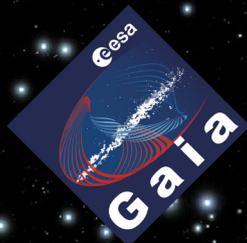


Eduard Masana, Xavier Luri, Lola Balaguer



# GAIA

## Astrometría al microsegundo de arco

*La astrometría es la rama de la astronomía que estudia las posiciones y los movimientos de los astros. Durante muchos siglos, hasta el nacimiento de la astrofísica, fue prácticamente la única rama de la astronomía. Sin embargo, con sólo datos astrométricos los astrónomos fueron capaces de descubrir, por ejemplo, la precesión de los equinoccios, determinar las órbitas de los planetas y establecer las leyes de Kepler, deducir la estructura de la Galaxia o medir efectos como la aberración de la luz, primera prueba directa del movimiento de la Tierra alrededor del Sol.*

### POSICIONES Y MOVIMIENTOS

Si queremos conocer la posición de un astro debemos determinar sus tres coordenadas en el espacio (x,y,z). Ello es posible si conocemos sus coordenadas en el cielo (ecuatoriales, eclípticas...) y su distancia. Las primeras son fáciles de medir y de hecho los primeros catálogos celestes datan de la época de los reinos combatientes (475–221 a. C.) en China, y ya fueron medidas para un gran número de estrellas por Hiparco en el siglo II a. C. Sin embargo, medir la distancia a una estrella es mucho más complicado. En realidad lo que debemos medir es la denominada *paralaje* de la estrella, una pequeña variación angular de periodicidad anual en la posición de la estrella equivalente al ángulo con que veríamos la órbita de la Tierra desde la distancia a la que se encuentra la estrella. Este ángulo es extremadamente pequeño, y no

fue hasta 1838 que Bessel fue capaz de determinarlo por primera vez para la estrella 61 Cyg.

En el caso del movimiento el problema consiste en determinar las tres componentes de su velocidad (U,V,W). Puesto que la velocidad de la estrella se puede dividir en dos componentes, una tangencial al plano del cielo y otra perpendicular al mismo, también aquí nos encontramos con dos problemas bien diferenciados. La componente tangencial, o *movimiento propio*, es el ángulo que parece desplazarse la estrella sobre el cielo en un tiempo determinado. Se mide en unidades de ángulo dividido por tiempo (por ejemplo, milisegundos de arco/año) y para medirlo necesitamos conocer la posición de la estrella en dos instantes diferentes. Cuanto más separadas en el tiempo estén las medidas, con más precisión obtendremos el movimiento propio. También es

Los autores pertenecen al Departamento de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Barcelona (UB-ICC/IEEC).

importante notar que cuanto más lejana se encuentre la estrella más pequeño será su movimiento propio. En la época moderna, fue Halley quien en 1718 se percató de que las estrellas tenían movimiento propio, aunque el astrónomo chino Yi Xing (683-727) de la dinastía Tang ya había observado que las estrellas se movían.

La determinación de la componente perpendicular o *velocidad radial* es totalmente diferente. Para obtenerla necesitamos un espectro de la estrella donde sean visibles líneas de absorción. Como es bien conocido, si una fuente de luz (en este caso la estrella) se desplaza respecto del observador, la longitud de onda (posición) de las líneas espectrales cambia debido al denominado efecto Doppler. Existe una sencilla relación que permite calcular la velocidad de la fuente en función del desplazamiento de las líneas respecto a un espectro en reposo. La velocidad radial se mide en km/s y la primera medida fue obtenida por Vogel en 1888.

Cualquier misión astrométrica como Gaia deberá medir los elementos que hemos citado: la posición en el cielo, la distancia, el movimiento propio y la velocidad radial.

### BREVE HISTORIA DE LA ASTROMETRÍA

Las civilizaciones antiguas ya advirtieron que los objetos celestes se mueven de una manera regular, lo que es útil para determinar direcciones y tiempos sobre la Tierra. La necesidad de resolver problemas prácticos, como fijar de forma precisa las fechas óptimas para la siembra y la cosecha, supuso el inicio de la astrometría de precisión.

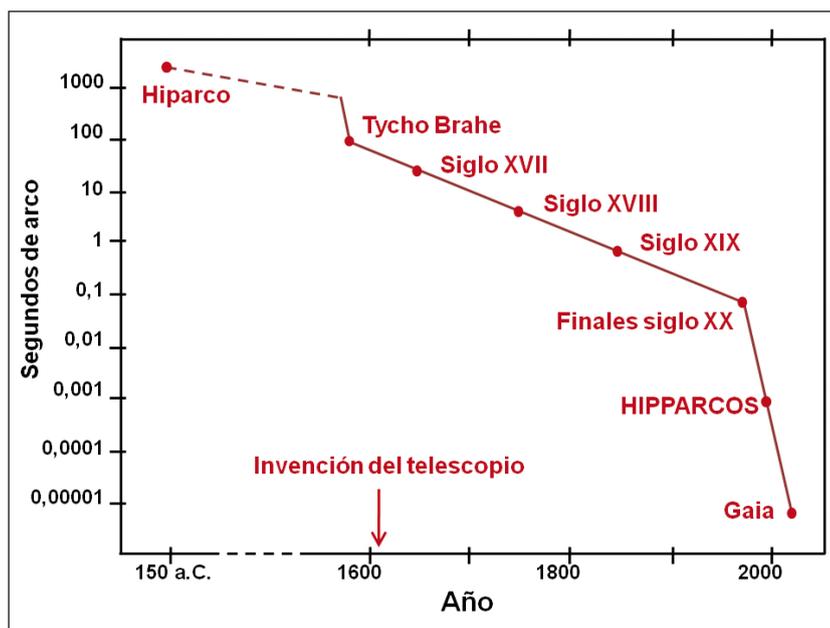
Llevar a cabo mediciones angulares precisas y catalogar las posiciones de los objetos celestes fue la tarea fundamental de la astronomía hasta el siglo XIX y todavía constituye un elemento básico de la investigación astronómica. Los ángulos implicados son extremadamente pequeños y mejorar la exactitud de las medidas astrométricas ha sido un objetivo constante para los astrónomos, que solo se ha alcanzado gracias al desarrollo de nuevos instrumentos de observación cada vez más precisos, conduciendo a una serie de cambios fundamentales en el conocimiento científico.

En la Figura 1 se muestra cómo ha ido aumentando la precisión de las medidas en función del tiempo. Fue el griego Hiparco de Nicea (190-120 a.C.) quien confeccionó el que se considera el primer catálogo astrométrico de precisión, compuesto por 1.080 estrellas con una precisión en las posiciones de un grado, equivalente al ángulo con que vemos una persona situada a cien metros de distancia. Hiparco también clasificó las estrellas en función de su brillo, introduciendo el concepto de *magnitud*.

El astrónomo, matemático e inventor chino Zhang Heng (78-139) construyó la primera esfera armilar ecuatorial conectada a un reloj de agua y con ella mejoró la precisión de los mapas estelares de su época. Su catálogo contenía 2.500 estrellas (sin

contar aquellas «visibles solo para los navegantes») de las que puso nombre a las 320 más brillantes en 124 asterismos. Además estimó la existencia de 11.500 estrellas débiles. En sus cartas colocaba líneas horizontales y verticales, inventando las medidas de longitud y latitud.

La primera gran mejora de precisión después de Hiparco vino de la mano de Tycho Brahe, en el siglo XVI. Tycho fue un observador sistemático que se diseñaba y construía sus propios instrumentos (astrolabios, esferas armilares, cuadrantes murales...), con los cuales elaboró un catálogo de 1.005 estrellas con una precisión en las posiciones de un minuto de arco, prácticamente el límite del ojo humano sin la ayuda de instrumentos ópticos. Cabe mencionar que las medidas de las posiciones de los planetas obtenidas por Tycho sirvieron a Kepler para establecer las leyes del movimiento planetario.



En 1609 se inventó el telescopio, el cual abrió nuevos mundos a los ojos de los hombres; aunque por sí solo no fue de gran ayuda para la medición de ángulos y todavía llevó algún tiempo concebir un instrumento capaz de aprovechar su potencial para mejorar la precisión angular de las medidas. En el siglo XVII se inventó el retículo micrométrico, que consiste en dos filamentos montados en el campo de visión de un telescopio que pueden acercarse y alejarse mutuamente por medio de una ruedecilla. El número de vueltas de la ruedecilla indica el ángulo subtendido por el objeto en el cielo. Esto permitió romper con la barrera impuesta por la resolución limitada del ojo humano, que no puede distinguir ángulos por debajo del minuto de arco.

En el siglo XVIII, el dominio de materiales y técnicas mejoró sustancialmente, permitiendo a los fabricantes de instrumentos grabar en ellos las escalas angulares, como en el círculo astronómico de alta precisión. Con ello, ésta mejoró hasta los segundos

(En página anterior).  
Imagen generada por ordenador de Gaia, con los paneles desplegados.  
(ESA-C. Carreau)

Figura 1. Evolución de la precisión de los catálogos astrométricos con el tiempo. (Excepto donde se indique lo contrario, todas las imágenes son cortesía de los autores)

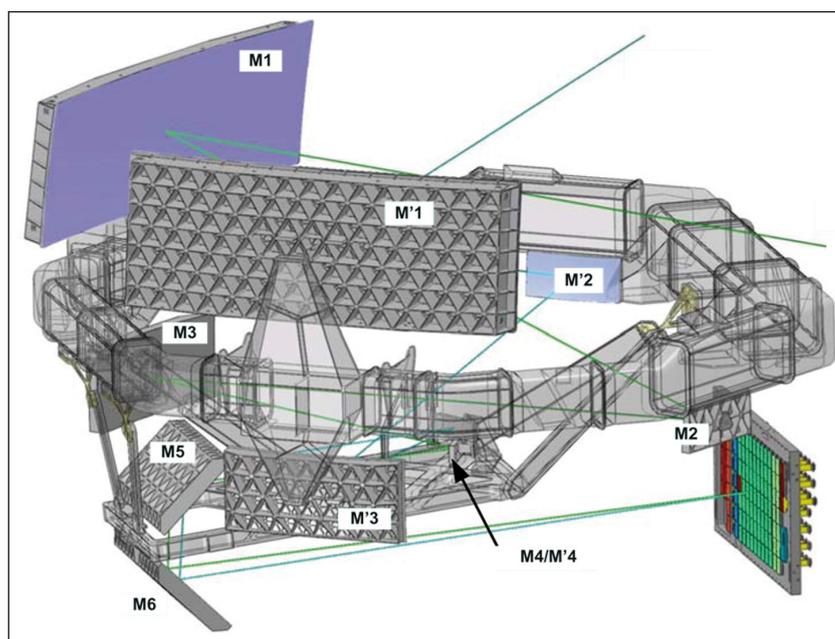


Figura 2. Modelo esquemático de la carga útil de Gaia. Pueden apreciarse (en la parte superior izquierda) los dos espejos primarios rotulados como M1, de forma rectangular, que apuntan a dos direcciones distintas del cielo.

de arco, lo que permitió grandes descubrimientos. Así encontramos por ejemplo el catálogo de Flamsteed, que contenía tres mil estrellas y que por primera vez en occidente utilizaba las coordenadas ecuatoriales (tradicionalmente usadas en China), en vez de las eclípticas como todos los catálogos occidentales precedentes. La precisión era de 10 segundos de arco, equivalente al ángulo con que vemos una persona situada a 36 km de distancia. Durante los siglos XVIII y XIX se fueron así sucediendo los catálogos cada vez más precisos y con más estrellas, gracias a la mejora de los instrumentos. A partir de la segunda mitad del siglo XIX algunos de ellos incluyen medidas de las paralajes.

Llegamos así al siglo XX, donde encontramos catálogos de posiciones y movimientos propios y algunos con paralajes (aunque comparativamente

para pocas estrellas), que van alcanzando precisiones de unos pocos milisegundos de arco. Estos catálogos están hechos en base a medidas obtenidas con instrumentos modernos, como los círculos meridianos. De entre todos estos catálogos hay que destacar el catálogo *Hipparcos*, considerado actualmente como el catálogo astrométrico de referencia. Este catálogo contiene 120.000 estrellas con posiciones, paralajes y movimientos propios (faltan las velocidades radiales), con una precisión del orden del milisegundo de arco, obtenidas desde el espacio por el satélite del mismo nombre. Este satélite fue lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA) en el año 1989 y estuvo observando durante cinco años. Los datos *Hipparcos* han supuesto una revolución en muchos campos de la astrofísica. Así por ejemplo, una buena determinación de la distancia permite conocer con precisión la magnitud absoluta de la estrella y su luminosidad, mejorando la precisión de los diagramas HR de cúmulos de estrellas, lo cual a su vez nos permite determinar su edad.

## LA MISIÓN GAIA

En cierta forma Gaia puede ser considerado como el sucesor de *Hipparcos*. Gaia es también una misión de la ESA que se lanzará a finales de 2012 a bordo de un cohete Soyuz y tendrá una vida útil de cinco años. Gaia dispone de dos telescopios cuyos espejos principales miden 1,45 x 0,5 metros y apuntan en direcciones separadas un ángulo de 106,5°. Una serie de espejos secundarios combinarán la luz de ambos telescopios en un único plano focal donde se encuentran los detectores CCD. Todo ello está montado en un banco óptico muy estable tanto desde el punto de vista térmico como mecánico (ver Figura 2).

El satélite se situará en órbita alrededor del punto de Lagrange L2, a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra en la línea Tierra-Sol. El satélite girará sobre sí mismo cada seis horas alrededor de un eje que

mantendrá un ángulo constante de 45° con la dirección Sol-satélite. El eje además precesionará alrededor de esta dirección Sol-satélite en cerca de setenta días (ver Figura 3). Este complicado movimiento permitirá a Gaia barrer el cielo en su totalidad de una manera más o menos uniforme, con un promedio de ochenta observaciones por astro en los cinco años que durará la misión.

Gaia realizará tres tipos de medidas diferentes:

- Astrométricas: posiciones y paralajes de todas las estrellas hasta la magnitud 20, o lo que es lo mismo, unos mil millones de estrellas, con una precisión de 10 a 15 microsegundos de arco a magnitud 15. ¡Esta precisión equivale al ángulo con que veríamos una moneda de un euro situada en la superficie de la Luna!
- Fotometría de todas las estrellas, lo cual permitirá determinar sus parámetros

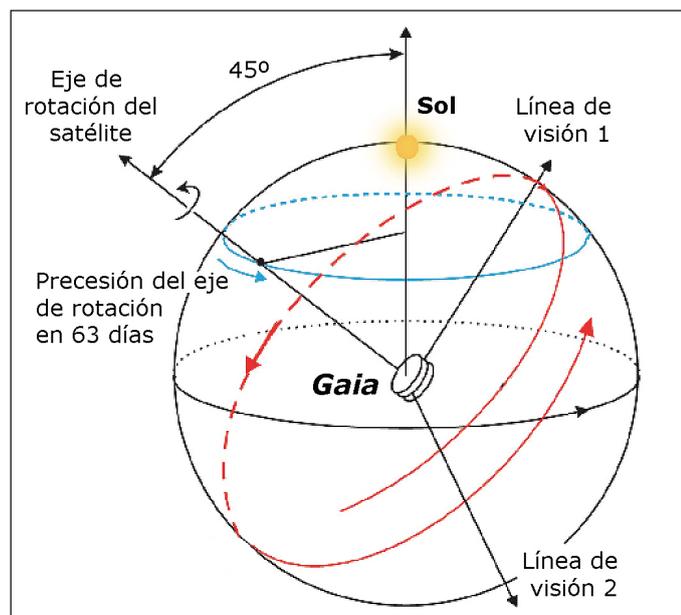


Figura 3. Movimiento de Gaia para barrer el cielo (línea roja).

físicos (temperatura, gravedad superficial, composición química...).

- Medidas espectroscópicas de todas las estrellas hasta magnitud 16. Estas medidas permitirán determinar la velocidad radial.

En la Tabla 1 vemos una comparación entre las características de *Hipparcos* y de *Gaia*.

Para poder realizar estas observaciones, el plano focal de *Gaia* consta de 102 CCD de 4.500 x 1.966 píxeles de un tamaño de 10 x 30 micras. Como vemos en la Figura 4, el plano focal está dividido en cuatro zonas:

- *Sky mapper*: formado por dos columnas de CCD destinadas a detectar los objetos a observar.
- Plano astrométrico: nueve columnas de CCD donde se realizarán las medidas astrométricas.
- Plano fotométrico: consta de dos columnas de CCD. Cada una de ellas recibe la luz que proviene de uno de los espectrofotómetros, el primero centrado en la zona azul del espectro y el segundo en la zona roja.
- Plano espectrográfico: estas doce CCD reciben la luz del espectrógrafo de velocidades radiales.

Los datos que proporcionará *Gaia* no serán imágenes. *Gaia* observará en el denominado modo TDI, consistente en que la carga de la CCD se traslada de una columna de píxeles a la siguiente a la misma velocidad que lo hace la imagen de la estrella (recordemos que el satélite está girando constantemente sobre sí

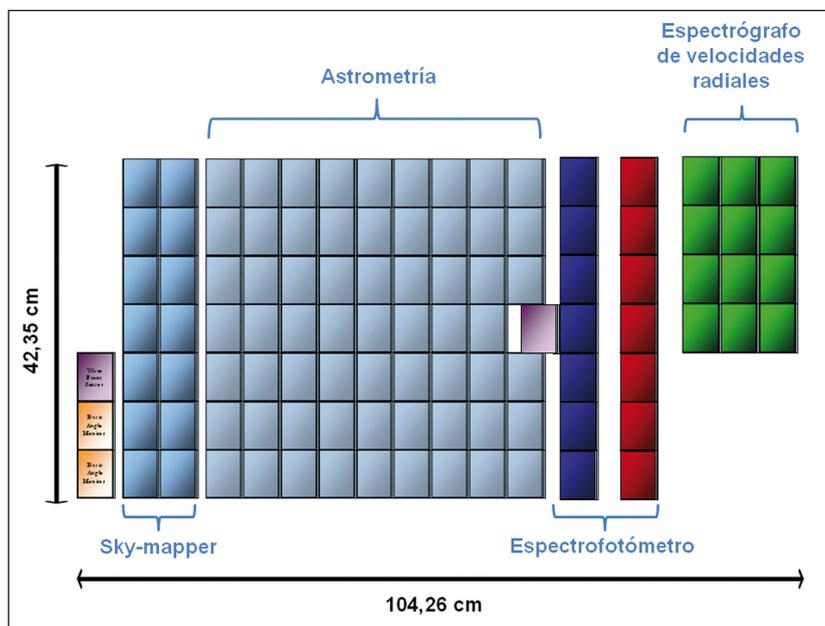


Figura 4. Esquema del plano focal de *Gaia*. Estará compuesto de 102 CCD, con un total de 938 millones de píxeles y una superficie de 2.800 cm<sup>2</sup>, lo que lo convertirá en la mayor cámara CCD en el espacio.

mismo). El tiempo de integración es, por tanto, igual al tiempo que tarda la estrella en cruzar la CCD (unos cuatro segundos). Lo que finalmente se transmitirá a tierra serán pequeñas ventanas de unos pocos píxeles a partir de las cuales se podrá determinar la posición de la estrella.

Actualmente la mayoría de módulos que componen *Gaia* ya están finalizados o casi finalizados y la empresa encargada de su construcción (Astrium) está integrándolos en su factoría de Toulouse, Francia (ver Figuras 5 a 7).

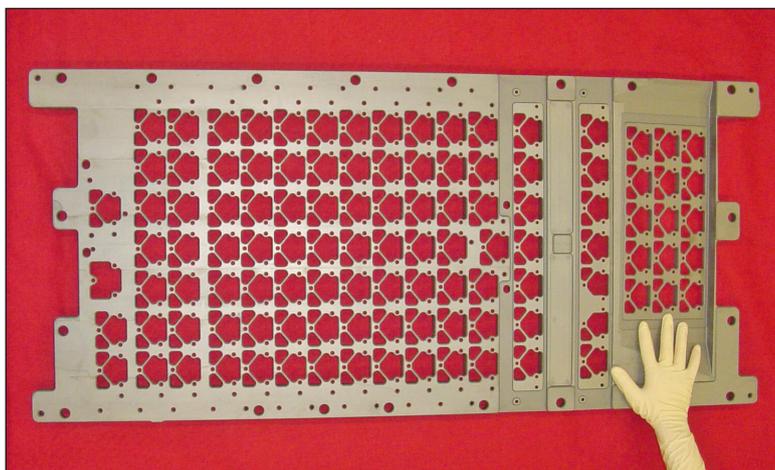
#### ASTROFÍSICA CON GAIA

Los datos que proporcionará *Gaia* van más allá de la astrometría. Como ya hemos mencionado, el hecho de disponer de medidas fotométricas permitirá establecer las características físicas de las estrellas y demás cuerpos observados. Son muchos los campos

	HIPPARCOS	GAIA
Magnitud límite	Mag. 12	Mag. 20
Completitud	Mag. 7,3 – 9,0	Mag. 20
Límite brillante	Mag. 0	Mag. 6
Número de objetos	120.000	26 millones a V = 15 250 millones a V = 18 1.000 millones a V = 20
Distancia efectiva	1 kpc (3.262 años luz)	1 Mpc (3.262.000 años luz)
Cuásares	No	5 x 10 <sup>5</sup>
Galaxias	No	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>7</sup>
Precisión	1 milisegundo de arco	7 microsegundos de arco a V = 10 10-25 microsegundos de arco a V = 15 300 microsegundos de arco a V = 20
Fotometría	2 colores (B y V)	Espectrofotometría hasta V = 20
Velocidad radial	No	15 km/s a V = 16-17
Observaciones	Preseleccionado	Completo y no sesgado

Tabla 1. Comparación de *Hipparcos* y *Gaia*

Figura 5. Soporte de los CCD del plano focal de Gaia. Nótese en la esquina inferior derecha la mano de un técnico, lo que da idea del gran tamaño del plano focal. (Boostec Industries/ Michel Bougoin)



asteroides, como su composición mineralógica, con la distancia al Sol. Las órbitas de los asteroides se establecerán con una precisión treinta veces superior a la actual. Se descubrirán del orden de trescientos nuevos objetos del Cinturón de Kuiper.

- Astrofísica estelar: el disponer de distancias con una precisión mejor que un 1 % para 10 millones de estrellas hasta 2,5 kpc (unos 8.100 años luz) y mejor que un 10 % para 100 millones de estrellas hasta 25 kpc (unos 81.000 años luz), permitirá profundizar

de la astrofísica que se beneficiarán de esta misión. Veamos algunos de ellos:

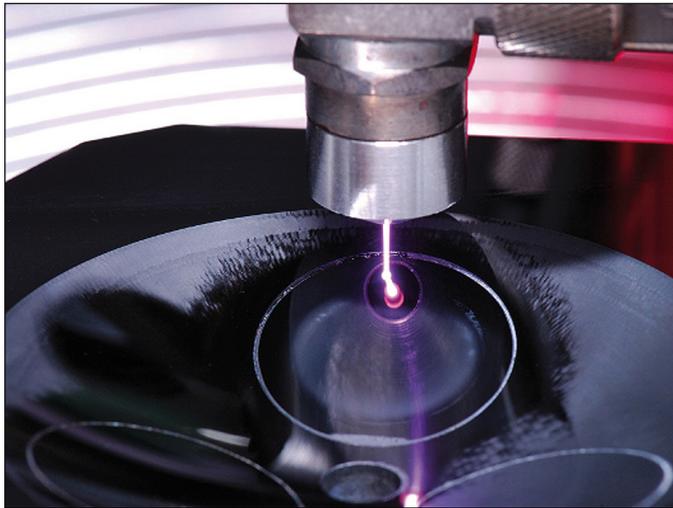
- Planetas extrasolares: gracias a la precisión astrométrica, se detectarán entre 10.000 y 20.000 nuevos planetas extrasolares (unos diez por día), estableciéndose las órbitas para unos 5.000 sistemas. Se podrán detectar planetas de unas diez masas terrestres a una distancia de hasta diez pársec (unos 33 años luz). También se detectaran nuevos planetas gracias a la observación fotométrica de tránsitos del planeta por delante de su estrella.
- Sistema Solar: se detectarán todos los objetos con movimiento propio elevado hasta magnitud 20. Se podrá relacionar las características de los

en el conocimiento de la Galaxia. Se observarán estrellas de todos los tipos y en todos los estados evolutivos (ver Figura 8). Todo ello mejorará el conocimiento que tenemos de parámetros astrofísicos fundamentales como la función inicial de masa, funciones de luminosidad...

- Cinemática y dinámica de la Galaxia: se conocerá la distribución de la distancia y velocidades de todas las poblaciones estelares, lo cual permitirá estudiar la estructura espacial y dinámica del disco y el halo, y la historia de su formación. Gaia también proporcionará un marco riguroso para comprobar las teorías de la estructura y evolución estelar.

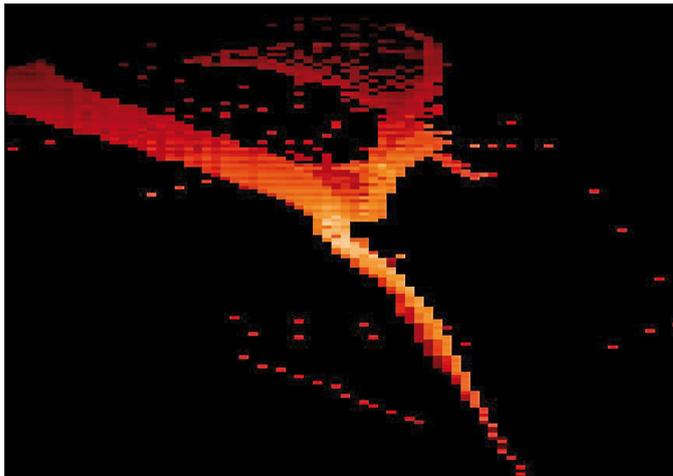
Figura 6. Soporte toroidal de la carga útil de Gaia. Está construido íntegramente en carburo de silicio (SiC), un material a la vez muy rígido, ligero y con una elevada conductividad térmica, que lo hacen ideal para asegurar la estabilidad de los instrumentos. (Boostec Industries)





- **Astrofísica extragaláctica:** se establecerán estándares de distancia definitivos utilizando medidas directas de las Nubes de Magallanes. También se descubrirán nuevos cuásares y microlentes gravitatorias (hasta 500.000).

Como vemos, Gaia supondrá una auténtica revolución en la práctica totalidad de los campos de la astrofísica.



## EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Uno de los grandes desafíos de la misión Gaia es el proceso de reducción de los datos (la conversión de datos en bruto a datos científicamente utilizables). Gaia mandará a la Tierra alrededor de 100 Terabytes de datos en bruto que deberán ser procesados con extremo cuidado para conseguir extraer de ellos las medidas con la precisión requerida.

Para llevar a cabo esta difícil tarea se ha creado el consorcio DPAC, formado por numerosos centros de investigación y universidades de toda Europa. Más de cuatrocientos científicos e ingenieros están colaborando en la solución de uno de los mayores desafíos científicos y tecnológicos de nuestra era.

La participación española en el procesamiento de los datos es crucial. Por mencionar algunas responsabilidades:

- El nodo central de almacenamiento y procesado estará en el Centro Europeo de Astronomía Espacial, ESAC (Villafranca del Castillo, Madrid).
- La Universidad de Barcelona está al cargo de la definición, coordinación y parte de la implementación del complejo desarrollo de dos de los sistemas cruciales de procesado de datos para Gaia (llamados «IDT» e «IDU»).
- La Universidad de Barcelona también se encarga del simulador de misión imprescindible para que todos los equipos de DPAC puedan probar sus sistemas bajo condiciones muy realistas antes del lanzamiento. Con este propósito hemos generado durante los últimos años diversas grandes simulaciones (conteniendo decenas de millones de estrellas simuladas y decenas de Terabytes de datos) que han permitido probar y validar la cadena de procesado de datos de DPAC. Estas simulaciones se han realizado usando el superordenador *Mare Nostrum* del Barcelona Supercomputing Center (BSC) (ver Figura 9).

El catálogo final de la misión está previsto que sea público aproximadamente en 2019, aunque existirán catálogos intermedios y se realizarán alertas casi inmediatas de aquellos fenómenos, como supernovas, que requieran observaciones complementarias urgentes desde telescopios terrestres.

Gaia es una misión científica con amplísimas y muy ambiciosas motivaciones. Si bien su objetivo último es resolver una de las cuestiones más

*Figura 7. Uno de los espejos de Gaia durante su proceso de pulido. Dada la extrema precisión requerida para dicho pulido, la última fase del mismo no se realiza mediante medios mecánicos sino usando un haz de plasma. (TNO/IOM/ Fred Kamphues)*

*Figura 8. (A la izquierda): Simulación de la cobertura del diagrama de Hertzsprung-Russell (HR) por los datos de Gaia. Todas las regiones de dicho diagrama están muy bien representadas en los datos de Gaia, desde las enanas blancas hasta las enanas gigantes. En las regiones más densas (color blanco) los recuadros de la figura contienen decenas de millones de objetos.*



desafiantes y fundamentales de la ciencia moderna: comprender el origen y evolución de nuestra propia Galaxia, la Vía Láctea, también va a revolucionar la búsqueda de planetas extrasolares, detectando varios millares en el entorno del Sol.

Gaia representa el sueño de muchas generaciones, pues arrojará luz sobre cuestiones que los astrónomos han intentado contestar durante muchos siglos. Es la expresión de una curiosidad sobre la naturaleza del Universo ampliamente extendida, combinada con la más reciente tecnología punta. **A**

*Figura 9. (Arriba): Fotografía del superordenador Mare Nostrum, en el Barcelona Supercomputing Center, usado por el equipo Gaia de la Universidad de Barcelona para la simulación y procesado de datos. (Barcelona Supercomputing Centre)*