

Structure et évolution des étoiles de faible masse et des naines brunes

Gilles Chabrier

Ecole Normale Supérieure de Lyon, C.R.A.L., 69364 Lyon Cedex 07, France

1. Introduction

Les raisons pour lesquelles les étoiles de faible masse et les naines brunes représentent un champ d'investigation particulièrement important proviennent de leur domaine d'intérêt particulièrement vaste, de la physique de la matière dense à la physique galactique, en passant par la physique stellaire.

Ces objets sont en effet intéressants à plus d'un titre :

Physique de la matière dense : intérieurs et atmosphères d'objets denses et froids où les effets de corrélation dominent les effets cinétiques.

Physique stellaire : quelle est la limite exacte de la séquence principale? Quelle est la masse minimum de formation d'objets de type stellaire? Quelle est le lien avec les planètes géantes, et quelle information peut-on tirer de la connaissance de ces dernières?

Physique galactique : La fonction de masse des étoiles de faible masse est-elle croissante ou décroissante à la limite de combustion de l'hydrogène? Quelle est l'allure de cette fonction de masse dans le domaine sub-stellaire? Quelle est la contribution des naines brunes au bilan massique de la Galaxie?

2. Résumé

2.1 Equation d'état

Dans les objets de faible masse, génériquement définis ci-après comme étant tous les objets de masse inférieure à $1 M_{\odot}$, les effets de corrélation entre particules dominent la contribution cinétique classique. L'équation d'état est donc celle d'un fluide non-idéal, contrairement aux objets plus massifs. Une approche analytique simplifiée des propriétés

mécaniques de ces objets, plus particulièrement des naines brunes, est donnée dans les revues de Stevenson (1991), Burrows & Liebert (1993) et Chabrier (1995). L'équation d'état complète développée pour décrire les propriétés thermodynamiques des intérieurs d'étoiles de faible masse, des naines brunes et des planètes gazeuses est celle de Saumon & Chabrier (Saumon & Chabrier, 1991, 1992 ; Saumon, Chabrier & Van Horn, 1995).

2.2 Distribution spectrale

L'atmosphère des objets de faible masse a une température effective T_{eff} inférieure à 5000 K, jusqu'à ~ 100 K par exemple pour Saturne. La gravité de surface $g = GM/R^2$ est $\log g \approx 3 - 5$. Sous ces conditions, des molécules se forment, ainsi que des dipôles induits par collision. D'où des coefficients d'absorption qui dépendent fortement de la fréquence et produisent une distribution spectrale d'énergie totalement différente de celle d'un corps noir. Une revue sur les propriétés atmosphériques de ces objets est donnée dans Allard et al. (1997) et Chabrier & Baraffe (2000).

2.3 Propriétés thermiques

La formation de molécules dans l'atmosphère a deux conséquences immédiates. D'une part l'opacité augmente et donc le flux radiatif diminue :

$$F_{rad} = \frac{4}{3\bar{\kappa}} \frac{d}{dr}(\sigma T^4) \propto \frac{\nabla T}{\bar{\kappa}} \quad (1)$$

D'autre part la chaleur spécifique \tilde{c}_p augmente de par l'augmentation du nombre de degrés de liberté dans la structure interne des particules (vibration, rotation). D'où accroissement du flux convectif :

$$F_{conv} \propto (\rho v_{conv}) \times (\tilde{c}_p \delta T) \quad (2)$$

où v_{conv} est la vitesse convective.

Ces deux effets favorisent le transport par convection. L'évolution des objets de faible masse requiert donc la solution complète de l'équation de transfert pour une atmosphère radiative-convective, avec des conditions frontière correctes entre le profil interne et le profil atmosphérique. Cette approche cohérente a été développée dans notre équipe (Baraffe et al., 1995 ; 1997, 1998 ; Chabrier & Baraffe, 1997 ; Chabrier et al., 2000) ainsi que dans l'équipe de Tucson (Saumon et al., 1994 ; Burrows et al., 1997).

3. Relation masse-magnitude. Fonction de masse

Les références mentionnées ci-dessus montrent le succès de la théorie générale pour les étoiles de faible masse et les objets sub-stellaires ainsi développée par comparaison avec les observables dans divers diagrammes observationnels : magnitude-couleur, couleur-couleur, masse-type spectral. Mais la plus forte contrainte vient de la comparaison entre théorie et observation dans des diagrammes masse-magnitude. Les relations théoriques reproduisent avec un accord remarquable les relations observationnelles obtenues dans différents filtres visibles et infrarouges par Delfosse et al. (2000).

Ceci permet de dériver des fonctions de masse stellaire jusqu'au bas, voire au dessous de la séquence principale, et ainsi de déterminer la contribution de ces objets au bilan baryonique galactique (Méra, Chabrier & Schaeffer, 1998 ; Chabrier, 2000).

Une revue détaillée des propriétés mécaniques et thermiques des objets de faible masse et des objets substellaires, ainsi que leur contribution au bilan massique galactique, est donnée dans Chabrier & Baraffe (2000).

Références

- [1] Allard, F., Alexander, D., Hauschildt, P.H. & Starrfield, S., 1997, *ARA&A*, 35, 137
- [2] Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. and Hauschildt P., 1995, *ApJ*, 446, L35
- [3] Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1997, *A&A*, 327, 1054
- [4] Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F. & Hauschildt, P.H., 1998, *A&A*, 337, 403
- [5] Burrows A. & Liebert J., 1993, *Review of Modern Physics*, 65, 301
- [6] Burrows, A., Marley, M., Hubbard, W.B., Lunine, J.I., Guillot, T., Saumon, D., Freedman, R., Sudarsky, D., Sharp, C. 1997, *ApJ*, 491, 856
- [7] Chabrier, G, Cours d'Aussois du GdR 131, *Structure et évolution des étoiles et des planètes géantes*, 1995
- [8] Chabrier, G & Baraffe, I., 1997, *A&A*, 327, 1039
- [9] Chabrier, G & Baraffe, I, 2000, *ARA&A*, 38, 339
- [10] G. Chabrier, I. Baraffe, F. Allard, P.H. Hauschildt *ApJ*, 2000, 542, 464
- [11] G. Chabrier, 2000, soumis
- [12] Delfosse, X., Forveille, T., Ségransan, D., et al., 2000, *A&A*, 364, 217

- [13] Méra, D., Chabrier, G. & Schaeffer, R., 1998, *A&A*, 330, 937 ; 330, 953
- [14] Saumon, D., Bergeron, P., Lunine, L.I., Hubbard, W.B., and Burrows, A., 1994, *ApJ*, 424, 333
- [15] Saumon, D., Chabrier, G., 1991, *Phys.Rev.A*, 44, 5122
- [16] Saumon, D., Chabrier, G., 1992, *Phys.Rev.A*, 46, 2084
- [17] Saumon, D., Chabrier, G., and VanHorn, H.M., 1995, *ApJS*, 99, 713
- [18] Stevenson, D., 1991, *ARA&A*, 29, 163