

La Musique des Etoiles

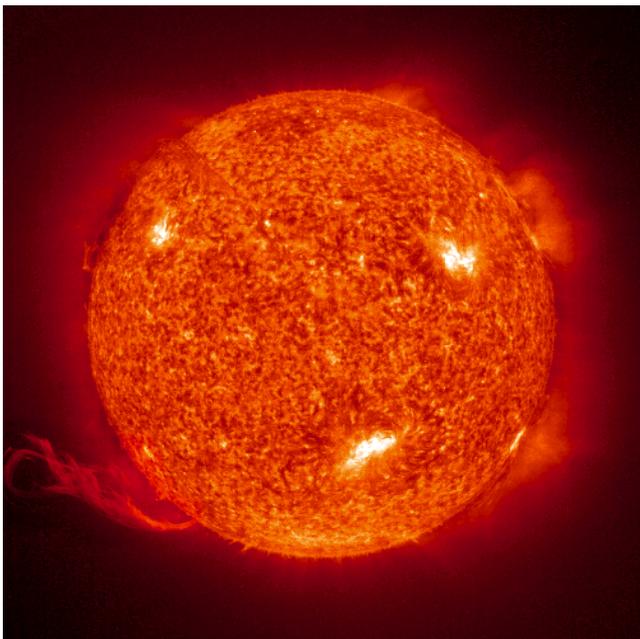
- 1- la découverte des vibrations du Soleil
- 2- la sismologie des étoiles ou Asterosismologie
- 3- ses multiples applications
- 4- La musique des Sphères ?
- 5- Création musicale...

Annie BAGLIN,
Chercheuse émérite
CNRS, Observatoire de Paris

Annie BAGLIN SAM, 4 février 2017



Notre étoile, le Soleil



Masse= **$2 \cdot 10^{30}$ kg** 300 000 M_{Terre}

Rayon= **700 000 km** 109 R_{Terre}

Distance= **149,6 millions de km,**
200 fois son Rayon
8 minutes lumière

Température à la surface= **5800°**
au centre ~ 15 millions!

Densité à la surface= **$10^{-9} \text{ g cm}^{-3}$**
au centre ~150 g cm^{-3}

Composition à la surface:

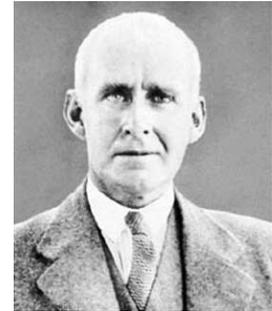
Hydrogène 70%,
Helium 28%
Métaux 2%

Age \geq **4,5 milliards d'années**

« A première vue, il semblerait que l'intérieur du soleil et des étoiles soit moins accessible aux investigations scientifiques que n'importe quelle autre région de l'univers. Nos télescopes pourront sonder de plus en plus loin dans les profondeurs de l'espace; mais comment pourrions-nous un jour **obtenir une connaissance précise** de ce qui est caché derrière des barrières infranchissables?

Quel instrument peut-il percer les couches externes d'une étoile et tester les conditions qui règnent à l'intérieur? »

(The internal constitution of the stars, (1926) page 1)



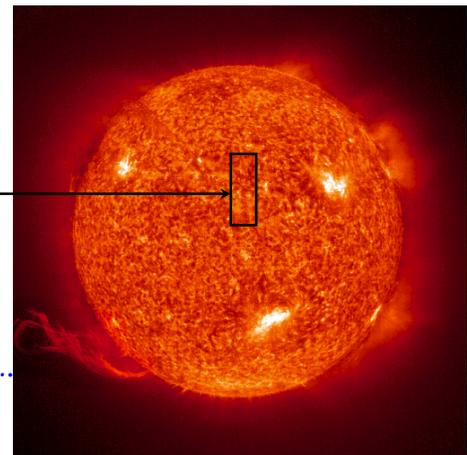
Sir Arthur Eddington
Astrophysicien anglais
1882-1944

Mais..... si les étoiles vibraient.....? elles nous permettraient de comprendre ce qui se passe dans leurs entrailles!

Les « modes propres » des étoiles (sphères autogravitantes)
.....seraient-ils détectables ?

En 1969,
Lloyd Evans et Raymond Michard (OPM)
observent **une petite région du Soleil**
pour étudier le phénomène des éruptions

Ils détectent , **par hasard** de curieux mouvements...
inconnus jusqu'alors
Ils semblent à peu près périodiques (5 minutes)



Leighton (USA) confirme quelques mois plus tard, par de nouvelles observations

De quoi s'agit-il ???

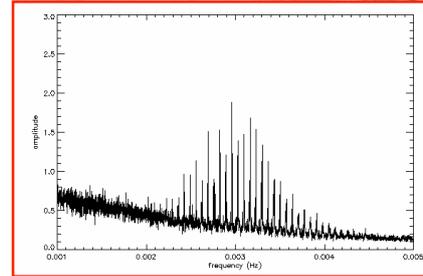
En 1979, une équipe franco-américaine (E. Fossat, Université de Nice et J.Pomerantz) organise une expédition au pôle Sud,

Pour observer le Soleil **en entier** pendant plusieurs jours (5) sans interruption pendant le jour polaire

- * Découvrent des variations de l'intensité globale aussi entre 3 et 5 minutes (3 mHz)
- * Découvrent la multipériodicité
- * Structure en "peigne" des fréquences

Parallèlement, les théoriciens essayent de comprendre de quel phénomène il s'agit...

Deubner (US) le premier montre que ces vibrations sont des « modes propres » de la sphère Soleil, des ondes sonores qui « résonnent » à leurs propres fréquences.

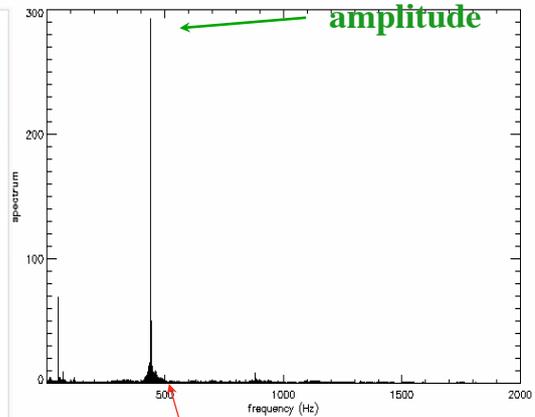


Petit détour technique!

Analyse du signal dite « de Fourier » : périodicité, intensité

amplitude

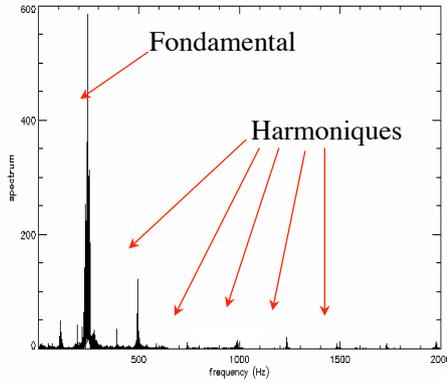
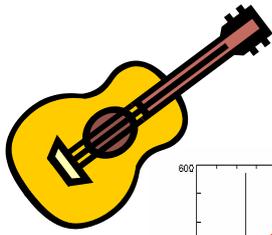
Fréquence = nombre de vibrations par seconde (Hertz)
Intensité = niveau de puissance



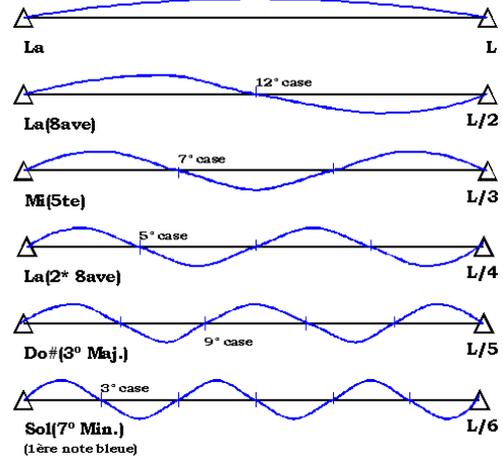
Fréquence → ←-- Période

La 440

fréquence



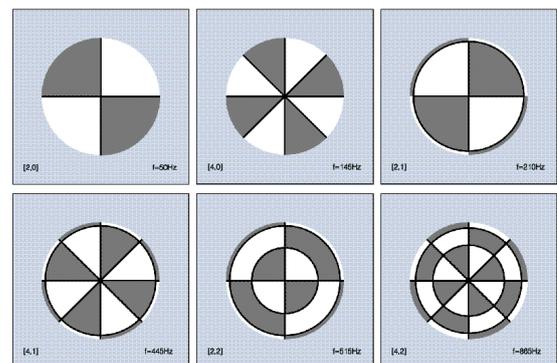
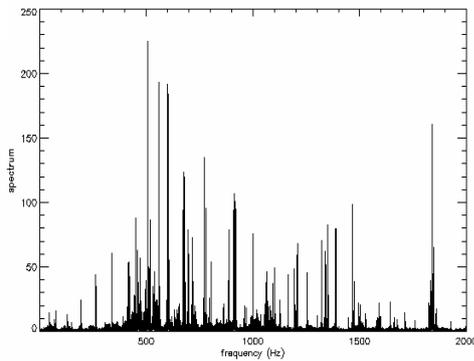
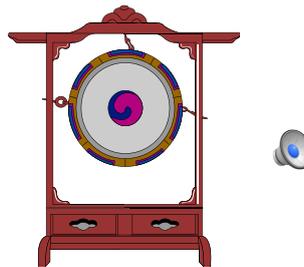
Les Harmoniques



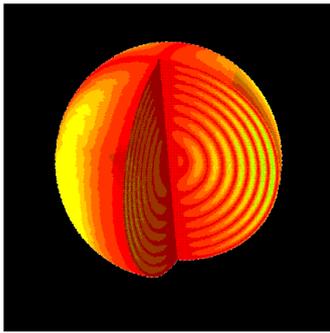
Déjà compris par Pythagore:

“il existe une relation entre la longueur d'une corde vibrante et la hauteur du son émis”

Un gong (2D)



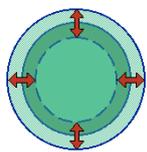
Figures sa to sf (top left to bottom right): Six of the simpler modes of a flat circular plate.



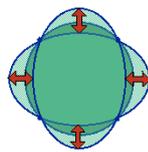
La théorie des vibrations des sphères autogravitantes Existe depuis les travaux de Poisson vers 1830, avec quelques hypothèses simplificatrices

Le long du rayon et sur la sphère

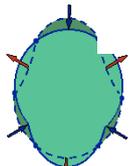
En surface les fonctions propres Sont les Harmoniques Sphériques:



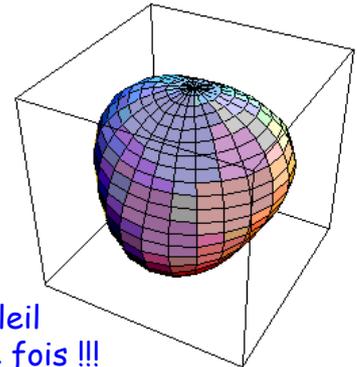
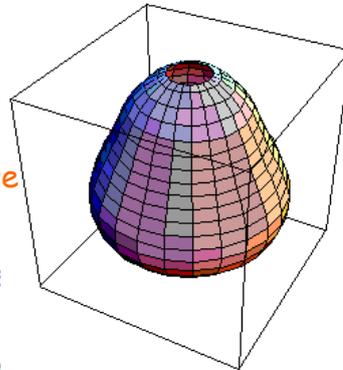
δ_0^0 : mode «ballon» ou «respiration»: purement



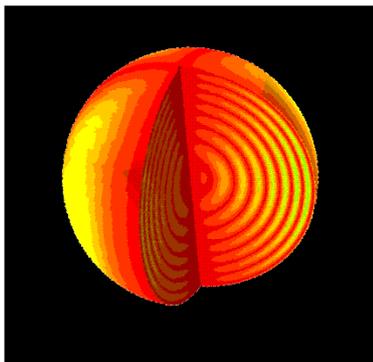
δ_2^0 : mode «football» (Fondamental, 53.9



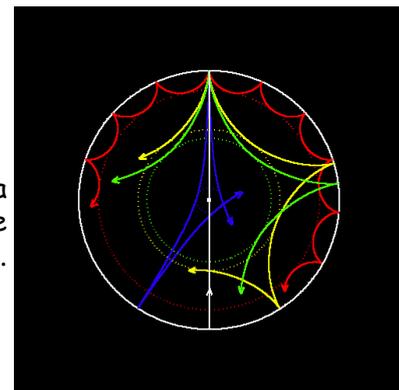
δ_3^0 : (25.7 minutes)



Amplitudes du Soleil grossies un million de fois !!!



Réflexion des ondes à la surface car chute brutale de la densité du gaz.



Les différents « modes » pénètrent plus ou moins profondément dans l'étoile. Ils sont donc sensibles à des régions différentes.

Réfraction des ondes à l'intérieur car augmentation de la température du gaz (i.e. vitesse du son).

Ils « voient » l'intérieur des étoiles

Entendre la "musique" du Soleil ?

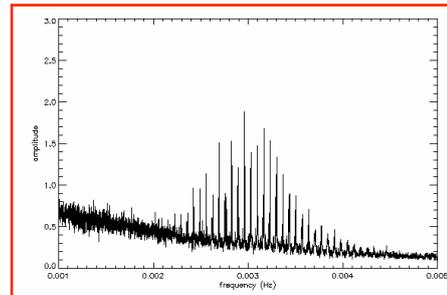
1-pas de propagation du son dans le vide intersidéral

2- les fréquences audibles par l'homme : 20-20 000 Hz

$$\text{Fréquence} = \frac{\text{vitesse du son}}{\text{dimension de la cavité}}$$

$$C_{\text{son}} = 340 \text{ m/s}, L = 1 \text{ m}$$

$$f = 340 \text{ Hz}$$

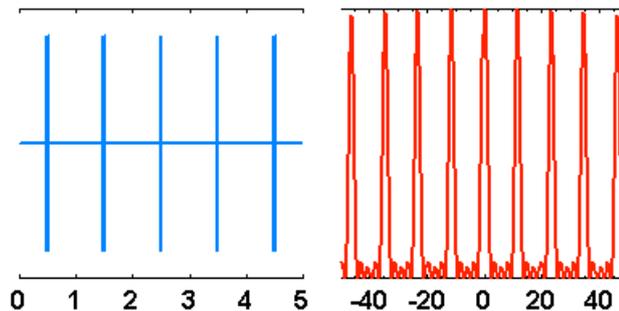


$$C_{\text{son}} = 300 \text{ km/s}, L = 100 \text{ 000 km}$$

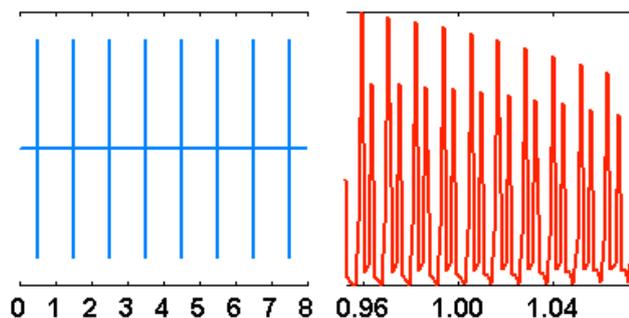
$$f = 3 \text{ mHz}$$

Multiplier les fréquences par 2^{18} (ou 2^{19})
18(ou 19) octaves ! 

Comment les observer ?

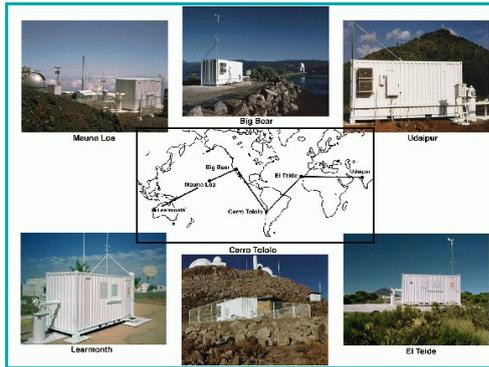


Continuum
et pendant de
longues périodes



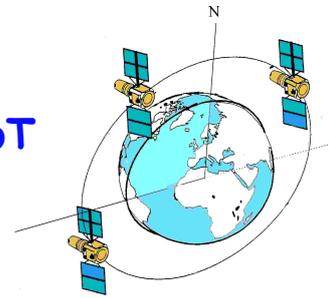
Deux solutions principales

* Avec des réseaux de télescopes au sol

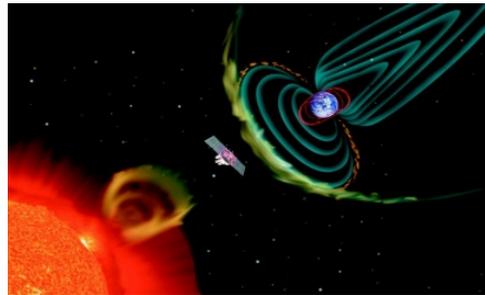


Réseau GONG

CoRoT



* Dans l'espace



SOHO
(ESA/NASA)
lancé le 2 déc 1995

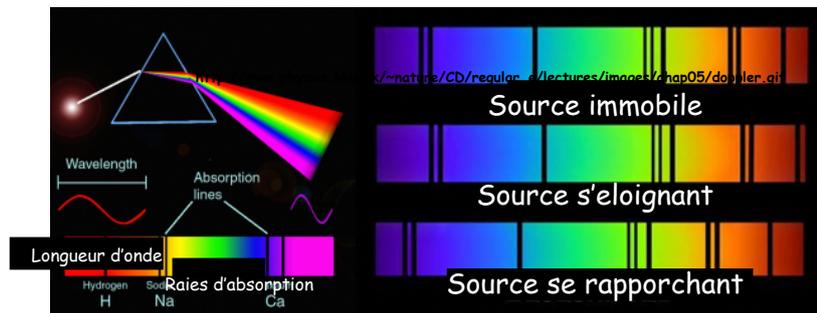
Des variations de vitesse

l'effet Doppler nous dit que

La fréquence d'une onde est modifiée si l'émetteur est en mouvement

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = v/c$$

$$\Delta\lambda = (\lambda_m - \lambda_0) / \lambda_0$$



C'est la méthode qui a été utilisée pour la découverte des oscillations du Soleil

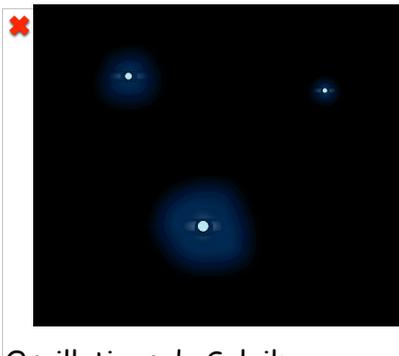
Variations de vitesse de quelques cm/s !!

mouvements à la surface du Soleil de quelques dizaines de km

(diamètre solaire de 1 400 000 km, distance Terre-Soleil de 150 millions de km !)

Mais les oscillations sont périodiques.....

c'est la **spectroscopie**, possible depuis le SO



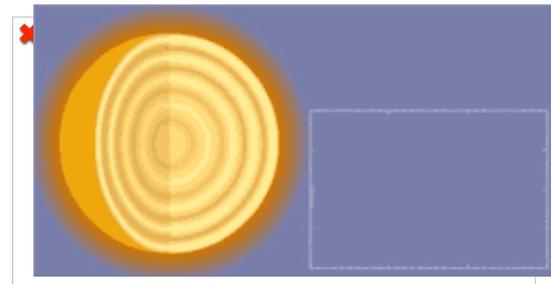
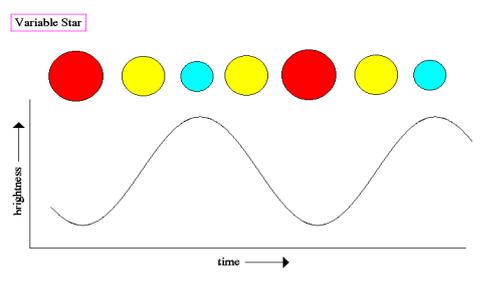
Oscillations du Soleil:

Variation de luminosité de 1 pour 1 millions!!

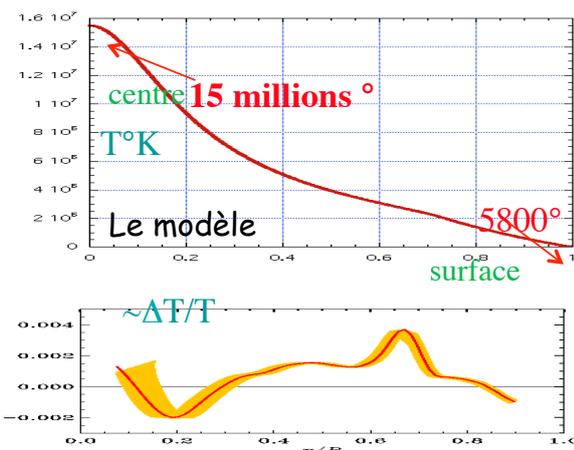
*la lumière émise par l' Empire State building de New-York sera plus sombre de 1 pour 1 millionssi on descend de 3 cm le rideau d' UNE SEULE FENETRE!

C'est la **photométrie**
Méthode employée au Pôle Sud

Très difficile depuis le sol à cause de l'atmosphère → **espace**



Température interne

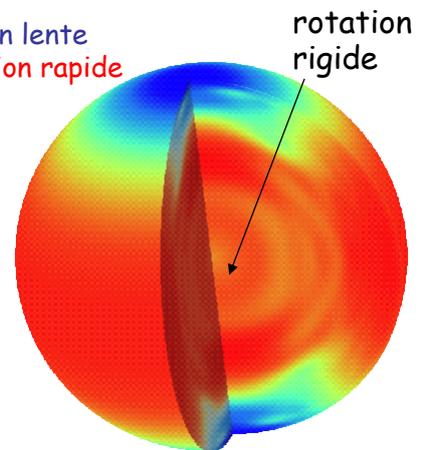


Différence entre le modèle et les observations

Bien compris !

Rotation interne

bleu: rotation lente
rouge: rotation rapide



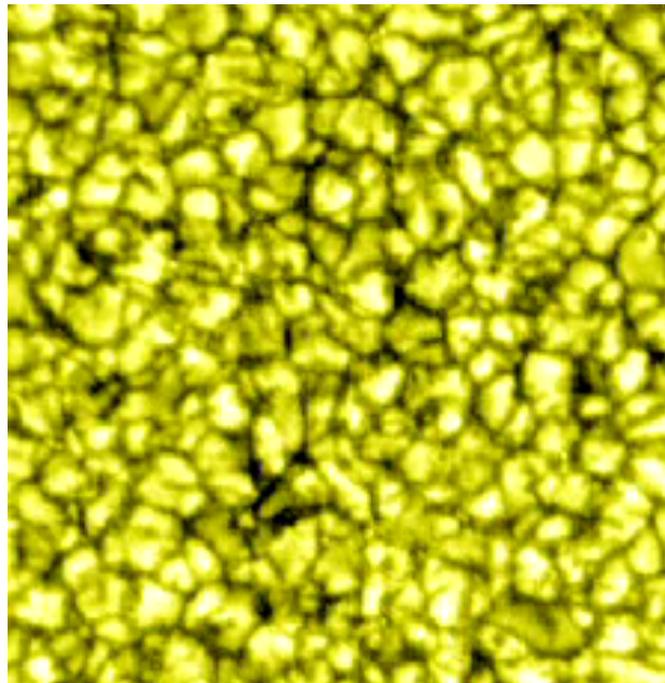
Pourquoi ?

Le Soleil est un immense laboratoire de physique!

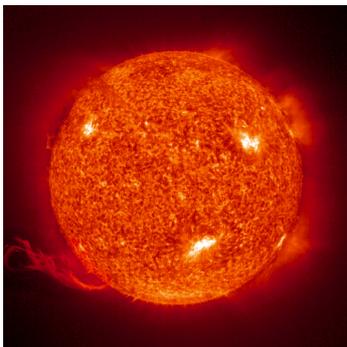
La granulation !



Terre
à la
Même
échelle



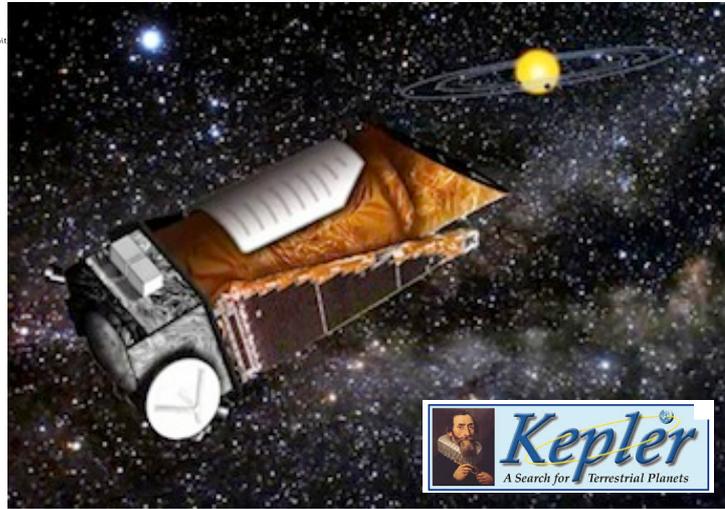
Détecter les modes propres des étoiles est beaucoup plus difficile....



Il faut aller
dans l'espace

CoRoT et Kepler
Et plus tard PLATO

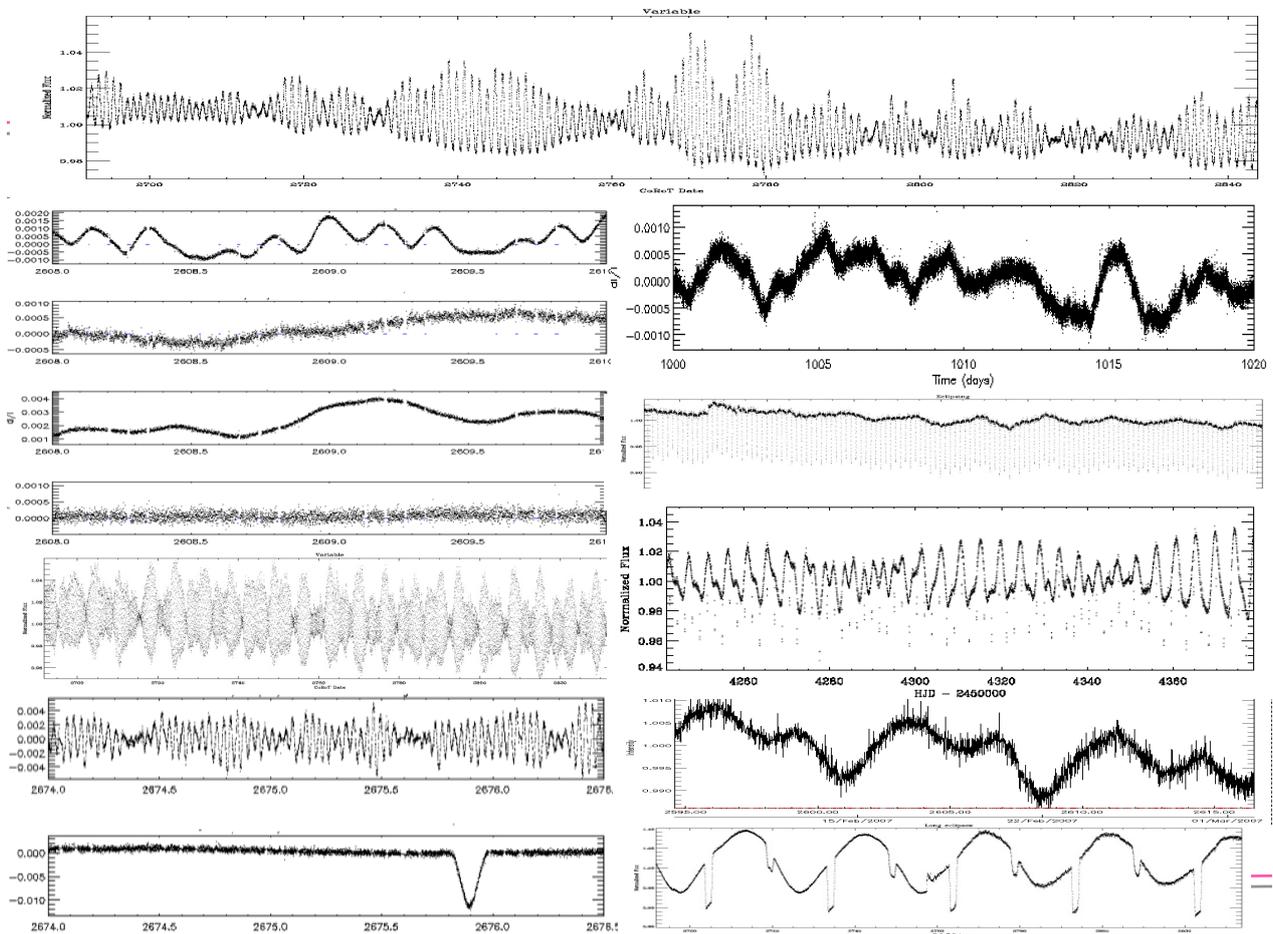
- Signal très faible: 10^{11} fois moins de photons (1 pour cent milliards)
On doit utiliser toute la lumière de l'UV jusqu'à l'infra-rouge (photométrie)
- Variations périodiques, mais plus faibles (1/10000) perturbations atmosphériques
- une étoile n'est visible de nuit depuis la Terre que pendant deux mois
- On ne distingue pas le disque stellaire



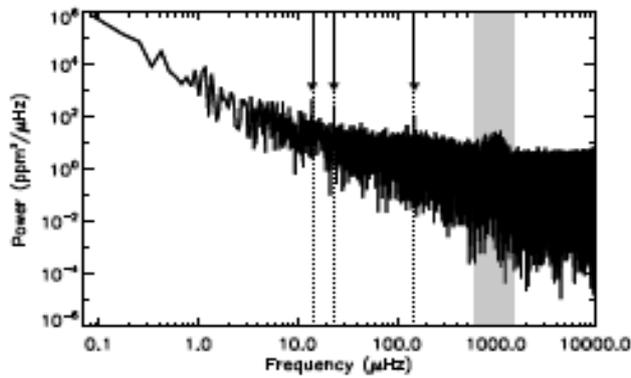
09/03/17

Annie BAGLIN SAM, 4 février 2017

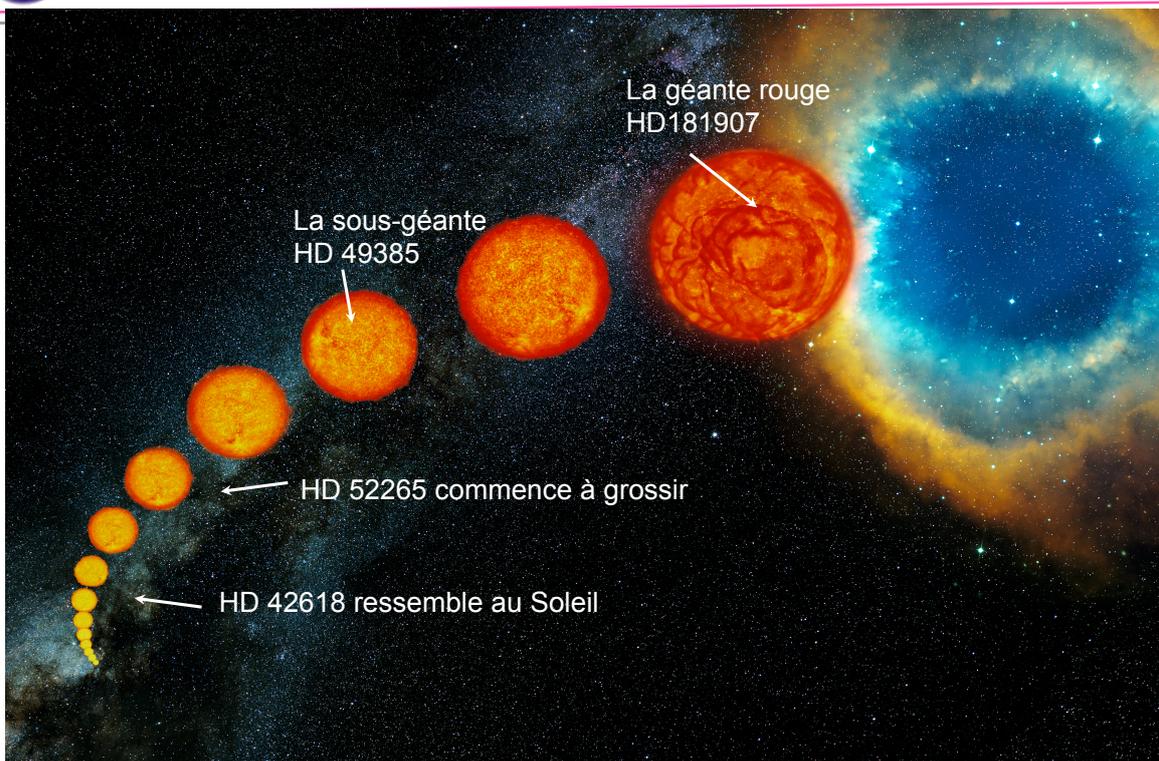
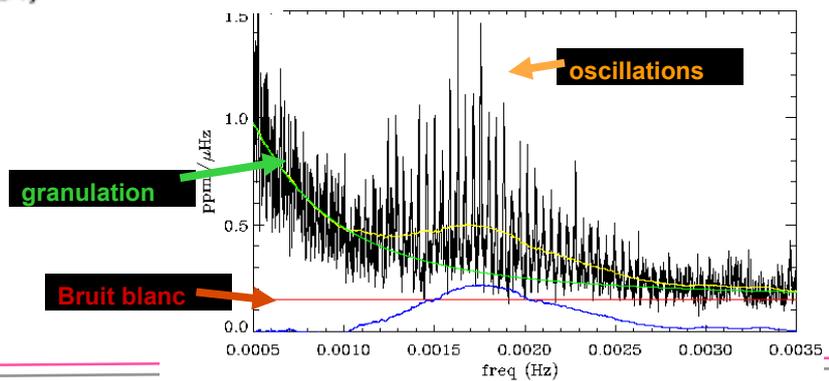
19

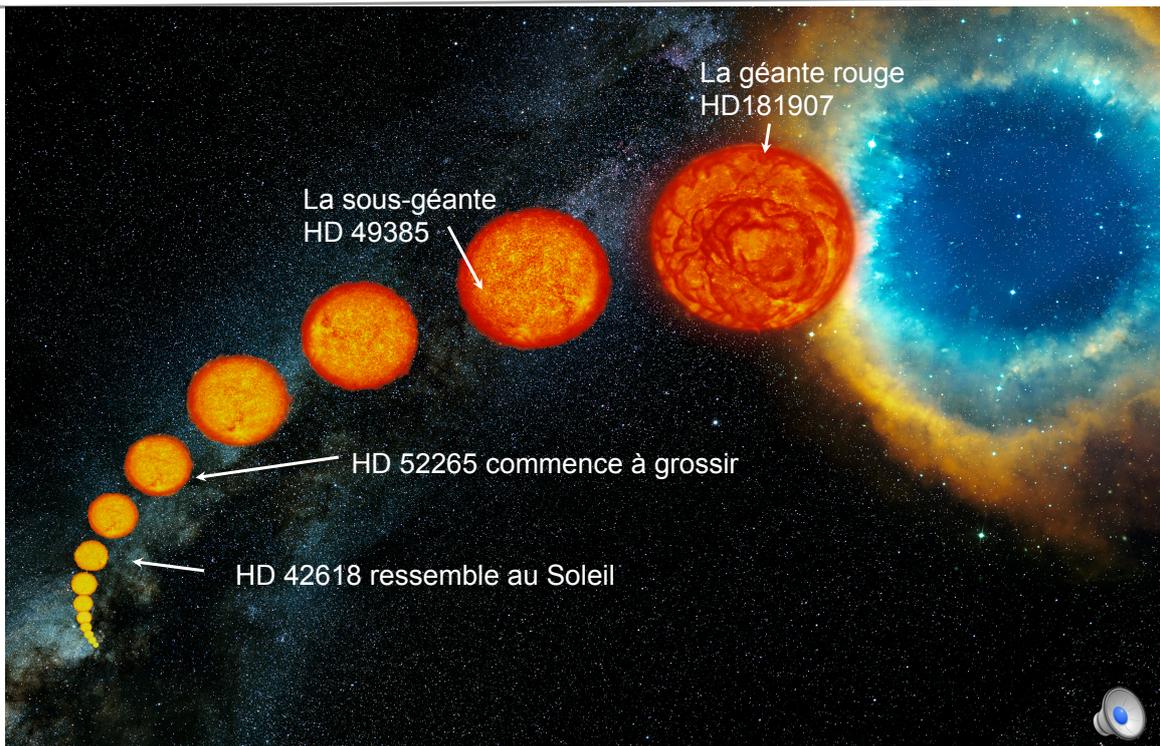


AM. 4 février 2017



Etoile de Magnitude 7 observée pendant 130 jours

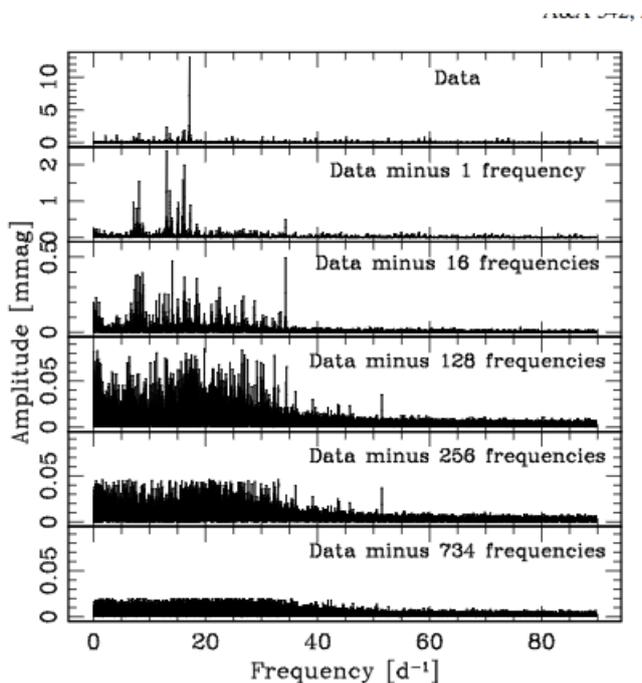




09/03/17

Annie BAGLIN SAM, 4 février 2017

23



Jusqu'en 2006, télescope au sol
1 fréquence/periode 3h

Dans l'espace,
Précision, Durée et Continuité

au moins 300 fréquences différentes

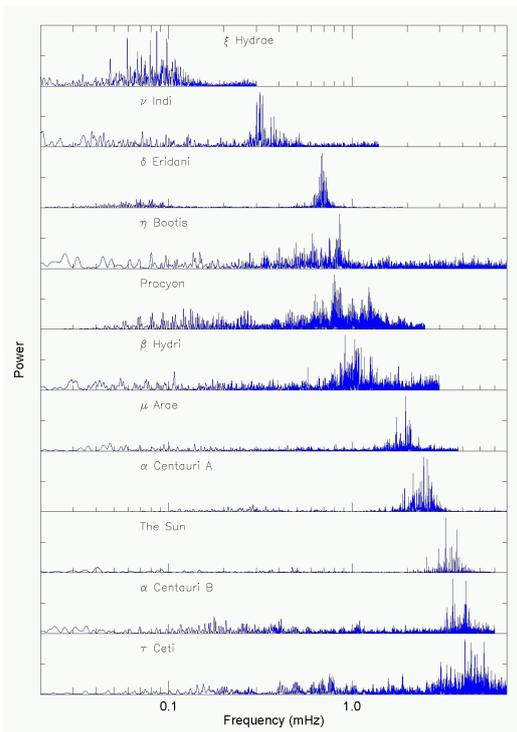
Structure complexe...
interprétation en cours!

09/03/17

Annie BAGLIN SAM, 4 février 2017

24

Les « géantes rouges »



Etoiles en fin de vie, évoluent vite
Très lumineuses → visible à grande distance

Rayon augmente ---> fréquence diminue

Deux « indices sismiques:

- la fréquence du Maximum
- l'espacement des dents

→ Luminosité et Rayon

→ Distance, Masse, Age

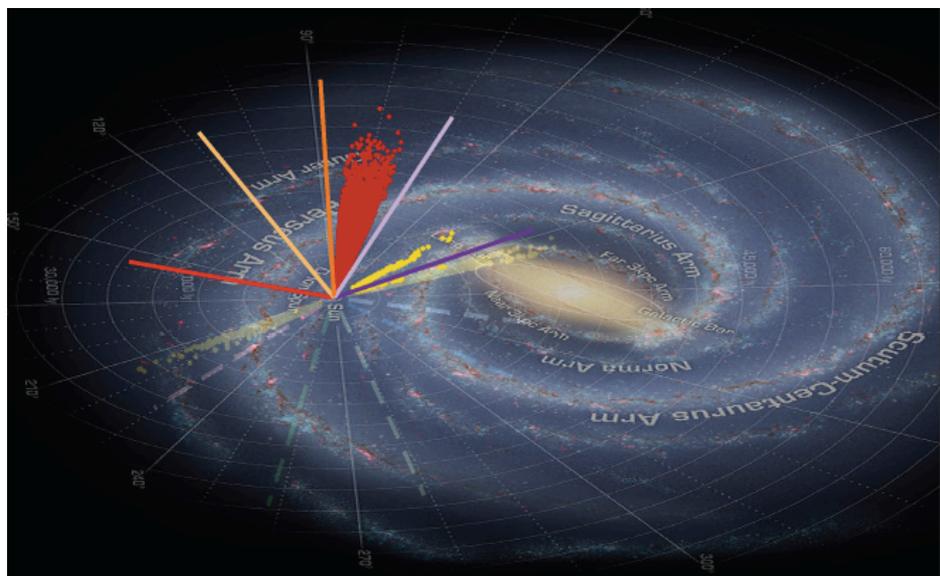
Une nouvelle discipline

Les indices sismiques des géantes rouges vont nous indiquer
comment la galaxie évolue

C'est » l' Archéologie galactique »

Kepler
rouge
+ K2

CoRoT
jaune



« L'âme du monde a des propriétés comparables aux relations musicales » Platon (428-348 av JC)

Les distances des planètes à la Terre sont dans les rapports faisant intervenir des nombres entiers... qui rappellent les intervalles de la gamme

1 2 3 4 14 25
Lune, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne



PLATON y voit la preuve que l'Univers est réglé par les nombres comme la musique !

Dans La République, (mythe d'Er)

« Sur le haut de chaque cercle associé à une planète une Sirène fait entendre une note unique et l'ensemble fait harmonie »

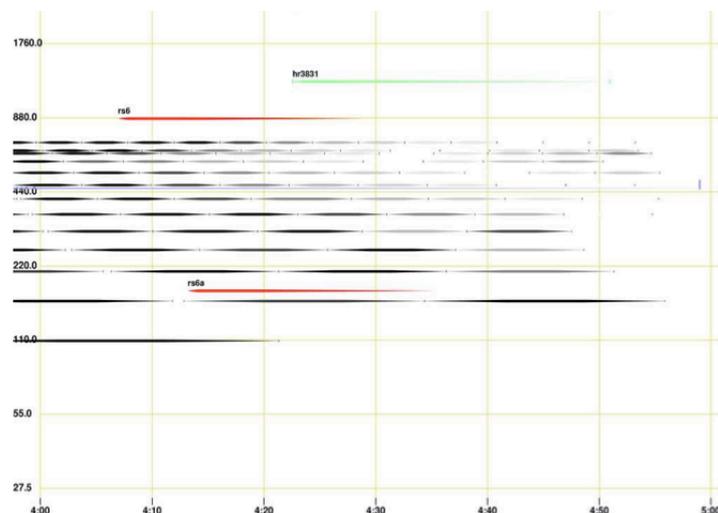
→ La musique des sphères et l'harmonie du monde

Les « sons » émis par les étoiles inspirent les musiciens modernes....

“Stellar music No.1” , par Jenö Keuler et Zoltan Kollath

Création musicale avec Différents instruments stellaires

La dynamique du son est représentée par les niveaux de gris
L'échelle verticale est en Hz



Merci de votre attention

Music of the spheres
A composition

Jenő Keuler, Zoltan Kollath:

Pure stellar sounds

Spectre d'étoiles de différents types

