

Giovanni Garberoglio

## La scienza di Gaia

**ABSTRACT:** How far are the stars that we see every night? How do they move? *Gaia* is a spacecraft dedicated to astronomical observations that was launched in 2013 to provide accurate answers to these questions and measure astrometric data of at least one billion stars in the Milky Way, the galaxy hosting our Solar System. In this paper we summarize some of the most interesting discoveries, and some unexpected consequences, of the accurate Gaia measurements.

**KEYWORDS:** Gaia (spacecraft), parallax, Milky Way, Arrokoth.

**SOMMARIO:** Quanto sono distanti le stelle che vediamo ogni notte? E come si muovono? *Gaia* è un satellite per osservazioni astronomiche lanciato nel 2013 per rispondere con precisione inaudita a queste questioni e misurare i dati astrometrici di almeno un miliardo di stelle della Via Lattea, la galassia in cui si trova il nostro Sistema Solare. In questa comunicazione riassumiamo alcune delle scoperte più interessanti, e qualche conseguenza inaspettata, delle accurate misurazioni effettuate da Gaia.

**PAROLE CHIAVE:** Gaia (satellite), parallasse, Via Lattea, Arrokoth.

### Introduzione

“Le stelle sono tante, milioni di milioni”. Così recitava una pubblicità della mia infanzia, e la mia mente già scettica da giovane scienziato in erba sospettava che il numero fosse stato messo lì solo per favorire la successiva rima con la marca del prodotto da promuovere.

Crescendo, mi sono dovuto parzialmente ricredere. Anzi, proprio quella canzoncina mi aiuta ora a ricordare quale sia l'ordine di grandezza del nume-

ro di stelle presenti nella nostra galassia: un centinaio di miliardi, ossia un decimo di quanto dichiarato dal motivetto pubblicitario. Per dare un contesto a questa cifra “galattica”, può essere utile ricordare che in una notte senza Luna, e soprattutto senza nubi, il numero di stelle visibili a occhio nudo è solo di qualche migliaio. E il rapporto tra qualche migliaio e cento miliardi è più o meno il rapporto fra il potere d’acquisto di uno stipendio medio e quello di tutti gli stipendi della popolazione non solo Italiana, ma anche di Francia, Germania e Inghilterra messe assieme.

Insomma, le stelle della nostra galassia sono proprio tante.<sup>1</sup>

E come i ventiquattro affezionati lettori di queste mie note avranno già immaginato, tra le prime domande che un qualsiasi astronomo moderno si pone di fronte a tutta questa immensità ci sono sicuramente: “e dove stanno esattamente?”, seguita a ruota da “come si stanno muovendo?” e finendo molto probabilmente con “da quanto tempo sono lì?”.

### *Coordinate stellari*

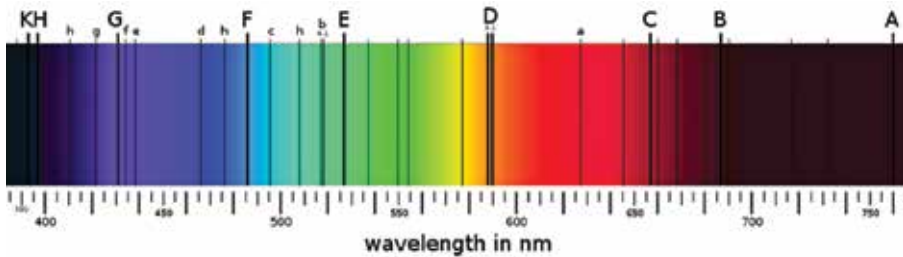
Per quanto riguarda la posizione, è relativamente facile stabilire la posizione delle stelle sulla “sfera celeste”, ovvero l’equivalente stellare della latitudine e longitudine terrestri. La distanza a cui si trovano, invece, è molto più difficile da misurare; la misura delle distanze è *il problema* con cui ogni astronomo si deve confrontare. Fortunatamente, per oggetti relativamente vicini come appunto le stelle della nostra galassia, possiamo usare il metodo della parallasse, che sfrutta la differenza dell’angolo di prospettiva tra due osservazioni quando la Terra è ai lati opposti della sua orbita per valutare la distanza delle stelle (Garberoglio, 2012).

### *Velocità stellari*

Anche la componente della velocità lungo la direzione di osservazione è relativamente “facile” da misurare, grazie all’effetto Doppler ovvero la variazione in frequenza della posizione delle righe dello spettro di assorbimento della luce stellare (Garberoglio, 2016). Ogni atomo può emettere o assorbire luce solo a determinate frequenze (ovvero colori), che sono caratteristiche dell’atomo stesso, un effetto dovuto alla “quantizzazione” delle orbite elettroniche e che fornisce a ogni atomo una “impronta digitale” caratteristica. Nel caso di stelle, gli atomi presenti nella zona più esterna possono venire eccitati dalla luce emessa, che viene poi diffusa in tutte le direzioni. Come conseguenza di questo

---

<sup>1</sup> Oppure io guadagno troppo poco.



1. Lo spettro della luce solare, noto anche spettro di Fraunhofer, dal nome del fisico che lo ha osservato e caratterizzato per primo. [Immagine di pubblico dominio]

fenomeno, la scomposizione della luce stellare attraverso prismi di alta qualità rivela delle zone più scure, corrispondenti appunto alle particolari frequenze di eccitazione-diseccitazione degli atomi. Un esempio lo si può vedere in Figura 1, dove viene mostrato lo spettro della luce solare. L'analisi delle frequenze (o, corrispondentemente, della lunghezza d'onda luminosa, come riportata in figura) permette di riconoscere la presenza di idrogeno (le righe C, F, G), elio (la riga D più a sinistra), sodio (la riga D più a destra), ferro (la riga E), e così via.

Quando una stella si avvicina o si allontana, la frequenza cambia e si sposta, rispettivamente, verso la parte più blu o più rossa dello spettro. Questo fenomeno è l'equivalente luminoso dell'“effetto ambulanza” per cui il suono di una sirena è più acuto quando l'ambulanza si avvicina e più basso quando si allontana. La conoscenza della posizione delle righe per atomi fermi (che si può misurare comodamente in laboratorio), unita al calcolo della dipendenza della variazione in frequenza dalla velocità permette di ricavare dall'osservazione la componente della velocità lungo la linea di vista della stella.

La componente tangenziale della velocità invece è molto, molto più difficile da misurare dal momento che occorre valutare la variazione della parallasse nel tempo; questo spostamento diventa apparente solo con misurazioni estremamente precise ed effettuate in periodi diversi.

### *Età stellari*

E infine l'età: le stelle sono fucine di reazioni termonucleari in cui l'idrogeno e l'elio primordiali vengono fusi per produrre tutti gli altri elementi della tavola periodica (noti in gergo astrofisico come *metalli*, nomenclatura che provoca brividi di orrore a tutti i chimici del pianeta). Durante la loro “vita” le stelle attraversano varie fasi in cui la temperatura e la luminosità variano, e il punto preciso dove si trovano del piano “temperatura-luminosità” (il cosiddetto diagramma di Hertzsprung-Russell, o diagramma HR) cambia di conseguenza. La

posizione nel diagramma HR dipende anche dalla massa iniziale della stella e quindi non è di per sé un indicatore affidabile dell'età, ma per fortuna le stelle non sono quasi mai sole. Le stelle nascono per contrazione gravitazionale di grandi nubi di gas, e questo processo dà generalmente luogo alla nascita "quasi contemporanea" (si parla di centinaia di migliaia di anni) di stelle con masse generalmente diverse tra di loro (un *cluster* stellare). Riportando sul diagramma i punti corrispondenti a stelle più o meno nate nello stesso periodo, e usando quanto si conosce sull'evoluzione stellare, è possibile dare una stima ragionevolmente precisa dell'età del cluster e quindi delle stelle che lo compongono.

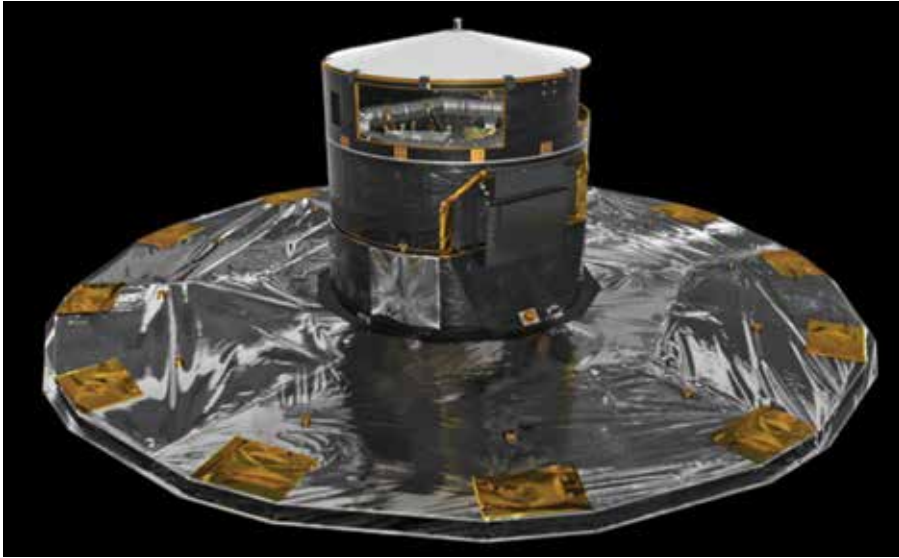
Per poter studiare in dettaglio la posizione delle stelle – e, quindi, la struttura esatta della nostra galassia, oltre che la sua storia – sarebbe auspicabile fare tutte queste misure per più stelle possibile. E in un tempo ragionevole. Ci vuole pertanto un sistema dedicato, possibilmente un satellite, dal momento che l'atmosfera terrestre ha sì il pregio di tenerci in vita, ma presenta fluttuazioni di densità tali da rendere difficile una misura *accurata* della posizione stellare se non con tecnologie avanzate, l'implementazione delle quali è comunque più costosa che non quella dello sviluppo e del lancio di un satellite.

## Gaia

A seguito del successo della missione *Hipparcos* all'inizio degli anni '90, che ha dimostrato la fattibilità di misurare con alta precisione la posizione e velocità delle stelle dallo spazio ottenendo un "bottino" di circa centomila caratterizzazioni, l'Agenzia Spaziale Europea lancia nel 2013 il satellite *Gaia*, con l'obiettivo ambizioso di misurare accuratamente la posizione e velocità di almeno un miliardo di stelle. La missione si propone di determinare la parallasse delle stelle fino a magnitudine<sup>2</sup> 20 con un'accuratezza di circa 10  $\mu$ s (milionesimi di secondo d'arco), che corrisponde alla dimensione angolare di un capello umano posto alla distanza di circa 1000 km. Oppure a quella di un tappo di bottiglia sulla superficie della Luna. Insomma, non importa come lo si giri, l'accuratezza di queste misure non è confrontabile con quello con cui abbiamo a che fare tutti i giorni. Può essere invece utile confrontarle

---

<sup>2</sup> La magnitudine è una misura della luminosità delle stelle così come viste da Terra. Una magnitudine maggiore indica che la stella è meno luminosa (di circa un fattore 2.5 per ogni grado di magnitudine). La stella più luminosa del cielo è Sirio con una magnitudine di -1.47, e l'occhio umano arriva a vedere stelle fino a magnitudine 6. La missione Gaia ha quindi come obiettivo quello di classificare stelle fino a 80000 volte meno luminose di quelle appena visibili.



2. Immagine del satellite Gaia. [Credits: ESA, ATG medialab]

con le più accurate misure di parallasse effettuate da osservatori terrestri, che sono dell'ordine di centesimi di secondo d'arco, mentre il numero di stelle catalogate in questo modo è dell'ordine di un milione.

Gaia parte quindi con l'ambizione di espandere la nostra conoscenza di un fattore di (almeno) mille.

E per fare questo sono necessarie soluzioni tecnologiche all'avanguardia. A iniziare dal primo problema: dove lo andiamo a mettere questo satellite? Non in orbita attorno Terra, così che la presenza del nostro pianeta o quella della Luna non ostruiscano la visuale, ma nemmeno troppo lontano, dal momento che i dati generati dalle osservazioni non possono certo essere elaborati a bordo del satellite e c'è quindi la necessità di una connessione ragionevolmente potente e stabile con i centri di elaborazione dati "qui a casa". La meccanica orbitale fornisce una soluzione quasi obbligata: i punti di Lagrange.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Versione francese del nome di Giuseppe Luigi Lagrangia, matematico e astronomo nato a Torino, "unanimente considerato uno dei maggiori e più influenti matematici europei del XVIII secolo" (secondo l'ineccepibile definizione di Wikipedia). Oltre ad aver sviluppato una formulazione matematica incredibilmente feconda della meccanica Newtoniana, si è dedicato a parecchi studi di astrofisica. La soluzione di un problema assegnato a un suo studente, Urbain Le Verrier, portò alla scoperta del pianeta Nettuno.

Se consideriamo il sistema Terra-Sole si può mostrare che esistono 5 posizioni nello spazio, la cui posizione relativa rispetto alla Terra è fissata, e dove è possibile disporre satelliti in modo che siano “in equilibrio”. L’equilibrio è tecnicamente instabile (come quello di una pallina in cima ad una cupola... basta poco per cascare!), ma è possibile stabilizzarlo con pochissimo uso di carburante. Questo è un aspetto importante per ogni missione spaziale; dal momento che non esistono (ancora) stazioni di rifornimento nel sistema solare è necessario portarsi “da casa” tutto il carburante di cui si avrà bisogno. Il rapporto fra la massa del razzo necessario per portare un satellite fuori dal pozzo gravitazionale terrestre e la massa del satellite stesso è grossomodo uno a cento e questo limita fortemente la massa di quanto può essere lanciato nello spazio. Nel caso di Gaia, il satellite a pieno carico aveva un peso di circa 2 tonnellate ed è stato messo in orbita da un razzo Soyuz-GT dal rispettabile peso al decollo di 300 tonnellate (il 99 per cento del quale dovuto al carburante!). Ma torniamo ai nostri punti di Lagrange: dei 5 disponibili quello scelto per la missione Gaia è il cosiddetto punto L2 che, dista circa 1.5 milioni di km da Terra, nella direzione opposta al Sole, e che è stato raggiunto l’8 gennaio del 2014, dopo circa 3 settimane di viaggio.

Qui Gaia ha iniziato quasi subito le sue osservazioni. Sul satellite sono installati due telescopi, che scrutano il cielo grazie alla rotazione del satellite su se stesso, che impiega circa 6 ore per fare un giro. Oltre a questo l’asse di rotazione non è fisso cambia lentamente direzione, in modo da far sì che il campo visualizzato dai telescopi possa coprire tutto il cielo; questo movimento di precessione è molto più lento e si completa in circa 2 mesi. In questo modo durante il periodo quinquennale della missione, tutto il cielo sarà osservato circa 30 volte. Queste osservazioni multiple sono fondamentali per misurare non solo la parallasse delle stelle (e quindi la loro distanza), ma anche la loro velocità in direzione perpendicolare alla linea di vista.

Nonostante la distanza “astronomica” di L2 (circa 4 volte la distanza della Luna dalla Terra), da questo punto è possibile avere una connessione con la Terra con una larghezza di banda di circa 5 Mbit al secondo (lo stato dell’arte di una connessione internet sul cellulare... di 15 anni fa!) per una media di 8 ore al giorno, che sono sufficienti a perseguire gli obiettivi della missione. Si stima che l’insieme dei dati grezzi che verranno raccolti dal satellite corrispondano a diverse centinaia di hard disk portatili (ovvero, secondo la stima del sito ESA dedicato alla missione, un milione e mezzo di CD-ROM).

Il compito di passare dai dati grezzi a elenchi precisi di parametri astro-metrici per tutti gli oggetti osservati da Gaia è affidato a una struttura creata appositamente, il Consorzio di Analisi ed Elaborazione Dati (Data Proces-

sing and Analysis Consortium, DPAC). È interessante notare come i risultati della missione Gaia, finanziata principalmente dai cittadini della Comunità Europea, siano di pubblico dominio. Il DPAC ha organizzato la pubblicazione dei risultati della missione in tre fasi, noti come Gaia Data Release (GDR). Il primo di questi GDR, rilasciato a settembre del 2016 dopo circa un anno e mezzo di missione, conteneva i dati preliminari relativamente a oltre un miliardo di corpi celesti. Il terzo ed ultimo GDR, il cui rilascio definitivo è previsto per per la prima metà del 2022, conterrà i risultati finali della missione: dati astrometrici di oltre un miliardo e ottocento milioni di oggetti. Una prima tranche è stata pubblicata nel dicembre del 2020 ed è liberamente scaricabile da chiunque abbia interesse a farlo.<sup>4</sup> Le dimensioni di questo database, che contiene i dati di circa un miliardo e mezzo di oggetti, sono anche relativamente modeste: 1.3 TB (meno delle dimensioni di un disco portatile facilmente reperibile in commercio).

Tanto tempo fa, in una galassia vicina vicina

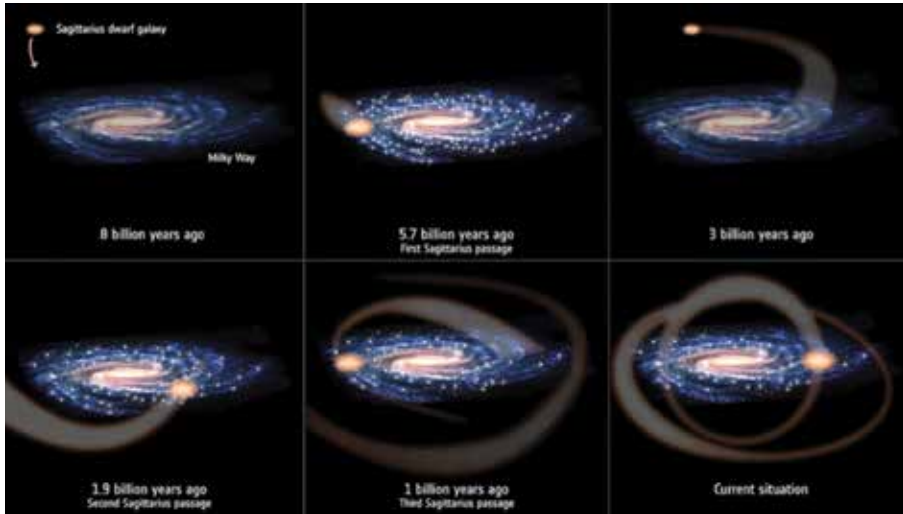
Inutile dire che non appena i dati di Gaia sono stati pubblicati, gli astronomi e gli astrofisici di tutto il mondo si sono sbizzarriti per estrarne informazioni. Al momento in cui scrivo sono riportate in letteratura oltre 4800 pubblicazioni basate sui risultati di Gaia. Molte di queste sono decisamente tecniche (certo, se avete la passione per la modellizzazione del disco di accrescimento della protostella GD 27-MM1 trovate sicuramente pane per i vostri denti (Añez-López et al., 2020)), ma l'analisi del moto di così tante stelle ha contribuito ad aumentare la nostra conoscenza su quella che è la storia della galassia che ci ospita, la Via Lattea.

### *La galassia nana del Sagittario*

Gli astronomi lo sospettavano da tempo, e grazie a Gaia il sospetto è diventato certezza: la nostra galassia ha, nella sua storia miliardaria, “divorato” galassie più piccole appartenenti al nostro gruppo locale. Una di queste è la galassia nana del Sagittario, i cui resti sono ancora oggi visibili nella costellazione omonima. I dati di Gaia hanno permesso di ricostruire con una notevole precisione la storia dell'interazione tra queste due galassie, le cui fasi salienti sono riportate in Figura 3.

---

<sup>4</sup> <https://gea.esac.esa.int/archive/>



3. Storia della collisione tra la galassia nana del Sagittario e la Via Lattea. I periodi corrispondenti a 5.7, 1.9 e 1 miliardo di anni fa, quando la galassia nana del Sagittario è passata nel piano della Via Lattea corrispondono a periodi di aumentata formazione stellare. Il primo di questi passaggi potrebbe aver favorito la formazione del Sole e del nostro sistema solare. [Credits: ESA, <https://sci.esa.int/web/gaia/-/galactic-crash-may-have-triggered-solar-system-formation>]

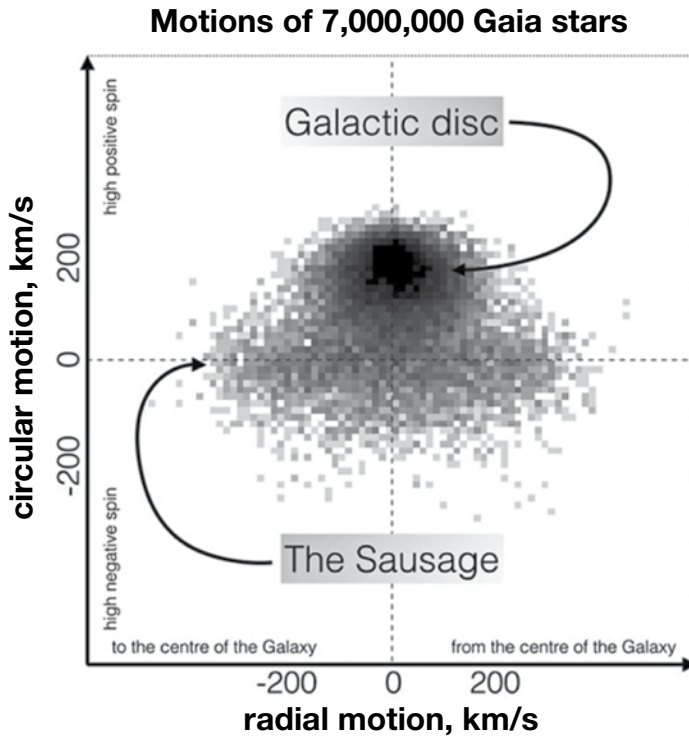
La storia inizia circa 8 miliardi di anni fa, quando la galassia del Sagittario viene catturata dal campo gravitazionale della nostra galassia. Lo “scontro” (anche se forse sarebbe più opportuno parlare di “compenetrazione”) tra le due produce perturbazioni del campo gravitazionale della Via Lattea che hanno come effetto quello di accelerare per un certo periodo la produzione stellare, che raggiunge un massimo intorno a 6 miliardi di anni fa. È altamente probabile che anche il nostro sistema solare (che ha più o meno la stessa età) si sia formato grazie all’influenza della galassia nana del Sagittario.

Successivamente la galassia del Sagittario inizia a ruotare intorno alla Via Lattea, e in un piano perpendicolare ad essa, con due altri “incontri” 2 miliardi e 1 miliardo di anni fa. Le forze di marea generate dalla nostra galassia hanno fatto sì che le due orbite della galassia nana del Sagittario lasciassero dietro di sé due code di stelle. Sebbene queste strutture fosse già state individuate grazie a precedenti campagne osservative, risultano ben visibili nella ricostruzione tridimensionale dei dati di Gaia.



### *La salsiccia di Gaia*

Ma la galassia nana del Sagittario non è stata l'unica vittima della nostra Via Lattea. Resti di una collisione più antica con un'altra galassia che è stata completamente "assorbita" dalla nostra sono evidenti in un grafico che riporti la distribuzione delle velocità radiali e tangenziali delle stelle della nostra galassia, riportata in Figura 2. Questa figura presenta chiaramente una distribuzione bimodale: se da un lato sono molto evidenti quelle stelle che appartengono al disco galattico (la maggioranza), si vede chiaramente un'altra struttura allungata, a cui è stato dato il nome di "salsiccia di Gaia". Simulazioni astrofisiche mostrano che una distribuzione bimodale come questa è



4. La salsiccia (sausage) di Gaia. Il grafico riporta la distribuzione di velocità radiali e tangenziali per 7 milioni di stelle della nostra galassia catalogate da Gaia. La maggior parte delle stelle occupa la zona più scura, corrispondente alla rotazione attorno al centro galattico (velocità tangenziale maggiore di quella radiale). La "salsiccia" invece rappresenta stelle la con un moto radiale generalmente maggiore di quello tangenziale. [Credits: V. Belokurov (Cambridge, UK e CCA, New York, US) e Gaia/ESA, [https://people.ast.cam.ac.uk/~vasily/gaia\\_sausage/info.html](https://people.ast.cam.ac.uk/~vasily/gaia_sausage/info.html)]

la “firma” di un altro “spuntino” fatto dalla Via Lattea a spese di un’altra galassia, circa 10 miliardi di anni fa. Questa malcapitata galassia è stata soprannominata Gaia-Encelado, dal nome di un gigante della mitologia greca, figlio di Gaia (la terra) e Urano (il cielo). Analisi più approfondite hanno rivelato che dentro la “salsiccia” si trovano una dozzina di cluster stellari; si pensa che questi conglomerati di stelle si siano formati all’interno di Gaia-Encelado e il loro numero “relativamente alto” indica che Gaia-Encelado sarebbe stata una galassia di dimensioni ragguardevoli. Alcune stime indicano che la sua massa sarebbe potuta essere anche un quarto della massa della Via Lattea, rendendo la “collisione” di 10 miliardi di anni fa un evento abbastanza drammatico nella storia della nostra galassia.

### *Viaggiatori tra i mondi*

Avendo a disposizione un database così vasto e completo di posizioni e velocità stellari, sembra naturale usarlo per estrarre classifiche e una delle curiosità a cui si può trovare risposta è proprio: quali sono le stelle più veloci della galassia?

Nel rispondere a questa domanda gli astronomi si sono trovati di fronte a una scoperta per certi versi inaspettata: si sono trovate diverse decine di stelle talmente veloci da poter sfuggire all’attrazione gravitazionale della galassia. Grazie alla precisione delle misure di Gaia è possibile “ripercorrere a ritroso” al loro traiettoria, e molte di esse sembrano provenire dal centro della nostra galassia, rendendo molto probabile il fatto che tali velocità siano state ottenute tramite violente interazioni col buco nero supermassiccio al centro della Via Lattea.

Ma cosa ancora più sorprendente, alcune delle stelle più veloci presente nel catalogo di Gaia hanno una velocità diretta *verso* la nostra galassia. Questo ovviamente significa che sono originarie di qualche altro posto: alcune provengono molto probabilmente da una delle Nubi di Magellano (un paio di galassie satelliti della nostra), ma altre potrebbero essere visitatori provenienti da galassie ancora più lontane. Così come le stelle accelerate dal nucleo della nostra galassia potranno forse un giorno raggiungere altri “universi isola”. L’identificazione di stelle “estranee” alla nostra galassia ha attratto l’attenzione dei ricercatori e verranno studiate con molto più dettaglio nel prossimo futuro.

E già che stiamo parlando di intrusi da altri mondi, il catalogo di Gaia ha anche qualcosa da dire a proposito di II/Oumuamua, il primo “turista extrasolare” mai osservato. Nel 2017 i telescopi del consorzio Pan-STARRS, che scrutano i cieli alla ricerca di asteroidi e comete, hanno rivelato un ogget-

to “strano”, proveniente da una direzione perpendicolare a quella del piano dell’eclittica, e con una velocità tale da non essere gravitazionalmente legato al Sole, dati perfettamente compatibili con un’origine estranea al sistema solare. Per la prima volta nella storia dell’astronomia si aveva a che fare con un oggetto extrasolare nelle nostre vicinanze: inutile aggiungere che è stato osservato in qualsiasi modo possibile nei 34 giorni in cui è stato possibile farlo prima che la sua luminosità diventasse troppo debole. ‘Oumuamua (termine hawaiano che significa “messaggero che arriva da lontano”) è risultato essere un oggetto di circa 100 metri di forma oblunga e col colore rossastro che hanno gli oggetti più esterni del sistema solare (si veda ad esempio la figura 4 per un esempio). Le osservazioni hanno evidenziato come fosse soggetto a debolissime accelerazioni “non gravitazionali”, probabilmente dovute all’emissione di gas e che quindi si sia trattato di qualcosa più simile a una cometa che non un asteroide.

Lo studio della traiettoria di ‘Oumuamua ha mostrato come sembrasse provenire dalla direzione della stella Vega, e considerando la sua velocità sarebbe dovuto partire da lì circa 600.000 anni or sono. Data la velocità relativa di Vega rispetto al sistema solare, però, 600000 anni fa Vega non era nella direzione in cui la vediamo ora. Da dove è arrivato ‘Oumuamua dunque? Alcuni astronomi hanno usato i dati di Gaia per rispondere a questa domanda, trovando 4 stelle molto vicine tra loro e con una traiettoria tale per cui è molto probabile che ‘Oumuamua sia provenuto da una di esse, iniziando il suo viaggio tra 1 e 4 milioni di anni or sono (Bailer-Jones et al., 2018).

## Un centro di gravità permanente

Le misure di parallasse stellare (e quindi di distanza) effettuate da Gaia consistono nella misura di un angolo prospettico, cosa che è possibile se si ha qualcosa di molto lontano e “fisso” a cui paragonarsi. Ma se le stelle della nostra galassia si muovono tutte, cos’è questo qualcosa di molto lontano?

Contemporaneamente alla misura dei dati astrometrici delle stelle nella nostra galassia, Gaia ha misurato anche la posizione di circa mezzo milione di quasar. I quasar sono oggetti molto lontani (si parla di *miliardi* di anni luce, laddove le dimensioni della nostra galassia si misurano in decine di migliaia di anni luce e le distanze intergalattiche in decine di milioni di anni luce) e molto luminosi, sia nella banda ottica che in quella radio. L’unico processo astrofisico noto che renda ragione dell’enorme energia emessa dai quasar (pari a quella di un centinaio di galassie “normali”) è l’accrescimento

di buchi neri supermassicci all'interno di (proto)galassie. In ogni caso, e per nostra fortuna, i quasar sono sorgenti facilmente identificabili e, data la loro enorme distanza, sono praticamente fissi nella sfera celeste. I quasar costituiscono quindi un'ottima base da cui partire per costruire un "sistema di riferimento" in base a cui descrivere le posizioni degli oggetti astronomici, siano essi stelle oppure asteroidi, comete o sonde interplanetarie all'interno del nostro sistema solare.

Prima della scoperta dei quasar, invece, i sistemi di coordinate usati dagli astronomi erano tutti basati su riferimenti terrestri, come ad esempio la direzione dell'asse di rotazione terrestre e la sua velocità di rotazione, le posizioni relative dei vari osservatori astronomici, la definizione di latitudine e longitudine, e così via.

Tutto ciò ha funzionato egregiamente fino a quando, a causa della sempre più accurata precisione degli strumenti di misura a disposizione degli (astro) fisici si è iniziato a vedere che qualcosa non tornava. Effetti molto fini, ma decisamente osservabili. Ad esempio, la velocità di rotazione terrestre non è costante, ma è influenzata dalla redistribuzione di masse a seguito di terremoti o addirittura di uragani! Per dare un'idea, i terremoti più forti mai registrati cambiano la lunghezza del giorno di qualche milionesimo di secondo, ovvero di una parte su cento milioni. Questo può sembrare molto poco, ma quando è necessario fare misure ultraprecise il fatto che la durata di un giorno "vari" in maniera casuale a seconda della presenza di grandi terremoti (o di tanti piccoli terremoti) ha un'influenza percepibile sull'accuratezza. Oltre a questo, la Terra non è così rigida come sembra: i continenti sono "alla deriva" su un mare di roccia fusa, e questo fa sì che le distanze tra i punti fissati sulla superficie terrestre (ad esempio, tra un osservatorio astronomico in Europa e uno in America) vari nel tempo. In questo caso si parla di diversi centimetri l'anno, ovvero anche qui di una parte su cento milioni. A tutto questo si aggiunga anche il fatto che gli effetti di marea, come ad esempio quello della Luna sulla Terra, non riguardano solo gli oceani, ma contribuiscono anche a deformare la crosta terrestre arrivando a creare spostamenti di circa mezzo metro in un periodo di *un giorno*.<sup>5</sup>

Insomma, la Terra non è un buon sistema di riferimento. Molto meglio i quasar. E grazie a Gaia, abbiamo ora una serie di riferimenti molto ben

---

<sup>5</sup> Può essere interessante notare *en passant* che le misure di posizione dei ricevitori GPS presenti in qualsiasi telefono cellulare moderno sono già corrette per tener conto di questi spostamenti. In questo modo il GPS permette di *studiare* gli effetti di marea e deriva dei continenti, invece di essere limitato da essi.

caratterizzati ed eccezionalmente stabili sulla base dei quali implementare un sistema di coordinate capace di resistere anche alle più insistenti pedanterie degli (astro)fisici sperimentali.

### *Arrokoth*

Il sistema di riferimento determinato dalle misure di Gaia ha anche già avuto un successo significativo. Permettami però una piccola digressione.

Nel gennaio del 2006, la NASA lanciò la missione *New Horizons* con lo scopo di andare a fotografare il pianeta Plutone<sup>6</sup> e il suo satellite Caronte, che erano rimasti esclusi dai *grand tour* interplanetari delle sonde Voyager negli anni '70 e '80. La missione fu portata a termine con successo nel luglio del 2015, fornendoci foto incredibili (e per molti versi inaspettate) di cosa stia accadendo ai confini del nostro sistema solare. Ma questo è argomento di un altro giorno.

Dopo aver visitato Plutone, *New Horizons* aveva ancora qualche carta da giocare: un minimo di riserve di carburante per qualche aggiustamento minimale alla sua traiettoria, e ancora abbastanza energia nel suo generatore termoelettrico a radioisotopi da poter scattare e trasmettere qualche altra foto prima di andarsi a tuffare nello spazio interstellare. Grazie a osservazioni effettuate col telescopio spaziale Hubble furono identificati tre possibili obiettivi e alla fine la scelta cadde su quello denominato 2014 MU<sub>69</sub>. Tra ottobre e novembre del 2015 furono fatti gli aggiustamenti di traiettoria necessari: appuntamento con 2014 MU<sub>69</sub> nel gennaio del 2019.<sup>7</sup>

A differenza di Plutone, che è comunque un bell'oggetto del diametro di 2300 km, secondo le osservazioni terrestri 2014 MU<sub>69</sub> era decisamente più piccolo: qualche decina di km. *New Horizons* lo avrebbe passato viaggiando alla velocità di oltre 50000 km/h e a una distanza di circa 3000 km. Per avere delle foto decenti, le telecamere di *New Horizons* avrebbero dovuto essere puntate in maniera precisa e tempestiva.

Si fecero ovviamente alcune prove di puntamento, ma qualcosa non tornava. *New Horizons* sembrava non essere esattamente là dove si pensava che fosse. A questo punto un membro della squadra di missione, Marc Buie, fece

---

<sup>6</sup> Dall'agosto 2016, pochi mesi dopo il lancio di *New Horizons*, Plutone non è più considerato un pianeta, ma un *pianeta nano*, qualifica che condivide con altri corpi del sistema solare quali l'ex asteroide Cerere e, nella fascia trans-nettuniana, Eris, Huamea e Makemake.

<sup>7</sup> "Lo spazio è vasto. Veramente vasto. Non riuscireste mai a credere quanto enormemente incredibilmente spaventosamente vasto esso sia. Voglio dire, magari voi pensate che andare fino alla vostra farmacia sia un bel tratto di strada, ma quel tratto di strada è una bazzecola in confronto allo spazio." (Adams, 2018)



5. Immagine di Arrokoth (conosciuto anche come 2014 MU<sub>69</sub> o Ultima Thule), il più lontano oggetto mai visitato da una sonda interplanetaria. Fotografia scattata da New Horizons nel gennaio del 2019. [Credits: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute/Roman Tkachenko.]

una proposta: perché non usare il sistema di riferimento di Gaia? (Sokol, 2020) Era stato pubblicato da poco il primo GDR, che includeva le posizioni di oltre mezzo milione di quasar, e ancora gli astronomi stavano dibattendolo su se e come usarlo. Buie, d'altro canto, lo aveva preso sul serio e si era convinto che la sonda non fosse là dove le misurazioni terrestri la ponevano: secondo lui era necessaria un'ulteriore piccola correzione di rotta per non rovinare questa missione. Alla fine le sue argomentazioni furono ritenute convincenti e la rotta di New Horizons fu cambiata seguendo le indicazioni ottenute grazie al sistema di riferimento di Gaia.

Il risultato fu un successo, come dimostra l'incredibile fotografia di 2014 MU<sub>69</sub> riportata in Figura 4. Nel frattempo 2014 MU<sub>69</sub> era stato ribattezzato col nome di Arrokoth, parola che significa "cielo" nella lingua dei Powhatan, una popolazione indigena americana nella cui regione tradizionale si trova il centro di ricerca che ha scoperto e caratterizzato questo oggetto.

## Bibliografia

- Adams D., 2018, *Guida galattica per gli autostoppisti*, Oscar Mondadori.
- Añez-López N. et al., 2020, *Modeling the Accretion Disk around the High-mass Protostar GGD 27-MM1*, «The Astrophysical Journal», **888** 41. <https://arxiv.org/abs/1911.12398>
- C.A.L. Bailer-Jones et al., 2018, *Plausible Home Stars of the Interstellar Object 'Oumuamua Found in Gaia DR2*, «The Astronomical Journal», **156** 205. <https://arxiv.org/abs/1809.09009>
- Garberoglio G., 2012, *Zio, ma quanto è grande il Sole?* «Atti», Acc. Rov. Agiati, a. 262, ser. IX, vol. II, B: 43-61, <https://media.agiati.org/page/attachments/agiati-atti-b-2012-art03-garberoglio.pdf>
- Garberoglio G., 2016, *La "realtà" secondo la Meccanica Quantistica: dalla funzione d'onda all'entanglement*, «Atti», Acc. Rov. Agiati, a. 266, ser. IX, vol. VI, B: 5-34, <https://media.agiati.org/page/attachments/agiati-atti-b-2016-art-01-garberoglio.pdf>
- Sokol J., 2020, *Precise maps of millions of bright quasars show our place in the cosmos as never before*, «Science», **370** 1028, <https://dx.doi.org/10.1126/science.abf8476>

## Sitografia

- Sito ufficiale della missione Gaia: <https://sci.esa.int/web/gaia>
- Pagina wikipedia relativa al satellite Gaia: [https://it.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_Gaia](https://it.wikipedia.org/wiki/Satellite_Gaia)
- Pagine wikipedia relativa alla sonda New Horizons: [https://it.wikipedia.org/wiki/New\\_Horizons](https://it.wikipedia.org/wiki/New_Horizons)
- Pagina wikipedia di 1I/'Oumuamua: <https://it.wikipedia.org/wiki/1I/%27Oumuamua>
- Un interessantissimo articolo sul blog di *Rudi Matematici* sulla vita e le opere di Lagrange: <http://rudimatematici-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/2009/01/25/25-gennaio-1736-buon-compleanno-giuseppe/>