

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

Francesca Figueras
cesca@fqa.ub.edu

Carme Jordi
carme@fqa.ub.edu

Xavier Luri
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 cúasares, 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.»

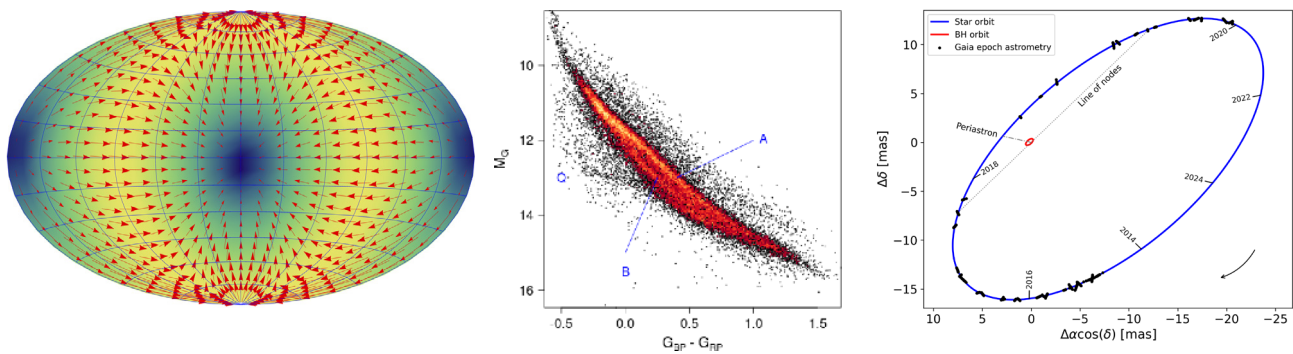


Figura 1. Izquierda: El patrón de la variación de los movimientos propios de los cuásares ha permitido cuantificar, por primera vez usando datos de Gaia, la aceleración del baricentro del sistema solar con respecto al sistema de referencia en reposo del Universo (Gaia Collaboration, 2021, A&A 649, A9). 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.

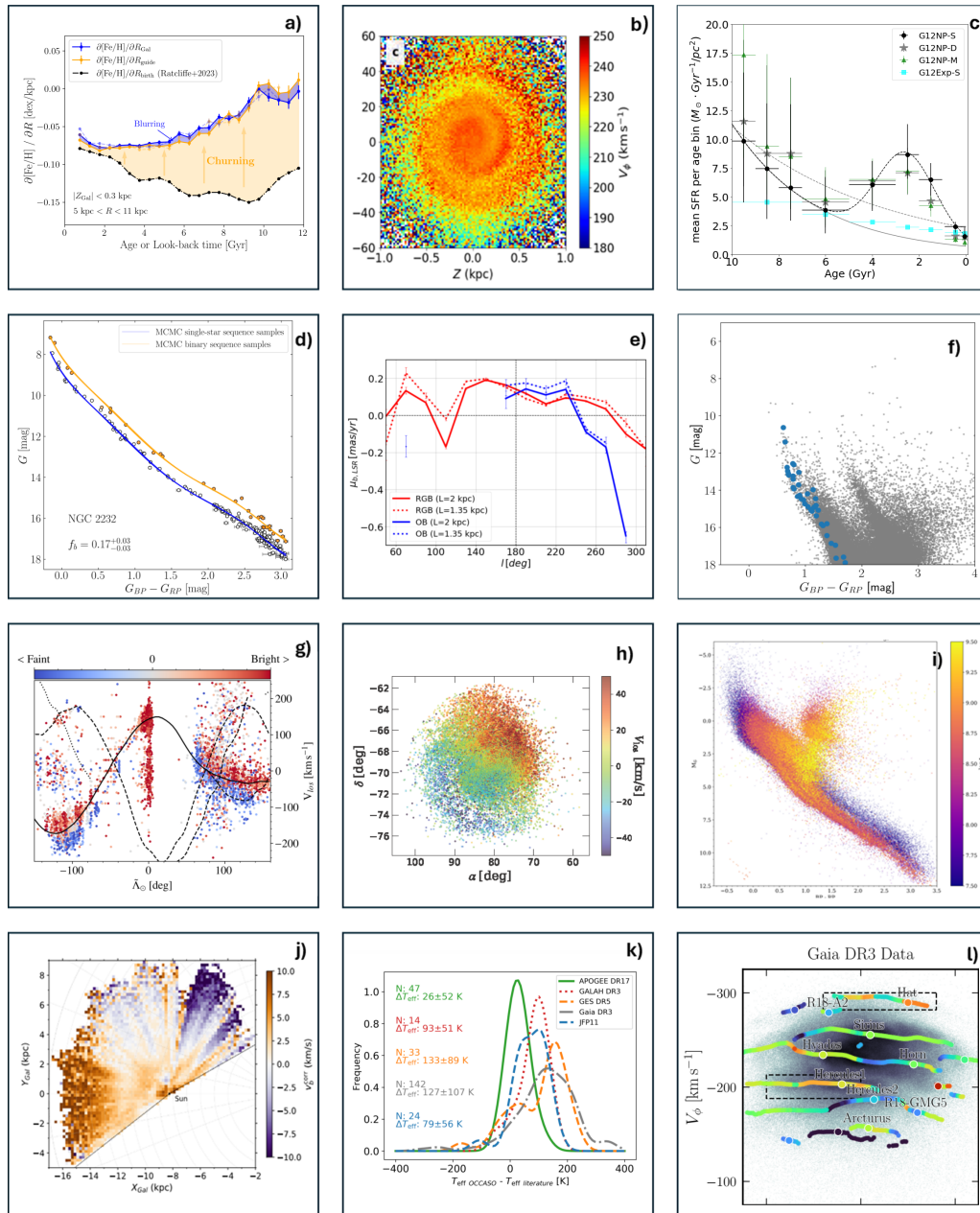


Figura 2. Publicaciones científicas lideradas por miembros del equipo *Gaia*-Barcelona en el periodo 2018-2024. De ellas se derivan resultados como: a) hemos podido cuantificar como la evolución del gradiente radial de metalicidad en disco de la Vía Láctea está afectada por la migración estelar (Anders 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).

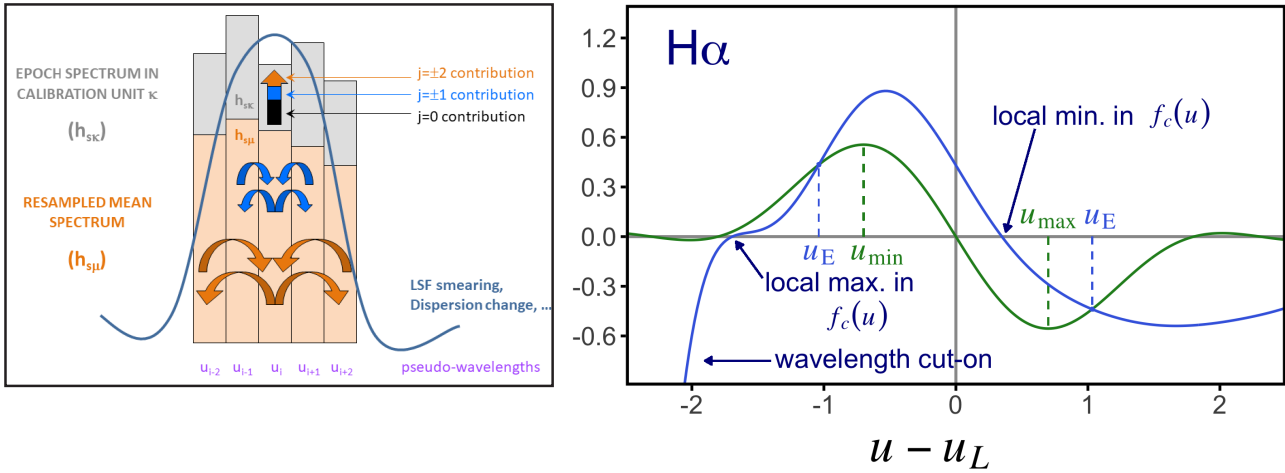


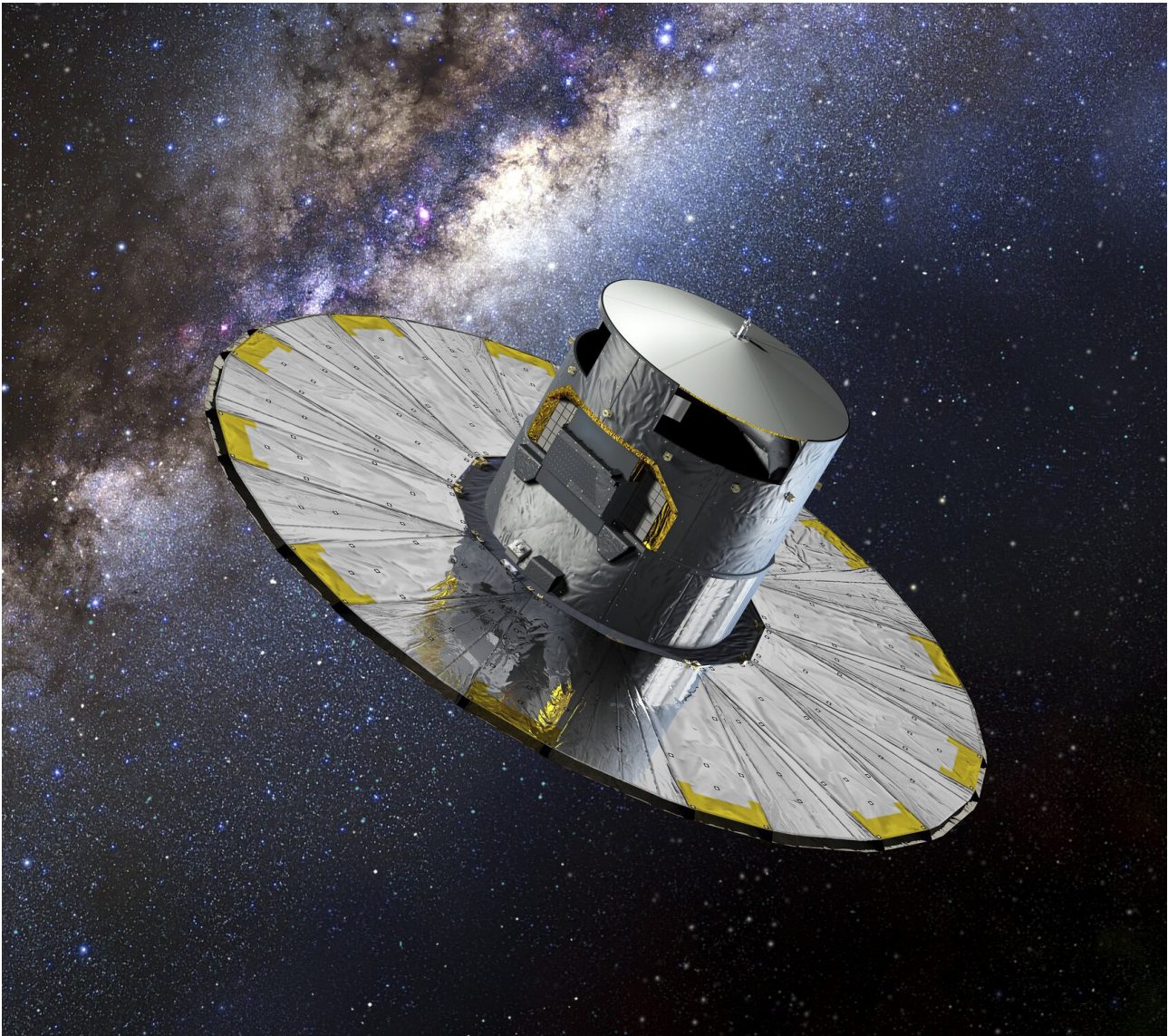
Figura 3. Izquierda: El procesado de los espectros BP/RP de *Gaia* DR3 incluye la variación de la LSF y la dispersión en el plano focal y con el tiempo (Carrasco et al., 2018). Derecha: Los espectros BP/RP se expresan como una combinación lineal de funciones Hermite, lo que permite nuevos métodos para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