

L'émergence de l'astrophysique dans les Alpes de Lumière

Christian Larcher
Membre du CLEA et de la SAF

Résumé : Avec ce dernier numéro de 2007, nous terminons l'évocation de l'Observatoire de Haute Provence, lieu de la première découverte d'une planète extrasolaire. Ce succès résulte en grande partie des spectrographes remarquables qui y sont réalisés. Ces spectrographes fournissent aussi aux astronomes un outil puissant pour l'étude de la sismologie stellaire. Mais l'OHP est aussi un centre de recherche en Géophysique où sont opérés des lâchers de ballons stratosphériques.

La vision d'ELODIE

ELODIE est le nom du spectrographe qui restera dans l'histoire de l'astronomie comme étant celui qui permit le premier, en 1995 et à l'Observatoire de Haute Provence, la détection d'une planète gravitant autour d'une étoile autre que le Soleil. Cette étoile (nommée 51 Peg) est située dans la constellation de Pégase à environ 40 années-lumière du Soleil. (1 a.l. = 10 000 milliards de km soit près de 3 millions de fois la distance entre la Terre et le Soleil) Voir, dans le n° 117 des Cahiers Clairaut (p. 17), un intéressant TP élèves intitulé : *Détection de planètes extrasolaires par la méthode des vitesses radiales*, avec la reproduction de documents originaux qui maintenant appartiennent à l'histoire.

Par la suite, le spectromètre **ELODIE** fut particulièrement prolifique : il permit la détection de 22 exoplanètes au total, toutes par la méthode dite des vitesses radiales, sauf une (HD 209458) obtenue par la méthode des transits. Il fonctionna pendant 12 ans (de 1994 à 2006) sur le télescope de 193 cm de l'OHP. Il vient de laisser sa place à son petit frère, qui est encore plus performant, il répond au joli nom de **SOPHIE** (Spectrographe pour l'Observation des PHénomènes sIsmologiques et Exoplanétaires) ; il se trouve que c'est aussi le prénom d'une des filles d'un Directeur de Recherche au CNRS travaillant à l'OHP !

« Le monde de SOPHIE »

Les spectromètres **ELODIE** et **SOPHIE** contiennent des réseaux qui permettent d'obtenir des spectres avec une très haute résolution.

Afin d'obtenir le maximum de précision et une très haute résolution, on cherche à étaler au maximum le spectre obtenu. Plus la résolution est grande, plus le spectre obtenu est détaillé, mais plus il devient faible en luminosité. On est donc amené à travailler sur des ordres d'interférences élevés (jusqu'à 39 pour **SOPHIE**) mais avec un réseau spécial appelé « réseau blazé ». Ces réseaux par réflexion sont gravés en dents de scie (on les appelle pour cette raison réseau échelle). Avec un tel réseau on peut concentrer, dans un ordre donné, un maximum de lumière pour une longueur d'onde spécifique, appelée « longueur d'onde de blaze ».

Une autre difficulté provient du fait que plus on travaille sur des ordres élevés plus les risques de chevauchement sont grands. Pour éviter ces chevauchements d'ordres, on utilise ce que l'on appelle une « dispersion croisée ». Il s'agit d'un prisme ou d'un réseau disposé de telle sorte que le décalage des ordres s'effectue perpendiculairement à la direction d'étalement du spectre ; en ce qui concerne **SOPHIE**, ce pré-disperseur est un prisme en flint (verre au plomb plus dispersif).

L'ensemble du dispositif permet l'enregistrement simultané de *tout le domaine spectral* sur une caméra CCD d'excellente qualité (4102×2048 pixels de 15 µm chacun) et ne contenant aucune ligne morte. Trouver un CCD d'une telle qualité nécessite de faire au préalable une sévère sélection.

Le **pouvoir de résolution** spectrale R dépend de la longueur d'onde λ de la radiation considérée. Il est donné par la relation $R = \lambda / \Delta\lambda$.

Pour **SOPHIE**, qui couvre le domaine visible du bleu (380 nm) au rouge (680 nm), ce pouvoir de

résolution est de l'ordre de 72 000 en mode « Haute Résolution ». En modifiant légèrement le dispositif, à l'aide d'une fente, il peut passer à 37 500 pour obtenir un « Haut Rendement lumineux », ce qui est particulièrement utile dans le cas des étoiles de faible intensité.

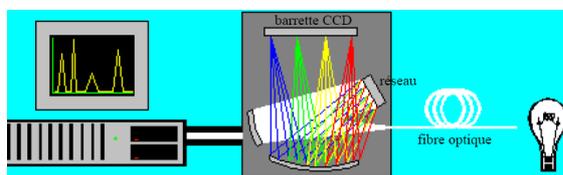
La **résolution** $\Delta\lambda$ se mesure par l'intervalle de longueur d'onde à la demi-hauteur d'une raie de calibration; cette résolution est constante sur tout le spectre quel que soit λ . La résolution spectrale de SOPHIE est 1,6 fois meilleure que celle d'ELODIE.

Le rapport S/B (signal/bruit) est le même que pour ELODIE. Le spectrographe est installé dans un caisson étanche en légère surpression pour éviter des variations d'indice de l'air. En effet, l'indice de l'air peut varier légèrement avec la pression atmosphérique pendant l'utilisation. Cette variation aurait des effets sensibles sur cet appareil de haute précision. Enfin, pour éviter les bruits parasites, le dispositif est refroidi à $-110\text{ }^\circ\text{C}$, (avec une stabilisation thermique à mieux que $0,01$ degré) à l'aide d'azote liquide.

La bonnette Cassegrain du télescope 193 cm est reliée au spectrographe par une fibre optique de diamètre 100 microns que l'on peut diaphragmer à 50 microns quand on travaille en « Haute Résolution ». Une autre fibre optique de 100 microns de diamètre permet de relier l'instrument à une lampe de calibration au Thorium. Chacune des fibres possède une ouverture de 3 secondes d'arc sur le ciel.

L'appareil permet actuellement d'obtenir une stabilité en vitesse radiale d'une étoile de l'ordre 3 à 4 m/s, ce qui est remarquable pour des étoiles aussi éloignées.

SOPHIE est le seul instrument français dédié aux exoplanètes. L'observation précise de l'évolution de profils de raie à haute résolution spectrale est déterminante pour la compréhension des phénomènes physiques de ces objets.



<http://web.ujf-grenoble.fr/PHY/intra/Organisation/CESIRE/OPT/DocsOptique/Notices/SpectroCCD.pdf>

Les principaux objectifs scientifiques de SOPHIE

Ils se déclinent selon trois grands axes :

- les planètes extrasolaires
- l'astérosismologie (voir plus loin)
- l'astrophysique stellaire

Cette dernière comprend l'étude fine de la dynamique des atmosphères stellaires, les mouvements de gaz, les ondes de pression, l'étude des pulsations stellaires et, depuis longtemps, la nature des éléments chimiques.

Un travail complémentaire : celui du couple SOPHIE - COROT

Le satellite **COROT** (COnvection RObtation et Transit planétaire) fut conçu par le CNES. Il pèse 600 kg, sa longueur est de 4 m. Il fut lancé le 27 décembre 2006 de la base de Baïkonour au Kazakhstan. Il orbite à 800 kilomètres de la Terre à la vitesse de 27 000 km/h.

Ce satellite photométrique est capable de sonder les étoiles et de donner des informations sur la taille de leur éventuel compagnon planétaire. Les infimes variations de mouvement de l'étoile renseignent sur la masse de son compagnon. Ces deux paramètres, rayon et masse, permettent d'évaluer la densité et d'extraire des informations sur la structure interne de la planète afin de déterminer s'il s'agit d'une planète semblable à la Terre.

COROT possède une caméra à 4 détecteurs CCD, sensibles à de très faibles variations de lumière des étoiles.

Jusqu'au 15 octobre 2007, le satellite **COROT** est orienté dans une direction proche du centre galactique. A cette date, il sera retourné de 180 degrés autour du plan de l'orbite pour se protéger de l'éblouissement du Soleil, pour commencer une nouvelle période de 6 mois.

Les premiers résultats obtenus concernent, en astérosismologie, deux étoiles variables de type Delta Scuti qui possèdent un très grand nombre de périodes de l'ordre de l'heure (un sujet d'agrégation de physique a porté sur une étude du satellite COROT).

La musique des astres : à chaque étoile une symphonie

Les étoiles vibrent et ces vibrations sont « visibles » à leur surface. L'enregistrement et l'étude de ces vibrations permettent de comprendre ce qui se passe à l'intérieur de l'étoile.

On parle d'ondes acoustiques (même si l'on n'entend rien) car ces ondes sont de même nature que les ondes sonores à la surface de la Terre. Le phénomène est d'origine mécanique, comme les ondes sonores d'un piano qui font vibrer l'air ambiant ; il correspond à des variations de pression du gaz stellaire.

Le Soleil, du fait de sa proximité, est l'étoile la plus facile à étudier, il se comporte comme une cavité résonnante. Il émet des vibrations qui sont analogues à celles d'un orchestre qui émettrait simultanément des millions de notes. Les fréquences de ces ondes sont cependant environ 100 000 fois plus petites (donc plus graves) que celles des ondes sonores qui sont comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz

Parmi ces fréquences, celle à 3 mHz (soit une oscillation toutes les 5 minutes) est plus excitée que les autres ; elle est donc nettement plus présente que les autres.

Il est bien sûr exclu de pouvoir entendre ces ondes acoustiques pour au moins deux raisons : d'une part à cause des valeurs très basses des fréquences, mais aussi parce qu'il n'existe pas de milieu vibratoire de propagation entre la Terre et le Soleil permettant cette transmission¹. Cependant, si l'on ne peut pas entendre ces vibrations, il est possible avec certains instruments « de les voir » en quelque sorte. En effet, grâce à l'effet Doppler, on peut déterminer, à chaque instant, les zones du Soleil qui s'approchent de nous (représentées en bleu) et celles qui s'éloignent (représentées en rouge) (Voir schéma).

Chaque étoile vibre d'une manière caractéristique, les modes de vibration ou comportement vibratoire permettent d'obtenir des informations concernant l'intérieur de l'étoile, de la même façon que l'étude des séismes terrestres donne des indications sur la nature de ce qui se trouve à l'intérieur de la Terre.

¹ En multipliant par un coefficient de l'ordre de 40 000 on obtient des ondes audibles mais graves, différentes pour chaque étoile.

Pour en savoir plus vous pouvez aller sur « Banque du savoir » en cliquant sur :

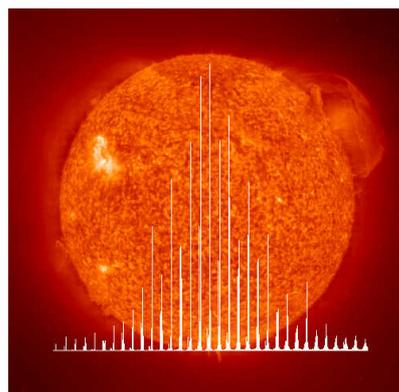
<http://www.savoirs.essonne.fr/dossiers/lunivers/astrophysique/article/type/0/intro/seismes-dans-les-etoiles/>

Pour comparer les vibrations sonores du Soleil (par rapport à une étoile géante rouge) cliquer sur la fiche intitulée : « Qu'est-ce qui fait briller le Soleil » ?

Eric Fossat (Université de Nice) écrit, dans un ouvrage du CNRS rédigé à l'occasion de l'année mondiale de la physique (p 226) :

« Supposez que vous écoutiez sans le voir un orchestre symphonique. Songez à la richesse d'information pratique que vous pouvez retirer de cette écoute, concernant l'orchestre lui-même, ses divers instruments et musiciens, leur nombre, leur distribution sur l'estrade, leurs éventuels petits défauts, leur accord plus ou moins parfait, et concernant la musique jouée, son compositeur, l'œuvre elle-même, en si bémol mineur ou en fa majeur, andante ou autre, etc. Vraiment beaucoup d'informations en trois minutes d'écoute. Remplacez maintenant l'orchestre par le Soleil, vos oreilles par un « héliosismographe », et votre culture musicale par un peu de connaissance de la transformation de Fourier et de la physique des étoiles. »

Ces vibrations changent selon l'âge et la composition de chaque astre. Par exemple : « Une géante résonne comme un tambour, une naine plutôt comme un cor de chasse ».



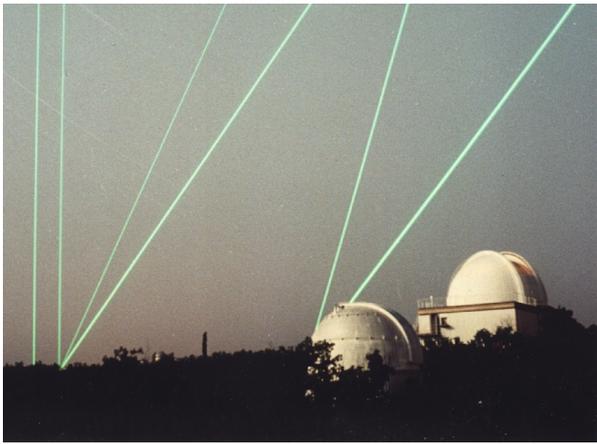
Cliché Dapnia

La station Géophysique de l'OHP

($\lambda = 43,935 \text{ N}$; $G = 5,7116 \text{ E}$; $h = 683 \text{ m}$)

Cette station d'observation, intégrée au réseau international NDACC (*Network for the Detection of Atmospheric Composition Change*) est chargée, entre autres, d'étudier les variations de la composition de l'atmosphère en général et de la couche d'ozone en particulier dans la troposphère et la stratosphère, c'est-à-dire en gros dans la couche d'air comprise entre 3 et 50 km à l'aide de LIDARS (*Light Detection And Ranging*)².

² LIDAR et RADAR sont des appareils complémentaires : le LIDAR permet de repérer les nuages fins et les aérosols tandis que les radars permettent d'analyser les nuages bas.



Le ciel de l'OHP illuminé de LASER (cliché OHP)

Cette étude est faite à l'aide d'ondes lumineuses émises par un LASER à impulsions (dont la durée est de l'ordre de la dizaine de nanosecondes). On dispose d'un top départ de chaque impulsion et on effectue un comptage des photons reçus par un télescope. Ces photons sont rétrodiffusés par les molécules gazeuses ou les aérosols et leur comptage est effectué en fonction du temps donc de l'altitude. Ceci permet d'établir des profils d'un paramètre physique (température) ou de concentration d'un constituant de l'atmosphère (ex : Ozone) en fonction de l'altitude.

La longueur d'onde du LASER utilisé dépend du paramètre mesuré (rayonnement dans le visible à 532 nm pour le LIDAR Température Aérosols, rayonnement dans l'ultraviolet pour les mesures relatives à l'Ozone). La fréquence de répétition est de 50 Hz.

En complément de ce dispositif, une fois par semaine, a lieu l'envoi d'un ballon muni d'une sonde météo (pression, température, humidité) et d'une sonde Ozone.

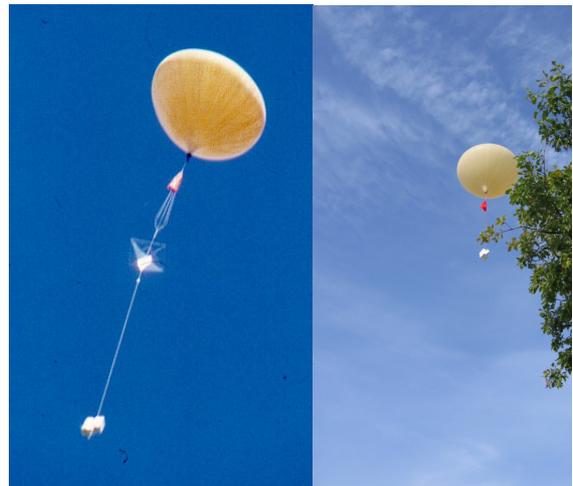
Ce ballon monte à une hauteur de l'ordre de 30 à 40 km en envoyant, en direct par radio, les mesures des différents paramètres, avant d'exploser.

Un LIDAR Doppler, également utilisé à l'OHP, est destiné à la mesure du profil vertical (vitesse, direction) des vents stratosphériques de 8 à 30km d'altitude.

Ces activités montrent l'importance de l'Observatoire de Haute Provence et lui donnent une jouvence nouvelle.



Lâcher de ballon à l'OHP par Guy Tournois, à gauche tenant un conteneur blanc - (cliché OHP)



(cliché OHP)

Remerciements : *Je remercie toutes les personnes de l'OHP qui m'ont transmis des informations et tout spécialement Monsieur Denis Gillet (Directeur de Recherche au CNRS et responsable scientifique de SOPHIE) ainsi que Monsieur Guy Tournois (responsable de la station LIDAR).*

Sitographie :

- http://www.obs-hp.fr/www/guide/sophie/SOPHIE_infos.html
- <http://www.insu.cnrs.fr/a1916,sophie-un-nouveau-decouvreur-d-exoplanetes.html>
- http://xserve.obs-hp.fr/Histoire_de_SOPHIE.html
- [http://209.85.135.104/search?q=cache:TpKmQxxGmQYJ:pleiades.unice.fr/iris/Library/docs/Tipe97-98\(Massena\)/document.htm](http://209.85.135.104/search?q=cache:TpKmQxxGmQYJ:pleiades.unice.fr/iris/Library/docs/Tipe97-98(Massena)/document.htm)
- http://www-dapnia.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=999
- http://www.obs-hp.fr/www/geo/geo_ohp.html

