

SEA

Sociedad Española de Astronomía



Portada: Dibujo de Júlía Novellas Corominas, ganadora de la Categoría de 12 a 15 años de la II Edición del Concurso de Dibujo "Mujer y Astronomía" para escolares, organizado por la Comisión Mujer y Astronomía de la Sociedad Española de Astronomía.
Créditos: Júlía Novellas Corominas.

Comité editorial:

Manuel Collados
Nuria Huélamo
José María Diego
Marc Ribó
Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez
Fernando J. Ballesteros Roselló
Amelia Ortiz Gil

Maquetación:

Fernando J. Ballesteros Roselló

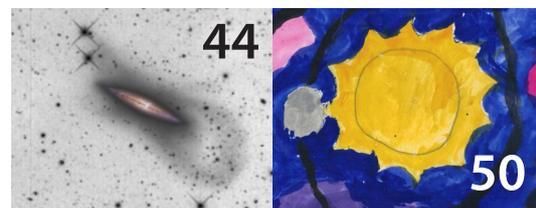
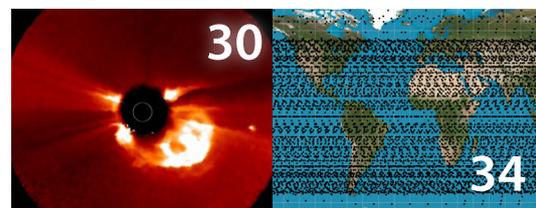
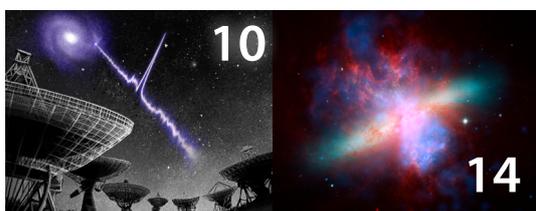
Sociedad Española de Astronomía SEA

www.sea-astronomia.es

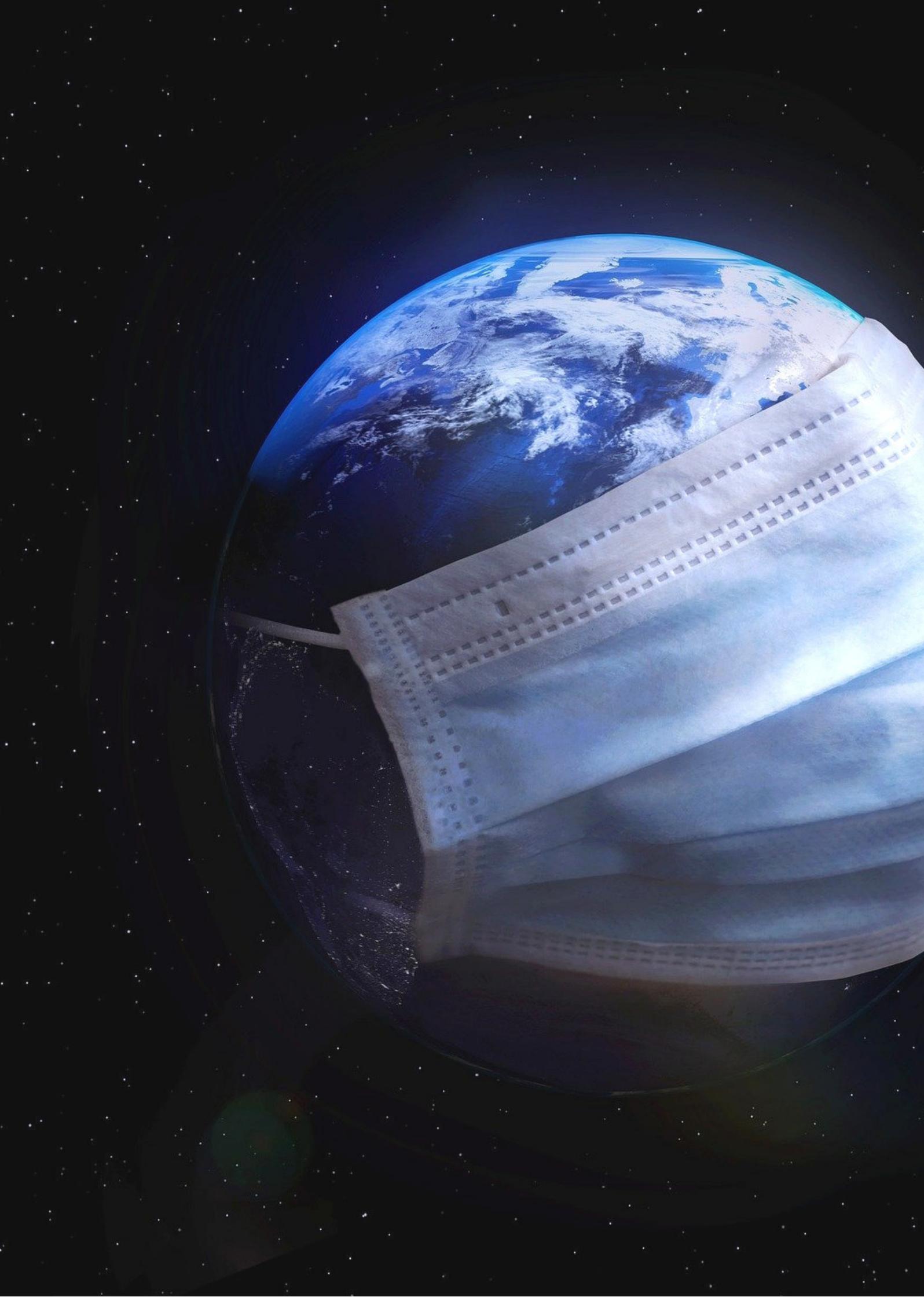
Comisión de Información

comi-info@sea.am.ub.es

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Política científica en tiempos del coronavirus
- 10 Clarificando el misterio de los Estallidos Rápidos de Radio
- 14 Despedida al Telescopio Espacial Spitzer
- 22 Solar Orbiter lanzado con éxito
- 24 De “Don Quijote” a las misiones Hera y DART: mitigación del riesgo de impacto asteroidal
- 30 Meteorología espacial o la ciencia de la interacción Sol-Tierra
- 34 Las mega-constelaciones de satélites como amenaza para la observación astronómica en longitudes de onda ópticas y en radio
- 44 La colaboración entre astrónomos profesionales y amateurs en España
- 50 Las astrónomas a través del arte de las nuevas generaciones: Sueños y Pasión
- 56 Ecos de (la) Sociedad
- 57 Libros
- 58 Tesis doctorales



EDITORIAL

Aquí presentamos el nuevo número del Boletín de nuestra Sociedad. Estos últimos meses nos han traído un cambio muy drástico en nuestra forma de vida que, sin ninguna duda, ha influido enormemente en todos los aspectos diarios y, en particular, en nuestro trabajo. Desde la Junta Directiva deseamos que estéis todos en perfecto estado de salud. A aquellos que hayáis podido sufrir más fuertemente el impacto de la COVID-19, os enviamos nuestro apoyo más intenso.

Complementando la versión clásica preparada por Fernando J. Ballesteros, Anna Boluda ha adaptado los contenidos para que sean accesibles de manera individualizada con dispositivos móviles. Con ello, pretendemos un acceso más fácil, moderno y adaptado a nuestros tiempos.

En este número, J. Miguel Mas Hesse y Vicent Martínez nos traen unas interesantes reflexiones sobre el impacto que puede tener en la ciencia esta pandemia, sobre todo teniendo en mente las consecuencias derivadas de la reciente crisis económica que comenzó hace unos diez años. Esperemos que el impacto ahora no sea tan intenso y que nos recuperemos en el menor tiempo posible.

De la mano de Benito Marcote, nos introducimos en el enigmático mundo de los estallidos rápidos de radio –o Fast Radio Bursts (FRBs), como se les conoce más en nuestro mundillo. Estos FRBs son señales intensas detectadas en radio que únicamente duran unos milisegundos y cuya naturaleza e implicaciones todavía no se comprenden en toda su magnitud.

En este Boletín se nos juntan tres generaciones de misiones espaciales. Por una parte, el pasado 30 de enero se dio por finalizada la misión infrarroja (3.6-160mm) del Telescopio Espacial Spitzer, después de más de 16 años de operaciones. Almudena Alonso, Pablo Pérez y María Morales nos cuentan algunos de los más importantes descubrimientos a los que ha dado lugar. Por otra parte, José Carlos del Toro Iniesta y Javier Rodríguez Pacheco nos traen la noticia del lanzamiento exitoso de Solar Orbiter. Esta es la primera misión científica en la que instituciones nacionales lideran dos de sus instrumentos científicos: el instrumento EPD (Energetic Particle Detector) y el instrumento SO/PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager on Solar Orbiter). Finalmente, y representando el futuro, Adriano Campo y Julia de León nos acercan a las misiones Hera (ESA) y DART (NASA). Hera será la primera misión en visitar un asteroide binario, Didymos. Su objetivo será estudiar el objeto secundario (Didymos B) tras el impacto producido por la misión DART de NASA.

En este Boletín también abordamos dos temas que van adquiriendo cada vez más importancia e interés. Consuelo Cid nos introduce el tema de la meteorología espacial y cómo el Sol puede afectarnos en nuestra vida diaria. La comisión ICOSAEDRO de la SEA nos presenta, por su parte, la creciente preocupación que existe en el entorno astronómico por proyectos para construir megaconstelaciones de satélites para telecomunicaciones, que podrían llenar la órbita terrestre baja con decenas de miles de objetos artificiales.

Entre todos los esfuerzos que hace la SEA para mantener contacto con la sociedad, la Comisión ProAm y la Comisión Mujer y Astronomía (CMyA) nos informan de algunas de sus actividades más recientes. La Comisión ProAm nos presenta proyectos de colaboración entre los astrónomos profesionales y amateurs en España. Por su parte, la CMyA nos hace partícipes de los sueños astronómicos de nuestros escolares más jóvenes, plasmados a través de los dibujos que han realizado para la II Edición del Concurso de Dibujo “Mujer y Astronomía”.

El Boletín se complementa con las habituales secciones “Ecos de (La) Sociedad” preparada por Amelia Ortiz, los comentarios del libro “Siete breves lecciones de física” de Carlo Rovelli que nos trae Enric Marco y la compilación de las tesis doctorales más recientes realizada por Adriana de Lorenzo.

Desde la Junta Directiva esperamos que os resulte atractivo el contenido de este Boletín y os deseamos una vuelta a la normalidad lo antes posible. Nos veremos en nuestra próxima reunión científica en pocas semanas, que tendrá esta vez un formato virtual, esperemos que de manera extraordinaria.

Manuel Collados
Instituto de Astrofísica de Canarias
Universidad de La Laguna

La Política Científica requiere planificación a largo plazo, lo que sólo es posible mediante un Pacto de Estado entre los diferentes partidos que conforman el arco parlamentario. Es la única opción para que pueda mantenerse con cierta estabilidad al margen de los potenciales cambios de mayorías. El plazo típico con el que se deben planificar estas actuaciones es de unos 10 años.



J. Miguel Mas Hesse
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
mm@cab.inta-csic.es



Vicent J. Martínez
Coordinador de la Red de
Infraestructuras de Astronomía
vicent.martinez@uv.es

ES PRECISA LA ESTABILIDAD A LARGO PLAZO

Por una parte, es el tiempo habitual para que una persona recién graduada desarrolle su tesis doctoral, madure mediante un contrato postdoctoral junior, en España o en otros países, tenga oportunidad de un contrato Ramón y Cajal o similar y pueda tener opciones de estabilizarse no más tarde de los 35 años. Esta es la edad a la que una investigadora o un investigador tiene su máximo de productividad, y es cuando más puede aportar al sistema y cuando puede empezar a consolidar un grupo de investigación. Los recortes asociados a la crisis económica del 2008 rompieron esta estrategia y las consecuencias se hicieron notar en los puntos más sensibles del sistema: por una parte, dejó de entrar personal nuevo, con un descenso notable de doctorandos y doctorandas, y en el otro extremo, excelentes investigadoras e investigadores que habían completado toda la carrera no pudieron acceder a puestos estables. Aunque la situación ha comenzado a mejorar en los últimos años, muchas de estas personas rondan ya la cuarentena y, o siguen dependiendo de contratos temporales, o han decidido permanecer en el extranjero, o simplemente han abandonado la investigación.

Por otra parte, entre 10 y 15 años es el periodo medio de preparación de los grandes proyectos de instrumentación científica, especialmente los de astronomía espacial. Por ejemplo, en estos momentos se lleva ya varios años trabajando en futuros observatorios como LISA o Athena, que no serán puestos en órbita hasta después del 2030. Los plazos de los observatorios de Tierra son algo más reducidos, pero precisan también de una cierta estabilidad y compromiso presupuestario a lo largo de 5 años como mínimo.

ESPAÑA, UNO DE LOS PAÍSES DE LA UE CON MENOR INVERSIÓN EN I+D+I

La reacción tras la crisis económica que comenzó en 2008 aumentó nuestra brecha en investigación con respecto a los países de nuestro entorno. Así, mientras entre 2009 y 2018 la inversión en I+D en España aumentó un magro 2,5%, centrado en los últimos años, en Alemania lo hizo un 38%; en Reino Unido, un 21%; en Italia, un 17%, y en Francia, un 12%. Francia, por ejemplo, aumentó la inversión en sus proyectos de investigación espacial en



Pedro Duque, ministro de Ciencia e Innovación, junto con Michel Mayor, Premio Nobel de Física de 2019.

los momentos más duros de este periodo. Ahora nos enfrentamos a una nueva crisis cuya magnitud todavía no podemos imaginar. Las lecciones que hemos aprendido deberían llevar a nuestros políticos a alcanzar objetivos como la estabilidad y el compromiso presupuestario para garantizar la formación de jóvenes investigadores e investigadoras, algo que es clave para el desarrollo económico, pero que es un proceso lento y costoso. Una interrupción a destiempo puede dar al traste con los esfuerzos de muchos años, y puede provocar la pérdida de la inversión realizada hasta entonces. Es imprescindible, por lo tanto, no dejarse llevar por las voces que reclamarán recortes y austeridad ante la crisis que se avecina, y mantener e incluso potenciar los programas de formación pre- y postdoctorales, así como la estabilización de los científicos y las científicas que hayan demostrado su nivel de excelencia. Recordemos que partimos de uno de los niveles de inversión en I+D+I más bajos de toda la Unión Europea, sin llegar al 60% de la media europea, y mucho más bajo que el de países punteros como Alemania o Francia.

Esta última crisis económica, de la que en el mundo de la Ciencia todavía no nos hemos recuperado, dejó además de manifiesto las debilidades de nuestro sistema de I+D+I. El instrumento básico de financiación del día a día de la actividad científica son los proyectos financiados por el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación (PEICTI), gestionado por la Agencia Estatal de Investigación (AEI) en el marco de la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología y de Innovación. Sorprendentemente, tan sólo se contemplan proyectos a corto plazo, que además deben ser autocontenidos. Este tipo de proyectos, que pueden ser válidos en general, no permiten afrontar colaboraciones a largo plazo como son habituales en el campo de la astrofísica. Un ejemplo claro es el desarrollo de instrumentación astronómica, ya sea para observatorios en Tierra o en el Espacio. La complejidad y elevado coste de estos instrumentos obliga a que sean diseñados y construidos en el marco de grandes consorcios internacionales, con periodos de actividad típicos entre 5 y 10 años, e incluso más en el caso de algunos proyectos espaciales. Por desgracia,

nuestro PEICTI no contempla ninguna herramienta que permita abordar este tipo de proyectos, por lo que es preciso ir empalmando subvención tras subvención, en un proceso lento y arriesgado desde el punto de vista científico y costoso desde el punto de vista administrativo. Los proyectos se vuelven a evaluar una y otra vez para cada subvención, se concatenan los procesos de justificación económica, es imposible realizar contratos de apoyo que cubran toda la fase de desarrollo... Pero sin duda, el mayor problema es que en ningún momento se oficializa un compromiso a largo plazo por parte de la AEI. Esta falta de compromiso oficial impide, o por lo menos dificulta, que los científicos españoles puedan liderar esos desarrollos, limitándonos a contribuciones de segundo orden. El peso y la capacidad científico-técnica de los grupos de investigación españoles, con el apoyo de una industria perfectamente capacitada, nos permitiría abordar desarrollos en condiciones de liderazgo a nivel europeo, pero la falta de mecanismos administrativos y de financiación apropiados nos lo impide. La propia Comisión Europea, en las recomendaciones que periódicamente emite, resume así la situación española ("Dictamen del Consejo sobre el Programa de Estabilidad de 2017 de España" [COM\(2017\) 508](#)):

"A fin de aumentar la productividad y la competitividad, España se beneficiaría de un mayor fomento de la investigación y la innovación. Sin embargo, los resultados en materia de innovación han ido decayendo hasta situarse actualmente en un nivel inferior al de 2007, mientras que el desfase con la media de la UE ha aumentado a lo largo del tiempo. El bajo rendimiento en innovación coincide con la disminución del gasto privado en I+D y apunta a la existencia de deficiencias en el marco de gobernanza de la investigación y la innovación. La Agencia Estatal de Investigación, encargada de gestionar la financiación de la investigación y la innovación procedente de la Administración central, comenzó a ser operativa a principios de 2017. Hasta ahora, no existe una planificación plurianual sistemática de los presupuestos destinados a los programas de apoyo [...]".

Este año caducan tanto el PEICTI como la Estrategia. Sería una excelente oportunidad para corregir los defectos que lastran la eficiencia del sistema de ciencia español.

NUEVOS RECORTES AFECTARÍAN GRAVEMENTE A LOS PROYECTOS INTERNACIONALES

Estos problemas estratégicos hacen que la crisis económica que nos espera tras la pandemia de la COVID-19 pueda ser especialmente letal para el desarrollo de instrumentación astronómica. La carencia de compromisos a medio-largo plazo por parte de nuestras agencias financiadoras pueden implicar que algunos de los proyectos en marcha no se renueven, o lo hagan en unas condiciones tales de infradotación económica que simplemente no sean viables. El impacto sería profundo: los grupos españoles participan ahora mismo en varios programas a largo plazo de la Agencia Espacial Europea o del Observatorio Austral Europeo. La paralización de la actividad en España tendría un efecto letal sobre estos proyectos, afectando a todos los centros que constituyen los consorcios internacionales y a las propias instituciones, ESA y ESO. El supuesto ahorro que se conseguiría en España llevaría a sobrecostes de muchos millones de euros para nuestros socios internacionales, y en algunos casos podría suponer la cancelación completa de alguno de los desarrollos.

España forma parte de la Unión Europea, de ESA y de ESO, y como tal debe ser consciente de sus deberes y compromisos a la hora de abordar proyectos científico-técnicos de gran alcance. Es imprescindible que se dote a la AEI de los mecanismos administrativos necesarios para asumir compromisos de financiación a largo plazo. Y si la legislación existente no lo permite, como se alega con frecuencia, háganse las leyes que hagan falta para dotarnos de un marco compatible con el de nuestros socios europeos. Las comisiones parlamentarias de ciencia, universidades e investigación, tanto en el Congreso como en el Senado, han de promover una legislación de este tipo que debe contar con la aquiescencia del Ministerio de Hacienda. Mientras esto no se entienda, seguiremos en inferioridad de condiciones con respecto a investigadores de otros países, y la inversión realizada no será todo lo eficiente que debiera.

En resumen, todos esperamos que la crisis asociada a la COVID-19 sea intensa, pero coyuntural, y que la recuperación de la actividad económica se complete en el plazo más corto posible. Lo que

hay que entender es que no es sólo una cuestión de evitar futuros recortes, se trata de incrementar la inversión en ciencia. Resulta imprescindible hacerlo, como recientemente ha declarado el propio ministro [Pedro Duque](#):

"Esta pandemia debe hacernos reflexionar sobre el papel de la ciencia en nuestra sociedad. Sólo a través de la investigación científica encontraremos la solución que frene a este virus, del que aún se desconocen muchos aspectos. Cuando salgamos de esta situación tenemos que ser conscientes de que la apuesta por el conocimiento y la innovación es lo que nos permite vencer a nuevos virus, que vendrán, pero también tener una mejor formación, más empleo cualificado, una mayor competitividad y, por todo ello, un sistema de pensiones sostenible. Hay que invertir en ciencia sean cuales sean las circunstancias. No podemos repetir lo sucedido durante la anterior crisis".

¡DÉJENSE ASESORAR POR LOS CIENTÍFICOS!

Las comisiones de reconstrucción que se están constituyendo a nivel europeo, estatal y autonómico deben contar con asesores del mundo de la ciencia. España es un país con seis ICTS (Instalaciones Científico-Técnicas Singulares) en el campo de la astronomía, incluyendo además numerosas instalaciones internacionales. Disponemos de las mejores condiciones e instalaciones para la observación astronómica en suelo europeo, de largo, y contamos además con una importante participación en organismos y programas internacionales de astrofísica y de espacio: ESO, programa científico de la ESA, o proyectos como SKA, CTA o EST. Por todo ello, la inversión en la actividad científica relacionada con la astronomía, que deberá articularse en futuros Presupuestos Generales del Estado, ha de permitir que todas estas instalaciones y programas puedan continuar aportando su potencial científico y tecnológico al servicio de la recuperación económica. Los avances tecnológicos asociados al desarrollo de nueva instrumentación de los telescopios de las diferentes ICTS permitirán que las inversiones en ciencia influyan de manera contundente en el desarrollo del tejido industrial de nuestro país y en su recuperación económica.

Queremos terminar con una reflexión que se ha manifestado en numerosos foros económicos tras la crisis del 2008: aquellos países que más capital destinan a I+D+I fueron a su vez los que tuvieron menores tasas de desempleo y los que superaron con mayor facilidad la crisis. No repitamos el mismo error, y aprovechemos lo que la astronomía puede aportar al Sistema Español de Ciencia y Tecnología para el provecho de toda la sociedad.

«El peso y la capacidad científico-técnica de los grupos de investigación españoles, con el apoyo de una industria perfectamente capacitada, nos permitiría abordar desarrollos en condiciones de liderazgo a nivel europeo, pero la falta de mecanismos administrativos y de financiación apropiados nos lo impide»

Los estallidos rápidos de radio – o Fast Radio Bursts (FRBs) – representan uno de los campos más recientes y prometedores de la astrofísica actual. Descubiertos en 2007, pasaron sus primeros diez años con más especulación que datos firmes en torno a su naturaleza. Sin embargo, la localización precisa de unos pocos de estos estallidos durante los últimos años ha aportado una cantidad de información sin igual sobre dónde se pueden producir y sus posibles orígenes. Aunque al mismo tiempo ha abierto un número incluso mayor de incógnitas.



Benito Marcote Martín
Joint Institute for VLBI ERIC
marcote@jive.eu

La mayor parte del Universo parece inmutable a nuestros ojos, mostrando cambios en escalas de tiempo mucho mayores a las humanas. Esto es especialmente cierto en el campo de la Cosmología, donde únicamente eventos como los estallidos de rayos gamma o la fusión de estrellas de neutrones o agujeros negros parecen perturbar este estado.

Sin embargo, existen unos eventos que se producen en escalas de tiempo mucho más rápidas. Estamos hablando de los estallidos rápidos de radio (FRBs). Estos eventos únicamente duran milésimas de segundo, después de las cuales no queda ningún rastro observable.

EL DESCUBRIMIENTO

Los FRBs no fueron descubiertos hasta 2007, a raíz de un reanálisis de datos del radio telescopio Parkes en Australia. Durante este análisis se detectó la presencia de una señal brillante que únicamente duraba unos milisegundos, pero mostraba una dispersión característica de una emisión producida a escalas cosmológicas (Lorimer et al. *Science* 2007; ver Fig. 1).

Aunque los púlsares son conocidos por mostrar señales similares, éstos son increíblemente periódicos. Pero la señal de este FRB no se ha vuelto a observar hasta la fecha. Adicionalmente, la dispersión que sufre la luz al propagarse por el espacio es proporcional a la cantidad de materia que hay entre el emisor y nosotros, y se observa como un retraso en la llegada de la señal proporcional al inverso del cuadrado de la frecuencia. El problema con los FRBs es que para explicar la dispersión observada se debe recurrir a una cantidad de materia muy superior a la contribución de toda nuestra galaxia en esa dirección. Por lo tanto, había que posicionar dicha emisión a una distancia cosmológica, de forma que el medio intergaláctico sea responsable de la mayor parte de esta dispersión.

Durante los primeros diez años se detectaron más de estos eventos, llegando a cientos en la actualidad (ver el catálogo de FRBs; Petroff et al. *PASA* 2016). Todos ellos sugiriendo distancias cosmológicas, lo que aumentaba la incógnita sobre estos objetos. A tales distancias la emisión debería ser de 10 a 15 órdenes de magnitud mayor que la de los púlsares. De forma adicional, y en base al número de FRBs detectados estos años, se predicen frecuencias de 10^{3-4} FRBs observables cada día. Estos ratios son significativamente

mayores de los esperados en otro tipo de eventos como estallidos de rayos gamma. Obviamente, un gran número de modelos fueron propuestos durante estos años, llegando incluso a tener un número mayor de posibles modelos que de FRBs descubiertos (ver [Platts et al. PR, 2019](#) para un resumen de los modelos más prometedores hasta la fecha).

EL PRIMER FRB CON ESTALLIDOS MÚLTIPLES

El primer avance (y cambio) significativo que ocurrió en este campo ocurrió en 2012, con el descubrimiento de estallidos múltiples en un mismo FRB, FRB 121102 ([Spitler et al. ApJ 2014](#), [Nature 2016](#); [Scholz et al. ApJ 2016](#)). Esto rompía la idea de que los FRBs provenían de eventos cataclísmicos (o al menos una parte de ellos). Aunque muchos modelos comenzaron a plantear la idea de dos posibles tipos diferentes de FRBs.

Sin embargo, todavía existía una limitación fundamental en el campo de los FRBs: ninguno de estos eventos se había podido asociar con contrapartidas conocidas. Todos los FRBs habían sido descubiertos con radio antenas individuales, lo que implica resoluciones de varios minutos de arco.

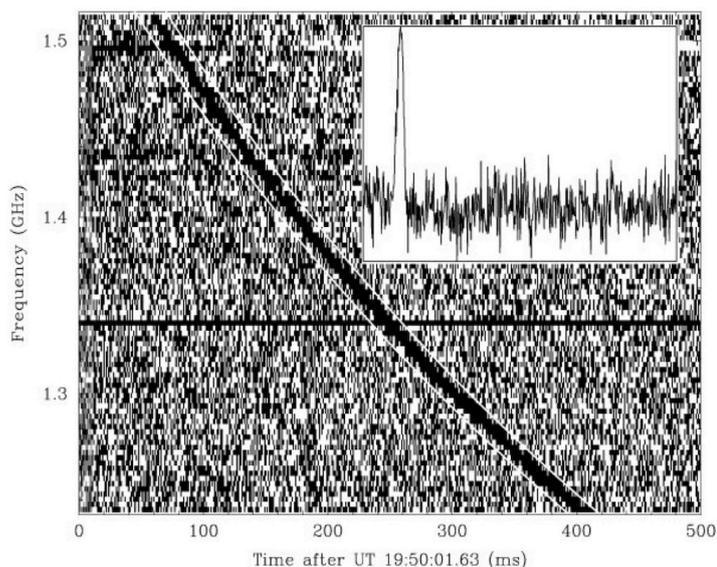


Fig. 1: FRB observado por el radiotelescopio Parkes. La señal, de sólo unos milisegundos de duración, muestra una dispersión clara: la señal llega más tarde a frecuencias más bajas. Esto revela la existencia de una ingente cantidad de material entre el emisor y nosotros. El recuadro interior muestra la señal integrada a todas las frecuencias, después de corregir dicha dispersión.

LA PRIMERA LOCALIZACIÓN PRECISA DE UN FRB

Un gran paso adelante ocurrió en 2017, cuando el mismo FRB 121102 fue localizado con suficiente precisión como para asociarlo con contrapartidas multi-longitud de onda.

La presencia de estallidos múltiples permitió apuntar tanto el Karl G. Jansky Very Large Array (VLA) como el European VLBI Network (EVN) a dicha región del cielo. La detección de varios estallidos durante estas observaciones permitió asociar FRB 121102 a una fuente persistente en radio y óptico ([Chatterjee et al. Nature 2017](#); [Marcote et al. ApJL 2017](#), [Tendulkar et al. ApJL 2017](#)). Al combinar estos datos con observaciones de Gemini Norte y el *Hubble Space Telescope* se encontró que los estallidos de FRB 121102 provienen de una galaxia enana a 972 Mpc. Más específicamente, están asociados a una objeto persistente en radio con un tamaño menor a 0.7 pc, todavía de origen indeterminado. Lo único que sabemos es que dicho objeto se encuentra inmerso en una región de formación estelar con baja metalicidad, que domina toda la emisión óptima de la galaxia (Fig. 2; [Bassa et al. ApJL 2017](#)).

Este tipo de ambientes es similar al de la mayor parte de estallidos de rayos gamma largos, favoreciendo la idea de que FRBs podrían estar ligados a magnetares jóvenes (~ 100 años) interaccionando con supernovas superlumínicas (para explicar la fuente persistente; e.g. [Margalit & Metzger ApJL 2018](#)). En cambio, el reducido tamaño de dicho objeto también favorecía la presencia de un agujero negro masivo ($\sim 10^{5-6} M_{\odot}$) en las inmediaciones, algo que se vio reforzado por la detección de una rotación por Faraday únicamente observada hasta ahora en objetos cercanos a Sgr. A* ([Michilli et al. Nature 2018](#)).

LOCALIZACIONES DE FRB DE UN SOLO EVENTO

En 2019 tres nuevas localizaciones fueron publicadas ([Bannister et al. Science 2019](#), [Ravi et al. Nature 2019](#), [Prochaska et al. Science 2019](#)). Las tres observaron nuevos FRBs de los que no se han observado repeticiones (FRBs de un solo evento). Estos FRBs fueron localizados en lugares radicalmente distintos al primero: dos dentro de galaxias elípticas y el último en algún lugar dentro de una galaxia masiva. Ninguno de ellos se pudo asociar con objetos concretos dentro de dichas galaxias debido a la ausencia de emisión compacta destacada.

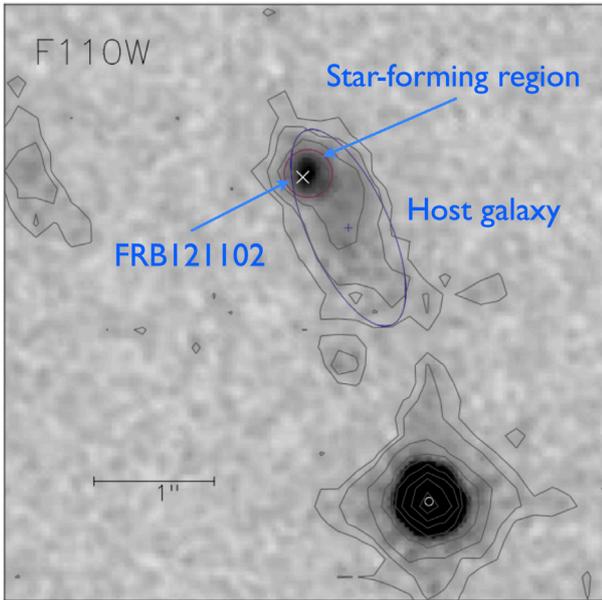
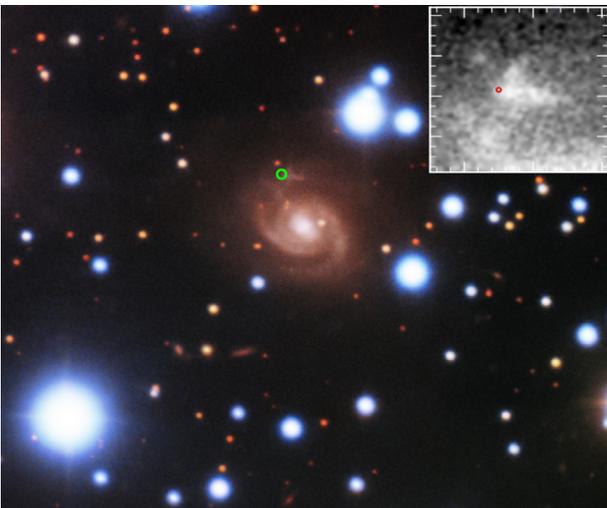


Fig 2. Ubicación de FRB 121102, el primer FRB localizado con precisión. Los estallidos provienen de una región de formación estelar con baja metalicidad que domina toda la emisión óptica de la galaxia enana a la que pertenece.

Fig 3. Ubicación de FRB 180916, el segundo FRB con múltiples estallidos localizado hasta la fecha. Su ubicación (círculos verde y rojo) muestra claras diferencias con respecto al anterior: aunque ambos se encuentran en regiones con formación estelar, este segundo FRB se localiza en una galaxia espiral, y dicha región muestra una metalicidad solar, aunque de un tamaño y forma inusual.



Esta disparidad de ambientes dificultó la idea de un modelo común a todos los FRBs, reforzando de nuevo la idea de que quizá los FRBs con múltiples estallidos se encuentran en hábitats más jóvenes (de formación estelar), mientras que los FRBs de un sólo evento pudieran estar ligados a galaxias más viejas.

Un nuevo segundo repetidor localizado

Todo esto volvió a cambiar de nuevo. El radio telescopio CHIME (Canadá) ha entrado recientemente en funcionamiento. Gracias a su gran campo de visión se ha posicionado rápidamente como el telescopio con más FRBs descubiertos hasta la fecha, con más de cientos de estos eventos. De todos ellos, sólo una pequeña fracción ha mostrado estallidos múltiples (CHIME/FRB Collaboration et al. *ApJL* 2019), aunque se piensa que todos los FRBs deben ser capaces de repetir, y únicamente estamos limitados por sensibilidad y ratio de estallidos brillantes (Ravi, *Nat. Astr.* 2019).

Entre estos nuevos FRBs descubiertos por CHIME, uno de ellos, FRB 180916, se ha mostrado como el FRB más activo descubierto hasta ahora, y posiblemente uno de los más cercanos. Pero CHIME únicamente permite precisiones de varios minutos de arco en el cielo, por lo que era imposible localizarlo con precisión.

La segunda localización de un FRB repetidor se llevó a cabo tras observar dicha región del cielo en varias épocas con el EVN durante 2019. En una de ellas se detectaron cuatro estallidos, permitiendo (al igual que con el primer FRB) localizar dichas señales con una precisión de milisegundos de arco (Marcote et al. *Nature* 2020). FRB 180916 se ubica en el interior de una región de formación estelar de una galaxia espiral a 149 Mpc (Figs. 3 y 4). Dicha región es inusualmente grande (~1.5 kpc de lado), y con una característica forma en "v". Aunque en este caso la metalicidad es consistente con la solar, como es esperarse de tales galaxias, y ningún objeto compacto consistente con los estallidos fue encontrado en esta ocasión.

Como se puede ver, las diferencias con el primer FRB son notables, quedando claro que los FRBs pueden producirse en multitud de ambientes.

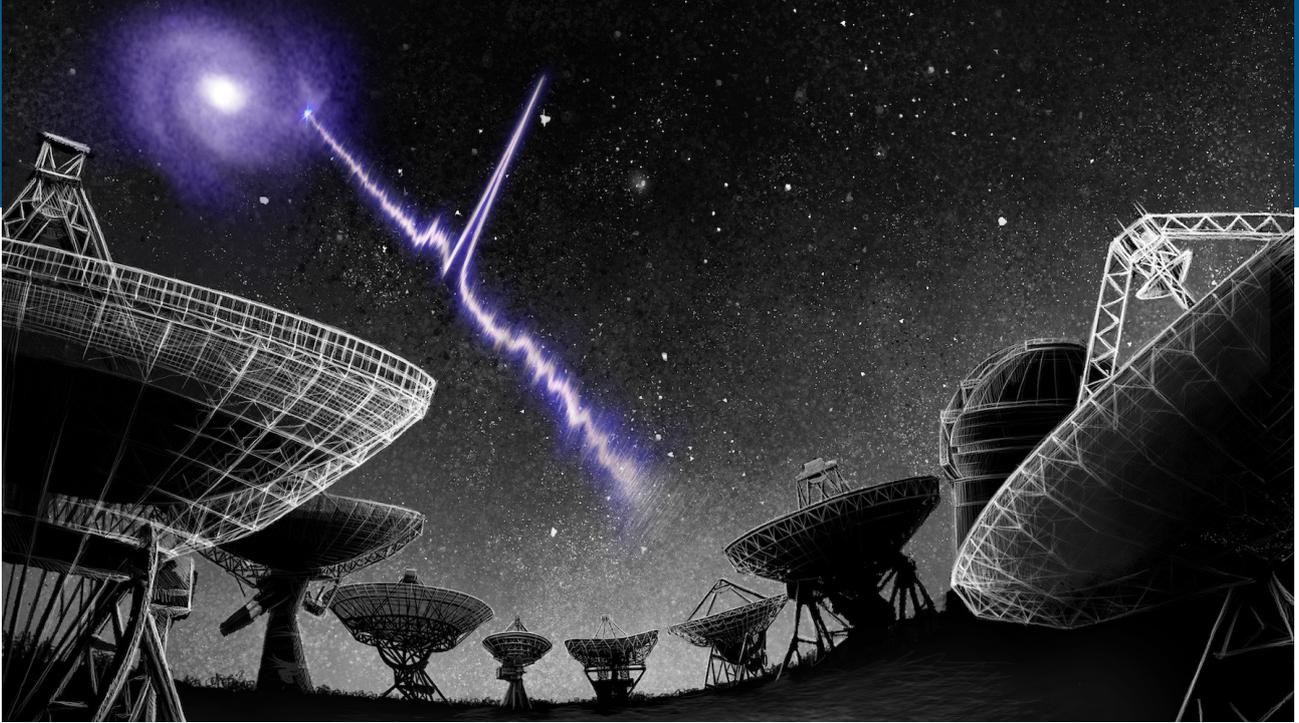


Fig 4. Representación de las observaciones del EVN detectando uno de los estallidos de FRB 180916. El EVN combina la señal de un gran número de radio antenas repartidas por Europa, Asia y África, incluyendo la antena de Yebes en Guadalajara, mantenida por el Observatorio Astronómico Nacional (OAN). Crédito: Danielle Futselaar (www.artsource.nl).

La última pieza puesta en este puzzle es el descubrimiento de una periodicidad en el patrón de estallidos de FRB 180916 de unos 16 días (CHIME/FRB Collaboration et al. *Nature* 2020), donde los estallidos aparecen en una ventana de unos cuatro días dentro de éste periodo, ¿quizá debido a un sistema binario?

¿QUÉ SON LOS FRBS?

Como hemos visto, únicamente conocemos con precisión la ubicación de un puñado de FRBs. Todos ellos mostrando diferencias intrínsecas y entornos distintos. Esto no ha ayudado a clarificar su naturaleza y origen, y es posible que hasta que no obtengamos un gran número de ellos estudiados con precisión no se pueda llegar a conclusiones firmes.

Este último objeto, FRB 180916, es con diferencia el más cercano a la Tierra que conocemos. Por primera vez se pueden poner límites reseñables a la posible emisión multilongitud de onda de los FRBs. Aunque se han llevado a cabo varias búsquedas de estallidos en otras regiones del espectro electromagnético (por ejemplo en rayos X, Scholz et al. *ApJL* 2017, 2020; y en óptico y rayos gamma, MAGIC Collaboration et al. *MNRAS* 2019), ningún estallido ha sido detectado hasta la fecha.

Sin embargo, recientemente se ha detectado el que podría ser el eslabón perdido entre los púlsares/

magnetares Galácticos y los FRBs. En abril 2020 se detectó una señal galáctica proveniente del magnetar Galáctico SGR 1935+2154 similar a la de los FRBs, y con contrapartidas en rayos X (Scholz et al. *ATel* 2020). Aunque esta señal es todavía varios órdenes de magnitud inferior en luminosidad, está muy por encima de la emisión conocida de este tipo de objetos. La posible conexión entre FRBs y magnetares jóvenes parece más firme después de esto. Queda por ver si el entorno (bien remanentes jóvenes de supernova o agujeros negros masivos) juegan un papel crítico en la emisión.

FRBS EN UN CONTEXTO MÁS AMPLIO

Para concluir, es necesario mencionar el por qué de tanto interés en este tipo de objetos. Y la razón radica es algunas de sus propiedades: la brevedad de la emisión radio (únicamente milisegundos), el gran número de FRBs esperados y su gran distancia (en muchos casos con redshifts $\gg 1$).

Estas propiedades permitirán trazar las propiedades del medio intergaláctico con una precisión sin precedentes. Pero además, estas señales lejanas transportan información sobre la historia de reionización del Universo. Y debido a la brevedad de la emisión ya se ha comenzado a poner límites precisos en física fundamental, como el principio de equivalencia o límites a la masa del fotón.

DESPEDIDA AL TELESCOPIO ESPACIAL SPITZER

El pasado 30 de enero se dio por finalizada la misión infrarroja (3.6-160 μ m) del Telescopio Espacial Spitzer, después de más de 16 años de operaciones. Spitzer fue el último de los 4 grandes observatorios espaciales de NASA (los otros tres son Hubble, Chandra y el también retirado Compton) en lanzarse, el 25 de agosto de 2003.



Almudena Alonso Herrero
aalonso@cab.inta-csic.es

Pablo G. Pérez González
pgperez@cab.inta-csic.es

María Morales Calderón
mariamc@cab.inta-csic.es

Unidad de Excelencia María de Maeztu,
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

La vida útil de Spitzer estaba inicialmente limitada a 5 años y medio, debido a la duración del criógeno necesario para enfriar los tres instrumentos científicos (IRAC, IRS y MIPS) que llevaba a bordo. Sin embargo, Spitzer continuó operando en las llamadas “misión caliente” y “misión más allá” otros 11 años, aunque solo en las longitudes de onda más cortas (3.6 μ m y 4.5 μ m) del instrumento IRAC.

Durante sus 16 años de vida, Spitzer ha observado multitud de objetos astronómicos, desde nuestro Sistema Solar, regiones de formación estelar, supernovas, discos de polvo alrededor de estrellas y exoplanetas en la Vía Láctea, galaxias cercanas y lejanas llegando a los albores del Universo. Dada la ingente cantidad de observaciones realizadas con Spitzer así como de los innumerables descubrimientos, resulta imposible poder resumirlos de manera exhaustiva. En este artículo discutimos algunos artículos escogidos, entre los casi 9000 publicados con datos de Spitzer, en las tres áreas astronómicas en las que trabajamos. Sin lugar a dudas, el extenso archivo de Spitzer tiene todavía una gran cantidad de ciencia escondida por descubrir en años venideros.

FORMACIÓN ESTELAR Y EXOPLANETAS

Durante los 6 años de misión criogénica, Spitzer proporcionaba, por primera vez, la cobertura en longitud de onda adecuada y la sensibilidad para detectar cantidades de polvo muy pequeñas en las zonas donde se formarían los planetas alrededor de miles de estrellas. Además, gracias a la efectividad de su mapeado, Spitzer nos ha proporcionado imágenes impresionantes de regiones de formación estelar completas (como por ejemplo Orión mostrada en la Figura 1). El estudio de estas regiones ha dado lugar a un incremento enorme del inventario de discos circunestelares y sobre todo de su estadística en cuanto a masa del objeto central, edad, entorno y estado evolutivo. Además, el instrumento IRS obtuvo miles de espectros de discos. Uno de los primeros resultados de estos estudios es la gran diversidad existente de estos discos y la incapacidad de usar un único parámetro (usualmente la pendiente de su distribución espectral de energía en el infrarrojo) para caracterizarlos.

La gran cantidad de estrellas jóvenes que se han observado ha permitido establecer firmemente el tiempo de disipación de los discos primordiales.

Figura 1: Imagen de la nebulosa de Orión tomada con las dos primeras bandas del instrumento IRAC (3.6 μm en azul y 4.5 μm en naranja). Los colores en la imagen reflejan temperaturas relativas y estados evolutivos de miles de estrellas desde meras aglomeraciones de polvo, algunas con potentes chorros estelares (en la parte de arriba de la imagen, la llamada Nube Molecular de Orión 1), hasta las estrellas más calientes de la región correspondientes al cúmulo del Trapecio, en el centro de la imagen. Los vientos y la radiación de estas estrellas han esculpido el polvo circundante. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/J. Stauffer (SSC/Caltech).



Esto era precisamente una de las finalidades de proyectos como “From Molecular Cores to Planet-forming Disks” (c2d: Evans et al. 2003) y “Formation and Evolution of Planetary Systems” (FEPS: Meyer et al. 2006). Ambos estudios concluyen que, 10 Myr es un límite superior firme para su longevidad en torno a estrellas de tipo solar y masas inferiores. La vida de estos discos es unas 2 veces más corta para objetos más masivos debido a una mayor tasa de acreción e irradiación (Calvet et al. 2005). Además, existe una dispersión pequeña en la vida media de los discos circunestelares (2 – 3 Myr) derivada de los estudios en diferentes cúmulos de una edad dada a pesar de la diferencia de tamaño de los cúmulos. Sin embargo, las perturbaciones gravitacionales tienen un papel importante en la evolución de los discos en sistemas binarios cercanos o sistemas múltiples: binarias con separaciones proyectadas de menos de 40 ua tienen la mitad de probabilidades de tener disco en comparación con binarias con separaciones mayores (Cieza et al. 2009). También el entorno tiene un efecto en los discos. La fotoevaporación producida por estrellas masivas erosiona las partes externas de los discos cercanos dejando, normalmente, las regiones más internas intactas afectando incluso a estrellas a decenas de parsecs de distancia.

Sin embargo, aunque no fue creado para ello, la gran estabilidad del telescopio ha hecho que uno de los campos en los que más ha resaltado Spitzer sea quizás el de los exoplanetas. Ya en 2005 observó por primera vez la luz infrarroja a 24 μm del planeta HD 209458b midiendo el paso del mismo por detrás de su estrella (Deming et al. 2005). La profundidad del eclipse nos dice cuánta luz infrarroja emite el planeta, y al combinarlo con el tamaño del mismo obtenemos su temperatura, unos 1100 K. Spitzer ha medido las temperaturas de planetas entre 700 y 3000K pero no puede llegar a temperaturas tan bajas como la de la Tierra. Usando el instrumento IRS se

encontraron nubes altas de polvo pobladas por silicatos en la atmósfera de otro Júpiter caliente, HD 189733b (Grillmair et al. 2007) y más tarde, con IRAC, también se encontraban evidencias de la presencia de vapor de agua (Beaulieu. et al. 2010).

Yendo aún más allá, Spitzer midió la variación de la temperatura en la superficie de un gigante gaseoso y se pudo construir el primer mapa del tiempo de un exoplaneta. Éste mostraba la existencia de vientos atmosféricos con velocidades de miles de kilómetros por hora en algunos casos. Incluso ya en la “misión caliente” Spitzer colaboró en el descubrimiento de un sistema planetario ¡con 7 planetas! en torno a una estrella muy fría, TRAPPIST-1 (Gillon et al. 2017). Tres de ellos habían sido detectados desde Tierra pero se sospechaba que había más y Spitzer dedicó 25 horas consecutivas de observación para detectar los 4 planetas adicionales. Las órbitas de todos ellos son muy cercanas, entre 1.5 y 12 días. Tres de los planetas parecen estar en la zona habitable, donde podría haber agua en estado líquido.

PROPIEDADES DEL POLVO EN GALAXIAS DEL UNIVERSO LOCAL

La emisión del polvo es una de las componentes fundamentales del espectro infrarrojo de galaxias con formación estelar y galaxias activas (AGN por sus siglas en inglés). La cobertura espectral de Spitzer ha permitido observar la emisión del polvo en forma de continuo y de emisión o absorción de los silicatos y otras especies de polvo (ver más adelante). Además la emisión de moléculas compuestas por carbono e hidrógeno denominadas hidrocarburos poli-cíclicos aromáticos (o PAHs por sus siglas en inglés) domina el espectro de galaxias con formación estelar. Observaciones espacialmente resueltas de galaxias cercanas con Spitzer, han revelado que el polvo caliente y templado (cientos a decenas de grados Kelvin) trazado por la emisión de continuo en $24\mu\text{m}$ y $70\mu\text{m}$ se origina en regiones de formación estelar oscurecida donde el polvo es calentado por las estrellas jóvenes y masivas. A $160\mu\text{m}$ la emisión tiene una apariencia más difusa y puede tener otras contribuciones adicionales además del polvo calentado en regiones HII. Entre los trabajos más destacados cabría mencionar los estudios pioneros de Gordon et al. (2004) de la galaxia M81 y Hinz et al. (2004) de M33 así como los resultados del programa de legado “The

Spitzer Nearby Galaxy Survey” (SINGS: Kennicutt et al. 2003), entre otros. Los PAHs emiten en forma de bandas anchas teniendo los picos más prominentes en 6.2, 7.7, 8.6, y $11.3\mu\text{m}$, además de en $3.3\mu\text{m}$ en el infrarrojo cercano. Aunque la emisión de PAHs en galaxias se había detectado con anterioridad con ISO y telescopios de tierra, Spitzer los observó en un gran número y tipo de galaxias hasta distancias cosmológicas. En galaxias con metalicidades altas e intermedias, la emisión de los PAH puede alcanzar el 10% de la emisión total en el infrarrojo. Además, Peeters et al. (2004) demostró que emisión de los PAH está fundamentalmente excitada por fotones UV emitidos por estrellas de tipo B y por lo tanto son trazadores de la formación estelar reciente. Estas propiedades del polvo han permitido derivar nuevas calibraciones de la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés) oscurecida usando la emisión de los PAHs y diferentes emisiones monocromáticas de continuo infrarrojo así como combinaciones con trazadores ópticos y ultravioleta (ver por ejemplo, Calzetti et al. 2007, Kennicutt et al. 2009, Rieke et al. 2009).

Uno de los resultados más inesperados fue la detección con Spitzer de emisión de PAHs en el superviento observado perpendicular al disco de la galaxia *starburst* M82 (Figura 2, las observaciones de Spitzer fueron publicadas por primera vez en Engelbracht et al. 2006). La emisión a $8\mu\text{m}$ observada por el instrumento IRAC se extiende al menos 6 kpc en el eje menor de la galaxia y demuestra que el polvo y los PAHs pueden sobrevivir en condiciones tan extremas como los supervientos asociados a formación estelar intensa. La emisión de los PAHs se ha detectado también en las regiones centrales de galaxias activas cercanas desde las menos luminosas como las galaxias Seyfert hasta cuásares (se muestra un ejemplo en la Figura 3). En general se observa que la emisión de los PAH aparece diluida en AGN comparada con la emisión en galaxias con formación estelar. Esto es debido en parte al intenso continuo producido por polvo calentado por el AGN pero probablemente también a diferentes condiciones físicas que pueden alterar la química de los PAHs pero que no los destruyen completamente. La emisión de los PAHs ha permitido derivar las SFRs en las regiones circunucleares de galaxias Seyfert y demostrar que están correlacionadas con la tasa de acreción de los agujeros negros



Figura 2: Visión multifrecuencia de la galaxia M82. En rojo es la emisión de los PAHs observada con el instrumento IRAC de Spitzer a $8\mu\text{m}$ y en azul es la emisión en rayos X observada con Chandra. Ambas emisiones trazan fundamentalmente el superviento perpendicular al disco de la galaxia trazado por emisión en el óptico observada con Hubble en colores naranja y verde. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UofA/.

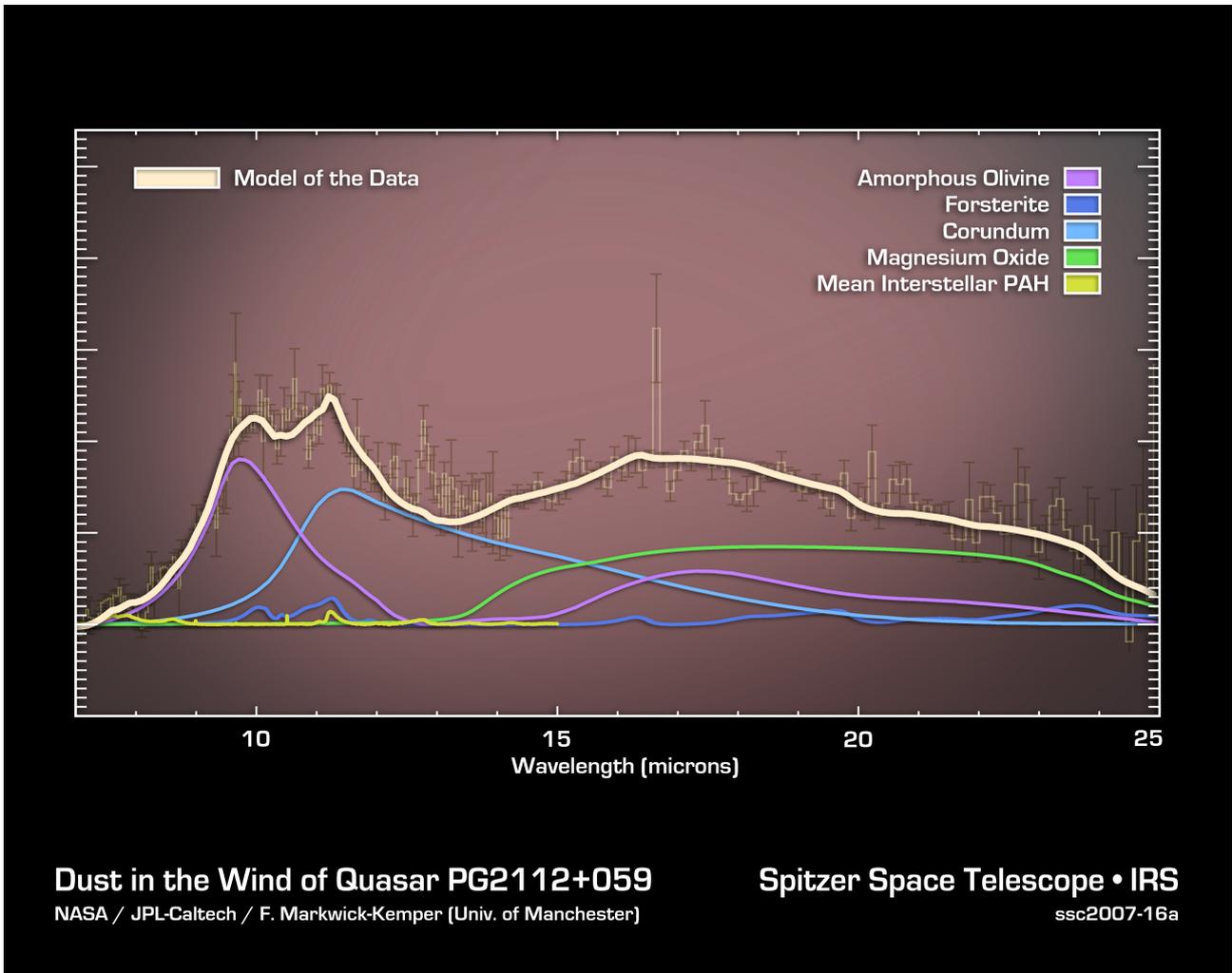


Figura 3. Composición del polvo en el viento del cuásar PG2112+059 ($z=0.466$) derivado a través de la modelización del espectro infrarrojo medio observado con el instrumento IRS de Spitzer. La olivina (silicato amorfo) tiene la mayor contribución, pero también se detectan óxidos y silicatos cristalinos. En este cuásar se puede observar que la emisión de los PAHs es débil pero no ausente. Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/F. Markwick-Kemper (University of Manchester).

«Aunque no fue creado para ello, la gran estabilidad del telescopio ha hecho que uno de los campos en los que más ha resaltado Spitzer sea quizás el de los exoplanetas»

supermasivos (Diamond-Stanic & Rieke 2012). Esto sugiere una conexión entre el gas que forma estrellas en escalas físicas de menos de 1 kpc y el gas que contribuye al crecimiento del agujero negro en escalas mucho menores que 1 pc.

Las teorías actuales predicen que la formación del polvo en el Universo Local tiene lugar en estrellas evolucionadas de tipo AGB. Sin embargo, observaciones (sub)milimétricas muestran la existencia de polvo a edades tempranas del Universo. Entre los mecanismos adicionales de formación de polvo, se han propuesto los vientos energéticos producidos en cuásares. Observaciones espectroscópicas con Spitzer e instrumentos de tierra han mostrado la presencia de polvo debido a granos de silicatos en la mayoría de galaxias activas. Además en algunos cuásares con potentes *outflows* la modelización de los espectros de Spitzer permite estimar la composición del polvo, como se puede apreciar en la Figura 3 (el resultado fue publicado en Markwick-Kemper et al. 2007). Estos descubrimientos sobre las propiedades del polvo en diferentes tipos de galaxias hacen necesaria la revisión de los modelos de formación, supervivencia y destrucción de los granos de polvo y PAHs en el medio interestelar, y en especial en los ambientes más hostiles como son los supervientos galácticos y las regiones centrales de galaxias activas.

EXPLORACIONES COSMOLÓGICAS

Los tres parámetros físicos más relevantes que hemos utilizado históricamente para estudiar la formación y evolución galaxias son el desplazamiento al rojo, la masa estelar y la SFR. Antes del lanzamiento de Spitzer en 2003, las exploraciones de galaxias más relevantes tenían importantes limitaciones en la estimación de esas tres propiedades. Spitzer supuso una revolución que todavía hoy, 16 años después de que se empezara a tomar datos, sigue vigente y lo convierte en uno de los telescopios más relevantes (quizás solo por detrás de Hubble) para el estudio de galaxias a distancias cosmológicas, a pesar de sus solo 85 cm de diámetro.

En cuanto al desplazamiento al rojo se refiere, exploraciones en el óptico con Hubble y con telescopios terrestres muestrearon en los primeros años de este siglo áreas de cielo del orden unos cientos, in-

cluso miles, de arcominutos cuadrados, permitiendo la detección de galaxias hasta desplazamientos al rojo en torno a $z=3-4$. Estas exploraciones contaron con considerables incertidumbres y degeneraciones en los desplazamientos al rojo fotométricos, que intentaban solucionarse con datos en el infrarrojo cercano tomados desde tierra. Spitzer, con su instrumento IRAC, permitió la obtención de imágenes extremadamente profundas, típicamente hasta magnitudes en torno a 25-26 ABmag en 3.6 y 4.5 μm en decenas de grados cuadrados (igual que los datos más profundos de banda K desde tierra, como los de ULTRAVista), e incluso llegando a más de 28 ABmag en zonas de cielo del orden de un grado cuadrado (con exploraciones como CANDELS, S-COSMOS, SpUDS, SWIRE). Estas imágenes infrarrojas en grandes áreas de cielo, tomadas con una rapidez sin precedentes, siguen a día de hoy estando muy por encima de las capacidades en el infrarrojo cercano desde tierra, y permitieron una mejora sustancial de las estimaciones de distancias para galaxias con formación estelar y AGN (Ilbert et al. 2009, Salvato et al. 2009, Barro et al. 2019) y una extensión de los trabajos de caracterización de galaxias hasta más allá de la época de reionización (Ouchi et al. 2009, de Barros et al. 2019).

Los datos IRAC de gran calidad mencionados en el párrafo anterior facilitaron el acceso al infrarrojo óptico y cercano en reposo, el mejor *proxy* que conocemos para determinar masas estelares, para galaxias hasta desplazamientos al rojo en torno a $z=4-5$. Eso permitió obtener resultados tan relevantes como la caracterización del ensamblado de la masa estelar durante el 90% de la historia del Universo (Pérez-González et al. 2008, Marchesini et al. 2009, Muzzin et al. 2013, Stefanon et al. 2017). Incluso las galaxias más distantes que conocemos en la actualidad, por encima de $z\sim 8$, en su mayor parte descubiertas con técnicas de detección del *break* de Lyman usando datos ultra-profundos del Hubble, cuentan con contrapartidas Spitzer/IRAC (de Barros et al. 2019, Figura 4), aunque la extracción de flujos requirió un importante esfuerzo en el desarrollo de técnicas de deconvolución de imágenes espaciales (Laidler et al. 2007, Guo et al. 2013). Todavía hoy en día los datos IRAC son los más profundos en el infrarrojo, con centenares y miles de fuentes extremadamente débiles en otras longitudes de onda que aún no

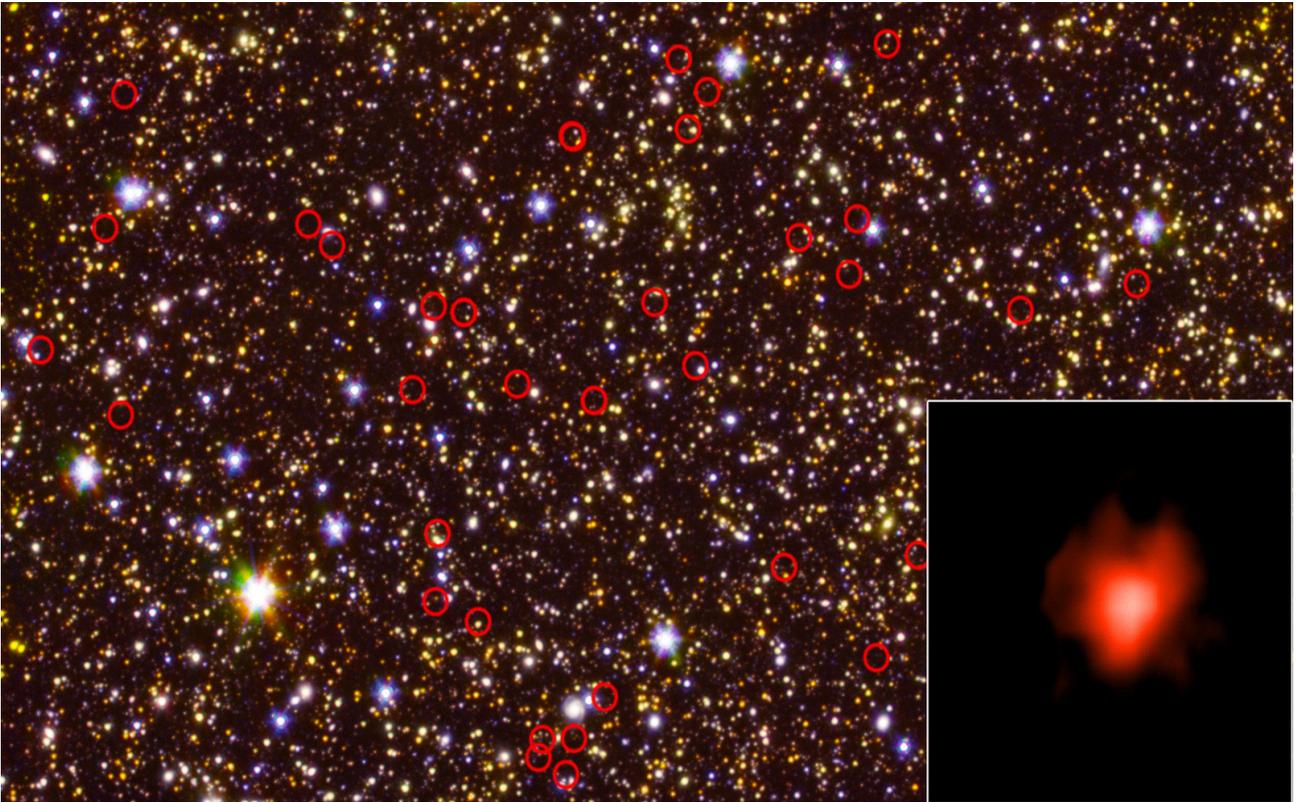


Figura 4: Imagen RGB de uno de los campos más profundos observados por Spitzer con su instrumento IRAC (GOODS/GREATS). Con círculos rojos se marcan candidatos de galaxias a $z \sim 8$. En la parte inferior derecha se muestra un zoom sobre uno de estos objetos (de Barros et al. 2019). Crédito de la imagen: NASA/JPL-Caltech/ESA/Spitzer/P. Oesch/S. De Barros/ I. Labbe.

han sido catalogadas ni caracterizadas (Wang et al. 2016, Alcalde Pampliega et al. 2019). Seguramente esas fuentes serán el pan nuestro de cada día cuando JWST obtenga datos, pero hoy permanecen escondidas entre el ruido y la confusión de los datos IRAC, esperándonos en el archivo Spitzer.

Finalmente, en lo que respecta a las SFRs de galaxias a distancias cosmológicas, Spitzer también ha sido un observatorio rompedor, gracias esta vez a su instrumento MIPS. El efecto más dramático que afecta a la determinación de esta propiedad física es la atenuación por polvo interestelar, más importante en las regiones más activas. MIPS permitió extender hasta desplazamientos al rojo en torno a $z \sim 3$ y SFRs tan bajas como $3M_{\odot}/\text{yr}$ a $z \sim 1$ (cercana a la de la Vía Láctea) y $30M_{\odot}/\text{yr}$ a $z \sim 2$ (típico de galaxias *starbursts* como M82, Figura 2)

los trabajos pioneros en el infrarrojo de IRAS e ISO. Esto permitió confirmar el incremento de densidad de tasa de formación estelar cósmica desde $z=0$ a $z=1$ (Le Floc'h et al. 2005) así como cuantificar su evolución con un estimador no afectado por la extinción del polvo hasta $z \sim 3$, es decir, durante el 80% de vida del Universo (Pérez-González et al. 2005). Asimismo, junto con IRAC, permitió hacer el primer censo extenso de galaxias con AGNs oscurecidos, una de las fases más relevantes en la evolución de agujeros negros supermasivos y de sus galaxias anfitrionas (Alonso-Herrero et al. 2006, Donley et al. 2012). Aún hoy los datos de MIPS siguen siendo los más sensibles a la formación estelar rodeada polvo a distancias cosmológicas y han servido de base para exploraciones complementarias en el infrarrojo lejano con telescopios como Herschel o antenas (sub)milimétricas.

Sobre los autores: Almudena Alonso Herrero y Pablo G. Pérez González trabajaron en el equipo responsable del instrumento MIPS en la Universidad de Arizona durante 2001-2003 y 2003-2006, respectivamente, participando en la caracterización del instrumento así como en las actividades de comisionado del instrumento en órbita. Fueron además miembros del equipo científico de MIPS, publicando artículos sobre galaxias cercanas y lejanas con datos de MIPS, IRAC e IRS. María Morales Calderón trabajó con el equipo responsable de IRAC en el Spitzer Science Center durante 2006 y 2009-2012 participando en la caracterización de los artefactos en las imágenes de IRAC. Además participó en dos grandes proyectos de “Exploration Science” estudiando la parte interna de los discos circunestelares a través de su variabilidad en el infrarrojo.

REFERENCIAS

- Alcalde Pampliega et al. 2019, ApJ, 876, 135
- Alonso-Herrero et al. 2006, ApJ, 640, 167
- Barro et al. 2019, ApJS, 243, 22
- Beaulieu et al. 2010, MNRAS, 409, 963
- Calvet et al. 2005, AJ, 129, 935
- Calzetti et al. 2007, ApJ, 666, 870
- Cieza et al. 2009, ApJ, 696, L84
- de Barros et al. 2019, MNRAS, 489, 2355
- Deming et al. 2005, Nature, 434, 740
- Diamond-Stanic & Rieke 2012, ApJ, 746, 168
- Donley et al. 2012, ApJ, 748, 142
- Engelbracht et al. 2006, ApJ, 642, L127
- Evans et al. 2003, PASP, 115, 965
- Gillon et al. 2017, Nature, 542, 456
- Gordon et al. 2004, ApJS, 154, 215
- Grillmair et al. 2007, ApJ, 658, L115
- Guo et al. 2013, ApJS, 207, 24
- Hinz et al. 2004, ApJS, 154, 259
- Ilbert et al. 2009, ApJ, 690, 1236
- Kennicutt et al. 2003, PASP, 1145, 928
- Kennicutt et al. 2009, ApJ, 703, 1672
- Laidler et al. 2007, PASP, 119, 1325
- Le Floch et al. 2005, ApJ, 632, 169
- Marchesini et al. 2009, ApJ, 701, 1765
- Markwick-Kemper et al. 2007, ApJ, 668, L107
- Meyer et al. 2006, PASP, 118, 1690
- Muzzin et al. 2013, ApJ, 777, 18
- Ouchi et al. 2009, ApJ, 706, 1136
- Peeters et al. 2004, ApJ, 613, 986
- Pérez-González et al. 2005, ApJ, 630, 82
- Pérez-González et al. 2008, ApJ, 675, 234
- Rieke et al. 2009, ApJ, 692, 556
- Salvato et al. 2009, ApJ, 690, 1250
- Stefanon et al. 2017, ApJ, 843, 36
- Wang et al. 2016, ApJ, 816, 84

«Estas imágenes
infrarrojas en grandes
áreas de cielo, tomadas
con una rapidez sin
precedentes, siguen a día
de hoy estando muy por
encima de las capacidades
en el infrarrojo cercano
desde tierra»

SOLAR ORBITER LANZADO CON ÉXITO

El pasado 10 de febrero, a las 04:03 UTC, la nave *Solar Orbiter*, de la ESA, partía con éxito en un cohete Atlas V, contratado por la NASA a la empresa United Launch Alliance, desde Cabo Cañaveral en la Florida.

La misión, que ya fue descrita en el número de invierno de 2018 de nuestro boletín, se comporta de acuerdo a las previsiones. Sus instrumentos de medida local ya han sido cotejados y han comenzado a tomar medidas científicas mientras que los de sondeo remoto se encuentran en el proceso de puesta a punto y comenzarán a operar regularmente en noviembre de 2021. En estos momentos, la nave se encuentra [aquí](#).

Aparte de su crucial valor científico puesto que es la primera misión en acercarse tanto al Sol (llegará a 0,28 UA) y en observarlo desde fuera de la eclíptica (la inclinación respecto a ella llegará a 33°) con instrumentos de sondeo remoto y de medida local, para España Solar Orbiter constituye la primera misión científica en la que instituciones nacionales lideran dos de sus instrumentos científicos. El instrumento EPD (Energetic Particle Detector) tiene a la Universidad de Alcalá como institución investigadora principal junto a la Universidad de Kiel (Alemania). El instrumento SO/PHI (Polarimetric and Helioseismic Imager on Solar Orbiter) tiene al Max-Planck-Institut für Sonnensystemphysik (Gotinga, Alemania) como institución investigadora principal junto con el Instituto de Astrofísica de Andalucía, del CSIC.

SO/PHI está encargado de cartografiar el vector campo magnético y la velocidad a lo largo de la línea de visión del plasma fotosférico. Como instrumento imaginador utiliza dos telescopios alternativos, de disco completo y de alta resolución. Las medidas magnetográficas y tacográficas se realizan aprovechando los efectos Zeeman y Doppler en la línea espectral de Fe I a 617.3 nm, mediante el muestreo de sus propiedades de polarización con una resolución espectral de 10 pm en cinco longitudes de onda más otra en el continuo adyacente. El análisis polarimétrico se realiza con retardadores ópticos de cristal líquido y el polarimétrico con un etalón Fabry-Pérot sólido de niobato de litio. Tanto los retardadores como el etalón vuelan por primera vez en una misión espacial. La escasez de telemetría debida a la órbita de la nave nos obliga a analizar los datos a bordo. Para ello hemos diseñado un inversor electrónico de la ecuación de transporte radiativo, primer dispositivo de su especie que acelera notablemente el análisis convencional en tierra.



Jose Carlos del Toro Iniesta
Instituto de Astrofísica de Andalucía, IAA-CSIC
jti@iaa.es

Javier Rodríguez-Pacheco
Universidad de Alcalá
javier.pacheco@uah.es

EPD consta de cuatro telescopios de partículas (STEP, EPT, SIS y HET) más la unidad electrónica de control del instrumento (ICU). Su misión será la de observar las propiedades físicas de la población de partículas energéticas (esto es, partículas con energías superiores a la térmica del viento solar) desde unos pocos keV hasta cientos de MeV por nucleón, con una elevada resolución isotópica (pudiendo distinguir 3He de 4He , por ejemplo) y

con una cadencia en la adquisición de datos de hasta 1 segundo. Además, cada uno de estos telescopios dispone de varios sensores apuntando en direcciones distintas, lo que permitirá obtener información direccional de los flujos de partículas incidentes. Estas características hacen de EPD uno de los instrumentos detectores de partículas energéticas más completos jamás desarrollado para ser embarcado en una misión espacial.



Algunos miembros del equipo internacional de EPD con familiares y amigos en las instalaciones del Kennedy Space Centre, el día de lanzamiento.

Algunos miembros del equipo español de SO/PHI con familiares y amigos frente al reloj de cuenta atrás, el día de lanzamiento.



Solar Orbiter en el momento del despegue.



DE “DON QUIJOTE” A LAS MISIONES HERA Y DART:

En su despacho, Andrea (Milani) está discutiendo animadamente con Paolo (Paolicchi) y Giovanni (Valsecchi). “¿Una nave espacial para desviar un asteroide?”, pregunto asombrado, “No, ¡dos!” contesta Andrea con esa sonrisa complacida de cuando te contaba una gran idea: “¡Como Don Quijote y Sancho Panza!”. Es el otoño de 2001 y en el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Pisa se está gestando la idea de la misión espacial “Don Quijote”. Una nave (el *Hidalgo*) impactaría contra un asteroide cercano a la Tierra (*Near-Earth Asteroid*, NEA) mientras otra (*Sancho*) estudiaría los efectos de la colisión. La idea maduró en una propuesta a la Agencia Europea del Espacio (ESA) en 2003 y fue seleccionada, aunque desafortunadamente sufrió sucesivos aplazamientos hasta casi caer en el olvido.



Adriano Campo Bagatin
Universidad de Alicante
acb@ua.es

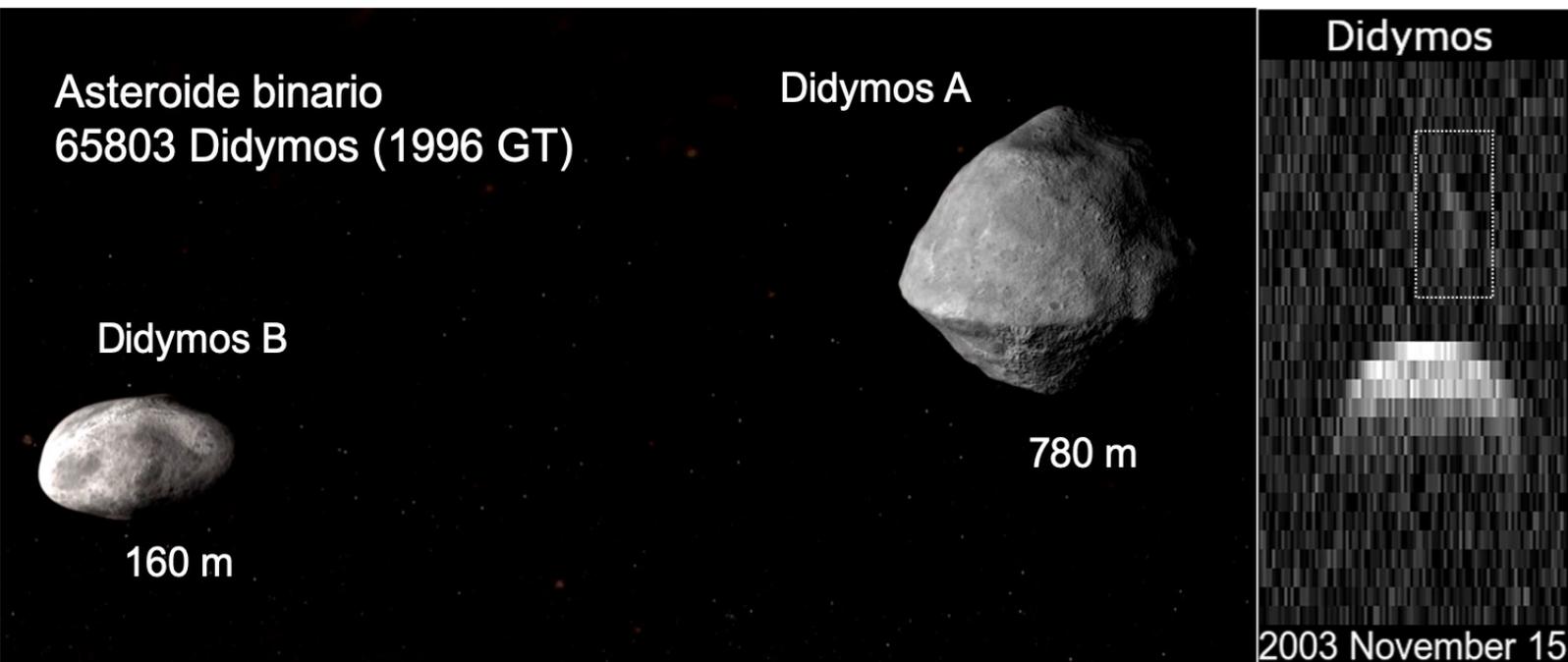


Julia de León Cruz
Instituto de Astrofísica de Canarias
jmlc@iac.es

Unos diez años más tarde, la idea fue recuperada por parte de los ingenieros de ESA que participaron en la primera propuesta, además de investigadores europeos y estadounidenses, que comenzaron a fraguar una colaboración entre NASA y ESA para llevar a cabo el primer experimento de desviación de la órbita de un asteroide: *Asteroid Impact and Deflection Assessment (AIDA)*. En esos diez años había quedado clara la existencia de los asteroides binarios, es decir, asteroides con satélites; éstos, lejos de ser una población exótica, representan más del 15% de los NEAs. La separación típica entre sus componentes es del orden de pocos kilómetros y es posible estimar su masa a partir de la determinación del periodo orbital del secundario utilizando su curva de luz, típicamente de varias horas. El semieje mayor de la órbita del satélite es en promedio unas 100 millones de veces más pequeño que el semieje de la órbita de un NEA en torno al Sol. Modificando la idea original, es más eficiente realizar una colisión en el satélite de un asteroide binario, ya que la medición del cambio inducido en su periodo orbital será mucho más precisa.

Pero, ¿por qué motivo tiene interés estrellar 650 kg de hierro en un asteroide a 6.6 km/s? A principios de los años 80, Luis Álvarez y Eugene Shoemaker descubrieron el cráter de colisión del asteroide de unos 10 km que hace 65 millones de años puso en marcha una de las mayores extinciones masivas de la historia de nuestro planeta. Ya se conocían decenas de cráteres de impacto, pero ese descubrimiento puso de manifiesto que el riesgo de colisión es un problema real. Afortunadamente, diversas campañas de búsqueda y seguimiento de NEAs en las dos últimas décadas, han dejado claro que no hay ningún asteroide de ese tamaño que pueda colisionar con la Tierra en los próximos siglos. Además, tras el incremento en la búsqueda de estos objetos impulsado por el mandato del congreso USA en 1998, se estima que más del 90% de los NEAs mayores de 850 m ha sido descubierto, sin que tampoco represente actualmente un riesgo para la Tierra. Sin embargo, el riesgo de impacto está dominado por los NEAs de pocos centenas de metros, de los que hay decenas de miles, y de los que menos de una tercera parte de la población estimada es conocida. Un asteroide de ese tamaño no provocaría extinciones masivas, pero podría liberar una energía del orden de

MITIGACIÓN DEL RIESGO DE IMPACTO ASTEROIDAL



(Didymos-system) Ilustración artística del asteroide binario 65803 Didymos (también denominado 1996 GT). A la derecha puede verse una imagen Doppler de Didymos obtenida con el radar de Goldstone, en el que Didymos B aparece como una traza por encima de la señal más intensa del primario (Naidu et al. 2020). Créditos: ESA.

1000 Megatones, equivalente a decenas de miles de veces la energía de las bombas atómicas que destruyeron Hiroshima y Nagasaki. Tal impacto provocaría una devastación a escala regional, con consecuencias desconocidas sobre el clima y la economía global. Estos episodios son esporádicos y *poissonianos*, y su probabilidad media de colisión se coloca en torno al 1% por siglo. Se trata de un ejemplo de suceso con una probabilidad relativamente baja pero con un alto riesgo intrínseco. Sin necesidad de preocuparse, es algo para lo que conviene estar preparados.

La próxima puesta en marcha de nuevos rastreos a baja magnitud absoluta, como **LSST**, en el óptico, y **NEOCam**, en el infrarrojo, ambos estadounidenses, responden en parte al nuevo mandato del Congreso de EEUU (2005), en el que se instaba a NASA a alcanzar la completitud del 90% para NEAs mayores de 140 m para 2020. Los retrasos, causados en buena parte por la crisis económica de la década anterior, no han permitido alcanzar

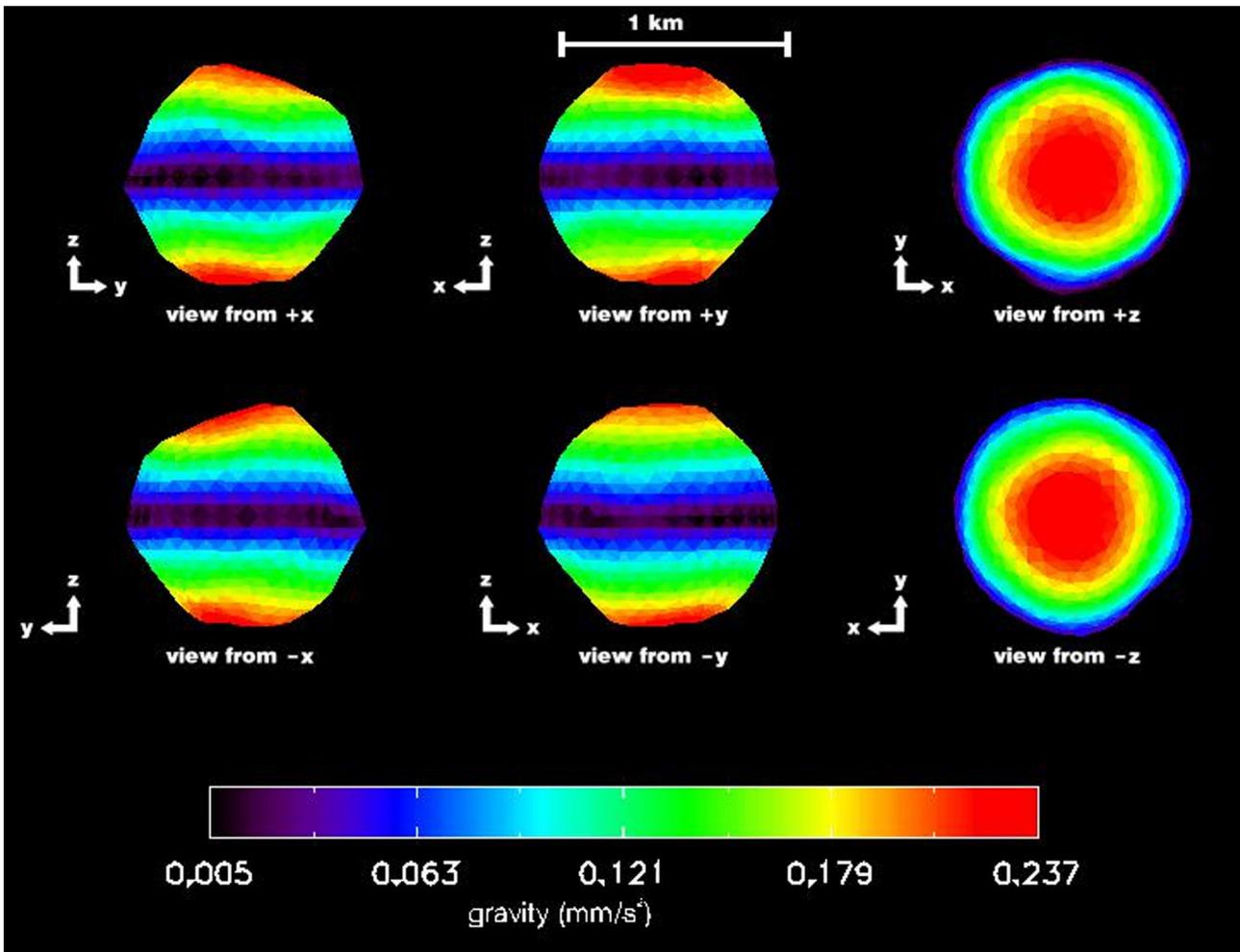
ese objetivo, que ahora se pospone a 2030. Esto significa que en la próxima década sabremos probablemente si hay algún NEA en ruta de colisión con la Tierra en este siglo, y cuál es.

A diferencia de otras catástrofes naturales, como los terremotos, las erupciones volcánicas o las pandemias, los rastreos observacionales hacen posible predecir las colisiones asteroidales con décadas de antelación. Entre los varios métodos planteados –más o menos realistas– de mitigación del riesgo, está la simple desviación del asteroide por medio de un impacto cinético, sin tan siquiera recurrir a explosivos. Cambiar la dirección de la velocidad de un NEA en apenas unas micras por segundo, con la necesaria antelación, puede ser suficiente para evitar una colisión sobre la Tierra. Actualmente, esta técnica parece ser la única viable, tanto desde un punto de vista tecnológico como en términos geo-políticos; pero nunca nadie ha realizado un experimento de colisión sobre un asteroide.

Lejos de ser un simple ejercicio académico, este no es un problema que se pueda resolver teóricamente. Un asteroide de pocas centenas de metros tiene una gravedad ridícula, del orden de una millonésima de la gravedad terrestre. Cuando un cuerpo de estas características sufre una colisión a varios km/s, los fragmentos que crea son expulsados al espacio con velocidad muy superior a su velocidad de escape (pocas decenas de cm/s). Parte de esa masa, con su alta velocidad, sale en sentido opuesto a la velocidad del proyectil, aumentando la cantidad de

movimiento impartida al asteroide en un factor totalmente desconocido: el 'factor de multiplicación' del momentum. Ese aumento puede llegar a ser varias veces el valor de la cantidad de movimiento original y depende de las características físicas del asteroide, de su composición y estructura, y hasta de la textura superficial del mismo, normalmente desconocidas. Conocer la efectividad de una colisión cinética sobre un asteroide es crucial para poder plantear cualquier estrategia futura de mitigación del riesgo basada en la desviación de su órbita.

(Gravity-Didymos) Magnitud de la gravedad local considerando la aceleración debida a la gravedad y el efecto de la rápida rotación del primario de Didymos y los valores nominales de sus parámetros físicos. La contribución de la aceleración centrífuga es realmente importante, y en el ecuador del asteroide prácticamente cancela la debida a la gravedad (Naidu et al. 2020).



El 28 de noviembre de 2019 se cumplía un año del fallecimiento de Andrea Milani, el 'padre conceptual' de AIDA, y en una de esas coincidencias de fechas tan oportunas, ese mismo día se aprobaba el plan de ESA 'Space19+', un amplio paquete de proyectos dirigidos a impulsar las actividades espaciales europeas, entre ellas la misión espacial [Hera](#). De este modo, la colaboración AIDA entre las misiones espaciales [DART](#) (*Double Asteroid Re-direction Test*, NASA) y [Hera](#) (ESA) es ahora una realidad.

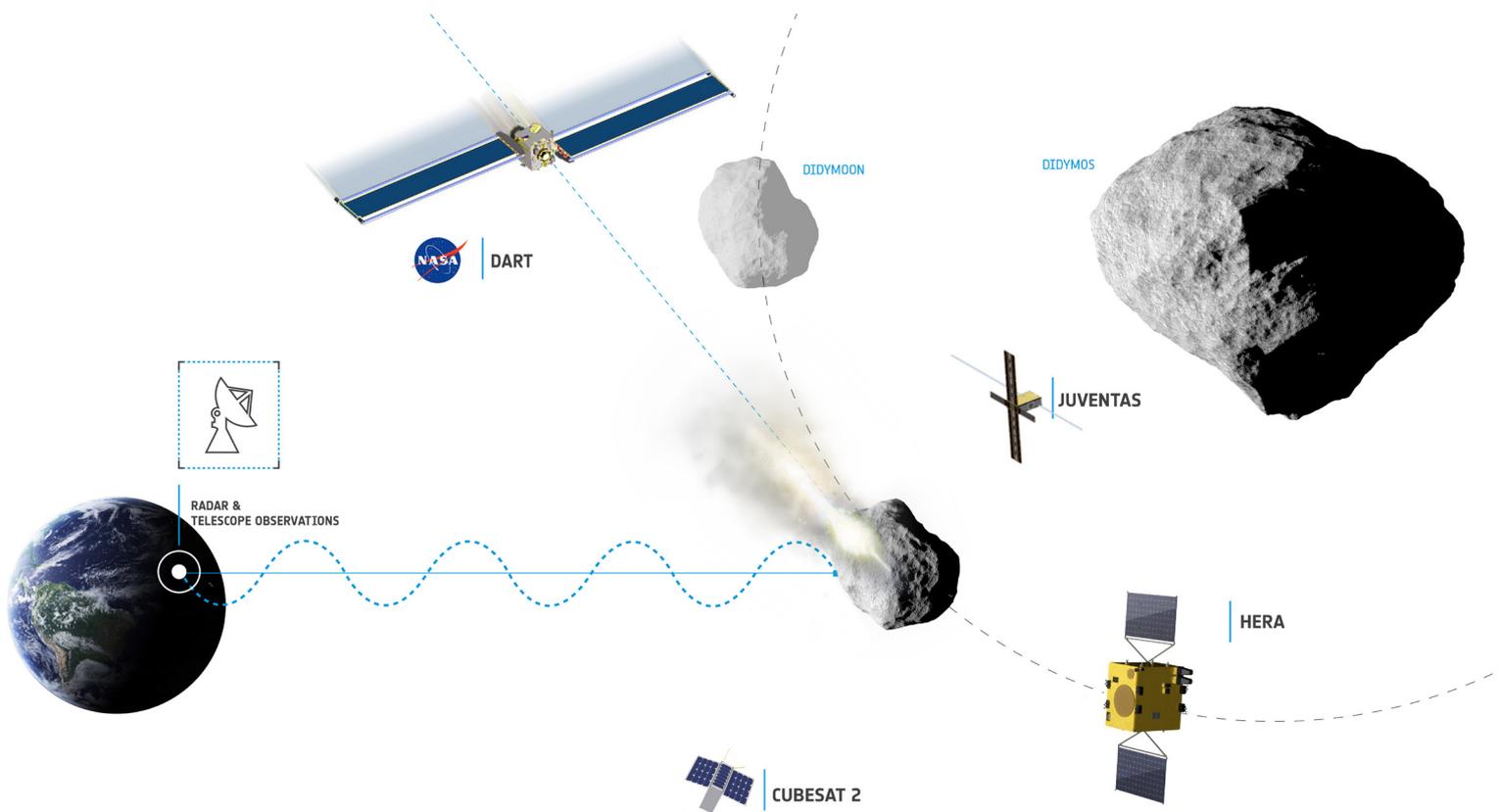
En julio de 2021, está previsto el lanzamiento de DART, una sonda de 650 kg cuya misión es colisionar a 6,6 km/s con el satélite del sistema binario (65803) Didymos en otoño de 2022. Didymos es un NEA de tipo rocoso, de 780 m de diámetro, con la típica forma de peonza característica de muchos de estos pequeños asteroides. Didymos rota en torno a su propio eje en apenas 2,26 horas, en el límite de la estabilidad para estos cuerpos, tanto que la gravedad aparente en su ecuador puede llegar a ser negativa (hacia fuera). Su compañero (Didymos B) orbita en torno a él a una distancia de 1,2 km empleando casi 12 horas en completar cada revolución. Sus 160 m de diámetro hacen de este cuerpo el blanco ideal de un experimento de desviación cinética. El objetivo es conseguir un cambio de varios minutos en su periodo orbital, medible desde Tierra. Al margen de las imágenes que DART pueda tomar en su acercamiento al objetivo final, no podrá ser testigo de nada de lo que ocurra a partir del instante de la colisión. Conseguir imágenes de la pluma de fragmentos eyectados en la colisión es, sin embargo, una información muy valiosa. El *cubeSat* LICIA (Agencia Espacial Italiana, ASI), se desvinculará de DART 10 días antes de la colisión para poder tomar fugaces imágenes de los instantes posteriores (pocos minutos).

Todo esto quedaría en un esfuerzo limitado sin la componente europea, [Hera](#). Más allá de la mera estimación del factor de multiplicación del momento, es necesario saber a qué factores estructurales es sensible ese factor. [Hera](#) deberá dar respuesta a una serie de preguntas de fundamental interés para dar validez y poner en contexto este experimento único. Además, contribuirá significativamente en nuestra comprensión de las características y la formación de los asteroides, los remanentes de los procesos de formación del sistema solar. ¿Qué

tamaño y tipo de cráter se ha formado? ¿Cómo han cambiado los parámetros de rotación y orbitales de Didymos B? ¿Ha quedado material eyectado orbitando al sistema? ¿Qué composición y estructura interna tienen los dos componentes de Didymos? ¿Cómo se forman estos sistemas binarios?

El lanzamiento de [Hera](#) está previsto para el mes de octubre de 2024 y su llegada a Didymos dos años después. Las dos misiones no son sincronas, como estaba previsto inicialmente, debido al retraso en la aprobación de [Hera](#), que no fue financiada en la reunión ministerial de 2016. Por una parte, la inclusión de LICIA en DART garantiza la cobertura de la fase transitoria en torno a la colisión. Por otra parte, el hecho de postergar 4 años la llegada de [Hera](#) tiene la ventaja de observar el sistema con la garantía de que éste ya se encuentre en una fase estacionaria (su "nueva normalidad") pudiendo así interpretar adecuadamente todos los efectos físicos y dinámicos a larga escala temporal (varias miles de revoluciones propias del sistema) inducidos por la colisión de DART.

Para llevar a cabo estas investigaciones, la nave estará equipada con un conjunto de instrumentos diseñados específicamente para tal propósito. La sonda, propulsada mediante la energía generada por sus paneles solares y un sistema de propulsión por hidrazina, es bastante ligera (pesará unos 660 kg, 1100 kg una vez llena de combustible) si se compara con las casi 3 toneladas de la sonda [Rosetta](#), también de ESA, enviada para estudiar el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. El instrumento principal a bordo de [Hera](#) es la *Asteroid Framing Camera* (AFC), del que la nave llevará dos unidades, y que se usará tanto para tareas de guiado y navegación como para realizar observaciones científicas. Consta de un detector de 1024x1024 píxeles, un telescopio que proporciona un campo de visión de 5°.5x5°.5 y un conjunto de 7 filtros de color más uno pancromático que cubren un rango en longitud de onda desde 400 nm hasta 1 µm. Este instrumento es gemelo del que se usó en la misión [Dawn](#) de NASA para estudiar el asteroide Vesta y el planeta enano Ceres, proporcionando imágenes de alta resolución y colores que permitieron estudiar la composición superficial de estos objetos.



(AIDA-layout) Esquema de la colaboración AIDA, integrada por dos naves independientes: DART (NASA) y Hera (ESA). Créditos: ESA – Science Office.

Hera estará también equipada con un haz de láser pulsado o lidar compacto – también llamado micro-lidar. Este láser, que opera a una longitud de onda de $1.5 \mu\text{m}$ y una frecuencia de 10 Hz, cubrirá un área de 1 m de diámetro a una distancia de la superficie de 1 km, y es la base del instrumento *Planetary micro-Altimeter* (PALT). PALT realizará medidas altimétricas de la superficie de Didymos B y dará soporte al cartografiado científico y a las operaciones en las cercanías del asteroide.

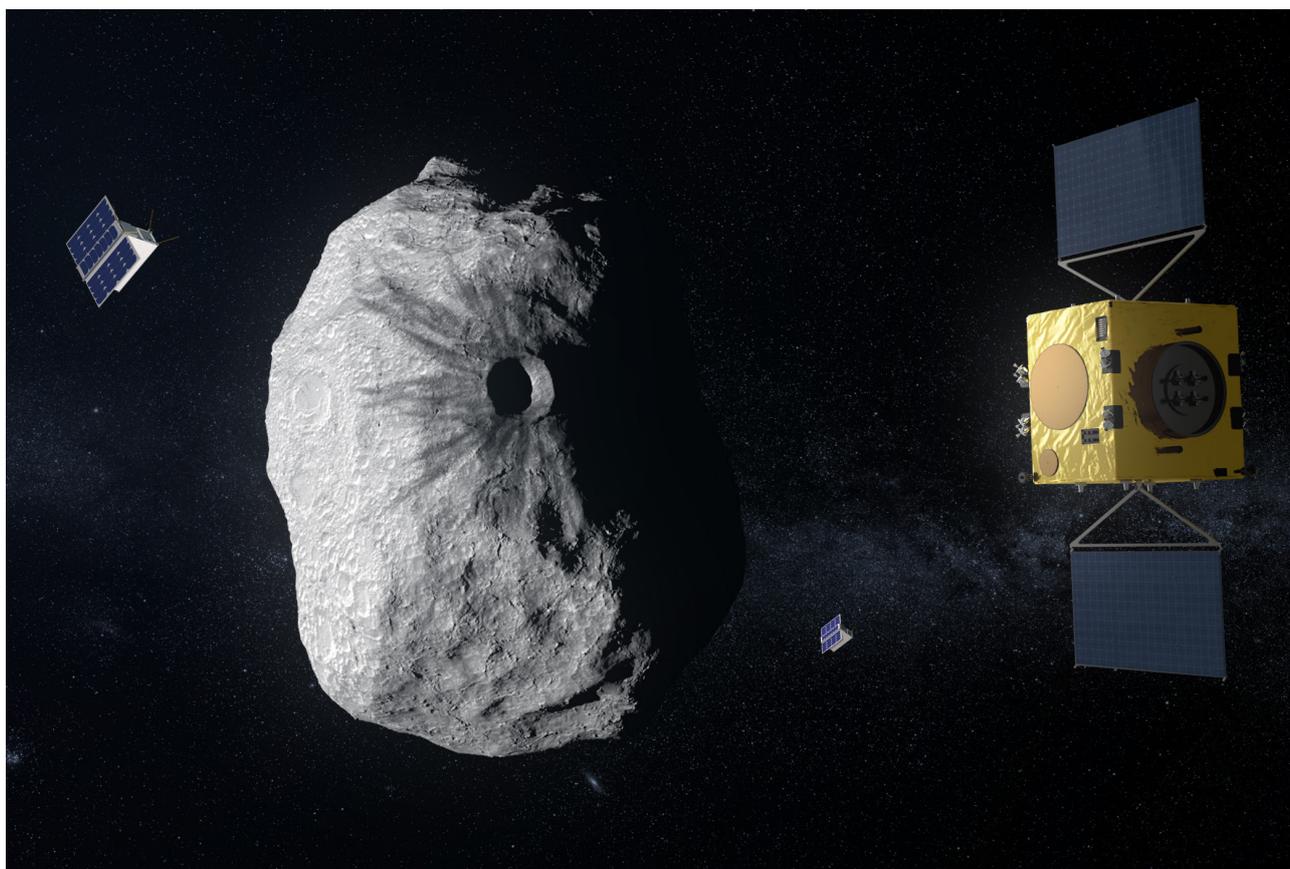
Además de las cámaras en el rango óptico, la nave contará con un instrumento en el rango infrarrojo, el *Thermal InfraRed Instrument* (TIRI), y al igual que en el caso de la AFC, la sonda portará dos unidades. Se trata de una versión mejorada del instrumento TIR que se encuentra a bordo de la

nave *Hayabusa2* y que ha sido desarrollado por la Agencia Espacial Japonesa (JAXA). Con su detector de 1024×768 píxeles y una resolución de 0.23 mrad/píxel , proporcionará información espectral en el rango de las 8 a las $14 \mu\text{m}$ mediante un conjunto de 6 filtros. El instrumento TIRI realizará mapas de temperatura de la superficie de Didymos B, que serán usados para delimitar propiedades como la distribución del tamaño de las partículas o la porosidad de su superficie.

LICIA no será el único *cubesat* que se utilice para observar a Didymos; Hera transportará dos *cubesats* que servirán para probar las comunicaciones entre los satélites y Hera (*Inter-satellite link*, ISL) por primera vez en Europa, así como para complementar los datos que proporcione la instrumentación

a bordo de la nave. Los satélites incluirán instrumentos tales como un espectrómetro de masa para determinar la presencia y abundancia de distintos elementos químicos en la superficie de Didymos B, un gravímetro para medir su gravedad, o una antena de baja frecuencia (*Low Frequency Radar*, LFR) para estudiar su interior. Estas últimas mediciones darán soporte a las medidas que se realicen con las dos antenas de radar ubicadas en la nave principal. Este experimento de ciencia en longitudes de onda de radio empleará las comunicaciones entre Hera y la Tierra para medir la masas de los dos componentes del sistema binario, así como las posibles variaciones en la masa interna del secundario, Didymos B.

En conclusión: la colaboración AIDA, entre las misiones DART y Hera, marcará sin duda un antes y un después en la exploración espacial. Por primera vez se realizará un experimento de desviación de un asteroide, se conocerá al más pequeño jamás visitado y al primer sistema binario explorado, utilizando tecnología nunca empleada en este contexto. Se verificarán décadas de estudios sobre colisiones y se comprobarán las predicciones sobre la estructura interna de estos pequeños cuerpos, fundamentales para comprender la formación y evolución del Sistema Solar. Y se hará uniendo teoría, observación y tecnología, porque como bien decía el Hidalgo Don Quijote: “En los casos arduos y dificultosos, en un mismo punto han de andar el consejo y la obra”.



(Hera-at-Didymos). La misión Hera, aprobada en noviembre de 2019, será la primera misión en visitar un asteroide binario, Didymos. Su objetivo será estudiar el objeto secundario (Didymos B) tras el impacto que llevará a cabo a la misión DART de NASA. Créditos: ESA – Science Office.

La vida en la Tierra no sería posible sin la existencia del Sol, nuestra estrella más cercana. A medida que la tecnología avanza, la proximidad del Sol permite a los astrofísicos descubrir nuevos rasgos en esta estrella que no es posible observar en ninguna otra. Las observaciones más recientes muestran un Sol muy activo, no sólo con manchas y filamentos, sino también con eyecciones de masa que se alejan de la estrella a más de 1000 km s^{-1} . Lejos de la belleza de las imágenes que proporciona el Sol durante periodos de actividad, vivir bajo la influencia de una estrella activa tienen sus consecuencias para la vida diaria, ya que supone un potencial peligro para los sistemas tecnológicos.



Consuelo Cid
Universidad de Alcalá
consuelo.cid@uah.es

La actividad solar origina numerosos cambios en el espacio cuyo estudio es el objeto de una ciencia multidisciplinar denominada Meteorología Espacial que abarca desde la Heliofísica (incluyendo la Física Solar e Interplanetaria) a la Geofísica y la Aeronomía. Además de multidisciplinar, la Meteorología Espacial puede entenderse como una ciencia básica, cuyo objetivo consiste en entender la interacción entre el Sol y la Tierra, pero sin duda es una ciencia aplicada, dedicada a la predicción del denominado “tiempo espacial” con objeto de anticiparse a las alteraciones que la actividad solar produce en los sistemas tecnológicos y mitigarlas en lo posible.

UN POCO DE HISTORIA

El primer suceso de “tiempo espacial” data de 1859, cuando el astrónomo Richard Carrington notó la “ocurrencia contemporánea” entre una fulguración solar en luz blanca y la perturbación magnética observada en el observatorio de Kew (Inglaterra). Los dos días siguientes a la fulguración numerosos magnetómetros de todo el mundo quedaron fuera de rango y únicamente se conserva el registro del magnetómetro de Colaba (India) en el que se observa una perturbación de más de 1500 nT en aproximadamente una hora. Durante este periodo se registraron numerosas alteraciones en el telégrafo, la única tecnología de la época.

Con el avance de la tecnología la influencia de la actividad solar fue apareciendo en más sectores. Así, el 24 de marzo de 1940 el Sol alteró por primera vez las comunicaciones radio. Quizá el hecho de que esta alteración tuviera lugar un domingo, y por lo tanto no afectara a la actividad económica, fue la causa de que no se le diera la importancia que merecía. En mayo de 1967 una colosal emisión radio en el Sol causó interferencias entre los 0.01 y los 9.0 GHz produciendo de forma simultánea un corte en las comunicaciones radio en toda la zona iluminada del planeta Tierra. Esa fecha marca sin duda un cambio respecto a la forma de contemplar el Sol por parte del sector de las telecomunicaciones, que se extiende actualmente al posicionamiento tras el primer fallo global en el sistema GPS en diciembre de 2006.

En marzo de 1989 el sector eléctrico notaba por primera vez los efectos de la actividad solar. El fallo irreparable de un transformador de la compañía eléctrica

O LA CIENCIA DE LA INTERACCIÓN SOL-TIERRA

Hydro-Québec (Canada) dejó sin luz a miles de usuarios durante nueve horas. El fallo fue provocado por corrientes inducidas geomagnéticamente como resultado de las rápidas e intensas variaciones de campo magnético asociadas a la llegada de una eyección de masa coronal al entorno terrestre. Además del fallo eléctrico, más de mil satélites perdieron su órbita durante este suceso de meteorología espacial.

En octubre-noviembre de 2003, durante las conocidas como “tormentas de Halloween”, el fallo de varios transformadores en Sudáfrica puso en evidencia que los problemas de la actividad solar no sólo afectan a las regiones de altas latitudes. De hecho, ya en 1903 hay constancia de fallos en el telégrafo relacionados con la actividad solar afectando a España y Portugal (Ribeiro et al., 2016).

ENTRE LA CIENCIA BÁSICA Y LA APLICACIÓN

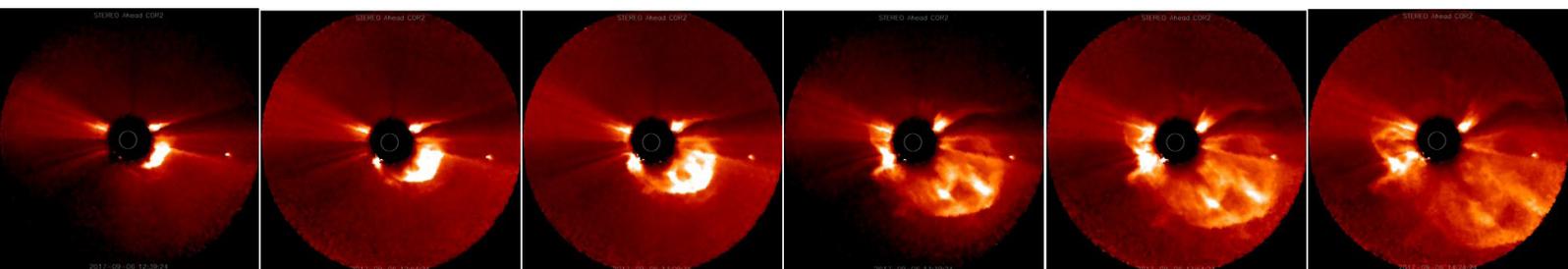
Los efectos sobre la tecnología mencionados anteriormente representan el final de una cadena que comienza en el Sol. Conocer los eslabones intermedios de la cadena durante sucesos previos no resulta sencillo, pero sí imprescindible para comprender los diferentes procesos involucrados en la interacción Sol-Tierra y, de esta forma, predecir con precisión y con la mayor antelación posible el tiempo espacial.

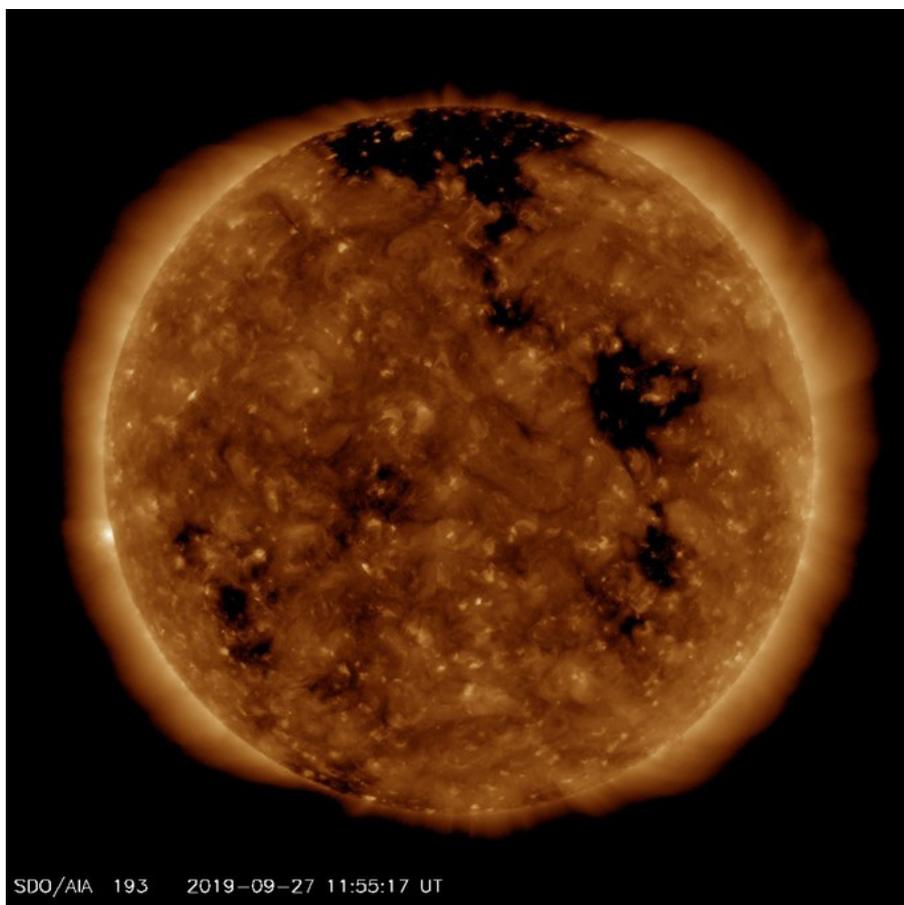
Así, la Meteorología Espacial puede plantearse como un procedimiento en el cual existe un único *input*, la actividad solar, con dos *outputs*, uno científico y otro tecnológico. Mientras el científico que estudia la interacción Sol-Tierra busca como *output* el estado del entorno terrestre, incluyendo la modificación de las

corrientes magnetosféricas, el estado de perturbación magnética (especialmente en el suelo) y diferentes parámetros que caracterizan las alteraciones de la ionosfera; el usuario final está interesado en indicadores que revelen cómo se va a ver afectada su tecnología concreta y la probabilidad de que esto suceda. La relación de estos indicadores (*outputs* tecnológicos) y las magnitudes físicas que caracterizan el entorno terrestre (*outputs* científicos) avanza lentamente y precisa de la colaboración entre científicos y usuarios finales en materia de meteorología espacial.

Respecto al único *input* del proceso, la actividad solar, encontramos tres posibles contribuciones: (1) el aumento repentino de la radiación electromagnética emitida por el Sol (o fulguración), (2) el incremento del flujo de partículas de energías relativistas (o suceso de partículas) y (3) la alteración del denominado viento solar normal, bien por una eyección de masa coronal (CME) o bien por una corriente rápida procedente de un agujero coronal. Durante los sucesos más importantes de meteorología espacial dos o tres de las contribuciones anteriores están asociadas, pero en ocasiones también suceden de forma independiente. Así, por ejemplo, una de las perturbaciones geomagnéticas mayores del ciclo solar 24, ocurrida en marzo de 2015, no estuvo relacionada con ninguna fulguración importante ni suceso de partículas, sino únicamente con una CME (Kamide and Kusano, 2015). Otro ejemplo puede encontrarse la región activa NOAA12192, que produjo una serie de fulguraciones tipo X (las de mayor intensidad) durante octubre de 2014, pero ninguna de ellas estuvo asociada a una CME.

Secuencia de imágenes del día 6 de septiembre de 2017 donde se observa una CME alejándose del Sol mientras éste se encuentra tapado por el disco de ocultación del coronógrafo COR2 a bordo de *Stereo A* (el radio de la circunferencia blanca corresponde a 1 radio solar).





El disco solar en 193 Å, observado por [AIA/SDO](#), muestra un extenso agujero coronal cercano al ecuador solar, además del agujero coronal polar claramente visible en el polo norte.

FULGURACIONES Y CMES

Cuando se produce una fulguración, el aumento de radiación solar alcanza el entorno terrestre en unos minutos, aumentando la ionización en las capas altas de la atmósfera terrestre, que modifican su altura y su absorción. La ionosfera terrestre se ve perturbada durante unos minutos (el tiempo que dura la fulguración), fundamentalmente en el lado de día, afectando a las diferentes capas en función del espectro de la radiación incidente. Así, la radiación ultravioleta y los rayos X blandos afectan a las capas más altas de la ionosfera, y por lo tanto a los sistemas de navegación por satélite (GNSS), mientras que las capas más profundas de la ionosfera sólo se ven afectadas por los rayos X duros, que alteran de esta forma la comunicación en radio.

Aunque hay diferentes modelos para predecir fulguraciones, actualmente la meteorología espacial sólo

proporciona con fiabilidad la monitorización de estos fenómenos. Para la clasificación de una fulguración se utiliza el valor del pico alcanzado por el flujo en rayos X medido en el canal 1-8 Å por los satélites GOES, considerándose relevantes aquellas fulguraciones con flujo superior a $5 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$ (o M5), pero es importante tener en cuenta que la emisión electromagnética en las distintas longitudes de onda no siempre está relacionada con la del canal 1-8 Å, por lo que se hace necesario encontrar un buen indicador que proporcione información sobre cuándo una fulguración alterará las comunicaciones o los sistemas de posicionamiento.

Las CMES son sin duda el fenómeno más peligroso del tiempo espacial desde el punto de vista de la tecnología. La perturbación del entorno terrestre debido a la llegada de una CME puede durar varios

días. No obstante, desde la observación solar del fenómeno en un coronógrafo se dispone de entre uno y tres días para determinar si la CME alcanzará el entorno terrestre y, si lo hace, cuáles serán las consecuencias. Los sucesos más peligrosos están relacionados con intensos campos magnéticos interplanetarios (>20 nT) en dirección antiparalela al dipolo terrestre y gran velocidad (> 1000 km s⁻¹) y densidad (>20 partículas cm⁻³) del viento solar. Obtener información sobre la velocidad de la CME y su campo magnético es, por lo tanto, lo más relevante de cara a la predicción.

Las imágenes obtenidas con los coronógrafos, unidas al análisis de la emisión radio emitida por el Sol, permiten realizar una primera estimación de la velocidad, pero la intensidad y dirección del campo magnético son aún parámetros difíciles de determinar a partir de la observación solar; más aún, considerando que los campos magnéticos intensos surgen en el medio interplanetario como resultado de la interacción de varias CMEs, o incluso entre una CME y la corriente procedente de un agujero coronal. En este escenario, las predicciones certeras requieren de modelos aún en desarrollo, o la combinación entre resultados de diferentes modelos y la experiencia del científico experto en la evolución de sucesos a lo largo de la cadena Sol-Tierra. En este tipo de sucesos la información sobre el medio interplanetario se convierte en un *input* adicional necesario, tanto para el análisis científico, como para aumentar la fiabilidad de las predicciones.

A la llegada al entorno terrestre del material procedente de una CME, el primer efecto es una compresión de la magnetosfera, cuya intensidad depende de la velocidad del viento solar. A continuación, las distintas corrientes magnetosféricas se ven modificadas en función de la intensidad y dirección del campo magnético y de otros parámetros del viento solar tales como su velocidad y densidad. Como consecuencia el campo magnético del entorno terrestre varía, registrándose variaciones de hasta varios cientos de nT en pocas horas (o incluso en pocos minutos) a nivel del suelo. Estas variaciones de campo magnético inducen a su vez corrientes en la ionosfera, que perturban las comunicaciones durante varios días, y en la corteza terrestre, con consecuencias en aquellas instalaciones en las que

se disponga de materiales conductores de gran longitud tales como las redes eléctricas y gasoductos. En estas instalaciones, las tomas a tierra se convierten en fuentes de alimentación de corriente continua inducida geomagnéticamente, que altera su normal funcionamiento.

EL USUARIO FINAL COMO OBJETIVO

La comunidad científica es cada vez más consciente de la importancia de considerar las perturbaciones geomagnéticas a nivel local, dado que los índices planetarios o específicos para latitudes concretas (muy utilizados en estudios de investigación científica) pierden información clave para los usuarios finales. Así, España es el primer país en disponer de un índice local para determinar, no sólo la perturbación magnética, sino también la probabilidad de que se establezcan corrientes inducidas, facilitando a los usuarios que pueden verse afectados por tiempo espacial adverso información clave para la gestión del riesgo (Cid et al., 2020).

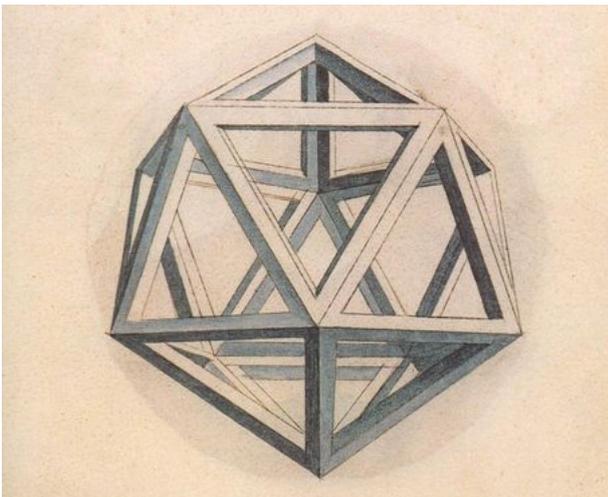
En este escenario, el **Servicio Nacional de Meteorología Espacial (SeNMEs)** puede considerarse como un servicio con dos finalidades. Por una parte, informando del tiempo espacial a los usuarios con los productos desarrollados por diferentes instituciones españolas, y por otra como una herramienta de divulgación científica sobre la actividad solar y su influencia en nuestra vida diaria, así como sobre la relativamente nueva disciplina científica denominada Meteorología Espacial.

REFERENCIAS

- Cid, C., Guerrero, A., Saiz, E., Halford, A. J., & Kellerman, A. C. (2020). Developing the LDi and LCi geomagnetic indices, an example of application of the AULs framework. *Space Weather*, 18, e2019SW002171. doi: [10.1029/2019SW002171](https://doi.org/10.1029/2019SW002171).
- Kamide, Y., and Kusano, K. (2015), No Major Solar Flares but the Largest Geomagnetic Storm in the Present Solar Cycle, *Space Weather*, 13, 365– 367. doi:[10.1002/2015SW001213](https://doi.org/10.1002/2015SW001213).
- Ribeiro, P., Vaquero, J. M., Gallego, M. C., and Trigo, R. M. (2016), The First Documented Space Weather Event That Perturbed the Communication Networks in Iberia, *Space Weather*, 14, 464– 468, doi:[10.1002/2016SW001424](https://doi.org/10.1002/2016SW001424).

LAS MEGA-CONSTELACIONES DE SATÉLITES COMO

Hay en curso varios proyectos para construir mega-constelaciones de satélites para telecomunicaciones que podrían llenar la órbita terrestre baja con decenas de miles de objetos artificiales. En meses recientes ha crecido la preocupación por el posible impacto de estos proyectos en la observación del cielo, tanto con luz visible como en radio. La Sociedad Española de Astronomía ha constituido un grupo de trabajo para evaluar este asunto y ya es posible avanzar algunos resultados relevantes.



Grupo de trabajo SEA - ICOSAEDRO
(Impacto de las Constelaciones de Satélites
en Detectores de Radio y Ópticos)
Sociedad Española de Astronomía
dgaladi@caha.es

Los satélites artificiales forman parte del cielo nocturno desde los inicios de la era espacial en 1957 y cada noche es posible observar a simple vista una buena cantidad de ellos, tras la puesta de Sol o antes de su salida, en los intervalos en que el cielo está oscuro pero a la vez incide luz solar directa sobre los objetos en órbita. Esta observación de satélites artificiales a simple vista revela objetos en órbita terrestre baja (LEO, del inglés *low Earth orbit*) y es posible identificarlos gracias a servicios en la red como Heavens-Above (www.heavens-above.com). Además, cualquier telescopio modesto revela objetos más débiles hasta el punto de permitir observar satélites geoestacionarios.

No cabe duda de que los trazos lineales que estos satélites dejan sobre las imágenes de larga exposición perjudican las observaciones profesionales de campo amplio. En ambientes no profesionales, hasta ahora muchas personas disfrutaban con el seguimiento de satélites artificiales, la Estación Espacial Internacional o los impactantes destellos causados por las versiones antiguas de los satélites Iridium.

La Oficina de Basura Espacial de la Agencia Espacial Europea estima que en este momento hay alrededor de 22 000 objetos artificiales de tamaño considerable (decenas de centímetros, o mayores) en órbita alrededor de la Tierra, pero que solo unos 2300 de ellos corresponden a aparatos en funcionamiento. El resto constituye la población que suele denominarse basura espacial, un enjambre muy diverso que incluye desde satélites abandonados hasta etapas superiores de cohetes, fragmentos procedentes de choques o explosiones, o incluso herramientas perdidas por astronautas.

El número de fragmentos de basura espacial crece de manera exponencial cuando se consideran tamaños menores, piezas difíciles de seguir pero que aún podrían infligir daños considerables a satélites operativos o naves tripuladas, en caso de colisión. Diversas instituciones están preocupadas por la proliferación incontrolada de la basura espacial, pero la situación actual podría empeorar drásticamente si ciertas empresas cumplen sus planes de llenar la órbita terrestre baja con unas cantidades abrumadoras de satélites de telecomunicaciones. En caso de que culminaran estos proyectos, el número actual

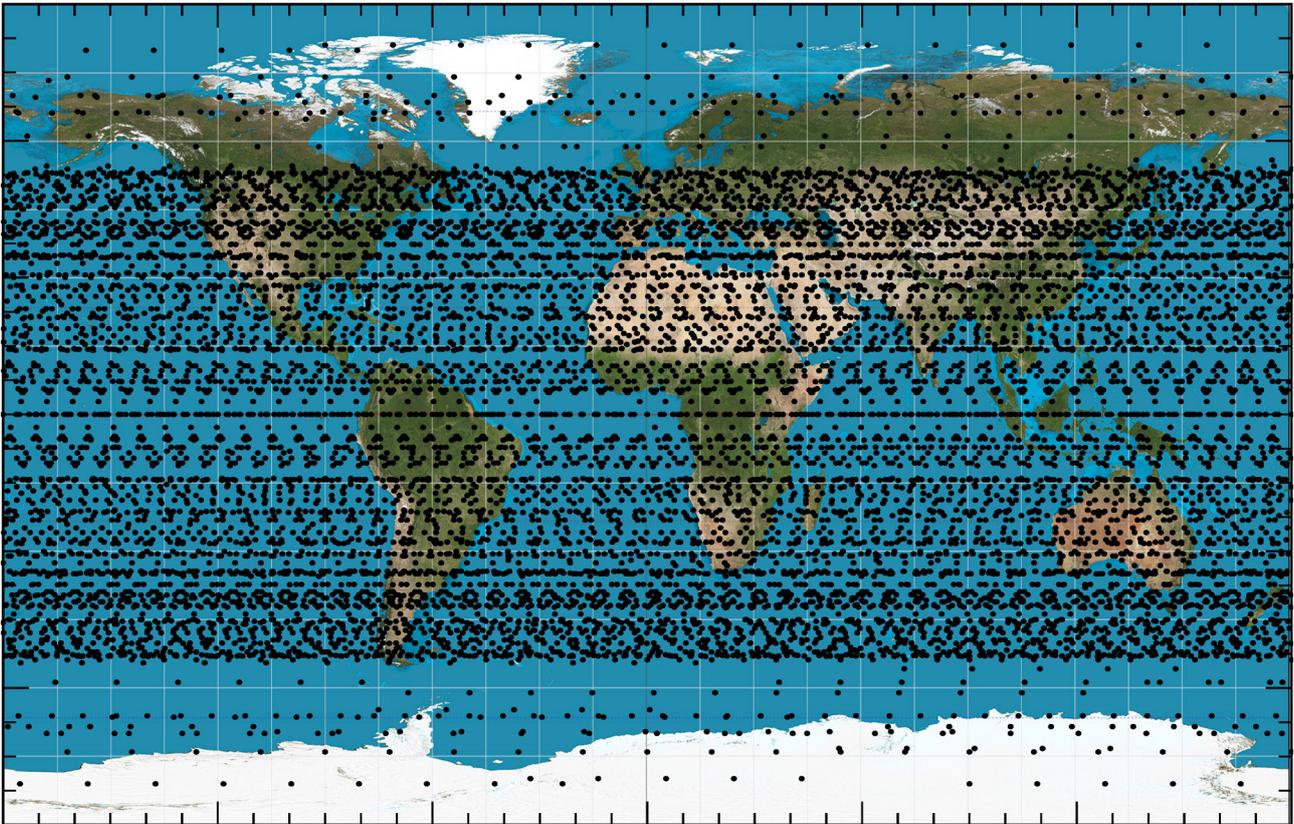


Figura 1. La constelación Starlink reflejada en la tabla 1. Casi 12 000 satélites cubren la Tierra en ocho capas con distintas altitudes e inclinaciones. Cada punto representa un satélite.

de objetos artificiales colocados en órbita de manera intencionada se vería más que duplicado. Estos proyectos conllevan consecuencias considerables y merecen una valoración detenida y detallada.

CONSTELACIONES DE WALKER

Una constelación de satélites es un grupo de ingenios espaciales con el mismo diseño y distribuidos entre una serie de órbitas con el fin de cubrir el planeta de la manera más completa posible. Entre sus aplicaciones se encuentra la observación del territorio, los servicios de posicionamiento global o los servicios de comunicaciones uni o bi-direccionales. Ya existen varias constelaciones, las más conocidas de las cuales son las de los sistemas de posicionamiento global GPS, Glonass y Galileo. Pero todas ellas incluyen un número pequeño de satélites, siempre por debajo del centenar.

Ahora hay varias empresas que han anunciado su intención de construir constelaciones de satélites cuyo tamaño supera el de las existentes en varios órdenes de magnitud, para proporcionar servicios de telecomunicaciones bidireccionales orientados al acceso a Internet con cobertura global. La información disponible sobre estos proyectos es incompleta, quizá porque las empresas prefieren no revelar sus intenciones a la competencia, pero también porque los detalles pueden irse decidiendo sobre la marcha, en función de las perspectivas de éxito comercial.

Entre la decena larga de proyectos de constelaciones relacionados con Internet encontramos los de Boeing y OneWeb, así como una iniciativa similar de la Corporación China de Ciencia y Tecnología Aeroespacial. Sin embargo, todo indica que el proyecto más adelantado es Starlink, impulsado por la

empresa SpaceX de Elon Musk, que planea lanzar al menos 12 000 satélites. La construcción de esta red ya se ha iniciado con varios centenares de satélites en órbita y con fechas fijadas para muchos otros lanzamientos. Las empresas afirman que estos satélites se retirarán de la órbita por sí solos al final de sus vidas operativas, pero es seguro que ocurrirán fallos que restringirán el alcance de esta promesa y, de hecho, varios satélites Starlink están ya fuera de control, lo que dispara las alarmas sobre seguridad espacial y sobre el crecimiento de la población de basura espacial.

El diseño habitual de estos enjambres de satélites se denomina «constelación de Walker». Una constelación de Walker se caracteriza por un cierto número de capas, cada una de las cuales contiene un número N de satélites que se sitúan en órbitas de la misma altitud sobre la superficie terrestre (por tanto, el mismo periodo) y la misma inclinación orbital, pero repartidos de modo que la cobertura del territorio sea la mejor posible. Esto conduce a que una capa con N satélites conste de \sqrt{N} órbitas de la misma inclinación, equiespaciadas (la longitud del nodo ascendente crece en $360/\sqrt{N}$ grados entre una órbita y la siguiente), y a que cada órbita albergue a su vez \sqrt{N} satélites que presentan entre sí separaciones iguales de fase orbital (de nuevo, entre un satélite y el siguiente median $360/\sqrt{N}$ grados).

Un satélite de telecomunicaciones en LEO solo puede prestar servicio a las regiones que sobrevuela, lo que deja sin cobertura las zonas con latitud cuyo valor absoluto es superior a la inclinación orbital. Las mega-constelaciones se diseñan teniendo en cuenta la distribución de la población mundial e incluyen varias capas con inclinaciones variadas, aparte de algunos satélites en órbitas muy inclinadas, incluso polares, que proporcionan una cobertura suficiente a las latitudes extremas.

RADIOASTRONOMÍA

Las voces de alarma se han centrado hasta ahora, sobre todo, en el impacto de estos proyectos sobre la observación del cielo en luz visible. Pero hay que tener en cuenta que se trata de satélites de telecomunicaciones que, como es natural, emiten y reciben en frecuencias a las cuales es transparente la atmósfera de la Tierra. Hay que subrayar que las emisiones de

estos sistemas estarán presentes día y noche, y que su intensidad podría no solo dificultar las observaciones radioastronómicas en las bandas afectadas, sino incluso dañar unos detectores diseñados para recibir la radiación procedente de fuentes naturales extremadamente débiles. Aunque en teoría hay bandas reservadas para radioastronomía, estos proyectos causan una preocupación considerable en la comunidad radioastronómica y varios grupos de trabajo están valorando su posible impacto sobre las infraestructuras de observación ya existentes y sobre las que se encuentran en fase de desarrollo, como el Square Kilometer Array (SKA).

En 2018 se realizó un estudio detallado que involucró a SpaceX, OneWeb y al Comité de expertos en Frecuencias para Radioastronomía (CRAF, del cual España es miembro). El informe ECC 271 considera la protección de la banda primaria de radioastronomía 10.6-10.7 GHz de los radioenlaces de bajada de la megaconstelación de satélites en la banda 10.7-12.75 GHz. También incluye protección para la línea espectral de radioastronomía en la banda 14.47 - 14.5 GHz de los enlaces de subida de los satélites que usan la banda 14.0 - 14.5 GHz. La protección de la radioastronomía en el informe de ECC 271 se mencionó más tarde en una decisión del Electronic Communications Committee (ECC), que puede considerarse un acuerdo legal vinculante en Europa. A medida que aumenta el número de satélites lanzados, se alienta a los observatorios de radio a monitorear la banda afectada e informar cualquier radiointerferencia. SpaceX y OneWeb planean cambiar varios parámetros en sus sistemas que requerirán actualizar el informe ECC 271. CRAF está siguiendo de cerca estos cambios y participará en los estudios de compatibilidad. Además, en la reciente conferencia mundial de Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) se tomaron nuevas decisiones para permitir operaciones de satélites no geoestacionarios en la banda 37-43.5 GHz, por lo que la banda primaria de radioastronomía 42.5-43.5 GHz necesitará nuevos estudios de compatibilidad en ECC para proteger las observaciones en dicha banda. Para las otras bandas de frecuencias que no están asignadas a la radioastronomía por los reglamentos de la UIT, CRAF podría considerar solicitar una protección especial para los radiotelescopios europeos, aunque dicha protección no se puede garantizar.

ASTRONOMÍA EN LUZ VISIBLE

Sin embargo, lo primero que llamó la atención del público general fueron los posibles efectos de estas redes de satélites sobre la observación del cielo nocturno mediante luz visible. Cada lanzamiento de la mega-constelación Starlink coloca en órbita unos 60 satélites que no se ubican de inmediato en sus órbitas de operación, sino que migran hacia ellas lentamente en el curso de varias semanas. Además, lo hacen a partir de órbitas iniciales más bajas y en una actitud espacial (una «configuración») distinta a la final, que los hace muy brillantes durante las fases iniciales de su presencia en el espacio. Esta circunstancia hizo saltar todas las alarmas desde el primer lanzamiento en mayo de 2019. Aunque luego se ha hecho evidente que los satélites Starlink se muestran mucho más débiles tras alcanzar las órbitas operativas, parece más que necesario estudiar el impacto potencial de estos proyectos sobre la observación del cielo.

Altitud de la capa (km)	Satélites en la capa	Inclinación (°)
550	1584	53
1110	1600	53.8
1130	400	74
1275	375	81
1325	450	70
335.9	2493	42
340.8	2478	48
345.6	2547	53

Tabla 1. Perfil de la constelación Starlink usado en este estudio.

Por supuesto, cualquier análisis debe partir del diseño previsto para la constelación y, como ya se ha indicado, no abunda la información de calidad al respecto. Los datos disponibles son incompletos y contradictorios incluso sobre el proyecto más avanzado, Starlink. Según algunas fuentes, la configuración final de esta constelación podría alcanzar la cifra, verdaderamente astronómica, de más de 45 000 satélites. Estimaciones más moderadas, basadas en los permisos ya solicitados en Estados Unidos por la empresa que lidera el proyecto, SpaceX, hablan de unos 12 000 aparatos en órbita. Para nuestro estudio nos hemos basado en este perfil de constelación, con exactamente 11 927 elementos,

como se describe en la tabla 1. Obsérvese que este perfil contempla órbitas que van desde unos 350 km de altitud hasta 1300, aproximadamente, con inclinaciones orbitales que se acumulan en torno a unos 50 grados pero incluyendo también un millar de satélites en órbitas de inclinación elevada, algunas casi polares. Desde el punto de vista estructural y de aspecto los satélites son gemelos, por lo que todos quedan descritos por los mismos parámetros de forma y albedo, lo que resulta relevante para la predicción de sus propiedades fotométricas. La figura 1 representa una toma instantánea de esta constelación y, en ella, cada punto corresponde a un satélite. Esta descripción se ha tomado como referencia para los cálculos que se describen a continuación, que corresponden tan solo a este perfil de constelación concreto. Las conclusiones que pasamos a describir podrían escalarse a constelaciones mayores, formadas por satélites del mismo tipo, aplicando el factor de escala adecuado, al menos como primera aproximación.

En el curso de la simulación conviene diferenciar entre satélites «al alcance» y satélites «visibles». Dado un lugar concreto de la Tierra (como, por ejemplo, un observatorio), si se especifica una altura mínima sobre el horizonte, entonces puede considerarse que están «al alcance» todos los satélites situados por encima de esa altura. Los «visibles» son tan solo un subconjunto de los satélites «al alcance»: se trata de aquellos que reciben de manera directa la luz del Sol. Para una constelación específica, el número medio de satélites al alcance y su distribución depende tan solo de la latitud: de día o de noche, cada lugar de la Tierra tiene acceso a un número determinado de aparatos con los que es posible establecer comunicación para la obtención del servicio y es esta cobertura la que se tiene en cuenta para diseñar el sistema de satélites.

En contraste, para la observación astronómica en bandas ópticas lo que nos interesa es la cantidad de satélites *visibles* de noche, así como su reparto por el cielo, aspectos que varían muchísimo con la hora local y con la estación del año, porque ambos factores dependen de la configuración local del cono de sombra de la Tierra. Un satélite que se halle dentro del cono de sombra podría estar al alcance, pero no será visible por no estar iluminado.

latitud (grados)	Ejemplo	Satélites al alcance	
		Por encima de 30°	Por encima del horizonte
37	Calar Alto	68	615
30	Cerro Pachón (VRT)	54	553
29	Roque de los Muchachos (GTC)	53	543
24	Cerro Paranal (VLT)	49	491
20	Mauna Kea	47	444
00	Ecuador	42	386

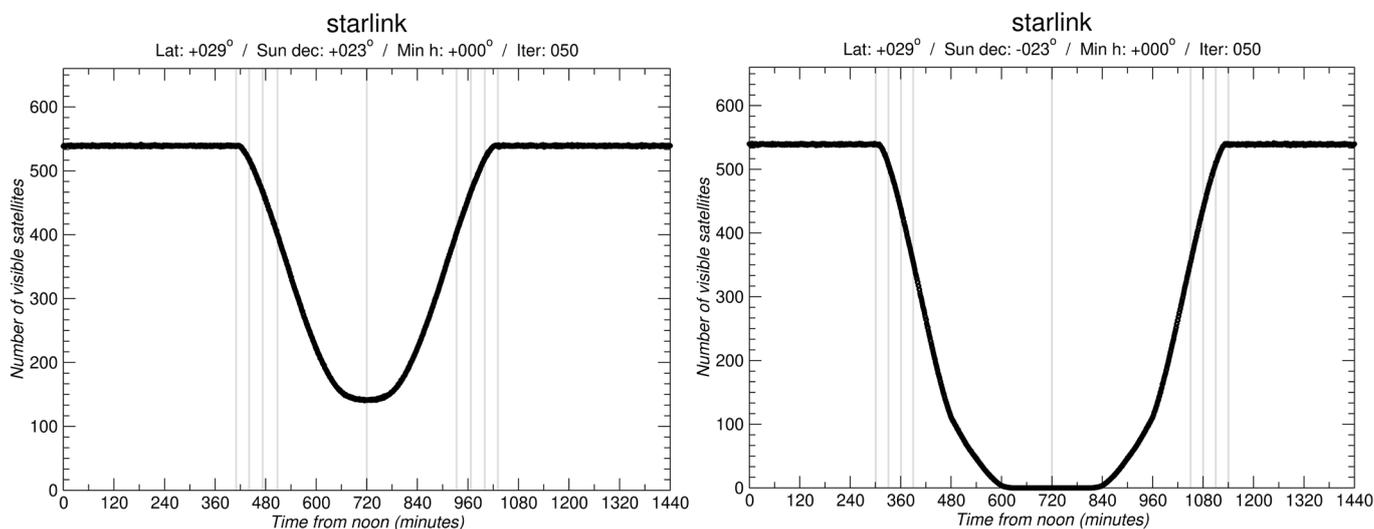
Tabla 2. Satélites al alcance para la configuración Starlink de la tabla 1, desde distintos observatorios y para dos alturas mínimas distintas sobre el horizonte: 30 grados y cero.

Al estudiar los detalles se aprecia una dependencia suave del número de satélites al alcance con la latitud del observatorio, como se muestra en la tabla 2. Pero tomemos como referencia la isla de La Palma, con latitud igual a +29°.

El número medio de satélites al alcance por encima del horizonte supera en este lugar los 500 en cualquier instante dado, aunque el 90 por ciento de ellos se concentra a menos de 30 grados de altura sobre el horizonte. En cualquier momento hay tan solo unos 50 satélites al alcance con alturas sobre el horizonte en las que se suelen realizar observaciones astronómicas profesionales, por encima de 30 grados.

Si pasamos a considerar no el número de satélites al alcance, sino la cantidad de los mismos que son visibles, se aprecia una dependencia muy fuerte con la hora local, a medida que va cambiando la configuración de la sombra de la Tierra. La cantidad de satélites visibles va descendiendo con el avance del crepúsculo de la tarde, desde el civil al náutico y de este al astronómico hasta la llegada de la noche astronómica. El número de satélites visibles por encima del horizonte alcanza siempre un nivel mínimo hacia media noche. Este valor mínimo ronda 120 en fechas cercanas al solsticio de verano aunque, de ellos, solo hay unos 10 por encima de 30 grados de altura. En el entorno del

Figura 2. Número de satélites Starlink visibles desde La Palma por encima del horizonte. La gráfica de la izquierda corresponde al solsticio de junio y la de la derecha al de diciembre. El tiempo se mide en minutos desde el mediodía anterior. Las líneas verticales marcan, de izquierda a derecha, la puesta de Sol y el fin de los crepúsculos civil, náutico y astronómico, la medianoche, y la sucesión de crepúsculos en orden inverso hasta el alba.



solsticio de invierno el número de satélites visibles sobre el horizonte llega a descender hasta cero durante cuatro horas centradas en la medianoche.

Para otras latitudes las tendencias generales son muy parecidas. La situación siempre mejora en fechas cercanas al solsticio del invierno local, porque en esas condiciones el cono de sombra de la Tierra se alza más alto en el cielo durante la noche. Las condiciones peores siempre se dan en el entorno del solsticio de verano.

No todo es el número de satélites. Resulta de la mayor importancia aclarar su brillo aparente y, también, su distribución en el cielo. La dependencia con la configuración local instantánea de la sombra terrestre permite prever que ambos aspectos pueden llegar a ser bastante complejos de describir.

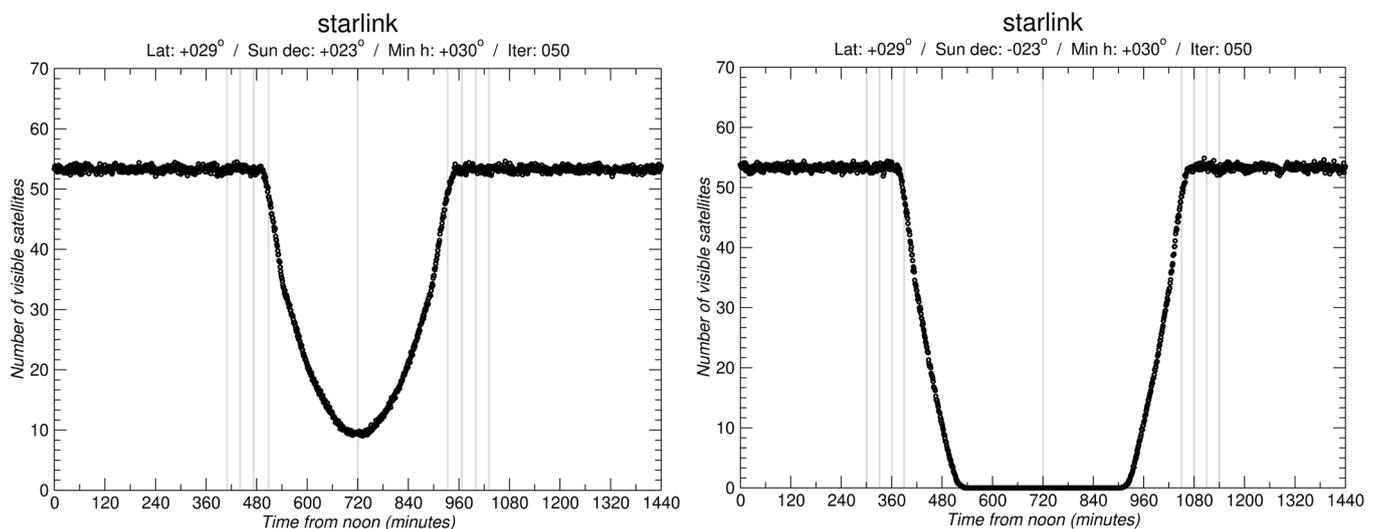
BRILLO APARENTE

El brillo aparente de los satélites visibles depende críticamente de la reflectividad de sus superficies. El modelo fotométrico incorporado a las simulaciones

es semejante al de Hainaut & Williams (2020) y tiene en cuenta tanto el ángulo de fase como la reflectividad de los aparatos, si bien de una manera bastante simplificada. Tratamos los satélites de la constelación Starlink como esferas de un metro de radio con un albedo geométrico igual a 0.25. A las características fotométricas resultantes de esos parámetros se añade una extinción atmosférica de 0.12 magnitudes por unidad de masa de aire. El modelo proporciona valores orientativos para la magnitud V aparente. A falta de introducir mejoras adicionales en el modelo, este al menos permite comparaciones directas con otras simulaciones publicadas hasta ahora.

Como era de esperar, la distribución de brillos aparentes de los satélites muestra una estructura que depende de la textura espacial de las capas de la constelación, así como de la distancia al observatorio. Los satélites visibles más alejados tienden a aparecer más cercanos al horizonte y a mostrarse mucho más débiles. Los satélites Starlink visibles por encima de 30 grados de altura presentan una distribución de brillos bimodal con máximos locales entorno a

Figura 3. Número de satélites Starlink visibles desde La Palma por encima de 30 grados de altura sobre el horizonte. La gráfica de la izquierda corresponde al solsticio de junio y la de la derecha al de diciembre. Véase la figura 2 para la interpretación detallada.



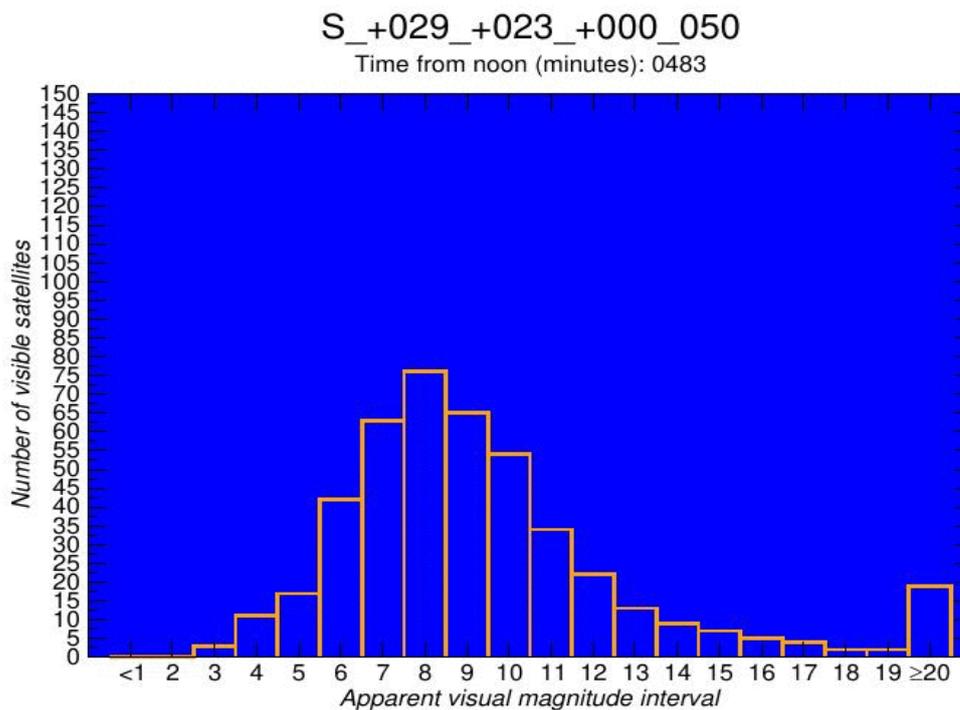
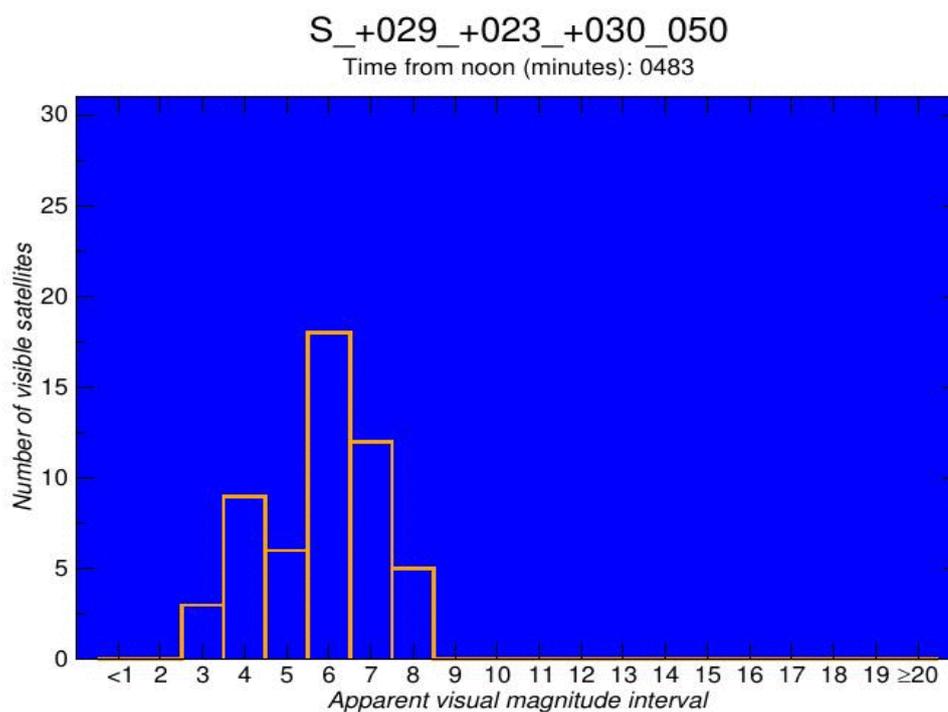


Figura 4. Histograma de magnitudes visuales aparentes de los satélites visibles desde La Palma por encima del horizonte, en condiciones de solsticio de verano, 483 minutos tras el mediodía anterior. Comparando con la figura 2 (izquierda) se aprecia que se trata de un instante sumido aún en el crepúsculo astronómico.

Figura 5. Histograma de magnitudes visuales aparentes de los satélites visibles desde La Palma por encima de 30 grados de altura sobre el horizonte, en condiciones de solsticio de verano, 483 minutos tras el mediodía anterior. Comparando con la figura 3 (izquierda) se aprecia que se trata de un instante sumido aún en el crepúsculo astronómico.



las magnitudes visuales 4 y 6. Si recordamos que la magnitud 6 es la más débil que puede percibirse a simple vista en un cielo oscuro, se concluye que la mayoría de los satélites Starlink visibles por encima de 30 grados de altura contaminarán visualmente el cielo nocturno de los lugares que aún conserven unas condiciones de oscuridad naturales, prístinas.

Los satélites visibles cercanos al horizonte tienden a ser significativamente más débiles y la mayoría de ellos permanece por debajo del umbral de sensibilidad del ojo humano sin ayuda óptica incluso bajo las condiciones de oscuridad más extrema: en este caso la distribución de brillos muestra un único máximo en torno a las magnitudes visuales aparentes 7 y 8, aunque sigue habiendo un número significativo de aparatos en los intervalos de magnitud 6 y 9. Esta debilidad general no significa que resulten inocuos, porque aún pueden afectar a las observaciones realizadas con instrumentos.

OBSERVACIÓN TELESCÓPICA

El impacto sobre las observaciones con instrumentos depende mucho del campo de visión y del tiempo de integración. La probabilidad de que se vean afectadas las observaciones de campo estrecho es pequeña, pero crece mucho para telescopios de campo amplio. Las simulaciones efectuadas implican fijar la latitud del observatorio, la declinación del Sol, el campo de visión y el tiempo de integración. Con esos parámetros fijos, se simula un conjunto muy amplio de apuntados en cinco direcciones canónicas: cenit, N, S, E, W. Las direcciones no cenitales se orientan a 45 grados de altura sobre el horizonte. El resultado de las simulaciones, para distintas alturas del Sol sobre (o, más bien, bajo) el horizonte permite derivar una serie de descriptores de afectación entre los que se incluye el número esperado de trazas satelitales en cada disparo, su longitud, el brillo aparente medio de los satélites o su velocidad angular aparente típica.

Si seguimos tomando como referencia la latitud de Canarias, podemos comparar dos casos de estudio: un instrumento profesional de campo estándar, como Hipercam en el William Herschel Telescope (WHT), y la toma de imágenes de campo muy amplio.

Hipercam es una cámara para la obtención de imágenes directas multi-banda simultáneas, diseñada

para su posible uso en varios telescopios. Cuando se instala en el Gran Telescopio Canarias (GTC) abarca 3 minutos de arco de campo en diagonal, mientras que en el WHT cubre 10 minutos, una anchura bastante representativa de otros instrumentos profesionales para la captación de imágenes directas, por lo que se ha tomado este dato como referencia. Los resultados indican que la toma de imágenes directas con campos de visión de este orden se ve muy poco afectada por una constelación de satélites como la mostrada en la tabla 1. El número de imágenes de 30 s de integración afectadas se mantiene en todas las condiciones por debajo del 1 %, salvo en circunstancias muy concretas. Se alcanza o supera muy ligeramente ese 1 % de afectación solo cuando el Sol se encuentra a -12° de altura, es decir, en el paso del crepúsculo civil al náutico. Los satélites responsables de estas trazas ocasionales presentan magnitud visual aparente media igual a 4.3, con una desviación estándar superior a una magnitud. Estas cifras infunden cierta tranquilidad sobre el impacto de las constelaciones de tipo Starlink sobre una de las formas más habituales de observación, puesto que incluso un gran incremento en la población de satélites en el diseño de la constelación seguiría manteniendo su impacto potencial en niveles manejables.

La situación cambia radicalmente cuando se consideran campos más amplios. Una simulación similar a la anterior pero con un campo de visión más típico de la fotografía paisajística o no profesional, con 20 grados de ancho, arroja resultados muy distintos. Aun manteniendo el resto de parámetros sin alterar (en particular, el tiempo de integración, que sigue estando en 30 segundos), el apuntado en las direcciones canónicas cenital y N, S, E, W (a 45° de altura) conduce a resultados muy variables, según la época del año y la hora de la noche. De nuevo las horas crepusculares son las más dadas a la aparición de satélites en las imágenes, con entre 3 y 4 trazas, habitualmente, en cualquier imagen obtenida con esta configuración, cuando el Sol se halla a -12° de altura, causadas por satélites con magnitudes visuales aparentes entre 4 y 5. Incluso en la noche astronómica, con el Sol ya a -25° de altura, cada imagen presenta típicamente entre 1 y 3 trazas, más probables para apuntados no cenitales, debidas a satélites cuya magnitud media está en el entorno de 6. En noche profunda, con el Sol en una altura de -37° , la

afectación sobre la toma de imágenes de campo amplio resulta muy poco probable y solo supera el umbral de 1 % en circunstancias concretas y para algunas direcciones de observación.

Si las imágenes de campo amplio se toman no a 45° de altura, sino a tan solo 15°, lo cual es habitual en fotografía artística y del paisaje, entonces los números se disparan. Aun con mucha variabilidad estacional y horaria, para alturas tan bajas es muy habitual que el número de trazas en una sola imagen supere la decena, incluso en noche cerrada. Por ejemplo, un apuntado a 15° de altura en acimut norte, en el solsticio de verano y con el Sol a -37° de altura, presentará típicamente 18 trazas debidas a satélites cuya magnitud visual aparente media ronda 9.5.

INSTRUMENTOS PROFESIONALES DE CAMPO AMPLIO

Comprobado que el campo de visión es determinante, nos preguntamos qué impacto podrían tener constelaciones del tipo de la mostrada en la tabla 1 sobre algunos de los instrumentos de mayor campo accesibles a la comunidad de la SEA.

Se simularon las circunstancias de la cámara Baker-Nunn del Telescopio Fabra-ROA Montsec (TFRM), con sus más de seis grados de campo. Mantenemos 30 segundos como tiempo de integración de referencia. Con las consabidas variaciones horarias y estacionales, se concluye que cabe esperar una traza por imagen durante el crepúsculo, debida a objetos de magnitud 5 (N, S, E, W) o 4 (Z). Con el Sol a -25° los satélites aparecen entre el 20 % y el 70 % de las veces, con magnitudes entre 5 y 6. Cuando el sol se halla en torno a -35° de altura lo más habitual es que no haya impacto, aunque en algunas épocas del año y en ciertas direcciones puede aparecer cierta afectación. Por ejemplo, la mitad de los apuntados de 30 s hacia el norte y a 45° de altura muestran trazas en condiciones de equinoccio, debidas a satélites con magnitud 6.5.

Los reconocimientos del cielo J-PAS y J-PLUS, del Observatorio Astrofísico de Javalambre, emplean telescopios e instrumentos diferentes cuyos campos de visión son, respectivamente, 2.4° y 1.6°. Por supuesto, el grado de afectación en estos casos no es nulo, si bien los ejemplos anteriores ya permiten intuir que el impacto no alcanzará niveles excesivos, al menos con el perfil de constelación de

satélites utilizado en este estudio. En noche astronómica, con el Sol a -25°, se espera detectar trazas entre el 10 % y el 30 % de los disparos de un minuto de tiempo de integración, debidos a satélites con magnitud entre 6 y 6.5. El equipo responsable de este proyecto deberá valorar hasta qué punto esto supone una limitación para su ciencia, teniendo en cuenta que la velocidad típica de los satélites que cruzan el campo de visión está en el entorno de 15 a 20 minutos de arco por segundo.

El grupo de trabajo ha producido simulaciones para otros instrumentos y ubicaciones, y está abierto a considerar simulaciones específicas a petición del colectivo de la SEA. Asimismo, los resultados detallados de las simulaciones efectuadas hasta ahora están también disponibles en las páginas del grupo de trabajo en el sitio de la SEA en Internet.

SOLUCIONES

Todo lo anterior apunta a que el impacto de las mega-constelaciones de satélites tipo Starlink sobre la astronomía profesional puede ser inferior al que se temía a primera vista. Aun así, dista de ser nulo. Por un lado, proyectos de campo amplio, sobre todo si son de gran *étendue*, pueden verse muy afectados, como es el caso del Legacy Survey of Space and Time (LSST) del Observatorio Vera C. Rubin (Cerro Pachón, Chile). Por otro lado, la peor parte recae sobre la fotografía de paisaje y campo amplio, una técnica poco relevante desde el punto de vista profesional pero a la que se dedica un gran multitud de entusiastas de nuestra ciencia.

¿Cuál puede ser la solución? Si partimos de la suposición de que las empresas responsables construirán constelaciones de tipo Starlink, y otras, entonces solo cabe considerar soluciones de carácter paliativo. Estas soluciones se engloban en dos categorías: técnicas de evitación y técnicas de atenuación.

Las técnicas de evitación consisten en el cálculo en tiempo real de las posiciones y trayectorias de los satélites, para disparar alarmas en caso de que vaya a producirse un cruce ante el campo de visión del telescopio. Las simulaciones efectuadas indican con claridad que en la mayoría de los casos la probabilidad de afectación es lo bastante reducida como para hacer posible este enfoque. Se trataría, por tanto, de un

sistema similar al desarrollado para prevenir colisiones entre satélites o piezas de basura espacial pero para evitar la «colisión» entre satélites y zonas de observación. Por supuesto, tal ataque del problema requiere que alguna entidad externa tal como CelesTrak o quizá la propia empresa operadora, proporcione elementos orbitales fiables y actualizados de los aparatos. Cada observatorio, dependiendo de las características concretas de su instrumental y de su ciencia, deberá valorar si un sistema de evitación le resulta útil o necesario.

Las técnicas de atenuación recaen sobre la empresa propietaria de los satélites y consisten en adoptar medidas para reducir la reflectividad de los satélites y, por tanto, su brillo aparente. La empresa SpaceX, propietaria de Starlink, ha iniciado experimentos en esta dirección y, mediante técnicas diferentes (superficies oscurecidas, dispositivos productores de sombra sobre partes clave de los aparatos) consideran posible atenuar los satélites en al menos una magnitud. Cabe la posibilidad de que las técnicas de atenuación logren que ningún satélite de tipo Starlink llegue a distinguirse a simple vista, pero probablemente sigan suponiendo un problema para los proyectos que pudieran verse afectados por las trazas de los satélites en su diseño actual.

Para los proyectos en los que no sea posible la evitación (todo indica que reconocimientos del tipo LSST lo tienen realmente muy complicado), queda también la planificación de la estrategia de observación (por ejemplo, en detectores de bajo o nulo ruido de lectura, dividir una exposición única en varias de menor tiempo, si ello es posible, para luego superponer los datos) y como último recurso el tratamiento *a posteriori* de los datos. La situación es muy variable dependiendo de cada instrumento y motivación científica en concreto pero, aun así, los cálculos preliminares realizados en el marco del grupo de trabajo Icosaedro de la SEA presentan un panorama menos preocupante de lo temido en un principio, al menos para la astronomía óptica. No cabe decir lo mismo en lo respecta a la proliferación de la basura espacial.

Nuestra intención es seguir avanzando en la simulación y modelado de las constelaciones de satélites, en particular en la previsión fotométrica por medio de modelos más complejos y basados en observaciones sistemáticas.

REFERENCIAS

- Hainaut O. & Williams A. (2020), A&A 636 A121 <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037501>
- CRAF, Committee on Radio Astronomy Frequencies: <http://www.craf.eu/>
- Electronic Communications Committee (ECC) report 271: <https://www.ecodocdb.dk/download/3ab9e6bc-0afd/ECC%20Report%20271.pdf>

AUTORAS/ES DE ESTE ARTÍCULO:

Francisco Colomer Sanmartín: Observatorio Astronómico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana), comisión B4 (Radioastronomía) de la IAU

David Galadí Enríquez: Observatorio de Calar Alto, comisión CB7 (Protección de Sitios de Observación) de la IAU

Daniel Marín Arcones: astrofísico, Consejería de Educación, Universidades, Cultura y Deportes del Gobierno de Canarias

Jorge Núñez de Murga: Universitat de Barcelona, Observatori Fabra (Reial Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona), comisión A1 (Astrometría) de la IAU

Olga Zamora Sánchez: astrofísica, Instituto de Astrofísica de Canarias

LA COLABORACIÓN ENTRE ASTRÓNOMOS

La astronomía es una de las ramas de las ciencias experimentales en las que mejor se conjuga el trabajo de científicos profesionales con aquel realizado por aficionados o amateurs. Conscientes de este potencial, desde la SEA hace tiempo que trabajamos en profundizar esta relación a través de nuestra colaboración con la Federación de Asociaciones Astronómicas de España (FAAE) y con las iniciativas de la Comisión ProAm.



Jordi Lopesino

Editorial Marcombo, Observatori Sant Pere
jordilopesino@telefonica.net

Santiago Pérez-Hoyos

Univ. del País Vasco, Comisión ProAm SEA
santiago.perez@ehu.eus

Alberto Solanes

Agrupación Astronómica de Huesca
info@aahu.es

Blanca Troughton

Fed. de Asociaciones Astronómicas de España
presidencia@federacionastronomica.es

Precisamente fruto de estas interacciones, la Agrupación Astronómica de Huesca organizó el pasado diciembre de 2019 el III Congreso ProAm. Fue un encuentro memorable donde más de 120 profesionales y amateurs nos codeamos y compartimos proyectos y nuevas ilusiones. Durante el mismo se celebró la mesa redonda “Los grandes retos de la colaboración ProAm en Astronomía”, que trató de mostrar una imagen completa de esta colaboración en nuestro país con el objetivo de cimentar las futuras colaboraciones.

Los participantes en la mesa redonda fueron Francesca Figueras (Presidenta de la SEA), Javier Salas (Agrupación Astronómica de Huesca), Santiago Pérez-Hoyos (Comisión ProAm de la SEA), Mercè Correa (Agrupación Astronómica de Sabadell), Joaquín Alvaro (Agrupación Astronómica de Cuenca, FAAE) y como moderador Jordi Lopesino (Editorial Marcombo, Observatori Sant Pere).

La variedad y la calidad del trabajo desarrollado por la comunidad amateur sorprendieron a algunos de los asistentes al Congreso ProAm y a la mesa redonda. Estos grupos se dedican a observar y a abastecer de datos, medidas e imágenes a diversos estamentos astronómicos internacionales y, en muy menor medida, a alguno estatal. La mayoría de ellos, además, archivan los datos para sus posibles usos futuros. En lo que sigue, presentamos algunos de los principales grupos de trabajo, en una lista que quisiera ser exhaustiva pero que difícilmente puede serla, habida cuenta de lo dinámicas que son estas interacciones.

Grupo Parhelio. De la mano de Javier Ruiz y Faustino García, a finales de 1999 nació Parhelio¹ una página web cuyo principal objetivo era dar a conocer formas de observar el Sol. La cantidad de datos reunidos en la página es considerable y han sido obtenidos por unos 80 observadores durante cuatro décadas. Podemos mencionar como ejemplo los 70.000 números de Wolf, las 50.000 posiciones de manchas o 60.000 de fáculas polares. El desarrollo de software propio, especialmente diseñado para trabajar con imágenes solares permite obtener numerosos datos en cuestión de minutos, de una manera casi totalmente automatizada y con una precisión similar a la de grandes observatorios. Si algún mérito tiene Parhelio es haber conseguido ensanchar el horizonte heliofísico amateur aprovechando las poderosas herramientas que proporciona la informática y la fotografía digital. El principal cauce de colaboración



Foto de familia en el Planetario de Aragón de los asistentes al III Congreso ProAm celebrado en Huesca el pasado diciembre. Cortesía de la Agrupación Astronómica de Huesca.

ProAm es la colaboración con el Observatoire Royal de Belgique, formando parte de la red mundial que se dedica a obtener números de Wolf.

La Red de Bólidos y Meteoros de la Universidad de Málaga y de la Sociedad Malagueña de Astronomía².

Coordina: Alberto Castellón. En 2006 la Sociedad Malagueña de Astronomía (SMA) instaló una cámara "all-sky" dedicada a la detección de meteoros en El Pinillo (Torremolinos, Málaga) integrándose en la Red Española de Meteoros (SPMN). Tras un paréntesis de inactividad causado por problemas técnicos en dicha estación, la SMA decidió acometer un proyecto más amplio para crear una red de detectores. Al mismo tiempo, se puso en marcha de nuevo la Estación de El Pinillo, ahora con mejoras en la óptica y software de elaboración propia y se comenzó a contar con las imágenes adquiridas por las cámaras CASANDRA-1 y 2 de los observatorios BOOTES-1 (El Arenosillo, Huelva) y BOOTES-2 (Algarrobo-Málaga), ambos per-

tenecientes a la Red Global BOOTES (IAA/CSIC). También se configuró la nube propia en Internet a la que suben datos las estaciones, nube que sigue realizando tales funciones hasta la fecha. La Red de Bólidos y Meteoros de la Universidad de Málaga y de la Sociedad Malagueña de Astronomía cuenta por el momento con 13 estaciones, 8 en activo y 5 en curso de instalación. Entre 2014 y 2019, este grupo ha presentado 5.986 alertas de vídeo, 3.058 alertas de imagen, 684 Meteoros procesados en dos estaciones.

Cometas_Obs³. Coordinan Julio Castellano y Esteban Reina. Este grupo nace en el año 2002 con el objetivo de aglutinar a un grupo de observadores dispersos, visuales y CCD, para hacer seguimiento de cometas. Cometas_Obs es una lista de correos y una página web. La lista de correos permite compartir las observaciones, efectuar propuestas de observación y resolver las dudas que puedan ir apareciendo. La página web mantiene una serie de informaciones

útiles para el observador y una base de datos de los cometas observados. Los observadores CCD no tardaron en darse cuenta de la dificultad que entrañaba la fotometría de estos objetos, debido a su irregularidad y la variedad de cámaras y configuraciones de las herramientas de observación. Poco a poco, se fue desarrollando un método para efectuar la fotometría CCD, que hoy es conocido como “multiapertura”, que ha ido evolucionando pero que ha permitido que todos los observadores pudieran homogeneizar y “normalizar” sus medidas fotométricas de cometas. Fruto de ello es la consistencia y calidad de esta base de datos. Este grupo ha tenido 238 colaboradores en su máximo esplendor. Ha observado 996 cometas. Ha realizado 58.142 observaciones fotométricas de multiapertura. Más de 10.000 observaciones visuales reportadas. Y 180.259 medidas astrométricas realizadas y enviadas al MPC.

Otro grupo afín a la observación de cometas es **Observadores_cometas**⁴. Año de creación: 2001. Responsables: Dr. Mark Kidger y Montse Campàs. El grupo tiene más de 260 miembros, de los cuales unos 50 observadores participan activamente enviando medidas. Tienen datos de 730 cometas distintos, con las imágenes enviadas por los observadores, y con gráficas de luz, Afhro, QDust realizadas con las medidas recibidas en la lista de correo. Por poner unos ejemplos: 800 imágenes del cometa 29P, más de 150 del cometa 67P y más de 218 imágenes del 9P. En 2019 se recibieron más de 900 paquetes de medidas; en cada paquete puede haber datos de varios cometas. Entre enero y marzo del 2020 ya se han recibido casi 1300 medidas. Además de cometas también hay datos de exoplanetas, asteroides, NEO's, PHA's, quasares... Con los datos recibidos el Dr. Mark Kidger confecciona el apartado de cometas de la revista de Astronomía, también hace una sección en el grupo inglés The Astronomers.

El **Grupo M1** se fundó en 1990 para colaborar con los profesionales en el estudio de estrellas variables y supernovas. El grupo fue creado por los astrónomos amateurs Diego Rodríguez, José Ripero y Francisco Pujol. En la actualidad, los observadores poseen telescopios desde 20-cm a 35-cm estandarizados con filtros fotométricos. Los observadores son independientes pero se unen para campañas de observación o algún trabajo concreto. La colaboración en estrellas variables con Pablo Rodríguez Gil, del

Instituto de Astrofísica de Canarias ha permitido disparar alertas de ToO en grandes telescopios: William Herschel, Issac Newton entre otros. Colaboran o han colaborado con las siguientes instituciones: AAVSO, IAC, o la Universidad de Warwickha, entre otras. Coordinadores: Adolfo Darriba (Alertas Blazars) Miguel Rodríguez Marco (espectroscopia) Diego Rodríguez⁵ (campañas de variables, supernovas).

Observadores de Supernovas (ObSN)⁶ es un grupo coordinado por Juan-Luis González Carballo y Ramón Naves, cuyo principal objetivo es el seguimiento a largo plazo de supernovas desde el mismo momento de su descubrimiento. En los últimos siete años ha participado en el seguimiento de más de 25 objetos (incluidas algunas novas), para lo cual han creado una base de datos de acceso público con todas las medidas recabadas por sus más de 30 observadores activos. Esta base de datos supera ya las 7.000 medidas fotométricas con diversos filtros (los clásicos Johnson, pero también Sloan, GAIA, etc.). Estos datos están disponibles para todos los astrónomos, ya sean profesionales o amateur, que quieran hacer uso de ellos, como ya ha ocurrido con algunos astrofísicos pertenecientes a instituciones y centros de investigación foráneos. ObSN participa el seguimiento de otros fenómenos transitorios y de estrellas variables en campañas dirigidas por destacados astrofísicos, como Mark Kidger y el cuásar OJ287, o diversas variables de tipo YSO por parte de Dirk Froebrich (Universidad de Kent). De forma individual, algunos de sus miembros también participan en otros trabajos coordinados por profesionales (seguimiento de blazares, confirmación de supernovas descubiertas por ASAS-SN, detección de exoplanetas, etc.). Cabe añadir que los nombres de muchos de estos colaboradores de ObSN aparecen como coautores de artículos científicos en diversas revistas internacionales de gran prestigio.

Hay que mencionar que los observadores españoles de estrellas variables, en toda su extensión, constituyen uno de los grupos más activos a nivel mundial. Como botón de muestra basta decir que es el tercer país por número de medidas remitidas a la base de datos de la American Association of Variable Star Observers (AAVSO, cerca de 400.000 medidas anuales), siendo el segundo por número de observadores activos.

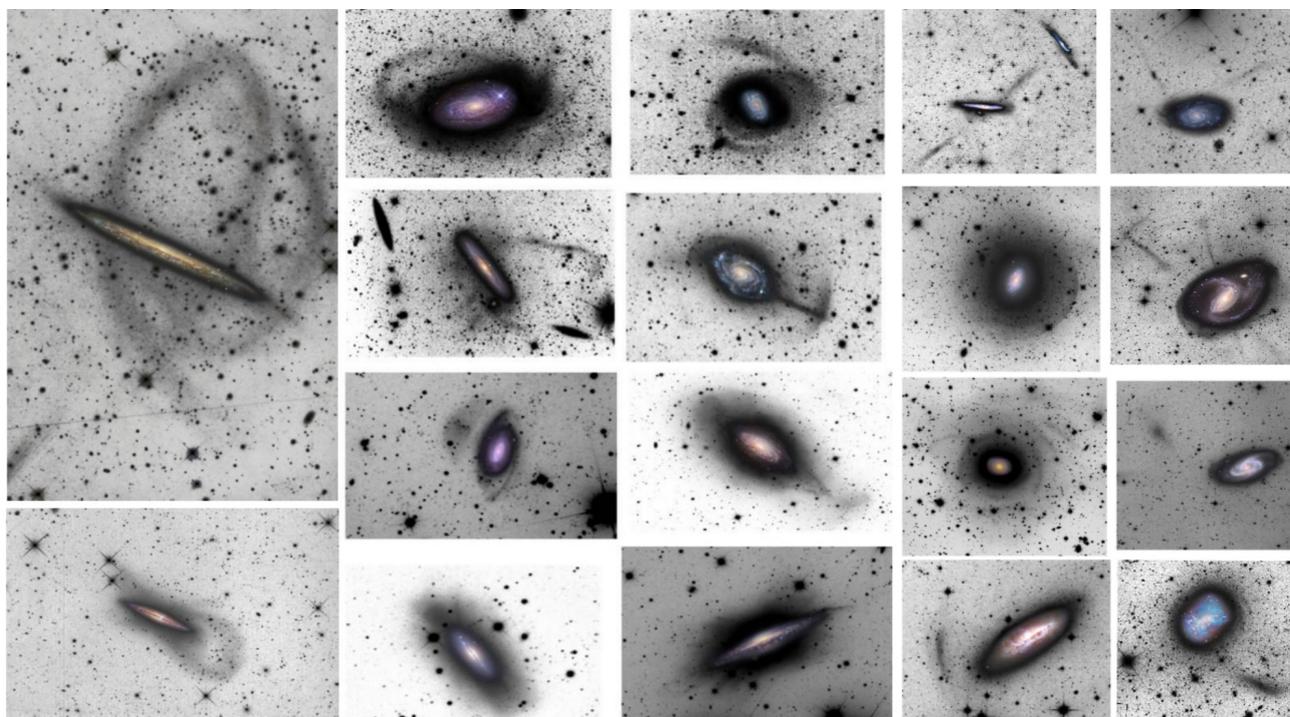


Ramon Naves Nagues junto a su telescopio en el Observatori Montcabrer MPC 213. Es uno de los observadores amateurs españoles con más horas de observación de este país que colabora en múltiples proyectos ProAm. Junto con su mujer Montse Campàs, también destacada astrónoma, agujerearon el techo de su casa para sacar el telescopio por el tejado con la ayuda de un pistón hidráulico; como si se tratara del periscopio de un submarino. Cortesía Ramon Naves.

Estrellas Dobles. La observación de estrellas dobles ha sido uno de los trabajos en los que tradicionalmente los observadores aficionados han destacado por sus aportaciones. Hace 11 años surgió una iniciativa completamente amateur pero que ha tenido una amplia proyección ProAm: la revista española **El Observador de Estrellas Dobles (OED)**⁷, dirigida por Rafael Benavides Palencia, Juan-Luis González Carballo y Edgardo R. Masa Martín. Con una periodicidad semestral (y su correspondiente ISSN), OED ha publicado ya cientos de artículos de los más diversos temas relacionados con las estrellas dobles (historia, metodología, caracterizaciones astrofísicas, medidas astrométricas —incluyendo técnicas novedosas como Lucky Imaging— y más de 15.000 medidas. Gracias al prestigio internacional conseguido

por esta publicación, OED ha sido reconocida por el Observatorio Naval de Estados Unidos, la institución acreditada por la UAI para centralizar las bases de datos de estrellas dobles, como una de las pocas publicaciones cuyas medidas pasan a formar parte, directamente, del principal catálogo de estrellas dobles: el Washington Double Star Catalog (WDS).

Exoplanetas. Los observadores amateurs que se dedican a la observación y seguimiento de exoplanetas no forman un grupo fijo ni homogéneo. Pero unos 30 colaboradores amateurs españoles cuelgan sus curvas de luz en la página Exoplanet Transit Database (ETD)⁸ que depende de la Czech Astronomical Society. Desde 2005 hemos contabilizado unas dignísimas 580 curvas de luz made in Spain.



Un precioso ejemplo de la contribución de observadores amateur en la ciencia profesional: imágenes de halos de galaxias con imágenes profundas de telescopios pequeños. Cortesía de David Martínez Delgado (IAA/CSIC), véase por ejemplo “Ultra deep imaging with amateur telescopes”, Martínez-Delgado, 2019¹³.

Espectroscopía. En España, a día de hoy, hay 5 observadores destacados que realizan observaciones espectroscópicas de nivel: Francisco Campos, Joan Guarro Fló, Diego Rodríguez, Teófilo Arranz y Miguel Rodríguez. Contribuyen con sus espectros a bases de datos internacionales, tales como ARAS (Francia, estrellas variables, todos los tipos), BeSS Database (estrellas Be del Observatorio de París-Meudon), AAVSO, BAA (British Astronomical Association).

Ciencias Planetarias. Dentro de un panorama claramente exportador de observaciones amateur hacia astrónomos profesionales extranjeros, destaca la colaboración ProAm establecida desde del Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU⁹ que, muy al contrario, capitaliza la colaboración

con una red internacional de observadores distribuidos por todo el globo, entre la que también se pueden encontrar algunos destacados observadores españoles (Jesús R. Sánchez o Antonio Lasala, entre otros). Nacido como parte del International Outer Planet Watch, el proyecto ha ido derivando hacia PVOL2¹⁰ una base de datos de más de 45.000 imágenes planetarias integradas dentro del observatorio virtual europeo VESPA e integra también herramientas de detección de impactos en planetas jovianos (DeTeCt y JID). Cabe destacar que algunas de las publicaciones de esta red de colaboración han llegado a aparecer en revistas tan prestigiosas como Nature, siendo incluso portada de esta publicación en alguna ocasión con imágenes de observadores amateur.

FAAE¹¹. Tras el primer congreso ProAm celebrado en Córdoba, la FAAE ha estado trabajando en un censo de observatorios astronómicos con posibles colaboradores ProAm. A manera de refuerzo últimamente ha creado la sección “Grupos interasociaciones”. El objetivo principal de esta sección es poner en contacto los distintos grupos de las Asociaciones con el fin de potenciar el desarrollo de actividades en común, tratando de servir también de nexo de unión entre los mismos para la generación de resultados tangibles. Uno de sus grandes beneficios será poder aprovechar las sinergias generadas por la relación de estos grupos y avanzar en determinadas líneas de investigación, permitiendo además que se compartan y se comenten dudas, inquietudes o ideas dentro de los mismos. El grupo está coordinado por el Secretario de la FAAE, Ángel Martínez Jiménez¹².

Esta lista de grupos de colaboración activos actualmente en nuestro país cuenta también con otras iniciativas destacables que por diversas razones no han podido desarrollarse en las líneas anteriores. Podríamos destacar por ejemplo el trabajo liderado por David Martínez Delgado para la observación de efectos de marea en galaxias cercanas que fue ganador ex-aequo del I Premio Javier Gorosabel de Colaboración ProAm, la Red de Investigación sobre Bóolidos y Meteoros (SPMN) coordinada por Josep María Trigo (ICE/CSIC), el de ocultaciones de estrellas por asteroides coordinado por Carles Schnabel, el GOAS¹⁴, Grupo de observación de asteroides, que se dedican a la obtención de curvas de luz y a calcular periodos de rotación de asteroides, coordinado por Rafael González, o el multidisciplinar OAG¹⁵, Observatori Astronòmic del Garraf. Sin duda, una lista impresionante por la diversidad de objetos y de técnicas involucradas con una cantidad de observaciones realizadas que, si bien obviamente no pueden competir en profundidad o precisión con los grandes telescopios, permiten en algunos casos complementar las fuentes de datos con las que cuentan los astrónomos profesionales.

Precisamente, una de las principales conclusiones que se presentó al finalizar la mesa redonda del Congreso ProAm de Huesca fue la necesidad de dar a conocer todas estas capacidades entre la comunidad profesional española que a menudo pasa por alto el potencial de una colaboración que está muy lejos de ser aprovechada hoy en día.

NOTAS

- 1 <http://www.parhelio.com>
- 2 <http://meteoros.astromalaga.es/>
- 3 <http://www.astrosurf.com/cometas-obs/>
- 4 <http://www.observadores-cometas.com/>
- 5 <http://personales.jet.es/drodrig/>
- 6 <https://sites.google.com/view/sn2017eaw/p%C3%A1gina-principal>
- 7 <https://elobservadordeestrellasdobles.wordpress.com/>
- 8 <http://var.astro.cz/ETD>
- 9 <http://www.ajax.ehu.es/>
- 10 <http://pvol2.ehu.eus/pvol2/>
- 11 <https://federacionastronomica.es/>
- 12 <https://federacionastronomica.es/index.php/la-federacion/grupos-interasociaciones>
- 13 <https://arxiv.org/abs/2001.05746>
- 14 <http://asteroides.sytes.net/GOAS/>
- 15 <https://www.oagarraf.net/>

LAS ASTRÓNOMAS A TRAVÉS DEL ARTE DE LAS

En las noches de verano, al amparo de la brisa fresca y la oscuridad de una localidad vacacional pequeña, nos gusta mirar al cielo llevados por la fascinación de un Universo plagado de estrellas y una bonita Luna. En tales momentos ¿a quién no se le ha pasado por la cabeza que quizá en algún lugar del espacio hay alguien que también mira hacia arriba, puede que incluso hacia nuestra estrella, nuestro Sol, presa de la misma emoción?



Comisión Mujer y Astronomía
Sociedad Española de Astronomía
mujer-y-astronomia@sea-astronomia.es

Este es precisamente el sentimiento que quiso plasmar **Lucía de la Varga García** (Villafranca del Castillo, Madrid, 7 años) en su obra para la II Edición del Concurso de Dibujo “Mujer y Astronomía” para escolares, organizado por la Comisión Mujer y Astronomía de la Sociedad Española de Astronomía (SEA) como parte de las actividades conmemorativas del 11 de febrero de 2020: Día Internacional de la Mujer y la Niña en Ciencia.

Lucía nos explica: *Dibujé una niña observando el espacio, los planetas, las estrellas, ... mientras pensaba si allí habría alguien más, alguna otra niña como ella también observando.* Nos traslada así hacia momentos que todas y todos vivimos durante la infancia pero que posiblemente hace tiempo que teníamos olvidados debido al frenesí del día a día de la vida adulta. Con este dibujo, Lucía de la Varga García resultó ganadora en la categoría de 6 a 8 años de esta Edición de 2020 del Concurso de Dibujo “Mujer y Astronomía”.

LA IMPORTANCIA DEL 11 DE FEBRERO

La Comisión Mujer y Astronomía de la SEA tiene como objetivos detectar las desigualdades de género en el ámbito de la investigación astrofísica profesional en España y proponer acciones que contribuyan a conseguir un ambiente plenamente igualitario. Tales desigualdades se forjan a diferentes niveles a lo largo de la vida de los investigadores e investigadoras, pues todas y todos somos partícipes de las discriminaciones por género que afectan a nuestro sistema de investigación actual.

Una parte importante de las diferencias entre científicas y científicos tiene su origen en la etapa de la infancia, cuando actitudes sutiles y mensajes subliminales enseñan y promueven que los niños son más adecuados para las tareas tecnológicas y científicas mientras que las niñas son más aptas para las disciplinas relacionadas con los cuidados. Esto deriva en un menor porcentaje de mujeres que deciden dedicarse a carreras de ciencia y tecnología. Tal desigualdad es la base del resto de actitudes no igualitarias que se propagan durante la educación básica y que afectan a la vida académica desde la etapa universitaria hasta las posiciones más consolidadas.



Dibujo de Lucía de la Varga García, ganadora de la Categoría de 6 a 8 años.

El 11 de febrero se celebra el Día Internacional de la Mujer y la Niña en Ciencia, promovido por las Naciones Unidas con los objetivos de dar visibilidad a mujeres científicas, proporcionando así referentes para las generaciones más jóvenes, e invitar a niñas y niños a reflexionar sobre la igualdad de la capacidad de todas las personas de acometer cualquier tarea científica.

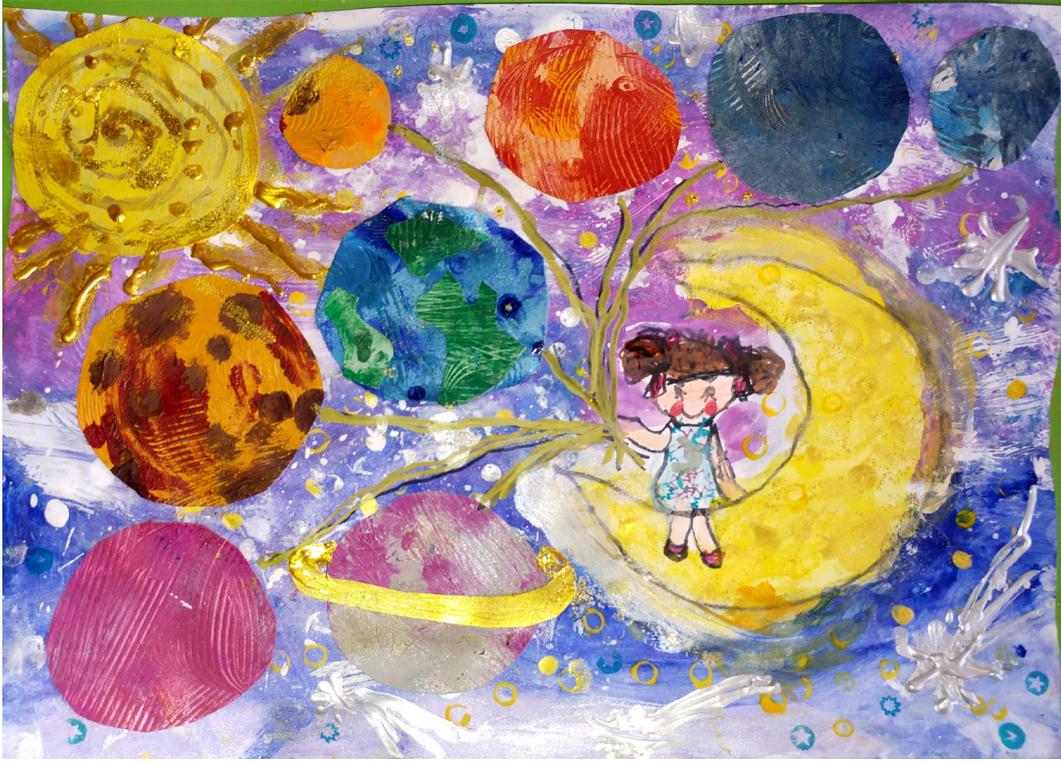
La Comisión Mujer y Astronomía de la SEA, como parte de las acciones para la igualdad, participa cada febrero con actividades diseñadas específicamente para dar visibilidad a las astrónomas y motivar a la juventud a dedicarse a esta preciosa profesión.

En 2020 se llevaron a cabo la III Edición de la actividad Chatea con una Astrónoma y la II Edición del Concurso de Dibujo “Mujer y Astronomía” y, por segundo año consecutivo, se mostró un carrusel con fotos de las astrónomas de la SEA en la página web principal de la Sociedad.

UN CONCURSO DE DIBUJO PARA APRENDER DE LA INFANCIA

El Concurso de Dibujo “Mujer y Astronomía”, en esta segunda edición, pidió a escolares de entre 3 y 15 años que plasmasen en un dibujo o *collage* sin restricciones de material y técnicas su visión sobre la temática “Mujer y Astronomía”.

Dibujo de Nerea Ullán Bejarano, ganadora de la Categoría de 3 a 5 años.



Dibujo de Julio Fuentes López, finalista de la Categoría de 6 a 8 años.

Contamos con la participación de unos 150 escolares de todos los rincones de España, desde Cataluña hasta Canarias. El concurso fue organizado en cuatro categorías según edades: de 3 a 5 años, de 6 a 8 años, de 9 a 11 años y de 12 a 15 años. El jurado estuvo constituido por voluntarias y voluntarios del Grupo Extendido de la Comisión Mujer y Astronomía, además del propio núcleo de la Comisión. En total, 17 personas que se enfrentaron a la ardua pero maravillosa tarea de evaluar los dibujos, todos ellos llenos de ideas geniales.

Aunque la idea principal del concurso vino motivada por nuestro deseo de enfatizar la relevancia de las astrofísicas en el mundo científico profesional entre los y las más pequeñas, el hecho es que son ellas y ellos, aún sin sesgos ambientales, educacionales o sociales, quienes mejor se dan cuenta de lo absurdo de las diferencias. Somos los y las adultas quienes podemos sacar más beneficio de estos dibujos y es por ello que hemos querido compartir algunas de estas obras con ustedes a través de este artículo. Hemos pedido a ganadoras, ganadores y finalistas que nos expliquen sus dibujos. El resultado es un conjunto artístico hermoso para los ojos... y la mente.

UNA NIÑA QUE QUIERE JUGAR CON EL UNIVERSO Y UN HOMENAJE A LAS MUJERES ESPACIALES

El dibujo de **Nerea Ullán Bejarano** (Salamanca, 5 años), ganadora de la categoría de 3 a 5 años, es la historia de una niña que sueña con viajar a la Luna para poder jugar desde allí con todos los planetas, con la Tierra, con el Sol... como si fueran globos de muchos colores.

Por su parte, **Julio Fuentes López** (Madrigueras, Albacete, 8 años), finalista de la categoría de 6 a 8 años, nos cuenta: *Mi dibujo lo hice pensando en todo lo que he aprendido en el cole. Vimos el Universo, el Sistema Solar, la misión Apollo... y también conocimos grandes personajes como: Hipatia, Valentina Tereshkova y también la perra Laika! Me encanta el tema del espacio y quería dedicar el dibujo a todas las niñas a las que también les encanta y hacer un homenaje a las mujeres más importantes en este "mundo espacial" que nos han enseñado tanto.*

ASTRÓNOMAS CON TESÓN Y PASIÓN QUE SE ENFRENTAN A NUEVOS RETOS

Alejandra Serra Iglesias (La Laguna, Tenerife, 10 años), ganadora de la categoría de 9 a 11 años, nos dice: *Mi dibujo quería representar a una astrónoma luchadora, con pasión y energía, observando auroras boreales en el Gran Telescopio Canarias situado en la isla de La Palma. Aunque en Canarias es muy difícil ver las auroras, es posible solo cada 500 años. Espero poder ir a Groenlandia a disfrutar de su espectacular baile en los cielos. Mis padres ya lo han hecho.*

Me llamo Júlia Novellas Corominas, tengo 13 años y estudio primer curso de ESO. Uno de mis astrónomos preferidos es Hipatia de Alejandría, por los importantes descubrimientos acerca de los movimientos de la Tierra y el posicionamiento del Sol y también por la especial dificultad que sufrió al ser mujer en una época especialmente difícil. Sus descubrimientos no se tomaron en serio hasta pasados 500 años. Me pregunto si esto hubiera pasado si Hipatia hubiera sido un hombre. Mi dibujo representa a una chica de mi edad soñando con descubrir nuevos retos sobre astronomía. **Júlia Novellas Corominas** (Barcelona, 13 años) es la ganadora de la categoría de 12 a 15 años.

EXPLICACIONES REVELADORAS

Los preciosos y coloridos dibujos ganadores y finalistas de la II Edición del Concurso de Dibujo "Mujer y Astronomía" (se pueden ver todos ellos en <https://www.sea-astronomia.es/noticias/ganadores-y-finalistas-del-concurso-de-dibujo-infantil-mujer-y-astronomia-2020>) adquieren otra dimensión cuando sus autores explican el trasfondo. Lucía, Nerea y Julio, de las categorías de menor edad, tienen sueños y ven a mujeres capaces de cualquier cosa: de viajar a la Luna, de jugar con los planetas, de dedicarse a la Astronomía... Reconocen la contribución de las astrónomas a lo largo de la historia sin cuestionarla. Pero nos hacemos mayores y la visión cambia. Alejandra y Júlia dedican sus dibujos a mujeres luchadoras y guerreras. Entienden que la contribución de las mujeres a la historia de la Astronomía es una proeza, pues tuvieron que enfrentarse a retos más allá de las intrigas de la ciencia. Siguen teniendo sueños pero son ya conscientes de las dificultades que su persecución entraña.

Sin embargo, todas las niñas ganadoras, desde Lucía hasta Júlia, tienen pasión y ánimos. Sus sueños no son inalcanzables, aunque sepan que no son fáciles de conseguir. El mensaje que nos transmiten estos dibujos es que no debemos dejar que esta pasión se convierta en desmotivación. No olvidemos nunca que podemos conseguir aquello que nos proponemos. Desde la Comisión Mujer y Astronomía, a través de este artículo y de todas nuestras actividades, esperamos que podamos imbuirnos del espíritu de estas y estos jóvenes artistas para extender el convencimiento de la igualdad entre toda la comunidad astrofísica española.

AUTORAS/ES DE ESTE ARTÍCULO:

Adriana de Lorenzo-Cáceres Rodríguez
Mercedes Mollá (CIEMAT)

Almudena Alonso Herrero (Centro de Astrobiología)
Silvia Bonoli (Donostia International Physics Center, Ikerbasque)

Miguel Cerviño (Centro de Astrobiología)
Amparo Marco (Universidad de Alicante)
Silvia Martínez Núñez (Instituto de Física de Cantabria)

Mayra Osorio (Instituto de Astrofísica de Andalucía - CSIC)

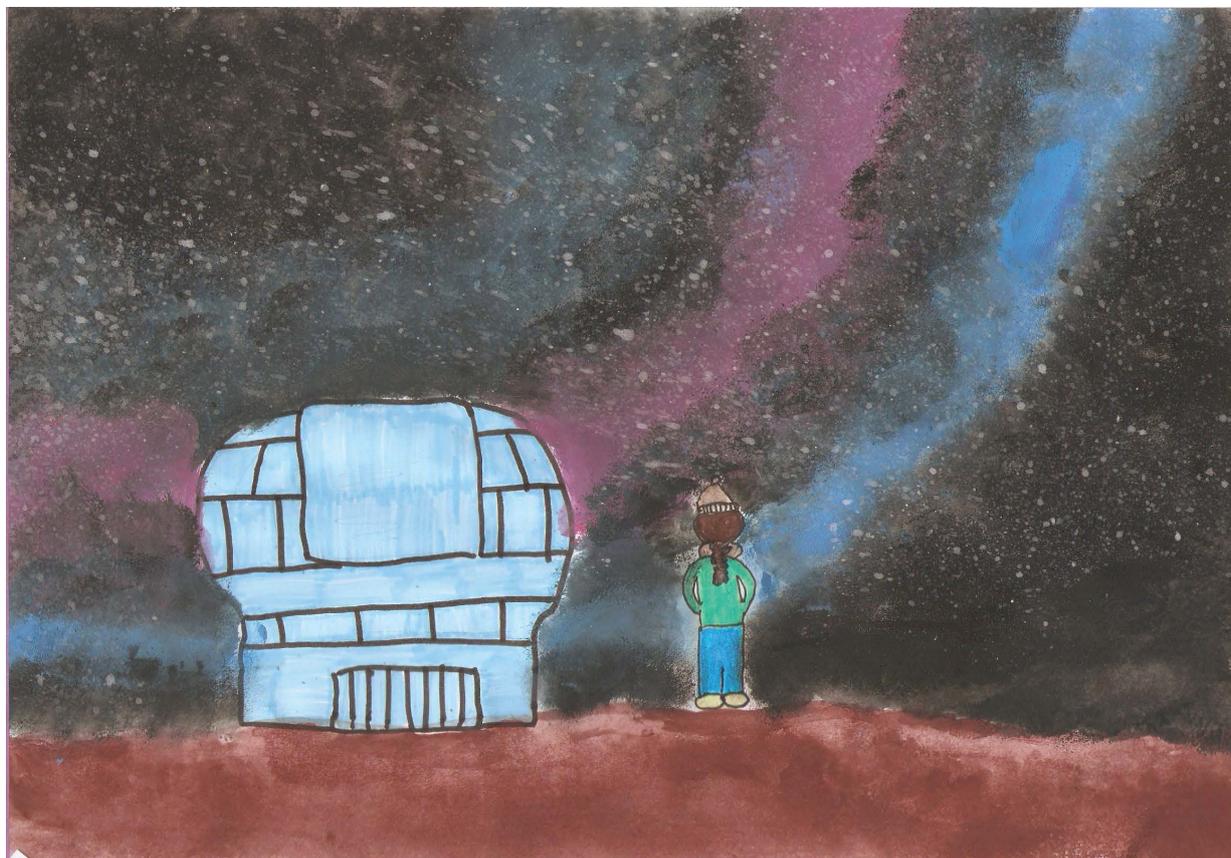
Marina Rodríguez Baras (Observatorio Astronómico Nacional)

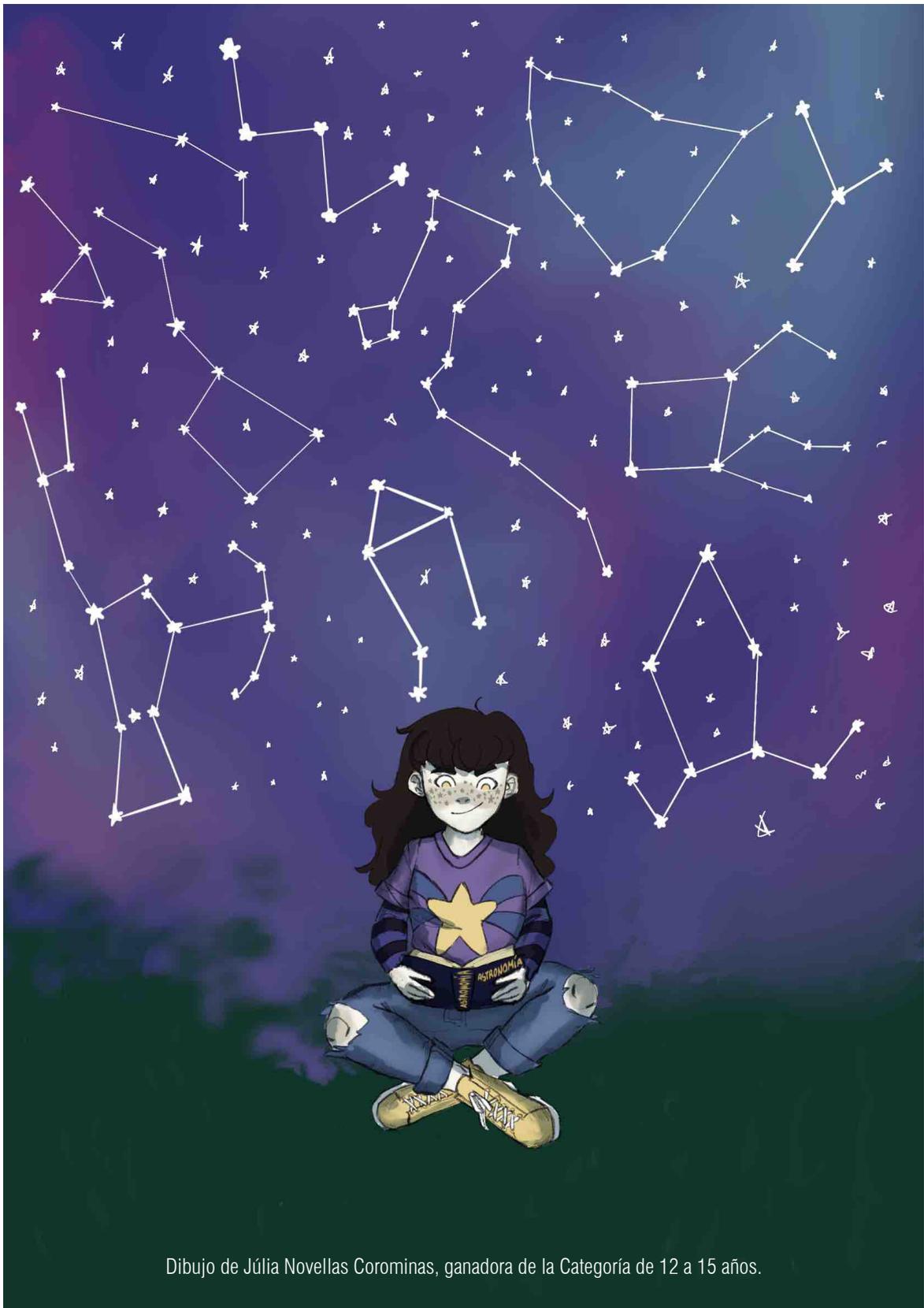
Julia Suso (Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia)

Jesús Varela (Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón)

María Dolores Rodríguez Frías (Universidad de Alcalá de Henares)

Dibujo de Alejandra Serra Iglesias, ganadora de la Categoría de 9 a 11 años.





Dibujo de Júlia Novellas Corominas, ganadora de la Categoría de 12 a 15 años.

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.

NANDA REA, PREMIO PREMIO FUNDACIÓN BANCO SABADELL DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Nuestra compañera **Nanda Rea** (ICE-CSIC-IEEC) ha sido galardonada con el IV Premio Fundación Banco Sabadell de Ciencias e Ingeniería, unos de los galardones científicos más importantes de los concedidos en España. ¡Enhorabuena!

JOSÉ LUIS BERNAL, GANADOR DEL PREMIO SEA TESIS 2020

Un año más hemos podido comprobar la altísima calidad de las tesis doctorales que los estudiantes jóvenes están realizando en nuestro país. El ganador del Premio SEA Tesis 2020 ha sido **José Luis Bernal**, con su tesis "Cosmology on the Edge of Lambda-Cold Dark Matter", realizada en el Institut de Ciències del Cosmos de la Universitat de Barcelona (IEEC-UB) y supervisada por la Dra. Licia Verde. ¡Felicidades, tanto al nuevo doctor como a su directora de tesis!

CONCEPCIÓN CÁRDENAS, PREMIO MERAC 2020

Nuestra compañera **Concepción Cárdenas** ha sido galardonada con el premio MERAC 2020 en Nuevas Tecnologías de la European Astronomical Society. Es la primera vez que un Premio SEA a la mejor tesis doctoral española en Instrumentación, Computación y Desarrollo Tecnológico en Astronomía y Astrofísica (galardón nuestra Sociedad le otorgó en 2019) recibe también este merecido premio MERAC. ¡Muchas felicidades!

CANDIDATOS SEA A LOS PREMIOS MERAC E IAU A LAS MEJORES TESIS DOCTORALES

La SEA presenta en 2020 a los premios MERAC e IAU las tres mejores tesis del premio SEA Tesis 2020: la ganadora "Cosmology on the Edge of Lambda-Cold Dark Matter" (**José Luis Bernal**; directora Licia Verde), "The structure and stellar population of the Nuclear Bulge of the Milky Way" (**Francisco Noguerras**; directores: Dr. R. Schödel y Dr. Antxon Alberdi) y "Dark matter in dense astrophysical objects" (**Marina Cermeño**; directora: Dr. M Ángeles Pérez-García). ¡Mucha suerte a los tres!

SANDRA BENÍTEZ, COORDINADORA NACIONAL DEL NODO REGIONAL EUROPEO DE LA OFICINA DE ASTRONOMÍA PARA EL DESARROLLO DE LA IAU

Nuestra colega del IAC **Sandra Benítez**, experta en divulgación y que ha participado en varios proyectos de astronomía para el desarrollo, será la primera coordinadora nacional española del nodo regional europeo, ubicado en la Univ. de Leiden, de la Oficina de Astronomía para el Desarrollo (OAD) de la IAU.

El nodo apoya y proporciona asesoramiento a las propuestas europeas que solicitan financiación a la OAD y a las que están ya siendo implementadas. ¡Enhorabuena, Sandra!

JUAN ÁNGEL VAQUERIZO, COORDINADOR NACIONAL DE LA OFICINA DE EDUCACIÓN EN ASTRONOMÍA DE LA IAU

Nuestro compañero **Juan Ángel Vaquerizo** (CAB), experto en comunicación y educación de la astronomía y al que muchos conocéis por su liderazgo en el proyecto Partner, ha sido nombrado coordinador nacional para España de la recién estrenada Oficina de Educación en Astronomía (OAE) de la IAU por la Comisión Nacional de Astronomía. La OAE está albergada en la Casa de la Astronomía de Heidelberg (Alemania) y tiene como objetivo servir de puente entre la IAU y el mundo de la educación desde infantil a bachillerato. ¡Enhorabuena, Juan Ángel!

VICENTE DOMINGO, DEP

Este semestre hemos despedido con gran tristeza a nuestro compañero Vicente Domingo (Universidad de Valencia), pionero de la investigación espacial que jugó un papel fundamental en la misión SOHO de la ESA como director científico. Descanse en paz.

REBECA GALERA ROSILLO, DEP

Hace muy pocos días se ha producido el fallecimiento de Rebeca Galera Rosillo, investigadora predoctoral del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y de la Universidad de La Laguna (ULL). Natural de la Puebla de Don Fadrique, en Granada, Rebeca era la única mujer astrónoma en la historia de su municipio. Tras finalizar sus estudios en la Universidad de Granada se incorporó al IAC en 2014. Actualmente trabajaba como astrónoma en el Isaac Newton Group of Telescopes (ING) en La Palma. Descanse en paz.

REUNIÓN CIENTÍFICA DE LA SEA XIV.0

Por primera vez en la historia de nuestra Sociedad vamos a realizar la reunión científica bienal de forma virtual. Os animamos a todos a participar de esta novedosa experiencia y agradecemos al LOC y al SOC el enorme esfuerzo que han hecho para que no perdiéramos esta oportunidad de reunirnos. ¡Un gran aplauso para ellos! ¡Nos vemos en la red!

SIETE BREVES LECCIONES DE FÍSICA

Carlo Rovelli

ISBN: 978-84-339-6400-7

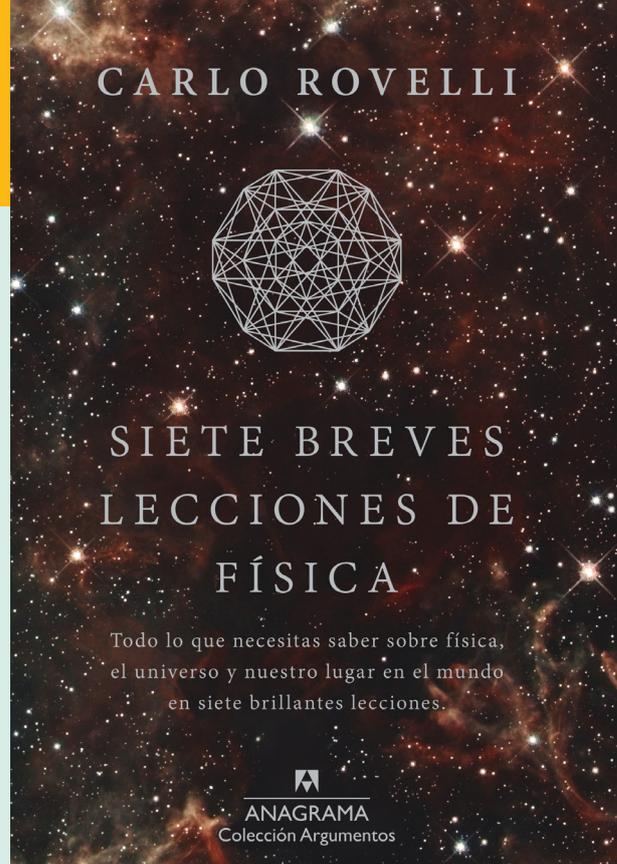
Editorial Anagrama, col. Argumentos

La ciencia nos enseña cómo comprender mejor el mundo, pero también nos muestra como es de amplio lo que todavía no sabemos. Y es que a pesar de los grandes avances del siglo XX, y al contrario de lo que gran parte de la sociedad cree, la ciencia moderna no es la explicación definitiva del mundo sino que sólo pretende ser una aproximación a la realidad. Una realidad que, sobre todo en la física contemporánea, se nos presenta huidiza y a veces incomprensible.

Sin embargo, el físico italiano Carlo Rovelli, en el pequeño pero denso libro *Siete breves lecciones de física*, se adentra en el difícil camino de hacer comprensible, para un público no necesariamente de ciencias, los fundamentos de la física del siglo XX, con sus éxitos fulgurantes, sus fracasos, sus contradicciones y especialmente las consecuencias que se derivan de ellas para la tecnología actual y para el pensamiento humano.

La obra, que ha sido un best seller en Italia, explica como un poético cuento, con seis capítulos o lecciones, de manera sencilla pero realmente profunda, las grandes teorías que han permitido el desarrollo de la sociedad moderna: la Relatividad General y la Mecánica Cuántica. Unas teorías potentes pero desgraciadamente contradictorias entre sí. La primera, la más bella y exigente de las teorías científicas, según el físico soviético Lev Landau, nos lleva a un espacio-tiempo continuo y en la que la materia y el espacio-tiempo se combinan continuamente, como un continuo juego del gato y el ratón. La segunda nos lleva a un mundo extraño en el que las partículas sólo existen cuando interactúan y donde el azar juega un papel fundamental. En palabras del autor, la realidad parece ser sólo interacción. Dos teorías que tratan de explicar el mundo pero que no pueden ser verdad al mismo tiempo. El espacio-tiempo curvado continuo frente al espacio plano de los cuantos, dos maneras de ver el mundo que funcionan sólo en su ámbito de aplicación.

Un físico no se debería molestar por esta dicotomía. Los conflictos de este tipo entre teorías de éxito son una oportunidad para avanzar hacia una nueva física. Son los momentos en los que algo oculto muestra la patita pero que no nos deja ver mucho más. La naturaleza siempre es tímida para mostrarnos sus secretos. Ahora necesitamos una teoría que lo unifique todo, como podría ser la Gravitación Cuántica de Lazos de la que Carlo Rovelli es uno de los desarrolladores. Esta teoría propone la cuantización del espacio-tiempo, en el que, a semejanza de la cuántica, todo es interacción. Y, si un día se llega a encontrar un observable, si llegan a prosperar algunos de los experimentos propuestos, será



una verdadera revolución de la física. Sin embargo, de momento, hay que seguir trabajando.

Y en esta nueva realidad propuesta ¿qué hacemos nosotros como humanos? ¿cuál es la realidad que percibimos, cuál es nuestra realidad?, ¿qué es el tiempo, qué es el presente? En este mundo de la física contemporánea donde el azar y la interacción son la norma, ¿somos realmente libres? Nosotros somos el sujeto que observa este mundo con el que interactuamos, pero al mismo tiempo somos parte integrante del mismo. Somos hechos también de partículas, luces e intercambios de la misma manera que lo son las galaxias y los otros seres vivos de la Tierra. Lo vemos desde dentro y tratamos de entenderlo con la potente pero limitada red neuronal de nuestro cerebro. Carlo Rovelli, en la última lección, nos cuenta su punto de vista sobre la humanidad, sobre la compleja realidad de la que estamos hechos. En definitiva, nos dice que lo específicamente humano no nos separa de la naturaleza, es nuestra naturaleza.

El mundo que nos rodea, que hemos visto por la ventana durante estos meses de confinamiento, nos parece bello, continuo, ordenado y que fluye al ritmo de las estaciones. Sin embargo, tenemos una visión desenfocada de la realidad. Vemos el lago con el agua tranquila, pero de lejos no percibimos su estructura fina, las moléculas de agua moviéndose, rompiéndose, los quarks dentro de los protones vibrando, y, más sutilmente aún, las posibles ínfimas porciones del espacio-tiempo.

Y termino con la misma expresión poética con la que termina el libro: A la orilla de lo que sabemos, en contacto con el océano de todo lo que no sabemos, brillan el misterio del mundo, la belleza del mundo, y nos dejan sin aliento.

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

Caracterización espectroscópica y física de las estrellas Galácticas tipo O observadas por los sondeos IACOB y OWN

Autor: Gonzalo Holgado Alijo

(gonzalo.holgado.alijo@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por:

Sergio Simón Díaz y Artemio Herrero Davó

Centro: Universidad de La Laguna

Fecha de lectura: 17 de enero de 2019

Las estrellas O representan una fase fundamental en el zoológico de las estrellas masivas. Ionizan el material a su alrededor e inundan su entorno con material procesado a través de fuertes vientos estelares y explosiones de supernova. Además de la pérdida de masa, factores como la rotación y la multiplicidad (así como la interacción entre ellos) se han convertido en procesos clave para comprender su evolución. Una mejor comprensión de estos complejos objetos requiere de una mejor caracterización empírica de sus propiedades físicas, algo que solo se puede obtener a través del extenso estudio de grandes conjuntos de datos. Este ha sido el principal propósito de esta tesis: la exhaustiva caracterización empírica, principalmente mediante la espectroscopía cuantitativa, pero también teniendo en cuenta la información sobre fotometría y paralajes, de una muestra de 415 estrellas de tipo O Galácticas (lo que representa una muestra 5-10 veces más grande que las consideradas en estudios similares anteriores).

Una parte crucial del trabajo ha sido la compilación de una base de datos cuasi-homogénea de espectros ópticos de estrellas O Galácticas. El grueso de las observaciones proviene de las extensas bases de datos espectroscópicas recopiladas en el marco de los estudios IACOB y OWN. En total, hemos utilizado 2900 espectros de 415 estrellas de tipo O Galácticas, cubriendo los tipos espectrales entre O2 y O9,7 y todas las clases de luminosidad.

En un primer paso, la capacidad multiépoca del conjunto de datos espectroscópicos compilados nos ha permitido evaluar la variabilidad espectroscópica de estas estrellas. Luego, realizamos un análisis espectroscópico detallado de aquellas estrellas (285) en la muestra no identificadas como binarias espectroscópicas de líneas dobles. Para hacer frente a la gran cantidad de objetos, utilizamos dos herramientas semiautomáticas (pero supervisadas) para el análisis espectroscópico cuantitativo, desarrolladas en el marco del proyecto IACOB.

Primero se utiliza un método combinado de la transformada de Fourier y ajuste de perfil para derivar v_{sini} y la cantidad de ensanchamiento de macroturbulencia que afecta a los perfiles de las líneas, usando el programa *iacob-broad*.

Luego, para derivar los parámetros de la atmósfera y el viento estelar, realizamos un minucioso análisis espectroscópico cuantitativo utilizando *iacob-gbat*, una herramienta

semiautomatizada basada en una optimización χ^2 con una vasta red de modelos de atmósfera *fastwind*. El programa calcula de forma rápida, objetiva y reproducible, valores e incertidumbres para T_{eff} , $\log g$, helium abundance, microturbulencia y $\log Q$.

Como parte de este trabajo, inicialmente hemos seleccionado y analizado una submuestra de referencia (la red de estrellas estándar tipo O para clasificación espectral) para establecer un protocolo que seguir paso a paso en el análisis de la muestra completa combinada de IACOB+OWN. Esta muestra también se usó para evaluar el nivel de acuerdo entre nuestros resultados y los proporcionados por los métodos más tradicionales "a ojo" y para construir nuevas calibraciones lineales de T_{eff} y $\log g$ en función del tipo espectral y clase de luminosidad para estrellas tipo O Galácticas.

Tras esto, extendimos nuestra investigación a toda la muestra de estrellas de tipo O Galácticas estudiadas por IACOB y OWN. Utilizamos los resultados del análisis espectroscópico para proporcionar una visión empírica global de los diversos parámetros investigados en varios diagramas de diagnóstico, así como para investigar algunos temas de interés en el campo de las estrellas masivas. En particular, introducimos una nueva versión independiente de la distancia de la relación de la luminosidad con el impulso del viento para evaluar nuestros resultados con respecto a estudios teóricos y empíricos anteriores. También evaluamos el desplazamiento aparente entre la edad cero en secuencia principal teórica y empírica para estrellas más masivas que $32 M_{\odot}$. Finalmente, estudiamos la distribución y evolución de la velocidad de rotación de las estrellas de tipo O y comparamos la información empírica extraída con las predicciones de los modelos más avanzados de evolución estelar simples y binarios.

En el último capítulo, realizamos una exhaustiva evaluación de la información disponible sobre paralajes para nuestra muestra completa de estrellas tipo O Galácticas. Evaluamos, en términos de cantidad y precisión, la mejora desde el catálogo *Hipparcos-Tycho* a la reciente segunda publicación de datos de la misión *Gaia* (Gaia-DR2). Luego, nos beneficiamos de las paralajes provistas por Gaia-DR2 para obtener las magnitudes absolutas, radios, luminosidades y masas espectroscópicas de nuestra submuestra de referencia: la red de estrellas estándar de tipo O para la clasificación espectral.

Tesis disponible en:

http://research.iac.es/proyecto/iacob/media/PhD/thesis_Gholgado_17Ene.pdf

TESEO:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1733208>

Evolución temporal de ondas magnetohidrodinámicas en arcadas coronales solares

Autor: Samuel Rial Lesaga (samuel.rial@uib.es)

Tesis doctoral dirigida por: Íñigo Arregui Uribe-Echevarría y Ramón Oliver Herrero

Centro: Universidad de las Islas Baleares

Fecha de lectura: 11 de octubre de 2019

En la primera parte de esta tesis nos hemos centrado en el estudio de la evolución temporal de ondas magnetohidrodinámicas (MHD) en arcadas coronales solares. Hemos estudiado las propiedades de oscilaciones verticales de pequeña amplitud en una arcada potencial en la aproximación de plasma frío cuando se consideran diferentes modelos de atmósfera solar y de bucle coronal.

Inicialmente nos hemos centrado en la evolución temporal sin introducir en nuestro modelo un bucle coronal. El objetivo de empezar con un modelo simple es sentar una base que nos ayude a interpretar los resultados cuando luego se incluya una mayor complejidad en nuestro modelo. Mediante el análisis temporal hemos estudiado la otra cara de la moneda de las oscilaciones magnetohidrodinámicas, la cual a menudo se ha estudiado mediante el análisis de modos normales. Otro de nuestros objetivos es dar un paso adelante hacia la simulación de ondas MHD tridimensionales. Para ello, y siguiendo con nuestro criterio de ir de menor a mayor complejidad, permitiremos la propagación tridimensional de las perturbaciones manteniendo un modelo de equilibrio bidimensional. Esto es conocido como un modelo 2,5 dimensional.

En este caso dos tipos de experimentos han sido realizados. Primero hemos estudiado la transferencia de energía que se produce mediante absorción resonante entre un modo rápido del sistema y las ondas de Alfvén. Debido al acoplamiento resonante, el modo rápido, que tiene un carácter global, transfiere su energía a oscilaciones Alfvénicas que están muy localizadas alrededor de determinadas superficies magnéticas dentro de la arcada, lo cual produce una atenuación de la oscilación del modo rápido inicial. En el siguiente experimento, hemos excitado nuestro sistema con un pulso impulsivo que imita una perturbación coronal más realista. En este caso el frente de onda rápido deja energía en diferentes superficies magnéticas de la arcada. El resultado más notable es que el sistema es capaz de atrapar energía incluso cuando nuestro modelo no tiene en cuenta un bucle coronal.

En el siguiente paso hemos mantenido el modelo anterior y le hemos añadido un bucle coronal. En este caso nos hemos centrado en la atenuación que sufren las ondas cuando se propagan a través del bucle. Hemos examinado dos mecanismos físicos que podrían estar involucrados en la rápida atenuación de las oscilaciones verticales observadas en bucles coronales, que son la emisión de energía mediante *wave tunneling* y la absorción resonante. Hemos comparado los resultados de las simulaciones temporales con las propiedades conocidas que han de poseer los modos normales. Esto nos ha servido como un método de comprobación de nuestros resultados y además nos ha ayudado a entender cómo ambas visiones están relacionadas entre sí.

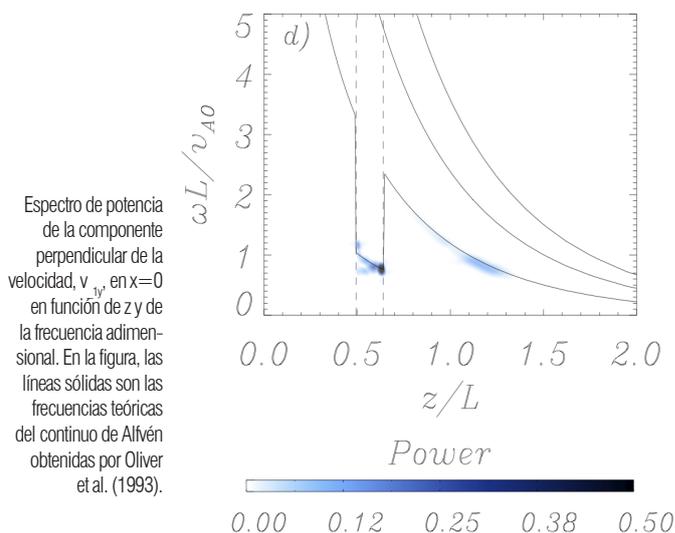
Cuando el modelo es puramente bidimensional, una perturbación inicial no es capaz de excitar los modos confinados del sistema. Al permitir la propagación tridimensional de las perturbaciones, básicamente tenemos dos resultados. El primero es que nuestro bucle es más eficiente a la hora de atrapar parte de la energía inicial en forma de oscilaciones verticales. El segundo es que debido al modelo de corona inhomogéneo que empleamos, el mecanismo de absorción resonante permite la atenuación de las oscilaciones verticales mediante la transferencia de energía desde el interior del bucle al medio coronal externo.

En la segunda parte de la tesis hemos investigado el uso de una nueva técnica para obtener los modos normales de un sistema a partir de los resultados temporales de simulaciones numéricas. Este método lo hemos aplicado a las oscilaciones transversales de un modelo de bucle coronal recto en el cual los modos normales pueden ser computados analíticamente. De este modo podemos comprobar si nuestro método nos permite recuperar los resultados analíticos además de ver cuáles son sus ventajas e inconvenientes.

El método es un proceso iterativo que consiste en la repetición de dos pasos. El primero es obtener los resultados numéricos de una simulación temporal. El segundo paso es hacer un análisis de funciones empíricas complejas ortogonales (CEOF) a los resultados temporales, que nos da una aproximación a los modos normales del sistema. En la primera iteración elegimos la aproximación proporcionada por CEOF al modo normal de nuestro interés y la empleamos como condición inicial para la simulación numérica de la segunda iteración. Repetimos el análisis CEOF y obtenemos una mejor aproximación al modo normal que nos interesa y, en consecuencia, una mejor condición inicial para la siguiente simulación numérica.

Mediante la aplicación repetida de este proceso, en cada iteración obtenemos una mejor aproximación de un modo normal. El proceso se detiene una vez que la diferencia entre dos aproximaciones sucesivas al modo normal está por debajo de un determinado valor prescrito. De este modo habremos obtenido los modos normales del sistema con el grado de precisión que deseemos.

Para el problema considerado en este trabajo, después de seis iteraciones la aproximación a la frecuencia y a las autofunciones del modo normal fundamental tienen una precisión superior al 0,7%, excepto para una autofunción que posee discontinuidades y que no puede ser recuperada con esta precisión tan elevada en la posición de dichas discontinuidades.



Caracterización del clima espacial a partir de registros del Observatorio Astronómico de Madrid (1876-1986)

Autor: Alejandro Jesús Pérez Aparicio
(ajpa@unex.es)

Tesis doctoral dirigida por: José Manuel Vaquerro Martínez y María Cruz Gallego Herrezuelo

Centro: Universidad de Extremadura

Fecha de lectura: 25 de octubre de 2019

Son numerosas las razones por las que el estudio del Sol es importante. En primer lugar, porque este astro constituye la principal fuente de energía del sistema climático de la Tierra. Su aporte de energía sustenta multitud de procesos naturales en nuestro planeta y hace posible la vida. En segundo lugar, el Sol es un tipo de estrella bastante común. Por lo tanto, lo que podemos aprender de él es extensible a todas las estrellas de su tipo. En tercer lugar, en los últimos años hay una gran preocupación por asuntos relativos al cambio climático. De modo que conocer la actividad solar de forma suficientemente precisa como para poder evaluar la contribución de nuestro astro al calentamiento global observado en los últimos 150 años es de suma importancia. En cuarto lugar, vivimos en una sociedad que desde hace más de un siglo es totalmente dependiente de los sistemas eléctricos y cada vez lo es más de tecnología apoyada en servicios ofrecidos por satélites. Y estos sistemas son altamente vulnerables a eventos violentos de actividad solar (tormentas solares). Por último, no hay que olvidar que todo ser vivo conforme se aleja de la superficie terrestre pierde protección de la atmósfera y de la magnetosfera terrestres, de forma que queda más expuesto a radiación y partículas energéticas (dañinas para la salud e incluso mortales) controladas fundamentalmente por la actividad solar.

El ciclo de actividad solar tiene una duración media de once años, por lo que el estudio de la actividad solar requiere series temporales que cubran grandes períodos de tiempo (de numerosos ciclos). Sin embargo, la mayoría de series de datos disponibles comienzan en la segunda mitad del siglo XX, por lo que cubren pocos ciclos solares. Por su parte, las manchas solares representan las más antiguas manifestaciones directas conocidas de la actividad solar. Existen registros telescópicos de ellas desde 1610. Por lo tanto, los índices basados en observaciones de manchas solares se extienden atrás en el tiempo varios siglos, siendo los índices de referencia en el estudio de la actividad solar de largo plazo o, como recientemente se ha denominado, "clima espacial". Entre estos índices destaca el número relativo de manchas solares (*Sunspot Number*, SN) con una serie temporal que comienza en 1700, el número de grupos de manchas solares (*Group Sunspot Number*, GSN), cuya serie contiene datos desde 1610, y el área total cubierta por manchas solares (*Sunspot Area*, SA), empezando en 1874. Estos índices están altamente correlacionados con los índices modernos de medida de la actividad solar global, por lo que permiten un seguimiento fiable de la actividad solar con una amplitud temporal mucho mayor que con cualquier otro índice.

Aparte de los anteriores índices, los cuales dan información a escala global del Sol, recientemente se está haciendo un esfuerzo por digitalizar catálogos de manchas solares. Estos muestran información individualizada sobre posición, área y tipología de cada mancha. De esta forma, se puede hacer un seguimiento de cada mancha, día a día, en su recorrido a lo largo del Sol. Esta información es sumamente valiosa para estudios de la dinámica solar (que, entre otros objetivos, tratan de simular el comportamiento magnético del Sol) y, también, para el estudio de regiones solares que fueron fuente de grandes tormentas solares. Estos eventos, en su forma más violenta, suceden con poca frecuencia, por lo que contar con registros que proporcionen información sobre las regiones que los originaron (generalmente grandes manchas solares) es de gran importancia.

En este contexto, durante más de cien años (1876-1986), el Observatorio Astronómico de Madrid hizo un seguimiento de la actividad solar realizando observaciones solares que fueron registradas en publicaciones internas del observatorio. El objetivo principal de esta tesis ha sido digitalizar estos datos para realizar un estudio del clima espacial de los últimos siglos. Con esta finalidad, hemos construido tres series temporales de los índices SN, GSN y SA a partir de los datos registrados en el mencionado observatorio. Posteriormente, estas tres series han sido analizadas y comparadas con otras internacionales, demostrando su fiabilidad. Por último, las hemos hecho disponibles a la comunidad científica internacional en formato electrónico. Los mismos procesos de digitalización, análisis y comprobación de fiabilidad han sido llevados a cabo con dos catálogos de manchas solares para los períodos 1914-1920 y 1952-1986, antes de haberlos hecho disponibles.

El programa de observación solar del Observatorio Astronómico de Madrid no solo se limitó a observaciones de manchas solares, sino que también se realizaron medidas de radiación solar directa a nivel de suelo durante el primer tercio del siglo XX. A este respecto, hemos digitalizado, analizado y seleccionado los valores fiables de esta serie, para después hacerla disponible. Este conjunto de datos puede considerarse una de las tres series de medidas pirheliométricas continuas más largas del primer cuarto del siglo XX en Europa y la única del sur del continente. Con esta serie, hemos analizado la transparencia atmosférica en Madrid para el período 1910-1929, revelando dos tendencias temporales estadísticamente significativas al 95% (un descenso con un mínimo en 1925 seguido de un ascenso) que concuerdan con los períodos recientemente propuestos de "early dimming" y "early brightening" en radiación solar en superficie encontrados en otros lugares de Europa. También en esta serie se ha detectado la influencia de la erupción del volcán Katmai en Alaska en junio de 1912, que redujo los valores de transparencia atmosférica en Madrid hasta febrero de 1914. Por último, mediante la serie de medidas pirheliométricas (I) y el *Sunspot Number* (SN), hemos estudiado la relación entre la actividad solar y la radiación solar que llega a la superficie terrestre. Un primer análisis de regresión entre estas dos únicas variables ofrece resultados físicamente incongruentes. Un segundo análisis, teniendo en cuenta cambios en transparencia atmosférica, muestra una correlación estadísticamente no significativa de I con SN del mismo orden de magnitud que la obtenida en el tope de la atmósfera. De estos resultados se deduce, primero, que el impacto que tiene la variabilidad solar en la radiación solar a nivel de suelo es tan bajo que los factores atmosféricos lo enmascaran y, segundo, que son necesarios análisis muy cuidadosos para no estimar erróneamente este impacto.

Espectroscopía de rayos X de cúmulos de galaxias en colisión

Autora: Igone Urdampilleta Aldama

Tesis doctoral dirigida por:

Jelle S. Kaastra y Jelle de Plaa

Centro: SRON (Netherlands Institute for Space Research) y Leiden University

Fecha de lectura: 13 de noviembre de 2019

Esta tesis se centra en el análisis espectral de cúmulos de galaxias en colisión y la actualización de un código (SPEX) para analizar futuras observaciones espectroscópicas de rayos X de alta resolución esperadas en las misiones XRISM y Athena. Este trabajo está dedicado a una mejor comprensión de dos aspectos concretos de estos cúmulos en colisión: uno, la correlación entre la componente térmica (rayos X) y la no térmica (radio), y dos, la historia de su enriquecimiento en metales. El primer tema puede revelar la asociación física de las componentes de rayos X y radio. El segundo puede arrojar luz sobre la historia dinámica de las colisiones y su papel en el enriquecimiento en metales de los cúmulos.

En primer lugar, mostramos el estudio en rayos X del cúmulo de galaxias en colisión Abell 3376 observado con *Suzaku*. Estudiamos la distribución espacial de la componente térmica del medio intracumular (ICM) incluyendo la periferia del cúmulo. Para este propósito obtenemos la distribución de la temperatura en cuatro direcciones radiales (norte, sur, este y oeste). Comparamos estas distribuciones con el perfil universal para cúmulos relajados y encontramos una desviación para todas las direcciones excepto para el sur, sugiriendo la posible presencia de ondas de choque en esas direcciones. Sin embargo, solo encontramos evidencias de dos ondas de choque al oeste y este. Una está asociada al “radio relic” del oeste con un número de Mach (M), $M_w \sim 2.8$, y la otra al “notch” del este con un $M_e \sim 1.5$. Detectamos además un frente frío (“cold front”) al este del pico de emisión de rayos X. El M_e es consistente con las observaciones de radio previas, mientras que el “radio relic” del oeste presenta un M_w ligeramente inferior, probablemente debido a los efectos de envejecimiento. Finalmente, estimamos el escenario de la colisión, el cual sugiere una colisión cerca del plano del cielo con una edad dinámica de ~ 0.6 Gyr después de cruzar el núcleo del subcúmulo principal.

En segundo lugar, investigamos las propiedades termodinámicas del plasma en el cúmulo de galaxias en colisión Abell 3365 usando observaciones de *XMM-Newton*. Para este propósito, primero buscamos discontinuidades en el brillo superficial y temperatura en las regiones periféricas y centrales del ICM. Segundo, obtenemos las distribuciones de temperatura, abundancia (Fe) y pseudoentropía a lo largo del eje de colisión en la región central. Encontramos dos ondas de choque prominentes ($M > 3$) asociadas al “radio relic” del este y al candidato de “radio relic” del oeste, además de un frente frío al oeste del pico de emisión de rayos X. La eficiencia de aceleración de la onda de choque en el “radio relic” del este es consistente con el mecanismo DSA (“Diffusive Shock Acceleration”), sugiriendo que es un escenario favorable para ondas de choque con $M > 3$. La distribución de abundancia presenta dos picos de valor $\sim 0.6 Z_\odot$. Uno se corresponde con la localización del subcúmulo principal y el otro está desplazado del pico de emisión hacia el frente frío, probablemente debido al

efecto de la colisión y a la dinámica interna del paso del frente de ondas. Además encontramos un mínimo de entropía que sugiere que el núcleo o “cool core” del cúmulo progenitor ha sobrevivido parcial o totalmente a la colisión.

En tercer lugar, presentamos el análisis espectral en rayos X de seis cúmulos de galaxias en colisión (CIZA J2242.8+5301, 1RXS J0603.3+4214, Abell 3376, Abell 3667, Abell 665 y Abell 2256) observados con *XMM-Newton*. Obtenemos las distribuciones de temperatura, abundancia (Fe) y pseudoentropía a lo largo del eje de colisión hasta r_{500} . De estas distribuciones derivamos el perfil promedio de Fe que presenta un pico moderado central, menor que los cúmulos relajados, seguido de una disminución hasta un valor uniforme de $\sim 0.2-0.3 Z_\odot$ para radios lejanos. Además, las distribuciones de pseudoentropía sugieren que en algunos casos el núcleo de baja entropía relativa puede sobrevivir a grandes colisiones. También estudiamos la correlación entre la abundancia y la pseudoentropía. Encontramos que existe una leve correlación para las regiones centrales, probablemente debido a que la actividad de la colisión esparce los metales. Sin embargo, no hay evidencias de ninguna correlación a radios lejanos, en la periferia de los cúmulos. Este resultado junto con la uniformidad de la abundancia parece aportar una evidencia adicional en favor del escenario de enriquecimiento temprano.

Por último, hemos actualizado el balance de ionización del software conocido como SPEX, utilizado en el análisis espectral de rayos X y desarrollado en SRON. Para ello hemos incluido 45 nuevas bases de datos con las secciones cruzadas de ionización para iones desde H a Zn, teniendo en cuenta los nuevos cálculos teóricos y nuevas medidas de laboratorio. Las secciones cruzadas del resto de iones que no tengan una base de datos han sido interpoladas o extrapoladas. En este estudio somos capaces de obtener por primera vez no solo la sección total, sino la sección de cada celda interna. Estas secciones cruzadas incluyen dos procesos radiativos diferentes: la ionización Directa (DI) y la Excitación-Autoionización (EA). Modelamos y ajustamos estos procesos de DI y EA con las ecuaciones extendidas de Younger y Mewe, respectivamente, para obtener los coeficientes de ajuste. Derivamos los coeficientes del cociente de ionización aplicando la integral a la distribución de velocidades Maxwelliana de estas ecuaciones. Finalmente, hemos incorporado los coeficientes de DI, EA y el cociente de ionización a SPEX v3.0.

Tesis disponible en:

https://personal.sron.nl/~igoneu/PhD_thesis_IUrdampilleta_Xray_spectroscopy_merging_clusters.pdf



Imagen compuesta (óptico, rayos X en naranja y radio en azul) del cúmulo de galaxias Abell 3376. Créditos: NASA/CXC/SAO/A. Vikhlinin y ROSAT (rayos X); DSS (óptico); NSF/NRAO/VLA/IUCAA/J. Bagchi (radio).

Caracterización de exoatmósferas con espectroscopía de transmisión

Autor: Alejandro Sánchez López

Tesis doctoral dirigida por:

Manuel López Puertas y Bernd Funke

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía - CSIC

Fecha de lectura: 29 de noviembre de 2019

En esta tesis hemos caracterizado las atmósferas de exoplanetas que transitan sus estrellas, en particular las de los Júpiteres calientes HD189733b y HD209458b. Este tipo de exoplanetas se encuentran en órbitas de periodo muy corto (apenas unos días o incluso horas) y, en algunos casos, pueden presentar temperaturas superiores a las de algunas estrellas. La velocidad orbital de estos cuerpos es muy alta (por encima de 140 km/s), por lo que su señal se observa con un desplazamiento Doppler grande y variable respecto a la absorción de la atmósfera terrestre. Utilizando modelos de absorción de las exoatmósferas (adaptados de los métodos existentes de resolución del transporte radiativo), podemos identificar la absorción de distintos compuestos en la exoatmósfera y obtener información esencial sobre su composición y temperatura.

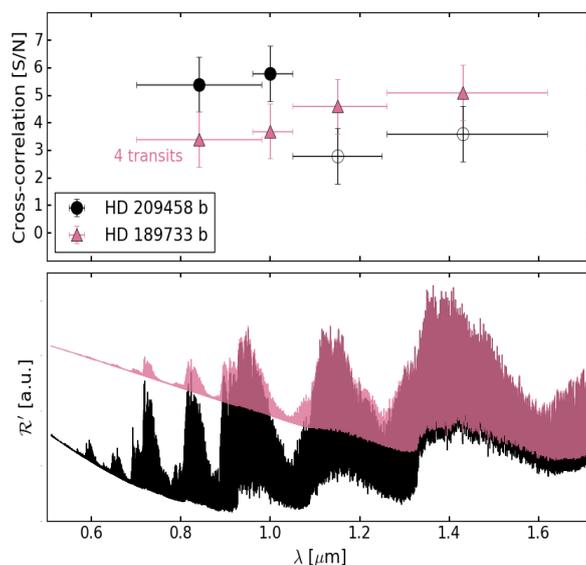
En la tesis hemos trabajado con datos de muy alta resolución tomados con el espectrógrafo CARMENES (Observatorio de Calar Alto, Almería) y hemos aplicado una técnica de correlación cruzada. Hemos identificado vapor de agua en ambos exoplanetas tanto en el infrarrojo como, por primera vez, en el óptico. Esto nos ha permitido demostrar la viabilidad de CARMENES (y de instrumentos similares en telescopios de 3,5 – 4 m) para identificar moléculas en exoatmósferas, algo no planeado en su diseño

originalmente. Además, hemos podido examinar también la dinámica de estas exoatmósferas, encontrando fuertes vientos que soplan desde sus caras iluminadas a las nocturnas. Combinando el estudio de bandas de absorción del vapor de agua de distinta intensidad y en distintas frecuencias, hemos podido explorar esta dinámica en distintas regiones atmosféricas. Así, obtenemos información sobre vientos a distintas alturas, que pueden contrastarse con modelos teóricos. A través de esta comparación de bandas, hemos realizado también la primera distinción entre exoatmósferas claras y brumosas a través de la inferencia de aerosoles en HD189733b, que no se encuentran en HD209458b.

En general, en esta tesis hemos contribuido a expandir el entendimiento de las atmósferas de estos ardientes gigantes gaseosos, un paso necesario para establecer las bases del estudio de planetas más fríos y pequeños. En el futuro, el refinamiento y adaptación de estas potentes técnicas de análisis a los nuevos telescopios e instrumentos terrestres nos conducirá a la caracterización de mundos alienígenas parecidos a la Tierra.

Tesis disponible en:

<https://digital.csic.es/handle/10261/196863>



Panel superior: Relación señal/ruido (S/N) de la señal de vapor de agua obtenida en diferentes intervalos de longitud de onda (indicados por barras horizontales) para HD209458b (círculos negros) y HD189733b (triángulos magentas) con CARMENES. Las incertidumbres a 1σ están indicadas por las barras verticales. Los resultados en la región espectral 0.96–1.71 μm se han obtenido con un tránsito para ambos exoplanetas (publicados en Sánchez-López et al., 2019 y Alonso-Floriano et al., 2019). Los resultados en la región espectral 0.70–0.98 μm son una actualización del trabajo preliminar realizado en la tesis y serán próximamente enviados a una revista de alto impacto. Panel inferior: Ejemplo de modelos de transmisión de vapor de agua durante un tránsito para una atmósfera clara (negro) y brumosa (magenta). La mayor señal a longitudes de onda cortas en HD209458b, comparado a HD189733b, es indicativa de la mayor transparencia de la atmósfera del primero.

Una visión multifrecuencia de Núcleos de Galaxias Activas

Autor: Ignacio Ordovás Pascual

Tesis doctoral dirigida por: Silvia Mateos

Ibáñez y Francisco J. Carrera Troyano

Centro: Universidad de Cantabria

Fecha de lectura: 17 de diciembre de 2019

En esta tesis estudiamos la relación entre la extinción en el UV/óptico (A_V) y la absorción (NH) medida en rayos X de Núcleos Galácticos Activos (AGN) de tipo 1 (es decir, con líneas anchas de emisión en el óptico/UV). La caracterización del oscurecimiento de la emisión nuclear es un aspecto importante en el estudio de AGN ya que es necesaria para poder recuperar su emisión intrínseca y propiedades derivadas de ella. Además nos permite comprender las propiedades del medio que rodea al agujero negro supermasivo en su centro. A día de hoy sigue habiendo incógnitas acerca del oscurecimiento en AGN y por tanto de la validez de los modelos que pretenden explicar su diversas variedades basados en la orientación del toro.

En esta tesis doctoral hemos realizado un estudio centrado en AGN de tipo 1 del muestreo de AGN *Bright Ultra-hard XMM-Newton Survey* (BUXS), seleccionado en la banda de 4,5-10 keV. Esta selección permite tener una muestra de AGN de tipo 1 casi completa para AGN no oscurecidos y con absorciones en rayos X bajas. No debería introducir ningún sesgo importante en la muestra de tipos 1 porque no se espera que haya objetos con estas NH y además se espera que A_V y NH estén correlacionados. Disponemos de datos en rayos X de *XMM-Newton* de buena calidad para todos los objetos, así como de espectros en el UV/óptico del muestreo público *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) y observaciones dedicadas de diversos telescopios terrestres. La identificación espectroscópica de las fuentes de BUXS es casi completa (>99% de fuentes identificadas).

Hemos planteado dos estudios diferentes. En el primero tenemos dos AGN de tipo 1,9 (A_V elevada), pero sus espectros en rayos X muestran bajo NH, por lo que estudiamos esta discrepancia. En el segundo estudio hemos llevado a cabo un análisis estadístico de una muestra representativa de 132 AGN de tipo 1, excluyendo los AGN con $L(2-10 \text{ keV}) < 10^{42} \text{ erg/s}$ y $z > 1$.

Para el estudio científico que hemos llevado a cabo, analizamos los espectros ópticos y de rayos X para obtener A_V y NH, además de la luminosidad intrínseca de los AGN y de determinadas líneas de emisión y de la dispersión de velocidades de la región de líneas anchas. Para el estudio estadístico de AGN de tipo 1 hemos obtenido las distribuciones individuales de probabilidad de A_V y NH para cada objeto, siendo el primer estudio que utiliza estas distribuciones para el análisis del oscurecimiento de los AGN.

En el primer estudio, hemos obtenido que los tipos 1,9 con bajo NH no forman una familia física de objetos, al

obtener que la discordancia para cada uno es debida a diferentes factores. En uno de los casos, la explicación más probable es que el medio que oscurece la emisión nuclear tiene más polvo que gas comparado con un medio con una composición similar a la Galáctica. En cuanto al segundo objeto, la discrepancia se debe a efectos de dilución de la emisión nuclear por la emisión estelar.

En cuanto al estudio estadístico de tipos 1, hemos obtenido una relación creciente entre subtipos de AGN (de 1,0 a 1,9) y oscurecimiento, tanto en el rango óptico como en rayos X. Además encontramos que la fracción de objetos extinguidos en el óptico y absorbidos en rayos X es significativamente mayor en la submuestra de la que disponemos de clasificación completa (aquellos con $z < 0,2$) que en la muestra total de tipos 1 (40-50% frente a 20%). Nuestros resultados indican que si no se usan muestras con clasificación completa existe un sesgo contra los AGN más oscurecidos.

Hemos analizado la fiabilidad de los métodos que estiman la extinción óptica usando el "decremento Balmer", obteniendo que no es un buen indicador de A_V . Estos resultados están en concordancia con estudios que sostienen que el cociente intrínseco de los flujos de las líneas anchas puede variar de unos objetos a otros dependiendo de las condiciones físicas de la región de líneas anchas. Por tanto, las estimaciones del A_V basadas en el decremento Balmer deben ser tomadas con precaución.

En cuanto a la relación A_V -NH, los resultados obtenidos muestran que no hay una relación clara entre la extinción óptica y la absorción en rayos X. Este resultado favorece modelos que asumen que la absorción en rayos X y la extinción en el óptico se producen mayoritariamente en estructuras diferentes, o alternativamente que los cocientes A_V /NH pueden ser muy distintos de fuente a fuente.

Por último, encontramos un mínimo de un 47% de objetos con un cociente de polvo/gas más alto que el Galáctico para la muestra completa. Si usamos únicamente los tipos 1,0/2/5, como hacen otros trabajos, esta fracción mínima es de un 32%, que sigue siendo más alta que la de estudios anteriores. Esta elevada fracción de objetos con A_V /NH más altos que el cociente Galáctico comparada con estudios anteriores puede ser debida a la clasificación equivocada de tipos 1 como tipos 2, por métodos de selección que sesgan la muestra en contra de AGN con extinción elevada.

Tesis disponible en <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/18024>

GALANTE: sistema fotométrico y cartografiado del plano Galáctico

Autor: Antonio Lorenzo Gutiérrez
(alorenzogutierrez@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Emilio Javier Alfaro Navarro y Jesús Maíz Apellániz

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y Universidad de Granada

Fecha de lectura: 17 de diciembre de 2019

El trabajo plasmado en esta tesis se desarrolla dentro del proyecto GALANTE, cuyo objetivo principal es realizar un cartografiado fotométrico de una banda de 6 grados de anchura centrada en el disco Galáctico al norte de la vecindad solar, definido por $\delta \geq 0^\circ$ y $|b| \leq 3^\circ$. El sistema fotométrico GALANTE consta de siete bandas que cubren el rango óptico desde los 3000 Å hasta los 9000 Å con el fin de optimizar la clasificación espectral y la determinación de las variables físicas (T_{eff} , $\log(g)$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ y extinción) para las estrellas observadas (Maíz Apellániz & Barbá, 2018a; Maíz Apellániz & Sota, 2008; Maíz Apellániz et al., 2014). GALANTE nace a partir de la iniciativa del observatorio de Javalambre del Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA) en Teruel para desarrollar dos proyectos astronómicos como son J-PLUS (Cenarro et al., 2019) y J-PAS (Benítez et al., 2014), con 2 telescopios de 80 cm y 250 cm respectivamente, que abrió un nicho para la realización de este proyecto. El objetivo principal de J-PAS es cosmológico, buscando medir el espectro de las Oscilaciones Acústicas de Bariones (BAOs) mediante estimaciones fotométricas del desplazamiento al rojo (Benítez et al., 2014), mientras que J-PLUS nació con la idea de hacer un cartografiado auxiliar para calibrar J-PAS (Cenarro et al., 2018). Los siete filtros GALANTE son una combinación de bandas intermedias y estrechas, de los cuales cuatro son comunes con J-PLUS (F348M, F515N, F660N y F861M) y tres son de diseño propio (F420N, F450N y F665N). Esta selección de filtros componen un sistema óptimo para cumplir los objetivos propuestos por Maíz Apellániz (2017), pudiendo determinarse con precisión la temperatura efectiva para estrellas calientes, así como la gravedad y metalicidad (para las estrellas tardías más frías que 10 000 K) permitiéndonos discriminar entre gigantes, supergigantes, enanas y metalicidad solar o superior (SMC).

Esta tesis se centra en el estudio de la asociación de Cygnus OB2, pues estos fueron los primeros datos completos obtenidos para la misma. Para ello, se ha descrito el sistema fotométrico GALANTE y su caracterización, con el fin de estudiar y conocer la particularidad de sus filtros (Lorenzo-Gutiérrez et al., 2019).

Tras esta descripción y caracterización fotométrica, obtenemos las ecuaciones de transformación entre GALANTE y *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS; Fukugita et al., 1996; Smith et al., 2002) mediante fotometría sintética a partir de los catálogos observacionales *Next Generation Spectral Library* (NGSL; Gregg et al., 2006; Heap & Lindler, 2016) y MAW (Maíz Apellániz & Weiler, 2018). Con estas ecuaciones, usamos una pequeña región de Cygnus OB2 para obtener los puntos cero con una calibración preliminar usando el

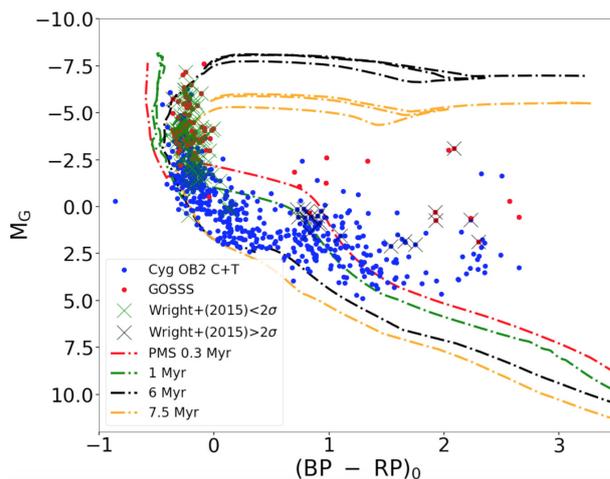
catálogo de SDSS y ATLAS (*All-Sky Stellar Reference Catalog RefCat2*; Tonry et al., 2018), concluyendo que la mejor calibración se obtiene con RefCat2 debido a su precisión interna y bajos errores sistemáticos (Lorenzo-Gutiérrez et al., 2019). Con la llegada y reducción de los primeros datos GALANTE, obtuvimos la fotometría instrumental de una fracción de Cygnus OB2, gracias al preprocesamiento de estas imágenes por parte del CEFCA y con un algoritmo creado a partir de paquetes de IRAF con los cuales obtenemos el flujo de los objetos en las imágenes del T-80. Aquí obtenemos una calibración de puntos cero preliminar usando nuestras ecuaciones de transformación.

Siguiendo los objetivos de GALANTE, elaboramos un algoritmo capaz de derivar los parámetros físicos estelares a partir de la fotometría GALANTE, al que llamamos MASTER (*Monte Carlo Astrophysics Studio for galante colours*), haciendo uso de seis bandas normalizadas, utilizando como figura de mérito el estadístico χ^2 . Para probar cómo funciona nuestra metodología, hacemos pruebas con los catálogos de modelos de Kurucz (Castelli et al., 1997), TLUSTY (Lanz & Hubeny, 2003), Coelho (Coelho, 2014) y KOESTER (Koester, 2010) para analizar los errores sistemáticos e internos de MASTER. Además, utilizamos estos catálogos para realizar una prueba con el catálogo observacional *Next Generation Spectral Library* (NGSL), haciendo un análisis de los valores obtenidos para las variables físicas estelares de las estrellas que lo componen tras introducirlo en MASTER (Lorenzo-Gutiérrez et al., 2020).

Tras estudiar el comportamiento de MASTER con el catálogo NGSL, obtuvimos la fotometría de todos los campos observados para Cyg OB2, calibrando ahora con un método más refinado, un total de 5,6 grados cuadrados en esta región, obteniendo un total de 6765 estrellas. Seguidamente, introducimos nuestro catálogo en MASTER para derivar los parámetros físicos de esas estrellas. Con los resultados obtenidos, tanto en los valores de χ^2 como de temperaturas efectivas, repasamos la bibliografía en esta región, tanto de datos espectroscópicos como fotométricos. El uso del catálogo de *Gaia* DR2 (Evans et al., 2018; *Gaia Collaboration* et al., 2016, 2018) nos permite utilizar distancias con las que, además de estudiar cómo se distribuye la extinción en nuestro cono de observaciones, podemos representar diferentes isocronas para derivar la edad de las estrellas que observamos y obtener interesantes resultados de su evolución.

Tesis disponible en:

<https://www.educacion.gob.es/teseo/mostrarRef.do?ref=1823382>



Exocometas: estudio del entorno gaseoso de estrellas tipo A en secuencia principal

Autora: Isabel Rebolledo Vázquez

Tesis doctoral dirigida por: Eva Gloria Villaver

Sobrinó y Benjamín Montesinos Comino

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 24 de enero de 2020

En las estrellas de secuencia principal, los excesos fotométricos en el infrarrojo atribuidos a la presencia de polvo circunestelar en los discos conocidos como *debris* o escombro ha sido la única prueba empírica indirecta de la existencia de cuerpos menores durante más de 40 años. No fue hasta 1987 cuando se encontró la primera evidencia de la presencia de exocometas en el entorno de la estrella Beta Pictoris, al detectarse absorciones variables no fotosféricas superpuestas a las líneas estelares de Ca II. Desde entonces, el número de estrellas conocidas con absorciones tipo exocometario ha crecido lentamente, hasta llegar a 20 estrellas con detecciones, todas ellas de tipo A. El crecimiento del campo exoplanetario y la posible relevancia de los cuerpos menores en la configuración, composición y arquitectura de los sistemas planetarios han vuelto a llamar la atención de la comunidad científica hacia el estudio de cuerpos pequeños alrededor de estrellas distintas al Sol. Además, recientemente se han publicado las primeras detecciones de cuerpos exocometarios en curvas de luz fotométrica a partir de datos tomados por misiones de búsqueda de exoplanetas como Kepler y TESS. Las detecciones en fotometría utilizando las curvas de luz de estos observatorios espaciales, además de proporcionar una nueva metodología, han demostrado que los exocometas están presentes alrededor de estrellas de diferentes tipos espectrales en la secuencia principal.

En esta tesis se lleva a cabo el primer estudio espectroscópico sistemático cuyo objetivo es el de detectar actividad exocometaria alrededor de estrellas de secuencia principal. Los objetivos principales son, primero, agrandar la muestra de estrellas conocidas con exocometas y segundo, determinar las posibles características ambientales de los sistemas exocometarios que podrían ayudar a comprenderlos y detectarlos.

Para ello se seleccionó una gran muestra de estrellas para buscar señales exocometarias, donde se inspeccionaron alrededor de 1500 espectros ópticos de alta resolución de 117 estrellas con tipos espectrales de G hasta B. Aunque la muestra estaba sesgada hacia estrellas con evidencias de material circunestelar, este es, a nuestro entender, el estudio exocometario más grande realizado hasta la fecha, que permite por primera vez evaluar la posible dependencia de la presencia de exocometas con las características del entorno circunestelar. Como resultado de este estudio, se ha encontrado variabilidad de tipo exocometario en seis nuevas estrellas, aumentando de 20 a 26 (un 30%) la cantidad de estrellas con evidencias de presencia de exocometas conocidas antes de este trabajo. También hemos detectado variaciones no fotosféricas en Ca II y en algunos casos en las líneas de Na I, en otras 12 estrellas en las que ya se habían detectado variaciones espectroscópicas con anterioridad. Sin embargo, no encontramos ninguna evidencia sólida que relacione la presencia de un disco de *debris* con la actividad exocometaria.

Por otra parte, se analizó la presencia de absorciones estrechas no fotosféricas estables en aquellos sistemas donde se había detectado previamente gas frío en longitudes de onda de infrarrojo lejano o (sub-)mm y se encontró una dependencia con el ángulo de inclinación del sistema, probando que ambos tipos de gas coexisten y probablemente tienen un origen común como la sublimación (o colisiones) de cuerpos pequeños.

Finalmente, hemos realizado un análisis más profundo de tres objetos (Phi Leo, HR10 y HD37306) que seleccionamos de la muestra original debido a que las absorciones variables no fotosféricas detectadas se originan a partir de diferentes mecanismos. Phi Leo es la estrella más variable en nuestra muestra, con cambios en las líneas en escalas de tiempo de horas. Una frecuencia comparable a la de la estrella Beta Pic y muy probablemente originada en cuerpos exocometarios. En el caso de HR10, una de las estrellas con exocometas más estudiadas hasta la fecha, se observó periodicidad en sus variaciones, consistente con el hecho de que la estrella sea realmente una binaria. HD37306 muestra una variabilidad de mayor duración y cuyas anchuras equivalentes y profundidades de las líneas son mayores que las observadas en exocometas y presentan características similares a las observadas en las estrellas de tipo *shell*. El origen de este tipo de variaciones sigue sin estar claro, aunque podrían deberse a la presencia de un disco circunestelar cercano.

Tesis disponible en:

<https://zenodo.org/record/3690842#.Xp3lji-b6qA>

Página opuesta: Representación de un grupo de estrellas OB de la región de CygOB2, cuyas propiedades físicas han sido derivadas en esta tesis. Mostramos nuestros resultados fotométricos utilizando los catálogos de modelos de Coelho + TLUSTY (C+T) en comparación con los derivados de los catálogos espectroscópicos de GOSSS (Maíz Apellániz et al., 2019b; Sota et al., 2013) y Wright et al. (2015). Representamos las isocronas de PARSEC (Marigo et al., 2017; secuencia principal) y MIST (Choi et al., 2016; Dotter, 2016), mostrando que obtenemos estrellas de presecuencia principal, como ya indicaban trabajos previos (Hanson, 2003).

Efectos circunestelares y cocientes isotópicos en estrellas AGB ricas en oxígeno

Autor: Víctor Pérez Mesa
(victorperme@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Domingo Aníbal
García-Hernández y Olga Zamora

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 17 de enero de 2020

Esta tesis trata varios temas relacionados con el estudio de las estrellas pertenecientes a la rama asintótica de gigantes (AGB, de sus siglas en inglés *asymptotic giant branch*) más masivas y ricas en oxígeno en nuestra Galaxia. En particular, los principales objetivos son la exploración de los efectos circunestelares en la determinación de las abundancias químicas en estrellas AGB masivas a metalicidad solar usando modelos de atmósfera pseudodinámicos más realistas y la obtención, por primera vez, de las abundancias elementales e isotópicas de CNO en estrellas AGB Galácticas verdaderamente masivas.

En primer lugar, hemos determinado las abundancias de Rb y Zr en una muestra de estrellas AGB Galácticas y masivas, previamente estudiadas con modelos hidrostáticos, usando modelos de atmósfera extensos que consideran la presencia de una envoltura circunestelar con un viento radial. Las nuevas abundancias de Rb son mucho más bajas que las obtenidas a partir de modelos hidrostáticos, mientras que las abundancias de Zr son parecidas a las hidrostáticas porque la cabeza de banda 6474 Å ZrO usada para derivar las abundancias de Zr se forma en capas más internas de la atmósfera y está menos afectada por efectos circunestelares que la línea 7800 Å Rb I. Las nuevas abundancias de [Rb/Fe] y cocientes de [Rb/Zr] se comparan mucho mejor con las predicciones teóricas, resolviendo significativamente el problema previo de la discordancia entre las observaciones y los modelos de nucleosíntesis en las estrellas AGB más masivas y confirmando que la reacción $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ es la principal fuente de neutrones en estas estrellas.

En segundo lugar, presentamos nuevas abundancias hidrostáticas y pseudodinámicas de Li y Ca en una muestra de estrellas AGB masivas y ricas en oxígeno de nuestra Galaxia

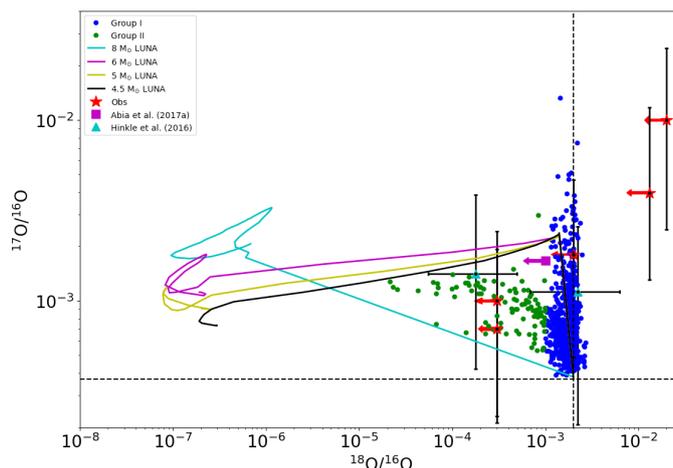
usando los nuevos modelos de atmósfera extensos (pseudodinámicos). Las abundancias de Li a partir de modelos de atmósfera extensos son muy similares a las obtenidas con modelos hidrostáticos, confirmando el carácter rico en litio (incluso súper rico en litio en algunas estrellas) de nuestra muestra de estrellas y la fuerte activación del proceso HBB (de sus siglas en inglés *hot bottom burning*) en estrellas AGB masivas. Esto está de acuerdo con la mayoría de modelos de nucleosíntesis de estrellas AGB. Las abundancias de Ca, las cuales han sido derivadas aquí por primera vez en estrellas AGB masivas de nuestra Galaxia, son consistentes con las predicciones de modelos de nucleosíntesis de procesos "s" para estrellas AGB masivas a metalicidad solar. Una minoría de estrellas muestra una cantidad significativa de Ca agotado y damos posibles explicaciones a esta aparente e inesperada disminución de Ca.

Por último, hemos obtenido, por primera vez mediante síntesis espectral, las abundancias y cocientes isotópicos de CNO en una muestra de estrellas AGB masivas y ricas en oxígeno de nuestra Galaxia al principio de la fase de pulsos térmicos (TP, de sus siglas en inglés *thermally pulsing*). Además, hemos encontrado que la presencia de una envoltura circunestelar y viento radial no afecta a la determinación de las abundancias elementales/isotópicas de CNO en el infrarrojo cercano. Las abundancias elementales/isotópicas de CNO derivadas están generalmente de acuerdo con las predicciones teóricas para estrellas AGB muy masivas (7-8 masas solares) a metalicidad solar que experimentan HBB en los primeros pulsos térmicos. En particular, las grandes sobreabundancias de N y los bajos cocientes $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ confirman la activación del HBB independientemente de las sobreabundancias de Li. Además, dos estrellas de la muestra parecen ser descendientes de estrellas progenitoras de ocho masas solares con HBB pero que no han experimentado ningún pulso térmico. Por lo tanto, estas estrellas son muy buenas candidatas a ser verdaderas estrellas súper-AGB. También, hemos comparado nuestros cocientes isotópicos de O con medidas hechas en granos presolares. La composición isotópica de O en dos estrellas refuerza la idea de que las estrellas AGB más masivas podrían ser el lugar de formación de los granos del Grupo II. Sin embargo, las grandes incertidumbres y nuestros límites inferiores conservativos para los cocientes de O en el resto de estrellas de la muestra no nos permiten obtener una respuesta definitiva acerca del origen de los granos del Grupo II.

Tesis disponible en:

https://www.dropbox.com/s/aaynjej2awoxs5j/Tesis_Victor_Perez_Mesa_040220.pdf?dl=0

Cocientes isotópicos observados en nuestra muestra de estrellas (estrellas rojas), granos presolares del Grupo I (puntos azules) y II (puntos verdes) y la evolución de los cocientes de O en la superficie estelar de los modelos Monash de estrellas AGB con diferentes masas (líneas sólidas). Además, hemos representado los cocientes isotópicos de SV Cas y RU Cyg (triángulos cian) y V1415 Aql (cuadrado magenta) derivados en Hinkle et al. (2016) y Abia et al. (2017a), respectivamente. La línea discontinua negra indica los valores de los cocientes de O solares, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O} = 3.704 \times 10^{-4}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 2.008 \times 10^{-3}$.





El radiotelescopio Parkes, primero en el mundo en detectar un Estallido Rápido de Radio (FRB).
Créditos: Tim Ruckley.



**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