

EFFET DE DÉCALAGE DU PHOTOCENTRE DANS LES ÉTOILES DOUBLES DU CATALOGUE GAIA DR2

Photocenter Shift Effect in Double Stars of Gaia DR2 Database

Josefina F. Ling

Observatorio Astronómico R. M. Aller
Universidad de Santiago de Compostela (España)
Email: josefinaf.ling@usc.es



Résumé

Afin de vérifier les performances du satellite Gaia lors de la détection d'étoiles doubles, nous avons tenté de découvrir un décalage du photocentre affectant les données de la deuxième publication de Gaia (Gaia DR2). Nous avons analysé les données d'étoiles doubles bona-fide du catalogue "Double and Multiple System Annex" et les avons comparées au catalogue Gaia DR2. On a essayé de dériver une relation entre les mesures de magnitude visuelle et les signes de binarité basés sur les parallaxes et mouvements propres. Une étude complète des parallaxes indique la présence de l'effet de décalage du photocentre. En raison de la nature bidimensionnelle du mouvement propre, nous n'avons mené qu'une simple étude qui implique qu'un réel décalage du photocentre peut affecter les étoiles doubles apparaissant dans le catalogue Gaia DR2 comme des sources simples.

Abstract

To check the performance of the Gaia satellite when detecting double stars, we attempted to discover a photocenter shift affecting Gaia's second data release (Gaia DR2). We analyzed data of bona-fide double stars from "Double and Multiple System Annex" catalog and matched them with the Gaia DR2 catalog. We tried to derive a relationship between measurements of visual magnitude and signs of binarity based on parallaxes and proper motions. A comprehensive study of parallaxes indicates the presence of the photocenter shift effect. Due to the proper motion two-dimensional nature, we conducted only a simple study which implies that a real photocenter shift may affect double stars appearing in the Gaia DR2 catalog as single sources.

Keywords: binaries visual – parallaxes – proper motions – statistics



Sommaire de l'article publié par López, A, Ling, J. F. & Sánchez, C. dans la revue *Acta Astronomica*, Vol. 70 pp. 19–32, (2020) [8]

1. INTRODUCTION

La mission astrométrique Gaia de l'Agence Spatiale Européenne vise à mieux comprendre notre Voie lactée. Depuis son lancement en décembre 2013, elle a obtenu des mesures de positions, de parallaxes et de mouvements propres pour plus d'un milliard d'objets astronomiques, entre autres, des étoiles doubles (pour plus de détails, voir l'article de Frédéric Arenou dans le numéro 5, de cette revue [1]). Les résultats ont été publiés dans trois catalogues : Gaia DR1 (14 septembre 2016) [4], Gaia DR2 (25 avril 2018) [5] et Gaia DR3 (13 juin 2022) [6].

Le but du présent travail est d'examiner les signes possibles du décalage du photocentre des étoiles doubles affectant les données publiées dans Gaia DR2.

En utilisant les différences entre les mesures de parallaxes et de mouvements propres obtenues par les missions Gaia et les mesures Hipparcos, ainsi que les déviations standard estimées dans leurs catalogues, et par une analyse statistique d'un échantillon d'étoiles doubles, de fortes preuves affectant les données de Gaia DR2 sont présentées. Nous supposons

que les erreurs de mesure suivent une distribution normale et indépendante pour trouver l'effet susmentionné et, en tant que sous-produit, d'autres phénomènes dans ces erreurs.

En général, le rapport de luminosité entre les composants d'un système binaire est plus petit que leur rapport de masse. Il en résulte un déplacement du barycentre par rapport au photocentre. Comme les deux composantes du couple orbitent autour du premier, le photocentre décrit une orbite virtuelle par rapport au barycentre et le vecteur de mouvement propre varie avec le temps. Les mesures de la différence entre les vecteurs de mouvement propre instantané et à long terme dans Hipparcos et Gaia DR2 permettraient de fixer des limites pour les combinaisons possibles des valeurs des masses et des radios de la composante secondaire.

2. COLLECTE DES DONNÉES

Le point de départ est un échantillon de binaires bien connues, extrait du "Double and Multiple System Annex" (DMSA) du catalogue Hipparcos (ESA 1997) [3] et présent dans Gaia DR2. Les objets retenus vérifient les conditions suivantes :

- magnitude limite $G < 13$ pour couvrir la magnitude $V \approx 11.5$ d'Hipparcos.
- les étoiles classées "poor" ou "uncertain" dans le DMSA sont

exclues.

- seules les étoiles binaires visuelles résolues par Hipparcos et dont chaque composante est bien identifiée ont été prises en compte.
- les étoiles dont la séparation angulaire est supérieure à 3" (secondes de degré) ont été supprimées. En effet, la fraction de paires résolues par Gaia diminue pour des séparations de 3"5, en raison des limitations de la taille d'acquisition des données des fenêtres du photomètre à prisme bleu et du photomètre à prisme rouge.
- les binaires ont été prises en compte lorsque les valeurs des parallaxes et des mouvements propres étaient connues pour chaque composante.

Nous avons ainsi obtenu un échantillon de 7316 binaires. Ensuite une identification croisée a été faite entre les catalogues Hipparcos et Gaia DR2 en utilisant le "Hipparcos Gaia Catalog of Accelerations" (HGCA, Brandt 2018) [2] et en concentrant tant sur les parallaxes que sur la détermination des changements dus aux mouvements propres. Le résultat a donné 5701 sources croisées pour lesquelles les valeurs suivantes ont été retenues :

- les parallaxes et les mouvements propres des deux catalogues avec leurs déviations standard correspondantes.
- la magnitude dans la bande visuelle V, pour chacune des composantes du couple, obtenue à partir du DMSA.

3. L'ANALYSE STATISTIQUE

En suivant une méthodologie similaire à celle de Makarov et al. (2017) [7], l'idée est d'étudier le comportement statistique entre les mesures obtenues par les missions Hipparcos et Gaia pour détecter des anomalies. En particulier, pour les étoiles doubles, le photocentre, sur les données Gaia DR2, peut être déplacé par rapport à la composante primaire en raison de la contribution photométrique de la composante secondaire. Pour ça, nous utilisons la valeur absolue de la différence de magnitude visuelle du couple $|\Delta m_V|$. Il est évident que ce paramètre n'est pas le seul à affecter le photocentre, il y en a d'autres comme la séparation angulaire de la binaire elle-même ou ses magnitudes à d'autres

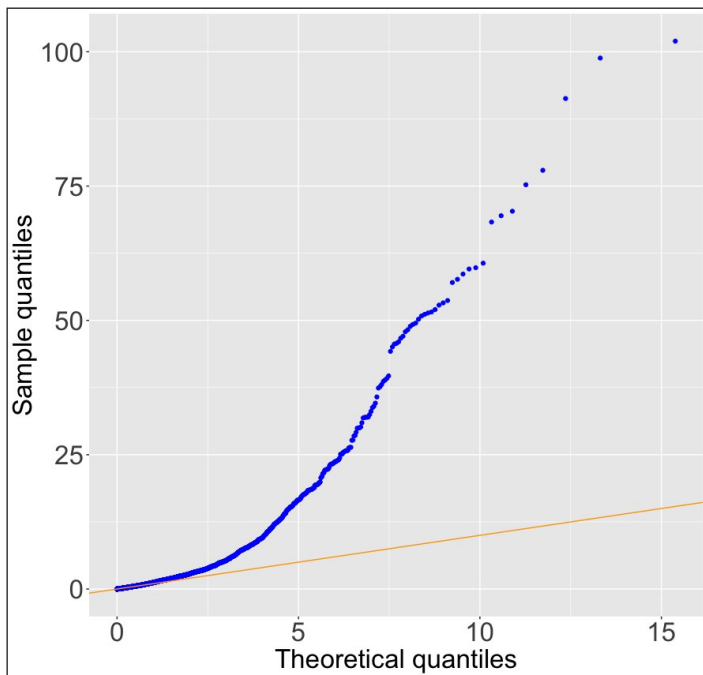


Figure 1. QQ-Plot pour les parallaxes de 5701 étoiles doubles de l'échantillon. Quantiles des différences quadratiques standardisées S2D (axe y) versus quantiles théoriques χ^2_1 (axe x). La ligne orange est la fonction d'identité. [8]

longueurs d'onde. Puisque la mission Gaia est la successeure de la mission Hipparcos, tous ses objets plus faibles que la magnitude $V \approx 6$ ont été observés par Gaia et nous supposons que le comportement de $|\Delta m_V|$ est similaire dans les deux cas.

3.1 Comportement des mesures de parallaxe

Pour chaque source de l'échantillon DMSA, nous avons commencé à travailler avec les valeurs des parallaxes ω_{g2} et ω_h et leurs erreurs standard σ_{g2} et σ_h fournies respectivement dans les catalogues Gaia DR2 et Hipparcos. Si l'on suppose qu'elles suivent une distribution normale et qu'elles sont indépendantes entre elles, alors la différence quadratique standardisée (S2D) devrait suivre une distribution du Chi-carré à un degré de liberté:

$$S2D = (\omega_{g2} - \omega_h)^2 / (\sigma_{\omega_{g2}}^2 + \sigma_{\omega_h}^2) \approx \chi^2_1.$$

Pour vérifier si cela est vrai, nous avons construit un diagramme quantile-quantile (QQ-plot) (Figure 1), qui représente la dispersion des quantiles observés de l'échantillon de 5701 S2D versus les quantiles théoriques correspondants à la distribution χ^2_1 .

On observe qu'un grand nombre de données s'éloignent de la ligne droite orange (qui est la fonction d'identité prise comme référence pour la comparaison) en montrant que les quantiles de l'échantillon sont plus grands que les quantiles théoriques correspondant à une Chi carré et ne s'ajustent donc pas à cette distribution.

Pour vérifier que cet écart est significatif, nous avons appliqué un test de Kolmogorov-Smirnov, basé sur l'écart maximal entre la distribution cumulative (Figure 2 courbe noire) de l'échantillon et la probabilité cumulative selon la distribution du χ^2_1 (Figure 2 courbe bleue).

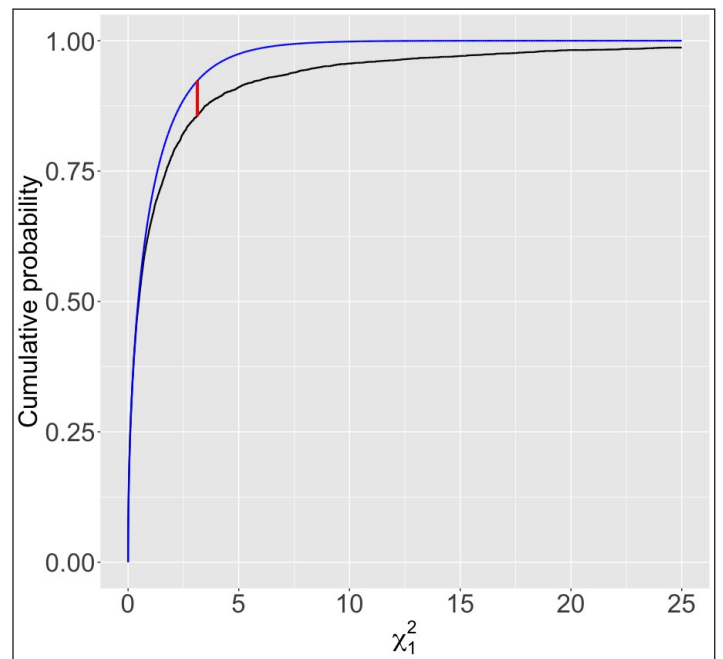


Figure 2. Fonctions de distribution cumulative correspondant à la distribution χ^2_1 (courbe bleue) et la distribution de l'échantillon correspondant aux valeurs de S2D (courbe noire). La ligne rouge est la valeur du test statistique de Kolmogorov-Smirnov, soit ici 0,067. [8]

Pour les petites valeurs de SD2, les deux quantités sont similaires, mais pour les grandes valeurs, la fréquence relative cumulée est nettement inférieure à la probabilité cumulée. L'écart le plus important, $0,067 = 6,7 \%$, correspond à $S2D = 3,1271$ (marqué par une barre verticale rouge Figure 2). Il correspond précisément la valeur de la statistique du test de

Kolmogorov-Smirnov. La valeur-p correspondante est inférieure à $2,2 \times 10^{-16}$, ce qui constitue une preuve solide contre l'hypothèse d'une distribution du Chi carré pour S2D. On observe donc que le QQ-plot et le test de Kolmogorov-Smirnov permettent de rejeter cette hypothèse.

Comme l'ensemble des données proviennent d'étoiles doubles, une cause naturelle de l'augmentation de l'erreur de mesure pourrait être le déplacement du photocentre. Pour évaluer si cet effet est possible, nous avons utilisé un diagramme de dispersion des différences de parallaxe normalisées SD = $(S2D)^{1/2}$ en fonction de la différence des magnitudes visuelles $|\Delta m_V|$ (Figure 3).

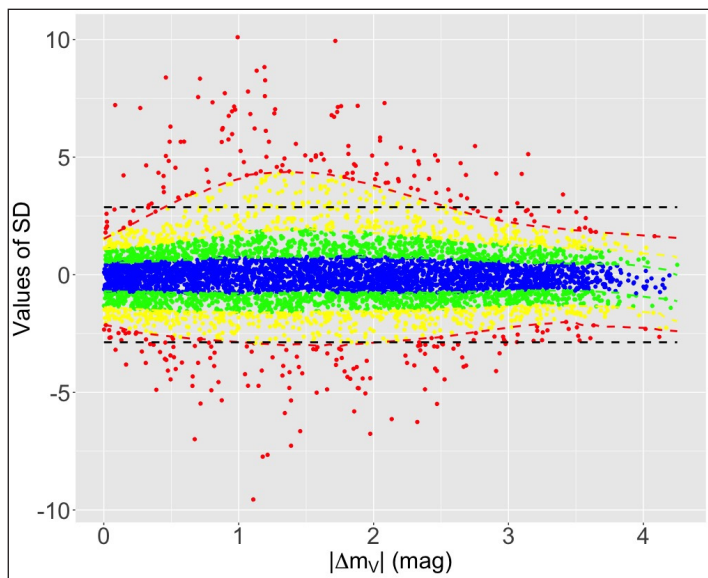


Figure 3. Diagramme de dispersion des différences de parallaxe normalisées SD en fonction de la différence des magnitudes visuelles $|\Delta m_V|$. Les deux lignes horizontales en pointillés noirs sont situées à $\pm 1,96 \times \sigma_{SD}$ où σ_{SD} est l'écart-type de SD. Les valeurs de SD entre les quantiles conditionnels de 25 % et de 75 % sont représentés en bleu, entre 10 % et 25 % et 75 % et 90 % en vert, entre 2,5 % et 10 % et 90 % et 97,5 % en jaune, et les inférieures à 2,5 % ou supérieures à 97,5 % en rouge, respectivement. [8]

Premièrement, on constate qu'il n'y a pas de tendance vers des valeurs positives ou négatives de la différence des magnitudes visuelles. L'écart-type de SD est $\sigma_{SD} = 1.465$. Les deux lignes pointillées noires correspondent à des valeurs de $\pm 1,96 \times \sigma_{SD}$. Le nuage de points a été codé par couleurs en fonction de la position des points par rapport aux quantiles conditionnels, selon la méthode de Yu et Jones (1998) [9] (voir la légende de la Figure 3). On observe que pour les valeurs $|\Delta m_V|$ inférieures à 2,53 (qui constituent 75% de l'échantillon), la dispersion des points autour de l'axe des ordonnées est considérablement plus importante que pour les valeurs supérieures. Cela se traduit par une plus grande variabilité des SD pour des différences de magnitude mineures et contribuera à un déplacement plus important du photocentre.

Une étude similaire a également été réalisée sur 25% de l'échantillon, correspondant aux observations dont les différences de magnitude étaient supérieures à 2,53, afin de vérifier si les hypothèses de distribution se vérifiaient, ce qui serait le cas si l'effet du déplacement du photocentre était faible. L'écart-type de ce sous-échantillon est de 1,068, ce qui est assez proche de 1, correspondant à une distribution normale standard. Le QQ-plot indique qu'environ 90 % est très proche de la diagonale, les 10 % restants correspondant à des valeurs S2D grandes sont plus élevées que celles attendues s'ils suivent une distribution du χ^2_1 . La statistique du test de Kolmogorov-Smirnov donne une déviation de 5,34%. Ainsi, dans ce cas, SD et SD2 sont

plus proches d'une distribution normale standard et d'un Chi-carré respectivement, ce qui est une preuve supplémentaire d'un effet de décalage du photocentre moins important.

3.2 Comportement de mesures des mouvements propres

Dans le cas des mouvements propres, nous considérons les vecteurs de mesure $p_{g2} = (p_{g2}^a, p_{g2}^d)$ et $p_h = (p_h^a, p_h^d)$ de Gaia DR2 et de Hipparcos respectivement, où chacun d'entre eux a deux composantes, l'une en ascension droite, l'autre en déclinaison. On travaille avec les matrices de covariance correspondantes C_{g2} et C_h dans lesquelles interviennent les composantes de chaque vecteur et leurs erreurs standard obtenues à partir des catalogues susmentionnés. Comme dans le cas des parallaxes, nous supposons que les erreurs suivent une distribution normale de moyenne zéro. Si l'on admet l'indépendance entre p_{g2} et p_h , la forme quadratique obtenue en travaillant avec l'inverse de la somme des matrices de covariance $C_t = C_{g2} + C_h$ suit une distribution du Chi-carré à 2 degrés de liberté :

$$W^T C_t^{-1} W \approx \chi^2_2$$

Où $W = p_{g2} - p_h$ est considéré un vecteur-colonne, W^T sa transposé et C_t^{-1} l'inverse de C_t . La QQ-plot a montré une grande déviation qui a été détectée comme significative par le test de Kolmogorov-Smirnov donnant une divergence maximale vraiment importante de 0,27825, ce qui implique des preuves solides contre une distribution χ^2_2 , raison pour laquelle il faut rechercher un effet possible de décalage du photocentre.

En raison de la nature bivariée des mouvements propres (composantes alpha et delta), la norme du vecteur W ($W^T W$ = la somme des carrés des différences dans les mesures des mouvements propres entre Gaia et Hipparcos) a été utilisée pour détecter l'effet. Un diagramme de dispersion du logarithme de cette norme en fonction de la différence de magnitude visuelle entre les composantes de l'étoile double est présenté dans la Figure 4.

On observe que les grandes valeurs du logarithme correspondent à des $|\Delta m_V|$ petits. Il faut rappeler que ce dernier

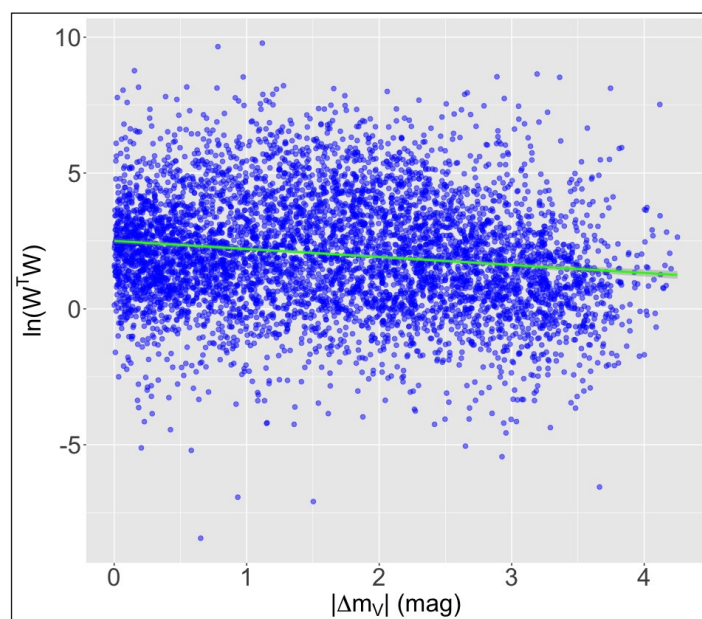


Figure 4. Diagramme de dispersion du logarithme de la norme $\ln(W^T W)$ en fonction de la différence des magnitudes visuelles $|\Delta m_V|$. En vert la droite de régression correspondante, qui est donnée par l'équation $y = (2,5 \pm 0,1) - (0,295 \pm 0,051)x$. Les limites inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95 % pour les deux coefficients ont été prises en compte.

est lié à un déplacement plus grand du photocentre. Une ligne de régression a été ajustée aux points par la méthode des moindres carrés, ce qui a donné une pente négative de $-0,295 \pm 0.051$ avec un niveau de confiance de 95%. Le coefficient de corrélation entre les deux paramètres est $R=-0,149$ et le coefficient de détermination $R^2=0,0221$ (interprétée comme la proportion de variabilité expliquée par la droite de régression). Ce dernier n'est pas grand et démontre un effet de déplacement du photocentre significatif sur les erreurs de mesure des mouvements propres.

4. CONCLUSIONS

Après avoir comparé les valeurs des étoiles doubles visuelles provenant des bases de données Gaia DR2 et DMSA, il a été clairement démontré qu'un décalage du photocentre affecte les mesures de Gaia DR2 dans l'échantillon étudié.

Une analyse approfondie des données de parallaxes a montré que, pour de petites valeurs de la différence de magnitude visuelle des composantes d'un couple ($|\Delta m_V|$), la différence de parallaxes normalisées souffre d'une grande variabilité, contrairement à ce qu'il se passe pour de grandes valeurs. Puisque des petites différences de magnitudes visuelles contribuent plus à l'effet du décalage du photocentre, l'explication la plus plausible est que cet effet affecte les mesures de Gaia DR2. Dans une analyse similaire des mouvements propres, une tendance décroissante significative a été obtenue entre le carré de la norme de la différence entre les vecteurs des mouvements propres et la différence de magnitude des composantes ($|\Delta m_V|$). Ceci est aussi probablement une indication de l'effet de déplacement du photocentre.

Ce phénomène, à son tour, pourrait être un outil approprié pour détecter les étoiles doubles dans les futures données Gaia. En effet, à cette occasion, le satellite aurait pu observer une certaine forme de binarité dans des sources qui, selon le

catalogue DMSA, sont de véritables étoiles binaires. Cependant, comme nous ne travaillons qu'avec des magnitudes visuelles, nos résultats pourraient être considérés comme incomplets dans un certain sens. En effet, on s'attendrait logiquement à quelque chose de similaire pour d'autres types de magnitudes. Ils doivent donc être interprétés avec précaution, bien qu'ils fournissent une explication logique de ce qu'il se passe réellement en ce qui concerne les données des étoiles doubles visuelles de Gaia DR2 croisées avec le DMSA.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Arenou, F. 2022, *Étoiles Doubles*, 5, 2
- [2] Brandt, T.D. 2018, *ApJS*, 239, 31.
- [3] ESA 1997, *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission (The Netherlands: ESA Special Publication)*, 1200.
- [4] Gaia Data Release 1 (Gaia DR1) <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-1>
- [5] Gaia Data Release 2 (Gaia DR2) <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-2>
- [6] Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/data-release-3>
- [7] Makarov, V., Fabricius, C., & Frouard, J. 2017, *ApJ*, 840, L1.
- [8] López, A, Ling. J. F. & Sánchez, C. 2020 *AcA*, 70, 19
- [9] Yu, K., and Jones, M.C. 1998, *Journal of the American Statistical Association*, 93, 228



Josefina F. Ling

Je suis professeure titulaire dans le domaine de l'astronomie et de l'astrophysique au département de Mathématiques Appliquées, et chercheuse et divulgatrice à l'observatoire astronomique R. M. Aller, de l'université de Saint-Jacques-de-Compostelle. J'ai participé à de nombreuses campagnes d'observation astronomique, dans différents observatoires internationaux –en France aux observatoires de la Côte d'Azur (Nice et Calern) et du Pic du Midi–, en utilisant d'abord la technique micrométrique puis l'interférométrie des tavelures. Mes publications scientifiques concernent des mesures, des calculs d'orbites et des problèmes de mécanique céleste liés aux étoiles doubles. Je suis membre de la Commission G1 (Systèmes d'étoiles binaires et multiples) de l'Union Astronomique Internationale et co-éditrice de sa Circulaire d'Information, ainsi que conseillère scientifique de la commission des étoiles doubles de la Société Astronomique de France, qui m'a décerné le prix "Edmond Girard" 2014. Actuellement, je suis également très impliquée dans la promotion du rôle des femmes dans l'astronomie.