

# Etudes Sismologiques des Planètes Géantes avec le FTS

Une nouvelle branche de l'astrophysique s'est ouverte avec la détection il y a 30 ans des oscillations acoustiques du Soleil, de ce qu'il est convenu d'appeler *oscillations de 5 minutes*. Les planètes géantes formées pour l'essentiel d'hydrogène et d'hélium ont des analogies avec la structure stellaire. Elles présentent une zone convective et doivent par conséquent être le siège d'oscillation de pression. Mais se pose un redoutable problème de détection pour la mise en évidence de ces oscillations tant planétaires que stellaires. D'après les études détaillées faites sur le Soleil, permises par sa brillance exceptionnelle, leur amplitude, en terme de déplacement radial est très faible. Par ailleurs le spectre en fréquence des oscillations de 5 minutes s'est révélé constitué par des millions de modes. Ce pose donc également un sévère problème de résolution temporelle.

## Méthodes de mesure en sismologie stellaire

Elles se divisent en deux familles, les méthodes photométriques et les méthodes spectroscopiques. Pour les premières, un photomètre à large bande spectrale enregistre avec une constante de temps n'excédant pas une minute les micro-fluctuations d'intensité correspondant aux variations de température de surface générées par les oscillations de pression. Les méthodes spectroscopiques les plus couramment utilisées sont basées sur la détection d'un signal Doppler à partir d'une ou plusieurs raies photosphériques, les oscillations de pression s'accompagnant d'un mouvement vertical de la matière. Les effets à mesurer sont très faibles. Dans le cas du Soleil l'amplitude Doppler dans chaque mode est au plus de 20 cm/s. La technique la plus répandue est celle dite de la résonance atomique utilisant une cuve à vapeur de sodium et qui fut développée en France à l'Observatoire de la Côte d'Azur (OCA) par Grec et Fossat (Astron. Astrophys. 55, 411, 1977). La lumière du Soleil ou d'une étoile qui possède la même raie du sodium passe à travers la cuve qui agit comme un filtre naturel très stable dont la transmission varie avec le déplacement Doppler des raies du doublet, placées dans le flanc des raies au repos.

La détection à l'OHP en Nov. 1987 d'un signal dans le domaine de fréquence attendu entre 0.5 et 2 mHz, au dessus du bruit, semblait indiquer un signal d'origine jovienne expliquable par des modes d'oscillation acoustique. Cela demandait confirmation par l'emploi d'une autre technique, si possible plus sensible. Jean Gay de l'OCA proposa pour cette observation le FTS du TCFH.

Pour l'enregistrement de l'interférogramme d'une source, le FTS comporte une mesure de la différence de marche référée à une longueur d'onde cohérente très stable (celle d'un laser stabilisé). Si le rapport signal-sur-bruit dans le spectre résultant le permet toutes les longueurs d'onde sont mesurées avec la même précision absolue que la référence. Le FTS est donc l'instrument de choix pour la mesure très précise des longueurs d'onde, donc entre autre de vitesses radiales.

Le FTS du CFH pouvait être employé sans modification pour cette application. En mode normal il balaye la différence de marche suivant une méthode dite pas-à-pas, c'est-à-dire consistant à se déplacer d'un pas très précisément proportionnel à la longueur d'onde de référence, à stationner pour intégrer le signal puis faire un autre pas de la même quantité et ainsi de suite pour échantillonner l'interférogramme. Dans l'application à la sismologie il s'agit de se rendre exactement à la différence de marche optimum, ce qui est

possible à 79 nm près (1/8ième de la longueur d'onde de référence) et à stationner, c'est-à-dire rester asservi sans interruption pendant toute une nuit et enregistrer le signal résultant, toutes opérations aisément faisables avec l'instrument. Seule une acquisition de données spécialisée permettant l'échantillonnage du signal dans ce mode était nécessaire. Elle fut réalisée par P. Antonelli et B. Mékarnia de l'OCA.

## Observations de Jupiter et Saturne

En Janvier 1990 le FTS fut mis pour la première fois pour 4 nuits dans ce mode pour l'observation sismologique de Jupiter, puis en Juillet pour 6 nuits pour celle de Saturne et 5 nuits en Janvier 1991 pour répéter celle de Jupiter. Les dates étaient choisies à chaque fois près de l'opposition pour obtenir la plus grande durée d'observation. Dans le travail préparatoire le domaine 1.1  $\mu\text{m}$  fut choisi car la bande  $3\nu_3$  du méthane est présente dans le spectre de Jupiter et de Saturne. C'est la seule bande assez régulière du méthane, non saturée, qui soit accessible. Un interférogramme enregistré précédemment dans le cadre d'un programme de spectroscopie sur Jupiter et Saturne servit à rechercher la différence de marche optimum. Elle fut choisie à  $d = 0.9771 \text{ cm}$  pour laquelle une quarantaine de raies du méthane sur la centaine identifiable dans le domaine se trouvent en phase. Les observations furent conduites en utilisant un diaphragme de 12 " sur la planète mais en modulant avec le secondaire vibrant suivant une direction parallèle au méridien de la planète. La commande du secondaire vibrant était générée par l'électronique d'acquisition de données à partir du signal de modulation interne au FTS à 156 Hz, à une fréquence 10 fois plus basse. L'intérêt de cette modulation est double. L'acquisition de données pouvait se faire séparément sur la plage Nord et sur la plage Sud permettant d'en faire la somme et la différence. Le signal différence élimine les modes d'ordre  $l + m$  pairs ( $l$  degré du mode,  $m$  son ordre azimuthal), ce qui simplifie le spectre de puissance final. Mais surtout pour ce signal, sur une période de modulation la position de pointage

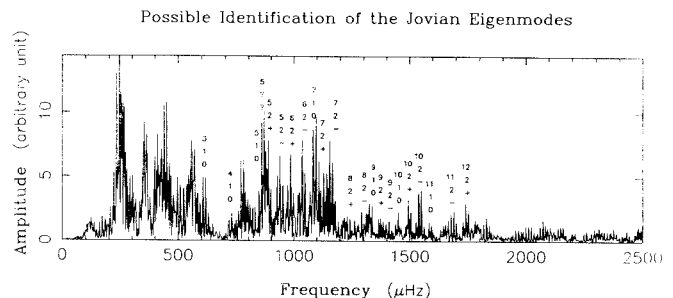


Figure 18: Identification de modes de pression dans le spectre de puissance du signal Doppler obtenu par l'observation de Jupiter avec le FTS de Janvier 1990. Chaque mode est caractérisé par 5 entiers, son ordre radial  $n$ , son degré  $l$  et son ordre azimuthal  $m$ . Des modes de degré  $l=1$  et  $l=2$  sont identifiés et  $m=-1, +1$  (notes - et +) et 0.

peut être considérée identique. Or à cause de la rotation très rapide des deux planètes, un décalage de 1" suivant l'équateur de Jupiter près du méridien central correspond à une variation de vitesse de 500 m/s, et de 1000 m/s sur Saturne, énorme par rapport aux amplitudes à mesurer. Les parallèles au méridien correspondant à des lignes de même vitesse apparente, ainsi se trouve éliminé le bruit de vitesse qui provient des erreurs de pointage et de turbulence. Cette modulation a fait défaut pour l'observation de Saturne, ce qui a beaucoup nuit à la qualité des données. Le signal somme permet une calibration du signal interférométrique en vitesse. Elle peut être obtenue de deux manières, soit en se déplaçant d'une quantité

connue suivant l'équateur de la planète ou en effectuant un pas en différence de marche. Ces deux calibrations fournissent le même résultat, à condition toutefois que la bande spectrale contienne le minimum de raies telluriques.

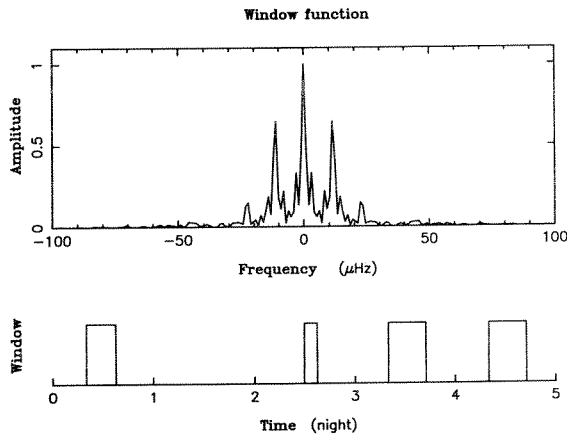


Figure 19: Fenêtres produites par les observations de Jupiter de Janvier 1991. La deuxième nuit a été perdue à cause de problèmes techniques, et une grande partie de la troisième à cause du mauvais temps. En haut, la fonction fenêtre avec tous ses pics secondaires par laquelle se trouve convolué le spectre des oscillations.

La réduction des données, effectuée à Nice par D. Mékarnia, consiste en la création d'un fichier unique de vitesse en fonction du temps dans lequel se trouvent raccordées toutes les séquences d'observation, après élimination des points aberrants et calibration. Le spectre en puissance de ce fichier final est le document (fig. 18) sur lequel il faut essayer d'identifier les nombreux pics présents, tâche ardue menée en priorité par B. Mosser (Meudon). L'alternance jour-nuit et les autres causes d'interruptions accidentelles forment une fonction faite de créneaux successifs qui multiplie l'enregistrement de vitesse. Le spectre des oscillations se trouve donc convolué par la transformation de Fourier en puissance de cette fonction (fig. 19). Ceci a pour effet de générer de nombreux pics parasites dans le spectre. D'autres méthodes, classiques en sismologie solaire aident à mener cette identification, en particulier l'établissement de *diagramme échelle* pour rechercher l'équidistance des pics. Dans le cas de Jupiter, cette équidistance qui correspond à un dédoublement des modes est une information importante. Elle résulte de la structure même de la planète avec un noyau central similaire à la Terre et l'enveloppe d'hydrogène et d'hélium. Elle peut être reliée à la fréquence caractéristique des oscillations. Une équidistance de 136  $\mu\text{Hz}$  avait été proposée d'après les observations avec la cellule de sodium. La même valeur a été mesurée sur les données FTS confirmant par une méthode complètement indépendante ce résultat. Une équidistance des modes comprise entre 150 et 190  $\mu\text{Hz}$  est prévue par les modèles de l'intérieur de Jupiter. Ceci implique une révision profonde de ces modèles qui est en cours de discussion car elle suppose de réexaminer les approximations faites avant de proposer des conséquences pour l'intérieur de Jupiter. D'autres résultats sont encore à tirer, par l'identification plus complète des modes. D'autres observations pourraient être nécessaires maintenant que la méthode est maîtrisée pour lever des ambiguïtés qui subsistent, et surtout améliorer la fonction d'appareil des spectres.

L'exploitation du FTS dans ce mode est à ses débuts. L'extension à la sismologie stellaire dont on a signalé l'intérêt astrophysique est une voie à explorer. Comparé aux autres méthodes depuis le sol l'interféromètre présente plusieurs avantages:

- une plus grande luminosité par ses propriétés multiplex qui permet d'utiliser l'information Doppler d'un grand nombre de raies,
- l'existence d'une calibration interne en vitesse
- l'absence de contraintes strictes sur les dates d'observation comme c'est le cas avec la cellule à sodium.

J.-P. Maillard

## $\delta$ Scuti Variables: Detection of High-degree Modes by Time Series Analysis

Theory predicts the presence of a multitude of modes and periods or  $\delta$  Scuti stars but these are rarely seen in photometric investigations. The sensitivity of high resolution spectroscopy to high-degree nonradial pulsations (NRP) is yielding some answers. Ultimately, the promise of multiperiodicity in  $\delta$  Scuti stars is in the art of stellar seismology to determine global properties of the stars. But more basic questions must be answered first. With more than half the stars in the  $\delta$  Scuti Instability Strip apparently constant photometrically, could many of these 'constant' stars be variable with only high-degree NRP or do these modes only occur in the presence of low-degree modes? Do rotation rate and spectral type play a role in mode determination? For  $\delta$  Scuti stars the factors which determine their modes of oscillation are still not well understood.

Classically, variability within the  $\delta$  Scuti Instability Strip has been determined photometrically, which is sensitive only to modes of low degree. However, using high-resolution (2.4Å/mm) Reticon spectra from CFHT, we found that *all* four rapidly rotating ( $v \sin i \approx 100 \text{ km s}^{-1}$ )  $\delta$  Scuti stars we observed (21 Mon,  $\kappa^2$  Boo,  $\nu$  UMa,  $\sigma^1$  Eri) displayed travelling features in their absorption lines (at 1% of the continuum) which were interpreted as high degree ( $|m| \geq 8$ ) nonradial pulsations (NRP) (Walker, *et al.*, Ap.J. 320, L139, 1987). I have extended their analysis by simulating the observed line profile variations with a geometrical NRP model which generates line profiles from A- and F-type synthetic spectra. The technique was successfully applied to the singly periodic star  $\kappa^2$  Boo and owes much of its success to the richness of the spectra. I identified both the low-degree mode (from radial velocity variations) and a high-degree mode ( $|m| = 12$ ) with a period of variation in the corotating frame of 1.7 hours which is consistent with pressure-driven oscillations.

The identification of multiple modes and periods is much more challenging and requires extensive data strings. Our spectroscopic observations of the three stars  $\epsilon$  Cep,  $\theta^2$  Tau, and  $\tau$  Peg at CFHT (October, 1990) confirmed the presence of the line profile variations we had already seen in low-resolution data. The time series of  $\epsilon$  Cep was interrupted by fog but we managed to obtain 5 and 7 hour data strings of  $\theta^2$  Tau and  $\tau$  Peg. Known to be multiperiodic from photometric data, the detection of additional high-degree modes is of particular interest in these stars. Additional observations were made on 97 Tau which proved to be variable and 14 Ari, a suspected (photometrically) constant star in the  $\delta$  Scuti instability strip.

The new data are being analyzed as two-dimensional Fourier transforms in the temporal and spatial (across the profile) domains to simultaneously identify frequencies and modes of oscillation. Rotation introduces wavelength shifts of the light from different positions on the stellar surface to produce a one-dimensional mapping of the surface in each line profile (an effect known as Doppler imaging). The space-time map of  $\theta^2$  Tau shown in Figure 20