



ASTERO SISMOLOGIE

(DIS-MOI COMMENT TU OSCILLES,
JE TE DIRAI QUI TU ES)

BENOÎT MOSSER
PROFESSEUR

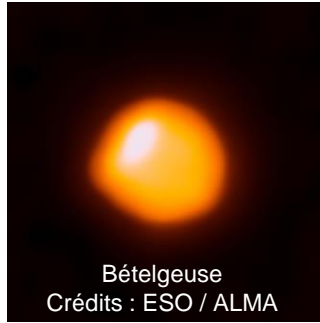
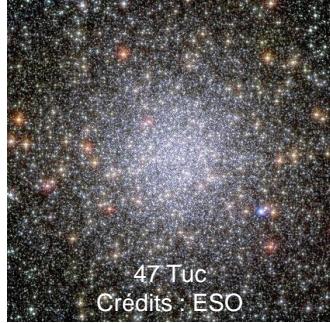
LESIA
OBSERVATOIRE DE PARIS
UNIVERSITÉ PARIS, SCIENCES & LETTRES

COLLÈGE DE FRANCE, SÉMINAIRE *ETOILE*
CHAIRE GALAXIES ET COSMOLOGIE, FRANÇOISE COMBES

LUNDI 8 JANVIER 2024

?

QUELLES OBSERVABLES POUR QUELS PARAMETRES STELLAIRES ?



Luminosité, distance ?
Composition de surface ?
Masse, rayon ?
Structure interne ? Âge ?

Astrométrie (*Gaia*, ESA)
Spectrométrie
Systèmes doubles, amas
Astérosismologie



POUR SONDER LE CŒUR D'UNE ÉTOILE LA FAIRE VIBRER !

Quelle **surprise** dans 9 mois?



Comment accrocher le portrait de belle-maman au mur ?





LA SISMOLOGIE EN QUELQUES QUESTIONS SIMPLES

LA FAIRE VIBRER !

- Comment avoir accès à l'intérieur des étoiles
Comment mesurer leur masse et leur rayon ? Comment estimer leur âge ?
- Oscillations stellaires
Que nous apprend le pendule pesant ? Spectre des oscillations
- Missions spatiales
CoRoT, Kepler
- Quelques résultats de la séquence principale aux étoiles géantes rouges
Etat évolutif, rotation, magnétisme stellaire, archéologie galactique...

T

DU PENDULE PESANT AUX OSCILLATIONS STELLAIRES ÉTUDE DE LA PÉRIODE

La période d'oscillation du pendule pesant

- dépend de sa longueur L
- dépend du champ de pesanteur g
- ne dépend pas de la masse du pendule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Imaginons un (très) grand pendule, de longueur L égale au rayon R d'une étoile

Un peu de physique montre que le champ de pesanteur est relié à la masse et au rayon de l'objet par $g \approx \frac{M}{R^2}$ (plus précisément $g \approx \frac{GM}{R^2}$)

Sa période d'oscillation s'écrirait dans ce cas

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

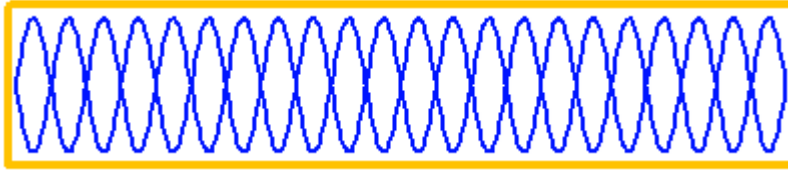
Cette période correspond :

- à la **durée qu'il faut pour traverser l'étoile à la vitesse d'une onde sonore**
- et aussi à la période de révolution d'un satellite en orbite basse



QUE NOUS APPREND LE TUYAU D'ORGUE

ÉTUDE DES HARMONIQUES



Onde sonore dans un tuyau d'orgue, milieu homogène, 1-D

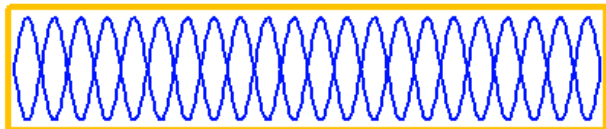
La vibration la plus grave correspond à 1 fuseau

Une harmonique d'ordre n à n fuseaux



QUE NOUS APPREND LE TUYAU D'ORGUE

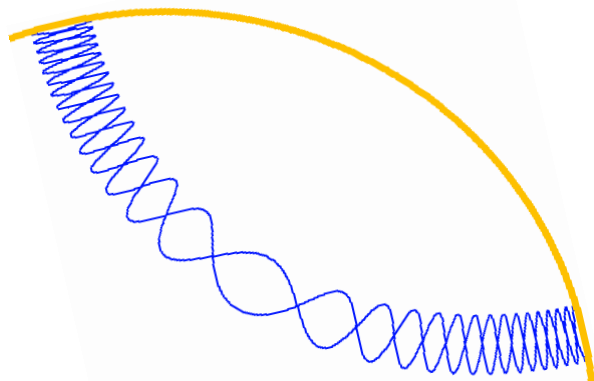
ÉTUDE DES HARMONIQUES



Onde sonore dans un tuyau d'orgue, milieu homogène, 1-D

La vibration la plus grave correspond à 1 fuseau

Une harmonique d'ordre n à n fuseaux

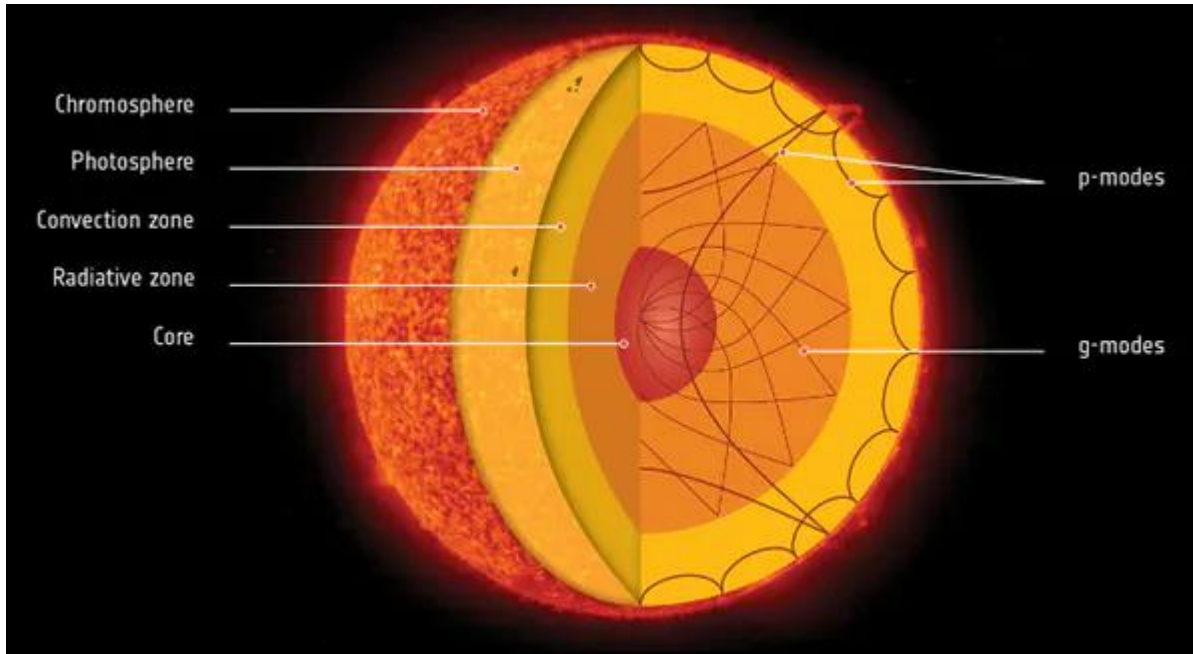


Étoile, sphère inhomogène 3-D

(en fait, 2-D si on néglige la rotation)

S

LES OSCILLATIONS D'UNE ÉTOILE ONDES DE PRESSION OU DE GRAVITÉ

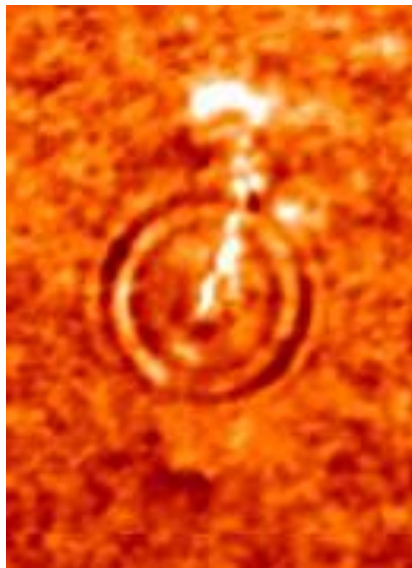
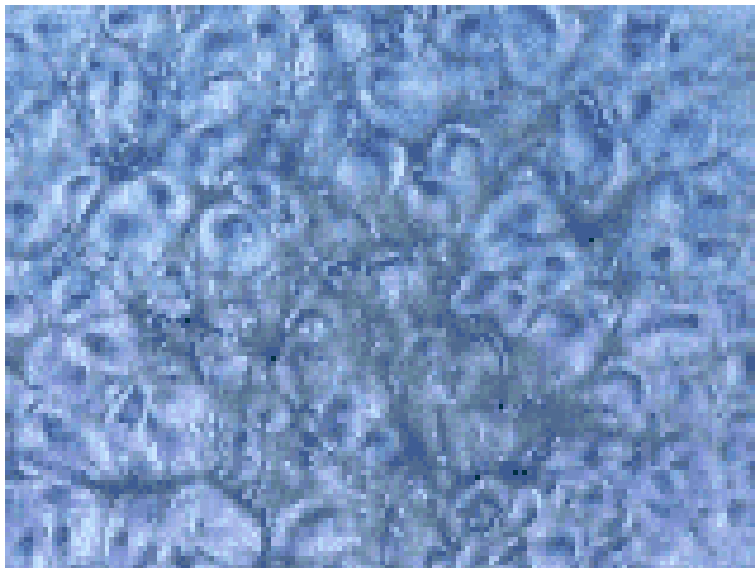




SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES

EXCITATION DES ONDES

SoHO (ESA / NASA)



Dans les étoiles de la séquence principale ou évolués de faible masse, le flux stellaire est transporté par la convection dans les régions extérieures

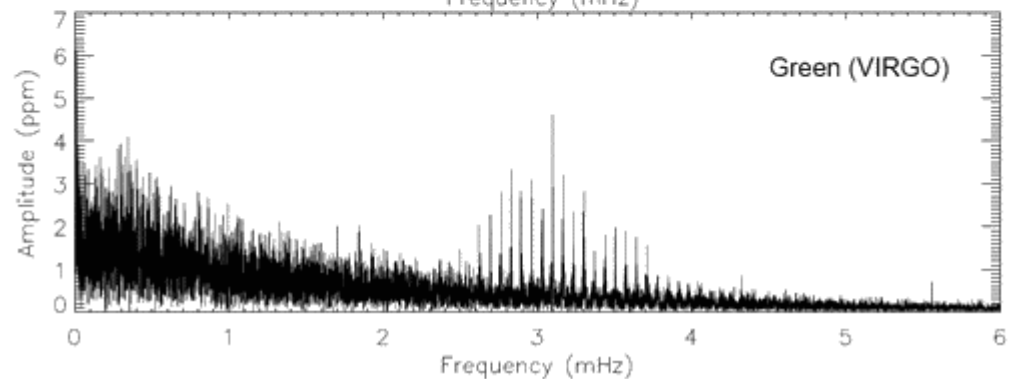
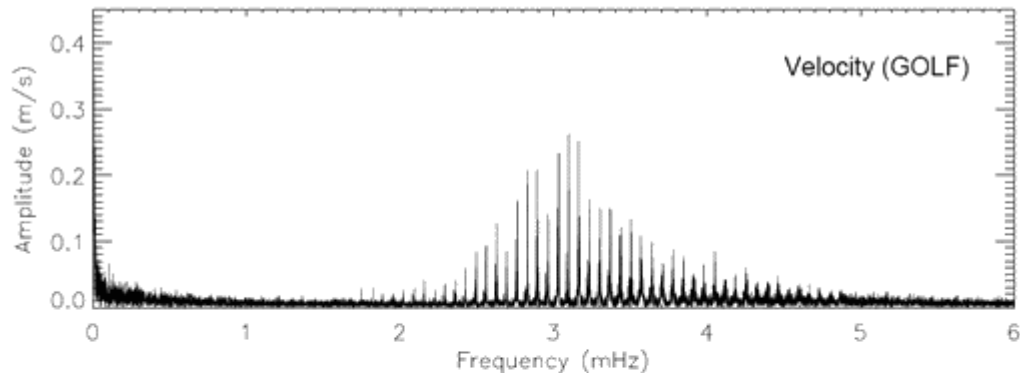
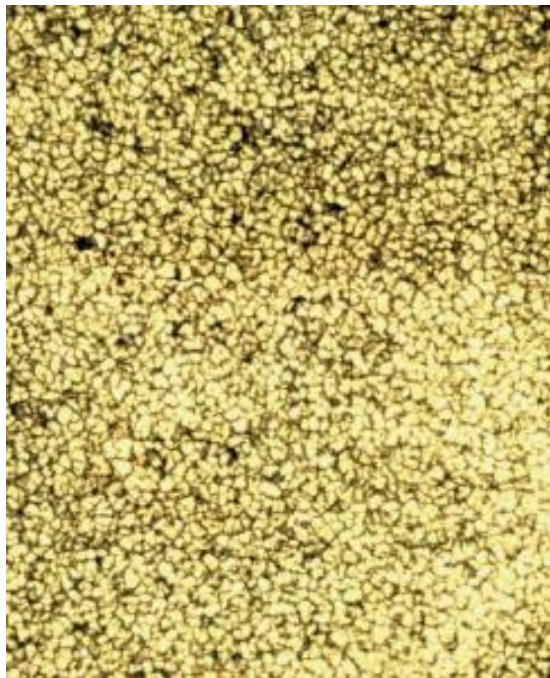
→ Excitation stochastique d'onde sonore par la convection turbulente



SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES

EXCITATION DES ONDES

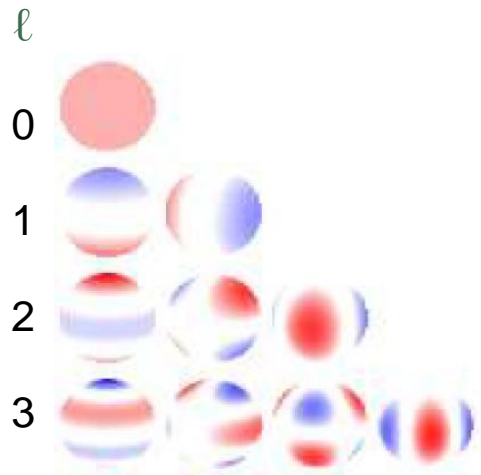
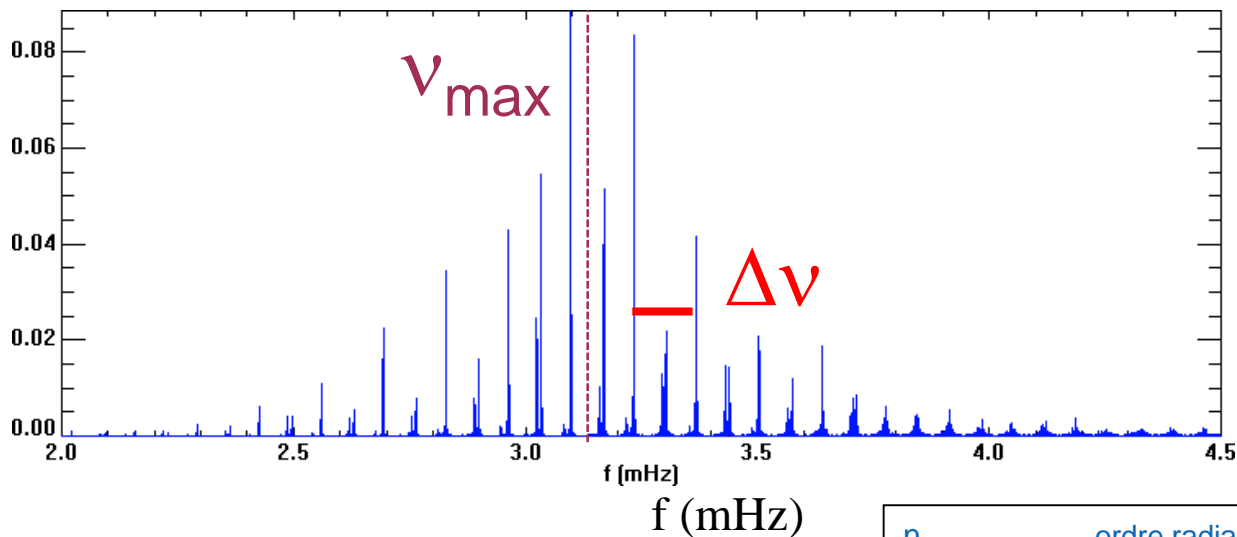
SoHO (ESA / NASA)





L'EXEMPLE DU SOLEIL

SPECTRE DES OSCILLATIONS DE BAS DEGRÉ

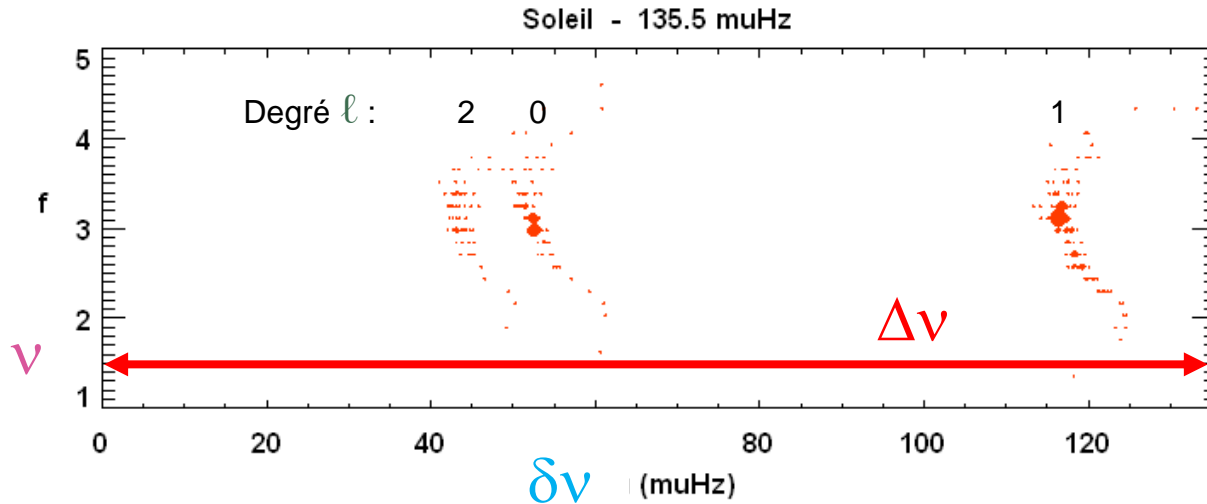


$$\nu_{nl} = (n + \ell/2 + \varepsilon) \Delta \nu + 2^{\text{nd}} \text{ ordre}$$

n	ordre radial
ℓ	degré (≤ 3 en observation intégrée)
ε	offset
$\Delta \nu$	grande séparation
ν_{\max}	fréquence d'oscillation maximale

L'EXEMPLE DU SOLEIL

DIAGRAMME ÉCHELLE



Spectre d'oscillation du Soleil réarrangé pour montrer la modulation des intervalles de fréquence d'une famille d'harmoniques à l'autre

→ Une représentation très utile pour étudier les termes de 2nd ordre qui portent les signatures des effets physiques qui modulent le spectre d'oscillation

$$\nu = k \Delta\nu + \delta\nu$$

M,R

SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES MASSE & RAYON

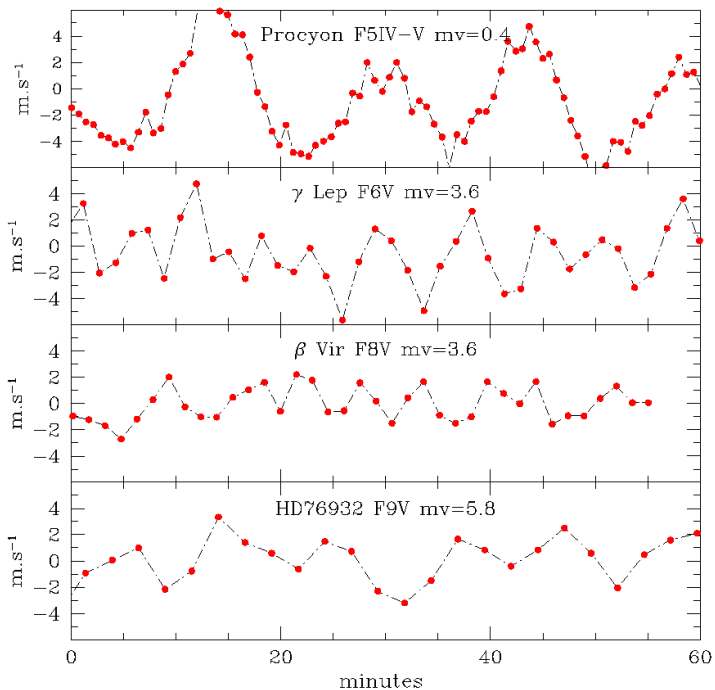
- La fréquence caractéristique $\Delta\nu$ dépend de la **densité stellaire moyenne** $\sqrt{\frac{M}{R^3}}$
- La fréquence du maximum d'oscillation ν_{\max} dépend de la **gravité de surface** $\frac{M}{R^2}$
- La mesure des fréquences observables $\Delta\nu$ et ν_{\max} permet d'estimer la masse M et le rayon R de l'étoile

$$\frac{R}{R_{\odot}} \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\odot}} \right)^{1/2},$$
$$\frac{M}{M_{\odot}} \simeq \left(\frac{\nu_{\max}}{\nu_{\max,\odot}} \right)^3 \left(\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\odot}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\odot}} \right)^{3/2}$$

S

OBSERVATIONS AU SOL

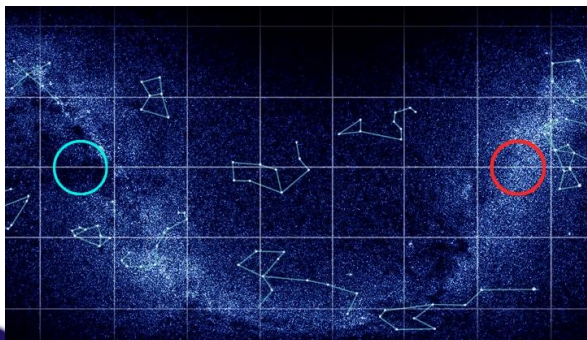
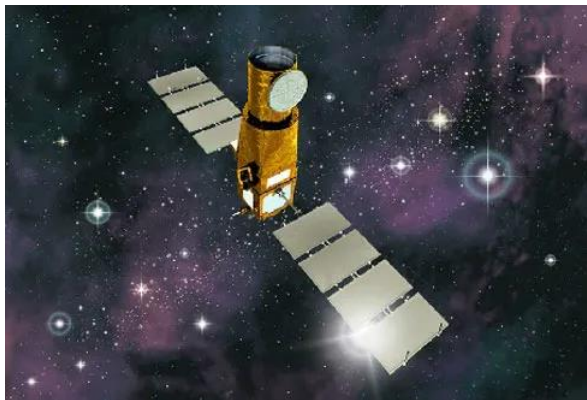
Bouchy, test HARPS, 2003
(private communication)



- Oscillations directement visibles dans la série temporelle (test du spectromètre HARPS de l'ESO, Bouchy 2003)
- Très bon rapport signal / bruit
- Mais durée d'observation limitée, et alternance jour / nuit qui limite la qualité d'observation

C

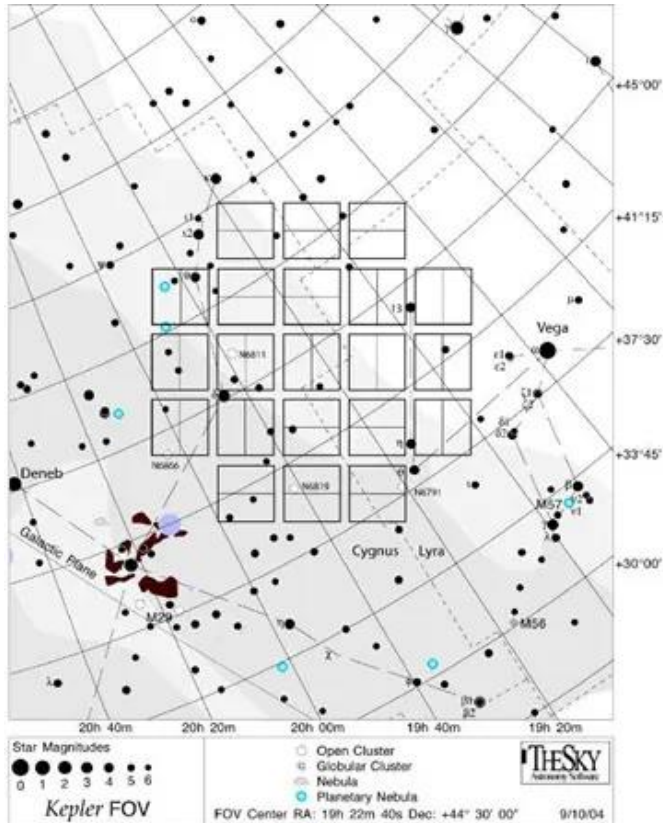
OBSERVER LES OSCILLATIONS DEPUIS L'ESPACE : MISSION COROT



Mission	CoRoT
Opérateur	CNES (France)
Lancement	Décembre 2006
Miroir collecteur	30 cm
Durée de la mission	7 ans
Observations	5 mois (LR) ; 1 mois (SR)
Champs observés	15 (LR)+8 (SR) 1°x1°
Magnitude	~ 6 à 12

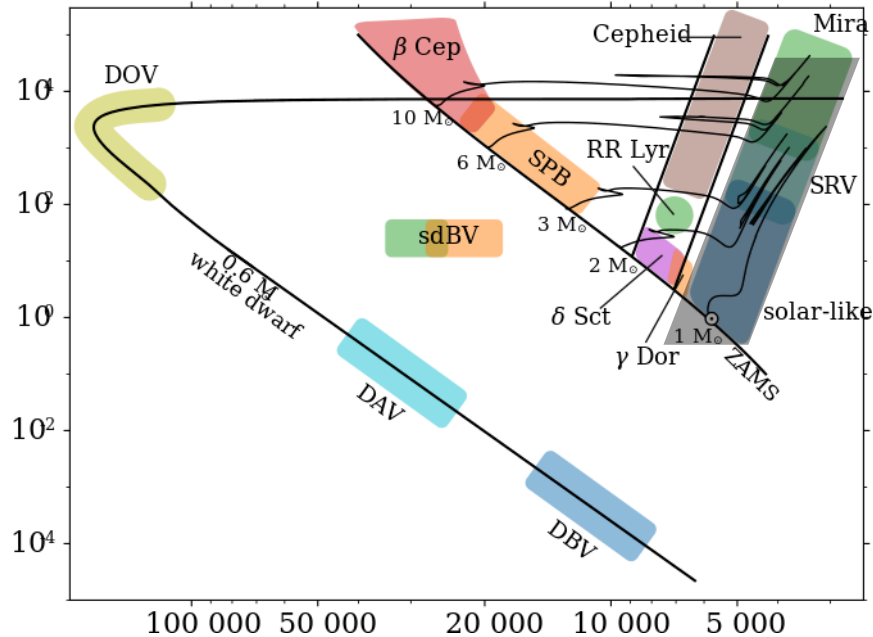
K

OBSERVER LES OSCILLATIONS DEPUIS L'ESPACE : MISSION KEPLER



Mission	Kepler
Opérateur	NASA (USA)
Lancement	Avril 2009
Miroir collecteur	90 cm
Durée de la mission	4 ans
Observation continue	4 ans
Champ observé	1, 10°x10°
Magnitude	~ 9 à 15

SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE AUX GÉANTES ROUGES



Oscillations de type solaire : excitées stochastiquement

Observées dans les étoiles 'froides'

- Soleil & étoiles de la séquence principale de masse $\leq 1.6 M_{\odot}$
- Sous-géantes
- Géantes rouges

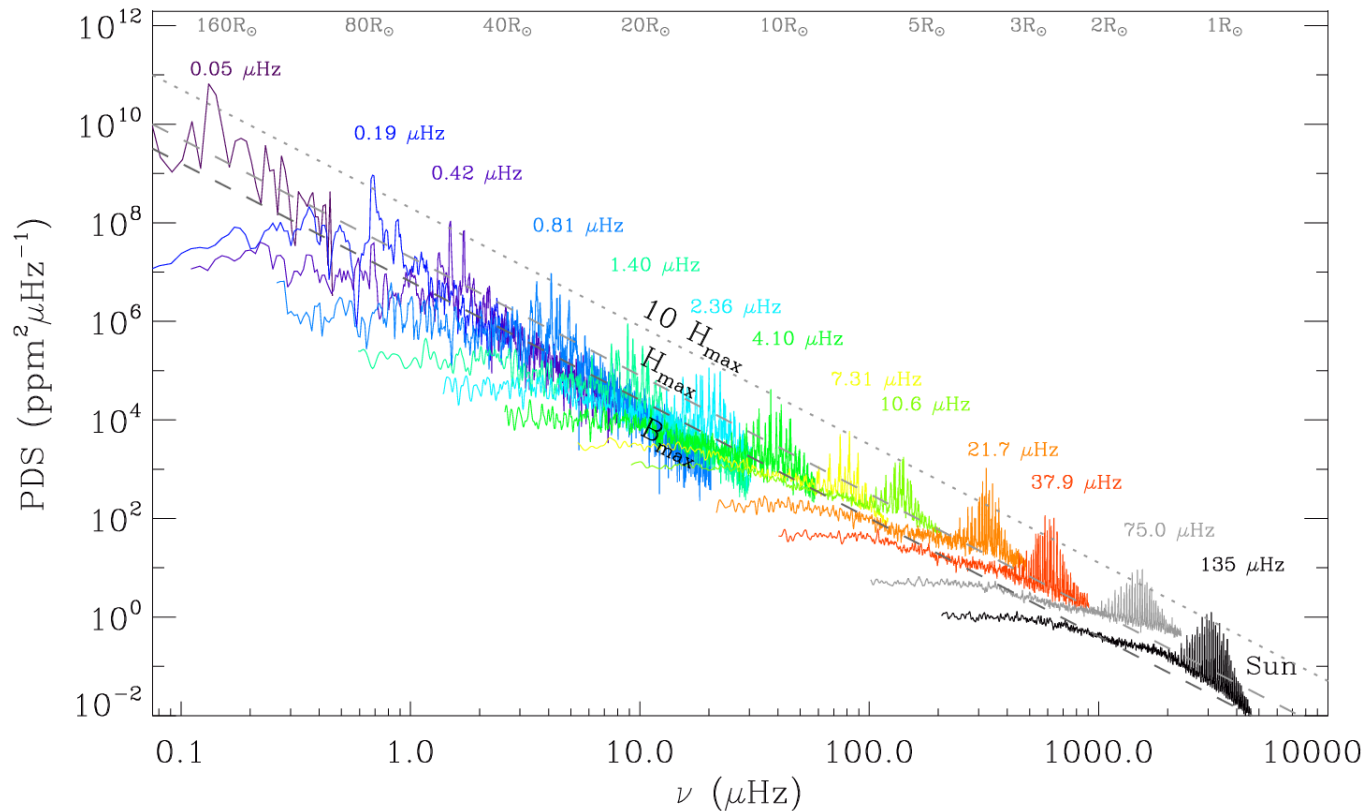
RGB : branche des géantes ayant épuisé l'hélium du cœur

RC : branche horizontale, des géantes brûlant l'hélium du cœur

AGB : branche asymptotique, géantes rouges ayant épuisé l'hélium du cœur

SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES SISMOLOGIE D'ENSEMBLE

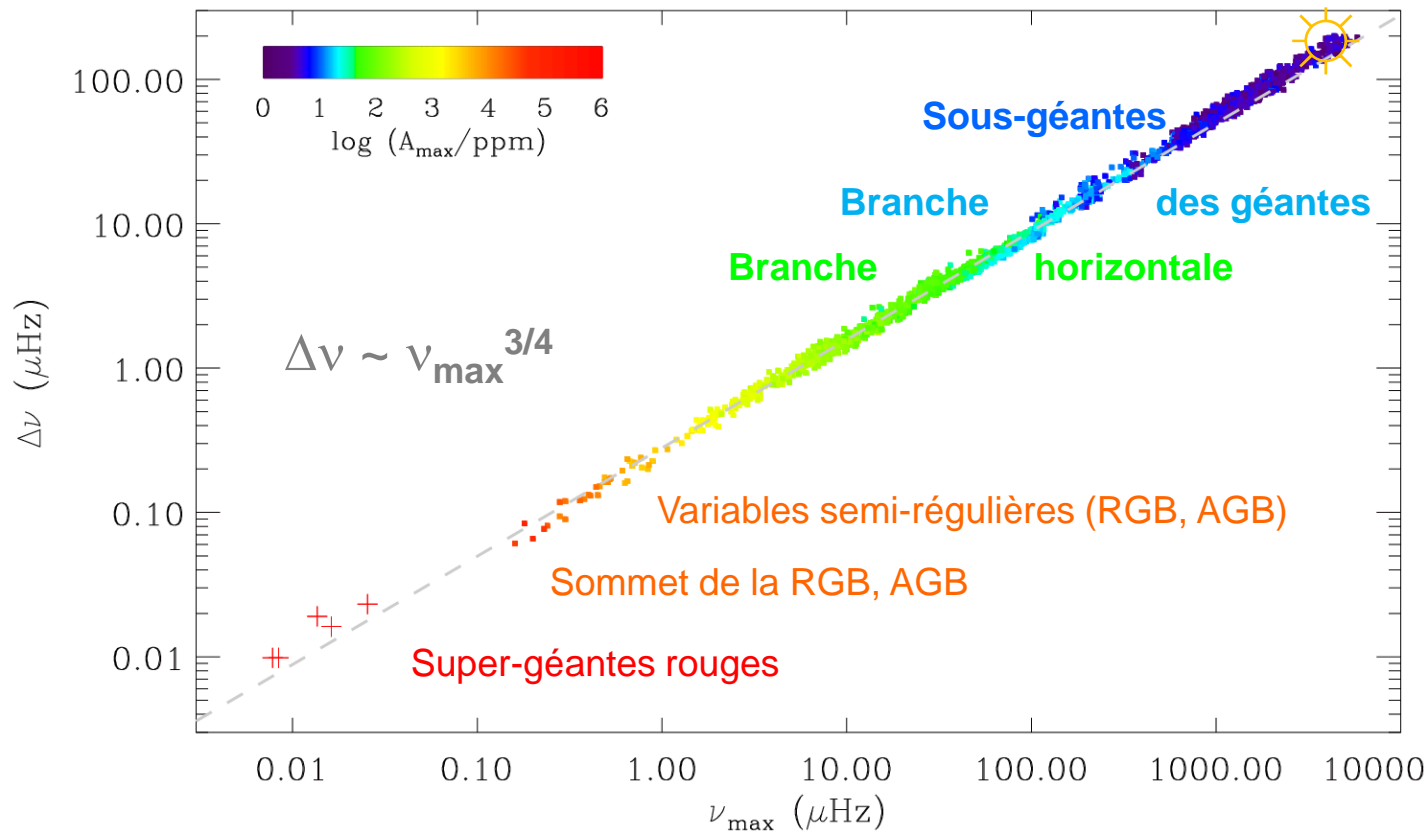
Observations du satellite Kepler



ν_{\max}
 $\Delta\nu$

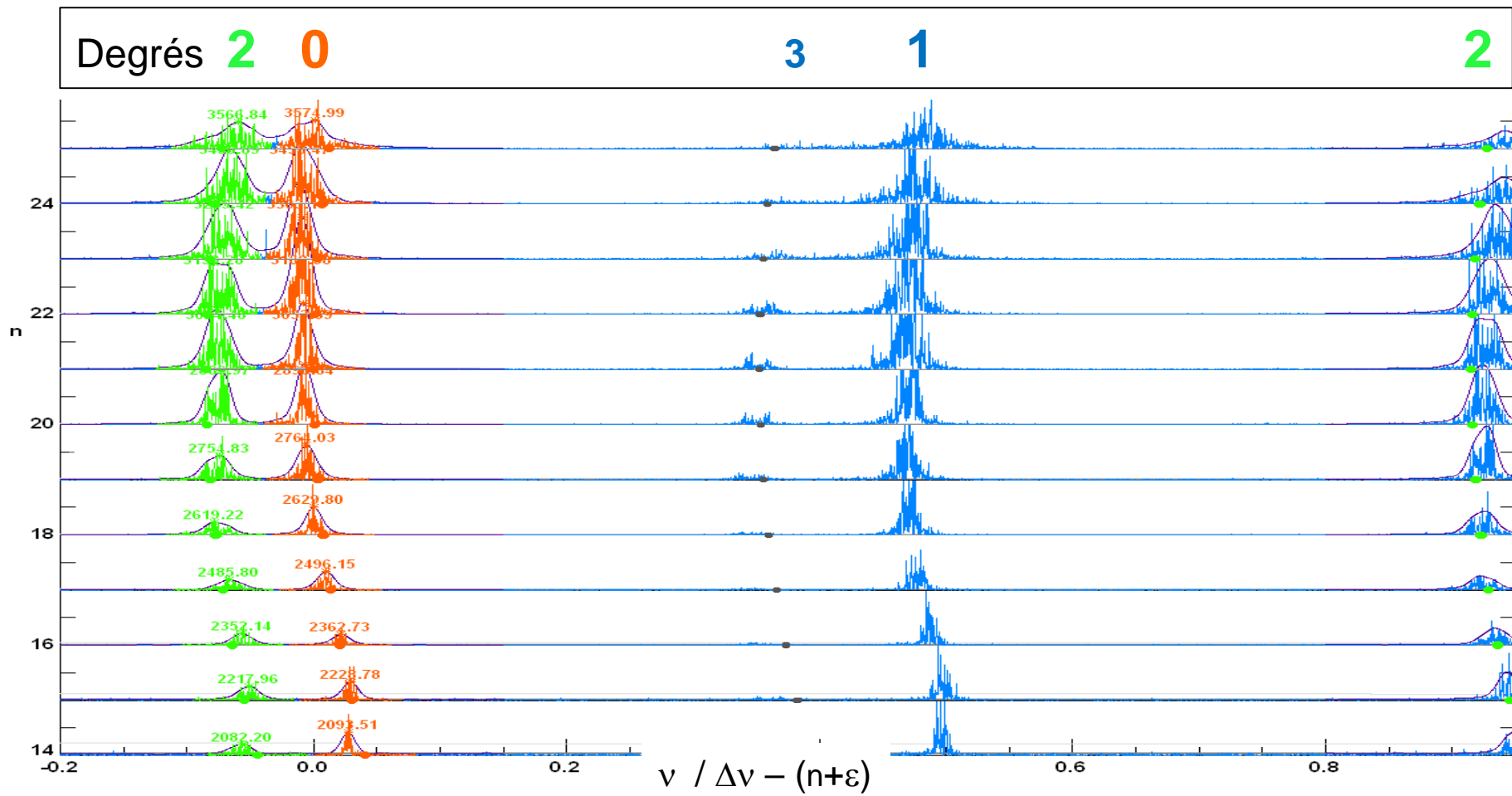
SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES SISMOLOGIE D'ENSEMBLE

Observations du satellite Kepler

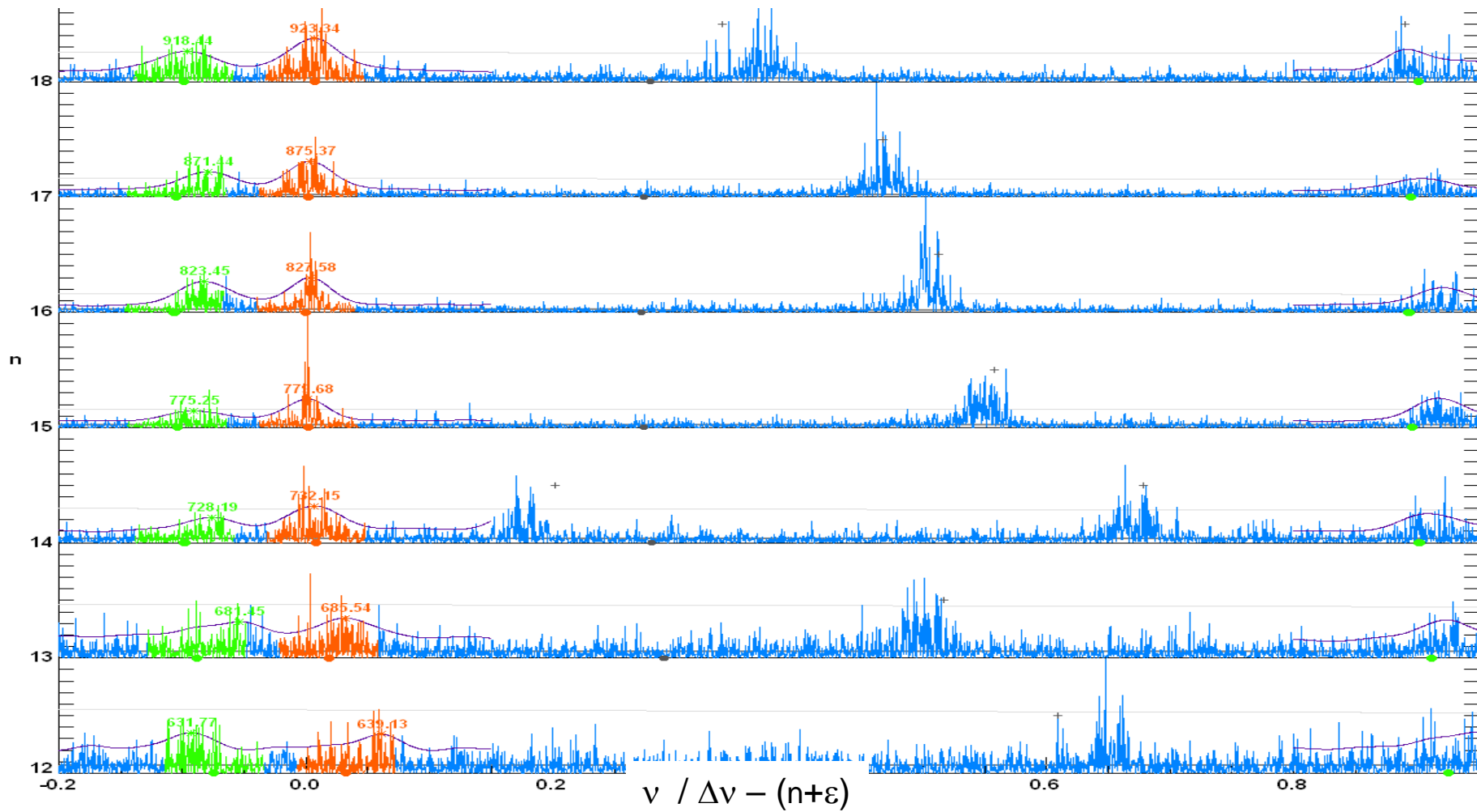


Soleil

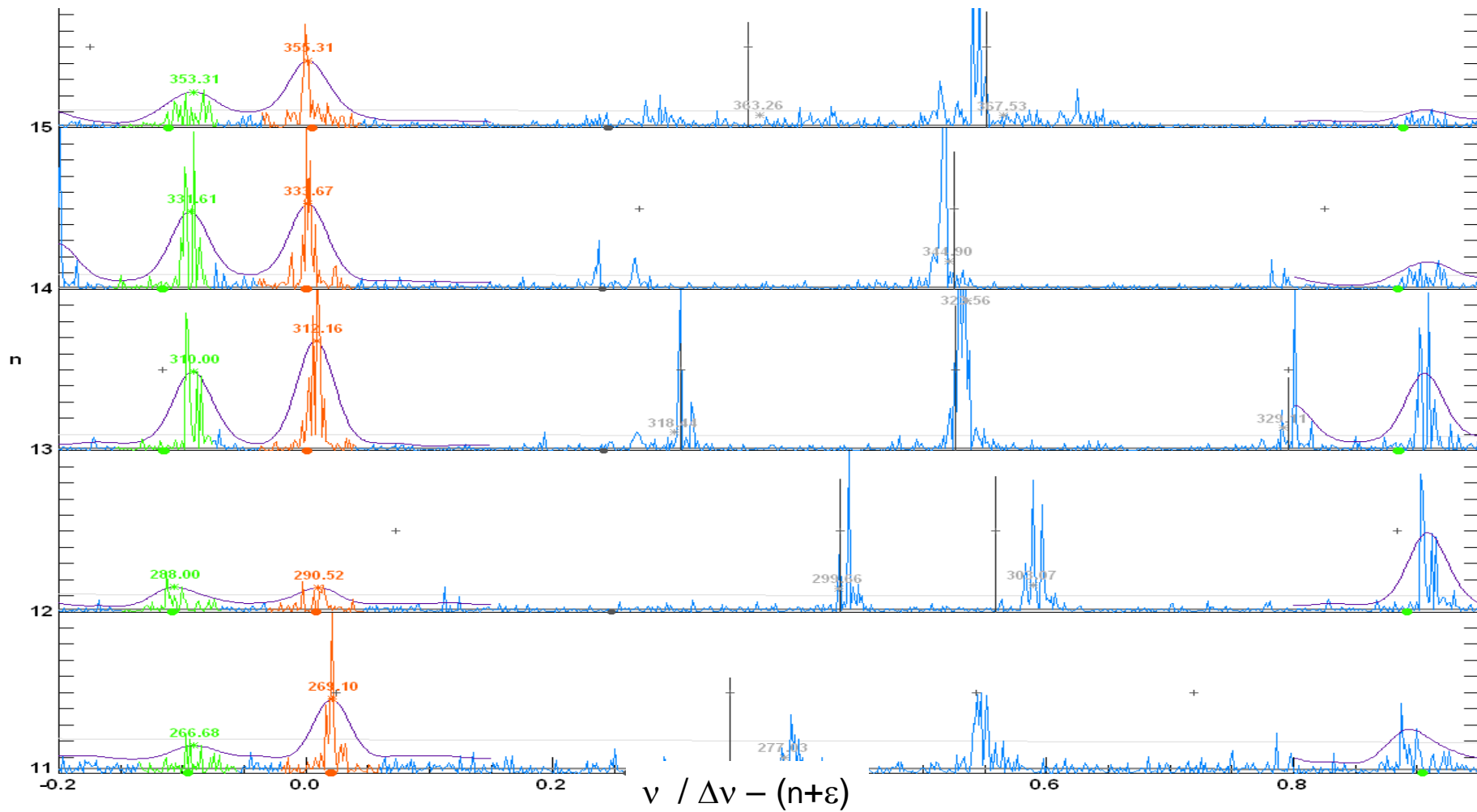
Soleil, $\Delta\nu \sim 135 \mu\text{Hz}$, $\nu_{\text{max}} \sim 3.1 \text{ mHz}$



Sous-géante, $\Delta\nu \sim 50 \mu\text{Hz}$, $\nu_{\text{max}} \sim 0,8 \text{ mHz}$

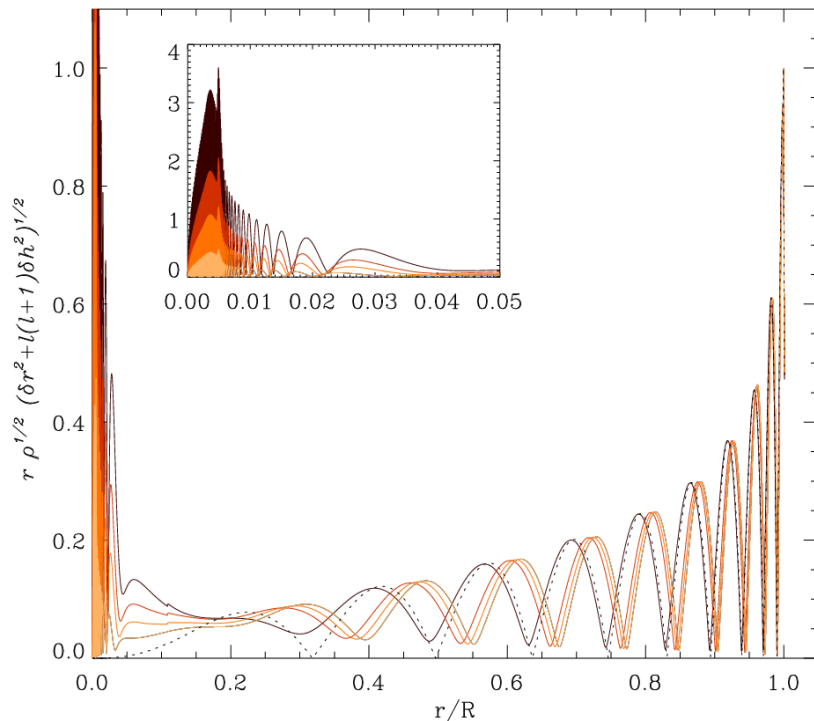


Géante rouge, $\Delta\nu \sim 21,6 \mu\text{Hz}$, $\nu_{\text{max}} \sim 0,31 \text{ mHz}$



SPECTRE D'OSCILLATION DES ÉTOILES ÉVOLUÉES MODES MIXTES

Beck et al, 2011, Science, mars 2011



Modes mixtes = modes se comportant comme

- des modes de gravité dans le cœur radiatif
- des modes de pression dans l'enveloppe convective.

Relation asymptotique des modes de gravité
(Tassoul 1980):

$$P_{k,1} = (-n_g + \varepsilon_g) \Delta\Pi_1$$

valable pour $|n_g|$ élevé : ce qui est réalisé dans
les étoiles géantes rouges (n_g entre -60 et -300).

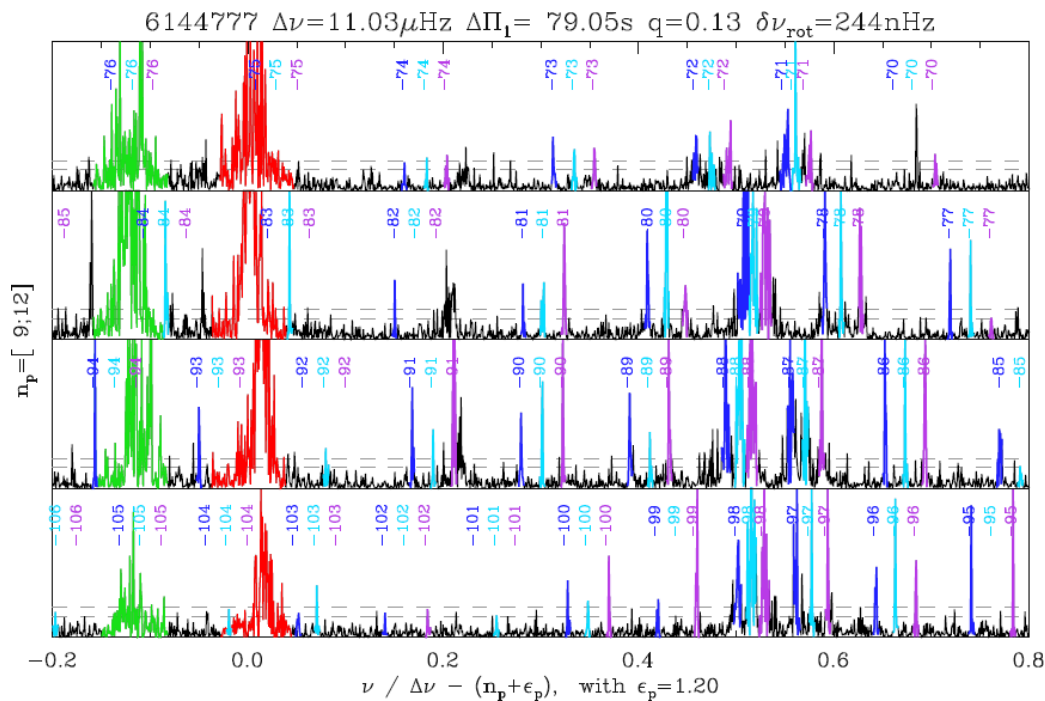
**Ces modes mixtes extraient l'information du
cœur des étoiles évoluées via la période $\Delta\Pi_1$**



SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES

IDENTIFICATION DES MODES

Mosser et al, 2018, A&A 618, A109



Le spectre d'oscillation peut être modélisé pour extraire des paramètres sismiques globaux

$\Delta\nu$

ν_{max}

$\Delta\Pi_1$

$\delta\nu_{\text{rot}}$

densité moyenne

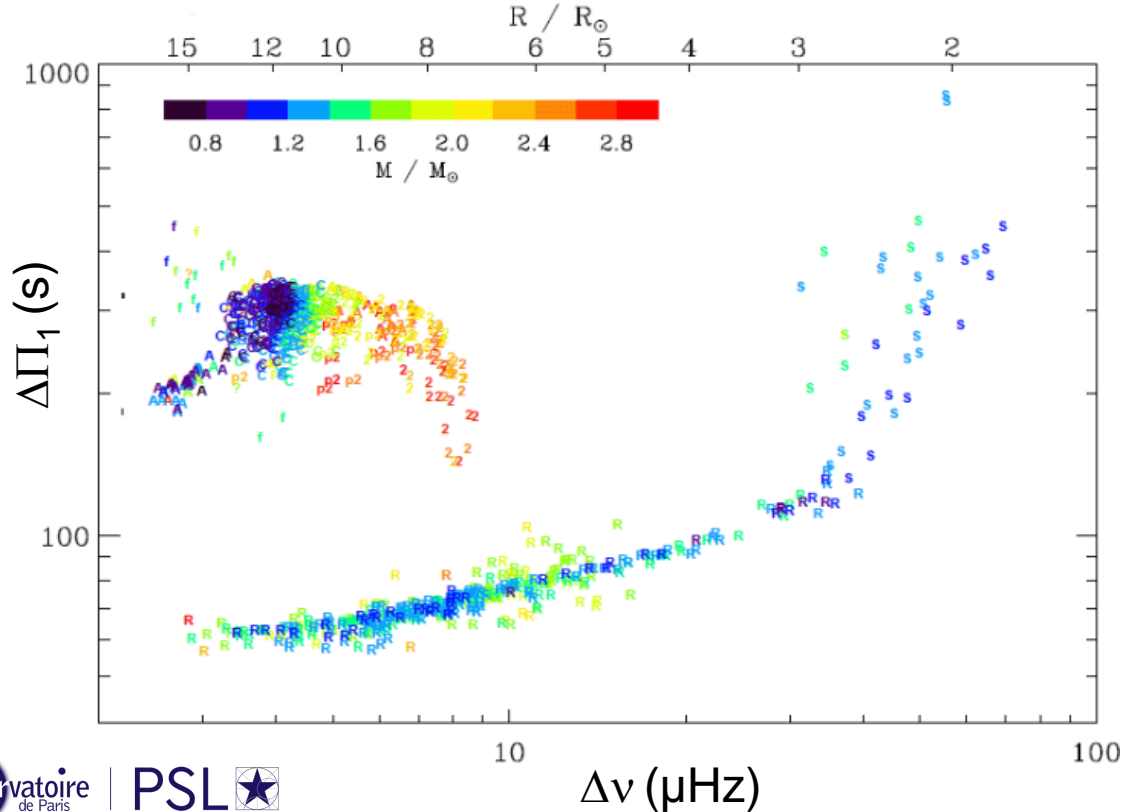
M et R

taille du cœur radiatif

rotation du cœur

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE



La grande séparation $\Delta\nu$ rend compte de la densité moyenne, dominée par la taille de l'enveloppe stellaire

La période $\Delta\Pi_1$ des modes de gravité rend compte de la taille du cœur radiatif

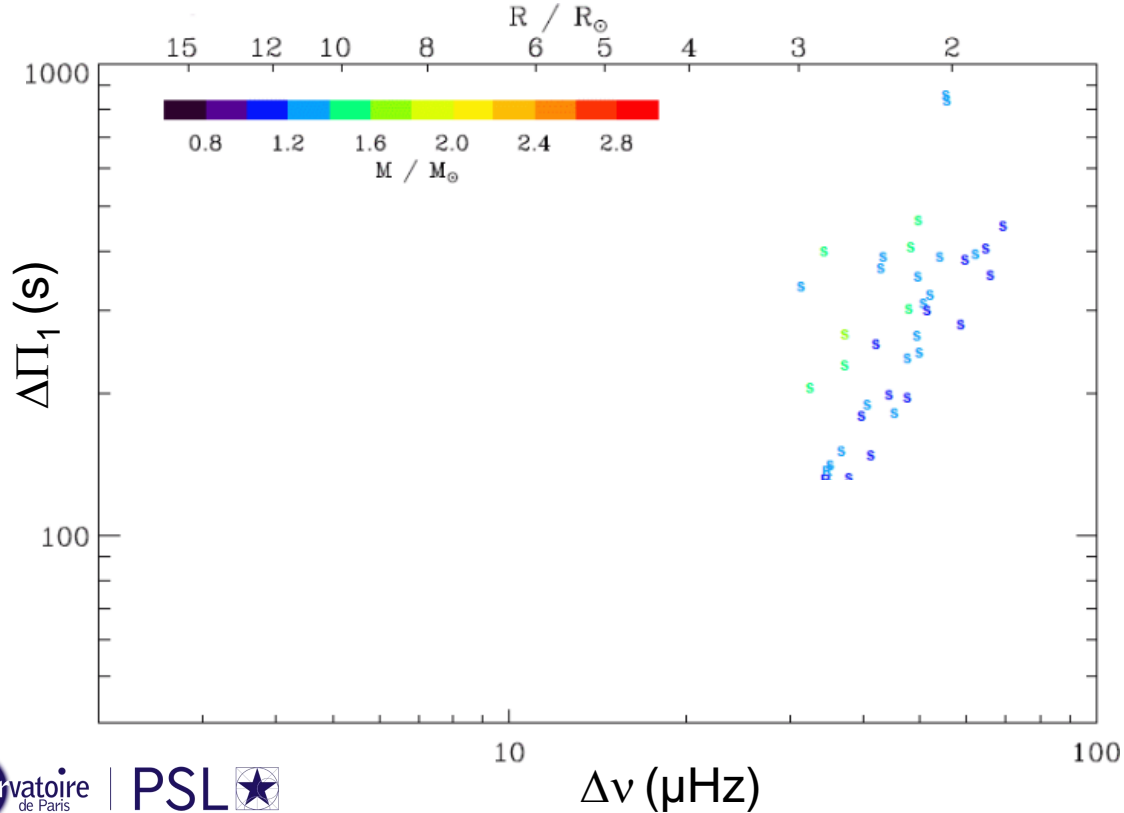
Le diagramme $\Delta\nu - \Delta\Pi_1$ rend compte du couplage entre le cœur et l'enveloppe des étoiles évoluées

La mesure des modes de gravité permet de distinguer les géantes, selon qu'elles montent la branche des géantes (**brûlage de l'hydrogène en couche**) ou qu'elle stationne sur la séquence horizontale (**brûlage de l'hélium du cœur**)

(Bedding et al. 2011, Nature 417, 608)

$$\Delta\nu$$
$$\Delta\Pi_1$$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE



S = sous-géante

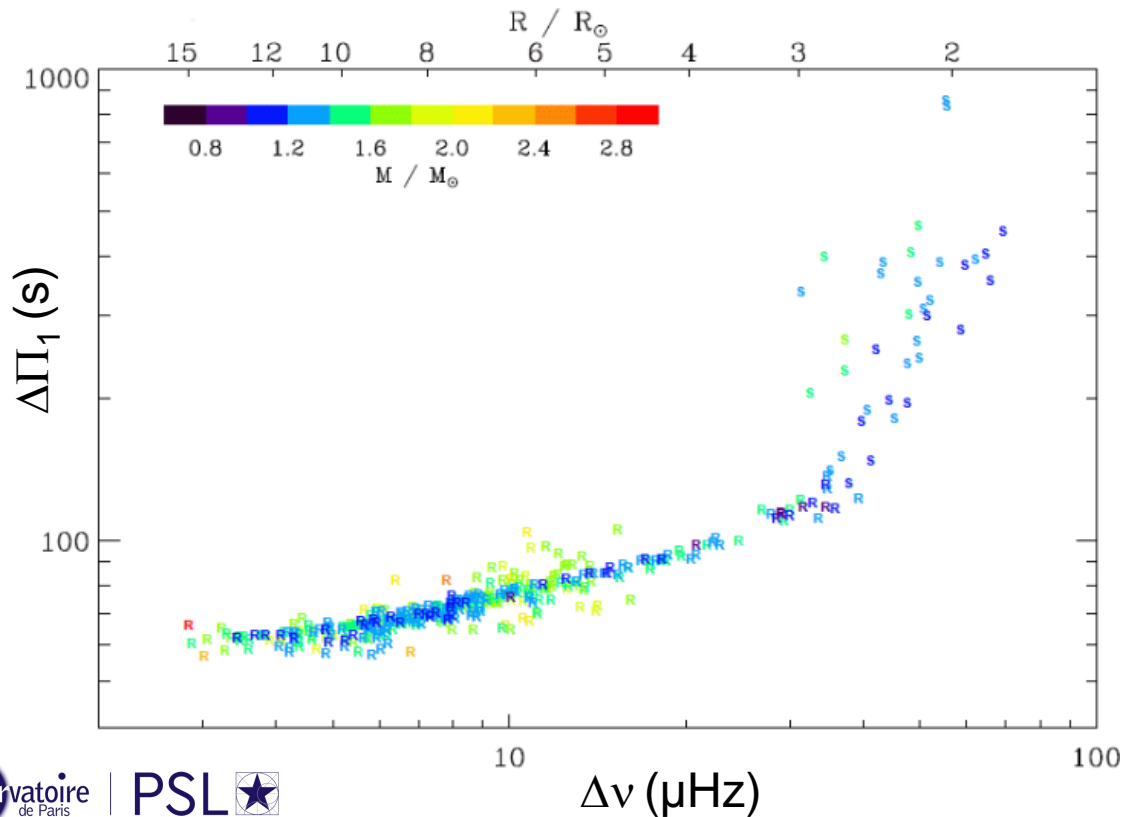
L'hydrogène du cœur est totalement épuisé ;
il continue à brûler en couche autour du cœur

L'enveloppe de l'étoile se refroidit, alors que
le cœur se contracte et s'échauffe pour
assurer l'équilibre de l'étoile

Les sous-géantes de masses différentes
suivent des trajets évolutifs différents

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE



R = branche des géantes rouges (RGB)

H continue à brûler en couche autour du cœur pour assurer l'équilibre de l'étoile

L'enveloppe de l'étoile se refroidit et s'étend de plus en plus

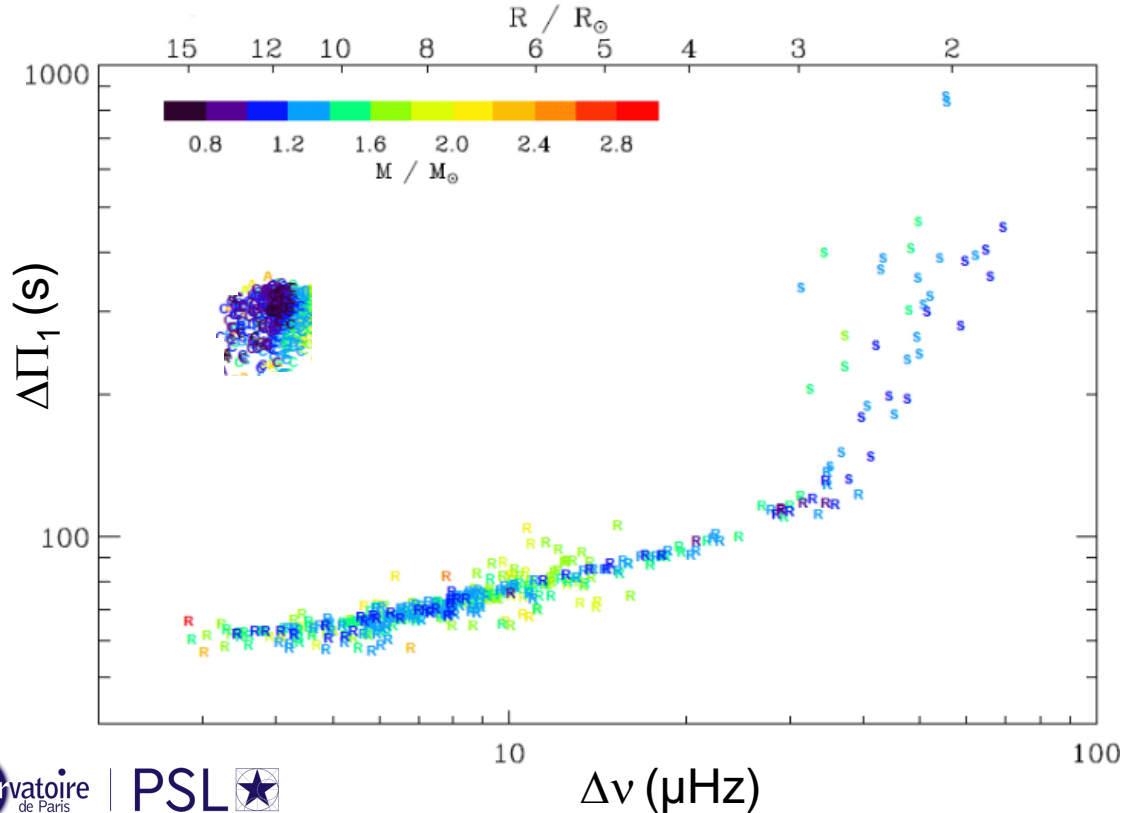
Les géantes de masses différentes suivent des trajets évolutifs quasi confondus

Effet miroir : la taille du cœur fixe la température de la couche H en fusion, qui détermine la taille de l'enveloppe

Évolution : vers le sommet de la RGB (~200 R_{\odot}), mais sans mesure des modes mixtes, donc sans information sur le noyau

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE



C = branche horizontale ($M < 1.8 M_{\odot}$)
(étoiles du *red clump*)

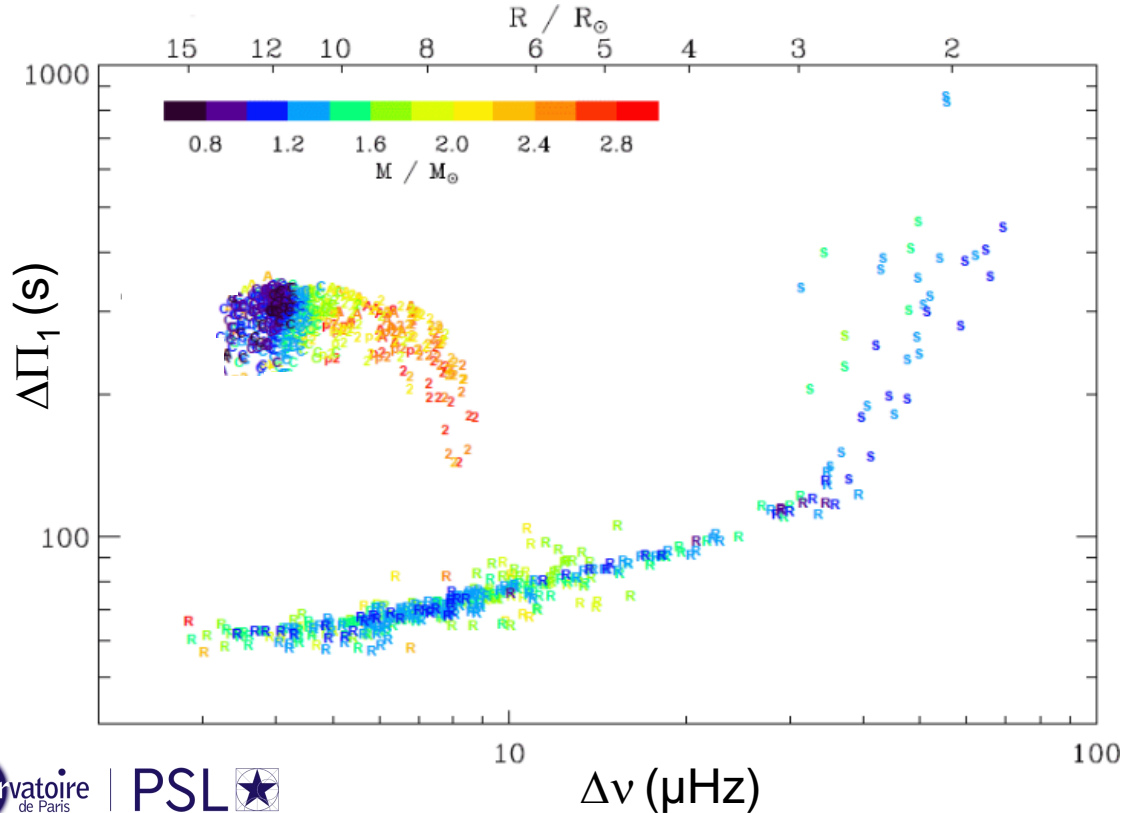
Au sommet de la RGB, pour un rayon de $\sim 200 R_{\odot}$, l'hélium du cœur a commencé à fusionner ; H continue à brûler en couche autour du cœur pour assurer l'équilibre de l'étoile

Le brûlage de l'hélium apporte de l'énergie, et l'hydrogène brûle en couche à plus faible température \rightarrow le rayon de l'étoile a diminué ($\sim 12 R_{\odot}$)

La dégénérescence du noyau conduit à des propriétés très semblables pour toutes ces étoiles avec $M < 1.8 M_{\odot}$

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE

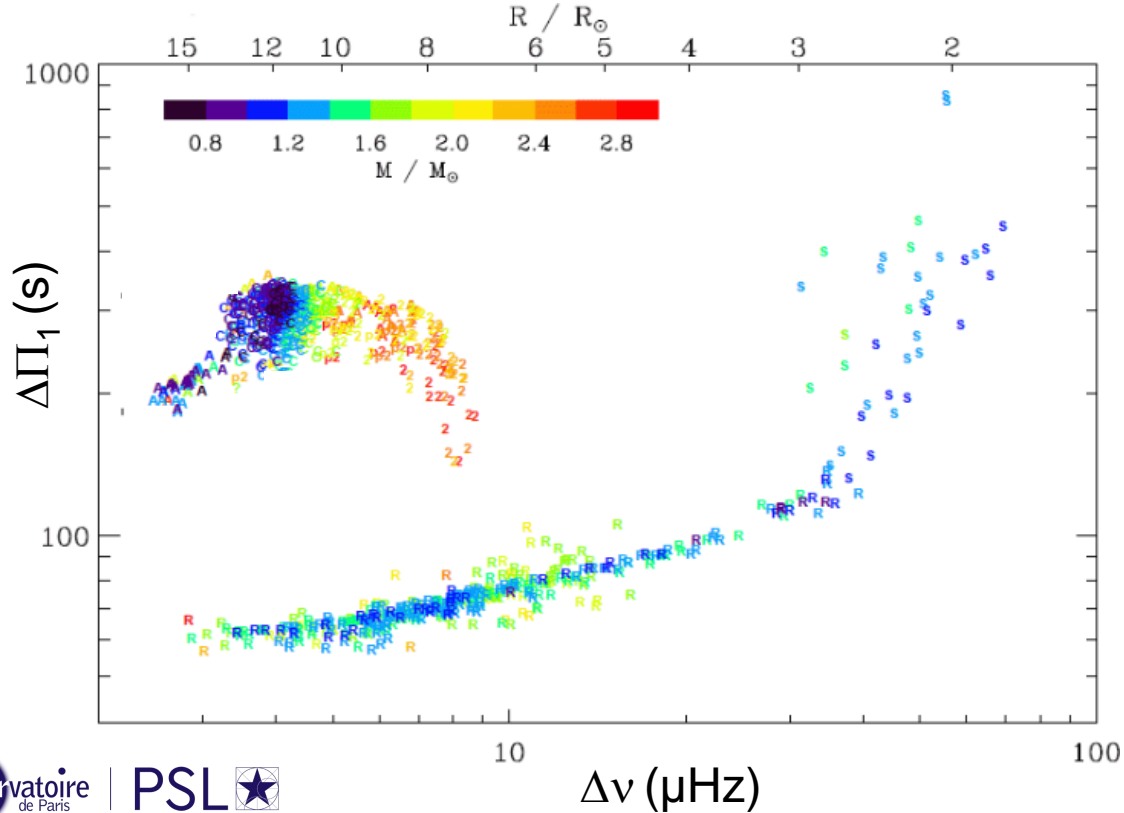


2 = *clump* secondaire, branche horizontale
($M \geq 1.8 M_\odot$)

Contrairement aux géantes moins massives, la fusion du cœur de ces géantes rouges plus massives a débuté dans un cœur non dégénéré. Les propriétés du cœur (et donc de l'enveloppe) dépendent de la masse totale de l'étoile

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE

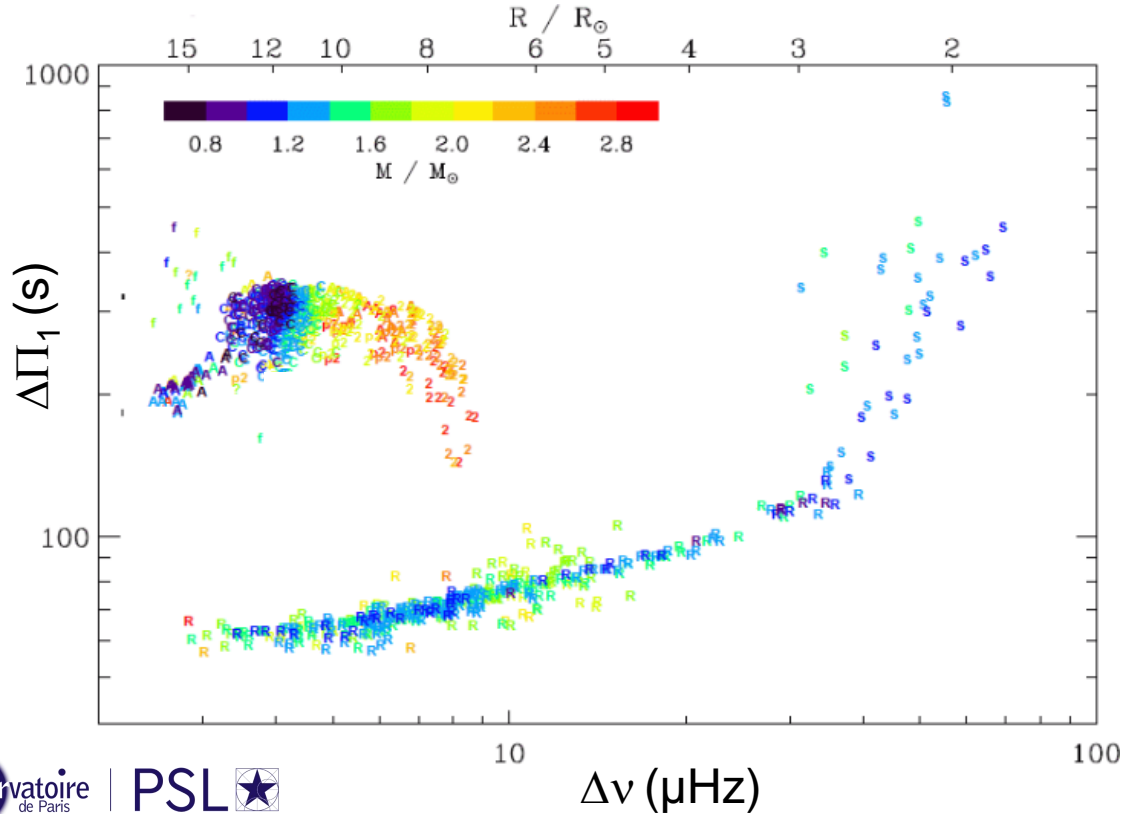


A = branche asymptotique

Lorsque l'hélium du cœur est épuisé, le cœur se contracte et l'énergie provient du brûlage en couches de l'hélium et de l'hydrogène

$\Delta\nu$
 $\Delta\Pi_1$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE



f = suite du flash de l'hélium

On peut supposer que les étoiles qui ne suivent pas l'évolution d'ensemble ajustent leur équilibre après le début de fusion de l'hélium

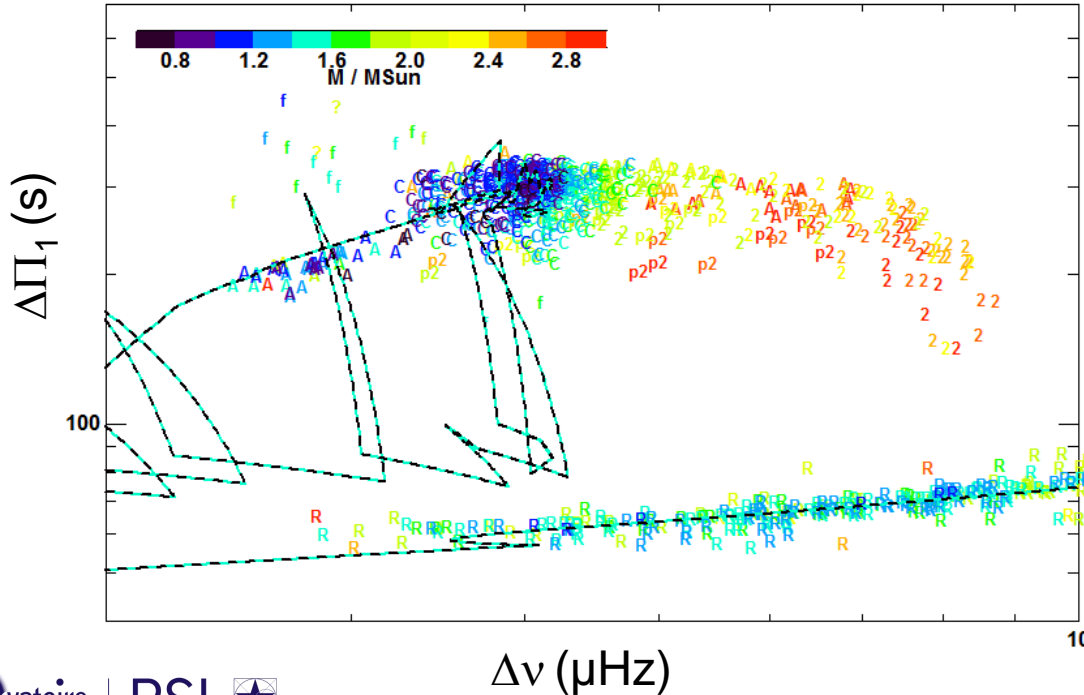
$$\Delta\nu$$

$$\Delta\Pi_1$$

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES

COUPLAGE CŒUR - ENVELOPPE

Mosser et al, 2014, A&A 572, L5



f = suite du flash de l'hélium

On peut supposer que les étoiles qui ne suivent pas l'évolution d'ensemble ajustent leur équilibre après le début de fusion de l'hélium...

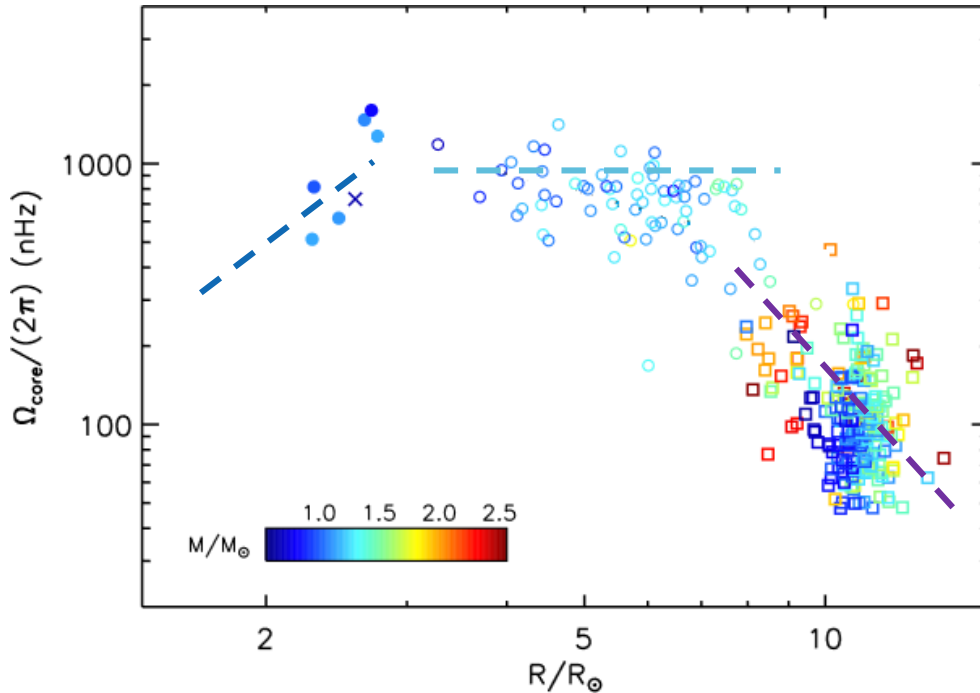
... ce que corroborent les modèles d'évolution stellaire qui prennent en compte l'*overshoot* du cœur non inclus dans le modèle d'évolution standard



SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES

ROTATION

Deheuvels et al, 2014, A&A 564, A27



La rotation du cœur croît dans la phase sous-géante (Deheuvels et al, 2014)

Puis n'évolue plus dans la phase des géantes avec des rotations plus lentes qu'attendues par conservation du moment cinétique du cœur (Géhan et al. 2018)

→ Un mécanisme de redistribution du moment cinétique empêche l'emballement de la rotation du cœur

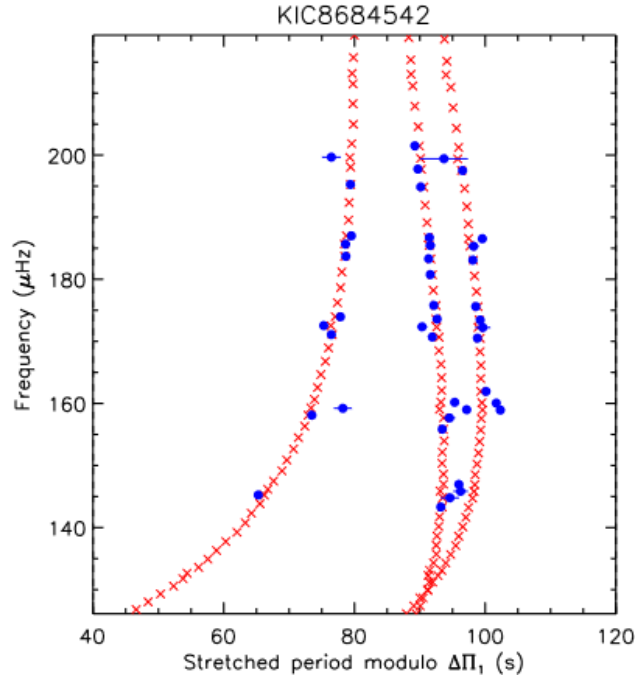
La rotation est couplée au rayon de l'étoile, dans la phase de brûlage de l'hélium (Mosser et al. 2024)

→ Un mécanisme de redistribution du moment cinétique transfère efficacement le moment cinétique du cœur vers l'enveloppe

B

SPECTRE D'OSCILLATION DES GÉANTES ROUGES MAGNETISME

Li et al, 2022, Nature 610, 43



Le champ magnétique interne déforme les triplets rotationnels des modes dipolaires

→ Détection d'un fort champ magnétique au niveau du cœur radiatif

Signature magnétique détectée dans une quinzaine de géantes rouges : champs de ~ 10 à ~ 400 kG

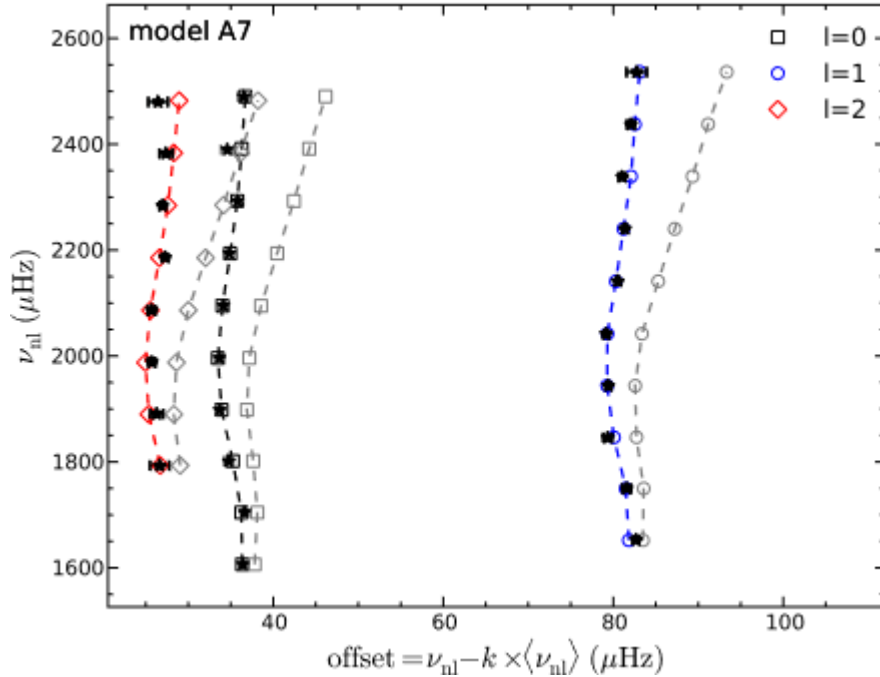
L'origine de ces champs reste débattue : champ fossile créé par effet dynamo dans le cœur convectif de l'étoile lorsqu'elle était sur la séquence principale ? (Deheuvels et al. 2023, A&A 670, L16)



SPECTRE D'OSCILLATION D'ÉTOILES HÔTES D'EXOPLANETES

AGE STELLAIRE

Lebreton & Goupil, 2014, A&A 569, A21



Étude détaillée de l'étoile HD 52265 observée par le satellite CoRoT

Différents ingrédients physiques sont testés pour ajuster les fréquences d'un modèle évolutif de structure interne aux observations

- Propriétés de la convection
- Composition chimique de l'étoile
- Diffusion (et gradient de composition)
- Equations d'état
- Modélisation de l'atmosphère

But : obtenir des mesures précises et justes

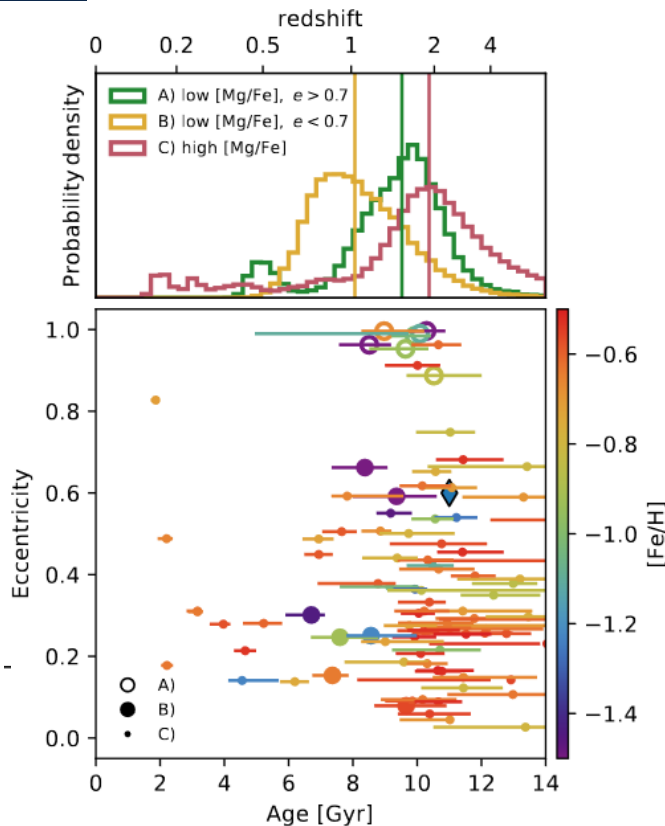
→ Âge de l'étoile HD52265 et de sa planète (= âge du meilleur modèle avec la physique la plus précise)

2.10-2.57 Ga



ASTROMETRIE, SPECTROMÉTRIE & SISMOMETRIE

ARCHEOLOGIE GALACTIQUE



L'astrométrie (*Gaia*) mesure la distance, donc la luminosité des étoiles, ainsi que leur mouvement apparent

La spectrométrie mesure les abondances. L'abondance d'éléments créés par processus α (ici [Mg/Fe]) permet de distinguer les composantes minces ou épaisses du disque galactique. Le disque épais comprend des étoiles plus vieilles avec [Mg/Fe] plus élevé.

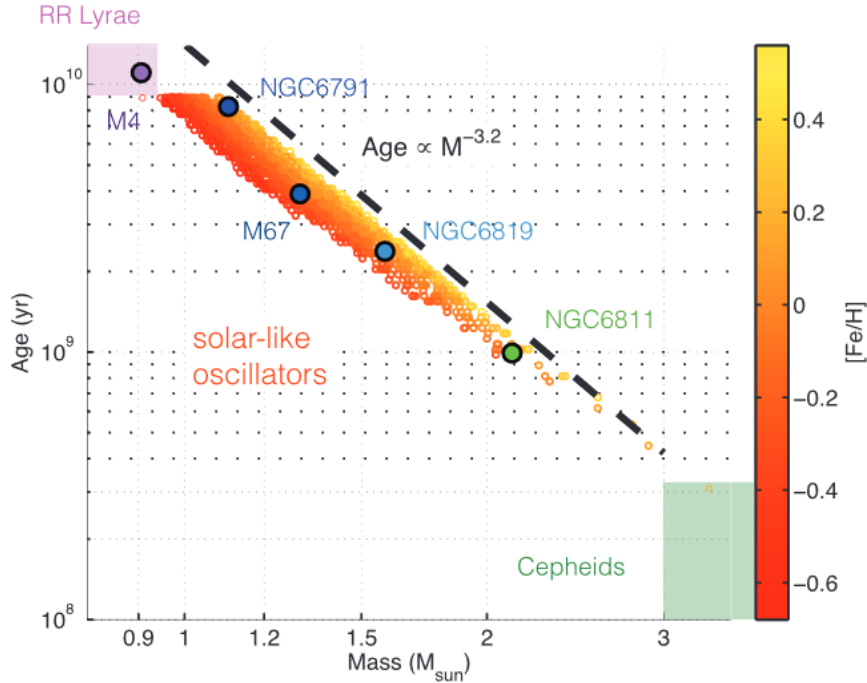
L'astérosismologie (\rightarrow sismométrie) couplée à la modélisation stellaire contraint l'âge des étoiles

\rightarrow Ceci permet de retracer l'histoire de la Galaxie

Montalban et al. (2022) ont démontré que la Voie Lactée avait déjà formé une population importante de ses étoiles (qui résident désormais principalement dans son disque épais) avant la chute de la galaxie satellite Gaia-Encelade il y a ~ 10 Ga



SISMOMETRIE ET ASTROMETRIE AMAS D'ÉTOILES



L'astérosismologie permet d'estimer les âges des amas stellaires avec une grande précision, la masse des géantes rouges étant précisément contrainte



EN GUISE DE CONCLUSION

ASTÉROSISMOLOGIE

Un regard à l'**intérieur** des étoiles

Les ondes qui se propagent à l'intérieur des étoiles sondent tout ce qu' on ne peut pas voir directement

Ces mesures sismiques nécessitent un niveau de précision photométrique extrême (ppm pour les étoiles comme le Soleil), continuent sur des durées très longues (plusieurs années)

Elles sont menées le plus souvent par des instruments spatiaux

Mesure des paramètres stellaires

L'étude de ces ondes permet, entre autres de mesurer très précisément la **masse** (à 3-5%) et le **rayon** d'une étoile, son **état d'évolution**, sa **rotation interne**

... et d'estimer son **âge** (le projet PLATO de l'ESA vise des âges plus précis que 10%)

Apport de l'astérosismologie par les missions CoRoT, *Kepler*, K2, TESS... et bientôt PLATO (2026)

Structure et évolution stellaire ; rotation interne, phénomènes de transport, champ magnétique

Caractérisation des systèmes exoplanétaires

Archéologie Galactique