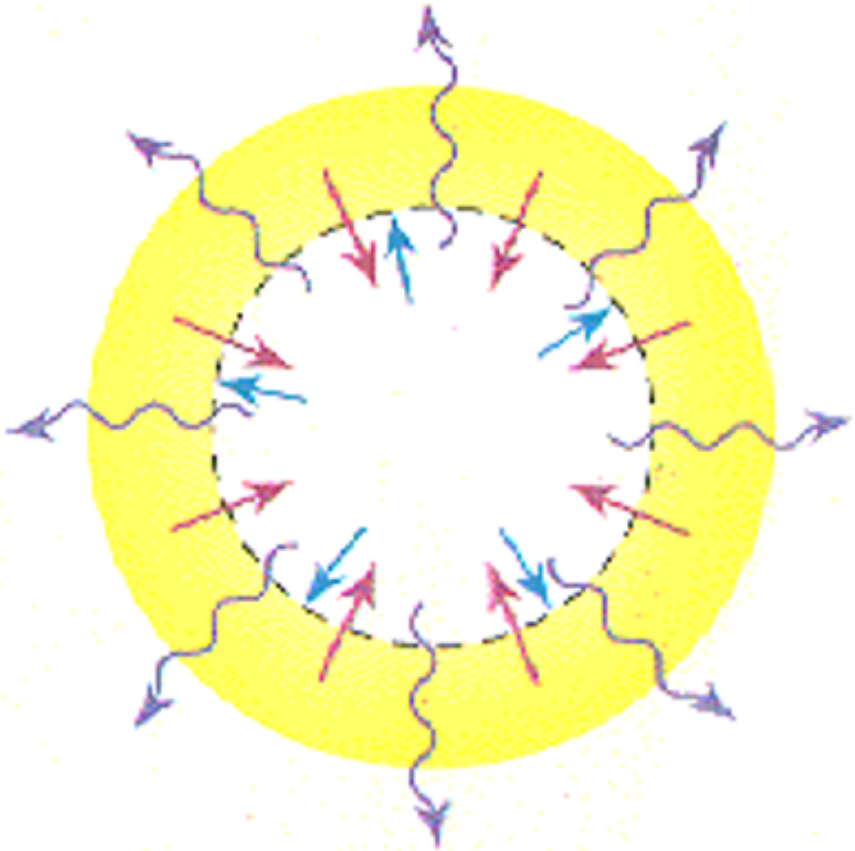
Petit ABC de la physique des étoiles pulsantes

B. Mauclaire



GRRR - juillet 2019

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie
- Pour certaines ce sont les pulsations de l'atmosphère qui modulent leur éclat

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie
- Pour certaines ce sont les pulsations de l'atmosphère qui modulent leur éclat
- Les RR Lyrae sont un type de pulsantes parmi une floppée que nous décrirons

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie
- Pour certaines ce sont les pulsations de l'atmosphère qui modulent leur éclat
- Les RR Lyrae sont un type de pulsantes parmi une floppée que nous décrirons
- Nous plongerons ensuite dans leur atmosphère pour comprendre l'origine de ces pulsations

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie
- Pour certaines ce sont les pulsations de l'atmosphère qui modulent leur éclat
- Les RR Lyrae sont un type de pulsantes parmi une floppée que nous décrirons
- Nous plongerons ensuite dans leur atmosphère pour comprendre l'origine de ces pulsations
- Nous verrons quels sont les phénomènes obsvervés

Introduction

- La grande majorité des étoiles varient en luminosité
- Plusieurs situations en sont à l'origine donnant lieu à une taxinomie
- Pour certaines ce sont les pulsations de l'atmosphère qui modulent leur éclat
- Les RR Lyrae sont un type de pulsantes parmi une floppée que nous décrirons
- Nous plongerons ensuite dans leur atmosphère pour comprendre l'origine de ces pulsations
- Nous verrons quels sont les phénomènes obsvervés
- Et l'explication actuelle des 3 émissions de Hα

Les types d'étoiles variables

Les variables pulsantes

Petit récapitulatif des pulsantes

Au sujet de RR Lyr

Partie A :

Les pulsantes : un type d'étoiles variables

1. Les types d'étoiles variables

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.
- Les variables par rotation :

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

- Les variables par rotation :
  - Étoiles possèdant sur leur surface des régions "froides" dues à d'intenses champs magnétiques (~ 1 T) bloquant la convection.

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

- Les variables par rotation :
  - Étoiles possèdant sur leur surface des régions "froides" dues à d'intenses champs magnétiques (~ 1 T) bloquant la convection.
  - Ces zones plus sombres réparties non uniformément font baisser l'éclat de l'étoile durant sa rotation.

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

- Les variables par rotation :
  - Étoiles possèdant sur leur surface des régions "froides" dues à d'intenses champs magnétiques (~ 1 T) bloquant la convection.
  - Ces zones plus sombres réparties non uniformément font baisser l'éclat de l'étoile durant sa rotation.

- Les variables éruptives :

  Sujettes à des éruptions sur leur surface, elles présentent des pics d'intensité lumineuse imprévisibles : Proxima Cen.

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

- Les variables par rotation :
  - Étoiles possèdant sur leur surface des régions "froides" dues à d'intenses champs magnétiques ($\sim$ 1 T) bloquant la convection.
  - Ces zones plus sombres réparties non uniformément font baisser l'éclat de l'étoile durant sa rotation.

- Les variables éruptives :

  Sujettes à des éruptions sur leur surface, elles présentent des pics d'intensité lumineuse imprévisibles : Proxima Cen.

- Les variables cataclysmiques :

  Ces étoiles (généralement binaires) sont variables à cause d'un événement dit cataclysmique : SN.

Les types d'étoiles variables

- Les variables à éclipses :

  Systèmes d'étoiles binaires où lorsqu'une passe devant l'autre, on constate alors une baisse d'éclat.

- Les variables par rotation :
  - Étoiles possèdant sur leur surface des régions "froides" dues à d'intenses champs magnétiques ($\sim$ 1 T) bloquant la convection.
  - Ces zones plus sombres réparties non uniformément font baisser l'éclat de l'étoile durant sa rotation.

- Les variables éruptives :

  Sujettes à des éruptions sur leur surface, elles présentent des pics d'intensité lumineuse imprévisibles : Proxima Cen.

- Les variables cataclysmiques :

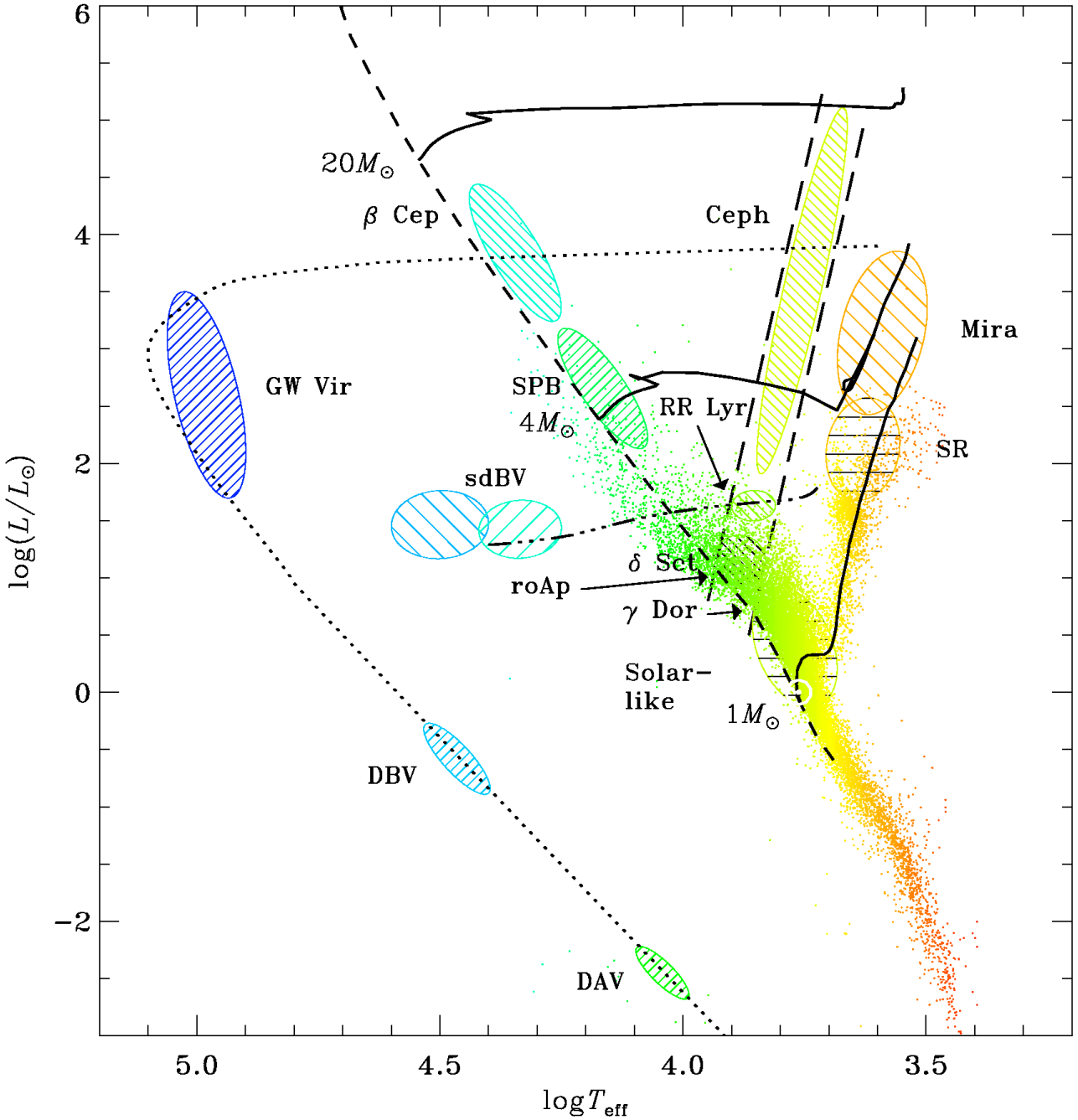
  Ces étoiles (généralement binaires) sont variables à cause d'un événement dit cataclysmique : SN.

- Les variables pulsantes :

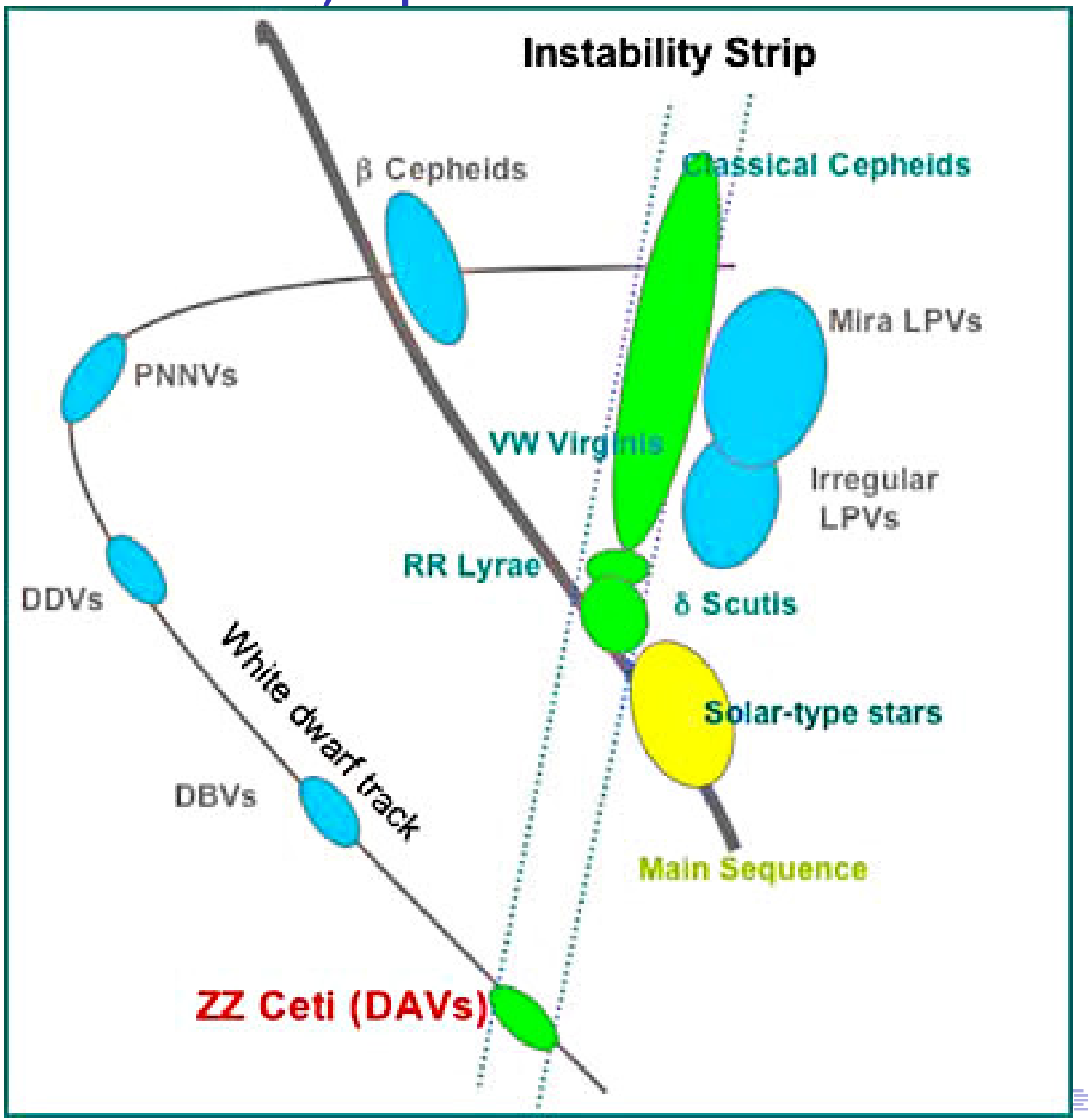
  L'éclat de ces étoiles varie périodiquement du fait de pulsations faisant aternativement se dilater et se contracter leur atmosphère.

2. Les variables pulsantes

Place de RR Lyr parmi les variables



Place de RR Lyr parmi les variables



Les variables pulsantes

- Les pulsantes sont situées sur la bande d'instabilité

Les variables pulsantes

- Les pulsantes sont situées sur la bande d'instabilité
- Elles ont fini de brûler l'hydrogène du noyau : elles quittent la séquence principale

Les variables pulsantes

- Les pulsantes sont situées sur la bande d'instabilité
- Elles ont fini de brûler l'hydrogène du noyau : elles quittent la séquence principale
- Le fusion de l'hélium entraîne une instabilité : l'équilibre hydrostatique est rompu

Les variables pulsantes

- Les pulsantes sont situées sur la bande d'instabilité
- Elles ont fini de brûler l'hydrogène du noyau : elles quittent la séquence principale
- Le fusion de l'hélium entraîne une instabilité : l'équilibre hydrostatique est rompu
- L'étoile se met à pulser !

Les variables pulsantes

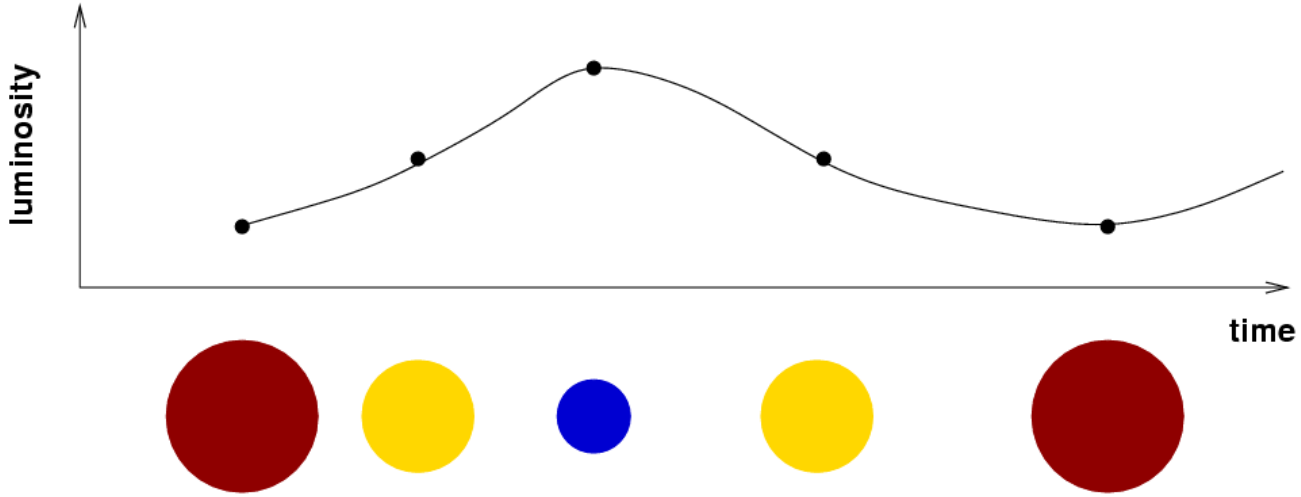
- Les pulsantes sont situées sur la bande d'instabilité
- Elles ont fini de brûler l'hydrogène du noyau : elles quittent la séquence principale
- Le fusion de l'hélium entraîne une instabilité : l'équilibre hydrostatique est rompu
- L'étoile se met à pulser !
- Mais toutes les étoiles ne deviennent pas des variables pulsantes

Les variables pulsantes

- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)

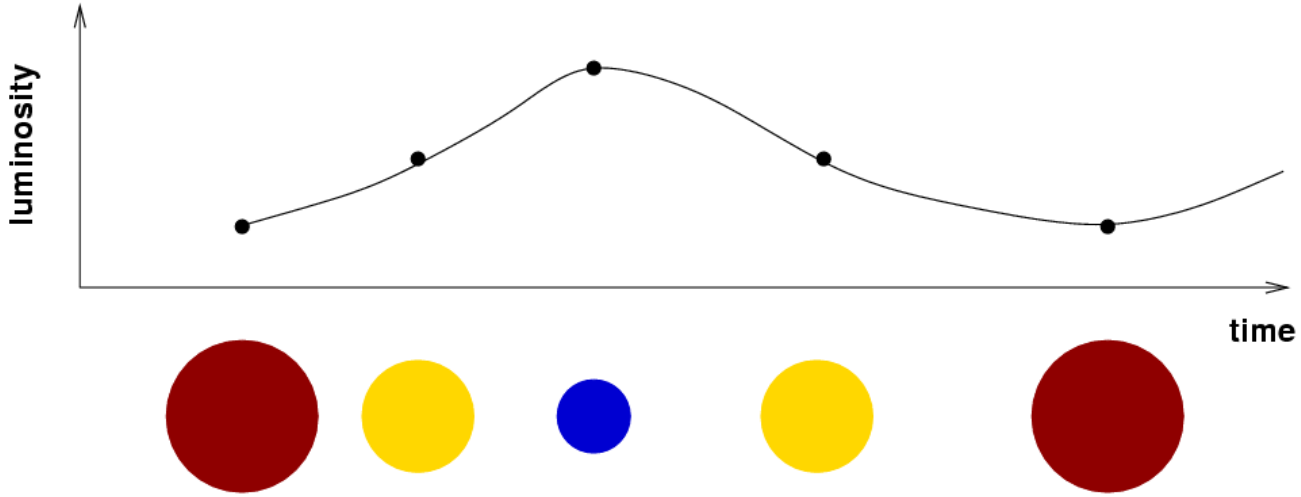
Les variables pulsantes

- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)



Les variables pulsantes

- 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

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.
- Les Miras :

  De type spectral M, elles représentent 60% des étoiles pulsantes observées : $T > 100\,j$.

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.
- Les Miras :

  De type spectral M, elles représentent 60% des étoiles pulsantes observées : $T > 100\,j$.
- Les Céphéides :

  10% de la population des étoiles variables.

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.
- Les Miras :

  De type spectral M, elles représentent 60% des étoiles pulsantes observées : $T > 100\,j$.
- Les Céphéides :

  10% de la population des étoiles variables.
  - Céphéides classiques ou δ Cep :

    Jeunes étoiles de population I : $1,5 < T < 60\,j$.

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.
- Les Miras :

  De type spectral M, elles représentent 60% des étoiles pulsantes observées : $T > 100\,j$.
- Les Céphéides :

  10% de la population des étoiles variables.
  - Céphéides classiques ou δ Cep :

    Jeunes étoiles de population I : $1,5 < T < 60\,j$.
  - W Virginis :

    Étoiles de population II plus agées et de faible métallicité : $1 < T < 50\,j$.

Les types de variables pulsantes

- Les semi-régulières ou irrégulières :

  Ce sont des supergéantes de types intermédiaire ou tardif de période très variable : $20\,j < T < 5\,ans$.
- Les Miras :

  De type spectral M, elles représentent 60% des étoiles pulsantes observées : $T > 100\,j$.
- Les Céphéides :

  10% de la population des étoiles variables.
  - Céphéides classiques ou δ Cep :

    Jeunes étoiles de population I : $1,5 < T < 60\,j$.
  - W Virginis :

    Étoiles de population II plus agées et de faible métallicité : $1 < T < 50\,j$.
- Les RR Lyrae :

  Vielles étoiles (pop. II) de masse $0,5 < M < 0,8\,M_\odot$ représentant $\sim 30\%$ des étoiles variables observées : $0,2 < T < 1\,j$

3. Petit récapitulatif des pulsantes

Petit récapitulatif des pulsantes

Types	**Sous-type**	**Classe spectrale**	ΔV**mag**	**Période (j)**	**Population**
RR Lyrae	RRab	A2-F6	0,9-1,3	0,3-1,0	II
	RRc		$\sim 0,5$	0,2-0,5	
	RRd				
Mira		M	2.5-11	> 100	I
Semi-régulières et irrégulières		F à M	1-2	20-2000	I-II
Céphéides	δ Ceph	F6-K2	0,1-1,2	1,5-60	I
	W-Virginis	F6-G6	0,8-1,3	1-50	II

4. Au sujet de RR Lyr

Au sujet de RR Lyr

- La variabilité de RR Lyr fut découverte en 1901 par Williamina Fleming :

Sagittarius	−16°	4904	18	24.6	−16	59	N	W. P. Fleming
Scutum	− 8°	4726	18	44.9	− 8	1	N	L. D. Wells
Scutum	− 8°	4764	18	50.0	− 8	19	N	W. P. Fleming
Sagittarius	.....		18	55.9	−12	54	Md	W. P. Fleming
Sagittarius	−22°	4958	18	57.7	−22	51	Mc	W. P. Fleming
Telescopium	.....		19	0.5	−49	4	Md	W. P. Fleming
Telescopium	*C. P. D.* −50°	11027	19	10.5	−50	38	Md ?	W. P. Fleming
Lyra	+42°	3338	19	22.2	+42	36	...	W. P. Fleming
Telescopium	.....		19	43.1	−50	15	Md	W. P. Fleming
Telescopium	....		20	11.2	−52	56	Md	W. P. Fleming
Telescopium	−51°	12487	20	12.9	−51	1	Mc 5 d	W. P. Fleming
Cygnus	.....		21	35.7	+42	45	....	H. R. Colson
Aquarius	−22°	5901	22	17.7	−22	35	Md ?	W. P. Fleming
Piscis Austr.	*A. G. C.*	30605	22	20.5	−29	35	...	W. P. Fleming
Andromeda	+48°	4093	23	28.8	+48	16	Md ?	W. P. Fleming
Pegasus	+25°	5054	23	55.0	+25	21	Md ?	W. P. Fleming

non

?!

Au sujet de RR Lyr

- La variabilité de RR Lyr fut découverte en 1901 par Williamina Fleming :

Sagittarius	−16° 4904	18	24.6	−16	59	N	W. P. Fleming
Scutum	− 8° 4726	18	44.9	− 8	1	N	L. D. Wells
Scutum	− 8° 4764	18	50.0	− 8	19	N	W. P. Fleming
Sagittarius	.....	18	55.9	−12	54	Md	W. P. Fleming
Sagittarius	−22° 4958	18	57.7	−22	51	Mc	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	0.5	−49	4	Md	W. P. Fleming
Telescopium	*C. P. D.* −50° 11027	19	10.5	−50	38	Md ?	W. P. Fleming
Lyra	+42° 3338 nom	19	22.2	+42	36	... ?	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	43.1	−50	15	Md	W. P. Fleming
Telescopium	....	20	11.2	−52	56	Md	W. P. Fleming
Telescopium	−51° 12487	20	12.9	−51	1	Mc 5 d	W. P. Fleming
Cygnus	.....	21	35.7	+42	45	....	H. R. Colson
Aquarius	−22° 5901	22	17.7	−22	35	Md ?	W. P. Fleming
Piscis Austr.	*A. G. C.* 30605	22	20.5	−29	35	...	W. P. Fleming
Andromeda	+48° 4093	23	28.8	+48	16	Md ?	W. P. Fleming
Pegasus	+25° 5054	23	55.0	+25	21	Md ?	W. P. Fleming

- C'est la première étoile variable de sa catégorie (RR Lyrae) découverte, d'où son nom : RR Lyr

Au sujet de RR Lyr

- La variabilité de RR Lyr fut découverte en 1901 par Williamina Fleming :

Sagittarius	−16° 4904	18	24.6	−16	59	N	W. P. Fleming
Scutum	− 8° 4726	18	44.9	− 8	1	N	L. D. Wells
Scutum	− 8° 4764	18	50.0	− 8	19	N	W. P. Fleming
Sagittarius	.....	18	55.9	−12	54	Md	W. P. Fleming
Sagittarius	−22° 4958	18	57.7	−22	51	Mc	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	0.5	−49	4	Md	W. P. Fleming
Telescopium	*C. P. D.* −50° 11027	19	10.5	−50	38	Md ?	W. P. Fleming
Lyra	+42° 3338	19	22.2	+42	36	...	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	43.1	−50	15	Md	W. P. Fleming
Telescopium	....	20	11.2	−52	56	Md	W. P. Fleming
Telescopium	−51° 12487	20	12.9	−51	1	Mc 5 d	W. P. Fleming
Cygnus	.....	21	35.7	+42	45	....	H. R. Colson
Aquarius	−22° 5901	22	17.7	−22	35	Md ?	W. P. Fleming
Piscis Austr.	*A. G. C.* 30605	22	20.5	−29	35	...	W. P. Fleming
Andromeda	+48° 4093	23	28.8	+48	16	Md ?	W. P. Fleming
Pegasus	+25° 5054	23	55.0	+25	21	Md ?	W. P. Fleming

non ?!

- C'est la première étoile variable de sa catégorie (RR Lyrae) découverte, d'où son nom : RR Lyr
- Son rayon moyen vaut $5,1\,R_\odot$

Au sujet de RR Lyr

- La variabilité de RR Lyr fut découverte en 1901 par Williamina Fleming :

Sagittarius	−16° 4904	18	24.6	−16	59	N	W. P. Fleming
Scutum	− 8° 4726	18	44.9	− 8	1	N	L. D. Wells
Scutum	− 8° 4764	18	50.0	− 8	19	N	W. P. Fleming
Sagittarius	.....	18	55.9	−12	54	Md	W. P. Fleming
Sagittarius	−22° 4958	18	57.7	−22	51	Mc	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	0.5	−49	4	Md	W. P. Fleming
Telescopium	*C. P. D.* −50° 11027	19	10.5	−50	38	Md ?	W. P. Fleming
Lyra	+42° 3338	19	22.2	+42	36	...	W. P. Fleming
Telescopium	.....	19	43.1	−50	15	Md	W. P. Fleming
Telescopium	....	20	11.2	−52	56	Md	W. P. Fleming
Telescopium	−51° 12487	20	12.9	−51	1	Mc 5 d	W. P. Fleming
Cygnus	.....	21	35.7	+42	45	....	H. R. Colson
Aquarius	−22° 5901	22	17.7	−22	35	Md ?	W. P. Fleming
Piscis Austr.	*A. G. C.* 30605	22	20.5	−29	35	...	W. P. Fleming
Andromeda	+48° 4093	23	28.8	+48	16	Md ?	W. P. Fleming
Pegasus	+25° 5054	23	55.0	+25	21	Md ?	W. P. Fleming

nom ?!

- C'est la première étoile variable de sa catégorie (RR Lyrae) découverte, d'où son nom : RR Lyr
- Son rayon moyen vaut $5,1\,R_\odot$
- Sa période de pulsation est $\sim$ 13h36mn (0,5668 j)

Au sujet de RR Lyr

- La variabilité de RR Lyr fut découverte en 1901 par Williamina Fleming :

Sagittarius	−16°	4904	18	24.6	−16	59	N	W. P. Fleming
Scutum	− 8°	4726	18	44.9	− 8	1	N	L. D. Wells
Scutum	− 8°	4764	18	50.0	− 8	19	N	W. P. Fleming
Sagittarius	.....		18	55.9	−12	54	Md	W. P. Fleming
Sagittarius	−22°	4958	18	57.7	−22	51	Mc	W. P. Fleming
Telescopium	.....		19	0.5	−49	4	Md	W. P. Fleming
Telescopium	*C. P. D.* −50°	11027	19	10.5	−50	38	Md ?	W. P. Fleming
Lyra	+42°	3338	19	22.2	+42	36	...	W. P. Fleming
Telescopium	.....		19	43.1	−50	15	Md	W. P. Fleming
Telescopium	....		20	11.2	−52	56	Md	W. P. Fleming
Telescopium	−51°	12487	20	12.9	−51	1	Mc 5 d	W. P. Fleming
Cygnus	.....		21	35.7	+42	45	....	H. R. Colson
Aquarius	−22°	5901	22	17.7	−22	35	Md ?	W. P. Fleming
Piscis Austr.	*A. G. C.*	30605	22	20.5	−29	35	...	W. P. Fleming
Andromeda	+48°	4093	23	28.8	+48	16	Md ?	W. P. Fleming
Pegasus	+25°	5054	23	55.0	+25	21	Md ?	W. P. Fleming

nom ?!

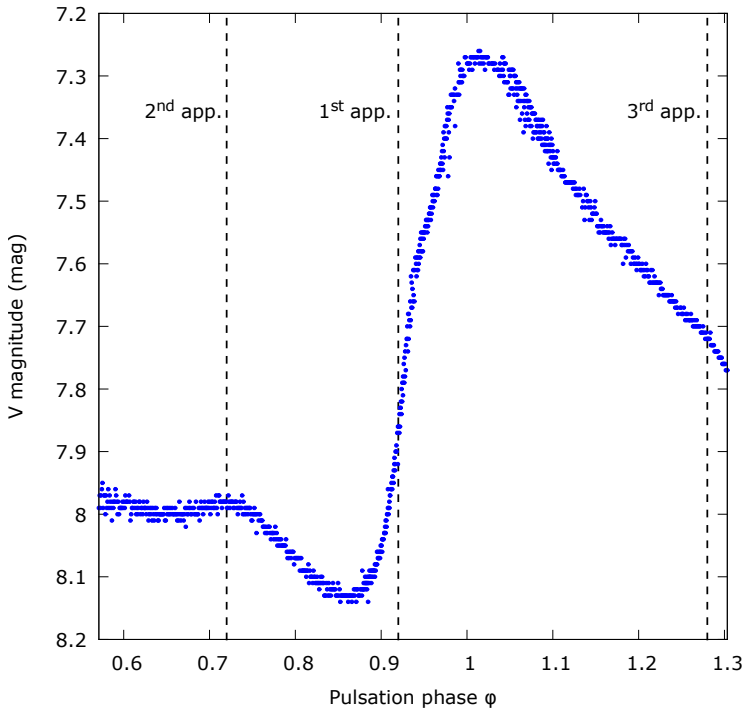
- C'est la première étoile variable de sa catégorie (RR Lyrae) découverte, d'où son nom : RR Lyr
- Son rayon moyen vaut $5,1\,R_\odot$
- Sa période de pulsation est $\sim$ 13h36mn (0,5668 j)
- Cette période est modulée par l'effet Blazhko de période $\sim 40\,j$

Au cours du cycle de RR Lyr

- Son rayon varie d'environ 17% : $4,1 \leq R/R_{\odot} \leq 6,1$!

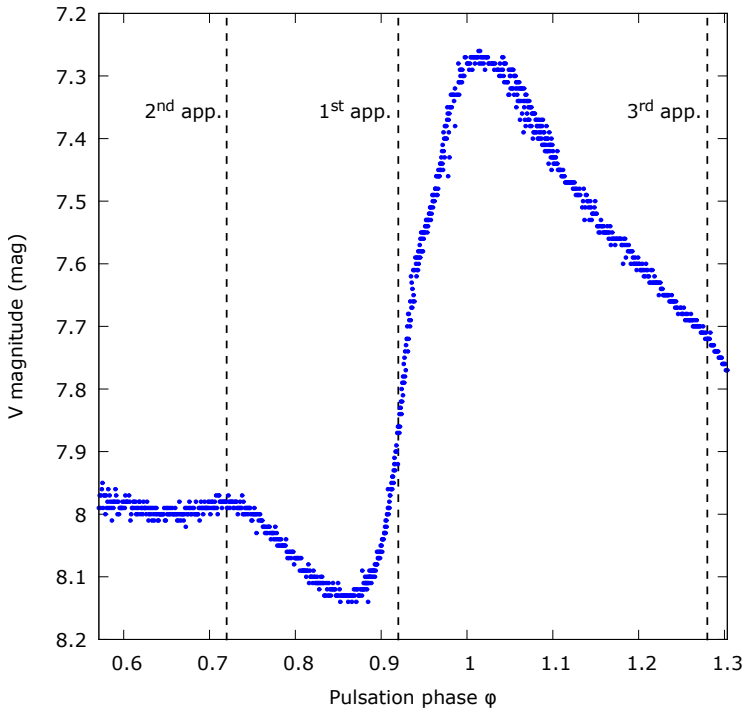
Au cours du cycle de RR Lyr

- Son rayon varie d'environ 17% : $4,1 \leq R/R_{\odot} \leq 6,1$!
- Entraînant une variation de magnitude $7 \leq \mathrm{V} \leq 8$



Au cours du cycle de RR Lyr

- Son rayon varie d'environ 17% : $4,1 \leq R/R_{\odot} \leq 6,1$!
- Entraînant une variation de magnitude $7 \leq \mathrm{V} \leq 8$



- Sa température de surface évolue et le type spectral passe de A7III à F8III

Partie B :

Les mécanismes de pulsation

1. Le κ-mécanisme

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- Les forces de pression dues aux réactions thermonucléaires compensent exactement les forces de gravité : c'est l'équilibre hydrostatique

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- Les forces de pression dues aux réactions thermonucléaires compensent exactement les forces de gravité : c'est l'équilibre hydrostatique
- À la fin de la fusion de l'hydrogène du noyau : fusion de l'hélium et des métaux (autres pulsantes)

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- Les forces de pression dues aux réactions thermonucléaires compensent exactement les forces de gravité : c'est l'équilibre hydrostatique
- À la fin de la fusion de l'hydrogène du noyau : fusion de l'hélium et des métaux (autres pulsantes)
- Cela va provoquer une instabilité de l'équilibre hydrostatique

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- Les forces de pression dues aux réactions thermonucléaires compensent exactement les forces de gravité : c'est l'équilibre hydrostatique
- À la fin de la fusion de l'hydrogène du noyau : fusion de l'hélium et des métaux (autres pulsantes)
- Cela va provoquer une instabilité de l'équilibre hydrostatique
- Lors de la contraction stellaire : $E_{\text{mécanique}} \rightarrow E_{\text{ionisation}}$

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- Les forces de pression dues aux réactions thermonucléaires compensent exactement les forces de gravité : c'est l'équilibre hydrostatique
- À la fin de la fusion de l'hydrogène du noyau : fusion de l'hélium et des métaux (autres pulsantes)
- Cela va provoquer une instabilité de l'équilibre hydrostatique
- Lors de la contraction stellaire : $E_{\text{mécanique}} \rightarrow E_{\text{ionisation}}$
- T reste constante mais la densité augmente, donc l'opacité κ aussi : cela piège le rayonnement

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité
- Une grande quantité d'énergie est alors libérée créant une onde de choc

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité
- Une grande quantité d'énergie est alors libérée créant une onde de choc
- Les couches sont poussées réduisant κ

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité
- Une grande quantité d'énergie est alors libérée créant une onde de choc
- Les couches sont poussées réduisant κ
- Le rayonnement peut de nouveau se propager : H et He redeviennent neutres

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité
- Une grande quantité d'énergie est alors libérée créant une onde de choc
- Les couches sont poussées réduisant κ
- Le rayonnement peut de nouveau se propager : H et He redeviennent neutres
- La force de gravité domine de nouveau entraînant une nouvelle contraction

Le κ-mécanisme : effets macroscopiques

- La force de pression va brièvement supplanter la force de gravité
- Une grande quantité d'énergie est alors libérée créant une onde de choc
- Les couches sont poussées réduisant κ
- Le rayonnement peut de nouveau se propager : H et He redeviennent neutres
- La force de gravité domine de nouveau entraînant une nouvelle contraction
- Le κ-mécanisme est l'origine principale des pulsations

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- Lors des pulsations, les étoiles grossissent et se contractent

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 :

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 :

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- 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 partiellement ionisés

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)
- Cette poussée d'électrons rapides crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

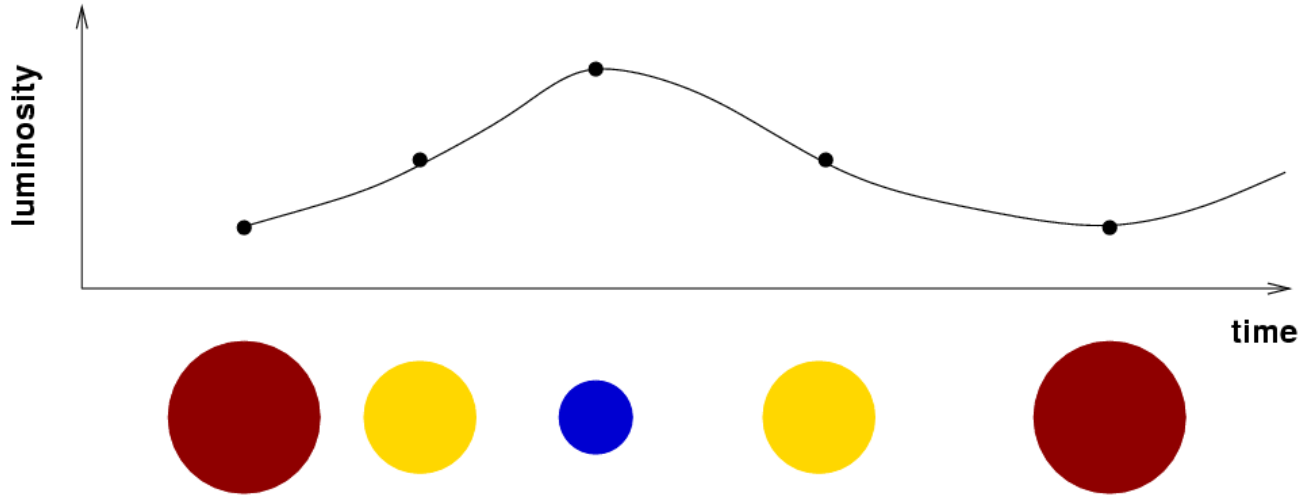
- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)
- Cette poussée d'électrons rapides crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère
- L'onde de choc pousse les couches supérieures

Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)
- Cette poussée d'électrons rapides crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère
- L'onde de choc pousse les couches supérieures
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)

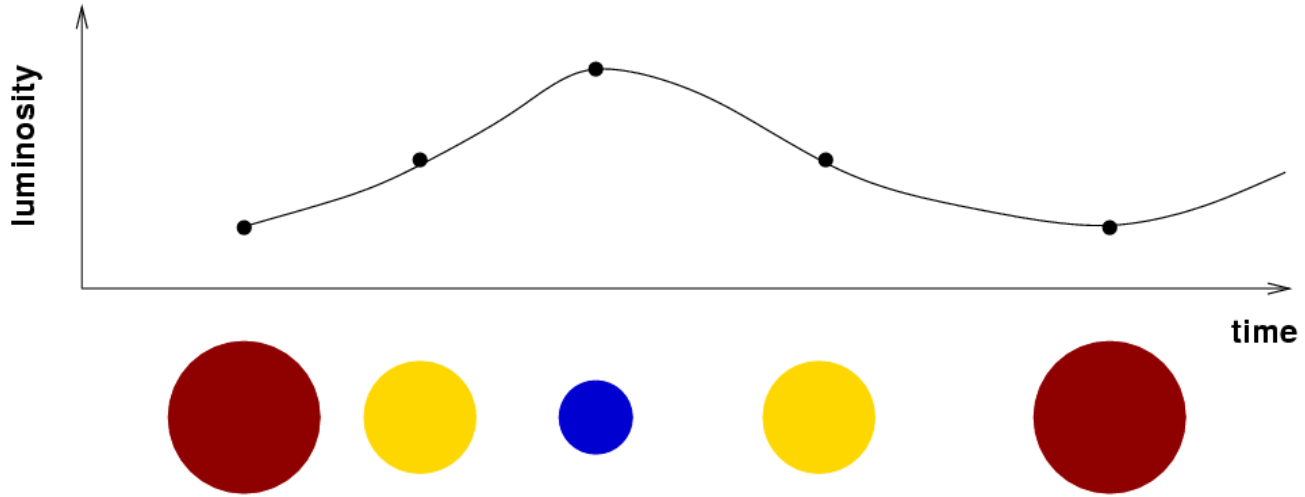
Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)
- Cette poussée d'électrons rapides crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère
- L'onde de choc pousse les couches supérieures
- Les couches externes de l'étoile se dilatent et donc se refroidissent (rougit)



Le κ-mécanisme : source d'ondes de choc

- La recombinaison (dite à 3 corps) de 2 électrons ambiants par ions produit 1 électron rapide (κ-méc.)
- Cette poussée d'électrons rapides crée une onde de choc se propageant dans l'atmosphère
- L'onde de choc pousse les couches supérieures
- 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

2. Le γ-mécanisme

Le γ-mécanisme

- La zone de gaz partiellement ionisés est entourée de gaz plus chauds non ionisés

Le γ-mécanisme

- La zone de gaz partiellement ionisés est entourée de gaz plus chauds non ionisés
- Pendant la phase de compression la chaleur a tendance à pénétrer dans la zone "ionisée"

Le γ-mécanisme

- La zone de gaz partiellement ionisés est entourée de gaz plus chauds non ionisés
- Pendant la phase de compression la chaleur a tendance à pénétrer dans la zone "ionisée"
- Les radiations amorties dans la zone font augmenter la pression et diminuer γ :
  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = f(T, \rho)$: d'où le nom !

Le γ-mécanisme

- La zone de gaz partiellement ionisés est entourée de gaz plus chauds non ionisés
- Pendant la phase de compression la chaleur a tendance à pénétrer dans la zone "ionisée"
- Les radiations amorties dans la zone font augmenter la pression et diminuer γ :
  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = f(T, \rho)$: d'où le nom !
- L'excès de pression acquis permet au cours de l'expansion les transformations énérgétiques :
  $E_{\text{thermique}} \rightarrow E_{\text{mécanique}} \rightarrow E_{\text{pulsation}}$

Le γ-mécanisme

- La température acquise entraîne une ionisation supplémentaire contribuant à l'instabilité des pulsations

Le γ-mécanisme

- La température acquise entraîne une ionisation supplémentaire contribuant à l'instabilité des pulsations
- γ-mécanisme : influence des variations de température sur les variations de luminosité

Le γ-mécanisme

- La température acquise entraîne une ionisation supplémentaire contribuant à l'instabilité des pulsations
- γ-mécanisme : influence des variations de température sur les variations de luminosité
- Cet effet subtil renforce le κ-mécanisme

Le γ-mécanisme

- La température acquise entraîne une ionisation supplémentaire contribuant à l'instabilité des pulsations
- γ-mécanisme : influence des variations de température sur les variations de luminosité
- Cet effet subtil renforce le κ-mécanisme
- On parle alors dans ce cas de κ-γ-mécanisme

3. Les modes de pulsation d'une étoile

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre
- Mais les instruments de musique ne produisent pas un son pur :

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre
- Mais les instruments de musique ne produisent pas un son pur :
  - Fréquence propre ou fondamentale : $f_0 = 440$ Hz
    C'est la fréquence minimale à laquelle il peut vibrer

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre
- Mais les instruments de musique ne produisent pas un son pur :
  - Fréquence propre ou fondamentale : $f_0 = 440$ Hz
    C'est la fréquence minimale à laquelle il peut vibrer
  - Fréquences harmoniques asociées : $2f_0 = 880$ Hz, $3f_0 = 1760$ Hz, etc.

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre
- Mais les instruments de musique ne produisent pas un son pur :
  - Fréquence propre ou fondamentale : $f_0 = 440$ Hz
    C'est la fréquence minimale à laquelle il peut vibrer
  - Fréquences harmoniques asociées : $2f_0 = 880$ Hz, $3f_0 = 1760$ Hz, etc.
- Les étoiles peuvent posséder plusieurs modes propres avec leur suite d'harmoniques associées

Modes propres d'oscillation et harmoniques

- Un diapason donnant la note LA à 440 Hz va vibrer à cette fréquence particulière : c'est la fréquence propre
- Les étoiles sont comme des caisses de résonnance avec leur mode propre
- Mais les instruments de musique ne produisent pas un son pur :
  - Fréquence propre ou fondamentale : $f_0 = 440$ Hz
    C'est la fréquence minimale à laquelle il peut vibrer
  - Fréquences harmoniques asociées : $2f_0 = 880$ Hz, $3f_0 = 1760$ Hz, etc.
- Les étoiles peuvent posséder plusieurs modes propres avec leur suite d'harmoniques associées
- Le Soleil possède plusieurs millions de modes propres d'oscillation

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae
- Les ondes de gravité ou "modes g" :

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae
- Les ondes de gravité ou "modes g" :
  - La gravité brise l'équilibre hydrostatique

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae
- Les ondes de gravité ou "modes g" :
  - La gravité brise l'équilibre hydrostatique
  - Les fréquences de ces modes sont basses

Deux types d'ondes d'oscillation

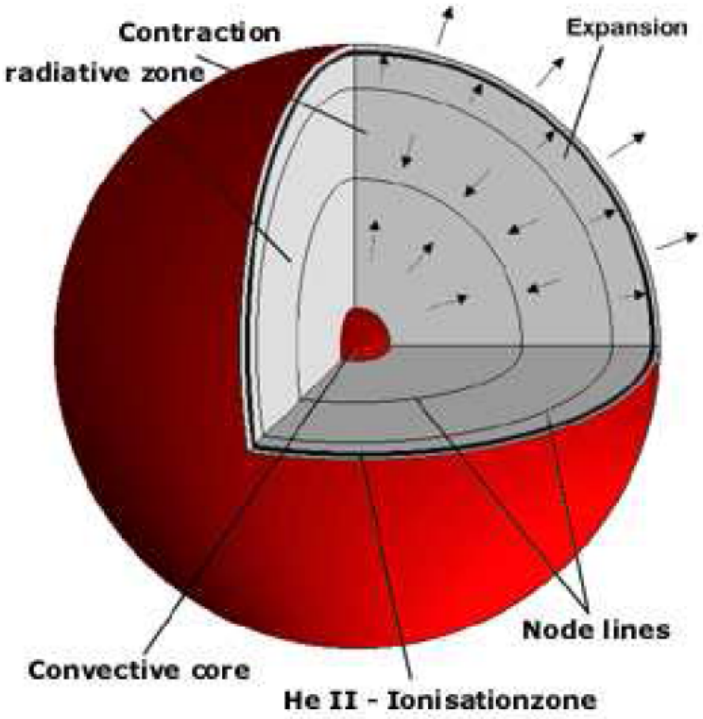
- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae
- Les ondes de gravité ou "modes g" :
  - La gravité brise l'équilibre hydrostatique
  - Les fréquences de ces modes sont basses
  - Les ondes de gravité se propagent dans les régions profondes de l'étoile avec pour force de rappel la poussée d'Archimède

Deux types d'ondes d'oscillation

- Les ondes de pression ou "modes p" :
  - Les forces de pression brisent l'équilibre hydrostatique
  - Les ondes de pression se propagent vers la surface avec pour force de rappel la force de pression du gaz
  - Les fréquences d'oscillation sont importantes
  - Les pulsations de l'atmosphère sont principalement radiales
  - C'est le phénomène dont sont le siège les RR Lyrae
- Les ondes de gravité ou "modes g" :
  - La gravité brise l'équilibre hydrostatique
  - Les fréquences de ces modes sont basses
  - Les ondes de gravité se propagent dans les régions profondes de l'étoile avec pour force de rappel la poussée d'Archimède
  - Difficiles à étudier mais présentes dans certaines étoiles de la SP

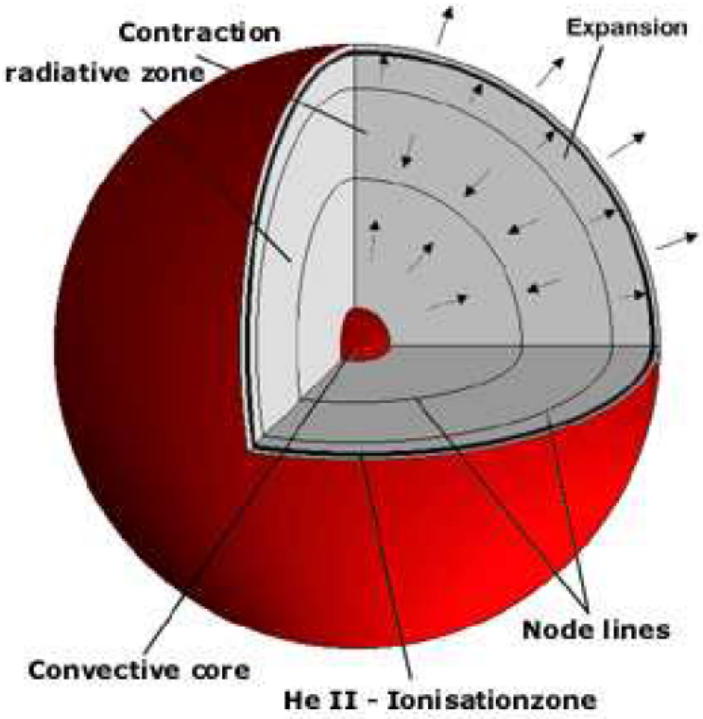
Les pulsation radiales

- Dirigées selon le rayon de l'étoile



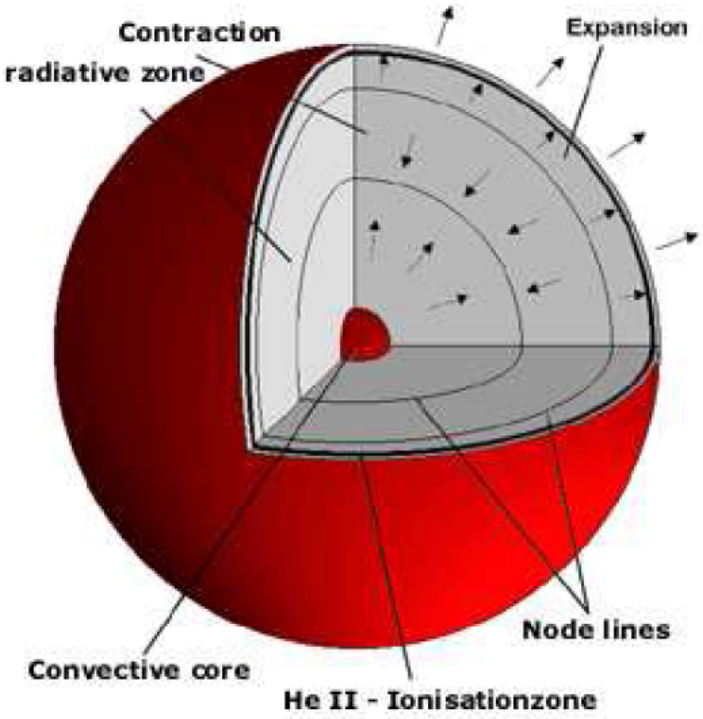
Les pulsation radiales

- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode



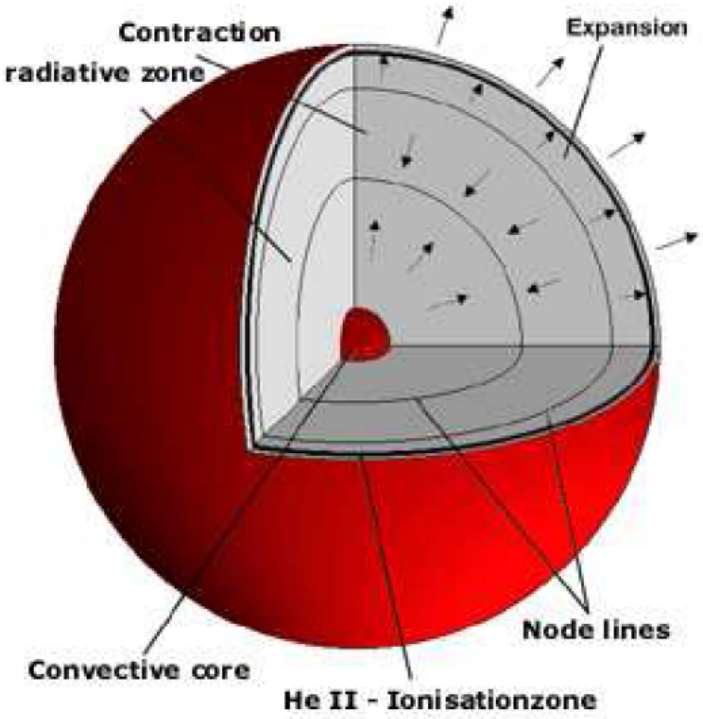
Les pulsation radiales

- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode
- Le mode fondamental : toutes les couches de l'atmosphère se contractent et se dilatent à l'unison



Les pulsation radiales

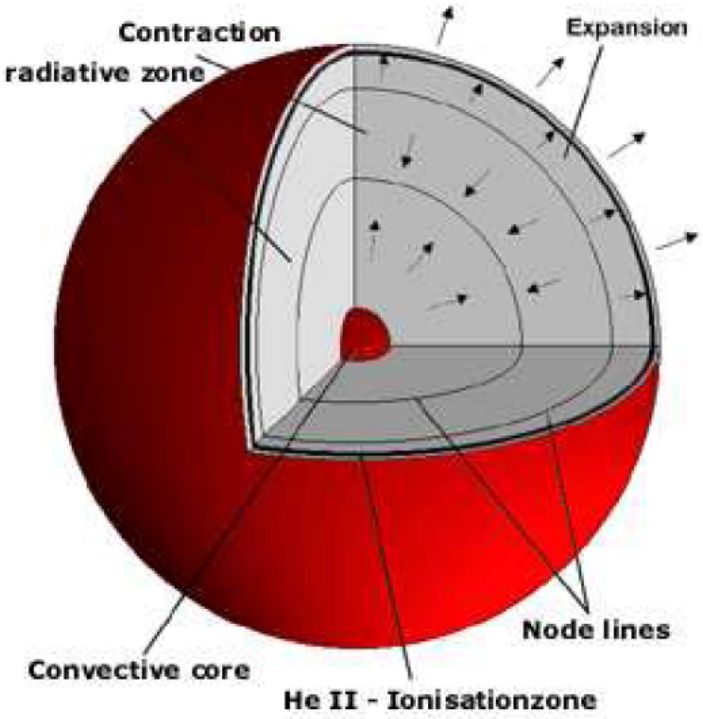
- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode
- Le mode fondamental : toutes les couches de l'atmosphère se contractent et se dilatent à l'unison



- La première harmonique :

Les pulsation radiales

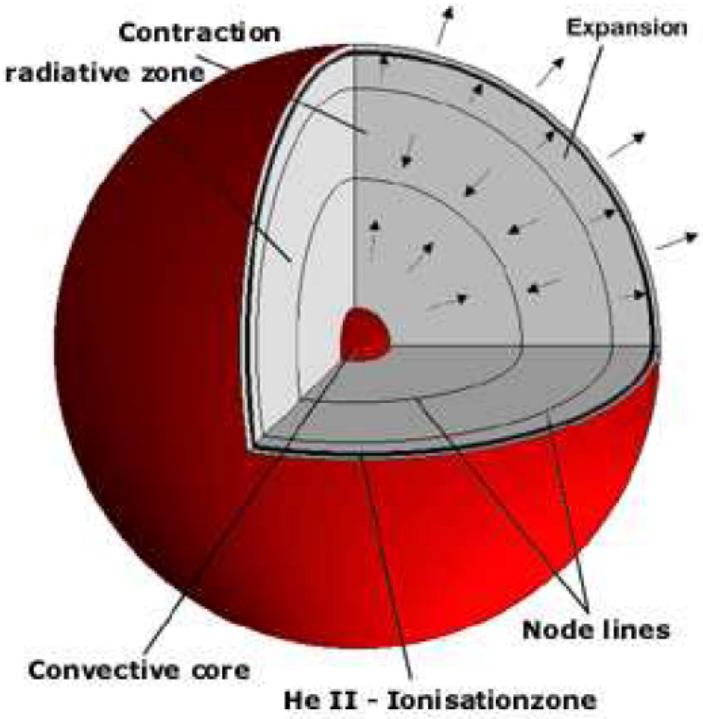
- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode
- Le mode fondamental : toutes les couches de l'atmosphère se contractent et se dilatent à l'unison



- La première harmonique :
  - La haute atmosphère s'étend lorsque la partie interne se contracte

Les pulsation radiales

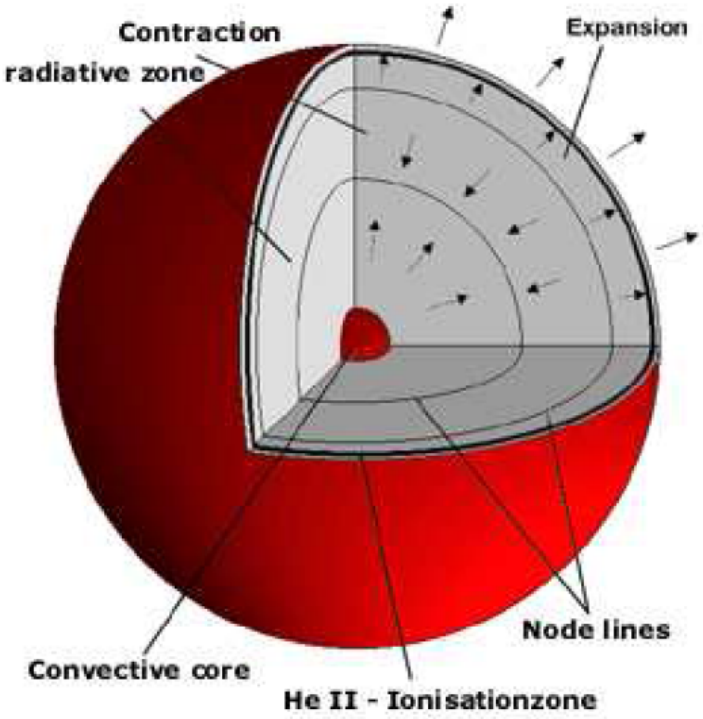
- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode
- Le mode fondamental : toutes les couches de l'atmosphère se contractent et se dilatent à l'unison



- La première harmonique :
  - La haute atmosphère s'étend lorsque la partie interne se contracte
  - La matière se déplace dans deux directions opposées par rapport au nœud à tout instant

Les pulsation radiales

- Dirigées selon le rayon de l'étoile
- Les RR Lyrae oscillent selon ce mode
- Le mode fondamental : toutes les couches de l'atmosphère se contractent et se dilatent à l'unison



- La première harmonique :
  - La haute atmosphère s'étend lorsque la partie interne se contracte
  - La matière se déplace dans deux directions opposées par rapport au nœud à tout instant
- Les autres harmoniques : l'atmosphère se comporte comme les plis d'un accordéon en action

Les pulsations non radiales

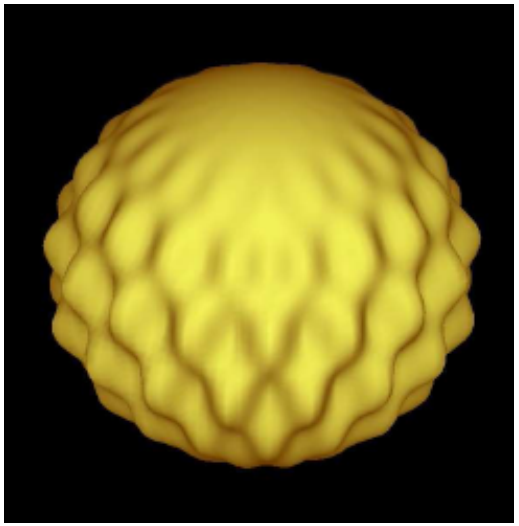
- Ces modes sont plus complexes

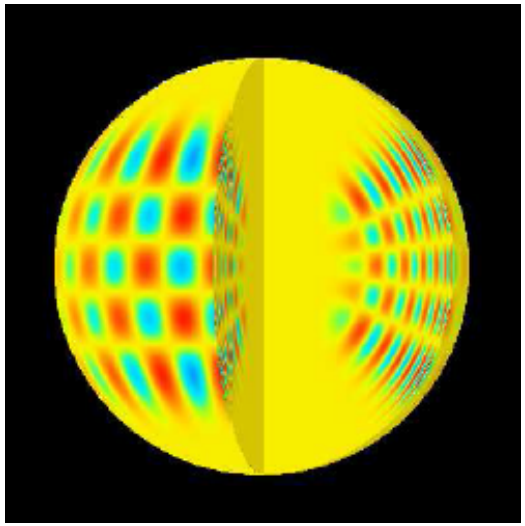
Les pulsations non radiales

- Ces modes sont plus complexes
- Certaines parties de la surface se déplacent vers le centre quand d'autres se déplacent vers l'extérieur

Les pulsations non radiales

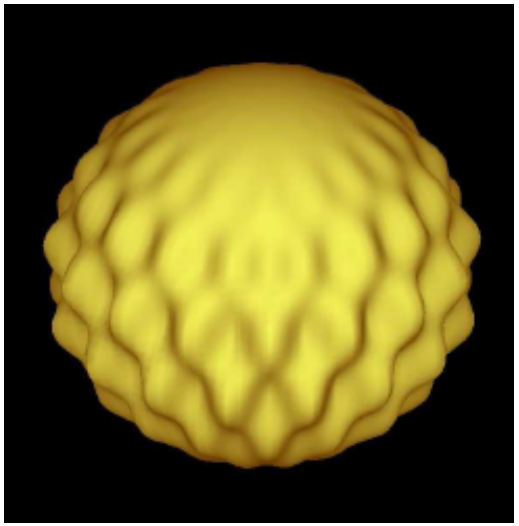
- Ces modes sont plus complexes
- Certaines parties de la surface se déplacent vers le centre quand d'autres se déplacent vers l'extérieur

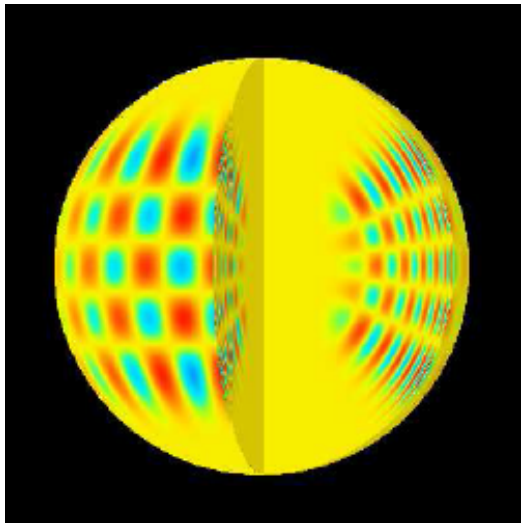




Les pulsations non radiales

- Ces modes sont plus complexes
- Certaines parties de la surface se déplacent vers le centre quand d'autres se déplacent vers l'extérieur





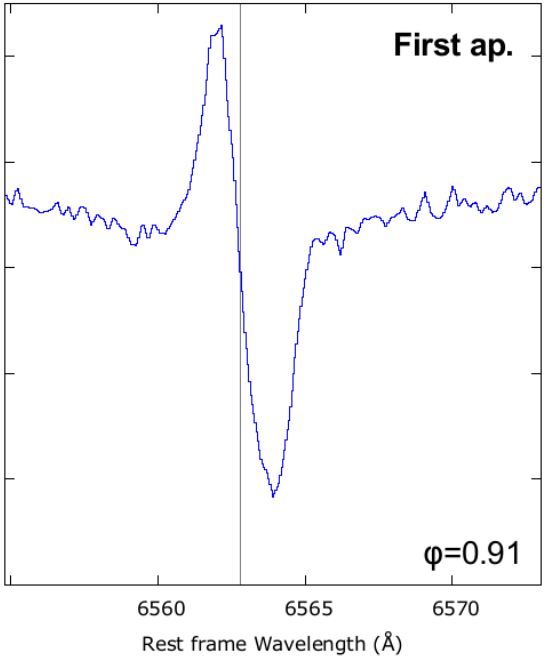
- Les différents mouvements de chute et d'expansion réchauffent ou refroidissent les zones

Partie C :

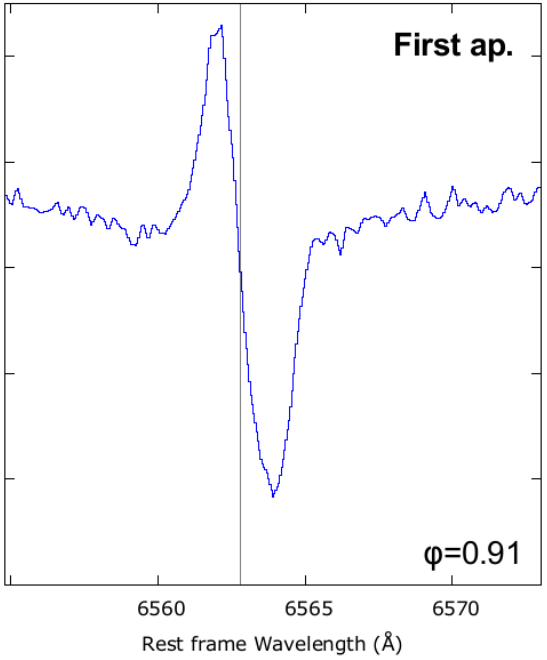
Origine des trois apparitions de Hα

1. La 1re apparition :

La 1re apparition

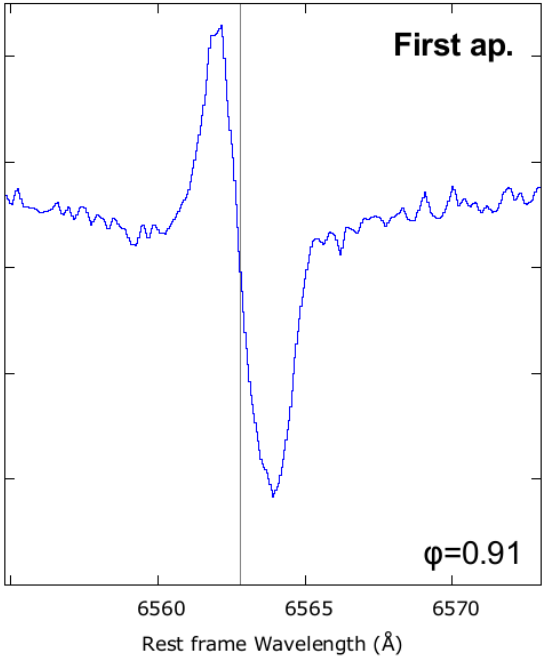


La 1re apparition



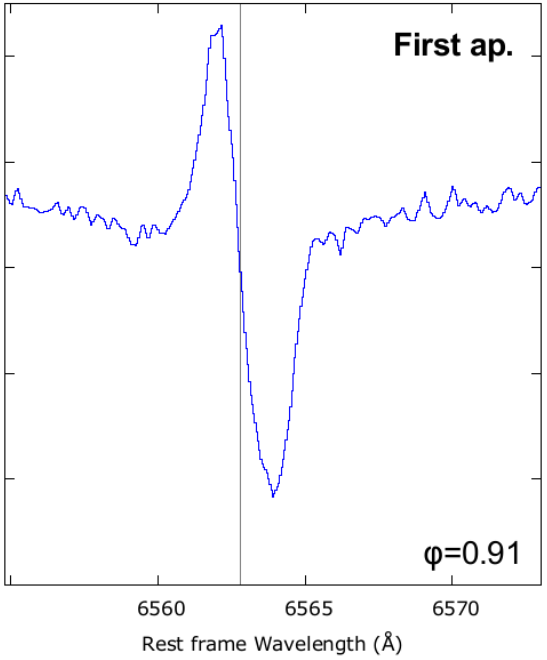
- Une onde de choc produite dans la couche siège du mécanisme κ arrive jusqu'à la photosphère

La 1re apparition



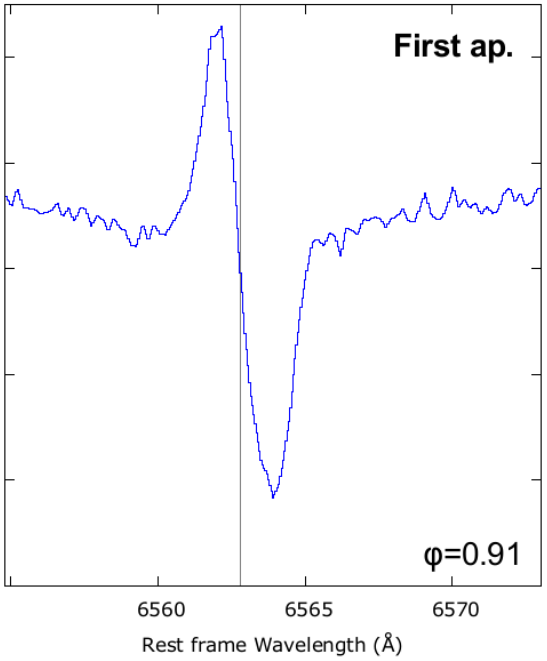
- Une onde de choc produite dans la couche siège du mécanisme κ arrive jusqu'à la photosphère
- L'onde de choc est alors en cours de décélération

La 1re apparition



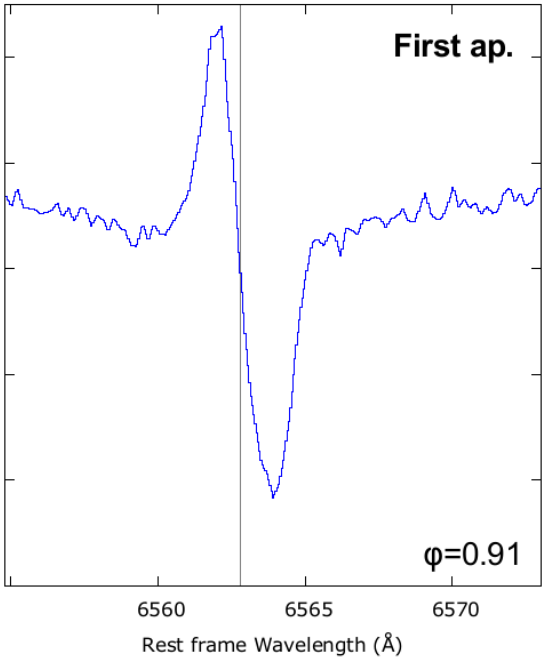
- Une onde de choc produite dans la couche siège du mécanisme κ arrive jusqu'à la photosphère
- L'onde de choc est alors en cours de décélération
- Elle chauffe l'hydrogène entraîné par son passage produisant la raie d'émission décalée vers le bleu

La 1re apparition



- Une onde de choc produite dans la couche siège du mécanisme κ arrive jusqu'à la photosphère
- L'onde de choc est alors en cours de décélération
- Elle chauffe l'hydrogène entraîné par son passage produisant la raie d'émission décalée vers le bleu
- L'énergie de l'onde se dissipe de façon radiative

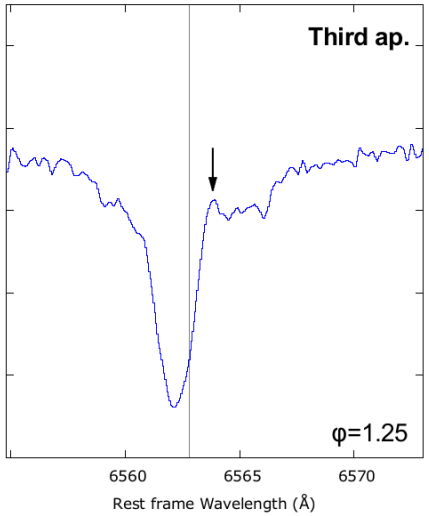
La 1re apparition

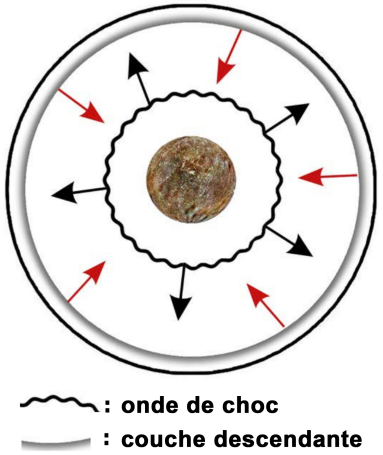


- Une onde de choc produite dans la couche siège du mécanisme κ arrive jusqu'à la photosphère
- L'onde de choc est alors en cours de décélération
- Elle chauffe l'hydrogène entraîné par son passage produisant la raie d'émission décalée vers le bleu
- L'énergie de l'onde se dissipe de façon radiative
- Preston l'a mise en évidence en 1965

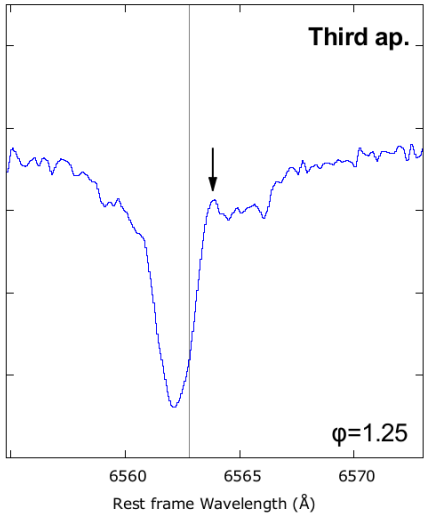
2. La 3e apparition :

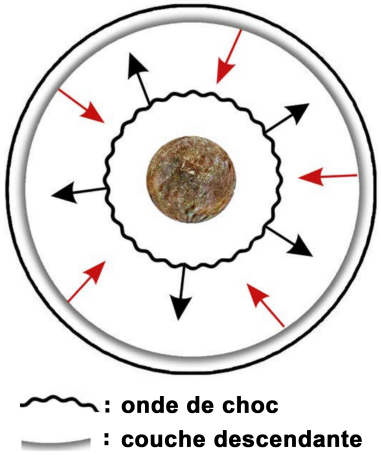
La 3e apparition





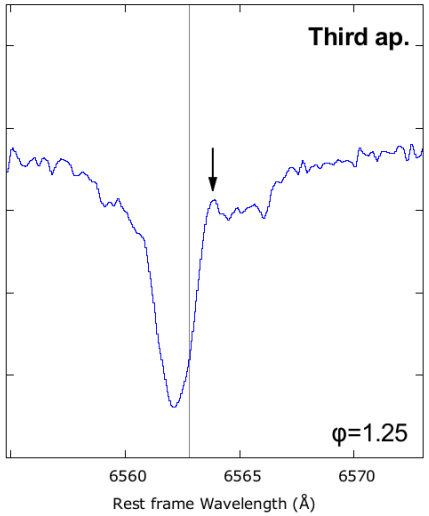
La 3e apparition

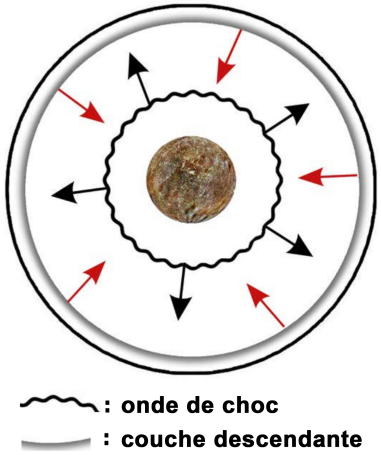




- À $\varphi = 0.2$ l'onde de choc ascendante du cycle en cours entraîne la basse atmosphère vers le haut

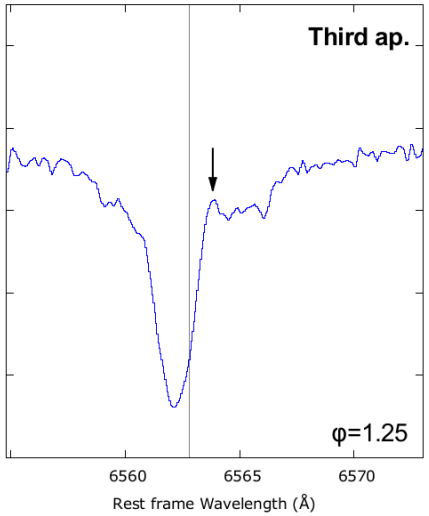
La 3e apparition

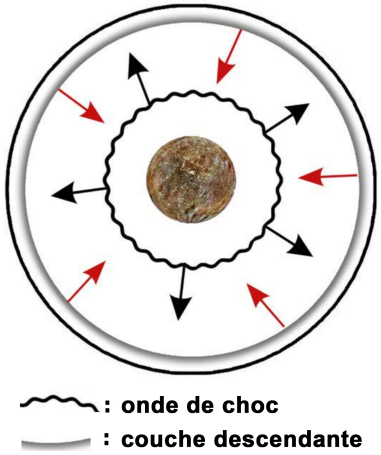




- À $\varphi = 0.2$ l'onde de choc ascendante du cycle en cours entraîne la basse atmosphère vers le haut
- Au même moment les couches enmenées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile ($g_{\text{RR Lyr}} = 10 g_{\text{pulsantes}}$)

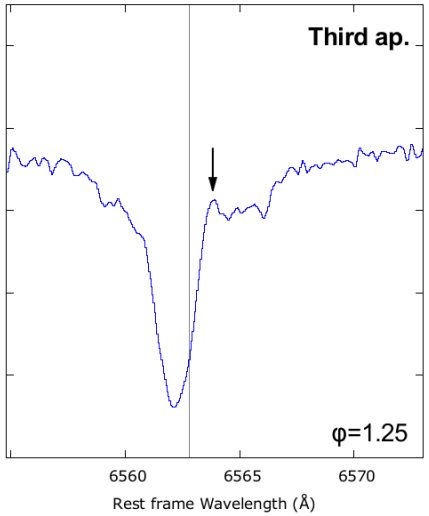
La 3e apparition

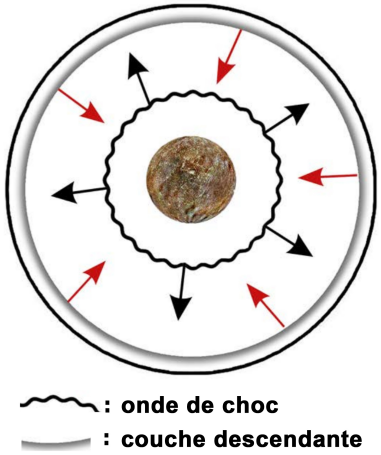




- À $\varphi = 0.2$ l'onde de choc ascendante du cycle en cours entraîne la basse atmosphère vers le haut
- Au même moment les couches enmenées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile ($g_{\text{RR Lyr}} = 10 g_{\text{pulsantes}}$)
- Création d'une zone de compression chauffée, précédent les couches descendantes

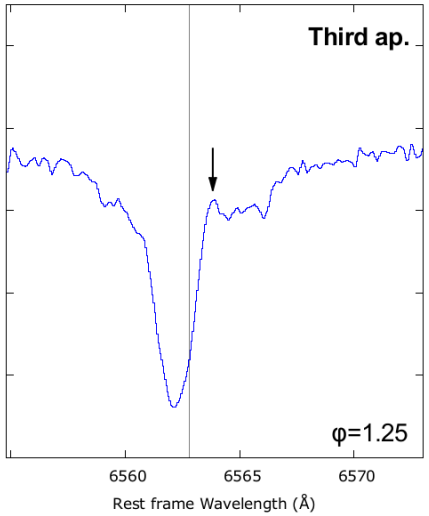
La 3e apparition

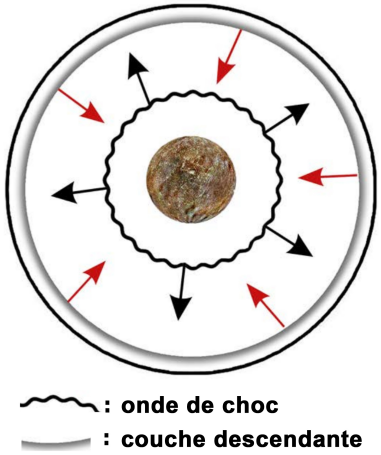




- À $\varphi = 0.2$ l'onde de choc ascendante du cycle en cours entraîne la basse atmosphère vers le haut
- Au même moment les couches enmenées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile ($g_{\text{RR Lyr}} = 10 g_{\text{pulsantes}}$)
- Création d'une zone de compression chauffée, précédent les couches descendantes
- Une émission décalée vers le rouge est alors créée

La 3e apparition

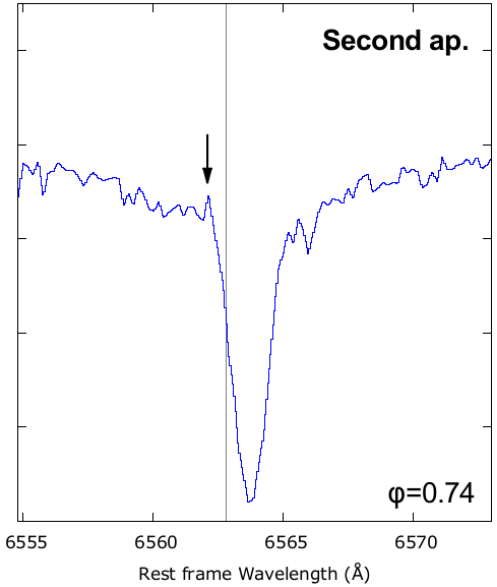




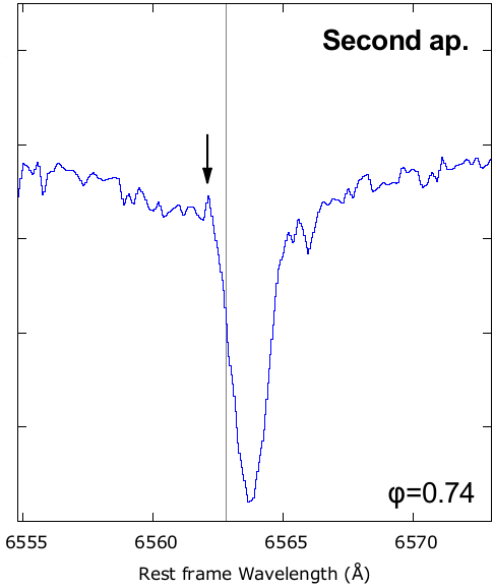
- À $\varphi = 0.2$ l'onde de choc ascendante du cycle en cours entraîne la basse atmosphère vers le haut
- Au même moment les couches enmenées dans la haute atmosphère au cycle précédent chutent vers le centre de l'étoile ($g_{\text{RR Lyr}} = 10 g_{\text{pulsantes}}$)
- Création d'une zone de compression chauffée, précédent les couches descendantes
- Une émission décalée vers le rouge est alors créée
- Le GRRR l'a mise en évidence dans RR Lyr en 2017 !

3. La 2e apparition :

La 2e apparition

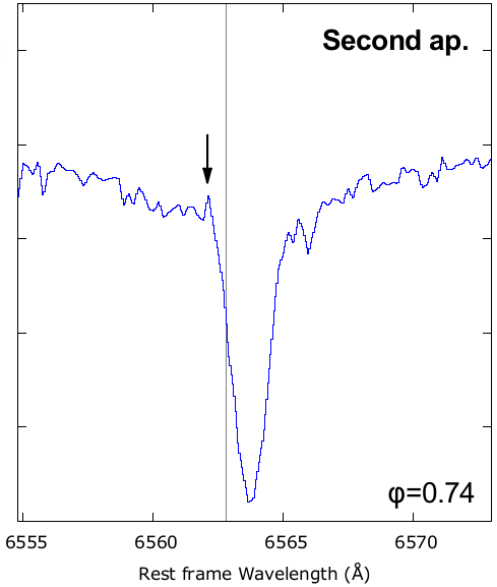


La 2e apparition



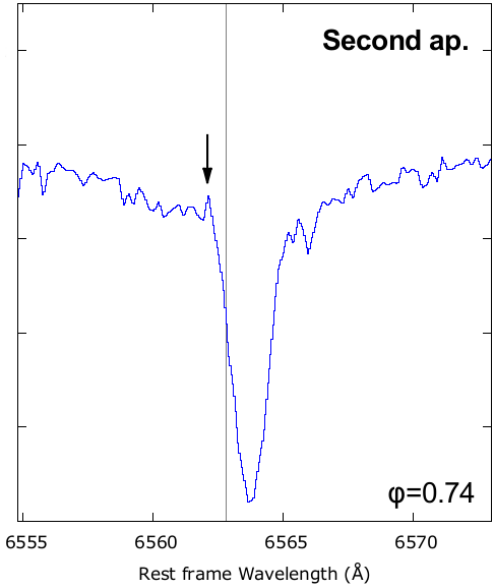
- À $\varphi = 0.72$ l'atmosphère est en contraction

La 2e apparition



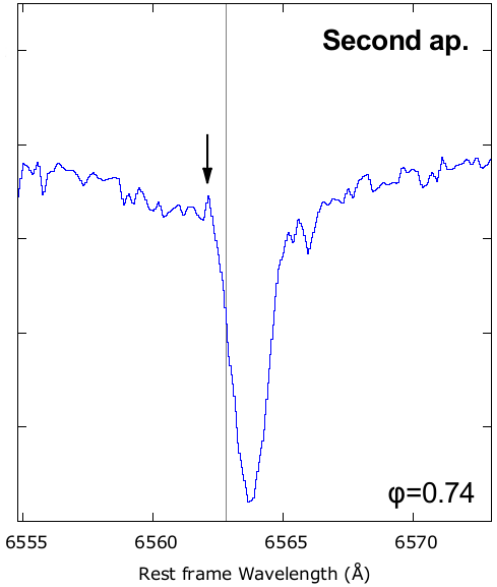
- À $\varphi = 0.72$ l'atmosphère est en contraction
- Les couches supérieures retombent à grande vitesse sur les couches inférieures moins rapides

La 2e apparition



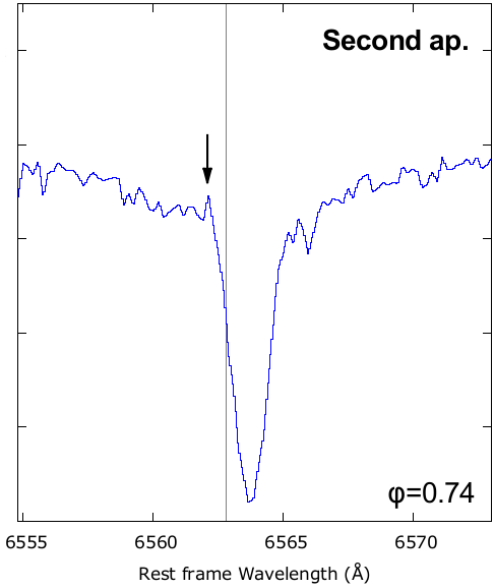
- À $\varphi = 0.72$ l'atmosphère est en contraction
- Les couches supérieures retombent à grande vitesse sur les couches inférieures moins rapides
- Le Δv et la densité plus importante des couches inférieures crée une zone comprimée de décélération se propageant vers la haute atmosphère

La 2e apparition



- À $\varphi = 0.72$ l'atmosphère est en contraction
- Les couches supérieures retombent à grande vitesse sur les couches inférieures moins rapides
- Le Δv et la densité plus importante des couches inférieures crée une zone comprimée de décélération se propageant vers la haute atmosphère
- Une faible raie et décalée vers le bleu est créée

La 2e apparition



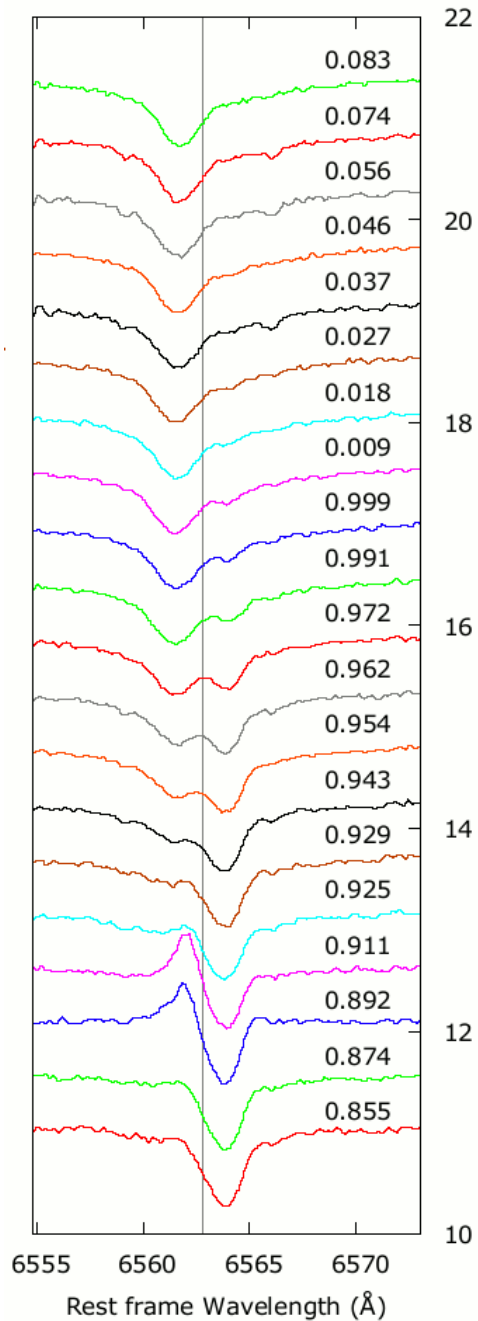
- À $\varphi = 0.72$ l'atmosphère est en contraction
- Les couches supérieures retombent à grande vitesse sur les couches inférieures moins rapides
- Le Δv et la densité plus importante des couches inférieures crée une zone comprimée de décélération se propageant vers la haute atmosphère
- Une faible raie et décalée vers le bleu est créée
- D. Gillet l'a mise en évidence dans RR Lyr en 1988

Partie D :

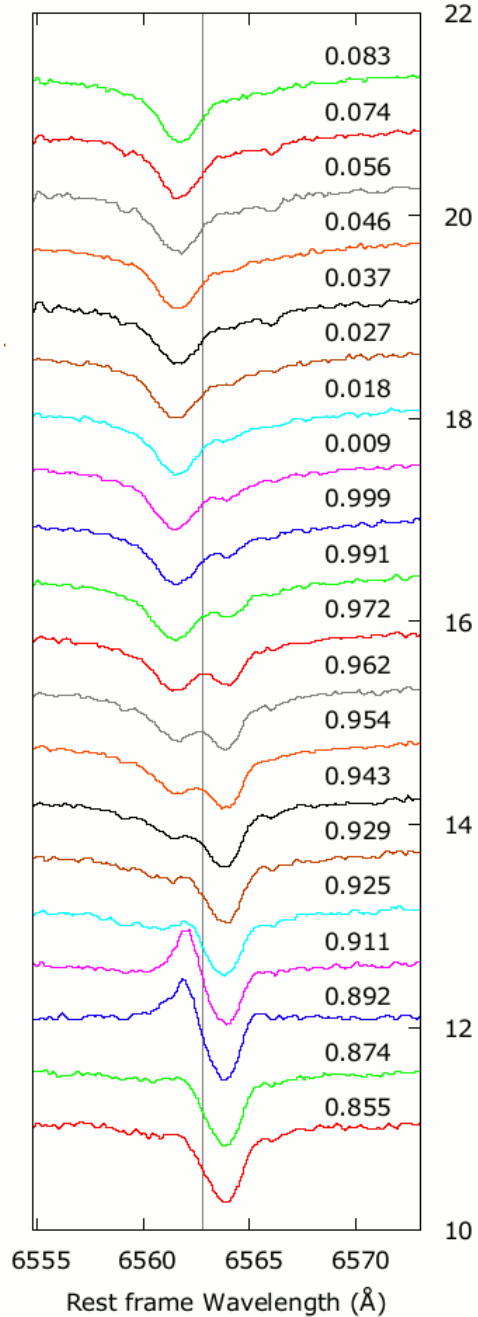
Les effets particuliers observés

1. L'effet Schwarzschild

L'effet Schwarzschild :

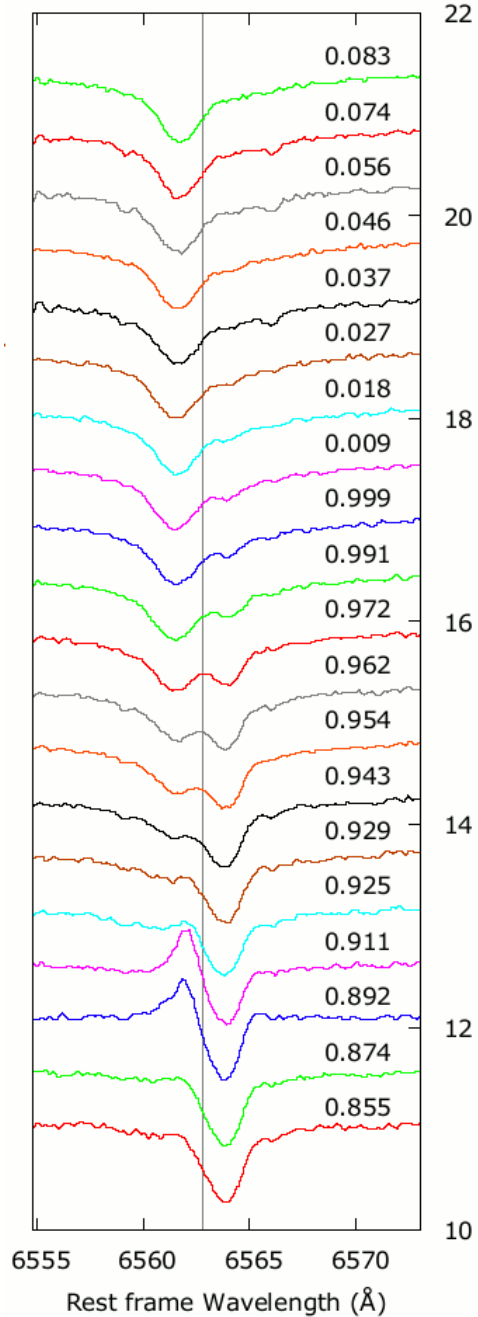


L'effet Schwarzschild :



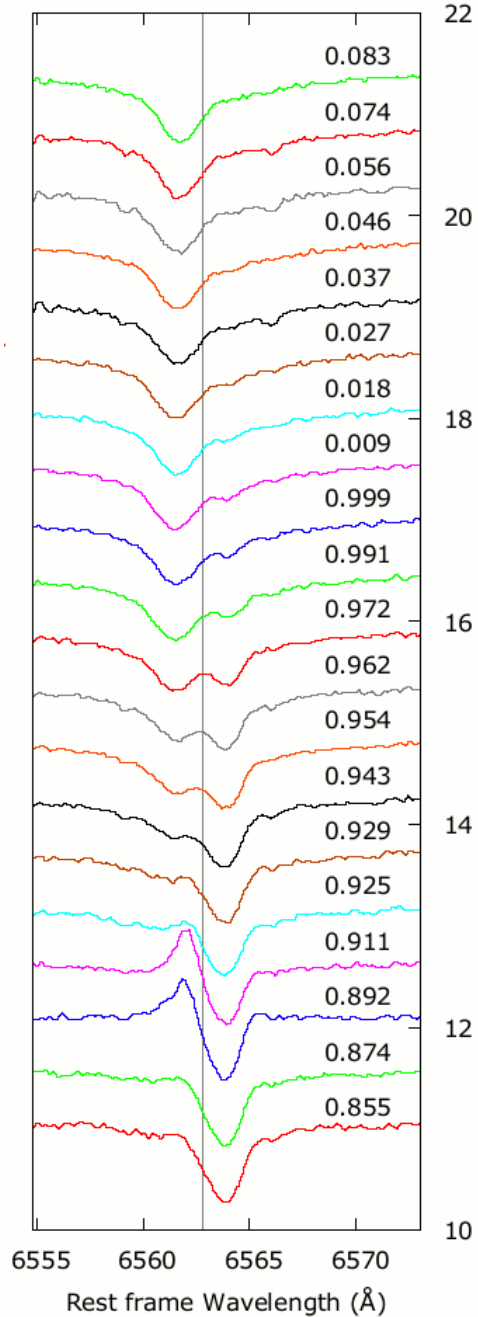
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952

L'effet Schwarzschild :



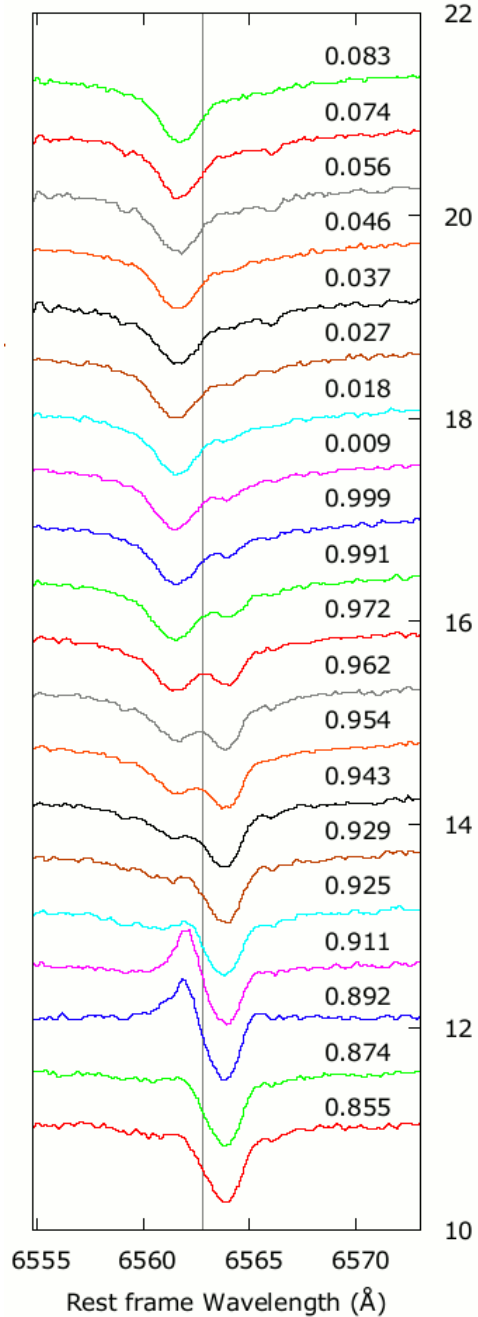
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes

L'effet Schwarzschild :



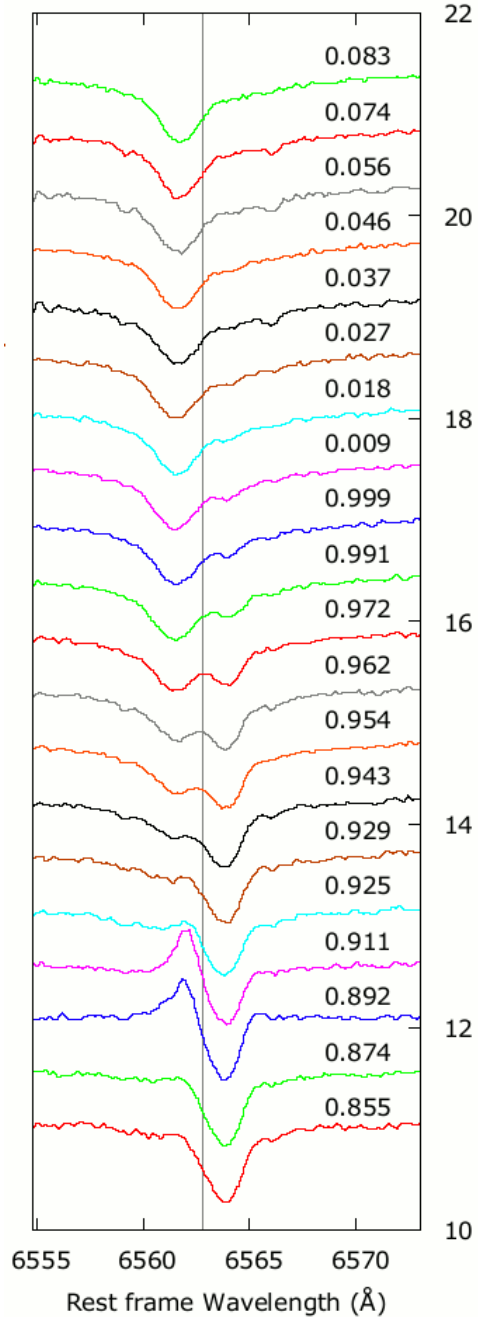
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes
- L'onde de choc du cycle en cours traverse la couche inférieure

L'effet Schwarzschild :



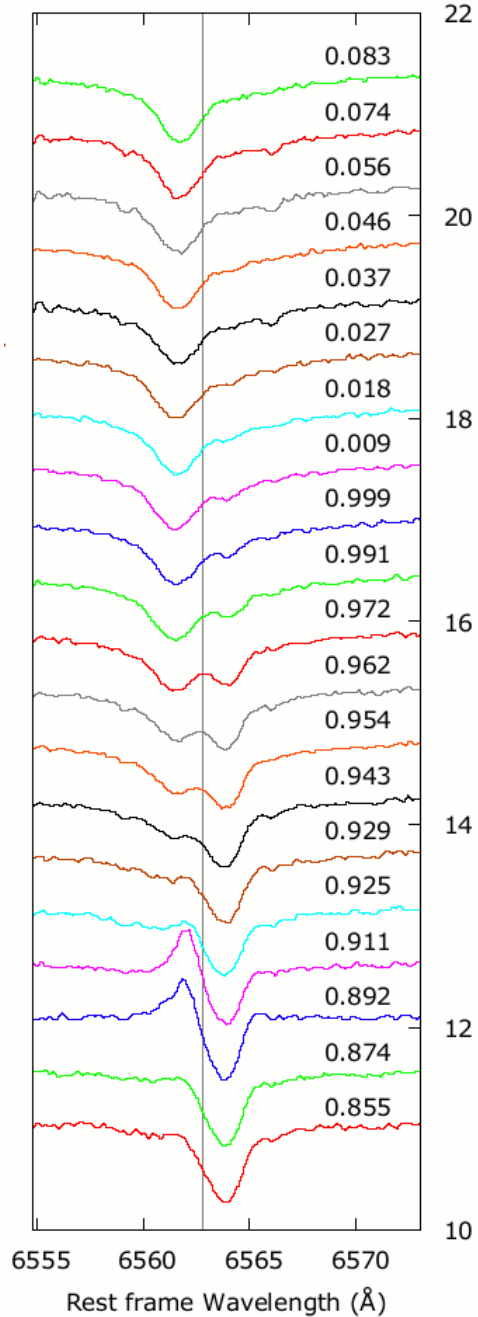
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes
- L'onde de choc du cycle en cours traverse la couche inférieure
- Elle provoque l'inversion du sens de déplacement de la couche inférieure

L'effet Schwarzschild :



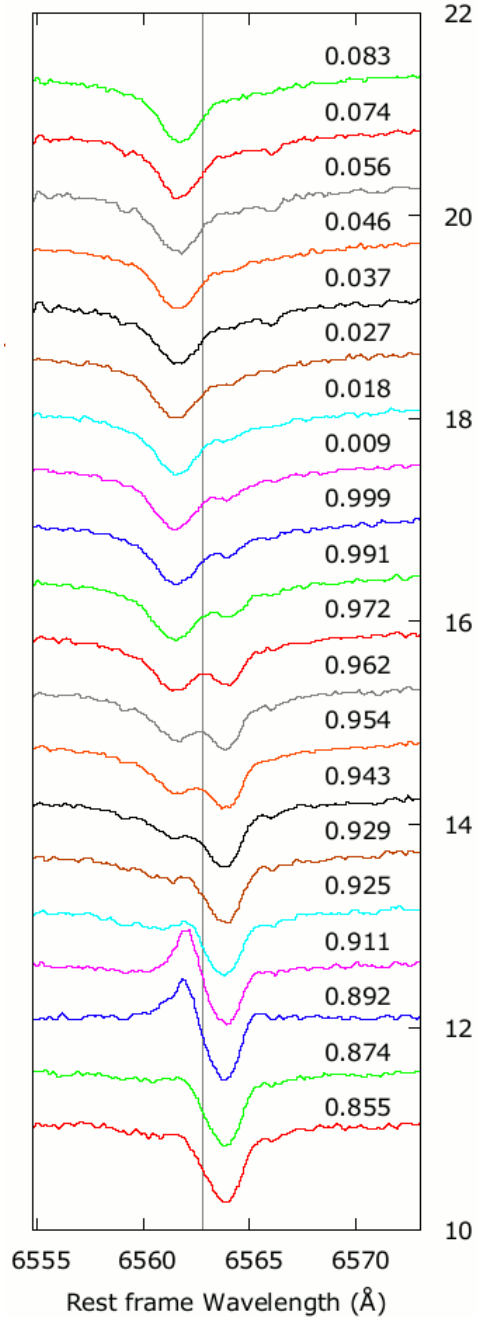
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes
- L'onde de choc du cycle en cours traverse la couche inférieure
- Elle provoque l'inversion du sens de déplacement de la couche inférieure
- À l'altitude propice à la formation des raies : dédoublement par effet Doppler

L'effet Schwarzschild :



- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes
- L'onde de choc du cycle en cours traverse la couche inférieure
- Elle provoque l'inversion du sens de déplacement de la couche inférieure
- À l'altitude propice à la formation des raies : dédoublement par effet Doppler
  - Couche inférieure ascendante : raie blueshiftée

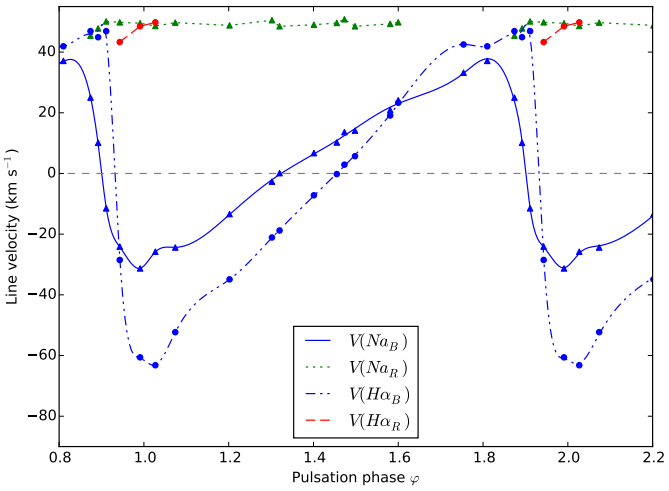
L'effet Schwarzschild :



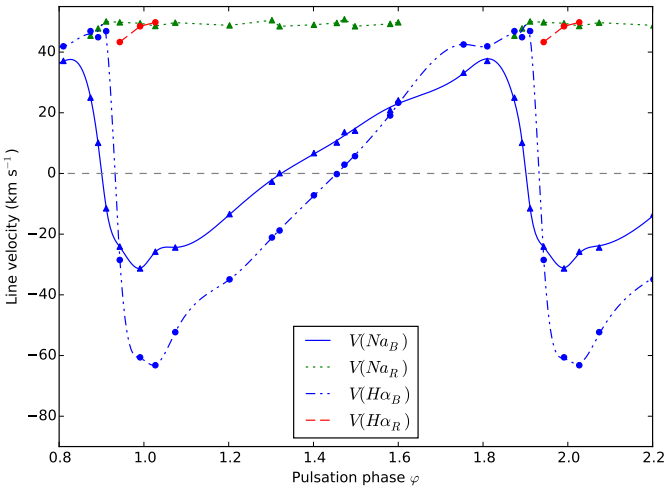
- Le dédoublement des raies a été interprété par Schwarzschild en 1952
- Durant la phase de compression : 3 couches du cycle précédent sont descendantes
- L'onde de choc du cycle en cours traverse la couche inférieure
- Elle provoque l'inversion du sens de déplacement de la couche inférieure
- À l'altitude propice à la formation des raies : dédoublement par effet Doppler
  - Couche inférieure ascendante : raie blueshiftée
  - Couches supérieures descendantes : raie redshiftée

2. L'effet Van Hoff

L'effet Van Hoff :

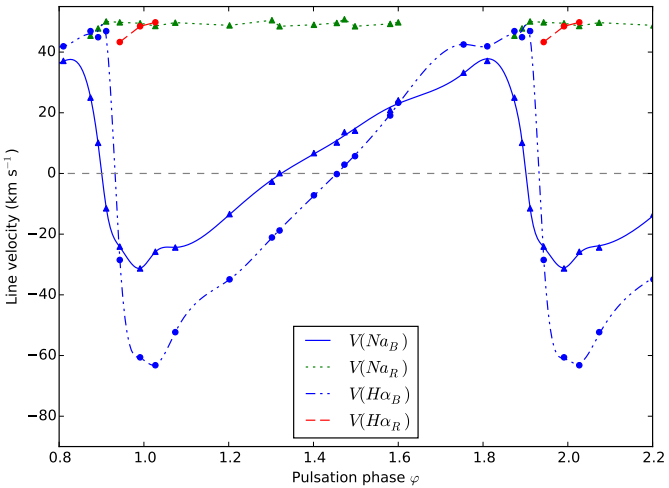


L'effet Van Hoff :



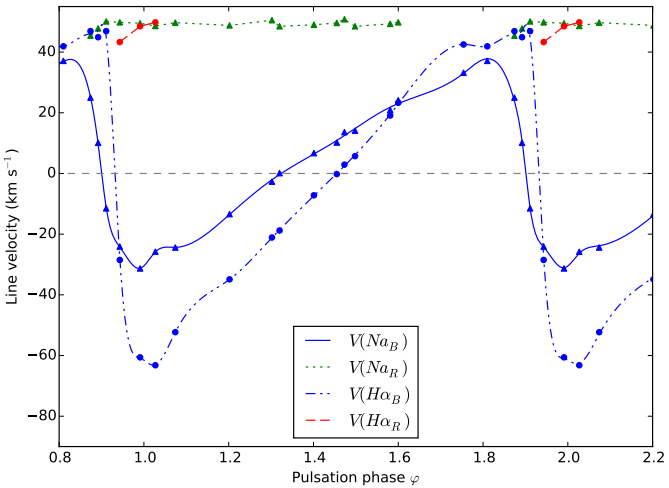
- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :

L'effet Van Hoff :



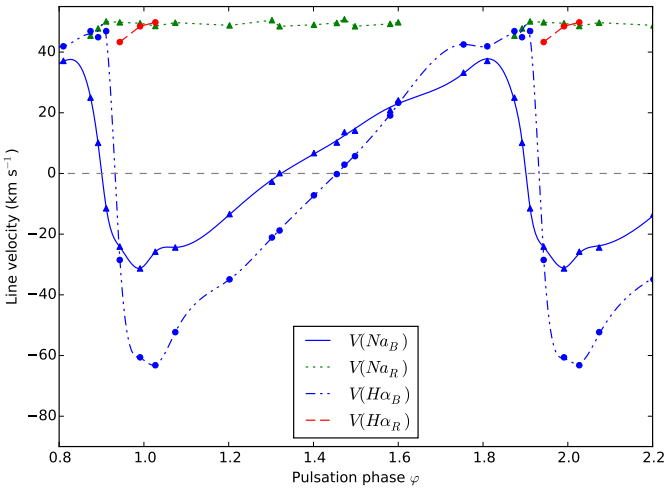
- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption

L'effet Van Hoff :



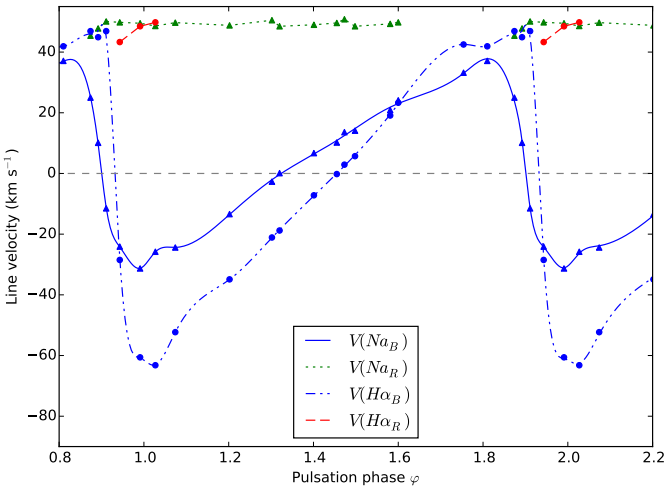
- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption
  - L'apparition de raies en émission

L'effet Van Hoff :



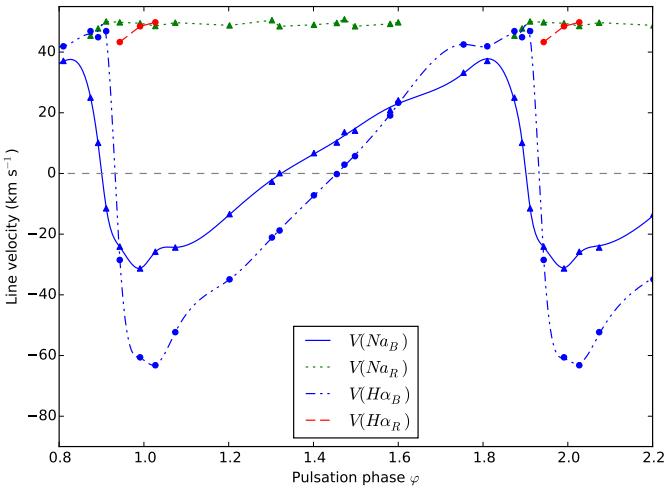
- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption
  - L'apparition de raies en émission
  - Une discontinuité dans la courbe de vitesse radiale

L'effet Van Hoff :



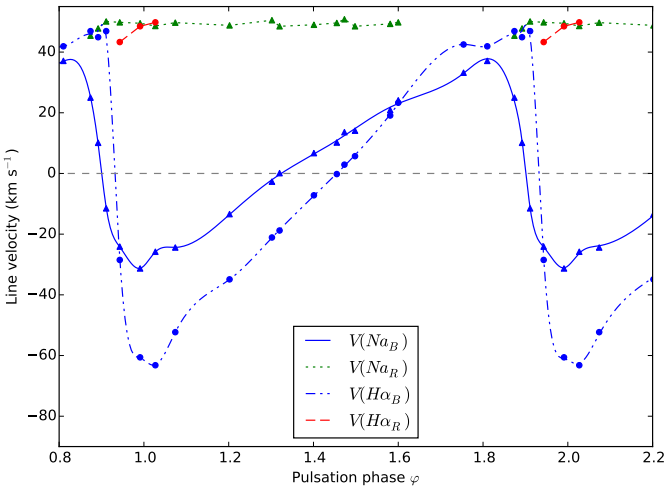
- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption
  - L'apparition de raies en émission
  - Une discontinuité dans la courbe de vitesse radiale
  - Et l'effet Van Hoff

L'effet Van Hoff :



- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption
  - L'apparition de raies en émission
  - Une discontinuité dans la courbe de vitesse radiale
  - Et l'effet Van Hoff
- Dans les courbes de vitesse radiale : un retard de $0,04\,\mathrm{P}$ de H_α sur les raies métalliques

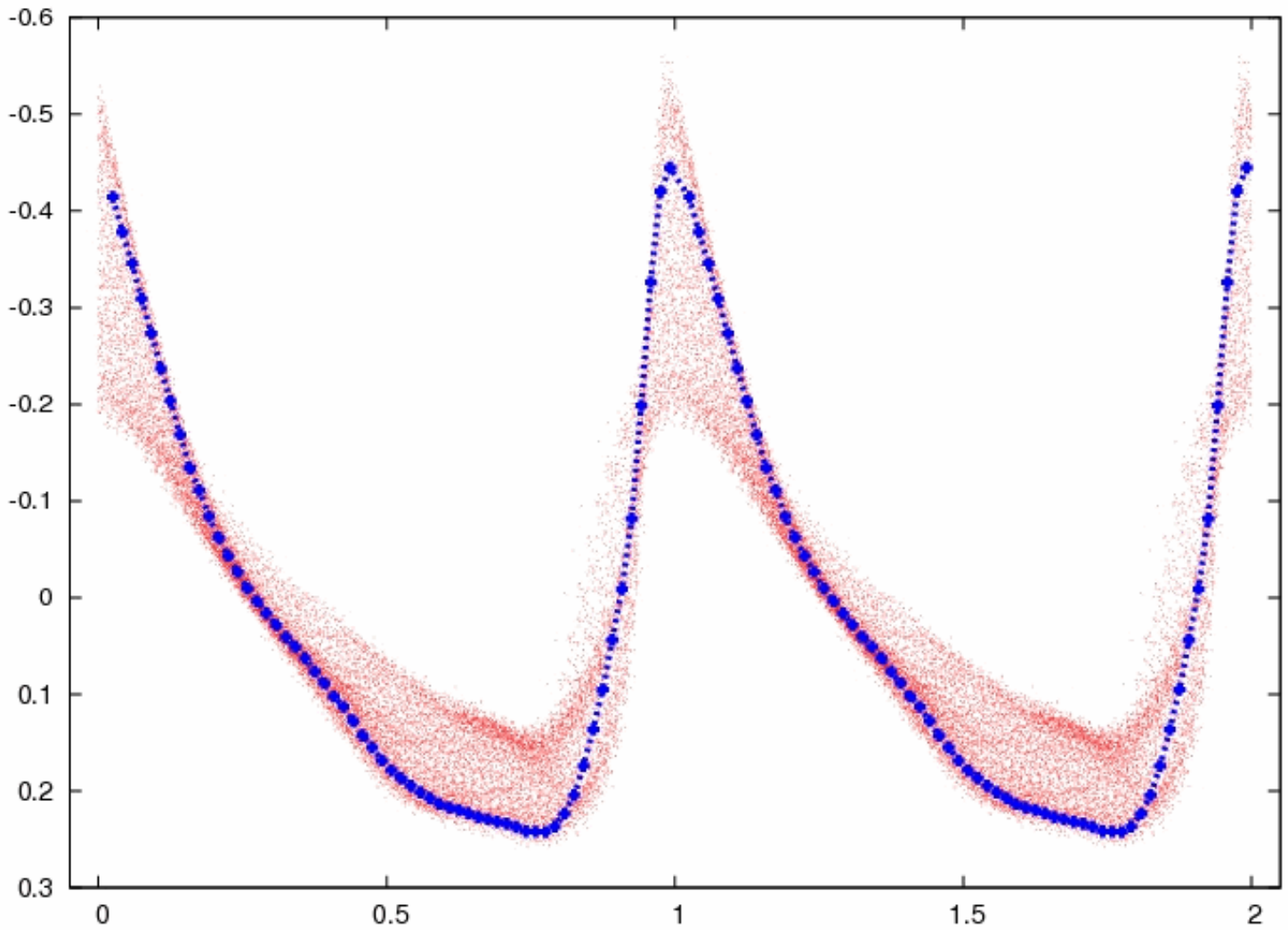
L'effet Van Hoff :



- La travservée de l'onde de choc dans l'atmosphère en mouvement de pulsation entraîne :
  - Le dédoublement des raies d'absorption
  - L'apparition de raies en émission
  - Une discontinuité dans la courbe de vitesse radiale
  - Et l'effet Van Hoff
- Dans les courbes de vitesse radiale : un retard de $0,04\,\mathrm{P}$ de H_α sur les raies métalliques
- Datant de 1953, P. Mathias l'a mise en évidence dans RR Lyr en 1995 !

3. L'effet Blazhko

L'effet Blazhko :



Crédit : http ://physique.unice.fr

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :
  - L'éclat photométrique au maximum ($\varphi = 0$) de pulsation varie selon ψ

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :
  - L'éclat photométrique au maximum ($\varphi = 0$) de pulsation varie selon ψ
  - L'instant des maxima se décalent de cycle en cycle

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :
  - L'éclat photométrique au maximum ($\varphi = 0$) de pulsation varie selon ψ
  - L'instant des maxima se décalent de cycle en cycle
  - À $\psi \sim 0$: les $O - C$ photométriques passent par un minimum

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :
  - L'éclat photométrique au maximum ($\varphi = 0$) de pulsation varie selon ψ
  - L'instant des maxima se décalent de cycle en cycle
  - À $\psi \sim 0$: les $O - C$ photométriques passent par un minimum
  - À $\psi \sim 0$: les ondes de choc sont amplifiées $\rightarrow$ 1re émission plus intense, He I et II en émission

L'effet Blazhko :

- Mis en évidence par Sergei Blazhko en 1907 dans les courbes photométriques
- C'est une modulation en durée et en intensité de l'intensité des pulsations
- La période Blazhko varie autour de 40 j : phase notée ψ
- Toutes les étoiles RR Lyrae ne subissent pas cet effet
- Phénomènes observées :
  - L'éclat photométrique au maximum ($\varphi = 0$) de pulsation varie selon ψ
  - L'instant des maxima se décalent de cycle en cycle
  - À $\psi \sim 0$: les $O - C$ photométriques passent par un minimum
  - À $\psi \sim 0$: les ondes de choc sont amplifiées $\rightarrow$ 1re émission plus intense, He I et II en émission
- Phénomène resté inexpliqué depuis plus de 100 ans !

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !
- Les Céphéides sont un sujet d'étude aussi d'intérêt

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !
- Les Céphéides sont un sujet d'étude aussi d'intérêt
- Un point commun les unie : le κ-mécanisme provoquant les ondes de pression

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !
- Les Céphéides sont un sujet d'étude aussi d'intérêt
- Un point commun les unie : le κ-mécanisme provoquant les ondes de pression
- Les 3 émissions de Hα n'ont plus de mystères pour vous

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !
- Les Céphéides sont un sujet d'étude aussi d'intérêt
- Un point commun les unie : le κ-mécanisme provoquant les ondes de pression
- Les 3 émissions de Hα n'ont plus de mystères pour vous
- Les effets Schwarzschild et Van Hoff vous sont alors familiers

Conclusion

- Ce grand tour d'horizon a permis de s'y retrouver parmi les types d'étoiles variables
- Plus les pulsantes sont petites, plus elles sont nerveuses : sacré RR Lyr !
- Les Céphéides sont un sujet d'étude aussi d'intérêt
- Un point commun les unie : le κ-mécanisme provoquant les ondes de pression
- Les 3 émissions de Hα n'ont plus de mystères pour vous
- Les effets Schwarzschild et Van Hoff vous sont alors familiers
- Mais l'effet Blazhko est le prochain challenge