Les objets intrinsèquement faibles du diagramme HR

Misha Haywood

DASGAL, Observatoire de Paris Meudon
5, Place Janssen
F-92195 MEUDON CEDEX

Abstract

Les objets intrinsèquement faibles du diagramme HR (naines brunes et naines blanches) sont activement recherchés, à l'aide de surveys photométriques optiques profonds (SLOAN, TDSS, EIS), et de surveys infrarouges (2MASS, DENIS). Le survey GAIA permettra de détecter l'ensemble des naines brunes et naines blanches jusqu'à la magnitude apparente V=22-24. On donne ci-dessous un aperçu du nombre de ces objets attendus dans GAIA et de leur caractéristiques, telles que l'on peut les envisager à partir des prédictions d'un modèle de populations stellaires et de résultats publiés dans la littérature.

1 Introduction

Tel qu'il est actuellement définit, le survey GAIA permettra d'observer un peu moins d'une centaine de millions de naines M, plusieurs dizaines de milliers de naines blanches du disque et de naines brunes. Ces objets sont, en général, de luminosité intrinsèque assez faible, et difficile à identifier dans les surveys actuels. Avec l'astrométrie envisagée pour GAIA, ils devraient être detectés jusqu'à la limite G=20 sans difficultés. Pour donner une idée des magnitudes absolues M_G concernées, la figure 1 montre un diagramme HR d'objets du voisinage solaire[1].

[1]obtenu en utilisant la relation entre la magnitude G et (V, V-I)

$$G = V + 0.51 - 0.50 \times \sqrt{0.6 + (V - I - 0.6)^2} - 0.065 \times (V - I - 0.6)^2$$

2 Naines M

Le bas de la séquence des naines M se trouve à la magnitude absolue GAIA G=15-16 (voir figure 1), et on peut considérer que le survey fournira un échantillonnage complet de la fonction de luminosité des naines M à un peu plus qu'une centaine de parsec.
Les sous-naines les moins massives, avec une magnitude absolue aux environs de G$\approx$ 12-13, seront visibles jusqu'à environ 300 pc. L'estimation du nombre de sous-naines de type spectral sdM dans le voisinage du soleil (cf Gizis & Reid, 1999) est de l'ordre de 30×10^{-5} étoiles par pc^{-3}. Une fonction de luminosité complète, jusqu'à la fin de la séquence principale des sous-naines pourrait ainsi être obtenue avec quelques dizaines de milliers d'objets.

3 Naines brunes

La figure 1 permet de comprendre le type de naines brunes qui seront détectées par GAIA. Les isochrones à 0.1 et 1 Gyr de la figure 1 montrent comment les naines brunes descendent très rapidement vers le bas du diagramme HR, jusqu'à atteindre, pour des objets de quelques milliards d'années, des magnitudes inaccessibles pour GAIA au-delà de quelques parsecs. Les naines brunes les moins massives sont celles qui refroidissent le plus vite. Il ressort que les naines brunes détectées à G<20 seront essentiellement des objets jeunes et proches de la limite de étoiles/naines brunes.

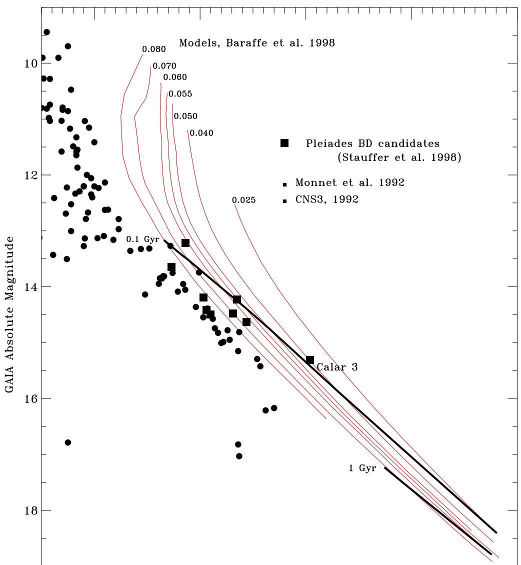


Figure 1: Le diagramme HR des objets faibles. Egalement représentés, les tracés évolutifs de Baraffe et al. pour les masses indiquées sur la figure ($M_\odot$), ainsi que les isochrones à 0.1 and 1 Gyr. Les points sont les naines M du voisinage solaire, les carrés représentent les candidats naines brunes des Pléiades detectés par Stauffer et al. (1998). Calar 3, une naine brune confirmée (Rebolo et al., 1996) des Pléiades est également indiquée.

La figure 1 montre d'autre part que les magnitudes absolues des naines brunes les plus jeunes sont comparables à celles des naines M, jusqu'à un âge de quelques dixièmes de milliards d'années. Il est raisonable de penser que les naines brunes modérément affectées par l'extinction interstellaire devraient être observées par GAIA jusqu'à des distances de quelques centaines de parsecs. En particulier, toutes les naines brunes des Pléiades jusqu'à environ 0.01 $M_{\odot}$ devraient observées.
Notre estimation du nombre de naines brunes jusqu'à G<20 est basée sur l'extrapolation de l'IMF stellaire au domaine substellaire (compte-tenu du peu d'information que l'on a sur l'IMF des naines brunes (cf Reid et al. 1999 astro-ph 9905170), on peut simplement dire que cette hypothèse n'est pas en contradiction avec les observations).
Considérant que l'évolution des naines brunes dans le diagramme HR favorise la découverte d'objets jeunes, il peut être intéressant d'obtenir une estimation du nombre de naines M jeunes (âge < 1 Gyr). Sur ce sujet, une information importante nous est donnée par les observations ROSAT. Les étoiles de la séquence principale ont une émission X qui provient de l'intensité de l'activité coronale, qui témoigne directement de l'âge de ces étoiles.

La proportion de naines M jeunes au voisinage du soleil

Les observations ROSAT (Sterzik & Schmitt, 1997) montrent qu'il existe une population d'étoiles jeunes à l'intérieure de la sphère des 25 pc. La luminosité X des étoiles M observées par ROSAT plus proches que 25 pc est comprise entre $-2 < \log L_X/L_{bol} < -5$ (Sterzik & Schmitt,figure 1), ce qui, d'après les corrélations existantes, implique des âges inférieurs à 1 Gyr. La sensibilité de ROSAT ne permet pas d'obtenir un survey complet des étoiles M les plus froides, même aux distances les plus proches. Les étoiles M (soit plus de 200 étoiles sur la figure de Sterzik & Schmitt (1997)) les moins froides (B-V entre 1.3 et 1.6) peuplent cependant tout l'interval de luminosité qui va de -2 à -5, ce qui démontre l'existence dans le voisinage solaire immédiat d'une population jeune. L'estimation de la quantité d'étoiles jeunes (activité X entre $-3 < \log L_X/L_{bol} < -4$) révélées par ROSAT d'après Fleming (1998) est de l'ordre de 0.003 $M_{\odot}.pc^3$, soit environ 18% des naines M au voisinage du soleil.

Combien de naines brunes ?

Le nombre attendu de naines brunes est difficile à quantifier, en raison de la très faible statistique du nombre d'objets connus, et du manque d'informations quantifiables sur leur processus de formation. Il est possible de faire des prédictions, sur la base des informations mentionnées ci-dessus. Nous faisons les hypothèses suivantes :
Tout d'abord, nous adoptons une IMF continue, c'est à dire dont la pente ne change pas au passage entre le stellaire et le substellaire. Cette hypothèse ne repose pas sur une base très solide à l'heure actuelle, mais les premières études sur les Pléiades (Bouvier et al. 1998) et le voisinage du soleil (Reid et al,astro-ph/9905170, 1999) n'indiquent pas de changement brusque de la pente à cette limite. La deuxième hypothèse est celle d'un taux de formation constant dans le temps, c'est à dire qu'on ne favorise pas particulièrement la formation récente de naines brunes. Evidement, on ne s'attend pas à ce que la population de naines brunes la plus récente suive un schéma aussi simple, mais qu'elle reflète plutôt la compléxité du milieu interstellaire. Malgré tout, les résultats obtenus avec ROSAT montrent qu'une population d'objets jeunes existent autour du soleil, alors même qu'il n'existe pas de région de formation d'étoiles très proches du Soleil.

En restreignant nos prédictions aux naines brunes plus vieilles que 0.5 milliard d'années, on obtient environ 20000 naines brunes avec un modèle standard de Galaxie, et avec les hypothèses ci-dessus. Au total, le modèle prédit un nombre bien plus important (> 100 000 naines brunes jusq'à G<20), parce que les naines brunes les plus jeunes (<0.5Gyr) sont échantillonnées à de plus grandes distances, mais c'est un chiffre dans doute irréaliste.
Bien que la plupart des naines brunes sera detectée aux faibles magnitudes apparentes, leur proximité implique que la précision relative sur les parallaxes devrait être inférieure à quelques %. On s'attend donc à ce que le positionnement de ces objets dans le diagramme HR soit excellent, et permettra de déterminer les âges et les masses des naines brunes par ajustement des tracés évolutifs avec une bonne précision. Cela devrait fournir une vue assez précise du taux récent de formation de ces objets, de leur fonction de masse initiale, les mouvements propres devant permettre de comprendre leur cinématique.

4 Naines blanches

Les naines blanches du disque peuvent être utilisées pour mesurer les variations du taux de formation d'étoiles (Noh & Scalo 1990, Wood 1992), et pour mesurer l'âge du disque galactique (Winget et al. 1987). Actuellement, les incertitudes statistiques dues au très petit nombre de naines blanches connues limite la précision de ces mesures.
Compte-tenu de la magnitude limite de GAIA et de la densité des naines blanches, plusieurs dizaines de milliers de naines blanches seront disponibles pour étudier ces deux problèmes.
Les figure 2 et 3 illustrent de quelle façon des observations à la précision de GAIA pourraient aider à résoudre ces 2 problèmes. Les figures 2a et 3a montre que pour des échantillons que l'on souhaiterait complet, c'est à dire jusqu'à des distances limites de l'ordre de quelques dizaines de parsecs, les précisions sur les parallaxes seront excellentes (σ_π/π inférieur à quelques %). La partie la plus brillante de la fonction de luminosité reflète les variations dans le taux de formation d'étoiles à moins de 5 milliards d'années. On a représenté sur la figure 3b des pics de densité de la fonction de luminosité tels qu'ils devraient apparaître si le taux de formation d'étoiles à enregistré des flambées d'activitées ($\times$ 10 durant 0.1 Gyr) il y a 0.6, 2.0, et 3.6 Gyr. Les barres d'erreurs sont les incertitudes poissonniennes sur le nombre de naines blanches par intervals de 0.25 mag.
Sur la figure 3b, la présence de naines blanches du disque vers les magnitudes les plus faibles donne une mesure de l'âge du disque galactique. Pour un échantillon complet et bien définit d'objets jusqu'à 40 pc, la fonction de luminosité des naines blanches donne une mesure sans ambiguité (mais dépendante de la précision des modèles de refroidissement des naines blanches) de l'âge du disque galactique : à la magnitude GAIA M_G=16.5, il devrait exister plusieurs dizaines de naines blanches si le disque à 10 Gyr, mais pratiquement aucune pour un âge de 9 milliards d'années ou moins.

5 Conclusion

On ne peut envisager une étude complète, exhaustive et statistiquement significative des objets faibles du diagramme HR dans le voisinage du soleil qu'avec l'aide de l'astrométrie. Telle qu'il est définit aujourd'hui, le projet GAIA donnerait accès à la mesure précise de la densité des objets faibles du diagramme HR, de leur fonction de luminosité et de leur cinématique. Il permettrait entre autres choses d'obtenir un schéma assez précis de la population de naines brunes jeunes du disque, de sa fonction de masse initiale et de sa cinématique.

References

[1] Bouvier J., et al (1998), A&A **336**, 490

[2] Fleming, H.J. (1998), ApJ **504**, 461

[3] Gizis J. E. and Reid I. N., (1999) AJ **117**, 508

[4] Noh, H.-R. & Scalo, J., (1990) ApJ **352**, 605

[5] Rebolo et al., (1996) ApJ **469** L53

[6] Stauffer J. R. et al., (1998) ApJ **504**, 805

[7] Sterzik, M. F. & Schmitt, J. (1997), AJ **114**, 1673

[8] Winget D.E. et al. (1987) ApJ **315**, L77

[9] Wood, M.A. (1992) ApJ **386**, 539

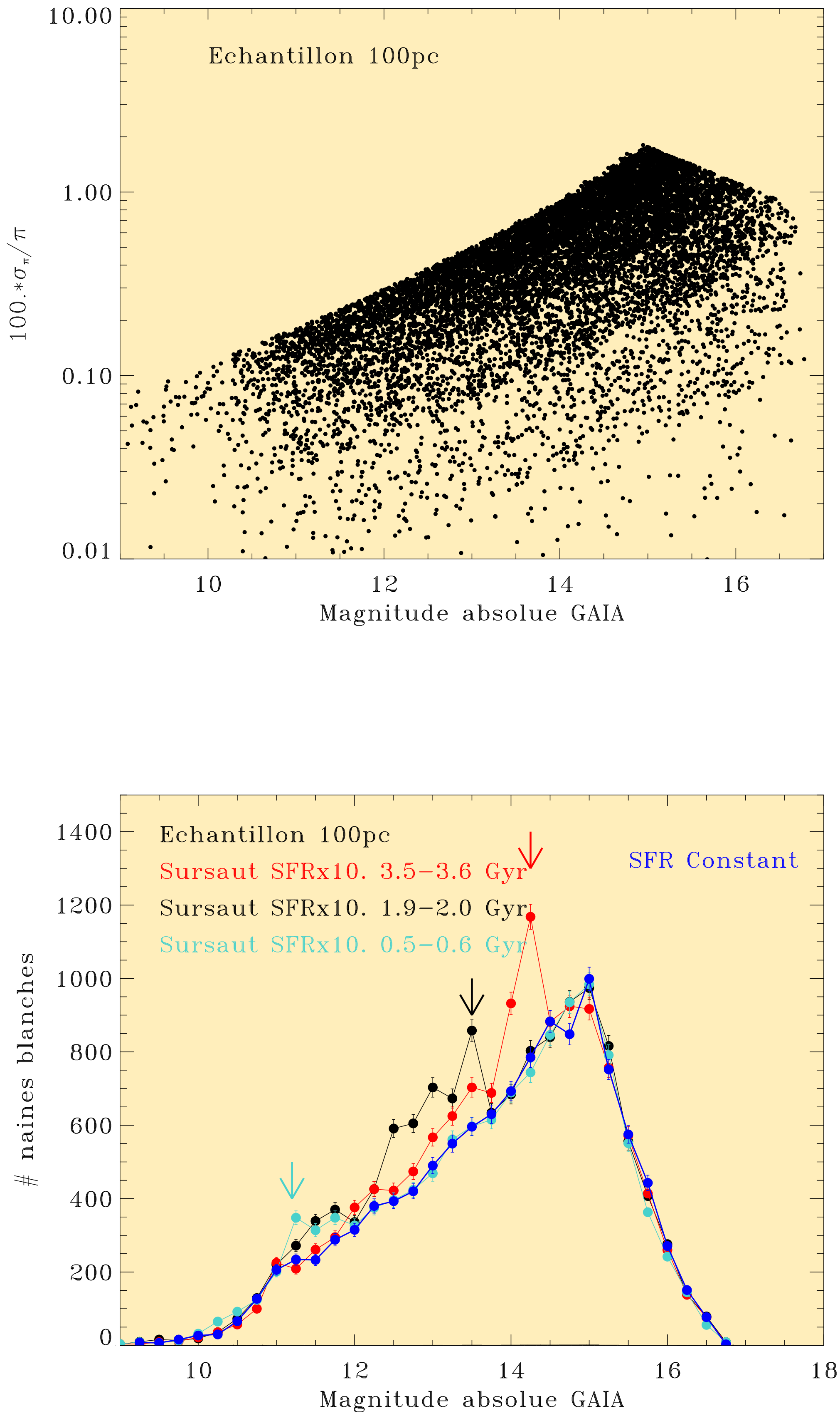
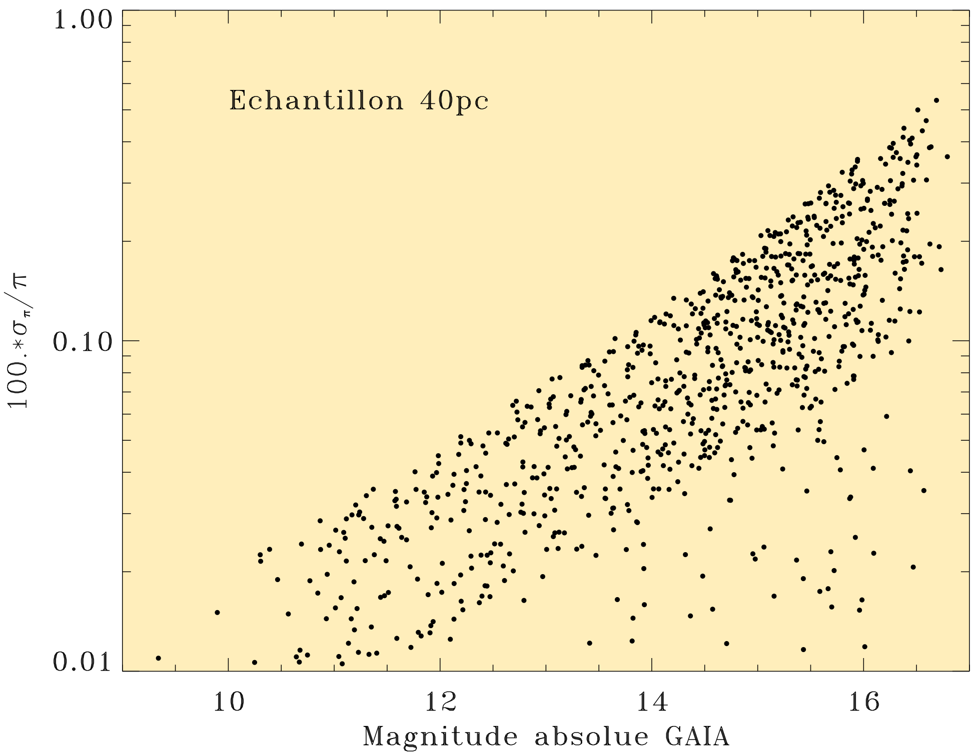


Figure 2: **a** & **b** Simulation d'un échantillon de naines blanches du disque jusqu'à 100 pc. Voir texte pour le commentaire.



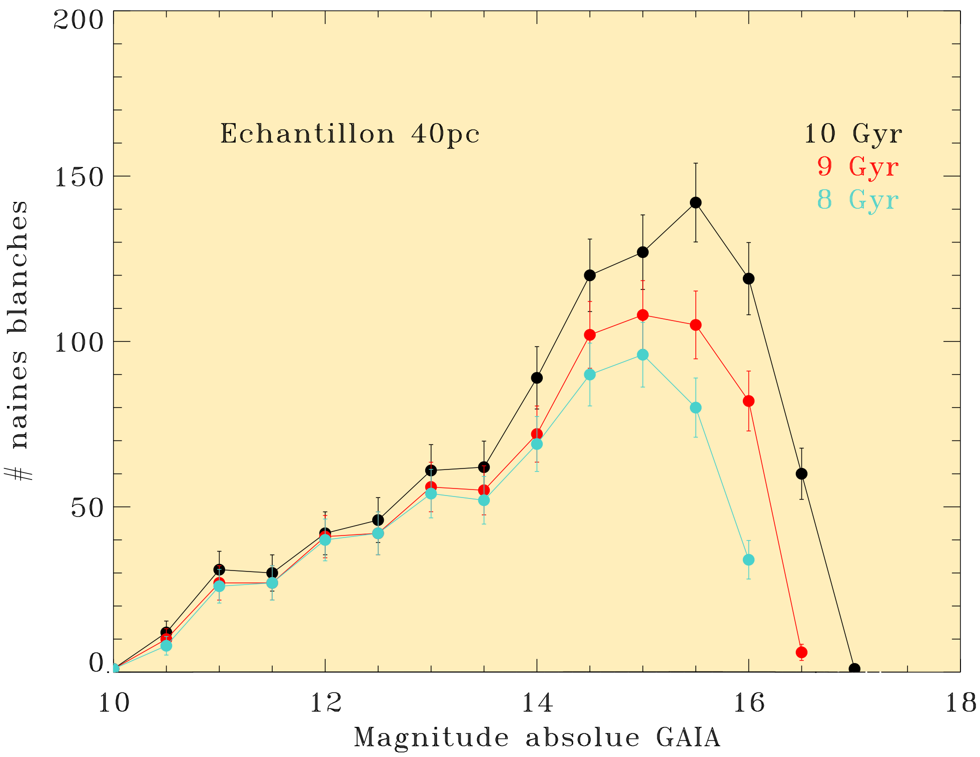


Figure 3: **a** & **b** Simulation d'un échantillon de naines blanches du disque jusqu'à 40 pc. Voir texte pour le commentaire.