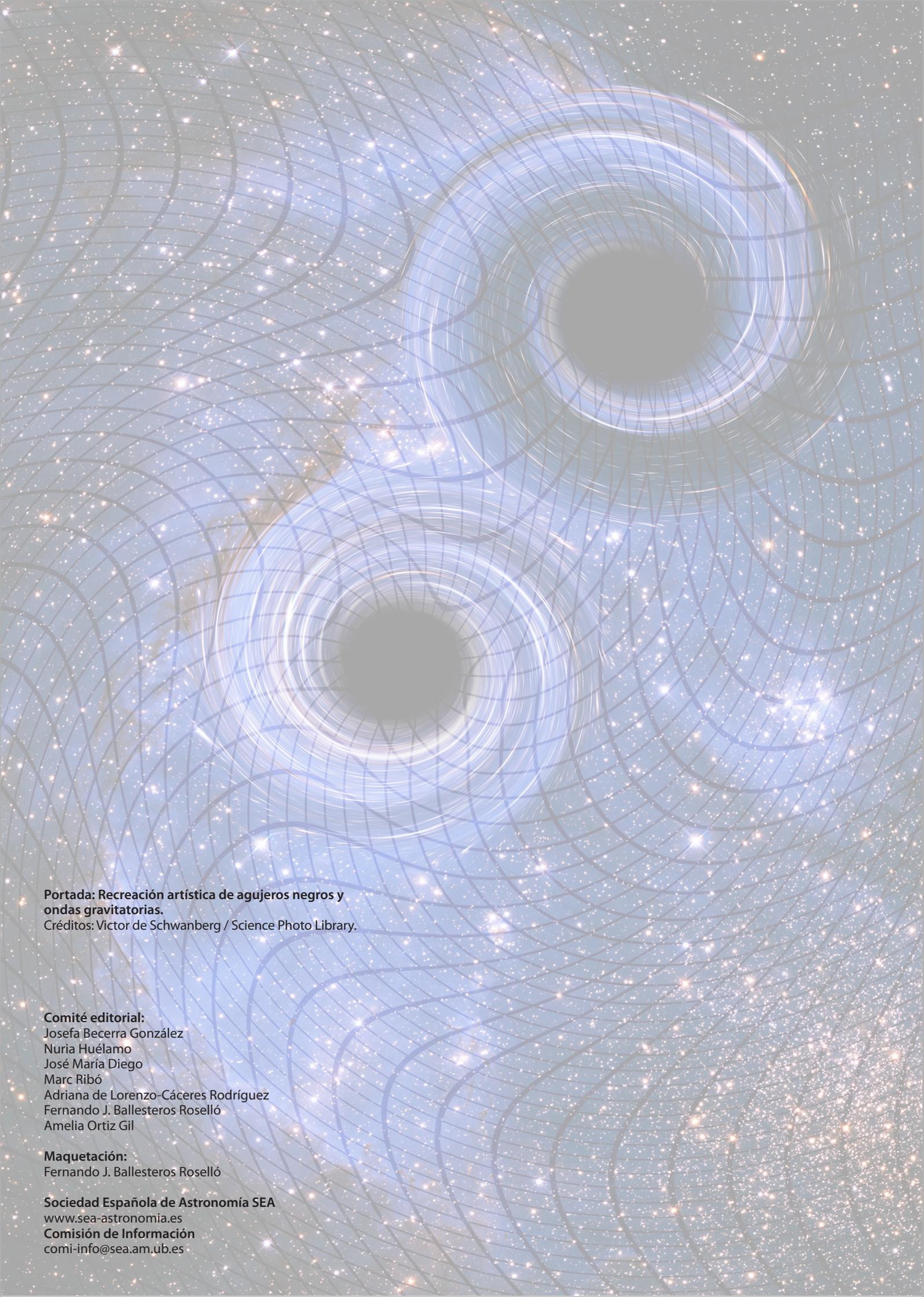


SEA

Sociedad Española de Astronomía

The image is a full-page artistic rendering of black holes and gravitational waves. It features a blue-toned background filled with a dense field of stars. Overlaid on this is a complex grid of lines that warp and curve around two prominent black holes, which appear as dark, circular voids with glowing, multi-colored accretion disks. The grid lines represent the curvature of spacetime caused by the massive objects. The overall effect is a dynamic and visually rich representation of these astrophysical phenomena.

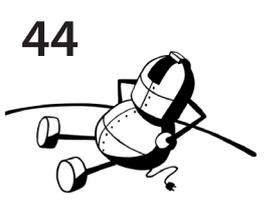
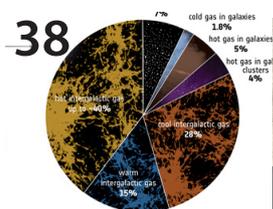
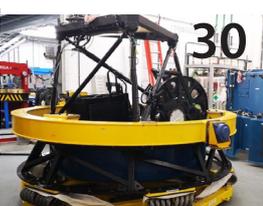
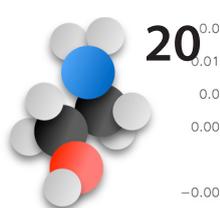
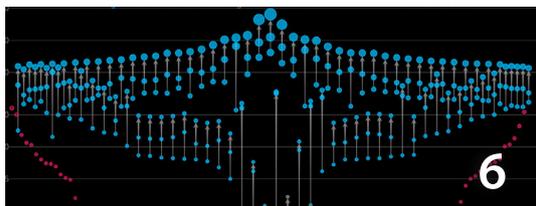
Portada: Recreación artística de agujeros negros y ondas gravitatorias.
Créditos: Victor de Schwanberg / Science Photo Library.

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

Maquetación:
Fernando J. Ballesteros Roselló

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

CONTENIDOS



- 5 Editorial
- 6 Observaciones de ondas gravitacionales por la colaboración LIGO-Virgo-KAGRA
- 16 Cartografiando el Universo
- 20 Detección de etanolamina, un precursor de fosfolípidos en el medio interestelar
- 24 La ESO en la próxima década
- 30 El nuevo OSIRIS
- 38 De imágenes del futuro satélite Euclid a resultados científicos: cómo lograrlo
- 42 Cielos oscuros y silenciosos para la ciencia y la sociedad
- 44 Robots que estimulan mentes científicas
- 52 Famelab 2021: Descubre a nuestras astrónomas
- 56 Ecos de (la) Sociedad
- 57 Libros
- 58 Tesis doctorales

Erupción del volcán Cumbre Vieja en
La Palma, presidida por la Vía Láctea.
Créditos: Imanol Zuaznabar.



En este nuevo número del boletín además de los diferentes temas de interés astronómico, que gracias a los compañeros trabajando en la primera línea nos hacen llegar de forma sencilla y amena, no podemos dejar de mencionar un tema mucho más terrenal. El pasado 19 de septiembre nació el volcán Cumbre Vieja situado en la isla de La Palma. Dada la importancia de la isla y sus observatorios en nuestro campo de investigación, tantas noches que muchos de nosotros hemos pasado escudriñando su cielo, y disfrutando de los encantos de la isla, no podemos dejar de sentir como propias las desventuras de su población. Desde aquí, nos gustaría poner en valor y agradecer el trabajo de todo el personal con base en la isla. Mucho ánimo y esperemos que la situación mejore lo antes posible.

Uno de los grandes hitos científicos que hemos tenido la suerte de vivir, es la detección de las primeras ondas gravitacionales. Nuestros protagonistas españoles en este hito histórico presentan un análisis sobre el estado del campo y su futuro. Hablamos también de cosmología, con cartografiados del universo y futuras misiones como Euclid. Hacemos una breve inmersión en el apasionante mundo de la astrobiología, en busca de compuestos químicos esenciales para el desarrollo de la vida.

Sin duda el desarrollo de instrumentación es fundamental para poder seguir avanzando. Conocemos de primera mano los planes de desarrollo de la ESO durante la próxima década. Aprovechando la actualización del instrumento OSIRIS del GTC, hacemos un poco de retrospectiva desde su diseño a su explotación científica.

Uno de los temas candentes sobre política científica, y que nos atañe de manera directa, es la protección de los cielos oscuros. Este tema está especialmente de relieve debido al impacto de las constelaciones de satélites sumado a otras fuentes de polución lumínica. Nos ponemos al día sobre las acciones planteadas por la IAU y la Oficina de Naciones Unidas.

En este número contamos con dos proyectos apasionantes de divulgación astronómica: el proyecto educativo PETeR y la participación de dos de nuestras compañeras como finalistas en el certamen internacional de monólogos científicos Famelab. Esta vez Enric Marco nos invita a un apasionante viaje al centro de un agujero negro con la reseña del libro. Encontrarán también la sección Ecos de Sociedad y la recopilación de las tesis más recientes de la mano de Amelia Ortiz y Adriana de Lorenzo.

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

OBSERVACIONES DE ONDAS GRAVITACIONALES

Hace ya más de seis años, el Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) capturó la primera onda gravitacional de la historia, GW150914, emitida en la coalescencia de dos agujeros negros. Desde entonces la observación de ondas gravitacionales de colisiones de agujeros negros en sistemas binarios se ha convertido en algo rutinario, lo que ha dado paso a una nueva forma de astronomía, con importantes implicaciones en muchas áreas de la física.



José A. Font

Dp. Astronomía y Astrofísica/OAUV, U. de Valencia
J.Antonio.Font@uv.es

Sascha Husa

Universitat de les Illes Balears
sascha.husa@uib.es

Mario Martínez

Institut de Física d'Altes Energies (IFAE)
mmp@ifae.es

Alicia Sintés

Universitat de les Illes Balears
alicia.sintes@uib.es

Sin embargo, hace apenas seis años todavía se albergaban dudas de la existencia de tal tipo de radiación, originalmente postulada en la Teoría General de la Relatividad de Albert Einstein en 1916. Además de los dos detectores Advanced LIGO, situados en Livingston (Louisiana, EE.UU.) y en Hanford (Washington, EE.UU.), el detector europeo Advanced Virgo, emplazado en Cascina (Italia), también contribuye a las detecciones desde finales de la segunda campaña de observación, O2 (concluida en agosto de 2017). Combinando los tres observatorios no solo aumenta nuestra confianza en el origen astrofísico de las señales (al minimizar las perturbaciones locales asociadas a efectos instrumentales y del entorno), sino que también es posible localizar en el cielo las fuentes que emiten las ondas gravitacionales con una precisión de hasta unas pocas decenas de grados cuadrados, lo que permite el seguimiento observacional posterior de las fuentes mediante telescopios "tradicionales" en todo el rango del espectro electromagnético. Esta posibilidad, esperada con mucha antelación por ambas comunidades científicas, se tornó realidad con la espectacular detección de [GW170817](#), señal gravitacional asociada a la colisión de dos estrellas de neutrones en un sistema binario en la galaxia NGC 4993 en la dirección de la constelación de Hydra. La fuente, GW170817/GRB 170817A/AT 2017gfo, observada por unos 200 telescopios tanto terrestres como espaciales, desde las frecuencias de los rayos gamma (GRB 170817A) hasta las de las ondas de radio, ha dado origen a la llamada [Astronomía de Mensajeros Múltiples](#). La astronomía española tuvo una participación muy relevante en las observaciones de esta fuente.

La red de detectores de ondas gravitatorias formada por Advanced LIGO y Advanced Virgo cuenta desde finales de la tercera campaña de observación, O3, con un nuevo instrumento, el interferómetro japonés KAGRA lo que, de nuevo, mejorará las posibilidades de localización de las fuentes y la significancia estadística del origen astrofísico de las detecciones. La campaña de observación O3 ha sido la más larga de las realizadas hasta la fecha. Inicialmente la misión iba a prolongarse durante 12 meses, incluyendo en este periodo un parón de un mes por mantenimiento de los instrumentos en octubre de 2019. O3 comenzó el 1 de abril de 2019 y finalizó unos días antes de la fecha originalmente prevista, el 30 de abril de

POR LA COLABORACIÓN LIGO-VIRGO-KAGRA

2020, a consecuencia de la pandemia global de COVID-19. El análisis de los datos recogidos durante los dos periodos de observación precedentes, O1 (desde el 12 de septiembre de 2015 hasta el 19 de enero de 2016) y O2 (desde el 30 de noviembre de 2016 hasta el 25 de agosto de 2017), produjo 11 señales (y 14 eventos marginales). Todas ellas, excepto GW170817, proceden de colisiones de agujeros negros en sistemas binarios. Durante la primera mitad de O3 (O3a; 1 de abril de 2019 a 1 de octubre de 2019) el número de detecciones anunciadas ha sido de 39. Todas ellas cumplen con el criterio de

un umbral de dos eventos de falsa alarma al año establecido por la colaboración para cada uno de los cuatro pipelines empleados en las búsquedas. El rápido crecimiento en el número de detecciones aparece ilustrado en la Figura 1 que muestra la cuenta acumulada de eventos desde el inicio de O1 hasta el final de O3a. Muy recientemente, la Colaboración LIGO-Virgo-KAGRA (LVK, por sus siglas en inglés) ha anunciado los resultados del estudio de los datos correspondientes a la segunda mitad de O3 (O3b; 1 de noviembre de 2019 a 27 de marzo de 2020), que incluye 35 nuevas detecciones.

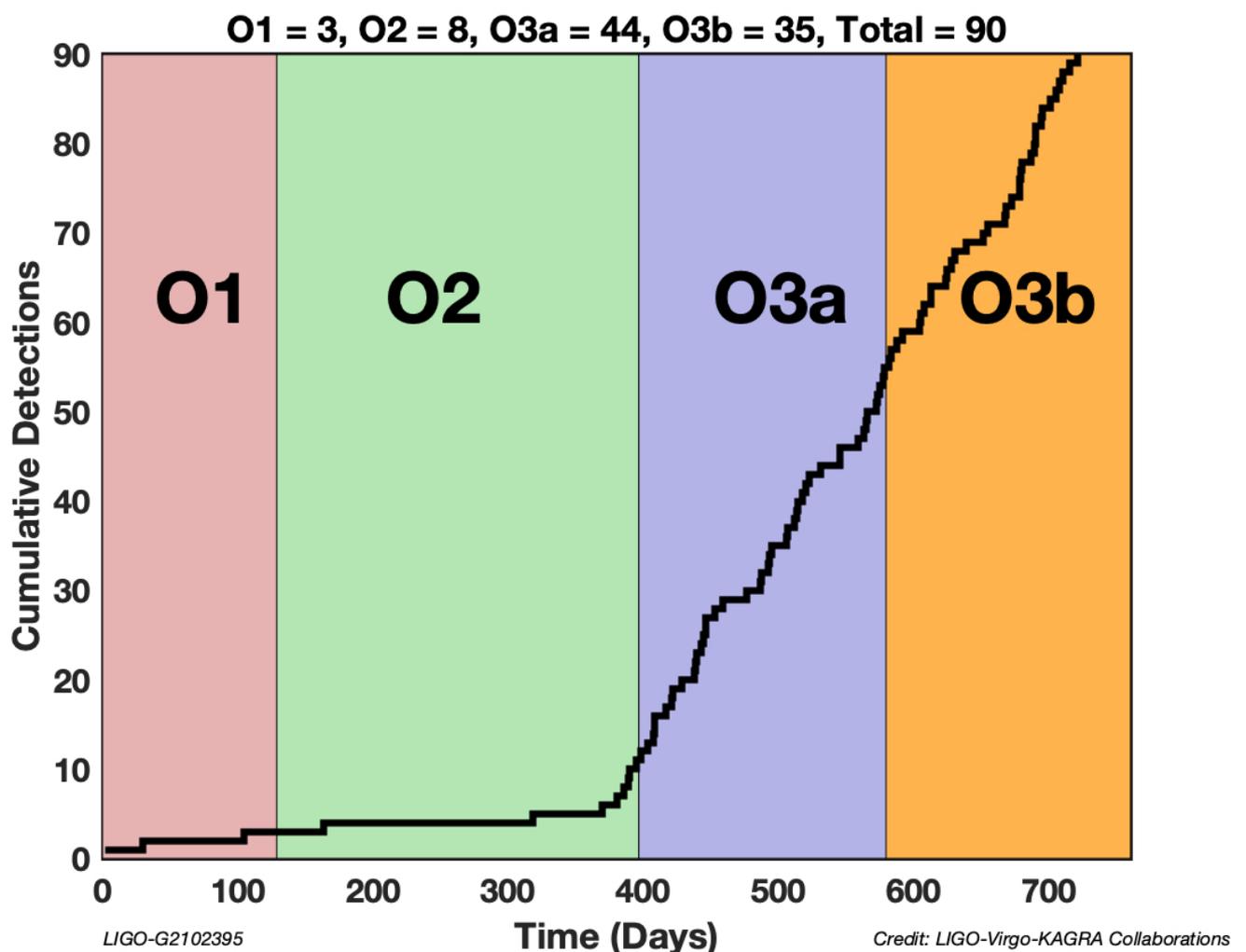


Figura 1: Número acumulado de ondas gravitacionales observadas por la Colaboración LIGO-Virgo-KAGRA desde O1 hasta O3. Crédito: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration.

Durante O3, la colaboración analizó todos los datos recibidos en tiempo real con objeto de detectar señales candidatas, localizar las fuentes y enviar alertas a la comunidad astronómica para iniciar búsquedas de contrapartidas empleando ondas electromagnéticas o detectores de neutrinos. Las [alertas de LIGO/Virgo](#) son públicas y se distribuyen a través de la Gamma-ray Coordinates Network (GCN) de la NASA. Además, la LVK ofrece una localización centralizada de todos los eventos candidatos de ondas gravitacionales en la base de datos [GraceDB](#) (Gravitational-Wave Candidate Event Database). Los datos de O1, O2 y O3 han sido ya hechos públicos por la colaboración a través de la web [Gravitational Wave Open Science Center](#), página que también recoge información para llevar a cabo análisis independientes de los datos, incluyendo documentación, tutoriales y software de apoyo. Los últimos datos, correspondientes a O3b, han sido publicados el 8 de noviembre de 2021.

Todas las observaciones anunciadas por la LVK se encuentran publicadas en 4 catálogos de ondas gravitatorias transitorias (GWTC por sus siglas en inglés), [GWTC-1](#), [GWTC-2](#), [GWTC-2.1](#), y [GWTC-3](#). El primero incluye las detecciones de O1 y O2, el segundo las de O3a, el tercero constituye un catálogo más "profundo" que GWTC-2 que recoge las detecciones realizadas durante O3a incluyendo triggers con menor umbral de significancia astrofísica. En concreto, el umbral utilizado en GWTC-2.1 es de tan solo dos eventos de falsa alarma al día, lo cual proporciona 1201 candidatos. De estos, hay 8 candidatos no incluidos en GWTC-2 con una probabilidad de ser de origen astrofísico (p_{astro}) superior a 0,5, todos ellos son potenciales candidatos a fusiones de binarias de agujeros negros. Finalmente, el catálogo GWTC-3 incluye las detecciones de O3b. La figura 2 muestra las masas de los eventos detectados por la colaboración y publicados en los diversos catálogos hasta GWTC-3. En total, la figura contiene 90 eventos que superan el umbral establecido por la colaboración para ser considerados de origen astrofísico. Las binarias de agujeros negros aparecen representadas en color azul y las binarias de estrellas de neutrones se ilustran en color naranja (los objetos en color amarillo y en color rojo corresponden, respectivamente, a estrellas de neutrones y agujeros negros en nuestra galaxia observados electromagnéticamente).

EVENTOS DE O3 (GWTC-2 Y GWTC-3) Y ANÁLISIS RELACIONADOS

GWTC-2 y GWTC-3 contienen tanto eventos identificados como colisiones de binarias de agujeros negros hasta redshifts de aproximadamente 0,8 (GWTC-2) y 0,9 (GWTC-3) así como binarias cuyas componentes secundarias no pueden ser identificadas sin ambigüedad ni como agujeros negros ni como estrellas de neutrones. En comparación con GWTC-1, el intervalo de masas de agujeros negros se extiende significativamente tanto hacia masas más pequeñas como más grandes, abarcando desde unas 7 masas solares (GW200115_042309, GWTC-3) hasta unas 150 masas solares (GW190521, GWTC-2). Además, por primera vez, en estos catálogos se incluyen sistemas binarios con cocientes de masas significativamente asimétricos (3:1 para GW190412, 9:1 para GW190814 y 26:1 para GW191219_163120). Los 39 eventos del catálogo GWTC-2 fueron observados en aproximadamente 26 semanas, lo que equivale a un ritmo de detecciones de aproximadamente 1,5 eventos a la semana, lo cual es consistente con lo obtenido en GWTC-1. El ritmo de detecciones de los eventos de GWTC-3 es similar.

Con los eventos de O3, la colaboración ha podido presentar datos actualizados de ritmos de sucesos, [estudios de poblaciones](#) y tests de Relatividad General. Así, por ejemplo, se pudo observar que el espectro de masas de la componente primaria de las binarias de agujeros negros es consistente tanto con una ley de potencias rota a 39,7 masas solares como con una ley de potencias con un pico gaussiano a unas 33,1 masas solares. Aunque la distribución de masas de la primaria se extiende hasta unas 65 masas solares, solo un 3% de sistemas tienen masas primarias superiores a 45 masas solares. Por otro lado, entre el 12% y el 44% de las binarias de agujeros negros tienen los espines individuales formando ángulos de más de 90 grados, lo que produce un espín efectivo negativo durante la fase de inspiral, lo que a su vez permite inferir que entre 25% y 93% de estos sistemas pueden haberse formado dinámicamente (pues las colisiones cuasi-circulares favorecen los espines alineados). Finalmente, los datos de GWTC-2 conducen a ritmos de colisiones de unos 24 eventos por año y por Gpc^3 para binarias de agujeros negros y de unos 320 eventos por año y por Gpc^3 para binarias de estrellas de neutrones.

Masses in the Stellar Graveyard

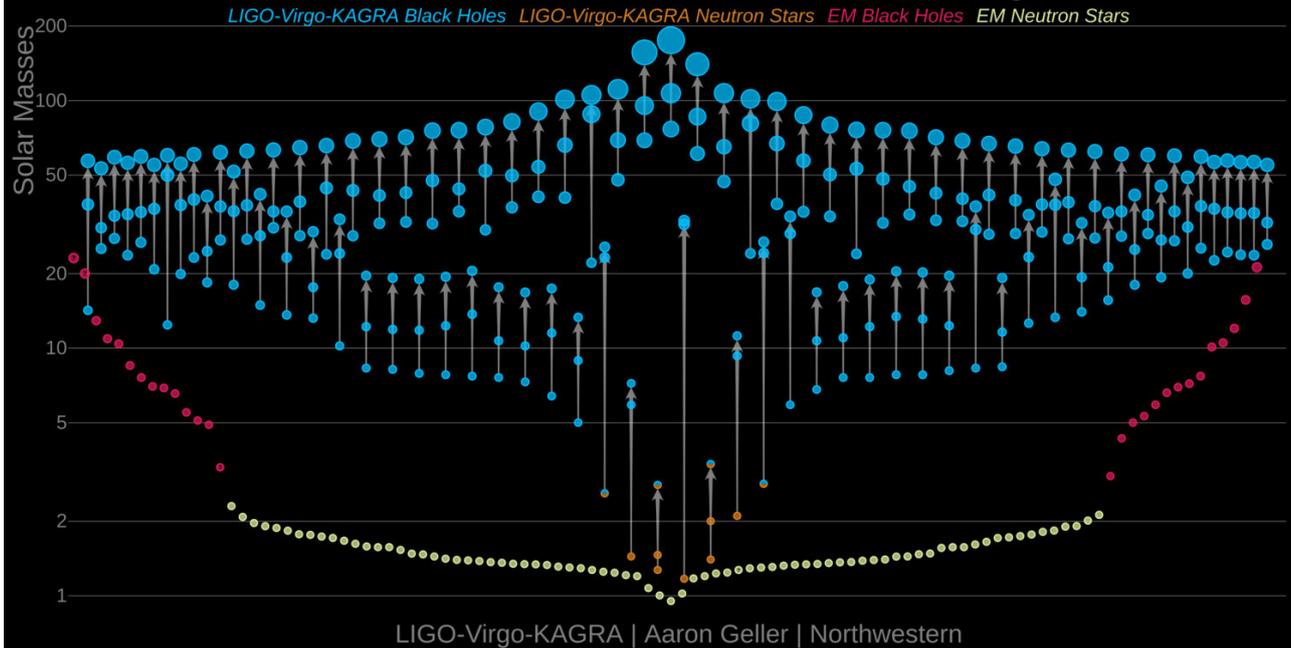


Figura 2: Masas de los eventos de origen astrofísico publicados desde GWTC-1 hasta GWTC-3. Crédito: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, Aaron Geller, Northwestern University.

Para los primeros, el ritmo de sucesos parece aumentar con el redshift aunque no más rápidamente que el ritmo de formación estelar.

GWTC-2 y GWTC-3 también han sido utilizado por la LVK para llevar a cabo nuevos [tests de la Relatividad General](#), evaluando la consistencia de los datos con las predicciones de la teoría. En primer lugar, se comprobó que los residuos de las formas de onda teóricas que mejor ajustan las observaciones son consistentes con el nivel de ruido de los detectores. Se emplearon también modificaciones parametrizadas de las formas de onda, variando coeficientes post-newtonianos en señales analíticas y parámetros de señales fenomenológicas obtenidas numéricamente, mejorando resultados previos por un factor 2. Asimismo, se demostró que los objetos finales de las colisiones son consistentes con una interpretación basada en que estos sean agujeros negros de Kerr (solución exacta de las ecuaciones de la Relatividad General). En particular, esto se comprobó midiendo las frecuencias de los modos cuasi-normales de oscilación y los ritmos de decaimiento de las señales durante la fase ringdown. Se encontraron variaciones relativas de la frecuencia del

modo fundamental (cuadrupolo) y del primer armónico compatibles con cero, lo que favorece la conjetura de que los agujeros negros no tienen pelo. Además, la cota superior de la masa del gravitón obtenida en el análisis de los datos de GWTC-2 es $1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ al 90% de credibilidad. Finalmente, no se encontró evidencia de la posible existencia de ecos en las señales de la fase post-fusión, que pudieran indicar desviaciones a la solución de Kerr. Por lo tanto, los eventos compilados en GWTC-2 no muestran evidencia a favor de nueva física más allá de la Relatividad General o a favor de la existencia de imitadores de agujeros negros.

OTROS ESTUDIOS CON DATOS DE O3

Los datos adquiridos por Advanced LIGO y Advanced Virgo durante O3 han permitido llevar a cabo búsquedas de ondas gravitatorias producidas por sistemas astrofísicos distintos a coalescencias de binarias compactas. Este tipo de búsquedas se realiza de manera habitual por la colaboración LVK. En la mayoría de ocasiones, las búsquedas permiten poner nuevos límites superiores a diversas magnitudes físicas, actualizando los valores previos obtenidos en campañas de búsqueda similares.

«Los eventos compilados
en GWTC-2
no muestran evidencia
a favor de nueva física
más allá de la Relatividad
General o a favor de la
existencia de imitadores de
agujeros negros.»

Así, se han realizado búsquedas en todo el cielo de [señales continuas](#) producidas por estrellas de neutrones aisladas en nuestra galaxia, con rotación y con ligeras desviaciones de la simetría axial. Pese a que no se ha observado ninguna señal de este tipo, pudieron ponerse nuevos límites superiores a los valores obtenidos con los datos de O2. La mejora fue especialmente significativa en la región de las altas frecuencias (\sim kHz), debido en parte a la mejora en la sensibilidad de los detectores gracias a la implementación de técnicas de "quantum squeezing".

También se han llevado a cabo búsquedas de señales de tipo "burst", tanto de [corta](#) duración (<1 s) como de [larga](#) duración (>1 s), empleando los datos de O3 al completo. Asociadas a las primeras, se buscaron señales debidas a modos de oscilación de tipo f en estrellas de neutrones (que pueden excitarse cuando un púlsar sufre un glitch) y a supernovas de Tipo II/Ib/Ic (originadas por el colapso del núcleo estelar). Por lo que respecta a la segunda clase, se buscaron señales debidas a deformaciones no axisimétricas en magnetares o a coalescencias excéntricas de agujeros negros. En ambos casos, no se encontraron candidatos suficientemente significativos. En el contexto de señales "burst" también se hizo una [búsqueda adaptada a 105 GRBs observados por Fermi y Swift](#) durante O3a, sin encontrar correlaciones significativas en los datos.

Otras búsquedas habituales son fondos estocásticos de radiación gravitatoria, tanto [isótropos](#) como [anisótropos](#), y estos también se han realizado con los datos de O3. De nuevo, no se han encontrado evidencias significativas. O3 también se ha utilizado para constreñir la posible existencia de [cuerdas cósmicas](#) (hipotéticos defectos topológicos que pudieron producirse durante transiciones de fase en el universo primitivo), obteniéndose el valor más competitivo hasta la fecha de la tensión de tales cuerdas cósmicas. Además, también en el ámbito de lo hipotético, los datos se han analizado para constreñir la existencia de [fotones oscuros](#) (bosones de gauge de espín 1) a través del análisis de posibles acoplamientos con los interferómetros. Aunque no se ha encontrado evidencia de su existencia, las restricciones proporcionadas por la colaboración LVK mejoran en dos órdenes de magnitud los límites previos obtenidos en los experimentos de detección de materia oscura MICROSCOPE y Eöt-Wash.

Finalmente, por lo que respecta a coalescencias de binarias compactas, se han buscado posibles improntas de [efecto lente gravitacional](#) en las observaciones de GWTC-2, sin encontrar evidencias convincentes. Además, también se han buscado [agujeros negros de masa intermedia](#) (empleando los datos de O3 al completo) y [agujeros negros de masa subsolar](#). Para los primeros, el aumento de la sensibilidad de la red de detectores durante O3 permitió la detección de GW190512, lo que ha proporcionado la primera evidencia de la formación de agujeros negros de masa intermedia. Las búsquedas dedicadas en los datos de O3, tanto modeladas (empleando patrones de señales como filtros) como no modeladas, proporcionaron algunos candidatos marginales no suficientemente significativos. En el otro extremo de masas, las búsquedas de agujeros negros de masa subsolar (entre 0,2 y 1 masas solares) tampoco han conducido a nuevas detecciones aunque han servido para poner restricciones astrofísicas a posibles fuentes en ese rango, como los agujeros negros primordiales y modelos de materia oscura disipativa.

NUEVOS DESCUBRIMIENTOS DURANTE O3

A continuación, pasamos a discutir los nuevos descubrimientos incluidos en GWTC-2 y GWTC-3 de manera individualizada:

GW190412

La mayoría de fusiones de agujeros negros detectadas desde el inicio de las campañas observacionales de los interferómetros avanzados, se asocian a sistemas binarios con componentes de igual masa. Este balance entre las masas se rompió con la observación de GW190412, apenas transcurridos 12 días del comienzo de O3. En esta señal, la componente primaria es más de 3 veces más masiva que la secundaria. Concretamente, los agujeros negros fusionados tenían alrededor de 30 y 8 masas solares, respectivamente. La importancia de esta detección radica en el hecho de que el desequilibrio entre las masas produce una intensidad inusualmente alta de la radiación gravitatoria en los llamados "modos de alto orden". Estos modos son, en general, subdominantes, pues la mayor parte de la emisión gravitacional se produce en el modo cuadrupolar dominante (asociado con variaciones temporales del cuadrupolo de masa del sistema). La aparición de modos subdominantes en GW190412 proporciona otra confirmación más de la validez de la teoría de la Relatividad General de Einstein.

GW190425

Tras GW170817, esta es la segunda observación de una onda gravitacional consistente con la fusión de un sistema binario de estrellas de neutrones, con masas individuales estimadas entre 1,12 y 2,52 masas solares (intervalo de credibilidad del 90%). Sin embargo, la posibilidad de que una o las dos componentes del sistema binario sean agujeros negros no puede descartarse utilizando únicamente datos gravitacionales. La fuente de GW190425 está a una distancia de 500 millones de años-luz de la Tierra y está localizada en el cielo en un área unas 300 veces mayor que la proporcionada para GW170817, pues solo fue observada por LIGO-Livingston (aunque los datos de Virgo se utilizaron para la inferencia de parámetros). Pese a tratarse de una fusión de estrellas de neutrones, no se ha encontrado contrapartida electromagnética, aunque simulaciones de relatividad numérica de este sistema indican la formación rápida de un agujero negro tras la fusión, lo que podría explicar la ausencia de emisión electromagnética. La masa total estimada del sistema binario que produjo GW190425 es 3,4 veces la masa del Sol. Esto lo convierte en un sistema considerablemente más masivo que las binarias de estrellas de neutrones conocidas en nuestra galaxia, cuya masa total está entre 2,5 y 2,9 veces la masa del Sol. Esto parece indicar que el sistema de estrellas de neutrones que originó GW190425 pudo formarse de manera distinta a los sistemas galácticos conocidos.

GW190521

Esta señal fue debida a la fusión de dos agujeros negros de 66 y 85 masas solares. Tanto la componente primaria del sistema binario como el agujero negro remanente, de unas 142 masas solares, se sitúan en un rango de masas no observado previamente, ni a través de ondas gravitacionales ni con observaciones electromagnéticas. El agujero negro final es el más masivo jamás detectado con ondas gravitacionales y pertenece a la clase de los llamados agujeros negros de masa intermedia (desde unas 100 hasta unas 100.000 masas solares). Debido a la elevada masa del sistema, la señal es muy breve, de unos 0.1 s, y, además no tiene la típica forma de "chirp" en la fase previa a la fusión sino que más bien se asemeja a una señal tipo "burst". Esto hace que la interpretación de la fuente sea mucho más complicada que en todos los otros eventos detectados por LIGO y Virgo.



Figura 3: Fotografías aéreas de LIGO Hanford (arriba a la izquierda), KAGRA (arriba a la derecha -ilustración), Virgo (abajo a la izquierda) y LIGO Livingston (abajo a la derecha). Crédito: ICRR, Univ. de Tokio / LIGO Lab / Caltech / MIT / Virgo Collaboration.

La detección de GW190521 subraya la existencia de poblaciones de agujeros negros que no habían sido observadas o que son inesperadas, lo que plantea nuevas preguntas sobre los mecanismos de formación. En particular, la masa de la componente primaria de GW190521 desafía los modelos astrofísicos que describen el colapso de estrellas muy masivas al final de sus vidas. Según estos modelos, tales estrellas se desestabilizan completamente en las explosiones de supernova, debido a un proceso llamado "inestabilidad de pares". En consecuencia, esta detección podría obligar a revisar nuestra comprensión actual de las etapas finales de la evolución estelar y las restricciones sobre la masa final en los procesos de formación de agujeros negros. Otra posibilidad para explicar la masa del agujero

negro primario es que sea el resultado de la fusión de agujeros negros más ligeros en un proceso de captura dinámica en un cúmulo globular denso.

Debemos también indicar que la componente primaria de dos de las fusiones de agujeros negros con $p_{\text{astro}} > 0,5$ publicadas en el catálogo "profundo" GWTC-2.1, concretamente GW190403_051519 y GW190426_190642, se encuentra en ambos casos dentro del hueco de masas predicho por la inestabilidad de pares de la teoría de supernovas. La masa del agujero negro resultante es, respectivamente, 100 y 184 masas solares, por lo que ambos sistemas se encontrarían dentro de la clase de los agujeros negros de masa intermedia, al igual que GW190521.

GW190814

Esta señal fue producida como resultado de la fusión de un agujero negro de 23 masas solares con un objeto compacto de aproximadamente 2,6 masas solares. El desequilibrio entre las masas de las dos componentes, de alrededor de un factor 9, la convierte en la fusión de un sistema binario con las masas más desiguales de todas las observadas, superando ampliamente a GW190412. Como en GW190412, la señal GW190814 permitió inferir la presencia en la emisión de multipolos de orden superior al cuadrupolo, lo cual proporcionó de nuevo estrictas verificaciones de la Relatividad General. Además, los múltipolos de orden superior permiten separar la degeneración existente entre la distancia a la fuente y el ángulo de inclinación del plano de la órbita del sistema binario con respecto a la visual.

La naturaleza de la componente secundaria de GW190814 es un misterio, al encontrarse dentro del denominado "hueco en la distribución de masas", un intervalo que parece existir entre 2,5 y 5 masas solares en el que no se han observado objetos compactos. De este modo, la componente secundaria de GW190814 podría tanto ser el agujero negro más ligero o la estrella de neutrones más masiva jamás observados.

De todas las detecciones, GW190814 es la señal con mejor localización en el cielo, con una incertidumbre de apenas unos 19 grados cuadrados. Esto permitió que muchos telescopios terrestres y espaciales hicieran un seguimiento en busca de luz y otras señales electromagnéticas, pero, a diferencia de GW170817, no se detectaron contrapartidas. Hay varias razones probables para explicar esto: En primer lugar, GW190814 estaba unas seis veces más lejos (800 millones de años luz) que GW170817 (130 millones de años luz), lo que dificulta la detección de cualquier señal electromagnética. En segundo lugar, si la colisión implicó dos agujeros negros, probablemente no hubo ninguna emisión electromagnética. Finalmente, si la secundaria se trataba de una estrella de neutrones, esta podría haber sido capturada entera por el agujero negro al ser este 9 veces más masivo, en cuyo caso tampoco debería haberse producido emisión electromagnética.

GW200105 y GW200115

Los eventos GW200105 y GW200115 pertenecen a la segunda mitad de O3 (O3b). Estos dos eventos, representan las primeras observaciones de ondas

gravitacionales generadas por la coalescencia de una estrella de neutrones y un agujero negro. La existencia de estos sistemas binarios mixtos fue predicha por la comunidad astronómica hace varias décadas, pero nunca habían sido observadas con seguridad, electromagnética o gravitacionalmente. Dos eventos anteriores, GW190814 y GW190426, han sido considerados candidatas a tal tipo de sistemas, pero sin un nivel de confianza suficientemente elevado. Las masas del agujero negro y la estrella de neutrones que originaron GW200105 son, respectivamente, 8,9 y 1,9 masas solares y su distancia luminosidad es de 280 Mpc. Para GW200115, las correspondientes masas son unas 5,7 y 1,5 masas solares y su distancia luminosidad es de 300 Mpc. Las predicciones teóricas indican que cuando las masas de los dos objetos compactos son comparables, la estrella de neutrones se fragmenta debido a las fuerzas de marea del agujero negro. Esta desintegración produciría emisión electromagnética de alta energía. Este proceso probablemente no sucedió ni para GW200105 ni para GW200115, ya que en ambos casos la masa del agujero negro es significativamente mayor a la de la estrella de neutrones, por lo que esta fue capturada sin sufrir desintegración previa. Esta dinámica podría explicar la ausencia de contrapartida electromagnética en ambos eventos, aunque la incertidumbre en la localización es elevada para los dos, 7200 grados² para GW200105 y 600 grados² para GW200115.

PAPEL DE LOS GRUPOS ESPAÑOLES DURANTE O3

Seis grupos españoles contribuyen al estudio y análisis de las ondas gravitatorias detectadas dentro de la colaboración LVK: Dos grupos, en la Universidad de las Illes Balears (UIB) y el Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) forman parte de la Colaboración científica LIGO; mientras que la Universitat de València (UV), el Instituto de Ciencias del Cosmos de la Universidad de Barcelona (ICCUB), el Institut de Física d'Altes Energies (IFAE) de Barcelona y el Instituto de Física Teórica (IFT) de la Universidad Autónoma de Madrid-CSIC son miembros de Virgo.

En preparación para O3, los grupos españoles han jugado un papel significativo en las tareas de puesta a punto de los interferómetros y los estudios de ruido con el fin de alcanzar la sensibilidad deseada. Durante O3, científicos de los grupos nacionales han participado en los equipos editoriales de diversas publicaciones de la

LVK, analizando datos, o realizando tareas de revisión interna de métodos, resultados y artículos. Los datos tomados durante O3 continúan siendo analizados por la LVK, y los grupos españoles continúan involucrados en estas actividades. Una parte del análisis que resulta particularmente costosa computacionalmente es la estimación de parámetros con métodos bayesianos. La estimación de las masas, los espines y la ubicación en el cielo se basa en la comparación de los datos del detector con modelos teóricos de formas de onda. Para el descubrimiento de las dos primeras coalescencias de estrellas de neutrones y agujeros negros, GW200105 y GW200115, así como para algunos eventos de GWTC-3, el análisis ha sido realizado por el grupo de la UIB en el superordenador Mare Nostrum del Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona. Así mismo, el PIC, Port d'Informació Científica de IFAE, ha contribuido significativamente al procesamiento de los datos de los experimentos. Además, uno de los dos modelos utilizados en la inferencia de todos los eventos incluidos en el catálogo GWTC-3 ha sido un modelo computacionalmente eficiente desarrollado en la UIB. Miembros de los grupos españoles también han escrito varios artículos complementarios a los resultados de la LVK, analizando GW190412 y GW190521 con nuevos métodos o [hipótesis astrofísicas](#), estableciendo límites a [nuevos modelos cosmológicos](#), o [reinterpretando las búsquedas de señales estocásticas](#) en términos de límites a modelos de nueva física en el universo temprano a altas temperaturas.

04 y 05

En estos momentos, los detectores se encuentran en fase de incorporación de nueva instrumentación y mejoras, con objeto de aumentar su sensibilidad para la campaña de observación O4 y para finalmente alcanzar la sensibilidad nominal de diseño en O5. Por primera vez, un grupo español (IFAE) hace una contribución significativa al detector Advanced Virgo en la forma de [nuevos deflectores instrumentados](#) que mejoraran el buen funcionamiento del interferómetro. Un primer deflector fue instalado en primavera de 2021 alrededor de uno de los espejos del experimento, y nuevos sistemas serán instalados para instrumentar los espejos principales a tiempo para O5.

La Colaboración LVK continúa evaluando y respondiendo a los impactos continuos del COVID-19 en los preparativos para O4, cuya fecha de inicio ha sido

anunciada para finales de 2022. Durante O4, se espera que Advanced LIGO tenga la sensibilidad suficiente para detectar fusiones de binarias de estrellas de neutrones hasta distancias de entre 160 y 190 Mpc y Advanced Virgo hasta distancias de entre 90 y 120 Mpc. Por su parte, el detector japonés KAGRA, también participará en la campaña O4 aunque, probablemente, con una sensibilidad inferior a la inicialmente estimada (25-130 Mpc). Para O5, de alcanzarse la sensibilidad de diseño, se podrían observar colisiones de binarias de estrellas de neutrones hasta distancias máximas de unos 330 Mpc (Advanced LIGO), 260 Mpc (Advanced Virgo) y superiores a 130 Mpc (KAGRA). Además, es posible que durante parte de O5, el detector LIGO-India se una a la red de observatorios, con las mismas capacidades observacionales que Advanced LIGO. Debemos también indicar que la colaboración mantiene actualizado [un artículo de revisión](#) con estudios prospectivos para la observación y localización de señales gravitacionales transitorias en las próximas campañas de observación. Además, la hoja de ruta para el futuro de la investigación en ondas gravitacionales ha sido recientemente discutida en un artículo en [Nature Reviews Physics](#), en el que puede encontrarse información sobre la evolución de este campo de investigación durante las próximas dos décadas.

DETECTORES DE TERCERA GENERACIÓN: IMPLICACIÓN ESPAÑOLA EN EL EINSTEIN TELESCOPE

Tras el éxito de LIGO y Virgo, la comunidad internacional de ondas gravitacionales trabaja en la definición de la así llamada tercera generación de detectores, de cara a las próximas décadas, con los proyectos Cosmic Explorer y Einstein Telescope (ET). En particular, el proyecto ET (ver figura 4) ha sido recientemente incluido en la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo de Infraestructuras de Investigación (ESFRI, por sus siglas en inglés) y ha iniciado su fase de preparación. ET tendrá la sensibilidad de observar ondas gravitacionales en todo el universo y en un amplio espectro de frecuencias, llevando el campo de estudio de las ondas gravitacionales al régimen de la física de precisión. Los grupos españoles han jugado un papel significativo en el desarrollo del caso científico de ET desde sus inicios. Recientemente, España ha intensificado su presencia en ET, e IFAE coordinará, a nivel europeo, los trabajos preparatorios para establecer los pilares de la gobernanza y organización del experimento y su diseño final en los próximos años.

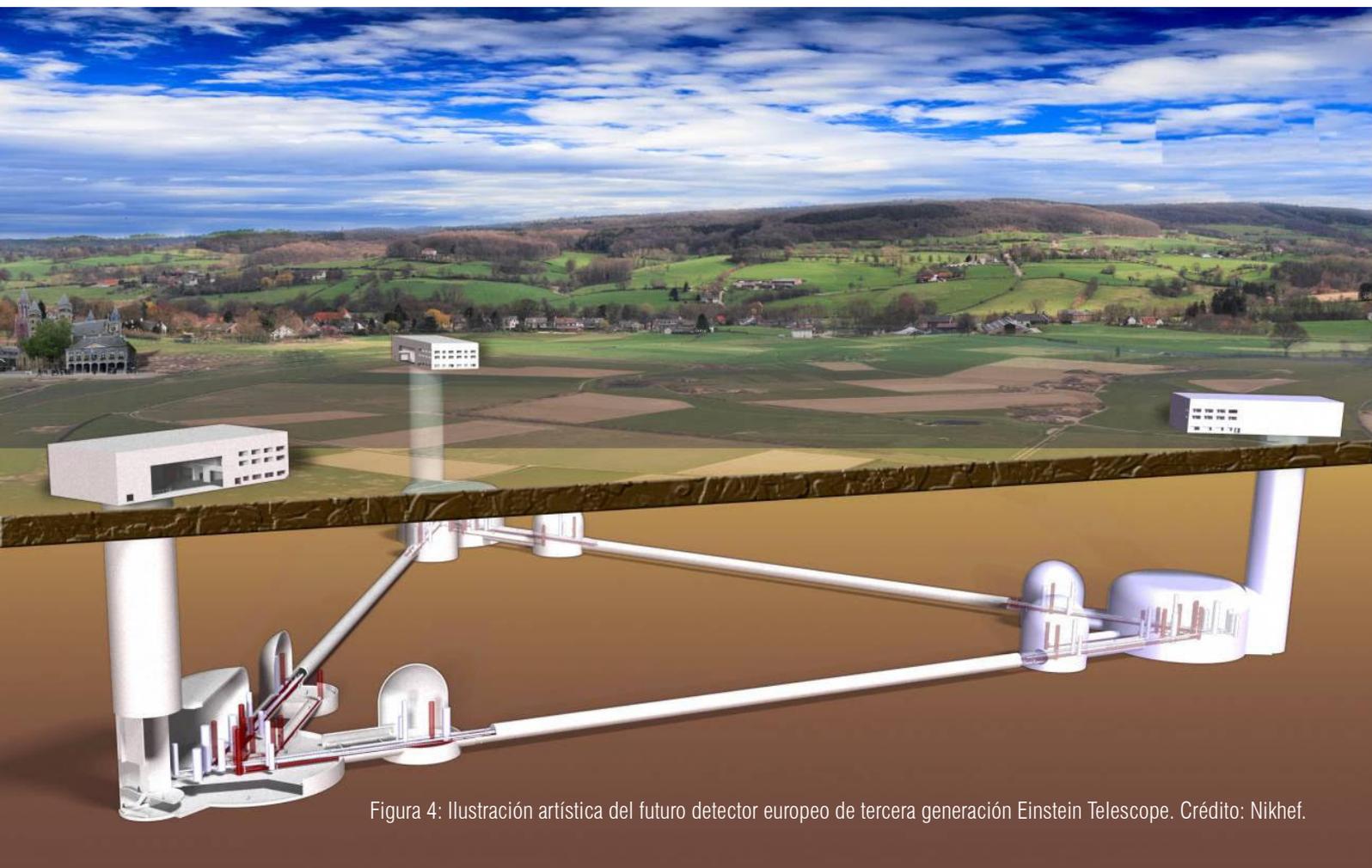


Figura 4: Ilustración artística del futuro detector europeo de tercera generación Einstein Telescope. Crédito: Nikhef.

CARTOGRAFIANDO EL UNIVERSO

La cartografía es la ciencia que se encarga de la realización e interpretación de medidas de regiones de la Tierra con el fin de elaborar mapas. Su nombre proviene del griego, *χάρτης*, *chartēs* = mapa y *γραφειν*, *graphein* = escrito, y significa escritura de mapas. La creación de mapas es seguramente tan antigua como el ser humano, ligada inherentemente a la localización de elementos básicos para la supervivencia como el agua y el alimento. Sin embargo, no es hasta la época de la antigua Grecia cuando ésta se desarrolla como ciencia, y posteriormente entre los siglos XVI y XVIII cuando la cartografía de mapas terrestres tiene su máximo esplendor, propiciada por la navegación marítima y la necesidad de agregar el descubrimiento de nuevos territorios a los mapas. Actualmente toda la superficie de la Tierra goza de una cartografía de alta precisión gracias a la tecnología aero-espacial, y los ojos de los nuevos cartógrafos se centran ahora en el cielo.



Licia Verde

liciaverde@icc.ub.edu

Hector Gil-Marín

hectorgil@icc.ub.edu

Instituto de Ciencias del Cosmos
Universitat de Barcelona

Análogamente a la cartografía terrestre, los cartografiados del cosmos tienen como objetivo realizar e interpretar medidas que nos permitan obtener una imagen de cómo es nuestro universo. El objetivo es entender las propiedades de sus constituyentes y las leyes físicas que lo rigen. Seguramente el primer "mapa cosmográfico" de precisión se le puede atribuir al satélite Cosmic Background Explorer que midió las anisotropías del fondo de radiación de microondas (CMB por su acrónimo en inglés) en 1992. Estas anisotropías representan pequeñas diferencias en temperatura y densidad en el universo, cuando éste tan solo tenía 380,000 años de edad, y son las semillas a partir de las cuales se formarán estrellas y galaxias miles de millones de años después. En este sentido, la energía de los fotones provenientes del CMB es un trazador de la distribución de materia en esa época. La medición y detección de estas anisotropías ha sido refinada posteriormente por medidas realizadas por los experimentos como el Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic (BOOMERanG) o el Atacama Cosmology Telescope (ACT), y el South Pole Telescope (SPT), así como telescopios en órbita, el Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) y más recientemente Planck, que se han beneficiado de mejoras en la tecnología de detectores para obtener una imagen del universo con cada vez más precisión. Sin embargo con Planck hemos llegado al límite en el que una mejora de la determinación de la temperatura no nos proporcionará más información acerca del universo en las escalas de interés. Por esta razón los futuros experimentos de CMB, como por ejemplo, Quijote, CMB-Stage 4, Simons Observatory (SO) o Litebird se centrarán en la detección de la polarización de esta radiación.

Cabe recordar que el CMB representa una imagen de nuestro universo cuando tan solo tenía 380,000 años de edad. Para obtener un mapa completo del universo es necesario además cartografiar las regiones desde la época del CMB hasta el día de hoy. Para realizar esta titánica tarea no nos podemos valer de la radiación de fondo cósmico, sino que hay que usar un trazador de materia distinto: las galaxias y el gas intergaláctico. A diferencia del CMB, el uso de las galaxias y gas nos permite realizar un mapa del universo en 3 dimensiones, ya que estos elementos son observables desde que el universo tenía una edad de 2,000 millones de años, hasta la actualidad, con 13,800 millones de años de edad, complementando así la información que se obtiene únicamente a partir del CMB. A esta rama de la cosmología que usa la localización de miles de galaxias y gas intergaláctico para la elaboración

y el estudio de mapas se la conoce como estructura a gran escala del universo (LSS por sus siglas en inglés), y representa una de las fuentes de información cosmológica más importantes a día de hoy.

UNA REGLA PARA MEDIR EL COSMOS

Una de las dificultades más importantes en astronomía es determinar con precisión la distancia a los objetos de estudio, en el caso de la LSS, las galaxias. Este es el principal reto en la elaboración de mapas de galaxias, donde la posición angular de éstas puede medirse con relativa facilidad, pero no así su distancia radial.

En el caso de galaxias suficientemente lejanas (fuera del llamado Grupo Local) la luz que observamos fue emitida hace mucho tiempo, y durante su viaje la expansión del universo ha provocado que su longitud de onda se estire. Por esta razón, el espectro electromagnético de las galaxias que observamos aparece desplazado hacia el rojo. Este desplazamiento se conoce con el nombre de *redshift*, y nos permite medir la velocidad de recesión de la galaxia debida a la expansión del universo. Por otro lado, la ley de Hubble nos ofrece un marco teórico para poder transformar estas velocidades de recesión en distancias, siempre que se conozca la historia de expansión cósmica. Así, una medida de precisión del espectro de las galaxias es clave para determinar su *redshift*, usarlo como indicador de su distancia radial, y elaborar el mapa. Sin embargo, el desconocimiento *a priori* de la historia de expansión cósmica, no nos permite conocer con precisión las distancias de las galaxias a partir de sus espectros, lo que nos urge a encontrar una vía alternativa para determinar las distancias.

Una de las técnicas para determinar distancias en el cosmos es identificar estructuras con un tamaño físico conocido, y a la vez suficientemente grande como para que puedan ser identificadas a escalas cósmicas. Es lo que se conoce como "regla estándar". Midiendo el tamaño aparente en el cielo de estas estructuras permite inferir su distancia a través de argumentos puramente geométricos. En cosmología este tipo de regla la proporcionan las oscilaciones acústicas de bariones (BAO por sus siglas en inglés).

Las BAO tienen su origen justo después del Big Bang, cuando el universo estaba formado por un plasma muy denso y caliente compuesto por materia ordinaria (los bariones en la jerga astronómica) y radiación. En esa época, estas dos especies estaban acopladas

mediante interacciones gravitatorias y electromagnéticas, que produjeron unos vaivenes (las oscilaciones) que a su vez se propagaron a través del plasma de manera análoga a las ondas sonoras (o acústicas). Esta propagación se mantuvo hasta que la temperatura del universo fue suficientemente baja (unos 3000K) como para que los protones y electrones empezaran a formar átomos de hidrógeno neutro (proceso conocido como recombinación), precisamente en el momento en que el universo se torna transparente a la radiación electromagnética y se emite la radiación del CMB que hoy detectamos. La recombinación propició la desaparición de este plasma, congelando así las ondas acústicas, incapaces de seguir propagándose en el vacío. La distancia que recorrieron estas ondas hasta ese instante se conoce como "horizonte de sonido" y dejó una impronta en la distribución de materia y radiación en esa época. A medida que el universo se fue expandiendo y enfriando este patrón acabó también reflejándose en la distribución de las galaxias que se iban formando. Actualmente esta regla tiene un tamaño de 480 millones de años luz, lo que implica que dos galaxias cualesquiera tienen una probabilidad ligeramente superior de estar separadas por esa distancia, que por otra ligeramente superior o inferior. Las BAO pueden visualizarse de forma idealizada como esferas (o círculos en 2 dimensiones) donde la densidad de galaxias es mayor que el promedio (ver figura 1). Sin embargo, dicho patrón no puede ser identificado por una inspección visual de los catálogos y requiere de sofisticadas técnicas estadísticas para su identificación.

El mayor mapa espectroscópico de galaxias y gas hasta la fecha es el producido por el Cartografiado Digital del Cielo Sloan (SDSS por sus siglas en inglés), situado en el Observatorio Punto Apache (APO, Nuevo México, EEUU), y en particular de sus experimentos de detección de oscilaciones acústicas de bariones (BOSS y eBOSS). Durante 20 años, el SDSS logró determinar con precisión más de 2 millones de espectros de galaxias y nubes de gas, a un ratio de unos 5,000 objetos por noche, obteniendo así su *redshift* y su velocidad de recesión. Gracias a la técnica de las BAO estas medidas han permitido caracterizar la expansión cósmica durante los últimos 11,000 millones de años, con una precisión sin precedentes (ver figura 2). Ha sido gracias a experimentos como estos que la cosmología, históricamente una ciencia más cualitativa que cuantitativa, se ha transformado en una disciplina científica de alta precisión en poco menos de 20 años.

El relevo de SDSS lo ha tomado el Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) instalado en el Telescopio Mayall en el observatorio Kitt Peak de Arizona, EEUU, que gracias a su nueva tecnología de fibras robóticas, permite la observación simultánea de hasta 5,000 objetos, y es capaz de medir hasta 100,000 espectros en una sola noche. Las observaciones de DESI se iniciaron a principios de 2021 y se espera que para 2026 llegue a medir 40 millones de espectros, 20 veces mayor que el mapa de SDSS.

EL MODELO COSMOLÓGICO Y LA ENERGÍA OSCURA

El modelo estándar de la cosmología, fue propuesto en los años 90 del siglo pasado y con tan solo 6 parámetros proporciona una descripción de la evolución cósmica del universo a lo largo de 13,800 millones de años, así como de procesos físicos tales como las oscilaciones acústicas en el plasma primordial. Han sido precisamente los datos aportados por las observaciones del CMB, y posteriormente los cartografiados de galaxias, los que lo han establecido como una piedra angular de nuestro conocimiento científico actual. Además, este modelo tiene profundas implicaciones sobre física de partículas y relatividad general. Por un lado, establece la existencia de la materia oscura, con propiedades tales que ponen de manifiesto la necesaria existencia de partículas exóticas más allá de las que describe el modelo estándar de física de partículas. Por otro lado, también establece la existencia de la energía oscura, un misterioso componente o propiedad del mismo espacio-tiempo sin la que no podría explicarse la expansión acelerada del universo a lo largo de los últimos 7000 millones de años detectada por las observaciones de las BAO en los mapas de SDSS. Además, las observaciones del aglutinamiento de galaxias proporcionadas por estos mismos mapas han permitido corroborar la validez de la teoría de la relatividad de Einstein a escalas inter-galácticas, del orden de decenas de millones de años luz, miles de órdenes de magnitud superiores a las del sistema solar.

A pesar de su tremendo éxito en hacer encajar las observaciones del CMB y de mapas de galaxias dentro de un mismo marco teórico, el modelo estándar de la cosmología dista mucho de ser un modelo fundamental. Nos describe de forma fenomenológica una serie de elementos tales como la materia y la energía oscura, pero no nos ofrece una comprensión a nivel teórico de éstos, ni cómo están conectados con la relatividad general o con el modelo estándar de partículas. No sabemos qué tipo de partículas podrían realizar

el rol de materia oscura, ni tampoco conocemos la naturaleza de la energía oscura, si es por ejemplo una energía asociada al vacío, o si bien está ligada a las propiedades de un campo escalar similar al Higgs; ni siquiera si esta expansión tardía del universo está o no relacionada con otra expansión acelerada mucho más rápida que se cree que pudo tener lugar unos instantes después del Big Bang. Por esta razón, este modelo cosmológico tiene necesariamente que ser un modelo efectivo con piezas puestas *ad hoc* y por construcción no puede ofrecer una respuesta perfecta a nuestras observaciones. El hecho paradójico de que éstas encajen tan bien podría deberse a que, a día de hoy, las observaciones no son lo suficientemente precisas para detectar las grietas por las que el modelo se acabará rompiendo. Si fuéramos capaces de detectar tales grietas nos daría pistas sobre el modelo fundamental subyacente que se esconde detrás del actual modelo cosmológico. Por esta razón es tan importante una mejora en la precisión de los mapas de galaxias que cartografiados como DESI prometen alcanzar durante esta década. Sin embargo, cabe destacar que tan importante es la mejora en la precisión de un experimento, como la mejora de la exactitud de los métodos y modelos usados para extraer e interpretar la información que la nueva generación de cartografiados nos brindará durante los próximos años.

Los autores, hemos tenido el gran privilegio de estar implicados en la creación e interpretación de los mapas de SDSS. Actualmente como miembros de la colaboración DESI, estamos involucrados en el desarrollo de herramientas y metodologías para lograr una interpretación óptima de los resultados venideros de DESI, pero también aplicables a otras campañas de observación como la del satélite de la agencia espacial europea Euclid. Estas herramientas permiten una interpretación de datos de forma agnóstica, fuera del marco que proporciona el modelo estándar de la cosmología. Por otro lado, la identificación de señales características en los mapas de galaxias, más allá de las comúnmente utilizadas como las BAO, que permitan realizar pruebas de consistencia y tests de estrés del modelo cosmológico. Animados por los éxitos iniciales en esta dirección, los dos autores estamos convencidos que es posible, y que esto nos permitirá entender el Universo más allá de la interpretación dentro de un modelo efectivo, y quizá descubrir grietas que sienten las bases para un modelo que nos ofrezca explicaciones más profundas acerca de los componentes y las leyes del universo.

DETECCIÓN DE ETANOLAMINA, UN PRECURSOR

La Tierra se formó aproximadamente al mismo tiempo que el Sol hace unos 4500 millones de años a partir de una enorme nube de gas y polvo interestelar. Como el resto del universo, dicha nube estaba constituida principalmente por hidrógeno molecular (H_2) y helio (He), pero albergaba también trazas de otras muchas moléculas. Este contenido químico fue la materia prima a partir de la cual se formaron los distintos cuerpos celestes de nuestro Sistema Solar. En el periodo comprendido entre los 400 y 700 millones años posteriores a su formación, la joven Tierra experimentó un continuo bombardeo de cuerpos extraterrestres (asteroides y cometas), conocido como el *bombardeo intenso tardío* (del inglés “*the Late Heavy Bombardment*”).



Víctor Manuel Rivilla
victor.rivilla@cab.inta-csic.es

Izaskun Jiménez-Serra
ijimenez@cab.inta-csic.es

Centro de Astrobiología, CSIC-INTA

Numerosas evidencias indican que estos objetos pudieron transportar una gran cantidad de moléculas a la superficie del planeta, incluyendo el agua de nuestros océanos (H_2O) y moléculas orgánicas de mayor complejidad. En efecto, es bien conocido que meteoritos como el de Murchison o el de Orgeil contienen más de 80 aminoácidos, siendo la mayoría de ellos de origen no biológico. Este maná químico pudo jugar un papel crucial en la aparición de la vida en la Tierra, que se estima que ocurrió hace unos 3800 millones de años. Por este motivo, el estudio de la complejidad química en las nubes moleculares del medio interestelar nos permite conocer qué moléculas pudieron haber llegado a la superficie de nuestro planeta, contribuyendo al cóctel químico prebiótico que precedió –y posiblemente permitió– el nacimiento de las primeras formas de vida.

Uno de los hitos cruciales en el origen de la vida fue la aparición de las membranas celulares. Estas estructuras se encargan de mantener unas condiciones estables en el interior de las células, protegiendo tanto su material genético como su maquinaria metabólica. Aunque existe un gran debate en torno al origen de las membranas celulares, la hipótesis más aceptada es que las primeras membranas pudieron estar formadas por ácidos o alcoholes grasos relativamente simples. Esto es debido a que estas moléculas presentan una gran capacidad hidrofóbica cuando entran en contacto con el agua. En la actualidad, sin embargo, las membranas celulares de todos los seres vivos están hechas de moléculas mucho más complejas, los fosfolípidos. Por tanto, en algún momento de la evolución temprana de las membranas celulares tuvo que producirse una transición de ácidos/alcoholes grasos simples a fosfolípidos. Y en este punto es donde la contribución interestelar pudo jugar un papel clave.

Uno de los fosfolípidos más simples que existen en la naturaleza, y el segundo más abundante en los seres vivos, es la fosfatidiletanolamina (Figura 1). Esta molécula está compuesta por dos colas hidrofóbicas y una cabeza hidrofílica, formada por un glicerol, un grupo fosfato y una molécula orgánica con nitrógeno llamada etanolamina: $NH_2CH_2CH_2OH$ (Figura 1). Esta molécula, de 11 átomos, contiene cuatro de los seis elementos químicos fundamentales para la vida

DE FOSFOLÍPIDOS EN EL MEDIO INTERESTELAR

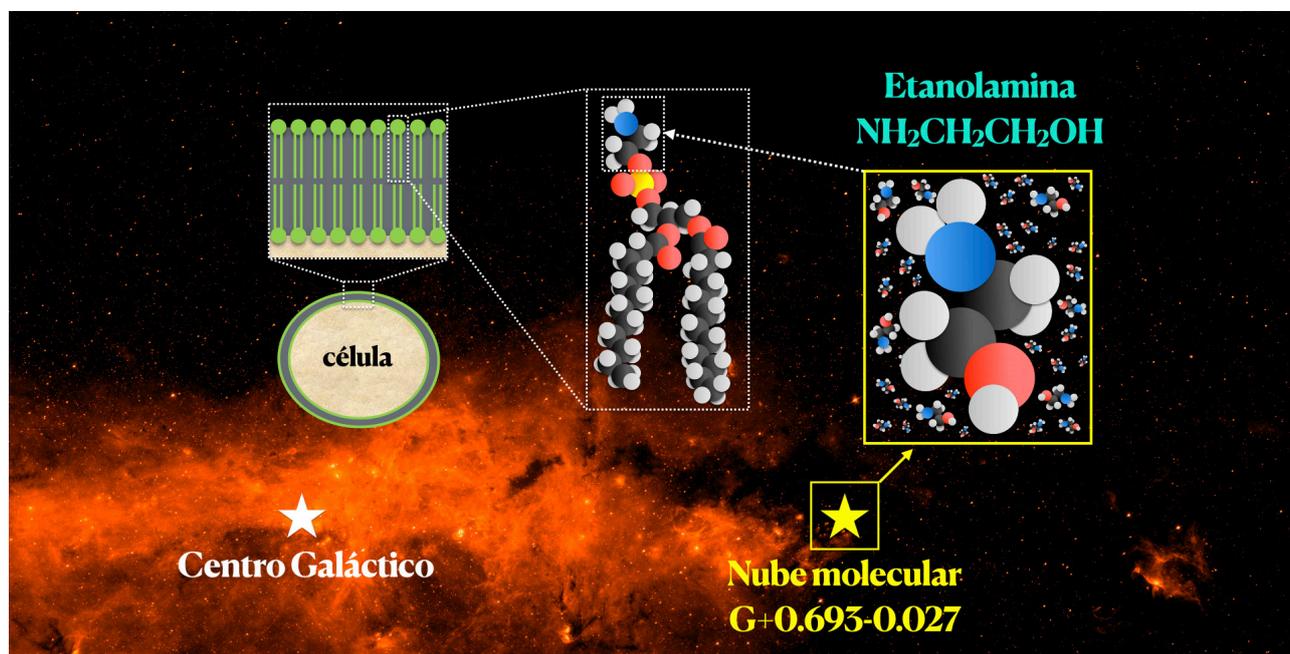


Figura 1: Descubrimiento de etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) en la nube molecular G+0.693-0.027 situada en el centro de nuestra Galaxia. Esta molécula forma parte de la cabeza de los fosfolípidos, los ladrillos de las membranas celulares. Créditos: V.M. Rivilla/ cámara IRAC4 (observando a 8 micras) a bordo del Telescopio Espacial Spitzer (NASA).

(CHONPS), y además de ser un constituyente de los fosfolípidos, puede actuar como precursora del aminoácido más simple, la glicina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$). Por todo ello, la etanolamina es una especie molecular que pudo desempeñar un rol fundamental en la química prebiótica de la Tierra primitiva.

Esta molécula se identificó en restos del meteorito Almahatta Sitta, que cayó en el desierto de Nubia (Sudán) en 2008. Sin embargo, el análisis realizado no pudo discernir el origen de la etanolamina en este meteorito. Una de las posibilidades es que se formara a partir de precursores moleculares más sencillos en el medio interestelar, incorporándose posteriormente al asteroide parental durante su proceso de formación. Si esto fuera cierto, entonces la etanolamina debería estar presente en el gas del medio interestelar. Por este motivo, un equipo científico multidisciplinar de astrofísicos, astroquímicos y bioquímicos del [Centro de Astrobiología \(CAB\)](#) nos planteamos el desafío de detectar esta molécula por primera vez en el espacio.

LA BÚSQUEDA DE ETANOLAMINA EN EL MEDIO INTERESTELAR

Para detectar moléculas en nubes moleculares interestelares se utilizan observaciones con radiotelescopios que operan en los rangos de longitudes de onda centimétricas, milimétricas y submilimétricas. Las moléculas de una parcela de gas en el medio interestelar que se encuentra a una cierta temperatura rotan y vibran en función de dicha temperatura y, al hacerlo, emiten luz. Dado que los niveles de energía de la molécula están *cuantizados*, y que cada transición entre niveles produce fotones a una determinada frecuencia, cada molécula emite un espectro de emisión característico y unívoco. Para confirmar la presencia de una molécula en el espacio se requiere la detección de varias de estas transiciones, de manera que se descarten falsos positivos o que la señal observada se deba a luz emitida por otras moléculas.

Para abordar la detección de la etanolamina, nuestro equipo utilizó dos potentes radiotelescopios situados ambos en suelo español. Por un lado, el radiote-

lescopia de 40 metros de diámetro del [Observatorio de Yebes](#), en Guadalajara, y por otro, el [radiotelescopio IRAM de 30 metros](#) de diámetro que se encuentra en el Pico Veleta (Sierra Nevada), en Granada (Figura 2). Con estos telescopios observamos una nube molecular situada en el centro de nuestra galaxia llamada G+0.693-0.027. Esta nube es un laboratorio ideal para descubrir nuevas moléculas en el espacio, puesto que es una de las fuentes astronómicas conocidas que presenta mayor riqueza química. Hasta la fecha, más de 120 especies moleculares distintas se han detectado en G+0.693-0.027.

Gracias a estas observaciones hemos obtenido un barrido espectral sin precedentes de esta nube molecular, que cubre varias decenas de gigaherzios a longitudes de onda entre 1 y 7 milímetros. Esto nos ha permitido buscar múltiples transiciones rotacionales de etanolamina, lo cual era un requisito indispensable para la identificación clara y definitiva de la molécula. Moléculas complejas como la etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) emiten transiciones muy débiles con intensidades típicas de unos pocos milikelvin en escala de temperatura de antena. Por tanto, es necesario que las observaciones realizadas con radiotelescopios sean muy profundas. Tras decenas de horas de observación usando ambos telescopios, conseguimos alcanzar una sensibilidad

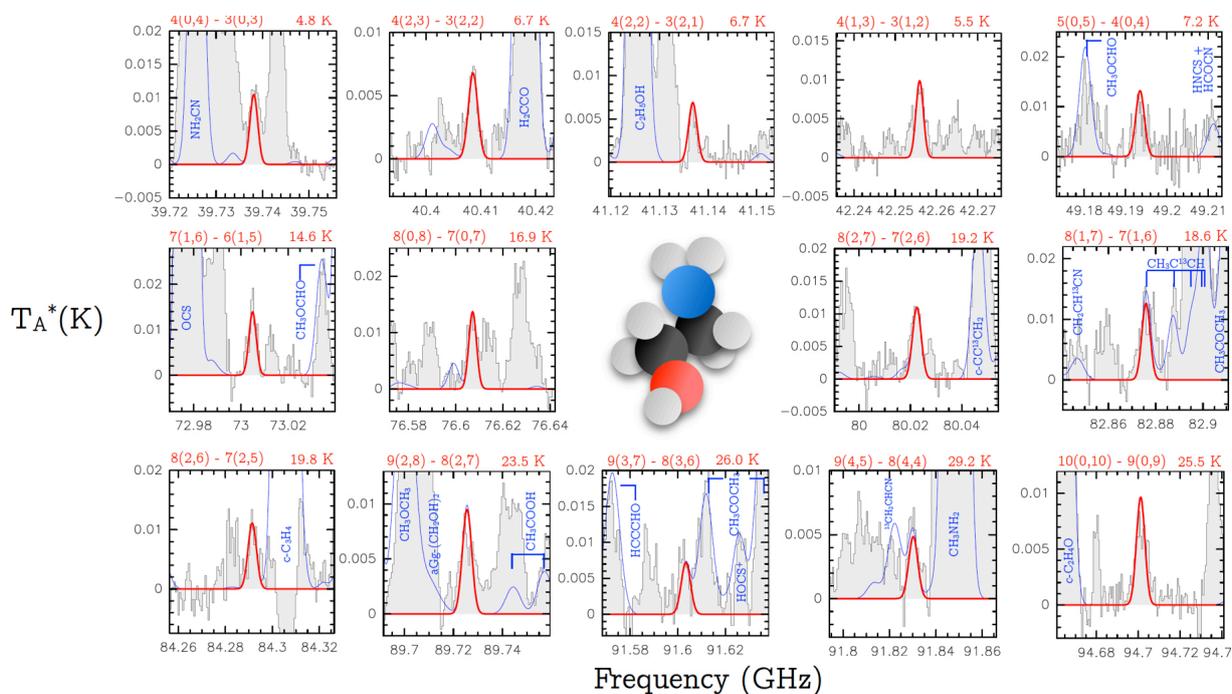
exquisita, cercana al milikelvin, que nos permitió detectar la presencia de etanolamina por primera vez en el espacio. El descubrimiento se publicó a mediados de este año en la prestigiosa revista [Proceedings of the National Academy of Sciences \(PNAS\)](#).

En la Figura 3 se muestran las catorce transiciones rotacionales limpias (libres de contaminación por parte de luz procedente de otras especies moleculares) de etanolamina que se han identificado en el barrido espectral de la nube molecular G+0.693-0.027. El análisis realizado, que utiliza condiciones de equilibrio termodinámico local, ajusta perfectamente las transiciones observadas (línea roja en Figura 3), confirmando no sólo la presencia de la molécula en el medio interestelar sino también proporcionando información acerca de la cantidad en la que se encuentra (su abundancia molecular). Nuestras observaciones indican que la etanolamina es unas 10^{-10} veces menos abundante que el hidrógeno molecular (H_2), y en torno a 1000 veces menos abundante que la molécula orgánica compleja más sencilla, el metanol (CH_3OH). Aunque esta abundancia pueda parecer pequeña, en realidad dista mucho de serlo. De hecho, considerando la relación de abundancias entre la etanolamina y el agua en el medio interestelar, y la cantidad de agua que pudo haber llegado a la Tierra transportada por meteoritos, hemos estimado

Figura 2: Radiotelescopios usados para la detección de etanolamina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) en la nube molecular G+0.693-0.027: Yebes 40m (izquierda), situado en Yebes (Guadalajara, España), e IRAM 30m, situado en Sierra Nevada (Granada, España). Créditos: Wikipedia.



Figura 3: Transiciones rotacionales de etanolamina detectadas en los espectros observados de la nube molecular G+0.693-0.027 (histogramas grises). El mejor ajuste, asumiendo condiciones de equilibrio termodinámico local, se indica con las líneas rojas. La emisión de otras moléculas anteriormente identificadas se indica en azul. Créditos: Rivilla et al. (2021), PNAS, 118 (22) e2101314118.



que cerca de 10^{15} litros de etanolamina podrían haber sido transferidos a la Tierra primitiva desde el espacio. Este volumen es equivalente al del lago Victoria, el segundo lago de agua dulce más grande de la Tierra.

IMPlicACIONES PARA LA QUÍMICA PREBIÓTICA Y EL ORIGEN DE LA VIDA

La detección de etanolamina en la nube molecular G+0.693-0.027 confirma que un posible precursor de fosfolípidos se sintetiza de forma eficiente en las condiciones extremas del medio interestelar. Como consecuencia, la etanolamina podría haber sido transferida de la nube molecular natal de nuestro Sistema Solar a objetos menores como cometas y asteroides, que pudieron posteriormente transportarla a la joven Tierra. Una vez en la superficie de nuestro planeta, la disponibilidad prebiótica de etanolamina, junto con la de ácidos y alcoholes grasos, pudo haber contribuido a la aparición de los primeros fosfolípidos, que formaron membranas celulares mucho más resistentes y eficientes. Esta hipótesis es consistente con [experimentos de química prebiótica](#) que simulan en el labo-

ratorio las condiciones químicas de la Tierra primitiva, y en los que se ha demostrado que la etanolamina es un precursor molecular a partir del cual se pueden formar fosfolípidos. En este escenario, las protocélulas dotadas de nuevas membranas, podrían haber incorporado de su entorno otras especies moleculares necesarias para la síntesis de ARN y para realizar los primeros procesos replicativos y metabólicos.

Los trepidantes avances de la astroquímica en los últimos años, de los cuales la detección de etanolamina es un buen ejemplo, nos están enseñando que los precursores moleculares esenciales para la vida están presentes en las regiones donde se forman nuevas estrellas. No hay duda de que buena parte de los ingredientes básicos para la receta de la vida están disponibles en la cocina de los sistemas planetarios jóvenes. Esto tiene profundas implicaciones no sólo para el origen de la vida en la Tierra, sino también en otros planetas y satélites de nuestro Sistema Solar y en los numerosos exoplanetas descubiertos hasta la fecha fuera de él.

LA ESO EN LA PRÓXIMA DÉCADA

Tras casi 60 años de existencia, la ESO se encuentra en una posición de liderazgo mundial en lo que respecta a infraestructuras astronómicas en tierra. Los observatorios de la ESO en operaciones (entre otros el VLT, el VLTI y ALMA) se encuentran entre los más productivos del mundo. A la vez, la ESO está construyendo el que será el mayor telescopio óptico/infrarrojo del mundo (el ELT). No solo las prestaciones del ELT superarán las de sus competidores, sino que además es el único que tiene su financiación asegurada al 100% y el que primero planea comenzar las observaciones científicas. Junto con otras actividades, como por ejemplo la futura operación de CTA-Sur, la ESO continuará asegurando las herramientas básicas para que la comunidad astronómica en sus estados miembros consolide su liderazgo.



Xavier Barcons

Director General de la Organización Europea para la investigación astronómica en el hemisferio austral (ESO)
xbarcons@eso.org

DE DÓNDE VENIMOS

La ESO (Organización europea para la investigación astronómica en el hemisferio austral) es un organismo intergubernamental fundado en 1962 por 5 estados europeos. Ese hito fundamental en la astronomía mundial fue el resultado fructífero de largas conversaciones y arduas gestiones de astrónomos europeos en el contexto de una Europa fragmentada como consecuencia de la segunda guerra mundial. La supremacía de EEUU en astronomía terrestre era avasalladora en aquella época, hasta el punto de que en Europa se consideraba la astronomía extragaláctica como algo inalcanzable dados los telescopios disponibles. La apuesta por la colaboración primero entre observatorios en distintos lugares de Europa, que en 1962 se consolidó en una cooperación entre estados, fue una de las semillas que acabó desencadenando la situación actual. La ESO cuenta con 16 estados miembros (España ingresó como miembro de pleno derecho con efectos de 1 de Julio de 2007), un socio estratégico (Australia) desde 2018 y desde 1963 una alianza con Chile, donde se encuentran por ahora todos los telescopios de la ESO.

Es importante destacar que el carácter de Organismo Intergubernamental conlleva un compromiso muy sólido por parte de los estados miembros, tanto en términos de apoyo financiero como de compartir objetivos programáticos. No es de extrañar que los gobiernos sean reacios a constituir Organismos Intergubernamentales y busquen otras formas menos comprometidas de colaboración (asociaciones o ERICs – European Research Infrastructure Consortium). Muy recientemente SKA se ha constituido como Organización Intergubernamental, siendo la segunda de tal tipo en astronomía en todo el mundo.

Pero las dificultades que conlleva comprometer a gobiernos y parlamentos alrededor de una tarea común tienen después sus compensaciones. La más importante es la capacidad de organismos como la ESO de planificar a largo plazo, puesto que se sabe con buena fiabilidad la proyección presupuestaria. Ello permite planificar y desarrollar proyectos muy ambiciosos, cuya construcción lleva entre 10 y 20 años, para después garantizar su operación.

DÓNDE ESTAMOS

Como ya he comentado, la ESO tiene en la actualidad 16 estados miembros, una asociación estratégica con Australia desde 2018 a 2027 y una alianza con Chile desde 1963, con carácter de tratado internacional. Trabajamos en la ESO unas 750 personas de más de 30 nacionalidades distintas, 450 en la sede central de Garching en Alemania, y otras 300 en los observatorios en el desierto de Atacama o en las oficinas de Santiago. El presupuesto anual "base" es de unos 180 MEUR, que en la actualidad ascienden hasta casi 350 MEUR debido a la construcción del ELT (Extremely Large Telescope). Desde 2017 se publican cada

año entre 1000 y 1100 artículos científicos con referee usando datos obtenidos en telescopios de la ESO, y en el caso de ALMA o APEX solo usando tiempo asignado a la ESO. De ese millar largo de artículos, un 35% utilizan el [archivo científico](#), y de estos últimos la mitad aproximadamente no han requerido observaciones nuevas. Hay más de 22000 usuarios de 130 países que utilizan el archivo científico de la ESO.

La ESO tiene en operación actualmente una potente batería de telescopios que dan servicio a esta comunidad. El llamado Observatorio de La Silla Paranal incluye los siguientes elementos en operación:



Vista aérea del Observatorio La Silla, ubicado en la parte sur del desierto de Atacama, a 600 km al norte de Santiago de Chile. Crédito: ESO.

- La Silla:
 - El telescopio de 3,6m dedicado esencialmente a medir velocidades radiales
 - El telescopio NTT (New Technology Telescope, el primero en incorporar óptica activa) de 3,5m dedicado especialmente a seguimiento de fenómenos transitorios
 - Una docena de pequeños proyectos operados por institutos de los estados miembros de la ESO y a los que se presta apoyo técnico bajo demanda.
- Paranal:
 - El Very Large Telescope (VLT), un sistema que consta de 4 telescopios de 8,2 metros de diámetro cada uno, con 3 instrumentos en cada uno de ellos (2 en el foco Nasmyth y 1 en el Cassegrain), más un instrumento llamado ESPRESSO (con participación española) en el foco Coude combinado de los 4 telescopios. Uno de los 4 telescopios está equipado con un sistema de óptica adaptativa, que incluye un sistema de 4 láseres, y que permite corregir parte de los efectos de la turbulencia atmosférica en tiempo real.
 - El VLTI (Very Large Telescope Interferometer), una infraestructura de alta precisión que permite combinar interferométricamente los haces de hasta 4 telescopios, ya sean los anteriores o los 4 telescopios auxiliares móviles de 1,8 m de diámetro. En el laboratorio del VLTI hay en la actualidad 3 instrumentos operativos (GRAVITY, MATISSE y PIONIER).
 - Los telescopios de cartografiado VST (2,6 m en el óptico) y VISTA (4,1 m en el infrarrojo). VISTA va a equiparse en 2023 con un espectrógrafo multiobjeto de fibras llamado 4MOST.
- APEX (Atacama Pathfinder EXperiment):
 - Un telescopio submilimétrico de 12 m de diámetro, equipado con distintos instrumentos, que la ESO opera para una asociación con el MPIfR y el Onsala Space Observatory.

Vista aérea del Observatorio Paranal en Chile. Crédito: ESO.



El amplio abanico de instrumentos que ofrece Paranal se desarrolla por parte de consorcios de institutos en los estados miembros, junto con la ESO. La ESO aporta (una parte de) los costes capitales, el consorcio aporta el trabajo (financiado con fondos nacionales) y el resto de los costes. Estas aportaciones de los consorcios se compensan con noches de tiempo de observación garantizado.

ALMA ([Atacama Large Millimeter/submillimeter Array](#)) es un radio-interferómetro en banda milimétrica y submilimétrica que resulta de una asociación entre la ESO, la NSF en América y NINS en Japón. Es un proyecto verdaderamente global, cuya gobernanza reposa sobre los intereses comunes de los tres socios. En Chile, el Joint ALMA Observatory es responsable de las operaciones en el lugar de observación (el Llano de Chajnantor a 5050 metros de altitud), aunque en la operación participan también los centros de apoyo en la ESO (Garching), NRAO (Charlottesville) y NAOJ (Mitaka). ALMA realizó las

primeras observaciones científicas en 2011. Está equipado con un conjunto de receptores en distintas bandas que aprovechan las ventanas de buena transmisión atmosférica que ofrece el Llano de Chajnantor. Hay un programa de desarrollo de ALMA que prevé al menos doblar la sensibilidad del interferómetro durante la próxima década.

El ELT ([Extremely Large Telescope](#)) será el mayor telescopio infrarrojo/óptico del mundo, con un diámetro en el espejo primario segmentado de 39,3 m y operando con un sistema de óptica adaptativa a través de su cuarto espejo deformable. El presupuesto de construcción para la ESO asciende a 1.300 MEUR a los que hay que sumar el apoyo organizativo de la ESO y las aportaciones de los consorcios a la primera generación de instrumentos.

El telescopio se instalará en Cerro Armazones, y se operará como parte del observatorio de Paranal. Esto requerirá una importante transformación del





Construcción de los cimientos de la cúpula para el telescopio Extremely Large Telescope (ELT).

modelo operativo para que esta operación sea financiera, social y medioambientalmente sostenible. Las obras en Cerro Armazones están en marcha y se empiezan a ensamblar ya las paredes de acero del edificio auxiliar sobre el que se asentará la cúpula. En la industria europea la mayoría de los elementos (optomecánica, control, etc.) están ya en manufactura o en avanzado estado de diseño. La primera generación de instrumentos (MICADO, MAORY, HARMONI y METIS) está también en las últimas fases de diseño final.

El ELT no solamente será el más potente de los 3 telescopios de esta generación (los otros dos son el GMT de 24 m y el TMT de 30 m), sino que es el único cuya construcción está financiada al 100% por los estados miembros de la ESO, es el que está más avanzado en su desarrollo y es el que primero prevé realizar observaciones científicas hacia finales de 2027¹.

En la zona de Paranal-Armazones se instalará también la componente sur del Cherenkov Telescope Array (CTA-S), mientras que la componente norte CTA-N estará en el Observatorio del Roque de los Muchachos. El CTA está en fase de preparación, se espera que durante 2022 se constituya el CTA-ERIC (del que ESO formará parte) y se apruebe el proyecto de construcción. Entre tanto, la carretera de acceso a CTA-S se va a comenzar a construir en marzo de 2022.

Además de construir y operar estos observatorios, la ESO realiza también otras actividades acordes con su misión. Contribuimos a la formación de científicos e ingenieros a través de contratos predoctorales (260 en los últimos 10 años) y postdoctorales (150 en los últimos 10 años); llevamos a cabo proyectos de desarrollo tecnológico relacionados con los futuros telescopios e instrumentos y contribuimos significativamente a la educación y difusión de la astronomía con multitud de productos e iniciativas.

HACIA DÓNDE VAMOS

En los últimos años la ESO está actualizando su cadena estratégica (Misión-Visión-Valores-Estrategia) para definir el marco de futuro. La **Misión** de la ESO sigue siendo la estipulada en la Convención que se rubricó en 1962 por primera vez y que ha sido ratificada por todos los estados miembros:

- Construir y operar telescopios astronómicos de primera calidad en tierra
- Fomentar la cooperación en temas relacionados con la astronomía

La **Visión** actual de la ESO fue fijada a principios del siglo XXI como guía de hacia donde debía dirigir sus pasos la organización. De manera simplificada, esta visión consiste en construir y poner en operación el ELT, manteniendo Paranal y ALMA al frente de la astronomía mundial. Esta visión va a ser revisada por el consejo de la ESO con el fin de guiar los pasos de la ESO a largo plazo, particularmente más allá de la próxima década.

Los **Valores** son las suposiciones sobre las que se asientan todas las actividades del organismo. En septiembre de 2021, el Consejo de la ESO aprobó la nueva formulación de estos valores, que se hará pública en breve en www.eso.org. Dichos valores incluyen el perseguir la excelencia a través de la innovación, el servicio a las comunidades, la promoción de diversidad e inclusión (tanto en género como en las demás dimensiones) y la sostenibilidad, en sus tres vertientes financiera, social y medioambiental.

En diciembre de 2020, el Consejo de la ESO aprobó la Estrategia de la organización para la década 2021-2030². Esta se formuló alrededor de 4 objetivos:

1. Implementar y operar el ELT como el telescopio más potente del mundo
2. Mantener los actuales observatorios a la cabeza de la investigación astronómica
3. Garantizar que la organización está preparada para proyectos futuros, cuando las proyecciones financieras lo permitan
4. Mantener el papel de liderazgo de la ESO en astronomía

Es natural que en la mente de muchos empiece a circular la pregunta relacionada con el tercer punto: ¿qué proyecto? y ¿cuándo?. Lo cierto es que no tengo respuestas a esas preguntas en la actualidad. El ELT es un proyecto de una envergadura (en todos los sentidos) fuera de lo común para la ESO. Los costes de construcción del ELT ascienden a unos 7 presupuestos anuales, pero a la vez hay que mantener Paranal y ALMA operativos, actualizados y proporcionando datos de primera calidad. En la situación económica actual, hasta más allá del 2030 la ESO tiene su presupuesto comprometido con el ELT, incluso después de su puesta en funcionamiento. Así que solo puedo pedir paciencia y mucho apoyo al ELT.

Quiero terminar aquí con un objetivo muy inmediato que queremos abordar en 2022, después de dos años de pandemia: reconectar con la comunidad a la que servimos y en general con la sociedad³. Coincidiendo con el 60 aniversario de la fundación de la ESO, es importante revitalizar las alianzas con la comunidad astronómica, con los estados miembros que financian nuestras actividades y con la sociedad en general a la que nuestras actividades benefician en distintas formas.

NOTAS

¹ Por ejemplo, en el decadal survey *Astro2020 Pathways to discovery of astronomy and astrophysics for the 2020s* (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, EEUU) se indica en la sección 7.6.1.1: *For comparison, the European Southern Observatory (ESO) is building the ESO ELT on Cerro Armazones in Chile with a 39.3 m diameter and a 10 arcminute FOV, with first light expected in 2028. Both the TMT and the GMT are well into development; both projects have mature designs and have commenced fabrication of key elements, although challenges remain. They are expected to commence operations in the mid 2030's, contingent on a U.S. funding commitment.*

² Waelkens, C., Benz, W. & Barcons, X., ESO Strategy for the 2020s, *The Messenger* 183, 3 (2021).

³ Los beneficios que retorna la ESO a la sociedad están recogidos en el informe: [ESO's Benefits to Society](#).

Un OSIRIS renovado entrará en servicio a principios de 2022. En su ubicación definitiva en el foco Cassegrain de GTC, y dotado de un nuevo detector monolítico, sensible al azul, proporcionará incluso mejores prestaciones para proseguir un longevo y exitoso aprovechamiento científico.

*In memoriam Paco Cobos,
Lorenzo Peraza y Héctor Castañeda*



Jordi Cepa

Instituto de Astrofísica de Canarias/U. La Laguna
jcepano@ull.es

Antonio Cabrera-Lavers

Instituto de Astrofísica de Canarias/GRANTECAN
antonio.cabrera@gtc.iac.es

Esta es una historia de hace mucho tiempo
El Hobbit, de J.R.R. Tolkien.

CUANDO OSIRIS NO TENÍA NOMBRE

El desarrollo de OSIRIS fue una larga y dificultosa singladura desde las costas de su concepto, hasta el puerto de su puesta a punto como instrumento de Día Uno del telescopio GTC.

El punto inicial puede situarse en la reunión para la puesta en marcha de la instrumentación del GTC, en la sede de GRANTECAN, los días 23 y 24 de octubre de 1997. En dicha reunión se formaron cuatro grupos de trabajo: espectroscopía óptica, imagen y espectroscopía infrarroja, alta resolución espacial, e imagen óptica. El grupo más numeroso fue el segundo, donde la sala apenas daba abasto para todas las personas interesadas. Al grupo de imagen óptica solamente asistimos, además de personal de GRANTECAN, Miguel Sánchez y yo (Jordi Cepa). Hay que añadir las demostraciones de interés que mandaron por correo Ignacio González y Emilio Alfaro, que no pudieron estar presentes. Los grupos de trabajo estaban encaminados a favorecer la formación de consorcios instrumentales, liderados por españoles, que confeccionarían unas “cartas de intenciones”, que fueron convocadas el 1 de diciembre de 1997, y dotadas de un presupuesto exiguo, destinadas a favorecer la preparación del futuro “anuncio de oportunidad”.

La lectura de la documentación asociada me dejó con la certidumbre de que eso no era lo mío. Pero los intereses científicos del grupo de imagen óptica no iban a estar cubiertos por ninguno de los otros instrumentos en proyecto. El espectrógrafo óptico de alta resolución no estaba inicialmente diseñado para acomodar la funcionalidad de modo imagen y, aunque posteriormente se consideró la posibilidad de cubrir ese nicho, el campo que se barajaba era reducido y el modo imagen presupuestariamente contingente. Esta situación, junto con la posibilidad de que los instrumentos de Día Uno del GTC no permitiesen la toma de imágenes ópticas, me resultaba algo inusual y poco conveniente estratégicamente. Estas fueron las razones que me llevaron a entregar la carta de intenciones, del instrumento ya bautizado como OSIRIS, el 29 de enero de 1998, cuya aprobación permitió llevar a cabo la primera reunión del futuro equipo científico (que en inglés se denominaba *Instrument Definition Team* -IDT-, Figura 1).



Figura 1.- Primera reunión de los miembros fundadores del equipo científico de OSIRIS el 22 de mayo de 1998 en Santander. A la derecha Héctor Castañeda. Fotografía cortesía del Diario Montañés.

MUCHOS REQUISITOS

Mi convencimiento de la necesidad de ofrecer la capacidad de tomar imágenes fue compartido por un entusiasta grupo extendido de colegas, de tres continentes, que apoyaron científica y técnicamente la idea, hasta llegar a una sólida propuesta de un instrumento único, versátil y poderoso, que dotara al GTC con modos de imagen y espectroscopía para una amplia ciencia.

En efecto, a contracorriente de la tesis entonces dominante, que era optar por un nicho científico competitivo y novedoso, y desarrollar los requisitos del instrumento alrededor de ese entorno específico, en el equipo científico decidimos optar por un instrumento multipropósito que permitiese una amplia variedad de casos científicos en Día Uno.

Por añadidura, se adoptó la decisión de que también se pudiera instalar en el foco Cassegrain, cuya envolvente mecánica relativamente reducida no permitía la instalación de cualquier instrumento. De esta manera se llenaba un nicho focal, se ampliaba el tiempo de vida y se aumentaba la eficiencia

al prescindir del espejo terciario. En resumen, se propuso un instrumento de larga vida útil, no limitado a un caso científico específico, y que sirviera de piedra angular del GTC. Esa entonces denostada opción, ha demostrado, en retrospectiva, ser un acierto (además, permite tomar imágenes *just for fun*, si se me permite el comentario para *connoisseurs*). Más aún, permitió que OSIRIS formara parte fundamental de las contrapartidas observacionales para la entrada de España en ESO. El Anuncio de Oportunidad se convocó finalmente el 17 de julio de 1998 con fecha límite el 15 de diciembre de 1998 y se presentaron 8 propuestas instrumentales.

El desarrollo del instrumento giró en torno a tres carencias fundamentales: la falta de experiencia del equipo científico incluyendo, claro está, al que suscribe (Jordi Cepa) como IP, y la falta de presupuesto y de personal técnico. La primera se palió parcialmente con el tiempo y el cambio de la política de contratación de instrumentos de GRANTECAN, la segunda con un Proyecto de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico (Modalidad P4) del Ministerio



Figura 2.- Algunos de los integrantes del equipo técnico de OSIRIS tras su instalación en GTC. Fotografía cortesía de Víctor González Escalera.

de Educación y Cultura, y la tercera cuando, ya a finales de 2006, se decidió dar prioridad a OSIRIS con respecto otros proyectos instrumentales del IAC, con los que competía en recursos humanos.

Bajo el punto de vista de diseño, los requisitos de alto nivel estaban condicionados por permitir los modos de imagen y espectroscopía de baja-media resolución y, especialmente, por el uso de filtros sintonizables. Este modo de observación, basado en etalones de muy baja resolución, no solamente permitía observar en cualquier longitud de onda con una cierta variedad de anchuras espectrales angostas, sino compensar de este modo las derivas en longitud de onda desde el centro al borde del campo, inherentes al campo relativamente amplio del instrumento, que no podían corregirse en caso de utilizar filtros de banda estrecha convencionales. Presenta, además, la ventaja añadida de que el amplio espacio en pupila necesario para acomodar filtros sintonizables, permitió aumentar

la resolución espectral de los prismas escalonados utilizados en espectroscopía.

MEJORAS PROPUESTAS

El diseño inicial incluía, además de la imagen convencional y sintonizable, los modos de espectroscopía multiobjeto y fotometría y espectroscopía rápidas. Pero ya el 1 de octubre de 2002 se propuso al Comité Científico Asesor (*Scientific Advisory Committee*) del GTC y, posteriormente, el 21 de octubre de 2011, al Director General de GRANTECAN, cambiar el detector por otro sensible al azul, e incorporar modos adicionales: etalones de alta resolución, polarimetría, unidades de campo integral basadas en fibras o rebanadores de imagen, y más alta resolución espectral. Alguna de estas mejoras propuestas por el equipo científico de OSIRIS ya ha sido implementada, mientras que otras van a ser implementadas próximamente por otros equipos, lo que demuestra la versatilidad del diseño, y la vitalidad y competitividad del instrumento.

EL EQUIPO DE OSIRIS

En el diseño de cualquier instrumento interviene un equipo de investigadores, que establece los requisitos de alto nivel, un equipo de ingenieros, que lo diseña y construye o supervisa la construcción de las distintas unidades que lo componen, y un/a gestor/a que actúa de intermediario entre unos y otros y que forma estrecho equipo con el IP. OSIRIS es un logro de todo/as ello/as (Figura 2), incluyendo la inestimable participación del equipo de ingeniería del Instituto de Astronomía de la Universidad Nacional Autónoma de México, pero me gustaría destacar el papel de dos de los ingenieros del proyecto que, aunque lamentablemente nos han dejado, siguen presentes en nuestros pensamientos.

Mucho se le debe a Paco Cobos (Figura 3), técnico académico del IA-UNAM. Paco apoyó la participación del IA-UNAM en el instrumento desde el primer momento, y fue responsable del diseño óptico inicial que permitió responder al Anuncio de Oportunidad. Este diseño inicial era totalmente transmisivo, con dos espejos planos que doblaban el haz, y que sirvió de inspiración para otros instrumentos. Sin embargo, en la presentación del instrumento al comité evaluador, fue

sustituido en el último momento por otro diseño catadióptrico que, salvo ajustes finos de optimización de la calidad de imagen, terminó siendo el finalmente adoptado. La alta transmisión de las lentes de la cámara en todo el rango espectral óptico, y los excelentes recubrimientos reflectantes de plata protegida del colimador y del espejo auxiliar, convierten OSIRIS en uno de los instrumentos más eficientes, incluso en el rango azul del espectro óptico, lo que permitirá ampliar prestaciones con el nuevo detector que entrará en operación próximamente, como se discutirá más adelante. Paco fue sin duda un sostén del instrumento, tanto técnico como humano, a lo largo de toda su singladura. Sin olvidar que me bautizó como *Asterix*, dado que el equipo científico estaba formado por *galos irreductibles*.

Lorenzo Peraza (Figura 4), del equipo de mecánica del IAC, fue el responsable del diseño, fabricación y pruebas del mecanismo de cambio de máscaras. A pesar del gran tamaño físico de las máscaras (45 cm x 48 cm), el peso del almacén de máscaras cargado con el máximo número de máscaras posibles, y la exigencia de poder operar en cualquier orientación espacial, consiguió cumplir los estrictos requisitos de repetición de posicionado y con el de tiempo máximo

Figura 3.- Francisco Cobos, ingeniero óptico de OSIRIS y técnico académico del IA-UNAM.



Figura 4.- Lorenzo Peraza, ingeniero mecánico de OSIRIS e ingeniero senior del IAC, con el mecanismo posicionador de máscaras. Fotografía cortesía de Víctor González Escalera.



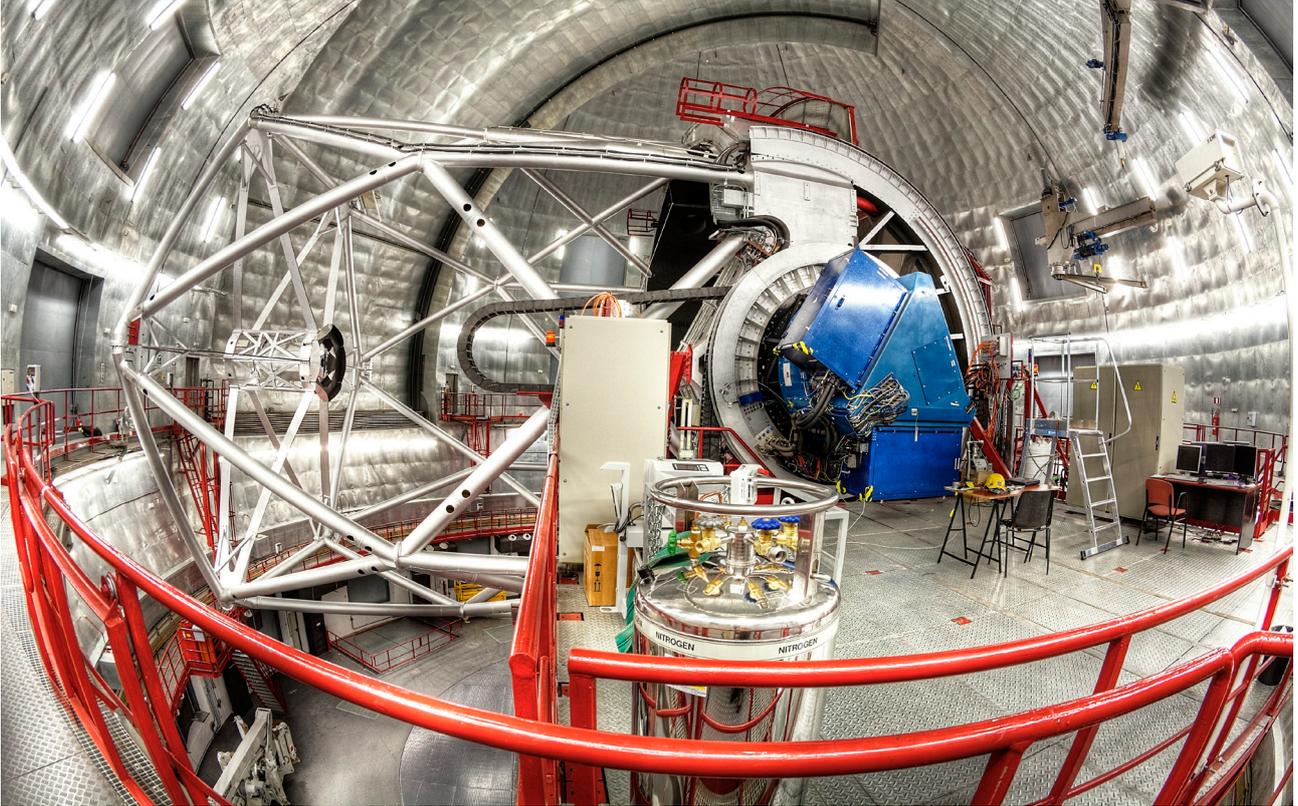


Figura 5.- El instrumento OSIRIS, en la plataforma Nasmyth B del GTC.

de cambio de máscaras, convirtiendo OSIRIS en uno de los instrumentos con un menor tiempo de configuración para esta clase de telescopios. Este es un punto importante puesto que permite optimizar el valioso tiempo de observación disponible.

EL COMISIONADO

Tras las preceptivas pruebas de integración y verificación, OSIRIS fue aceptado para su instalación en uno de los focos Nasmyth del GTC (Figura 5). Curiosamente, parece que fui el único al que le pareció gracioso que, durante el traslado del instrumento a La Palma, nos pusieran una multa por ir demasiado despacio en la autopista sur de Tenerife. Eso sí, que nos parase la Guardia Civil a la salida del barco, porque el vehículo de acompañamiento les pareció sospechoso, ya no lo fue tanto. A pesar de todo, y tras desplazar el instrumento dentro del edificio del GTC sobre un cojín de aire, fue instalado en el telescopio el 4 de diciembre de 2008.

Pero en las primeras pruebas de operación *in situ*, quedó claro que los mecanismos fallaban. Las condiciones de temperatura no eran las mismas dentro de la cúpula en invierno, que en la sala climatizada de integración y pruebas del IAC. Una pequeña reduc-

ción en velocidad de los mecanismos, que les proporcionaba mayor par, solucionó el problema, obviamente tras dar muchas vueltas a las posibles causas.

La instalación de un instrumento en fase de pruebas, en un telescopio también en fase de pruebas, fue realmente problemática. Las pruebas de OSIRIS se demoraron mucho tiempo debido a las paradas técnicas del GTC y a no contar aún con unos procedimientos de operación nocturna suficientemente maduros. Por añadidura, la falta de autoguiado no permitió tomar exposiciones de suficiente duración como para poner de manifiesto la alta corriente de oscuridad del detector. Este problema fue detectado ya en la fase de operación, y paliado unos meses más tarde. En suma, estas circunstancias, junto con presiones fruto de premuras, y el componente personal, impidieron terminar convenientemente el comisionado de OSIRIS.

Pero la historia de OSIRIS se siguió, y se sigue escribiendo, más allá del inicio de su operación científica, aunque esa historia la narran a continuación los responsables de su operación y aprovechamiento científico.

OPERACIÓN CIENTÍFICA CON OSIRIS

La explotación científica de OSIRIS se inició el 1 de marzo de 2009, día "D" del comienzo de la operación nocturna del GTC. Como en cualquier inicio de un nuevo componente, este no estuvo exento de los ineludibles problemas que suponen la puesta en marcha de un sistema tan complejo como el GTC y el propio instrumento en sí. De este modo, como se mencionó anteriormente, los primeros datos obtenidos con OSIRIS en cielo mostraron un valor demasiado alto de la corriente de oscuridad (debido a un problema con el link térmico del detector dentro del criostato), que hacía necesaria la adquisición de imágenes de calibración complementarias (darks) para su posible uso científico. Aún con este problema, los datos obtenidos en este período condujeron a los primeros resultados científicos exitosos de la historia del telescopio y permitieron vislumbrar el prometedor horizonte de descubrimientos futuros que sin duda OSIRIS podría brindar a la comunidad de usuarios del GTC.

Estos problemas técnicos del instrumento para nada han sido la norma habitual durante el largo período de explotación científica de OSIRIS, ya que, de hecho, se trata de uno de los subsistemas más robustos de todos los que se incluyen en la operación del GTC. En sus más de 12 años de uso continuado, los problemas técnicos achacables a OSIRIS han supuesto apenas un 2.4% de las incidencias técnicas de la instalación (Figura 6), lo que indica una afección marginal en la operación del GTC. OSIRIS ha sido, y es hasta la fecha, nuestro 'viejo y fiable' compañero.

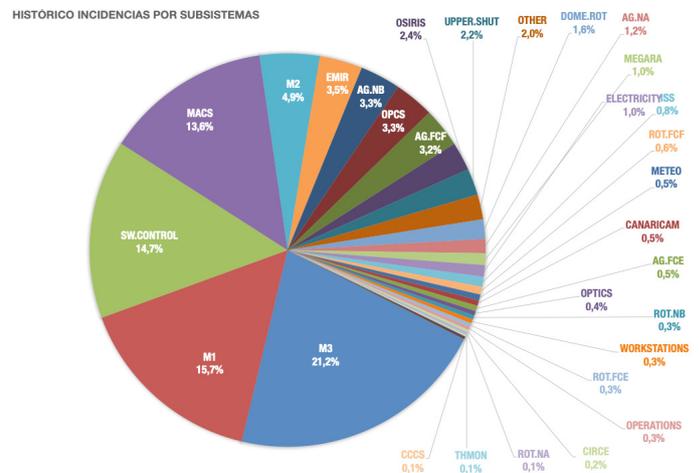
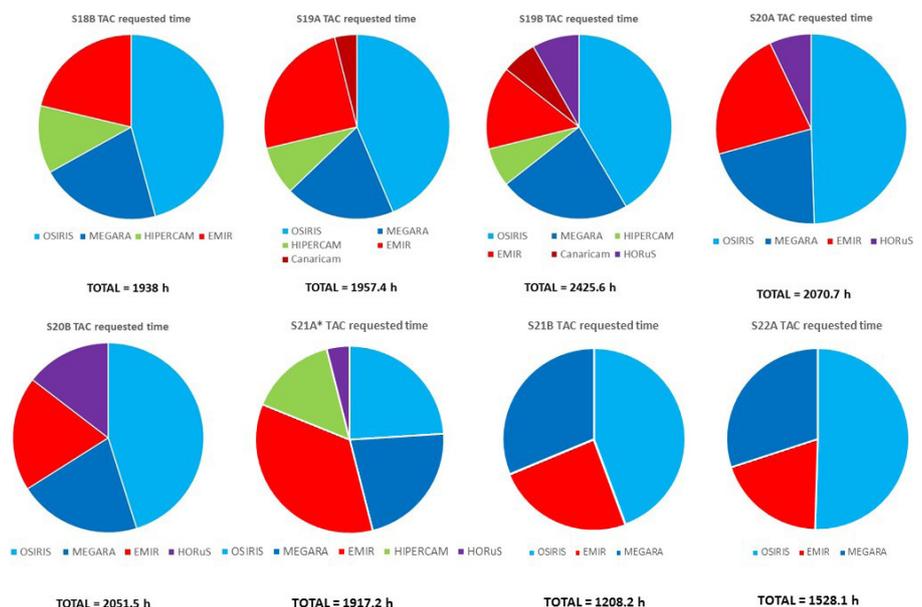


Figura 6.- Distribución histórica de las incidencias técnicas del GTC. Los problemas originados por OSIRIS apenas suponen un 2.4% del total de tiempo perdido, aun siendo de lejos el instrumento más utilizado durante la operación nocturna.

Figura 7.- Evolución de la demanda de tiempo del GTC durante los semestres S18B-S22A, donde se observa que OSIRIS (azul claro) siempre ha sido el instrumento más demandado del telescopio (hay que notar que en el período S21A se ofreció el instrumento en una llamada especial con un número restringido de horas disponibles, de ahí su bajo valor).



En cuanto a la explotación científica, los números de OSIRIS no dejan dudas de que se trata del instrumento más exitoso de la historia del GTC. OSIRIS es el instrumento con mayor demanda de tiempo de observación del telescopio (Figura 7), aun cuando el abanico de instrumentos ofertados se ha ampliado en algunos periodos a cinco o incluso seis instrumentos diferentes.

A raíz de esto, OSIRIS ha sido también el instrumento que mayor número de horas ha producido durante la operación científica del telescopio, ya que cerca del 75% del total de horas ejecutadas con GTC desde 2009 se han realizado con OSIRIS (o lo que es lo mismo, se han obtenido más de 13200 h de datos), manteniéndose este valor por encima del 50% incluso en los periodos de mayor disponibilidad instrumental mencionados anteriormente (Figura 8).

Los resultados derivados de estas observaciones también dan cuenta de la importancia fundamental que OSIRIS tiene para la operación del GTC. De las aproximadamente 700 publicaciones producidas en revistas científicas con datos de GTC hasta el 1 de noviembre de 2021, más del 85 % de las mismas se derivan de observaciones realizadas con OSIRIS, algo muy significativo no solo en cuanto al número global, sino también en cuanto a la calidad científica de las mismas, ya que hasta 27 de las 30 publicaciones de GTC aparecidas en revistas de alto impacto (SCIENCE, NATURE) se corresponden también con datos observados con este instrumento (Figura 8). El abanico de campos científicos cubierto por OSIRIS es amplísimo, siguiendo al pie de la letra la filosofía de uso del GTC como telescopio multipropósito. Es por esto complicado indicar un único 'nicho científico' para OSIRIS, aunque si merece la pena

Figura 8.- Distribución del tiempo observado por instrumento en GTC (izquierda) y su comparativa con la distribución de las publicaciones científicas obtenidas con el telescopio (derecha). OSIRIS ocupa un papel claramente predominante en ambos aspectos.

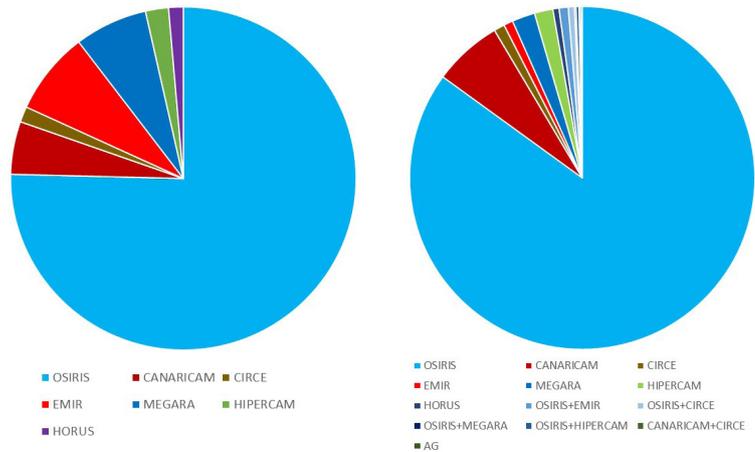
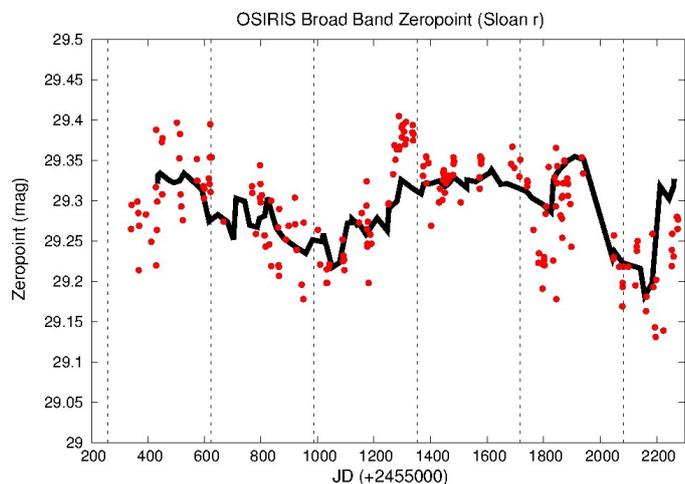


Figura 9.- Evolución del zeropoint fotométrico en OSIRIS (filtro Sloan r) durante los primeros seis años de operación del telescopio y su correlación directa con la reflectividad total de GTC a 650 nm, convenientemente escalada -representada con una línea sólida negra- (Abril-Abril, 2016, SPIE, 9906, 3).



destacar que la combinación de la versatilidad del instrumento y la flexibilidad del modo de operación en cola del GTC han permitido su uso de manera muy eficiente en observaciones de ToOs, con una altísima productividad científica al respecto.

OSIRIS COMO DISPOSITIVO DE MONITORIZACIÓN DEL GTC

De forma adicional, el uso continuado de OSIRIS en el telescopio desde del comienzo de la operación científica ha permitido contar con un elemento único de monitorización de las prestaciones del telescopio. Así, mediante la correlación entre los valores de los *zeropoints* fotométricos de OSIRIS y las medidas de reflectividad directa de los espejos de GTC se ha podido elaborar un procedimiento rutinario de control de calidad de la reflectividad global del telescopio empleando OSIRIS como elemento de medida (Figura 9), alertando al equipo técnico de en qué momentos acometer tareas de mejora de la misma, bien mediante la sustitución de espejos del espejo primario (M1) o a través de la limpieza/aluminizado del espejo secundario (M2) y/o terciario (M3). Con este procedimiento, se ha conseguido aliviar la carga y el consumo de recursos del equipo de mantenimiento del GTC.

FUTURO A CORTO PLAZO DE OSIRIS

La inminente llegada del sistema de óptica adaptativa al GTC (GTCAO) ha provocado que OSIRIS deba cambiar su ubicación actual en el telescopio, liberando la plataforma Nasmyth B en la que ha

estado instalado desde el comienzo de su explotación científica para dejar el espacio a este nuevo subsistema (Figura 10). Al respecto, a lo largo de 2021 se ha preparado una nueva estación focal en el GTC, el foco Cassegrain principal, iniciándose el proceso de migración del instrumento a su nueva ubicación durante la segunda mitad de este año, obteniéndose las últimas observaciones científicas con OSIRIS en agosto de 2021.

Este cambio no solo permitirá ampliar el abanico de instrumentación disponible en el telescopio, contando el GTC con hasta seis estaciones focales operativas durante 2022, sino que se traducirá en una ganancia neta en la eficiencia de OSIRIS de hasta un 10%, por el hecho de eliminar completamente un espejo del camino óptico. A esta mejora en las capacidades de OSIRIS hay que añadir también la llegada de un nuevo detector a principios de 2022, un detector monolítico con mucha mejor respuesta en el azul que el mosaico de CCDs disponibles en la actualidad.

De este modo, el GTC podrá contar a partir de 2022 con su instrumento más demandado y productivo en unas condiciones aún mejores de las explotadas hasta ahora. Por tanto, es fácil suponer que a OSIRIS le quedan por delante aún muchos más años de operación exitosa en el telescopio a disposición de la exigente comunidad de usuarios del GTC.

Figura 10.- Traslado de OSIRIS desde el foco Nasmyth B hacia la cámara del telescopio en agosto de 2021 (izquierda). Trabajos de mantenimiento en OSIRIS en la sala limpia del GTC en octubre de 2021 (derecha).



La mayoría de astrónomos será capaz de responder a la pregunta: “¿de qué está compuesto nuestro universo?”. El famoso gráfico circular (véase la Figura 1) dice: “casi el 70% es Energía Oscura (Dark Energy, DE), algo menos del 30% es Materia Oscura (Dark Matter, DM), y ese porcentaje que falta es la materia ordinaria (Ordinary Matter or Baryonic Matter, BM)¹. Pero, ¿cómo se obtienen estos resultados? Los datos más precisos sobre la composición de nuestro universo y sobre los valores de los parámetros del Modelo Cosmológico Estándar se han obtenido a partir de las observaciones del Fondo Cósmico de Microondas, siendo la misión Planck el mejor ejemplo de esta era. Sin embargo, la cosmología moderna está avanzando hacia una nueva era donde los datos de la Estructura a Gran Escala de nuestro universo serán los protagonistas. En este aspecto, se espera que el satélite Euclid sea crucial en la tarea de revisar el Modelo Cosmológico Estándar.



Guadalupe Cañas Herrera
Universidad de Leiden / Consorcio Euclid
canasherrera@lorentz.leidenuniv.nl

LA MISIÓN EUCLID Y EL OBJETIVO

La Agencia Espacial Europea (ESA) tiene actualmente en marcha la misión Euclid². El objetivo de esta misión es intentar comprender el universo oscuro: origen y naturaleza de la expansión acelerada del universo en su historia reciente, de la cuál se hace responsable a la denominada Energía Oscura, e intentar discernir diferentes modelos sobre la Materia Oscura. Para ello, el satélite Euclid, cuyo lanzamiento se planificó para finales del año que viene, tomará numerosas imágenes de galaxias y cúmulos de galaxias lejanos en el espectro óptico e infrarrojo. El objetivo es crear dos catálogos de galaxias con propiedades distintas: un catálogo fotométrico y un catálogo espectroscópico, con el que se estudiarán las denominadas pruebas observacionales primarias de la misión. Estas pruebas primarias son complementarias entre sí y se espera que consigan resultados prometedores a la hora de constreñir el Modelo Cosmológico Estándar.

Con el catálogo fotométrico se estudiará el efecto de lente gravitatoria débil (Weak Lensing) y la agrupación de galaxias a partir del redshift fotométrico (Galaxy Clustering photometric), midiendo el espectro de potencias angular de ambos observables (Angular Power Spectrum) a partir de galaxias que se encuentran a un redshift aproximado de entre prácticamente 0 y 2.5. Al mismo tiempo, con el catálogo espectroscópico se estudiará la agrupación de galaxias, esta vez utilizando los redshifts espectroscópicos y en el espacio de Fourier, suplementado con mediciones de Oscilaciones Acústicas Bariónicas (Baryonic Acoustic Oscillations, BAO) y distorsiones en el espacio redshift (Redshift Space Distortions, RSD). En este caso, los observables espectroscópicos utilizarán galaxias hasta redshift 1.8.

Para lograr estas mediciones, el satélite Euclid, que estará en el punto Lagrangiano L2 entre la Tierra y el Sol, observará aproximadamente 15000 grados cuadrado del cielo libre de contaminación lumínica de nuestro sistema solar y nuestra galaxia. Se espera que Euclid sea capaz de tomar imágenes de alrededor de 10 miles de millones de fuentes. En términos más técnicos, la misión durará aproximadamente seis años y el satélite en cuestión se lanzará con una Soyuz desde la Guyana Francesa.

A RESULTADOS CIENTÍFICOS: CÓMO LOGRARLO

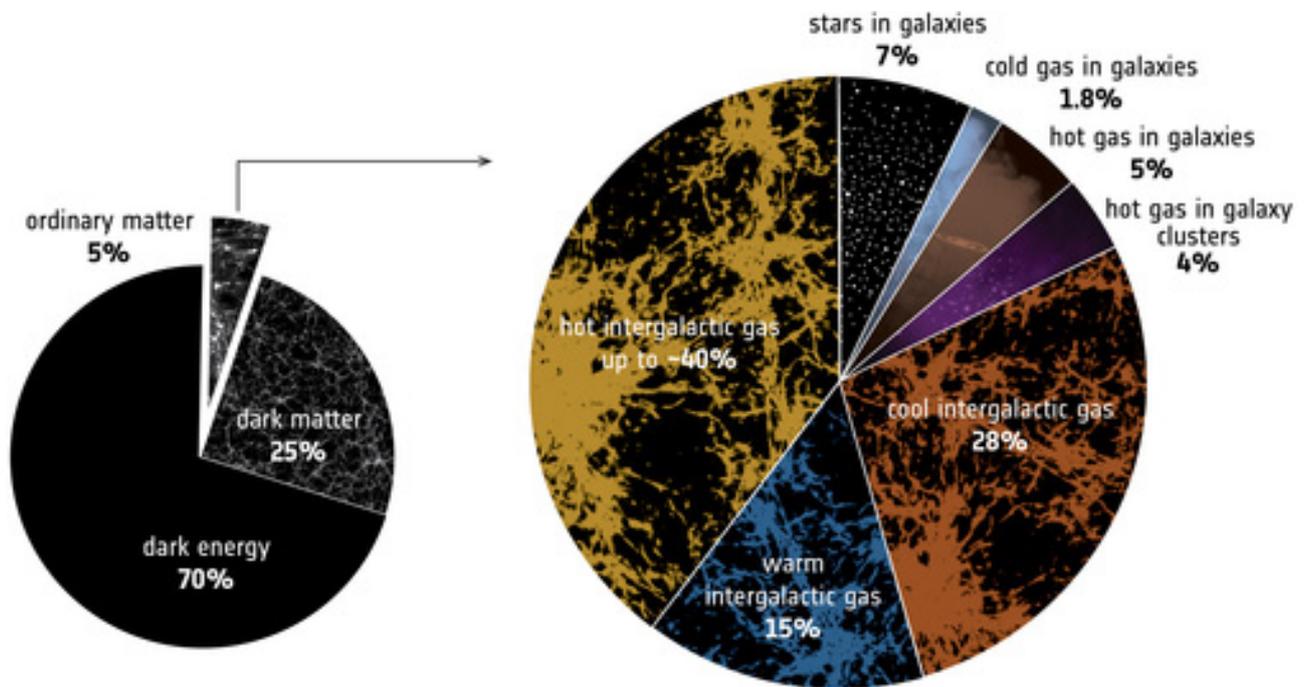


Figura 1. Gráfico Circular con la composición de nuestro Universo. Crédito: ESA.

La magia de la ingeniería dentro del satélite Euclid consistirá en un telescopio con un espejo de aproximadamente 1.2 metros de diámetro (diseñado y fabricado por Airbus), que estará equipado con dos instrumentos científicos: VIS (una cámara panorámica CCD en el espectro visible de gran calidad), NISP-P (un fotómetro triple del infrarrojo cercano en las bandas Y, J y H) y NISP-S (un espectrógrafo de hendidura conocido en inglés como “slitless spectrograph”). La integración de estos instrumentos dentro del módulo de carga concluyó a finales del 2020, y actualmente está listo para que la empresa Thales Alenia Space, en Turín, introduzca el módulo de carga en el módulo final para el lanzamiento.

¿Y quién se encargará de la explotación y análisis de los datos? En 2012, la ESA seleccionó a el Consorcio Euclid como el equipo responsable de la parte científica, producción de datos y control de los instrumentos. La motivación es clara: intentar responder preguntas relacionadas con la física fundamental y la cosmología referentes a la natu-

raleza de la energía oscura y su relación con la gravedad a partir del análisis de los observables primarios. En particular, desde un punto de vista de la cosmología teórica, la misión se centrará en estudiar si la energía oscura puede modelarse como una constante o si su comportamiento puede explicarse gracias a modelos de gravedad modificada. También se comprobarán diferentes modelos de Materia Oscura frente a los datos. Además, se espera que Euclid pueda dar información valiosa de manera indirecta sobre el universo temprano y sus condiciones iniciales, que fueron responsables de la formación de la estructura cósmica que vemos hoy en día.

Aparte de los observables principales, Euclid proporcionará una serie de observables no primarios que serán de mucha utilidad para otras ramas de la astrofísica, como por ejemplo, la relación de los observables principales con el Fondo Cósmico de Microondas (CMB), la correlación cruzada de la agrupación de galaxias con eventos de ondas gra-

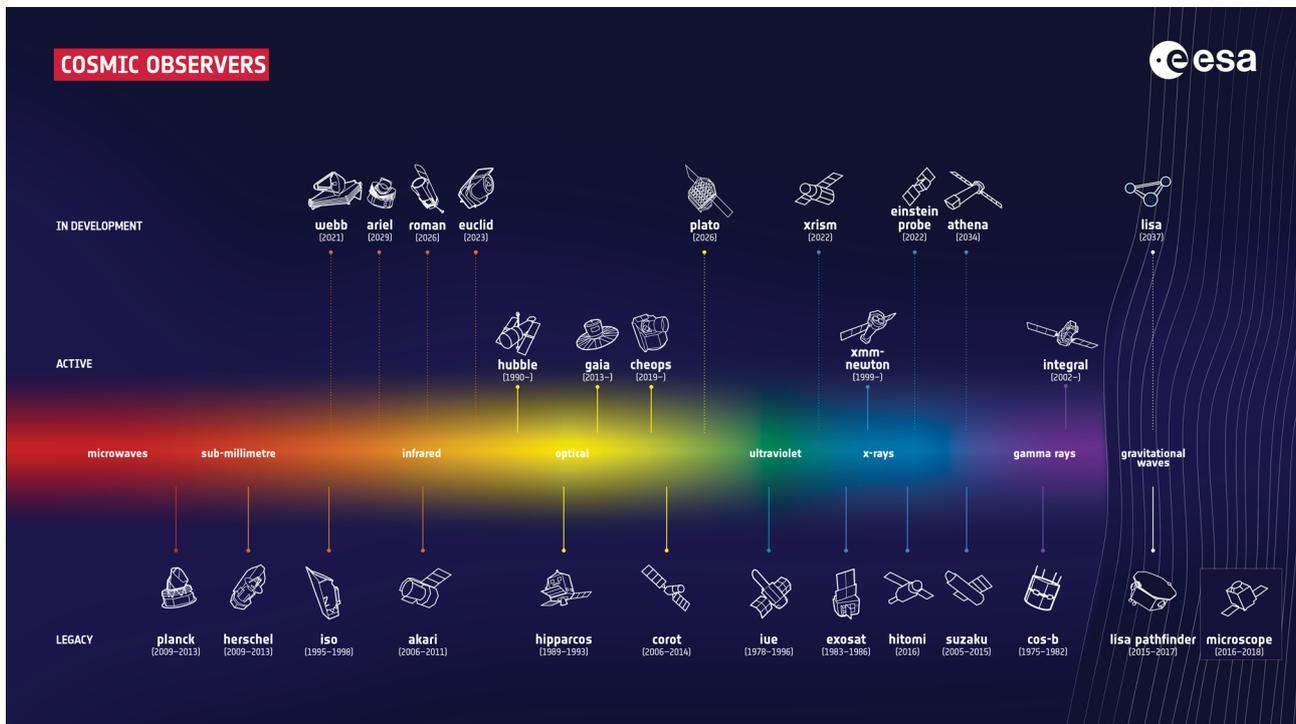


Figura 2. La flota de misiones de la ESA destinadas a hacer observaciones cosmológicas.

vitacionales detectados por LIGO (o próximamente con LISA), el estudio y comprensión de la evolución de las galaxias, detección de supernovas e incluso detección y estudio de exoplanetas. Para poder desarrollar todos los objetivos científicos de la misión, el Consorcio Euclid se compone de más de mil investigadores de diferentes ramas científicas: astrónomos, astrofísicos y físicos teóricos.

EXPLOTAR LOS DATOS

Para poder explotar los datos científicos de la misión, se utilizará fundamentalmente la estadística Bayesiana³ para obtener la distribución de probabilidad de los parámetros de los modelos cosmológicos mas allá del modelo estándar. Sin embargo, no será una tarea fácil.

En primer lugar, las imágenes originales serán procesadas para poder producir los vectores con los datos. Al mismo tiempo, se requerirán 'recetas' teóricas para modelar las pruebas observacionales

primarias para poder producir los vectores teóricos que contengan los parámetros del modelo cosmológico que se desee testear frente a los datos.

La herramienta que se utilizará para comparar los datos con la teoría será la 'likelihood'. De esta manera, la 'likelihood' se convierte en una pieza clave para poder discernir que valores más probables tienen los parámetros de un modelo dado los datos. Su obtención es necesaria para poder llevar a cabo el estudio estadístico de los datos de Euclid. El Consorcio Euclid es consciente de su importancia y por lo tanto ha creado un grupo de trabajo específico para esta tarea. El Grupo de Trabajo Multidisciplinar Likelihood ("Inter-Science Task Force Likelihood", IST:L) es el encargado de diseñar, modelar y crear esta likelihood, a la vez que tiene la responsabilidad de leer los vectores de los datos y de escribir el código para los vectores teóricos a partir de las recetas de los grupos científicos dentro de la colaboración. Es un grupo de trabajo

especial y multidisciplinar dentro del consorcio formado por científicos muy diferentes entre sí (físicos teóricos, cosmólogos observacionales, científicos de datos y de computación...), dirigido por tres líderes con amplia experiencia en análisis de datos y en el funcionamiento de Euclid. Nuestra tarea consiste no solo en obtener la likelihood desde un punto de vista teórico, sino que somos los responsables de generar los códigos computacionales para poder realizar el estudio estadístico completo para todo el consorcio una vez que los datos reales estén disponibles tras el lanzamiento del satélite Euclid.

Un año y medio después de la creación del IST:L, la primera versión de nuestro software vio la luz en un estreno interno dentro del consorcio. Su nombre es CLOE (Cosmological Likelihood and Observables in Euclid, traducido como Likelihood Cosmológica y Observables de Euclid). Todos los miembros del Consorcio Euclid pueden descargarse esta primera versión y probarla. Esta primera versión de CLOE ha sido el resultado no sólo del trabajo de investigación de una lista inmensa de científicos que trabajan en el consorcio, sino que recoge también la experiencia de muchos cosmólogos que están acostumbrados a realizar este tipo de estudios estadísticos. Por lo tanto, hemos intentado que CLOE sea lo más flexible, agradable e intuitivo posible para el usuario.

LA COSMOLOGÍA TIENE SU FUTURO EN LAS MEDICIONES DE LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO

Prácticamente todos los objetivos que Euclid tiene durante su misión serían imposibles de alcanzar por una única persona: se necesitan ingenieros, físicos, astrónomos, gestores, técnicos, etc. Un gran número de investigadores que trabajamos dentro de la Fuerza Especial de Trabajo de la Likelihood somos cosmólogos teóricos que pertenecemos al grupo científico de teoría dentro del consorcio Euclid. Nuestro trabajo principal consiste en desarrollar y estudiar modelos teóricos diferentes del Modelo Cosmológico Estándar para poder explicar ciertos fenómenos observacionales y predecir cómo se van a comportar las pruebas cosmológicas en estos nuevos modelos. Sin embargo, nuestro objetivo va un paso más allá: queremos estudiar nosotros mismos estos modelos frente a los datos, y por eso sabemos que las responsabilidades dentro de este grupo de trabajo son cruciales.

Los mayores avances científicos recientes realizados en el campo de la cosmología han venido de la mano de grandes colaboraciones científicas (WMAP, Planck, BICEP, LIGO/VIRGO...) y seguirán viniendo con la nueva generación de experimentos destinados a explotar la información codificada en la estructura a gran escala de nuestro universo (DES, SKA, Vera Rubin Observatory...) ^{4,5}, donde muchas mentes dispuestas a trabajar en equipo dejan de lado los individualismos para dar paso a la ciencia colaborativa. Este es el caso de Euclid. En la siguiente década, Euclid tendrá un impacto directo y fundamental en el campo de la cosmología. Representará un gran cambio de sentido en el enfoque de análisis de datos cosmológicos que se estaba llevando a cabo actualmente, cerrando finalmente la era de la cosmología de precisión con los estudios del Fondo Cósmico de Microondas y comenzando la era de precisión con los estudios de la estructura a gran escala del universo.

REFERENCIAS

- ¹ https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2020/09/aa33910-18/aa33910-18.html
- ² <https://arxiv.org/pdf/1110.3193.pdf>
- ³ <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1763.0053>
- ⁴ <https://www.darkenergysurvey.org/des-year-3-cosmology-results-papers/>
- ⁵ <https://spain.skatelescope.org>

CIELOS OSCUROS Y SILENCIOSOS

El cielo estrellado lleva inspirando a la humanidad desde hace milenios en todas sus expresiones intelectuales y emocionales: poesía, filosofía, religión y ciencia. La ciencia moderna le debe mucho al seguimiento de los fenómenos astronómicos, y la observación minuciosa del cielo ha servido para estimular y verificar muchos de sus principales avances, como la teoría de la gravedad universal o la de la relatividad general. El progreso tecnológico, y en concreto la iluminación artificial de las áreas urbanas, hace que sea cada vez más difícil observar un cielo nocturno nítido. La contaminación lumínica y la interferencia de señales de radio están poniendo en peligro emplazamientos que fueron elegidos en su día para albergar los observatorios astronómicos más sofisticados. Mas recientemente, las megaconstelaciones de satélites artificiales en órbita terrestre baja han añadido un elemento nuevo de considerable impacto a la observación del cielo.



Casiana Muñoz-Tuñón
Instituto de Astrofísica de Canarias
cmt@iac.es

Piero Benvenuti
Universidad de Padua
piero.benvenuti@unipd.it

En los últimos años se han organizado varias conferencias para analizar la amenaza de la contaminación lumínica y en radio para la astronomía. En particular, la conferencia organizada en 2017 en La Palma, en el 10.º aniversario de la «Declaración Starlight», aprobó una serie de resoluciones. Más recientemente, el 2020, la Unión Astronómica Internacional (IAU, por sus siglas en inglés), junto con la Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA, por sus siglas en inglés) y el Gobierno de España acordaron con la colaboración del Instituto de Astrofísica de Canarias la organización de una conferencia titulada «Cielos oscuros y silenciosos para la ciencia y la sociedad». La conferencia había de celebrarse en Santa Cruz de La Palma, Islas Canarias, España en octubre de 2020; La Pandemia forzó la celebración del evento en línea; el *workshop "Dark&Quiet skies" 2020*.

El objetivo específico del *workshop* fue generar un documento que evaluase el impacto del desarrollo tecnológico en la visibilidad del cielo estrellado, en la astronomía y el bioambiente, y que también describiera todas las medidas que los gobiernos y las empresas privadas pueden adoptar para mitigar su impacto negativo. Estas amenazas son la contaminación lumínica (luz artificial nocturna o ALAN, por sus siglas en inglés), la interferencia de la ingente cantidad prevista (decenas de miles) de satélites en órbita terrestre baja y la protección de ventanas de observación de radio de las transmisiones y emisiones de radar. El documento se presentó a la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos de las Naciones Unidas (COPUOS, por sus siglas en inglés) para ser aprobado y poder así convertirse en una referencia para futuros análisis regulares de la situación.

El éxito de este taller en línea superó con creces las expectativas, con más de 950 participantes registrados de todo el mundo y entre 250 y 380 asistentes en cada uno de los cinco días del evento. La redacción del informe estuvo a cargo de cinco grupos de trabajo formados por expertos de renombre internacional en diferentes campos y se puso de antemano a disposición de los participantes del taller. Los grupos de trabajo revisaron el texto incorporando el gran número de comentarios y sugerencias que los participantes remitieron por escrito. El documento final constituye el informe más completo y actualizado hasta la fecha sobre la protección de los cielos oscuros y silenciosos. El Comité Ejecutivo de la IAU aprobó el resumen del documento (llamado documento de sesión o CRP, por sus siglas en inglés) el 5 de enero de 2021. El CRP tuvo como objetivo informar y concienciar sobre el creciente riesgo de una grave degradación de las observaciones astronómicas a los representantes de alto nivel de las 95 naciones de la ONU que pertenecen a COPUOS.

El CRP incluye medidas de mitigación y recomendaciones específicas para contener y reducir el impacto negativo de todos los desarrollos tecnológicos mencionados. El documento, firmado por Chile, Etiopía, Jordania, Eslovaquia, España y la Unión Astronómica Internacional se presentó al Subcomité Científico y Técnico (STSC, por sus siglas en inglés) de COPUOS en abril de 2021.

Muchas otras delegaciones del STSC apoyaron sin reservas las recomendaciones y el Comité aprobó la siguiente conclusión:

«El Subcomité alentó a la Oficina para Asuntos del Espacio Exterior a dialogar con todas las partes interesadas pertinentes, como la IAU y otras, sobre el tema de los cielos oscuros y silenciosos, ya que guarda relación con el mandato del Comité y sus subcomités, y a presentar el debate, incluidas las acciones y resultados que permitan proseguir el análisis de este tema, para que el Subcomité lo examine durante su 59.ª sesión, en 2022. A este respecto, la conferencia sobre cielos oscuros y silenciosos para la ciencia y la sociedad que organizará la UNOOSA junto con el gobierno de España y la IAU, prevista para octubre de 2021, podrá proporcionar aportaciones para un debate sobre oportunidades de cooperación internacional».

La declaración aprobada es importante, dado que reconoce a nivel de la ONU la relevancia del derecho a disponer de un cielo oscuro y silencioso para la ciencia y la sociedad y menciona la conferencia que se habrá de celebrar en octubre de 2021 en La Palma como un hito en el debate con todas las partes interesadas.

La reunión presencial se celebraría en octubre de 2021 para debatir y acordar estrategias de puesta en práctica de las recomendaciones. La IAU y COPUOS expresaron su gratitud al Gobierno español y al Instituto de Astrofísica de Canarias por prestarse a albergar y organizar la conferencia tras la firma formal de un acuerdo con el país anfitrión. La conferencia de octubre 2021 se centró en discutir las acciones técnicas y políticas necesarias para implementar las recomendaciones. En particular identificar las organizaciones y socios que han de colaborar para implementar soluciones satisfactorias para preservar los cielos oscuros y silenciosos. La conferencia fue coorganizada por UNOOSA y el Gobierno de España, a través del IAC como organizador local y la IAU con apoyo de Noir-Lab. El programa de la conferencia incluyó charlas invitadas y contribuciones seleccionadas por el SOC.

UNOOSA y el Gobierno de España acordaron celebrar la conferencia con un modelo híbrido, con par-

ticipantes en Santa Cruz de La Palma y transmisión del evento *on line* para un grupo más numeroso conectado desde otros lugares. Desafortunadamente, la erupción del volcán de Cumbre Vieja en La Palma el día 19 de septiembre, solo dos semanas antes de la conferencia, causó tanto impacto en la actividad de la isla que se decidió organizarla en modo completamente telemático. El [Congreso Dark&Quiet Skies 2021](#) se celebró del 3 al 7 de octubre de 2021 y la información general se suministró a través del sitio web del IAC (<http://research.iac.es/congreso/quietdarksky2021>). El IAC estuvo también a cargo de la organización del sistema del webinar con la ayuda de los miembros del Comité director (*Steering Committee*) y del Comité Científico (SOC).

Durante la conferencia se discutieron un conjunto de medidas que deberán tomarse para reducir el impacto de las fuentes de contaminación lumínica e interferencias en la observación en el rango óptico y también en la radioastronomía.

La conferencia concluyó con intervenciones del representante de la misión permanente de España en Naciones Unidas, la Unión Astronómica Internacional y UNOOSA que además de expresar a La Palma su apoyo en estos momentos, le agradeció su labor pionera y continuada en la protección de la oscuridad del cielo.

En las palabras de clausura y como prueba fehaciente de la importancia del problema debatido en el *workshop 2020* y la conferencia 2021, la protección de la observación astronómica de las fuentes contaminantes, la IAU anunció la creación de un centro dedicado específicamente a estructurar y apoyar iniciativas para proteger la observación astronómica. El resumen detallado de lo discutido en la conferencia se publicará próximamente a través de la web de UNOOSA.

La IAU y UNOOSA, con los países firmantes del CRP discutirán ahora cómo proceder. Tendrán que definir la estrategia que pasa por aunar el apoyo de un número de países cada vez mayor. Para ello estudiarán la posibilidad de más intervenciones en reuniones del Subcomité Jurídico y de la COPUOS o la creación de grupos de trabajo específicos dentro de esa organización.

La participación de COPUOS es de particular importancia en el paradigma actual. El despliegue inminente de mega-constelaciones de satélites de comunicación altera significativamente la riqueza natural del cielo nocturno y representa una nueva y grave amenaza para la astronomía. COPUOS es el foro internacional para llamar la atención de los gobiernos del mundo con la confianza de convencerlos y tener su apoyo.

ROBOTS QUE ESTIMULAN MENTES CIENTÍFICAS

Vivimos tiempos en los que los bulos y mensajes pseudocientíficos se propagan como la pólvora en las redes poniendo en riesgo la salud global, tiempos en los que gran parte de la juventud se informa a través de YouTube y ser “influencer” se ha convertido en una aspiración profesional.

En estos tiempos, es prioritario fomentar el pensamiento racional crítico en las nuevas generaciones en aras de conseguir, en un futuro próximo, una sociedad mejor informada y capaz de tomar decisiones basadas en la evidencia y no en las opiniones. Pero, ¿cómo conseguirlo?

En la investigación en didáctica de la ciencia existe consenso en que el aprendizaje por indagación es un enfoque educativo clave para el desarrollo del pensamiento científico en el alumnado.



Nayra Rodríguez Eugenio
Coordinadora de PETeR
Instituto de Astrofísica de Canarias
nre@iac.es

Un informe reciente¹ de la Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas revela un dato preocupante: el número de matriculados en las titulaciones STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, por sus siglas en inglés) ha disminuido en España un 30% desde 2000. El bajo interés de la juventud española por la ciencia y la tecnología puede tener implicaciones negativas en muchos ámbitos. Algunos que nos tocan de cerca son la sostenibilidad y competitividad de los centros de investigación, que se nutren de graduados en estas áreas, o la instalación de futuras infraestructuras telescópicas en el territorio nacional, que podrían ser objeto de oposición social, como ha pasado en Hawái con el *Thirty Meter Telescope*.

Entre los factores que influyen en el desinterés de los jóvenes por los estudios y carreras STEM, destacan: la forma en que estas materias se imparten en las escuelas, la percepción de que se trata de disciplinas difíciles y la aparente falta de oportunidades profesionales suficientemente atractivas².

Por lo tanto, para atraer al alumnado a estas áreas es necesario incidir en tres aspectos: 1. acercarlos la ciencia de forma práctica y amena; 2. trabajar con los docentes, proporcionándoles los recursos, la formación y el apoyo necesarios para que puedan desarrollar una educación STEM más atractiva y estimulante para su alumnado; y 3. contribuir a cambiar los estereotipos sociales sobre las profesiones científico-tecnológicas.

La Astronomía es el motor perfecto para despertar la curiosidad y el interés por las materias STEM³. Une el ancestral anhelo humano de conocer lo que hay más allá del mundo que nos rodea con la espectacularidad de las imágenes del Universo y el asombro por los fenómenos que ocurren en él. En las últimas décadas, la puesta en marcha de telescopios robóticos, diseñados para funcionar de forma autónoma, junto con el desarrollo de herramientas que permiten su uso por parte de observadores no profesionales, ha permitido abrir esta ciencia a la participación de la comunidad educativa⁴.

PETER - ROBOTS QUE MIRAN AL CIELO

El [Proyecto Educativo con Telescopios Robóticos](#) (PETeR) del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) busca promover el interés de estudiantes

preuniversitarios por las áreas STEM a través de su participación en experiencias científicas reales usando telescopios profesionales.

El proyecto se puso en marcha entre 2004 y 2006, tras la instalación en el Observatorio del Roque de los Muchachos del Telescopio Liverpool (TL), el primero de los telescopios robóticos de 2 metros totalmente autónomos y uno de los más grandes y avanzados aún hoy. El TL es propiedad del *Astrophysics Research Institute* de la *Liverpool John Moores University*, que decidió dedicar el 5% del tiempo de observación con este telescopio a la educación y divulgación de la Astronomía en el Reino Unido y, para ello, creó el [National Schools' Observatory](#) (NSO).

El IAC hizo también una apuesta decidida por la educación STEM destinando a la comunidad educativa española el 25% de su tiempo de observación con el TL, lo que supone otro 5% del tiempo total de este telescopio. Nació así PETeR, con el objetivo de gestionar esa bolsa de tiempo dedicado a la educación y la divulgación de la Astronomía en España.

Además del TL, en los últimos años hemos ido sumando otros "robots" al proyecto. En 2018, nos incorporamos como socios educativos del Observatorio Las Cumbres (LCO) a través del programa [Global Sky Partners](#), que da acceso a su red de telescopios de 40 cm situados en seis observatorios alrededor del mundo, tanto en el hemisferio Norte (Canarias, Texas y Hawái) como en el Sur (Australia, Sudáfrica y Chile). Desde 2019, los usuarios de PETeR tienen también acceso a realizar observaciones con los telescopios de clase 0,5 m PIRATE y COAST pertenecientes a la *Open University*, que fueron inaugurados en el Observatorio del Teide a finales de 2017. Y los últimos telescopios que hemos incorporado al proyecto son los de la red [Southeastern Association for Research in Astronomy](#) (SARA), de clase 1 m.

Todos los telescopios disponibles en PETeR funcionan por colas, excepto los de SARA, que se controlan de forma remota. En estos últimos, se solicitan medias noches en los observatorios de Kitt Peak (EEUU) y Cerro Tololo (Chile) para que coincidan con el horario lectivo en España. De esta forma, los centros educativos que lo deseen pueden conectarse en directo a la realización de las observaciones

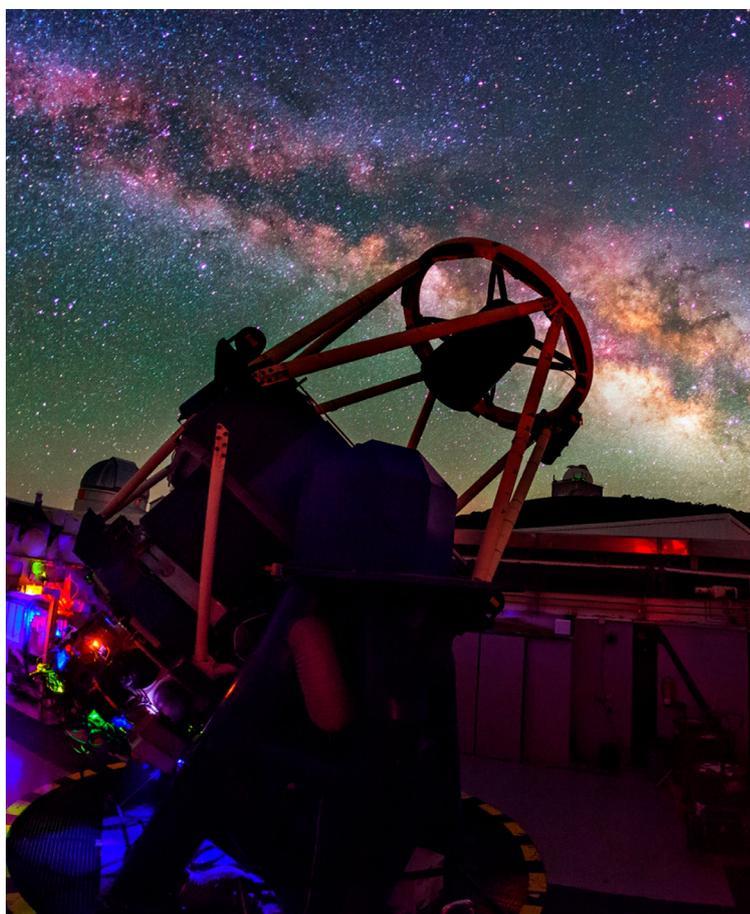


Logo del proyecto PETeR. Crédito: Inés Bonet (IAC).

remotas. En el caso de las observaciones por colas, los usuarios pueden acceder a través de la web de PETeR a los portales de los diferentes telescopios para solicitar sus observaciones y descargarse las imágenes una vez obtenidas.

La disponibilidad de tiempo de observación en este amplio conjunto de telescopios, que además ofrecen diferentes tipos de observaciones a través de portales de fácil uso (en su mayoría), nos ha permitido abrir el proyecto a todos los niveles educativos preuniversitarios, desde primaria a bachillerato y formación profesional. El tiempo de observación se ofrece a los centros educativos de forma totalmente gratuita y, de momento, sin más limitación que la división del tiempo disponible entre los centros registrados.

En la actualidad, PETeR cuenta entre sus usuarios con más de 300 centros educativos repartidos por toda la geografía española, unos 25 centros de secundaria de otros países que colaboran en proyectos específicos con institutos españoles, así como unos 40 centros no formales y asociaciones de astrónomos aficionados que participan en el proyecto realizando actividades educativas y de divulgación con público infantil y juvenil. El alcance del proyecto es actualmente de unos 10.000 estudiantes al año.



Algunos de los telescopios robóticos disponibles en PETeR. Izquierda: el Telescopio Liverpool (Observatorio del Roque de los Muchachos, La Palma). Arriba a la derecha: dos de los telescopios de 0,4m del LCO (Observatorio del Teide, Tenerife). Abajo a la derecha: telescopio COAST de la Open University (Observatorio del Teide). Crédito: Daniel López / IAC.

APRENDER CIENCIA HACIENDO CIENCIA

PETeR funciona como un laboratorio en línea que permite al alumnado descubrir el Universo realizando sus propias observaciones e investigaciones astronómicas. Para ello, ofrecemos diferentes herramientas, recursos y formatos.

En 2012, lanzamos una encuesta entre los usuarios activos y potenciales de PETeR para conocer sus necesidades y los modelos de proyecto que les parecían más interesantes y adecuados para su práctica docente. A partir de los resultados de ese estudio⁵, planteamos tres enfoques de aprendizaje activo, complementarios entre sí, que intentan cubrir la mayor parte de las demandas de la comunidad. Estos son:

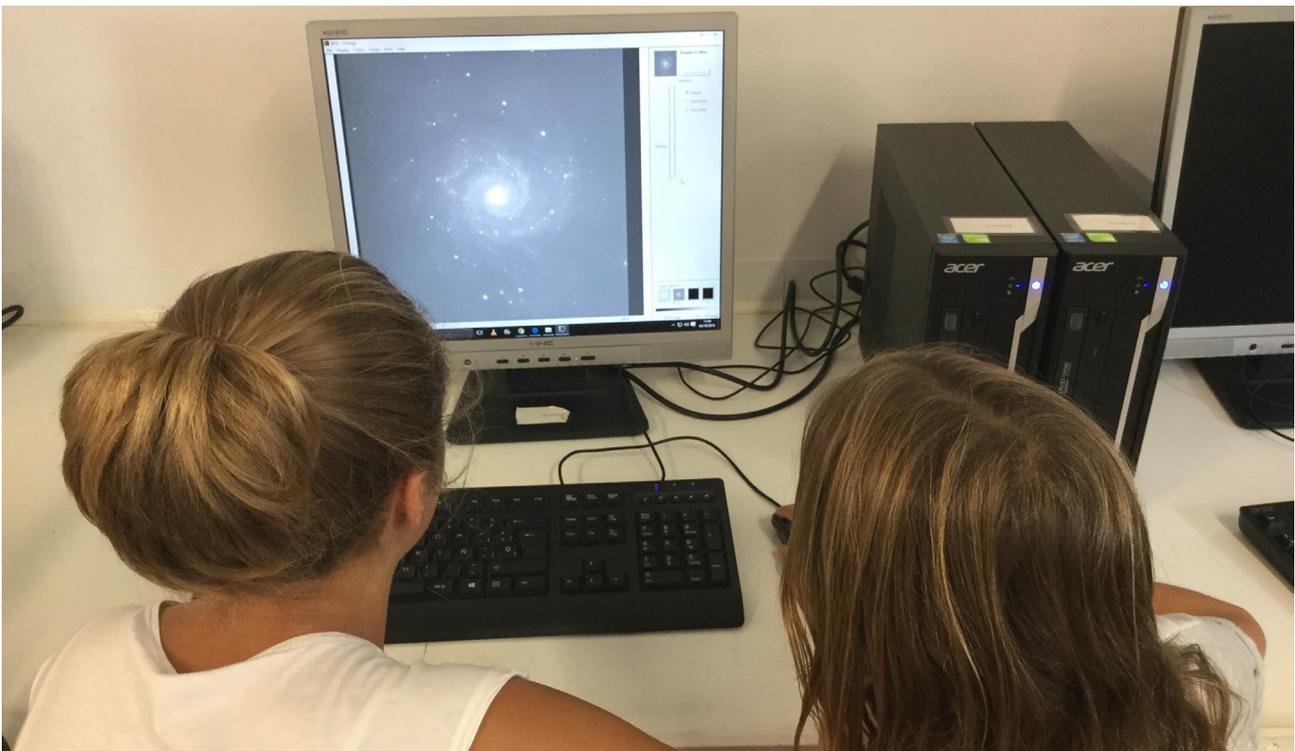
1. Observaciones prediseñadas: la propuesta consiste en obtener y analizar imágenes en uno o varios filtros de diferentes tipos de objetos celestes (regiones de La Luna, planetas del Sistema Solar, cúmulos estelares, nebulosas y galaxias) que pueden seleccionarse de una lista. La interfaz de observación establece, para cada objeto, el instrumento, el o los filtros y el tiempo de exposición adecuados. Esta es una opción fácil de integrar en la actividad docente, ya que requiere poco tiempo de preparación y no es necesario tener conocimientos previos de Astronomía. En el sitio web de PETeR ofrecemos, además, un programa para visualizar y analizar las imágenes astronómicas, [PeterSoft](#), que está especialmente diseñado para uso educativo.

2. Unidades didácticas: cada Unidad introduce varios conceptos de Astronomía relacionados con los planes de estudio de primaria y/o secundaria e incluye una o más actividades que hacen uso de datos pre-observados con los telescopios de PE-TeR. Las actividades sirven, a su vez, como introducción práctica a las diferentes herramientas del software de procesamiento de imágenes: medida de tamaños angulares y distancias, medida de brillos (fotometría de apertura), etc. Algunos de los temas que se proponen son la estructura del Sistema Solar, los movimientos de planetas y satélites o la determinación de distancias en el Universo. Con este enfoque se busca que el alumnado desarrolle sus habilidades STEM a la vez que asimila conocimientos sobre el tema presentado.

3. Proyectos de investigación: este formato es el que corresponde a proyectos científicos reales, ya sea de indagación guiada o abierta. En el pri-

mer caso, proponemos al profesorado el tipo de objetos a estudiar y la posible metodología a seguir para seleccionar los objetos, programar las observaciones y analizar los datos obtenidos, dotándoles de los recursos didácticos y programas necesarios para desarrollar la investigación. Algunos ejemplos de proyectos que ofrecemos son la detección de supernovas, la búsqueda de estrellas variables, la caracterización de exoplanetas con tránsitos o la confirmación de órbitas de asteroides. En las investigaciones abiertas, en cambio, son los grupos de estudiantes más su docente los que deciden qué quieren investigar y cómo. En ambos casos, proporcionamos asesoramiento científico y técnico a los usuarios para el desarrollo del proyecto e intentamos contar con la participación de investigadoras e investigadores del IAC, especialistas en el campo tratado, que, además de asesorar, se convierten en referentes profesionales para el alumnado.

Estudiantes de sexto de primaria de Escola GEM (Cataluña) analizando la imagen de una galaxia obtenida con el Telescopio Liverpool. Crédito: Aleix Roig (Escola GEM).



«La Astronomía es el motor perfecto para despertar la curiosidad y el interés por las materias STEM. Une el ancestral anhelo humano de conocer lo que hay más allá del mundo que nos rodea con la espectacularidad de las imágenes del Universo y el asombro por los fenómenos que ocurren en él.»

Este enfoque permite a los estudiantes experimentar el método científico siguiendo las fases del aprendizaje basado en la indagación⁶: tienen que formular la pregunta que quieren investigar, plantear sus hipótesis y método de trabajo, tomar decisiones razonadas (por ejemplo, elegir un objeto de estudio que pueda ser observado en un cierto plazo de tiempo con los telescopios disponibles), analizar e interpretar los datos obtenidos y, finalmente, sacar sus conclusiones y presentarlas. Se fomenta también el trabajo colaborativo, tanto dentro del aula, como entre escuelas y con otras instituciones educativas.

Un ejemplo del potencial de este tipo de proyectos para fomentar el interés y las vocaciones STEM entre el alumnado, además de tener un alto impacto social, fue el desarrollado en 2017 por un profesor de Matemáticas y sus estudiantes de segundo de ESO del Instituto de Enseñanza Secundaria El Calero (Gran Canaria). El objetivo del proyecto era intentar descubrir estrellas variables y aprender de forma práctica los elementos matemáticos necesarios para caracterizarlas. El método de investigación seguido consistió en seleccionar dos regiones del cielo en las que querían buscar estrellas variables y, a través de PETeR, solicitar observaciones de esos campos con telescopios del LCO. Después, complementaron esas observaciones con otras obtenidas con un telescopio amateur y con datos de archivo. Realizaron fotometría diferencial en las estrellas de los campos observados, construyeron las curvas de luz correspondientes y encontraron dos estrellas que presentaban variaciones periódicas de brillo compatibles con binarias eclipsantes de contacto. Enviaron sus resultados a la [American Association of Variable Star Observers](#), que les confirmó que habían descubierto dos nuevas estrellas variables.

Estas alumnas y alumnos se convirtieron en los más jóvenes del mundo en hacer un descubrimiento de este tipo dentro de un proceso de educación formal, por lo que emitimos una nota de prensa que tuvo bastante repercusión y les entrevistaron en programas de radio y de televisión. La experiencia sirvió, además, como piloto para el proyecto de investigación sobre estrellas variables que han replicado muchos otros centros después.

EL PROFESORADO: UN FACTOR CLAVE

Solo si el profesorado se siente cómodo y seguro con los conocimientos y herramientas que son necesarios para desarrollar los proyectos de investigación astronómica, querrá llevar a cabo estas experiencias con su alumnado. Por este motivo, uno de los objetivos principales de PETeR es la formación continua del profesorado, tanto en temas de Astronomía y Astrofísica, como en el uso de los telescopios robóticos, los programas y recursos web que permiten analizar los datos obtenidos y en los métodos de aprendizaje por indagación.

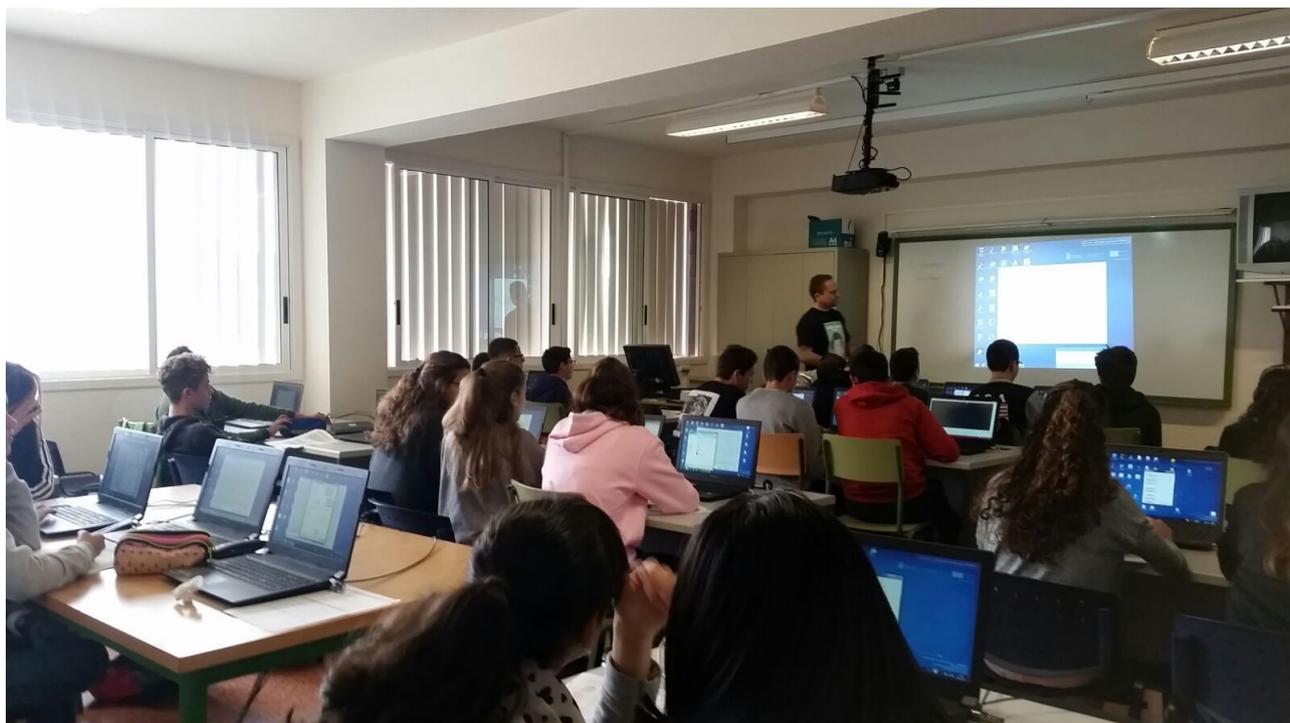
Desde 2015, hemos formado a más de 1.100 docentes y educadores de 61 países de los cinco continentes (más de 800 de ellos españoles) a través de los diferentes cursos, presenciales y online, que organizamos o en los que participamos en el marco de PETeR. Destacamos la escuela internacional de verano “[Astronomy Education Adventure in the Canary Islands](#)”, organizada por el IAC y [NUCLIO](#) con la colaboración de los proyectos NSO, [Faulkes Telescope](#)

[Project](#) y [CESAR](#) (últimas dos ediciones). La escuela, que en 2021 ha celebrado su séptima edición consecutiva, consiste en una semana de formación intensiva y altamente práctica, que incluye ponencias, talleres, visitas formativas a los Observatorios de Canarias y actividades que permiten a los participantes relacionarse entre sí y establecer vínculos con docentes de otros países. El objetivo es que el profesorado disfrute de una experiencia de aprendizaje y colaboración que pueda trasladar a su alumnado en condiciones similares, fomentando la cooperación entre escuelas alrededor del mundo.

ROBOTS QUE MIRAN AL FUTURO

Los proyectos educativos con telescopios robóticos requieren una inversión nada despreciable de recursos tecnológicos (tiempo de telescopio, portales de observación, software educativo,...) y humanos (personal dedicado a desarrollar los materiales didácticos y proyectos de investigación, asesorar y formar a los docentes,...), pero los beneficios son considerables.

Alumnado del IES El Calero (Gran Canaria) y su profesor de Matemáticas, Carlos Morales, desarrollando el proyecto de investigación que les llevó a descubrir las estrellas variables TYC 3224-2619-1 y GSC 03224-01689. Crédito: IES El Calero.



En primer lugar, democratizan el acceso al cielo y a la Astronomía. Son pocos los centros educativos que cuentan con un telescopio amateur y aún menos los que, además, se encuentran en regiones con baja contaminación lumínica y alta frecuencia de noches despejadas. Los telescopios robóticos pueden ser usados por cientos o miles de escuelas cada año y, en el caso de PETeR, damos acceso no solo al cielo visible desde el hemisferio norte, sino también a los secretos del cielo del sur. A esto se suma que las observaciones por colas, o las remotas en horario lectivo, facilitan enormemente la participación de escolares de 6 a 12 años, para los que no se suelen organizar actividades de observación nocturna.

En el ámbito de la educación STEM, los resultados de PETeR y de otros proyectos similares muestran que el uso educativo de los telescopios robóticos permite desarrollar de forma efectiva procesos de enseñanza-aprendizaje por indagación, fomentan el interés del alumnado por estas áreas y estimulan el pensamiento científico.

En Astronomía solemos decir que nuestras herramientas, los telescopios, nos permiten mirar al pasado. En PETeR, las usamos para incentivar las mentes científicas del futuro.

Sesión inaugural del curso internacional de verano "Astronomy Education Adventure in the Canary Islands 2019". Crédito: Inés Bonet (IAC).

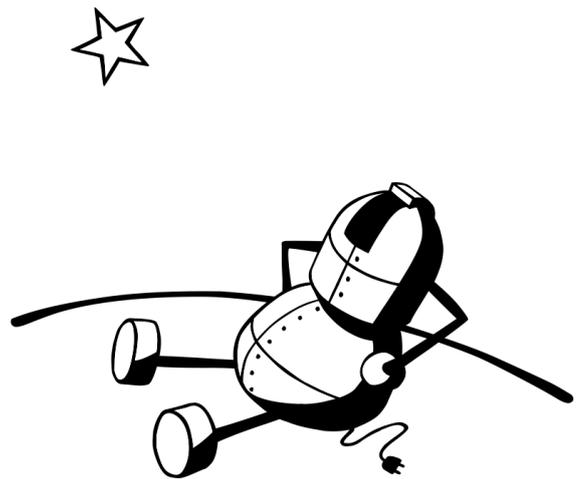


REFERENCIAS

- ¹ Informe SUE 2018. "La contribución socioeconómica del Sistema Universitario Español".
- ² Fundación La Caixa, FECYT y everis (2015). "¿Cómo podemos estimular una mente científica? Estudio sobre vocaciones científicas".
- ³ Percy, J.R. (2005). "Why astronomy is useful and should be included in the school curriculum". Teaching and learning astronomy, edited by J.M. Pasachoff and J.R. Percy, Cambridge University Press, Cambridge UK, pp. 10-13.
- ⁴ Gomez, E. L. and Fitzgerald, M. T. (2017). "Robotic telescopes in education". Astronomical Review, 13(1): 28-68.
- ⁵ Rodríguez-Eugenio, N. (2019). "Fifteen years of PE-TeR, an educational project with robotic telescopes in Spain". Proceedings of the IAU Astronomy Education Conference: Bridging Research & Practice, pp. 83-89.
- ⁶ Pedaste, M. et al. (2015). "Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry circle". Educational Research Review, 14, pp. 47-61, 10.1016/j.edurev.2015.02.003.

PETER

ROBOTS QUE MIRAN AL CIELO



El concurso de monólogos científicos Famelab organizado por la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) junto al British Council contó en su edición de 2021 con dos investigadoras que forman parte de la Sociedad Española de Astronomía. Sara Cazzoli (SC) que alcanzó la fase de semifinales y Laura Toribio San Cipriano (LT) que fue premiada con el segundo puesto por el jurado. Hablamos con las dos participantes para que nos cuenten sobre su paso por Famelab y lo que significa para ellas la divulgación.



Sara Cazzoli
Instituto de Astrofísica de Andalucía
sara@iaa.es

Laura Toribio San Cipriano
Centro de Investigaciones Energéticas,
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)
Laura.Toribio@ciemat.es

¿POR QUÉ DECIDISTE PRESENTARTE A FAMELAB?

LT: Tenía muchas ganas de participar en Famelab desde que conocí su existencia después de la primera edición. Durante el doctorado empecé a participar en actividades de divulgación y quienes me conocen saben que llevo muchos años bailando y haciendo teatro. Famelab me permitía juntar todas esas partes de mi vida. Sin embargo por falta de tiempo y también por miedo, lo dejé pasar. Este año, después de la pandemia, me di cuenta que debía retomar aquellas cosas que me ilusionaban y por eso decidí presentarme.

SC: La verdad que un poco por casualidad. Solo había oído hablar de Famelab. No conocía mucho del concurso, pero mis compañeros del IAA sí. Me animaron a participar al tener una buena capacidad comunicativa, chispas con la cámara y ganas de pasarlo bien con la divulgación científica. Además me contaron cómo de bien les fue en la experiencia y cómo les ha influido como divulgadores. No necesitaba saber más, y la aventura de Famelab empezó.

¿NOS PODÉIS HABLAR DE CÓMO PREPARASTEIS VUESTROS MONÓLOGOS?

SC: Me fascinan las hojas blancas, son una oportunidad única en la vida, aún así ¡qué nervios al tener una delante! Lo primero fue una lluvia de ideas para no paralizarme delante al desafío de escribir un monólogo por primera vez, y además en español que no es mi idioma nativo (soy italiana). Las palabras cobraban vida, ciencia y humor, y eso de escribir monólogos se convirtió en un sin parar. Escribí varios borradores para luego poder decidir el que más se adaptaba a la primera selección. Fue tiempo bien invertido ya que algunos de esos fueron la semilla de charlas de divulgación exitosas. El texto final llegó en Navidades, después de una carrera de 10 km.

El día de la grabación, lo recuerdo como un día de ilusión y disfrute. Pude contar con un equipo adorable y sobre todo paciente, fueron los primeros que busqué al recibir la llamada de FECYT. Las cosas no se hacen a solas, y con mucho atrevimiento cito a Ortega y Gasset: “Yo soy yo, y mi circunstancia, y si no la salvo a ella no me salvo yo”, en mi caso, pude dar lo mejor de mi al estar en un entorno profesional y personal increíble.

LT: Nunca antes había escrito un monólogo así que lo primero que hice fue buscar en internet algunos consejos. Aquello me ayudó bastante, primero a pensar en el tema y luego a estructurar lo que quería decir. Me gustó mucho crear un personaje que se acercaba a la ciencia por intereses totalmente ajenos a la propia ciencia y al final se quedaba prendida de ella. Para mí, la divulgación tiene un poco de eso: despertar inquietudes en aquellos que pensaban que esto no les interesaba o que nunca llegarían a entenderlo.

Cuidé cada detalle del vídeo que envié a FameLab. Intenté hacerlo lo mejor que podía, pero nunca terminas de saber que es lo que buscan o si tu texto tendrá la calidad que ellos esperan. Me ayudaron mis amigos en la grabación, sin ellos creo que no hubiera sido posible. Y como comenta Sara tener un entorno profesional es necesario para que las cosas funcionen. Cuando recibí la llamada de la FECYT para decirme que era finalista me hizo una ilusión enorme.

CONTADNOS SOBRE LA SEMIFINAL

LT: Antes de la semifinal tuvimos un encuentro virtual con los organizadores y con el resto de concursantes. Repasamos los monólogos y nos dieron algunos consejos para mejorar el contenido y la interpretación. Durante todo el concurso nosotros teníamos el control sobre nuestros textos, nunca ellos nos cambiaron nada. Éramos nosotros los que teníamos la última palabra. Eso es algo que me gustó bastante, porque en ningún momento te pedían hacer o decir algo que te incomodara o que te hiciera sentir insatisfecho. Había mucho respeto por el trabajo que habíamos realizado.

Por culpa de la pandemia la semifinal se realizó a puerta cerrada. Solo estábamos los 12 semifinalistas, el jurado y los organizadores. Ese día estaba muy nerviosa, mucho más que en la final. Quería pasar de fase pero lo veía muy complicado. Los 12 monólogos me parecían muy buenos. Por eso, cuando dijeron mi nombre entre los finalistas me sentí muy agradecida. Sentí que confiaban en mí, que unas personas que no me conocían de nada me estaban diciendo que lo que hacía estaba bien hecho, que siguiera.





Crédito: Víctor Aníbal López Fernández

SC: ¡Cuántas emociones, una aventura que finalmente se hace realidad! Conocí a mis compañeros por primera vez en el encuentro virtual. Además que nos llevamos tod@s buenos consejos para mejorar, nos quedamos con las ganas de vernos y hacer equipo. Y así fue. Los dos días que pasamos juntos fueron hermosos, solo nos faltó el cariño del público.

Repetí el monólogo hasta la saciedad, para poder interiorizarlo y darle vida en el escenario. Mi índole me lleva a ser muchas veces muy exigente conmigo misma, pero ese día salí muy contenta del escenario, y lo puedo decir alto y claro. Del teatro no niego que salí dolida al tener que abandonar la aventura de Famelab. Sin embargo, volví a hacer el monólogo en España y en Italia, y gustó, recibí muchas felicitaciones y cariño... ¡a por más!

Y SOBRE LA FINAL...

LT: El día de la final lo viví con mucha ilusión. El acto se celebró en el teatro Fernando de Rojas en el

Círculo de las Bellas Artes de Madrid. El teatro era precioso, cuando llegué me pareció un regalo poder actuar allí. Los 8 finalistas teníamos que estar desde por la mañana en el teatro para probar los micros, las luces, aprender por donde teníamos que subir y bajar del escenario... Fue un día muy intenso, pero lo repetiría ahora mismo.

Cuando me tocó salir al escenario lo hice muy tranquila. Tenía claro que durante los 3 minutos que duraba el monólogo tenía que disfrutarlo. También salí a ganar y casi lo consigo. Cuando estaba en escena los focos del teatro me impedían ver al público. Yo hablaba a un espacio totalmente negro, podría haber estado el teatro vacío. Sin embargo, oía a la gente reírse y aplaudir, noté que estaba conectando con ellos, que aquello que les estaba contando les estaba interesando.

SC: Compartiendo los nervios imposible tener favorit@s! itod@s l@ concursantes se merecían ganar! El jurado no lo tuvo fácil.

POR ÚLTIMO ¿POR QUÉ CONSIDERÁIS IMPORTANTE LA DIVULGACIÓN? ¿RECOMENDARÍAIS FAMELAB?

SC: Sin duda: ¡Sí! Merece la pena participar en Famelab, es una experiencia estupenda. Pero ... ojo que no es la única. Hoy en día la divulgación científica ofrece muchos escenarios para, según el arte de cada un@, estrenarse y comprometerse en esta actividad tan enriquecedora.

La divulgación científica es un proceso creativo y profundo, crea vocaciones en l@s pequeñ@s y despierta inquietudes en l@s mayores, rompe la barrera de cristal entre “academia” y “sociedad”, nos hace mejores investigadores al mejorar nuestra habilidad de comunicar mensajes científicos y, encima, ¡se pasa muy bien! Si lo pensamos bien, en el día a día compartimos de todo ¿por qué no compartir/divulgar nuestra ciencia tan bonita y interesante?

LT: Desde mi punto de vista comunicar ciencia es algo importante para la sociedad porque está en

muchos más aspectos de nuestra vida cotidiana de lo que parece. Uno de los grandes esfuerzos de la comunicación científica debería estar en lograr que la gente abandone esa idea de que la ciencia solo le pertenece a un pequeño grupo de personas que es capaz de entenderla. No se trata de pedir que todo el mundo entienda todas las teorías que existen, pero sí deberíamos ser capaces de que la gente disfrute la ciencia y la consuma al igual que lo hacen con la música aunque no sepan tocar un instrumento ni leer una partitura.

Famelab es un canal que intenta conectar con el público utilizando la estructura de los monólogos pero no es el único medio artístico del que podemos aprovecharnos los científicos para explicar aquello que queremos comunicar. Para mí el paso por Famelab ha sido tan enriquecedor que se lo recomendaría a cualquiera que quisiera participar. Les diría que confíen en ellos, que cuiden su trabajo y valoren lo que están haciendo como la comunicación de la ciencia se merece.



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.

JOSÉ MIGUEL RODRÍGUEZ ESPINOSA, SECRETARIO GENERAL DE LA IAU

Tras la asamblea general de la Unión Astronómica Internacional (IAU) del pasado mes de agosto, nuestro colega **José Miguel Rodríguez Espinosa** ha asumido sus responsabilidades como secretario general de la Unión para el próximo trienio. Es el puesto de responsabilidad más alto que un español ha ocupado en esta sociedad científica desde que se fundó en 1919. ¡Enhorabuena, José Miguel!

LAURA TORIBIO, SEGUNDO PREMIO DE FAMELAB ESPAÑA

Nuestra compañera **Laura Toribio** (IAC) ha logrado un magnífico segundo puesto en el certamen de monólogos científicos FameLab, en su edición nacional, demostrando que se puede combinar la ciencia con el humor y el entretenimiento para llegar a todos los públicos. ¡Enhorabuena, Laura!

PREMIOS POR LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Nuestro compañero **Jaime Zamorano** (UCM) ha sido galardonado con el con el Crawford Hunter Lifetime Achievement Award 2021 que concede la International Dark-Sky Association por su intensa y larga lucha contra la contaminación lumínica. Junto a Jaime, ha sido galardonado con el Galileo Award el profesor Salvador Bará (Universidade de Santiago de Compostela), por su investigación para analizar y reducir la contaminación lumínica. ¡Enhorabuena!

FRANCISCO SÁNCHEZ, PREMIO TABURIENTE 2021

A finales de octubre, el Prof. **Francisco Sánchez**, fundador y primer director del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), recibió el Premio Taburiente 2021, reconociendo su contribución al avance de la astronomía en España, incluyendo la creación de los observatorios de Izaña y el Roque de los Muchachos. ¡Muchas felicidades!

ALICIA SINTES, PREMIO "MUJERES A SEGUIR"

Nuestra compañera **Alicia Sintes** (Universitat de les Illes Balears), experta en el campo de las ondas gravitacionales, ha sido galardonada el premio "Mujeres a seguir" de la Comunidad de Madrid, en la categoría de ciencias. ¡Muchas felicitaciones, Alicia!

OMAIRA GONZÁLEZ, JOVEN ACADÉMICA DISTINGUIDA

Omaira Gonzalez Martín ha recibido la "Distinción de la UNAM para Jóvenes Académicos" 2021. Su principal área de conocimiento son los estudios multifrecuencia de los núcleos activos de galaxias dentro del marco de la astronomía extragaláctica. ¡Enhorabuena, Omaira!

ISABEL MÁRQUEZ, GALARDONADA EN LA III EDICIÓN DE LOS PREMIOS "GRANADA CIUDAD DE LA CIENCIA Y LA INNOVACIÓN"

Isabel Márquez, actual vicedirectora del Instituto de Astrofísica de Andalucía, ha sido recientemente galardonada en la categoría "Mujer y Ciencia" en la III edición de los premios "Granada Ciudad de la Ciencia y la Innovación", por su "trayectoria profesional impecable" y por compaginar su labor profesional con "actividades de promoción y visibilización sobre el papel de la mujer en ese campo realmente inabarcable que es la astronomía". ¡Enhorabuena Isabel!

RECORDANDO A LLUÍS MAS FRANCH

El pasado 25 de junio falleció el Dr. **Lluís Mas Franch**, uno de los impulsores del estudio de la teoría de la relatividad general en España y de los Encuentros Relativistas Españoles, unas reuniones científicas que contribuyeron a consolidar la relatividad como disciplina investigadora en España. Su tesis sobre soluciones de las ecuaciones de campo sobre la base de una nueva métrica representa un hito importante en la física teórica de España, ya que fue la primera sobre teoría de la relatividad. Descanse en paz.

Iván Martí Vidal
**Viaje al centro de
 un agujero negro**

VIAJE AL CENTRO DE UN AGUJERO NEGRO

Iván Martí Vidal

ISBN: 978-84-7822-886-7

Editorial Institució Alfons el Magnànim

Acostumbrados a vivir en esta parte del Universo donde todo es tranquilo y lento, donde nos basta con la Ley de Gravitación de Newton, es fascinante saber que existen otras partes del Cosmos en donde todo es violencia y el espacio-tiempo se retuerce de manera inimaginable. Estos lugares, situados en las proximidades de los agujeros negros, ponen a prueba nuestras teorías físicas. Aquí Newton no es suficiente y debemos recurrir a la Teoría de la Relatividad de Einstein para explicar los extraños comportamientos de la materia y la energía.

Estas estrellas muertas, antes meros objetos teóricos, entraron triunfalmente en la realidad con el descubrimiento del agujero negro supermasivo de nuestra galaxia y al obtener señales de sus colisiones en los detectores LIGO y VIRGO. Hazañas que se premiaron con dos premios Nobel de Física.

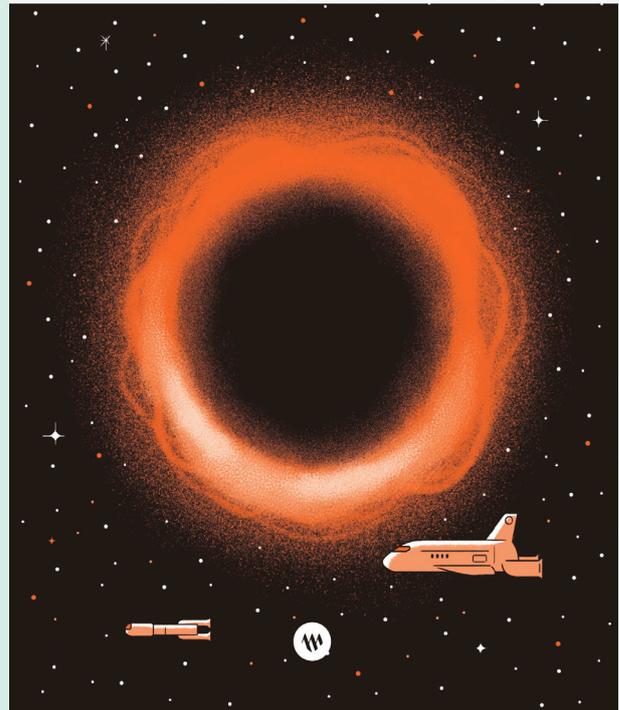
Pero conseguir ver el aspecto de un agujero negro es otra cosa. Nos interesa poder distinguir todos los detalles del monstruo estelar, ver sus distintas capas hasta llegar al horizonte de sucesos, su disco de acreción y, sobre todo, poder explicar cómo se forman sus energéticos chorros relativistas. Un nivel de detalle tan enorme solo puede conseguirse con la técnica VLBI, o sea, con el uso de una red mundial de radiotelescopios de una sensibilidad extrema y a longitudes de onda milimétricas. Un sueño difícil de alcanzar.

Finalmente la colaboración internacional Event Horizon Telescope (EHT) consiguió obtener la imagen icónica de las inmediaciones del agujero negro supermasivo de la galaxia M87. Una imagen que maravilló al mundo el 10 de abril de 2019.

Iván Martí Vidal, uno de los más destacados miembros del EHT, en **Viaje al centro de un agujero negro**, nos cuenta de primera mano los retos científicos y tecnológicos que se han tenido que superar y los esfuerzos humanos que se han requerido para lograr esta imagen. Un éxito que sin la contribución esencial de Iván no hubiera sido posible.

El libro comienza recorriendo los puntos más relevantes de la Relatividad de Einstein. Se explica la paradoja de los gemelos, los invariantes relativistas y las propiedades curiosas del espacio-tiempo. Más adelante se introduce el Principio de Equivalencia, por el que un campo gravitatorio es equivalente a una aceleración; se habla de la no existencia de la simultaneidad en el universo. Todo ello sazonado con explicaciones y ejemplos originales de Iván que, como confiesa, le han llevado muchas horas de reflexión.

Los siguientes capítulos se dedican a describir la anatomía de los agujeros negros, como sus propiedades dependen de su masa y rotación, como se comporta la materia en sus alrededores y como se



altera el tiempo en el horizonte de sucesos. Es fascinante comprobar de qué manera gira la materia a su alrededor formando un disco de acreción, ionizándose y calentándose, mientras va cayendo en espiral en las fauces del monstruo cósmico, a la vez que los rayos de luz son atrapados para siempre en el conjunto de órbitas que forman la fotonosfera. Pero, de algún modo, una parte de esa materia es regurgitada al espacio en forma de chorros relativistas.

En los últimos capítulos del libro, Iván nos cuenta, de manera apasionada, cómo la red mundial de radiotelescopios usada, con ALMA como pieza fundamental, consiguió captar algunos de los pocos fotones que lograron escapar de la fotonosfera del agujero central de M87 hace más de 50 millones de años. Asimismo, nos describe el tipo de algoritmos que fueron necesarios para poder sacar la información de los preciosos datos recibidos y reconstruir su aspecto real.

Lejos de ser este el final de la aventura, a EHT se le augura un futuro brillante. Además de revelarnos próximamente la estructura del campo magnético alrededor del agujero negro central de M87, usando polarimetría de la que Iván es un experto, se están analizando actualmente los datos que nos darán imágenes del agujero central de la Vía Láctea. Además, EHT buscará también nuevos objetivos y por tanto continuará dándonos alegrías en los próximos años.

Enric Marco
 Dept. Astronomia i Astrofísica
 Universitat de València

El Observatorio Astronómico: un diálogo entre ciencia y arquitectura

Autor: Miguel Ángel Castro Tirado
(macastrotirado@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Javier Boned Purkiss y Alberto Javier Castro-Tirado

Centro: Universidad de Málaga

Fecha de lectura: 19 de julio de 2019

Esta tesis doctoral aborda el desarrollo del observatorio astronómico a lo largo de la historia, desde el punto de vista arquitectónico, como edificio en relación con los instrumentos de observación y su funcionamiento como centro de trabajo heterogéneo. Teniendo en cuenta el impacto de la propia construcción o sus instalaciones sobre los resultados de la investigación (estabilidad térmica o estructural, mala protección climática, turbulencias...), se presta poca atención a desarrollar teorías o estudios de los aspectos arquitectónicos o constructivos de los observatorios. Este trabajo presenta un aporte teórico-crítico que, al menos, invita a la reflexión de los involucrados en el desarrollo de los observatorios astronómicos en el futuro.

Se presenta una aproximación desde el prisma de la arquitectura del propio edificio, dejando de lado otros aspectos como su equipamiento astronómico o su posible uso científico. Es decir, se estudian las particularidades relacionadas con la construcción en la que se ubican los instrumentos y cuya finalidad es la función astronómica.

El análisis se limitó a los observatorios astronómicos ópticos. Esta investigación se remonta hasta las civilizaciones antiguas, presentando los precedentes de lo que posteriormente serían los observatorios astronómicos. El ordenamiento cronológico de los observatorios organizados en tres épocas (islámico-medieval, moderno y contemporáneo) tiene como objetivo facilitar la comprensión de su desarrollo temporal agrupándolos según aspectos fundamentales y limitándolos según puntos de inflexión trascendentes.

Una nueva tipología propuesta de observatorios astronómicos

El desarrollo de la astronomía y su tecnología especializada condujo a una evolución no planificada del observatorio astronómico. Estos cambios se han consolidado a través de un proceso de prueba y error en el que se descartaron ciertas innovaciones, se consolidaron algunas características nuevas y otras modificaciones reemplazaron soluciones preexistentes.

En definitiva, los atributos que definen a un observatorio astronómico son: i) su condición de edificación y, como tal, habitable; ii) que su función principal es astronómica; y iii) que su arquitectura (espacio y construcción) está caracterizada por los diferentes usos de la astronomía.

Si bien algunos de los tipos de observatorios astronómicos han quedado obsoletos y un diseño basado en sus características carecería de sentido en la actualidad, el desarrollo impredecible que puede presentar la astronomía o la innovación tecnológica podría incluso devolverles una improbable vigencia. Por otro lado, no existe un único tipo válido para el observatorio actual, ya que cada variante puede adaptarse mejor a las circunstancias que definen un centro astronómico en particular. Su configuración dependerá del grado de profesionalización, la ubicación, el tamaño de los instrumentos, el programa de usos...

En cualquier caso, el análisis tipológico del observatorio constituye una herramienta para su estudio histórico y para un mejor

conocimiento de su condición. Por ello, esta tesis estudia los rasgos que definen estos centros y propone 10 tipos en el desarrollo de los observatorios astronómicos a lo largo de la historia. Esto permite un conocimiento profundo de su desarrollo y los atributos que lo definen de utilidad para afrontar el proyecto de un futuro observatorio, independientemente de su escala, presupuesto o profesionalización.

Aun así, la evolución de los observatorios ha estado fuertemente marcada por los avances técnicos y por el progreso astronómico, de modo que tanto el desarrollo tecnológico como los nuevos descubrimientos de la ciencia pueden producir nuevas condiciones o requerir diferentes soluciones que alteren los tipos presentados o, incluso, generen otros nuevos.

Sobre la evolución del observatorio astronómico

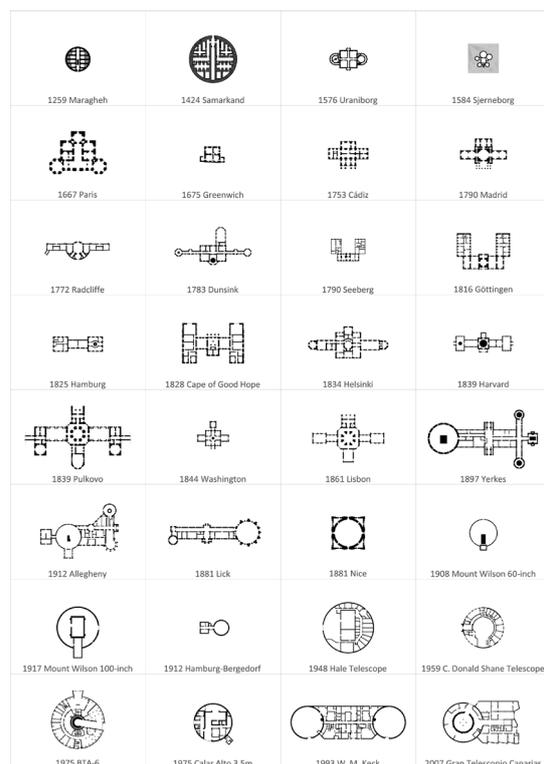
Esta tesis analiza más de 50 observatorios (1259-2007) siguiendo sus avances cronológicamente hasta encontrar evidencias una evolución presente en dos direcciones opuestas: continuar con la disociación de instrumentos astronómicos de otras funciones relacionadas con la investigación y reunificar usos heterogéneos en un mismo edificio.

La primera posibilidad implicaría una escisión de lo que ahora se conoce como observatorio para dar lugar a un par de edificios, uno de ellos con espacios para el personal u otros servicios y otro, separado e independiente, que no tendría relación con la actividad humana.

La segunda posibilidad pasaría por unificar en un solo edificio tanto las funciones estrictamente intrínsecas de la investigación astronómica como el resto de usos y servicios asociados a los trabajadores del centro o incluso a los visitantes, dando lugar a una construcción unitaria más compleja.

A lo largo de esta tesis doctoral se presentan numerosos casos que demuestran que los mayores y más importantes avances en el diseño de observatorios se han producido tras la colaboración entre los arquitectos responsables del proyecto de edificación y los astrónomos que llevarían a cabo la investigación en el edificio. Es decir, cuando el observatorio se ha entendido como el resultado de una relación equilibrada entre astronomía y arquitectura.

En este siglo XXI es el momento de recuperar el diálogo entre Astronomía y Arquitectura.



Plantas principales representadas a la misma escala de los observatorios astronómicos más representativos de sus periodos.

Estudio observacional de moléculas precursoras para la formación de polvo en envolturas circunestelares

Autora: Sarah Massalkhi
(sarah.massalkhi@csic.es)

Tesis doctoral dirigida por:
Marcelino Agúndez y José Cernicharo
Centro: Universidad Autónoma de Madrid
Fecha de lectura: 18 de diciembre de 2020

La fase de la rama asintótica de gigantes (AGB, por sus siglas en inglés) es una etapa tardía en la evolución de las estrellas de masa baja a intermedia. Durante esta fase, las estrellas pierden copiosas cantidades de material a través de vientos estelares densos y lentos que dan lugar a una envoltura circunestelar extensa que rodea a la estrella central. Estas envolturas son entornos astrofísicos notables ya que en ellos tiene lugar la formación de muy diversas moléculas así como de granos de polvo. Este material circunestelar será finalmente expulsado hacia el exterior y será la principal fuente de enriquecimiento del medio interestelar, proporcionando así las piezas para la construcción de una nueva generación de estrellas y planetas.

Uno de los principales ingredientes del material circunestelar es el polvo. Sin embargo, cómo ocurre el proceso de formación del polvo sigue siendo un misterio. Preguntas como ¿cuáles son los componentes básicos en fase gaseosa que dan lugar a los primeros núcleos de condensación? y ¿cómo estas partículas de tamaño intermedio evolucionan hacia granos de tamaño micrométrico? permanecen aún sin respuesta. Estas preguntas están en el corazón de *NANOCOSMOS*, el proyecto ERC *Synergy* dentro del cual se ha realizado esta tesis, que tiene como objetivo comprender mejor los procesos físicos y químicos que gobiernan la formación y evolución del polvo cósmico, principalmente desde un punto de vista observacional. El trabajo que se presenta en esta tesis se basa en la obtención y análisis de espectros en el rango de longitudes de onda milimétricas con el fin de estudiar el gas molecular en envolturas circunestelares alrededor de estrellas AGB. El objetivo de las observaciones es buscar la emisión de posibles candidatos que podrían actuar como precursores del polvo en fase gaseosa

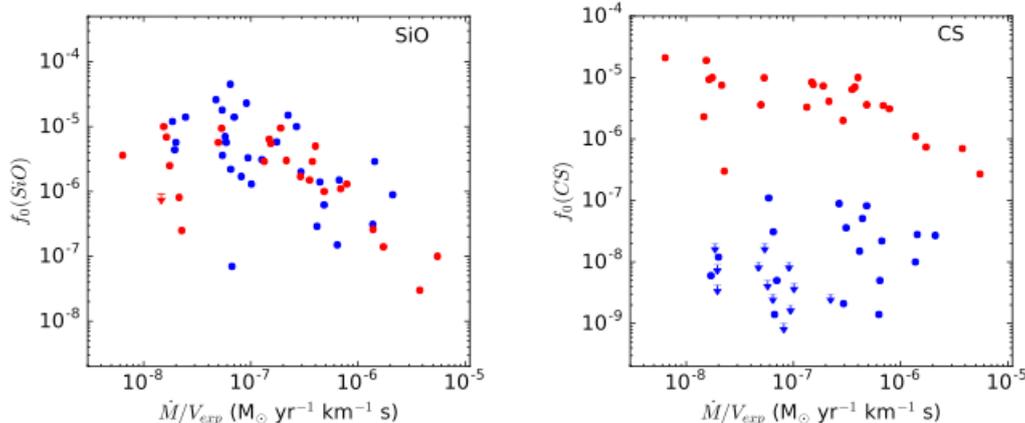
alrededor de las estrellas AGB e investigar la importancia de su papel en la formación del polvo. Por esta razón, realizamos observaciones de alta sensibilidad de una gran muestra de estrellas AGB en la banda de 2 mm utilizando el radiotelescopio de treinta metros de diámetro de IRAM. La muestra de objetos observados contiene tanto envolturas ricas en carbono como ricas en oxígeno y abarca un amplio rango de tasas de pérdida de masa y propiedades circunestelares. Hemos buscado la emisión de las moléculas SiC_2 , SiO , SiS y CS en 25 envolturas ricas en carbono, y de las moléculas SiO , SiS , CS , SO y SO_2 en una muestra de 30 envolturas ricas en oxígeno. Hemos construido modelos de excitación fuera del equilibrio termodinámico y transporte de radiación con objeto de reproducir las líneas observadas y determinar la abundancia con respecto a H_2 de estas moléculas. Destacamos que para la mayor parte de moléculas observadas, esta es la primera vez que se determina de forma coherente su abundancia en una muestra estadísticamente significativa.

Entre los resultados más interesantes encontrados, este estudio revela una clara correlación entre la abundancia de ciertas moléculas y la densidad de la envoltura. En concreto, en envolturas ricas en carbono la abundancia de SiC_2 , SiO y CS disminuye a medida que aumenta la densidad de la envoltura. Esta correlación se interpreta como una evidencia de la desaparición de estas moléculas de la fase gas para pasar a formar parte de granos de polvo, proceso que es favorecido al aumentar la densidad debido al mayor ritmo de colisiones entre partículas. Por lo tanto, SiC_2 , SiO , y CS son fuertes candidatos a actuar como precursores de polvo en envolturas ricas en carbono. En el caso de envolturas ricas en oxígeno, la abundancia de SiO muestra también una clara correlación con la densidad de la envoltura en la que al aumentar la densidad la abundancia de estas moléculas disminuye. Por lo tanto, SiO es un claro candidato a precursor de polvo en envolturas ricas en oxígeno.

Otro resultado interesante es ver cómo se comporta la abundancia de cada molécula dependiendo del carácter rico en carbono o rico en oxígeno de la envoltura. Así, las moléculas CS y SiS muestran una clara diferenciación entre estos dos tipos de envolturas, siendo significativamente más abundantes en envolturas ricas en carbono que en envolturas ricas en oxígeno. Por otra parte, la molécula de SiO parece no verse afectada por el hecho de encontrarse en un ambiente rico en carbono o rico en oxígeno. Algunos de estos hechos pueden explicarse mediante modelos de equilibrio químico, aunque otros son difícilmente explicables mediante estos modelos, lo que apunta a procesos químicos fuera del equilibrio como importantes agentes reguladores de la composición química en las regiones internas de envolturas circunestelares de estrellas AGB.

Tesis disponible en <https://repositorio.uam.es/handle/10486/694426>

Abundancia relativa a H_2 de las moléculas SiO (izquierda) y CS (derecha) en la muestra de envolturas ricas en carbono (puntos rojos) y la muestra de envolturas ricas en oxígeno (puntos azules) en función del parámetro \dot{M}/V_{exp} , que es una medida de la densidad. Se aprecia cómo al aumentar la densidad disminuye la abundancia de SiO en los dos tipos de envoltura y la de CS en envolturas ricas en carbono. Se aprecia también cómo CS muestra una clara diferenciación entre envolturas ricas en carbono y ricas en oxígeno mientras que esto no ocurre para SiO .



Discos y jets en la formación de sistemas estelares múltiples

Autora: Ana Karla Díaz Rodríguez

(ana.diazrodriguez@manchester.ac.uk)

Tesis doctoral dirigida por: Guillem Anglada Pons

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía

Fecha de lectura: 10 de febrero de 2021

Nuestro objetivo general es estudiar las primeras etapas del proceso de formación estelar en sistemas múltiples. Para ello analizamos dos aspectos complementarios de la formación múltiple de estrellas: la formación simultánea de protoestrellas en un cúmulo, y la formación de un sistema binario individual.

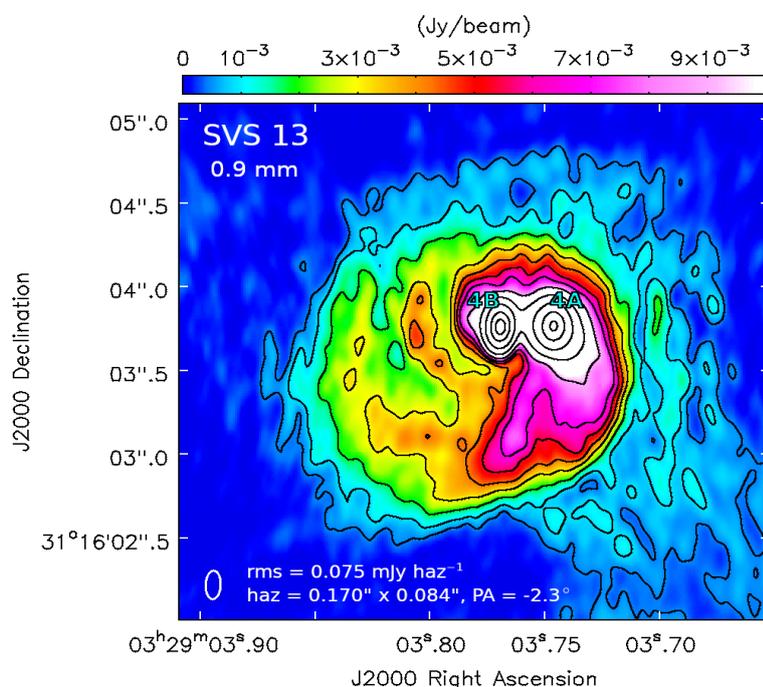
En primer lugar, presentamos observaciones multibanda (0,7-5 cm) y multiépoca (1994-2015) del VLA hacia la región que contiene las fuentes de IR lejano FIR 3 (HOPS 370) y FIR 4 (HOPS 108) en la Nube Molecular de Orión 2 (OMC-2). Reportamos la detección de diez fuentes de radio, siete de ellas identificadas como objetos estelares jóvenes (YSOs). Obtenemos la imagen del radio *jet* muy bien colimado (VLA 11) con emisión térmica libre-libre en su núcleo, asociado con la protoestrella de Clase I HOPS 370, de masa intermedia. El *jet* presenta varios nudos de emisión no térmica (probablemente sincrotrón debido al choque de electrones relativistas) a distancias de ~7500-12500 unidades astronómicas (au) de la protoestrella, en una región donde otros trazadores de choque han sido previamente identificados. Mostramos que estos nudos se están alejando de la protoestrella HOPS 370 a ~100 km/s. La protoestrella de Clase 0 HOPS 108, que detectamos como una fuente de radio independiente, cinemáticamente desacoplada del *jet*, cae en el camino de estos nudos no térmicos. Estos resultados favorecen el escenario propuesto anteriormente donde la formación de HOPS 108 ha sido desencadenada por el impacto del *jet* de HOPS 370 con el material denso a su alrededor. Sin embargo, HOPS 108 presenta una velocidad de movimiento propia aparente de ~30 km/s, similar a la de otras estrellas "fugitivas" en Orión, cuyo origen es desconcertante.

Más adelante, ampliamos nuestro estudio a todo el campo de visión de esas observaciones, una porción de 12,5' de longitud del Filamento con Forma de Integral (ISF) que contiene todo OMC-2 y los 2,5' más al sur de OMC-3. Reportamos 47 fuentes de radio adicionales, 23 de las cuales se presentan aquí por primera vez. Para estas 47 fuentes de radio, reportamos sus posiciones, densidades de flujo e índices espectrales. Discutimos su naturaleza analizando su índice espectral de radio, morfología, emisión a otras longitudes de onda, posición relativa al ISF y asociación con condensaciones de polvo. Concluimos que, del total de 57 fuentes de radio en el campo de visión, 41 (72%) están muy probablemente asociadas con la

El sistema protobinario SVS 13 visto con ALMA a 0,9 mm. Los dos picos de emisión están asociados con las fuentes centimétricas previamente identificadas VLA 4A y VLA 4B, y están rodeados por emisión extendida en forma de espirales. La imagen se ha realizado con pesado Briggs, con robust = 0,5. Los contornos son -6, 6, 12, 24, 40, 56, 72, 88, 120, 200, 400, 800 y 1200 veces 0,075 mJy haz⁻¹, el valor del rms de la imagen. El haz sintetizado (0,170" × 0,084", PA = -2,3°) se muestra en la esquina inferior izquierda de la imagen. La imagen está corregida por la respuesta del haz primario de la antena.

región de formación estelar, seis son fuentes de fondo extragalácticas, y no estamos seguros de la asociación con la región de las diez fuentes restantes. De las 41 fuentes asociadas con la región de formación estelar, 36 están trazando la posición de YSOs, tres están trazando la emisión no térmica de los nudos de un *jet*, una está trazando la pared ionizada por choques de una cavidad y una podría ser un YSO o un nudo de un *jet*. Identificamos de forma clara la emisión de radio continuo de las fuentes impulsoras de los nueve chorros moleculares previamente reportados en nuestro campo de visión. Para cuatro de estas fuentes resolvemos claramente su morfología alargada característica de los radio *jets*. Detectamos emisión térmica libre-libre proveniente de dos YSOs de Clase III que podría estar trazando sus discos fotoevaporados. Encontramos signos de variabilidad en trece fuentes de radio, siete de las cuales también son variables en longitudes de onda más cortas (infrarrojo cercano/óptico/rayos X). Encontramos siete pares de fuentes de radio con una separación proyectada <3000 au, que constituyen potenciales sistemas binarios; teniendo en cuenta fuentes adicionales detectadas a otras longitudes de onda, identificamos un total de 17 potenciales sistemas múltiples en nuestro campo de visión en ese rango de separación.

Finalmente, estudiamos con ALMA el sistema binario cerrado SVS 13, con componentes separadas 90 au. Detectamos al menos dos discos circunestelares de polvo y gas, y un disco circumbinario con prominentes brazos espirales que parece estar en las primeras etapas de formación. La emisión de polvo parece más intensa y compacta hacia la componente VLA 4B, mientras que la VLA 4A parece estar asociada con una mayor cantidad de polvo y con transiciones moleculares más intensas. Estimamos temperaturas rotacionales y densidades de columnas moleculares, indicando altas temperaturas y una rica química. Las transiciones moleculares típicas de los *corinos* calientes se detectan hacia las dos componentes VLA 4A y VLA 4B. A partir de la emisión de polvo observada y la información cinemática estimamos la orientación del sistema, las masas estelares y las de sus discos asociados. Nuestro análisis de los movimientos propios y la cinemática de los discos sugiere que hasta cuatro objetos estelares, uno de ellos una estrella visible, podrían estar presentes dentro de una región de tamaño <100 au. En resumen, SVS 13 parece ser un excelente caso de estudio con el que contrastar simulaciones numéricas de las primeras etapas de la formación de sistemas binarios y múltiples.



Caracterización de la alta atmósfera de exoplanetas que sufren escape atmosférico hidrodinámico

Autor: Manuel Lampón González-Albo (mlampon@iaa.es)

Tesis doctoral dirigida por: Manuel López Puertas

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) / Universidad de Granada

Fecha de lectura: 24 de marzo de 2021

Se estima que un gran número de planetas sufre escape atmosférico hidrodinámico en alguna etapa de su vida. Los planetas que se encuentran en esta etapa de gran expansión atmosférica pueden experimentar un gran cambio en su masa, en su radio, en su composición atmosférica e incluso pueden evolucionar a una clase planetaria diferente. Por lo tanto, este mecanismo juega un papel crucial en la formación y evolución de los planetas, así como en el origen de la diversidad planetaria observada.

La falta de observaciones en planetas que están sufriendo escape hidrodinámico dificulta seriamente su caracterización atmosférica y limita la comprensión de este proceso. Una de las principales deficiencias en el conocimiento de este tipo de escape es la falta de confirmación de los tres regímenes hidrodinámicos que han sido identificados de forma teórica: limitado por la energía, limitado por recombinación y limitado por el número de fotones (en inglés, *energy-limited*, *recombination-limited* y *photon-limited*), ya que actualmente no se ha obtenido ninguna prueba observacional de su existencia. Sin embargo, recientemente se han tomado medidas de alta resolución de las líneas de absorción del triplete de He I a 10830 Å en planetas intensamente irradiados por su estrella, por lo que se abre una nueva ventana para el estudio del escape atmosférico.

La finalidad de esta tesis es contribuir al conocimiento en el ámbito de las ciencias planetarias a través del estudio de la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape atmosférico hidrodinámico. Nuestros objetivos son 1) mejorar la caracterización de la alta atmósfera de una muestra de exoplanetas que están experimentando escape hidrodinámico. Esta muestra está compuesta por los exoplanetas tipo Júpiter caliente HD209458b y HD189733b, y por el exoplaneta tipo Neptuno caliente GJ3470b; 2) realizar un análisis comparativo entre estos exoplanetas con el fin de comprender mejor el proceso de escape hidrodinámico; y 3) investigar su régimen hidrodinámico. Para alcanzar los objetivos de la tesis, hemos participado en el proyecto CARMENES He I, una colaboración dentro del Consorcio de CARMENES para observar el He I en atmósferas exoplanetarias mediante el espectrógrafo de alta resolución CARMENES. Como parte del grupo de trabajo dedicado al estudio de atmósferas, hemos sido de los primeros a nivel mundial en obtener este tipo de medidas. Para analizar estas observaciones, hemos desarrollado un modelo hidrodinámico 1D con simetría esférica para describir la alta atmósfera de los exoplanetas, y lo hemos acoplado a un modelo termodinámico de desequilibrio para el cálculo de la población del He triplete. Además, hemos realizado un modelo de transferencia radiativa de alta resolución para calcular el espectro sintético de las líneas del triplete de He y analizar el espectro de absorción medido. De este análisis extraemos información de parámetros atmosféricos tales como la tasa de pérdida de masa, la temperatura de la termosfera y el perfil de densidad del triplete de He. Para romper la degeneración existente entre algunos de

estos parámetros, hemos utilizado observaciones previamente publicadas de la línea Lyman-alpha de estos exoplanetas.

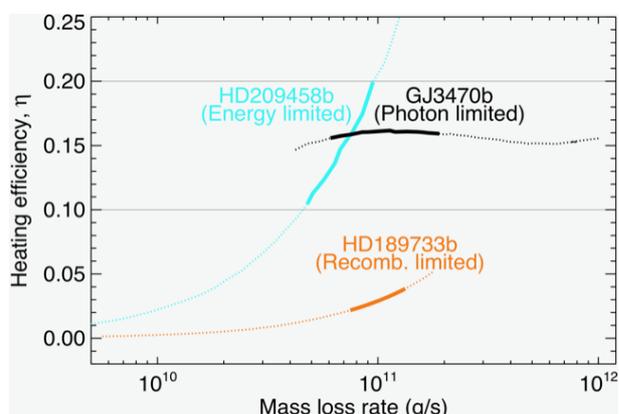
Entre los resultados obtenidos, encontramos que la alta atmósfera de HD189733b es caliente y compacta, tiene una temperatura máxima de 12100-12800 K y una composición determinada por la proporción H/He= $((99,2/0,8) \pm 0,1)$, se escapa con una velocidad baja, está altamente ionizada y sufre una tasa de pérdida de masa de $(0,98-1,15) \times 10^{11}$ g s⁻¹. Por el contrario, la alta atmósfera de GJ3470b está muy extendida, es relativamente fría, con una temperatura máxima de 5100 ± 900 K, tiene un H/He= $((98,5/1,5) \pm 1,5)$, se expande a una velocidad muy alta, está moderadamente ionizada y pierde masa a un ritmo de $(1,87 \pm 1,13) \times 10^{11}$ g s⁻¹. La alta atmósfera de HD209458b parece un caso intermedio entre las de HD189733b y GJ3470b, ya que está moderadamente extendida, tiene una temperatura máxima de 7625 ± 500 K; tiene un H/He= $98/2$; escapa a una velocidad moderada y pierde masa a un ritmo de $(0,71 \pm 0,29) \times 10^{11}$ g s⁻¹.

Atendiendo a los perfiles de densidad del H, encontramos que mientras la recombinación es el proceso que gobierna en toda la atmósfera de HD189733b, la advección domina completamente en la de GJ3470b, no siendo ninguno de estos procesos despreciable en la alta atmósfera de HD209458b. Aparte de obtener buenas estimaciones de los principales parámetros atmosféricos de estos exoplanetas, hemos podido confirmar que GJ3470b sufre escape hidrodinámico.

Además, hemos proporcionado la primera estimación observacional de la proporción de H/He en un exoplaneta. Nuestras estimaciones de H/He en los tres exoplanetas sugieren que la alta atmósfera de planetas gigantes que sufren escape hidrodinámico tienden a tener una masa molecular media muy baja (H/He mayor que 97/3).

Por otro lado, presentamos pruebas observacionales de los diferentes regímenes hidrodinámicos en atmósferas ricas en hidrógeno. En concreto, mostramos que HD209458b se encuentra en el régimen limitado por la energía, HD189733b en el régimen limitado por la recombinación y GJ3470b en el limitado por el número de fotones. De acuerdo con estos resultados, proponemos estos exoplanetas como arquetipos para sus respectivos regímenes. Concluimos que este trabajo mejora significativamente la caracterización de la alta atmósfera de los exoplanetas que componen nuestra muestra, al igual que mejora nuestro conocimiento sobre el proceso de escape atmosférico hidrodinámico.

Tesis disponible en: https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/iaa_2021_tesis_m_lampon.pdf



Eficiencia de calentamiento de la alta atmósfera del planeta respecto a su tasa de pérdida de masa. Esta relación muestra la eficiencia con la que se genera el escape atmosférico del planeta a partir del flujo estelar incidente y revela a su vez el régimen hidrodinámico en el que se encuentra cada uno de los exoplanetas estudiados.

Detección, caracterización y uso de cúmulos abiertos en un contexto Galáctico en un entorno *Big Data*

Autor: Alfred Castro Ginard

Tesis doctoral dirigida por: Xavier Luri y

Carme Jordi

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 30 de abril de 2021

Los cúmulos estelares abiertos son conjuntos de estrellas, ligadas gravitacionalmente, nacidas de la misma nube de gas molecular que tienen posiciones, cinemática, edades y metalicidades similares. Los métodos tradicionales para la búsqueda de cúmulos abiertos se basan en la inspección visual de regiones del cielo buscando sobredensidades posicionales y comprobando que sus estrellas siguen una isócrona en un diagrama de color-magnitud. El segundo lanzamiento de datos de *Gaia*, con más de 1300 millones de estrellas con medidas de paralaje y movimiento propio junto con fotometría en tres bandas, ha catapultado el desarrollo de novedosas técnicas basadas en *machine learning* para automatizar la detección de cúmulos abiertos, usando información tanto astrométrica como fotométrica.

La caracterización de los cúmulos abiertos nos permite conocer propiedades del disco Galáctico tales como la estructura y evolución de los brazos espirales, o la comprobación de estudios sobre evolución estelar, ya que los parámetros astrofísicos de los cúmulos se pueden estimar con una precisión mayor que para estrellas de campo individuales. Por esto, una buena caracterización de la población de cúmulos abiertos en la Vía Láctea es clave para estudios de arqueología Galáctica.

Nuestro objetivo para esta tesis es transformar los métodos clásicos para la detección de diferentes tipos de patrones en datos astronómicos, que mayoritariamente dependen de la inspección visual, a métodos automáticos de minería de datos para extraer información útil de catálogos estelares. También usaremos el resultado de la aplicación de técnicas de *machine learning* a los datos de *Gaia* en un contexto Galáctico más amplio.

Hemos desarrollado una metodología de minería de datos para la búsqueda a ciegas de cúmulos abiertos en el disco Galáctico. Primero, usamos un algoritmo basado en densidad, DBSCAN, para buscar sobredensidades estelares en el espacio astrométrico de cinco dimensiones de *Gaia*. El despliegue del método de detección en un entorno de *Big Data*, en el superordenador *MareNostrum* colocado en el *Barcelona Supercomputing Center*, evita que la búsqueda esté limitada por restricciones computacionales. Después, las sobredensidades detectadas son clasificadas en simples sobredensidades estadísticas o estructuras físicas usando una red neuronal artificial entrenada para reconocer las isócronas que los cúmulos abiertos forman en un diagrama de color-magnitud.

Para toda la población de cúmulos abiertos, estimamos los parámetros astrofísicos tales como edad, distancia y extinción en la línea de visión usando una red neuronal artificial entrenada en cúmulos abiertos bien estudiados. Usamos esta

información, junto con velocidades radiales medias para cada cúmulo, para trazar la estructura espiral de nuestra Galaxia usando *GaussianMixtureModels* para asociar los cúmulos más jóvenes (< 30 My) al brazo espiral donde se han formado. También describimos la evolución de los brazos espirales durante los últimos 80 My para dar nuevas pistas sobre la naturaleza de la estructura espiral de la Vía Láctea.

La automatización del procedimiento de detección de cúmulos abiertos, junto con su despliegue en un entorno de *Big Data*, ha resultado en más de 650 nuevos cúmulos abiertos detectados con este método. Los nuevos cúmulos UBC representan un tercio del censo total de cúmulos abiertos actualmente conocido y es la mayor contribución individual al catálogo de cúmulos abiertos.

Somos capaces de añadir 264 cúmulos abiertos jóvenes a las 84 regiones de formación estelar de alta masa que se han usado tradicionalmente para trazar los brazos espirales, para incrementar el rango en azimut Galáctico donde los brazos espirales están definidos y estimar mejor sus parámetros. Analizando la distribución de cúmulos abiertos a través de los brazos espirales y calculando las diferentes velocidades de estos brazos somos capaces de desfavorecer las clásicas ondas de densidad como el mecanismo principal de formación de los brazos espirales de la Vía Láctea, favoreciendo un comportamiento transitorio.

Con esta tesis hemos mostrado que el uso de *machine learning*, con un tratamiento correcto de los recursos computacionales, tiene un largo viaje por delante en un futuro de la Astrofísica dominada por los datos.

Tesis disponible en: <https://www.tesisenred.net/handle/10803/671790#page=1>

Sistemas planetarios orbitando enanas rojas y actividad de sus estrellas anfitrionas

Autor: Rafael Luque Ramírez (rluque@iaa.es)

Tesis doctoral dirigida por: Enric Pallé y Grzegorz Nowak

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

Fecha de lectura: 25 de mayo de 2021

Uno de los campos más apasionantes de la ciencia hoy en día es el estudio de los exoplanetas, que cautivan la imaginación no solo de la comunidad astronómica sino también de la sociedad en general. Identificar exoplanetas como la Tierra y encontrar biomarcadores en sus atmósferas está entre los principales objetivos de la astronomía para este siglo, motivando el desarrollo y construcción de ambiciosas misiones espaciales y telescopios en tierra de enormes dimensiones. Los planetas pequeños y rocosos orbitando estrellas de tipo espectral M, también conocidas como enanas rojas, son los únicos candidatos similares a la Tierra cuyas atmósferas se pueden estudiar con la tecnología actual. Además, son los mejores, si no los únicos, candidatos para detectar signos de vida en ellos con la próxima generación de instrumentos.

Esta tesis se centra en el descubrimiento y caracterización de planetas pequeños en torno a enanas rojas. Las enanas rojas componen el 70% de las estrellas de nuestra Galaxia y debido a su pequeña masa y tamaño ofrecen varias ventajas para la detección y caracterización de exoplanetas usando las dos técnicas más comunes y exitosas: el método de tránsito y el de las velocidades radiales. El objetivo principal de este trabajo es aprovechar la oportunidad que ofrecen este tipo de estrellas para descubrir y estudiar los mejores candidatos para el estudio de atmósferas exoplanetarias con instrumentos venideros usando la sinergia entre misiones espaciales que buscan planetas transitantes y espectrógrafos de alta resolución en tierra. Para ello, se han desarrollado nuevos métodos analíticos para la determinación del mejor modelo de ajuste de los datos usando estadística Bayesiana y el modelado de la actividad estelar usando procesos Gaussianos.

Los resultados de la tesis incluyen la detección y caracterización de dos supertierras orbitando las enanas rojas GJ 3779 y GJ 1265 usando el espectrógrafo CARMENES (Luque et al., 2018), y dos sistemas multiplanetarios (Luque et al., 2019b, 2021) cuyos planetas se detectaron en tránsito por el telescopio espacial TESS y han sido confirmados y caracterizados con una batería de instrumentos en tierra. Además de estos trabajos sobre sistemas planetarios orbitando enanas rojas, la tesis incluye publicaciones adicionales acerca de la detección y caracterización de planetas en torno a otros tipos de estrella (como las de tipo solar —Luque et al., 2019a- y las gigantes rojas —Luque et al., 2019c-) y el análisis de la composición química de la atmósfera del “Júpiter caliente” WASP-74 (Luque et al., 2020).

El descubrimiento del sistema multiplanetario alrededor de la brillante enana roja GJ 357 es uno de los resultados más

destacados de esta tesis. El planeta más cercano a su estrella, GJ 357 b, es un planeta caliente con una densidad similar a la Tierra que se ha convertido en el tercer planeta transitante más cercano al nuestro. El próximo año el telescopio espacial JWST estudiará la atmósfera de GJ 357 b, lo que permitirá conocer la composición química de este tipo de planetas llamados “tierras calientes” por primera vez. El análisis de las velocidades radiales de la estrella reveló dos planetas adicionales de tipo supertierra en órbitas externas, estando el más alejado en la “zona habitable”, es decir, en el rango de órbitas donde el agua podría mantenerse en estado líquido en su superficie.

En total, nueve nuevos planetas en seis sistemas extrasolares se han descubierto y analizado como primer autor de los artículos que componen esta tesis. Al comienzo de esta tesis, en enero de 2018, solo se conocían doce planetas orbitando enanas rojas con medidas precisas de su masa y radio. Tras su finalización, el número ha incrementado hasta 33, siendo más de la mitad de las nuevas incorporaciones parte del trabajo de esta tesis (como autor principal o co-autor). Las nuevas incorporaciones no solo han permitido encontrar candidatos apropiados para estudios atmosféricos, especialmente con el telescopio espacial JWST, sino que también nos ayudan a comprender la composición, origen y evolución de esta población de una forma global. Los resultados y las técnicas desarrolladas en esta tesis contribuyen a mejorar nuestro conocimiento acerca del tipo de planeta más frecuente en el Universo, los planetas rocosos orbitando enanas rojas, y su potencial para albergar condiciones propicias para la vida.

Tesis disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFichaConsulta.do?idFicha=658776>

El Universo de bajo brillo superficial: la última frontera

Autor: Raúl Infante Sainz

(infantesainz@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Trujillo

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

Fecha de lectura: 18 de junio de 2021

El estudio del Universo de bajo brillo superficial supone una de las mayores oportunidades de descubrimientos en la Astronomía actual. Sin embargo, las técnicas tradicionales para reducir y tratar los datos astronómicos no son capaces de proporcionar imágenes en las que las estructuras de bajo brillo superficial puedan ser analizadas y estudiadas con suficiente nivel de detalle. Ir más profundo de 30 mag arcsec⁻² implica observar estructuras ~1500 veces más débiles que el brillo del cielo más oscuro de la Tierra, y múltiples efectos sistemáticos lo hacen muy difícil (por ejemplo, el campo plano, la sobresubstracción del fondo del cielo, las reflexiones internas, la luz dispersada, los cirros Galácticos, etc.). En esta tesis se ha

llevado a cabo una exploración del Universo de bajo brillo superficial con especial énfasis en los apartados más técnicos.

Para corregir los efectos sistemáticos y poder estudiar las estructuras de bajo brillo superficial, se han desarrollado, mejorado y aplicado muchas técnicas a una gran cantidad de datos de telescopios muy diferentes. Se ha prestado especial atención al efecto de la función de dispersión de punto (PSF) para corregir la luz dispersada en las imágenes astronómicas. Un resultado notable es la detección de una estructura estelar de marea muy débil de la galaxia NGC 1052-DF4. Esto revela que la galaxia NGC 1052-DF4 está interactuando con otra galaxia cercana, explicando así su sorprendente falta de materia oscura. Las técnicas y herramientas desarrolladas están pensadas para ser utilizadas en la próxima generación de telescopios y cartografiados profundos con el objetivo de mejorar la calidad de los datos. Junto al desarrollo de esta tesis, también se ha desarrollado y madurado un programa para realizar investigaciones reproducibles: *Maneage* (del inglés, *Managing data Lineage*). El objetivo de Maneage es proporcionar un entorno totalmente controlado para llevar a cabo estudios científicos reproducibles. En este sentido, la práctica totalidad de las reducciones y el análisis de los datos astronómicos en esta tesis se han realizado utilizando Maneage.

Tesis disponible en: correo electrónico a infantesainz@gmail.com



Arriba izquierda: Imagen de la galaxia NGC 4565 observada con la cámara PAUCam y el telescopio William Herschel (WHT) usando los filtros *g*, *r*, *i* de Sloan. Nótese que en esta imagen hay muchas fuentes cercanas a la galaxia cuya luz contamina las estructuras de bajo brillo superficial, es decir, el halo, la parte externa del disco, etc. La magnitud superficial límite de esta imagen (para cada filtro) es ~30magarcsec⁻². Arriba derecha: Campo de luz dispersada debido a las estrellas más brillantes (únicamente estrellas más brillantes que 13 magnitudes presentes en el catálogo de Gaia DR2). En esta imagen se muestra cómo aplicando las técnicas desarrolladas y mejoradas en esta tesis es posible obtener imágenes muy profundas. Del mismo modo, construyendo la PSF muy extendida es posible modelar el campo de luz difusa generado por las estrellas presentes en el campo de visión y corregir de este efecto. Una vez modelada esta luz contaminante, se puede eliminar esta contribución y estudiar las estructuras de bajo brillo superficial, como por ejemplo el halo de la galaxia o las partes más externas, que antes no era posible. En ambas imágenes la orientación es norte hacia arriba y este hacia la izquierda.

Derecha: Elementos de la matriz de Mueller de un etalón comercial de niobato de litio en función del ángulo de incidencia y de la longitud de onda. Los coeficientes *a* y *c* se encuentran en la diagonal de la matriz de Mueller y muestran el comportamiento típico del perfil de transmisión con el ángulo de incidencia correspondiente a un dispositivo Fabry-Pérot. Sin embargo, los elementos *b* y *d* se encuentran fuera de la diagonal y producen un desdoblamiento del perfil de transmisión, así como una contaminación de los diferentes parámetros de Stokes y, por tanto, causan señales espurias en la medida del estado de polarización de la luz que pueden a su vez falsear las medidas del campo magnético solar.

Propiedades espectropolarimétricas y de calidad de imagen de los etalones Fabry-Pérot. Aplicaciones a instrumentación solar

Autor: Francisco Javier Bailén Martínez
(fbailen@iaa.es)

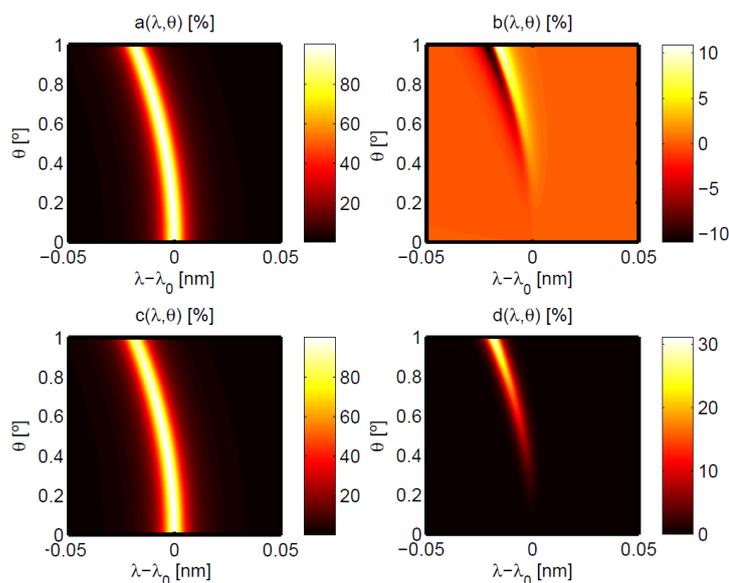
Tesis doctoral dirigida por: David Orozco Suárez y José Carlos del Toro Iniesta

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía / Universidad de Granada

Fecha de lectura: 25 de junio de 2021

El uso de etalones Fabry-Pérot como filtros sintonizables de banda estrecha ha experimentado un fuerte crecimiento en las últimas décadas en el ámbito de la instrumentación solar. Sin embargo, en la mayoría de estudios hasta la fecha solo se ha evaluado su comportamiento hasta cierto punto —por ejemplo, suponiendo efectos puramente monocromáticos, comportamientos isotropos o iluminación ideal—. En este trabajo abordamos las características espectrales, polarimétricas y de calidad de imagen de los etalones Fabry-Pérot, así como su influencia en espectropolarímetros solares en la configuración colimada y en la telecéntrica, prestando una especial atención a (i) el efecto del ancho de banda finito del etalón, (ii) los posibles efectos birrefringentes que aparecen en etalones sólidos, (iii) las posibles imperfecciones en la iluminación y (iv) el impacto de los defectos de los etalones en las observaciones.

Esta tesis está basada en una compilación de cuatro artículos sobre instrumentos basados en etalones Fabry-Pérot, publicados en *The Astrophysical Journal Supplement Series*. En nuestro primer artículo comenzamos con una revisión general de las características de los etalones. Repasamos el enfoque histórico seguido para evaluar el impacto de las irregularidades e inhomogeneidades de los etalones en el perfil de transmisión y generalizamos las expresiones empleadas más comúnmente con el fin de incluir el impacto de defectos de magnitud arbitraria en etalones tanto cristalinos como de aire. También examinamos su respuesta espectral y la calidad de imagen esperada



para cada configuración, colimada y telecéntrica, incluyendo los efectos policromáticos provocados por el ancho de banda finito del filtro, así como posibles desviaciones de la iluminación respecto a la ideal. En concreto, nos centramos en los efectos de apodización de pupila que ocurren en las monturas telecéntricas y en las consecuencias de las asimetrías, desplazamientos y ensanchamientos inducidos en el perfil de transmisión y en la PSF cuando el etalón está girado respecto al eje óptico del instrumento, cuando se tienen en cuenta errores en el alineamiento de los componentes ópticos, o por desviaciones de la propagación paraxial ideal de la luz a lo largo del instrumento.

En el segundo artículo abordamos la respuesta polarimétrica de etalones sólidos uniaxiales (como los de LiNbO_3) y demostramos que la matriz de Mueller en estos etalones depende solo de cuatro coeficientes espectrales que cambian rápidamente a lo largo del perfil de transmisión y que la respuesta polarimétrica puede formularse como la combinación de las matrices de Mueller de un retardador y de un espejo, correctamente moduladas a lo largo del perfil de transmisión. También incluimos el efecto de tener diferentes orientaciones del plano principal del cristal en cada configuración y formulamos la dependencia explícita de la birrefringencia inducida en cristales uniaxiales con la dirección de la luz incidente y con la orientación del eje óptico.

Por último, evaluamos la respuesta de un etalón de niobato de litio para las monturas colimada y telecéntrica y estudiamos la dependencia de su PSF con la polarización de la luz incidente. En el tercer artículo evaluamos las señales espurias de las velocidades del plasma y del campo magnético debidas a los efectos estudiados en los artículos anteriores: la apodización de pupila que surge en monturas telecéntricas, las asimetrías en la apodización de pupila que aparecen cuando hay imperfecciones en la iluminación de etalones telecéntricos y los efectos birrefringentes que aparecen en las dos configuraciones cuando se usa un etalón uniaxial. Para este fin simulamos un espectropolarímetro en configuraciones similares a las de PHI e IMaX y comparamos las velocidades y campos magnéticos del plasma a lo largo del campo de visión con los obtenidos cuando se supone un comportamiento ideal. Para ello, tenemos en cuenta la localización del etalón dentro del tren óptico y distinguimos entre dos casos importantes: cuando se coloca detrás del polarímetro (como ocurre en instrumentos de doble haz) y cuando se sitúa antes del analizador. Evaluamos también la posible contaminación entre canales ortogonales que aparece en instrumentos de doble haz y mostramos que la birrefringencia tiene un impacto mínimo en la medida del vector de Stokes en comparación con las señales artificiales esperadas por la apodización de pupila.

En el cuarto artículo presentamos una fórmula analítica que describe el campo eléctrico transmitido en la configuración telecéntrica y que ajusta de manera excelente con los resultados obtenidos tras resolver de forma numérica la ecuación del campo eléctrico. Usamos esta expresión para inferir tanto el perfil de transmisión como el frente de onda transmitido. En concreto, obtenemos expresiones para la degradación de frente de onda producida por errores a lo largo de la huella del haz incidente y discutimos la magnitud máxima necesaria para lograr alcanzar el límite de difracción. Para ello, evaluamos la dependencia del error del frente de onda con el número f , con la reflectividad y con la resolución espectral, a la vez que comparamos de forma cualitativa el comportamiento de las monturas telecéntricas con la esperada en instrumentos colimados atendiendo a consideraciones relacionadas con el tamaño, la calidad y el coste del etalón y del propio instrumento. Por último, proponemos un método para evaluar analíticamente la matriz de Mueller de etalones telecéntricos adaptando la formulación derivada para el caso isotropo.

Tesis disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/244671>

Nuevas ventanas a la población estelar del centro Galáctico: estudios en múltiples longitudes de onda y en el tiempo

Autora: Aurelia Teresa Gallego Calvente

Tesis doctoral dirigida por: Rainer Schoedel

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)

Fecha de lectura: 8 de julio de 2021

El centro de nuestra Galaxia, la Vía Láctea, será siempre de nuestro interés debido a que su proximidad lo convierte en un laboratorio ideal para poder estudiar fenómenos que luego se pueden extrapolar a otras galaxias. Sin embargo, el estar abarrotado de estrellas hace muy difícil su completa observación y, además, el medio interestelar entre la Tierra y el centro Galáctico es opaco para algunas longitudes de onda, como por ejemplo para la luz visible. Por ello, es cada vez más relevante estudiar el Universo a diferentes frecuencias y en diferentes épocas para poner de manifiesto todos sus aspectos.

De entre todos los distintos tipos de estrellas que conocemos, las *estrellas masivas* son de especial interés debido a varios hechos fundamentales. En primer lugar, su alta masa (comúnmente aceptada mayor a ocho veces la masa de nuestro Sol), que hace que tengan una temperatura central muy elevada y, por lo tanto, una gran luminosidad, da lugar a que estas estrellas evolucionen más rápidamente y vivan menos tiempo que las estrellas de menor masa. Excitan y enriquecen químicamente el medio interestelar en el que se encuentran a través de una intensa radiación ionizante, fuertes vientos y, en particular, al morir en una explosión que se determina como “supernova”. Además, dan origen a objetos de alta energía como estrellas de neutrones o agujeros negros.

Por otro lado, y precisamente por su elevada masa, son raras y difíciles de observar ya que cuanto más masiva es una estrella en menor cantidad se encuentra y, al formarse en las regiones más densas de las nubes moleculares, se hallan envueltas por una gran cantidad de polvo y gas molecular durante las fases iniciales de su vida hasta que llegan a la secuencia principal. A través de estudios observacionales se ha demostrado que la tasa de formación estelar por intervalo de masa depende fundamentalmente de la masa. Esta dependencia se conoce como “función inicial de masa” (IMF, por sus siglas en inglés). Pues bien, para masas mayores a una masa solar, la IMF puede aproximarse a una ley de potencias con la masa como base y el exponente, para estrellas masivas y de masa intermedia, igual a -2.35 (IMF de Salpeter). En entornos extremos como es el caso del centro Galáctico, con fuerzas de marea muy intensas, un campo magnético tremendo, temperaturas muy elevadas, enormes turbulencias en el medio interestelar, una densidad estelar muy extrema y una radiación ultravioleta importante, este exponente puede pasar a un valor diferente, como el valor de -1.8 encontrado observacionalmente para el cúmulo de Arches (Hosek et al. 2019), lo que puede indicar que en este entorno se forman relativamente más estrellas masivas que en la vecindad solar.

Otra característica notable que presentan es su alta fracción de multiplicidad, es decir, suelen formar sistemas múltiples (alrededor del 91% de acuerdo con Sana et al. 2014), lo que debe también tenerse en cuenta al analizar su evolución y en el extremo final de la función inicial de masa.

Para estudiarlas, el centro Galáctico es un lugar excepcional por ser el único núcleo galáctico y el entorno de condiciones físicas más extremas que podemos examinar a escalas de milipársecs. Así pues, considerando además que las nubes moleculares en las que se forman se encuentran a distancias mayores a 1 Kpc de nosotros, para estudiar las estrellas masivas necesitaremos instrumentos con la mayor sensibilidad y la mejor resolución posibles.

El objetivo de esta tesis es el estudio de las estrellas masivas pertenecientes a dos de los cúmulos más emblemáticos del centro Galáctico, los cúmulos de Arches y Quintuplet, ambos situados a unos 30 pársecs en proyección de Sagittarius A*, el agujero negro central de la Vía Láctea, utilizando técnicas de muy alta resolución angular radio interferométricas. Estas técnicas nos permiten la observación de objetos lejanos separados por una distancia angular muy pequeña, sintetizando una apertura equivalente a la distancia de separación de pares de antenas, apertura que no sería posible conseguir con un único radio telescopio.

Debido a que la extinción interestelar en esta región es muy elevada, los estudios observacionales de estos dos cúmulos se han visto limitados fundamentalmente a observaciones en el infrarrojo cercano, con espectroscopía y fotometría, por ser el rango óptico prácticamente inaccesible y estar el infrarrojo medio limitado por la resolución angular y/o la sensibilidad de los instrumentos en un enclave muy poblado de estrellas. Dada la baja estadística de observaciones en radio de los vientos ionizados de las estrellas masivas y la existencia de ellas en los cúmulos de Arches y Quintuplet, este trabajo es un nuevo paso hacia la comprensión de este tipo de estrellas y de los cúmulos que las contienen.

Todos los estudios que en la tesis se presentan se han realizado gracias a la utilización del radio interferómetro *Karl G. Jansky Very Large Array* (JVLA) operado por el *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO). En este trabajo se ha obtenido: a) un nuevo censo, en ambos cúmulos, del número de estrellas masivas observadas en longitudes de onda de radio centimétricas, b) los flujos y posiciones de las mismas, c) las tasas de pérdida de masa estimadas, d) una valoración de su posible multiplicidad en base al índice espectral calculado, e) una evaluación de la variabilidad y, finalmente, f) una estimación, entre unos ciertos límites, de la edad y/o masa de los cúmulos, así como de la función inicial de masa en base, precisamente, al número de radiofuentes detectadas.

Tesis disponible desde: https://www.iaa.csic.es/sites/default/files/thesis/tesis_iaa_2021_gallegocalvente_aurelia_teresa.pdf

Modelización y observaciones de outflows relativistas en sistemas binarios de alta energía

Autor: Edgar Molina Lumbreras
(emolina@fqa.ub.edu)

Tesis doctoral dirigida por: Valentí Bosch-Ramon y Marc Ribó

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 29 de septiembre de 2021

Algunos sistemas binarios formados por un objeto compacto, que puede ser una estrella de neutrones o un agujero negro, y una estrella compañera típicamente no degenerada se han observado emitiendo en un amplio rango de frecuencias, desde radio hasta rayos gamma. Estos sistemas normalmente se clasifican como binarias de rayos X o de rayos gamma en función de la frecuencia a la cual su emisión es máxima. Al contrario que en las estrellas convencionales, una gran parte de esta emisión no puede ser explicada mediante procesos térmicos y por tanto es necesario que se den mecanismos no térmicos de emisión de radiación. Las interacciones entre la estrella y el objeto compacto pueden resultar en el lanzamiento de *outflows* de plasma originados alrededor del objeto compacto. Estos *outflows* pueden adquirir velocidades próximas a la de la luz y pueden acelerar partículas cargadas hasta energías relativistas. Parte de la emisión no térmica que se observa en las binarias de rayos X y gamma proviene precisamente del enfriamiento radiativo no térmico de estas partículas. Además, cuando la estrella compañera es muy masiva, esta genera un fuerte viento estelar que interactúa con los *outflows* y les afecta tanto en su dinámica como en su emisión de radiación.

El principal objetivo de esta tesis desde el punto de vista teórico es el estudio de las interacciones entre los *outflows* de binarias de rayos X y gamma y el viento estelar de una estrella compañera masiva. Para esto hemos desarrollado una serie de modelos semianalíticos que dan una visión completa de estas interacciones en diferentes tipos de escenarios. En ellos, se adopta una prescripción simplificada de la trayectoria que siguen los *outflows* para que los cálculos puedan realizarse en ordenadores comunes. La evolución de las partículas no térmicas a lo largo de esta trayectoria se calcula teniendo en cuenta que se enfrían mediante diferentes procesos no térmicos, como la expansión adiabática o las pérdidas por sincrotrón y Compton inverso. Con tal de obtener la emisión detectada por el observador, la emisión intrínseca de los *outflows* es corregida por el efecto del beaming relativista y por procesos de absorción mediados por los campos estelares de fotones e iones.

Los resultados de la modelización teórica incluyen distribuciones espectrales de energía y curvas de luz directamente comparables con los datos observacionales. También se obtienen mapas de radio para la emisión a gran escala de los *outflows*. Estos últimos permiten visualizar directamente el efecto diná-

mico del viento estelar en la trayectoria de los *outflows*, que adquieren forma de hélice o espiral. Esta trayectoria da lugar a asimetrías en las curvas de luz a diferentes rangos de energía, así como a cambios en las distribuciones espectrales de energía debidos principalmente a variaciones en procesos dependientes del ángulo entre el *outflow* y la estrella o el observador.

En su parte observacional, esta tesis se focaliza en la emisión potencial de rayos gamma de muy alta energía (por encima de 100 GeV) de la binaria de rayos X MAXI J1820+070, observada con los telescopios MAGIC. El análisis de las observaciones se realiza a través de un software personalizado de MAGIC, que permite reconstruir la energía y dirección de un rayo gamma a través de la luz Cherenkov emitida por la cascada electromagnética que el rayo gamma genera al entrar en la atmósfera terrestre. Con tal de tener una visión más global de la fuente estudiada, el análisis de muy altas energías se contextualiza con datos multifrecuencia de radio a rayos gamma de alta energía, por encima de los 100 MeV.

Los resultados observacionales consisten en un estudio multifrecuencia de la fuente MAXI J1820+070 en forma de curvas de luz y distribuciones espectrales de energía que utilizan datos de diferentes telescopios a frecuencias radio, ópticas, de rayos X y de rayos gamma. La fuente no se detecta en rayos gamma por encima de 100 MeV, y solo se pueden obtener límites superiores del flujo a estas energías. Sin embargo, estos límites, junto con los flujos en otras frecuencias, permiten acotar significativamente las propiedades de un emisor potencial de rayos gamma en MAXI J1820+070, principalmente su tamaño y localización.

En conclusión, esta tesis profundiza en el conocimiento de las interacciones entre el viento estelar y los *outflows* de sistemas binarios de altas energías. Se muestra que estas interacciones deben tenerse en cuenta con tal de caracterizar el subconjunto de estos sistemas con una estrella masiva, en los cuales el viento estelar es potente. En esta tesis también se muestra que las observaciones de sistemas binarios en rayos gamma de altas y muy altas energías permite limitar de manera importante las propiedades de los *outflows*, incluso cuando las fuentes no son detectadas y solo se pueden obtener límites superiores en los flujos.

Tesis disponible en: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/180843>



La oscuridad del cielo nocturno,
un patrimonio cultural de la Humanidad,
y una necesidad para la biodiversidad.



**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