emisión de rayos γ .

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1518321>



Espectro observado y modelo de las observaciones de RS Oph con la EPIC/MOS1 13.8 días después de la explosión. Los residuos se muestran en los paneles inferiores. El modelo global y sus dos componentes (T_{max} y T_{min} BVAPEC) se muestran en el gráfico con líneas de color rojo, verde y azul respectivamente.

Transferencia de radiación polarizada en líneas resonantes teniendo en cuenta redistribución parcial en frecuencias y campos magnéticos arbitrarios

Autor: Ernest Alsina Ballester (ernest@irsol.ch)

Tesis doctoral dirigida por: Luca Belluzzi y Javier Trujillo Bueno

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias / Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 16 de Enero de 2018

El campo magnético del Sol desempeña un papel fundamental en fenómenos tales como la variabilidad de la irradiancia y el ciclo solar. Además, muchas de las estructuras del plasma de la atmósfera solar y fenómenos explosivos (p. ej., manchas solares, prominencias, espículas o erupciones solares) no pueden entenderse sin su influencia. Para comprender en profundidad la física subyacente, y abordar interrogantes como la aceleración del viento solar o el calentamiento coronal, es esencial tener un conocimiento detallado de la fuerza y la topología del campo magnético. Sin embargo, tales campos magnéticos no se pueden medir *in situ*, y las medidas deben realizarse de forma remota. La cantidad observable que contiene la inmensa mayoría de la información sobre las propiedades termodinámicas del Sol es la radiación emergente. En particular, el grado y estado de polarización de líneas espectrales, cuantificados en sus cuatro parámetros de Stokes, almacenan valiosa información sobre la fuerza y orientación del campo magnético.

En esta tesis doctoral hemos considerado el complejo problema de modelizar los parámetros de Stokes de líneas espectrales resonantes para las que los fenómenos de redistribución parcial en frecuencias (PRD) son importantes. Hemos prestado especial atención al impacto de los campos magnéticos, tanto deterministas como microestructurados, sobre la polarización de la radiación emergente de la atmósfera solar. Para ello, se ha tenido en cuenta la acción conjunta de los procesos de dispersión, el efecto Hanle y el efecto Zeeman. Se ha considerado un modelo atómico con dos niveles, con el nivel inferior no polarizado, con el cual se pueden estudiar de forma adecuada varias líneas espectrales (p. ej., la línea del Sr I a 4607 Å, la del Ca I a 4227 Å o la región espectral correspondiente al núcleo de la línea k del Mg II). Debido a la complejidad del problema de la generación y el transporte de la radiación polarizada en líneas resonantes, al tener en cuenta los efectos de PRD y del campo magnético (incluyendo tanto el efecto Hanle como el efecto Zeeman), la investigación se ha centrado en modelos atmosféricos unidimensionales.

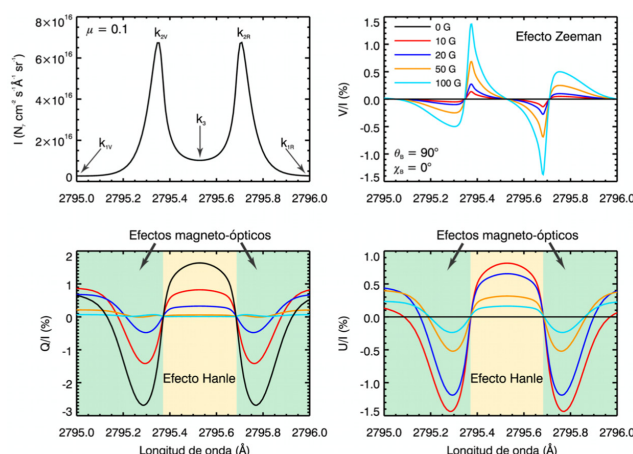
Hemos formulado y resuelto problemas de transporte radiativo, aplicando una teoría cuántica rigurosa para la generación y transporte de la radiación polarizada. Para tratar de forma eficiente tales problemas, hemos desarrollado un código numérico que resuelve iterativamente las ecuaciones de transporte del vector de Stokes, teniendo en cuenta que los coeficientes de emisión dependen del campo de radiación incidente. El método iterativo desarrollado permite resolver problemas en presencia de campos magnéticos con intensidades que van desde cero a unos pocos miles de gauss.

Primero hemos investigado el caso no magnético, con el objetivo de estudiar la sensibilidad de los perfiles de intensidad y

polarización de las líneas espectrales del Sr I a 4607 Å y del Sr II a 4078 Å al modelo atmosférico considerado. Además, hemos analizado los efectos de redistribución y depolarización debido a las colisiones elásticas con átomos de hidrógeno neutros. Hemos estudiado el impacto de tales colisiones en líneas que se originan en la fotosfera (para las que los efectos de PRD tienen una influencia despreciable), y en la cromosfera (para las que los efectos de PRD son generalmente importantes).

El resto de los casos que hemos investigado – los cuales representan el grueso del trabajo realizado en esta tesis – se centran en la influencia del campo magnético en la polarización de líneas espectrales. Una conclusión muy importante es que, en líneas resonantes fuertes para las que los efectos de PRD dan lugar a perfiles de polarización lineal con alas extensas, es imprescindible tener en cuenta la acción conjunta de la polarización por dispersión y de los efectos Hanle y Zeeman para modelizar correctamente sus parámetros de Stokes. En particular, mostramos que para tales líneas se halla una sensibilidad magnética artificial en las alas de los perfiles de Q/I y U/I cuando se desprecia el efecto Zeeman, incluso cuando el campo magnético es lo bastante débil como para que el desdoblamiento Zeeman sea mucho menor que la anchura Doppler de la línea.

Quizás la contribución más importante de esta tesis esté relacionada con los efectos magneto-ópticos (MO), es decir, los acoplamientos entre los distintos estados de polarización de la radiación que se propaga por el medio, inducidos por el campo magnético. Hemos descubierto que tales efectos originan una notable sensibilidad magnética en las alas de los perfiles de polarización lineal de líneas resonantes fuertes, que tienen una amplitud considerable debido a los efectos de PRD. Hemos llevado a cabo una investigación detallada sobre el impacto de los efectos MO para varias geometrías y fuerzas del campo magnético. Hemos presentado también argumentos teóricos para explicar el hecho de que operan principalmente en las alas de las líneas resonantes, incluso para campos magnéticos con fuerzas típicas del Sol en calma ($B \lesssim 100$ G). Argumentamos que tales efectos extienden el potencial para el diagnóstico de líneas que se originan en las regiones externas de atmósfera solar ya que, gracias a su impacto, las señales de polarización en las alas contienen información sobre la actividad magnética en regiones atmosféricas más profundas. El descubrimiento teórico de tal sensibilidad magnética supone una motivación adicional para desarrollar instrumentos capaces de realizar medidas espectropolarimétricas de alta precisión en líneas resonantes fuertes de la cromosfera y la región de transición (p. ej., los experimentos CLASP con cohetes sonda). Demostramos que las sorprendentes señales en las alas de U/I y la variación en las alas de Q/I y U/I para la línea cromosférica del Ca I a 4227 Å se pueden explicar mediante tales efectos. Finalmente, hemos investigado las situaciones en las que los efectos MO puede inducir una reducción neta de la fracción total de polarización lineal en las líneas espectrales donde operan.



Cúmulos con supergigantes K

Autor: Javier Alonso Santiago

(javier.alonso@ua.es)

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Negue-
ruela Díez y Amparo Marco Tobarra

Centro: Universidad de Alicante

Fecha de lectura: 26 de Enero de 2018

La masa inicial con la que nace una estrella es el parámetro fundamental que va a determinar sus propiedades y su posterior evolución. Según como sea ésta, la estrella pasará por una fase de AGB o de supergigante roja (RSG). En el primer caso, la estrella muere como una enana blanca tras expulsar sus capas externas en forma de nebulosa planetaria. En el segundo, se produce un colapso del núcleo que libera una cantidad ingente de energía en forma de explosión como supernova. Tras de sí queda un objeto muy compacto, o bien una estrella de neutrones o bien un agujero negro, si la estrella era mucho más masiva. El límite entre ambos escenarios estaría situado aproximadamente entre las ocho y las nueve masas solares, dependiendo de los distintos modelos.

En los últimos años se han llevado a cabo distintos programas para la búsqueda de progenitores de supernova. Los resultados de dichos trabajos están cambiando el paradigma clásico que explica el origen de las mismas. La masa mínima que debe tener una estrella para que se produzca una supernova parece ser bastante menor que lo que previamente se creía, especialmente si consideramos entornos de baja metalicidad y sistemas binarios, donde estrellas con masas comprendidas tan solo entre seis y siete veces la solar podrían ya originar una supernova.

Esta tesis tiene como objetivo principal la exploración del rango de masas que abarca la frontera entre las AGBs más masivas y las RSGs con menor masa: el límite para que se produzca una supernova.

Para ello, nuestro trabajo se va a centrar en las (super)gigantes que encontramos en cúmulos abiertos, laboratorios ideales para estudiar la evolución estelar de sus miembros. Recurrimos a la literatura en busca de cúmulos cuyas estrellas evolucionadas estén en el rango de masa que nos interesa para nuestra investigación (de seis a nueve masas solares), que es equivalente a tener edades comprendidas en el rango entre los 30-100 millones de años. Aunque encontramos que los cúmulos, en este rango de edad, tienen de media sólo dos (super)gigantes rojas, para nuestra muestra seleccionamos aquellos que son estadísticamente más significativos, con al menos cinco estrellas evolucionadas. Estos cúmulos son: NGC 2345, NGC

3105, NGC 6067, NGC 6649, NGC 6664 y Trumpler 35. En total albergan medio centenar de (super)gigantes, la mayoría rojas aunque también encontramos algunas azules y amarillas.

Por un lado realizamos un estudio muy consistente de cada cúmulo mediante el empleo combinado de fotometría (propia o de archivo según los casos) y espectroscopía de baja o moderada resolución. De esta manera, además de caracterizar el propio cúmulo, obtenemos la edad y la masa de sus estrellas evolucionadas. En su mayoría, estas estrellas presentan tipo espectral K, de ahí el nombre de la tesis.

Por otro lado, a partir del empleo de espectroscopía de alta resolución ($R=48000$) caracterizamos estas estrellas calculando tanto sus parámetros estelares como las abundancias químicas (de los siguientes elementos: Li, O, Na, Mg, Si, Ca, Ti, Ni, Rb, Y y Ba). Para ello hemos utilizado el espectrógrafo FEROS, que se encuentra acoplado al telescopio de 2,2 m en el Observatorio de La Silla (Chile).

En esta tesis hemos llevado a cabo el estudio más completo hasta la fecha de los cúmulos incluidos en nuestra muestra. Por primera vez se ha realizado un estudio espectroscópico detallado sobre estrellas de NGC 3105, NGC 6649, NGC 6664 y Trumpler 35. Para los otros dos cúmulos, NGC 2345 y NGC 6067, se ha aumentado el número de estrellas analizadas con respecto al único estudio publicado previamente en cada caso. En este rango de edad, nuestra muestra representa la mitad de los cúmulos estudiados espectroscópicamente y el 87% en cuanto a caracterización de estrellas evolucionadas se refiere.

Obtenemos metalicidades (usando como proxy la abundancia de hierro) compatibles con el gradiente galáctico obtenido a partir del estudio de cefeidas, aunque sistemáticamente nuestras metalicidades son algo más bajas. Las abundancias químicas son también compatibles tanto con las tendencias observadas en el disco fino de la Galaxia como con lo predicho por los modelos de evolución química de la misma. Destaca especialmente la sobreabundancia de Ba, que apoya el modelo que sugiere un mayor rendimiento de los elementos r frente al valor presente en los modelos canónicos.

A nivel evolutivo, hemos cubierto un rango de masas entre 5,5-9,5 masas solares. No encontramos tendencias significativas en las abundancias químicas entre las gigantes luminosas con menor masa y las supergigantes rojas. Tampoco encontramos en nuestra muestra estrellas super-AGB. A nivel observacional, la transición observada en las estrellas de nuestra muestra, desde tipos espectrales K medios o tardíos II/Ib a M la tempranos, podría ser un indicador de la separación AGB/RSG.

Tesis disponible en:

<http://hdl.handle.net/10045/74527>

Página de al lado: Radiación emergente calculada en los cuatro parámetros de Stokes, considerando la región espectral donde la línea k del Mg II se puede modelizar correctamente con un átomo de dos niveles. Las curvas de colores representan los cálculos realizados en presencia de un campo magnético horizontal ($\theta_b = 90^\circ$) contenido en el plano definido por la vertical local y la línea de visión del observador ($\chi_b = 0^\circ$), con las fuerzas indicadas en el panel superior derecho. Se ha considerado una línea de visión con $\mu = \cos\theta = 0.1$, con θ la inclinación respecto a la vertical local (ángulo heliocéntrico). Los paneles inferiores izquierdo y derecho corresponden a los perfiles de Stokes Q/I y U/I, respectivamente, que juntos determinan la fracción de polarización lineal total y el ángulo de polarización. Las áreas beige y verde indican las regiones espectrales donde el impacto del campo magnético sobre la polarización lineal se manifiesta debido principalmente a los efectos Hanle y magneto-ópticos, respectivamente. La dirección de referencia para Stokes Q se ha tomado paralela al limbo solar.

DIEGO SÁEZ, IN MEMORIAM

Nos ha dolido la muerte de Diego porque hemos estimado a Diego. Nos ha aliviado un poco repasar su andadura investigadora, docente y gestora:

Una característica de su generación fue la de partir prácticamente de cero para iniciarse en temas actuales de investigación y formar al mismo tiempo estudiantes capaces de continuar desarrollándolos de forma independiente.

Empezó estudiando algunas teorías alternativas a la Relatividad General analizando sus consecuencias observacionales relacionadas con la estructura estelar. Mas tarde, con teorías vector-tensor volvió a plantearse la comparación con la Relatividad General pero ahora en relación con la polarización de la radiación de fondo de microondas.

La radiación de fondo fue quizás su tema preferido. Participó activamente en la misión Planck de la Agencia Espacial Europea y estudió las anisotropías producidas por los efectos Rees-Sciama, Sunyaev-Zeldovich y el efecto Sachs-Wolfe integrado.

Su tercer tema de interés fue el de la formación de estructuras a partir de pequeñas perturbaciones iniciales. Desarrolló un código

numérico propio, con la novedad de incorporar materia bariónica y no sólo materia oscura como era habitual en esa época.

Últimamente estaba muy interesado en los sistemas de posicionamiento y trabajó en ello desarrollando una línea de investigación numérica para la modelización del llamado posicionamiento relativista.

Su contribución a la docencia impartida en nuestro departamento ha dado solidez al conocimiento de la Cosmología. Todas sus líneas de investigación han producido tesis doctorales y buenos profesionales.

Diego no ejerció nunca un cargo de dirección, pero ayudó a dirigir. No le gustaba gestionar pero fue investigador principal de sucesivos proyectos. También le queremos agradecer que intentara sacarnos de la pobreza, gestionando una quiniela semanal durante más de treinta años.

Te seguimos estimando.

OBITUARIO ESCRITO POR: Juan Ferrando, Jose Maria Ibañez, Antonio Morales, Miguel Portilla, Vicente Quilis (Universitat de València).





Imagen de larga exposición sobre el VLT en Paranal.
Créditos: ESO/Babak Tafreshi.



**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