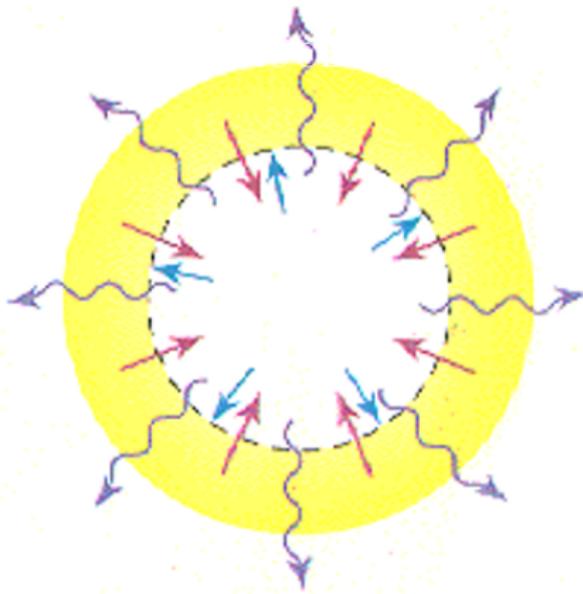


RR Lyr, dynamique atmosphérique et pulsations : une aventure de chercheurs

B. MAUCLAIRE



Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :
 1. Ce qu'est une étoile pulsante

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :
 1. Ce qu'est une étoile pulsante
 2. Le contexte de cette collaboration pro-am

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :
 1. Ce qu'est une étoile pulsante
 2. Le contexte de cette collaboration pro-am
 3. L'observation inédite de la 3^e émission de $H\alpha$ dans RR Lyr

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :
 1. Ce qu'est une étoile pulsante
 2. Le contexte de cette collaboration pro-am
 3. L'observation inédite de la 3^e émission de $H\alpha$ dans RR Lyr
 4. L'étude de la dynamique atmosphérique

Introduction

- RR Lyr est une étoile pulsante de période 13,6 h
- Elle appartient à la population II et subit l'effet Blazhko
- C'est la plus brillante des étoiles RR Lyrae du ciel
- Mais ce n'est pas forcément la mieux connue
- Une collaboration pro-am est alors née
- Buts : étude de la dynamique atmosphérique et des ondes de choc
- Nous allons voir :
 1. Ce qu'est une étoile pulsante
 2. Le contexte de cette collaboration pro-am
 3. L'observation inédite de la 3^e émission de $H\alpha$ dans RR Lyr
 4. L'étude de la dynamique atmosphérique
 5. D'autres étoiles pulsantes à étudier

Partie A :

Qu'est-ce qu'une étoile pulsante ?

Les étoiles sont variables

Les étoiles sont
variables

Place de RR Lyr
parmi les variables

Pulsations et
ondes de choc

L'effet Blazho

RR Lyr est une étoile variable

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

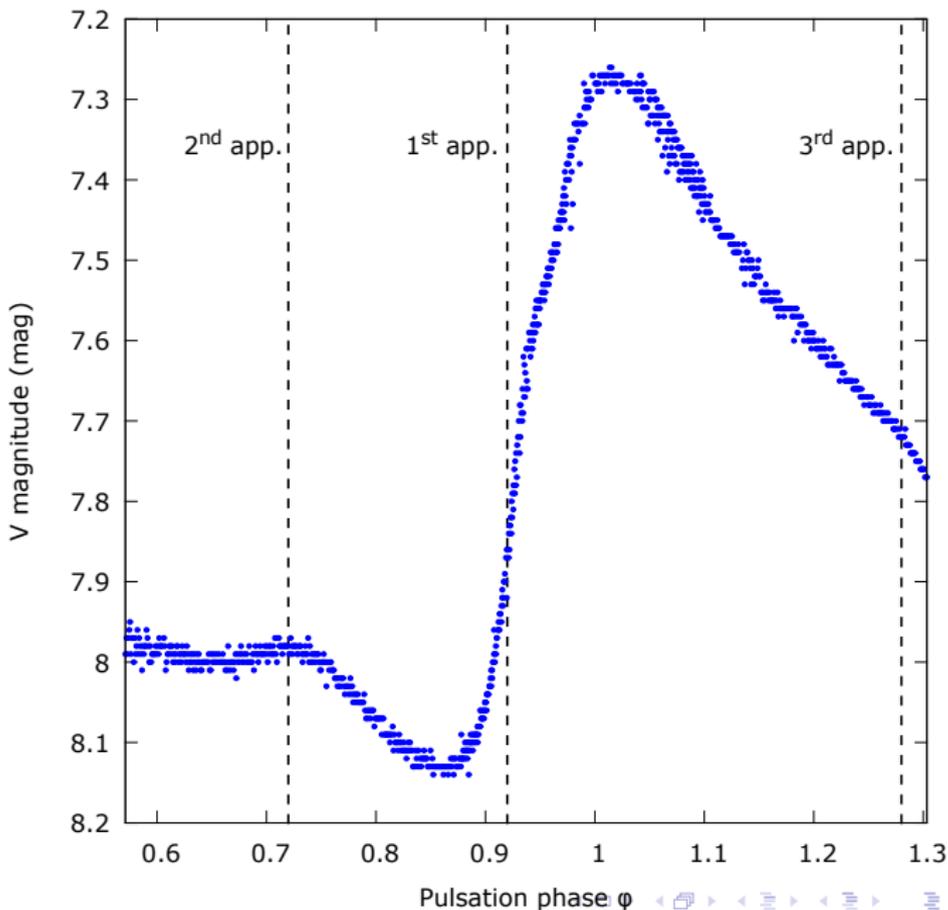
B. MAUCLAIRE

Les étoiles sont
variables

Place de RR Lyr
parmi les variables

Pulsations et
ondes de choc

L'effet Blazho



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

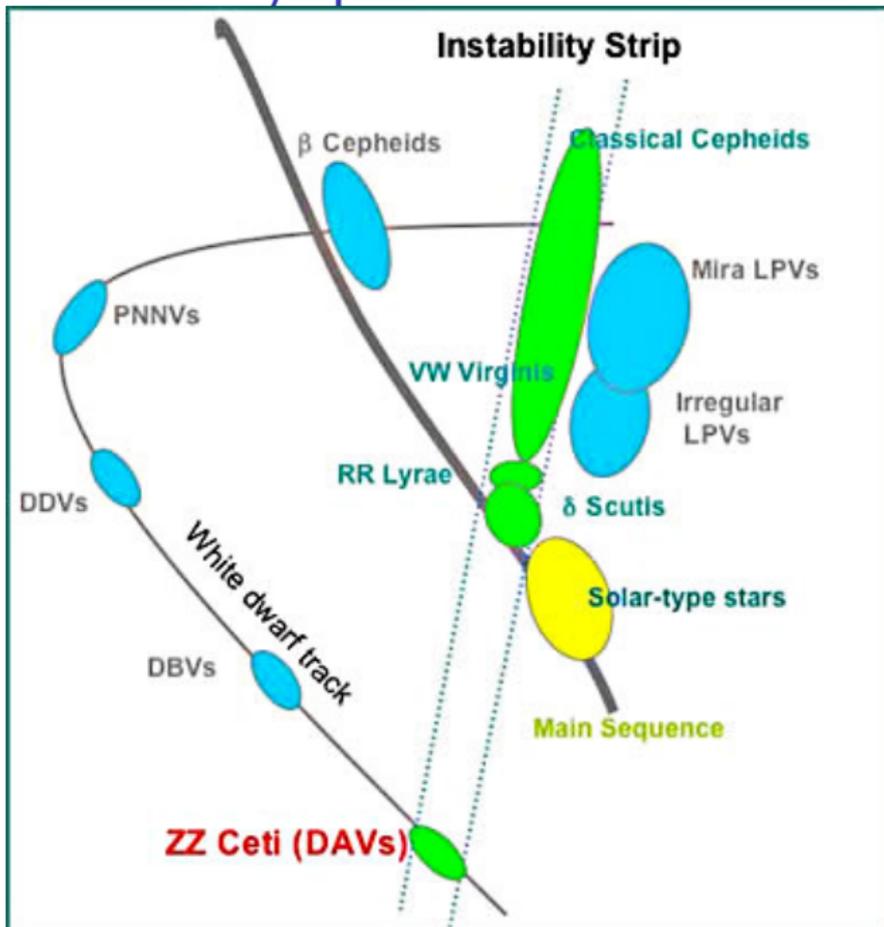
Les étoiles sont
variables

Place de RR Lyr
parmi les variables

Pulsations et
ondes de choc

L'effet Blazho

Place de RR Lyr parmi les variables



Place de RR Lyr parmi les variables

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

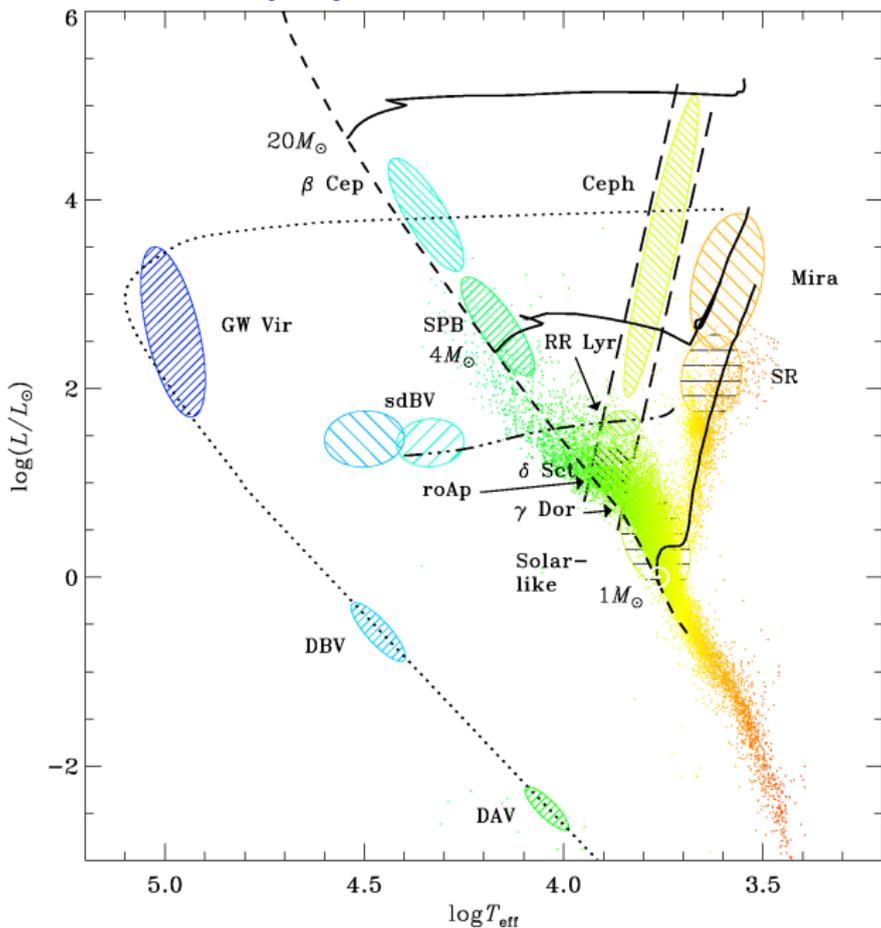
B. MAUCLAIRE

Les étoiles sont
variables

Place de RR Lyr
parmi les variables

Pulsations et
ondes de choc

L'effet Blazho



Pulsations et ondes de choc 1/2

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent

Pulsations et ondes de choc 1/2

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent
- Comparable à une casserole d'eau avec un couvercle plein d'eau, posé sur un réchaud :

Pulsations et ondes de choc 1/2

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent
- Comparable à une casserole d'eau avec un couvercle plein d'eau, posé sur un réchaud :



- ▶ Lors de l'ébullition, la vapeur pousse le couvercle

Pulsations et ondes de choc 1/2

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent
- Comparable à une casserole d'eau avec un couvercle plein d'eau, posé sur un réchaud :



- ▶ Lors de l'ébullition, la vapeur pousse le couvercle
- ▶ Le couvercle s'ouvre : la gravité est vaincue momentanément
- ▶ La pression à l'intérieur de la casserole chute alors soudainement

Pulsations et ondes de choc 1/2

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent
- Comparable à une casserole d'eau avec un couvercle plein d'eau, posé sur un réchaud :



- ▶ Lors de l'ébullition, la vapeur pousse le couvercle
 - ▶ Le couvercle s'ouvre : la gravité est vaincue momentanément
 - ▶ La pression à l'intérieur de la casserole chute alors soudainement
 - ▶ Le couvercle se remet en place et le cycle recommence
- Le couvercle dans les étoiles pulsantes est une couche où H, He et He⁺ sont ionisés

Pulsations et ondes de choc 2/2

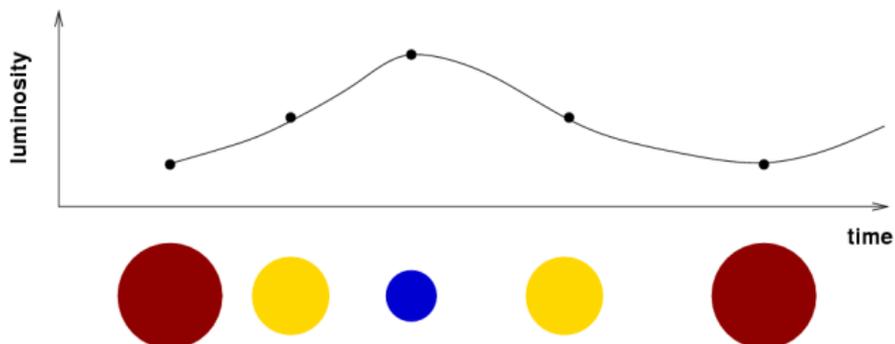
- La recombinaison des électrons ambiants sur ces ions produit des électrons rapides poussant les couches supérieures (κ -mécanisme)

Pulsations et ondes de choc 2/2

- La recombinaison des électrons ambiants sur ces ions produit des électrons rapides poussant les couches supérieures (κ -mécanisme)
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)

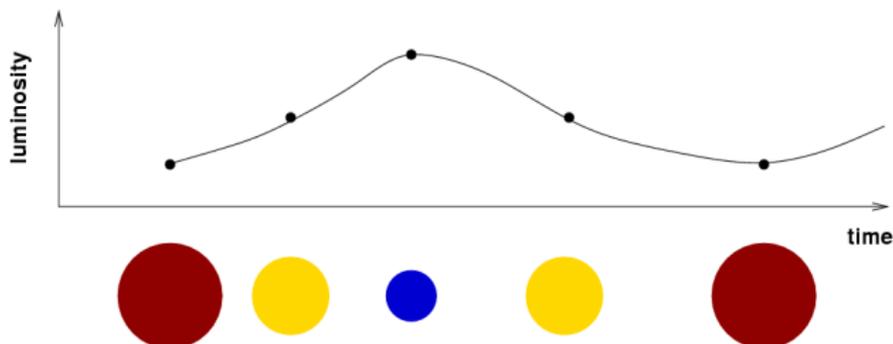
Pulsations et ondes de choc 2/2

- La recombinaison des électrons ambiants sur ces ions produit des électrons rapides poussant les couches supérieures (κ -mécanisme)
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)



Pulsations et ondes de choc 2/2

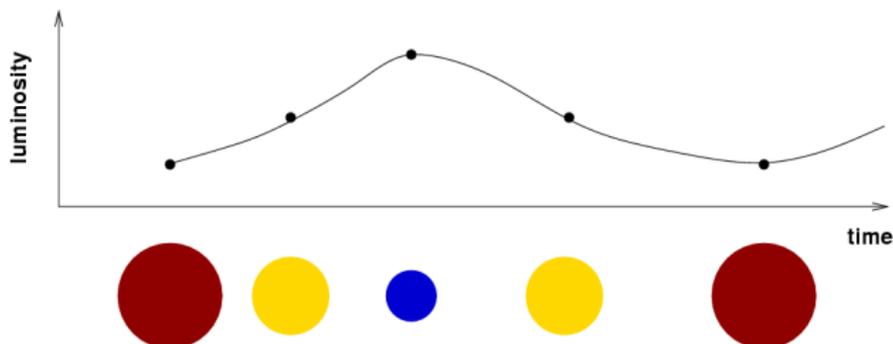
- La recombinaison des électrons ambiants sur ces ions produit des électrons rapides poussant les couches supérieures (κ -mécanisme)
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)



- Puis se contractent et se réchauffent alors (bleuit) : l'étoile se rétracte et gagne en luminosité

Pulsations et ondes de choc 2/2

- La recombinaison des électrons ambiants sur ces ions produit des électrons rapides poussant les couches supérieures (κ -mécanisme)
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (**rougit**)



- Puis se contractent et se réchauffent alors (**bleuit**) : l'étoile se rétracte et gagne en luminosité
- Cette poussée électronique crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

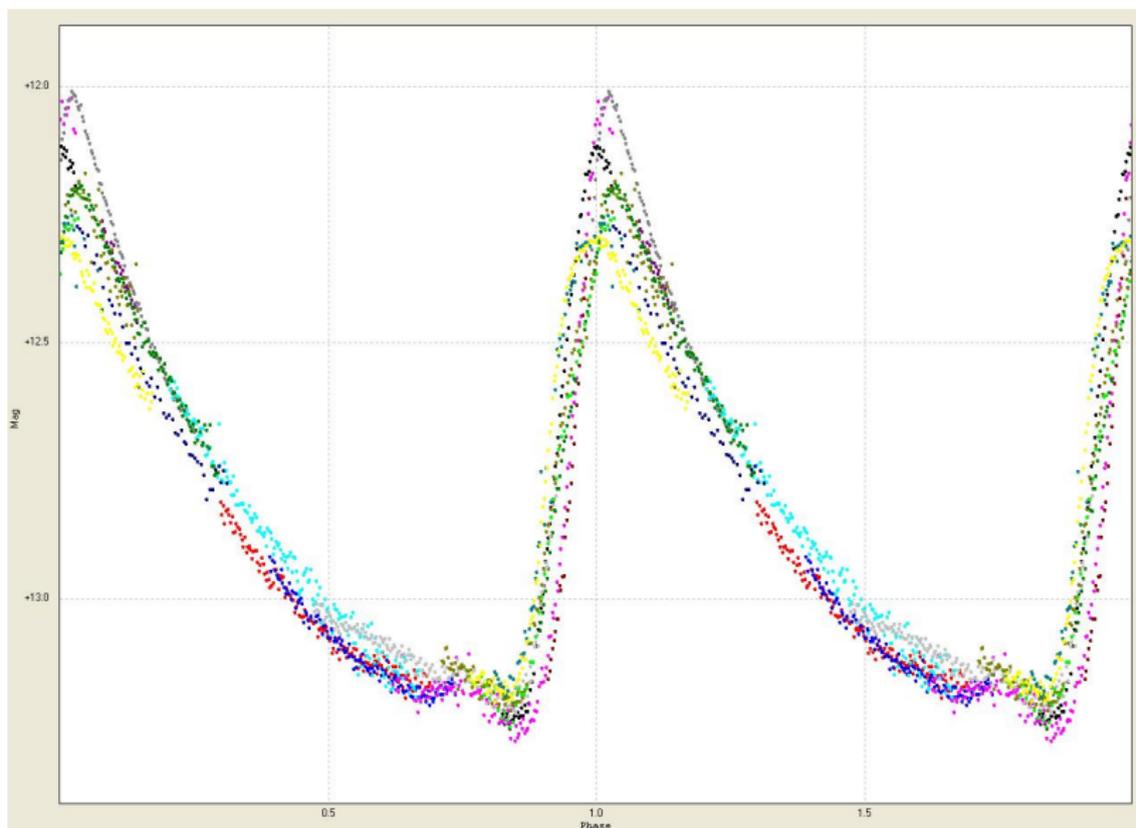
Les étoiles sont
variables

Place de RR Lyr
parmi les variables

Pulsations et
ondes de choc

L'effet Blazho

L'effet Blazhko (CX Lyr)



Partie B :

Contexte et bref historique

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013
- But initial : observations des maxima de pulsation
pour étudier l'effet Blazhko

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013
- But initial : observations des maxima de pulsation
pour étudier l'effet Blazhko
- Inédit : la 3^e apparition en émission de la raie $H\alpha$
est observée pour la première fois dans RR Lyr

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013
- But initial : observations des maxima de pulsation
pour étudier l'effet Blazhko
- Inédit : la 3^e apparition en émission de la raie $H\alpha$
est observée pour la première fois dans RR Lyr
- Un article est alors publié dans la revue A&A :
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2017A%26A...607A..51G>

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013
- But initial : observations des maxima de pulsation
pour étudier l'effet Blazhko
- Inédit : la 3^e apparition en émission de la raie $H\alpha$
est observée pour la première fois dans RR Lyr
- Un article est alors publié dans la revue A&A :
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2017A%26A...607A..51G>
- Mais il n'y pas eu que la "3^e émission"

Une collaboration pro-am insoupçonnée

- Lors des Spectro Star Party d'été à l'OHP :
rencontre de Denis Gillet (CNRS-OHP)
- Une collaboration pro-am sur les étoiles pulsantes
est alors initiée en 2013
- But initial : observations des maxima de pulsation
pour étudier l'effet Blazhko
- Inédit : la 3^e apparition en émission de la raie $H\alpha$
est observée pour la première fois dans RR Lyr
- Un article est alors publié dans la revue A&A :
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2017A%26A...607A..51G>
- Mais il n'y pas eu que la "3^e émission"
- Voyons d'abord quelles ont été les étapes menant à
cet article

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL
- Entre 2014 et 2017, des workshops ont lieu chaque année :

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL
- Entre 2014 et 2017, des workshops ont lieu chaque année :
 - ▶ Bilan des observations

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL
- Entre 2014 et 2017, des workshops ont lieu chaque année :
 - ▶ Bilan des observations
 - ▶ Formation astrophysique avec des intervenants professionnels

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL
- Entre 2014 et 2017, des workshops ont lieu chaque année :
 - ▶ Bilan des observations
 - ▶ Formation astrophysique avec des intervenants professionnels
 - ▶ Présentation et développement d'un spectrographe échelle innovant

2013 : début d'une aventure intense

- 2013/4/17 : workshop-acte fondateur du survey RR Lyr
- S'en suit une série de 13 nuits d'observation au T152 de l'OHP avec AURELIE
- Des observations sont réalisées en parallèle par chacun : T20 à T35 + LHIRES3 et ESHELL
- Entre 2014 et 2017, des workshops ont lieu chaque année :
 - ▶ Bilan des observations
 - ▶ Formation astrophysique avec des intervenants professionnels
 - ▶ Présentation et développement d'un spectrographe échelle innovant
- Un régal pour progresser en astrophysique et en méthodes d'analyse

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les
+3000 spectres :

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique
 - ▶ Tracé dans le référentiel de l'étoile (Rest frame) permettant la mesure de vitesses liées à l'atmosphère

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique
 - ▶ Tracé dans le référentiel de l'étoile (Rest frame) permettant la mesure de vitesses liées à l'atmosphère
- Mise en place de choix pour les tracés graphiques :

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique
 - ▶ Tracé dans le référentiel de l'étoile (Rest frame) permettant la mesure de vitesses liées à l'atmosphère
- Mise en place de choix pour les tracés graphiques :
 - ▶ Tracés **sans lissage** pour discerner l'information du bruit

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique
 - ▶ Tracé dans le référentiel de l'étoile (Rest frame) permettant la mesure de vitesses liées à l'atmosphère
- Mise en place de choix pour les tracés graphiques :
 - ▶ Tracés **sans lissage** pour discerner l'information du bruit
 - ▶ Affichage de la phase de pulsation

Méthodes d'exploitation des spectres

- Développement de scripts (Audela) pour gérer les +3000 spectres :
Calcul d'éphémérides (φ , ψ), de sélection de zone en longueur d'onde, de sélection à des phases de pulsation φ , de tracé de multiplotphasés, etc.
- Préparation des spectres :
 - ▶ Correction héliocentrique systématique
 - ▶ Tracé dans le référentiel de l'étoile (Rest frame) permettant la mesure de vitesses liées à l'atmosphère
- Mise en place de choix pour les tracés graphiques :
 - ▶ Tracés **sans lissage** pour discerner l'information du bruit
 - ▶ Affichage de la phase de pulsation
 - ▶ Sortie PDF supportant le zoom et prête à la publication

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

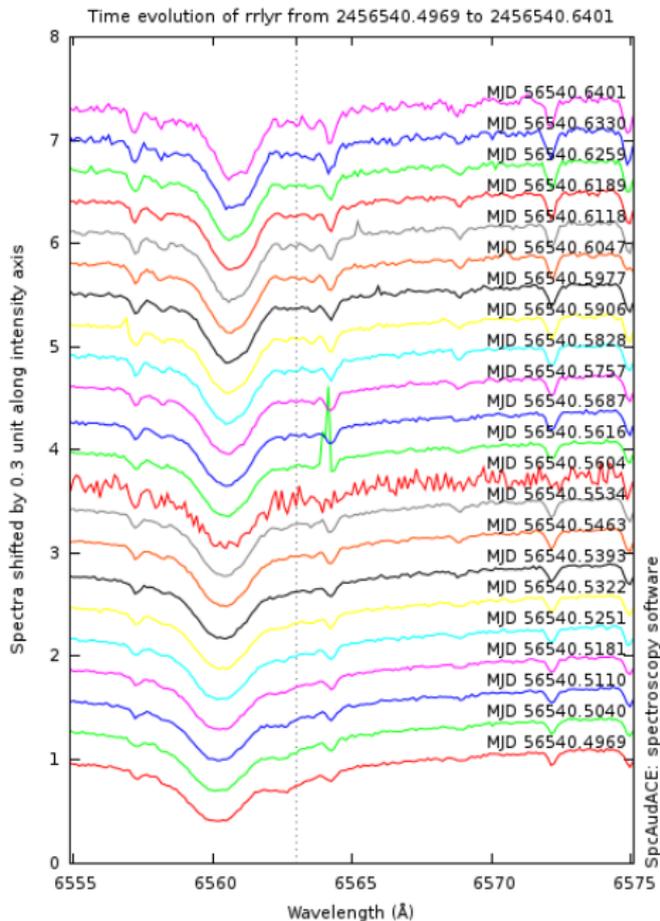
B. MAUCLAIRE

Une collaboration
pro-am
insoupçonnée

2013 : début d'une
aventure intense

Méthodes
d'exploitation des
spectres

Exemple de graphique : avant



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

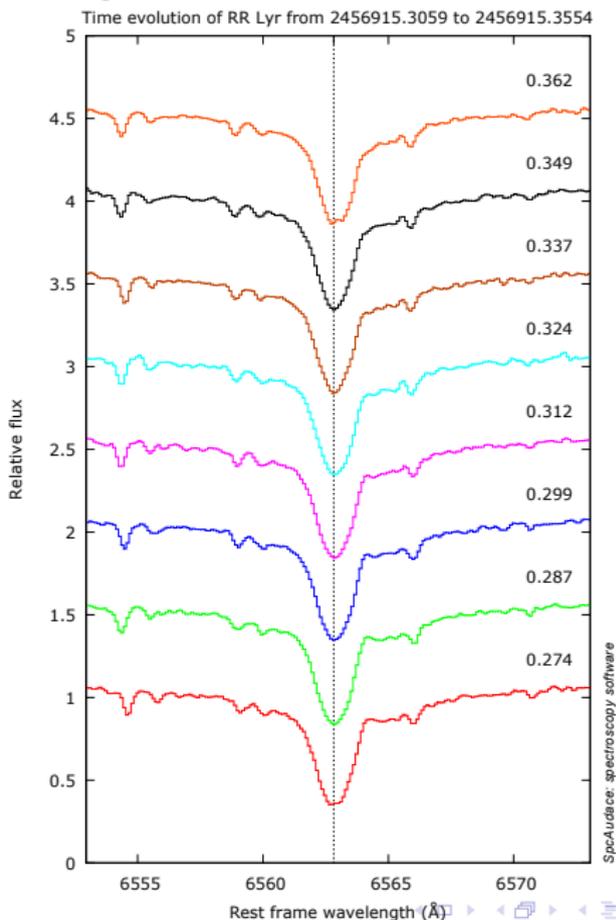
B. MAUCLAIRE

Une collaboration
pro-am
insoupçonnée

2013 : début d'une
aventure intense

Méthodes
d'exploitation des
spectres

Exemple de graphique : après



Partie C :

Première observation de la 3^e émission de H α dans RR Lyr

1. Deux observations décisives pour le modèle de D. Gillet

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de $H\alpha$

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de $H\alpha$
- Deux observations furent programmées au T152 :
 $\varphi \sim 0.3$ et $\psi \sim 0.9$

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de $H\alpha$
- Deux observations furent programmées au T152 :
 $\varphi \sim 0.3$ et $\psi \sim 0.9$
 - ▶ En effet, à ce stade nous croyions que la 3^e émission a lieu lors des maxima Blazhko ($\psi \sim 1$)

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de H α
- Deux observations furent programmées au T152 :
 $\varphi \sim 0.3$ et $\psi \sim 0.9$
 - ▶ En effet, à ce stade nous croyions que la 3^e émission a lieu lors des maxima Blazhko ($\psi \sim 1$)
 - ▶ Victoire : le soir des observations, la 3^e émission fut même détectable sur les données brutes !

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de H α
- Deux observations furent programmées au T152 :
 $\varphi \sim 0.3$ et $\psi \sim 0.9$
 - ▶ En effet, à ce stade nous croyions que la 3^e émission a lieu lors des maxima Blazhko ($\psi \sim 1$)
 - ▶ Victoire : le soir des observations, la 3^e émission fut même détectable sur les données brutes !
- Au 05/2016, la 3^e émission fut observée 4 fois

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

Deux observations décisives

- En 1997¹, D. Gillet et al. ont élaboré un modèle d'étoile pulsante
- Un des points pour le vérifier : la 3^e émission de H α
- Deux observations furent programmées au T152 :
 $\varphi \sim 0.3$ et $\psi \sim 0.9$
 - ▶ En effet, à ce stade nous croyions que la 3^e émission a lieu lors des maxima Blazhko ($\psi \sim 1$)
 - ▶ Victoire : le soir des observations, la 3^e émission fut même détectable sur les données brutes !
- Au 05/2016, la 3^e émission fut observée 4 fois
- Observations retenues (SNR) :
le **2014/09/14** et **2013/09/04**

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

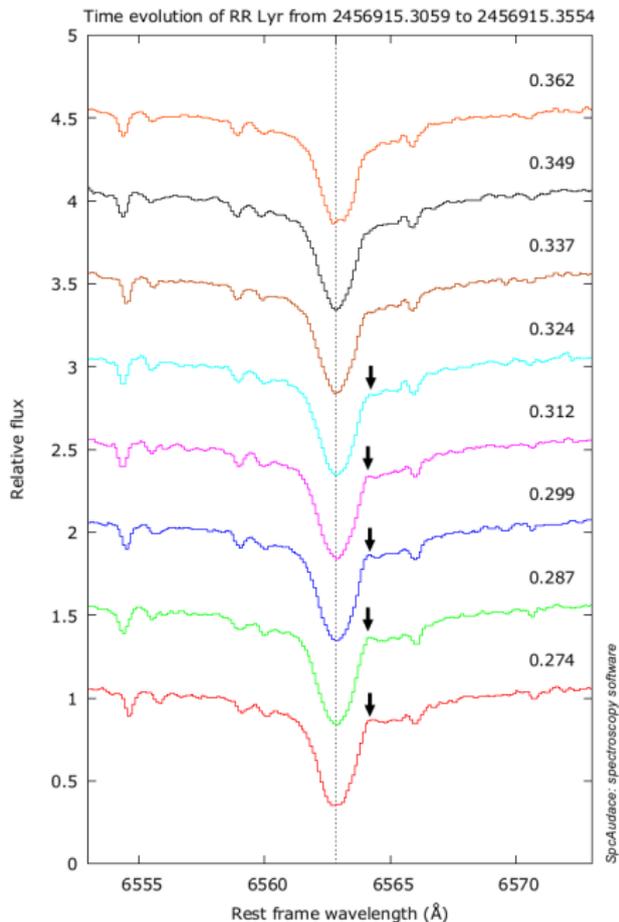
Extraction de la
composante en
émission

Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

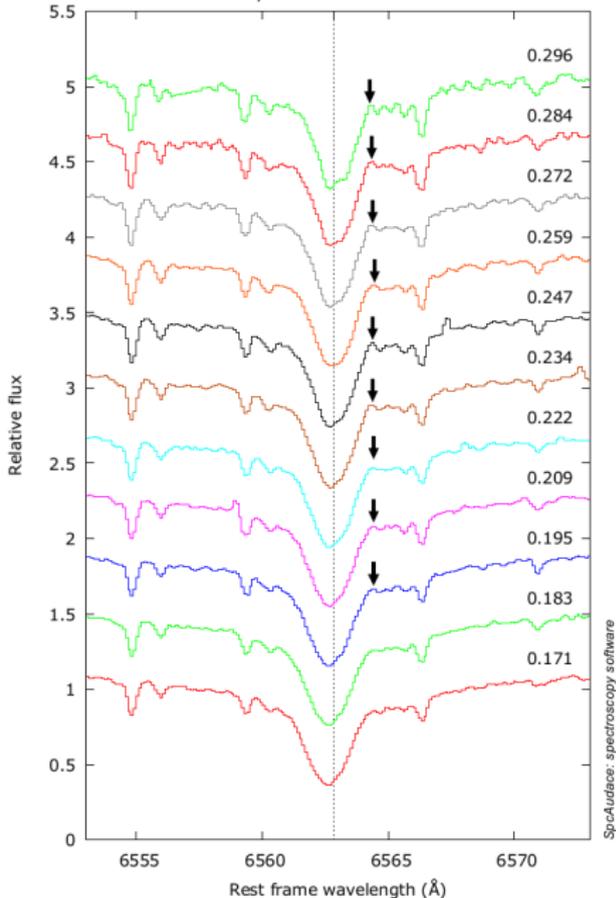
Bilan de la 3^e
émission

Observation du 2014/09/14 :



Observation du 2013/09/04 :

Time evolution of rrl_{yr} from 2456540.5687 to 2456540.6401



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

Extraction de la
composante en
émission

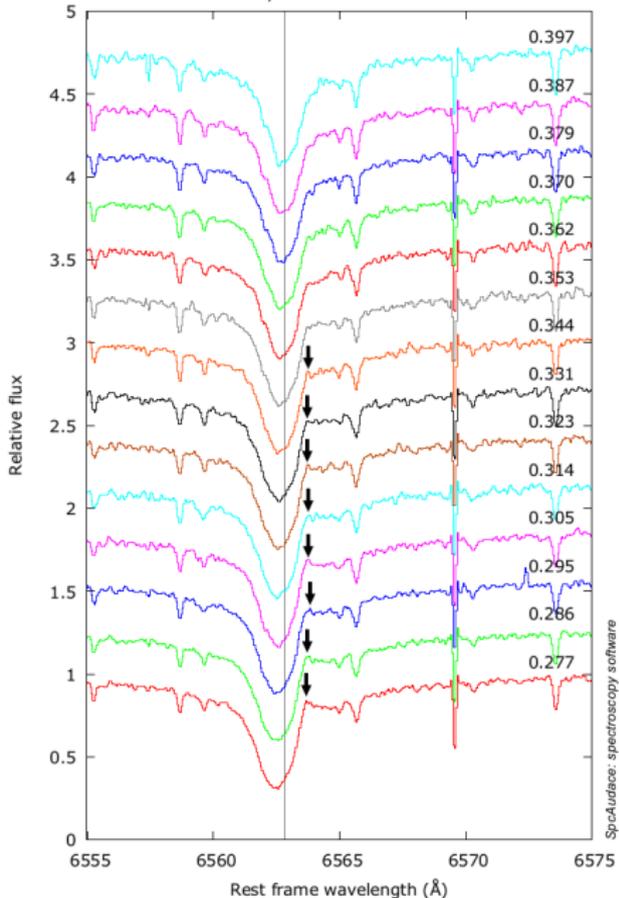
Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

Bilan de la 3^e
émission

Mais aussi au T193 le 1997/8/30 !

Time evolution of RR Lyr from 2450691.5524 to 2450691.6202



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

Extraction de la
composante en
émission

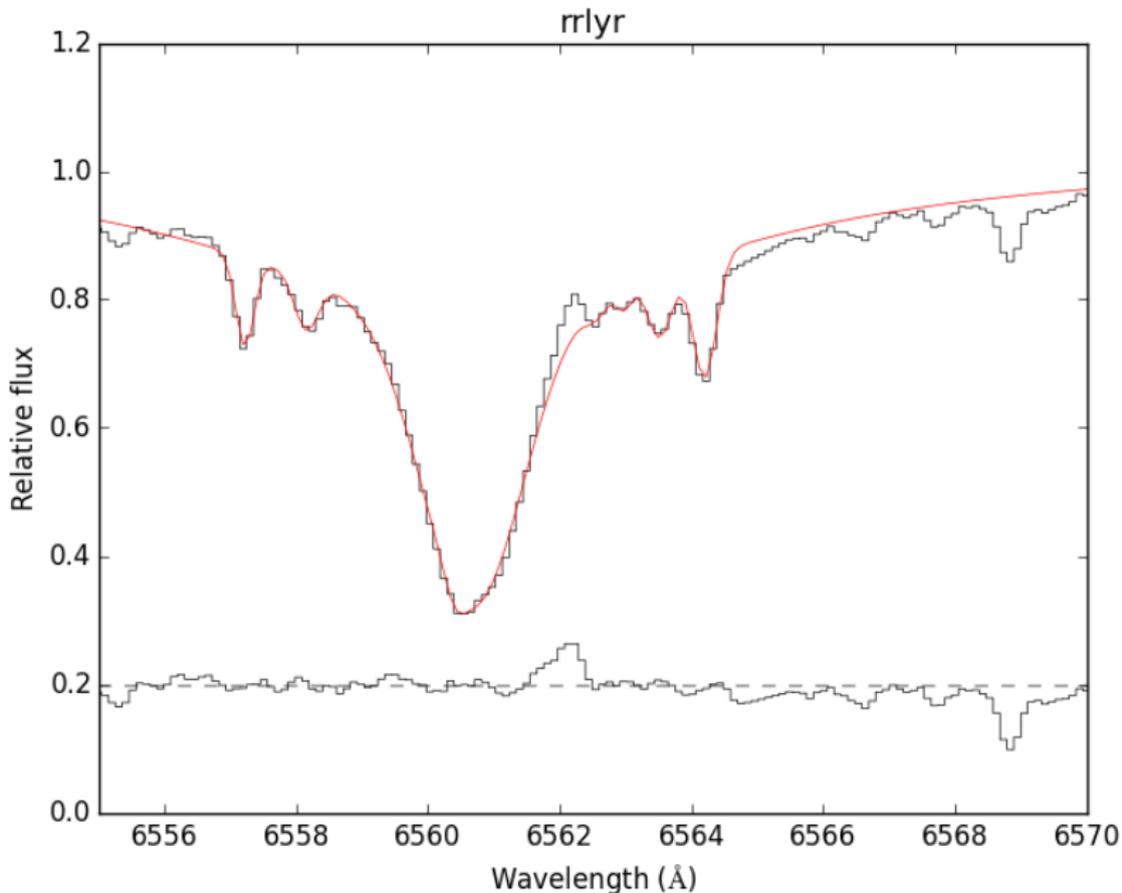
Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

Bilan de la 3^e
émission

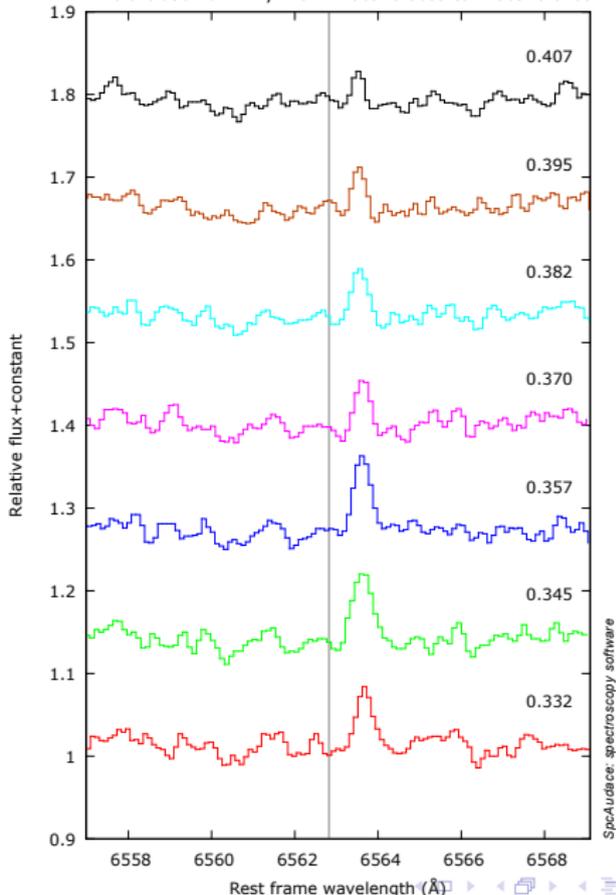
2. Extraction de la composante en émission

Extraction de la composante en émission



Forme de la 3^e émission

Time evolution of RR Lyr from 2456915.3059 to 2456915.3483



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

Extraction de la
composante en
émission

Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

Bilan de la 3^e
émission

3. Interprétation du phénomène

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig* ?

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig*?
 1. L'onde de choc de la pulsation du cycle en cours est ascendante

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig*?
 1. L'onde de choc de la pulsation du cycle en cours est ascendante
 2. Les couches élevées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig*?
 1. L'onde de choc de la pulsation du cycle en cours est ascendante
 2. Les couches élevées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile
 3. Création d'une zone de compression chauffée, précédant l'onde de choc

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig*?
 1. L'onde de choc de la pulsation du cycle en cours est ascendante
 2. Les couches élevées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile
 3. Création d'une zone de compression chauffée, précédent l'onde de choc
- La 3^e émission serait produite par la mince couche chaude

Interprétation du phénomène

- La 3^e émission est visible à chaque cycle de pulsation et est indépendante de la phase Blazhko
- Explication de son origine : *2 cols+fig* ?
 1. L'onde de choc de la pulsation du cycle en cours est ascendante
 2. Les couches élevées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile
 3. Création d'une zone de compression chauffée, précédent l'onde de choc
- La 3^e émission serait produite par la mince couche chaude
- Le modèle théorique¹ de D. Gillet et al. est en accord avec ces observations

¹ Fokin, A. B. & Gillet, D. 1997, A&A, 325, 1013

4. Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

- J'avais déjà une expérience dans la rédaction

Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

- J'avais déjà une expérience dans la rédaction
- Je connaissais le préparateur de texte $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$

Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

- J'avais déjà une expérience dans la rédaction
- Je connaissais le préparateur de texte $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$
- Du piano à 4 mains avec D. Gillet dans la bonne ambiance

Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

- J'avais déjà une expérience dans la rédaction
- Je connaissais le préparateur de texte \LaTeX
- Du piano à 4 mains avec D. Gillet dans la bonne ambiance
- Trois aller-retours, puis accepté le 2017-08-22 !

A&A 607, A51 (2017)
DOI: 10.1051/0004-6361/201629897
© ESO 2017

**Astronomy
&
Astrophysics**

First observation of H α redshifted emission in RR Lyr^{*} Evidence of a supersonic infalling motion of the atmosphere

D. Gillet¹, B. Maucilaire², T. Garrel³, T. Lemoult⁴, Ph. Mathias⁵, T. de France⁶, J.-S. Devaux⁷, H. Boussier⁸,
D. Verilhac⁹, G. Brabant¹⁰, J. Desbordes¹¹, O. Garde¹², and the GRRR Collaboration^{13, **}

¹ Observatoire de Haute-Provence – CNRS/PYTHEAS/Université d'Aix-Marseille, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France
e-mail: denis.gillet@osupytheas.fr

² Observatoire du Val de l'Arc, route de Peynier, 13530 Trets, France
e-mail: bma.ova@gmail.com

³ Observatoire de Fontcaude, 19 Av. du Hameau du golf, 34990 Juvignac, France

⁴ Observatoire de Chelles, 23 Av. Hénin, 77500 Chelles, France

⁵ Observatoire Midi-Pyrénées, IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, Tarbes, 31400 Toulouse, France

⁶ Observatoire de Méze, 5 Imp. des Tourterelles, 34140 Méze, France

⁷ Observatoire OAV, 13 rue du Moulin, 34290 Alignan-du-Vent, France

⁸ 115 Av. du général de Gaulle, 84450 Saint-Saturnin-les-Avignon, France

⁹ Les Trucs, 26420 Saint-Agnan en Vercors, France

¹⁰ 42 chemin de la Beaume, 26190 Saint-Laurent-en-Royans, France

¹¹ 5 rue Edmond Gondinet, 75013 Paris, France

¹² Observatoire de la Tourbière, 45 chemin du Lac, 38690 Chabons, France

¹³ Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France

Received 14 October 2016 / Accepted 22 August 2017

Rédaction de l'article (2016-9 à 2017-8)

A&A 607, A51 (2017)
DOI: 10.1051/0004-6361/201629897
© ESO 2017

**Astronomy
&
Astrophysics**

First observation of H α redshifted emission in RR Lyr[★] Evidence of a supersonic infalling motion of the atmosphere

D. Gillet¹, B. Maucilaire², T. Garrel³, T. Lemoult⁴, Ph. Mathias⁵, T. de France⁶, J.-S. Devaux⁷, H. Boussier⁸,
D. Verilhac⁹, G. Brabant¹⁰, J. Desbordes¹¹, O. Garde¹², and the GRRR Collaboration^{13,★★}

¹ Observatoire de Haute-Provence – CNRS/PYTHEAS/Université d'Aix-Marseille, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France
e-mail: denis.gillet@osupytheas.fr

² Observatoire du Val de l'Arc, route de Peynier, 13530 Trets, France
e-mail: bma.ova@gmail.com

³ Observatoire de Fontcaude, 19 Av. du Hameau du golf, 34990 Juvignac, France

⁴ Observatoire de Chelles, 23 Av. Hénin, 77500 Chelles, France

⁵ Observatoire Midi-Pyrénées, IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, Tarbes, 31400 Toulouse, France

⁶ Observatoire de Méze, 5 Imp. des Tourterelles, 34140 Méze, France

⁷ Observatoire OAV, 13 rue du Moulin, 34290 Alignan-du-Vent, France

⁸ 115 Av. du général de Gaulle, 84450 Saint-Saturnin-les-Avignon, France

⁹ Les Trucs, 26420 Saint-Agnan en Vercors, France

¹⁰ 42 chemin de la Beaume, 26190 Saint-Laurent-en-Royans, France

¹¹ 5 rue Edmond Gondinet, 75013 Paris, France

¹² Observatoire de la Tourbière, 45 chemin du Lac, 38690 Chabons, France

¹³ Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France

Received 14 October 2016 / Accepted 22 August 2017

Originalité de cette publication :

**Premier article en spectroscopie avec un amateur
impliqué dans l'analyse et la rédaction !**

Bilan de la 3^e émission

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

Extraction de la
composante en
émission

Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

Bilan de la 3^e
émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse

Bilan de la 3^e émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse
- Il faut garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation

Bilan de la 3^e émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse
- Il faut garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
- Nécessité de faire évoluer ses outils et d'être soigneux

Bilan de la 3^e émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse
- Il faut garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
- Nécessité de faire évoluer ses outils et d'être soigneux
- Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire

Bilan de la 3^e émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse
- Il faut garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
- Nécessité de faire évoluer ses outils et d'être soigneux
- Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire
- Travail en étroite collaboration avec deux professionnels passionnés : D. Gillet et Ph. Mathias

Bilan de la 3^e émission

B. MAUCLAIRE

Deux observations
décisives

Extraction de la
composante en
émission

Interprétation du
phénomène

Rédaction de
l'article (2016-9 à
2017-8)

Bilan de la 3^e
émission

- Les observations dictent la science et non l'inverse
- Il faut garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
- Nécessité de faire évoluer ses outils et d'être soigneux
- Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire
- Travail en étroite collaboration avec deux professionnels passionnés : D. Gillet et Ph. Mathias
- On apprend beaucoup et dans la bonne humeur

Partie D :

Étude de la dynamique atmosphérique

RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Le film de
l'atmosphère est
dévoilé

Quelques résultats

1. Le film de l'atmosphère est dévoilé

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit
- Cela nécessite d'automatiser un observatoire :
le **T35cm (!)** de Thierry Lemoult

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit
- Cela nécessite d'automatiser un observatoire :
le **T35cm (!)** de Thierry Lemoult
- Large plage de longueurs d'ondes (4300 – 7100 Å)
couvertes par le spectrographe échelle

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit
- Cela nécessite d'automatiser un observatoire :
le **T35cm (!)** de Thierry Lemoult
- Large plage de longueurs d'ondes (4300 – 7100 Å)
couvertes par le spectrographe échelle
- Avril 2017 : **47 h d'observations en 11 jours !**

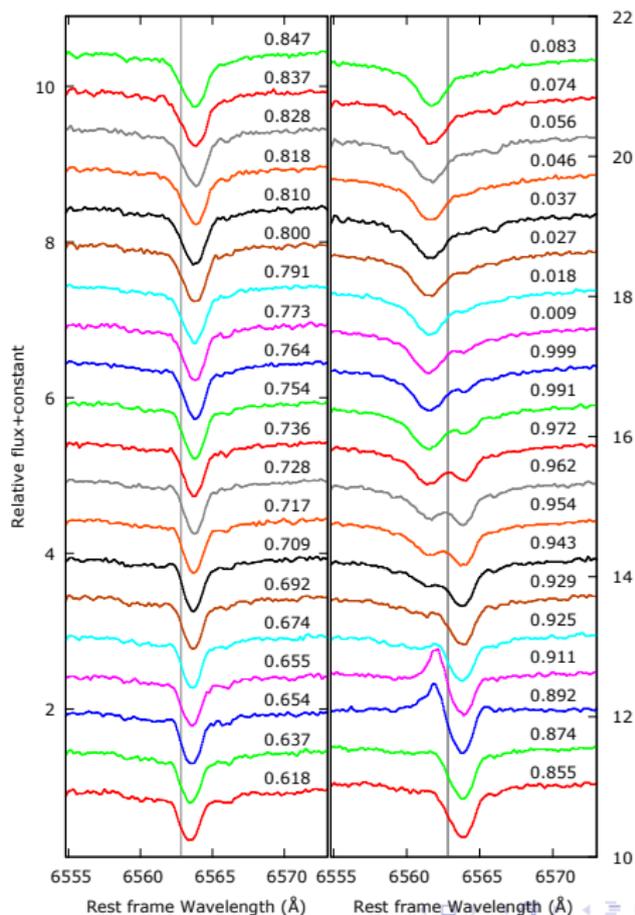
Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit
- Cela nécessite d'automatiser un observatoire :
le **T35cm (!)** de Thierry Lemoult
- Large plage de longueurs d'ondes (4300 – 7100 Å)
couvertes par le spectrographe échelle
- Avril 2017 : **47 h d'observations en 11 jours !**
- Résolution temporelle importante : 15 min

Le film de l'atmosphère est dévoilé

- Période de pulsation de RR Lyr : 13,6 h
⇒ impossible de couvrir rapidement un cycle en observant quelques h/nuit
- Cela nécessite d'automatiser un observatoire :
le **T35cm (!)** de Thierry Lemoult
- Large plage de longueurs d'ondes (4300 – 7100 Å)
couvertes par le spectrographe échelle
- Avril 2017 : **47 h d'observations en 11 jours !**
- Résolution temporelle importante : 15 min
- On possède alors **le film des soubresauts de RR Lyr !**

Film de H α durant avril 2017



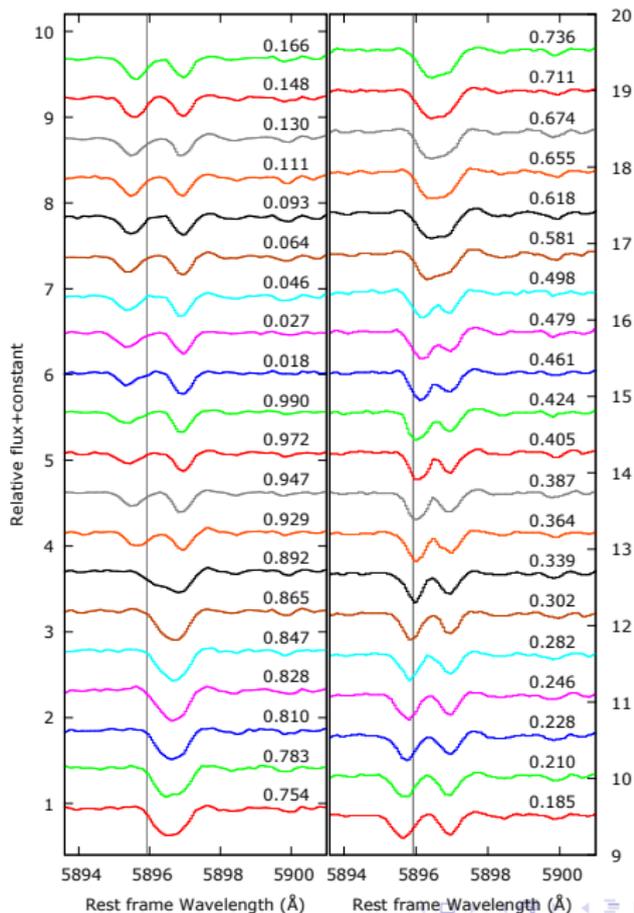
RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Le film de
l'atmosphère est
dévoilé

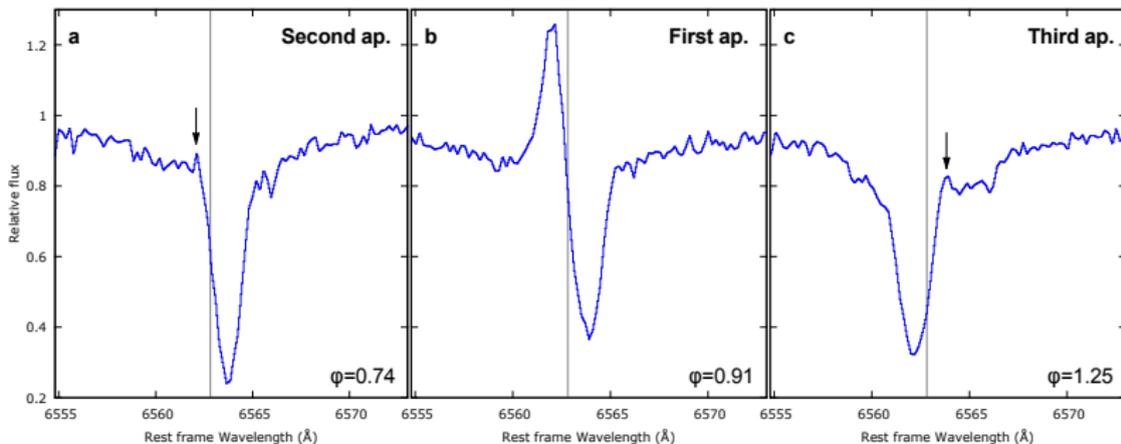
Quelques résultats

Film de Na durant avril 2017



2. Quelques résultats

On y retrouve les 3 émissions de $H\alpha$



RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

Le film de
l'atmosphère est
dévoilé

Quelques résultats

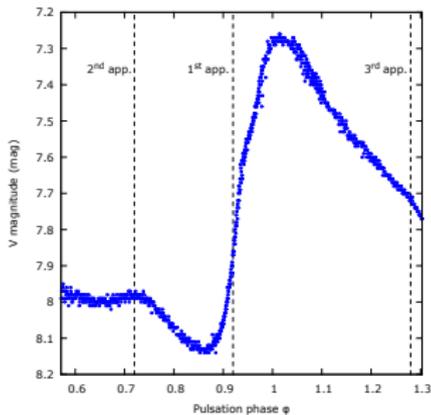
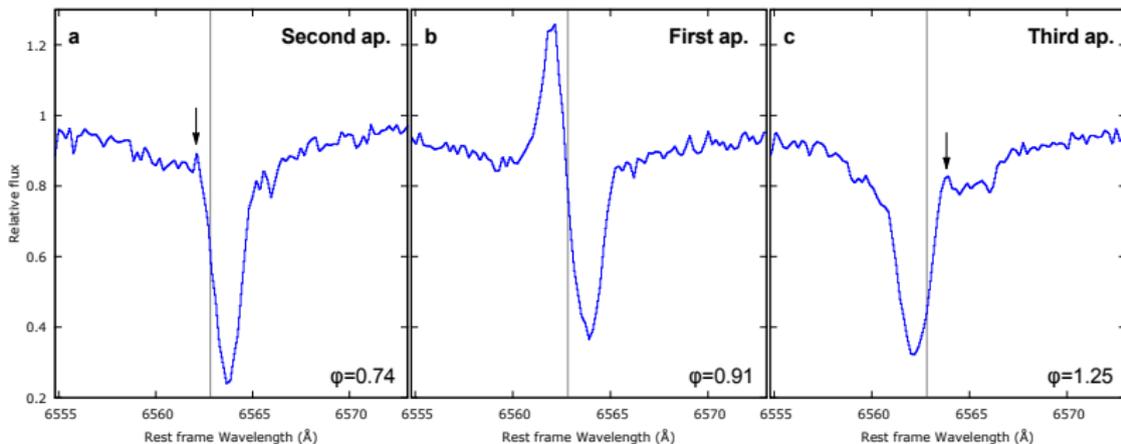
RR Lyr,
dynamique
atmosphérique et
pulsations : une
aventure de
chercheurs

B. MAUCLAIRE

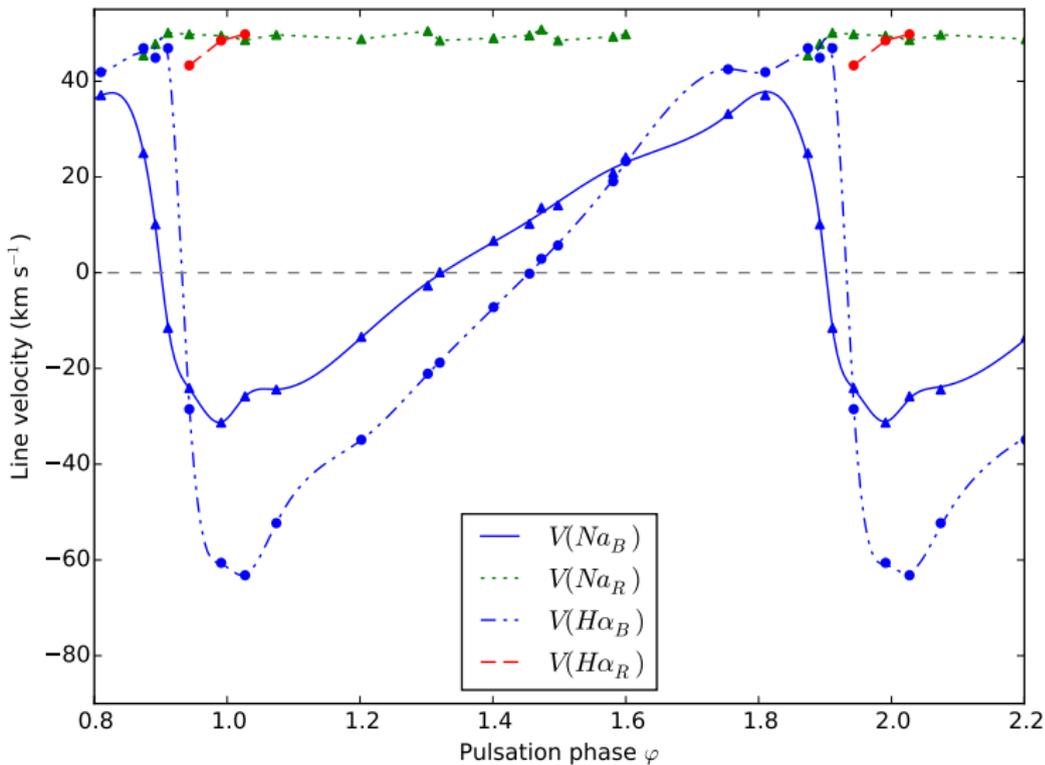
Le film de
l'atmosphère est
dévoilé

Quelques résultats

On y retrouve les 3 émissions de $H\alpha$



V_{radiale} de $H\alpha$ et Na (stellar rest frame)



Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
------	--------------------	------------

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase
3	0.320	Maximum expansion of the Na layer

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase
3	0.320	Maximum expansion of the Na layer
4	0.455	Maximum expansion of the H α layer

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase
3	0.320	Maximum expansion of the Na layer
4	0.455	Maximum expansion of the H α layer
5	0.320 – 0.455	A two-steps infalling motion

Quelques explications

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase
3	0.320	Maximum expansion of the Na layer
4	0.455	Maximum expansion of the H α layer
5	0.320 – 0.455	A two-steps infalling motion
6	around 0.36	A strong photospheric compression

Quelques explications

B. MAUCLAIRE

Le film de
l'atmosphère est
dévoilé

Quelques résultats

Step	φ interval	Phenomenon
1	0.874 – 0.892	Emergence of the main shock
2	0.892 – 0.929	Radiative shock wave phase
3	0.320	Maximum expansion of the Na layer
4	0.455	Maximum expansion of the H α layer
5	0.320 – 0.455	A two-steps infalling motion
6	around 0.36	A strong photospheric compression

Step 1 : c'est le moment du κ -mécanisme !

Dynamical structure of the pulsating atmosphere of RR Lyrae

I. A typical pulsation cycle

D. Gillet¹, B. Maucilaire², T. Lemoult³, Ph. Mathias⁴, Th. de France⁵, T. Garrel⁶, and the GRRR Collaboration^{7*}

¹ Observatoire de Haute-Provence – CNRS/PYTHEAS/Université d' Aix-Marseille, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France
e-mail: denis.gillet@osupytheas.fr

² Observatoire du Val de l'Arc, route de Peynier, 13530 Trets, France
e-mail: bma.ova@gmail.com

³ Observatoire de Chelles, 23 avenue Hénin, 77500 Chelles, France

⁴ IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, 57 avenue d'Azereix, 65000, Tarbes, France

⁵ Observatoire des Tourterelles, 5 impasse Tourterelles, 34140 Mèze, France

⁶ Observatoire de Fontcaude, 19 avenue du hameau du Golf, 34990 Juvignac, France

⁷ Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France **

Received July 16, 2018; accepted xxxx

Dynamical structure of the pulsating atmosphere of RR Lyrae

I. A typical pulsation cycle

D. Gillet¹, B. Maucilaire², T. Lemoult³, Ph. Mathias⁴, Th. de France⁵, T. Garrel⁶, and the GRRR Collaboration^{7*}

¹ Observatoire de Haute-Provence – CNRS/PYTHEAS/Université d' Aix-Marseille, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France
e-mail: denis.gillet@osupytheas.fr

² Observatoire du Val de l'Arc, route de Peynier, 13530 Trets, France
e-mail: bma.ova@gmail.com

³ Observatoire de Chelles, 23 avenue Hénin, 77500 Chelles, France

⁴ IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, 57 avenue d'Azereix, 65000, Tarbes, France

⁵ Observatoire des Tourterelles, 5 impasse Tourterelles, 34140 Mèze, France

⁶ Observatoire de Fontcaude, 19 avenue du hameau du Golf, 34990 Juvignac, France

⁷ Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France **

Received July 16, 2018; accepted xxxx

- Un cycle typique de pulsation de RR Lyr

Dynamical structure of the pulsating atmosphere of RR Lyrae

I. A typical pulsation cycle

D. Gillet¹, B. Mauclaire², T. Lemoult³, Ph. Mathias⁴, Th. de France⁵, T. Garrel⁶, and the GRRR Collaboration^{7*}

¹ Observatoire de Haute-Provence – CNRS/PYTHEAS/Université d' Aix-Marseille, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France
e-mail: denis.gillet@osupytheas.fr

² Observatoire du Val de l'Arc, route de Peynier, 13530 Trets, France
e-mail: bma.ova@gmail.com

³ Observatoire de Chelles, 23 avenue Hénin, 77500 Chelles, France

⁴ IRAP, Université de Toulouse, CNRS, UPS, CNES, 57 avenue d'Azereix, 65000, Tarbes, France

⁵ Observatoire des Tourterelles, 5 impasse Tourterelles, 34140 Mèze, France

⁶ Observatoire de Fontcaude, 19 avenue du hameau du Golf, 34990 Juvignac, France

⁷ Observatoire de Haute-Provence, 04870 Saint-Michel l'Observatoire, France **

Received July 16, 2018; accepted xxxx

- Un cycle typique de pulsation de RR Lyr
- Le deuxième volet est déjà en préparation...

Partie E :

D'autres étoiles pulsantes au programme

D'autres étoiles pulsantes méconnues

- BW Vulpeculae :
 - ▶ Type β Cep
 - ▶ Période de pulsation : $T_0 = 4.8$ h
 - ▶ Les chocs des pulsations sont énormes :
 $\Delta V_{\text{radiale}} = 200 \text{ km s}^{-1}$!
 - ▶ Est-ce que la période des maxima reste la même ?

D'autres étoiles pulsantes méconnues

- BW Vulpeculae :
 - ▶ Type β Cep
 - ▶ Période de pulsation : $T_0 = 4.8$ h
 - ▶ Les chocs des pulsations sont énormes :
 $\Delta V_{\text{radiale}} = 200 \text{ km s}^{-1}$!
 - ▶ Est-ce que la période des maxima reste la même ?
- σ Scorpii
 - ▶ Pulsante de type β Cep et binaire SB2
 - ▶ Période de pulsation : $T_0 = 5.9$ h
 - ▶ Mais basse sur l'horizon depuis l'hémisphère Nord

D'autres étoiles pulsantes méconnues

- BW Vulpeculae :
 - ▶ Type β Cep
 - ▶ Période de pulsation : $T_0 = 4.8$ h
 - ▶ Les chocs des pulsations sont énormes :
 $\Delta V_{\text{radiale}} = 200 \text{ km s}^{-1}$!
 - ▶ Est-ce que la période des maxima reste la même ?
- σ Scorpii
 - ▶ Pulsante de type β Cep et binaire SB2
 - ▶ Période de pulsation : $T_0 = 5.9$ h
 - ▶ Mais basse sur l'horizon depuis l'hémisphère Nord
- X Cygni :
 - ▶ Étoile de type Céphéide
 - ▶ Période : $T_0 = 16.39$ jours

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :
 - ▶ Nécessité de garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :
 - ▶ Nécessité de garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
 - ▶ Il faut faire évoluer ses outils et être soigneux

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :
 - ▶ Nécessité de garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
 - ▶ Il faut faire évoluer ses outils et être soigneux
 - ▶ **Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire**

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :
 - ▶ Nécessité de garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
 - ▶ Il faut faire évoluer ses outils et être soigneux
 - ▶ **Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire**
- Besoin de modèles d'atmosphère pulsante gérant la convection et les chocs pour aboutir

Conclusion

- Cette aventure scientifique se poursuit encore aujourd'hui avec méthode :
 - ▶ Nécessité de garder un esprit critique sur ses méthodes d'analyse et leur interprétation
 - ▶ Il faut faire évoluer ses outils et être soigneux
 - ▶ **Remettre l'ouvrage sur la table autant que nécessaire**
- Besoin de modèles d'atmosphère pulsante gérant la convection et les chocs pour aboutir
- L'études d'autres étoiles pulsantes de choix permettront d'étendre ou non les mécanismes de RR Lyr
 - ⇒ BW Vulpeculae, σ Scorpii et X Cygni

Partie G :

Compléments

Le κ -mécanisme

Il s'agit d'un phénomène lié à la variation de l'opacité des gaz dans une couche située ni trop haute (pour éviter les phénomènes de dilution) ni trop basse (pour ne pas amortir l'effet).

En résumé, lors de la compression, de l'énergie est stockée sous forme potentielle via l'ionisation d'un élément particulier (H, He ou, pour les β Céphéides en particulier, les éléments métalliques, et plus spécialement le fer), et cette énergie est relâchée lors de l'expansion avec juste ce qu'il faut pour entretenir le mouvement de pulsation.

1. Ionisation de H, He et He^+ par collision avec les électrons ambiants

Le κ -mécanisme

Il s'agit d'un phénomène lié à la variation de l'opacité des gaz dans une couche située ni trop haute (pour éviter les phénomènes de dilution) ni trop basse (pour ne pas amortir l'effet).

En résumé, lors de la compression, de l'énergie est stockée sous forme potentielle via l'ionisation d'un élément particulier (H, He ou, pour les β Céphéides en particulier, les éléments métalliques, et plus spécialement le fer), et cette énergie est relâchée lors de l'expansion avec juste ce qu'il faut pour entretenir le mouvement de pulsation.

1. Ionisation de H, He et He^+ par collision avec les électrons ambiants
2. Cette zone d'ionisation constituée alors d'ions H^+ , He^+ et He^{++} est comme le couvercle dans la casserole

Le κ -mécanisme

Il s'agit d'un phénomène lié à la variation de l'opacité des gaz dans une couche située ni trop haute (pour éviter les phénomènes de dilution) ni trop basse (pour ne pas amortir l'effet).

En résumé, lors de la compression, de l'énergie est stockée sous forme potentielle via l'ionisation d'un élément particulier (H, He ou, pour les β Céphéides en particulier, les éléments métalliques, et plus spécialement le fer), et cette énergie est relâchée lors de l'expansion avec juste ce qu'il faut pour entretenir le mouvement de pulsation.

1. Ionisation de H, He et He^+ par collision avec les électrons ambiants
2. Cette zone d'ionisation constituée alors d'ions H^+ , He^+ et He^{++} est comme le couvercle dans la casserole
3. Le mécanisme de recombinaison électronique à 3 corps produit des électrons rapides poussant vers les couches moins denses : les couches supérieures

Le κ -mécanisme

Il s'agit d'un phénomène lié à la variation de l'opacité des gaz dans une couche située ni trop haute (pour éviter les phénomènes de dilution) ni trop basse (pour ne pas amortir l'effet).

En résumé, lors de la compression, de l'énergie est stockée sous forme potentielle via l'ionisation d'un élément particulier (H, He ou, pour les β Céphéides en particulier, les éléments métalliques, et plus spécialement le fer), et cette énergie est relâchée lors de l'expansion avec juste ce qu'il faut pour entretenir le mouvement de pulsation.

1. Ionisation de H, He et He^+ par collision avec les électrons ambiants
2. Cette zone d'ionisation constituée alors d'ions H^+ , He^+ et He^{++} est comme le couvercle dans la casserole
3. Le mécanisme de recombinaison électronique à 3 corps produit des électrons rapides poussant vers les couches moins denses : les couches supérieures
4. Cette poussée d'électrons crée une onde de choc