

El tercer catálogo de datos de la misión *Gaia* (*Gaia*-DR3, *Gaia* Collaboration, Vallenari et al 2022), incluye por primera vez la espectrofotometría de más de 219 millones de objetos (De Angeli et al 2022), cubriendo los dos hemisferios celestes (Fig. 1) con un único instrumento y con la precisión asociada a datos obtenidos desde el espacio. *Gaia* tiene dos instrumentos espectrofotométricos, uno que observa en el rango azul del espectro visible (Blue Photometer o BP que cubre el rango 330-680 nm de longitudes de onda) y otro en el rango rojo (Red Photometer o RP, 640-1000 nm). La resolución espectral es dependiente de la longitud de onda y siempre inferior a 100 (ver Carrasco et al 2021). La información espectrofotométrica permite modelar los efectos de cromaticidad en el plano focal, proporcionando la precisión necesaria para convertir *Gaia* en una misión capaz de revolucionar múltiples campos de la astrofísica.

Josep Manel Carrasco¹
Michael Weiler¹
Minia Manteiga²
Carme Jordi¹
Claus Fabricius¹
Daniel Garabato²
Lara Pallas-Quintela²
Marco A. Álvarez²
Carlos Dafonte²
Luis Manuel Sarro³

¹ Institut de Ciències del Cosmos,
Universidad de Barcelona, IEEC-UB

² CIGUS CITIC, Universidade da Coruña

³ Dept. de Inteligencia Artificial, Universidad
Nacional de Educación a Distancia (UNED)

Los grupos de la Universitat de Barcelona, la Universidade da Coruña y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han participado en todas las etapas del análisis de estos datos espectrofotométricos. Estas etapas incluyen el diseño del instrumento, la monitorización de su salud durante la misión, la calibración y verificación de los datos obtenidos, su análisis para determinar los parámetros astrofísicos de las fuentes observadas y la validación del catálogo para su publicación.

LOS ESPECTROS EN DR3

Gaia-DR3 incluye los espectros BP/RP para los objetos con magnitud $G < 17.65$ mag y más de 15 observaciones en el instrumento espectrofotométrico. Además, se han incluido explícitamente los espectros de algunos objetos intrínsecamente más débiles (enanas blancas, cuásares, galaxias, estrellas ultrafrías, estrellas de calibración...).

El catálogo de *Gaia* proporciona el espectro externo, totalmente calibrado en flujo absoluto y longitud de onda, y también el espectro interno, descrito en flujos instrumentales y pseudo-longitudes de onda. El enlace https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20220610 permite ver cómo cambian estos dos tipos de espectro según su posición en el diagrama Hertzsprung-Russell. La Fig. 2 muestra la relación señal a ruido de los espectros internos publicados para algunas estrellas de magnitud $G=16$ mag. Como se puede apreciar, la forma de los espectros cambia con el color de las estrellas, dejando ver también el efecto de algunas líneas espectrales.

NUEVOS DATOS REQUIEREN NUEVAS TÉCNICAS

Los espectros BP y RP de *Gaia* no se expresan como un conjunto discreto de valores de flujo y longitud de onda. En su lugar, se expresan mediante 55 coeficientes en cada instrumento (BP o RP), que representan los pesos de cada una de las funciones base en su combinación lineal. Esta inusual representación de un espectro es consecuencia de su proceso de calibración (Carrasco et al. 2021). A partir de estos coeficientes, el flujo en función de la longitud de onda puede calcularse fácilmente. La herramienta *GaiaXPy* (<https://gaia-dpci.github.io/GaiaXPy-website/>) facilita esta conversión para el usuario.

Si bien los coeficientes de un espectro generalmente sólo están débilmente correlacionados, al transformarlos a valores de flujo en función de la longitud de onda, éstos sí que tienden a estar fuertemente correlacionados.

Por lo tanto, es ventajoso comenzar el análisis de los espectros de BP/RP utilizando los coeficientes y evitar el muestreo de los espectros siempre que sea posible.

Esta es una forma nueva de trabajar con datos espectroscópicos, pero también es una forma que permite cálculos rápidos y eficientes, incluso para análisis complejos. El análisis de líneas espectrales presentado en Weiler et al (2022) proporciona un buen ejemplo de ello. A modo de ilustración, la Fig. 3 muestra cómo los coeficientes espectrales representan las diferentes líneas de Balmer de hidrógeno para una estrella de $G=14.2$ mag y una temperatura efectiva de 9900 K. Si bien estamos acostumbrados a la separación del continuo y las líneas en los espectros muestreados, toda la información está contenida en los coeficientes y los cálculos se realizan de manera más eficiente con ellos.

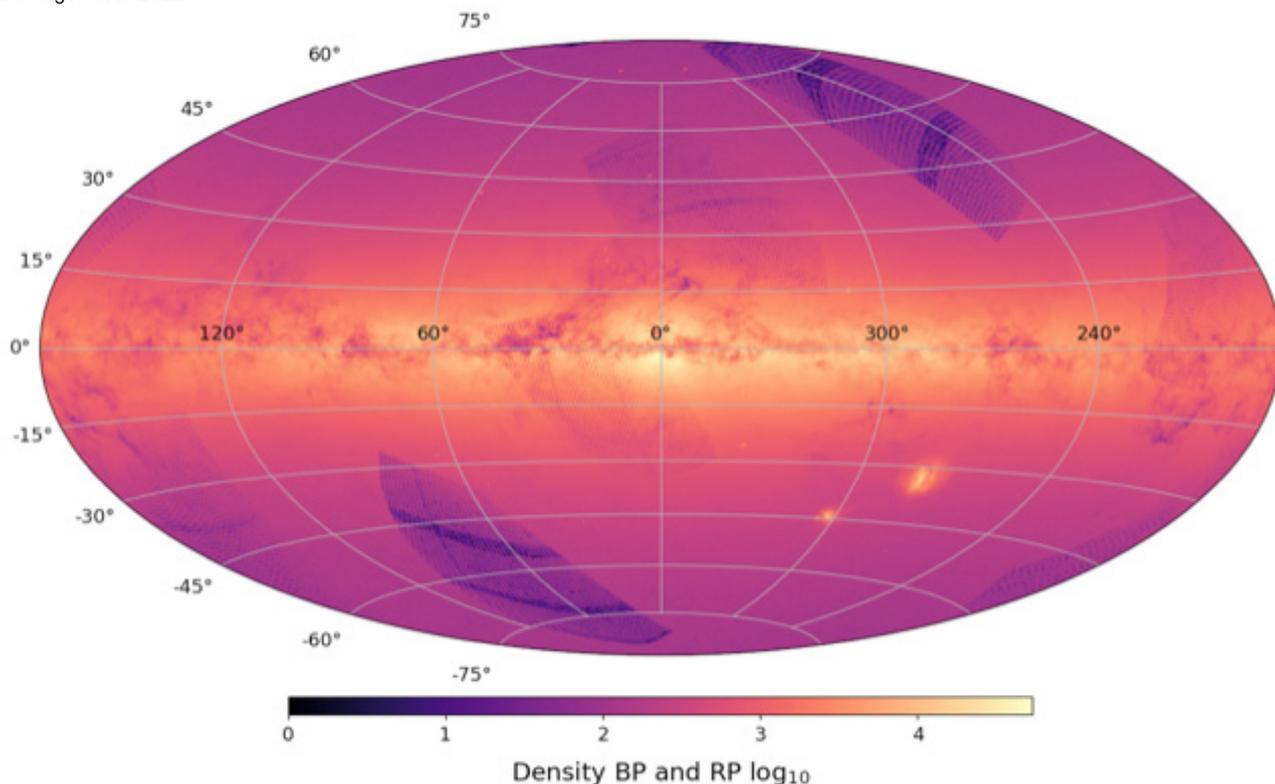
PARÁMETROS FÍSICOS Y ANÁLISIS DE “OUTLIERS”

A pesar de su modesta resolución espectral, la espectrofotometría de *Gaia* permite también determinar

los parámetros astrofísicos de los objetos. Así, el equipo de *Gaia*, utilizando una serie de algoritmos, han proporcionado la clasificación y parametrización de los diferentes objetos astronómicos (Creevey et al. 2022). En *Gaia* DR3 se proporciona la clasificación de prácticamente todos los objetos del catálogo (1590 millones), sus parámetros atmosféricos (T_{ef} , $\log g$, $[M/H]$, A_G , etc.) de más de 470 millones de estrellas y el desplazamiento al rojo de unos 6,3 millones de objetos candidatos a cuásares y de 1,3 millones de objetos candidatos a galaxias.

Los algoritmos que se usaron son de dos tipos, o bien basados en las propias observaciones de *Gaia* o bien basados en modelos de atmósferas e isócronas. Entre los algoritmos del primer tipo están los que se encargan de clasificar las fuentes en estrellas u objetos extragalácticos, proporcionar estimaciones de temperatura de enanas ultrafrías y los que utilizan mapas auto-organizativos (SOM, Delchambre et al 2022) para proponer una clasificación de los objetos con baja

Figura 1. Densidad de objetos en el cielo con datos BP/RP disponibles en la tercera publicación de datos de *Gaia*, *Gaia*-DR3. Figura extraída de De Angeli et al 2022.



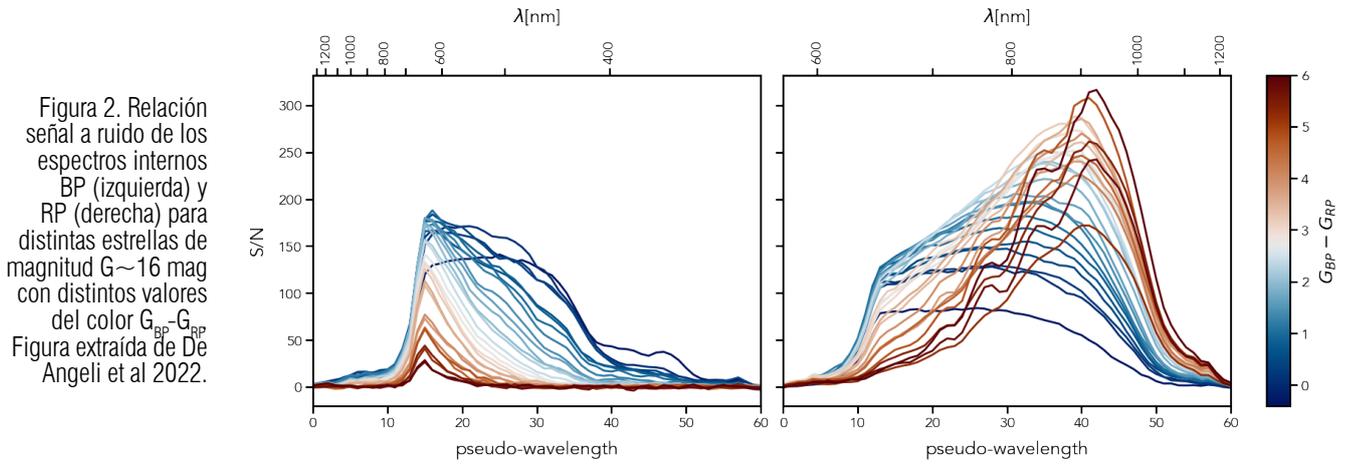


Figura 2. Relación señal a ruido de los espectros internos BP (izquierda) y RP (derecha) para distintas estrellas de magnitud $G \sim 16$ mag con distintos valores del color $G_{BP} - G_{RP}$. Figura extraída de De Angeli et al 2022.

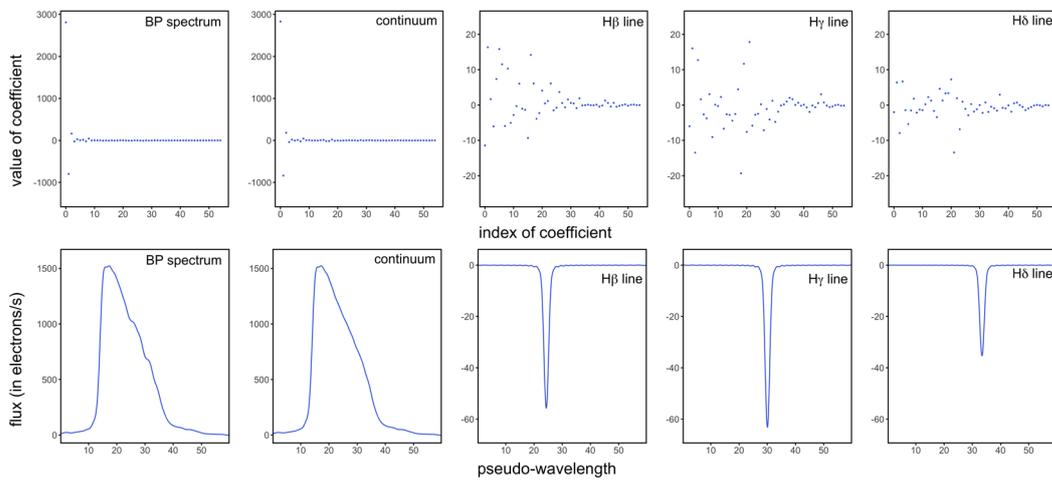


Figura 3. Espectros BP de *Gaia* DR3 505171240162594560, mostrando las líneas H β , H γ y H δ . Los paneles de arriba muestran los coeficientes que representan las características de los espectros calibrados internamente en los paneles de abajo una vez muestreados en flujo.

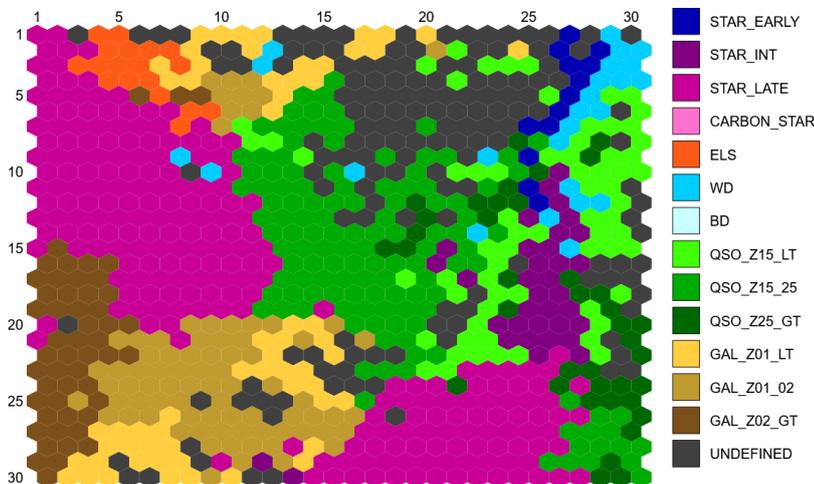


Figura 4. Mapa auto-organizativo (obtenido con GUASOM, Álvarez et al. 2021) de las fuentes con baja probabilidad de pertenencia a clases astronómicas básicas, es decir, *outliers* de clasificación en *Gaia* DR3. Los colores representan su similitud con espectros de distintos tipos de objetos.

probabilidad de pertenencia a las clases astronómicas conocidas. En la Fig. 4 se muestra el mapa SOM etiquetado con clases astronómicas obtenido en DR3.

Los algoritmos que extraen parámetros astrofísicos a partir de los espectros BP o RP lo hacen a dos niveles: un paquete genérico denominado GSP-Phot calcula parámetros bajo la hipótesis de que todas las observaciones corresponden a estrellas y utiliza métodos de Monte Carlo basado en cadenas de Markov (MCMC), mientras que algoritmos específicos se centran en obtener parámetros más precisos para tipos de objetos concretos, como QSOC (dedicado a parametrizar cuásares), UGC (galaxias no resueltas) o los módulos ESP dedicados a espectros de estrellas calientes ($T_{\text{ef}} > 7500$ K; ESP-HS), ultrafrías (tipos espectrales más tardíos de M7; ESP-UCD) o estrellas con líneas de emisión (ESP-ELS).

CONCLUSIONES

Como hemos visto, los primeros datos espectrofotométricos publicados por la misión *Gaia* demuestran su gran potencial para extraer las propiedades astrofísicas de los objetos observados. Además, su disponibilidad en cualquier región del cielo permite utilizarlos como fuente de objetos estándares para otros programas observacionales. En futuras publicaciones de datos, la espectrofotometría de *Gaia* estará disponible para todos los objetos del catálogo (del orden de 2000 millones de fuentes). Además, también se publicarán, no sólo los espectros prome-

dios, sino también cada uno de los espectros observados en cada tránsito realizado durante la misión. Esto permitirá estudiar los efectos de variabilidad en distintas regiones espectrales.

Es impresionante ver como cada una de las promesas hechas hace años por la misión *Gaia* se van cumpliendo en cada nueva publicación de datos, constituyendo el catálogo que será (y ya está siendo) la base de la astrofísica en las próximas décadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M.A. et al 2021, *Neural Computing and Applications* 34, 1993-2006 (2021).
- Carrasco et al. 2021, "Internal calibration of *Gaia* BP/RP low-resolution spectra", *A&A* 652, A86, 20.
- Delchambre et al. 2022, "Gaia Data Release 3. Apsis. III. Non-stellar content and source classification", *A&A* (in press), arXiv:2206.06710
- Gaia Collaboration, Creevey, O.L. et al 2022, "Gaia Data Release 3: Astrophysical parameters inference system (Apsis) I: methods and content overview", *A&A* (in press), arXiv:2206.05864
- De Angeli et al. 2022. "Gaia Data Release 3: Processing and validation of BP/RP low-resolution spectral data", *A&A* (in press), arXiv:2206.06143
- Gaia Collaboration, Vallenari, A. et al 2022, "Gaia Data Release 3. Summary of the content and survey properties", *A&A* (in press), arXiv:2208.00211
- Weiler et al. 2022, *A&A* (in press), arXiv:2211.06946



Los autores de este artículo.