

# SEA

Sociedad Española de Astronomía

50 Verano 2024



**Portada: Collage de anteriores portadas del Boletín de la SEA.**

Créditos: Fernando J. Ballesteros.

**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

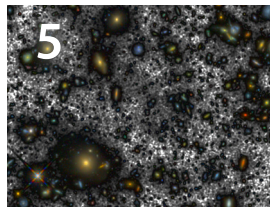
**Sociedad Española de Astronomía SEA**

[www.sea-astronomia.es](http://www.sea-astronomia.es)

**Comisión de Información**

[comi-info@sea.am.ub.es](mailto:comi-info@sea.am.ub.es)

# CONTENIDOS

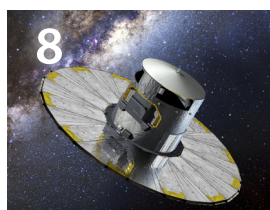


5

BOLETIN INFORMATIVO

6

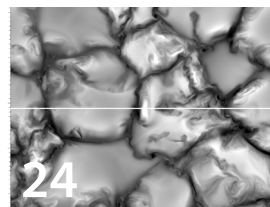
Comisiones  
naria de la SEA  
grosos  
servación para ISO  
lección de nuevos miembros  
a solicitud de tiempos de observación



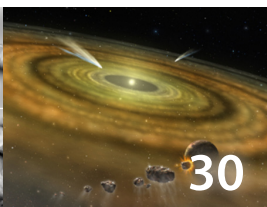
8



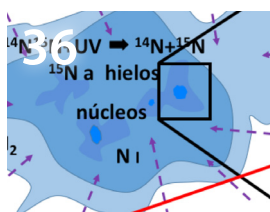
14



24



30



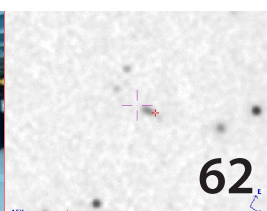
36



40



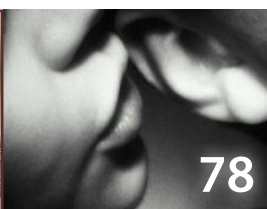
46



62



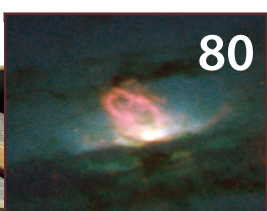
74



78



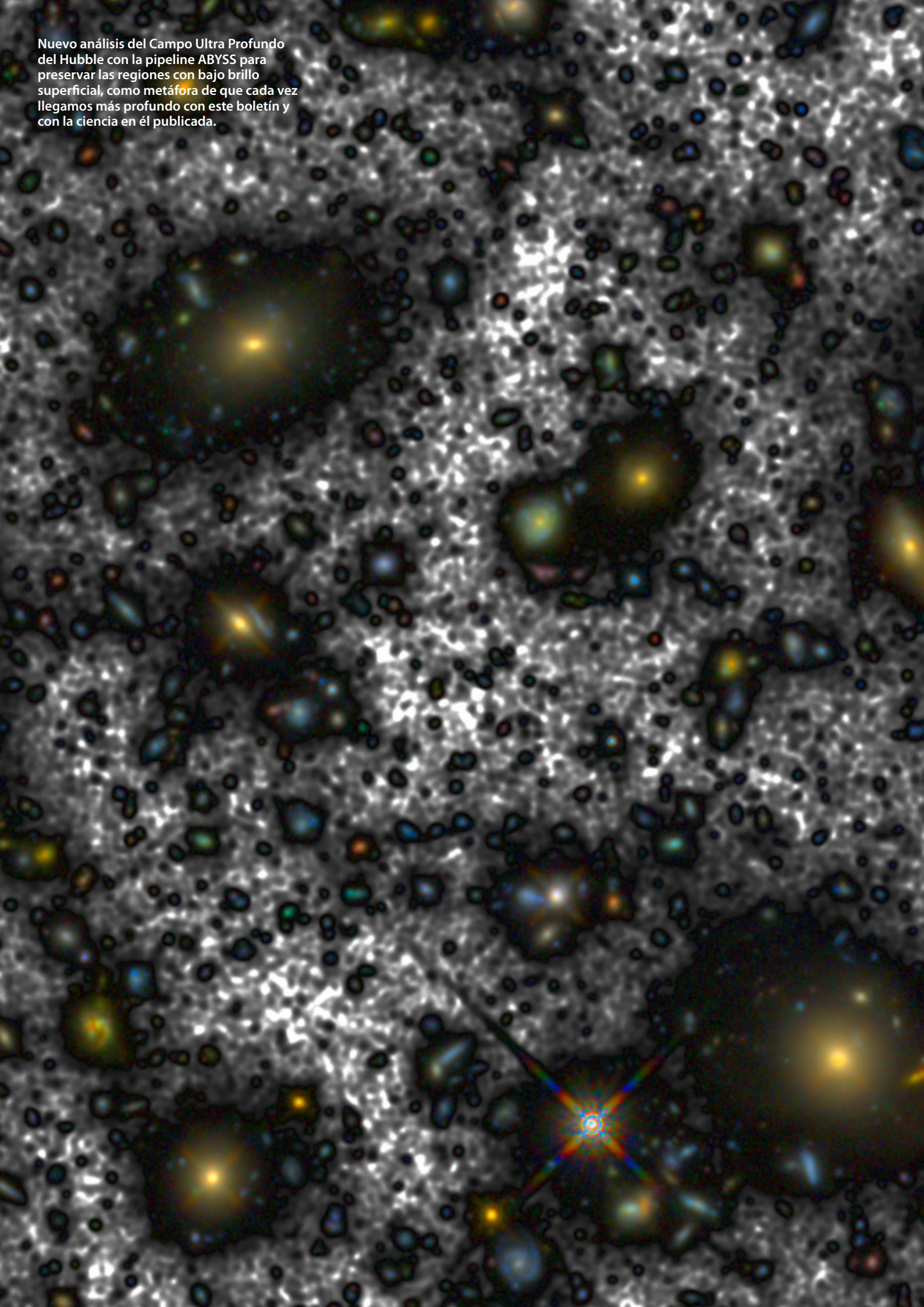
79



80

- 5 Editorial
- 6 Allá por 1994: primer Boletín de la SEA
- 8 Astrometría espacial: Hipparcos, Gaia y GaiaNIR
- 14 De los avances en el campo de los GRBs en los últimos 25 años
- 24 Dinámica de la cromosfera solar: avances en plasma multifluido
- 30 SUL4LIFE: Tras el Aroma de la Vida
- 36 Un isotópologo de amoniaco en la atmósfera de una enana marrón
- 40 Explorando las sombras del Universo
- 46 La astrofísica computacional en España: desarrollos y retos
- 62 20 años de Observatorio Virtual en España
- 74 Concurso infantil de dibujos Mujer y Astronomía
- 78 Ecos de (la) Sociedad
- 79 Libros
- 80 Tesis doctorales

Nuevo análisis del Campo Ultra Profundo del Hubble con la pipeline ABYSS para preservar las regiones con bajo brillo superficial, como metáfora de que cada vez llegamos más profundo con este boletín y con la ciencia en él publicada.



# EDITORIAL

Hace ya 25 vueltas al Sol que el boletín cambió de formato, pasando de ser un boletín informativo sobre nuestra sociedad a un boletín científico, donde poner de relieve hitos científicos relevantes y compartir la ciencia que estamos haciendo en la comunidad española. Sin duda, es apasionante ver el avance científico y tecnológico que se pone claramente de manifiesto al hacer un repaso desde los primeros boletines.

Este número 50 lo abre los primeros editores a cargo del boletín, contándonos cómo se fraguó este inicio. También tenemos el placer de contar con una actualización de los dos artículos científicos que se publicaron en la primera edición del boletín, astrometría espacial y GRBs, donde podemos apreciar el desarrollo exponencial en ambos campos científicos.

En este número se presentan los avances en el estudio de la cromosfera solar en el marco del proyecto PI2FA. Así como también el proyecto SUL4LIFE centrado en el estudio del azufre y su aparición en la Tierra como componente esencial para la aparición de vida. Ambos proyectos ganadores del programa ERC.

Contamos con el estudio de la atmósfera de una enana marrón usando datos del JWST. Nos adentramos en el enigmático Universo de bajo brillo superficial, gracias en gran medida al desarrollo de técnicas de análisis con sello español. Se describe el estado de la computación en España, así como sus retos y celebramos el 20 aniversario de la creación del Observatorio Virtual en España. También encontraréis los magníficos resultados de la tercera edición del concurso infantil de dibujo organizado por la comisión Mujer y Astronomía.

Además de estos temas, encontrarán como siempre las secciones de Ecos de (la) Sociedad, la reseña de un libro y los resúmenes de las tesis doctorales.

Muchísimas gracias a todos los que habéis hecho posible la publicación del boletín durante estas 50 ediciones.

¡Feliz solsticio!

Pepa Becerra González  
*Instituto de Astrofísica de Canarias*  
*Universidad de La Laguna*

# ALLÁ POR 1994: PRIMER BOLETÍN DE LA SEA

El 31 de mayo de 1994, hace poco más de 30 años, se publicó el **primer “Boletín Informativo”** de la Sociedad Española de Astronomía. Los autores de este pequeño artículo fuimos los editores de ese número, que os animamos a leer por su valor histórico. Recordamos perfectamente la primera reunión que tuvimos para decidir los contenidos y el formato de ese Boletín: aprovechando el paso de uno de nosotros (XB) por Madrid, una habitación de hotel fue la redacción improvisada para la primera publicación de la SEA... y así fue como arrancamos.



**Benjamín Montesinos**

Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA  
[bmm@cab.inta-csic.es](mailto:bmm@cab.inta-csic.es)

**Xavier Barcons**

European Southern Observatory (ESO)  
[xbarcons@eso.org](mailto:xbarcons@eso.org)

Algunos datos para poner en contexto los años en que comenzamos esa andadura: la SEA se creó en 1992 en una asamblea constituyente a la que asistieron 39 miembros fundadores -de los cuales solo tres eran mujeres-, faltaban dos años para que el legendario International Ultraviolet Explorer (IUE) dejara de funcionar después de 19 años en órbita -y un ordenador a bordo con solo 12 Kb de capacidad!-, tres años para el descubrimiento del primer exoplaneta, 51 Peg b, en torno a una estrella similar al Sol, cuatro para que se tuvieran evidencias sólidas de la expansión acelerada del universo, cinco para el lanzamiento del observatorio espacial XMM-Newton; entretanto el GTC era aún una entelequia, y España no era miembro de ESO.

En ese primer Boletín se anunciaba que en septiembre de 1994 se celebraría la II Asamblea Ordinaria de la SEA que tendría lugar en Alicante y que iría acompañada en paralelo de “cuatro sesiones científicas, consistentes en una o dos conferencias invitadas sobre un tema de actualidad o de gran interés y un *review* y discusión de los pósters por un especialista en el contenido de cada sesión” (entrecorrimos aquí y en adelante los textos literales del Boletín). Los temas elegidos para las sesiones científicas fueron el “telescopio español de 8 metros”, “la cosmología y astronomía extragaláctica”, “estrellas y medio interestelar”, y “sistema solar e instrumentación”. Esas sesiones compusieron formalmente la I Reunión Científica de la SEA, uno de los pilares de la Sociedad, a la que siguieron otras catorce: San Sebastián, La Laguna, Santiago, Toledo, Granada, Barcelona, Santander, Madrid, Valencia, Teruel, Bilbao, Salamanca, la virtual de 2020, y de nuevo La Laguna. En poco menos de un mes celebraremos en Granada la XVI Reunión.

Es interesante echar una ojeada en ese primer número a la sección de la Comisión de Información porque, sobre todo los más jóvenes, descubriréis en ella términos técnicos sorprendentes y arcanos para quienes prácticamente habéis nacido con un móvil en las manos, usáis cada día técnicas de inteligencia artificial y programáis en Python de forma fluida. Los medios técnicos de la época -compusimos ese primer Boletín en LaTeX- nos sorprende hasta a nosotros. En esa sección se habla de servidores *gopher*, de conexión telnet, de un protocolo *HTTP*, entonces casi embrionario, y de una aplicación llamada *Mosaic*, “un lector de hipertexto que soporta (casi)

## BOLETIN INFORMATIVO

### Contenidos

- Presentación
- Informes de las Comisiones
- II Asamblea Ordinaria de la SEA
- Anuncios de Congresos
- Propuestas de observación para ISO
- Solicitudes de adhesión de nuevos miembros
- Fechas límite para solicitud de tiempos de observación

Los proyectos de la Comisión de Información respecto al acceso a información vía **internet** no acaban aquí. De hecho, se pretenden instalar en la futura máquina de la SEA servidores **gopher** y **HTTP** – además del ya existente servidor de **ftp** anónimo. Estos dos protocolos permiten un acceso mucho más ágil a los datos y abren las puertas a la gran red de información global existente en **internet**. Si estás interesado en las posibilidades de estos sistemas puedes conectarte, por ejemplo, al servidor **gopher** de la Universidad de Valencia mediante los comandos:

```
telnet gopher.uv.es  
login: gopher (sin password)
```

Respecto al protocolo **HTTP** (Hiper Text Transfer Protocol), por el momento la Comisión ha centrado su trabajo en **Mosaic**. Este programa es un lector de hipertexto que soporta (casi) todos los protocolos de acceso a la información de **internet**: **mail**, **telnet**, **ftp**, **gopher**, **HTTP**, **news**, etc. Con él pueden visualizarse documentos en hipertexto (texto+imágenes+sonido), acceder a servidores **gopher** y una amplia gama de posibilidades. Existen versiones de este programa para un gran número de plataformas: UNIX con X-Windows, PC con MS-Windows, Macintosh, NeXt, etc. En el **ftp** anónimo de la SEA puede encontrarse un paquete de instalación de **Mosaic** para plataformas UNIX con X-Windows, así como varios programas complementarios necesarios para la instalación con plenas prestaciones de **Mosaic**. Estos programas se encuentran en el directorio

```
/pub/Software
```

### Dos recortes del primer boletín de la Sociedad Española de Astronomía.

todos los protocolos de acceso a la información de internet: mail, telnet, ftp, gopher, HTTP, news, etc. Con él pueden visualizarse documentos en hipertexto (texto+imágenes+sonido) y una amplia gama de posibilidades”. En el primer párrafo de este artículo mencionábamos el valor histórico de ese primer modesto Boletín, pero visto en perspectiva casi podríamos hablar de su valor prehistórico.

El Boletín ha pasado por dos épocas distintas, como podréis comprobar en los [PDFs que están disponibles en la página web de la SEA](#). La primera etapa contó con ocho números, ahora identificados con números romanos del I al VIII. [En el III](#) se unió Xavier Luri al equipo editorial y apareció por primera vez el logo de la SEA en su portada, y [en el VII](#) Ignasi Ribas se unió para formar un cuarteto de editores. El número de [noviembre de 1998](#), con un nuevo formato y más contenidos, se renumeró como “Volumen 1, Número 1”. La idea original al etiquetar ese Boletín con “Volumen 1” era recopilar los artículos científicos que iniciamos en ese ejemplar de manera similar a las publicaciones “serias”, agrupándolos después en un volumen cada cierto número de ellos... la realidad es que esto nunca sucedió.

El [Boletín 21](#) fue un especial dedicado en gran parte al Año Internacional de la Astronomía 2009; como curiosidad, aparece en la portada el anuncio de una propuesta de votación para el nuevo logo de la SEA;

en la página 1 se ofrecieron tres versiones, y fue la segunda, en azul y blanco, la elegida y que aún hoy usamos. En esa misma página se anunció que por fin la SEA inauguraba una página web con el dominio [www.sea-astronomia.es](http://www.sea-astronomia.es) y se puso en funcionamiento SEAMOS. Ese paso fue fundamental para la organización de toda la información que la SEA deseaba poner a disposición de la comunidad y para la propia cohesión de nuestro colectivo.

El Boletín dio otro paso cuantitativo y cualitativo a partir del [número 24](#), editado en la primavera de 2011, a todo color, con una maquetación más moderna y atractiva, y dejó de imprimirse en papel... y aquí estamos, celebrando el Boletín número 50 contando solo los publicados en la segunda época.

Durante estos años los equipos editoriales que han llevado el Boletín a su versión actual han sido cambiantes, amplios y diversos. Eso ha hecho muy visible que es la SEA en toda su amplitud quien ostenta la propiedad de este Boletín. En todos los números se incluye la composición de los equipos editoriales, cada vez más numerosos para proporcionar a los Boletines más contenidos. Permittednos, como editores de los primeros números, que agradezcamos a todas las personas que han colaborado y colaboran en la elaboración de este instrumento de comunicación de la SEA; y los mejores deseos de éxito para aquellas que vayan tomando el relevo en el futuro.

# ASTROMETRÍA ESPACIAL: HIPPARCOS, GAIA Y GAIANIR

Este próximo 25 de julio de 2024 se cumplirán diez años de operación científica del satélite *Gaia*. Con más de 250.000 millones de tránsitos a través del plano focal y una extensión de la misión que prácticamente ha doblado los cinco años de la misión nominal, contabilizamos ya más de 10.000 artículos publicados con datos de *Gaia*. Ello nos hace vislumbrar “la revolución *Gaia*”, una revolución que nos está desvelando una evolución de la Vía Láctea mucho más compleja –cómo no– de la esperada.



Claus Fabricius  
[claus@icc.ub.edu](mailto:claus@icc.ub.edu)

Francesca Figueras  
[cesca@fqa.ub.edu](mailto:cesca@fqa.ub.edu)

Carme Jordi  
[carme@fqa.ub.edu](mailto:carme@fqa.ub.edu)

Xavier Luri  
[xluri@fqa.ub.edu](mailto:xluri@fqa.ub.edu)

En representación del equipo *Gaia*-Barcelona  
(ICCUB-IEEC)

Nuestro equipo *Gaia*-Barcelona lleva involucrado en la misión alrededor de 25 años, 25 años que coinciden con los 25 años del Boletín que hoy celebramos. Durante este periodo han sido varios los artículos que el Boletín ha dedicado a *Gaia*. A título de ejemplo citamos los núm. 29, “*Gaia* empieza su andadura”, núm. 35, “El primer mapa de la Galaxia publicado por *Gaia*” y varios artículos en los números 43 (eDR3) y 47 (DR3). Una mención específica merece el artículo que publicó Jordi Torra en 2013. En él citaba a *Gaia* como “una máquina de descubrimientos”. Repetimos aquí una de sus frases: “*El satélite es el máximo exponente de una tecnología que ha colocado a Europa como líder absoluto en el campo de la astrometría desde el espacio*”. Con este artículo que hoy tenéis en las manos deseamos convenceros de que éste es ya el sueño de muchos hecho realidad.

## 1. PASADO, PRESENTE Y FUTURO DE LA ASTROMETRÍA EN EL ESPACIO

A mediados del siglo XX, la astrometría óptica desde tierra seguía un proceso de evolución muy lento, dominado por círculos meridianos visuales y cartografiados fotográficos. Estas técnicas, aplicadas a unos centenares de miles de estrellas, resultaban en errores en movimiento propio de unos 5-10 milisegundos de arco (mas) por año. En cuanto a paralajes, el catálogo general de 1995 contenía solo 8112 estrellas cuyos errores difícilmente estaban por debajo de los 4 mas. Fue en 1966 cuando Pierre Lacroute, del Observatorio de Estrasburgo, propuso al CNRS francés una misión astrométrica espacial para determinar con precisión las coordenadas de 700 estrellas. En los años siguientes, la idea de una misión astrométrica desde el espacio fue ganando fuerza resultando en una propuesta a ESA de una misión llamada *Hipparcos* que perseguía la determinación de los parámetros astrométricos fundamentales (posición, paralaje y movimiento propio) a nivel de 2 mas para unas 100.000 estrellas. En una decisión muy ajustada, *Hipparcos* fue aprobada por la ESA en 1980.

El impacto que pudiera tener una misión astrométrica desde el espacio no era nada evidente en ese momento. Fue en ese año cuando jóvenes astrónomos de la comunidad española (Jordi Torra y Jorge Núñez), a propuesta de la Dra. Assumpció Català, empezaron a participar en los consorcios de compilación del catálogo de entrada y de reducción de datos. En la



compleja tarea de definir la lista de objetos a observar participaron los equipos de la Universitat de Barcelona y del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando. *Hipparcos*, operando en el periodo 1989-1993, observó 118.000 estrellas y acumuló un total de 100 GB de datos (1000 kg de cinta magnética). La tarea de analizar esta “ingente” cantidad de datos fue la más compleja jamás llevada a cabo en astronomía hasta entonces. En 1997 se publicó el catálogo *Hipparcos* y a él nos referimos en el artículo publicado en el primer boletín de la SEA. En la Tabla 1 mostramos la evolución de la astrometría desde el espacio desde *Hipparcos* a *Gaia*, una misión que, con un nuevo desarrollo tecnológico, lleva acumulados más de 130 TB de datos de una precisión sin precedentes.

*Gaia* da un salto tecnológico sustituyendo el sistema fotoeléctrico usado en *Hipparcos* por los detectores CCD y el modo TDI (boletín SEA No. 29, pág. 11). La misión alcanza una precisión sin precedentes tras un intrincado y complejo tratamiento de las observaciones en bruto. Fue tal la complejidad prevista en las fases de estudio de la misión que, antes de su aprobación definitiva, ESA requirió un complejo estudio de viabilidad del procesado. Para ello se elaboró un prototipo *Gaia Data Access and Analysis Study* (GDAAS) alimentado por datos simulados, todo ello liderado por nuestro equipo *Gaia-Barcelona* (2000-2004). En 2006 ESA aprobó el *Data Processing and Analysis Consortium* (DPAC), actualmente formado por más de 450 científicos e ingenieros, mayoritariamente europeos. La participación española en este consorcio supera el 15% (boletín SEA núm. 43). Las responsabilidades de DPAC-España son, por una parte, el tratamiento inicial de los datos de telemetría que alimentan las cadenas de astrometría, fotometría y espectroscopía y el procesado de los datos intermedios en *Mare Nostrum*. También son responsabilidad de DPAC-España, entre otros, el diseño de modelos de calibración fotométricos y espectroscópicos (boletín SEA núm. 47), el desarrollo de diversos algoritmos de parametrización física de estrellas, galaxias y cuásares, y aspectos críticos de la confección del archivo de datos como es la ingente tarea de validación de estos. Este trabajo converge hacia la compleja, a la vez que grata, tarea de explotación científica de *Gaia*. Nuestra Red Española para la Explotación Científica, fundada en 2010, cuenta en la actualidad con más de 200 miembros estableciendo sinergias, compartiendo conocimiento y consolidando equipos de investigación.

Tabla 1 Un siglo de astrometría absoluta global desde el espacio (1950 - 2050)

**HIPPARCOS:**

1950's astrometría fotoeléctrica, principios básicos, Lacroute, padre astrometría desde espacio
1976: ESA aprueba la fase de estudio
1980: ESA aprueba la misión y equipos españoles empiezan a colaborar
1989-1993: periodo de adquisición de datos
1997: publicación datos catálogos <i>Hipparcos</i> y <i>Tycho</i>

**Gaia:**

1992: definición de los principios básicos (CCDs y TDI)
1997: España en <i>Gaia</i> , primeros proyectos al MICIN (J. Torra, GDASS 2002-2006)
2000: ESA aprueba la misión
2010: nace la Red Española de Explotación Científica de <i>Gaia</i> (REG)
2014-2025: periodo de adquisición de datos
2016: publicación DR1 - TGAS ( <i>Tycho-Gaia</i> Astrometric Solution)
2018-2023: DR2 (2018), eDR3 (2020), DR3 (2022), FPRs (2023)
2025-2030: prevista la publicación de DR4 y DR5

**GaiaNIR:**

2013: primeros diseños, detectores en IR
2017: ESA aprueba un estudio tecnológico de la opción IR
2019: se publica el libro blanco de la misión
2023-2024: estudios de viabilidad modo TDI en IR
2030 (estimado): ESA adopta la misión
2045 (estimado): lanzamiento e inicio de las operaciones

**2. Gaia: GRANDES RETOS, GRANDES LOGROS Y GRANDES DESCUBRIMIENTOS**

Estos casi diez años de operación están siendo años llenos de logros tecnológicos y científicos (ver boletines SEA núm. 43 y 47). La comunidad astronómica, profesionales y amateurs, está usando, analizando e interpretando datos de una calidad sin precedentes. En la Figura 1 mostramos algunos ejemplos de esta “revolución *Gaia*”. Los datos publicados hasta la fecha – solo 34 de los casi 120 meses de operación con éxito – inciden en muchos campos de la astrofísica, desde el sistema solar a la física extragaláctica, pasando, cómo no, por el objetivo principal de la misión, el estudio de la composición, formación y evolución de nuestra galaxia. En la Figura 2 mostramos, a título de ejemplo, algunas de las líneas de investigación en las que estamos trabajando en el seno de nuestro equipo *Gaia*-Barcelona. Estas son solo un ejemplo de los importantes resultados que está aportando la comunidad, un porcentaje significativo de los cuales está siendo liderado por equipos españoles pertenecientes a la Red Española de Explotación Científica de *Gaia*. Como no puede ser de otra forma, nuestra próxima reunión científica en

«El satélite es el máximo exponente de una tecnología que ha colocado a Europa como líder absoluto en el campo de la astrometría desde el espacio.»

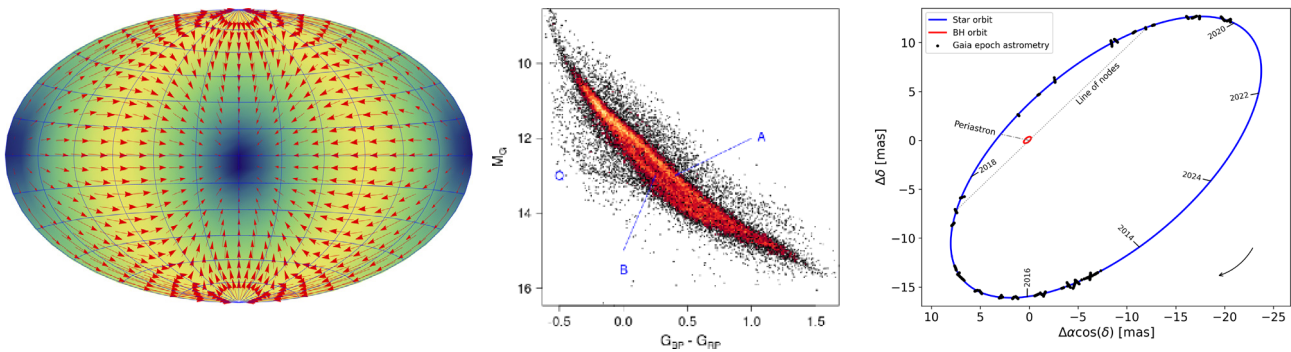


Figura 1. Izquierda: El patrón de la variación de los movimientos propios de los cuásares ha permitido cuantificar, por primera vez usando datos de *Gaia*, la aceleración del baricentro del sistema solar con respecto al sistema de referencia en reposo del Universo (*Gaia* Collaboration, 2021, A&A 649, A9). Centro: La doble secuencia de las enanas blancas en el diagrama Hertzsprung-Russell (*Gaia* Collaboration, 2018, A&A 616, A10), nunca antes vista, sigue planteando grandes retos (ej. Camisassa et al., 2024, A&A 683, A101). Derecha: la órbita que ha permitido detectar el primer agujero negro estelar de 30 masas solares, un tipo de objeto que hasta la fecha ha sido detectado solo en galaxias distantes y mediante ondas gravitacionales (*Gaia* Collaboration, 2024, A&A letters, en prensa), ha abierto un importante debate en la comunidad estelar. Créditos: ESA/*Gaia*/DPAC.

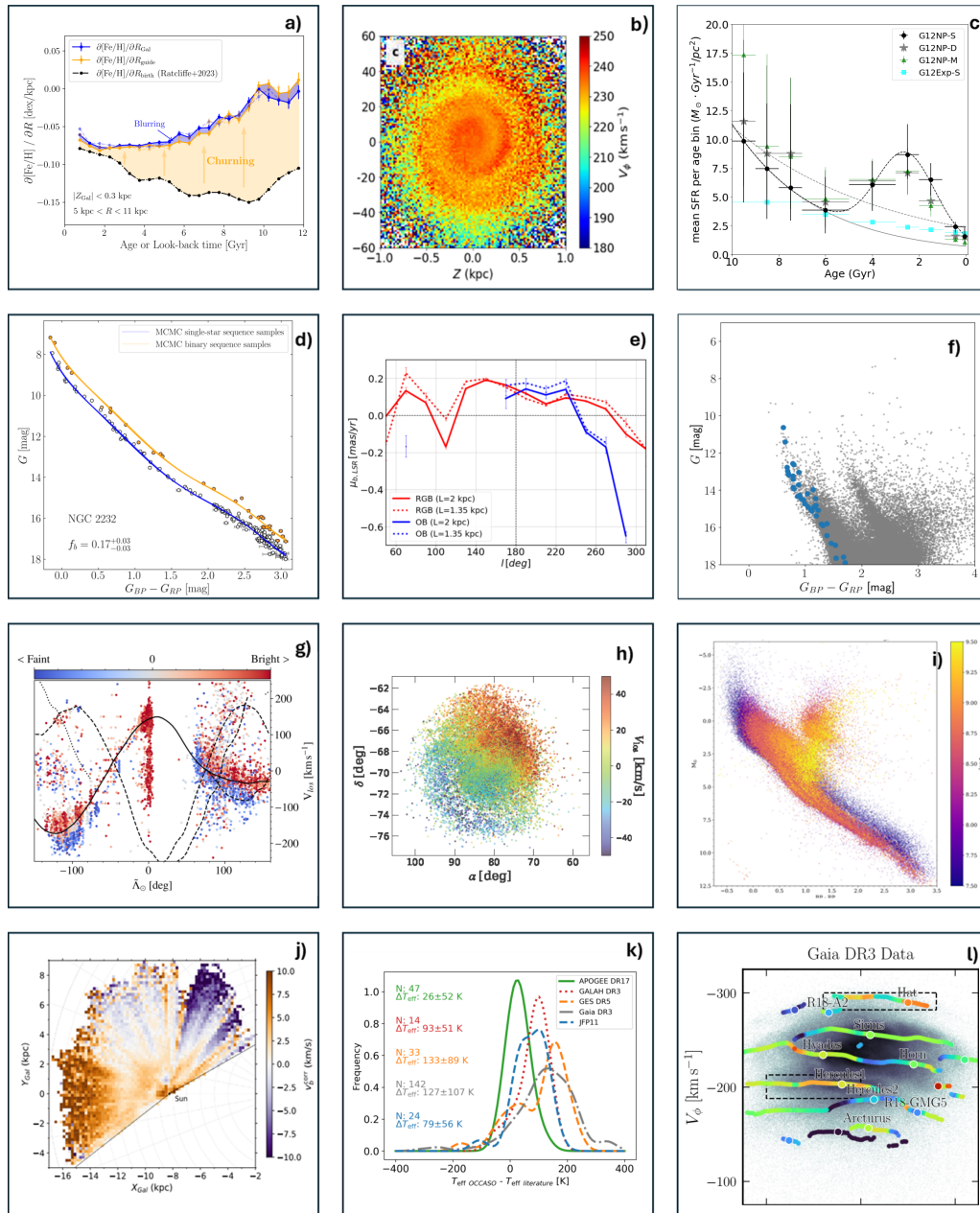


Figura 2. Publicaciones científicas lideradas por miembros del equipo *Gaia*-Barcelona en el periodo 2018-2024. De ellas se derivan resultados como: a) hemos podido cuantificar como la evolución del gradiente radial de metalicidad en disco de la Vía Láctea está afectada por la migración estelar (Anders et al. 2023); b) la espiral en el espacio de fases vertical nos muestra un disco estelar de la Vía Láctea fuera del equilibrio dinámico (Antoja et al. 2018); c) los datos revelan la existencia de un brote de formación estelar en el disco ocurrido hace 2-3 Ga (Mor et al. 2019); d) más de 200 cúmulos estelares abiertos nos permiten cuantificar cuán compleja es y de que parámetros depende la fracción de multiplicidad estelar (Donada et al. 2023); e) el estudio del movimiento vertical de la componente estelar en el alabeo no revela diferencias significativas entre poblaciones estelares (Romero-Gómez et al. 2019); f) el tratamiento de datos de eDR3 en un entorno de “big data” nos ha permitido aumentar significativamente la detección y caracterización de un número significativo de nuevos cúmulos abiertos (Castro-Ginard et al. 2022); g) La subestructura químico-cinématica de la corriente estelar de Sagitario apunta a un posible progenitor con disco estelar como origen de la bifurcación observada (Ramos et al. 2022); h) los mapas de velocidad en la Gran Nube de Magallanes posibilitan las primeras determinaciones del patrón de rotación de la barra central (Jiménez-Arranz et al. 2024); i) los 1867 cúmulos abiertos de DR2 trazan un diagrama Hertzsprung-Russell codificado por colores según la edad (Cantat-Gaudin et al. 2020); j) observamos irregularidades muy significativas en la cinemática vertical de las estrellas A de edad intermedia (Ardèvol et al. 2023); k) la alta resolución del cartografiado espectroscópico OCCASO nos está aportando un detallado estudio de temperaturas y abundancias químicas (Carbajo et al. 2024 y l) el subespacio cinemático a grandes distancias en el disco y la variación de los gradientes de velocidad revelan una estructura dinámica más compleja de la esperada (Bernet et al. 2024).

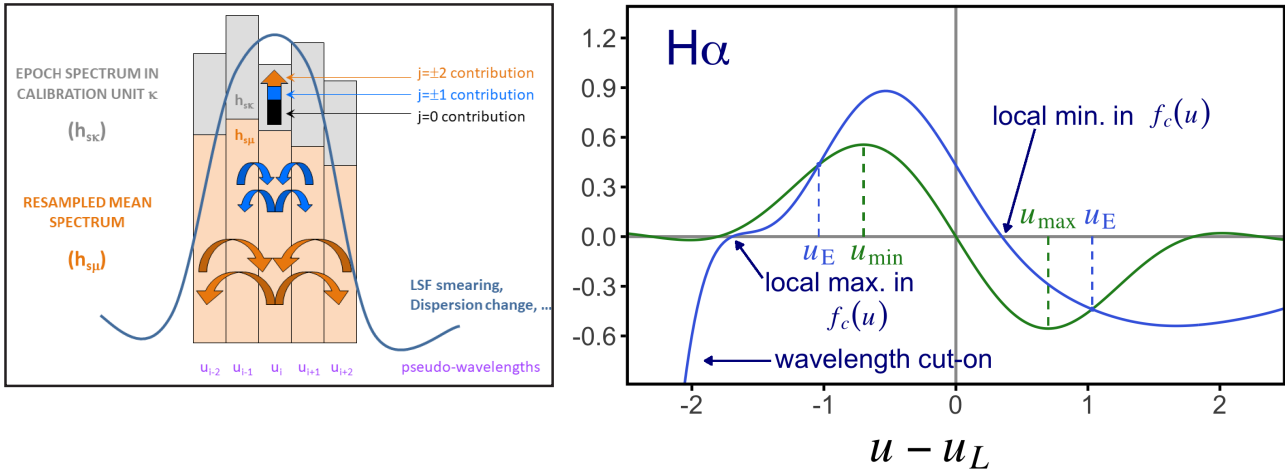


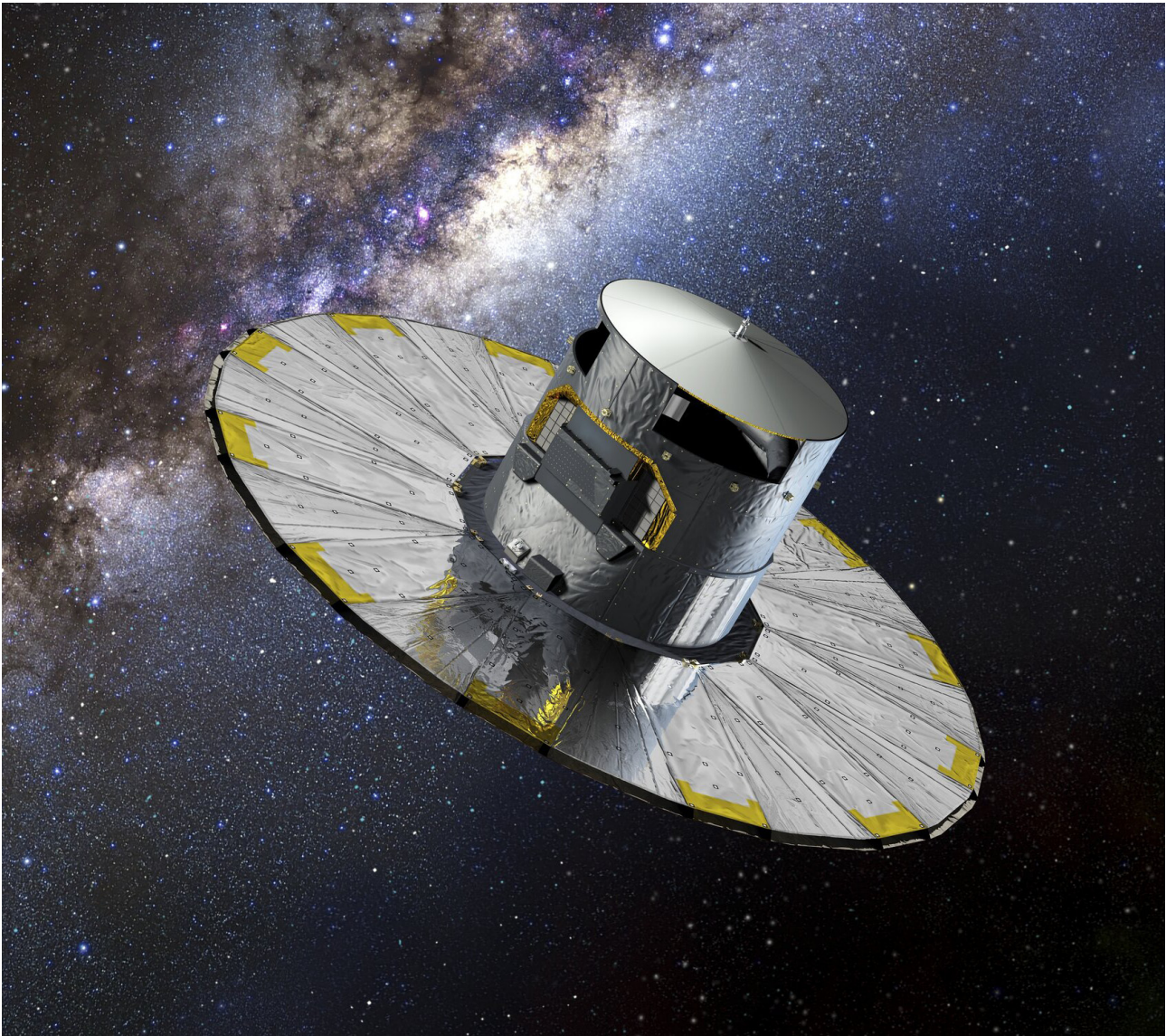
Figura 3. Izquierda: El procesado de los espectros BP/RP de *Gaia* DR3 incluye la variación de la LSF y la dispersión en el plano focal y con el tiempo (Carrasco et al., 2018). Derecha: Los espectros BP/RP se expresan como una combinación lineal de funciones Hermite, lo que permite nuevos métodos para el estudio de líneas de absorción y emisión (Weiler et al., 2023).

Granada (SEA-2024) será una excelente plataforma donde mostrar estos avances junto con los muchos retos a resolver, retos que conllevan, entre otros, el desarrollo de nuevos modelos teóricos en física estelar, galáctica y extragaláctica. Los debates sobre la propia existencia de la materia oscura a los que ahora estamos asistiendo con pasión en el seno de la comunidad de usuarios *Gaia* son solo la punta del iceberg de lo que nos deparan los datos de DR4 y DR5 sobre los que estamos trabajando (ver Tabla 1). Los desafíos con los que nos enfrentamos son varios y complejos. Nuestro equipo, con más de 25 años de participación en la misión *Gaia*, sigue al frente de aspectos críticos de la misión como son el procesado de datos, la fotometría y los espectros BP/RP (ver Figura 3). También lideramos diversos paquetes de validación y del archivo de datos para DR4 y DR5. La acumulación de observaciones con la consiguiente mejora de las precisiones de los datos revela con más claridad efectos sistemáticos que vamos reduciendo a cada catálogo publicado. El próximo catálogo (DR4, no antes de fin de 2025) con 66 meses de misión y el catálogo final (DR5, no antes de fin de 2030) con 10 años de datos, son un reto de primera magnitud. DPAC está trabajando intensamente para que este aumento significativo en la precisión astrométrica y fotométrica sea una realidad.

### 3. PRÓXIMO RETO: ASTROMETRÍA sub- $\mu$ s EN EL INFRARROJO

Las posiciones, los movimientos propios, las paralajes y, de aquí, el sistema de referencia de *Gaia*, son los más precisos de la historia. Pero esta precisión se degrada con el tiempo por la propagación de las incertidumbres en los movimientos propios. No cabe duda, pues, que es necesaria otra misión astrométrica 20-30 años después de *Gaia*, no solo para mantener la calidad del sistema de referencia sino también alcanzar precisiones aún mejores en combinación con los datos actuales. Podemos solo vislumbrar, a nivel de ejemplo, lo que esto supondrá en diversos campos, como por ejemplo en el estudio de las galaxias del Grupo Local. Si además desplazamos las observaciones del visible al IR cercano abriremos la ventana a las regiones más oscurecidas por el polvo, regiones de formación estelar, bulbo y barra galáctica. También a la física de objetos fríos y ultrafríos: enanas marrones, planetas, enanas blancas frías, campos de la astrofísica actualmente fuera del alcance de *Gaia*.

Por todo ello y basándonos en los mismos principios (cielo completo, astrometría espacial), el diseño de la misión *Gaia*NIR comenzó su andadura en 2016 (Hobbs et al, 2016, arXiv:1609.07325v2). Su libro blanco se presentó en 2019 a la llamada Voyage



Representación artística de la misión *Gaia* situada en el punto L2 de Lagrange del sistema Sol-Tierra. Créditos: ESA–D. Ducros, 2013.

2050 de ESA (Hobbs et al, 2021, EA 51, 783). ESA identificó el estudio del ecosistema galáctico con astrometría en el IR cercano como uno de los potenciales temas científicos de alta prioridad. La hoja de ruta para la futura astrometría sub- $\mu$ s en Europa está en marcha y los descubrimientos que se avecinan con los actuales y futuros datos de *Gaia* darán mucho de qué hablar en las próximas décadas.

#### **AGRADECIMIENTOS**

La competente, eficaz y coordinada contribución de la Agencia Europea del Espacio (ESA), de la industria europea, del consorcio DPAC y, como no, de la comunidad científica, han hecho realidad la astrometría de precisión del siglo XXI. Debemos destacar, en este empeño, la importante participación de la comunidad española en todos y cada uno de estos frentes.

Los estallidos de rayos-gamma (GRBs) fueron descubiertos en 1967 y hoy sabemos que los de larga duración ( $\geq 2$  s) por lo general están producidos por colapsos de estrellas masivas dando lugar a agujeros negros recién nacidos en remotas galaxias a un ritmo de uno por día en nuestro Universo (por término medio) mientras que los de corta duración ( $< 2$  s) se originan en fusiones de estrellas binarias de neutrones, liberándose energías del orden de  $10^{51}$  erg en el caso de los primeros y algo menor y formándose lantánidos en el caso de los segundos. Todos estos avances se detallan en la presente contribución, justo veinticinco años tras la que abría el primer Boletín de la SEA allá por noviembre de 1998 [1], cuando reportábamos la detección de las primeras contrapartidas electromagnéticas gracias al descubrimiento por el satélite *BeppoSAX* de las postluminiscencias en rayos-X (que propició la detección posterior de la misma en óptico y en radio) y la determinación de la escala de distancia cosmológica para los GRBs, con los primeros corrimientos al rojo en torno a  $z = 1$ .



Alberto J. Castro-Tirado

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) / Universidad de Málaga  
[ajct@iaa.es](mailto:ajct@iaa.es) / [@AJCastroTirado](https://twitter.com/AJCastroTirado)

La física de los GRBs ha avanzado mucho desde entonces y de hecho me atrevo, sin ánimo de ser exhaustivo, a dar las siguientes pinceladas de los hitos observacionales más relevantes acaecidos en el campo desde entonces.

## PRINCIPALES HITOS OBSERVACIONALES EN EL CAMPO DE LOS GRBs ENTRE 1998 Y 2024

- 1999. La emisión de los GRBs es colimada con lo que la energía total liberada pasa de  $E \sim 10^{52}$ - $10^{54}$  erg (considerando emisión isotropa) a ser  $E \sim 10^{51}$  erg [2,3]. En este año también se anunció la primera detección de emisión óptica simultánea a un GRB [4].
- 2003. La relación entre las supernovas (SNe) altamente energéticas (en especial las SN I c) con los GRBs de larga duración [5,6] confirmando los indicios (cinco años antes) de la relación entre SN1998bw y un GRB de baja luminosidad en una galaxia cercana. Ese mismo año también se reporta la detección de variabilidad en la polarización de la postluminiscencia óptica, para el mismo GRB [7].
- 2005. La detección de las primeras contrapartidas electromagnéticas de los GRBs de corta duración tanto en rayos X [8,9] como en el óptico [10,11]. En este año también se reporta la detección del primer GRB a alto corrimiento al rojo, por encima de  $z = 6$  [12,13].
- 2006. Un GRB de baja energía (a modo de destello de rayos X) asociado a una SN [14,15]. En este año también se publica la no existencia de la esperada SN asociada a un GRB de larga duración cercano [16,17] así como la primera detección de polarización óptica en la emisión temprana de un GRB [18].
- 2008. La detección de un GRB cuya postluminiscencia óptica llegó a ser visible a simple vista por unos segundos [19].
- 2009. Detección de un GRB con corrimiento al rojo de 8,1 [20,21].
- 2012. Asociación de la SN subyacente de un GRB ultra largo ( $10^4$  s) con una magnetar [22]. En este año también se reporta la primera detección de polarización circular en la postluminiscencia óptica de un GRB [23].
- 2013. Uno de los GRBs más brillantes registrados hasta la fecha [24] y primera detección de una kilonova en un GRB, distinto del anterior [25].

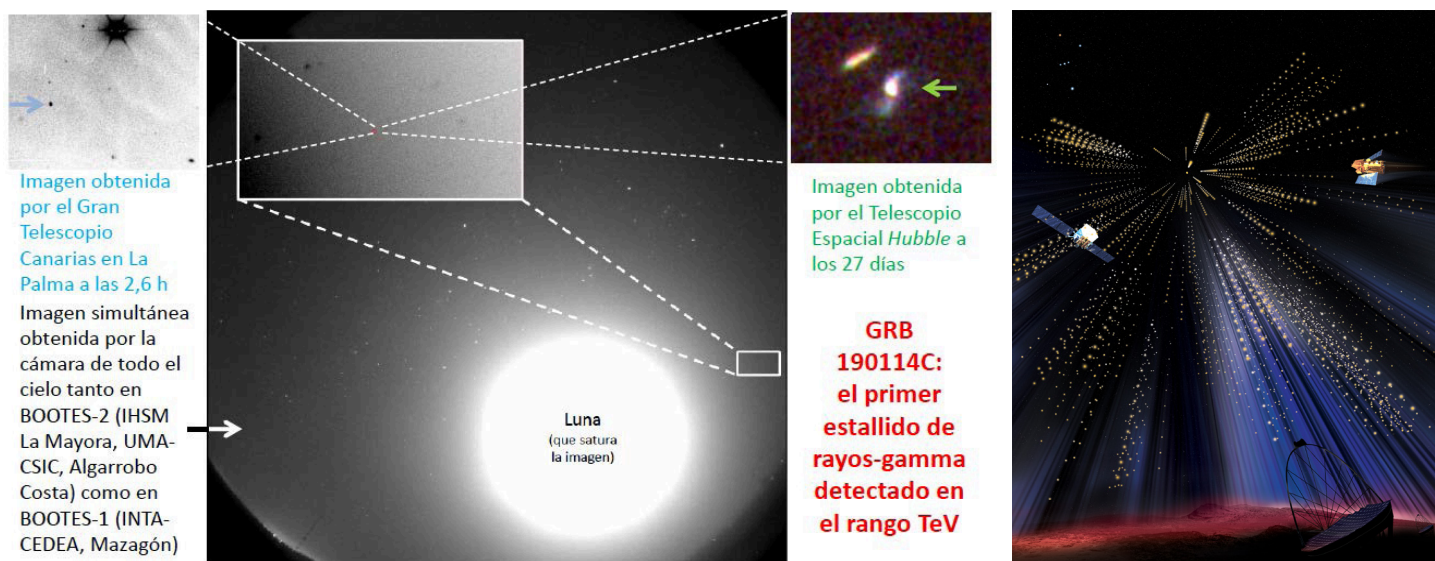


Figura 1. La primera detección de un GRB en el rango TEV, por parte de MAGIC. Elaboración propia (izda.) y A. Simonnet (dcha.).

- 2017. Detección de un GRB débil y de corta duración sólo 2 segundos tras la llegada de la correspondiente onda gravitacional a la Tierra (modelada por la colaboración LIGO como la fusión en un sistema binario de dos estrellas de neutrones) y la kilonova asociada [26,27]
- 2018. Evidencia de la afloración del chorro como consecuencia del colapso del progenitor de un GRB antes de detectarse la SN de larga duración asociada al mismo [28].
- 2019. Primera detección de un GRB en el rango de los TeV [29] (Figura 1). En este año también se presentan evidencias de magnetares como resultado final (en algunos casos) de la fusión de sistemas de estrellas binarios [30].
- 2021. Detección de una kilonova asociada a un GRB de larga duración, implicando la existencia de GRBs de duración  $>2s$  en una subclase de fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones [31,32].
- 2022. La detección del GRB más intenso hasta la fecha, con la primera detección de uno por encima de 10 TeV [33,34].
- 2023. Detección de una kilonova asociada a un GRB de larga duración con evidencias de producción de lantánidos [35].

## IMPLICACIÓN EN LA COMPRESIÓN DE LOS GRBS Y LOS AVANCES TEÓRICOS

Entonces, ¿qué sabemos a estas alturas, veinticinco años después?

De entrada, el número de GRBs con postluminiscencias ha sobrepasado ya los 1700, con  $\sim 450$  corrimientos al rojo ya medidos [36] y un valor medio de  $z \sim 2.5$  [37]. Centrándonos en nuestro país, investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) han usado los observatorios españoles (en particular los telescopios de 1,5m de Sierra Nevada, 2.2m de Calar Alto, y el Gran Telescopio Canarias) para contribuir en muchas de estas detecciones y determinación de corrimientos al rojo, dando lugar resultados muy notables, complementados por las detecciones tempranas (pocos segundos tras recibir la alerta de GRB) de la Red Global BOOTES de Telescopios Robóticos, la primera desplegada por país alguno en los cinco continentes [38,39]. Como anécdota<sup>1</sup>, las primeras observaciones de GRB en modo de oportunidad se iniciaron en 1997 en todos los observatorios españoles (cuando los programas de oportunidad en cualquier campo científico eran inexistentes) y el primer resultado científico del GTC en cualquier campo, fue para un GRB ocurrido

durante la fase de comisión en 2009 [40]. Como se ha comentado, con MAGIC (colaboración donde se enmarcan varios grupos de investigación españoles) se registró en 2019 el primer GRB en el rango TeV. También se ha avanzado mucho tanto en la comprensión teórica de los chorros, como en los progenitores de los GRBs de mayor duración, gracias en estos dos últimos casos a los trabajos realizados desde hace años en la Universidad de Valencia (ver [41, 42] a modo de ejemplo).

Desgranamos en los siguientes epígrafes, y de manera muy somera, el estado actual de la cuestión.

**Progenitores: (¿Supernova o no supernova? / ¿Kilonova?)**

La clasificación convencional de GRBs entre los ahora llamado de tipo I (largos, debido a colapso de estrellas masivas pobres en metales, ‘*collapsars*’) y los de tipo II (cortos, originados en fusiones de sistemas binarios de estrellas de neutrones (NS-NS) sigue teniendo vigencia [43,44], pero ya sabemos de varios casos (reflejados anteriormente) que no cumplen esta dicotomía. Aparte, la existencia de varios GRBs de extremadamente larga duración ( $> 10^3$  s) apunta a que otra clase de progenitores están involucrados.

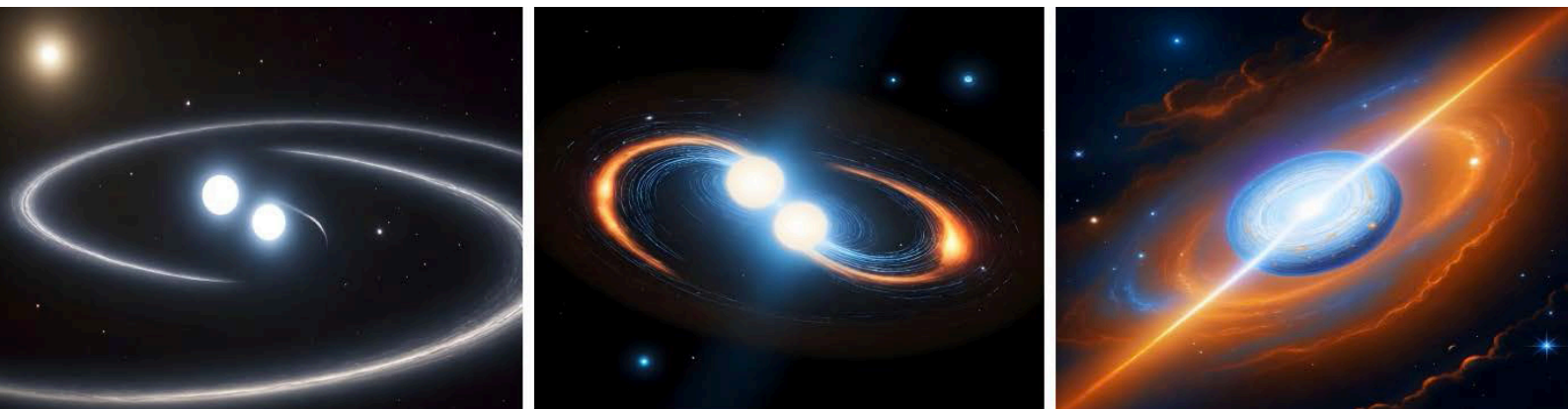
La clave para la determinación unívoca y sin duda alguna de un progenitor masivo en el caso de GRBs de tipo I es la existencia de una SN que se puede inferir, bien como un exceso en la curva de luz de la

postluminiscencia óptica, con el máximo aproximadamente un mes tras el estallido (que son las SNe más débiles que se podrían llegar a observar con sensibilidad suficiente hasta  $z \sim 1$ ) o bien, de manera espectroscópica (limitada en este caso forzosamente a valores de  $z < 0.5$ ), aunque para ello se necesite una alta relación señal-ruido. En estos casos, para mejor caracterizar la SN, los espectros de la misma obtenidos (tras sustraerle el la contribución de la galaxia subyacente), se comparan con SN1998bw, que fue la primera asociada con un GRB de larga duración, siendo además la más cercana de todas las SNe asociadas a GRBs detectadas hasta la fecha.

Y en aquellos casos en los GRBs de tipo I en los que hay evidencias en la postluminiscencia de una fase de emisión continuada en forma de meseta (*‘plateau’*), ésta se explica como una inyección de energía continuada y evidencia de haberse formado un magnetar [45] en vez de un agujero negro, siendo también estos objetos producidos en las fusiones de sistema binarios de estrellas de neutrones.

¿Y en el caso de los de tipo II? La existencia de una kilonova es la prueba evidente de la fusión de un sistema binario de estrella de neutrones (Figura 2), tras la primera detección en GRB 130603B y el hallazgo de la kilonova en la contrapartida electromagnética de la onda gravitacional GW 170817A asociada a un GRB de corta duración.

Figura 2. Concepción artística de la secuencia de formación, a partir de la fusión de dos estrellas de neutrones en un sistema binario, de una kilonova asociada con un estallido de rayos gamma. / Clara & Sofía López Martín (Freepik) y Alberto J. Castro-Tirado (IAA-CSIC/UMA).





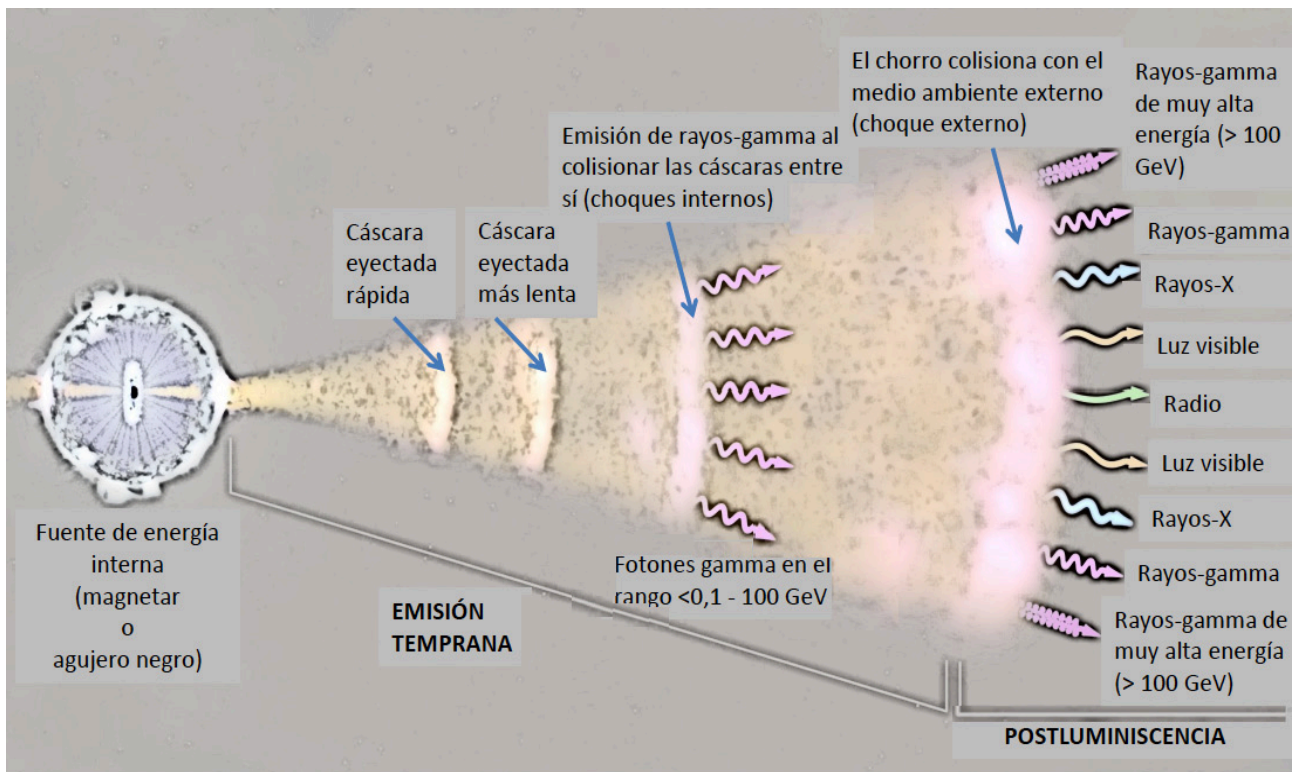


Figura 3. Concepción artística del modelo estándar de GRBs, adaptado de [58].

### Postluminiscencias

Desde el punto de vista de su interacción con el medio, la postluminiscencia (el “*afterglow*” en inglés) que se observa en todas las longitudes de onda, satisface la predicción del modelo de bola de fuego (“*fireball model*”) relativista [46], al inyectarse una cantidad de energía nada despreciable en el medio interestelar de la galaxia anfitriona (Figura 3). El proceso físico dominante es radiación sincrotrón, por parte de electrones relativistas en presencia de fuertes campos electromagnéticos ( $B \sim 10^6$  G), y originados en la eyección relativista (factores iniciales de Lorentz  $\Gamma \sim 10^2 - 10^3$ ) de material en diversas fases a lo largo de un chorro de emisión colimada en un ángulo con una abertura en el rango  $\sim 1^\circ - 10^\circ$ .

Sin embargo, estudios más recientes muestran que no todos los GRBs satisfacen las predicciones del modelo estándar, en relación tanto a la emisión temprana como a la postluminiscencia (ver por

ejemplo, [47]) como se muestra en las Figuras 4 y 5. En especial, el ajuste de las postluminiscencias no es tan bueno en las longitudes de onda de radio, cuando se hace el ajuste multifrecuencia de todos los datos. También se han observado, en  $\sim 40\%$  de las postluminiscencias de rayos X observadas por el satélite *Swift* pocos minutos tras el GRB, fulguraciones hasta  $10^4$  s más tarde, episodios a modo de flujo constante o mesetas (“*plateaus*”) que se extienden hasta  $10^4 - 10^5$  s y cambios de pendientes (“*jet breaks*”) que hacen más compleja toda la interpretación.

Aparte del modelo estándar mencionado anteriormente, existen otros modelos de emisión temprana (de choques magnéticos internos, de atmósfera magnéticamente disipativa) y el llamado ICMART (“*Internal Collision-induced Magnetic Reconnection and Turbulence*”) así como modelos híbridos resultante de los anteriores.

Figura 4. La postluminiscencia de GRB 021004, desde rayos-X hasta radio, desde 0,01 hasta 250 días tras el GRB, mostrando los 7 episodios de inyección de energía a lo largo de ese tiempo. Adaptado de [59].

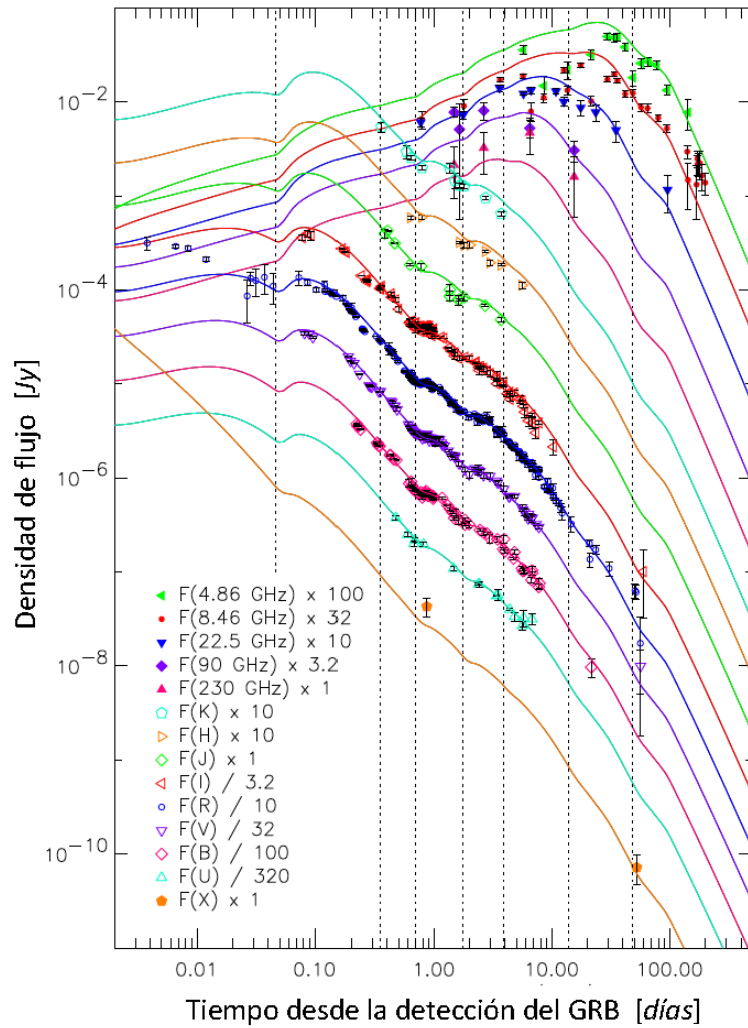
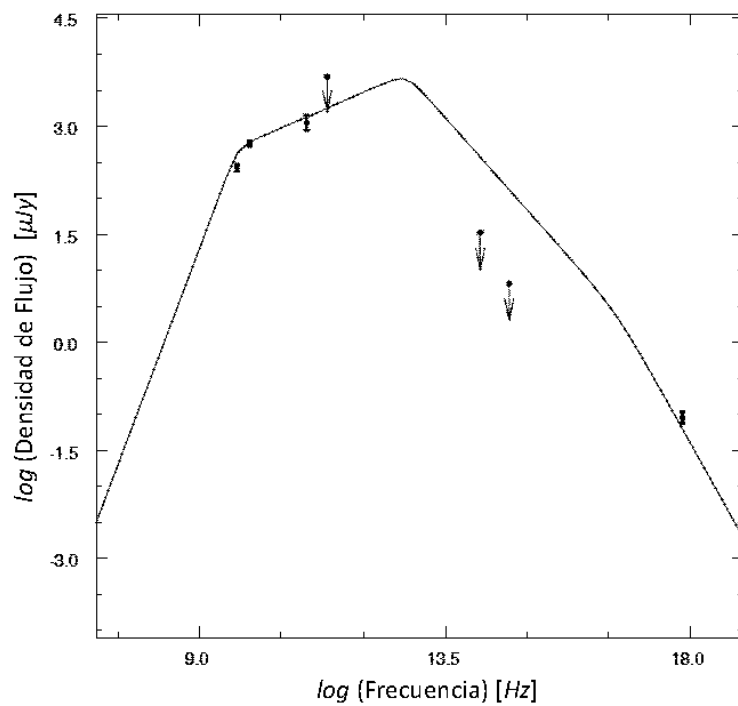


Figura 5. La distribución espectral (desde radio hasta rayos-X) de la postluminiscencia de GRB 051022 (a las 33 h tras su detección), incluyendo datos de Calar Alto con el ajuste según el modelo estándar. Adaptado de [60].



### La estructura y composición del chorro

En GRB 030329, uno de los mejor estudiados, se propuso la existencia de un doble chorro. Una primera componente (el chorro más estrecho y con un factor de Lorentz inicial más alto) que sería el responsable de la emisión gamma y una segunda componente (con un chorro más ancho) que sería el causante de la emisión de la postluminiscencia, al menos desde radio hasta el óptico [48].

Pero, ¿cómo es la geometría del chorro? La estructura del chorro depende de varios factores, tales como la presencia de un agujero negro (y de su spin) o de una estrella de neutrones, la estructura, masa y momento angular del disco de acrecimiento, la geometría e intensidad del campo magnético y de la energía transportada por los neutrinos [49].

Hay básicamente tres modelos de estructura del chorro inicial: gaussiano, de sombrero de copa (*'top-hat'*) y como ley de potencia; estructura que obviamente se modifica al interactuar con el medio. La estructura final también se ve configurada en función de ciertas variables: la naturaleza de la energía en el chorro, la magnetización del mismo o la presencia de una SN subyacente. La tipología de chorro estructurado es la que se ha invocado para explicar los GRBs más intensos, como ha sido el caso GRB 221009 [50].

En cuanto a la composición del chorro, se barajan modelos de composición bariónica enteramente o dominados por el flujo de Poynting. Aunque hay casos donde se ha observado una composición híbrida, con dos componentes, como en el referido GRB 221009A, un caso excepcional donde el ángulo de visión fue de sólo  $0.6^\circ$ .

### GALAXIAS ANFITRIONAS

La mayoría de las galaxias anfitrionas detectadas inicialmente fueron galaxias de baja metalicidad, brillantes en el UV (implicando alta formación estelar) y siendo la mayoría galaxias enanas irregulares, con masas en el rango  $10^9$ - $10^{10} M_\odot$ . Observaciones en el infrarrojo cercano realizadas de manera más continuada mostraron que  $\sim 25\%$  de las postluminiscencias de los GRB largos están

afectadas por el polvo, implicando extinciones  $A_V > 1$  (ver por ejemplo [51]). Con ello, la muestra de galaxias anfitrionas ya identificadas ha aumentado considerablemente, estando muchas ya más enriquecidas en metales (con metalicidad próxima a la solar) y siendo más masivas que la anterior muestra, con masas en el rango  $10^9$ - $10^{10} M_\odot$ . De ello se infiere que podría haber dos vías en cuanto a la formación de GRBs de larga duración y la baja metalicidad sería una de las condiciones en una de ellas. En cualquier caso, la adición de estas galaxias más masivas a la muestra de galaxias anfitrionas de GRBs implica que el sesgo para considerar a los GRBs como indicadores de formación estelar es menor, y podrían ser buenos indicadores para determinar la tasa de formación estelar a valores de  $z > 3$ .

### SONDEANDO EL MEDIO INTERESTELAR EN GALAXIAS CON FORMACIÓN ESTELAR A ALTO CORRIMIENTO AL ROJO

El GRB más lejano observado hasta la fecha tiene un corrimiento al rojo  $z \sim 9.4$  [52], y se estima que podrían incluso ser detectados hasta  $z \sim 20$  [53]. Aparte de poder sondear distantes galaxias con formación estelar, la espectroscopía de las postluminiscencias de GRBs en las horas iniciales tras la detección de los mismos, propicia el estudio del medio interestelar (ISM) en dichas galaxias de una manera sin precedentes, posibilitando de esta forma evaluar la absorción producida por el gas, los metales y el polvo, de lo que se pueden inferir las propiedades del polvo, el estado de ionización y la cinemática de los sistemas entre medias así como la composición química y la fracción de gas molecular de la galaxia anfitriona. Ver la Figura 6.

### COSMOLOGÍA CON GRBS

Debido a su luminosidad extrema, los GRBs se pueden observar hasta muy alto corrimiento al rojo, como hemos reseñado anteriormente. De manera similar a las SNe de tipo Ia, los GRBs pueden considerarse como indicadores cósmicos de distancia usando correlaciones propuestas entre distintos observables y así restringir los parámetros cosmológicos (ver por ejemplo [54]), aunque hay cierta controversia al respecto (ver por ejemplo [55]).

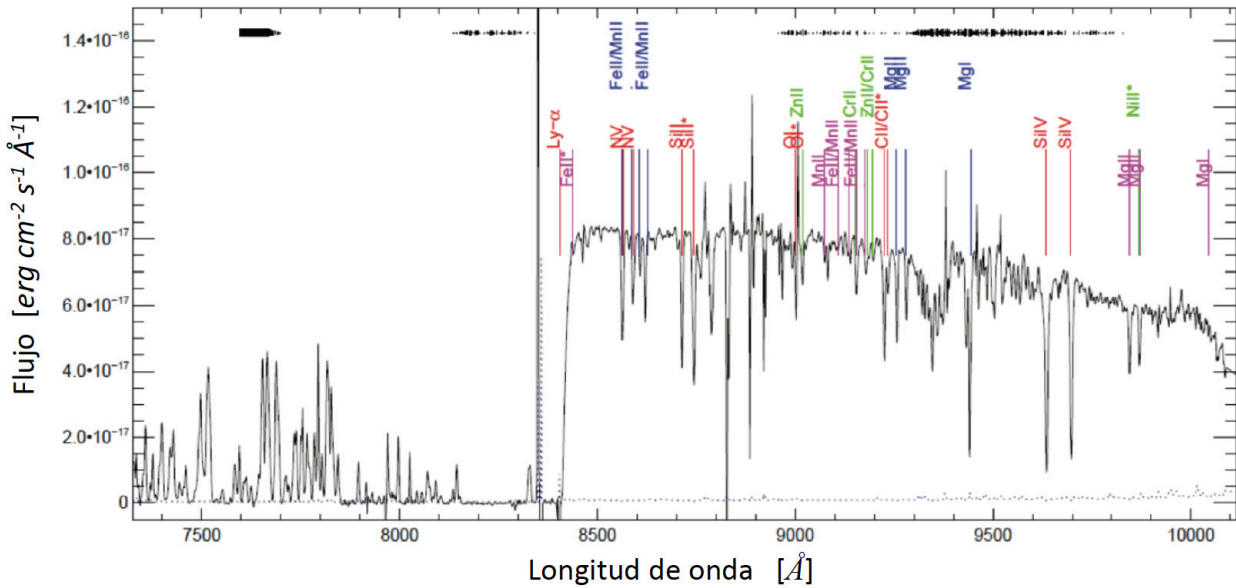


Figura 6. El espectro de absorción (tomado con OSIRIS en el GTC) de la postluminiscencia óptica de GRB 130606A indicaba un corrimiento al rojo  $z = 5,91$ , confirmando la expectativa de la distancia al haber sido descubierto tres horas antes con nuestro telescopio robótico TELMA en la estación BOOTES-2 en el IHSM/UMA-CSIC La Mayora en Algarrobo-Costa (Málaga). El soberbio espectro de GTC (sólo dos exposiciones de 1200s con R2500I) permitió también detectar varios sistemas intermedios (coloreados) y fue tomado sólo 3h tras el GRB (cuando la magnitud óptica de dicha contrapartida era de 20). Adaptado de [61].

**INTERROGANTES ADICIONALES**

Pero todavía hay muchos interrogantes que responder (ver más detalles en [56]), en relación a varios aspectos:

- Progenitores y su clasificación: estrellas masivas por un lado y fusiones de sistemas binarios por otro. ¿Algún otro tipo?, ¿cuántas clases físicamente distintas?
- Fuente energética central ('central engine') en los GRBs de tipo I: agujero negro, ¿también magnetares?
- Composición del chorro: ¿bariónica?, ¿leptónica?, ¿magnética?
- Mecanismo de disipación de energía: ¿choques?, ¿disipación magnética?
- Mecanismos de aceleración de partículas y radiación: sincrotrón, Compton inverso, cuasi-térmico. ¿Alguno más?
- Física de las postluminiscencias: interacción en el medio frente a la actividad de la fuente de energía interna en escalas largas de tiempo.

Y podríamos plantearnos interrogantes adicionales, recurrentes en el campo:

- En el caso de los GRBs de tipo I (larga duración), ¿hay diferentes progenitores?, ¿son la mayoría sistemas binarios?
- En el caso de los GRBs de tipo II (corta duración), ¿hay otros progenitores diferentes a los sistemas binarios de estrellas de neutrones? Tal vez... ¿fusiones de estrella de neutrón y agujero negro? ¿fusiones de agujero negro y enana blanca? ¿e incluso de estrella de neutrón y enana blanca?

**CONCLUSIONES**

El campo de los GRBs ha experimentado un auge espectacular en estos 25 años, con implicaciones que van desde evolución estelar astrofísica extragaláctica, culminando con el uso de los GRBs en cosmología. En particular queremos resaltar entre todos los resultados de estos 25 años la ya

mencionada detección de un GRB de corta duración asociado a la onda gravitacional GW170817 y la posterior detección de la kilonova asociada supuso la confirmación de la asociación de los GRBs de tipo II con las fusiones de estrellas de neutrones en sistemas binarios, como siempre se había sospechado.

Pero aunque se ha avanzado mucho en todo este tiempo, aún quedan muchos interrogantes, y buena prueba de ello son las dos grandes misiones espaciales lanzadas este año para seguir profundizando en este campo: *Einstein Probe* (lanzada en enero) y *SVOM*<sup>2</sup> (lanzada en junio) en sinergia con toda la batería de instrumentación multirango en tierra firme y los observatorios de ondas gravitacionales y de neutrinos en esta era de la Astrofísica de Multimensajeros.

Si la misión *THESEUS* [57] (Figura 7) con fuerte participación española, es finalmente adoptada por la ESA en 2026, la comunidad de altas energías española en particular y europea en general, se asegurará seguir teniendo un papel preponderante en este campo, toda vez que el Observatorio de rayos-gamma *INTEGRAL* de la ESA dejará de dar servicio en unos meses, después de tantos éxitos cosechados. En ese caso, el lanzamiento de *THESEUS* sería en 2037, y en clara sinergia con el resto de infraestructura en tierra y misiones espaciales previstas para entonces.

## AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros de mi equipo por su dedicación y entrega todos estos 25 años (con mención especial a Javier Gorosabel y Mariló Pérez-Ramírez, quienes nos dejaron en 2015, antes de tiempo) y también a todos aquellos colegas que nos han “sufrido” teniendo que interrumpir sus importantes observaciones para atender las nuestras, conscientes de la importancia de la necesidad de la prontitud de las mismas. Y también a los comités de asignación de tiempos, que entendieron igualmente de la importancia de los programas de oportunidad para obtener el máximo rendimiento y publicaciones de alto impacto asociadas a los observatorios ópticos respectivos, en pos de beneficiar a los grupos españoles proponentes (aunque últimamente ya no sea tanto este el caso, atendándose casi más a peticiones con mayoritaria participación extranjera en tiempo español en detrimento de los grupos de nuestro propio país).

## NOTAS

1 Historietas de esa época hay a raudales, como salir corriendo del LAEFF en Villafranca en Villafranca del Castillo (en Madrid) con lo puesto para llegar a Calar Alto al atardecer tras 7 horas de coche y entrar literalmente por la ventana –entreabierta– de la biblioteca (ya que nadie escuchaba el timbre para abrirnos la puerta) y “asaltar” al astrónomo de turno para pedirle (tras recuperarse el pobre alemán del “susto” inicial) que por favor observara cierta posición en el cielo donde horas antes había acontecido un GRB. Y explicarle primero qué era un GRB, claro. Anécdota también recogida en [62]. Y es que por entonces aún no se habían descubierto contrapartida óptica alguna y la escala de distancias seguía siendo un misterio...

2 Misión en la que España, por tan sólo 0.5 Meur pudiera haber participado con todas las garantías del resto de países del consorcio, de haberse atendido la petición del autor de esta contribución al Plan Nacional, siguiendo la invitación que se nos cursó desde Francia (donde se co-lidera la misión), para aportar una pequeña componente del hardware, y cuya patente era además de una empresa española. Sin embargo, la propuesta no alcanzó la prioridad suficiente.

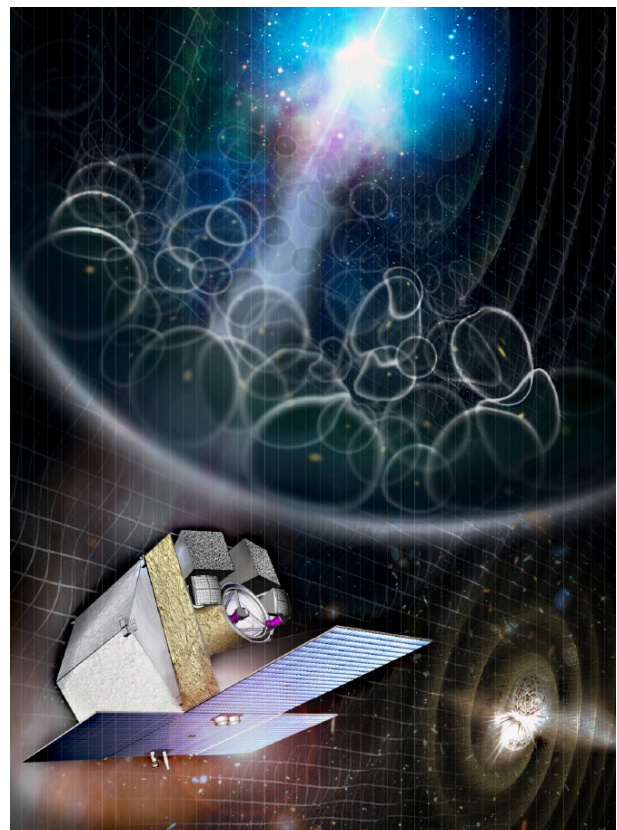
## REFERENCIAS

- [1] A. J. Castro-Tirado 1998, Explosiones cósmicas de rayos-gamma. Los fenómenos más energéticos del Universo. Boletín de la SEA, 1, 14.
- [2] A. J. Castro-Tirado et al. 1999, Decay of the GRB 990123 Optical Afterglow: Implications for the Fireball Model, *Science* 283, 2069.
- [3] S. R. Kulkarni et al. 1999, The afterglow, redshift and extreme energetics of the  $\gamma$ -ray burst of 23 January 1999, *Nature* 398, 389.
- [4] C. Akerlof et al. 1999, Observation of contemporaneous optical radiation from a  $\gamma$ -ray burst, *Nature* 398. 400.
- [5] J. Hjorth et al. 2003, A very energetic supernova associated with the  $\gamma$ -ray burst of 29 March 2003, *Nature* 423, 847.
- [6] K. Z. Stanek et al. 2003, Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329, *ApJ* 591, L17.

- [7]. J. Greiner et al. 2003, Evolution of the polarization of the optical afterglow of the  $\gamma$ -ray burst GRB030329, *Nature* 26, 157.
- [8] N. Gehrels et al. 2005, A short  $\gamma$ -ray burst apparently associated with an elliptical galaxy at redshift  $z = 0.225$ , *Nature* 37, 851.
- [9] A. J. Castro-Tirado et al. 2005, GRB 050509b: the elusive optical/nIR/mm afterglow of a short-duration GRB, *A&A* 439, L15.
- [10] E. Berger et al. 2005, The afterglow and elliptical host galaxy of the short  $\gamma$ -ray burst GRB 050724, *Nature* 438, 988.
- [11] J. Hjorth et al. 2005, The optical afterglow of the short  $\gamma$ -ray burst GRB 050709, *Nature* 437, 859.
- [12] N. Kawai et al. 2006, An optical spectrum of the afterglow of a  $\gamma$ -ray burst at a redshift of  $z = 6.295$ , *Nature* 440, 184.
- [13]. J. B. Haislip et al. 2006, A photometric redshift of  $z = 6.39 \pm 0.12$  for GRB 050904, *Nature* 440, 181.
- [14] S. Campana et al. 2006, The association of GRB 060218 with a supernova and the evolution of the shock wave, *Nature* 442, 1008.
- [15] P. Mazzali et al. 2006, A neutron-star-driven X-ray flash associated with supernova SN 2006aj. *Nature* 442, 1018.
- [16] M. Della Valle et al. 2006, An enigmatic long-lasting gamma-ray burst not accompanied by a bright supernova, *Nature* 444, 1050.
- [17] A. Gal-Yam et al. 2006, A novel explosive process is required for the  $\gamma$ -ray burst GRB 060614, *Nature* 444, 1053.
- [18] C. G. Mundell et al. 2007, Early Optical Polarization of a Gamma-Ray Burst Afterglow, *Science* 315, 1822.
- [19] J. L. Racusin et al. 2008, Broadband observations of the naked-eye  $\gamma$ -ray burst GRB080319B, *Nature* 455, 183.
- [20] N. Tanvir et al. 2009, A gamma-ray burst at redshift  $z = 8.2$ , *Nature* 461, 1254.
- [21] R. Salvaterra et al. 2009, GRB090423 at a redshift of  $z \sim 8.1$ , *Nature* 461, 1258.
- [22] J. Greiner et al. 2015, A very luminous magnetar-powered supernova associated with an ultra-long  $\gamma$ -ray burst, *Nature* 523, 189.
- [23] K. Wiersema et al. 2014, Circular polarization in the optical afterglow of GRB 121024A, *Nature* 509, 201.
- [24] D. A. Perley et al. 2014, The afterglow of GRB 130427A from 1 to 1016 GHz. *ApJ* 781, 37.
- [25] N. Tanvir et al. 2013, A 'kilonova' associated with the short-duration  $\gamma$ -ray burst GRB 130603B, *Nature* 500, 547
- [26] B. P. Abbott et al. 2017, Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger, *ApJ* 848, L12.
- [27] E. Pian et al. 2018, Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron-star merger, *Nature* 551, 67.
- [28] L. Izzo et al. 2019, Signatures of a jet cocoon in early spectra of a supernova associated with a  $\gamma$ -ray burst, *Nature* 565, 324.
- [29] Colaboración MAGIC 2019, Teraelectronvolt emission from the  $\gamma$ -ray burst GRB 190114C, *Nature* 575, 455.
- [30] Y. Q. Xue et al. 2019, A magnetar-powered X-ray transient as the aftermath of a binary neutron-star merger, *Nature* 568, 198.
- [31] E. Troja et al. 2022, A nearby long gamma-ray burst from a merger of compact objects, *Nature* 612, 228.
- [32] J. C. Rastinejad et al. 2022, A kilonova following a long-duration gamma-ray burst at 350 Mpc, *Nature* 612, 223.
- [33] E. Burns et al. 2023, GRB 221009A: The Boat, *ApJ* 496, L1.
- [34] Z. Cao and LHAASO Collaboration 2023, A Teraelectron volt afterglow from a narrow jet in an extremely bright gamma-ray burst, *Science* 380, 1390.
- [35] Y.-H. Yan et al. 2024, A lanthanide-rich kilonova in the aftermath of a long gamma-ray burst, *Nature* 626, 742.
- [36] D. A. Kann et al. 2010, The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows, *ApJ* 720, 1513.
- [37] M. G. Dainotti et al. 2024, Inferring the Redshift of More than 150 GRBs with a Machine-learning Ensemble Model, *ApJS* 271, 22.
- [38] A. J. Castro-Tirado 2003, La red global BOOTES de telescopios robóticos, *Boletín de Verano de la SEA* 48, 42.
- [39] A. J. Castro-Tirado 2023, Tracking transients day and night, *Nature Astronomy* 7, 1136.
- [40] A. J. Castro-Tirado et al. 2009, GRB 090709A: deep optical observation with the 10.4m GTC, *GCN Circular* 9655.
- [41] J. Martí, J. M. Perucho & J. L. Gómez 2016, The Internal Structure of over pressured, Magnetized, Relativistic Jets, *ApJ* 831, 163.

- [42] M. Obergaulinger & M. A. Aloy 2022, Magneto rotational core collapse of possible gamma-ray bursts progenitors—IV. A wider range of progenitors, *MNRAS* 512, 2489
- [43] P. Kumar, R. Narayan & J. L. Johnson 2008, Mass fall-back and accretion in the central engine of gamma-ray bursts, *MNRAS* 388, 1729.
- [44] R. C. Duncan & C. Thompson C. 1992 Formation of very strongly magnetized neutron stars—Implications for gamma-ray bursts, *ApJ* 392, L9.
- [45] A. Rowlinson et al. 2014, Constraining properties of GRB magnetar central engines using the observed plateau luminosity and duration correlation, *MNRAS* 443, 1779.
- [46] P. Meszáros and M. J. Rees, 1993, Relativistic Fireballs and Their Impact on External Matter: Models for Cosmological Gamma-Ray Bursts, *ApJ*, 405, 278.
- [47] R. Sánchez-Ramírez et al. 2017, GRB 110715A: the peculiar multiwavelength evolution of the first afterglow detected by ALMA, *MNRAS*, 464, 4624.
- [48] E. Berger et al. 2003, A common origin for cosmic explosions inferred from calorimetry of GRB030329, *Nature* 426, 154.
- [49] O. Gottlieb et al. 2022, On the Jet-Ejecta Interaction in 3D GRMHD Simulations of a Binary Neutron Star Merger Aftermath, *ApJ* 933, L2.
- [50] B. O'Connor et al. 2023, A structured jet explains the extreme GRB 221009A, *Science Advances* 9, id. eadi1405.
- [51] L. K. Hunt LK et al. 2014, New light on gamma-ray burst host galaxies with Herschel, *A&A* 565, A112.
- [52] A. Cucchiara et al. 2011, A Photometric Redshift of  $z \sim 9.4$  for GRB 090429B, *ApJ* 736, L7.
- [53] D. Q. Lamb & D.E. Reichart 2000, Gamma-Ray Bursts as a Probe of the Very High Redshift Universe, *ApJ* 536, 1.
- [54] J.-L. Li et al. 2023, Constraints on the Cosmological Parameters with Three-Parameter Correlation of Gamma-Ray Bursts, *ApJ* 953, 58.
- [55] D. Kumar et al. 2023, Gamma Rays Bursts: A Viable Cosmological Probe? *JCAP*, en prensa (arXiv:2212.057313).
- [56] B. Zhang 2018, *The physics of Gamma-ray bursts*. Cambridge University Press.
- [57] G. Stratta et al. 2022, Breakthrough Multi-Messenger Astrophysics with the THESEUS Space Mission, *Galaxies* 2022, 10.
- [58] N. Gehrels, L. Piro & P. J. T. Leonard 2002, The brightest explosions in the Universe, *Scientific American*, 287 (Dec 2002).
- [59] A. de Ugarte Postigo et al. 2005, GRB 021004 modelled by multiple energy injections, *A&A* 443, 841.
- [60] A. J. Castro-Tirado et al. 2009, The dark nature of GRB051022 and its host galaxy, *A&A* 475, 101.
- [61] A. J. Castro-Tirado et al. 2024, GRB 130606A within a sub-DLA at redshift 5.91, *A&A*, enviado (<https://arxiv.org/abs/1312.5631>).
- [62] G. Schilling 2002. *Flash! The hunt for the biggest explosions in the Universe*. Cambridge University Press.

Figura 7. Concepción artística de la Misión *THESEUS* (Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor) de la Agencia Espacial Europea. Cortesía ESA.



# DINÁMICA DE LA CROMOSFERA SOLAR:

En este artículo, presentamos el proyecto PI2FA (Partial Ionization: 2-Fluid Approach, por sus siglas en inglés). Este proyecto, respaldado por una ERC Consolidating Grant, ha estado activo durante los últimos 5 años. Su objetivo principal ha sido investigar la cromosfera solar utilizando un marco teórico innovador, que va más allá de los modelos magnetohidrodinámicos convencionales. Dada la baja temperatura de la atmósfera solar, más de la mitad de las partículas se encuentran en un estado neutro y se comportan como un fluido distinto al plasma formado exclusivamente por partículas cargadas. En este contexto, el proyecto PI2FA se ha centrado en desarrollar y aplicar herramientas para el modelado multidimensional del plasma cromosférico parcialmente ionizado, utilizando el formalismo multifluido. Las preguntas científicas abordadas incluyen el análisis de mecanismos de calentamiento cromosférico y la creación de modelos realistas multidimensionales de la cromosfera solar que incorporen efectos derivados de la presencia de átomos neutros, así como la comprensión del papel de los neutros en la dinámica de las protuberancias solares.



Funded by  
the European Union



European Research Council  
Established by the European Commission



Elena Khomenko

Instituto de Astrofísica de Canarias  
[khomenko@iac.es](mailto:khomenko@iac.es)

## INTRODUCCIÓN

La atmósfera solar exhibe varias capas, entre las cuales la cromosfera destaca por su peculiaridad y, posiblemente, su complejidad máxima. Su nombre proviene de "cromo", que significa color, ya que durante los eclipses se manifiesta en tonalidades rojizas. Este matiz se debe a la emisión de luz por parte de átomos de hidrógeno en la longitud de onda de la línea  $H\alpha$ . Ubicada entre la fotosfera, donde comienza la superficie solar, y la corona, su capa externa, la cromosfera posee un grosor de apenas unos mil kilómetros, una medida diminuta en comparación con el tamaño del Sol. ¿Por qué atribuir tanta relevancia a esta capa?

En el Sol, al igual que en todas las estrellas, la temperatura disminuye gradualmente desde el núcleo hacia las capas más externas. Sin embargo, de manera similar a muchas estrellas magnéticas de la secuencia principal, la temperatura alcanza un mínimo y luego vuelve a aumentar. Este aumento conduce a la emisión de radiación por parte del hidrógeno, lo que confiere el color rojo característico a la cromosfera. No obstante, aún no comprendemos completamente el origen de este incremento, ni el posterior aumento aún más drástico en la zona de transición y la corona. Se cree que la presencia del campo magnético en la superficie solar desempeña un papel crucial en este calentamiento, y se espera que comprender el calentamiento cromosférico nos permita entender también el calentamiento de la corona. A pesar de décadas de investigación, el problema de este calentamiento sigue siendo uno de los enigmas no resueltos en la física solar.

Hasta hace poco, se creía que el campo magnético del Sol se concentraba principalmente en las manchas solares. Sin embargo, la llegada de la polarimetría infrarroja en los años 90 permitió confirmar que hay elementos de intensidad magnética considerable distribuidos por toda la superficie solar, incluso durante los periodos de mínima actividad cuando no hay manchas solares. La energía que estos elementos magnéticos poseen en todo momento supera la necesaria para calentar la cromosfera. Solo se requiere encontrar mecanismos que conviertan esta energía en calor.

Al menos la mitad del hidrógeno presente en la cromosfera se encuentra en estado neutro, lo que confiere al material cromosférico una composición



equivalente a la de dos fluidos con naturalezas distintas (uno compuesto exclusivamente por partículas neutras y otro en forma de plasma formado por iones y electrones). La falta de acoplamiento colisional entre estos dos fluidos, debido a las bajas densidades en estas capas, provoca una dinámica ligeramente diferenciada entre ambos. Mientras las partículas ionizadas experimentan la influencia del campo magnético a través de la fuerza de Lorentz, las partículas neutras no lo hacen. Como consecuencia, aparece un comportamiento dinámico diferente en ambos tipos de partículas que genera fricción entre ellas, lo que constituye un mecanismo disipativo que convierte la energía mecánica o magnética en calor. Dependiendo de la descripción matemática del plasma, ya sea como un fluido único o multifluído, este fenómeno se denomina como "difusividad ambipolar" o "calentamiento por fricción". Nuestros estudios idealizados y los de nuestros colaboradores han demostrado que este mecanismo podría ser clave para proporcionar una gran cantidad de energía a la cromosfera, suficiente para mantener sus altas temperaturas. Sin embargo, la cromosfera es extremadamente compleja y hay numerosos factores a considerar, como la interacción entre el plasma y la radiación, o los procesos de ionización y recombinación, entre otros. Es por ello que se necesitan estudios más detallados sobre el mecanismo de calentamiento por neutros en modelos más realistas. El proyecto PI2FA se ha centrado en este tipo de estudios.

## EL PROYECTO

El proyecto PI2FA se ha propuesto mejorar nuestra comprensión de la cromosfera solar magnetizada mediante la aplicación de un innovador marco teórico de plasma multifluído. Se han creado y aplicado herramientas para la modelización multidimensional de los plasmas cromosféricos, con el objetivo de entender los procesos no térmicos que generan calor en la alta atmósfera del Sol. Un desafío único de estos estudios radica en la incapacidad de resolver espacialmente las escalas en las que ocurren los procesos de liberación de energía magnética en observaciones directas. Sin embargo, los modernos telescopios solares de gran apertura como DKIST y el futuro EST ofrecen esperanzas en este aspecto. Además, los potentes superordenadores actuales brindan la capacidad de cálculo necesaria para abordar las escalas de interacción entre neutros y partículas

cargadas en modelos realistas. Estos modelos permiten prever los fenómenos que se deben buscar en observaciones para validar los hallazgos teóricos.

El proyecto se ha centrado en mecanismos fundamentales de propagación e intercambio de energía en plasmas complejos, como ondas, inestabilidades e interacciones plasma-radiación. La transición desde modelos unidimensionales idealizados hasta simulaciones multidimensionales representa un avance crucial, en consonancia con la constante evolución tecnológica de nuestras capacidades para la observación solar.

Al término del proyecto, hemos avanzado en nuestra comprensión de los procesos que energizan la atmósfera solar como consecuencia de estar parcialmente ionizada. Por un lado, hemos desarrollado extensiones de la teoría multifluído para diversos regímenes colisionales y hemos creado diversas herramientas computacionales y numéricas para la modelización realista de plasmas parcialmente ionizados. Por otro lado, la aplicación de estas herramientas ha generado resultados científicos interesantes, algunos de los cuales se detallan a continuación.

## CALENTAMIENTO CROMOSFÉRICO POR ONDAS

La cromosfera solar está llena de ondas y choques. Los movimientos del plasma magnetizado en la fotosfera solar crean un flujo de energía mecánica y magnética suficiente para calentar la cromosfera y la corona. Esta energía puede transportarse a la cromosfera en forma de ondas. Sin embargo, no todos los tipos de ondas pueden desempeñar igualmente bien esta función. En algunas circunstancias, los choques de tipo acústico pueden escapar hacia capas superiores, propagándose alineados con el campo magnético. Las ondas de tipo magnético pueden alcanzar capas superiores porque no se disipan en la fotosfera debido a la radiación o la viscosidad y se ven menos afectadas por los efectos de la estratificación gravitacional. Hasta ahora, las ondas de Alfvén han sido las más elusivas, tanto desde el punto de vista teórico como observacional. Solo una pequeña fracción de la energía de las ondas de Alfvén sería suficiente para alimentar el viento solar. Aunque podrían transportar energía fácilmente hacia la cromosfera al propagarse alineadas con el campo, sus mecanismos de generación no están claros.

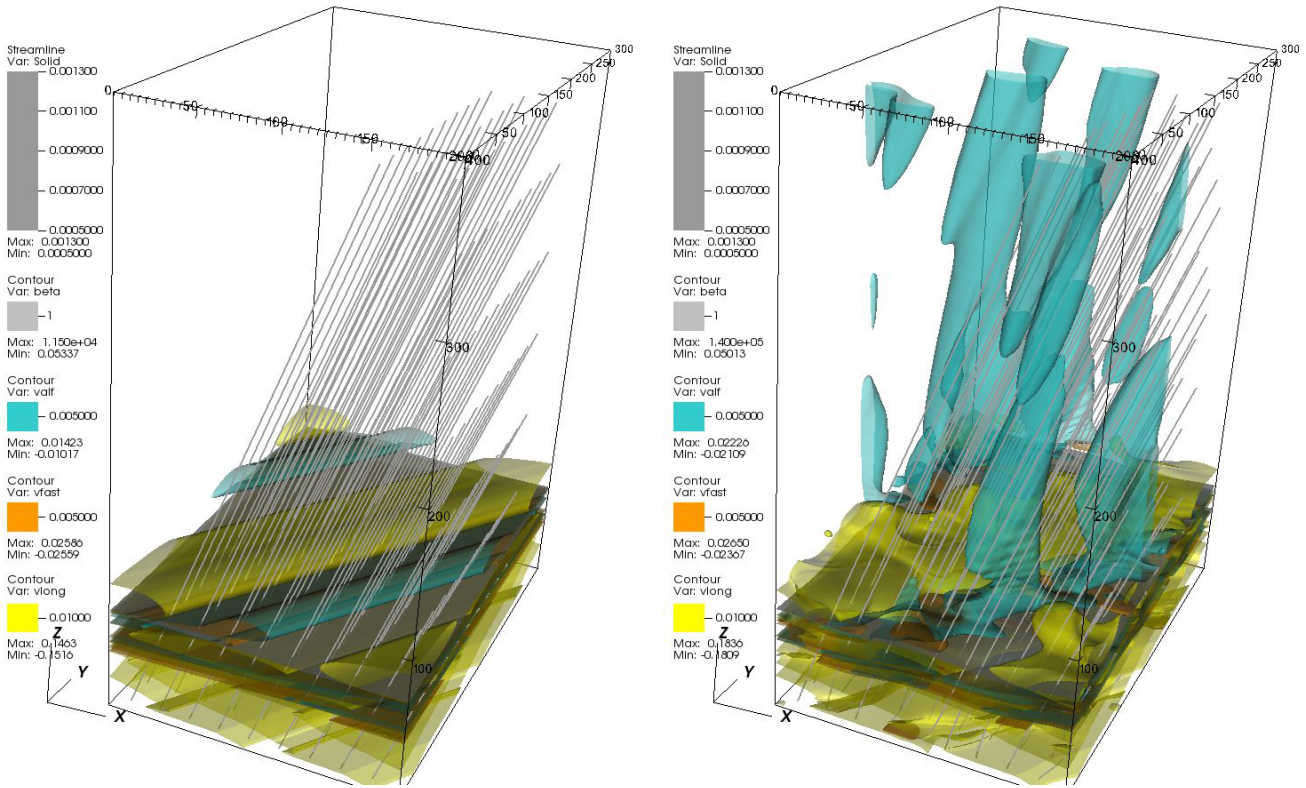


Figura 1. Modelado de propagación de ondas en la atmosfera solar horizontalmente homogénea (izquierda) y con estructuración horizontal (derecha) desde la fotosfera hasta la corona. Los colores indican la presencia de diferentes modos de oscilación: modo acústico lento (amarillo); magnético rápido (naranja) y Alfvén (azul). Las líneas inclinadas son las líneas de campo magnético. Notar como la estructuración horizontal permite la generación de modo Alfvén en la corona evidente por la presencia de contornos azules en la imagen de la derecha.

Una teoría novedosa surgida recientemente para explicar generación de modos Alfvén es la teoría de transformación de modos. Se ha demostrado que, bajo ciertas circunstancias, las ondas acústicas pueden transformarse en ondas magnéticas y de Alfvén. Las ondas de Alfvén creadas por este mecanismo podrían llegar más fácilmente a la cromosfera.

Además, las ondas de Alfvén son conocidas por ser particularmente difíciles de disipar bajo el marco de la magnetohidrodinámica clásica ideal. Afortunadamente, los efectos de interacciones ion-neutro proporcionan un mecanismo de disipación eficiente de este tipo de ondas.

En el proyecto PI2FA, hemos formulado una teoría nueva de producción de ondas Alfvén en plasmas parcialmente ionizados a través de la transformación de

modos (proceso por el cual una onda cambia sus propiedades), y hemos explorado sus mecanismos de disipación. Hemos descubierto que las corrientes creadas por el desacoplamiento colisional entre iones y electrones (denominado efecto Hall) proporcionan una manera eficiente para acoplar ondas magnéticas y de Alfvén. El mecanismo funciona para frecuencias mucho más bajas que en plasmas completamente ionizados ya que su eficiencia es inversamente proporcional al grado de ionización. Conjuntamente con la estructuración horizontal de la atmósfera solar, esto permite un flujo de energía de ondas de Alfvén suficiente como para calentar tanto regiones de Sol en calma como regiones activas (ver figura 1). Como consecuencia de la existencia de un desacoplamiento significativo en la dinámica de plasma y neutros, las ondas magnéticas y de Alfvén se disipan eficientemente a través del mecanismo de difusión ambipolar (o fricción ion-neutro).

Nuestra investigación ha revelado que los efectos multifluidos se vuelven cruciales para ondas con frecuencias mucho más bajas que las frecuencias típicas de colisión entre partículas, a diferencia de lo sugerido por la teoría clásica de ondas en plasmas homogéneos. Este descubrimiento conlleva implicaciones profundas, ya que hay considerablemente más energía disponible para la disipación a bajas frecuencias.

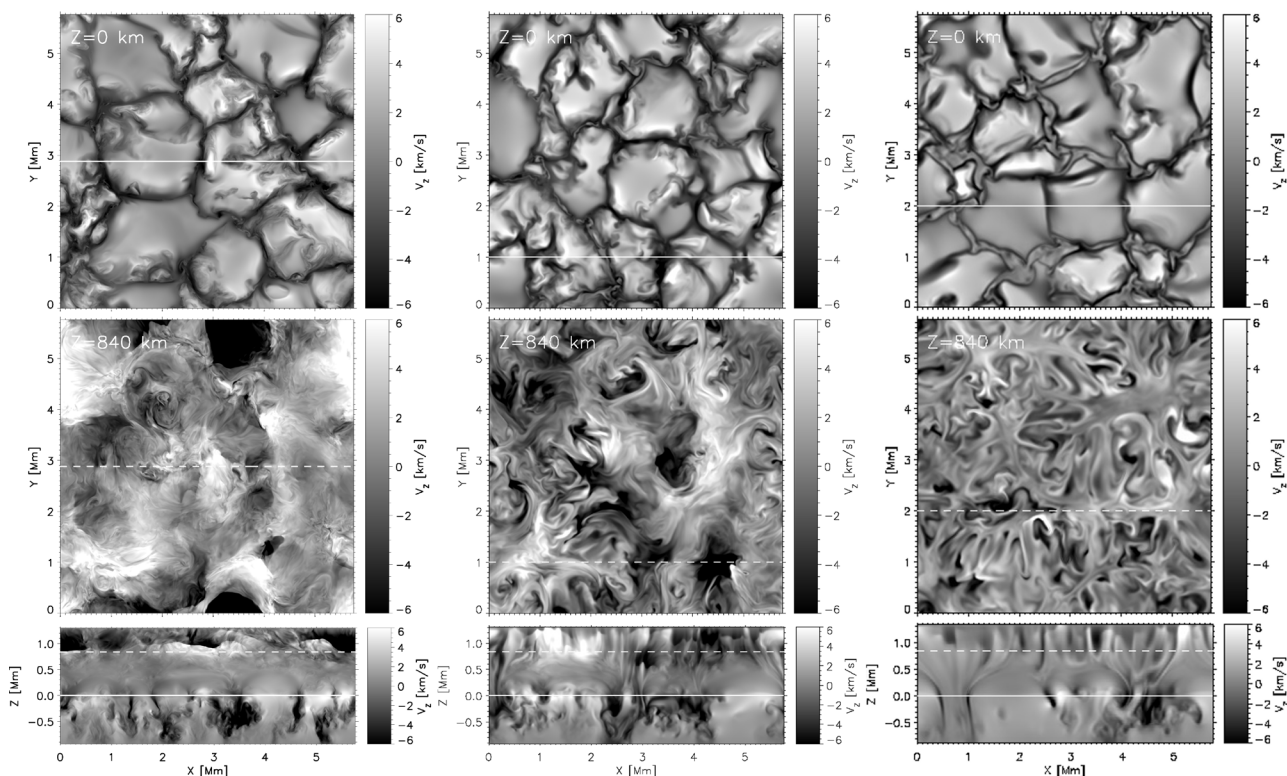
### SIMULACIONES REALISTAS DE LA CROMOSFERA

Los modelos realistas de magnetoconvección tridimensional (3D) han demostrado ser una herramienta valiosa para avanzar en nuestra comprensión de numerosos procesos magnetohidrodinámicos que tienen lugar en la atmósfera solar. Estos modelos son utilizados rutinariamente por la comunidad de física solar para sintetizar el espectro emitido y permitir la comparación directa con observaciones. Su realismo en el caso de la fotosfera ha alcanzado

el punto tal que no se puede distinguir a simple vista la diferencia entre una imagen solar de granulación y la producida por el ordenador. Esto no ocurre así para la cromosfera.

Un desafío enorme para el proyecto ha sido proporcionar modelos realistas de magnetoconvección que lleguen hasta la cromosfera y tengan en cuenta los efectos de interacción entre neutros y partículas cargadas, algo que no se había abordado en modelos tridimensionales por ningún otro grupo. Estos modelos incluyen complejas interacciones hasta las escalas más pequeñas y permiten la comparación directa con datos observacionales, como una forma de preparar a nuestra comunidad para los datos de los telescopios DKIST y el futuro EST. Aquí es conveniente enfatizar que la cromosfera es un objetivo principal para estos telescopios y, por lo tanto, crear herramientas teóricas para la interpretación de datos cromosféricos es vital.

Figura 2. Simulaciones realistas de magnetoconvección solar. Las imágenes muestran cortes horizontales (paneles superiores, fotosfera y cromosfera) y vertical (panel inferior) de un modelo 3D. De izquierda a derecha: modelo de dinamo a pequeña escala; modelos de red magnética con diferente intensidad de campo. El tono de grises muestra las velocidades de movimiento del plasma.



Hemos llevado a cabo simulaciones tridimensionales que representan diversas regiones del Sol. Para describir el magnetismo solar de Sol en calma, es decir, en la superficie solar fuera de las manchas y regiones activas, hemos desarrollado modelos de dinamo a pequeña escala (SSD, por sus siglas en inglés) (ver figura 2). Estos modelos muestran la existencia de un campo magnético intrincado con cambios de polaridad a pequeña escala y configurados en forma de pequeños arcos. Por otra parte, para representar regiones de la red magnética, hemos creado modelos con campo magnético más intenso y con una polaridad dominante (ver figura 2), con elementos magnéticos en forma de tubos de flujo que se expanden con altura en la cromosfera. Hemos alcanzado una resolución numérica sin precedentes para modelar adecuadamente las escalas de intercambio de energía entre los neutros y las partículas cargadas. Inicialmente, partimos de la suposición de que los campos magnéticos más intensos tendrían un efecto de calentamiento mayor (por almacenar intrínsecamente una mayor cantidad de energía magnética). Sin embargo, nos sorprendió descubrir que el efecto mayor se producía para los campos magnéticos intrincados de dinamo a pequeña escala. Esto se debe a que, en estos modelos, la energía se deposita en capas más profundas donde se gasta principalmente en calentar el plasma en lugar de ionizarlo. Observamos que, en tan solo 10 minutos, el plasma se calienta aproximadamente 500 Kelvin (un  $\sim 10\%$  de su valor inicial) en capas cromosféricas donde la interacción neutro-ion está completamente resuelta en las simulaciones, sin mostrar signos de saturación incluso en nuestra mejor resolución de 3.5 km. Este descubrimiento tiene profundas implicaciones para nuestra comprensión de la formación de las cromosferas calientes del Sol y de otras estrellas.

### **PROTUBERANCIAS SOLARES**

La corona solar contiene nubes de plasma frío con propiedades muy similares al de la cromosfera. Se trata de protuberancias solares. Las protuberancias pueden estar suspendidas durante días o meses en la corona solar, y aisladas térmicamente de ella por el campo magnético. Al final de su vida, algunas de ellas pueden deshacerse en forma de gotas de lluvia coronal cayendo a lo largo de los arcos de campo magnético. O pueden volverse inestables y producir una erupción. En determinadas condiciones, la

materia asociada se propaga en forma de eyección de masa coronal que podría afectar a la Tierra. A pequeña escala, las protuberancias son extremadamente dinámicas. Los procesos más relevantes tienen lugar en sus bordes y en los extremos de las finas hebras que forman estas estructuras, allí donde las propiedades del plasma cambian abruptamente. Las protuberancias se mantienen estables en escalas globales debido a las fuerzas de la tensión magnética. Sin embargo, los neutros que componen el material de la protuberancia solo sienten esta fuerza a través del débil acoplamiento colisional con los iones. Por lo tanto, las protuberancias pueden volverse inestables a pequeña escala.

Para investigar la influencia de las partículas neutras en la estabilidad de las protuberancias, en el proyecto PI2FA hemos llevado a cabo un modelado exhaustivo utilizando el marco teórico multifluido para analizar las inestabilidades que se forman en la interfaz entre la hebra de la protuberancia y la corona solar. Este modelado se ha realizado con una resolución sin precedentes de 1 km, permitiendo la representación detallada de todos los procesos físicos relevantes, como las colisiones elásticas entre partículas, la ionización y recombinación, la viscosidad y la conductividad (ver figura 3). En estas simulaciones detectamos una amplia gama de efectos multifluidos, especialmente destacados en las capas de transición entre el plasma frío y caliente. En estas regiones, los desequilibrios de ionización/recombinación generan capas sobreionizadas con notables diferencias en la dinámica de partículas neutras y cargas (con velocidades relativas que pueden diferir hasta un 10-20%, aproximadamente), además de un calentamiento por fricción de hasta varios miles de Kelvin, que potencialmente podrían ser detectados en observaciones. Estos hallazgos subrayan la importancia de los efectos presentes en las capas de transición entre los materiales fríos y calientes, como la región de transición solar y la interfaz entre la protuberancia y la corona.

Los efectos multifluido operan en escalas más allá de las capacidades de resolución de nuestra instrumentación más avanzada, lo que hace necesarias iniciativas observacionales especializadas para su detección. Lo más directo que se puede medir son las velocidades de neutros y cargas, detectando los desplazamientos Doppler de las líneas espectrales

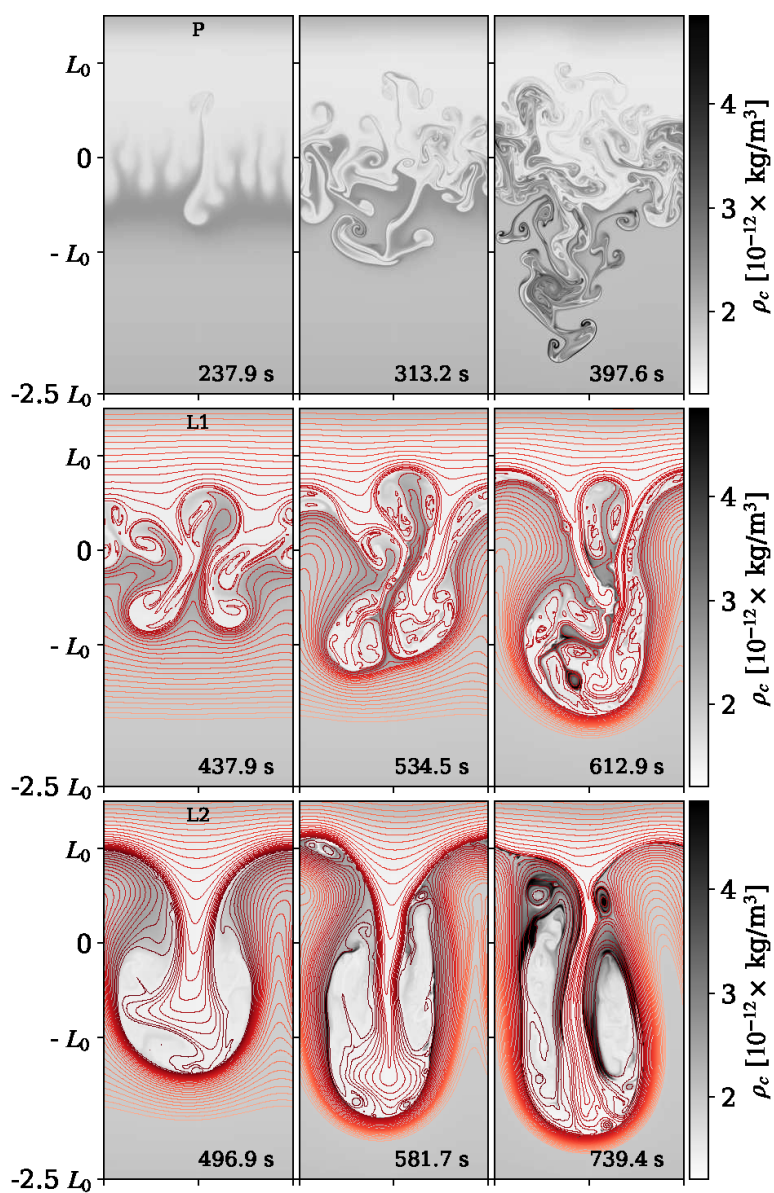


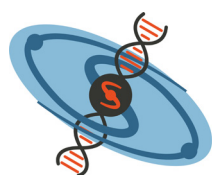
Figura 3. Simulaciones de inestabilidad de Rayleigh-Taylor en el borde de una hebra de protuberancia solar. Los paneles de izquierda a derecha muestran diferentes instantes temporales de evolución de la densidad del plasma. Los paneles de arriba abajo muestran modelos con diferente orientación de campo magnético. Las líneas rojas indican la posición de las líneas de campo magnético en el plano de inestabilidad.

emitidas por el mismo volumen del plasma. Aun sin resolver las escalas pequeñas, las huellas del desacoplamiento dinámico pueden quedar presentes en datos no resueltos espacialmente. Por esta razón, para buscar la confirmación observacional de nuestros hallazgos teóricos, hemos diseñado campañas de observación específicas en los telescopios VTT y

THEMIS del Observatorio del Teide, y también hemos utilizado datos históricos tomados en el Observatorio Ondřejov en la República Checa. En estos conjuntos de datos hemos encontrado un ligero exceso en las velocidades de los iones sobre los neutros, localizado justo en los bordes de las protuberancias, en línea con las predicciones teóricas.

# SUL4LIFE: TRAS EL AROMA DE LA VIDA

El proyecto “The trail of sulphur: from molecular clouds to life” (SUL4LIFE) (IP: Asunción Fuente) ha sido seleccionado por la Unión Europea para su financiación dentro del programa ERC AdG 2022 – Grant Agreement No101096293 (<https://cab.inta-csic.es/proyectos/the-trail-of-sulphur-from-molecular-clouds-to-life-sul4life/>). El objetivo de este proyecto es determinar cómo llegó el azufre a nuestro planeta, un paso fundamental para comprender la aparición de la vida. Para ello, emplearemos una metodología innovadora para determinar la evolución química de este elemento en el medio interestelar y seguir su rastro hasta la formación de los planetas.



## SUL4LIFE

Asunción Fuente

Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA  
[afuente@cab.inta-csic.es](mailto:afuente@cab.inta-csic.es)

Marina Rodríguez Baras

Observatorio Astronómico Nacional (OAN, IGN)  
[m.rodriguez@oan.es](mailto:m.rodriguez@oan.es)

## ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE CONOCER LAS ABUNDANCIAS DE LOS ELEMENTOS EN EL ESPACIO?

El estudio de las abundancias de los elementos es esencial para entender la química cósmica y la evolución del universo. Durante el Big Bang, se formaron los átomos de hidrógeno (H), helio (He) y trazas de otros elementos ligeros como litio (Li) y berilio (Be). Los elementos más pesados se forman en el interior de estrellas masivas y se dispersan posteriormente en el medio interestelar.

El Sol contiene más del 99% de la masa del Sistema Solar, y su composición química puede considerarse similar a la de la nube interestelar natal a partir de la cual se formó hace más de 4 mil millones de años. Sin embargo, la composición química del resto de los objetos del Sistema Solar, desde planetas y satélites hasta asteroides y cometas, difiere notablemente del estándar solar. Esta variación tiene su origen en la compleja sucesión de procesos físico-químicos que se desarrollaron desde el colapso de la nube materna hasta la formación de los cuerpos celestes individuales. Investigar estas discrepancias composicionales ofrece valiosas perspectivas sobre la formación de la Tierra y el resto de los cuerpos de nuestro sistema planetario.

Hoy creemos que una fracción de la materia prima a partir de la cual se formó la vida pudo tener un origen exógeno, es decir, llegó a la Tierra con el intenso bombardeo de cuerpos cometarios que sufrió hace unos 3800 millones de años (el llamado “Bombardeo intenso tardío”) (ver Fig. 1). Se considera que la composición de estas cometas es similar a la de los hielos que cubrían los granos de polvo en la nebulosa protosolar inicial. Por lo tanto, conocer la composición química del azufre en las nubes interestelares nos proporcionará una información clave para comprender cómo se incorporaron los átomos de azufre a nuestro planeta y, finalmente, a la vida.

El estudio de las abundancias elementales nos brinda una ventana única para comprender los procesos físicos y químicos que dieron origen a los planetas y, por extensión, a la vida misma. La utilización de observaciones con alta resolución espacial como las obtenidas con los interferómetros milimétricos ALMA del Observatorio Europeo Austral (ESO), NOEMA del Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM) y el EVLA del Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO) de Estados Unidos, nos permite abordar

problemas tan importantes como la composición química de la materia durante las primeras etapas de la formación de planetas en un disco protoplanetario. El Telescopio Espacial James Webb (JWST) y, en los próximos años, la misión espacial ARIEL de la Agencia Espacial Europea (lanzamiento previsto para 2029) proporcionarán información detallada sobre la composición química de las atmósferas de numerosos exoplanetas. Por primera vez, los astrónomos podremos trazar la evolución de los elementos desde el nacimiento de las estrellas hasta el origen de los planetas y la vida.

### ¿POR QUÉ EL AZUFRE?

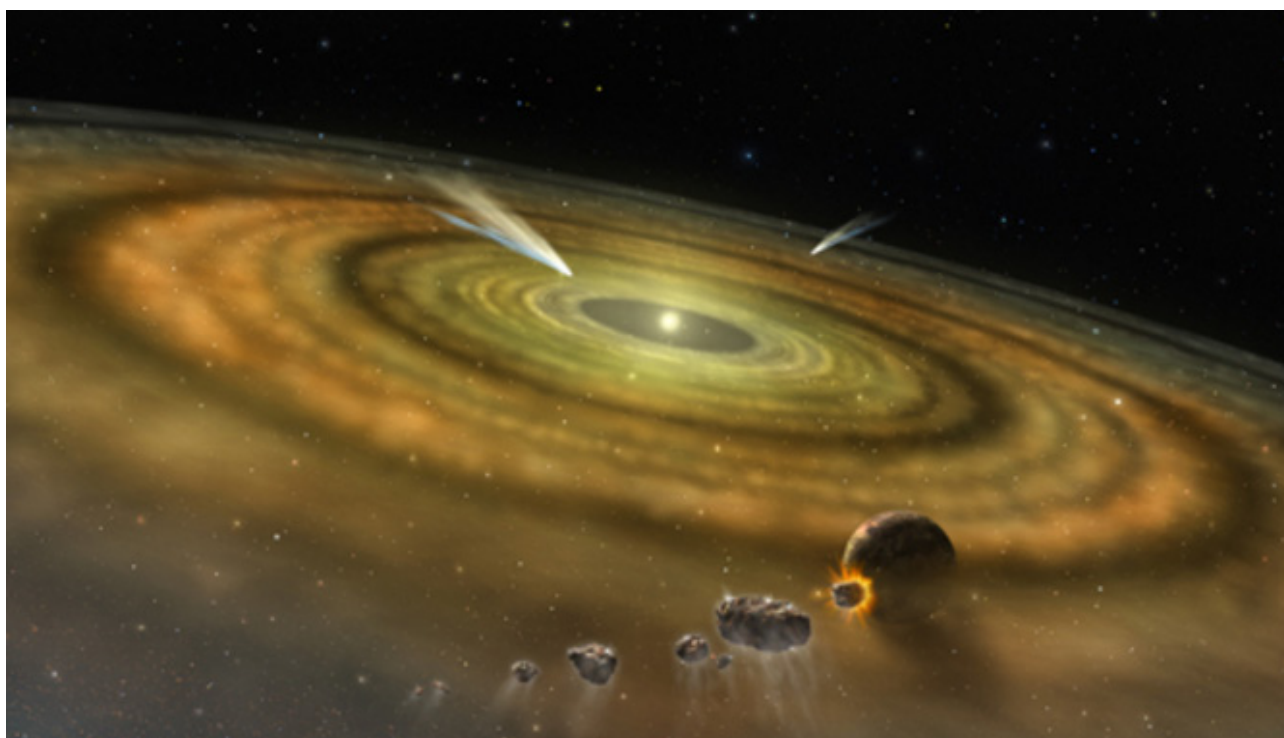
Hay seis elementos que son especialmente importantes para nosotros porque están ligados al origen de la vida: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre (CHONPS). El azufre representa el 0.2% del peso del cuerpo humano y se encuentra en una amplia variedad de biomoléculas, como aminoácidos, ácidos nucleicos, azúcares y vitaminas. Se considera, además, que algunos compuestos de azufre como el  $H_2S$  han sido necesarios como

catalizadores para la formación de aminoácidos en el medio interestelar [1]. A pesar de que se ha investigado mucho sobre la química del azufre, aún quedan muchas preguntas cruciales que responder. Por ejemplo, no sabemos cuánto azufre hay y cómo se distribuye entre el gas y el polvo en las zonas donde se forman los planetas. Realizar un gran proyecto que investigue la historia del azufre en el espacio y cómo llegó a nuestro Sistema Solar, y a otros sistemas exoplanetarios, es necesario para determinar los compuestos y los procesos químicos a partir de los cuales se originó de la vida.

### UN ELEMENTO MISTERIOSO

El desconocimiento de la química del azufre en el medio interestelar no se debe a un desinterés por parte de los astrónomos y astroquímicos, sino a la dificultad que entraña su estudio. Los astroquímicos utilizamos los telescopios como herramientas básicas para conocer la composición química del universo. Sabemos que todas las especies gaseosas emiten a frecuencias características del espectro electromagnético (una especie de huella dactilar). Un análisis detallado

Figura 1. Visión artística del bombardeo de un planeta por cuerpos cometarios en el disco protoplanetario progenitor. Créditos de la imagen: NASA/FUSE/Lynette Cook.



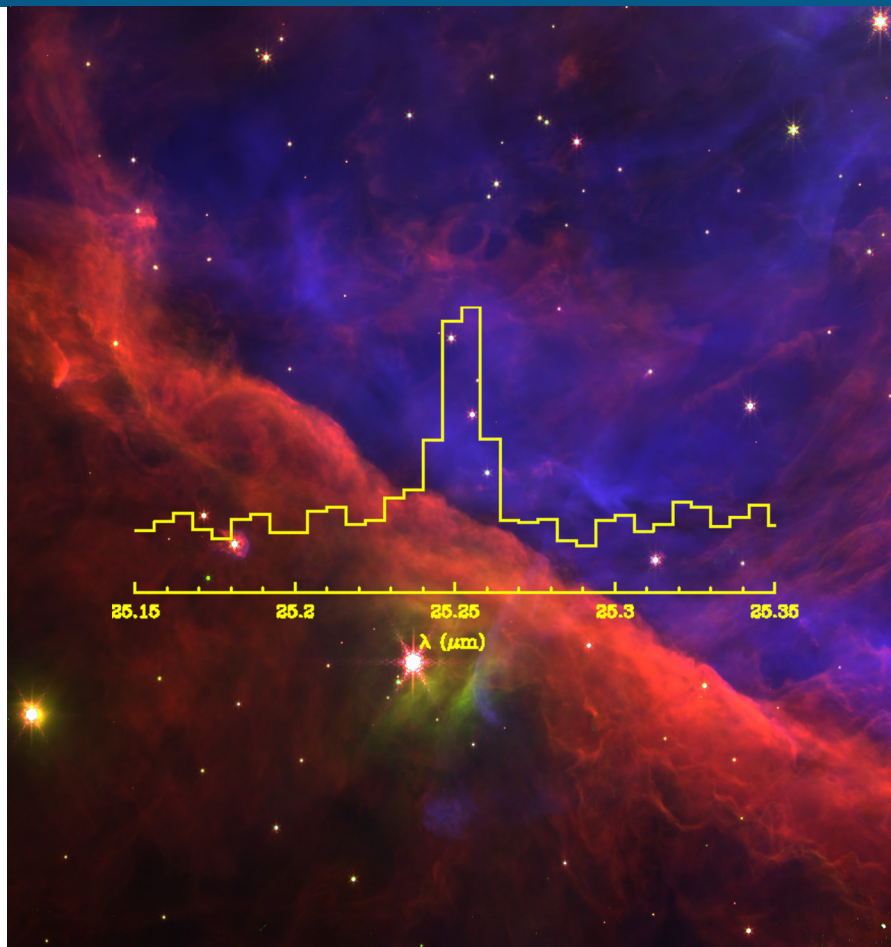


Figura 2. Espectro de la línea [S I]  $3P^1 \rightarrow 3P^2$  a 25.2490 micras en la región de fotodisociación conocida como “Barra de Orión” observada con el JWST [8]. La Barra de Orión es la característica diagonal bastante recta que marca la transición del gas caliente ionizado cerca de las estrellas del Trapecio (azul) a la nube molecular fría (rojo) al otro lado de la barra. La imagen de fondo es una composición RGB en la que el color azul muestra la emisión del gas caliente ionizado (filtro NIRCam F187N), el color rojo muestra la emisión de grandes moléculas carbonosas (filtro NIRCam F335M), y el color verde traza el polvo caliente y el gas molecular (filtro NIRCam F470N) [19]. Créditos de la imagen de fondo: NASA/ESA/CSA, E. Dartois, E. Habart, PDRs4All ERS team.

de los espectros observados con la instrumentación de vanguardia (NOEMA, ALMA, e-VLA, JWST) nos permite determinar la composición química de diferentes objetos, ya sean una nube de gas y polvo interestelar o una atmósfera planetaria. A partir de la comparación entre unos objetos y otros podemos reconstruir la evolución química que sufre la materia en el proceso de formación de estrellas y planetas.

A pesar de los extraordinarios avances que se han producido en la instrumentación astronómica en los últimos años, nuestro conocimiento de la química del azufre en el espacio sigue siendo muy limitado. La principal razón es que los compuestos de azufre más abundantes en el medio interestelar, el azufre atómico neutro (S) y el hielo de  $H_2S$  (a partir de ahora lo llamaremos s- $H_2S$ ), no se pueden observar de manera extensiva. Esta limitación se debe a que estas

especies no tienen transiciones que sean suficientemente intensas para ser detectadas, en las condiciones físicas que imperan en el medio interestelar. En el caso del azufre atómico, su transición  $3P^1 \rightarrow 3P^2$  a 25.2490 micras solo se espera que sea observable en regiones densas y calientes, que son una fracción muy pequeña de la masa de gas en el medio interestelar. La gran sensibilidad del JWST ha permitido detectar azufre atómico en la nebulosa de Orión, proporcionando información valiosa sobre la abundancia de este elemento en el gas molecular caliente ( $T > 50$  K) que rodea la región ionizada (ver Fig. 2, [2]). Siendo éste un gran paso en nuestro conocimiento de la abundancia del azufre atómico, aún seguimos desconociendo su abundancia en regiones más frías del medio interestelar como pueden ser las condensaciones pre-estelares o la parte externa de los discos protoplanetarios. El s- $H_2S$  es la especie



azufrada más abundante en cometas [3]. En el medio interestelar solo puede ser detectada a través de su banda a  $3.92 \mu\text{m}$ . A pesar de los sucesivos intentos de detección, esta especie no ha sido observada aún y solo tenemos límites superiores a su abundancia [4]. Las observaciones más recientes del JWST sugieren que su abundancia es menor que 0.6% respecto al  $\text{H}_2\text{O}$  en la nube molecular Chamaleon I [5]. Cabría esperar que s- $\text{H}_2\text{S}$  pudiera presentar mayores abundancias en otros entornos. El solapamiento de esta banda de s- $\text{H}_2\text{S}$  con una banda más intensa de s- $\text{CH}_3\text{OH}$ , un componente mayoritario del hielo interestelar, dificulta enormemente su detección.

Afortunadamente, existen muchos otros compuestos azufrados que se pueden observar rutinariamente en el medio interestelar utilizando grandes telescopios milimétricos. Hasta ahora, se han detectado 38 especies gaseosas [6] (<https://cdms.astro.uni-koeln.de/classic/molecules>) y una especie sólida (s-OCS, [7]). Las abundancias de estos compuestos se utilizan para determinar la cantidad de azufre en el gas y en el hielo interestelar, así como su composición química detallada. Aunque las especies observadas son numerosas, la cantidad de azufre contenido en

ellas es menos del 5% del total [13]. Determinar la composición química de todo el azufre a partir de las observaciones de estas moléculas es como intentar determinar la composición química del océano sin saber la cantidad de agua que contiene.

### UN ENFOQUE INNOVADOR

El objetivo de SUL4LIFE es mejorar nuestro conocimiento de la química del azufre utilizando una metodología innovadora, capaz de sortear los obstáculos observacionales anteriormente descritos, para determinar la evolución química de este elemento hasta la formación de la vida. En SUL4LIFE utilizaremos experimentos de laboratorio que reproducen las condiciones físicas en el medio interestelar para simular evolución química de este elemento en el espacio. Estos experimentos se realizarán en el laboratorio de hielos del Centro de Astrobiología (CAB), CSIC-INTA, [8] donde investigaremos cómo varían las abundancias de las moléculas azufradas contenidas en los hielos bajo irradiación con radiación UV y rayos X (Fig. 3). Estas condiciones son las que sufren los hielos en la superficie de los discos protoplanetarios donde se están formando los planetas y, por tanto, es uno de nuestros objetivos prioritarios.

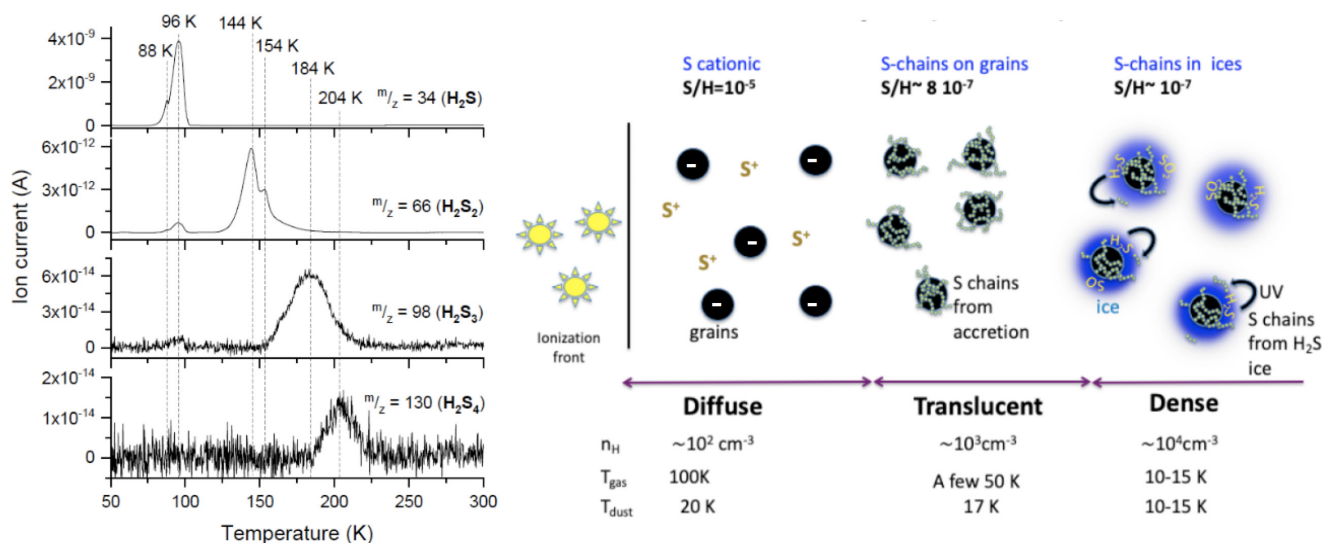


Figura 3. A la izquierda podemos observar la desorción térmica de las especies formadas en un hielo puro de  $\text{H}_2\text{S}$  que ha sido irradiado con fotones ultravioleta. Se observa la formación de moléculas con dobles y triples enlaces de azufre ( $\text{H}_2\text{S}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}_3$ ) [18]. A la derecha vemos un esquema propuesto en [12] para explicar la depleción de azufre en nubes oscuras. Se propone que la formación de alótropos de azufre ( $\text{S}_n$ ) en la parte traslúcida de las nubes moleculares puede explicar la baja abundancia de los compuestos azufrados observada en fase gaseosa.

Estos experimentos se combinarán con cálculos químicos mecano-cuánticos que permitirán determinar las tasas de las reacciones de formación y destrucción de las diferentes moléculas azufradas tanto en el gas [9] como en el hielo. Los modelos químicos utilizados en astroquímica contienen decenas de miles de reacciones en fase gaseosa [10]. La selección de las reacciones a investigar es en sí misma un objetivo, pues la importancia relativa de cada una de ellas es dependiente de las condiciones físicas y químicas en un tiempo determinado.

Aunque la evolución de la materia interestelar desde la nube materna a la formación del disco protoplanetario dura unos pocos millones de años, pensamos que la composición química del disco está determinada en gran medida por la composición química de la nube molecular progenitora y su evolución dinámica durante el colapso. En consecuencia, debemos rastrear el contenido de azufre desde la nube natal hasta los discos protoplanetarios para entender cuánto y en qué forma se incorpora el azufre a las lunas, planetas y, eventualmente, a la vida. Desde el punto de vista teórico, este rastreo se realizará mediante el uso de simulaciones magnetohidrodinámicas (MHD) y químicas que nos permitan seguir la evolución química de la materia durante el colapso y la formación del disco protoplanetario [11] (ver Fig. 4).

Estas simulaciones tan complejas solo se pueden realizar extensivamente utilizando inteligencia artificial para acelerar los cálculos y reducir el tiempo de computación. El poder predictivo de estas simulaciones será contrastado y mejorado mediante la comparación exhaustiva de sus predicciones con nuestra extensa base de datos observacionales, que incluye observaciones de la máxima calidad de una muestra amplia de moléculas azufradas en objetos astronómicos en diferentes estadios evolutivos: nubes moleculares [12, 13], objetos estelares jóvenes [14, 15] y discos protoplanetarios [16, 17].

El éxito de este proyecto requiere un esfuerzo continuo en el desarrollo de técnicas de observación, experimentos de laboratorio, cálculos *'ab initio'* y simulaciones numéricas cada vez más complejas que nos permitan reproducir la realidad con fidelidad. Este esfuerzo solo es posible con un equipo multidisciplinar que trabaje coordinadamente hacia la consecución de los objetivos.

## HACIA EL FUTURO

Gracias a la financiación de la Unión Europea (ERC-AdG-2022 SUL4LIFE), hemos podido crear un equipo multidisciplinar capaz de abordar este ambicioso proyecto. SUL4LIFE se posiciona así en la primera línea de la investigación sobre la química del azufre en el espacio, uniendo observaciones de vanguardia, experimentos de laboratorio y simulaciones teóricas para resolver uno de los mayores misterios de la astrobiología: cómo uno de los elementos esenciales para la vida llegó a formar parte de planetas como la Tierra.

Además, nuestro proyecto se sincroniza perfectamente con el desarrollo instrumental. Combinando las observaciones de ALMA y otros telescopios de alta resolución, como los interferómetros NOEMA y EVLA, podremos abordar algunas de las cuestiones más importantes sobre las primeras etapas de la formación planetaria. Además, el JWST y la futura misión ARIEL de la Agencia Espacial Europea nos proporcionarán conocimientos increíbles sobre la composición química de las atmósferas de muchos exoplanetas.

En conclusión, SUL4LIFE representa un enorme esfuerzo que involucra investigadores de diferentes disciplinas trabajando colaborativamente para investigar la historia del azufre en el cosmos, explorar la evolución este elemento vital durante la formación de las estrellas y revelar cómo se acaba integrando en los mundos donde la vida puede emerger.

## REFERENCIAS

- [1] Canavelli, P., Islam, S., & Powner, M. W., 2019, *Nature*, 571, 546
- [2] Fuente, A., Roueff, E., Le Petit, F., et al., 2024, *A&A*, in press (arXiv:2404.09235)
- [3] Calmonte, U., Altwegg, K., Balsiger, H., et al., 2016, *MNRAS*, 462, S253
- [4] Jiménez-Escobar, A. & Muñoz-Caro, G. M., 2011, *A&A* 536, A91
- [5] Mc Clure, M. K., Rocha, W. R. M., Pontoppidan, K. M., et al., 2023, *Nature Astronomy*, 7, 431
- [6] Endres, C.P., Schlemmer, S., Schilke, P., Stutzki, J., & Müller, H. S. p., *he Cologne Database for Molecular Spectroscopy, CDMS, in the Virtual Atomic and Molecular Data Centre, VAMDC J. Mol. Spectrosc.* 327, 95–104 (2016)
- [7] Boogert, A. C. A., Brewer, K., Brittain, A. et al., 2022, *ApJ*, 941, 32

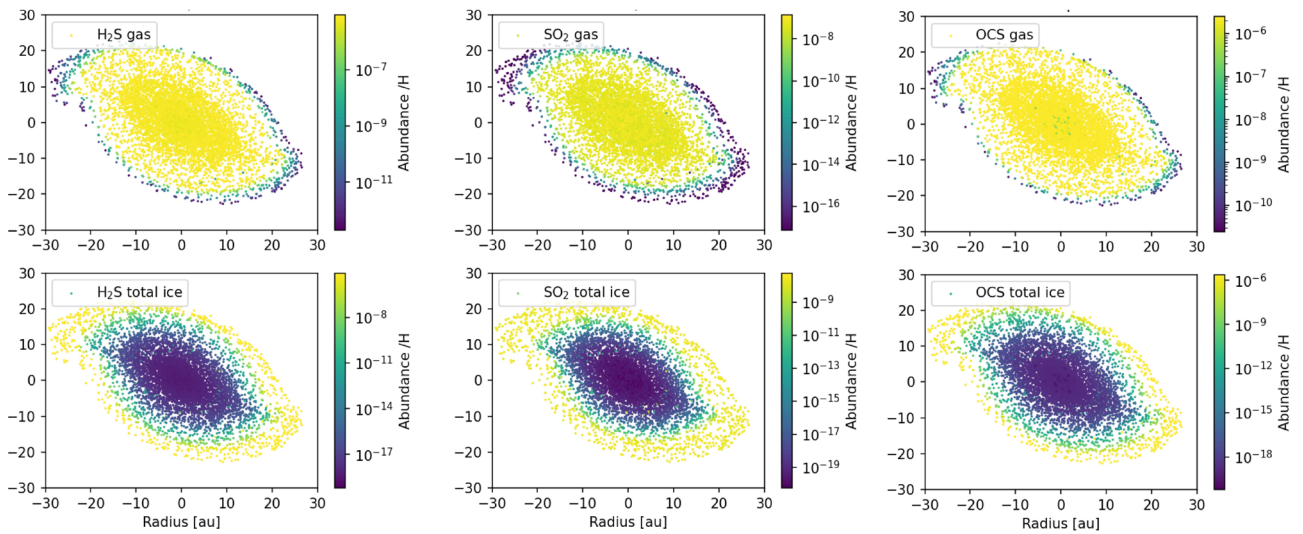


Figura 4. Predicciones de las abundancias de especies azufradas en fase gaseosa y en el hielo en el disco recién formado al inicio de la etapa Clase 0 de la formación de una estrella de masa similar al Sol. Estas predicciones están basadas en simulaciones MHD acopladas a un complejo modelo químico [11]. El azufre que permanece congelado en la superficie de los granos interestelares en las zonas frías de la nube molecular se sublima incorporándose a la fase gaseosa en la zona interna del disco.

- [8] Muñoz-Caro, G. M., Jiménez-Escobar, A., Martín-Gago, J. A., et al. 2010, *A&A*, 522, A108
- [9] Rocha, C. M. R., Roncero, O., Bulut, N., et al., 2023, *A&A*, 677, A41
- [10] Ruaud, M., Wakelam, V., & Hersant, F., 2016, *MNRAS* 459, 4, 3756
- [11] Navarro-Almáida, D., Lebreuilly, U., Hennebelle, P., et al., 2024, *A&A*, in press (arXiv:2403.01905)
- [12] Fuente, A., Navarro, D. G., Caselli, P., et al., 2019, *A&A*, 624, A105
- [13] Rodríguez-Baras, M., Fuente, A., Rivière-Marichalar, P., et al., 2021, *A&A*, 648, A120
- [14] Valdivia-Mena, M. T., Pineda, J. E., Segura-Cox, D. M., et al. 2022, *A&A*, 667, A12
- [15] Esplugues, G., Rodríguez-Baras, M., San Andrés, D., et al., 2023, *A&A*, 678, A199
- [16] Rivière-Marichalar, P., Fuente, A., Esplugues, G., et al., 2022, *A&A*, 665, A61
- [17] Semenov, D., Henning, Th., Guilloteau, S., et al., 2024, *A&A*, in press (arXiv:2402.14653)
- [18] Cazaux, S., Carrascosa, H., Muñoz-Caro, G.M., et al., 2022, *A&A*, 657, A100
- [19] Habart, E., Peeters, E., Berné, O., et al., 2024, *A&A*, 685, A73



Funded by  
the European Union



European Research Council  
Established by the European Commission

# UN ISOTOPÓLOGO DE AMONIACO

Las enanas marrones son objetos con una masa comprendida entre la de un planeta gigante y la de una estrella pequeña (es decir, entre 15 y 75 veces la masa de Júpiter). En este rango de masas, estos objetos no son capaces de mantener la fusión de hidrógeno, como en el caso de una estrella, lo que hace que sean considerados “estrellas fallidas”. El James Webb Space Telescope (JWST) revolucionará el estudio de estos objetos de baja luminosidad, permitiendo el acceso a todo su rango luminoso.



María Morales Calderón  
[mariamc@cab.inta-csic.es](mailto:mariamc@cab.inta-csic.es)



David Barrado  
[barrado@cab.inta-csic.es](mailto:barrado@cab.inta-csic.es)

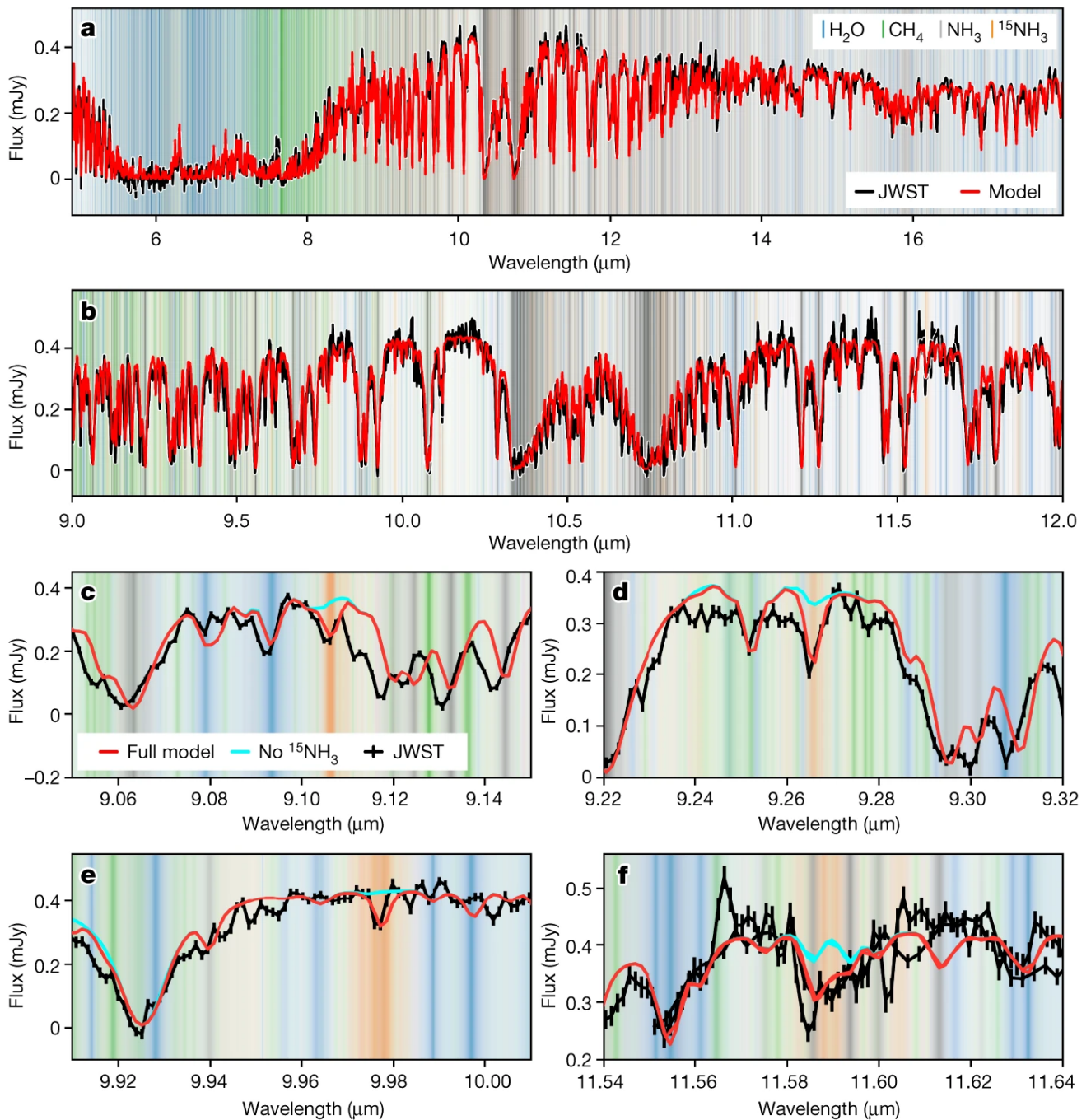
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

La clase más fría de enanas marrones, las denominadas enanas Y, abarca temperaturas de 250 K a 500 K. Sus atmósferas están dominadas por la absorción de agua, metano y amoníaco, mientras que las nubes de agua probablemente adquieren importancia en las enanas Y más frías. Dado que su emisión alcanza su máximo en el infrarrojo medio, más allá de los 4  $\mu\text{m}$ , la caracterización espectroscópica de las enanas Y supone un reto y el número de estudios hasta ahora ha sido muy limitado.

Estos objetos son excelentes laboratorios para estudiar las atmósferas de exoplanetas gigantes en órbitas amplias, ya que ambos comparten procesos físicos y químicos casi idénticos. Comprender el origen de los planetas gigantes gaseosos es un objetivo primordial en la ciencia de exoplanetas, y a menudo se intenta conectar las relaciones de abundancia atmosférica, como la del carbono-oxígeno (C/O), con la formación. Sin embargo, la complejidad de la formación planetaria requiere trazadores adicionales debido a los retos asociados a la interpretación de la razón C/O. Las relaciones isotópicas, como la razón deuterio-hidrógeno y  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ , pueden proporcionar información adicional sobre la formación, de forma similar a su uso en el sistema solar. En el caso de los exoplanetas, sólo existen unos pocos datos sobre  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ , que apuntan a la acreción de hielo rico en  $^{13}\text{C}$  desde más allá de la línea de hielo de CO de los discos. De esta forma las enanas marrones desempeñan un papel único en la búsqueda de isótopos en exoplanetas: probablemente representan el extremo de baja masa de la formación estelar, y sus relaciones isotópicas parecen reflejarlo.

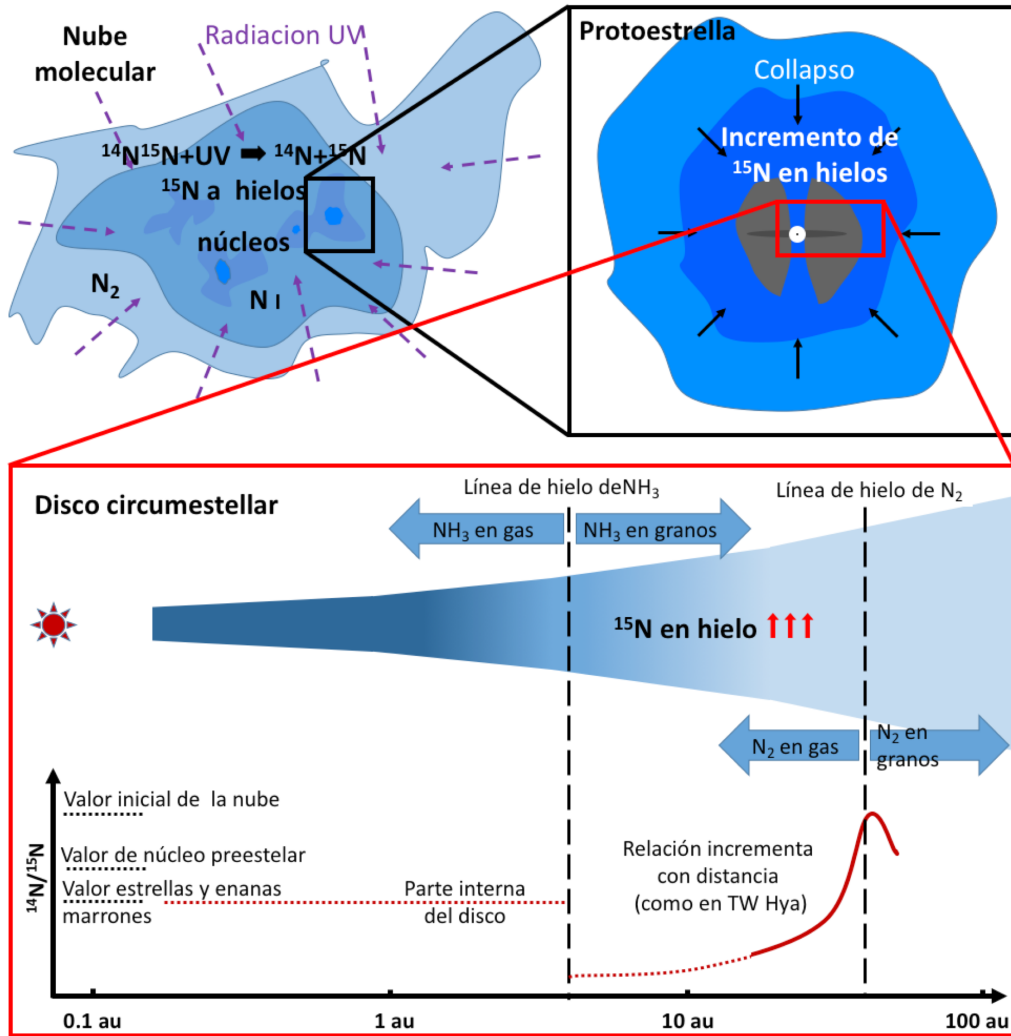
Como parte de un proyecto de GTO (Granted Telescope Observation) hemos utilizado el espectrómetro de resolución media (MRS) del Mid-InfraRed Instrument (MIRI) a bordo del JWST para observar la enana Y WISEP J182831.08+265037.8 (en adelante WISE J1828), con una temperatura efectiva de 380 K. Hemos obtenido un espectro del infrarrojo medio en resoluciones desde 3.000 a 1.500, en el rango entre 4,9 y 27,9  $\mu\text{m}$ . Nuestras observaciones se presentan en la Fig. 1, junto con un modelo óptimo de mejor ajuste de nuestro análisis, y revelan un espectro rico en características moleculares, a saber, una banda ancha de absorción de agua en 5-7  $\mu\text{m}$ , metano en 7,6  $\mu\text{m}$  y amoníaco en 9-13  $\mu\text{m}$ .

# EN LA ATMÓSFERA DE UNA ENANA MARRÓN



Espectro MIRI/MRS y modelo de mejor ajuste de WISE J1828, una enana ultrafría de tipo espectral Y. El segundo panel muestra la banda de absorción de  $\text{NH}_3$  a  $10\ \mu\text{m}$  con más detalle. Las dos filas inferiores muestran líneas individuales del isotópulo del amoníaco  $^{15}\text{NH}_3$  en los datos, incluyendo un modelo de recuperación de mejor ajuste con y sin tener en cuenta la opacidad del  $^{15}\text{NH}_3$ . El panel inferior derecho muestra dos subcanales MIRI MRS superpuestos. Las líneas de color indican las posiciones teóricas de las líneas de absorción de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  y  $^{15}\text{NH}_3$ . Crédito: Barrado et al. (2023).

Fases de formación de estrellas, enanas marrones y planetas, mostrando la relación con el fraccionamiento del amoniac y la evolución de la relación  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  en las siguientes etapas: dentro de una nube molecular con núcleos preestelares, durante la formación de una protoestrella y en un disco circunestelar alrededor de una estrella joven.



Combinando distintos métodos de análisis nuestros resultados indican una atmósfera con una metalicidad solar, pero pobre en C y N. Una causa probable es una desviación del equilibrio químico, donde el gas pobre en  $\text{NH}_3$  y  $\text{CH}_4$  se mezcla desde el interior del objeto. El gas resultante estaría enriquecido en  $\text{N}_2$  y  $\text{CO}$ , a los que nuestras observaciones no son sensibles; mientras que el  $\text{N}_2$  no es espectralmente activo, nuestras longitudes de onda más cortas

son más largas que la ubicación de la banda fundamental del  $\text{CO}$  en  $\sim 4,5 \mu\text{m}$ . Sin embargo, es cuestionable que pueda mezclarse suficiente  $\text{CO}$  de la atmósfera profunda como para cambiar significativamente la relación C/O inferida.

Nuestro valor de la razón  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 670^{+390}_{-211}$  para WISE J1828 es coherente con el solar en un nivel  $1-2\sigma$ . Tanto el Sol como WISE J1828, de los que

deducimos que tienen edades similares, presentan valores de  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  superiores a los observados en el medio interestelar, que ha sido enriquecido en  $^{15}\text{N}$  por la evolución estelar galáctica desde su formación.

La medición del  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  pueden servir como trazador de formación. Por ejemplo, los cometas del sistema solar, componentes fundamentales de la construcción planetaria, están enriquecidos en  $^{15}\text{N}$  en un factor de 2-3 en comparación con el solar, debido al hielo de  $\text{NH}_3$  y  $\text{HCN}$  rico en  $^{15}\text{N}$ . Por el contrario, se cree que el gas  $\text{N}_2$  del disco de acreción solar estaba empobrecido en  $^{15}\text{N}$ . En el sistema solar, tanto Júpiter como Saturno están enriquecidos en nitrógeno, pero muestran valores de  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  similares a los del Sol. Esto puede significar que acrecieron hielo lo suficientemente frío como para contener incluso el volátil hielo de  $\text{N}_2$ , lo que requiere temperaturas menores que 30 K, y corresponde a distancias orbitales mayores que 25 au. Un contenido de nitrógeno enriquecido a través de la acreción de hielo, pero a  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  solares, puede por tanto requerir una acreción cercana a donde incluso el  $\text{N}_2$  altamente volátil pueda condensarse.

La comprensión de cómo se produce realmente el fraccionamiento del nitrógeno es incompleta: en las partes más densas de las nubes se infiere un aumento de  $^{15}\text{N}$  en  $\text{NH}_3$ , siendo un candidato para este fraccionamiento la fotodisociación selectiva de isótopos. Posteriormente, los hielos de  $\text{NH}_3$  y  $\text{HCN}$  se condensan en los cúmulos más fríos, produciendo potencialmente hielo rico en  $^{15}\text{N}$ . Una vez que se forma una protoestrella, existen pruebas de que el  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  disminuye aún más. Se cree que la consecuencia final es un aumento del  $^{15}\text{N}$  en los portadores de nitrógeno menos volátiles, lo que conduce al aumento observado del  $^{15}\text{N}$  en el  $\text{HCN}$  de los discos protoplanetarios y en el  $\text{NH}_3$  y el  $\text{HCN}$  de los cometas del sistema solar. Observamos que los modelos predicen un gas  $\text{NH}_3$  pobre en  $^{15}\text{N}$  en los discos protoplanetarios.

Para evaluar mejor el  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  como trazador de formación, utilizamos en nuestro análisis un modelo simplificado de formación de planetas. Rastreamos el  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  en función de la masa acumulada como material helado y rocoso, para un planeta situado en-

tre la línea de hielo de  $\text{N}_2$  del disco, a unas 20-80 au, y la línea de hielo de  $\text{NH}_3$ , diez veces más cerca. Por tanto, es probable que los hielos estuvieran enriquecidos en  $^{15}\text{N}$ . Encontramos que para enriquecimientos metálicos similares a los de Saturno ( $\sim 6 \times$  solar) el  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  disminuye en un 30-40% cuando se compara con el solar, indicando que el  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  puede variar significativamente cuando se compara con el valor estelar para un planeta que se forma entre las líneas de hielo  $\text{N}_2$  y  $\text{NH}_3$ .

Con la detección de  $^{15}\text{NH}_3$  mostramos que con JWST MIRI un isotópologo sensible a la formación se hace accesible también para objetos con bajas temperaturas efectivas. En el infrarrojo medio, el  $\text{NH}_3$  es un absorbente dominante desde  $T_{\text{eff}} = 1000$  K, hasta al menos 380 K, la temperatura efectiva de WISE J1828. Nuestras mediciones muestran que WISE J1828 probablemente se formó como una estrella, tal y como cabía esperar. Es improbable un fuerte enriquecimiento en hielo y, en consecuencia, descartamos los valores cometarios  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N} < 200$  en más de  $3\sigma$ .

Como se ha demostrado anteriormente,  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$  puede restringir las ubicaciones de formación con respecto a las líneas de hielo de  $\text{NH}_3$  y  $\text{N}_2$  del disco. Esto se suma a las restricciones sobre N/O que permite la detección simultánea de  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$ , que se ha sugerido como otro trazador de formación útil, pero que puede ser difícil de restringir. No obstante, pueden obtenerse restricciones simultáneas de C/O, N/O y  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ , basadas en  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$ , para exoplanetas fríos con imágenes directas, elucidando aún más su historia de formación. Estos planetas se encuentran en órbitas que oscilan entre diez y cientos de au, lo que pone en tela de juicio el paradigma de la formación planetaria por acreción del núcleo. O bien se formaron en sus ubicaciones detectadas a través de una inestabilidad gravitatoria similar a la de una estrella, o bien se originaron más cerca de su estrella a través de la acreción del núcleo y la posterior migración hacia el exterior.

## REFERENCIAS

Barrado, D, et al. (Morales-Calderón incluida), 2023 "15NH3 in the atmosphere of a cool brown dwarf", Nature, volumen 624, número 7991, p. 263-266.

El Universo del bajo brillo superficial se considera la última frontera de la astronomía óptica: objetos con las densidades estelares más bajas, ocultos en los grandes cartografiados del cielo y de los que sabemos muy poco gracias a observaciones más específicas.

Esta disciplina ha ganado 'visibilidad' en los últimos años gracias a su potencial para entender la física que reina en nuestro Universo. Desde la formación y evolución de galaxias y cúmulos de galaxias hasta la naturaleza de la materia oscura, las oportunidades que el estudio de este campo nos depara transformarán cómo vemos y entendemos nuestro Universo.



Mireia Montes Quiles  
ICE-CSIC/IAC  
[mireia.montes@iac.es](mailto:mireia.montes@iac.es)  
[@mireiamontesq](https://www.instagram.com/mireiamontesq)

Acompáñame en un viaje a 1995. Ese año, con un reparado y brillante nuevo telescopio espacial Hubble, el director del Space Telescope Science Institute en aquellos tiempos, Robert Williams, decidió dedicar 100 horas de su tiempo de director a observar una zona del cielo relativamente vacía. Visto desde nuestra perspectiva actual, parece una idea muy obvia. Sin embargo, fue muy criticada y astrónomos del calibre de Bahcall y Lyman Spitzer Jr. se opusieron firmemente. No creían que se pudiera ver mucho más allá de lo que se había visto hasta la fecha y que dedicar tanto tiempo a observar "nada" era muy arriesgado tanto científicamente como políticamente, ya que el telescopio Hubble no tenía muy buena prensa en aquel momento.

Y, sin embargo, la astronomía no sería la misma sin el resultado de ese experimento: el Hubble Deep Field. Vimos, por primera vez, las galaxias más distantes y jóvenes, y pudimos entender mejor la evolución de galaxias. Tanto éxito tuvo, que no tardaron mucho en repetirlo en otros campos: el Hubble Deep Field Sur (el primero era el Norte), el Hubble Ultra Deep Field (Fig. 1) y los Frontier Fields.

Pero las imágenes muy profundas no sólo sirven para revelar galaxias distantes. Cuando tenemos imágenes muy profundas de objetos más cercanos empezamos a ver detalles que sólo pueden verse a muy bajo brillo superficial. De repente, aparecen arcos gigantes alrededor de galaxias, filamentos de polvo de nuestra galaxia inundan la imagen y observamos que el espacio entre galaxias en cúmulos no está tan vacío como pensábamos. Este es el llamado universo de bajo brillo superficial. La última frontera que queda en observaciones en el óptico/infrarrojo cercano. Y, como en el caso del Hubble Deep Field, no mucha gente creía en ello hasta hace relativamente poco.

Este campo abarca varias ramas de la Astronomía como, por ejemplo: el estudio de la luz zodiacal en el sistema solar, estructuras débiles alrededor de estrellas evolucionadas que revelan interiores estelares y los filamentos de polvo de nuestra galaxia (cirros galácticos) para el estudio del medio interestelar. Pero ha sido en astronomía extragaláctica donde este campo ha destacado más, tanto por los resultados obtenidos como en número de investigadores.



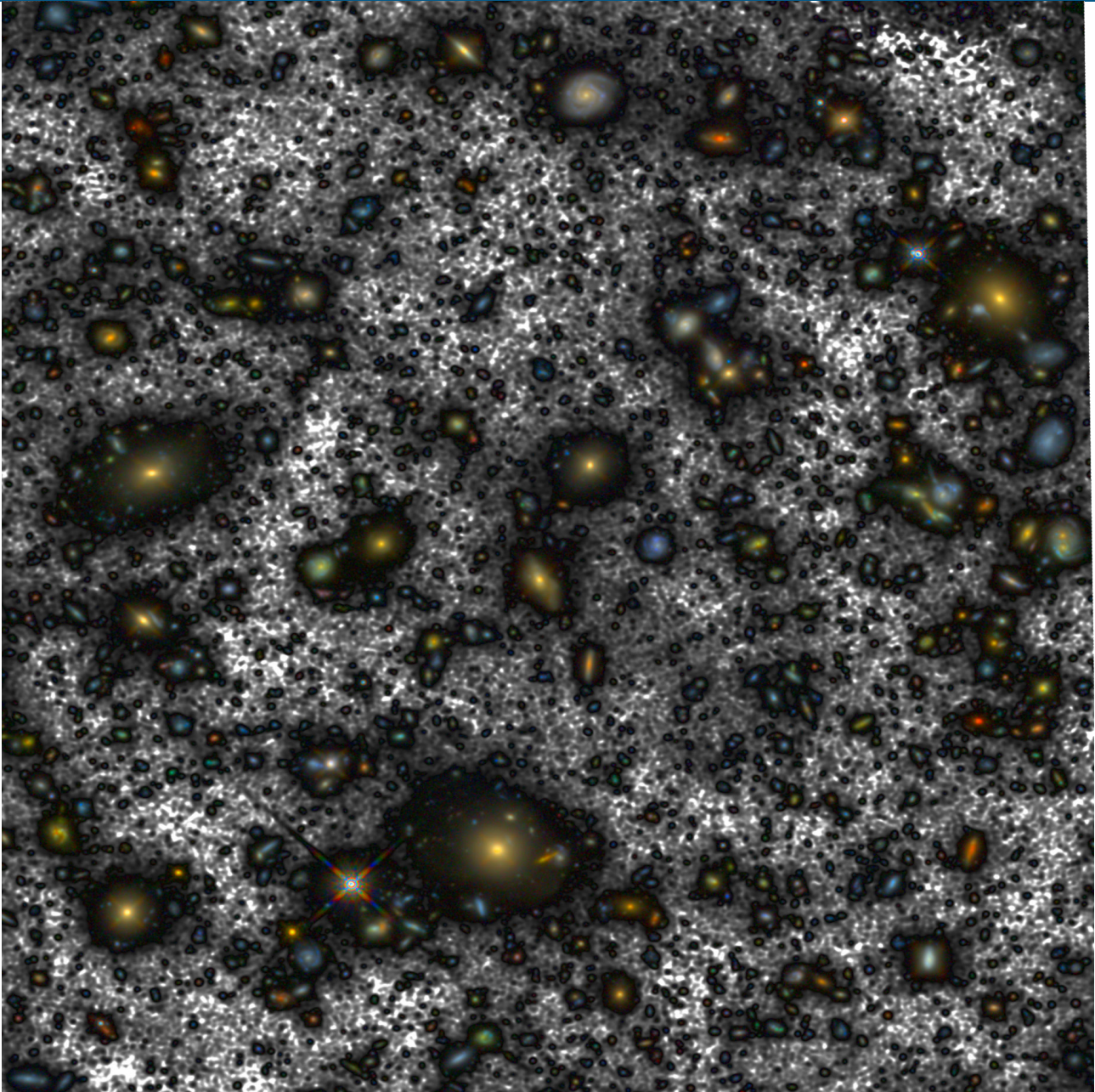


Figura 1. ABYSS: Una nueva visión del Hubble Ultra Deep Field bajo la lente del bajo brillo superficial. Borlaff et al. (2019).

### UN UNIVERSO DE GALAXIAS EXÓTICAS

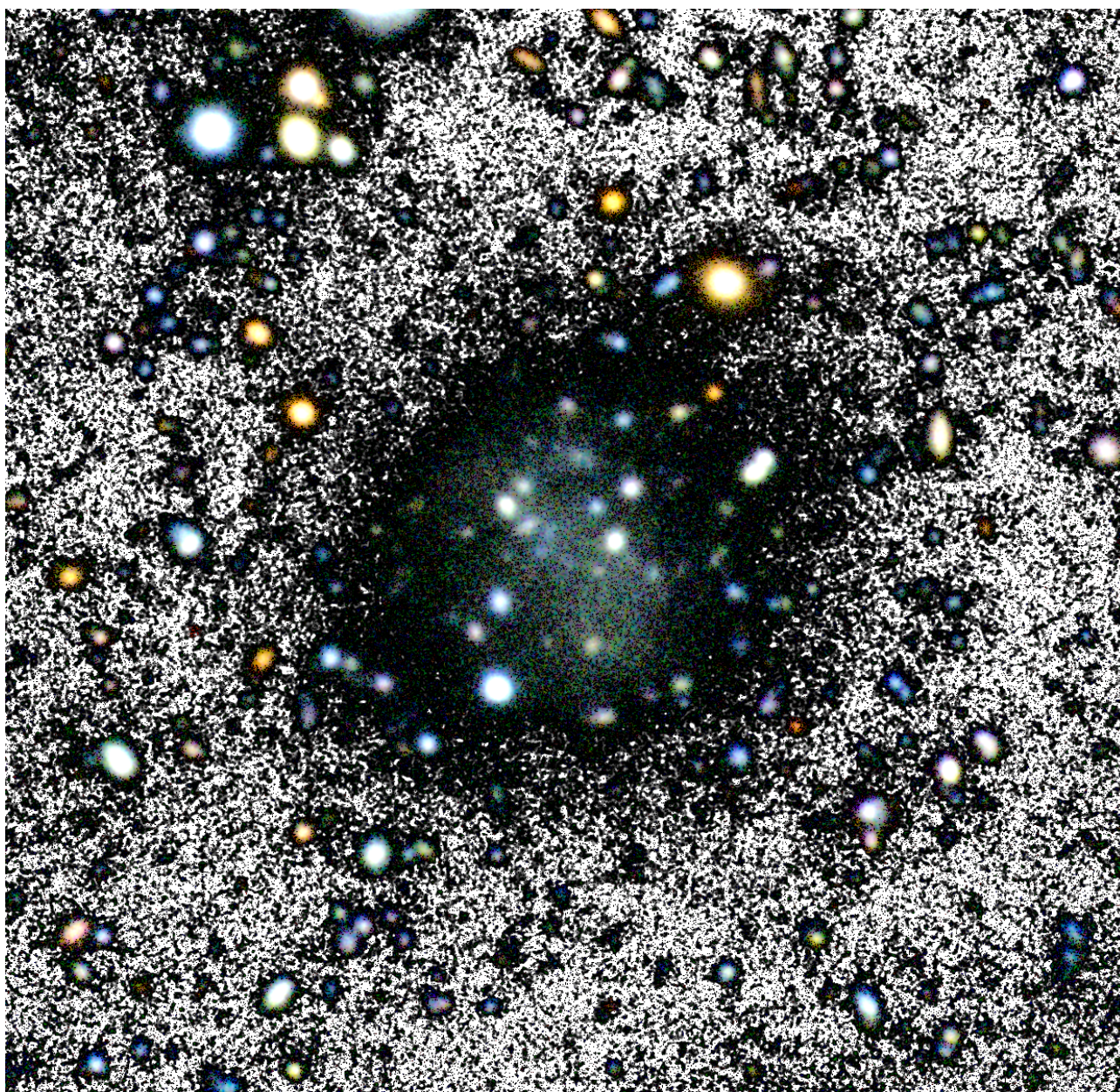
Las galaxias de bajo brillo superficial, galaxias enanas básicamente, son las más numerosas y también las que de forma rutinaria estamos perdiendo en los cartografiados de gran campo. El estudio de estas galaxias, su número y sus propiedades, promete darnos pistas sobre cómo funciona la física de nuestro Universo. Conocer sus propiedades nos da

información sobre su formación, sobre la formación estelar en halos poco masivos y en densidades bajas. Además, éste es el rango de masas donde vemos discrepancias entre el número de galaxias observado y lo que predicen nuestros modelos cosmológicos. ¿No vemos estas galaxias o no están allí? Sólo observaciones profundas de grandes áreas del cielo pueden darnos la respuesta.

Aquí entramos en todo un zoológico de objetos curiosos, extraños, todo un Universo que espera ser descubierto. Como, por ejemplo, galaxias que desafían nuestro entender de lo que es una galaxia. Estas son las llamadas galaxias “oscuras”, objetos compuestos por gas y materia oscura pero muy pocas

estrellas, si acaso alguna, y por lo tanto muy difíciles de encontrar. Un ejemplo de galaxia “casi oscura” está en la Fig. 2. De nuevo, necesitamos observaciones de grandes áreas del cielo para poder buscarlas. ¿Seremos capaces de encontrarlas? ¿Qué otras sorpresas, galaxias curiosas, nos esperan?

Figura 2. La galaxia Nube, una galaxia casi oscura que es diez veces más débil y tres veces más extendida que galaxias de masas similares. Sus propiedades son difíciles de explicar con el modelo cosmológico actual. Montes et al. (2024).



## **GALAXIAS SIN LÍMITE**

Imágenes cada vez más profundas revelan que lo que sabemos de las galaxias viene dado por la profundidad de la imagen que estamos viendo. Su forma, sus propiedades, cambian cuando las analizamos a brillos superficiales cada vez más bajos.

Es difícil saber dónde terminan las galaxias; yendo un poco más profundo vemos que aún siguen apareciendo estrellas. Pero sabemos que existe un límite o borde físico que viene dado por las últimas estrellas que la galaxia es capaz de formar, es decir, la densidad mínima del gas para ser capaz de formar estrellas. Un límite que nos da información importante: su posición viene dada por la fuerza de la gravedad total de la galaxia, es decir, por el halo de materia oscura que la rodea.

¿Y qué hay más allá de ese límite? Es lo que conocemos como el halo estelar, donde quedan registradas todas las interacciones que dan forma a las galaxias. Es ahí donde vemos los majestuosos arcos envolviendo las galaxias, arcos que describen el halo de materia oscura en el que la galaxia habita. Y según las simulaciones, solo estamos viendo la punta del iceberg; nos estamos perdiendo la mayor parte del rico tapiz de estos halos estelares. La cantidad de luz en estos halos nos habla de la historia de la galaxia, de la cantidad de satélites que ha acreetado y, por lo tanto, de la naturaleza de la materia oscura.

## **UNA LUZ FANTASMAL QUE PERMEA EL ESPACIO ENTRE LAS GALAXIAS**

En un Universo en el que solo tenemos unas pocas fotografías de su evolución, el tener un registro de todo lo que ha pasado anteriormente es un bien muy preciado. En cúmulos de galaxias este registro se llama luz intracumular, como podemos ver en la Fig. 3 y 4. La historia pasada del cúmulo está escrita ahí, esperando que la descubramos. Este brillo está formado por estrellas liberadas debido a las interacciones gravitacionales entre galaxias en el cúmulo. Estudiando las características de esta luz, cantidad y color, podemos descubrir cómo ha sido el pasado de los cúmulos y entender la formación de las estructuras más masivas del Universo ligadas por la gravedad. Esta luz también nos ayuda a ver la distribución de materia oscura del cúmulo de galaxias. Forma un velo extendido que habita en las regiones donde la

materia oscura domina. Como una especie de purpurina cósmica que resalta todos los recovecos del cúmulo. La distribución de materia en un cúmulo viene dada por las propiedades de la materia oscura, y tener un trazador luminoso nos asegura poder, por fin, entender esta sustancia tan elusiva.

Nuestros modelos teóricos están calibrados para reproducir sólo lo que hemos podido ver hasta la fecha, y el estudio de objetos de bajo brillo superficial nos permite completar nuestra comprensión de la física de nuestro Universo. Para ello es necesario poder explorar el Universo sistemáticamente a brillos más débiles de 30 mag/arcsec<sup>2</sup> y poder detectar las estructuras más débiles.

## **EL BAJO BRILLO SUPERFICIAL CON MARCA ESPAÑOLA**

Aparte de unos pocos trabajos con placas fotográficas, fue la entrada de cámaras CCD que permitió acceder a estas estructuras de bajo brillo. En los años 2000 empiezan a haber estudios más sistemáticos, pero no es hasta la década pasada, 2010s, que este campo surgió con fuerza y con el nombre propio que merece.

Para estudiar estructuras de bajo brillo superficial no es suficiente con tener imágenes profundas, no. Es necesario saber procesar esas imágenes para exprimir toda la información posible y no introducir sesgos. Todo el trabajo de décadas anteriores, todo ese conocimiento que poco a poco ha ido encajando en una especie de puzzle técnico que es capaz de revelar paisajes cósmicos impensables sólo unos pocos años antes.

Los avances hechos, y los que hay por hacer, tienen una marcada contribución de investigadores españoles. No estaría escribiendo este artículo de no ser por los trabajos pioneros con astrónomos amateur de David Martínez-Delgado. El récord de imagen profunda desde tierra lo ostenta Ignacio Trujillo y el del espacio es de Alejandro S. Borlaff. Y no termina ahí: el primer estudio de colores de cirros en el óptico de Javier Román, las poblaciones estelares de galaxias ultradifusas de Anna Ferré-Mateu, la identificación de bordes de galaxias cercanas de Cristina Martínez-Lombilla y a alto redshift de Fernando Buitrago, fracciones de luz intracumular para identificar cúmulos de galaxias fusionándose de Yolanda Jiménez-Teja y el origen de la luz intracumular y cómo traza la materia oscura de una servidora. Y gente que no he nombrado pero que, sin sus

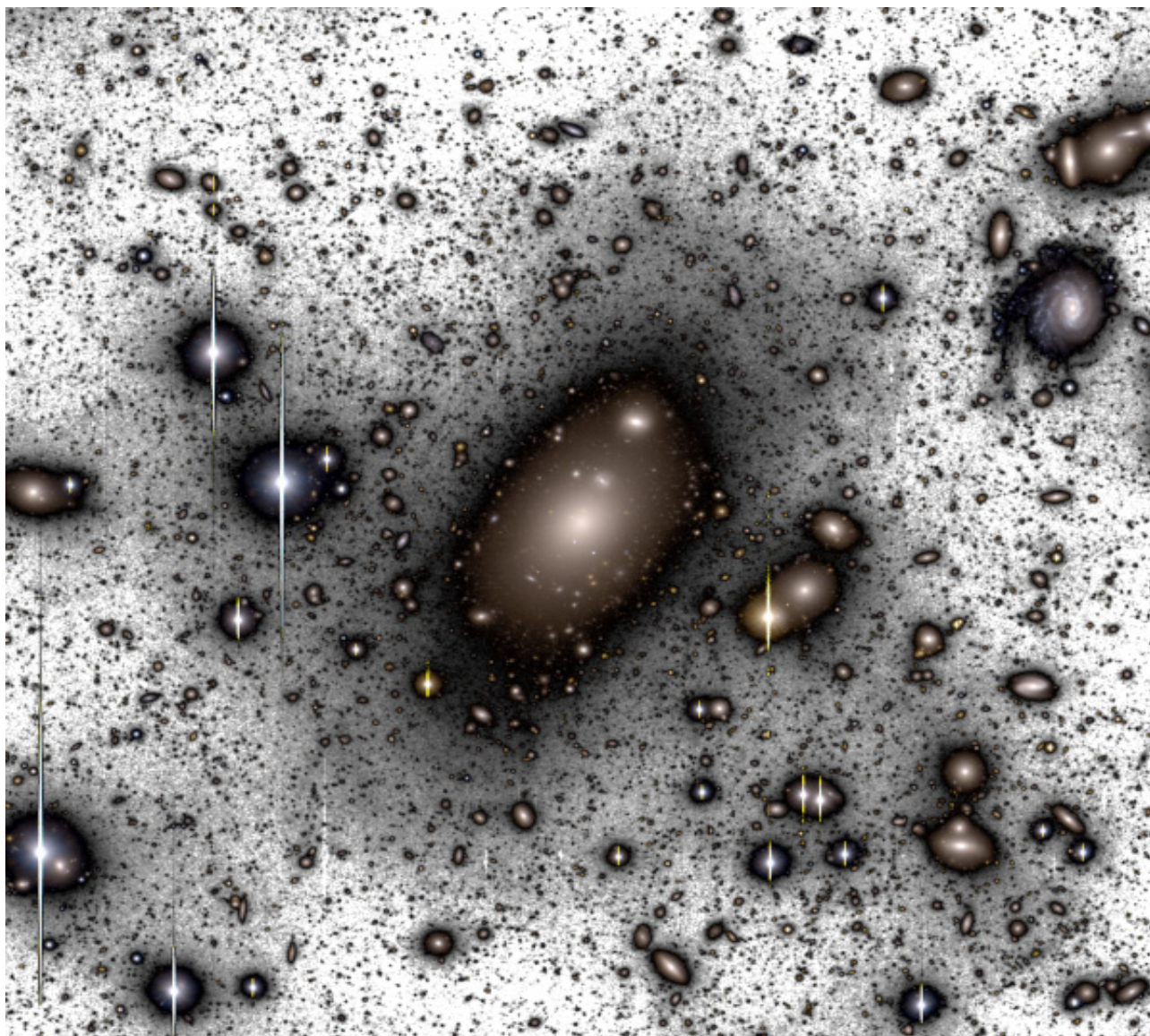


Figura 3. Luz intracumular en el cúmulo de galaxias Abell 85, visto por la Hyper Suprime-Cam del telescopio Subaru. Montes et al. (2021).

habilidades técnicas, todo este trabajo sería imposible. Y los que están por venir. La mayoría investigadores jóvenes, un capital humano que no deberíamos perder.

A pesar de todos estos estudios y de todo el conocimiento que hemos ido ganando con el tiempo, los avances en este campo han sido lentos debido a la escasez de imágenes ultraprofundas y de calidad, cubriendo grandes áreas, necesarias para producir

muestras estadísticamente significativas y homogéneas. Por eso el gran interés que despiertan misiones como Euclid, el telescopio espacial Roman y el cartografiado LSST con el telescopio Vera Rubin. Sin embargo, estos cartografiados no han sido diseñados con el bajo brillo superficial en mente. Por eso mismo, muchos de nosotros trabajamos en varias de ellas, o incluso en las tres, para intentar mejorar el procesado de los datos y preservar la luz difusa que intentamos estudiar.

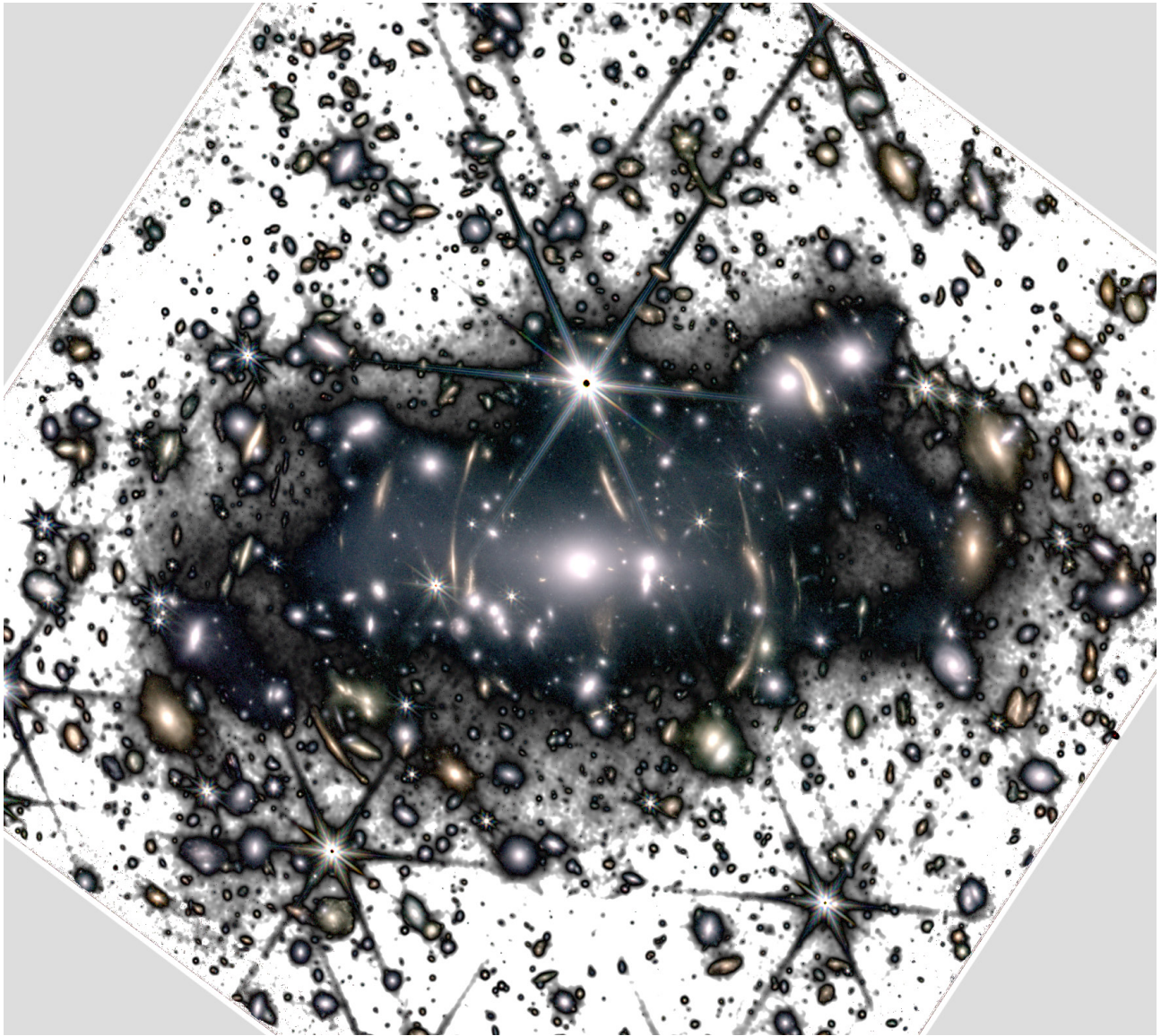


Figura 4. Las primeras imágenes públicas del telescopio espacial James Webb revelan el brillo difuso de la luz intracumular. Montes & Trujillo (2022).

Por supuesto, nuestro ojo derecho es la misión espacial ARRAKIHS, la primera misión liderada por España y dedicada totalmente al estudio del bajo brillo superficial. Por fin, en una misión tenemos la combinación perfecta de: imagen ultraprofunda, una estrategia observacional óptima y un procesado de datos cuidadoso. Gracias a ARRAKIHS, poder entender los halos de galaxias y la función de luminosidad a bajas masas está un poco más cerca.

El Universo del bajo brillo superficial está en la encrucijada entre astrofísica y cosmología. Abre una ventana, aunque entre poca luz, al estudio de la formación y evolución de estructura y la naturaleza última de la materia oscura. En los próximos años, gracias a los nuevos cartografiados ultraprofundos, nuestro conocimiento del Universo se transformará y podremos responder a muchas de las preguntas cuyas respuestas siguen, por ahora, escondidas en las sombras.

# LA ASTROFÍSICA COMPUTACIONAL EN ESPAÑA:

En este artículo pretendemos dar una visión global de la situación en España en relación con la Astrofísica/Cosmología computacional, entendida ésta como el área de investigación donde la herramienta principal es la realización y análisis de simulaciones numéricas de objetos astrofísicos individuales, o del Universo en su conjunto. No hemos pretendido hacer una revisión exhaustiva de los resultados científicos derivados de las simulaciones, sino más bien exponer las líneas principales de investigación, basándonos en el uso por parte de los grupos españoles de las infraestructuras de supercomputación de altas prestaciones (HPC) accesibles a nivel estatal y europeo. Para ello hemos recopilado a partir de datos públicos, los tiempos de computación concedidos por los diferentes Comités de Acceso a proyectos liderados por investigadores afiliados a cualquier universidad o instituto de investigación científica española.



**Gustavo Yepes**

Universidad Autónoma de Madrid  
*gustavo.yepes@uam.es*

**Claudio Dalla Vecchia**

Instituto de Astrofísica de Canarias  
*caius@iac.es*

## INTRODUCCIÓN

La Astrofísica es una ciencia puramente observacional, donde el objeto de estudio no puede ser manipulado. Por tanto, es difícil poder realizar experimentos para poner a prueba las predicciones de las teorías físicas que intentan explicar los mecanismos responsables de la formación y evolución de los diferentes sistemas astrofísicos, incluido el Universo en su conjunto.

Gracias al enorme avance de los sistemas de computación, en Astrofísica, como muchas otras ramas de la ciencia que comparten con ella la imposibilidad de realizar experimentos, es ahora factible construir laboratorios virtuales donde se pueden testar las diferentes teorías.

El campo de aplicación de la simulación numérica en Astrofísica es enorme, precisamente por la razón anteriormente expuesta. Abarca desde la simulación del movimiento de objetos en el Sistema Solar, la dinámica de la atmósfera solar y de los planetas, la formación y evolución de estrellas en nubes moleculares, y su relación con el medio interestelar, la dinámica de sistemas binarios de estrellas de neutrones y agujeros negros que producen ondas gravitacionales, los procesos de formación y evolución de galaxias y cúmulos de galaxias, y la formación y evolución de la estructura a gran escala en el Universo.

Todos estos ejemplos astrofísicos requieren de la modelización de diferentes procesos físicos que actúan simultáneamente entre las diversas componentes del sistema que se pretende estudiar: fenómenos hidrodinámicos de la componente gaseosa, o magneto hidrodinámicos en el caso de plasmas, fenómenos radiativos debido a las transiciones atómicas, reacciones nucleares en interiores estelares, interacción entre materia bariónica y radiación, efectos debido a la presencia de materia y energía oscuras a grandes escalas, radiación de ondas gravitacionales por coalescencia de estrellas o agujeros negros, etc.

Cada uno de estos fenómenos ocurre en escalas espacio-temporales que pueden variar en varios ordenes de magnitud. Es por ello que, al igual que ocurre en otras áreas de investigación con la misma problemática (por ejemplo, en meteorología o climatología), hay que realizar aproximaciones para tener en cuenta aquellos efectos debido a los fenómenos que ocurren en escalas por debajo de la resolución

máxima que se puede alcanzar en la simulación y que depende sobre todo de las capacidades computacionales del sistema informático donde se vaya a realizar. A mayor capacidad computacional, mejores resoluciones espacio-temporales se pueden conseguir y, por tanto, menos aproximaciones a la física del sistema se necesitan, con lo que los resultados son más realistas. Sin embargo, con mejores resoluciones más fenómenos físicos, que antes se aproximaban en un conjunto macroscópico, se tienen que modelar en detalle. En este sentido, la Astrofísica computacional ha sido una de las áreas de investigación que ha necesitado siempre de los sistemas de supercomputación más potentes en cada época. En consecuencia, dada esta fuerte interrelación entre el acceso a los grandes recursos computacionales y la generación de simulaciones realistas de diferentes problemas astrofísicos, el desarrollo de grupos de investigación competitivos está condicionado a la disponibilidad de acceso a estas infraestructuras.

En España, la infraestructura de supercomputación era bastante limitada hasta la instalación por IBM del superordenador *MareNostrum* en Barcelona en el año 2004. Previo a esa fecha, los pocos grupos que se dedicaban a la simulación astrofísica debían ingeniárselas para conseguir acceso a recursos de computación fundamentalmente de centros extranjeros, mediante colaboraciones con otros grupos que sí que tenían posibilidad de pedir tiempo de computación en los centros de datos de países como EE.UU., Alemania, Francia, Reino Unido, o Italia. En España había ciertas infraestructuras de computación en Universidades, centros de investigación, y algunas empresas de alta tecnología, si bien no existía una política de acceso bien definida. Había que llamar a muchas puertas para conseguir acceso a ellas, muchas veces sin éxito. Por contraposición, si nos fijamos en la Astrofísica observacional en España, ésta tuvo un desarrollo vertiginoso debido a la instalación de grandes infraestructuras de telescopios de Canarias, Calar Alto, etc., que permitió disponer de tiempo de observación garantizado para desarrollar proyecto de investigación liderados por grupos españoles.

La situación para los astrofísicos computacionales españoles cambió radicalmente en 2004 con la creación de un centro español de supercomputación y la instalación por parte de IBM del mayor supercomputador europeo de aquella época.

## LA INSTALACIÓN DE MARENOSTRUM Y LA CREACIÓN DE LA RES

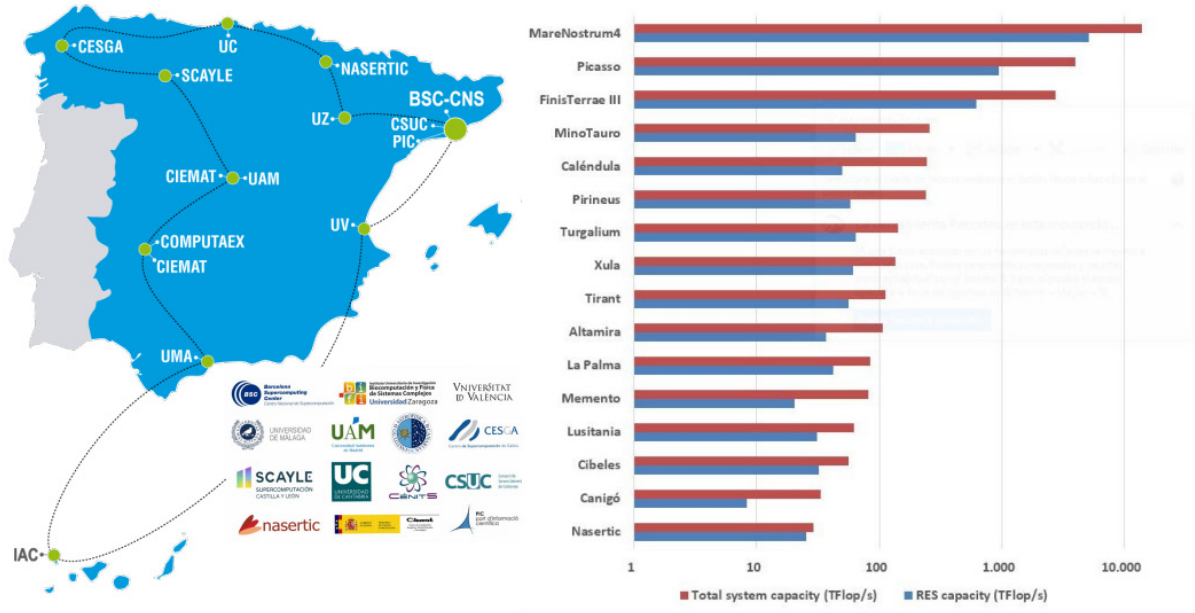
El precursor del *Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS) fue el Centro de Paralelismo de Barcelona (CEPBA), un centro asociado a la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) que desde 1991 prestaba servicios a los distintos departamentos de la universidad.

En el año 2000 el CEPBA firmó un acuerdo con IBM de cuatro años de duración para crear un instituto de investigación, que se llamó CIRI y, en 2004, el acuerdo entre IBM y el CEPBA es ampliado por iniciativa del Ministerio de Educación y Ciencia, la Generalitat de Catalunya y la UPC creando el BSC-CNS. En abril del año siguiente inician sus actividades con el supercomputador *MareNostrum*, el de más capacidad de cálculo de toda Europa en aquel momento y cuarto a nivel mundial.

En el año 2006 se produce una actualización del *MareNostrum* que dobla su capacidad y continúa ostentando el primer puesto de Europa. En el mismo año se amplió el supercomputador *MAGERIT* perteneciente al CeSViMa (*Centro de Supercomputación y Visualización de Madrid*) y dependiente de la Universidad Politécnica de Madrid, conformando los dos primeros nodos de la *Red Española de Supercomputación* (RES), bajo la coordinación del BSC (<https://www.res.es>).

A lo largo del año 2007 entran en funcionamiento los distintos nodos de la RES que se crean a partir de la actualización del supercomputador *MareNostrum*, incrementando los recursos de cómputo ofertados por la RES. Al día de hoy, la RES está compuesta de 15 nodos de 14 instituciones, sumando una capacidad de cálculo de más de 20 petaflops, previo a la puesta en producción de *MareNostrum-5*, del que hablaremos más adelante

Todos los nodos de la RES tienen la característica que son sistemas basados en procesadores INTEL, o AMD, multinúcleos y unidos por una red de alta velocidad y baja latencia. En este sentido, cada uno de los nodos RES pueden ser utilizados de forma casi transparente por una gran variedad de códigos numéricos con la condición de que estén paralelizados, usando MPI o bien MPI + OpenMP.



Total RES capacity 20 PFLOPS

Figura 1. Composición actual de la Red Española de Supercomputación.

En septiembre de 2011 se añade al BSC, *MINOTAURO*, el primer superordenador basado en aceleradores gráficos (GPUs) de NVIDIA fabricado por Bull y en noviembre de ese año el BSC alcanza un acuerdo con Intel por el cual establecen en conjunto un laboratorio I+D sobre los problemas de escalabilidad y programación que puedan surgir en supercomputadores a la escala exaflop (1000 petaflops o 1.000.000 teraflops).

El BSC-CNS ha llegado también a un acuerdo con NVIDIA para construir un superordenador basado en arquitectura ARM de bajo consumo energético con aceleradores NVIDIA Tesla, bajo el proyecto llamado *Mont-Blanc*.

El BSC gestiona el superordenador *MareNostrum* desde su instalación en la capilla de la Universidad Politécnica de Cataluña en 2004. Hasta el momento se han instalado cinco versiones, la penúltima de ellas, *MareNostrum-4*, entró en funcionamiento en junio de 2017 y la última versión, *MareNostrum-5*,

ha entrado en producción recientemente, en marzo de 2024. Las versiones anteriores de *MareNostrum* no han desaparecido. Siguen funcionando de forma fraccionada en diversos nodos de la RES, dando servicio a las necesidades de los usuarios locales de los nodos y contribuyendo a la oferta de horas de supercomputación de la RES en su conjunto.

En la actualidad, la RES es una de las Infraestructuras Científica-Técnica Singular (ICTS) en España, y la única relacionada con la computación de altas prestaciones.

El acceso a los recursos de la RES se realiza a través de una convocatoria abierta todo el año, con tres resoluciones anuales. Los grupos de investigación de cualquier disciplina científica que realicen su trabajo en universidades y centros públicos en España pueden solicitar recursos a la RES, si bien el acceso está abierto a solicitantes de centros de otros países. Para facilitar la selección de las propuestas que obtiene tiempo de computación, existe



un Comité de Acceso compuesto por cuatro miembros que ocupan el cargo por un periodo máximo de cuatro años. Este Comité de Acceso está asesorado de dos *Paneles de Expertos*:

- El *Panel Técnico*. Los nodos de la RES nombran a los miembros de este panel, que es el responsable de realizar la evaluación de las solicitudes desde el punto de vista técnico.
- El *Panel Científico*. Está formado por científicos reconocidos a nivel internacional y externos a la RES que se divide en seis áreas científicas:
  - Astronomía, Espacio y Ciencias de la Tierra (AECT)
  - Biología y Ciencias de la Vida (BCV)
  - Física (FI)
  - Ingeniería y Matemáticas (IM)
  - Química Homogénea (QH)
  - Química Heterogénea y de Sólidos (QHS)

Cada solicitante tiene que elegir el área científica que se mejor se ajuste su propuesta. Todas las solicitudes de cada área son evaluadas, al menos, por dos revisores del área correspondiente. Por cada área se nombra uno o dos coordinadores que son los encargados de distribuir las solicitudes entre el panel de revisores de cada área y que se encargan de compilar los informes y puntuaciones obtenidas por cada solicitud y elaboran la lista priorizada de solicitudes que es luego enviada al Comité de Acceso para decidir el listado final de actividades aceptadas y las horas de cálculo asignadas a cada una de ella, según las horas de cómputo disponibles.

En el ámbito que nos concierne de Astronomía, compartimos un mismo panel con Espacio y Ciencias de la Tierra. La distribución de recursos entre las distintas áreas científicas de la RES depende de la calidad de las solicitudes enviadas. En este sentido, tenemos que presumir que en el área de AECT, a pesar que el número de investigadores es considerablemente menor que en otras áreas como Química, Física, o Biología, tenemos un éxito considerable en la consecución de recursos.

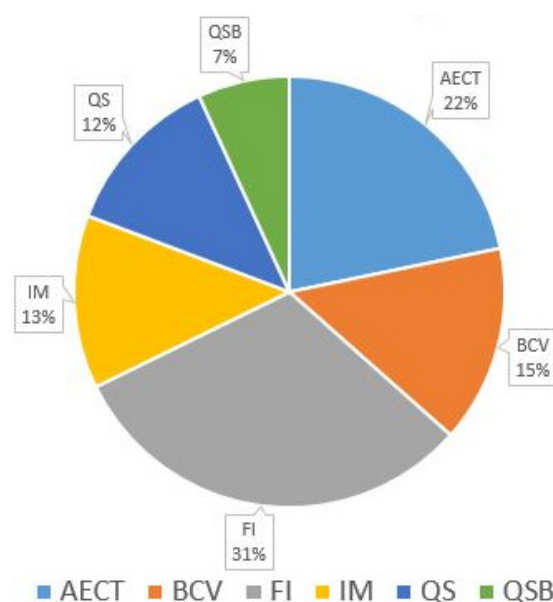


Figura 2. Distribución de horas asignadas en 2020 a las diferentes disciplinas científicas.

En la Figura 2, tomada de la página web de la RES, se representa la distribución de los recursos por áreas para el año 2020. Como se puede ver, el área de AECT consiguió casi un tercio de todos los recursos de la RES, a pesar de que 2020 fue el año de la pandemia de COVID y que se priorizaban los proyectos de Biología relacionados con la misma. En general, esta tendencia se ha mantenido más o menos constante a lo largo de los años.

Nos centraremos ahora en analizar en detalle el uso de los recursos de la RES por parte de la comunidad de Astrofísica computacional en España. Para ellos hemos recopilado los datos sobre los proyectos que han conseguido recursos de la RES dentro del periodo comprendido entre 2015 y 2023 y que estaban relacionados con algún tema de Astrofísica/Cosmología computacional y cuyo investigador principal desarrollaba su labor investigadora en cualquier institución científica española.

De esta base de datos hemos realizado diferentes estudios estadísticos. En primer lugar, hemos querido identificar cuáles son los temas científicos donde se han

concedido más horas de supercomputación (ver Figura 3). Seguidamente, queríamos saber cómo se han distribuido esos recursos entre los diferentes nodos de la RES (ver Figura 4) y finalmente hemos representado también la asignación de recursos por institución del investigador principal de los proyectos (Figura 5).

**Distribución de recursos de RES por temas científicos**

En primer lugar, para simplificar las cosas, hemos clasificado los proyectos en los siguientes temas científicos:

- **Cosmología:**
  - Simulaciones N-cuerpos de gran volumen para estudio de estructura a larga escala. Aplicaciones para surveys de galaxias.
- **Galaxias:**
  - Simulaciones de formación de galaxias a diferentes épocas cosmológicas en general y modelado de la formación de la Vía Láctea y el Universo Local.
- **Medio Interestelar**
  - Simulaciones del medio interestelar, turbulencia, evolución química.
- **Física Estelar**
  - Simulaciones de formación estelar en nubes moleculares y modelización de últimos estadios de evolución estelar.
- **Ondas Gravitacionales**
  - Modelado de la emisión de ondas gravitacionales en coalescencia de estrellas de neutrones o agujeros negros de cara a su uso por colaboraciones internacionales LIGO /VIRGO.
- **Astrofísica Relativista**
  - Simulaciones magneto-hidrodinámicas (MHD) de fluidos relativistas y en entornos de alto campo gravitatorio (agujeros negros, estrellas de neutrones).
- **Física Solar**
  - Simulaciones magneto-hidrodinámicas de plasmas en la atmósfera solar.
- **Gaia**
  - Reducción de datos del satélite *Gaia*.
- **Planetas**
  - Simulaciones de atmósferas planetarias (Marte, Jupiter, Saturno).
- **Espacio**
  - Simulaciones de turbulencia en fluidos.

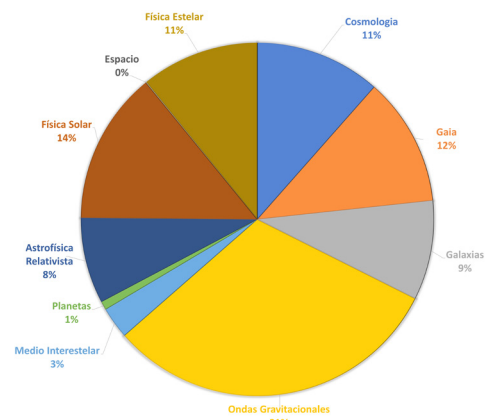


Figura 3. Distribución del tiempo de la RES por áreas (2015-2023).

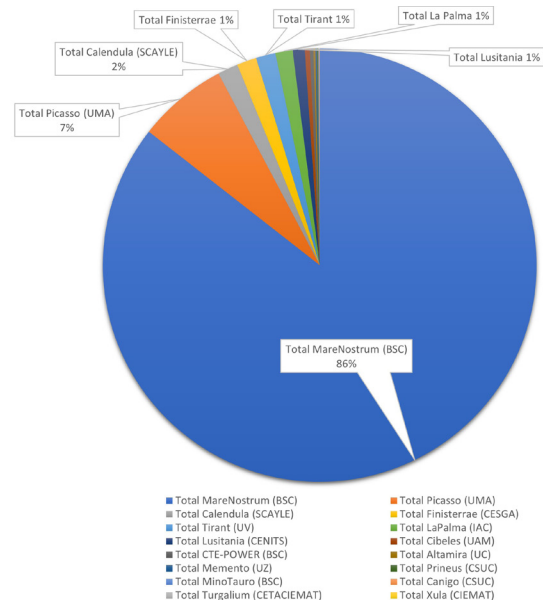


Figura 4. Distribución de tiempo de máquinas por áreas (2015-2023).

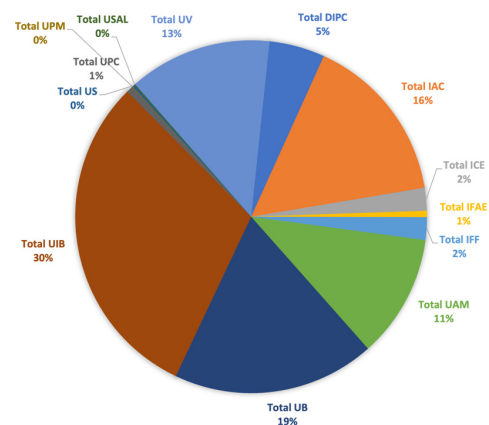


Figura 5. Distribución de tiempo por institución (2015-2023).

En total, dentro del periodo analizado, el número de horas computacionales asignados a los proyectos de Astrofísica fueron **565 millones**. La fracción de horas asignadas a los proyectos englobados en los temas científicos arriba indicados están representados en el diagrama de la Figura 3. Como se puede comprobar, el campo que domina en el consumo de recursos computacionales (más de un tercio) es el de la simulación de la generación de ondas gravitacionales a partir de fenómenos de coalescencia de agujeros negros y/o estrellas de neutrones. Es evidente que el descubrimiento de la primera señal de onda gravitacional por las colaboraciones LIGO /VIRGO, anunciado el 11 de septiembre de 2016, supuso una enorme necesidad de disponer de *templates* de producción de ondas gravitatorias durante el proceso de coalescencia de objetos estelares compactos. Para ello es necesario realizar simulaciones detalladas de este proceso descrito por las ecuaciones de Einstein de la Relatividad General. El grupo de Sacha Husa de la UIB ha venido desarrollando este tipo de simulaciones en la RES desde 2015 y los resultados obtenidos son fundamentales para la identificación del origen de los distintos eventos detectados por la colaboración LIGO.

En segundo lugar, con un 14% del tiempo asignado se encuentran los proyectos relacionados con simulaciones magneto-hidrodinámicas de plasmas en la atmósfera solar. En este tema, los grupos del IAC con Fernando Moreno Insertis, Elena Khomenko y Javier Trujillo han sido los más activos.

A continuación, hay una distribución más o menos similar de recursos de HPC entre Cosmología (12%), Gaia (12%), Física Estelar (11%) y Galaxias (9%).

En el tema de *Cosmología*, hemos recopilado todos aquellos proyectos que utilizan grandes recursos computacionales para simular la formación de estructuras en grandes volúmenes cosmológicos, principalmente, mediante métodos de N-cuerpos en diferentes modelos cosmológicos, aunque también hay simulaciones hidrodinámicas de formación de galaxias y de tipo zoom que se focalizan en regiones alrededor de cúmulos de galaxias. Una parte considerable de los resultados numéricos derivados de los proyectos RES en este campo han sido utilizados exhaustivamente por la comunidad internacional, tanto

«Gracias a la creación de estructuras como RES y PRACE, que agrupan recursos computacionales de diferente capacidad, los investigadores que requerimos de acceso a estos sistemas podemos elegir aquel que más de adecue al problema que queremos tratar.»

«La comunidad de Astrofísica/Cosmología computacional en España ha alcanzado una posición muy competitiva, gracias en parte al haber dispuesto de acceso a grandes recursos computacionales, tanto a nivel estatal, a través de la RES, como europeo por medio de los consorcios PRACE y EuroHPC.»

por investigadores y grupos individuales, como por las grandes colaboraciones que se encargan de desarrollar los cartografiados galácticos (BOSS, eBOSS, DES, DESI, Euclid, JPAS, etc). Los grupos más activos en este campo son los de la UAM (G. Yepes), UB (P. Fosalba), DIPC (R. Angulo) o IAA (F Prada).

En cuanto al tema *Gaia*, hay que hacer una mención especial, ya que los proyectos relacionados con este campo son exclusivamente dedicados al análisis de los datos provenientes del satélite *Gaia* por parte del grupo de la Universidad de Barcelona que colabora en esta misión espacial. Es sin duda el grupo más longevo en solicitar recursos de la RES desde su fundación, primero liderado por el recordado profesor Jordi Torra, y posteriormente por Xavier Luri. Sin duda, el enorme éxito de la misión *Gaia* y su excelente base de datos tienen mucho que agradecer a los recursos computacionales garantizados por la RES a este proyecto.

En cuanto al tema de *Física Estelar*, aquí hemos incluido aquellos proyectos que tienen que ver tanto con la simulación de procesos de formación estelar en nubes moleculares, como con el modelado numérico de los últimos estadios del colapso estelar previo a la explosión como supernovas. En este campo los grupos más activos con diferencia han sido los dirigidos por Paolo Padoan de la Universidad de Barcelona y Martin Obergaulinger y Miguel Ángel Aloy de la Universidad de Valencia.

En cuanto al tema de *Galaxias*, hay una variedad de grupos que han obtenido recursos para realizar simulaciones hidrodinámicas de formación de galaxias a nivel cosmológico, o bien focalizadas en la dinámica de la Vía Láctea y el Universo Local. Los grupos que más recursos RES han utilizado para estos temas son los del IAC (C. Dalla Vecchia, I. Alonso), Universidad de Sevilla (J. Oñorbe), UAM (D. Ceverino, W. Cui) y UB (C. Laporte).

El resto de temas, *Planetas* y *Medio Interestelar*, han tenido un uso más moderado de los recursos de RES, con menos del 5%. En el caso de Planetas, ha habido únicamente cuatro proyectos aprobados en el periodo analizado, todos ellos relacionados con simulaciones de la atmósfera de Júpiter (E. García-Melendo), Saturno (M. Soria) y extrasolares (D. Vigano). En Me-

dio Interestelar, los proyectos que han utilizado recursos de RES están directamente relacionados con la simulación mediante métodos de química cuántica de procesos que generan moléculas complejas en el medio interestelar. El investigador Octavio Ronceiro del CSIC es el investigador con mayor número de proyectos aprobados en esta línea.

Una conclusión que se desprende del análisis anterior por temas científicos es el gran uso de la infraestructura de supercomputación de la RES por parte de la comunidad astrofísica española en prácticamente todas áreas de investigación, desde las más grandes escalas cosmológicas hasta la modelización de las atmósferas planetarias. Esto es debido en gran medida a las posibilidades que ofrece la RES de acceder a diferente tipo de hardware en base a las necesidades computacionales del problema a resolver. Esto permite que proyectos con diferentes necesidades de HPC puedan ser ejecutados en el nodo RES más adaptado a sus necesidades, optimizando así los recursos asignados. No siempre el nodo con mayor capacidad de cálculo es el más útil para llevar a cabo un proyecto que requiere de un número moderado de procesadores o necesita mucha memoria por procesador. En general en HPC, la distribución de trabajos a ejecutar se comporta cómo las funciones de masa o luminosidad de galaxias o estrellas. Esto es, cuantos menos procesadores necesita una simulación, mayor número de ejecuciones se requieren. A mayor necesidad de recursos, menos número de ejecuciones. En este sentido, es necesario priorizar aquellos trabajos que requieren de acceso a los supercomputadores con mayor capacidad frente a los que necesitan menos recursos que pueden ser ejecutados en máquinas más pequeñas.

Para darnos una idea de cómo los investigadores utilizan el hardware gestionado por la RES, hemos hecho también un análisis sobre la utilización de las diferentes máquinas RES por parte de todos los proyectos del área de Astrofísica y Cosmología computacional.

### **Distribución de tiempo de proyectos de Astrofísica en nodos de la RES**

En la Figura 4 representamos la fracción de tiempo por máquina de la RES. Como es evidente, *MareNostrum* del BSC, con el 86% del total, es la infraestructura más solicitada por los proyectos de Astrofísica dada su alta capacidad de computación y el que mayor número de

horas computacionales aporta al total de recursos de la RES. Por detrás están el resto de nodos con máquinas menos potentes, pero de arquitecturas similares a *MareNostrum*, donde la mayoría de los códigos numéricos utilizados pueden ser ejecutados de forma similar en modo de paralelismo híbrido (MPI + OpenMP). En este sentido es hacer notar la relativa poca ocupación que tiene el superordenador Finisferre del CESGA a pesar de ser único en la RES en cuanto a la alta capacidad de memoria RAM por núcleo que dispone en los nodos de cálculo, y que son de especial interés para muchos códigos de simulación, donde este factor es muy importante.

### **Distribución de tiempo de proyectos de Astrofísica por Institución**

Por último, en la Figura 5 representamos la fracción de horas computacionales asignadas por la RES en función de la institución española donde el IP de cada proyecto tiene su afiliación.

Aquí se puede ver cómo hay una institución que destaca en cuanto al tiempo obtenido y es la Universidad de las Islas Baleares, con casi un tercio de los recursos. Esto es así por el hecho de que el grupo que se dedica a simulaciones de *templates* de ondas gravitacionales, liderado por Sasha Husa, está ubicado en esta Universidad. Como se ve en el gráfico de la Figura 4, este tema de investigación ha sido también el que más recursos ha utilizado, dada su importancia para las colaboraciones de LIGO/VIRGO. A continuación, le sigue la Universidad de Barcelona con un 19% de recursos, fundamentalmente debido a que allí está localizado el grupo que participa en el satélite Gaia y que se ha encargado en gran medida del análisis de datos del satélite en *MareNostrum*. Estas dos instituciones han usado prácticamente el 50% del total de horas asignadas por RES a proyectos de Astrofísica en el periodo analizado. El otro 50% restante se divide principalmente entre tres instituciones: El IAC con 16%, la Universidad de Valencia con el 13% y la Universidad Autónoma de Madrid con el 11%. El 10% restantes se lo distribuyen entre institutos públicos de investigación como el Donostia International Physics Center (5%) y varios institutos del CSIC: el Instituto de Ciencias Espaciales (ICE, 2%) el Instituto de Física Fundamental (IFF, 2%), Instituto de Física de Altas Energías (IFAE, 1%). En porcentajes menores del 1% aparecen también las Universidades Politécnicas de Madrid y de Cataluña, así como la Universidad de Sevilla y la de Salamanca.

Una conclusión que se desprende de este gráfico es la gran diferencia entre los recursos utilizados por grupos de investigación en Universidades (~75%) frente a aquellos que se encuentran realizando su labor en institutos de investigación no universitarios (~25%). Esto nos lleva a concluir que la Astrofísica computacional en España se ha venido realizando sobre todo en departamentos universitarios donde los recursos financieros son mucho menores que en los institutos de investigación con lo que se ha priorizado la simulación numérica, mucho menos costosa si se dispone de acceso a las infraestructuras de supercomputación como RES.

Por último, también es interesante fijarse en los temas científicos prioritarios en aquellas instituciones con más de un 10% de cuota de tiempo en RES. Como ya hemos mencionado, la UIB se focaliza casi exclusivamente en el tema de Ondas gravitacionales, mientras que la UB esta fundamentalmente involucrada en el análisis de datos de Gaia. Así mismo, en el IAC domina históricamente los proyectos de Física Solar. Mientras que la UAM tiene también una larga tradición en el tema de las simulaciones cosmológicas y de formación de galaxias. Por último, la Universidad de Valencia domina claramente el tema de Astrofísica Relativista y Física Estelar. En cuanto al resto de Universidades y Centros de investigación, los temas científicos están más dispersos.

### **PRACE COMO MOTOR DE LA SUPERCOMPUTACIÓN EN EUROPA**

El "*Partnership for Advanced Computing in Europe*" (PRACE, <https://prace-ri.eu>) es una organización europea muy similar a RES tanto en sus objetivos como en la fecha de creación. La motivación detrás de esta iniciativa fue la de promover el acceso a la supercomputación de alto rendimiento para la investigación científica y la innovación tecnológica en Europa. Para ellos, los grandes centros de supercomputación europeos decidieron aportar una fracción de sus recursos de computación al consorcio PRACE para que fueran distribuidos de forma centralizada mediante un Comité de Acceso único que se encargaría de evaluar los proyectos enviados por investigadores de cualquier lugar del mundo.

A continuación, se presenta una descripción de sus orígenes, evolución e impacto hasta la fecha.

### **Orígenes y fundación del consorcio PRACE**

La idea de PRACE surgió en 2006 como una respuesta al creciente reconocimiento de la importancia de la supercomputación en la ciencia y la innovación. El proyecto se inició bajo la dirección de la Comisión Europea, que identificó la necesidad de una infraestructura de supercomputación paneuropea. En 2008, PRACE se estableció como un proyecto financiado por la Comisión Europea. El consorcio original incluía a cuatro países: Francia, Alemania, Italia y España, que alojaban los mayores superordenadores europeos gestionados por centros de cálculo líderes en HPC como GENCI (Francia), GCS (Alemania), CINECA (Italia) y BSC (España). En 2010, se estableció formalmente la "*PRACE Research Infrastructure*" como una entidad legal sin fines de lucro con sede en Bruselas. Se creó una red de supercomputadoras de alto rendimiento, permitiendo a investigadores europeos acceder a recursos punteros. Durante esta etapa, se desarrollaron además programas de formación y se establecieron vínculos con la industria. PRACE amplió la lista de miembros hasta tener más de 25 países europeos dentro del consorcio, con un conjunto variado de infraestructuras de supercomputación tanto a nivel de arquitecturas como de potencia de cálculo, dividiéndose entre máquinas tipo Tier-0 y Tier-1.

En 2017, PRACE lanzó su segunda fase, que supuso una mejora significativa en la infraestructura y los servicios ofrecidos. El presupuesto de PRACE 2 ascendió a 400 millones de euros, y se fortaleció la colaboración con socios industriales y académicos.

Desde 2010, PRACE ha proporcionado acceso a superordenadores a miles de proyectos científicos, cubriendo campos como la física, la biología, la ingeniería y las ciencias medioambientales. Los proyectos apoyados por PRACE han contribuido significativamente al desarrollo de nuevos medicamentos, la comprensión de los cambios climáticos y el diseño de materiales innovadores. PRACE ha organizado cientos de talleres y programas de formación para investigadores, promoviendo la excelencia en el uso de la supercomputación. Así mismo, ha fomentado la cooperación con empresas, permitiendo que la industria europea aproveche las capacidades de la supercomputación.

En 2021 PRACE entró en su tercera fase con un enfoque renovado en la preparación para la llegada de la computación de exaescala. Hay un esfuerzo concertado por mejorar la eficiencia energética de los centros de supercomputación y aumentar la inclusión de las empresas pequeñas y medianas. PRACE forma parte integral de la estrategia europea para la supercomputación en la próxima década, en conjunto con la iniciativa EuroHPC de la que hablaremos más adelante.

Se espera que la organización siga desempeñando un papel fundamental en el desarrollo de sistemas de supercomputación exaescala y la promoción de la soberanía tecnológica europea.

En la Figura 6 representamos los superordenadores tipo Tier-0 que estaban integrados en PRACE en la última época, previa a la creación de EuroHPC. La potencia de cálculo acumulada es de aproximadamente 196 PFLOPS. Es decir, no llega ni al 20% de

Figura 6. Superordenadores tipo Tier-0 integrados en PRACE durante la última época previa a la creación de EuroHPC.



Country	Site (Partner)	HPC System	RPeak (TF/s)
France	CEA (GENCI)	Joliot-Curie KNL	2 300
France	CEA (GENCI)	Joliot-Curie Rome	12 000
France	CEA (GENCI)	Joliot-Curie SKL	6 600
Germany	JUELICH (FZJ)	JUWELS Booster	71 000
Germany	JUELICH (FZJ)	JUWELS Cluster	9 900
Germany	LRZ (GCS)	SuperMUC-NG	26 900
Germany	HLRS (GCS)	HAWK	25 200
Italy	CINECA (CINECA)	Marconi100	20 000
Spain	BSC (BSC)	MareNostrum 4	11 150
Switzerland	CSCS (ETH)	Piz Daint	15 988.0

un EXAFLOP, y muy similar a la potencia pico que va a tener *MareNostrum-5*. No obstante, comparado con los recursos a nivel nacional proporcionados por RES, es casi un factor 10 superior. En cuanto a arquitecturas de los superordenadores, salvo el caso del ordenador CRAY *Piz Daint*, en Suiza, que tiene una arquitectura híbrida con CPU multinúcleo + GPUs como aceleradores de cálculo, todos los demás son muy homogéneos con sistema multinúcleo AMD o Intel e interconectados por una red de baja latencia, muy similar al resto de computadoras de menor capacidad a nivel nacional (por ejemplo, RES en España). Esto quiere decir que para la mayoría de los grupos de investigación que usan códigos numéricos basados en paralelismo híbrido OpenMP + MPI, el acceso a estos sistemas Tier-0 de PRACE sería relativamente sencillo. El único requisito es por tanto el interés del caso científico del proyecto y la necesidad de disponer de una capacidad de computación superior a la que podrían disponer a nivel nacional.

En resumen, gracias a la creación de estructuras como RES y PRACE, que agrupan recursos computacionales de diferente capacidad, los investigadores que requerimos de acceso a estos sistemas podemos elegir aquel que más de adecue al problema científico que queremos tratar. En general, la puesta a punto del código se puede realizar en sistemas informáticos más modestos, accesibles a nivel del grupo de investigación, departamental, universitario o centro de investigación. Este tipo de infraestructuras serían de tipo Tier-2, por debajo del PFLOP de potencia, pero con un acceso de tiempo mucho más flexible. Una vez optimizado y testado el código de simulación, se puede pedir tiempo en régimen competitivo, bien a recursos a nivel nacional con máquinas tipo Tier-1, del orden del PFLOPS, pero con mayores restricciones de tiempos de ejecución. Si la simulación lo necesitara, todavía se podría acceder a las infraestructuras de tipo Tier-0, de decenas o centenas de PFLOPS a nivel europeo gracias a PRACE. Obviamente, cuanto mayores son los recursos que se necesitan, mayor será la competencia sobre ellos y más complicado será conseguir que se aprueben las propuestas de tiempo de cálculo.

Puesto que en este artículo estamos interesados en ofrecer una visión de la astrofísica computacional española, no queremos dejar pasar la ocasión

de realizar también un análisis sobre el grado de utilización de PRACE por parte de los investigadores españoles.

Como en el caso de RES, hemos recopilado todos los proyectos liderados por un investigador que tenía afiliación en una institución española y que han conseguido tiempo de computación en PRACE. Nos hemos centrado exclusivamente en analizar cómo se ha distribuido el tiempo total asignado en función del área científica, la institución de origen del IP y el tipo de máquina donde se ha asignado el tiempo de cálculo. Queremos dejar claro que hay muchas más propuestas en PRACE donde investigadores de centros españoles actúan como colaboradores. Hemos decidido no tomarlas en cuenta en nuestro análisis para poder identificar con claridad las áreas donde los investigadores españoles han tenido una posición de liderazgo.

El resultado de nuestro análisis se puede ver en las Figuras 7, 8 y 9. En la Figura 7 representamos los temas científicos de proyectos que han conseguido tiempo en PRACE. Como puede verse, representan una distribución bastante parecida a lo que vimos en RES, salvo el caso especial de Gaia que no es una actividad específica de HPC. Al igual que en RES, son los proyectos de ondas gravitacionales de la UIB los que se llevan la fracción mayor del tiempo en PRACE. A continuación, le siguen los temas relacionados con física estelar, cosmología, Astrofísica Relativista y Física Solar. Si tenemos en cuenta lo dicho anteriormente en el análisis de tiempos concedidos en RES, estos temas científicos están directamente relacionados con los mismos grupos de investigación que han liderado también las propuestas a nivel nacional.

En la Figura 8 se representa la distribución de tiempos por institución de referencia del IP. La UIB es la que mayor fracción de tiempo ha conseguido, gracias a los proyectos de Sasha Husa, en relación con las simulaciones de radiación de ondas gravitacionales durante la coalescencia de objetos estelares densos, seguida en este caso por la UB, con Paolo Padoan liderando proyectos para simulaciones de formación estelar en el ISM. A continuación, se encuentra la UAM, donde uno de los autores de este informe ha liderado varios proyectos de simulaciones cosmológicas en grandes volúmenes cosmológicos y de partículas, tales como *Multidark*, (<https://www.cosmosim.org>), *The Curie*



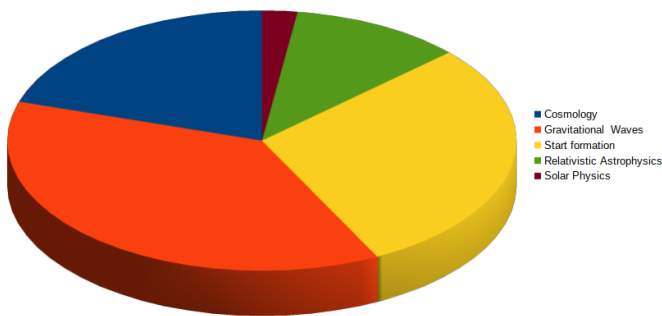


Figura 7. Distribución de tiempo de PRACE por área científica.

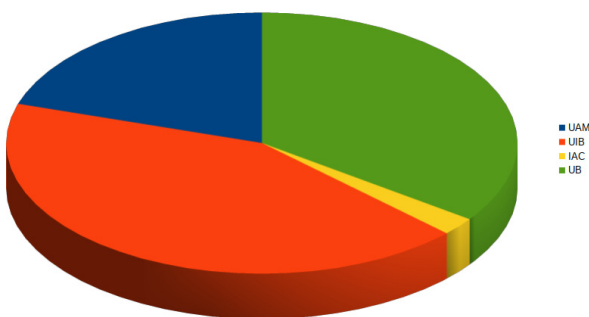


Figura 8. Distribución de tiempo concedido en PRACE por institución.

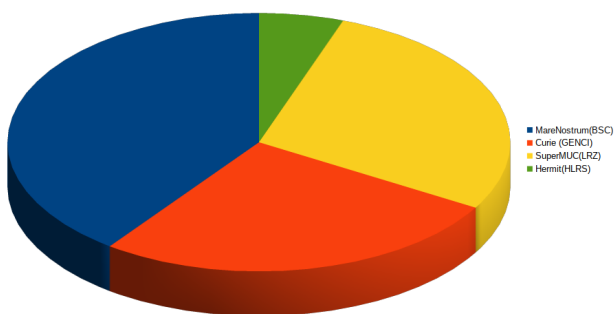


Figura 9. Distribución de tiempo concedido en máquinas PRACE.

*Universe* (<https://curiehz.ft.uam.es/>) o *UNITSIMS* (<https://unitsims.ft.uam.es/>). Finalmente, también el IAC ha conseguido tiempo de PRACE para proyectos de Física Solar liderados por Elena Khomenko.

En la Figura 8 representamos la distribución de tiempo PRACE por máquina. Como es lógico imaginar, la mayoría los proyectos liderados por un IP de España fueron asignados a *MareNostrum*, ya que esos grupos tenían experiencia previa en esta máquina gracias a sus proyectos de RES. Sin embargo, hay dos máquinas similares a *MareNostrum* que también han sido ampliamente utilizadas por los grupos españoles, con porcentajes similares, *SuperMUC* en LRZ (Alemania) y *Curie* en GENCI (Francia).

### EUROHPC, EL CAMINO EUROPEO HACIA LA EXAESCALA

EuroHPC (<https://eurohpc-ju.europa.eu> *European High-Performance Computing Joint Undertaking*) es una iniciativa impulsada por la Unión Europea y sus Estados miembros con el objetivo de situar a Europa en la vanguardia de la computación de alto rendimiento (HPC) a nivel mundial. Este consorcio estratégico, establecido en 2018, se enfoca en desarrollar, adquirir y operar sistemas de supercomputación exaescala, es decir con una potencia de cálculo superior al EXAFLOP = 1000 PFLOPS.

Entre sus principales metas está la construcción y puesta en funcionamiento de varias supercomputadoras de exaescala antes de mediados de la década de 2020, así como la promoción de un ecosistema europeo sólido de tecnologías y servicios relacionados con la HPC. Esto implica no solo adquirir y operar estas potentes máquinas, sino también fomentar el desarrollo de hardware y software europeo, así como capacitar a una nueva generación de expertos en supercomputación.

Al igual que PRACE, EuroHPC trabaja bajo un enfoque colaborativo, involucrando a gobiernos nacionales, instituciones académicas, centros de investigación y empresas tecnológicas. A través de financiamiento conjunto y estrategias compartidas, este consorcio busca optimizar los recursos y acelerar el progreso en el campo de la HPC. Además, promueve la accesibilidad y el uso eficiente de estas infraestructuras entre investigadores, científicos y empresas de toda Europa, facilitando el intercambio de conocimientos y la solución de problemas trans fronterizos.



Figura 10. Infraestructuras actualmente gestionadas por EuroHPC.

Country	Site (Partner)	HPC System	RPeak (PFlop/s)
Finland	CSC	LUMI	550
Italy	CINECA	LEONARDO	324.4
Spain	BSC-CNS	MareNostrum5	314
Slovenia	IZUM	VEGA	10
Luxemburg	LuxProvide	MELUXINA	18.3
Czech Rep.	IT4	KAROLINA	15.7
Portugal	MACC	DEUCALION	10
Bulgaria	SofiaTech Park	DISCOVER	5.94
<b>Total</b>			1248.34

En resumen, EuroHPC representa un compromiso firme de Europa hacia la excelencia en computación de alto rendimiento, buscando no solo mantenerse al día con las principales potencias tecnológicas globales (EE.UU, China y Japón), sino también liderar el avance de soluciones basadas en supercomputación para los desafíos más apremiantes de nuestra época. A través de su trabajo, EuroHPC contribuye al fortalecimiento de la investigación científica, el desarrollo industrial y la competitividad de Europa en el escenario global.

En julio de 2019, la *EuroHPC Joint Undertaking* seleccionó al Barcelona Supercomputing Center como una de las entidades para albergar un superordenador pre-exaescala de la red de supercomputadores de alta capacidad promovida por la Comisión Europea. *MareNostrum-5* está cofinanciado por EuroHPC y el consorcio español

formado por el Ministerio de Universidades, Ciencia e Innovación, la Generalitat de Cataluña y la UPC y ha entrado recientemente en producción para dar servicio, tanto a proyectos de la RES como de EuroHPC y tiene una capacidad total de cálculo de más de 300 PFLOPS con dos particiones, una con nodos de Intel CPU multinúcleo, igual que en versiones anteriores de *MareNostrum*, y otra con aceleradores gráficos NVIDIA de última generación. Es decir, *MareNostrum-5* tendrá más potencia que toda la infraestructura gestionada por PRACE en el pasado.

En la Figura 10 se pueden ver la infraestructura de HPC gestionada por EuroHPC en la actualidad. Como se puede apreciar, hay tres máquinas que sobresalen por encima de las demás: *LUMI* (550 PFLOPS), *LEONARDO* (324 PFLOPS) y *MareNostrum-5* (313 PFLOPS). Estos tres sistemas son los

pre-exaescala co-financiados por la Unión Europea. En una segunda fase, habrá dos superordenadores con potencia de exaescala instalados en Alemania y Francia. El resto de máquinas de EuroHPC son de potencia similar a las máquinas PRACE de años anteriores. Sin embargo, la característica principal que comparten todas ellas es la de tener una arquitectura mixta, con nodos basados en CPU clásica y nodos con CPU + GPU. Sería imposible poder aumentar la potencia de cálculo a las escalas de EXAFLOPS sin recurrir a los aceleradores gráficos. De hecho, se puede ver esta tendencia si se revisa la famosa lista Top500 (<https://www.top500.org>) que compila los superordenadores de mayor potencia en el mundo. En ella, hay solo dos superordenadores instalados en EE.UU. que traspasan la barrera del EXAFLOP. *Frontier* tiene una arquitectura combinada de una CPU AMD Epyc + 4 GPUs AMD Indistinct por nodo. *Aurora*, es el otro superordenador que combina CPU y GPUs, en este caso fabricadas ambas por Intel.

### **DESAFÍOS Y RETOS DE LA ASTROFÍSICA COMPUTACIONAL EN LOS PRÓXIMOS AÑOS**

La Astrofísica computacional es una ciencia cuyo desarrollo va parejo al incremento de la potencia de cálculo disponible en cada momento de la historia. A mayor potencia de procesamiento, mejores datos simulados se pueden obtener, ya que los objetos a simular pueden ser modelizados con un mayor número de elementos computacionales, bien sean partículas o mallas. Esto lleva asociado a su vez un desarrollo teórico para modelizar los procesos físicos que ocurren a escalas que antes no se resolvían. Así mismo, es necesario también realizar un enorme esfuerzo para diseñar los códigos numéricos que van a resolver las ecuaciones que describen la física de los objetos de estudio de forma que puedan utilizar la potencia máxima posible de cálculo de la infraestructura donde se van a ejecutar.

Esto ha implicado el cambio de paradigma a nivel de programación varias veces en el pasado. Los pioneros en la simulación numérica en Astrofísica todavía recordarán cuando los códigos numéricos se programaban en el lenguaje FORTRAN 66, donde no existía ni siquiera el concepto de bucle de operaciones. En esa época la velocidad del código era directamente proporcional a la velocidad del (único) procesador donde se ejecutaba. Como se cumplía eficientemen-

te con la Ley de Moore (la potencia de los procesadores se doblaba cada 18 meses aproximadamente), el mismo código podía ser utilizado durante años aplicándolo a problemas cada vez más complejos. Cuando la tecnología cambió y se introdujeron los chips con múltiples líneas de ejecución simultánea (multinúcleo), se tuvieron que modificar los códigos para adaptarlos a esta tecnología. El proceso no fue excesivamente complicado, y bastaba con evitar las dependencias de las operaciones, fundamentalmente dentro de los bucles, para que el compilador se encargara de paralelizarlos y que se ejecutaran las instrucciones de forma simultánea en varios núcleos a la vez. Simplemente había que aprender varias directivas de compilación del estándar OpenMP, que había que poner como comentarios en los bucles a paralelizar. En general, un astrofísico, generalmente estudiante de doctorado, o postdoc, podía aprenderlo con relativa facilidad y optimizar los códigos para sacarles un gran rendimiento en los sistemas multinúcleo.

Posteriormente llegaron los superordenadores basados en la unión de múltiples nodos multinúcleo interconectados por una red de alta velocidad, donde el acceso a los datos en memoria ya no está disponible por todos los procesadores, sino que había que distribuir los datos entre la memoria de los diferentes nodos y tener que enviar y recibir los datos que no estaban locales mediante mensajes a otros nodos. La ventaja es que se podían usar una gran cantidad de procesadores en un mismo problema, pero a costa de tener que reescribir los códigos de simulación, utilizando librerías como MPI que facilitaban la labor del tráfico de datos entre los nodos.

En la actualidad, la mayoría de los códigos utilizados en la simulación astrofísica en los diferentes temas de los que hemos hablado en este artículo están bastante bien adaptados para ser eficientes en arquitecturas de múltiples nodos donde cada nodo tiene uno o varios chips multinúcleo y una memoria por núcleo relativamente limitada, del orden de los 1-2 Gbytes.

Ahora nos viene el siguiente cambio de paradigma. Como hemos comentado anteriormente, las infraestructuras de HPC del presente y futuro inmediato van a añadir un elemento adicional, los aceleradores gráficos. Si queremos seguir progresando en

la calidad y verosimilitud de nuestras simulaciones numéricas, es necesario realizar un gran esfuerzo para adaptar de nuevo los códigos más habitualmente utilizados en Astrofísica a este nuevo paradigma. Sin embargo, la situación no es sencilla. La complejidad técnica se va haciendo cada vez mayor y se necesita la ayuda de personal altamente cualificado con formación en ciencia computacional para ayudar en este proceso. Ya no es tan sencillo el que un estudiante de doctorado con formación astrofísica sea capaz de llevar a cabo esta tarea. Nos enfrentamos a un desafío enorme que va a requerir de la inversión en recursos humanos especializados, no fáciles de conseguir, dado la alta competitividad actual para contratar a estos especialistas a raíz de la explosión de la inteligencia artificial en todos los ámbitos de nuestra sociedad. En este sentido, la Unión Europea a través de EuroHPC es consciente de este problema que afecta a todas las ramas de ciencia que tienen a la supercomputación como una herramienta fundamental en su desarrollo.

A principios del año 2023 se crearon 10 Centros de Excelencia en Europa (<https://www.hpccoe.eu/about/>) para dar apoyo a diferentes disciplinas científicas en la transición de sus códigos de simulación hacia la era Exascale. En lo que concierne al ámbito de Astrofísica se creó el Centro de Excelencia *SPACE* (*Scalable Parallel Astrophysical Codes for Exascale*, <https://www.space-coe.eu>), localizado en Irlanda con un presupuesto de 8 millones de euros por un periodo de 48 meses. Varios de los códigos numéricos más usados en la comunidad de Astrofísica/Cosmología computacional (GADGET, RAMSES, PLUTO, IPI3D, BHAC, FIL), están recibiendo apoyo técnico de *SPACE* para adaptarlos a la arquitectura de los superordenadores gestionados por EuroHPC. Uno de los requisitos exigidos para que estos códigos tengan apoyo por parte de *SPACE* es que estén disponibles públicamente para toda la comunidad.

## CONCLUSIONES

En este artículo hemos intentado presentar una visión cuantitativa y cualitativa a nivel español de una de las áreas de la Astrofísica más importantes en la actualidad, que tiene que ver con la producción de simulaciones numéricas que actúan como laboratorios virtuales donde comparar y comprender la inmensa colección de datos observacionales que

obtenemos del Universo en todo el rango espectral electromagnético y de nuevos mensajeros como las ondas gravitacionales.

La conclusión que derivamos de nuestro análisis es que la comunidad de Astrofísica/Cosmología computacional en España ha alcanzado una posición muy competitiva, gracias en parte al haber dispuesto de acceso a grandes recursos computacionales, tanto a nivel estatal, a través de la RES, como europeo por medio de los consorcios PRACE y EuroHPC.

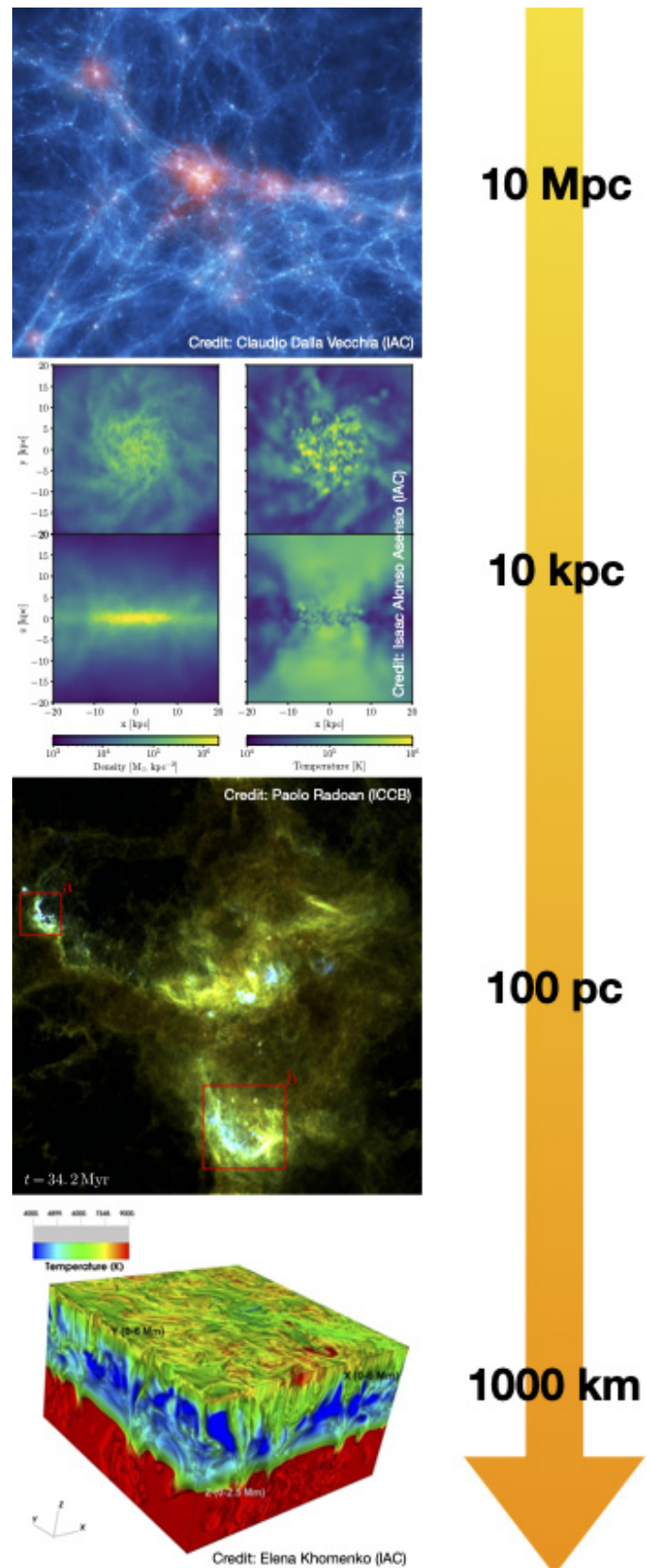
A nivel estatal, la constitución de la red de nodos de la RES ha impulsado la Astrofísica computacional en distintos centros de investigación y universidades. En algunos centros (sobre todo departamentos universitarios), la línea de investigación teórica/numérica tenía una larga tradición y se ha aprovechado de la infraestructura proporcionada por la RES para el fortalecimiento de esos grupos. Sin embargo, otros centros que no tenían esa vocación han decidido crear nuevos grupos de investigación dedicados a la Astrofísica computacional gracias a las posibilidades que ofrecía la RES, tanto de acceso a recursos locales como estatales. Disponer de instalaciones de supercomputación locales facilita el desarrollo de códigos y el diseño de simulaciones que posteriormente se ejecutan en los grandes superordenadores europeos.

Para el futuro inmediato, uno de los grandes retos que se plantea la comunidad para continuar con el desarrollo de simulaciones más realistas es la adaptación de los códigos numéricos actuales a las nuevas infraestructuras de supercomputación exaescala basadas en hardware híbrido con CPU + aceleradores GPUs. Por otro lado, el desarrollo exponencial de la inteligencia artificial (IA) también va a suponer una enorme revolución dentro del campo de la simulación astrofísica. Las ecuaciones que describen los fenómenos físicos son habitualmente resueltas mediante métodos numéricos muy complejos que cuestan mucho tiempo de cálculo. Los algoritmos de IA pueden ser entrenados a partir de resultados de simulaciones para que aprendan las relaciones entre las diferentes variables del sistema a simular. Estos algoritmos entrenados pueden actuar como emuladores de las ecuaciones físicas, acelerando enormemente los tiempos de cálculo y

permitiendo incrementar la resolución espacio-temporal y la complejidad de los modelos físicos de las simulaciones. Esto no es una predicción de futuro. Existe ya mucha literatura al respecto donde este tipo de aplicaciones en el ámbito de la Astrofísica es ya una realidad, pero un análisis más en profundidad de la revolución que la IA va a representar tanto en los campos de la simulación como en el análisis de los datos astronómicos merecería de otro artículo dedicado exclusivamente a este tema.

Para finalizar este artículo, y a modo de resumen, presentamos en la Figura 11 una visualización de resultados de algunas de las simulaciones numéricas realizadas con proyectos de RES y PRACE liderados por grupos españoles, que abarcan objetos en un rango de escalas *astronómicas*: desde kilómetros de la superficie solar hasta escalas de mega parsecs de una simulación cosmológica.

Figura 11. Resultados de simulaciones numéricas con proyectos RES y PRACE abarcando diferentes escalas, de megaparsecs (arriba) hasta kilómetros (abajo).



A principios del siglo XXI, el concepto del Observatorio Virtual (VO) estaba ganando tracción a nivel internacional. La idea era simple pero desafiante: crear una infraestructura que permitiera descubrir y acceder a datos heterogéneos de archivos distribuidos por todo el mundo sin las barreras de formato o ubicación. Para ello había que lograr un doble objetivo: I) crear una federación de archivos astronómicos que, con la aplicación de un conjunto común de normas ("estándares VO"), proporcionara un acceso homogéneo a la información almacenada en los nodos de dicha federación ("red de datos") y II) desarrollar herramientas de descubrimiento y análisis de datos ("red de servicios"). El Observatorio Virtual Español (SVO) es la iniciativa que, desde el Centro de Astrobiología (CAB, CSIC-INTA), coordina las actividades VO en España. SVO vio la luz en 2004 por lo que estamos celebrando nuestro vigésimo aniversario. Sirva este artículo como resumen de lo que ha sido nuestro periplo durante estos 20 años de actividad.



Enrique Solano Márquez  
Centro de Astrobiología (CAB; CSIC-INTA)  
esm@cab.inta-csic.es  
@obsvirtesp

Investigador Principal del proyecto  
Observatorio Virtual Español

## INTRODUCCIÓN

A finales de la década de 1990 y principios de la de 2000, la astronomía se enfrentó a un reto crucial: la gestión del gran volumen de datos generado por los nuevos telescopios y misiones espaciales. La necesidad de mejorar la accesibilidad y la interoperabilidad de los datos de archivo llevó al surgimiento del VO.

*Interoperabilidad* es la palabra clave cuando se habla de archivos astronómicos y VO, entendiendo como tal la capacidad de que éstos se "hablen" entre sí de manera fácil y eficiente. La interoperabilidad es una condición fundamental para la astrofísica moderna ya que, en una gran mayoría de las líneas de investigación, es necesario acceder a información en diferentes rangos de longitud de onda (normalmente disponible en diferentes archivos) para tener una visión pancromática del objeto de estudio y poder entender los procesos físicos que en él ocurren. El descubrimiento en agosto de 2017 de una onda gravitacional producida por el colapso de dos estrellas de neutrones y su posterior seguimiento por parte de más de 70 telescopios en tierra y satélites en el espacio en todo el rango del espectro electromagnético, desde muy altas energías hasta ondas radio, en un esfuerzo que involucró a más de 4.000 investigadores, es un ejemplo paradigmático de la importancia de la astronomía multirango (Fig. 1).

Garantizar no solamente la interoperabilidad de los datos astronómicos sino que éstos sean **FAIR** (*Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*) es el objetivo de la Alianza del Observatorio Virtual Internacional (IVOA), una alianza que nació en junio de 2002 y que, en la actualidad, se encuentra formada por 23 proyectos distribuidos por los cinco continentes.

La hoja de ruta definida por IVOA para conseguir dicho objetivo consta de los siguientes cuatro pasos:

- Desarrollo de estándares y protocolos que permitan un descubrimiento y acceso homogéneo a la información existente en los archivos astronómicos.
- Implementación de dichos estándares y protocolos en los centros de datos astronómicos.
- Desarrollo de herramientas de descubrimiento y análisis de datos que se beneficien del trabajo de estandarización realizado en los pasos previos.

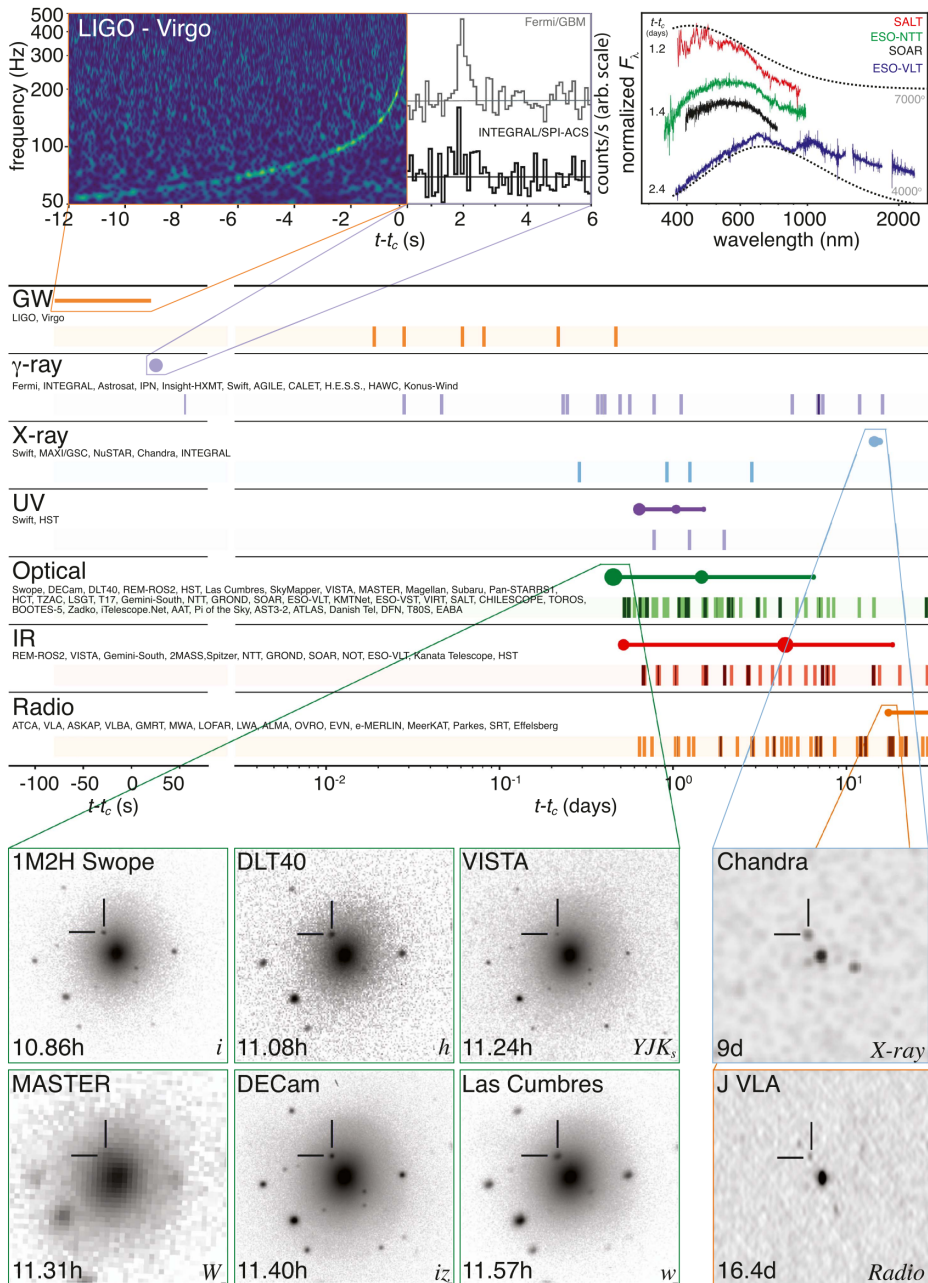


Figura 1. Recopilación de las observaciones de seguimiento realizadas en todo el rango del espectro electromagnético del evento GW170817. Fuente: [Abbott et al. \(2017\)](#).

- Uso de estas herramientas por parte de la comunidad astronómica, tanto profesional como amateur (e, incluso, por el público en general) para realizar un tipo de investigación que, fuera de VO, se realizaría de manera muy ineficiente o, simplemente, no podría llevarse a cabo.

Veamos cómo ha contribuido SVO a cada una de estas líneas de trabajo a lo largo de sus 20 años de existencia.

### DESARROLLO DE ESTÁNDARES

Los cimientos de VO se apoyan en estándares que resuelven el problema de cómo descubrir (registro), consultar (protocolos de acceso) y describir (modelos y formatos de datos) la información astronómica.

Desde su aceptación en IVOA, SVO ha venido participando de manera activa en el desarrollo de estándares. Los protocolos de acceso a [datos espectroscópicos teóricos](#) y [simulaciones numéricas](#)

o los modelos de datos que describen cómo debe mostrarse la [información fotométrica](#) o las observaciones de radio de tipo “*single-dish*” son algunas de las principales aportaciones que SVO ha realizado en este ámbito.

### ARCHIVOS

El Centro de Datos del CAB es uno de los centros de datos astronómicos de referencia a nivel internacional. La lista completa de los archivos astronómicos gestionados por SVO puede consultarse [aquí](#).

Además de las operaciones diarias de mantenimiento de los archivos, es necesario realizar una serie de actividades adicionales para garantizar la óptima funcionalidad y máximo rendimiento de los mismos. Entre ellas, se encuentran las siguientes:

#### Implementación de nuevos estándares VO

VO es un proyecto en continua evolución. Periódicamente surgen nuevos estándares, así como nuevas versiones de estándares ya existentes que hay que implementar en los archivos gestionados por SVO.

#### Inclusión de nuevos instrumentos y modos de operación

Los archivos de GTC y Calar Alto son los dos archivos más importantes gestionados por SVO en términos de uso, volumen de datos e impacto científico. De hecho, ambos archivos son el único punto de entrada para que la comunidad nacional e internacional acceda a los datos de dichas infraestructuras. En ambos casos, los sistemas de archivo se han diseñado con la suficiente modularidad como para acomodar fácilmente nuevos instrumentos, nuevos modos de observación o nuevos tipos de datos (e.g., datos reducidos, catálogos, mosaicos, ...).

SVO no solamente gestiona los archivos del CAB sino que también proporciona asesoramiento a otros centros de datos que quieren adaptar sus contenidos a los estándares VO. Este escenario encaja perfectamente con la filosofía VO de crear una red de centros de datos distribuidos por todo el mundo, frente a la idea de un centro monolítico y centralizado.

A través de diferentes actividades de formación (reuniones, visitas técnicas y organización de [talleres](#)), SVO asesoró al Observatorio Astronómico de Javalambre durante las primeras fases de desarrollo de su archivo de datos y está colaborando con el Ob-

servatorio Astronómico Nacional en la adaptación VO del archivo de datos del radiotelescopio de 40m, actualmente en desarrollo. Para facilitar este proceso, SVO ha desarrollado diferentes [herramientas de publicación de datos](#), que permiten pasar de manera fácil de tener un conjunto de ficheros almacenados de manera local a poseer un archivo 100% VO formado por una base de datos, una interfaz de consulta y visualización de los resultados y los protocolos VO necesarios para la consulta de los datos.

### DESARROLLO DE HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

La interacción de la infraestructura VO con los usuarios finales se realiza mediante una serie de aplicaciones denominadas herramientas VO, las cuales se benefician de la estandarización anteriormente comentada y permiten abrir nuevas líneas de investigación al facilitar el descubrimiento, acceso y comparación de conjuntos de datos astronómicos.

De entre todas las herramientas desarrolladas por SVO a lo largo de su existencia (descritas en el apartado “Tools and services” del [portal SVO](#)), destacaremos las siguientes:

#### Herramienta VOSA

VOSA (VO Sed Analyzer, [Bayo et al. 2008](#)) es una herramienta web que permite estimar parámetros físicos (temperaturas, gravedades, radios, luminosidades,...) de estrellas y enanas marrones mediante la comparación entre la fotometría observada a diferentes longitudes de onda y los correspondientes valores teóricos. La realización de este tipo de análisis fuera de VO puede llegar a requerir varias horas de trabajo para un solo objeto, la misma cantidad de tiempo que VOSA emplea para analizar miles de objetos de manera simultánea (Fig. 2).

VOSA es una herramienta enormemente popular entre la comunidad astronómica tal y como lo demuestran los más de 4.300 usuarios que han analizado más de 14 millones de objetos y han publicado más de 450 artículos en revistas arbitradas a lo largo de sus 16 años de vida operacional.

#### Filter Profile Service

El Filter Profile Service (FPS) es un servicio web concebido originalmente como mecanismo para gestionar la información fotométrica requerida por VOSA.



En particular, VOSA necesita transformar magnitudes observadas a flujos. En este sentido, FPS no sólo es un repositorio de información, sino también un recurso en torno al cual pueden construirse otros servicios y aplicaciones (e.g., [Specphot](#) o [COLCA](#)).

FPS contiene la mayor colección pública de filtros fotométricos con más de 10.000 filtros, incluyendo filtros específicos de misiones de exploración del sistema solar y de observación de la Tierra. Asimismo, FPS es un servicio utilizado de manera intensiva por la comunidad astronómica internacional, como lo demuestra el hecho de que, solamente en el período 2020-2022, se publicaron [115 artículos](#) en revistas arbitradas que utilizaban FPS para fines muy diversos. Archivos y servicios astronómicos como el Canadian Astronomy Data

Center o VizieR hacen uso de FPS. Mención especial merece [GaiaXPy](#), un servicio que, utilizado en combinación con FPS, permite generar información fotométrica en decenas de sistemas fotométricos utilizando los coeficientes espectroscópicos de Gaia Data Release 3.

### Herramientas de Inteligencia Artificial y Machine Learning

La puesta en marcha de nuevas infraestructuras como el Observatorio Vera C. Rubin o el Square Kilometre Array (SKA) hará que el volumen de datos astronómicos crezca de manera exponencial en los próximos años, pasando de varios cientos de petabytes al rango de decenas de exabytes al final de esta década. Esta expansión impulsará la necesidad ya existente de desarrollar nuevos entornos de análisis de datos basados en inteligencia artificial y *machine learning*.

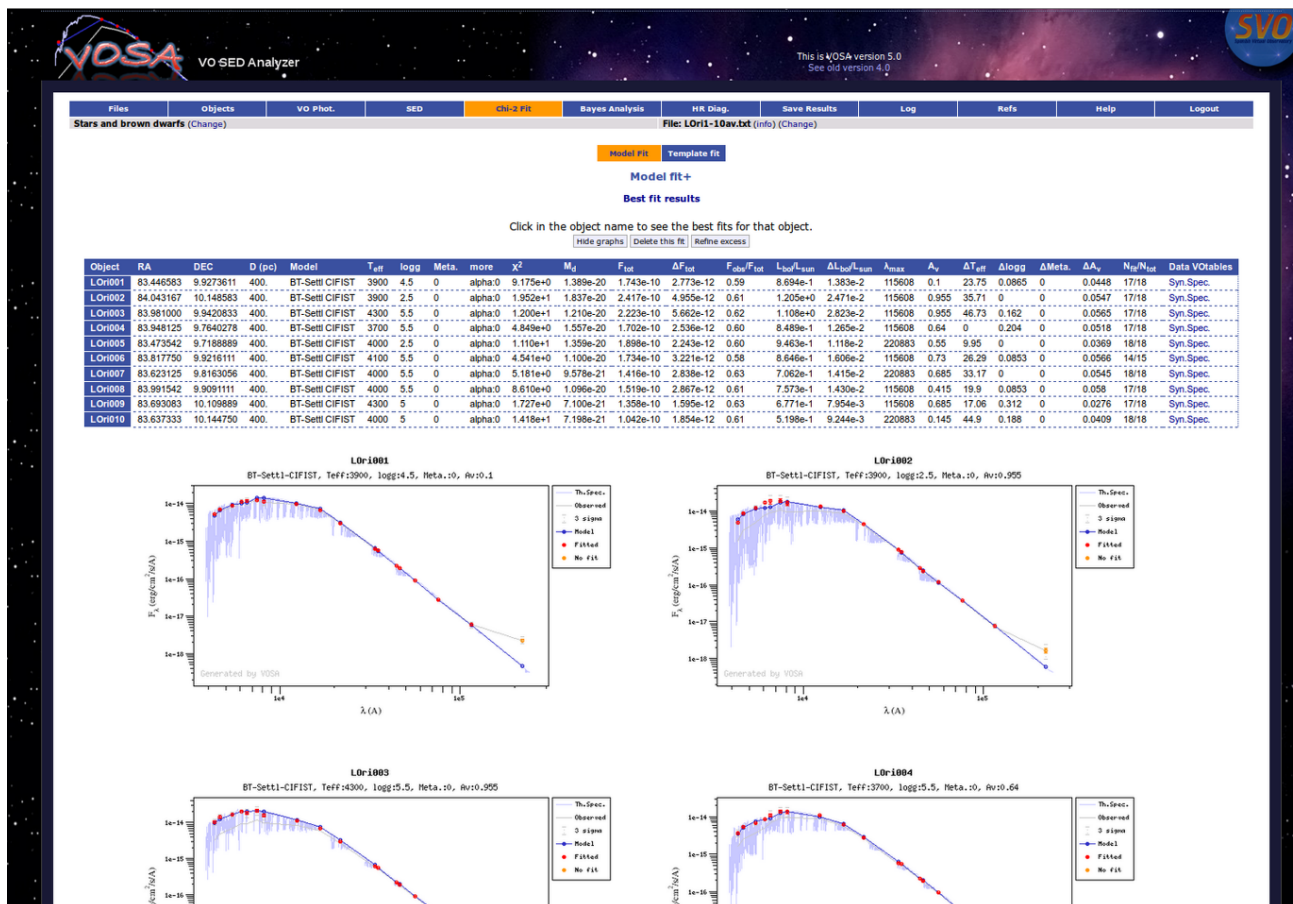


Figura 2. Parámetros físicos obtenidos con VOSA para un conjunto de estrellas a partir del ajuste de la distribución espectral de energía observada (puntos rojos) a un modelo teórico (en azul).

Las técnicas de minería de datos aplicadas a la astronomía incluyen métodos estadísticos avanzados, métodos de reconocimiento de patrones y técnicas de clasificación supervisadas y no supervisadas en espacios de datos multidimensionales, así como metodologías basadas en *Deep Learning*, que ofrecen una gran variedad de posibilidades. A todo ello habría que sumar el enorme potencial de la inteligencia artificial generativa (IAG), una rama de la inteligencia artificial que se enfoca en la generación de contenido original a partir de datos existentes. Inicialmente utilizada en el procesamiento del lenguaje natural, la IAG ha ganado recientemente un interés generalizado en el campo de las ciencias naturales.

Entre las actividades desarrolladas por SVO podemos citar la clasificación supervisada de las curvas de luz observadas de la misión CoRoT. Los resultados de este estudio se incorporaron al [archivo de datos](#), lo que permite que los usuarios puedan realizar consultas de alto nivel del tipo "dame todos los objetos de una determinada clase de variabilidad con una probabilidad de pertenencia superior a un valor dado". Sin la información sobre la clasificación, el usuario se vería obligado a descargar todo el contenido del archivo CoRoT (más de 150.000 curvas de luz) para realizar un análisis local con el fin de identificar sus objetos de interés.

Otra línea de trabajo de SVO en este campo fue el estudio de la pertenencia de objetos estelares a cúmulos. Los cartografiados de grandes regiones del cielo que comenzaron hace unas pocas décadas han dado lugar a grandes catálogos fotométricos y astrométricos. La precisión y sensibilidad sin precedentes de estos conjuntos de datos y su amplia cobertura espacial, temporal y de longitud de onda convierten en obsoletos los métodos clásicos de selección de miembros que se basaban en unos pocos colores y luminosidades. Como alternativa desarrollamos un método bayesiano para aprovechar al máximo la alta dimensionalidad de los datos (fotométrica, astrométrica y temporal) y obtener probabilidades de pertenencia a cúmulos autoconsistentes y robustas.

Más recientemente, nuestros esfuerzos en el campo del *Big Data* se han dirigido a la determinación de parámetros físicos de los objetos ultrafríos (estelares y subestelares) observados por la misión Gaia usando técnicas de inferencia bayesiana. Además se ha trabajado en la determinación de parámetros físicos de estrellas de tipo espectral M a partir de la información espectroscópica de muy alta resolución proporcionada por el instrumento CARMENES aplicando arquitecturas de redes neuronales de *Deep Learning* como los *autoencoders*.

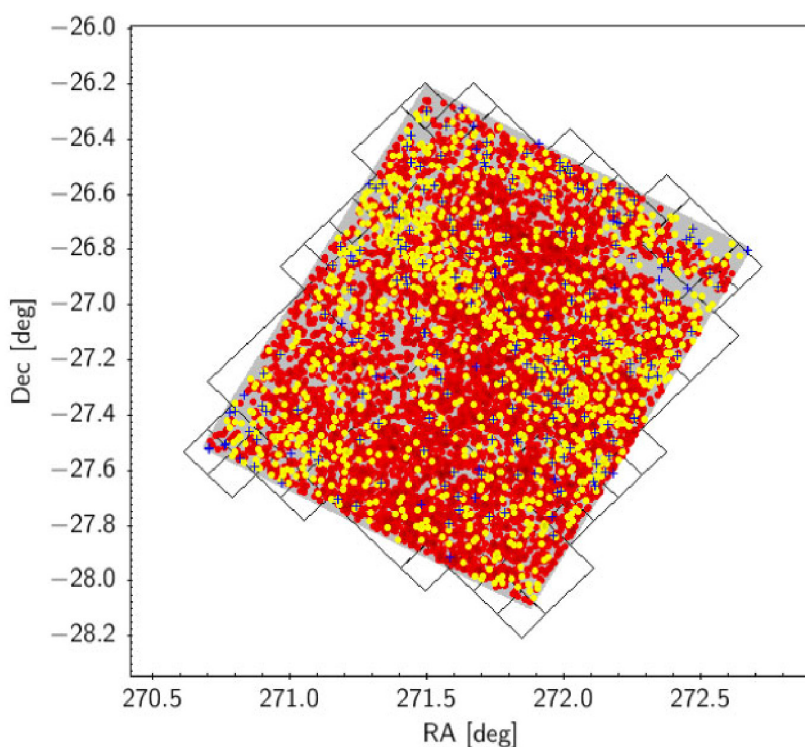


Figura 3. Posición en el cielo de las 7925 nuevas estrellas enanas M descubiertas por Cruz et al. (2023) (puntos rojos y amarillos) usando el cartografiado VVV. Como comparación se muestran en azul las enanas M conocidas en Gaia DR3 en la misma región del cielo.

Una lista detallada de todos los artículos SVO en el campo de la Inteligencia artificial se pueden encontrar [aquí](#).

## CIENCIA-VO

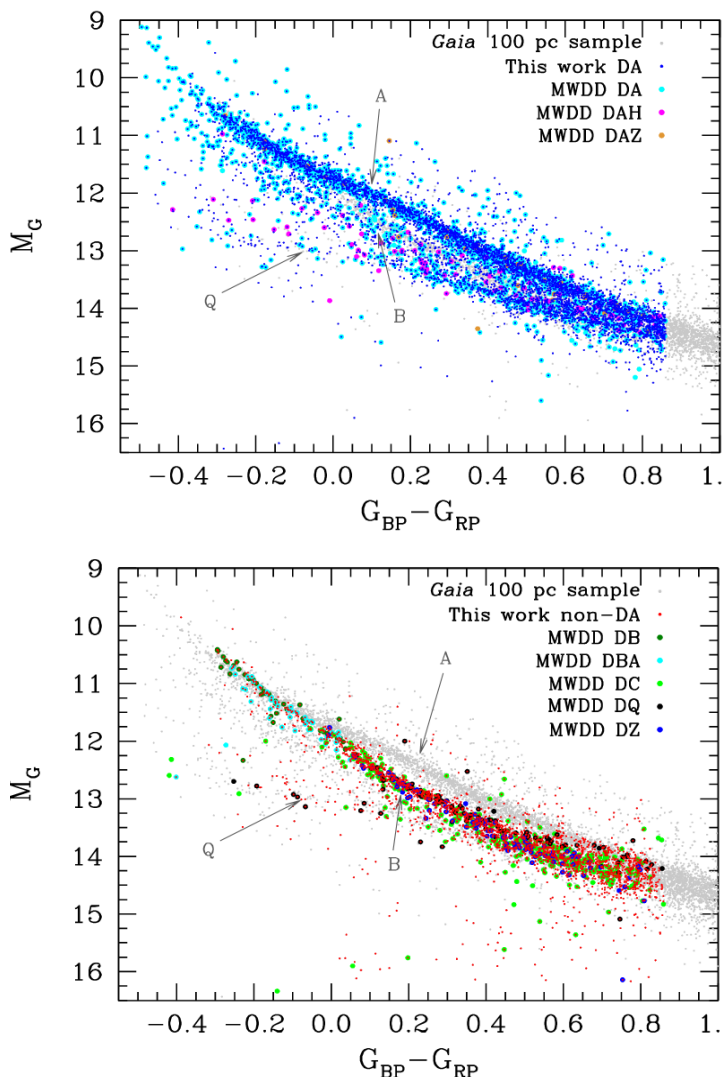
El objetivo último de VO es abrir nuevas líneas de investigación en astrofísica. Desde sus orígenes, IVOA entendió la importancia de conseguir dicho objetivo y en 2009 creó el Comité de Prioridades Científicas.

La falta de familiaridad de la comunidad astronómica con VO es uno de los problemas potenciales que pueden limitar su impacto científico. Asimismo, la ausencia de vínculos sólidos entre la iniciativa VO y la

comunidad astronómica puede dar lugar a esfuerzos inútiles. Así, por ejemplo, si los servicios desarrollados por VO no tienen una orientación científica, no serán utilizados por la comunidad.

Desde los comienzos de su andadura, los esfuerzos de SVO se han orientado a evitar esta situación, dando a conocer el potencial de VO a la comunidad astronómica española y fomentando las colaboraciones científicas. El papel de SVO en estas colaboraciones se centra en tres aspectos principales: I) Evaluar el caso científico desde el punto de vista de VO, II) proporcionar información sobre las herramientas VO existentes para abordar el caso propuesto y III) en caso necesario, desarrollar nuevas herramientas.

Figura 4. Diagrama HR para las enanas blancas de tipo DA (panel superior; puntos azules) y no DA (panel inferior; puntos rojos) clasificadas en Jiménez-Esteban et al. (2023). Otros tipos espectrales obtenidos de la *Montreal White Dwarf Database* (MWDD) se han representado en diferentes colores.



El desarrollo de proyectos de ciencia-VO es una línea de trabajo en la que SVO viene desempeñando un papel de liderazgo a nivel internacional, como lo demuestra el significativo número de [artículos VO](#) publicado en los últimos años. La lista completa de artículos SVO se encuentra en la pestaña “VO-science” del [portal](#) del SVO

Entre las líneas de investigación abordadas por SVO, destacamos las siguientes.

### Estudio de objetos subestelares y estelares de baja masa

Numerosas son las líneas de estudio que, sobre objetos subestelares y estelares de baja masa, ha abordado SVO a lo largo de su historia. Descubrimiento de nuevos objetos en diferentes cartografiados (VV, J-PLUS, CARMENES, ALHAMBRA, COSMOS, Kepler, UKIDSS, SDSS, VISTA, IPHAS,...), identificación de sistemas binarios, tanto en órbitas cercanas como separadas, identificación de objetos de baja metalicidad (subenanas),..., son algunos de los campos investigados. La lista completa de artículos se puede encontrar [aquí](#) (Fig. 3).

### Identificación y caracterización de enanas blancas

Es bien conocido que la misión *Gaia* ha revolucionado nuestros conocimientos en muchos campos de la astronomía. En particular, *Gaia* y VO han demostrado ser un binomio de gran valor en el campo de las enanas blancas. En colaboración con la Universitat Politècnica de Catalunya, hemos venido trabajando en los últimos años en el estudio y caracterización de la población de enanas blancas de la vecindad solar. La lista completa de los artículos publicados en este campo se puede encontrar [aquí](#) (Fig. 4).

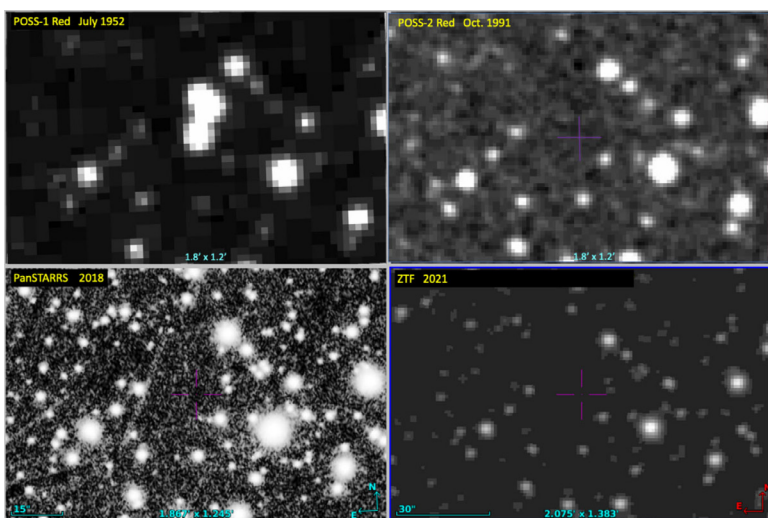


Figura 5. Exposiciones del cielo centradas en el triple objeto transitorio reportado en Solano et al. (2023), tomadas en cuatro momentos diferentes a lo largo de 69 años. Arriba a la izquierda: La imagen de POSS I, tomada en julio de 1952, muestra el objeto triple con una magnitud R (Supercomos)  $\sim 16$  mag. Arriba a la derecha: Imagen de POSS II, tomada en octubre de 1991. El objeto triple se encuentra ausente con un umbral de detección de 21 mag. Abajo a la izquierda: Imagen PanSTARRS (2018). Abajo a la derecha: Imagen ZTF (2021). En ambas el objeto triple se encuentra igualmente ausente.

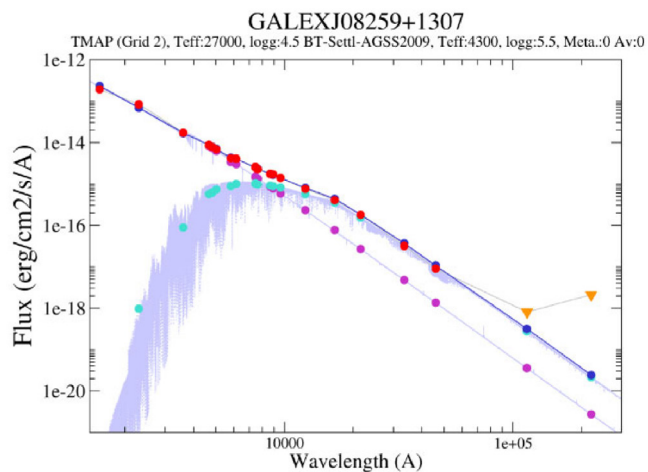
### Estudio de objetos transitorios (“transients”)

Por “transient” se entiende todo fenómeno astronómico con una duración que va desde fracciones de segundo hasta semanas o años. En la mayoría de los casos se requiere realizar observaciones en diferentes longitudes de onda para comprender adecuadamente la verdadera naturaleza del objeto transitorio. Esta caracterización suele llevarse a cabo con observaciones de seguimiento utilizando instalaciones terrestres y espaciales. Desde SVO se ofrece un enfoque alternativo explotando la información existente en los archivos astronómicos y beneficiándose de las ventajas que VO ofrece en términos de descubrimiento, acceso y análisis de datos. La cantidad y diversidad de información disponible en los archivos de VO proporciona una oportunidad sin precedentes que puede ser de gran interés en muchos campos de la astrofísica *Multi-Messenger* y *Time-Domain*. Un aspecto adicional altamente interesante es que, solamente con datos de archivo, es posible obtener información de cómo era el objeto antes de sufrir la variación en brillo. Una recopilación de los artículos publicados en esta línea de trabajo se puede encontrar [aquí](#) (Fig. 5).

### Estudio de subenanas calientes

Las estrellas subenanas calientes son objetos compactos azules evolucionados, caracterizados por poseer una capa extremadamente fina de hidrógeno. La mayoría de los modelos sugieren que esta pérdida de hidrógeno es debido a una evolución como sistema binario con envoltura común durante la fase de

Figura 6. Identificación de una subenana caliente binaria utilizando VOSA. Los puntos púrpura y verdes representan, respectivamente, la fotometría de los modelos TMAP y BT-Settl que mejor se ajustan. Los espectros teóricos correspondientes se representan en púrpura. Los puntos rojos son los puntos fotométricos observados, mientras que la línea azul y los puntos azules indican el modelo compuesto que mejor se ajusta a los datos. Los triángulos amarillos invertidos indican que los valores fotométricos corresponden a límites superiores y, por lo tanto, no se tienen en cuenta en el cálculo.



Gigante Roja. Sin embargo, el número real de subenanas calientes binarias es una cuestión aún abierta.

A lo largo de los años, SVO ha venido trabajando tanto en la identificación de nuevas subenanas calientes como en la estimación de su tasa de binariedad. La lista completa de artículos SVO publicados en este campo se puede encontrar [aquí](#) (Fig. 6).

## ACTIVIDADES EDUCATIVAS

Desde sus comienzos SVO puso un fuerte énfasis en la formación y capacitación de investigadores y estudiantes. La formación se considera un elemento clave para garantizar la adopción del entorno VO por parte de la comunidad astronómica. En particular, el uso de las herramientas y servicios VO por parte de las nuevas generaciones de astrónomos es imprescindible para garantizar la sostenibilidad del mismo a largo plazo.

Para ello se ha venido participando en cursos de máster en diferentes universidades españolas (Autónoma y Complutense de Madrid, Granada, Universidad Católica de Murcia, Universidad Internacional de Valencia y Universidad Internacional de La Rioja) y se han dirigido [trabajos de tesis, fin de grado y fin de máster](#). Pero, sin lugar a dudas, la actividad más visible en el marco educativo ha sido la organización de [escuelas y cursos de VO](#) (hasta la fecha, 23 a nivel nacional y 10 a nivel europeo).

### Escuelas VO

Las escuelas VO han demostrado ser el mecanismo de capacitación más eficaz. De entre todos los proyectos VO a nivel internacional, SVO es el más activo en la organización de escuelas VO con 23 ediciones a nivel nacional desde 2009 y 10 a nivel europeo desde 2010. Entre ellas destacan las escuelas realizadas desde 2021 en coordinación con las universidades españolas que ofertan programas de máster o doctorado en astronomía, las dos escuelas realizadas desde 2021 en colaboración con la Federación de Asociaciones Astronómicas de España (FAAE) y orientadas principalmente a la comunidad amateur y la I escuela Latinoamérica que reunió a más de 150 participantes de más de 20 países.

El objetivo principal de las escuelas es exponer a los participantes a la variedad de herramientas y servicios VO disponibles en la actualidad para que puedan utilizarlos de forma eficiente en sus propias investigaciones. Durante las mismas los participantes se familiarizan con las principales funcionalidades de las herramientas VO más populares a través del desarrollo de casos científicos reales. En ocasiones, dependiendo del formato y la duración de la escuela, los participantes pueden trabajar en sus propios casos científicos. Los materiales de formación (tutoria-

les) usados en las escuelas se encuentran disponibles tanto en el [portal](#) del SVO como en plataformas como [Zenodo](#).

El largo periodo en el que la situación pandémica por COVID-19 estuvo lejos de estar bajo control, nos hizo modificar el formato de las escuelas y convertirlas en actividades *online* usando plataformas como Zoom y Slack. Desarrollar un evento con decenas de participantes y un alto nivel de interactividad en un entorno en línea fue un reto exigente y SVO fue pionero a nivel mundial. La experiencia fue extremadamente exitosa y no se observó ningún impacto negativo en el seguimiento de la escuela. Por el contrario, aprovechamos las ventajas del formato virtual para llegar a un público más amplio y diverso. Esto ha hecho que, a día de hoy, no hayamos descartado el formato *online* y lo sigamos usando en muchas de nuestras escuelas.

## EL OBSERVATORIO VIRTUAL Y LA COMUNIDAD AMATEUR

VO es un recurso muy interesante para muchas de las actividades de la comunidad astronómica amateur. Entre ellas, se pueden destacar las siguientes:

### Material didáctico

VO ha desarrollado una serie de [guías y tutoriales](#) que pueden ser de gran utilidad en las actividades divulgativas realizadas por la comunidad amateur, ya que permiten introducir conceptos astronómicos utilizando datos reales. La generación del diagrama HR del cúmulo de las Pléyades, la determinación de la distancia a Andrómeda o a la Nebulosa del Cangrejo, la identificación de una supernova o la estimación del movimiento propio de la estrella de Barnard son los casos prácticos propuestos en algunos de los casos ofertados. Este material puede ser igualmente útil para la enseñanza de la astronomía en cursos de secundaria, bachillerato y universidad.

### Desarrollo de archivos astronómicos

Es bien sabido que en los últimos años la comunidad amateur ha experimentado un avance extraordinario en lo que se refiere tanto al uso de instrumentación astronómica como al manejo de técnicas de reducción de datos. Este avance ha permitido que el interés de la comunidad profesional por las actividades realizadas por los amateurs haya aumentado significativamente y que el número de colaboraciones Pro-Am (Profesional-Amateur) sea cada vez mayor.

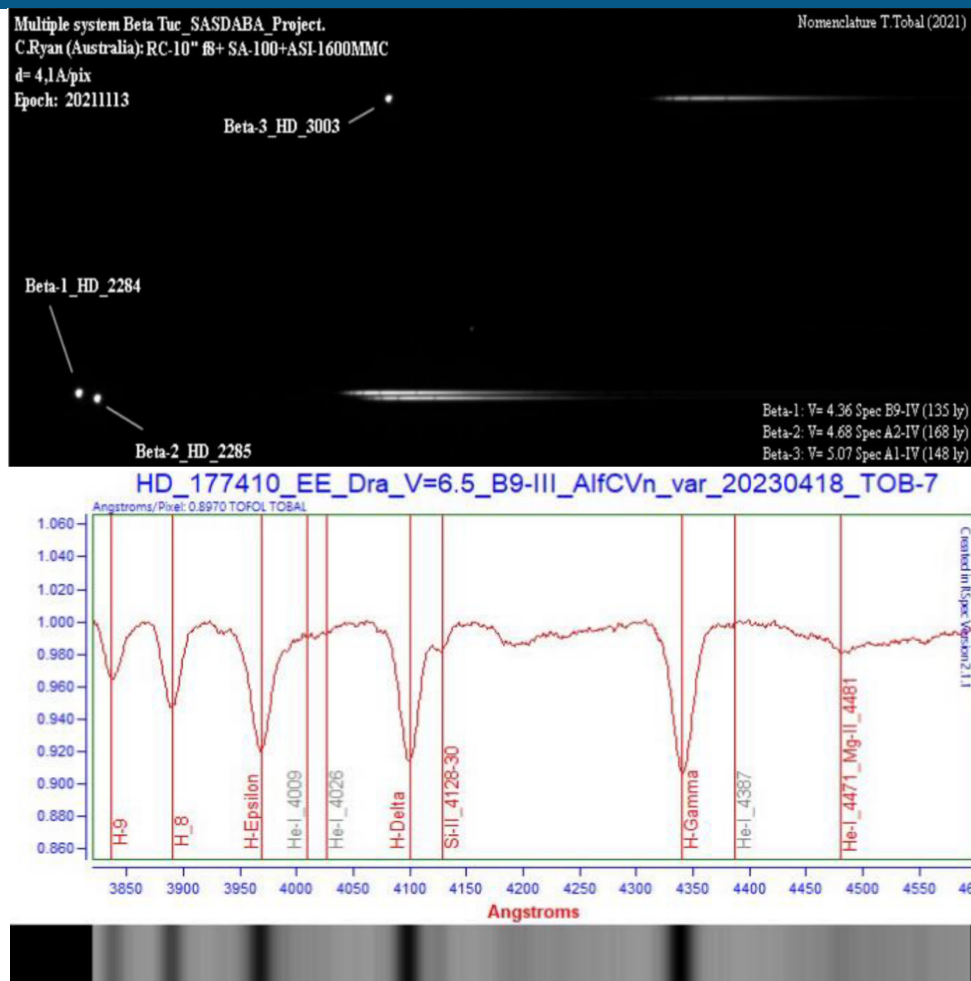


Figura 7: Arriba, observaciones espectroscópicas de Beta Tuc. Abajo, Espectro reducido e identificación de líneas en la estrella variable EE Dra.

No obstante, existe todavía un “talón de Aquiles” en lo que se refiere a la gestión y distribución de los datos obtenidos. Normalmente la información se almacena de manera local, sin copias de seguridad, en equipos sin mantenimiento a largo plazo y de difícil acceso para otros grupos, muchos de los cuales ni siquiera conocen la existencia de dichos datos.

Para mejorar esta situación, desde SVO se ofrece la posibilidad de crear y gestionar un archivo de datos. El único requisito es que el grupo amateur transfiera la información de interés a un ordenador conectado a Internet desde donde será enviada al Centro de Datos Astronómicos del CAB para su ingestión en el archivo una vez hayan superado los pertinentes controles de calidad. Para facilitar su acceso e identificación, los archivos Pro-Am tienen un acceso independiente dentro del SVO a través del [Portal de Datos para Astronomía Amateur](#). A través de este portal es posible acceder a los seis archivos que SVO ha desarrollado para la comunidad amateur a

lo largo de los años. A continuación, describiremos brevemente dos de los más representativos:

- SASDABA: Este proyecto tiene por objetivo la creación de una base de datos espectroscópica de estrellas brillantes ( $V < 5$  mag) de ambos hemisferios. SASDABA es un excelente recurso para docentes, estudiantes y aficionados que deseen realizar trabajos introductorios de espectroscopía estelar.

El archivo [SASDABA](#) proporciona acceso a las imágenes en bruto, que pueden ser descargadas, procesadas y analizadas por cada usuario según sus intereses. SASDABA es un archivo dinámico cuyo contenido cambia con el tiempo. A fecha de mayo de 2024 el cartografiado se encuentra completo a más del 95% y el archivo contiene 8.004 imágenes espectroscópicas de 2.959 estrellas tomadas durante el periodo 2018-2024 en más de 600 noches de observación por equipos ubicados en España, Brasil y Australia. (Figura 7).

- Observatorio de Cielo Profundo (ObCP) de la Agrupación Astronómica de Cartagena: Un aspecto muy interesante a destacar de este [archivo de datos](#) es que, al estar plenamente integrado en el Observatorio Virtual, herramientas VO como Aladin van a descubrir las observaciones ObCP de manera automática, pudiendo éstas compararse con las tomadas por los grandes cartografiados profesionales. Así, por ejemplo, en la Fig. 8 se compara una imagen original con una imagen del mismo campo obtenida por el cartografiado SDSS. Se puede apreciar cómo la imagen ObCP es claramente menos profunda, pero contiene un objeto que no aparece en la imagen SDSS. Utilizando una herramienta de VO como [SkyBot](#) es posible clasificar dicho objeto como un asteroide del Cinturón Principal.

Este sencillo ejemplo nos muestra el enorme potencial en términos de análisis y explotación de datos que ofrece un archivo astronómico VO y el mundo de posibilidades que se abre a la comunidad amateur para desarrollar nuevas líneas de investigación.

## Colaboración en proyectos científicos

Tal y como se desprende de la encuesta que la FAAE llevó a cabo recientemente, existe un creciente interés dentro de la comunidad amateur por las herramientas de VO y su aplicación en colaboraciones Pro-Am.

En este contexto, hemos desarrollado en los últimos meses el proyecto “Identificación y caracterización de estrellas dobles olvidadas”, entendiendo por “olvidadas” aquellas estrellas dobles con una única observación en el catálogo [WDS](#). En colaboración con el Observatorio Astronómico del Garraf y la Agrupación Astronómica de Cartagena, hemos procedido, utilizando el catálogo de datos de la misión Gaia, a identificar aquellos sistemas que se encuentran ligados gravitacionalmente. Como resultado de este trabajo conseguimos confirmar y caracterizar 428 sistemas binarios y múltiples y estimar las energías de ligaduras para 42 de ellos (Fig. 9). Los resultados del trabajo se han publicado en el siguiente [artículo](#).

Figura 8. Comparación entre una imagen del Observatorio de Cielo Profundo (ObCP) de la Agrupación Astronómica de Cartagena (arriba) y una imagen del cartografiado SDSS de la misma región de cielo (abajo). Se puede apreciar que en la imagen superior aparece un objeto que no se muestra en la imagen inferior. Este objeto corresponde al asteroide van Albada, perteneciente al cinturón principal de asteroides.

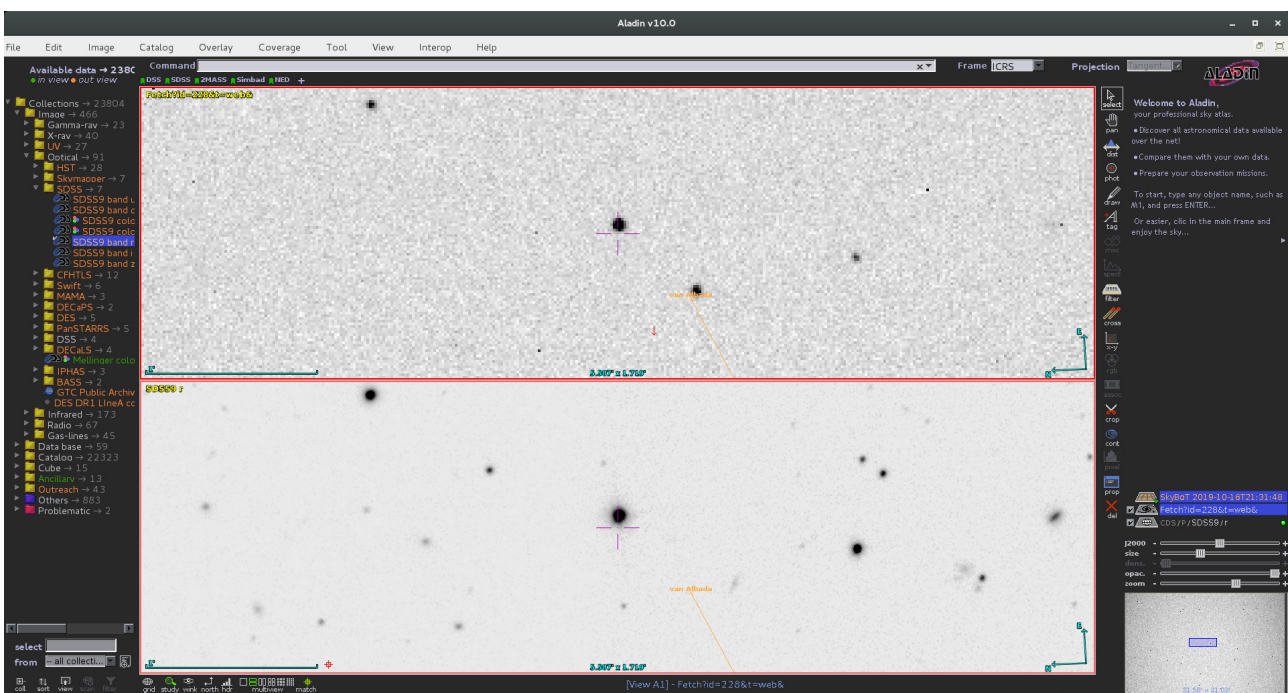
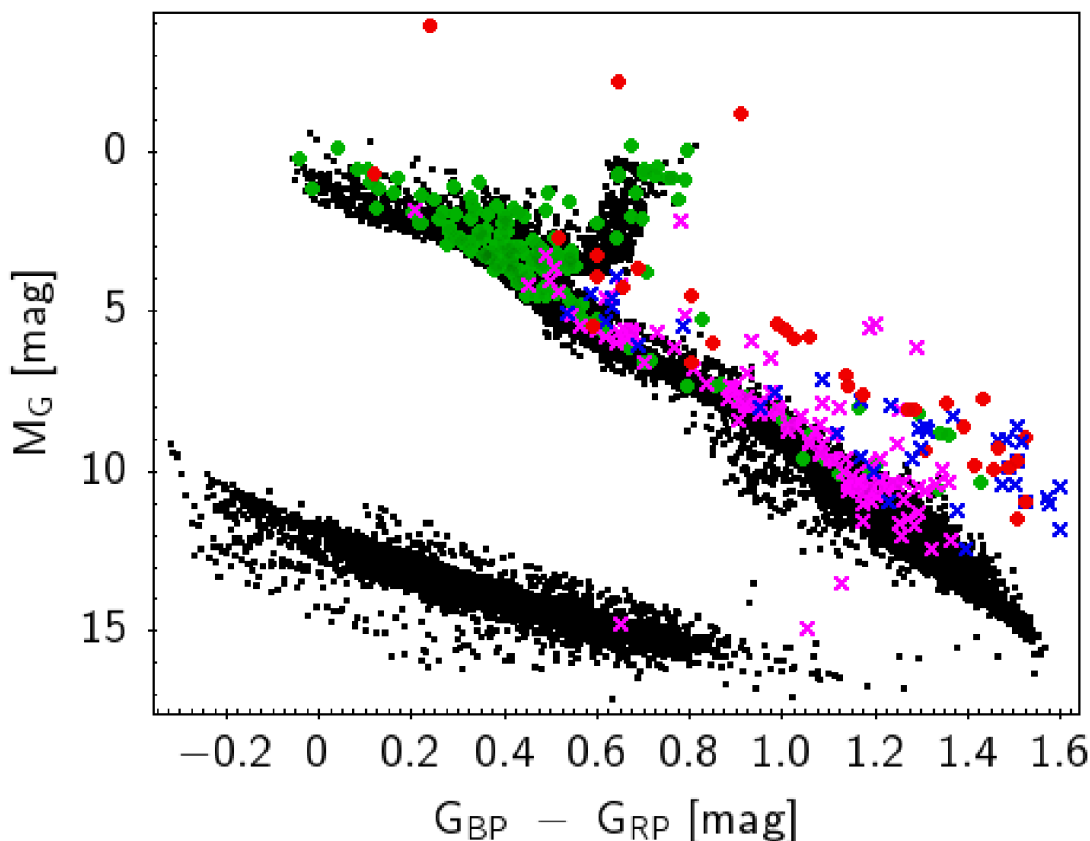


Figura 9: Diagrama color-magnitud de las estrellas dobles "olvidadas" identificadas en Solano et al. (2023). Las componentes primarias clasificadas por VOSA como "singles" se muestran en verde mientras que las identificadas como binarias no resueltas aparecen en color rojo. Igualmente, las componentes secundarias "singles" y binarias no resueltas se muestran en rosa y azul, respectivamente.



### PROYECTOS DE CIENCIA CIUDADANA

El principal objetivo de este tipo de iniciativas es involucrar al público en proyectos de investigación, permitiendo a los entusiastas de la astronomía contribuir al avance científico.

SVO viene desarrollando desde 2011 un [proyecto de ciencia ciudadana](#) cuyo objetivo es mejorar el conocimiento de las órbitas de asteroides cercanos a la Tierra. El proyecto se encuentra abierto al público en general y no se necesita ningún conocimiento previo de astronomía para participar. A través de la inspección visual de una secuencia de imágenes, los participantes deben identificar el asteroide y medir sus coordenadas. Una vez estas coordenadas han sido validadas, la información es enviada al Centro de Planetas Menores para la actualización de los correspondientes parámetros orbitales (Fig. 10).

El proyecto ofrece al público la posibilidad de participar en una atractiva iniciativa recorriendo los mismos

pasos que los astrónomos profesionales (adquisición y análisis de datos y publicación de resultados) y contribuyendo a un mejor conocimiento de los asteroides con potenciales trayectorias de colisión con la Tierra. El trabajo realizado por los más de 4.000 usuarios registrados ha permitido no solamente mejorar el conocimiento de las órbitas de cientos de asteroides y, en consecuencia, estimar de manera más precisa la probabilidad de impacto con la Tierra, sino también aumentar en un 40% y en un !663%! el número de asteroides cercanos a la Tierra y *Mars-crossers* con clasificación taxonómica.

Algunos de los resultados más interesantes de esta iniciativa se pueden encontrar en [Solano et al. \(2014\)](#) y [Carry et al. \(2016\)](#).

### CONCLUSIONES

SVO ha sido una iniciativa pionera y de gran importancia para la astronomía en España durante las últimas dos décadas. Desde su nacimiento en 2004,



SVO ha evolucionado significativamente, adaptándose a los cambios tecnológicos y científicos para servir mejor a la comunidad astronómica.

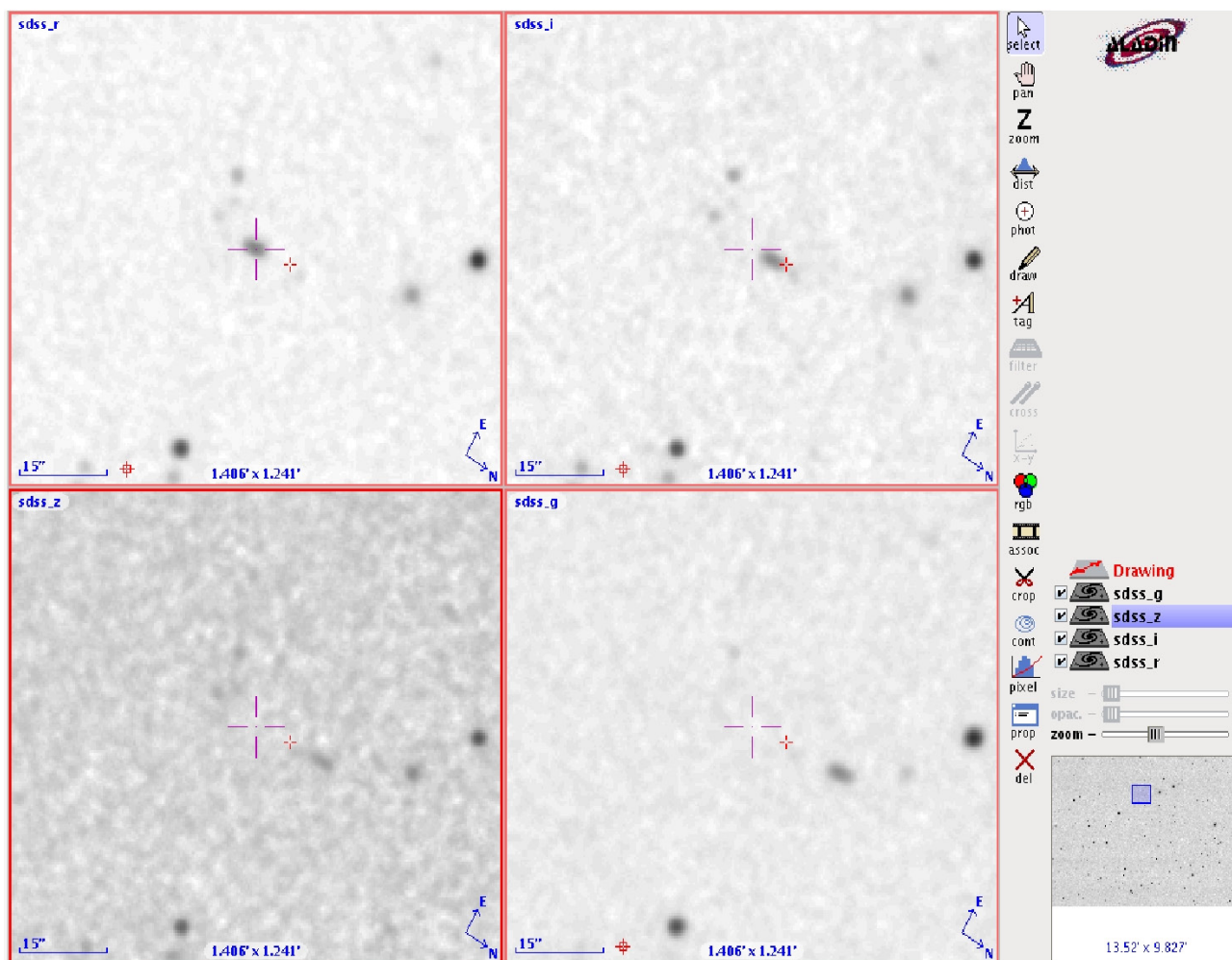
No obstante, la astronomía está en una era de rápidos cambios, con nuevas tecnologías y descubrimientos que transforman constantemente el campo. SVO, una iniciativa plenamente consolidada y reconocida a nivel internacional, deberá seguir innovando para mantenerse a la vanguardia, trabajando en nuevos desarro-

llos que respondan a las necesidades de la comunidad astronómica y, sobre todo, seguir manteniendo el espíritu de servicio a la comunidad que lo ha caracterizado durante estos primeros veinte años de vida.

### AGRADECIMIENTOS

A todos los miembros del proyecto SVO con los que he tenido el placer de trabajar desde 2004 y sin cuya aportación todo lo descrito en este artículo no hubiera sido posible.

Figura 10. Proyecto de ciencia ciudadana del Observatorio Virtual Español. El asteroide 2007JZ20 se identifica claramente en la secuencia de imágenes por su movimiento Sur – Norte. La pequeña cruz roja indica la posición esperada del asteroide según sus parámetros orbitales. Se observa como dicha posición no coincide con la posición real del asteroide en las imágenes. Gracias a las mediciones realizadas por los participantes en el proyecto estas discrepancias pueden ser reducidas o, incluso, eliminadas.



# CONCURSO INFANTIL DE DIBUJOS

El día 11 de febrero se celebra el Día Internacional de la Mujer y la Niña en Ciencia. En este marco, desde la Comisión de Mujeres y Astronomía de la SEA llevamos varios años proponiendo diferentes actividades relacionadas con el aumento de visibilidad de las astrónomas de nuestra comunidad. Una de estas actividades es el concurso infantil de dibujos que este año ha celebrado su tercera edición. Las artistas, con edades comprendidas entre los 3 y los 15 años, han enviado más de 150 dibujos relacionados con la Mujer y la Astronomía.



**Sara Rodríguez Berlanas**  
Inst. de Astrofísica de Canarias / U. de La Laguna  
[srberlan@iac.es](mailto:srberlan@iac.es)

**Ismael García Bernete**  
Universidad de Oxford  
[igbernete@gmail.com](mailto:igbernete@gmail.com)

**Naiara Barrado Izagirre**  
Universidad del País Vasco  
[naiara.barrado@ehu.eus](mailto:naiara.barrado@ehu.eus)

**Alicia Rouco Escorial**  
European Space Astronomy Centre  
[Alicia.RoucoEscorial@esa.int](mailto:Alicia.RoucoEscorial@esa.int)

En nombre de la Comisión Mujeres y Astronomía

El día 11 de febrero se celebra el [Día Internacional de la Mujer y la Niña en Ciencia](#), una iniciativa de la Asamblea General de las Naciones Unidas con el objetivo de lograr una mayor participación y progreso de las mujeres y las niñas en la ciencia. La Sociedad Española de Astronomía (SEA), a través de su [Comisión Mujeres y Astronomía](#), ha participado en las pasadas ediciones de esta celebración con diversas actividades que también se realizan este año 2024, con el ánimo de aumentar la visibilidad de nuestras astrónomas, así como de fomentar la presencia de las niñas en las actividades relacionadas con la física y con las áreas denominadas STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, del inglés *Science, Technology, Engineering and Mathematics*).

Una de las actividades realizadas este año 2024 ha sido un concurso infantil de dibujos, donde niños y niñas de edades comprendidas entre los 3 y 15 años han plasmado su visión de las mujeres en la Astronomía. Tras las exitosas convocatorias de los años 2019 y 2020, hemos retomado esta bonita actividad, celebrando su tercera edición con una participación de más de 150 jóvenes artistas.

## MOTIVACIÓN

Uno de los objetivos principales de esta actividad es promover el interés por la astronomía y la carrera investigadora entre las niñas, visibilizando la presencia de la mujer en la ciencia, y con ello combatir las desigualdades significativas de género aún existentes en las áreas STEM. Actividades como este concurso de dibujos dirigido al público infantil no sólo permiten fomentar desde una edad temprana la igualdad y mayor diversidad en la ciencia, sino también evidenciar entre la población adulta los estereotipos de género aún presentes en áreas científicas como la Astronomía.

Creemos importante proporcionar oportunidades para explorar la imaginación y creatividad en las edades más tempranas. A través de un concurso de dibujo infantil se da a los más pequeños la oportunidad de expresar la innata fascinación que la humanidad siente por el Universo. Se hace, además, de una forma accesible para todo el mundo en cuanto al nivel socioeconómico o la edad: no se necesita una gran inversión, simplemente un papel y lápiz son suficientes para realizar esta actividad.



Muestra de los dibujos participantes en esta edición del concurso de dibujo.

### Importancia para la comunidad científica

Este tipo de actividades proporcionan una oportunidad de devolver el esfuerzo realizado en investigación más allá de la producción científica. En particular, este concurso de dibujos infantiles nos proporciona una herramienta muy útil para promover la comprensión de la ciencia y el papel crucial de las investigadoras entre las generaciones más jóvenes, a la vez que fomenta una conexión entre la comunidad científica y el público general. Actividades como ésta contribuyen a inspirar futuras generaciones de niñas y niños en carreras investigadoras, siendo no solo una inversión de futuro científico, sino una forma de contribuir a la construcción de una sociedad más informada y madura en el bienestar colectivo.

### PEQUEÑAS ARTISTAS

El jurado, compuesto por miembros voluntarios pertenecientes al Grupo Extendido de la Comisión Mujer y Astronomía, ha valorado y puntuado la originalidad y creatividad de los más de 150 dibujos recibidos y que se han dividido en cuatro categorías según la edad de los participantes: Categoría 1 (3 a 5 años), Categoría 2 (6 a 8 años), Categoría 3 (9 a 12 años) y Categoría 4 (13 a 15 años). Los tres primeros dibujos clasificados de cada categoría resultaron el/la ganador/a y primer y segundo finalistas. Todos ellos recibieron un regalo relacionado con la astronomía, aparte del certificado de participación que se otorgó a todos y todas las jóvenes artistas. Los dibujos ganadores y finalistas se encuentran publicados en la página web del concurso [<https://www.sea-astronomia.es/noticias/estos-son-los-premios-del-concurso-del-dibujo-infantil-mujer-y-astronomia-2024>]. Además, todos los dibujos recibidos se han expuesto en un carrusel en el banner superior de la web de la SEA [<https://www.sea-astronomia.es/>] a lo largo de los meses de febrero, marzo y abril, sabiendo que eso daba mayor visibilidad a la actividad además de suponer un importante aliciente para los y las participantes.

Las obras recibidas han puesto de relevancia cómo niñas y niños no presentan los sesgos ni los estereotipos que frecuentemente sí encontramos en la sociedad adulta, lo cual nos anima a seguir llevando a cabo actividades de estas características. Un ejemplo para compartir es el de Alma, ganadora del

concurso de la Categoría 1 con tan sólo 4 años de edad. En su dibujo, Alma nos presenta su representación de las fases de la Luna. Según palabras de su madre *“Ha sido una experiencia chulísima que siempre recordaremos. Quién sabe si en unos años Alma es astrónoma...”*

Las ganadoras fueron:

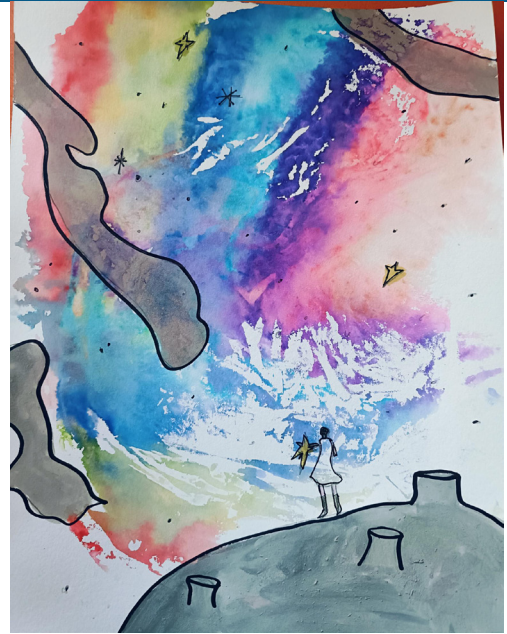
- Alma Martínez Arlanzón. Ganadora de la Categoría 1, de 4 años (Burgos)
- María Zangróniz. Ganadora de la Categoría 2, de 7 años (La Rioja)
- Nerea Ullan Bejarano. Ganadora de la Categoría 3, de 9 años (Salamanca)
- Lucía Guillén Álvarez. Ganadora de la categoría 4, de 13 años (Madrid)

Además, en cada categoría hubo concursantes finalistas:

- Lucía Pla Rubiano. 1ª Finalista de la Categoría 1, de 5 años (Madrid)
- Raúl Moreno. 2º Finalista de la Categoría 1, de 3 años (La Rioja)
- Vega Corrochano Sánchez. 1ª Finalista de la Categoría 2, de 7 años (Valladolid)
- Julia Rodríguez Paquet. 2ª Finalista de la Categoría 2, de 7 años (Granada)
- Angie Olarte Calderón. 1ª Finalista de la Categoría 3, de 11 años (Colombia)
- Laia Iraizoz. 2ª Finalista de la Categoría 3, de 9 años (Navarra)
- Sofía Simsek Román. 2ª Finalista de la Categoría 3, 10 años (Gipuzkoa)
- Gabriela Gómez Sinisterra. 1ª Finalista de la Categoría 4, de 14 años (Colombia)
- Cristina BL. 2ª Finalista de la Categoría 4, de 15 años (Colombia)

Desde la CMYA de la SEA aprovechamos para felicitar no solo a las ganadoras del concurso sino a todos los participantes, debido al alto nivel de los dibujos presentados y creatividad que han demostrado sus jóvenes autores.

**¡¡NUESTRA MÁS SENTIDA ENHORABUENA A TODAS Y TODOS LOS CONCURSANTES!!**



Dibujos ganadores del concurso infantil de dibujos sobre la mujer en la astronomía. Arriba a la izquierda, dibujo de Alma Martínez, ganadora de la Categoría 1 (3 a 5 años). Arriba a la derecha, dibujo de María Zangróniz, ganadora de la Categoría 2 (6 a 8 años). Abajo a la izquierda, dibujo de Nerea Ullán Bejarano, ganadora de la Categoría 3 (9 a 11 años). Abajo a la derecha, dibujo de Lucía Guillen Álvarez, ganadora de la Categoría 3 (12 a 15 años). Bajo estas líneas, actuales miembros de la comisión Mujeres y Astronomía de la SEA: Marina Rodríguez Baras, Alicia Rouco, Beatriz Agís, Naiara Barrado, Silvia Bonoli, Ismael García Bernete, Marc Huertas Company, Maritza Lara López, Elena Manjavacas, Nataly Ospina, Irene Pintos Castro, Isabel Rebollido, Sara Rodríguez Berlanas y Alba Vidal.



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.

## **MINIA MANTEIGA, NUEVA COORDINADORA DE AYA**

Este semestre, Patricia Sánchez Blázquez ha finalizado su mandato como coordinadora de AYA en la Agencia Estatal de Investigación. Agradecemos a Patricia el esfuerzo realizado por servir a nuestra comunidad y deseamos lo mejor a su sucesora, nuestra vicepresidenta (y pronto presidenta) Minia Manteiga Outeiro.

## **GROUP ACHIEVEMENT AWARD 2024 DE LA RAS AL EQUIPO DEL JWST-MIR**

La Royal Astronomical Society (RAS) ha concedido su *Group Achievement Award 2024* al equipo del instrumento JWST-MIRI que incluye, entre otros, a Luis Colina, co-IP del instrumento por parte de España, David Barrado, IP de varios proyectos del Plan Nacional gestionados desde INTA para el diseño y construcción del MTS, y Eva Díaz Catalá, Project Manager durante la mayor parte del proyecto.

## **ALBERTO CASTRO TIRADO Y SU EQUIPO, PREMIADOS POR LA UNIVERSIDAD DE MÁLAGA**

Alberto J. Castro Tirado y su equipo han recibido el "I Premio de trabajos de investigación de excelencia de la Universidad de Málaga" en su 50 aniversario, de entre un total de 2700 trabajos de investigación evaluados (con autores principales o co-autores de dicha universidad). El trabajo premiado, que trata sobre el nuevo magnetar hallado en la galaxia del Escultor (NGC 253), fue liderado por Alberto y publicado en *Nature*.

## **EVA VILLAVER, PREMIO DE INVESTIGACIÓN 2023 DE LA SOCIEDAD GEOGRÁFICA ESPAÑOLA**

La Sociedad Geográfica Española, fundada en 1997, ha concedido su Premio de Investigación 2023 a nuestra colega Eva Villaver. Los premios de la SGE son un reconocimiento a las mejores iniciativas y proyectos en el campo de la exploración, los viajes, la aventura y la investigación científica.

## **ASTEROIDE (667531) IGNASIRIBAS**

La IAU ha puesto nombres nuevos a dos asteroides en homenaje a dos relevantes astrónomos españoles. El asteroide 667531 toma el nombre de nuestro colega Ignasi Ribas, director del Institut d'Estudis Espacials de Catalunya. El asteroide 658642 ha sido bautizado con el nombre de Carreira, en honor al astrofísico y jesuita gallego Manuel Carreira.

## **JULIO ARRECHEA RODRÍGUEZ, PREMIO SEA TESIS 2024**

El Premio SEA Tesis 2024, en su modalidad de Astronomía y astrofísica, ha sido otorgado a **Julio Arrechea Rodríguez**, por la tesis "Hydrostatic equilibrium in the semiclassical approximation", realizada en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) bajo la dirección de los Profs. Carlos Barceló Serón, Luis J. Garay Elizondo y Raúl Carballo Rubio.

El alto nivel de las 24 tesis presentadas al premio ha llevado al jurado a conceder dos menciones especiales a **Clara Dehman** por su trabajo "Unveiling the Physics of Neutron Stars: A 3D expedition into Magneto-Thermal evolution in Isolated Neutron Stars with 'MATINS'" dirigida por los Dres. José A. Pons, y Daniele Viganò y la Profa. Nanda Rea, y a **Francesco Sinigaglia**, por su tesis "Galaxy Evolution, Cosmology, and Large Scale Structure with HI: paving the way to 21-cm line and Lyman-alpha forest upcoming surveys", dirigida por los Profs. Francisco-Shu Kitaura Joyanes y Giulia Rodighiero.

## **JOSÉ FRANCISCO SANZ REQUENA, DEP**

Con tristeza hemos recobido este semestre la noticia del fallecimiento de José Francisco Sanz Requena, investigador en la Universidad de Valladolid y también miembro del Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU. Descanse en paz.

**THE REINVENTION OF SCIENCE**

Bernard J. T. Jones, Vicent J. Martínez y  
Virginia L. Trimble

ISBN: 978-1-80061-336-2

Editorial: World Scientific Publishing

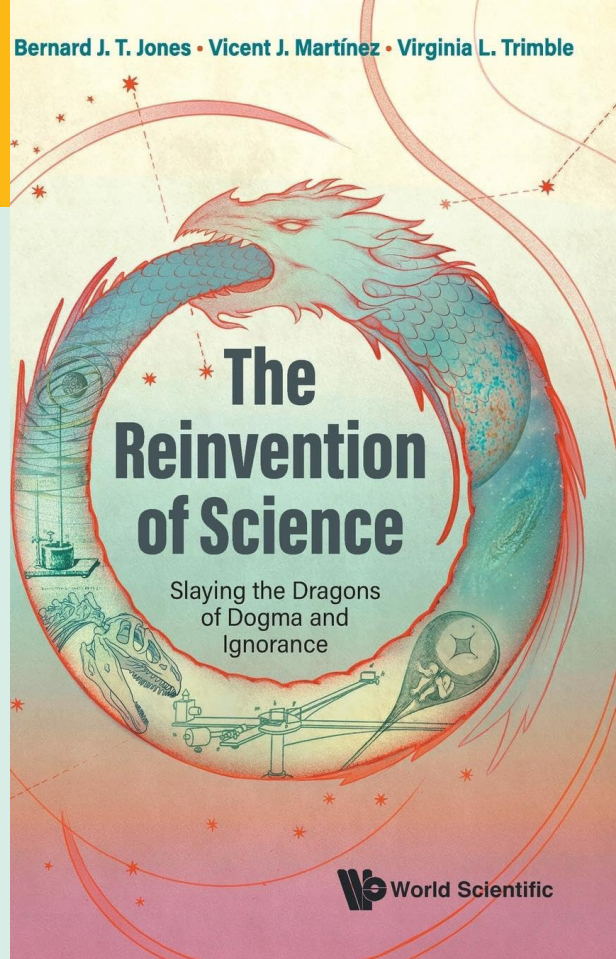
*Hic sunt dracones* (aquí hay dragones) es una expresión que avisa de territorios peligrosos o inexplorados. Proviene de una práctica medieval de dibujar ilustraciones de dragones y monstruos marinos en zonas inexploradas de los confines de los mapas donde se creía que existían peligros potenciales.

Aparentemente algunos de estos terribles animales imaginarios se escaparon de las cartas marinas y fueron adoptados por la ciencia para que ésta pudiera avanzar. Estos «dragones», aunque no fueran visibles o detectables en su tiempo, eran seres que se consideraban necesarios para mantener la estabilidad del cosmos tal como lo veían o lo entendían los filósofos. La existencia de estas entidades también permitía explicar, o al menos justificar, las observaciones o experimentos del momento. Una práctica útil temporalmente, pero que hizo que en muchas ocasiones estos dragones acabaran siendo dogmas aceptados que dificultaron el progreso.

**The Reinvention Of Science, Slaying The Dragons Of Dogma And Ignorance**, el interesante libro que han escrito los cosmólogos Bernard J. T. Jones, Vicent J. Martínez y Virginia L. Trimble, nos introduce en el fascinante mundo de la creación del conocimiento desde una perspectiva innovadora, ya que más que los personajes se destacan las ideas, unas veces geniales y otras veces basadas en los dragones del dogma y la ignorancia. Es un texto que detalla el flujo de las ideas que han llevado a la civilización actual, pero también nos explica cómo los errores, los pasos en falso, las vacilaciones, nos han hecho avanzar pero también retroceder en la formación de la ciencia moderna. Porque aunque siempre nos han contado la evolución de la ciencia de forma lineal, en realidad, ésta ha estado llena de curvas, de callejones sin salida y de trampas.

Para encontrar el camino correcto hacia el conocimiento fue preciso que nos perdiéramos muchas veces. Así, para explicar el mundo se adoptó el dragón del geocentrismo, con las esferas cristalinas y epiciclos, antes de llegar al heliocentrismo; el fuego del dragón del flogisto precedió la llegada de la termodinámica o una substancia sutil como el éter se creía que llenaba el universo antes de que se descubriera la relatividad, todos éstos son ejemplos de dragones, entre muchos otros, que los científicos se encontraron por el camino y que tuvieron que vencer para poder avanzar.

¿Estamos en el siglo XXI probablemente en una situación similar con la energía oscura? ¿Puede que sea realmente un dragón, una entidad creada solo



para justificar las observaciones? ¿Habrá que esparirlo de alguna manera para poder adentrarnos en las zonas inexploradas de una nueva física?

**The reinvention of science** es también un libro de las personas que han hecho y hacen la ciencia, con sus aciertos, egos, tozudez y a veces hasta incluso con sus ataques despiadados a quienes proponían teorías alternativas. Pero, sobre todo, se saca a la luz el papel cada vez más relevante de las mujeres en la ciencia. Así, conoceremos a Mary Anning, fundadora de la paleontología; Marie Tharp, que descubrió la dorsal mesoatlántica y la deriva continental; Gerta Keller, que reivindicó la teoría del vulcanismo para explicar la extinción de los dinosaurios; Jocelyn Bell, descubridora de los púlsares, o Vera Rubin, que demostró la existencia de la materia oscura. Su labor fue a menudo menospreciada, si no ocultada o usurpada por sus compañeros hombres. Y es que la ciencia tampoco está libre de malas personas, acoso laboral o abuso de poder y prejuicios de género o de clase.

La lectura del libro es un placer intelectual, y sus autores, a lo largo de un viaje temporal en busca de dragones ocultos, consiguen demostrar de manera clara de qué manera progresa el conocimiento científico, aunque algunas ideas erróneas puedan detener momentáneamente este progreso y aunque, a veces, personas que no se lo merecen se lleven los honores. Por ello a veces, se necesitaría un San Jorge de la ciencia que matara al dragón para hacer posible que de su sangre brotaran las rosas del conocimiento.

Enric Marco  
Departament d'Astronomia i Astrofísica  
Universitat de València

## Tratamiento óptimo de contaminantes y sistemáticos para la explotación presente y futura de datos del Fondo Cósmico de Microondas

Autora: Elena de la Hoz López-Collado  
(delahoz@berkeley.edu)

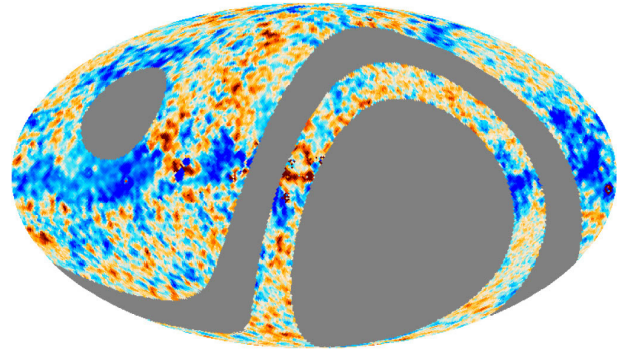
Tesis doctoral dirigida por: Patricio Vielva  
Martínez y Enrique Martínez González  
Centro: Instituto de Física de Cantabria  
(Universidad de Cantabria)

Fecha de lectura: 11 de enero de 2023

La presente tesis doctoral es un compendio de artículos donde se exponen diversas aplicaciones de métodos de separación de componentes paramétricos para abordar los desafíos asociados a la detección de ondas gravitacionales primordiales (OGP) a partir de medidas de polarización del Fondo Cósmico de Microondas (FCM). En particular, se enfoca en la obtención de mapas de FCM libres de *foregrounds*, emisiones en microondas provenientes de fenómenos físicos distintos al FCM y errores sistemáticos. Para esto, se ha aplicado una herramienta de separación de componentes paramétrica Bayesiana llamada B-SeCRET (*Bayesian-Separation of Components and Residuals Estimate Tool*) tanto a datos como a simulaciones realistas de experimentos centrados en el estudio del FCM.

El tratamiento y análisis de datos de polarización del FCM destinados a la búsqueda de OGP requieren técnicas sofisticadas, no solo debido a la pequeña intensidad de la señal que se busca, sino también porque esta es más pequeña que la señal emitida por *foregrounds* y puede ser confundida con errores sistemáticos. Para abordar ambos contaminantes, en esta tesis se ha desarrollado B-SeCRET, un método Bayesiano paramétrico que utiliza un muestreador de conjuntos invariante afín basado en un *Markov Chain Monte Carlo*. Este enfoque Bayesiano busca determinar los parámetros del modelo que se ajustan mejor a las observaciones teniendo en cuenta información *a priori*, permitiendo una estimación robusta y precisa de estos. Esta herramienta se ha utilizado en la tesis con tres objetivos diferentes: 1) estudio y optimización del diseño experimental de un experimento terrestre enfocado en la detección del FCM a bajas frecuencias, 2) control y mitigación de errores sistemáticos debidos a ángulos de polarización calibrados con una precisión insuficiente y 3) caracterización de la densidad espectral de energía (SED) del sincrotrón polarizado en el rango de microondas. A continuación, se detallan los resultados principales de cada aplicación.

La primera aplicación se centra en la óptima detección del *ratio* entre modos tensoriales y escalares ( $r$ ) con un experimento terrestre centrado en las bajas frecuencias como parte de la iniciativa ELFS (*European Low-Frequency Survey*). En el estudio se exploran dos conceptos diferentes: un experimento independiente con suficiente sensibilidad y bandas espectrales entre 10-120 GHz para detectar las OGP con una precisión de  $\sigma(r) \sim 10^{-3}$ , o un experimento enfocado solo a las frecuencias más bajas (10-40 GHz) cuyo objetivo sería ayudar a limpiar los *foregrounds* de baja frecuencia a otros experimentos como la misión Lite-



Índice espectral de la emisión de sincrotrón galáctica polarizada en el rango de las microondas obtenida a partir de datos de QUIJOTE-MFI, WMAP y Planck. Mapa en coordenadas galácticas.

BIRD. Los resultados muestran que el primer objetivo solo se podría obtener con un experimento terrestre muy sensible con instrumentos en ambos hemisferios, mientras que el segundo objetivo es fácil de conseguir con la tecnología actual y ayudaría significativamente a la limpieza del sincrotrón, además de otras potenciales emisiones polarizadas como el *spinning dust*.

La segunda aplicación estudia el efecto de una calibración imprecisa de ángulos de polarización y su impacto en la detección de las OGP. Este efecto se prueba en el contexto del experimento Lite-BIRD, y los resultados muestran que si la calibración experimental no es suficientemente precisa, se recupera un valor sesgado de  $r$ . Sin embargo, se demuestra que este error sistemático se puede mitigar de dos formas: 1) estimando los ángulos de polarización a partir de los datos multifrecuencia asumiendo que el espectro angular cruzado EB del FCM es nulo y corrigiendo los mapas multifrecuencia con esas estimaciones, o 2) incluyendo los ángulos de polarización en el modelo paramétrico además de información *a priori* sobre los ángulos dentro de B-SeCRET. Ambos enfoques son capaces de mitigar los errores sistemáticos debido a este efecto hasta niveles despreciables, aunque el segundo muestra una mejor caracterización de los ángulos de polarización.

Finalmente, la tercera aplicación se centra en la reconstrucción del SED del sincrotrón polarizado en el rango de las microondas, entre 11 y 353 GHz, a partir de datos del *Multi-Frequency Instrument* (MFI) del experimento QUIJOTE, además de los datos de WMAP y Planck. A partir de estos datos, se ha logrado la primera reconstrucción del índice espectral del sincrotrón en el hemisferio norte a una resolución de dos grados, demostrando finalmente que las variaciones espaciales observadas en este índice son estadísticamente significativas. También se encontró un valor no nulo de una posible curvatura del SED del sincrotrón; sin embargo, no hay suficiente evidencia para determinar si el sincrotrón en el rango de las microondas se ajusta mejor a una ley de potencias o a una ley de potencias con curvatura.

Es importante destacar que todas estas líneas de estudio siguen en desarrollo. En particular, se está estudiando la implementación del segundo concepto de la primera aplicación mediante la incorporación de instrumentos europeos de bajas frecuencias (6-20 GHz) en el telescopio del *Simons Array* para ayudar a limpiar la emisión de sincrotrón del FCM. Por otro lado, dentro de la colaboración LiteBIRD, se ha desarrollado una metodología para estimar simultáneamente los ángulos de polarización y un ángulo de birrefringencia isotrópico. Por último, se está llevando a cabo un análisis de separación de componentes centrado en los *foregrounds* de bajas frecuencias con datos de intensidad del MFI y otros experimentos dentro del rango de las microondas.

Tesis disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/29126>



# Técnicas de deconvolución dinámicas en observaciones interferométricas

Autor: Alejandro Mus (alejandro.mus@uv.es)

Tesis doctoral dirigida por: Ivan Martí-Vidal

Centro: Universitat de València

Fecha de lectura: 18 de abril de 2023

La técnica de VLBI (por sus siglas en inglés, *very long baseline interferometry*) combina la señal de diferentes antenas distribuidas alrededor del mundo para sintetizar un telescopio del tamaño de la Tierra y superar así las limitaciones que conllevaría construir un único telescopio de dicho tamaño. Gracias a VLBI, la colaboración del *Event Horizon Telescope* (EHTC) ha obtenido las primeras imágenes de dos agujeros negros supermasivos, M87\* y SgrA\*, a escalas de su horizonte de sucesos. No obstante, esta técnica presenta dificultades. El pobre recubrimiento del espacio de Fourier (el espacio de las visibilidades) hace que existan múltiples imágenes asociadas a una observación. En otras palabras, el problema inverso de obtención de una imagen a partir de datos interferométricos está mal condicionado.

Los retos para obtener imágenes son particularmente notables en el caso de SgrA\*. El medio interestelar presente produce un efecto de distorsión. No obstante, la mayor dificultad que presenta este objeto es su rápida variabilidad intrínseca. Su relativa baja masa y tamaño hacen que el periodo orbital de su ISCO sea del orden de minutos. Por ello, nuevos algoritmos que lidien con su variabilidad deben ser desarrollados. Queremos poder obtener imágenes y vídeos.

Existen dos grandes familias de algoritmos que resuelven el problema de la "reconstrucción de imágenes" (o *imaging*): "*Forward*" y "*Backward Modeling*". Mientras que los segundos trabajan en el espacio de Fourier y aplicando deconvoluciones sucesivas que "limpian" la imagen, los primeros suponen una imagen conocida a priori e intentan encontrar la imagen más cercana que mejor se ajusta a los datos. Por supuesto, ambas estrategias presentan sus ventajas y desventajas. No obstante, la necesidad de conocimiento experto por parte del usuario en los "*Backward Modeling*" los hace especialmente sensibles a sesgos.

Por otro lado, los algoritmos de "*Backward Modeling*" pueden ser divididos en "Métodos de optimización", "Métodos Bayesianos" y, más recientemente, "Aprendizaje automático e inteligencia artificial".

En esta tesis se presentan tres nuevos algoritmos, dos siguiendo la filosofía del "*Forward Modeling*" y uno en la de "*Backward Modeling*", nacidos para formar parte de la nueva generación de algoritmos de *imaging* y diseñados para los retos que aparecerán con telescopios de mayor sensibilidad.

En primer lugar, se presenta MOEA/D (*Multi-Objective Evolutionary Algorithm by Decomposition*), un algoritmo de optimización multiobjetivo que descompone el problema de *imaging* en siete problemas de optimización independientes. Estos problemas se resuelven mediante los principios de la evolución Darwiniana.

De este modo, nuestro algoritmo resuelve dos de las grandes carencias existentes en los algoritmos actuales de *imaging*:

1. Evita hacer costosas exploraciones de parámetros. Además, da explícitamente las relaciones entre dichos parámetros.
2. Es capaz de obtener todas las posibles imágenes provocadas por el pobre recubrimiento del espacio de Fourier.

En segundo lugar, se presenta una nueva calibración, llamada "two-components self-calibration". El centro galáctico es un laboratorio astrofísico riquísimo. En él, se pueden encontrar toda clase de objetos astronómicos como remanentes de supernovas, un agujero negro, púlsares e incluso un magnetar. No obstante, la alta variabilidad de SgrA\* contamina las observaciones, de tal modo que pueden aparecer efectos espurios en las imágenes que den lugar a confusión con eventos transitorios (*transients*).

En esta parte de la tesis, hemos creado una técnica de calibración que parte de la idea de dividir la fuente en dos partes: una compacta y variable, y otra extensa y constante. Esta técnica nos permite maximizar la información de los datos. Dicho modelado permite construir una ganancia de antena que absorbe la variabilidad intrínseca de la fuente, mitigando los efectos provenientes de la variabilidad.

Con estos datos de alta calidad hemos reconstruido vídeos de los residuos de las imágenes en cada tiempo de integración del interferómetro ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) para buscar *transients*. Puesto que hemos modelado suponiendo que la parte extensa es constante, cualquier *transient* aparecerá en los residuos. Para determinar si un evento es transitorio o ruido, hemos establecido una definición basada en previos trabajos de la literatura.

Finalmente, se presenta el problema de optimización ngMEM o next-generation Maximum Entropy Method. Este problema de optimización con restricciones extiende el concepto de entropía a la dimensión temporal y permite recuperar películas, en lugar de imágenes, de objetos con rápida evolución como es el caso de SgrA\*. La solución de dicho problema es la película con máxima entropía en brillo y tiempo.

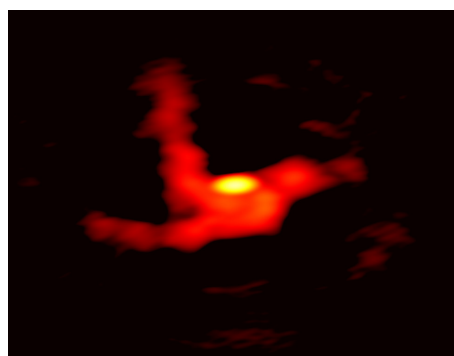
Para ello, se define el concepto de "keyframe", instante concreto de la observación donde se resuelve el problema de optimización. Estos keyframes están relacionados por la entropía temporal y por un "time beam", una correlación Gaussiana que pondera los keyframes según su distancia temporal.

El problema debe satisfacer que:

1. Los datos deben ajustarse a un modelo.
2. Las curvas de luz de la fuente deben ajustarse a las curvas de luz del modelo.

En los capítulos asociados a este problema, hemos mostrado su formulación matemática y presentado ejemplos. Toda la tesis está acompañada de un estado del arte de los algoritmos actuales de reconstrucción de imágenes y películas.

Tesis disponible en: <https://roderic.uv.es/items/f1dda1e9-a766-4824-be2c-114655269e50>



SgrA\* visto con ALMA a 230 GHz durante las observaciones del EHT. La imagen de alta calidad se ha obtenido usando la nueva técnica introducida "two components self-calibration".

## Envejecimiento y apagado galáctico

Autor: Pablo Corcho Caballero

(corchocaballeropablo@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Yago Ascasibar y

Ángel Rafael López Sánchez

Centro: Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

y Macquarie University (MQ; Sydney, Australia)

Fecha de lectura: 27 de abril de 2023

Esta tesis investiga la actividad presente y pasada de formación estelar en galaxias, y los mecanismos físicos que gobiernan la conversión de gas en estrellas en el Universo local. La primera parte se enfoca en estudiar la distribución de galaxias en términos de la tasa de formación estelar específica y la masa estelar total (Corcho-Caballero et al. 2020). Encontramos que la distribución es monomodal, correspondiendo esta a la Secuencia Principal de galaxias formadoras de estrellas, y presenta colas, con forma de ley de potencias, que se extienden en ambos extremos. Este resultado es consistente con el escenario de una única población de galaxias con diferentes niveles de actividad de formación estelar (ver Figura-A). Al comparar los resultados con varias simulaciones cosmológicas, encontramos que estas están de acuerdo con las observaciones hasta el llamado Valle Verde (*Green Valley*), donde las galaxias muestran bajos niveles de formación estelar (Corcho-Caballero et al. 2021a). Por debajo de este límite, la mayoría de las galaxias pasivas en las simulaciones cesaron completamente la formación de estrellas hace varios gigaaños, después de experimentar algún episodio de apagado (*quenching*), mientras que las observaciones parecen indicar que estas galaxias aún conservan niveles residuales de formación estelar (ver Figura-B).

La segunda parte de la tesis consistió en estudiar la historia de formación estelar en galaxias y determinar el papel de los mecanismos que pueden detener de forma abrupta la misma. Hemos desarrollado una herramienta de diagnóstico, denominada Diagrama de Envejecimiento (*ageing diagram*), para discriminar entre galaxias dominadas por evolución secular y aquellos sistemas que recientemente dejaron de formar estrellas. Esta técnica se ha aplicado a varias muestras de galaxias observadas con unidades de campo integral, tanto en escalas resueltas (Corcho-Caballero et al. 2021b) como en escalas globales (Corcho-Caballero et al. 2023a, Corcho-Caballero et al. 2023b), y en combinación con datos sintéticos de simulaciones (ver Figura-C). Los resultados revelan la existencia de dos secuencias galácticas paralelas y estrechas – representando los escenarios de envejecimiento y apagado – indicando que, en lugar de dos etapas de evolución intrínsecas a todas las galaxias, hay dos caminos evolutivos distintos con un final común. Las galaxias pueden volverse rojas debido a la influencia de algún mecanismo de apagado (en escalas de varios cientos de megaaños) o simplemente debido al continuo consumo del reservorio de gas a través de la formación estelar (en escalas de varios gigaaños).

Mostramos que más del 70% de las galaxias en el Universo local evolucionan secularmente, mientras que una pequeña fracción de sistemas, del 5 al 10%, ha sufrido una interrupción brusca en su formación estelar en el último gigaaño. El número restante de galaxias corresponde a una población vieja, cuya antigua formación estelar es difícil de inferir. Concluimos explo-

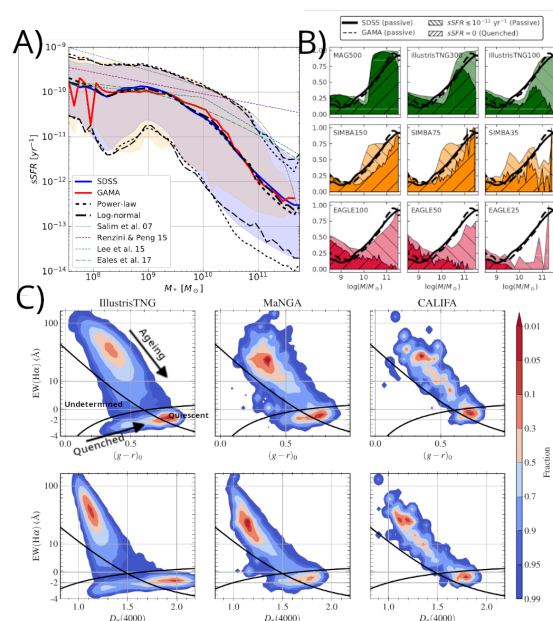
rando las causas físicas del apagado galáctico (Corcho-Caballero et al. 2023b) y encontramos que el entorno es el candidato más probable, especialmente para galaxias satélites de baja masa, aunque también detectamos una pequeña fracción de sistemas de masa intermedia en el campo, cuyo truncamiento de la formación estelar podría estar relacionado con procesos internos (por ejemplo, impulsado por la acción de agujero supermasivos o la morfología).

Los temas tratados durante esta tesis aún requieren respuestas adicionales, que dan lugar a nuevas líneas de investigación actualmente bajo desarrollo:

- Que las galaxias retengan niveles residuales o, en cambio, detengan permanentemente la formación estelar es clave para su evolución posterior en términos de, por ejemplo, su evolución química. Por ello, es vital obtener una estimación robusta de la formación estelar presente en galaxias viejas y rojas, independiente de los métodos tradicionales basados en la estimación de la población ionizante subyacente.
- El apagado o quenching de las galaxias es un proceso complejo que en ocasiones resulta de la acción de diversos procesos físicos. Para entender la formación de galaxias pasivas, es necesario constreñir la tasa de apagado de galaxias durante los diferentes periodos del Universo.

Gracias a la nueva generación de instrumentos y observatorios, tanto terrestres (por ejemplo, WEAVE, Hector) como espaciales (por ejemplo, EUCLID), en los que actualmente estoy involucrado, estas preguntas podrán ser abordadas con una mayor facilidad y precisión.

Tesis disponible en: <https://repositorio.uam.es/handle/10486/709817>



A) Distribución de probabilidad condicional de la tasa de formación estelar específica en función de la masa estelar total (Corcho-Caballero+20). Las líneas azul y roja representan la mediana obtenida de muestras de SDSS y GAMA. El resto de líneas de color corresponden a ajustes previos de la literatura. Nuestro formalismo se ilustra con líneas negras y es capaz de describir la distribución bidimensional completa (las líneas ejemplifican los percentiles 16, 50 y 84 de la distribución). B) Fracción acumulada de galaxias pasivas/apagadas (ver leyenda) en SDSS (línea sólida) y GAMA (línea rayada), comparado con un conjunto de simulaciones cosmológicas (Corcho-Caballero et al. 2021a). C) Distribución de galaxias en el Diagrama de Envejecimiento utilizando IllustrisTNG, MaNGA y CALIFA (Corcho-Caballero et al. 2023a). Las líneas negras representan la prescripción propuesta para distinguir entre los canales evolutivos de envejecimiento y apagado.

# Modelos químicos y espectrofotométricos de evolución química

Autor: Iker Millán Irigoyen  
(millaniker@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Mercedes Mollá y Yago Ascasibar

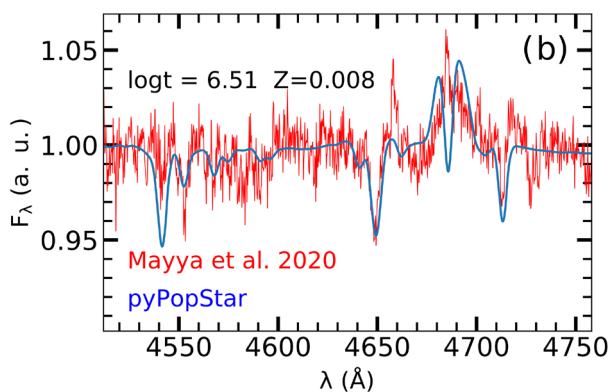
Centro: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Fecha de lectura: 2 de junio de 2023

La formación y evolución de galaxias estudia cómo se forman y evolucionan los diferentes componentes de una galaxia, gas, polvo y estrellas, a lo largo del tiempo y modificando la contribución que cada una de ellas hace a la luz que recibimos. Además, el estudio de los diferentes componentes nos permite obtener información sobre características galácticas como la edad estelar, la metalicidad estelar, la metalicidad del gas y el *ratio* polvo a gas (DTG). Estas propiedades pueden ser tanto el valor medio, como por ejemplo la edad estelar media, o la propiedad en la etapa final de la evolución de la galaxia, como el DTG o la metalicidad del gas.

Debido a la información diferente y complementaria que nos da cada una, se suelen aplicar dos técnicas distintas para estudiarlas: los modelos de evolución química y los modelos de síntesis evolutiva. Por un lado, la evolución química utiliza la abundancia actual de los metales que hay en forma gaseosa y en polvo en el medio interestelar. Por otro lado, la síntesis evolutiva obtiene las distribuciones espectrales de energía (SED) emitidas por las poblaciones estelares a diferentes edades y metalicidades, lo que nos da la Historia de Formación Estelar (SFH) y las propiedades promediadas del contenido estelar de la galaxia.

Ajuste de población de una región de formación estelar de NGC 1569 de los datos obtenidos por Mayya et al. 2020, en rojo, y HR-pyPopStar, en azul. Los espectros de HR-pyPopStar han sido degradados para tener la misma resolución que las observaciones.



En esta tesis he creado un modelo de evolución química que incluye de manera autoconsistente el ISM como un medio multifase, gas atómico, ionizado y molecular. Además he incluido el ciclo de vida de los granos de polvo, debido a su papel en la regulación del proceso de formación estelar, al ser los principales productores de hidrógeno molecular y proteger a las nubes de la radiación fotodisociadora. Además, una fracción de los metales del ISM acaba en los granos de polvo, lo que resalta la necesidad de modelar correctamente el ciclo de vida del polvo para poder crear un modelo detallado de evolución química. Los resultados reproducen las observaciones de la relación DTG-Z en el rango de metalicidad intermedia y alta, pero se diferencian significativamente en el régimen de metalicidad baja, de acuerdo con otros trabajos publicados. Seguramente esta diferencia viene por las incertidumbres en algunos de los ingredientes del modelo a baja metalicidad.

Respecto al cálculo de espectros en modelos de síntesis evolutiva, he creado una nueva versión del código PopStar (Mollá, García-Vargas, y Bressan, 2009) en *Python* llamada HR-pyPopStar para mejorar la resolución espectral de las SEDs de Poblaciones Estelares Simples (SSPs) de diferente edad y metalicidad. Las SEDs de alta resolución creadas tienen la resolución espectral de  $R_{th,5000} \approx 50000$  a  $5000$  Å. El código utiliza librerías espectrales teóricas más actualizadas para la Secuencia Principal, post-AGB/Nebulosas Planetarias y las estrellas OB y WR. Las SEDs de las SSPs tienen un amplio rango de edades, desde 0,1 Myr hasta 13,8 Gyr, y cuatro metalicidades  $Z$ , desde 0,004 hasta 0,05, y se calculan para cuatro Funciones de Masa Inicial (IMFs) diferentes. El espectro de una galaxia estelar cercana, NGC 1569, se ha analizado con los nuevos SSPs, reproduciendo claramente el "bump" azul característico de las estrellas *Wolf-Rayet* debido a las poblaciones estelares más jóvenes. Los espectros se pueden descargar en la página: [https://www.fractal-es.com/PopStar/#hr\\_py\\_download](https://www.fractal-es.com/PopStar/#hr_py_download).

Por último, hemos utilizado los modelos HR-pyPopStar para analizar los espectros de galaxias que albergan supernovas de tipo Ia para ver si las propiedades de las poblaciones estelares de la galaxia tienen alguna correlación con la explosión de la supernova. Esta relación puede servir para mejorar la calibración de las curvas de luz de las SN Ia para estudios cosmológicos. He analizado los espectros de las 680 galaxias en el rango  $0,04 < z < 1,0$  usando los modelos de SSPs calculados como base usando el código de análisis espectral FADO.

He obtenido la metalicidad estelar media y la edad ponderadas por masa y luminosidad,  $\langle Z \rangle_{M,L}$ ,  $\langle \tau \rangle_{M,L}$ , la masa estelar  $M_*$  y la SFH. He encontrado una relación Masa - Metalicidad muy similar a trabajos anteriores, pero edades más jóvenes que en dichos trabajos posiblemente debido a las diferentes SSPs usadas como base. Después he calculado el residuo de Hubble, la diferencia entre el módulo de distancia observado en la SN y el cosmológico, usando datos de SALT2.

Finalmente, he buscado correlaciones entre las propiedades de las poblaciones estelares y el residuo de Hubble, encontrando una anticorrelación entre el residuo de Hubble y  $M_*$ , como otros autores. También he encontrado una anticorrelación entre HR y  $\log \langle (Z/Z_\odot) \rangle_M$  con una pendiente de  $-0,061$  mag/dex. Este resultado apoya hallazgos previos de la literatura realizados bien midiendo la abundancia del gas o la metalicidad estelar promediada (en escala logarítmica), pero con mejor precisión debido al mayor número de objetos de nuestro estudio y al mayor rango de corrimiento al rojo de nuestra muestra.

## Caracterización del gas molecular caliente en regiones de formación de estrellas masivas

Autora: Miriam García Santa-María

Tesis doctoral dirigida por: Javier R.

Goicoechea

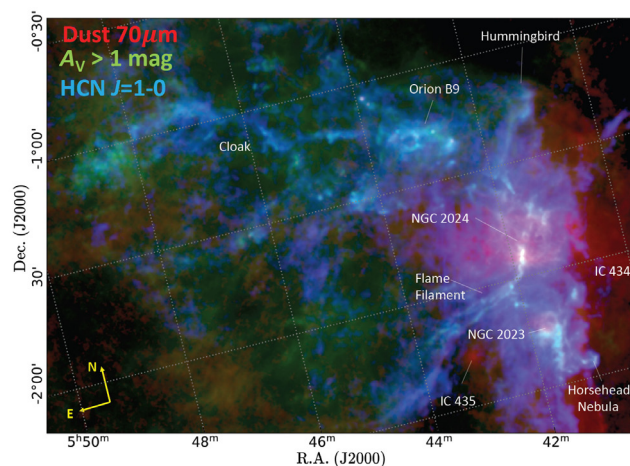
Centro: Dept. Astrofísica Molecular. Instituto de Física Fundamental (CSIC)

Fecha de lectura: 29 de septiembre de 2023

Las estrellas masivas dominan la inyección de radiación y energía mecánica (procesos conocidos como *feedback* estelar) en el medio interestelar (ISM). Estas estrellas se forman en núcleos densos y masivos en el interior de nubes moleculares gigantes (GMCs). El efecto del *feedback* estelar no se limita al entorno más cercano de las estrellas masivas. También controla las condiciones físicas del ISM y la luminosidad emitida a escalas de decenas de pársecs (que aquí denominamos la nube ambiente). Determinar las condiciones físicas y los mecanismos de calentamiento de la nube ambiente es crucial para evaluar el papel que juega el *feedback* estelar a grandes escalas espaciales y entender el proceso de formación estelar masiva en diferentes entornos (núcleos y discos galácticos). Encontrar trazadores químicos adecuados a los diferentes mecanismos de calentamiento del gas, así como trazadores de los núcleos densos que forman estrellas ( $n_{\text{H}} \sim 10^4\text{--}10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $A_V > 8 \text{ mag}$ ) es muy importante. Hasta hace muy poco, el cartografiado de grandes áreas de GMCs en múltiples líneas moleculares y atómicas era un desafío difícil. En consecuencia, nuestro conocimiento de las condiciones físicas y la composición química a grandes escalas, el entorno extenso de la nube (decenas de pc), es mucho más restringido que en los núcleos de formación estelar ( $< 0,1 \text{ pc}$ ) y protoestrellas (miles de ua).

La nube ambiente se enfría a través de líneas de emisión atómicas de estructura fina y de rotación molecular. Estas líneas trazan diferentes procesos de *feedback* que afectan a una región con formación de estrellas masivas: radiación UV y vientos de estrellas masivas cercanas, choques y rayos cósmicos. Muchas de estas líneas emiten a longitudes de onda en el infrarrojo lejano (FIR) y submilimétrico (submm) y no pueden ser observadas desde observatorios terrestres debido a la pobre transmisión atmosférica. En esta tesis proporcionamos modelos locales que ayuden a interpretar las observaciones extragalácticas, las cuales no resuelven espacialmente los núcleos de formación estelar de la nube ambiente. Uno de los principales objetivos de esta tesis es determinar las propiedades del entorno extenso de una GMC a las escalas espaciales que dominan las observaciones extragalácticas.

En esta tesis estudiamos el entorno extenso de dos de las regiones más representativas de formación de estrellas masivas de la Vía Láctea: Sgr B2 (la región con el mayor brote de formación estelar en el Centro Galáctico) y la cercana región de Orión B (localizada en el disco de la Galaxia). Analizamos cartografiados de la emisión en líneas espectrales (CO, [C I] y [N II]) y de continuo obtenidos con el telescopio espacial *Herschel*. Además, analizamos los cartografiados más grandes (cinco grados cuadrados) observados hasta la fecha con el telesco-



RGB image of a 5-square-degree area of Orion B GMC (G. Santa-María, M., et al., 2023, A&A, 679, A4)

pio IRAM 30m de la emisión de líneas rotacionales de especies moleculares clave: HCN, HNC, CO y  $\text{HCO}^+$ .

En Sgr B2 encontramos que, aunque la intensidad de las líneas en cada punto de la nube ambiente es menor que hacia los núcleos de formación de estrellas masivas, la mayor área de la nube ambiente implica que la luminosidad total de la región está dominada por esta última componente. Más del 90% de la luminosidad total emitida por las líneas de CO (mid-J), [C I], y [N II]  $205 \mu\text{m}$ , así como un 80% de la luminosidad del continuo FIR (polvo), provienen del entorno extenso de Sgr B2. La emisión rotacionalmente excitada del CO traza una componente de gas comprimido e iluminado por radiación FUV ( $n_{\text{H}} = 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ,  $P_{\text{th}} < 10^7 - 10^8 \text{ K cm}^{-3}$ ). La emisión de las líneas de estructura fina del carbono atómico traza una componente de la nube de menor densidad ( $n_{\text{H}} \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $T_{\text{K}} \sim 40 - 60 \text{ K}$ ). Los rayos cósmicos dominan el calentamiento del gas de esta componente.

En Orión B encontramos que aproximadamente un 70% de la luminosidad total emitida en la línea HCN 1-0 proviene de gas a  $A_V < 8 \text{ mag}$  (i.e., de gas no denso). El cociente de intensidad de líneas HCN/CO 1-0 muestra un comportamiento bimodal con respecto a la extinción visual de la nube. El punto de inflexión a  $A_V \sim 3 \text{ mag}$  es típico del gas translúcido y de los bordes de la nube iluminados por radiación FUV de estrellas masivas cercanas. Encontramos que la mayor parte de la emisión de HCN 1-0 proviene de gas con bajas densidades  $n_{\text{H}} < 10^4 \text{ cm}^{-3}$ . Las colisiones inelásticas con electrones dominan la excitación de HCN 1-0 a gran escala. Este aumento de la emisión de HCN 1-0 en el gas translúcido explica el comportamiento bimodal del cociente HCN/CO, el cual puede ser alto en gas iluminado por radiación FUV sin ser necesariamente denso.

En esta tesis concluimos que la componente extensa de ambas GMCs debe ser porosa a la radiación FUV, favoreciendo el calentamiento del gas y la formación y excitación de moléculas en el gas extenso lejos de estrellas masivas. Finalmente, es el entorno extenso de las GMCs locales, en lugar de los núcleos de formación estelar, el que sirve como modelo cuando los telescopios no resuelven estos entornos extensos de las GMCs extragalácticas.

# Análisis de la formación temprana de las galaxias masivas con datos JWST y HST

Autora: Ángela García Argumáñez

(agarciaargumanez@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: Pablo Guillermo Pérez González y Armando Gil de Paz

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 20 de octubre de 2023

Esta tesis pretende avanzar en nuestro conocimiento del proceso de formación y evolución de las galaxias restringiendo la época en la que empezaron a formarse las galaxias más masivas del Universo cercano. Para ello, presentamos un estudio exhaustivo que combina las excepcionales capacidades de *Hubble* (HST) y JWST con una sofisticada técnica de análisis para investigar las primeras etapas en la formación y ensamblaje de masa estelar de progenitores masivos a  $1 < z < 4$  de estas galaxias. Este trabajo no solo aborda la cuestión de cuándo comenzaron a formar sus poblaciones estelares, sino que también compara los resultados con las predicciones de simulaciones cosmológicas actuales para explorar sus posibles limitaciones y las revisiones necesarias de los modelos cosmológicos y/o de formación de galaxias.

Nuestros datos incluyen observaciones en imagen de banda ancha en el óptico e infrarrojo cercano de las exploraciones CANDELS con HST y *Cosmic Evolution Early Release Science* (CEERS) con JWST, pudiendo acceder a la emisión espacialmente resuelta de una muestra representativa de galaxias masivas ( $M_{\star} > 10^{10} M_{\odot}$ ) a  $1 < z < 4$ . Nuestro enfoque consiste en combinar la información proporcionada por estas poblaciones estelares en dos dimensiones (2D), derivada de la correspondiente síntesis de poblaciones estelares bidimensional (2D-SPS), y desarrollar una metodología que permita inferir las primeras etapas de sus historias de formación estelar (SFHs) de una manera más robusta que cuando solo se utiliza la emisión integrada. Esta tesis puede dividirse en una primera parte sobre el desarrollo y validación de nuestra metodología 2D-SPS con datos de imagen simulados y una segunda parte sobre la aplicación de esta metodología 2D-SPS a observaciones reales de JWST+HST.

Esta metodología 2D-SPS se ha desarrollado y evaluado utilizando la simulación cosmológica *Illustris*, simulación hidrodinámica a gran escala que reproduce las relaciones generales observadas para galaxias a diferentes *redshifts*. *Illustris* proporciona imágenes sintéticas de NIRCcam, ACS y WFC3 que imitan las de exploraciones cosmológicas reales de JWST y HST. Utilizamos estas imágenes sintéticas de *Illustris* para desarrollar y optimizar nuestra metodología 2D-SPS a la hora de inferir las primeras etapas de la SFH global de una galaxia, construida combinando la información de sus poblaciones estelares espacialmente resueltas. La ventaja de utilizar *Illustris* es que podemos acceder a las partículas simuladas individuales que componen cada galaxia dentro de la simulación, lo que nos proporciona la información de partida sobre la formación y ensamblaje de la masa estelar de las galaxias simuladas. La comparación con estos valores verdaderos proporcionados por las partículas simuladas en la galaxia es clave para evaluar la calidad de las SFHs derivadas mediante nuestro método 2D-SPS, especialmente en sus primeras etapas.

Gracias a los árboles de fusiones de *Illustris*, seleccionamos únicamente galaxias masivas a  $1 < z < 4$  que son progenitoras genuinas de las galaxias locales más masivas ( $M_{\star} > 10^{11} M_{\odot}$ ). Utilizamos esta muestra de progenitores masivos  $1 < z < 4$  para probar nuestro método 2D-SPS y estudiar su eficacia en recuperar los primeros episodios de ensamblaje de masa estelar a partir de sus SFHs. Para nuestro análisis, cuantificamos las primeras etapas de formación de masa estelar calculando los "tiempos de formación" en los que cada galaxia formó el 5%, 10% y 25% de su masa estelar, calculados directamente de su SFH. Evaluamos la bondad de nuestras estimaciones en términos de su precisión, definida aquí como la mediana de la diferencia relativa entre los tiempos de formación derivados y los valores verdaderos de *Illustris*. Nuestro método consigue recuperar los tiempos de formación con una precisión mediana  $< 5\%$  (ver García-Argumáñez et al. 2023). Adicionalmente, comparamos los tiempos de formación inferidos para nuestra muestra de progenitores masivos de *Illustris* a  $1 < z < 4$  con los de sus descendientes a  $z=0$ , y con los calculados para toda la población de  $M_{\star} > 10^{11} M_{\odot}$  galaxias a  $z=0$ , para obtener información sobre las limitaciones y sesgos que podemos encontrar en las observaciones reales.

A continuación, aplicamos nuestro método 2D-SPS ya validado a galaxias masivas reales observadas con NIRCcam en la primera época de observaciones de JWST/CEERS (junio 2022), para las cuales ya existen imágenes de HST disponibles en el óptico. Encontramos que, en línea con otros trabajos recientes del JWST, las galaxias masivas a  $1 < z < 4$  en CEERS comenzaron a formar sus estrellas a *redshift* muy alto:  $z \sim 30$ -20 según la SFH mediana de la muestra derivada a partir del análisis 2D-SPS. Además, estas galaxias masivas habrían formado el 5% de su masa estelar presente a  $z=1$  (mínimo *redshift* de la muestra) a  $z_5 \geq 7.7$ , y el 10% a  $z_{10} \geq 6.2$  (García-Argumáñez et al. 2024; en preparación). Comparamos estos resultados con las predicciones para galaxias análogas simuladas en *Illustris* y *IllustrisTNG* (simulación sucesora) y encontramos que las simulaciones predicen una formación de la masa estelar más tardía en edad del Universo que la observada en las galaxias de CEERS. Esto podría sugerir posibles deficiencias en los actuales modelos de formación de galaxias incluidos en estas simulaciones en épocas tempranas y/o en el contexto cosmológico general asumido por ellas. En este sentido, los resultados de esta tesis y similares pueden proporcionar importantes restricciones observacionales para futuros modelos cosmológicos y de formación de galaxias.

Tesis disponible en: <https://zenodo.org/records/10217838>

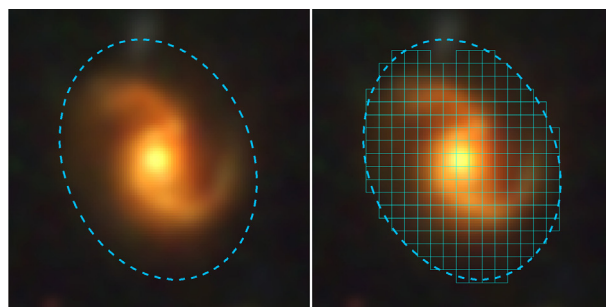


Imagen RGB (3.5"x3.5") generada con imágenes NIRCcam (R:F356W, G:F200W, B:F115W) de la galaxia de CEERS nircam3-3679 ( $z=2.60$ ;  $M_{\star} \sim 10^{11} M_{\odot}$ ). Se muestran la apertura integrada y la malla donde se han medido las SEDs en 2D.

## Estudio Radiativo-Dinámico de la Gran Mancha Roja de Júpiter

Autor: Asier Anguiano-Arteaga  
(asier.anguiano@ehu.es)

Tesis doctoral dirigida por: Agustín Sánchez-Lavega y Santiago Pérez-Hoyos  
Centro: Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea  
Fecha de lectura: 13 de noviembre de 2023

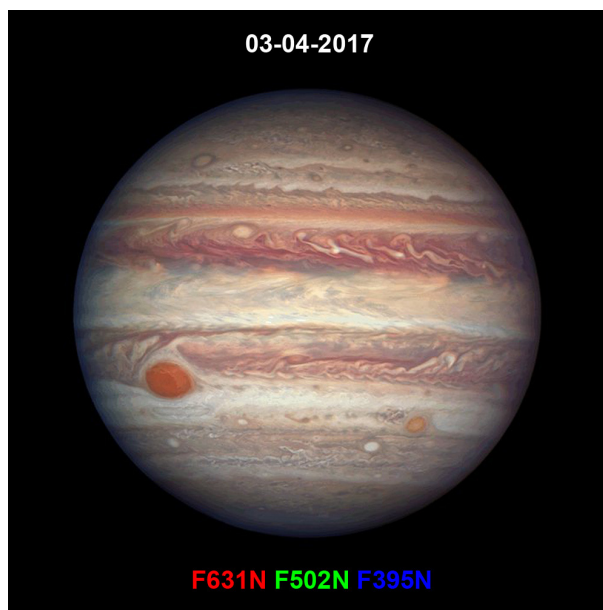
La Gran Mancha Roja de Júpiter (GRS, por sus siglas en inglés) es el mayor y más longevo de todos los vórtices observados en las atmósferas planetarias. Su tamaño ha disminuido a la mitad en los últimos 130 años, su forma se ha vuelto más circular y recientemente se ha demostrado que se está oscureciendo. Aunque la GRS ha sido ampliamente estudiada históricamente, aún quedan muchas incógnitas por resolver.

Uno de los principales interrogantes es el origen de su coloración rojiza, que está directamente relacionada con la distribución vertical y la composición de las nieblas y nubes en niveles atmosféricos superiores ( $P < 1$  bar). Varios trabajos han estudiado este problema analizando los espectros de la GRS, trabajando principalmente en los rangos visible e infrarrojo. En 2019, la Gran Mancha Roja inició una serie de interacciones con anticiclones más pequeños que podrían haber cambiado su estructura vertical de nubes, lo que hizo que la región fuera de especial interés para nuestro análisis.

El segundo anticiclón más grande de Júpiter, llamado Óvalo BA, se formó en el año 2000. En 2005, las nubes que rodean el núcleo oval comenzaron a teñirse de rojo y este fenómeno fue ampliamente estudiado. Del mismo modo, el Óvalo BA comenzó a cambiar su color de rojo a blanco en 2018. A diferencia del gran interés suscitado por el cambio de color de 2005-2006, no existían estudios sobre su reciente blanqueamiento anteriores a nuestra investigación.

Como primera parte de esta tesis, se analizaron desde un punto de vista dinámico las interacciones que la GRS experimentó con una serie de vórtices en 2019. En concreto, el autor de la tesis encontró cambios significativos en las velocidades máximas del viento en la GRS, en su forma y en las oscilaciones de 90 días. Tras este estudio se concluyó que la interacción con varios anticiclones fue un fenómeno de superficie que no afectó a la estructura profunda de la GRS.

Para la parte principal de la tesis, se estudiaron un total de trece regiones en el área de la GRS con el *software* de transporte radiativo NEMESIS, para el periodo de tiempo comprendido entre 2015 y 2021 y utilizando imágenes de la cámara *Wide Field Camera 3* del *Telescopio Espacial Hubble*. En concreto, se analizaron las propiedades de nieblas y nubes para niveles de presión inferiores a 1 bar. Nuestro estudio incluyó por primera vez el análisis de datos UV y la adición de restricciones de oscurecimiento del limbo al modelado de los cromóforos en la GRS. Entre otras conclusiones, este estudio condujo a un hallazgo importante: nuestros resultados independientes eran compatibles con el cromóforo más prometedor de la literatura, que resultaría de reacciones químicas entre acetileno y amoníaco fotodisociado. Además, se encontró una característica importante de dicho cromóforo: un pico de absorción en la región UV cerca de 350 nm. Esta característica puede ser útil para determinar finalmente la naturaleza del compuesto que da a la GRS su coloración rojiza. También encontramos un segundo cromóforo que estaría situado en una capa extendida (de 500 mbar a 100 mbar) justo debajo del primero, el cual se localizaría en una capa delgada ligeramente por encima de la tropopausa. Aunque el cromóforo superior puede explicar por sí solo la absorción en el visible, tanto el cromóforo superior como el inferior son necesarios para explicar la absorción UV total, como se muestra por primera vez en nuestro análisis. En cuanto al Óvalo BA, el cambio de color rojizo a blanquecino entre 2018 y 2019 es explicado por nuestro modelo con una disminución de la concentración del cromóforo en el óvalo. Sin embargo, la relación de esta disminución con la dinámica local está todavía por ser esclarecida.



Composición en color a partir de imágenes captadas por la *Wide Field Camera 3* el 3 de abril de 2017. Los canales R, G y B se corresponden con los filtros F631N, F502N y F395N, respectivamente. Crédito: NASA, ESA, y A. Simon (NASA Goddard Space Flight Center).

En lo que respecta a la parte final de la tesis, se presenta una exploración de las condiciones microfísicas para la generación de aerosoles en la GRS, incluyendo el desarrollo de un código microfísico unidimensional aplicable a todas las atmósferas planetarias. Con dicho código, se pretende determinar las tasas de producción de aerosoles necesarias para explicar un modelo consistente de los agentes responsables de la coloración en la atmósfera joviana.

Tesis disponible en: <https://ehubox.ehu.es/s/s6N9iTsYHTRyLjy>

# Sistemas Herbig Ae/Be: estrellas, discos e interacciones estrella-disco

Autor: Jorge Guzmán Díaz  
(joparhp@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Ignacio Mendi-  
gutía Gómez y Benjamín Montesinos Comino  
Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Fecha de lectura: 19 de enero de 2024

En esta tesis se ha contribuido al estudio del régimen de las estrellas Herbig Ae/Be (HAeBes), estrellas presecuencia principal, de masa intermedia y rodeadas de un disco protoplanetario. Dichos objetos poseen propiedades de especial interés. Primero, las HAeBes son el eslabón entre las estrellas T Tauri de baja masa y los objetos estelares jóvenes masivos, por lo que el conocimiento de sus propiedades físicas sirve para conectar los regímenes de baja y alta masa. Segundo, estas estrellas presentan discos protoplanetarios brillantes y extensos, razón por la cual las HAeBes son excelentes candidatas para el empleo de técnicas de imagen a alta resolución y el estudio de la formación planetaria.

Antes del lanzamiento de *Gaia*, e incluso después de este, las HAeBes se solían estudiar en pequeñas muestras esparcidas por el cielo, y sus parámetros estelares y circunestelares se derivaban empleando metodologías diferentes. Además, el número de estas ( $\sim 250$ ) contrasta con las miles de estrellas T Tauri descubiertas, aunque esto se debe en parte a la forma que presenta la función inicial de masa. No obstante, a día de hoy existen miles de candidatas a HAeBes, para las cuales necesitamos confirmar su naturaleza y caracterizarlas. Por otro lado, la mayoría de trabajos suelen asumir que las HAeBes poseen una metalicidad estelar similar a la solar, por lo que no tienen en cuenta las posibles peculiaridades químicas que estas pueden tener (por ejemplo, la peculiaridad  $\lambda$  Bootis), las cuales pueden estar relacionadas con la presencia de planetas. Actualmente existen dos HAeBes que son firmes candidatas a albergar planetas: AB Aur y HD 169142. Sin embargo, dicha cantidad no concuerda con las numerosas subestructuras (cavidades, anillos, espirales,...) observadas en los discos protoplanetarios de estas estrellas que podrían haber sido originadas por planetas.

Nuestro trabajo viene motivado por el contexto expuesto en el párrafo anterior. La primera parte de la tesis se centra en un estudio fotométrico en el que se ha llevado a cabo una caracterización homogénea de una amplia muestra de HAeBes genuinas (209 estrellas) a partir de sus distribuciones espectrales de energía (SEDs) y de sus distancias *Gaia* EDR3. Para derivar los parámetros estelares (temperatura efectiva, extinción visual,

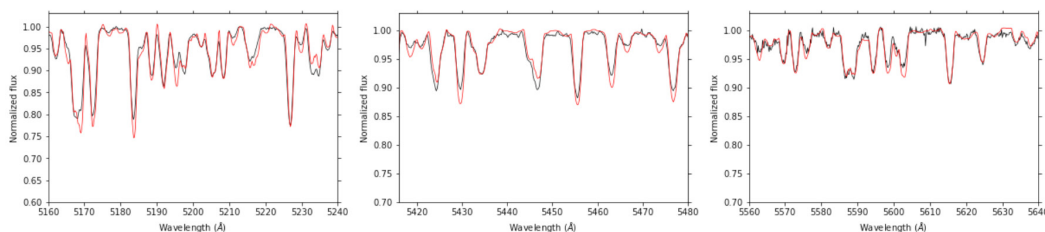
radio, luminosidad, masa y edad estelar) se ha empleado la herramienta online *Virtual Observatory SED Analyzer* (VOSA), la cual nos permite comparar mediante un ajuste chi-cuadrado la fotometría observada con la fotometría sintética extraída de los modelos teóricos. Por otro lado, hemos clasificado las SEDs de nuestras HAeBes siguiendo dos esquemas que se asocian a diferentes propiedades de los discos protoplanetarios. También se derivaron parámetros circunestelares como las tasas de acreción, las masas de los discos o el tamaño de las cavidades internas de polvo. Todos estos parámetros estelares y circunestelares están recogidos en un archivo online llamado HArchBe<sup>[1]</sup>, el cual se irá actualizando a medida que se vayan descubriendo nuevas estrellas de este tipo. Posteriormente, gracias a esta gran cantidad de datos, se realizó un estudio estadístico robusto centrado en la evolución de los discos. Como resultado principal de este estudio se ha obtenido que el principal mecanismo de disipación que actúa en los discos de las estrellas Herbig Be sea probablemente la fotoevaporación, aunque otros tipos de procesos no pueden ser descartados (por ejemplo, la presencia de un segundo objeto). En cambio, la fotoevaporación no parece ser el mecanismo de disipación dominante en las estrellas Herbig Ae.

La segunda parte de la tesis se ha focalizado en un estudio espectroscópico en el que se han derivado homogéneamente las metalicidades estelares de 67 HAeBes de nuestra muestra mediante síntesis de espectros. Como subproductos del proceso que hemos seguido, también se han estimado las gravedades superficiales y las velocidades de rotación proyectadas. En la figura se muestra, a modo de ejemplo, el ajuste de tres regiones del espectro de HD 142666 con el mejor modelo de Kurucz encontrado. A partir de un estudio estadístico, se ha confirmado una correlación entre las metalicidades y el aspecto de las SEDs. En particular, las HAeBes con una baja metalicidad tienden a tener discos protoplanetarios con cavidades. Además, nosotros aportamos una serie de evidencias que apuntan a la presencia de planetas gigantes como el origen de estas cavidades.

Por último, a raíz del trabajo realizado en esta tesis surgen dos futuras líneas de investigación:

- Identificación y caracterización de nuevas HAeBes: gracias a la base de datos de *Gaia* y a técnicas innovadoras de programación (por ejemplo, *Machine Learning*) se han descubierto miles de candidatas a HAeBes. VOSA puede ser una herramienta opcional para analizar estas estrellas, permitiéndonos caracterizarlas de manera rápida y eficiente.
- Detección de planetas en formación en este tipo de estrellas: como se ha mencionado previamente, a día de hoy se tienen dos HAeBes que son firmes candidatas a albergar planetas. La llegada de los telescopios de clase 30 metros nos ayudará en esta tarea, los cuales nos van a permitir tener una mayor sensibilidad en el rango infrarrojo medio, donde se espera una mayor emisión del material acretaado por parte del planeta que se está formando.

[1] <http://svo2.cab.inta-csic.es/projects/harchibe/>



Ajuste de tres regiones del espectro de HD 142666 (línea continua negra) con el mejor modelo obtenido (línea continua roja). El modelo se ha generado con una  $T_{\text{eff}} = 7250$  K,  $\log g = 4.00$  y  $v \sin i = 65$  km/s y  $[M/H] = 0.0$ , donde  $T_{\text{eff}}$  es la temperatura efectiva,  $\log g$  la gravedad superficial,  $v \sin i$  la velocidad de rotación y  $[M/H]$  la metalicidad estelar.

## Vientos estelares y exo-Tierras: un estudio de su interacción mutua

Autora: Ada Canet Varea (adacanet@ucm.es)

Tesis doctoral dirigida por: Ana Inés Gómez de Castro

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 21 de marzo de 2024

Dentro de los numerosos factores que influyen en la habitabilidad de un planeta, la presencia de una atmósfera es un elemento crucial para el sustento de la vida. No obstante, la atmósfera de un planeta como la Tierra, lejos de ser estática, es un sistema en constante evolución, con cambios significativos en su composición y propiedades a lo largo de su existencia. La detección y caracterización tanto de planetas extrasolares, así como la observación de la Tierra, revela la existencia de amplias envolturas compuestas fundamentalmente por hidrógeno, correspondientes a diferentes etapas evolutivas del planeta. Debido a su significativa extensión, son susceptibles de ser detectadas a través de trazadores espectroscópicos en longitudes de onda ultravioleta.

A lo largo de todas las etapas evolutivas de un planeta, sus atmósferas están expuestas a un flujo continuo de electrones y protones, acelerado a altas velocidades desde la corona estelar. Estos flujos, conocidos como vientos estelares, transportan consigo el campo magnético estelar y son producto de la actividad magnética de la estrella. Los vientos estelares y las atmósferas planetarias interactúan durante todas las etapas de su vida. Estos vientos modifican la morfología de las envolturas gaseosas planetarias, pudiendo reducir su extensión de forma significativa, así como desencadenar pérdidas de masa atmosférica. Además, la interacción de un plasma magnetizado como el viento estelar y las atmósferas planetarias da lugar a la formación de diferentes estructuras características, como arcos de choque, magnetosferas o colas cometarias detrás del planeta que pueden ser detectables, y cuya extensión y localización depende fundamentalmente de las características de los propios vientos estelares, así como de la atmósfera presente alrededor del planeta.

En la presente tesis doctoral se estudia la interacción entre los vientos estelares y planetas similares a la Tierra en diversas etapas evolutivas; desde la presencia de envolturas primordiales de hidrógeno en etapas prematuras de su evolución, pasando por planetas que han perdido su envoltura primordial, hasta la interacción de planetas con una exosfera similar a la presente en la Tierra. Esta interacción es descrita a través de la evolución magnetohidrodinámica de los plasmas involucrados, donde el fuerte de nivel de acoplamiento no lineal entre las magnitudes fundamentales que controlan la evolución del sistema requiere del uso de la simulación numérica. En este trabajo se ha utilizado el código PLUTO, ampliamente utilizado en la simulación de plasmas astrofísicos.

En un primer estudio se examina la interacción entre exosferas de hidrógeno similares a la terrestre y los vientos estelares de estrellas con diferentes niveles de actividad. La supervivencia de las exosferas de hidrógeno ionizado depende por completo de la intensidad de los vientos estelares. En estrellas muy activas, las atmósferas son rápidamente barridas por los vientos, mientras que en estrellas con una actividad moderada se forman extensos frentes de choque alrededor de estos planetas, incrementando los niveles de densidad en la vecindad del planeta.

En un segundo estudio se investiga el escenario en el que el planeta ha perdido por completo su atmósfera primordial debido a la intensa radiación ultravioleta y en rayos X de la estrella, convirtiéndose en un simple obstáculo rocoso a la propagación del viento estelar. La interacción de los vientos en régimen supermagnetosónico rápido conduce a la formación de frentes de choque, cuya compresión y extensión es parametrizada en función de los números de Mach característicos del viento estelar. La formación de magnetosferas inducidas alrededor del planeta no magnetizado desempeña un papel crucial en la posición estacionaria de los frentes de choque.

En un tercer estudio, se presentan los resultados de la interacción de los vientos estelares y las atmósferas primordiales en planetas similares a la Tierra, considerando la evolución conjunta de estas atmósferas y los vientos estelares hasta la completa evaporación de la atmósfera primordial. La extensión de la atmósfera de hidrógeno es reducida considerablemente en épocas tempranas de la evolución, bajo la acción de vientos de estrellas de alta rotación. En el caso de estrellas de baja rotación, las atmósferas no presentan cambios significativos en su evolución. Sin embargo, la erosión causada por la acción de los vientos estelares es despreciable en comparación con la pérdida de masa ocasionada por la radiación de la estrella. La Tierra constituye un laboratorio a gran escala para estudiar la respuesta de las exosferas de hidrógeno frente al viento solar. Esta tesis concluye con la descripción de la misión EarthASAP, un pequeño satélite lunar diseñado para cubrir dicho propósito y cuya propuesta inspiró el estudio que se presenta en esta tesis.

En resumen, esta tesis representa un estudio exhaustivo de la interacción entre planetas similares a la Tierra y los vientos estelares a lo largo de todas las etapas de su evolución. Este enfoque permite caracterizar la formación de estructuras como resultado de dicha interacción, lo que proporciona información crucial sobre las posibles características de planetas potencialmente habitables.



# Caracterización dinámica de las Nubes de Magallanes con los datos de Gaia y las simulaciones KRATOS

Autor: Óscar Jiménez-Arranz

(oscar.jimenez.1996@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Mercè Romero-Gómez y Xavier Luri

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 8 de abril de 2024

Las Nubes de Magallanes son las galaxias externas más visibles a simple vista en el cielo nocturno, ya que son muy cercanas a nuestra Galaxia y las más grandes en su vecindad. Debido a su proximidad, la Gran y Pequeña Nube de Magallanes (del inglés, LMC y SMC, respectivamente) proporcionan a los astrónomos una ventana única para el estudio de las complejidades de los sistemas galácticos en interacción gracias a la gran cantidad de características observables en estas galaxias. Esto las convierte en el caso ideal para estudiar las interacciones galácticas, la evolución estelar y los principios fundamentales que subyacen a la formación y dinámica de las galaxias.

Situada a una distancia de aproximadamente 50 kpc, la peculiar LMC presenta un único brazo espiral y una barra estelar asimétrica. La SMC siempre se ha considerado un satélite de la LMC debido a su proximidad. Se encuentra a unos 62 kpc de la Vía Láctea y a una distancia de 20-25 kpc de la LMC. La SMC es una galaxia irregular enana y rica en gas.

Con el lanzamiento de la misión espacial *Gaia* en 2013, se ha inaugurado una nueva era en la observación astronómica, permitiendo el estudio detallado de miles de millones de estrellas. *Gaia* mide con precisión las posiciones, movimientos y distancias (a través de su paralaje) de las estrellas mediante medidas recurrentes a lo largo del tiempo. *Gaia* es el principal esfuerzo científico de la *Agencia Espacial Europea* (ESA) para cartografiar y estudiar las estrellas de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, *Gaia* recopila información de todas las fuentes de luz, lo que incluye también las estrellas de las Nubes de Magallanes, así como asteroides, binarias no resueltas, galaxias no resueltas o cúasares. Las Nubes están lo suficientemente cer-

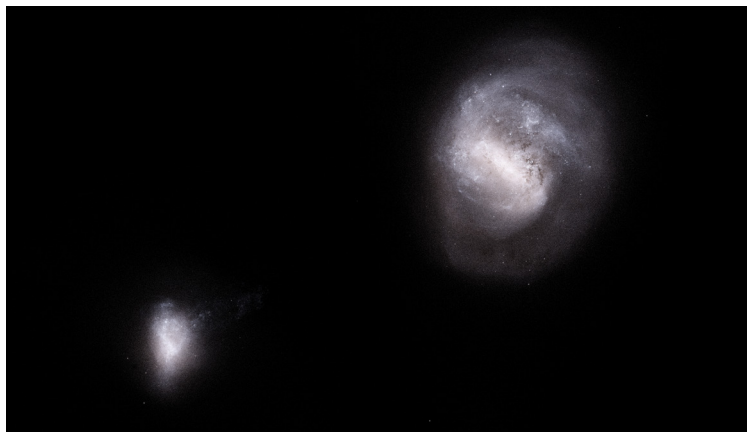
ca como para que *Gaia* sea capaz de resolver individualmente muchas de sus estrellas.

Esta tesis se centra en el análisis cinemático del disco de LMC. Para ello, aplicamos una estrategia de selección basada en redes neuronales para distinguir las estrellas de la LMC eliminando la contaminación de estrellas de la Vía Láctea utilizando la mayor parte de la información disponible de *Gaia*. Con las muestras limpias, generamos perfiles y mapas de velocidad 3D de la LMC usando los movimientos propios y las velocidades de la línea de visión de *Gaia* DR3. Ha sido la primera vez que se genera un conjunto de datos homogéneo de una galaxia que no es la Vía Láctea con información de velocidad 3D para más de veinte mil estrellas. También utilizamos estos mapas cinemáticos para proporcionar nuevas restricciones sobre la velocidad de rotación de la barra estelar de la LMC. Tras el éxito del clasificador LMC/Vía Láctea, entrenamos y utilizamos una red neuronal para separar también las estrellas SMC de la contaminación de estrellas de la Vía Láctea.

Sin embargo, el estudio de la formación del sistema LMC-SMC no se puede realizar solo con observaciones, ya que proporcionan únicamente una imagen estática del sistema. En los últimos años, estos estudios se han centrado en intentar recrear la distribución del gas neutro y la posición y propiedades de las corrientes utilizando simulaciones hidrodinámicas y no la cinemática interna de las Nubes. En este contexto, esta tesis incluye la presentación de KRATOS, una *suite* de 28 simulaciones de N-cuerpos (de libre acceso) de galaxias tipo LMC y SMC. Con estos modelos es posible estudiar la formación de subestructuras en un disco de tipo LMC tras la interacción con un sistema de tipo SMC y compararlas con las observaciones (por ejemplo, los mapas cinemáticos y la velocidad del patrón de barras de la LMC usando datos de *Gaia* DR3). La tesis incluye el primer artículo de una serie que se dedicará a un análisis más específico de la interacción LMC-SMC.

En conclusión, esta tesis proporciona a la comunidad científica un catálogo que distingue las estrellas de la LMC y SMC de las estrellas de la Vía Láctea. Con estas muestras limpias hemos profundizado en el conocimiento de la cinemática interna del disco de la LMC mediante mapas cinemáticos 3D y el análisis de la velocidad de rotación de la barra estelar. Por último, comenzamos a evaluar el impacto de la SMC en la subestructura del disco de la LMC mediante el uso de las simulaciones KRATOS, que continuaremos en futuros trabajos.

Tesis disponible próximamente en: [Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona / Tesis Doctorals / Departament Física Quàntica i Astrofísica](#).



Las Nubes de Magallanes vistas por Gaia. Imagen creada utilizando información del Gaia Data Release 3 (DR3). La contaminación de estrellas de la Vía Láctea se ha eliminado, ya que se han utilizado las muestras NN Complete de Jiménez-Arranz et al. (2023b,a). Créditos y copyright: Ó. Jiménez-Arranz.

# Desentrañando el camino de formación de las galaxias lenticulares

Autor: José Luis Tous Mayol  
(jtousmayol@gmail.com)

Tesis doctoral dirigida por: Josep Maria Solanes y Jaime Perea

Centro: Universidad de Barcelona

Fecha de lectura: 12 de abril de 2024

Las galaxias lenticulares (S0) se encuentran en diferentes entornos donde la física que rige su formación puede variar significativamente, desde interacciones gravitatorias de galaxias (fusiones o efectos de marea) hasta interacciones hidrodinámicas del medio intergaláctico con el interestelar. La heterogeneidad observada en las propiedades de esta población de galaxias respalda la existencia de más de un mecanismo de formación, pero tanto la identificación exacta como la contribución relativa de los distintos mecanismos formativos propuestos todavía está sujeta a debate.

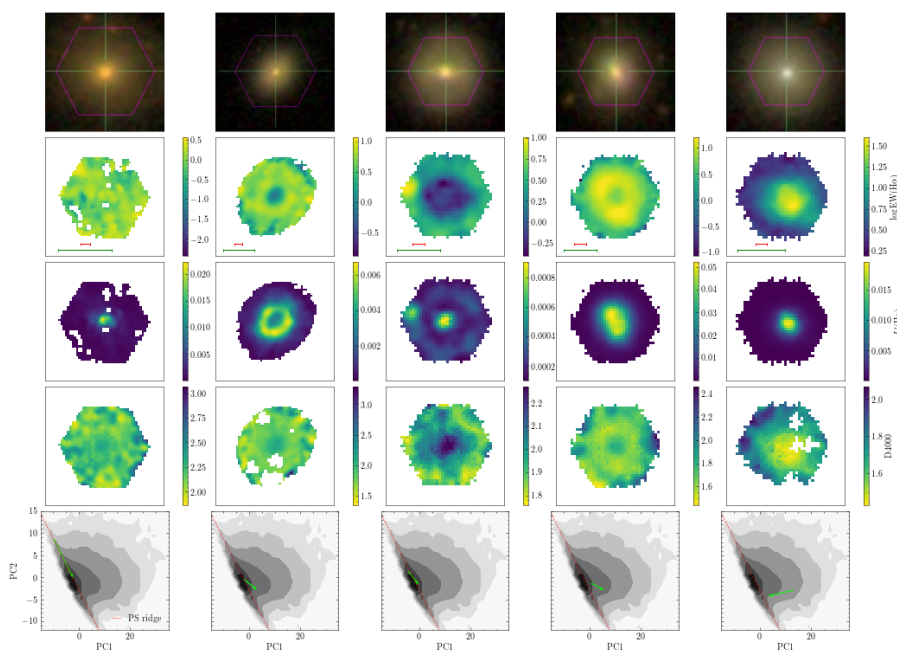
Esta tesis está dedicada a revisar las principales propiedades de las galaxias clasificadas como S0. Nuestro objetivo es reunir información abundante y, sobre todo, sólida sobre los parámetros más relevantes de este tipo morfológico poco compren-

dido y su posible dependencia con el entorno para acotar sus caminos de formación. Por primera vez exploramos todo el espectro óptico de estas galaxias, buscando pistas para inferir su evolución.

Comenzamos la exploración con espectros de fibra única del censo SDSS de una muestra de casi 70000 S0 cercanas y sus propiedades globales. Utilizamos un análisis de componentes principales (PCA) para reducir la alta complejidad de los datos espectrales mediante sus proyecciones en un espacio de baja dimensionalidad, facilitando así una clasificación basada en aprendizaje automático libre de sesgos de las galaxias. El procedimiento revela que la población S0 se compone de dos clases principales con propiedades distintas. Mientras que la clase mayoritaria está formada por lenticulares pasivas con espectros inactivos, la otra se caracteriza por galaxias activas que, pese a su morfología de tipo temprano, muestran ritmos de formación estelar que pueden llegar a ser similares a los observados en espirales de tipo tardío. La principal fuente de ionización de estas galaxias activas es la formación estelar. Sin embargo, en los sistemas S0 de tipo *Seyfert* y LINER detectados en radio y rayos X, la actividad es impulsada, respectivamente, por acreción nuclear y estrellas post-AGB.

Aplicado a espectros resueltos espacialmente del censo MaNGA, el PCA se puede utilizar para estudiar la configuración radial de la actividad en las galaxias. La extensión del PCA a estos espectros nos lleva a identificar anillos de formación estelar en galaxias S0, típicamente asociados con un gradiente de actividad positivo, y a reunir el catálogo más grande de estos objetos jamás identificados a través de este tipo de datos. La evaluación de los anillos indica que son relativamente

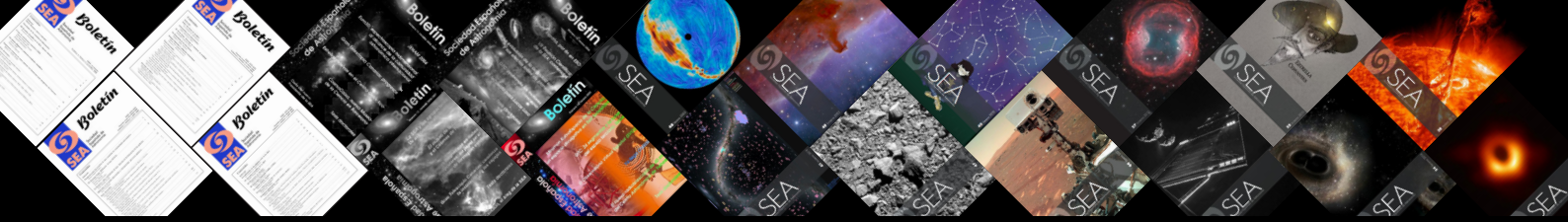
Ejemplos de mapas espectrales y perfiles espectrales de galaxias S0 empleados en Tous et al. (2023). Las filas segunda, tercera y cuarta muestran, respectivamente, mapas del ancho equivalente y luminosidad en H $\alpha$ , y del índice espectral D4000. Las líneas horizontales verdes y rojas incluidas en los paneles de la segunda fila indican, respectivamente, el diámetro efectivo de la galaxia y la PSF. La última fila muestra la orientación de los perfiles espectrales de las galaxias proyectados sobre las dos primeras componentes principales. Las imágenes en color de las galaxias se muestran en la primera fila, donde los marcos hexagonales superpuestos indican la región cubierta por MaNGA (fuente de las imágenes: <https://data.sdss.org/sas/dr15/manga/>).



abundantes (~30%) en S0s completamente formadas, con una frecuencia que aumenta bruscamente con la masa de las anfitrionas pero que no se correlaciona con el entorno. Los anillos son dos veces más frecuentes entre los miembros de la clase pasiva que en los activos, y probablemente se alimentan de gas residual del disco. Estos resultados vinculan los anillos con la captura por parte de las S0 de galaxias satélite enanas que orbitan cerca de ellas. Finalmente, examinamos los perfiles de actividad radial de las S0s en función de sus propiedades. La comparación revela que el gradiente de actividad radial de estas galaxias está estrechamente relacionado con sus clasificaciones PCA y BPT y el estado de formación estelar. La clase pasiva a menudo muestra perfiles de actividad de bajo nivel y planos, mientras que sus equivalentes activas generalmente tienen gradientes de actividad negativos, típicamente asociados con un elevado ritmo específico de formación estelar.

En conjunto, nuestros resultados respaldan un escenario en que las fusiones menores podrían desempeñar un papel activo en la evolución reciente de las galaxias S0 rejuveneciéndolas, mientras que los cúmulos operan en dirección opuesta, apagando su actividad. La metodología que hemos desarrollado proporciona una imagen unificada de la actividad en las galaxias S0 en el dominio óptico. En combinación con cantidades físicas y diagramas de líneas de emisión, demuestra ser una herramienta valiosa para interpretar tendencias globales y radiales clave en las galaxias lenticulares que debería ser aplicable a otras morfologías.

Tesis disponible próximamente en: [Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona / Tesis Doctorals / Departament Física Quàntica i Astrofísica](#).



Selección de algunas portadas mostrando la evolución del Boletín de la SEA.



**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