

# *Gaia*: la revolució del segle XXI a l'astronomia

Discurs de presentació de Carme Jordi i Nebot  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 3 de juliol de 2023



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA



*Gaia*: la revolució  
del segle XXI a l'astronomia



# *Gaia*: la revolució del segle XXI a l'astronomia

Discurs de presentació de Carme Jordi i Nebot  
com a membre numerària de la Secció de Ciències  
i Tecnologia, llegit el dia 3 de juliol de 2023

Barcelona, 2023



Institut  
d'Estudis  
Catalans

SECCIÓ  
DE CIÈNCIES  
I TECNOLOGIA

**Jordi i Nebot, Carme, autor**

Gaia: la revolució del segle XXI a l'astronomia. — Primera edició

Referències bibliogràfiques

ISBN 9788499657158

I. Institut d'Estudis Catalans. Secció de Ciències i Tecnologia. II. Títol

1. GAIA (Satèl·lit artificial) 2. Astrometria 3. Fotometria astronòmica.

4. Espectroscòpia astronòmica.

629.783

521.9

520.82

520.35

© Carme Jordi i Nebot

© 2023, Institut d'Estudis Catalans, per a aquesta edició

Carrer del Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: juny de 2023

Text revisat lingüísticament per la Unitat d'Edició del Servei Editorial de l'IEC

Disseny de la coberta: Azcunce | Ventura

Imatge de la coberta: El centre de la Via Làctia, amb els seus núvols de gas i pols, brilla en el cel del desert xilè. A la part inferior de la imatge podem distingir Júpiter. Fotografia d'Eduard Masana.

Compost per fotocomposició gama, s. l.

Imprès a Service Point FMI, SA

ISBN: 978-84-9965-715-8

Dipòsit Legal: B 11527-2023

DOI: 10.2436/10.2000.76.1



Aquesta obra és d'ús lliure, però està sotmesa a les condicions de la llicència pública de Creative Commons. Es pot reproduir, distribuir i comunicar l'obra sempre que se'n reconegui l'autoria i l'entitat que la publica i no se'n faci un ús comercial ni cap obra derivada. Es pot trobar una còpia completa dels termes d'aquesta llicència a l'adreça: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>.

## INTRODUCCIÓ

Diuen que l'astronomia és la ciència més antiga de la humanitat. La sola visió dels cels estelats planteja preguntes, com ara: què són els planetes?, què són les estrelles?, per què lluen?, fins on s'estenen?, hi ha altres terres al voltant d'altres sols?, què és l'Univers?, és finit?, és etern?, és immutable?, si no ho és, com es va formar?, quan?, com serà en el futur? Aquestes preguntes van fer que descriure i interpretar allò que es veu en els cels estelats fos un dels exercicis científics més primerencs dels humans. Avui en dia hem respost algunes d'aquestes preguntes i n'han sorgit moltes més. La formació i evolució de l'Univers i els seus components són el subjecte d'estudi de l'astronomia en el sentit més ampli del terme.

L'astronomia és diferent d'altres ciències en què els experiments als laboratoris poden permetre elaborar, corroborar o descartar teories. No és una ciència experimental pròpiament dita, sinó observacional. Els astrònoms som actors passius de l'Univers. Aquí a la Terra, esperem pacients que la informació ens arribi en forma de radiació electromagnètica, d'ones gravitacionals, de partícules còsmiques, de meteorits, etc. Encara no podem anar a les estrelles i observar-les *in situ*, no podem fer córrer el temps endavant o enrere per experimentar l'evolució. Però, tot i així, l'acumulació de coneixement durant mil·lennis i la millora de la instrumentació han permès dibuixar la concepció actual de l'Univers. Espremem al màxim la informació que ens n'arriba.

Al Renaixement, Nicolau Copèrnic, Galileu, Tycho Brahe, Johannes Kepler i Isaac Newton, en poc més d'un segle i mig, van capgirar la concepció de l'Univers posant-hi el Sol al centre i no la Terra. Fa tot just un segle, Henrietta S. Leavitt i

Edwin P. Hubble van propiciar el descobriment de l'existència de les galàxies i que la Via Làctia, la galàxia on vivim, només n'és una d'entre milers de milers de milers... de milions. Aquest concepte galàctic i extragalàctic que es va fer evident a les nostres ments fa només un segle no ha parat d'evolucionar. Hem traslladat les preguntes de com són les estrelles, com es formen i com evolucionen, a les galàxies, i ens preguntem com són, com es formen i com evolucionen. Hem après que n'hi ha de molts tipus, que n'hi ha de moltes mides, que molt sovint interaccionen, es barregen i canvien de forma. Les galàxies com la nostra es formen per unions successives de galàxies més menudes. Quantes barreges han ocorregut?, quantes n'ocorren actualment?, hi haurà barreges en un futur?, com i quan s'han format les seves estrelles?, i els planetes? Tenim grans preguntes per respondre.

Molt sovint, la revolució conceptual i la revolució en les capacitats instrumentals transcorren en paral·lel. La utilització del telescopi a principis del segle XVII per part de Galileu va descobrir-nos les fases de Venus, les llunes de Júpiter, les taques del Sol, els cràters de la Lluna i milers d'estrelles invisibles a ull nu. La fotografia, a mitjan segle XIX, va permetre l'enregistrament d'imatges i l'observació d'objectes dèbils. La radioastronomia, als anys trenta del segle passat, va oferir-nos una visió de l'Univers invisible als nostres ulls. Les ones gravitacionals, aquest segle, han permès detectar les deformacions de l'espai-temps.

En aquest context, he triat el subjecte del meu discurs: la missió espacial *Gaia*, actualment en funcionament i que està revolucionant tots els camps de l'astronomia i que ja ha batut tots els rècords de l'Agència Espacial Europea (ESA, de l'anglès European Space Agency) en termes de producció científica. És la missió més emblemàtica de l'ESA. Un projecte revolucionari des del punt de vista de la tecnologia, revolucionari des del punt de vista de les dades que està proporcionant per quantitat i qualitat, i revolucionari des del punt de vista de la ciència per oferir una altra manera de veure les estrelles i la nostra galàxia. Una missió exclusivament europea, en la qual la contribució d'astrònoms i enginyers a Catalunya té un paper molt rellevant des dels seus inicis, a finals de la dècada dels noranta del segle passat, i en la qual jo estic involucrada des de llavors.

## **LA MISSIÓ ESPACIAL GAIA**

La motivació principal de la missió espacial *Gaia* és entendre la nostra galàxia, tant la seva estructura com la seva formació i evolució. És el que anomenem *arqueologia galàctica*. Aquesta arqueologia de la Galàxia només es pot fer estudiant els seus components: principalment estrelles, gas, pols i matèria fosca. Necessitem conèixer com estan distribuïts, com es mouen, com són i quina edat i quina composició química tenen. Relacionant aquestes propietats entre si podem identificar orígens comuns a les estrelles, establir l'estructura tridimensional de la Galàxia,



estimar el potencial gravitatori i la massa involucrada o identificar moviments ocasionats per pertorbacions en el moment de les barreges, entre moltes altres aplicacions.

La nostra galàxia és una galàxia espiral barrada (figura 1, esquerra). Al centre hi ha un forat negre supermassiu d'aproximadament 4 milions de vegades la massa del Sol. La major part de les estrelles, el gas i la pols se situen en un disc lleugerament ondulat, amb les estrelles més joves a les zones dels braços espirals. Tot plegat està envoltat d'un halo d'estrelles velles immers en un halo de matèria fosca. El Sol és en el disc i a, aproximadament, 26.000 anys llum del centre. No podem estudiar totes les estrelles de la Galàxia, però podem estudiar com més estrelles millor, com més lluny millor, en totes direccions, en el disc i a l'halo. Això ens proporciona una visió representativa de totes les parts de la Galàxia. Per tant, *Gaia* té com a objectiu construir el mapa tridimensional més gran i més precís de la Galàxia fet fins ara i complementar-lo amb les velocitats en tres dimensions i tantes propietats físiques dels objectes com es pugui.

Per mesurar les posicions i els moviments en l'esfera celeste de les estrelles més allunyades, es necessiten precisions de poques desenes de microsegons d'arc ( $\mu\text{s}$ )<sup>1</sup> (figura 1, dreta). La missió *Hipparcos*, també de l'ESA, va ser la primera missió espacial dedicada a l'astrometria, que és la tècnica que mesura les direccions d'arribada de la radiació electromagnètica emesa pels objectes celestes. *Hipparcos* va mesurar paral·laxis amb precisions de mil·lèsimes de segon d'arc per a 120.000 estrelles. En el seu moment, va ser un projecte innovador. La precisió en les mesures havia anat millorant aproximadament 1 ordre de magnitud cada segle i, de cop, *Hipparcos* va millorar les precisions 2 ordres de magnitud, alhora que augmentava el nombre d'estrelles per un factor de 15. Amb *Gaia* hem volgut fer un pas més enllà: quasi 2.000 milions d'estrelles amb precisions de 15  $\mu\text{s}$  a magnitud<sup>2</sup> 15. Per tant, *Gaia* fa un salt d'un altre factor de 100 en la millora de les precisions i un factor de 15.000 en el nombre d'estrelles. Si amb *Hipparcos* podíem distingir una persona caminant per la Lluna vista des de la Terra, amb *Gaia* podem veure'n els ulls i apreciar com li creixen els cabells dia a dia. Si *Hipparcos* només podia observar estrelles a l'entorn solar, *Gaia* pot observar estrelles dels confins de la Galàxia i més enllà, a les galàxies satèl·lits de la nostra, i fins i tot galàxies llunyanes.

1. 1 grau conté 60 minuts d'arc, cadascun de 60 segons d'arc. Un microsegon d'arc és una milio-nèsima part de segon d'arc.

2. La magnitud és una mesura del flux d'energia que rebem d'un objecte celeste. Magnitud =  $-2,5 \log_{10} \text{flux} + \text{constant}$ , on la constant és arbitrària. Molt sovint s'adopta l'estrella Vega com a punt zero de l'escala de magnituds, i llavors la constant =  $2,5 \log_{10} \text{flux}_{\text{Vega}}$ . Les estrelles més dèbils a simple vista tenen magnitud 6; el límit que *Gaia* pot apercebre és magnitud 20,7, que és 750.000 vegades més dèbil que l'ull nu.

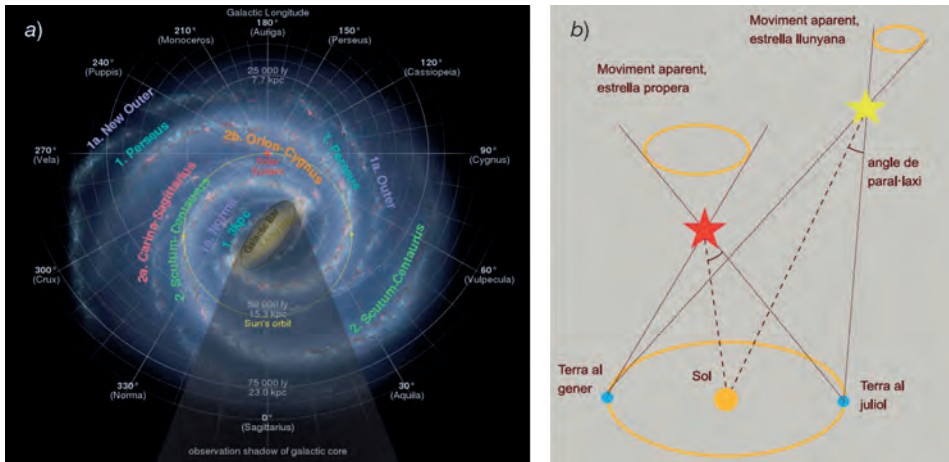


FIGURA 1. Esquerra: representació artística de la Galàxia vista de front. Es tracta d'una galàxia espiral barrada. Dreta: el moviment de la Terra al voltant del baricentre del Sistema Solar al llarg de l'any provoca un canvi de perspectiva i un moviment aparent de les estrelles, que descriuen petites el·lipses de semieixos més petits com més llunyanes són les estrelles. L'angle de la paral·laxi té valors de 140  $\mu$ s en la direcció de l'anticentre galàctic i de 50  $\mu$ s cap a l'extrem de l'halo vistos des del Sistema Solar.

FONT: Esquerra: NASA/JPL-CALTECH/ESO/R (2011), «Artist's impression of the Milky Way», a *Wikipedia* (en línia), <[https://en.wikipedia.org/wiki/Milky\\_Way#/media/File:Milky\\_Way\\_Arms\\_ssc2008-10.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way#/media/File:Milky_Way_Arms_ssc2008-10.svg)> (consulta: 1 maig 2023). Dreta: L. BALAGUER, J. M. CARRASCO, C. FABRICIUS, F. FIGUERAS, N. GARRALDA, C. JORDI, X. LURI, E. MASANA, S. OLARTE, S. ROCA, M. ROMERO i J. TORRA (2013), «Paral·laxi», a *Mil milions d'ulls per a mil milions d'estrelles* (en línia), exposició, panell 3, <<https://serviastro.ub.edu/materials/exposicions/mil-milions-dulls-a-mil-milions-destrelles>> (consulta: 1 maig 2023).

Com qualsevol altra missió espacial, la preparació va ser llarga. Les primeres idees van sorgir a finals dels anys noranta arran de l'èxit de la missió *Hipparcos*. Ràpidament es va plantejar un salt ambiciós: multiplicar el nombre d'estrelles per un factor de 15.000, arribar als límits de la Galàxia, augmentar la precisió per un factor de 70 i complementar l'astrometria amb la fotometria i l'espectroscòpia per obtenir simultàniament les propietats físiques dels objectes observats. Diversos equips de científics, d'enginyers i de la indústria van elaborar un disseny preliminar compacte, estable mecànicament i tèrmica, que podia dur a terme els reptes científics plantejats. L'ESA va aprovar el concepte de missió a finals del 2000 i va encomanar la coordinació de la construcció a l'empresa EADS Astrium,<sup>3</sup> ara ano-

3. La construcció es va distribuir entre diverses empreses, principalment europees, segons la seva expertesa. Les indústries espanyoles involucrades van ser Crisa, GMV, l'Institut Nacional de Tècnica Aeroespacial (INTA), Mier, Rymosa Espacio, Sener i Tedae.

menada Airbus Defence and Space. No cal dir que la mateixa construcció i també les retallades de pressupost van implicar modificacions en el disseny, però mai no van comprometre l'objectiu del projecte. L'equip de Barcelona ha estat involucrat en totes les fases del desenvolupament de la missió, especialment liderant el disseny de l'instrument fotomètric i les simulacions en les etapes més inicials, els primers prototips de processament de dades un cop la missió ja estava aprovada i supervisant el desenvolupament industrial en tota l'etapa de disseny i construcció.

Finalment, el llançament va ser al desembre de 2013 des de Kourou, a la Guaiana Francesa, amb un llançador *Soyuz*.<sup>4</sup> Va ser un èxit, el desplegament del para-sol amb els panells solars va ocórrer durant el viatge, el satèl·lit va arribar al punt L2 i, des de llavors, està observant sense entrebancs. En l'etapa actual d'operacions del satèl·lit i processament de dades, el grup de Barcelona contribueix en el monitoratge del comportament del satèl·lit i el processament i la publicació de dades (vegeu la secció següent).

## EL MODE D'OPERACIÓ DE GAIA

*Gaia* (*Gaia* Collaboration, Prusti *et al.*, 2016) es va llançar a l'espai el desembre de 2013 i va viatjar fins al punt de Lagrange L2 del sistema Sol-Terra, a 1,5 milions de quilòmetres en la direcció oposada al Sol. Després d'un període de posada a punt, estabilització i comprovació dels diferents subsistemes, les observacions científiques van començar al juliol de 2014. La missió nominal de 5 anys va finalitzar al juliol de 2019. Vist l'èxit de la missió, l'ESA va estendre les operacions, primer fins a finals de 2020, després fins a finals de 2022, i ara, fins al 2025, data en què es preveu l'exhauriment del combustible que permet el control del satèl·lit.

El satèl·lit gira sobre si mateix amb un període de 6 hores, precessiona entorn de la direcció Terra-Sol en 63 dies i gira entorn del Sol en 1 any. La combinació dels tres moviments li permet observar el cel sencer en 6 mesos. El control de l'actitud del satèl·lit és un dels punts clau de la missió. Per a això està equipat amb un conjunt de micropropulsors per compensar impactes de meteoroides. L'energia per al funcionament de l'electrònica prové de panells solars instal·lats en el gran para-sol de 10,2 m de diàmetre, el qual protegeix els telescopis de la llum directa del Sol i ajuda a proporcionar una temperatura estable a l'interior del satèl·lit d'aproximadament  $-110^{\circ}\text{C}$ .

El satèl·lit té dos telescopis que apunten a dos llocs diferents del cel, separats 106,5 graus. La llum dels objectes celestes es reflecteix en sis miralls per cobrir la distància focal de 35 m i arribar al pla focal. L'estructura que suporta els miralls i el pla focal és toroidal i de carbur de silici sinteritzat, molt resistent a deforma-

4. <[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2013/12/Gaia\\_launch\\_replay\\_highlights](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2013/12/Gaia_launch_replay_highlights)>.

cions per canvis tèrmics, perquè l'estabilitat mecànica i tèrmica (de l'ordre de mil·ligraus) és un requeriment essencial de la missió. La base dels miralls també és de carbur de silici sinteritzat i el revestiment reflectant és de plata. Els dos miralls principals són rectangulars, d'1,45 m × 0,54 m. Si imaginéssim que aquests miralls tinguessin la mida de l'oceà Atlàntic, qualsevol rugositat de la seva superfície seria de l'ordre de pocs centímetres.

El pla focal conté 106 càmeres digitals organitzades en sectors, cadascun amb una funció específica (figura 2). El conjunt de les càmeres aporta 1 gigapíxel, la càmera més gran que s'ha llançat a l'espai. Les dues primeres columnes de xips (sector *a* a la figura 2) veuen cadascuna d'elles les estrelles observades per un sol telescopi, mentre que a la resta de les càmeres hi ha la superposició de les estrelles dels dos telescopis. S'identifiquen els objectes d'aparença puntual (presumiblement, estrelles)<sup>5</sup> i se'n fa el seguiment als xips següents. Només s'emmagatzema i s'envia a la Terra una petita imatge centrada en l'objecte quan passa per les columnes 3-11 (sector *b* a la figura 2), de la qual s'obté la posició i el nombre de fotons que ens arriben de l'objecte. Quan passa per les dues columnes següents (sector *c* a la figura 2), la llum ha travessat, a més, dos prismes que filtren la llum blava i vermella i la dispersen per obtenir espectres de baixa resolució. La distribució de la radiació electromagnètica en aquests dos espectres ens permet de classificar els objectes en estrelles, galàxies, quàsars i cossos del Sistema Solar, i determinar-ne les propietats físiques, com ara les temperatures, les gravitats superficials, les edats i el grau d'enrogiment de la llum pel medi interestel·lar. Sobre dels darrers xips (sector *d* a la figura 2), se situa un espectrògraf que ens permet l'obtenció d'espectres de resolució mitjana per a les estrelles brillants i el voltant del triplet infraroig del calci. Amb això podem determinar el desplaçament Doppler de les línies dels espectres i, per tant, la velocitat d'apropament o allunyament de les estrelles o galàxies respecte del baricentre del Sistema Solar. A més, a partir de la intensitat de les línies, podem determinar-ne els paràmetres físics i les abundàncies de diversos elements químics.

Amb el seu moviment continu, *Gaia* observa a un ritme mitjà de 70 milions d'objectes cada dia, uns 60 GB de dades científiques diàries, i ha acumulat fins ara 227.000 milions d'observacions individuals, o 120.000 GB. La repetició de les observacions permet calcular els canvis en les posicions (i, per tant, els moviments en la volta celeste), canvis en les brillantor i en els espectres de radiació.

Les dades s'emmagatzemen a bord fins que s'estableix contacte amb les estacions a Terra (Darmstadt, Alemanya; Nova Núrsia, Austràlia; Malargüe, Argentina).

5. L'objectiu principal de *Gaia* són les estrelles, però en fer-se la selecció a bord només a partir de l'aparença puntual, s'observen també objectes menors del Sistema Solar, galàxies llunyanes i nuclis de galàxies.

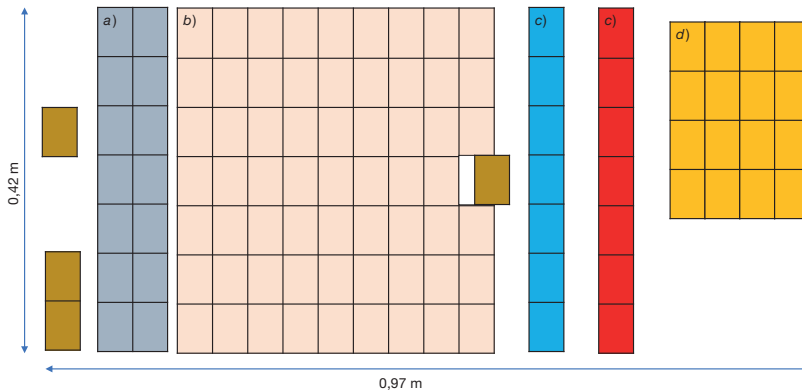


FIGURA 2. Pla focal de *Gaia*, amb 106 càmeres digitals. El sector *a* està destinat a la detecció; el sector *b*, a l'astrometria; el sector *c*, a l'espectroscòpia de baixa resolució, i el sector *d*, a l'espectroscòpia de mitjana resolució.

FONT: Elaboració pròpia.

Llavors les dades es descarreguen i se centralitzen al Centre Europeu d'Astronomia Espacial (ESAC, de l'anglès European Space Astronomy Centre), el centre d'ESA a Villafranca del Castillo (Madrid). L'ens encarregat del processament de les dades i la publicació dels arxius és el Consorci de Processament i Anàlisi de Dades (DPAC, del seu nom en anglès Data Processing and Analysis Consortium). El Consorci està format per nou unitats, cadascuna amb tasques específiques, i engloba sis centres de supercomputació i, aproximadament, quatre-centes cinquanta persones, majoritàriament a Europa. El grup de l'Institut de Ciències del Cosmos de la Universitat de Barcelona i l'Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, amb unes vint-i-cinc persones, participa en tres d'aquestes unitats (simulacions, calibratge de la fotometria i tractament inicial de les dades abans d'entrar a tota la cadena de processament), en lidera una altra (la de la validació de les dades i confecció de l'arxiu) i executa part del processament de dades en el supercomputador MareNostrum del Centre de Supercomputació de Barcelona (BSC, de l'anglès Barcelona Supercomputing Center). En conjunt, el grup de Barcelona representa aproximadament un 8 % del total del DPAC.

## ELS ARXIUS DE DADES

De les dades brutes que *Gaia* proporciona, en podem extreure informació bàsicament de tres tipus: *a)* d'astrometria, que, com hem dit, es refereix a la determinació de la direcció d'arribada dels fotons provinents dels objectes celestes; *b)* de fotometria, que mesura el nombre de fotons que ens arriben d'un objecte

celeste, i c) d'espectroscòpia, que permet conèixer la distribució espectral d'energia dels fotons que ens arriben. Tot plegat ens permet determinar la posició, la brillantor i l'espectre de l'objecte a l'instant de l'observació. L'observació repetida d'un mateix objecte en diversos instants permet determinar el moviment de l'objecte respecte de l'observador (figura 3), la paral·laxi (figura 1, dreta), si està aïllat o té algun company o més —ja sigui una altra estrella o un planeta—, de

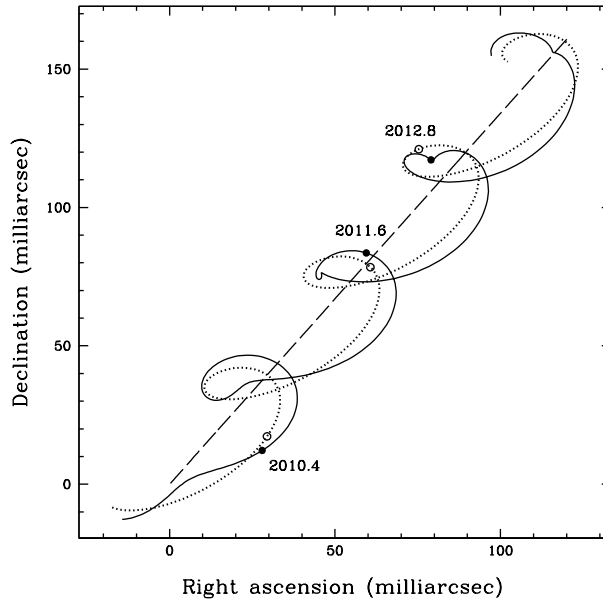


FIGURA 3. Canvi en la posició d'un objecte a la volta celeste. La línia discontinua correspon al moviment propi de l'objecte, la línia de punts combina el moviment propi de l'objecte i el moviment anual de la Terra al voltant del Sol, i la línia sòlida afegeix a més l'efecte provocat per la presència d'un company. En aquest cas es tracta d'una estrella a 163 anys llum del baricentre del Sistema Solar. L'estrella té un moviment propi de 50 mil·lèsimes de segon d'arc per any, i el company és un planeta 15 vegades la massa de Júpiter en una òrbita el·líptica amb un semieix 0,6 vegades la distància Terra-Sol i una excentricitat de 0,2. L'efecte del planeta està magnificat un factor de 30.

FONT: M. A. C. PERRYMAN (2000), «Extra-solar planets», *Reports on Progress in Physics*, vol. 63, núm. 8, p. 1209-1272, també disponible en línia a <<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0005602.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

quin tipus d'objecte es tracta i quines són les seves propietats físiques o si hi ha deformació de la trajectòria dels fotons per presència d'una lent gravitatòria. La informació repetida de la fotometria i els espectres ens permet de detectar variabilitats, ja siguin intrínseques dels objectes (estrelles en fases d'instabilitat, presència de taques a la superfície, morfologia de la superfície d'un asteroide, etc.) o extrínseques (per pertinença a sistemes múltiples, presència de lents gravitatòries, etc.).

Mai no havíem tingut tanta diversitat d'informació simultània i homogènia per a un conjunt tan gran d'objectes. Per això, tot i que les precisions actuals no són les nominals del disseny, no esperem a acabar la missió per publicar les dades, sinó que ja s'han fet públics arxius amb dades intermèdies: DR1 al setembre de 2016 a partir de les observacions dels primers 14 mesos (*Gaia* Collaboration, Brown *et al.*, 2016), DR2 a l'abril de 2018 a partir les observacions dels primers 22 mesos (*Gaia* Collaboration, Brown *et al.*, 2018), EDR3 al desembre de 2020, amb l'astrometria i fotometria a partir de les observacions dels primers 34 mesos (*Gaia* Collaboration, Brown *et al.*, 2021), i DR3 al juny de 2022 afegint-hi espectroscòpia, classificació, variabilitat, objectes del Sistema Solar i multitud de tipologia de dades (*Gaia* Collaboration, Vallenari *et al.*, en premsa), cada arxiu amb més tipologia de dades i amb més precisió que l'anterior pel fet d'augmentar el període d'observacions cobert i la complexitat del processament i calibratge. El proper arxiu no es preveu abans de finals del 2025, amb els 5 primers anys de missió, i el darrer arxiu, amb els 10 anys d'observacions, cap al 2030.

La taula 1 mostra el contingut dels arxius publicats fins al 2022, en què s'aprecia l'increment en nombre d'objectes, amb un augment de la tipologia d'objectes i de la tipologia de dades.

## ALGUNS RESULTATS

Les dades es fan públiques a tota la comunitat científica arreu del món al mateix moment i, gràcies a la seva expansió geogràfica i temàtica, tenen una diversitat d'aplicacions tan àmplia. El DPAC no té cap prioritat en l'anàlisi científica, però sí que fa unes primeres anàlisis per validar que la qualitat dels resultats i la capacitat per extreure'n conclusions científiques són les esperades. A partir d'aquí, les dades són obertes a tota la comunitat i cadascú tria l'objectiu científic i els mètodes d'anàlisi i interpretació. Fins al moment d'escriure aquest discurs, s'han publicat més de 8.700 articles en revistes científiques que usen les dades de *Gaia* o que descriuen les dades obtingudes. És impossible fer una revisió de tots els temes tractats i tots els resultats obtinguts, així que, a continuació, he fet una selecció subjectiva de temes en els quals jo mateixa he estat involucrada o que em semblen més rellevants.

TAULA 1  
Contingut dels arxius de Gaia publicats (2016, 2018, 2020 i 2022)

Total number of sources	# sources in Gaia DR3	# sources in Gaia DR2	# sources in Gaia DR1
	<b>1,811,709,771</b>	<b>1,692,919,135</b>	<b>1,142,679,769</b>
	Gaia Early Data Release 3		
Number of sources with full astrometry	1,467,744,818	1,331,909,727	2,057,050
Number of 5-parameter sources	585,416,709		
Number of 6-parameter sources	882,328,109		
Number of 2-parameter sources	343,964,953	361,009,408	1,140,622,719
Gaia-CRF sources	1,614,173	556,869	2191
Sources with mean G magnitude	1,806,254,432	1,692,919,135	1,142,679,769
Sources with mean G <sub>BP</sub> -band photometry	1,542,033,472	1,381,964,755	-
Sources with mean G <sub>RP</sub> -band photometry	1,554,997,939	1,383,551,713	-
	New in Gaia Data Release 3		
Sources with radial velocities	33,812,183	7,224,631	-
Sources with mean G <sub>BP</sub> -band magnitudes	32,232,187	-	-
Sources with rotational velocities	3,524,677	-	-
Mean BP/RP spectra	219,197,643	-	-
Mean RVS spectra	999,645	-	-
Variable-source analysis	10,509,536	550,737	3,194
Variability types (supervised machine learning)	24	6	2
Supervised machine-learning classification for variables	9,976,881	390,449	3,194
Specific Object Studies – Cepheids	15,021	9,575	599
Specific Object Studies – Compact companions	6,306	-	-
Specific Object Studies – Eclipsing binaries	2,184,477	-	-
Specific Object Studies – Long-period variables	1,720,588	89,617	-
Specific Object Studies – Microlensing events	363	-	-
Specific Object Studies – Planetary transits	214	-	-
Specific Object Studies – RR Lyrae stars	271,779	140,784	2,595
Specific Object Studies – Short-timescale variables	471,679	3,018	-
Specific Object Studies – Solar-like rotational modulation variables	474,026	147,535	-
Specific Object Studies – Upper-main-sequence oscillators	54,476	-	-
Specific Object Studies – Active galactic nuclei	872,228	-	-
Photometrically-variable sources with radial-velocity time series	1,898	-	-
Sources with object classifications	1,590,760,469	-	-
Stars with emission-line classifications	57,511	-	-
Sources with astrophysical parameters from BP/RP spectra	470,759,263	161,497,595	-
Sources with astrophysical parameters assuming an unresolved binary	348,711,151	-	-
Sources with spectral types	217,982,837	-	-
Sources with evolutionary parameters (mass and age)	128,611,111	-	-
Hot stars with spectroscopic parameters	2,382,015	-	-
Ultra-cool stars	94,158	-	-
Cool stars with activity index	1,349,499	-	-
Sources with H-alpha emission measurements	235,384,119	-	-
Sources with astrophysical parameters from RVS spectra	5,891,594	-	-
Sources with chemical abundances from RVS spectra (up to 13 species)	2,513,593	-	-
Sources with a diffuse interstellar band (DIB) in their RVS spectrum	472,584	-	-
Non-single stars (astrometric, spectroscopic, eclipsing, orbits, trends)	813,687	-	-
Non-single stars – orbital astrometric solutions	169,227	-	-
Non-single stars – orbital spectroscopic solutions (SB1 / SB2)	186,905	-	-
Non-single stars – eclipsing binaries	87,073	-	-
QSO candidates	6,649,162	-	-
QSO candidates – redshifts	6,375,063	-	-
QSO candidates – host galaxy detected	64,498	-	-
QSO candidates – host galaxy surface brightness profiles	15,867	-	-
Galaxy candidates	4,842,342	-	-
Galaxy candidates – redshifts	1,367,153	-	-
Galaxy candidates – surface brightness profiles	914,837	-	-
Solar system objects	158,152	14,099	-
Solar system objects – epoch astrometry (CGD transits)	23,336,467	-	-
Solar system objects – orbits	154,787	-	-
Solar system objects – average BP/RP reflectance spectra	60,518	-	-
Solar system objects – planetary satellites	31	-	-
All-sky total galactic extinction maps at different spatial resolutions	HEALPix levels 6, 7, 8, and 9	-	-
Gaia Andromeda Photometric Survey (GAPS) with lightcurves for all objects	1,257,319	-	-

FONT: ESA/GAIA/DPAC (2022), *Gaia Data Release 3 (Gaia DR3)*, <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>> (consulta: 10 gener 2023).



## ***Cúmuls estel·lars***

La majoria d'estrelles es formen en el procés de col·lapse i fragmentació de grans núvols de gas molecular fred a causa de la pertorbació provocada per una ona de xoc d'una supernova propera, per una col·lisió entre núvols, pel pas d'un braç espiral o per una barreja de galàxies. Molt sovint, el resultat és un grup d'estrelles lligat gravitatòriament, que es poden distingir de la resta d'estrelles projectades al cel en la mateixa direcció ja estiguin al davant o al darrere, pel seu moviment comú, la seva paral·laxi comuna, la seva edat comuna i la seva composició química comuna, l'originària del núvol de gas del qual s'han format. Aquests cúmuls es van disgregant a poc a poc per efecte del potencial gravitatori galàctic i les seves estrelles passen a formar part de la població estel·lar general del disc. Les dades de *Gaia* han permès de detectar més d'un miler de cúmuls d'estrelles (per exemple, Castro-Ginard *et al.*, 2020 i 2022) i descartar com a cúmul alguns dels que es coneixien fins ara (Cantat-Gaudin i Anders, 2020). Es tractava simplement d'una superposició casual d'estrelles en la direcció de la visió. Hem observat, també, com les forces de marea estan destruint aquests cúmuls, dispersen les seves estrelles i les barregen en el disc (per exemple, Meingast i Alves, 2019). Molt probablement, el Sol va pertànyer a algun d'aquests cúmuls o a algun que ja s'ha desfet completament. El conjunt conegut actualment de cúmuls, més del doble del que es coneixia en l'etapa anterior a *Gaia* (Dias *et al.*, 2002), està permetent estudiar el procés de formació (quantes estrelles neixen de cada massa, quantes estrelles són simples i quantes binàries, com es fragmenten els núvols, la seqüenciació de la formació en generacions...), d'evolució i de desintegració (com es van evaporant les estrelles, com això depèn de l'òrbita del cúmul i la posició en el disc...), i com actua el potencial gravitatori galàctic. Hem esbrinat que aproximadament un 30 % de les estrelles pertanyen a sistemes binaris, que la segregació de masses comença en etapes molt primerenques, que la presència d'estrelles amb línies d'emissió en els espectres decreix amb l'edat, etc. També hem utilitzat els cúmuls joves per traçar l'estructura espiral a l'entorn solar perquè és en els braços on hi ha la formació estel·lar més intensa (figura 4, Castro-Ginard *et al.*, 2022). No hi ha cap dubte que, combinant les dades de *Gaia* amb les dades espectroscòpiques que s'obtidran des de terra en els propers anys amb espectrògrafs com ara WEAVE i 4MOST avançarem de manera molt significativa en la comprensió de com es formen i com es destrueixen els cúmuls.

## ***La col·lisió amb la galàxia nana de Sagitari***

L'existència d'un conjunt estès d'estrelles amb moviment comú a l'altre costat del centre galàctic es va detectar el 1994 (Ibata, Gilmore i Irwin, 1994), es va ano-

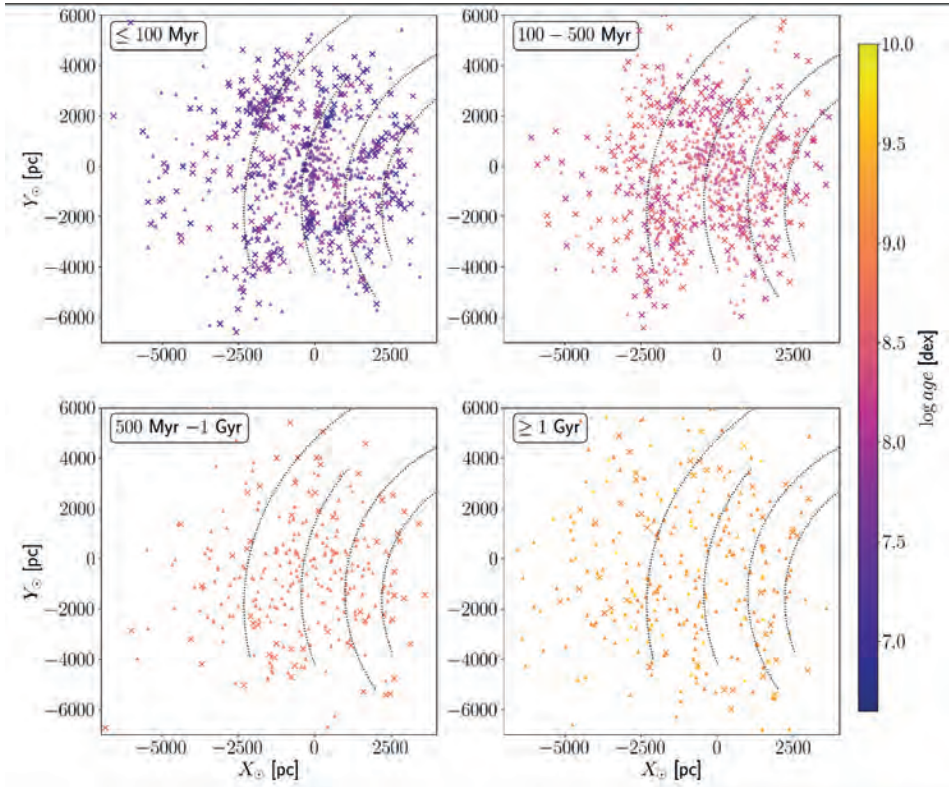


FIGURA 4. Distribució dels cúmuls en el disc galàctic per a quatre rangs d'edat. La posició (0,0) correspon a la posició del Sol. El centre galàctic és a la posició (8500,0). Les distàncies estan expressades en parsecs (pc). 1 pc és equivalent a 3,26 anys llum. Els cúmuls joves tracen l'estructura espiral.

FONT: A. CASTRO-GINARD, C. JORDI, X. LURI, T. CANTAT-GAUDIN, J. M. CARRASCO, L. CASAMIQUELA, F. ANDERS, L. BALAGUER-NÚÑEZ i R. M. BADIA (2022), «Hunting for open clusters in *Gaia* EDR3: 628 new open clusters found with OCfinder», *Astronomy & Astrophysics* (en línia), vol. 661, A118, <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2022/05/aa42568-21.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

menar *galàxia nana de Sagitari* i es va postular que està en procés de destrucció per les forces de marea de la Via Làctia i en procés de barreja. Des de llavors, s'han fet observacions en diferents longituds d'ona i amb diferents brillantor límit, i s'ha confirmat aquesta hipòtesi. Amb *Gaia* s'ha pogut anar encara més enllà.

A partir dels moviments de les estrelles hem pogut calcular l'òrbita de la galàxia nana entorn de la Via Làctia i identificar les estrelles despreses del nucli i que

van quedant escampades en filaments al llarg de l'òrbita (Ramos *et al.*, 2022). La galàxia nana de Sagitari ha creuat la part més externa del nostre disc en tres ocasions (fa aproximadament 1.000, 2.000 i 5.500 milions d'anys). Aquestes interaccions han provocat una alteració de les òrbites de les nostres estrelles talment com si llancéssim una pedra en un estany d'aigües tranquil·les. A mesura que vagi transcorrent el temps, la superfície de l'aigua recuperarà la forma plana, però mentrestant podem observar l'alteració de la forma de la superfície. En el nostre cas, encara ara podem observar les alteracions produïdes a les òrbites de les estrelles de l'entorn solar pel pas de la galàxia de Sagitari fa aproximadament 1.000 milions d'anys (Antoja *et al.*, 2018). L'alteració de les òrbites dels núvols de gas i els canvis en l'estructura espiral provoquen una formació sobtada d'estrelles. A partir de les brillantors i els colors de les estrelles observades per *Gaia* hem pogut deduir les edats i hem apreciat clarament un excés d'estrelles nascudes fa 1.000, 2.000 i 5.500 milions d'anys, que corresponen al pas del nucli de la galàxia pel nostre disc (Ruiz-Lara *et al.*, 2020). Per primera vegada, doncs, hem pogut detectar de manera observacional els efectes sobre les òrbites i el naixement d'estrelles que les teories apuntaven en el cas de barreges de galàxies (figura 5). També s'ha plantejat la hipòtesi que el Sol i el Sistema Solar es podrien haver format com a conseqüència del primer dels creuaments de la galàxia de Sagitari.

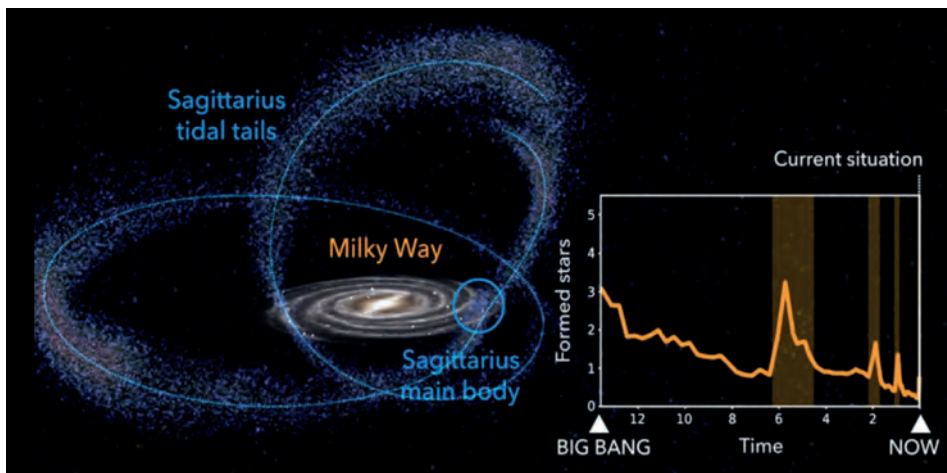


FIGURA 5. Esquema de l'òrbita de la galàxia nana de Sagitari entorn de la Via Làctia, les estrelles escampades al llarg de l'òrbita i els períodes de formació estel·lar sobtada a la Via Làctia.

FONT: Gabriel PÉREZ DÍAZ (Instituto de Astrofísica de Canarias) (2020). Recollida a T. RUIZ LARA, C. GALLART GALLART i E. J. BERNARD, «The role of the Sagittarius dwarf galaxy in the evolution of our Galaxy», a *Instituto de Astrofísica de Canarias* (en línia), <<https://www.iac.es/en/outreach/news/role-sagittarius-dwarf-galaxy-evolution-our-galaxy>> (consulta: 8 maig 2023).

## L'aberració i l'acceleració del Sistema Solar

El moviment del Sol al voltant del centre de la Galàxia es pot assimilar a un corredor en una pista d'atletisme. Si plou sense vent, l'aigua cau verticalment, però al corredor li sembla que la pluja li ve per davant. Quan corre cap a un extrem de la pista, la pluja li ve per davant. Quan gira a la pista i corre cap a un altre costat, li continua venint per davant, com si la pluja estigués canviant de direcció igual que ell canvia de direcció a mesura que corre. En canvi, la pluja cau verticalment i no canvia de direcció per a un espectador en repòs. És el mateix que passa en les observacions celestes. No plouen gotes d'aigua sinó fotons. Per a un espectador quiet, els fotons sempre li arriben en la mateixa direcció si l'objecte no es mou, però cap observador no està quiet. Nosaltres, lligats al Sistema Solar, anem rotant entorn del baricentre del Sistema Solar i aquest ho fa entorn del centre de la Galàxia, i això implica que la direcció dels fotons que ens arriben vagi canviant aparentment de direcció amb el temps. És el fenomen que anomenem *aberració*, explicat per J. Bradley el 1727.

Si ens fixem en els objectes més llunyans, els quàsars, les precisions no ens permeten mesurar els seus moviments propis. Però podem apreciar el canvi de direcció degut al moviment del Sistema Solar en el si de la Via Làctia i calcular l'acceleració del Sistema Solar (figura 6). L'acceleració és tan petita com

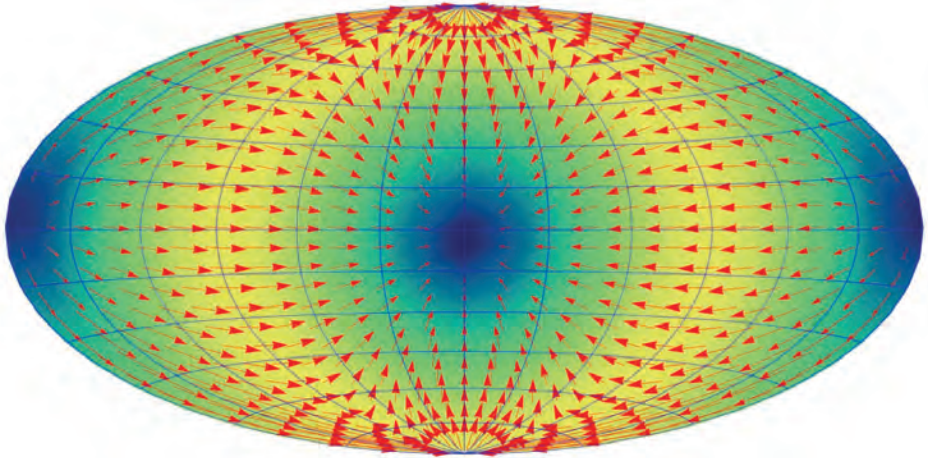


FIGURA 6. Mapa dels moviments propis aparents dels quàsars induïts per la rotació del Sistema Solar entorn del centre de la Galàxia.

FONT: ESA/GAIA/DPAC (2020), *Gaia's measurement of the solar system acceleration with respect to the distant Universe* (en línia), <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-acceleration-solar-system>> (consulta: 1 maig 2023). Sota la llicència CC BY-SA 3.0 IGO.

$(2,32 \pm 0,16) \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ . És molt petita, extremament petita en comparació amb la dels  $9,8 \text{ m/s}^2$  que hi ha a la superfície terrestre. Per fer-nos una idea de la petitesa d'aquesta acceleració: si deixem anar un objecte sobre la superfície de la Terra, durant el primer segon cau 5 m. Si la Terra no estigués orbitant entorn del bari-centre del Sistema Solar, «cauria» 3 mm cap al baricentre el primer segon. Fent el mateix paral·lelisme, el Sistema Solar «cau» cap al centre de la Galàxia només 0,1 nm (*Gaia* Collaboration, Klioner *et al.*, 2021). És la primera vegada que podem mesurar aquesta acceleració en el rang òptic de la llum i adonar-nos que l'acceleració no està dirigida justament cap al centre de la Galàxia sinó uns graus més al sud, molt probablement degut a l'atracció gravitatòria dels Núvols de Magalhães.

### ***La massa de la Galàxia***

La llei de la gravitació universal d'Isaac Newton relaciona la massa de dos cossos, la seva separació i l'acceleració de l'un cap a l'altre. Per tant, la mesura de les acceleracions i les distàncies proporciona les masses. Dit d'una altra manera, les òrbites proporcionen les masses. Per exemple, l'òrbita de la Terra al voltant del Sol ens permet de saber la massa del Sol. L'estudi del moviment de les estrelles del disc al voltant del centre de la Galàxia va desvelar que la massa de les estrelles, el gas i la pols per si sols no poden proporcionar la gravetat exercida perquè les òrbites siguin tal com són. Les òrbites només poden explicar-se amb una gravetat molt més elevada. D'aquí que es va postular l'existència d'una matèria addicional que exerceix aquesta gravetat extra i va rebre el nom de *matèria fosca* (vegeu la revisió de Rubin, 2006).

*Gaia* ha mesurat els moviments d'estrelles en galàxies nanes satèl·lits de la Via Làctia i se n'han deduït les òrbites, i també d'estrelles de cúmuls globulars a la part externa de l'halo galàctic. D'aquí que podem deduir la massa de tota la Via Làctia, inclosa la matèria fosca. El resultat és de  $9,1^{+6,2}_{-2,6} \cdot 10^{11}$  masses solars, quasi  $10^{12}$  masses solars (*Gaia* Collaboration, Helmi *et al.*, 2018). S'estima que la nostra galàxia conté aproximadament  $2 \cdot 10^{11}$  estrelles, que seria una massa de  $2 \cdot 10^{11}$  masses solars si totes fossin com el Sol. La conclusió és que la matèria coneguda (estrelles, planetes, gas i pols) representa només un 20 % de la massa total de la Via Làctia.

### ***Els Núvols de Magalhães***

Els dos Núvols de Magalhães són a l'hemisferi celeste sud i s'aprecien a ull nu com a núvols de llum difusa. Gràcies a la relació entre brillantor i període d'estrelles variables de tipus cefeides als Núvols de Magalhães publicada per Leavitt el 1908 (Leavitt, 1908) i les primeres mesures de paral·laxis de cefeides a la Via

Làctia, es va deduir per primer cop la distància als Núvols. Són, aproximadament, a 160.000 i 200.000 anys llum de distància. Aquesta gran distància va encendre el debat de si formaven part o no de la Via Làctia. Avui en dia tothom reconeix que són galàxies satèl·lits de la nostra.

Tot i la distància, *Gaia* ha estat capaç de mesurar-ne estrelles individuals. Per primera vegada hem delimitat amb precisió la barra central i l'estructura espiral del Gran Núvol, hem mesurat la rotació de les dues galàxies en el pla de visió (figura 7) i la diferència en distribució i moviment d'estrelles joves i estrelles velles. També hem estudiat per primer cop el corrent estel·lar d'estrelles del Petit Núvol cap al Gran Núvol tant per a estrelles joves com velles i les subestructures a les parts més externes dels Núvols (*Gaia* Collaboration, Luri *et al.*, 2021). Tot plegat ens permet de conèixer millor la formació i l'evolució d'aquests dos satèl·lits i la seva interacció amb la Via Làctia.

### ***Abundàncies químiques***

Un dels tresors del tercer arxiu de *Gaia* publicat el 2022 és la inclusió dels resultats de les observacions espectroscòpiques de resolució mitjana amb 33 mi-

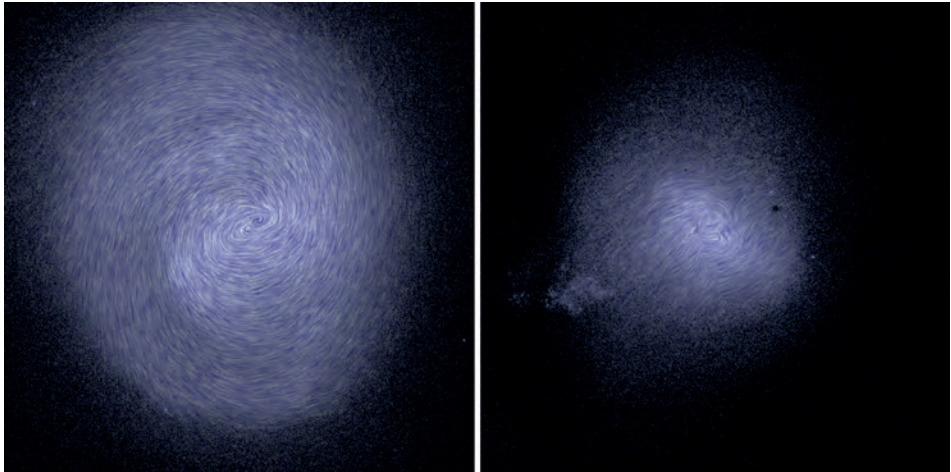


FIGURA 7. Representació del Gran Núvol (esquerra) i del Petit Núvol (dreta) de Magalhães. Els segments de línia indiquen els moviments de les estrelles. S'aprecia perfectament la rotació del Gran Núvol i un moviment més desorganitzat en el Petit Núvol. En el Petit Núvol, a baix a l'esquerra, es pot veure l'inici del pont d'estrelles que flueixen del Petit cap al Gran.

FONT: GAIA COLLABORATION, X. LURI *et al.* (2021), «*Gaia* Early Data Release 3: Structure and properties of the Magellanic Clouds», *Astronomy & Astrophysics* (en línia), vol. 649, A7, <<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2021/05/aa39588-20.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

lions de velocitats radials (determinades pel desplaçament Doppler de les línies en els espectres), 2,5 milions d'abundàncies químiques i 1 milió d'espectres. Això és més del que mai hem tingut al nostre abast en tots els segles d'observacions astronòmiques. Les abundàncies químiques de les atmosferes de les estrelles, que es mesuren a partir de la intensitat de les línies d'absorció en els espectres, donen informació de la composició del núvol de gas a partir del qual les estrelles es van formar. Les abundàncies d'aquest gas depenen de la història passada de formació estel·lar i poden ser diferents en diferents regions de la Galàxia. Així doncs, les dependències de les abundàncies amb les edats de les estrelles i el lloc de formació permeten esbrinar la història de la formació estel·lar o episodis de captura de gas d'altres galàxies que canvia la composició del nostre propi gas. La figura 8 mostra les abundàncies de les estrelles a diferents distàncies del Sol. Per a les estrelles més properes, trobem majoritàriament estrelles al disc prim amb abundàncies molt similars a les del Sol. A mesura que ens anem allunyant, comencen a dominar les estrelles del disc gruixut i l'halo amb estrelles molt més pobres en elements més

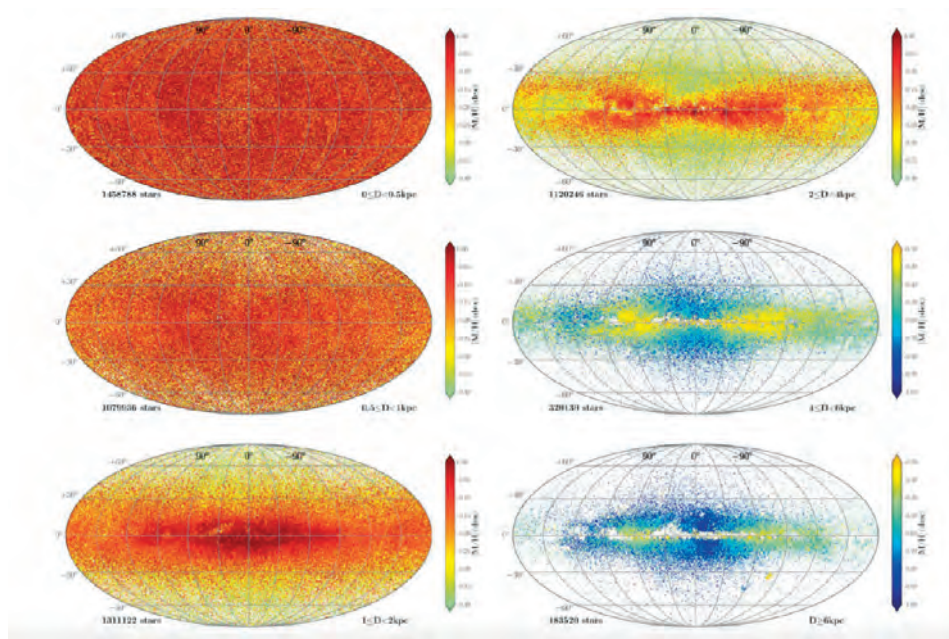


FIGURA 8. Abundàncies químiques de les estrelles de l'entorn solar. Cada panell representa les estrelles en rangs de distància al Sol, amb distància creixent de dalt a baix i d'esquerra a dreta.

FONT: GAIA COLLABORATION, A. RECIO-BLANCO *et al.* (en premsa), «Gaia Data Release 3: Chemical cartography of the Milky Way», *Astronomy & Astrophysics* (en línia), <<https://arxiv.org/pdf/2206.05534.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

pesants que l'heli (*Gaia* Collaboration, Recio-Blanco *et al.*, en premsa). Hem pogut redeterminar el gradient de metal·licitat en funció de la distància al centre amb un decreixement de  $-0,056 \pm 0,007 \text{ dex kpc}^{-1}$  per a baixa latitud i que aquest gradient s'aplana a mesura que ens allunyem verticalment del disc i dominen les estrelles del disc gruixut i l'halo.

També la detecció d'abundàncies anòmales permet identificar estrelles amb origen en altres galàxies amb històries de formació diferents de la nostra. Aquest és el cas, per exemple, de les estrelles de la galàxia menor Gaia-Enceladus, que es va barrejar amb la Via Làctia fa uns 10.000 milions d'anys. No només hem detectat que les òrbites d'aquestes estrelles són òrbites retrògrades, sinó que, a més, hem vist que les abundàncies químiques són diferents de les de la nostra galàxia. Tot indica, doncs, que aquestes estrelles no es van originar a la Via Làctia, són les responsables de la formació del disc gruixut i se situen a la part interna del nostre halo (Helmi *et al.*, 2018). És una mostra més del gran potencial de les dades de *Gaia* per poder combinar diferents tipus d'informació per a uns mateixos objectes, en aquest cas, moviments, edats i composicions químiques.

### ***Estrelles no isolades***

La detecció de companys d'una estrella, ja sigui una altra estrella o bé un planeta, es pot fer amb diverses tècniques. En el cas de *Gaia*, la presència de companys es pot deduir a partir del moviment de les estrelles en el cel (per astrometria), pels canvis de brillantor en cas que el company eclipsi l'estrella durant un període de temps (per fotometria) o pels canvis en la velocitat radial pel moviment de l'estrella entorn del centre de masses del conjunt (per espectroscòpia). En una mostra seleccionada, s'han detectat aproximadament 800.000 estrelles amb companys, entre ells 297 exoplanetes, dels quals 114 no es coneixien amb anterioritat (*Gaia* Collaboration, Arenou *et al.*, en premsa). Entre els companys també s'han detectat casos d'objectes compactes, com ara nanes blanques, estrelles de neutrons i forats negres; tots ells són resultat de la mort d'estrelles. Aquestes deteccions són especialment importants perquè aquests objectes poden ser en un futur originaris d'ones gravitacionals. La figura 9 mostra les deteccions segons el mètode. En el cas de l'astrometria, els components tendeixen a estar ben separats i les òrbites són de període més llarg. En el cas de l'espectroscòpia tendim a detectar companys d'estrelles brillants per les limitacions de les observacions. En el cas dels eclipsis, el sistema compost tendeix a tenir òrbites amb semieixos molt petits i, per tant, períodes curts. Tot i que mai no hem tingut tantes dades de sistemes múltiples, aquests resultats milloraran amb el següent arxiu de dades, quan s'hauran pogut analitzar 5 anys d'observacions i s'haurà avançat en els processos de tractament de dades i d'identificació dels casos d'estrelles no simples.



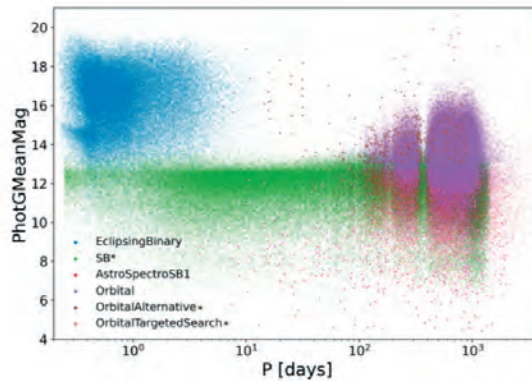


FIGURA 9. Detecció de companys d'estrelles segons els mètodes de detecció. L'eix  $x$  indica el període de l'òrbita relativa i l'eix  $y$ , la magnitud aparent (una mesura de la brillantor) de l'estrella. Diferents mètodes detecten configuracions orbitals diferents.

FONT: GAIA COLLABORATION, F. ARENOU *et al.* (en premsa), «*Gaia* Data Release 3: Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure», *Astronomy & Astrophysics* (en línia), <<https://arxiv.org/pdf/2206.05595.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

## Sistema Solar

Com que *Gaia* observa tot allò que té aparença puntual, també observa cossos menors del Sistema Solar. De les observacions repetides de les seves posicions se'n pot deduir l'òrbita i si té algun satèl·lit; de les observacions fotomètriques repetides se'n pot deduir la forma del cos i el període de rotació, i dels espectres de baixa resolució se'n pot deduir la composició química. El tercer arxiu de *Gaia* inclou òrbites de 156.000 asteroides; les posicions de 31 llunes de Mart, Júpiter, Saturn, Urà i Neptú, i composicions químiques de 60.000 asteroides (*Gaia* Collaboration, Galluccio *et al.*, en premsa). Per primera vegada tenim tantes òrbites d'extrema qualitat i tantes abundàncies que estem posant les bases per als estudis de la formació del Sistema Solar. S'ha pogut observar que hi ha grups d'asteroides amb òrbites i composicions químiques similars entre ells (figura 10), la qual cosa indica un origen comú; inclús podria ser que estiguéssim observant els fragments d'algun cos més gran que es va destruir per col·lisions en el passat.

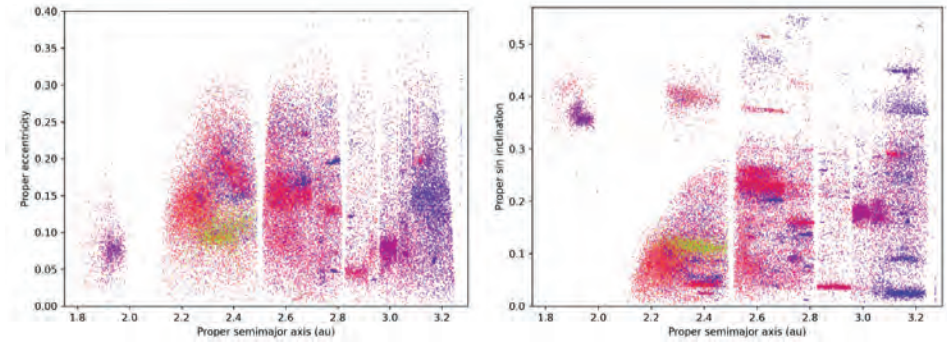


FIGURA 10. Representació de 60.000 asteroides amb abundància química determinada. Els eixos representen les excentricitats, les inclinacions i el semieix major de les òrbites.

FONT: GAIA COLLABORATION, L. GALLUCCIO *et al.* (en premsa), «Gaia Data Release 3: Reflectance spectra of Solar System small bodies», *Astronomy & Astrophysics* (en línia), <<https://arxiv.org/pdf/2206.12174.pdf>> (consulta: 1 maig 2023).

## CONCLUSIONS

La missió *Gaia* és única en molts sentits: única en la diversitat i la quantitat de dades que observa (mitjançant l'astrometria, la fotometria i l'espectroscòpia), única en la precisió de les mesures (amb anterioritat només s'havia arribat a precisions de microsegons d'arc en estudis molt concrets i per a pocs objectes), única en l'aplicació de casos científics (les estrelles, la nostra galàxia, les galàxies externes, el Sistema Solar i la relativitat general), única pel repte tecnològic (estabilitat tèrmica de mil·lèsimes de grau, estabilitat mecànica de l'estructura, precisió en el poliment dels miralls, control de la rotació del satèl·lit, etc.), única pel conjunt de persones involucrades, única per la relació resultats-inversió econòmica, única per la posada a disposició de les dades a tota la comunitat científica sense prioritat per a ningú, ni tan sols per a la comunitat involucrada en el processament de les dades. Aquesta democratització de les dades és una de les revolucions de *Gaia* i permet que la producció de resultats sigui molt més rica i ràpida. L'impacte que està tenint en tots els àmbits de l'astronomia va més enllà del que inicialment s'havia previst, tot i que no es tracta de les dades del final de la missió.

La diversitat i la quantitat de dades simultànies d'un objecte, i especialment la qualitat de l'astrometria, no tenen precedent en la història de la humanitat. Per això *Gaia* és la base de pràcticament tota l'astronomia des que es va fer la publicació del primer arxiu, i ho serà de ben segur en les properes dècades. Per a mi és un orgull haver-hi participat des del començament, haver contribuït al fet que *Gaia* hagi sigut una realitat i continuar-hi treballant perquè els propers arxius acabin de completar la revolució del segle XXI.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ANTOJA, T.; HELMI, A.; ROMERO-GÓMEZ, M.; KATZ, D.; BABUSIAUX, C.; DRIMMEL, R.; EVANS, D. W.; FIGUERAS, F.; POGGIO, E.; REYLÉ, C.; ROBIN, A. C.; SEABROKE, G.; SOUBIRAN, C. (2018). «A dynamically young and perturbed Milky Way disk». *Nature*, vol. 561, p. 360-362.
- BALAGUER, L.; CARRASCO, J. M.; FABRICIUS, C.; FIGUERAS, F.; GARRALDA, N.; JORDI, C.; LURI, X.; MASANA, E.; OLARTE, S.; ROCA, S.; ROMERO, M.; TORRA, J. (2013). «Paral·laxi». A: *Mil milions d'ulls per a mil milions d'estrelles* [en línia]. Exposició, panell 3. <<https://serviastro.ub.edu/materials/exposicions/mil-milions-dulls-a-mil-milions-destrelles>> [Consulta: 1 maig 2023].
- CANTAT-GAUDIN, T.; ANDERS, F. (2020). «Clusters and mirages: Cataloguing stellar aggregates in the Milky Way». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 633, A99.
- CASTRO-GINARD, A.; JORDI, C.; LURI, X.; ÁLVAREZ CID-FUENTES, J.; CASAMIQUELA, L.; ANDERS, F.; CANTAT-GAUDIN, T.; MONGUIÓ, M.; BALAGUER-NÚÑEZ, L.; SOLÀ, S.; BADIA, R. M. (2020). «Hunting for open clusters in *Gaia* DR2: 582 new open clusters in the Galactic disc». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 635, A45.
- CASTRO-GINARD, A.; JORDI, C.; LURI, X.; CANTAT-GAUDIN, T.; CARRASCO, J. M.; CASAMIQUELA, L.; ANDERS, F.; BALAGUER-NÚÑEZ, L.; BADIA, R. M. (2022). «Hunting for open clusters in *Gaia* EDR3: 628 new open clusters found with OCfinder». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 661, A118.
- DIAS, W. S.; ALESSI, B. S.; MOITINHO, A.; LÉPINE, J. R. D. (2002). «New catalogue of optically visible open clusters and candidates». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 389, p. 871-973.
- ESA/GAIA/DPAC (2020). *Gaia's measurement of the solar system acceleration with respect to the distant Universe* [en línia]. <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/edr3-acceleration-solar-system>> [Consulta: 1 maig 2023].
- (2022). *Gaia Data Release 3 (Gaia DR3)* [en línia]. <<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3>> [Consulta: 10 gener 2023].
- GAIA COLLABORATION, ARENOU, F. [*et al.*] (en premsa). «*Gaia* Data Release 3: Stellar multiplicity, a teaser for the hidden treasure». *Astronomy & Astrophysics*.
- GAIA COLLABORATION, BROWN, A. G. A. [*et al.*] (2016). «*Gaia* Data Release 1: Summary of the astrometric, photometric, and survey properties». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, A2.
- (2018). «*Gaia* Data Release 2: Summary of the contents and survey properties». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 616, A1.
- (2021). «*Gaia* Early Data Release 3: Summary of the contents and survey properties». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 649, A1.
- GAIA COLLABORATION, GALLUCCIO, L. [*et al.*] (en premsa). «*Gaia* Data Release 3: Reflectance spectra of Solar System small bodies». *Astronomy & Astrophysics*.
- GAIA COLLABORATION, HELMI, A. [*et al.*] (2018). «*Gaia* Data Release 2: Kinematics of globular clusters and dwarf galaxies around the Milky Way». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 616, A12.
- GAIA COLLABORATION, KLIONER, S. A. [*et al.*] (2021). «*Gaia* Early Data Release 3: Acceleration of the Solar System from *Gaia* astrometry». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 649, A9.

- GAIA COLLABORATION, LURI, X. [*et al.*] (2021). «Gaia Early Data Release 3: Structure and properties of the Magellanic Clouds». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 649, A7.
- GAIA COLLABORATION, PRUSTI, T. [*et al.*] (2016). «The Gaia mission». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, A1.
- GAIA COLLABORATION, RECIO-BLANCO, A. [*et al.*] (en premsa). «Gaia Data Release 3: Chemical cartography of the Milky Way». *Astronomy & Astrophysics*.
- GAIA COLLABORATION, VALLENARI, A. [*et al.*] (en premsa). «Gaia Data Release 3: Summary of the content and survey properties». *Astronomy & Astrophysics*.
- HELMI, A.; BABUSIAUX, C.; KOPPELMAN, H. H.; MASSARI, D.; VELJANOSKI, J.; BROWN, A. G. A. (2018). «The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk». *Nature*, vol. 563, p. 85-88.
- IBATA, R. A.; GILMORE, G.; IRWIN, M. J. (1994). «A dwarf satellite galaxy in Sagittarius». *Nature*, vol. 370, p. 194-196.
- LEAVITT, H. S. (1908). «1777 variables in the Magellanic Clouds». *Annals of Harvard College Observatory*, vol. 60, núm. 4.
- MEINGAST, S.; ALVES, J. (2019). «Extended stellar systems in the solar neighborhood». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 621, L3.
- NASA/JPL-CALTECH/ESO/R (2011). «Artist's impression of the Milky Way». A: *Wikipedia* [en línia]. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Milky\\_Way#/media/File:Milky\\_Way\\_Arms\\_ssc2008-10.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Milky_Way#/media/File:Milky_Way_Arms_ssc2008-10.svg)> [Consulta: 1 maig 2023].
- PERRYMAN, M. A. C. (2000). «Extra-solar planets». *Reports on Progress in Physics*, vol. 63, núm. 8, p. 1209-1272. També disponible en línia a <<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0005602.pdf>> [Consulta: 1 maig 2023].
- RAMOS, P.; ANTOJA, T.; YUAN, Z.; ARENTSEN, A.; ORIA, P.-A.; FAMAËY, B.; IBATA, R.; MATEU, C. E.; CARBALLO-BELLO, J. A. (2022). «The Sagittarius stream in Gaia Early Data Release 3 and the origin of the bifurcations». *Astronomy & Astrophysics*, vol. 666, A64.
- RUBIN, V. (2006). «Seeing dark matter in the Andromeda galaxy». *Physics Today*, vol. 59, núm. 12, p. 8.
- RUIZ-LARA, T.; GALLART, C.; BERNARD, E. J.; CASSISI, S. (2020). «The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the star formation history of the Milky Way». *Nature Astronomy*, vol. 4, p. 965-973.



