Les binaires spectroscopiques vues par l'astrométrie de GAIA

Jean–Louis Halbwachs, Frédéric Arenou

Observatoire Astronomique de Strasbourg

11, rue de l'université, F–67000 Strasbourg

DASGAL, Observatoire de Paris–Meudon

5, pl. J. Janssen, F–92195 Meudon Cedex

Abstract

Les mesures astrométriques de GAIA apporteront un complément d'informations précieux pour l'étude des binaires spectroscopiques déjà connues. Les perspectives ainsi ouvertes sont évaluées ici, dans le domaine des binaires à un comme à deux spectres. Dans le premier cas, on peut attendre une estimation précise des masses des compagnons planétaires connus actuellement, pourvu que leur période soit supérieure à 2 mois. Pour les BS2, les masses des composantes d'au moins 75 couples du catalogue de Batten et al. [1] devraient être déterminées avec une précision supérieure ou égale à 15 %. Compte tenu de l'accroissement exponentiel du nombre d'orbites spectroscopiques, ce nombre devrait doubler d'ici 2015. Il pourraît encore s'accroître considérablement si les perspectives de mesures de VR par GAIA venaient à se réaliser.

1 Introduction

Le catalogue Hipparcos [2] a été publié voici déjà deux ans, et on commence seulement à réaliser l'importance que ce matériel observationnel est appelé à prendre dans l'étude des binaires avec des séparations de l'ordre de l'UA. L'excellente précision des mesures individuelles, qui sont distribuées comme "Hipparcos Intermediate Data", permet de déterminer des orbites

astrométriques précises pour bon nombre de binaires spectroscopiques d'éléments orbitaux connus (la connaissance préalable des éléments orbitaux spectroscopiques est importante, car elle améliore considérablement la qualité de l'orbite astrométrique). Il est alors possible d'accéder à ce but primordial de l'étude des étoiles doubles qu'est la détermination des masses des étoiles.
Partant de l'expérience fraîchement acquise en exploitant Hipparcos, nous allons ici imaginer ce que nous pourrons faire lorsque nous disposerons des observations de GAIA.

2 Les binaires à un spectre

2.1 Rappel de quelques généralités

Une binaire spectroscopique à un spectre, ou BS1, est une étoile double pour laquelle on suit les variations de vitesse radiale (VR) de la composante la plus brillante. Ces variations proviennent de l'orbite que décrit cette composante autour du centre de gravité du couple. La courbe de variation de la VR nous donne plusieurs informations sur l'orbite: la période, P, l'excentricité, e, un des trois angles définissant l'orientation de l'orbite dans l'espace, la date de passage au périastre ... De plus, ajoutant l'amplitude de la variation de VR, K, aux deux premiers de ces paramètres, nous pouvons calculer la fonction de masse:

$$f_{\mathcal{M}} = {K_{km/s}}^3 \times \sqrt{1-e^2}^3 \times P_{jours} \times 1.036\,10^{-7}\,\mathcal{M}_\odot \tag{1}$$

En vertu de la troisième loi de Kepler, cette fonction de masse est liée aux masses des deux composantes et à l'inclinaison de l'orbite, par la relation:

$$f_{\mathcal{M}} = \frac{{\mathcal{M}_2}^3 \sin^3 i}{(\mathcal{M}_1 + \mathcal{M}_2)^2} \tag{2}$$

où $\mathcal{M}_1$ est la masse de la composante la plus brillante, appelée aussi composante primaire, et $\mathcal{M}_2$ la masse de l'autre composante, dite secondaire, et dont on ne voit pas le spectre. L'inclinaison, i, est l'angle entre le plan de l'orbite et le plan tangent à la voûte céleste, ou, si l'on préfère, l'angle entre le vecteur moment angulaire et la ligne de visée; cet angle est ici défini entre 0 et $\pi/2$.
Quand la composante primaire est une étoile "normale" de la séquence principale, sa masse peut être déduite du type spectral, qui est généralement connu. Mais l'inclinaison du système reste indéterminée (tout au plus la remplacera-t-on pas des spéculations statistiques parfois hasardeuses ..), et on ne peut déduire qu'une évaluation minimum de la masse secondaire. Quand le rapport des masses est petit, cette évaluation équivaut à $\mathcal{M}_2 \sin i$. C'est pour cette raison que nous connaissons actuellement des compagnons d'étoiles qui sont des *candidates naines brunes* et des *candidates planètes*, sans pouvoir préciser davantage.

2.2 Les BS1 vues par Hipparcos

Nous avons eu récemment l'occasion d'éprouver la qualité des mesures astrométriques de Hipparcos, en calculant l'orbite du photocentre de quelques BS1 [3]. Les éléments de l'orbite spectroscopique étaient pris en compte dans la recherche de l'orbite astrométrique; parmi ceux-ci, le plus important est la période, car elle permet d'initialiser correctement le processus de calcul. Nous avons vérifié que nous obtenions des demi–grands axes, a_0, et des incertitudes, σ_{a_0}, qui étaient fiables pour les binaires de périodes inférieures à la durée de la mission scientifique du

satellite, soit environ 3,5 ans: au–delà, le mouvement orbital se confond avec le mouvement propre de l'étoile, et des valeurs aberrantes deviennent possibles.
Nous considérons maintenant le cas d'une composante secondaire peu brillante (c'est fréquent chez les BS1), et nous assimilons le photocentre du couple à la composante primaire. Si nous négligeons les erreurs sur la parallaxe, sur $\mathcal{M}_1$, et sur les éléments orbitaux spectroscopiques, nous obtenons finalement une estimation de $\sin i$, donc de $\mathcal{M}_2$, d'incertitude relative σ_{a_0}/a_0. Grâce aux contraintes imposées par les éléments de l'orbite spectroscopique, l'incertitude σ_{a_0} est généralement inférieure à 0,9 mas; elle est en fait du même ordre de grandeur que l'incertitude sur la parallaxe trigonométrique de ces étoiles. Nous obtenons donc des masses secondaires à près de 10 % quand les conditions: $P < 3.5$ ans et $a_0 > 9$ mas sont remplies.

2.3 Les BS1 vues par GAIA

Nous supposons que, de même que Hipparcos, GAIA donnera des a_0 aussi précis que les parallaxes. Pour des étoiles brillantes, ce qui est le cas des BS, nous aurons donc $\sigma_{a_0} \approx 4$ μas. Par conséquent, les masses secondaires pourraient être précises à près de 10 % quand $a_0 > 40$ μas. En plus, il faudra que $P < 5$ ans, puisque telle sera la durée de la mission.
Pour fixer les idées, nous avons calculé des valeurs de a_0 s'appliquant à des couples situés à 10 pc, et de $\mathcal{M}_1 = 1\ \mathcal{M}_\odot$. A nouveau, nous assimilons le demi–grand axe de l'orbite du photocentre, a_0, à a_1, qui est celui de l'orbite de la composante primaire autour du centre de masse du couple. On sait que :

$$a_{1_{UA}} = {P_{ans}}^{2/3} \times \frac{\mathcal{M}_{2_{\mathcal{M}_\odot}}}{(\mathcal{M}_{1_{\mathcal{M}_\odot}} + \mathcal{M}_{2_{\mathcal{M}_\odot}})^{2/3}} \qquad (3)$$

Les résultats sont présentés Table 1.

Table 1: Demi–grand axe de l'orbite astrométrique en fonction de la période et de la masse du compagnon; cas d'une composante primaire de $\mathcal{M}_1 = 1\ \mathcal{M}_\odot$, vue à une distance de 10 pc.

$\mathcal{M}_2$	$P = 10$ j	$P = 100$ j	$P = 1$ an	$P = 5$ ans
0,08 $\mathcal{M}_\odot$	0,69 mas	3,2 mas	7,6 mas	22 mas
1 $\mathcal{M}_{Jupiter}$	8,7 μas	40 μas	95 μas	280 μas
1 $\mathcal{M}_{Saturne}$	2.6 μas	12 μas	29 μas	84 μas
1 $\mathcal{M}_{Neptune}$	0,47 μas	2,2 μas	5,2 μas	15 μas
1 $\mathcal{M}_{Uranus}$	0,40 μas	1,8 μas	4,4 μas	13 μas
1 $\mathcal{M}_{Terre}$	0,03 μas	0,13 μas	0,30 μas	0,88 μas

On constate qu'une planète comme la Terre, même si elle devenait accessible au niveau des variations de vitesse radiale, resterait absolument hors de portée sur le plan astrométrique; quant à d'éventuelles planètes de la masse de Neptune ou d'Uranus, elles produiraient un demi–grand axe d'une douzaine de μas pour une période de 5 ans, ce qui donnerait des masses à 30 ou 40 % près environ. Bien qu'imprécises, de telles informations ne seraient pas à négliger. Cependant, la plus grosse difficulté serait encore l'obtention de l'orbite spectroscopique: avec

une période de 5 ans, l'amplitude de VR induite par un compagnon de la masse d'Uranus ne serait que de 0,8 m/s.
Les résultats sont beaucoup plus probants en ce qui concerne les planètes de type jovien. Un compagnon ayant exactement la masse de Jupiter serait "pesé", avec précision, pourvu que sa période soit supérieure à 100 jours. Si nous considérons une période de 5 ans, il ressort de la Table 1 que nous pouvons étendre notre champ d'action jusqu'à une distance de 70 pc, soit bien au–delà du volume prospecté actuellement. Quant aux compagnons stellaires hors naines brunes, de masse supérieure à 0,08 $\mathcal{M}_{\odot}$, ils ne posent aucune difficulté même aux courtes périodes.
De façon plus concrète, on a calculé la limite inférieure de a_1 pour les candidates planètes connues à ce jour. Les résultats figurent Table 2. On constate que les masses de tous les objets de période supérieure à deux mois devraient être déterminées avec GAIA.

Table 2: Les candidates planètes extra–solaires, avec estimation de la valeur minimum du demi–grand axe de l'orbite astrométrique. Les flèches désignent les étoiles pour lesquelles GAIA devrait déterminer sin i, donc la masse, avec une précision d'au moins 10 %.

Nom	$\mathcal{M}_2 \sin i$ $\mathcal{M}_{Jupiter}$	Période *jours*	Parallaxe *mas*	$a_1 \sin i$ μas	
HD 187123	0,52	3,1	21	0	
τ Boo	3,87	3,3	64	9	
HD 75289	0,42	3,5	35	1	
51 Peg	0,47	4,2	65	1	
υ And	0,71	4,6	74	2	
	2,11	241,2		94	$\longleftarrow$
	4,61	1266,6		580	$\longleftarrow$
HD 217107	1,28	7,1	51	5	
55 Cnc	0,84	14,6	80	8	
Gl 86	3,6	15,8	92	50	$\longleftarrow$
HD 195019	3,43	18,3	27	12	
ρ CrB	1,1	39,6	57	14	
HD 168443	5,04	57,9	26	39	
Gl 876	2,1	60,8	213	270	$\longleftarrow$
70 Vir	6,6	116,6	55	170	$\longleftarrow$
HD 210277	1,28	437	47	69	$\longleftarrow$
16 Cyg B	1,50	804	47	130	$\longleftarrow$
47 UMa	2,80	1088	71	330	$\longleftarrow$
14 Her	3,3	1619	55	610	$\longleftarrow$

3 Les binaires à deux spectres

3.1 Généralités

Dans le cas des binaires à deux spectres (BS2), la composante secondaire est suffisamment brillante pour qu'il soit possible de mesurer distinctement sa vitesse radiale au maximum d'élongation de la courbe de variation. Avec ces étoiles, il n'est plus nécessaire de faire des hypothèses sur la masse primaire: $\mathcal{M}_1 \sin^3 i$ et $\mathcal{M}_2 \sin^3 i$ sont directement déduits des éléments de l'orbite spectroscopique. La dépendance en $\sin i$ est donc devenu une dépendance en $\sin^3 i$, mais, d'un autre côté, l'intérêt scientifique est tout autre, puisque nous pouvons alors chercher les masses individuelles des étoiles.
La luminosité des composantes secondaires des BS2 permet l'enregistrement du spectre secondaire, mais affecte la dimension de l'orbite astrométrique: comme la composante secondaire est relativement brillante, le photocentre du couple ne correspond plus à la composante primaire; en fait, la luminosité de la secondaire déplace le photocentre de façon à le rapprocher du centre de masse du système. Par rapport aux BS1, nous sommes en présence de deux effets antagonistes: la masse plus grande de la secondaire agrandit la dimension de l'orbite de la primaire autour du centre de masse, mais, en même temps, la luminosité de la secondaire rapproche le photocentre du centre de masse, et rapetisse donc l'orbite. Ce dernier effet l'emporte quand les deux composantes deviennent identiques: le demi–grand axe de l'orbite photocentrique est alors nul.
La comparaison de a_0 et de a_1 nous permet en fait d'évaluer Δm, la différence de magnitude entre les composantes. Indépendamment de toute hypothèse sur les propriétés physiques des étoiles, ces paramètres sont liés entre eux par la relation:

$$a_0 = a_1 \times \left| \, 1 \; - \; \left(\frac{1 + \frac{\mathcal{M}_2}{\mathcal{M}_1}}{\frac{\mathcal{M}_2}{\mathcal{M}_1}} \times \frac{10^{-0.4\,\Delta m}}{1 + 10^{-0.4\,\Delta m}} \right) \right| \tag{4}$$

(pour une BS2, le rapport des masses $\mathcal{M}_2/\mathcal{M}_1$ est tout simplement le rapport des amplitudes de VR, K_1/K_2). En plus des masses individuelles, nous avons donc aussi accès aux magnitudes des composantes, donc à la relation masse–luminosité.

3.2 Les BS2 avec Hipparcos

Malgré les contraintes que font peser la petite dimension des orbites astrométriques et une exigence accrue sur la précision de $\sin i$, il a été possible de calculer les masses des composantes d'une demi–douzaine de BS2 [4] (ce nombre ne doit pas être confondu avec l'ensemble des étoiles doubles pour lesquelles Hipparcos a produit des masses purement dynamiques avec une précision comparable; il faudrait alors y ajouter une trentaine de binaires visuelles [5, 6, 7]). On a ainsi constaté que l'on atteignait une précision de l'ordre de 15 % sur les masses quand a_0 est de l'ordre de 30 fois son incertitude, qui est elle–même comparable à l'incertitude sur la parallaxe. De même que précédemment, la période doit être inférieure à la durée de la mission.

3.3 Les BS2 avec GAIA

A nouveau, nous extrapolons à GAIA les résultats obtenus pour Hipparcos. Nous en déduisons que les orbites astrométriques, conjuguées aux éléments spectroscopiques, produisent des masses précises quand:

- $a_0 \geq 150\ \mu$as
- $P \leq 5$ ans

Nous avons cherché le nombre de BS2 qui satisfaisaient ces critères. Nous sommes partis du catalogue de Batten et al. [1], qui contient 1469 BS, dont 437 BS2. L'estimation des demi–grands axes des orbites photocentriques est un exercice un peu fastidieux qui se déroule en plusieurs étapes (sauf indication contraire, on a utilisé les calibrations compilées par Schmidt–Kaler [8]):

- Estimation de la masse de la composante primaire à partir de son type spectral. En cas de classe de luminosité inconnue, l'étoile est considérée comme géante. Si la masse déduite du type spectral est inférieure à $\mathcal{M}_1 \sin^3 i$, cette dernière valeur est adoptée.
- Estimation de la masse de la composante secondaire à partir de la masse primaire et du rapport des amplitudes de VR.
- Estimation de la magnitude absolue primaire, M_{v_1} à partir du type spectral.
- Estimation de la magnitude absolue secondaire, M_{v_2}, à partir de la masse secondaire, la composante étant supposée sur la séquence principale. On utilise la relation masse–luminosité de Kroupa et al. [9].
- Calcul de la distance du couple: pour cela la magnitude apparente primaire, m_{v_1}, est déduite de la magnitude apparente composite et de la différence de magnitude, $\Delta m_v = M_{v_2} - M_{v_1}$. La distance est ensuite tirée de $m_{v_1} - M_{v_1}$, sans correction d'extinction.
- Calcul du demi–grand axe de l'orbite apparente, à partir de la période, des masses, et de la distance.
- Calcul de la position du photocentre dans la bande photométrique de GAIA, G. Il faut pour cela déterminer d'abord les indices $(B-V)$ des deux composantes; pour la primaire, on utilise le type spectral, pour la secondaire, on part de M_{v_2}, l'étoile étant supposée sur la séquence principale. On convertit ensuite $(B-V)$ en $(V-I)$, grâce à des formules de transformations [10]. On en déduit la magnitude G:

$$G = M_v + 0,524 - 0,496 \times \sqrt{1 + (V - I + 0,3)^2} - 0.067 \times (V - I + 0,3)^2 \qquad (5)$$

  Ayant calculé G pour chaque composante, on obtient finalement a_0 par application de l'équation (4).

Nous voulons encore nous assurer que les deux composantes tiennent dans leurs lobes de Roche, faute de quoi les masses seront inutilisables pour l'établissement de calibration. Les rayons des composantes hors séquence principale ont été déduits des types spectraux, alors que ceux des autres ont été déduits des masses grâce à la relation: $\mathcal{R} \propto \mathcal{M}^{0,75}$. Par sécurité, on a rejeté tous les couples pour lesquels le rayon d'une composante atteignait la moitié de la distance allant du centre de l'étoile au premier point de Lagrange.
On sélectionne ainsi 99 BS2 ayant des composantes bien détachées, une période de moins de 5 ans et une orbite photocentrique de demi–grand axe supérieur à 150 μas. Parmi celles–ci, nous en trouvons 24 qui présentent des paramètres aberrants: $\sin i$ (déduits de $\mathcal{M}$ et de $\mathcal{M} \sin^3 i$)

plus grands que 1, ou Δm_v négatifs. Par sécurité, nous rejetons ces systèmes et ne basons notre estimation finale que sur les 75 qui restent.
Il nous reste à extrapoler ces résultats jusqu'à la date de fin du programme GAIA, prévue en 2015. Nous savons que, du *second* au *heighth catalogue of the orbital elements of spectroscopic binary systems*, le nombre de BS a, grosso modo, doublé tous les 25 ans [11]. Supposant constante la proportion de BS2 pour lesquelles GAIA pourra déterminer les masses des composantes, nous estimons ces dernières à 150. Ce nombre pourrait cependant être très largement dépassé si GAIA est en mesure de produire des mesures de VR avec une précision de l'ordre du km/s, et une bonne aptitude à séparer les spectres. Les masses pourraient alors se compter par milliers.

4 Conclusion

Les mesures astrométriques de GAIA apporteront un complément d'information capital pour la détermination des masses des composantes des binaires spectroscopiques. Ceci concerne aussi bien le domaine, actuellement en plein essor, des planètes géantes extra–solaires, que celui des relations entre les masses et les autres paramètres physiques des étoiles. Pour ne rappeler que les résultats les plus marquants, on notera que des compagnons planétaires de la masse de Jupiter et de période de 5 ans pourront être "pesés" avec une précision de 10 % jusqu'à une distance de 70 pc; quant aux BS2, elles devraient fournir des masses pour les composantes non évoluées de 150 couples environ. La mission GAIA elle–même pourrait accroître considérablement le nombre de BS2 de masses calculables, si les performances en matière de mesure de VR s'avèrent à la hauteur de espérances actuelles. Ces étoiles viendraient s'ajouter aux composantes de binaires visuelles dont GAIA permettra de calculer la masse, et dont le nombre n'a pas été évalué ici.
En conclusion, nous pouvons prévoir que le trésor observationnel que constitueront les observations individuelles de GAIA sera certainement exploité intensivement, tant pour les objets connus au moment de la mission, que pour ceux qui seront découverts par la suite.

RÉFÉRENCES

References

[1] Eighth catalogue of the orbital elements of spectroscopic binary systems, Publ. Dominion Obs. Vol. XVII, 1989, Batten, A.H., Fletcher, J.M. and MacCarthy D.G.

[2] ESA, 1997, The Hipparcos Catalogue, ESA SP–1200

[3] Halbwachs, J.L., Arenou, F., Mayor, M., Udry, S., Queloz, D. (1999) Exploring the brown dwarf desert with Hipparcos, soumis à A&A

[4] Arenou, F., Halbwachs, J.L., Mayor, M., Udry, S. (1999) The masses of components of six double–lined spectroscopic binary components derived from Hipparcos observations, A&A, en préparation

[5] Martin, C., Mignard, F. (1998) Mass determination of astrometric binaries with Hipparcos, II: Selection of candidates and results, A&A, **330**, 585

[6] Martin, C., Mignard, F., Hartkopf, W.I., McAlister H.A. (1998) Mass determination of astrometric binaries with Hipparcos, III: New results for 28 systems, A&AS, **133**, 149

[7] Söderhjelm, S. (1999) Visual binary orbits and masses post Hipparcos, A&A, **341**, 121

[8] Physical parameters of the stars, Schmidt-Kaler T., 1982, Landolt–Börnstein, Numerical data and functional relationships in science and technology, Springer–Verlag

[9] Kroupa, P, Tout, C.A., Gilmore G. (1993) The distribution of low–mass stars in the Galactic disc, MNRAS **262**, 545

[10] Caldwell, J.A.R., Cousins, A.W.J., Ahlers, C.C., van Wamelen, P., Maritz, E.J. (1993) Statistical relations between the photometric colours of common types of stars in the UBV(RI)c, JHK and uvby systems, SAAO Circ. N. 15

[11] Halbwachs, J.L., Arenou, F. (1999) On the derivation of the masses of SB2 components with GAIA astrometry, Baltic Astron. (sous presse)