



université
PARIS-SACLAY

ÉCOLE DOCTORALE
Astronomie
et Astrophysique
d'Île-de-France

UNIVERSITÉ
PARIS
SUD
Comprendre le monde,
construire l'avenir®



Frédéric MARCADON

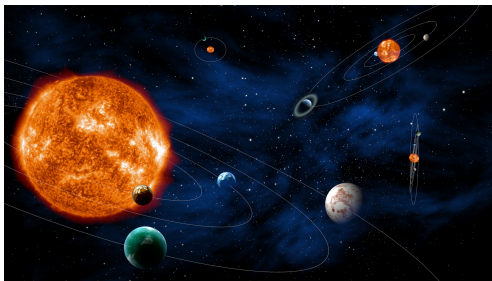
Détection et modélisation de binaires sismiques avec Kepler

Directeur de thèse : Thierry APPOURCHAUX

Institut d'Astrophysique Spatiale

Orsay – 20 mars 2018

Introduction générale



- Missions CoRoT et Kepler : détection d'exoplanètes par la méthode des transits et caractérisation des étoiles hôtes par l'astérosismologie.
- Astérosismologie : outil de diagnostic de la structure interne des étoiles et de détermination de leurs propriétés physiques (masse et âge).
- Observation des variations de luminosité des étoiles au cours du temps par photométrie (courbes de lumière).

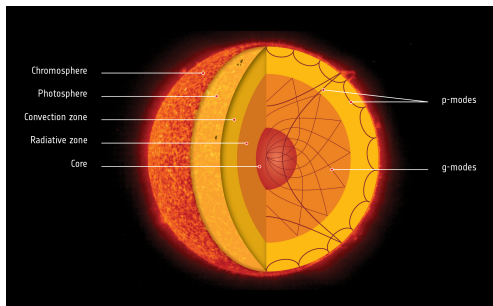
Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Théorie des oscillations stellaires



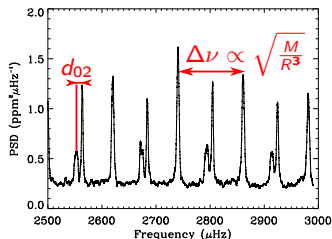
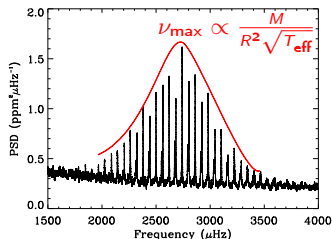
- Astérosismologie : étude des oscillations des étoiles permettant de sonder leur structure interne.
- Différents types d'ondes se propageant à l'intérieur de l'étoile :
 - les ondes acoustiques générées dans la zone convective et dont la force de rappel est la pression (modes p).
 - les ondes internes de gravité confinées dans la zone radiative et dont la force de rappel est la poussée d'Archimède (modes g).

Astérosismologie et physique stellaire

- Oscillations stellaires détectées par l'observation des variations de luminosité des étoiles (courbes de lumière).
- Grande séparation $\Delta\nu$: inverse du temps nécessaire à l'onde sonore pour effectuer un aller-retour entre le centre et la surface.

$$\Delta\nu = \left[2 \int_0^R \frac{dr}{c(r)} \right]^{-1} \quad (1)$$

- Paramètres sismiques $\Delta\nu$ et $\nu_{\max}$ reliés aux paramètres stellaires à travers les lois d'échelle.



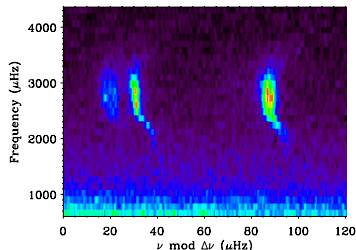
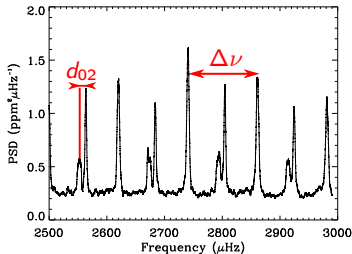
Spectre de puissance de KIC 8379927 (gauche) et zoom sur les modes (droite)

Astérosismologie et physique stellaire

- Fréquences ν des modes de pression données par l'expression asymptotique (Tassoul, 1980, 1990) :

$$\nu_{n,l} \simeq \left(n + \frac{l}{2} + \frac{1}{4} + \alpha \right) \Delta\nu \quad (2)$$

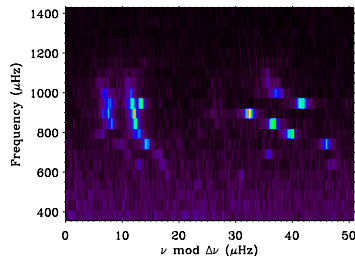
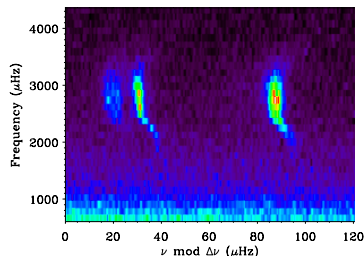
- ordre radial n et degré angulaire l
- α dépend des conditions dans les couches superficielles
- Diagramme échelle : spectre de puissance découpé en portions de longueur $\Delta\nu$ superposées les unes au-dessus des autres.



Zoom sur les modes de KIC 8379927 (gauche) et diagramme échelle (droite)

Astérosismologie et physique stellaire

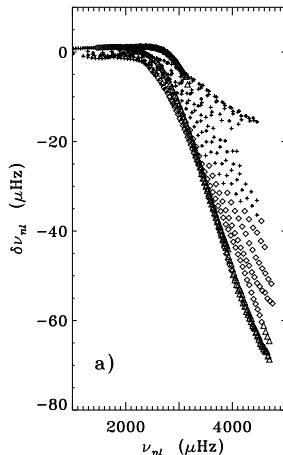
- Modes mixtes : information concernant le stade évolutif de l'étoile directement visible sur le diagramme échelle (KIC 11026764).



Diagrammes échelle de KIC 8379927 (gauche) et KIC 11026764 (droite)

Analyse de la structure interne

- Description approximative des couches superficielles de l'étoile.
⇒ Décalage entre fréquences théoriques et observées (effets de surface).



Différence entre fréquences observées et théoriques pour le Soleil
Figure tirée de Aerts et al. (2010)

Analyse de la structure interne

- Description approximative des couches superficielles de l'étoile.
 $\Rightarrow$ Décalage entre fréquences théoriques et observées (effets de surface).

Rapports de fréquences dépendant uniquement de la structure interne à travers le terme δ_l (Roxburgh et Vorontsov, 2003) :

$$2\pi \nu_{n,l} (2\Delta_l)^{-1} = (n + l/2)\pi + \alpha(\nu_{n,l}) - \delta_l(\nu_{n,l}) \quad (3)$$

- α dépend des conditions dans les couches superficielles

$$r_{02}(n) = \frac{d_{02}(n)}{\Delta_1(n)}, \quad r_{01}(n) = \frac{d_{01}(n)}{\Delta_1(n)}, \quad r_{10}(n) = \frac{d_{10}(n)}{\Delta_0(n+1)} \quad (4)$$

- petites séparations $d_{02}(n)$, $d_{01}(n)$ et $d_{10}(n)$
- grandes séparations $\Delta_l(n) = \nu_{n,l} - \nu_{n-1,l}$

Analyse de la structure interne

- Petite séparation d_{02} dépend de l'abondance centrale en hydrogène et donc de l'état évolutif de l'étoile.

⇒ Rapport de fréquences r_{02} particulièrement sensible à l'âge.

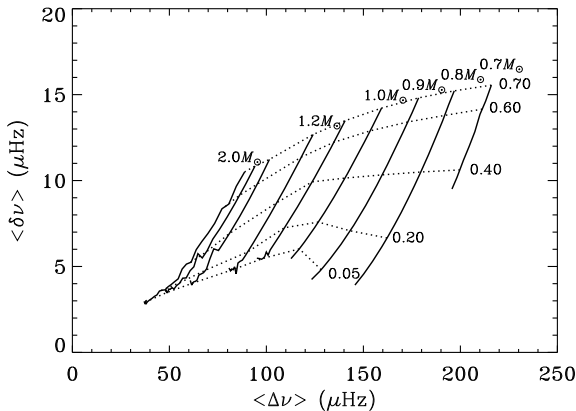


Diagramme de Christensen-Dalsgaard (1993)

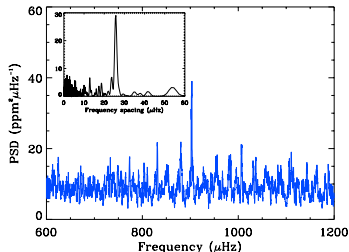
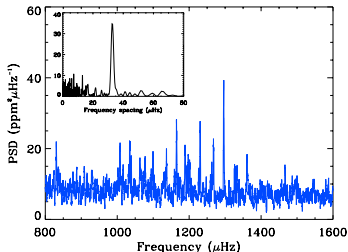
Figure tirée de Aerts et al. (2010)

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Détection d'oscillations avec K2

- Mai 2013 : la mission Kepler prend fin avec la perte d'une 2^e roue de réaction.
⇒ Nouveau mode de fonctionnement connu sous le nom de K2.
- Capacité à détecter des étoiles de type solaire à partir des nouvelles données :
→ spectres de puissance de 23 étoiles distribués à différentes équipes.
→ détection des oscillations et détermination des paramètres sismiques.
- À partir des codes développés par notre équipe pour la mission Kepler :
→ détection de 2 cibles parmi les 4 identifiées par l'ensemble des équipes.
→ ajustement des spectres de puissance afin d'estimer $\nu_{\max}$ et $\Delta\nu$.



Spectres de puissance de EPIC 201367296 (gauche) et EPIC 201367904 (droite)

Modélisation des 4 cibles détectées

- Modélisation type grille de modèles appliquée par une autre série d'équipes.
⇒ Détermination des propriétés physiques des 4 étoiles détectées.
- Différentes séries de contraintes utilisées pour la modélisation :
 - $\{\Delta\nu, \nu_{\max}, T_{\text{eff}}, [\text{Fe}/\text{H}]\}$
 - $\{\Delta\nu, T_{\text{eff}}, [\text{Fe}/\text{H}]\}$
- ⇒ Tester l'impact des contraintes sur les propriétés physiques obtenues.
- Chaplin et al. (2015) incluant Marcadon, F. et Appourchaux, T. paru dans PASP, 127:1038–1044.

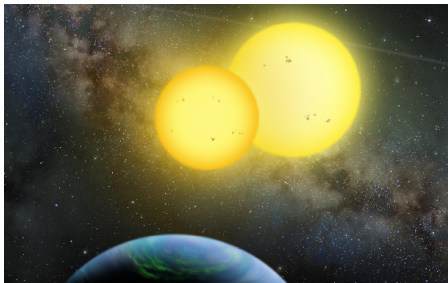
EPIC	$\nu_{\max}$ (μHz)	$\Delta\nu$ (μHz)	M ($M_{\odot}$)	R ($R_{\odot}$)	ρ (g cm^{-3})	$\log g$ (dex)
201367296	1176	65.7	1.14	1.71	0.323	4.032
201367904	890	51.5	1.28	2.08	0.202	3.912
201820830	1196	66.6	1.35	1.77	0.345	4.076
201860743	1000	57.1	1.14	1.87	0.246	3.952

Paramètres sismiques et propriétés physiques des 4 étoiles

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires**
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Systèmes d'étoiles de type solaire



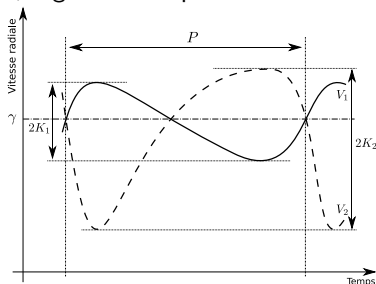
- Binaires astérosismiques : détection de la signature caractéristique des oscillations de type solaire pour les deux étoiles du système.
- Contraintes sur les masses suivant la nature des observations :
 - Binaires résolues spatialement (visuelles) $\Rightarrow$ masse totale du système.
 - Binaires spectroscopiques à 2 spectres (SB2) $\Rightarrow$ rapport de masse.
- Origine commune (Tohline, 2002) : même âge et composition initiale identique permettant de contraindre les modèles d'évolution stellaire.

Application aux binaires spectroscopiques

- Vitesses radiales des étoiles de masses M_1 et M_2 calculées à partir des éléments orbitaux $\mathcal{P}_{\text{orb}} = (P, T, e, \omega, \gamma, K_1, K_2)$.

$$V_{1/2} = \gamma \pm K_{1/2} [e \cos \omega + \cos(\nu + \omega)] \quad (5)$$

- période orbitale P et temps de passage au périastre T
- demi-amplitudes des courbes de vitesse radiale $K_{1/2}$
- vitesse systémique γ , anomalie vraie ν
- excentricité e , argument du périastre ω



Courbes de vitesse radiale

Application aux binaires spectroscopiques

- Vitesses radiales des étoiles de masses M_1 et M_2 calculées à partir des éléments orbitaux $\mathcal{P}_{\text{orb}} = (P, T, e, \omega, \gamma, K_1, K_2)$.

$$V_{1/2} = \gamma \pm K_{1/2} [e \cos \omega + \cos(\nu + \omega)] \quad (5)$$

- période orbitale P et temps de passage au périastre T
- demi-amplitudes des courbes de vitesse radiale $K_{1/2}$
- vitesse systémique γ , anomalie vraie ν
- excentricité e , argument du périastre ω

Seul le rapport de masse entre les deux étoiles est mesurable :

$$M_{1/2} = \frac{1}{(2\pi)^3} \frac{(K_1 + K_2)^2 K_{2/1} P (1 - e^2)^{3/2}}{\sin^3 i} \quad (6)$$

$$\Rightarrow \frac{M_1}{M_2} = \frac{K_2}{K_1} \quad (7)$$

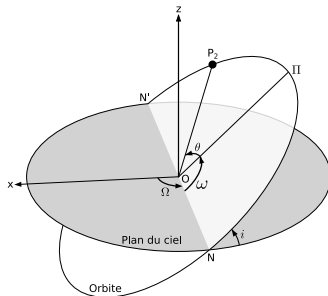
car inclinaison i du système par rapport au plan du ciel inconnue.

Application aux binaires résolues spatialement

- x, y : coordonnées de l'orbite relative dans le plan du ciel.

$$x = AX + FY, \quad y = BX + GY \quad (8)$$

- éléments de Thiele-Innes A, B, F, G
- coordonnées dans le plan de l'orbite X, Y
- Éléments de Thiele-Innes et coordonnées X, Y calculés à partir des éléments orbitaux $P_{\text{orb}} = (P, T, e, \omega, a, i, \Omega)$.
 - longitude du nœud ascendant Ω



Orbite d'une binaire visuelle

Application aux binaires résolues spatialement

- x, y : coordonnées de l'orbite relative dans le plan du ciel.

$$x = AX + FY, \quad y = BX + GY \quad (8)$$

- éléments de Thiele-Innes A, B, F, G
- coordonnées dans le plan de l'orbite X, Y
- Éléments de Thiele-Innes et coordonnées X, Y calculés à partir des éléments orbitaux $P_{\text{orb}} = (P, T, e, \omega, a, i, \Omega)$.
 - longitude du nœud ascendant Ω

Masse totale du système à partir de la troisième loi de Kepler :

$$M_{\text{syst}} = \left(\frac{a}{\pi}\right)^3 \frac{1}{P^2} \quad (9)$$

avec la période P , le demi-grand axe angulaire a et la parallaxe π .

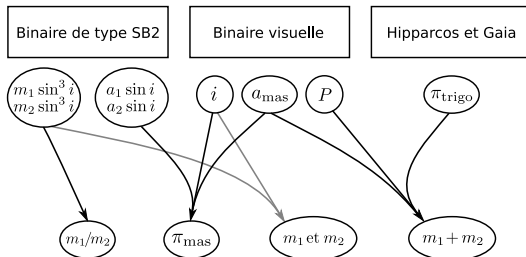
Cas d'une binaire visuelle de type SB2

- Demi-grand axe linéaire de l'orbite visuelle donné par :

$$a_{ua} = \frac{1}{2\pi} \frac{(K_1 + K_2) P (1 - e^2)^{1/2}}{\sin i} \quad (10)$$

- demi-grands axes des orbites barycentriques $a_1 + a_2 = a_{ua}$
- Parallaxe orbitale d'une binaire visuelle de type SB2 donnée par :

$$\pi_{mas} = \frac{a_{mas}}{a_{ua}} \quad (11)$$



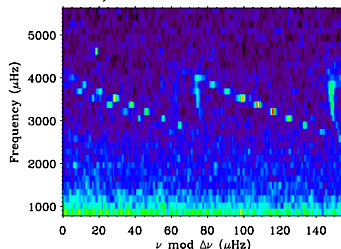
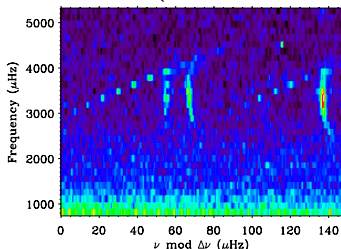
Grandeurs accessibles selon la nature des observations

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler**
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Perspectives de détection de binaires sismiques

- ~ 200 binaires astérosismiques attendues parmi les données Kepler (Miglio et al., 2014).
→ seul un faible nombre de binaires détectables en cadence courte (58.85 s).
- 4 binaires astérosismiques déjà détectées :
 - 16 Cyg A et B (Metcalf et al., 2012).
 - Carlsberg et Punto (HD 176071 ; Metcalfe et al., 2014).
 - Krazy et Ignatz (HD 177412 ; Appourchaux et al., 2015).
 - Luke et Leia (HD 176465 ; White et al., 2017).



Diagrammes échelle de Luke (gauche) et Leia (droite)

Procédure de détection des oscillations

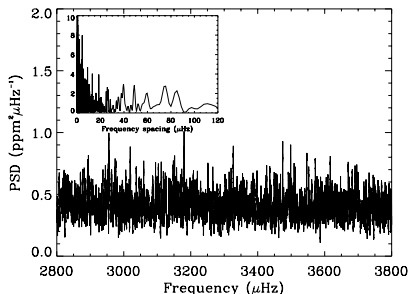
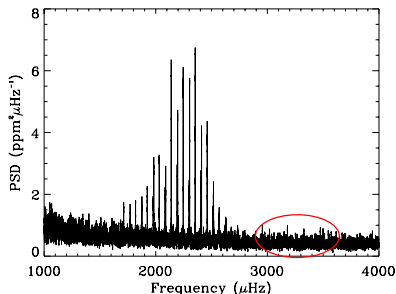
- ❶ Lister les coordonnées référencées dans le Kepler input catalog (KIC).
→ ~ 5300 cibles observées en cadence courte avec Kepler.
- ❷ Identifier les objets associés à partir de la base de données SIMBAD.
- ❸ Rechercher la signature des oscillations de type solaire :
→ prédétection des modes à l'aide des codes développés par notre équipe dans le cadre de la mission Kepler.
→ inspection visuelle des spectres de puissance et diagrammes échelle.

KIC	HD	RA J2000 (h:m:s)	Dec J2000 (d:m:s)	Magnitudes		ρ (arcsec)
				Pri	Sec	
6469154	188753	19 54 58.389	+41 52 17.53	8.03	8.72	0.30
7510397	177412	19 02 39.403	+43 07 02.93	8.30	9.20	0.10
8379927	187160	19 46 41.294	+44 20 54.71	7.40	8.70	0.10
10124866	176465	18 58 03.461	+47 11 29.94	8.54	8.67	1.40

Magnitudes et séparation ρ issues du Washington double star catalog (WDS)

Procédure de détection des oscillations

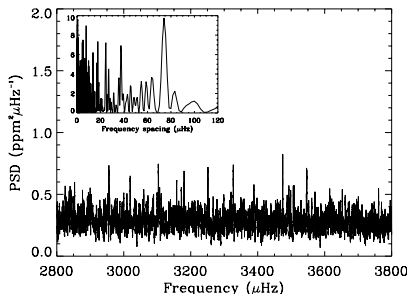
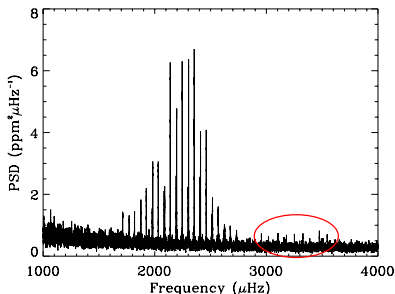
- Problème de calibration affectant la version DR24 (Data release 24) des courbes de lumière $\Rightarrow$ dégradation du rapport signal sur bruit.
- Résolution du problème dans la version DR25 permettant la détection de la seconde composante.



Spectre de puissance de HD 188753 (gauche) et seconde composante (droite)

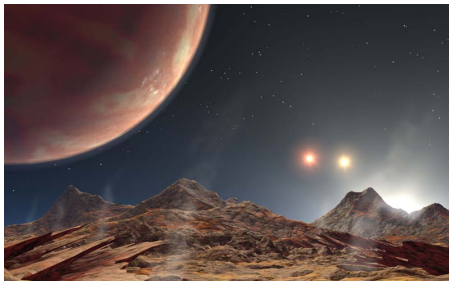
Procédure de détection des oscillations

- Problème de calibration affectant la version DR24 (Data release 24) des courbes de lumière $\Rightarrow$ dégradation du rapport signal sur bruit.
- Résolution du problème dans la version DR25 permettant la détection de la seconde composante.



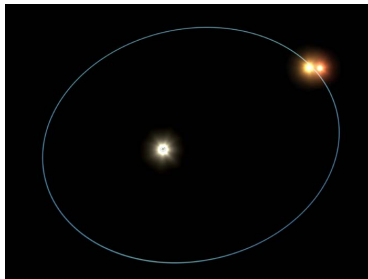
Spectre de puissance de HD 188753 (gauche) et seconde composante (droite)

Système d'étoiles triple HD 188753



- Système triple hiérarchique avec deux composantes visuelles observées par interférométrie des tavelures ($P \simeq 25.6$ ans) :
 - HD 188753A est l'étoile principale présentant des oscillations de type solaire détectées par Kepler.
 - HD 188753B est une binaire spectroscopique à 2 spectres (SB2) avec une période orbitale de ~ 155 jours.
- Détection par Konacki (2005) d'une planète de type Jupiter chaud autour de HD 188753A à partir des mesures de vitesses radiales.

Système d'étoiles triple HD 188753



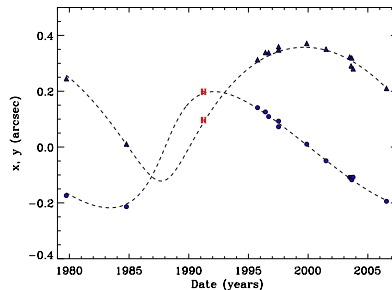
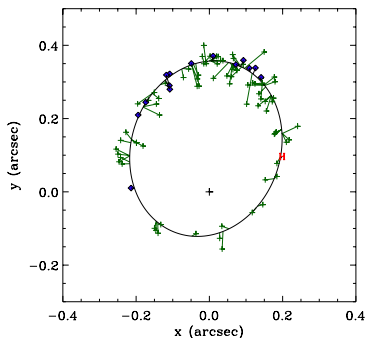
- Système triple hiérarchique avec deux composantes visuelles observées par interférométrie des tavelures ($P \simeq 25.6$ ans) :
 - HD 188753A est l'étoile principale présentant des oscillations de type solaire détectées par Kepler.
 - HD 188753B est une binaire spectroscopique à 2 spectres (SB2) avec une période orbitale de ~ 155 jours.
- Détection par Konacki (2005) d'une planète de type Jupiter chaud autour de HD 188753A à partir des mesures de vitesses radiales.

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753**
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives

Masses de la binaire visuelle (AB)

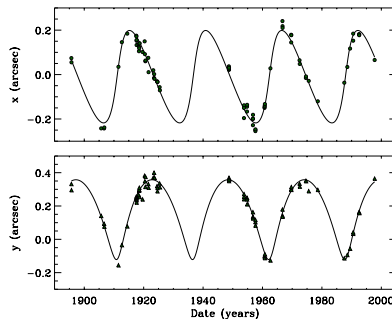
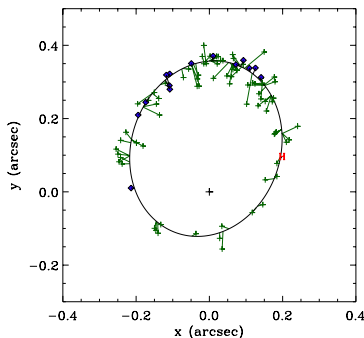
- Plus d'un siècle d'observations combinées afin de déterminer la masse des trois étoiles.
- x, y : coordonnées de l'orbite relative dans le plan du ciel.
- Ajustement simultané de l'orbite visuelle et des vitesses radiales par une méthode MCMC.



Positions relatives des deux composantes visuelles du système (4th catalog of interferometric measurements of binary stars)

Masses de la binaire visuelle (AB)

- Plus d'un siècle d'observations combinées afin de déterminer la masse des trois étoiles.
- x, y : coordonnées de l'orbite relative dans le plan du ciel.
- Ajustement simultané de l'orbite visuelle et des vitesses radiales par une méthode MCMC.



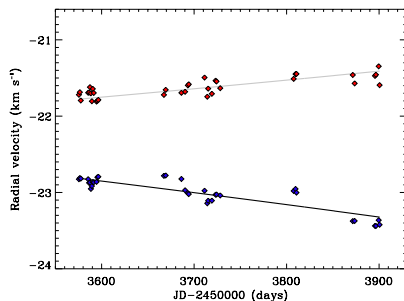
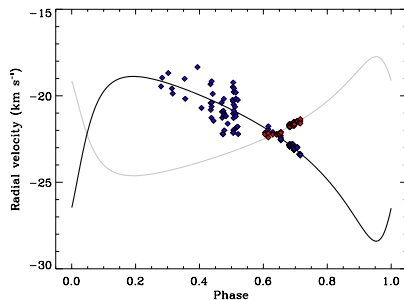
Positions relatives des deux composantes visuelles du système (4th catalog of interferometric measurements of binary stars)

Masses de la binaire visuelle (AB)

- À partir de l'orbite visuelle et des vitesses radiales de A et B :

$$\Rightarrow M_A = 1.05^{+0.10}_{-0.09} M_{\odot} \text{ et } M_B = 1.46^{+0.13}_{-0.11} M_{\odot}$$

$\Rightarrow$ Parallaxe orbitale $\pi = 21.9 \pm 0.6 \text{ mas}$ en accord avec la parallaxe Hipparcos $\pi = 21.6 \pm 0.7 \text{ mas}$ révisée par van Leeuwen (2007).



Mesures de vitesses radiales et solution orbitale pour HD 188753

Masses de la binaire spectroscopique (Bab)

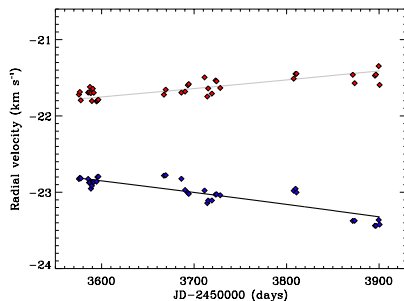
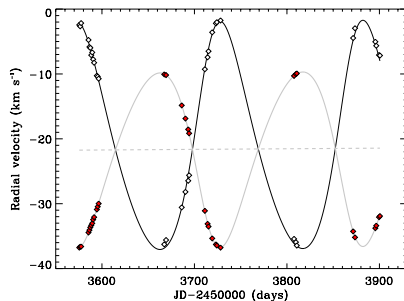
- À partir des vitesses radiales de Ba et Bb :

$$M_B = 1.46^{+0.13}_{-0.11} M_{\odot}$$

$$i_{Bab} = 42.8 \pm 1.5 \text{ degrés}$$

$$M_{Ba} \sin^3 i_{Bab} = 0.258 \pm 0.004 M_{\odot} \Rightarrow M_{Ba} = 0.83 \pm 0.07 M_{\odot}$$

$$M_{Bb} \sin^3 i_{Bab} = 0.198 \pm 0.002 M_{\odot} \Rightarrow M_{Bb} = 0.63^{+0.06}_{-0.05} M_{\odot}$$



Mesures de vitesses radiales et solution orbitale pour HD 188753

Parallaxe de HD 188753

- Principaux types de parallaxe :

- Parallaxe dynamique obtenue à partir de l'orbite visuelle et de la troisième loi de Kepler.
⇒ Nécessite de connaître la masse totale du système.
- Parallaxe orbitale obtenue à partir de l'orbite visuelle associée aux mesures de vitesses radiales.
- Parallaxe trigonométrique obtenue à partir de missions dédiées telles que Hipparcos et Gaia.
⇒ Prise en compte de l'orbite visuelle des binaires (Söderhjelm, 1999).

π (mas)	Type de parallaxe et référence
21.9 ± 0.2	Parallaxe dynamique (Marcadon et al., en révision)
21.9 ± 0.6	Parallaxe orbitale (Marcadon et al., en révision)
21.6 ± 0.7	Hipparcos (van Leeuwen, 2007)
21.9 ± 0.6	Hipparcos + orbite visuelle (Söderhjelm, 1999)
—	Gaia Data Release 1 (DR1 ; Lindegren et al. 2016)

Valeurs de la parallaxe pour HD 188753.

Inclinaison relative de HD 188753

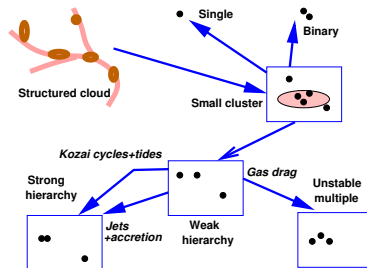
- Inclinaison ϕ entre l'orbite interne (Bab) et l'orbite externe (AB) :

$$\cos \phi = \cos i_{AB} \cos i_{Bab} + \sin i_{AB} \sin i_{Bab} \cos(\Omega_{AB} - \Omega_{Bab}) \quad (12)$$

- inclinaison i et longitude du nœud ascendant Ω
- Valeur de Ω_{Bab} inconnue en l'absence d'une orbite visuelle mesurable.

$$i_{Bab} - i_{AB} \leq \phi \leq i_{Bab} + i_{AB} \Rightarrow 10.9^\circ \leq \phi \leq 73.1^\circ \quad (13)$$

- Mécanisme de Lidov-Kozai à l'œuvre pour $39.2^\circ \leq \phi \leq 140.8^\circ$.



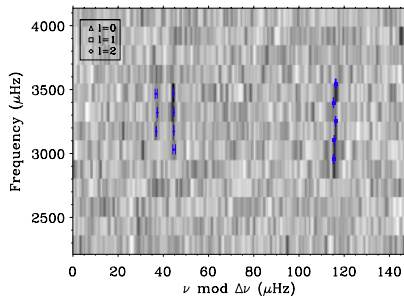
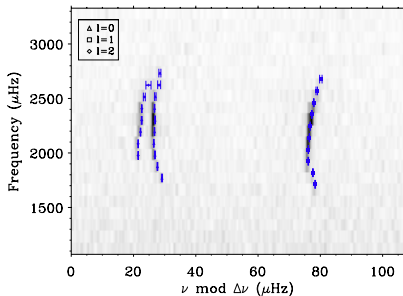
Processus de formation (Tokovinin, 2004)

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753**
- 7 Conclusions et perspectives

Détection d'oscillations avec Kepler

- Système HD 188753 (KIC 6469154) observé par Kepler durant 6 mois en cadence courte (quarters 13–14).
- Détection d'oscillations de type solaire pour les deux étoiles les plus brillantes du système.
- Extraction des fréquences individuelles des modes pour les étoiles A et Ba comme décrit par Appourchaux et al. (2012).



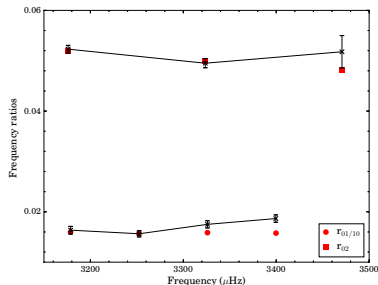
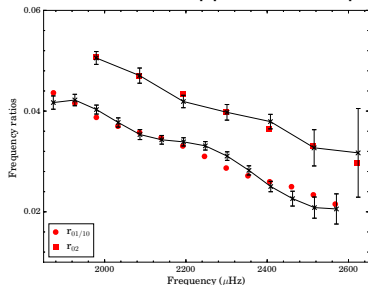
Diagrammes échelle de l'étoile A (gauche) et de l'étoile Ba (droite)

Modélisation de la structure interne

- CESTAM : Code d'évolution stellaire, avec transport, adaptatif et modulaire (Morel et Lebreton, 2008 ; Marques et al., 2013).
- Physique d'entrée utilisée pour la modélisation des deux étoiles détectées :
 - Équations d'état OPAL05.
 - Opacités OPAL96 + Alexander et Ferguson (1994) pour les basses températures.
 - Taux de réactions nucléaires NACRE + LUNA.
 - Diffusion prise en compte suivant Michaud et Proffitt (1993).
 - Convection traitée suivant la MLT (Mixing-length theory).
 - Modèles calculés sans overshoot.
 - Atmosphère décrite par la loi d'Eddington en cas gris.
 - Mixture solaire de Asplund et al. (2009 ; AGSS09).
- ADIPLS : Aarhus adiabatic pulsation package (Christensen-Dalsgaard, 2008).
⇒ Calcul des fréquences d'oscillations théoriques.

Modélisation de la structure interne

- Procédure d'optimisation permettant de déterminer un modèle de référence pour chaque étoile.
 - ⇒ Implémentation d'une grille de modèles stellaires.
 - ⇒ Optimal stellar models (OSM ; algorithme de Levenberg-Marquardt).
- Paramètres libres : masse, âge, abondance initiale en hélium Y_0 , métallicité initiale $(Z/X)_0$ et paramètre de longueur de mélange α_{MLT} .
- Contraintes : rapports de fréquences.



Rapports de fréquences pour l'étoile A (gauche) et l'étoile Ba (droite)

Modélisation de la structure interne

- Procédure d'optimisation permettant de déterminer un modèle de référence pour chaque étoile.
 - ⇒ Implémentation d'une grille de modèles stellaires.
 - ⇒ Optimal stellar models (OSM ; algorithme de Levenberg-Marquardt).
 - Paramètres libres : masse, âge, abondance initiale en hélium Y_0 , métallicité initiale $(Z/X)_0$ et paramètre de longueur de mélange α_{MLT} .
 - Contraintes : rapports de fréquences.

Étoile	M ($M_{\odot}$)	Âge (Gyr)	Y_0	$(Z/X)_0$	α_{MLT}
A	0.99 ± 0.01	10.7 ± 0.2	0.278 ± 0.002	0.033 ± 0.001	1.83 ± 0.06
Ba	0.86 ± 0.01	11.0 ± 0.3	0.289 ± 0.004	0.031	1.77

Paramètres stellaires associés au modèle de référence de chaque étoile

Âge et masse totale de HD 188753

- Âge du système déterminé à partir des modèles optimaux :

$$\begin{aligned} \hat{\text{Age}}_A &= 10.7 \pm 0.2 \text{ Gyr} \\ \hat{\text{Age}}_{Ba} &= 11.0 \pm 0.3 \text{ Gyr} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \hat{\text{Age}}_{\text{syst}} = 10.8 \pm 0.2 \text{ Gyr}$$

- Masse totale du système déterminée suivant :
 - l'orbite visuelle et les vitesses radiales de A et B.
 - les masses sismiques et le rapport de masse entre Ba et Bb.

Analyse	M_A ($M_\odot$)	M_{Ba} ($M_\odot$)	M_{syst} ($M_\odot$)
Orbite	$1.05^{+0.10}_{-0.09}$	0.83 ± 0.07	$2.51^{+0.20}_{-0.18}$
Modèles	0.99 ± 0.01	0.86 ± 0.01	2.51 ± 0.02

Masses du système HD 188753

Âge et masse totale de HD 188753

- Âge du système déterminé à partir des modèles optimaux :

$$\begin{aligned}\hat{\text{Age}}_A &= 10.7 \pm 0.2 \text{ Gyr} \\ \hat{\text{Age}}_{Ba} &= 11.0 \pm 0.3 \text{ Gyr}\end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \hat{\text{Age}}_{\text{syst}} = 10.8 \pm 0.2 \text{ Gyr}$$

- Masse totale du système déterminée suivant :
 - l'orbite visuelle et les vitesses radiales de A et B.
 - les masses sismiques et le rapport de masse entre Ba et Bb.

Analyse	M_A ($M_\odot$)	M_{Ba} ($M_\odot$)	M_{syst} ($M_\odot$)
Orbite	$1.05^{+0.10}_{-0.09}$	0.83 ± 0.07	$2.51^{+0.20}_{-0.18}$
Modèles	0.99 ± 0.01	0.86 ± 0.01	2.51 ± 0.02

Masses du système HD 188753

Impact de la physique sur les paramètres stellaires

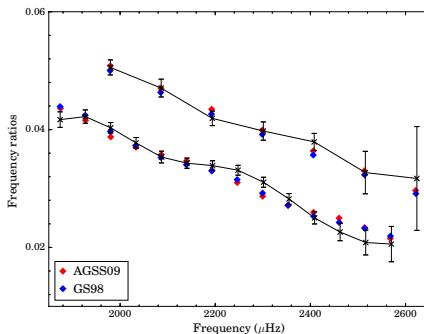
- Tester la pertinence des paramètres stellaires obtenus en changeant la physique d'entrée pour la modélisation de l'étoile A.
 - ⇒ Application au cas de la mixture solaire.
 - Modèle de référence basé sur AGSS09 (Asplund et al., 2009).
 - Second modèle basé sur GS98 (Grevesse et Sauval, 1998).

El.	GN93	GS98	AGSS09	C11	AGSS15
C	8.55	8.52	8.43	8.50	–
N	7.97	7.92	7.83	7.86	–
O	8.87	8.83	8.69	8.76	–
Ne	8.08	8.08	7.93	8.05	7.93
Mg	7.58	7.58	7.60	7.54	7.59
Si	7.55	7.55	7.51	7.52	7.51
S	7.33	7.33	7.13	7.16	7.13
Fe	7.50	7.50	7.50	7.52	7.47
(Z/X) _⊙	0.0245	0.0230	0.0180	0.0209	–

Abondances pour différentes mixtures (Serenelli, 2016)

Impact de la physique sur les paramètres stellaires

- Tester la pertinence des paramètres stellaires obtenus en changeant la physique d'entrée pour la modélisation de l'étoile A.
 - ⇒ Application au cas de la mixture solaire.
 - Modèle de référence basé sur AGSS09 (Asplund et al., 2009).
 - Second modèle basé sur GS98 (Grevesse et Sauval, 1998).



Rapports de fréquences pour l'étoile A

Impact de la physique sur les paramètres stellaires

- Tester la pertinence des paramètres stellaires obtenus en changeant la physique d'entrée pour la modélisation de l'étoile A.
 - ⇒ Application au cas de la mixture solaire.
 - Modèle de référence basé sur AGSS09 (Asplund et al., 2009).
 - Second modèle basé sur GS98 (Grevesse et Sauval, 1998).

Masse orbitale $M_A = 1.05^{+0.10}_{-0.09} M_{\odot}$ ne permet pas de discriminer les deux modèles.

⇒ Ajustement des abondances possible mais complexe.

Mixture	M ($M_{\odot}$)	Âge (Gyr)	Y_0	$(Z/X)_0$	α_{MLT}
AGSS09	0.99 ± 0.01	10.7 ± 0.2	0.278 ± 0.002	0.033 ± 0.001	1.83 ± 0.06
GS98	0.95 ± 0.01	11.6 ± 0.2	0.290 ± 0.002	0.039 ± 0.002	1.63 ± 0.07

Paramètres stellaires associés aux différentes mixtures solaires pour l'étoile A

Sommaire

- 1 Introduction à l'astérosismologie
- 2 Astérosismologie avec K2
- 3 Intérêt des étoiles binaires
- 4 Binaires sismiques avec Kepler
- 5 Analyse orbitale de HD 188753
- 6 Modélisation de HD 188753
- 7 Conclusions et perspectives**

Conclusions et perspectives

- Travail de détection de binaires sismiques parmi les données Kepler.
⇒ Découverte du système triple hiérarchique HD 188753.
 - Analyse orbitale combinant les positions relatives et vitesses radiales.
⇒ Estimation de la masse totale du système et de la parallaxe orbitale.
⇒ Mise en évidence de la configuration non-coplanaire du système.
 - Modélisation détaillée des deux composantes sismiques de HD 188753.
 - Masse totale de $2.51 \pm 0.02 M_{\odot}$ en accord avec la valeur orbitale.
 - Parallaxe dynamique de $21.9 \pm 0.2 \text{ mas}$.
 - Âge commun de $10.8 \pm 0.2 \text{ Gyr}$.
 - Étude de l'impact de la physique adoptée dans les modèles stellaires.
⇒ Emploi de deux mixtures solaires ne pouvant être discriminées.
- ⇒ Marcadon et al., soumis à A&A, en révision.

Conclusions et perspectives

- Futures missions spatiales dédiées à l'astérosismologie :
 - TESS – Transiting exoplanet survey satellite (NASA, 2018).
 - PLATO – Planetary transits and oscillations of stars (ESA, 2026).
- ~ 100 systèmes binaires et multiples avec une précision sur la masse totale de quelques pourcents déjà référencés pour TESS.
 - ⇒ **Calibration des modèles** d'évolution stellaire et des lois d'échelle à partir d'un échantillon plus important d'étoiles binaires et multiples.
 - ⇒ **Estimation de la parallaxe** pour ces systèmes de façon juste, précise et indépendante des données Hipparcos et Gaia.
 - ⇒ **Étude de l'évolution dynamique** des systèmes multiples à l'aide de différentes méthodes d'observation afin d'accéder à leur configuration.