

Étude des propriétés du cœur pré-stellaire L1498

Pierre Wulles

July 25, 2019

1 Introduction

Ce rapport présente un résumé du travail que j'ai effectué lors de mon stage à l'IPAG pendant l'été 2019 sous la direction de Pierre Hily-Blant. J'ai eu pour objet d'étude principal un cœur pré-stellaire : L1498. En utilisant différentes méthodes d'analyse d'images et de modélisation j'ai dû déterminer plusieurs paramètres propres à ce corps.

2 Cœur pré-stellaire

2.1 Définition

Cœur pré-stellaire est le raccourci fréquemment employé pour désigner un cœur pré-(proto)-stellaire, c'est-à-dire un amas de gaz et de poussières en équilibre viriel qui peut former une étoile. Ces cœurs sont principalement constitués d'hydrogène et d'hélium et leurs luminosité provient principalement de l'émission des poussières.[7]. Plusieurs paramètres sont aujourd'hui à l'étude au sein de ces cœurs, température, densité de colonne (le nombre d'atomes par unité de surface) mais aussi leur composition chimique. On s'intéresse également au profil de la densité au sein du cœur.

2.2 L1498

L1498 est un cœur pré-stellaire situé dans la constellation du Taureau. Les informations sur ce cœur proviennent de trois sources : les satellites Herschel (250 μ m, 350 μ m et 500 μ m) et Planck[1] (100 μ m, 550 μ m et 850 μ m) ainsi que la caméra double bande Nika 2 (1,25mm et 2mm) qui possède l'avantage de conserver les basses fréquences spatiales. Ce cœur a déjà été étudié dans le passé [5, 3] mais les cartes à 1mm et 2mm sont des données récentes et l'objectif de ce stage est la mesure de certains paramètres à l'aide de ces données inédites.

3 Propriétés des poussières (T , β)

3.1 Extraire les intensités des cartes

Les cartes que l'on obtient sont des fichiers FITS, un format de données contenant des images et des en-têtes. J'ai écrit un script qui convolue les cartes par une gaussienne large de d arcsec ou d représente la taille approximative du beam, puis détermine le maximum d'intensité (d'autres méthodes ont été utilisés). On répète ensuite l'opération sur chaque carte et on obtient un graphique Intensité[longueur d'onde]. Toutes les données sont converties en MJy/sr (depuis le mJy/beam) car les beams des appareils sont différents.

3.2 Modélisation de l'émission des poussières au pic d'intensité

Dans un premier temps, j'ai étudié l'émission des poussières à la position du pic d'intensité.

Une première supposition concernant l'émission du cœur pré-stellaire est un comportement de corps noir :

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} \quad (1)$$

Il apparaît très vite que cette modélisation n'est pas suffisante. En effet, un rapide calcul montre que l'on devrait obtenir des valeurs de l'ordre de 10^4 MJy/sr or les mesures sont 100 fois inférieures. On modifie donc le modèle pour en faire un corps gris, en intégrant l'équation de transfert et en supposant T , la température des poussières, constante. L'intensité spécifique émise par les poussières, à la fréquence ν , devient:

$$I_\nu(T) = B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2)$$

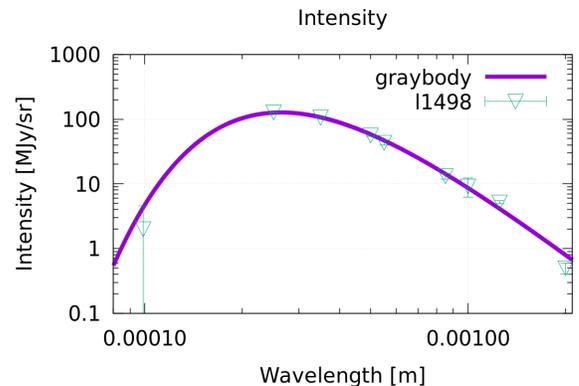
où

$$\tau_\nu = 2.8 N_H \kappa_\lambda m_H \quad (3)$$

est l'opacité des poussières. Elle est proportionnelle à la densité de colonne totale N_H et à la section efficace par unité de masse de gaz et poussière (cm^2/g) :

$$\kappa_\lambda = \kappa_{250} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{250}} \right)^{-\beta} \quad (4)$$

On choisit de prendre $\kappa_{250} = 0.09 \text{ cm}^2/\text{g}$. Maintenant que l'ordre de grandeur est le bon, on effectue une régression sur les données en utilisant l'algorithme de Levenberg-Macquart (dans GnuPlot). J'ai obtenu les résultats suivants :



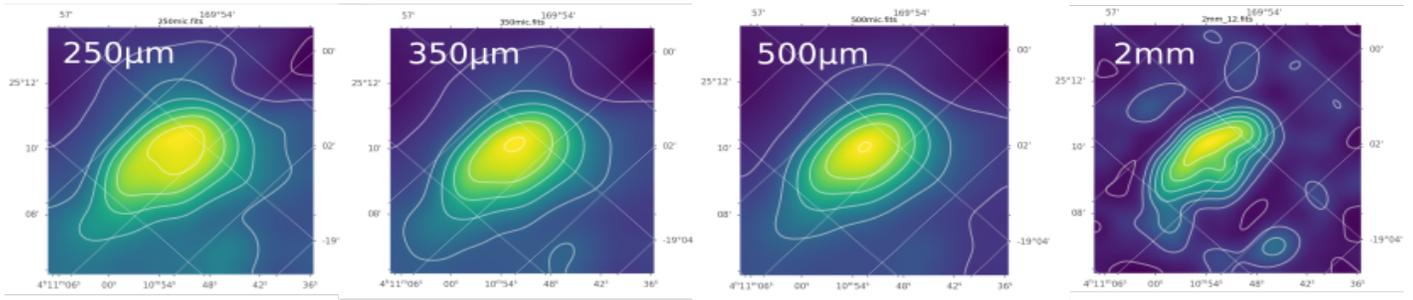


Figure 1: Cartes de L1498 à différentes longueurs d'ondes, 1.25mm n'est pas représenté car peu exploitable.

Final set of parameters	Asymptotic	Standard Error
NH (m^{-2}) = 7.5806e+26	+/- 1.791e+26	(23.63%)
T (K) = 10.1559	+/- 0.4401	(4.333%)
beta = 2.37752	+/- 0.1491	(6.271%)

Les valeurs de β et N_H sont en accord avec la littérature sur le sujet [7, 3], le point à 2mm a permis de fixer la valeur de beta (domaine Rayleigh-Jeans haute longueur d'onde, basse température: $\tilde{B} \propto \nu^{-(2+\beta)}$).

4 Profil de densité

Pour aller plus loin dans l'analyse, j'ai utilisé les cartes aux différentes longueurs simultanément pour contraindre la structure spatiale de la source, en particulier son profil de densité $n(r)$. Pour le profil de densité, la théorie suggère [7] la forme:

$$n(x) = \frac{n_0}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^\alpha} \quad (5)$$

4.1 Extraction des données

Bien que l'approximation sphérique présente des limites évidentes, dans une première étape, j'ai ignoré les déviations à la géométrie sphérique. On supposera donc que le cœur est sphérique. J'ai établi le profil radial d'intensité de la poussière aux différentes longueurs d'onde, $I_\nu(r)$, en mesurant l'intensité moyenne dans des anneaux concentriques autour du pic. Ce profil radial d'intensité est comparé au profil de densité de colonne théorique obtenu en intégrant la densité le long de chaque ligne de visée. La fonction $x \mapsto n(x)$ n'ayant pas de primitives connues pour α , l'intégrale est calculée numériquement. L'exploration de l'espace des paramètres utilise une méthode MCMC.

4.2 MCMC

Cette classe d'algorithmes [2] permet d'explorer un espace des paramètres de grandes dimensions en utilisant le principe de la marche aléatoire, le revers de la médaille étant un temps de calcul important (20 minutes pour 1000 steps, 2 heures pour 5000 steps). Les résultats obtenus sont les suivants : Comme on explore tout l'espace des paramètres on peut même avoir des estimations pour T , β ... :

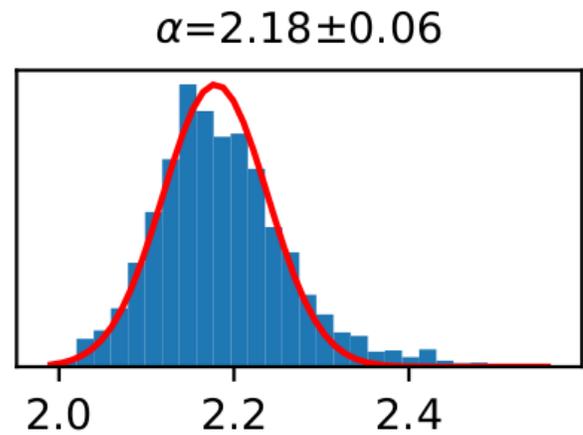


Figure 2: α (24 walkers et 2000 steps, burnin=1200)

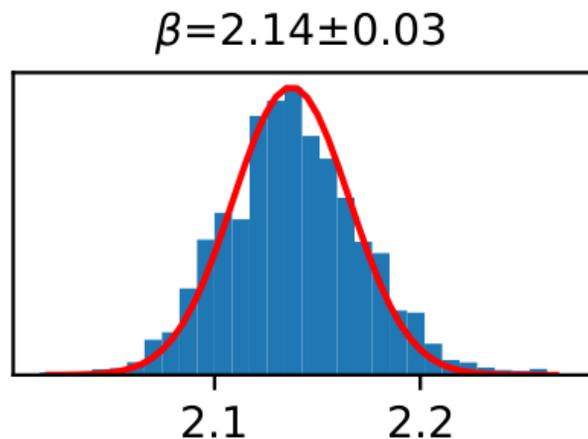


Figure 3: β (24 walkers et 2000 steps, burnin=1200)

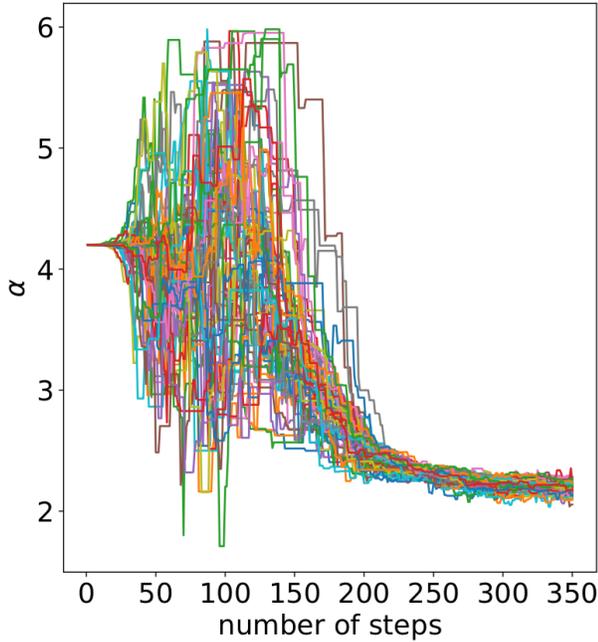


Figure 4: Les 350 premières étapes, la convergence est assez rapide.

Dans le tableau suivant j'ai résumé les valeurs des paramètres auxquelles je me suis intéressé. On peut distinguer la température au centre de la température extérieure. Pour L1521e, les 5 cartes utilisées étaient à 250, 350, 500, 850 et 1300 μm .

Paramètres du cœur pré-stellaire	L1498	L1521e
$\log(n_0)$	5.54 ± 0.06	5.07 ± 0.06
r_0	$38 \pm 3''$	24 ± 1
α	2.18 ± 0.06	2.38 ± 0.06
T_0	8.0 ± 0.3	12.5 ± 0.4
T_{ext}	12.2 ± 0.2	16.9 ± 0.6
β	2.14 ± 0.03	1.78 ± 0.06

5 Conclusion

La conclusion est double, non seulement nous avons maintenant une valeur plus « sûre » pour les paramètres beta et alpha mais il est également facile d'appliquer la méthode à d'autres cœurs pré-stellaires, je me suis ainsi occupé à la fin de mon stage des cœurs L1521E et L1512[6, 4]. Le code développé pour le MCMC a été modifié pour être réutilisable facilement sur d'autres jeu de données. Ce stage fut une bonne découverte du monde de la recherche fondamentale, il m'a permis de découvrir à la fois l'aspect technique du métier mais aussi l'aspect social, le fonctionnement d'un groupe de recherche. Quelques problèmes techniques liés au pipeline de production du boîtier d'acquisition ont pu montrer que la pratique est souvent assez éloigné de la théorie. Enfin dans une démarche de reproductibilité scientifique, tous les codes que j'ai écrit pendant ce stage sont disponibles sur un dépôt Gitlab.

6 Remerciements :

Pierre Hily-Blant : pour son encadrement, sa motivation et ses réponses à mes nombreuses questions.

Nicolas Ponthieu : pour son aide dans la compréhension des données extraites de la caméra Nika 2.

Victor Magalhaes : pour son aide dans la mise en place de la méthode MCMC.

References

- [1] P. ET AL, *Planck 2015 results. XXVIII. The Planck Catalogue of Galactic cold clumps*, A & A, 594 (2016), p. A28.
- [2] D. J. C. MACKAY, *Information Theory, Inference and Learning Algorithms*, Cambridge University Press, Sep 2003.
- [3] MAGALHAES, *Abundance of HCN and its C and N isotopologues in L1498*, arXiv, (2018).
- [4] MAKIWA, *Far-infrared/sub-millimetre properties of pre-stellar cores L1521E, L1521F and L1689B as revealed by the Herschel SPIRE instrument – I. Central positions*, arXiv, (2016).
- [5] MARET, *Chemical modeling of the L1498 and L1517B prestellar cores: CO and HCO+ depletion*, arXiv, (2013).
- [6] M. TAFALLA AND J. SANTIAGO, *L1521E: the first starless core with no molecular depletion*, arXiv, (2004).
- [7] D. WARD-THOMPSON AND A. P. WHITWORTH, *An Introduction to Star Formation*, Cambridge University Press, 2011.