

AU CŒUR DES PULSATIONS DE RR Lyr : INVESTIGATION DE LA DYNAMIQUE ATMOSPHÉRIQUE ET DES ONDES DE CHOC

Mauclaire, B.¹ and Mathias, Ph.²

Résumé. We show how a pro-am collaboration, thanks to good observation setups, can lead to important and new results concerning pulsating stars, focusing here on the RR Lyrae prototype.

Keywords: shock waves, stars : variables : RR Lyrae, stars : individual : RR Lyr, stars : atmospheres, professional-amateur collaboration

1 Introduction

RR Lyr est l'archétype des variables RR Lyrae qui sont des étoiles pulsantes de population II situées dans la partie inférieure de la bande d'instabilité du diagramme HR (Hertzsprung-Russell). Elles sont le siège d'importants mouvements atmosphériques pilotés par d'intenses ondes de choc. Leur propagation se manifeste de façon particulièrement remarquable en spectroscopie au travers notamment du phénomène de dédoublement de raies et d'émissions décalées vers le bleu. De plus, certaines de ces étoiles dont RR Lyr elle-même, présentent une modulation lente de la courbe de lumière encore inexpliquée aujourd'hui et appelée effet Blazhko.

Preston et al. (1965) fut le premier à réaliser une étude spectrale détaillée durant un cycle Blazhko entier bien que limitée à la partie ascendante de la courbe de lumière, c'est-à-dire entre la phase 0,8 et 1,0. D'autres campagnes spectroscopiques portant sur la dynamique atmosphérique des étoiles RR Lyrae eurent lieu comme celles de Preston (2011) et Chadid & Preston (2013), mais aucune ne traite de RR Lyr elle-même. Ces campagnes avaient parfois détecté dans d'autres RR Lyrae une faible émission décalée vers le rouge dans la raie H α qui apparaissait autour de la phase de pulsation $\varphi = 0,30$. En cohérence avec avec les appellations déjà utilisées pour l'émission intense à $\varphi = 0,91$ et la seconde apparition à $\varphi = 0,7$, ils la nommèrent troisième apparition. Dans le but d'investiguer la présence ou non de ce phénomène dans RR Lyr et plus généralement d'étudier la dynamique atmosphérique, une collaboration pro-am a débuté en 2013 où des observations spectroscopiques à haute résolution temporelle furent mises en œuvre.

2 Observations et analyse des données

Pour pouvoir observer les différents phénomènes atmosphériques qui ont lieu durant un cycle de pulsation avec une résolution temporelle importante (5 à 15 min), les données furent collectées avec différents spectrographes :

- ELODIE : installé sur le télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute-Provence, il possède un pouvoir de résolution de $R = 44\,000$ (Baranne et al. 1996). Nous avons sélectionné 6 spectres de rapport signal/bruit S/B compris entre 63 et 91 et obtenus dans le cadre d'une campagne (1994 – 1997) conduite par D. Gillet et publiée dans Chadid et al. (1999).
- AURELIE : 28 spectres ont été acquis en 2013 et 2014 avec pour but de détecter la 3^e apparition de la raie H α . Cet instrument (Gillet et al. 1994) est installé sur le télescope de 152 cm de l'Observatoire de Haute-Provence nous a permis d'obtenir des spectres d'une résolution de $R = 22\,700$ avec un S/B moyen de 85.

¹ Observatoire du Val de l'Arc, 13530 Trets, France

*. ² IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, 57 avenue d'Azereix, 65000, Tarbes, France

— ESHELL : ce spectrographe échelle à fibre décrit dans [Thizy & Cochard \(2011\)](#) a été fixé sur un télescope automatique de 35 cm à l’Observatoire de Chelles - France (Lemoult et al. in prep.) nous a permis de collecter 85 spectres durant le mois d’avril 2017 avec un pouvoir de résolution de $R = 10\,500$ et un S/B moyen de 74.

Les spectres ont été traités de façon homogène avec les pipelines du logiciel Audela ([Klotz et al. 2012](#)) et SpcAudace ([Mauclaire 2017](#)) réalisant les opérations classiques. En particulier, tous les spectres produits sont dans le repère de l’étoile permettant plus facilement l’étude des mouvements atmosphériques. Toutes les longueurs d’onde (λ) sont données en Å (Angström).

3 Première observation dans RR Lyr de l’émission $H\alpha$ décalée vers le rouge

3.1 Jeu de données

Entre 2013 et 2015 la troisième apparition a été observée à cinq reprises. Compte-tenu que ce motif spectral est une bosse de faible intensité et que les durées d’exposition sont courtes (600s), nous avons sélectionné les observations ayant le S/B le plus important : les nuits du 04-09-2013 et 14-09-2014. Ces séries temporelles centrées autour de $\varphi = 0,3$ sont présentées dans la Fig. 1 où le panneau de gauche montre la croissance et celui du milieu le déclin de la petite émission située en haut de l’aile rouge de la raie $H\alpha$.

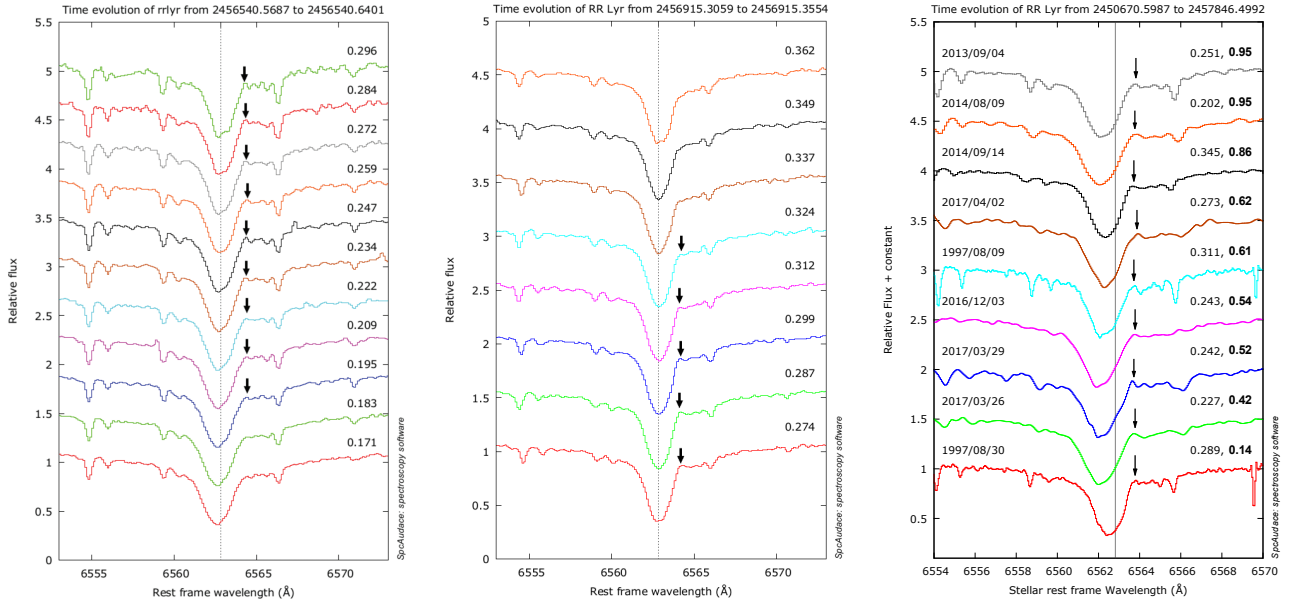


Figure 1. Évolution de la 3^e apparition aux deux dates sélectionnées tracée dans le référentiel de l’étoile. La ligne verticale indique la longueur d’onde au repos de la raie $H\alpha$. Les faibles raies d’absorption de part et d’autre de la raie $H\alpha$ sont des raies telluriques. Les faibles bosses situées sur le bord rouge de la raie $H\alpha$ représentent la 3^e apparition. Elles sont indiquées sur chaque spectre par une flèche noire. **Panneau de gauche :** série temporelle du 04-09-2013 avec AURELIE. **Panneau central :** série temporelle du 14-09-2014 avec AURELIE. **Panneau de droite :** opus d’observations passées et postérieures de la 3^e apparition issues de différentes campagnes. Les phases de pulsation φ et Blazhko ψ sont respectivement indiquées en texte noir et en gras.

L’analyse d’observations réalisées au cours d’autres campagnes passées et postérieures (Fig. 1, panneau de droite) ont montré que la 3^e émission est présente à chaque cycle de pulsation autour de $\varphi = 0,3$ i.e., juste après le maximum de luminosité. De plus elle est visible quelque soit la phase Blazhko ψ (notée en gras dans la figure). Ce qui montre que ce phénomène semble être indépendant de l’effet Blazhko.

3.2 Origine physique de la 3^e émission de l’hydrogène

Le mécanisme de pulsation basé sur le mécanisme $\kappa - \gamma$ donne naissance à l’onde de choc principale qui apparaît dans l’atmosphère autour de la phase $\varphi \sim 0,91$. Elle a pour effet immédiat de soulever les différentes

couches le long de sa propagation. Autour de la phase $\varphi \sim 0,3$, les couches inférieures de la photosphère atteignent alors leur rayon maximum (Fokin & Gillet 1997). Leurs vitesses sont par conséquent quasiment nulles avant de retomber vers le cœur de l'étoile. Ensuite l'onde de choc principale du cycle en cours poursuit sa propagation et rencontre les couches supérieures de l'atmosphère stellaire entraînées par la pulsation précédente à environ 1,35 rayon photosphérique. Durant cette ascension son intensité décroît et l'intense émission décalée vers le bleu de la raie $H\alpha$ disparaît : le choc n'est alors plus radiatif et s'atténue.

Cependant les couches situées en aval du front de l'onde de choc n'ont pas encore terminé la redescente suite au cycle de pulsation précédent. Ce mouvement de chute des couches supérieures de l'atmosphère entraîne alors la compression du gaz localisé devant l'onde de choc. Cette compression est alors amplifiée par le mouvement ascendant des couches du cycle en cours. Il est ainsi assez logique de penser que la 3^e apparition serait produite dans cette zone subissant une importante compression et donc une élévation de température conséquente.

4 Structure dynamique de l'atmosphère stellaire

4.1 Choix d'une stratégie d'observation

Cette collaboration pro-am a permis par ailleurs d'investiguer la dynamique atmosphérique en couvrant désormais des cycles entiers de pulsation. Néanmoins ce n'est pas chose aisée de couvrir un cycle entier en une nuit vu que la période d'un cycle est de 13,6 h. Ce n'est pas la seule difficulté. En plus de l'effet Blazhko, les différences induites par l'observation de cycles non consécutifs peuvent brouiller la visibilité des phénomènes mis en jeu compte-tenu du caractère non-linéaire de la dynamique atmosphérique. Il est donc ainsi nécessaire d'observer aussi souvent que possible en exploitant toutes les fenêtres météo à disposition.

Cette situation contraignante nous a conduit à automatiser un télescope de 35 cm équipé d'un spectrographe haute résolution situé à l'Observatoire de Chelles (Lemoult et al. in prep.). Cet instrument basé sur un spectrographe échelle couvre une bande spectrale allant de 4300 à 7100 Å avec un pouvoir de résolution de $R = 10\,500$ à $\lambda = 5896,92$. Ce système a permis de réaliser plus de 47 h d'observations en seulement 11 j avec un échantillonnage temporel de 15 min. Ces 11 j sont largement suffisants pour mener l'étude des différents phénomènes ponctuant un cycle typique de pulsation mais pas ceux durant un cycle Blazhko vu que seulement 28% de sa période est couverte. Il a donc alors été possible pour la première fois de mener une étude détaillée de la dynamique atmosphérique de RR Lyr durant une succession de cycles de pulsation proches.

4.2 Scénario de la dynamique atmosphérique de RR Lyr

La Fig. 2 montre une partie des spectres obtenus lors de la campagne portant sur deux raies : $H\alpha$ et Na D1. Ces deux raies présentent un phénomène de dédoublement. Mais comme la composante rouge de la raie Na D1 possède une vitesse constante, son origine a été attribuée au milieu interstellaire (ISM) le long de la ligne de visée. L'intense émission bleue de la raie $H\alpha$ associée au choc principal est facilement détectable autour de $\varphi \sim 0,9$ i.e., juste avant le phénomène de dédoublement qui correspond au moment de la seconde apparition tenue vers $\varphi \sim 0,7$ du cycle suivant mais dans la continuité du processus physique.

À partir de l'évolution des différents phénomènes observés comme notamment le dédoublement de raie, les émissions décalées vers le bleu et celle vers le rouge (en particulier les 3 apparitions de la raie $H\alpha$), nous avons déterminé les principaux phénomènes de la dynamique qui animent l'atmosphère de RR Lyr durant un cycle de pulsation, à savoir :

- $0,874 \leq \varphi \leq 0,892$: l'émergence de l'onde de choc principale trouvant son origine dans le mécanisme κ qui a lieu dans les couches subphotosphériques ;
- $0,892 \leq \varphi \leq 0,929$: phase radiative de l'onde de choc où la raie $H\alpha$ présente l'intense et bien connue émission décalée vers le bleu, c'est-à-dire la première apparition. Le phénomène de dédoublement de raie met en évidence le passage de l'onde choc ascendante entraînant avec elle une partie des couches qui sont alors en mouvement de chute balistique. Le mouvement des couches s'inverse. Il est alors comparable à celui des plis d'un accordéon se dilatant suite à une contraction. Durant cette phase, l'onde décélère ;
- $\varphi = 0,320$: les couches de Na formées dans la basse atmosphère atteignent leur expansion maximum ;
- $\varphi = 0,455$: les couches de $H\alpha$ atteignent alors leur expansion maximum, c'est-à-dire lorsque l'onde de choc principale atteint les couches supérieures ;
- $0,320 \leq \varphi \leq 0,455$: mouvement de chute en deux temps ; la région juste devant l'onde de choc est intensément compressée entre l'onde ascendante du choc principal et le mouvement de chute balistique

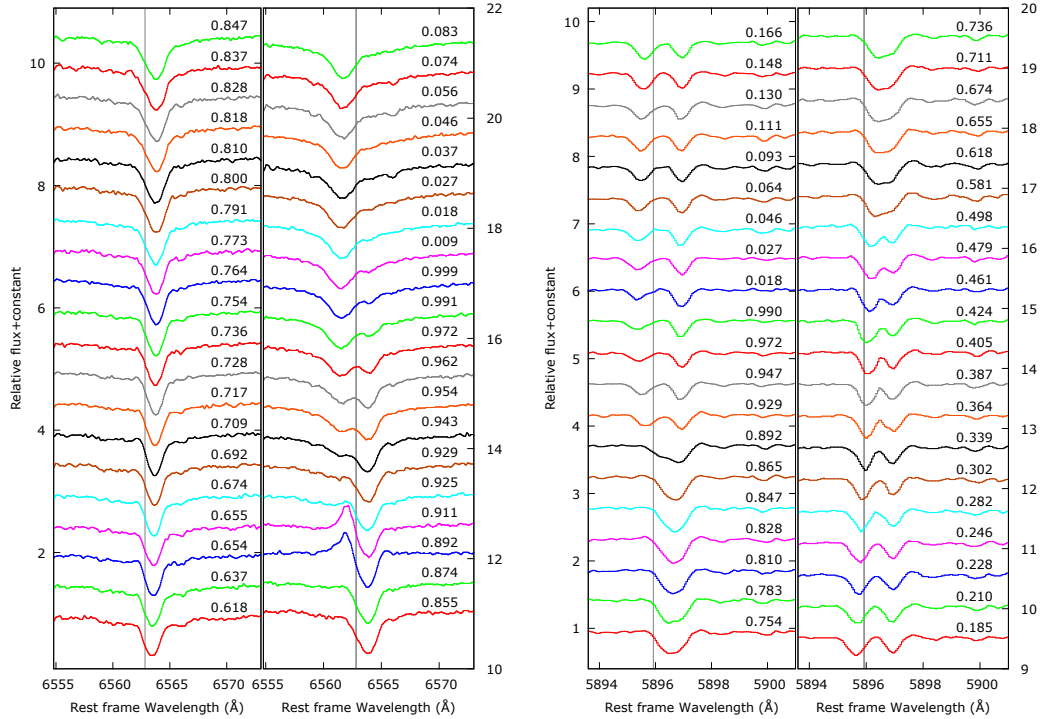


Figure 2. Ces figures montrent une partie des séries temporelles d’avril 2017 représentées dans le référentiel stellaire à différentes phases de pulsation. La ligne verticale représente le longueur d’onde au repos de la raie étudiée. La résolution temporelle est de 15 min. **Panneau de gauche :** raie H α avec la première apparition vers $\varphi \sim 0,91$ suivie du phénomène de dédoublement de raie. **Panneau de droite :** raie Na D1 dont la composante rouge est due à l’ISM.

des couches supérieures à la fin du cycle précédent. Une faible émission se forme sur le côté rouge de la raie H α : c’est la 3^e apparition ;

- $0,600 \leq \varphi \leq 0,874$: les couches supérieures terminent leur chute sur les couches en profondeur produisant alors une faible émission décalée vers le bleu sur la raie H α qui n’est autre que la 2^e apparition ($\varphi \sim 0,7$). Il est à noter que l’intensité de cette émission dépend directement de la phase Blazhko.

Au delà de ces phénomènes il a été possible de suivre l’évolution de l’énergie du choc principal. Tandis que [Preston et al. \(1965\)](#) ont montré que durant l’ascension de l’onde de choc son intensité ainsi que sa vitesse augmentaient, nos observations ont montré seulement sa décélération. En effet, durant la première apparition ($0,90 \leq \varphi \leq 1,04$), la vitesse du front d’onde décroît de 155 km s^{-1} ($Mach \sim 15$) à 60 km s^{-1} , via deux mécanismes successifs :

- (d’intenses) pertes radiatives jusqu’à $\varphi \sim 0,95$;
- une atténuation du phénomène dans un second temps.

Il aussi a été observé que cette modulation de l’énergie semble être particulièrement influencée par l’effet Blazhko.

5 Conclusion

La première partie de cette collaboration pro-am a montré la présence de la 3^e apparition de la raie H α dans le spectre de RR Lyr, chose encore jamais mise en évidence dans cette étoile. Cette émission est clairement visible dans l’intervalle de phase $0,188 \leq \varphi \leq 0,407$, *i.e.* durant près de 20% de la période de pulsation. L’intensité du pic représente 13% du continuum, ce qui est très faible, et est située sur le flanc rouge de la raie H α . Cette observation inédite a conduit en 2017 à une publication dans un journal à comité de lecture : [Gillet et al. \(2017\)](#). Cet article a ceci de notable que c’est le premier dans ce domaine où un amateur a contribué de façon importante tant dans l’analyse des données spectrales que dans la rédaction.

La seconde partie de cette collaboration porte sur l’étude de la dynamique atmosphérique de RR Lyr durant un cycle typique de pulsation. La modulation de l’énergie de l’onde de choc en est l’un des principaux résultats.

Dans une première phase par un choc isotherme avec dissipation radiative, puis suivi par un refroidissement adiabatique lors de l'atténuation du front d'onde. Ces résultats ont donné lieu à un second article publié dans A&A (Gillet et al. 2019).

Cette fructueuse collaboration faisant intervenir plus de 20 "amateurs" poursuit toujours son cours et pointe du doigt l'importance d'une méthode d'observation souvent peu usitée : la spectroscopie à moyenne résolution ($R \sim 10\,000$, mais qui est cependant suffisante pour ce genre d'études même utilisée sur d'autres étoiles) combinée à une haute cadence temporelle (pour ce type d'observations). Ce moyen permet d'importantes améliorations dans la compréhension des processus physiques mis en jeu. Ce type de collaborations pro-am est par conséquent à encourager.

Références

- Baranne, A., Queloz, D., Mayor, M., & al. 1996, A&AS, 119, 373
Chadid, M., Kolenberg, K., Aerts, C., & Gillet, D. 1999, A&A, 352, 201
Chadid, M. & Preston, G. W. 2013, MNRAS, 434, 552
Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013
Gillet, D., Burnage, R., Kohler, D., & al. 1994, A&AS, 108, 181
Gillet, D., Mauclore, B., Garrel, T., & al. 2017, A&A, 607, A51
Gillet, D., Mauclore, B., Lemoult, T., et al. 2019, A&A, 623, A109
Klotz, A., Delmas, R., Marchais, D., & al. 2012, in Astronomical Society of India Conference Series, Vol. 7, Astronomical Society of India Conference Series, .15
Mauclore, B. 2017, SpcAudace : Spectroscopic processing and analysis package of Audela software, Astrophysics Source Code Library
Preston, G. W. 2011, AJ, 141, 6
Preston, G. W., Smak, J., & Paczynski, B. 1965, ApJS, 12, 99
Thizy, O. & Cocharad, F. 2011, in IAU Symposium, Vol. 272, Active OB Stars : Structure, Evolution, Mass Loss, and Critical Limits, ed. C. Neiner, , G. Wade, , G. Meynet, & G. Peters, 282–283