

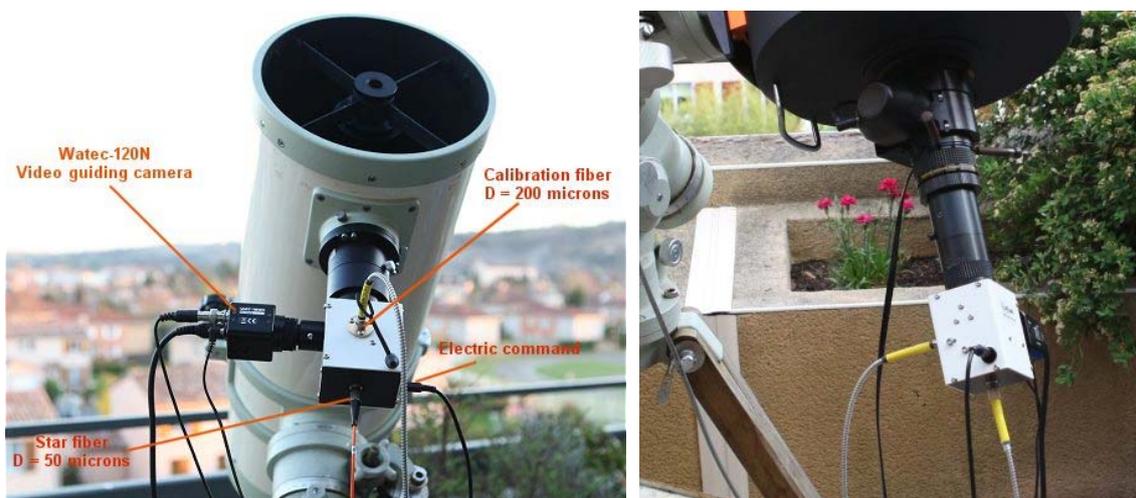
Observations avec le spectrographe eShel

Observing with the eShel spectrograph



Le spectrographe échelle eShel est le premier instrument commercial de cette catégorie accessible pour les amateurs (eShel est disponible auprès de la société [Shelyak Instruments](#)). Cette page expose des résultats d'observations visant à évaluer l'instrument. Ces quelques exemples montrent que eShel peut être un formidable outil de découverte de facettes méconnues du ciel et un outil de recherche et d'apprentissage de l'astrophysique à l'attention des amateurs et des instituts professionnels...

eShel echelle spectrograph is the first commercially available instrument of this type accessible to amateurs (eShel is manufactured and distributed by [Shelyak Instruments](#)). This article presents observing results done to evaluate the instrument. Those examples show that eShel can be a wonderful tool to discover unknown characteristic of the sky. It can also be a learning & research instrument for amateurs and professional observatories...



Le système comprend deux parties. L'une est un petit boîtier attaché au télescope dont la fonction est d'injecter le flux lumineux de l'objet étudié dans une fibre optique. L'autre est le spectrographe proprement dit, qui peut se situer jusqu'à 15 mètres du télescope. Cette configuration évite de surcharger le télescope et permet de disposer le spectrographe dans un lieu bien protégé des intempéries, tout en garantissant une stabilité mécanique et thermique favorisant des mesures précises. Dans la vue en haut à gauche on peut voir l'unité "d'injection fibre optique" au foyer d'un télescope de 0.2 mètre (Takahashi CN-212). Le rapport d'ouverture de $f/3.9$ de ce télescope est bien adapté pour recueillir un maximum de flux dans une fibre optique. Cependant, pour l'ensemble des résultats de cette page, j'ai utilisé un télescope du type Schmidt-Cassegrain Celestron 11 (diamètre de 0.28 m) auquel est ajouté un réducteur de focale Meade $f/6.3$. Un jeu de bague allonge complémentaire (voir la vue en haut à droite) permet d'accroître encore la luminosité à $f/5.9$.

The full equipment includes two parts. On is a small box attached to the telescope whose function is to inject star light into the optical fibre. The other one is the echelle spectrograph itself which can be meters away from the telescope. This configuration avoid to put too much heavy weight on the telescope and protect the spectrograph from the weather while keeping it in a mechanical and thermal stable environment - this is key for high precision measurement. Left picture shows the optical fibre injection unit at prime focus of a 0.2m telescope (Takahashi CN-212). The $f/3.9$ ratio is well adapted to collect maximum light into the optical fibre. But for all the results shown in this article, I have used a Schmidt-Cassegrain Celestron 11 (0.28m diameter) with a $f/6.3$ Meade reducer; additional extenders adapters (see right picture) allow to bring the f /ratio down to $f/5.9$.

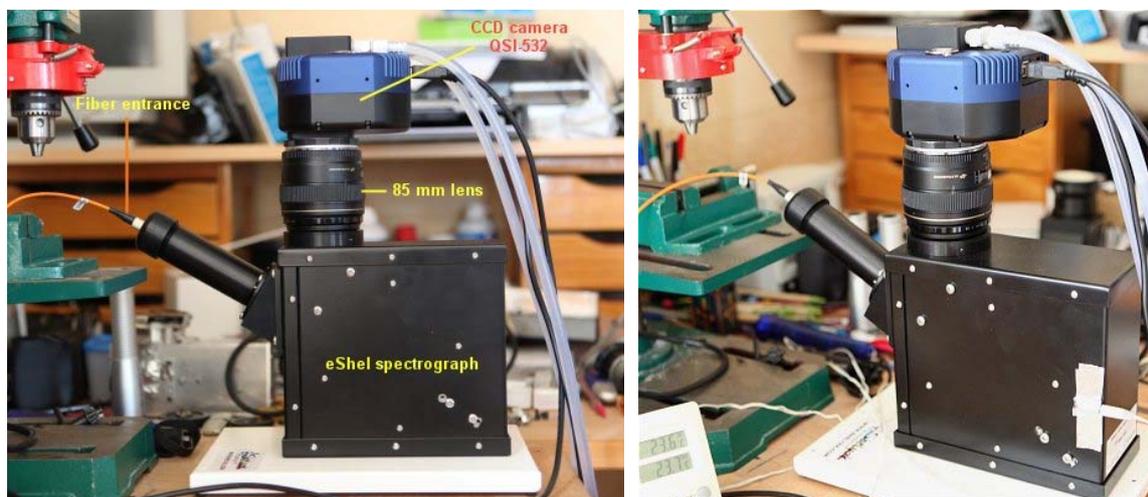
La fibre optique a un diamètre de 50 microns (0.050 mm). Le dispositif d'injection intègre une fonction de visée des objets, qui sert aussi au guidage du télescope durant les poses. Une caméra vidéo sensible [Watec-120N](#) est ici utilisée pour le centrage de l'objet et son guidage. Une seconde fibre de 200 microns de diamètre sert à l'étalonnage (elle véhicule par exemple la lumière d'une lampe produisant un spectre de raies en émission). Le passage du mode "observation" au mode "étalonnage" est commandé électriquement. Il est même programmable avec le logiciel [Audela](#) via une interface RS232 (cette fonction est très pratique pour enchaîner des séances d'acquisition répétitives sans risque d'erreur). L'observatoire de Castanet-Tolosan d'où sont pris les spectres est localisé non loin de la ville de Toulouse. La pollution lumineuse est peu gênante pour ce type d'observation, ce qui n'est pas le moindre des intérêts de la spectrographie (les observations astronomiques en ville sont totalement réhabilitées !).

The optical fibre has a core diameter of 50 microns (0.050 mm). The fibre injection unit includes a guiding port which allows telescope guiding during the exposure. A sensitive [Watec-120N](#) video camera is being used to center the object into the optical fibre and to guide. A second 200 microns optical fibre is used for calibration: it transports for example the light from a Thorium-Argon lamp whose emission spectrum will be used for spectra's wavelength calibration. Switching between observing (target) and calibration is done electronically. It can be controlled by Audela software and a RS232 interface. This automation is very useful when doing repeated observing sessions and avoiding mistakes. Spectra have been taken from Castanet-Tolosan observatory which is close to Toulouse large city. Light pollution is not a problem for this type of observation. This actually raises interest of observations from light polluted cities by using spectroscopic technics.



Un des aspects les plus fascinant du dispositif : après avoir parcouru des distances immenses, la lumière de l'étoile fini son parcours le long d'un parquet d'appartement, dans un mince cheveu de verre qui mène au spectrographe. Par respect pour l'étoile, on évite de marcher sur la fibre lors des déplacements dans le dit appartement !

One of the most fascinating aspect of the setup: after light-years of distance, star light ends its journey along the floor, in a very small glass path which goes into the spectrograph. For the soul of the star, we avoid to step on the fibre when walking around the place!



Le spectrographe eShel. A gauche, on aperçoit une sonde de température accolée au spectrographe pour surveiller la stabilité thermique. La caméra CCD est ici un modèle [QSI-532](#), équipée d'un CCD KAF-3200ME (pixels de 6,8 microns). Un dispositif complémentaire d'évacuation liquide de la chaleur produite par le système Peltier de la caméra est ajouté. Ceci permet d'accroître la performance de refroidissement du CCD de près de 10°C. L'usage d'un système liquide réfrigéré est même envisageable, ce qui serait quasi impossible si le spectrographe (et donc la caméra CCD) était accroché au télescope. Les caméras équipées de CCD de la famille KAF-1600 ou plus gros sont parfaitement adaptées à eShel. Il est aussi possible d'employer un boîtier photographique numérique pour acquérir les spectres (les spectres sont alors en vraies couleurs, ce qui peut être bénéfique lors d'une démarche pédagogique d'apprentissage de la spectrographie et de la physique des phénomènes lumineux - [voir ici des exemples](#)).

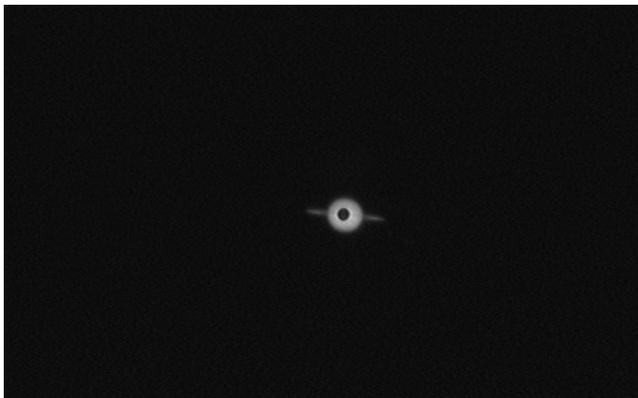
eShel spectrograph. Left: one can see the temperature sensor to monitor the thermal stability. CCD camera is a [QSI-532](#) with a KAF-3200ME (6.8 microns pixels). An additional but optional water-cooling system has been added; this lower the temperature by almost 10°C. An additional water cooling system could be added which would be almost impossible if the spectrograph (and the CCD camera) was mounted on the telescope. KAF-1600 based camera (and larger chip) are well adapted to eShel spectrograph. It is even possible to use a digital SLR to capture true colors which is very interesting for educational purposes ([see here for some examples](#)).



A gauche, l'unité d'étalonnage du spectrographe. Celle-ci inclue une lampe à cathode creuse Thorium-Argon offrant un étalonnage de qualité professionnelle des spectres et une grande simplicité d'exploitation (le logiciel Audela - voir plus loin - identifie automatiquement la position des raies du thorium-argon et pratique l'ensemble de l'étalonnage sans qu'une intervention humaine soit nécessaire). A droite, une opération intermédiaire est en cours, qui vise à établir la réponse instrumentale en s'aidant d'une simple lampe halogène (celle-ci produit un spectre continu, sans raies spectrales).

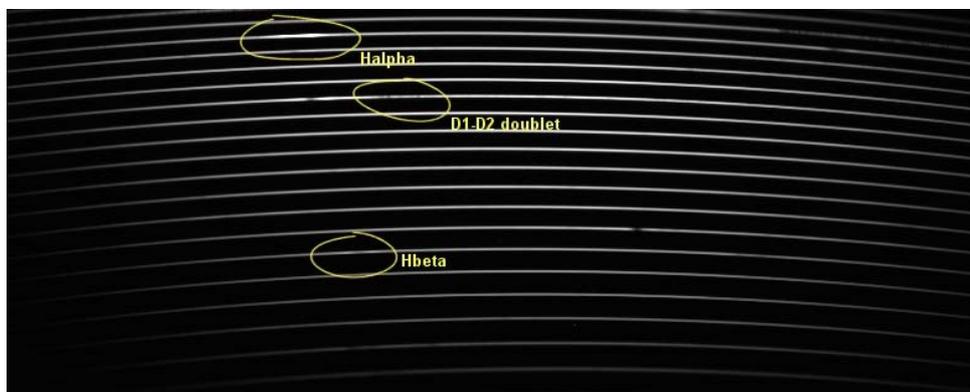
Left picture: calibration unit for the spectrograph. It includes a Thorium-Argon hollow cathode lamp which provides professional quality spectra's wavelength calibration and a very easy to use processing (Audela software - see below - identifies automatically Thorium-Argon lines and provided the overall calibration without manual intervention). Right: an intermediary operation to set instrument response with an halogen lamp (eShel calibration unit also includes LED lamps for flat continuous spectrum).





Images provenant de la caméra de guidage Watek-120N (le signal vidéo est numérisé par un grabber GrabBee-X, [voir ici](#)). Le trou de 50 microns matérialisant l'entrée de la fibre optique est parfaitement visible. La lumière qui est dirigée vers la caméra de guidage se réfléchit sur une lame de verre recouverte de chrome. C'est sur cette lame qu'un trou très net a été réalisé spécialement pour eShel par sérigraphie. La lumière qui traverse le trou (et qui donc n'est pas envoyée vers la caméra de guidage) est focalisée sur l'entrée de fibre optique via un système optique de haute précision. L'image observée avec la caméra de guidage est de bonne qualité, ce qui permet de réaliser un centrage intuitif des objets, de focaliser très précisément une étoile sur le trou et d'assurer un guidage confortable. L'intérêt du dispositif est sa fiabilité, sa légèreté, sa simplicité d'utilisation et la possibilité d'effectuer un suivi avec votre logiciel favori. On voit sur les exemples qu'il est possible d'acquérir le spectre d'une région très précise du champ image : par exemple le bord droit ou le bord gauche du disque de la planète Saturne pour mettre en évidence la rotation de l'astre par effet Doppler. D'une manière plus générale, l'unité fibre optique de eShel permet d'isoler avec précision un élément dont on cherche à faire le spectre, une caractéristique qui peut être utile dans des domaines autres que l'astronomie : biologie, contrôle industriel, optoélectronique, etc.

Images from the Watek-120N guiding camera (video signal is digitized with a GrabBee-X, [see details here](#)). 50 microns hole is well visible, showing the entrance of the optical fibre. Light from telescope is directed to the guiding camera by a mirror with chromium surface. Shelyak made a precise 50 micron hole on this chromium surface to let the star light enter the optical fibre through a very precise optical system. Image from the guiding camera is of very good quality allowing a very precise object centering, a very easy focus, and a very comfortable guiding method. The system is reliable, light, easy to use. Examples displayed here show it is possible to acquire a precisised area of an object: right or left edge of Saturn to measure rotational speed for exemple. In general, the eShel optical fibre unit allow to isolate a precise area of an object which we want to take the spectrum of. This can be used in other domains: biology, industrial control, optoelectronic, etc...



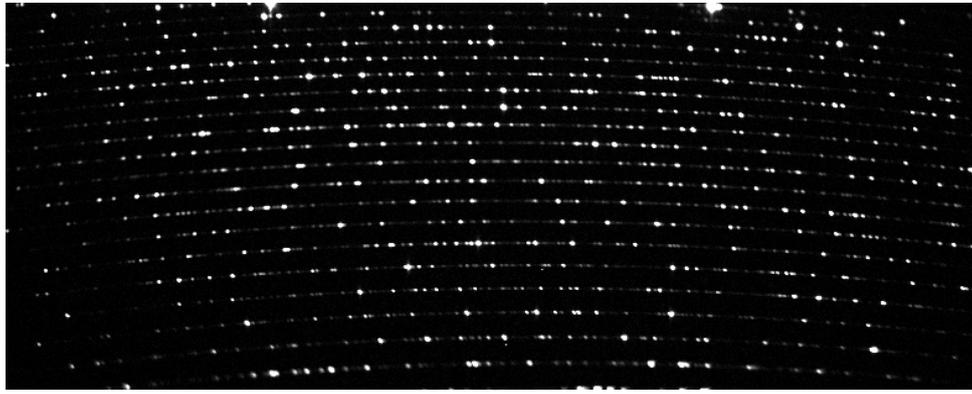
Ci-dessous, exemple d'image CCD exposée avec le spectrographe eShel. Il s'agit du spectre de l'étoile Beta Lyrae (Shelyak), pris le 2 mai 2009. Le spectre est découpé en segments par le dispositif optique du spectrographe. Chaque segment s'appelle un *ordre*. Ces ordres s'organisent comme les lignes d'un livre : en les mettant bout à bout après un traitement soigné, on peut lire le message spectral de l'étoile. Les ordres sont affectés un numéro. Celui de la raie Halpaha (Ha) a le numéro 34, puis en allant de haut en bas, le numéro d'ordre va croissant (en parcourant le spectre du rouge vers le bleu).

Above is an exemple of a CCD picture taken with the eShel. This is beta Lyrae (Shelyak!) star taken on May 2nd, 2009. The spectrum is split in multiple segments by the echelle optical system within the spectrograph. Each segment is called an 'order'. Those orders are like lines wrapped in a book: when put together, one can read the spectral message sent by the star. Each order has a number. Halpaha (Ha) is number 34, then going from top to bottom, order are going up (going from red to blue part of the spectrum).



L'identification automatique des ordres nécessite une spectre continu, ici le spectre d'une lampe à incandescence halogène (tungstène). Ce même spectre donne aussi accès à la fonction de *blaze*, qui indique comment l'instrument répond à la lumière le long d'un ordre donné.

Automatic identification of each orders require a continuous spectrum, here a halogen (Tungsten). This spectrum provides the 'blaze' function which indicates the instrument response along a specific order.

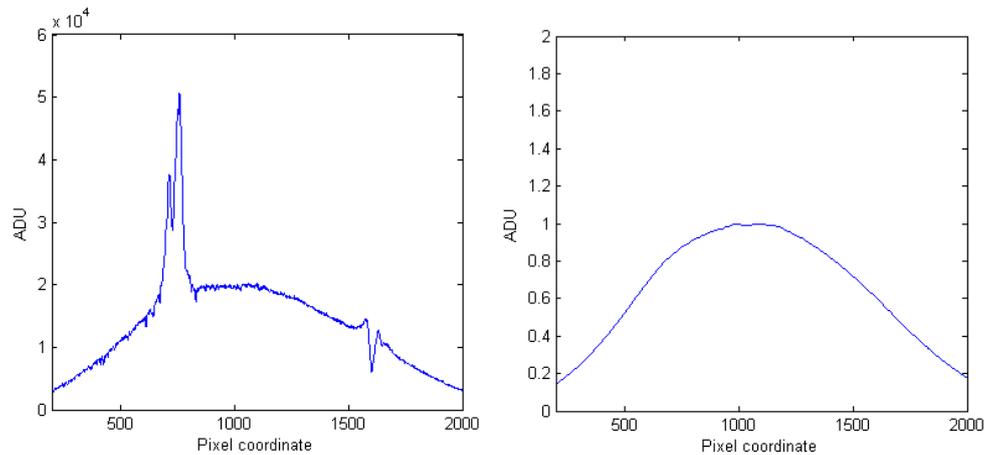


La lampe Thorium-Argon de eShel fourni un spectre de raies d'émission très riche, permettant de réaliser un étalonnage spectral de précision.

Thorium-Argon lamp of eShel calibration unit provides a high precision wavelength calibration.

Une étape critique du traitement consiste à identifier et corriger les distorsions géométriques qui affectent l'image du spectre échelle. Un algorithme précis a été spécialement mis au point pour cette opération. Ici l'ordre #34 (qui contient la raie Halpha) est soigneusement "redressé" géométriquement avant que soit extrait le profil spectral.

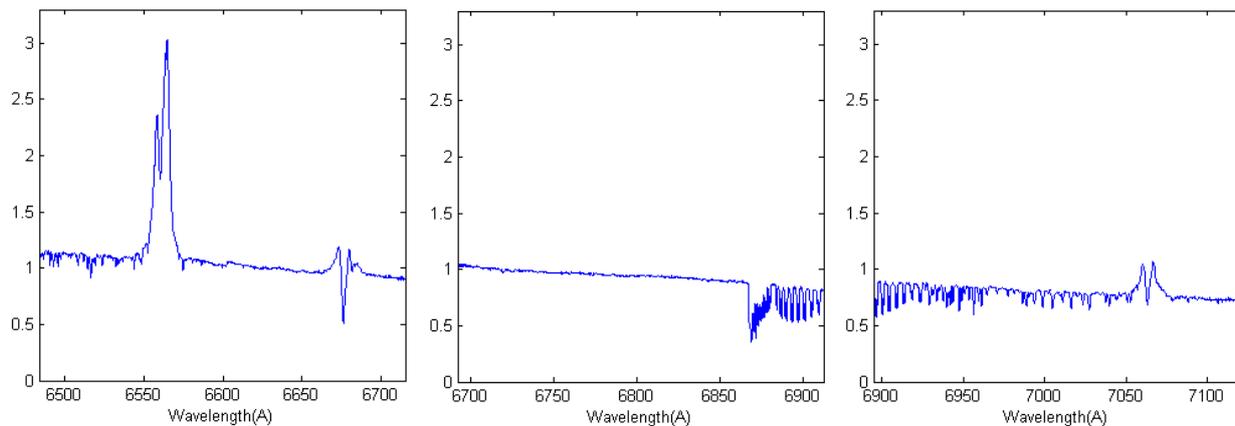
A critical step of the processing identify and geometrically correct the spectral image. A special algorithm has been coded for this step. Here is the order #34 (with Halpha) is straighten before being extracted.



A gauche, le profil spectral de l'ordre #34 de l'étoile Beta Lyre (pose de 300 secondes) extrait optimalement sur le plan du rapport signal sur bruit et après avoir retiré le signal de fond de l'image. La raie intense vers le numéro de pixel 650 est due à l'émission de l'hydrogène neutre (c'est la fameuse raie H α). A ce stade, le spectre n'est pas encore étalonné spectralement. A droite, la fonction de blaze de l'ordre correspondant (réponse de l'instrument le long d'un ordre donné).

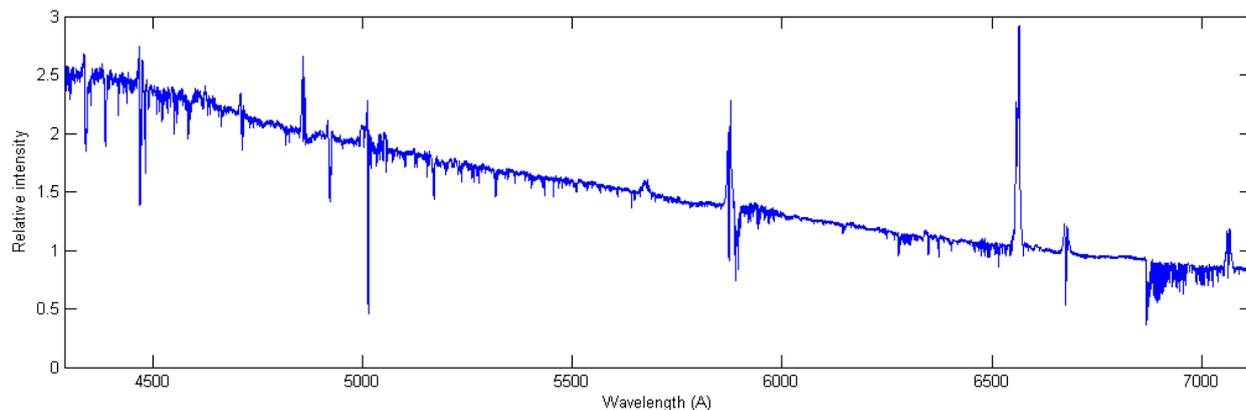
Left picture: order #34 profile (exposure is 300sec) is extracted with an noise optimized algorithm. The intense emission line is the famous Halpha line of neutral Hydrogen.

At this point, the profile is not yet calibrated in wavelength. Right picture: the 'blaze' function for the order #34 (instrumental response along this order)



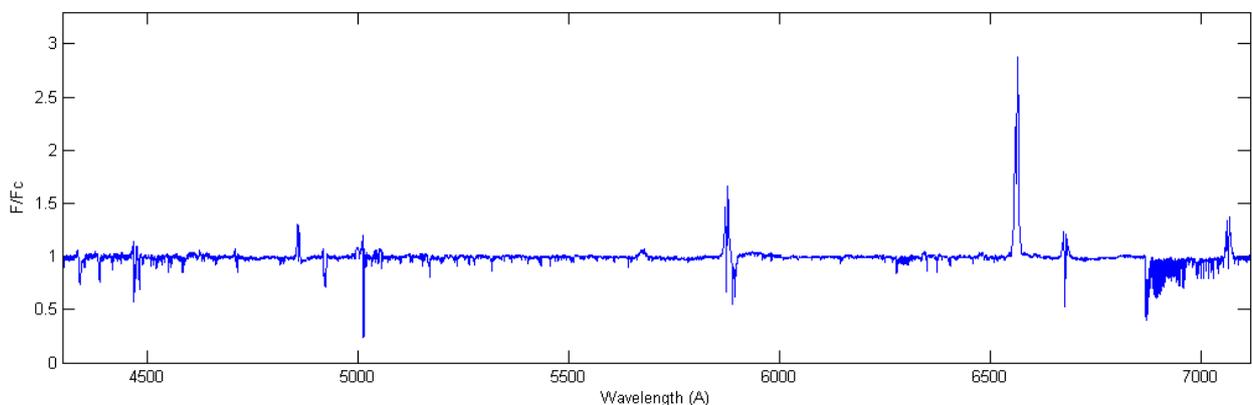
De gauche à droite, les ordres #32 à #34 après la correction de la fonction de blaze, l'étalonnage spectral et la combinaison optimale de 5 poses de 300 secondes (incluant la détection des rayons cosmiques). On remarque que les informations des ordres successifs se recouvrent légèrement.

Left to right: orders #32, #33 and #34 after blaze correction, wavelength calibration and optimal combination of five 300sec exposures (including cosmic rays detection). One can notice the orders have a slight overlap.



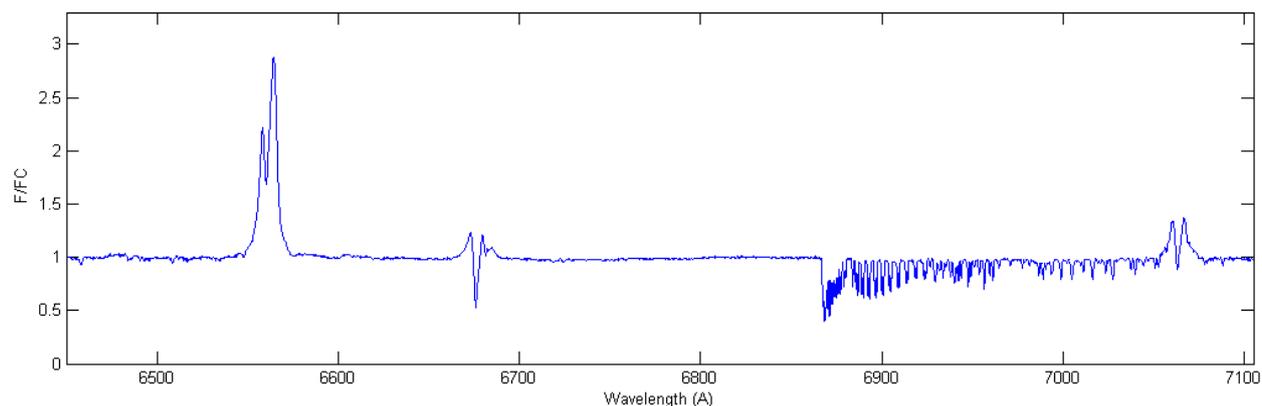
Optionnellement, les profils spectraux des ordres individuels peuvent être fusionnés pour constituer un spectre d'un seul tenant de l'objet. Ici les ordres #32 à #52 de Beta Lyre ont été mis bout à bout pour aboutir à un spectre de plus de 28000 points avec un échantillonnage spectral de 0,1 Å/point. Ici encore, l'opération est entièrement automatique et ne prend que quelques secondes. Le domaine spectral couvert va de 4300 à 7100 angstroms environ. On note que la quantité d'information délivrée par un spectrographe échelle peu être considérable !

Each order profiles can be merged together into a single spectrum. This is optional as some professional astronomers prefer to work on individual orders. Here, order #32 to #52 of beta Lyrae have been merged into a 28000 'elements' spectrum with a dispersion around 0.1 Å/element. Processing is fully automated and takes few seconds. Spectral domain covers between 4300 and 7100 angstroms. The level of information provided by the eShel echelle spectrograph is huge!



Après avoir divisé chaque point du spectre par une valeur estimée du continuum local (F_c), il devient possible de quantifier l'intensité relative des raies spectrales relativement à ce continuum. C'est ce que montre le spectre ci-dessus. En plus ici, les raies de la vapeur d'eau de l'atmosphère terrestre ont été éliminées sous [VisualSpec](#) (ces raies telluriques H2O polluent la région de la raie Halpha vers 6563 Å et la région de la raie de l'hélium vers 5820 Å).

After division by a continuum fit (F_c), it is possible to measure relative intensity of spectral lines to this continuum. This is what the spectrum above shows. Telluric lines (H2O from Earth atmosphere polluting domain around Halpha 6563Å and around Helium 5820Å) have been removed with [VisualSpec](#).



Agrandissement de la partie rouge du spectre échelle de Beta Lyre. L'ensemble de raies en absorption à partir de 6870 Å est provoqué par l'oxygène de notre propre atmosphère terrestre (molécule O2). Les raies qui mêlent absorption et émission à 6678 et 7065 Å sont en revanche la signature de l'hélium dans l'atmosphère de l'étoile. La raie de l'hydrogène est bien visible à 6563 Å.

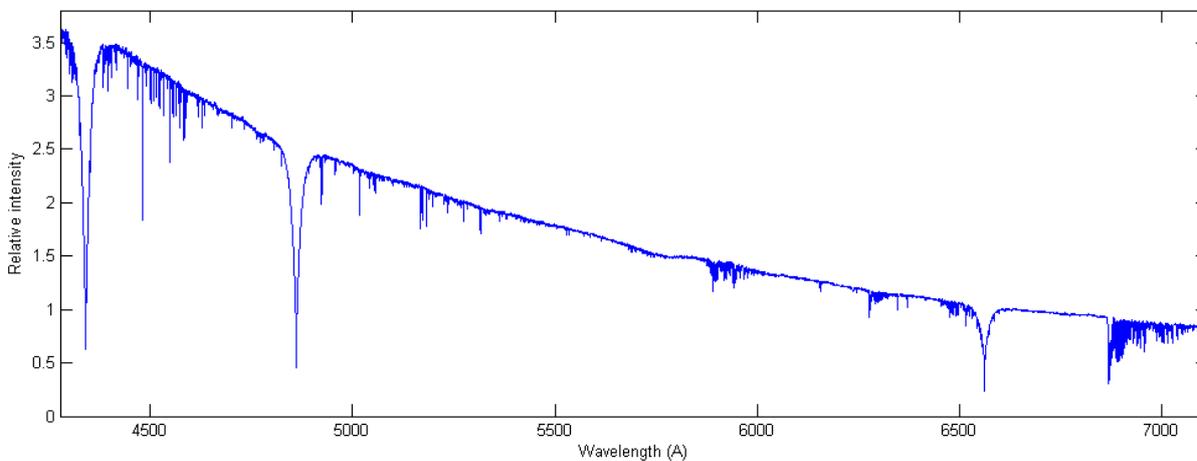
Zoom of the red part of the beta Lyrae echelle spectrum. Absorptions lines pattern around 6870Å is done by O2 molecules in Earth atmosphere. Lines with mix of emission and absorption around 6678Å and 7065Å are signature of Helium in the star atmosphere. Halpha Hydrogen line is also well visible at 6563Å.





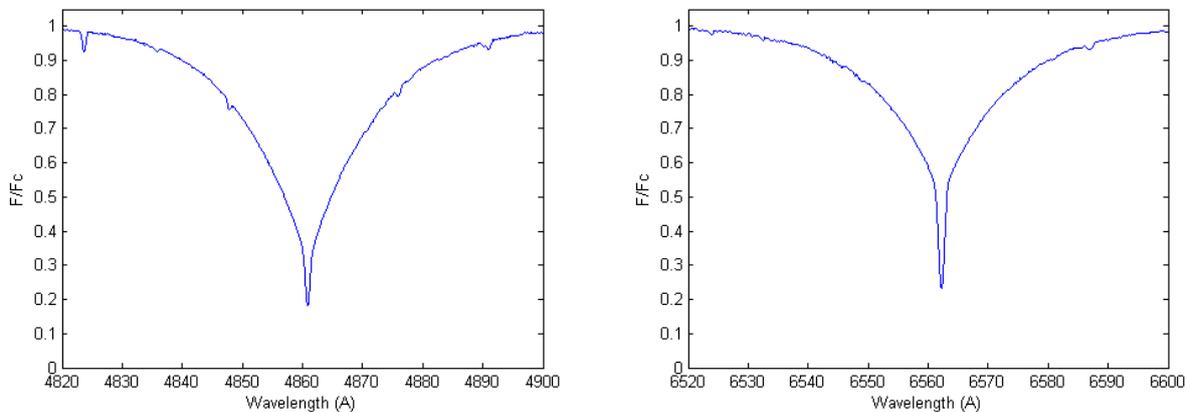
Un élément crucial du système eShel : le logiciel d'acquisition et de traitement, développé sous [Audela](#). Acquisition et traitement sont intimement liés, ce qui permet d'exploiter les spectres en quasi-temps réel avec leur acquisition. L'outil est très puissant. Il se charge de toutes les opérations complexes permettant d'aboutir à un spectre étalonné. Le traitement est fortement automatisé, l'intervention de l'opérateur est minimale (par exemple, le logiciel peu associer automatiquement les images à traiter et les données servant à les étalonner). Audela gère des scripts d'observation, pilote les fonctions du spectrographe (commutation des sources d'étalonnage), réalise l'autoguidage, etc. Audela est un logiciel libre et gratuit.

A critical element of the eShel system: the acquisition and processing software written on [Audela](#) platform. Both acquiring and processing spectra are tight together and allow almost real time spectra processing. The software is extremely powerful. It handle all complexe operations to obtain the calibrated and processed spectral profile. Manual intervention is minimized as the software automatically link calibration frames to a serie of spectra of objects. AudeLA eShel software manages observing scripts, drives the calibration unit and acquisition. AudeLA can also manage autoguiding and telescope pointing. AudeLA is a free open source software.



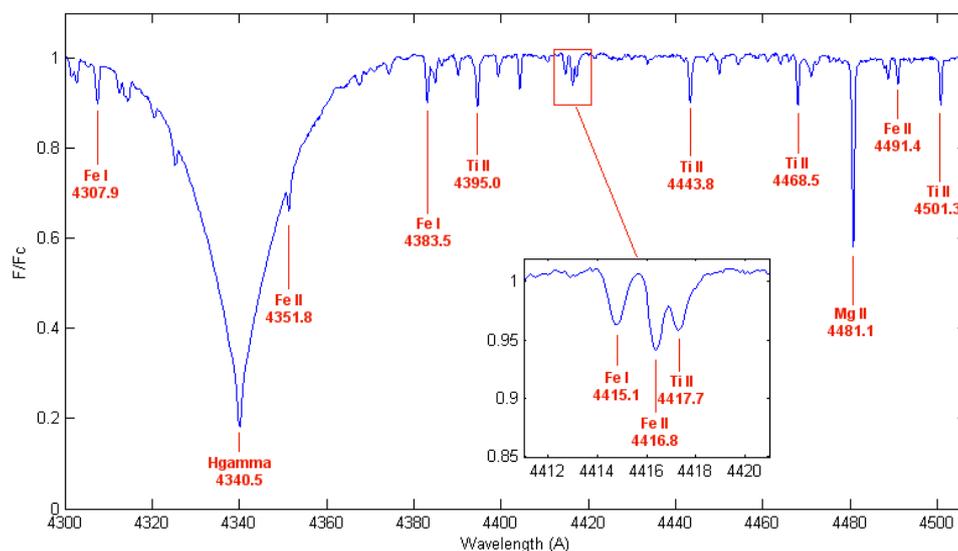
Spectre de l'étoile Vega (Alpha Lyrae) réalisé en fusionnant les ordres #32 à #52. Le domaine spectral couvert sans trou va de 4275 à 7115 angstroms. Ce spectre est le résultat de l'addition de 20 spectres échelles individuels exposés chacun 60 secondes sur le télescope de 0.28 m.

Vega (alpha Lyrae) spectrum, orders #32 to #52 merged together. Spectral domain is fully covered from 4275 to 7115 Angstroms. This spectrum is the sum of 20 individual 60sec exposures on a 0.28m telescope.



Ci-dessus, aperçu d'un détail du spectre de Véga au niveau des raies Hb (à gauche) et Ha (à droite). Les raies de l'hydrogène présentent un profil particulier, dit de *Voigt*, qui est le résultat de la convolution d'un profil *lorentzien* (qui influence plus particulièrement les ailes de la raie) et d'un profil *gaussien* (qui influence plus particulièrement le cœur de la raie). Le profil de Lorentz est sensible à la pression alors que le profil de Gauss caractérise la température. L'analyse de la forme des raies permet donc de trouver les paramètres fondamentaux des atmosphères stellaires (en prenant garde de tenir compte de l'élargissement des raies causé par l'instrument lui-même).

Above are zooms around Hb (left) et Ha (right). Hydrogen lines display a particular profile called 'Voigt' which is the combination of a 'Lorentzian' (mainly on the wings of the line) and a 'Gaussian' profiles. Lorentzian profile is more sensitive to pressure while Gaussian profile is more sensitive to temperature. Line profile analysis, taking into account the instrumental line broadening too, can help to go back to stellar atmosphere fundamental parameters.



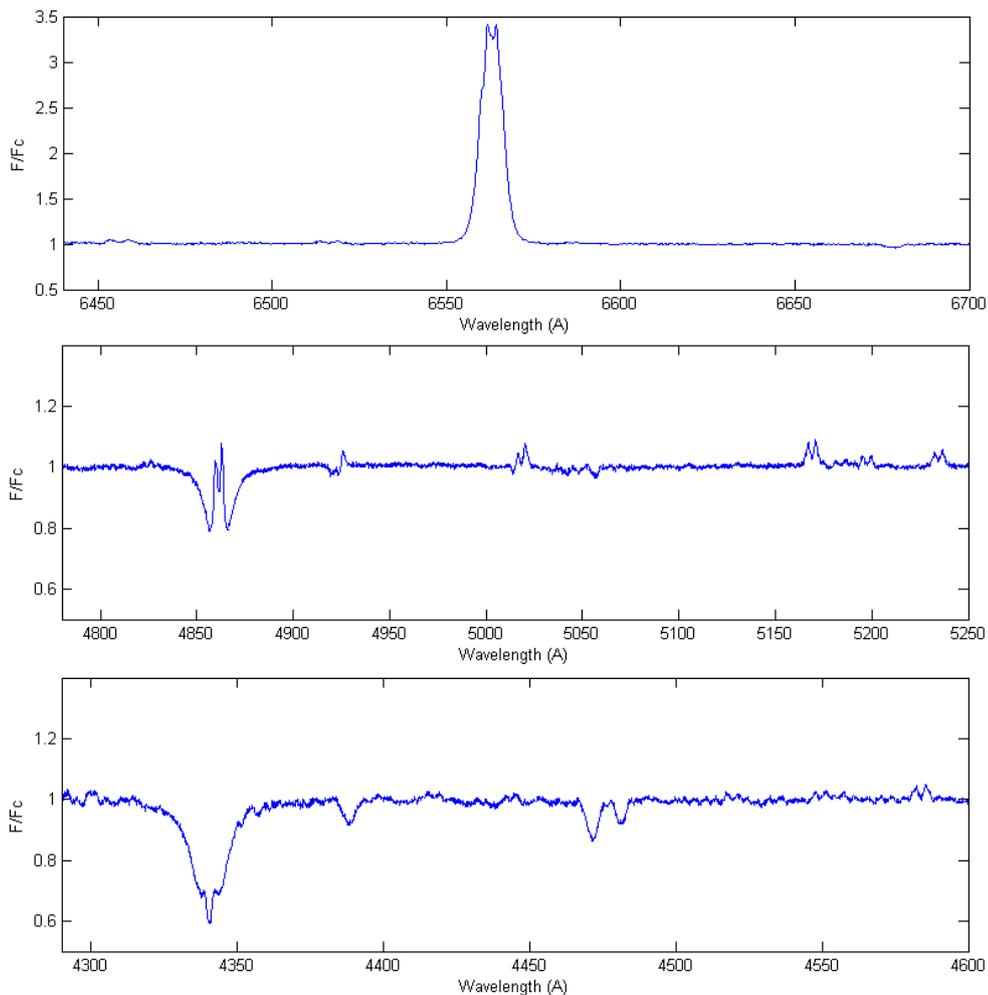
L'identification des raies spectrales dans la partie bleu du spectre de Véga. Cette analyse peut se faire en s'aidant de modèles numériques des atmosphères stellaires, par exemple en utilisant la [page interactive ici](#) (noter alors que Véga est une étoile de type spectral A0V). La mesure de la largeur des raies métalliques (c-a-d provenant d'éléments plus lourds que l'hélium), par nature étroites, donne accès à la vitesse de rotation de l'astre sur lui-même projetée suivant l'axe de visée ($V \cdot \sin i$). On remarque que les raies de l'hydrogène sont considérablement plus larges que les raies métalliques dans cette étoile et parfaitement résolues par l'instrument. Le pouvoir de résolution de eShel approche 12000 (c'est le rapport entre la longueur d'onde et la limite de séparation de deux raies de même intensité à cette même longueur d'onde). Par exemple à 4340 Å, le spectrographe est capable de distinguer des détails spectraux aussi fins que $4340/12000=0,36$ Å environ.

Identification of spectral lines in the blue part of Vega spectrum. This analysis can be done with help of numerical models of stellar photospheres, for example using the [interactive web page here](#) (note that Vega is of spectral type A0V). Metallic lines broadening (elements heavier than Helium; line profile very thin by nature), provides the rotational speed of the star around itself and projected on the line of sight ($v \cdot \sin i$). note that Hydrogen lines are much broader than metallic lines and well resolved by the eShel instrument. The power of resolution of the eShel spectrograph is around $R=12000$ (Power of resolution R is the division of the wavelength by the splitting limit of two lines of same intensity at that wavelength). For example, at 4340Å, the eShel spectrograph is capable to show details around $4340/12000=0.36$ Å.



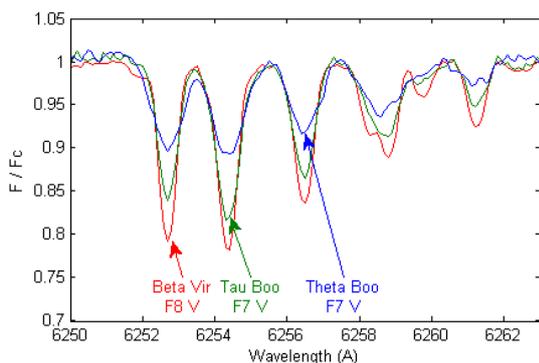
Un des intérêts majeurs des spectrographes échelle est de couvrir un très large domaine spectral en une seule prise d'image. Ceci permet d'effectuer une surveillance globale du spectre visible. A titre d'illustration, dans les spectres ci-dessous on montre successivement l'aspect des raies Ha (6563 Å), Hb (4861 Å) et Hg (4340 Å) de l'étoile de type Be Kappa Dra (temps de pose de 6 x 300 sec avec le télescope Celestron 11, le 18 avril 2009), des raies sensibles au comportement du nuage circumstellaire qui entoure l'étoile.

One of the major interest of the echelle spectrograph is to cover a large spectral domain in one exposure. This allows overall visible spectral domain monitoring. Spectra below show line profiles of Ha (6563 Å), Hb (4861 Å) and Hg (4340 Å) of the Be star kappa Dra (exposure time 6 x 300 sec with Celestron 11, April 18th, 2009).



L'émission de la raie de l'hydrogène neutre diminue clairement au fur et à mesure que l'on se propage vers le bleu. Par exemple, l'émission demeure perceptible dans la raie H γ , mais la forme classique d'une raie à émission prend nettement le dessus. Du côté rouge de la raie H β (extrait de spectre du centre) on aperçoit l'émission faible (en double pic) des raies du fer. On peut noter que le spectrographe eShel associé à un CCD KAF-3200ME permet d'enregistrer avec une assez bonne efficacité le spectre bleu profond dans les étoiles chaudes.

Neutral Hydrogen emission diminished as we go toward the blue part of the spectrum. For example, emission is still visible on H γ but the classical shape of an absorption line is taking over. On the red side of H β (spectrum at the center), one can see the faint emission in double peak of Iron. Note that eShel spectrograph with KAF-3200ME ccd chip allows recording of blue spectral domain of hot stars with a good efficiency.



Graphique de gauche. Les étoiles Beta Vir, Tau Boo et Theta Boo ont des types spectraux très proches (ce sont toutes trois des naines de type F). Pourtant l'aspect des raies dans la portion de spectre présentée est fort différent entre ces trois objets. L'écart provient de la vitesse de rotation des étoiles sur elle-même projetée suivant l'axe de visée ($v \sin i$). L'étoile Theta Boo est un rotateur rapide, et par voie de conséquence, les raies sont émoussées par l'élargissement Doppler consécutif. A l'inverse, l'étoile Beta Vir tourne lentement sur elle-même et les raies sont profondes. L'étoile Tau Boo montre une situation intermédiaire. Cette figure est inspirée d'une illustration du livre de David F. Gray, *Stellar Photosphere*, 3ème édition, page 469. On verra à la fin de cette page que l'étoile Tau Boo réserve une autre surprise...

Spectres acquis avec eShel et le SCT 0.28 m. Temps de pose de 4x600 sec. pour Beta Vir, de 5x300 sec. pour Tau Boo et de 4 x 300 sec. pour Theta Boo.

Graph above: beta Vir, tau Boo and theta Boo have very similar spectral types (all are dwarf F-type stars). Still, line profiles are different for those three stars. The differences come from the rotational speed of the stars around themselves projected on the line of sight ($v \sin i$). Theta Boo is a fast rotator and absorption lines are broadened due to Doppler effect. Beta vir on the other side is a slow rotator (and/or line of sight is on the rotational axis) and display narrow lines. Tau Boo is an intermediate one. This figure is inspired by David F. Gray "stellar photosphere" book, 3rd edition page 469. We will see that tau Boo is actually an even more interesting star...

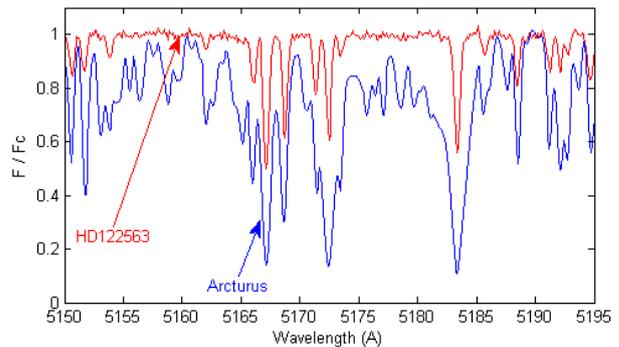
Spectra taken with eShel spectrograph and a 0.28m telescope. Exposure time 4x600sec for beta Vir, 5x300sec for tau Boo and 4x300sec for theta Boo.



HD122563 fait partie de la catégorie des étoiles dites à faible métallicité. Ces objets sont rares et situés pour l'essentiel dans le halo de la Galaxie. Une faible métallicité caractérise un objet formé dans un milieu peu enrichi en éléments lourds par des générations précédentes d'étoiles. Ces éléments lourds proviennent de la transmutation par nucléosynthèse d'éléments plus légers. Au fil du temps des étoiles vieilles les rejette dans le milieu interstellaire. Les nouvelles générations d'étoiles qui se forment à partir de cette matière monteront une abondance en métaux plus élevés (en astrophysique on appelle métal tout élément chimique plus lourd que l'hélium).

La faible métallicité de HD122563 indique donc que l'on est en présence d'une vieille étoile, dite de Population II, faisant partie des premières générations stellaires de notre Galaxie. Il s'agit d'une étoile géante rouge de magnitude $V = 6.2$, de type spectral noté F8IV sur SIMBAD (mais sa couleur est plus conforme avec le type K1III). Le graphique à droite montre en rouge le spectre de HD122563 au voisinage du triplet du magnésium, comparé au spectre de l'étoile Arcturus (en bleu). La faible intensité des raies métalliques dans le spectre de HD122563 est le signe de la faible abondance de ces éléments dans l'atmosphère de l'étoile. Cette figure est inspirée d'une illustration du livre de David F. Gray, Stellar Photosphere, 3eme édition, page 408.

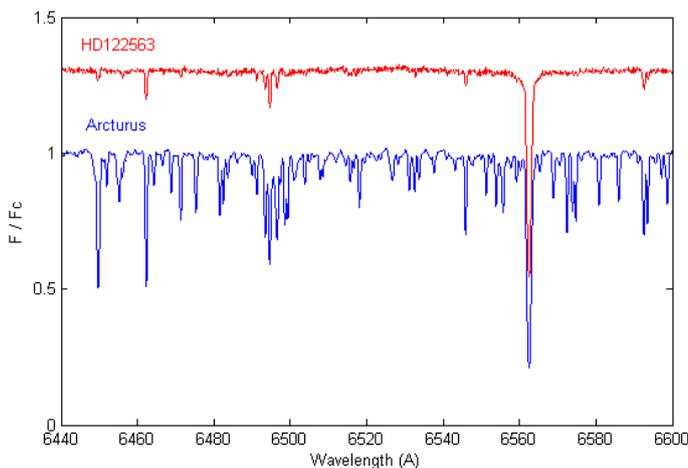
Temps de pose de 8x600 sec pour HD122563 et de 9x30 sec. pour Arcturus.



HD122563 is a low metallicity star. Those objects are very rare and mainly located in our galaxy halo. Low metallicity is an indication of a star born in an environment poor in metal (elements heavier than Helium). Those heavy elements come from nucleosynthesis of multiple generations of stars. As time goes by, stars increase the number of metals in space when dying. Newer generation stars use those elements and display more and more heavy elements in their composition.

Low metallicity of HD122563 is an indication that this is an old star, called 'population II', among the early generation of our galaxy. This is a red giant of magnitude $V=6.2$ and F8IV spectral type in Simbad (but color is more of a K1III type). The graph above shows in red the HD122563 spectrum around Magnesium triplet compared to Arcturus (in blue). Low intensity of HD122563 spectral lines is an indication of low metallicity in this star atmosphere. Figure inspired by David F. Gray 'stellar photosphere', 3rd edition page 408.

Exposure time of 8x600sec for HD122563 and 9x30 sec for Arcturus.



Comparaison des spectres de HD122563 et de Arcturus (Alpha Boo) sur un domaine spectral plus conséquent que ci-avant. La raie Halpha à 6563 Å a une intensité équivalente dans les deux spectres alors que les raies métalliques (pour l'essentiel du fer) sont considérablement moins intenses dans le spectre de HD122563. Pourtant les types spectraux de ces deux étoiles sont assez proches. Comme on l'a vu, la différence vient du fait que Arcturus est une étoile population I, qui regroupe les astres qui peuplent le disque de notre Galaxie et qui naissent à partir d'une matière interstellaire riche en métaux, alors que HD122563 est une vieille étoile de population II, navigant dans le halot de la Galaxie. Le décalage vertical de deux profils spectraux est artificiel : il est pratiqué pour améliorer la lisibilité.

On mesure la métallicité comparée entre une étoile et le Soleil d'un élément chimique A par rapport à un autre éléments chimique B à partir du paramètre $[A/B]$, tel que :

$$[A/B] = \log(N_A/N_B)_{\text{étoile}} - \log(N_A/N_B)_{\text{Soleil}}$$

avec N_A et N_B respectivement la densité d'atomes A et B.

Dans le cas de l'étoile HD122563 nous avons $[Fe/H] = -2.63$ alors que pour Arcturus nous avons $[Fe/H] = -0.55$. Les plus faibles métallicités d'étoiles rencontrées dans notre Galaxie sont de l'ordre de $[Fe/H] = -4$ à -5 .

Above: comparison of HD122563 and Arcturus (alpha Boo) in a larger spectral domain. Halpha 6563Å has a very similar intensity while metallic lines (mainly Iron) are much less intense in HD122563 spectrum. Spectral type of those two stars are similar; difference comes from the fact that HD122563 is a population II star, much earlier generation than Arcturus. Spectral shift of the two spectra is artificial to better display the two profiles.

We can measure the metallicity between the star ('étoile') and the Sun ('Soleil') and between two elements A & B:

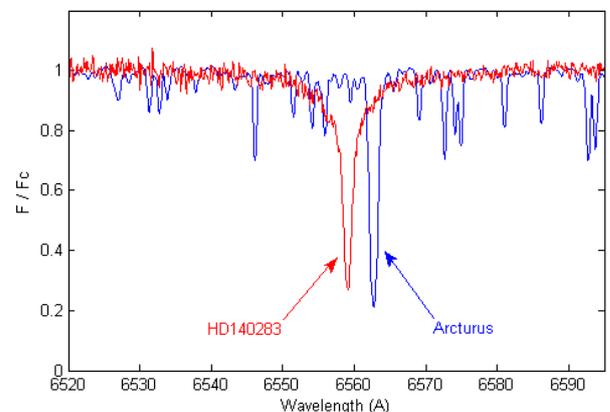
$$[A/B] = \log(N_A/N_B)_{\text{étoile}} - \log(N_A/N_B)_{\text{Soleil}}$$

with 'Na' and 'Nb' the atom A & B densities. Here, we measure $[Fe/H] = -2.63$ for HD122563 while we measure $[Fe/H] = -0.55$ for Arcturus. The lowest $[Fe/H]$ metallicity measured in our galaxy is around -4 & -5 .

L'étoile HD140283 a aussi une faible métallicité ($[Fe/H] = -2.41$). Elle est plus faible que HD122563 ($V=7.2$) et aussi plus chaude ($T_{\text{eff}} = 4520$ pour HD122563, $T_{\text{eff}} = 5700$ K pour HD140283). Dans le graphique à droite, le spectre de HD140283 est comparé à celui de Arcturus autour de la raie H α . On remarque immédiatement un fort décalage spectral (la correction de la vitesse héliocentrique est déjà appliquée à ces spectres). La vitesse radiale mesurée sur le spectre de Arcturus est d'environ -5 km/s alors qu'elle est mesurée à $-170,7$ km/s sur HD140283 en utilisant uniquement la position de la raie Halpha (on trouve dans la littérature la valeur de $-170,4$ km/s, l'accord est excellent). HD140283 s'avère, en plus d'avoir une faible métallicité, être un objet du halo galactique animé d'un mouvement assez rapide.

Le temps de pose est de 6 x 600 secondes pour le spectre de HD140283.

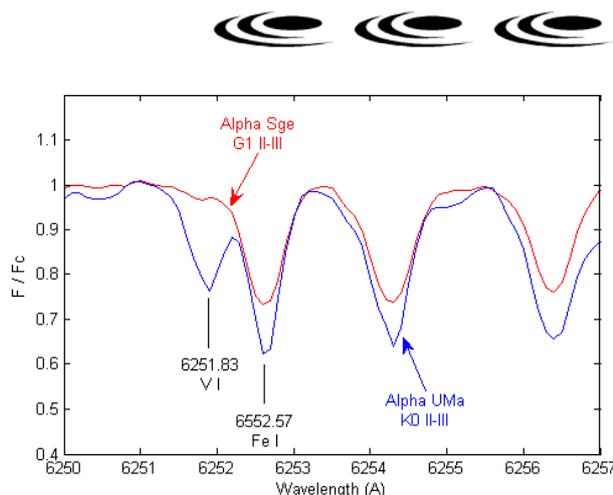
Quelques autres étoiles présentant une faible métallicité : HD108317 ($[Fe/H] = -2.36$), HD216143 ($[Fe/H] = -2.15$), HD221170 ($[Fe/H] = -2.10$).



HD140283 star has also a low metallicity ($[Fe/H] = -2.41$). It is fainter ($V=7,2$) than HD122563 but also hotter ($T_{\text{eff}} = 4520\text{K}$ for HD122563, $T_{\text{eff}} = 5700\text{K}$ for HD140283). Above graph compare HD140283 and Arcturus spectra around Halpha. Heliocentric correction (movement of Earth around our Sun) has been applied but we note a strong Doppler shift due to radial velocities. Arcturus displays a radial velocity around -5 km/s while HD140283 displays a $RV = -170,7$ km/s only measuring the Halpha line center. Catalog show also a Radial Velocity of $-170,4$ km/s, match with our measurement is excellent). HD140283 not only has a low metallicity but appears to be an object from our galactic halo with a high speed movement (projected to our line of sight).

Exposure is 6 x 600 secondes for HD140283.

Other stars with low metallicity: HD108317 ([Fe / H] = -2.36), HD216143 ([Fe / H] = -2.15), HD221170 ([Fe / H] = -2.10).

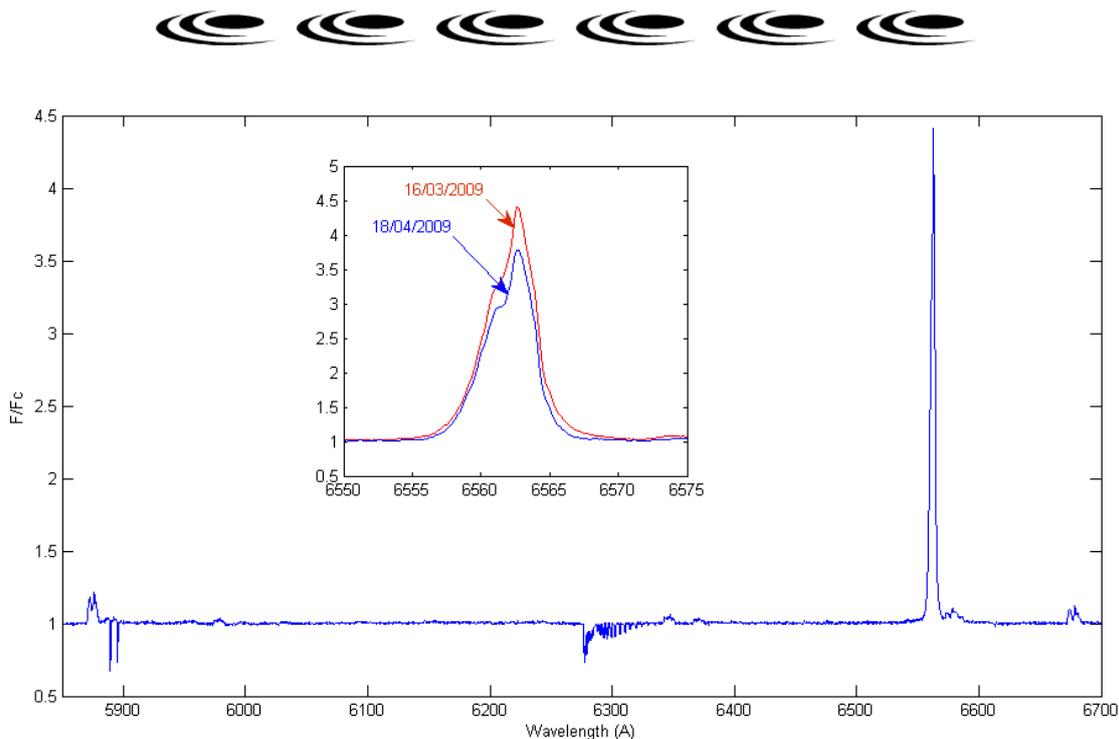


La sensibilité des raies métalliques à la température peut varier fortement suivant l'élément chimique considéré. Le rapport entre l'intensité de ces raies devient alors un très bon indicateur de la température de la photosphère. A titre d'exemple, la figure à gauche montre à quel point le rapport d'intensité entre la raie du vanadium à 6251.8 Å et la raie du fer à 6552.6 Å peu changer suivant l'étoile. Cette variation s'explique ici uniquement par la différence de température de la photosphère des deux astres : l'étoile est d'autant plus froide que le rapport de la profondeur de la raie à 6251.8 et de la raie à 6552.6 augmente. Ainsi, la température effective de Alpha Sge est de 5540 K alors que celle de Alpha UMa est de 4660 K. Cette technique de rapport de raie est un thermomètre très précis, permettant de relever la température à quelques degrés près dans les cas favorables, et ce d'autant plus que l'aspect des raies en question dans les étoiles de type solaire est insensible à la pression. Cette figure est inspirée d'une illustration du livre de David F. Gray, Stellar Photosphères, 3ème édition, page 358.

Alpha UMa et Alpha Sge ont été observé avec un temps de pose respectif de 5x150 s et 6x300 s avec un spectrographe eShel et le télescope SCT de 11 pouces (D=0.28 m).

Above: sensitivity of metallic lines to the temperature can vary a lot depending on the element. The ratio between the intensity of those lines can be an excellent thermometer of the star photosphere effective temperature. Graph shows the ratio between Vanadium (6251.8 Å) and Iron (6552.6 Å) line intensities. This difference is explained by the different photosphere temperature. Star photosphere temperature is cooler as the ratio Vanadium(6251.8)/Iron(6552.6) increases. Effective temperature of alpha Sge is 5540K while alpha UMa is 4660K. This technic of line ratio is very powerful and precise thermometer; even more on solar spectral type whose line profile is less sensitive to pressure. Figure inspired by David F. Gray 'stellar photosphere', 3rd edition page 358.

Alpha UMa and alpha Sge have been recorded with an eShel echelle spectrograph and a 0.28m telescope with exposure time of 5x150sec and 6x300sec.



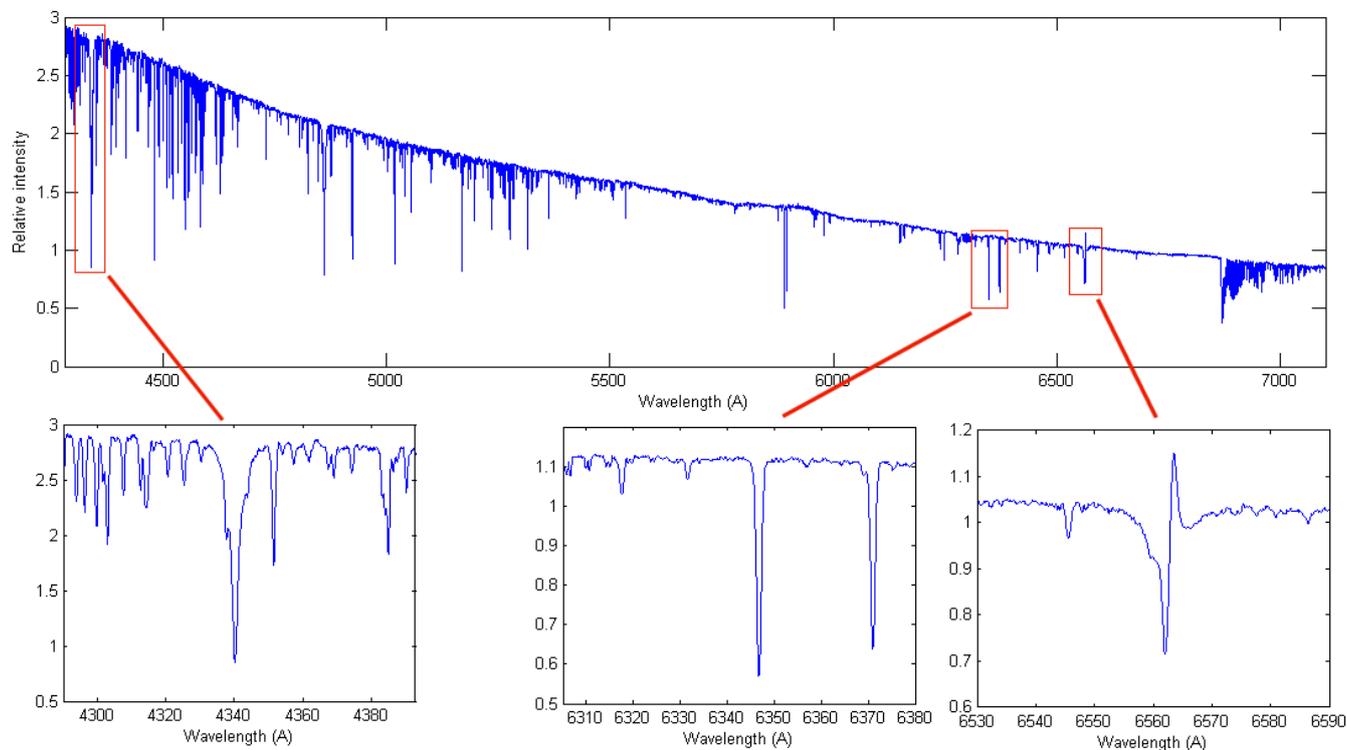
Ci-dessus, une portion du spectre échelle de l'étoile Delta Sco (acquis le 16 mars 2009, temps de pose de 10 x 120 sec. avec eShel). Cette étoile brillante et active, de type Be, fait l'objet d'une surveillance étroite par la communauté professionnelle et amateur. En médaillon, l'évolution constatée de la raie H α sur une période de 1 mois. Spectrographe eShel, caméra QSI-532, télescope Celestron 11. Pour plus de détails sur la collaboration professionnel/amateur sur la thématique des étoiles Be, consulter ArasBeam : <http://arasbeam.free.fr/?lang=en>, la base BeSS : http://basebe.obspm.fr/basebe/Accueil.php?flag_lang=en, et le site ARAS : <http://astrourf.com/aras/>.

Above is a portion of delta Sco (taken on March 16th, 2009; exposure time is 10x120sec with eShel spectrograph, 0.28m Celestron 11 telescope and QSI532 ccd camera). This bright star is an active Be star whose monitoring by professional and amateur community is required. For more details on professional/amateur collaboration on Be star, check ArasBeam (<http://arasbeam.free.fr/?lang=en>), BeSS Be Star Spectra database (http://basebe.obspm.fr/basebe/Accueil.php?flag_lang=en) and ARAS (<http://astrourf.com/aras/>) web site.

L'étoile Deneb (Alpha Cyg) est le prototype d'une classe d'étoiles supergéantes variables photométriquement et spectroscopiquement. Cette étoile est par ailleurs bien caractéristique de cette famille d'astres très brillants, accessibles avec un modeste télescope, et présentant un réel intérêt astrophysique (voir par exemple le papier récent de A. Gautschi, Astronomy Astrophysics, 498, 273, 2009). Le spectre a un caractère variable, signe que l'étoile est instable. Un autre exemplaire de ce type d'objet est Beta Orion (Rigel). La période de rotation, le vent stellaire et les pulsations sont les possibles responsables des variabilités multipériodiques observées. Mais le détail des mécanismes induisant les instabilités demeure mal compris encore aujourd'hui. En particulier, la signature des modes de vibrations doit être précisée par des observations spectroscopiques continues sur de longues périodes (couplées avec des observations photométriques, particulièrement indiquées pour les amateurs compte tenu de la brillance de l'astre qui autorise l'usage d'instrument modeste - simple téléobjectif). Les variations de vitesse radiale sont aisément accessibles au spectrographe eShel (précision meilleure que 1 km/s). Le suivi de l'émission de la raie

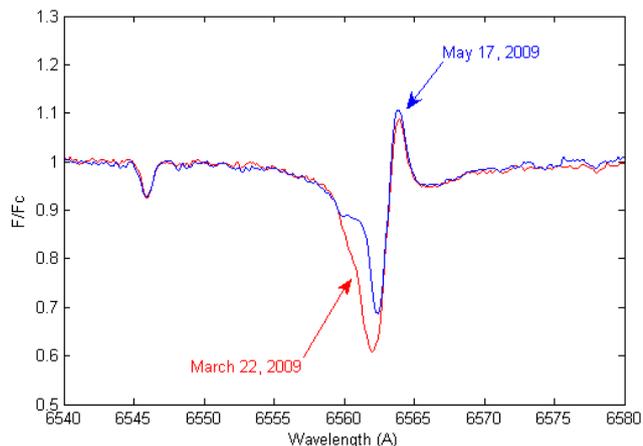
Halp̄a, qui est un indicateur du vent stellaire, est aussi tr̄s int̄ressant à mener (voir par exemple A. Kaufer &all, Long-term spectroscopic monitoring of BA-type superḡants, A&A, 305, 887, 1997).

Deneb (alpha Cyg) is a prototype of supergiant stars which vary photometrically and spectroscopically. This star is a good example of very bright stars, accessible to amateur telescope, whose spectra have a real astrophysical interest (see for example a recent paper: A. Gautschy, Astronomy Astrophysics, 498, 273, 2009). Deneb's spectrum is variable as the star is unstable. Another example is beta Ori (Rigel). Rotational period, stellar winds and pulsations are possible root causes of multiperiodic variations observed. But details of the processus involved are still unknown today. In particular, vibration mode signature should be determined with more accuracy by more continuous spectroscopic observations over longer period of time, coupled with photometric observations which can be done with a simple lens! Radial velocities of less than 1km/sec are easy to achieve with the eShel spectrograph and Halp̄a monitoring is a good indicator for the stellar wind (see for exemple A. Kaufer &all, Long-term spectroscopic monitoring of BA-type supergiants, A&A, 305, 887, 1997).



Ci-dessus, un spectre eShel de l'étoile Deneb couvrant le domaine 4280-7100 Å réalisé avec le Celestron 11 le 17 mai 2009 (compositage de 9 poses de 2 minutes). De gauche à droite, les détails montrent la région de la raie Hg, de la raie du Si II à 6347 Å et de la raie Hα (noter l'émission dans le flanc rouge de la raie).

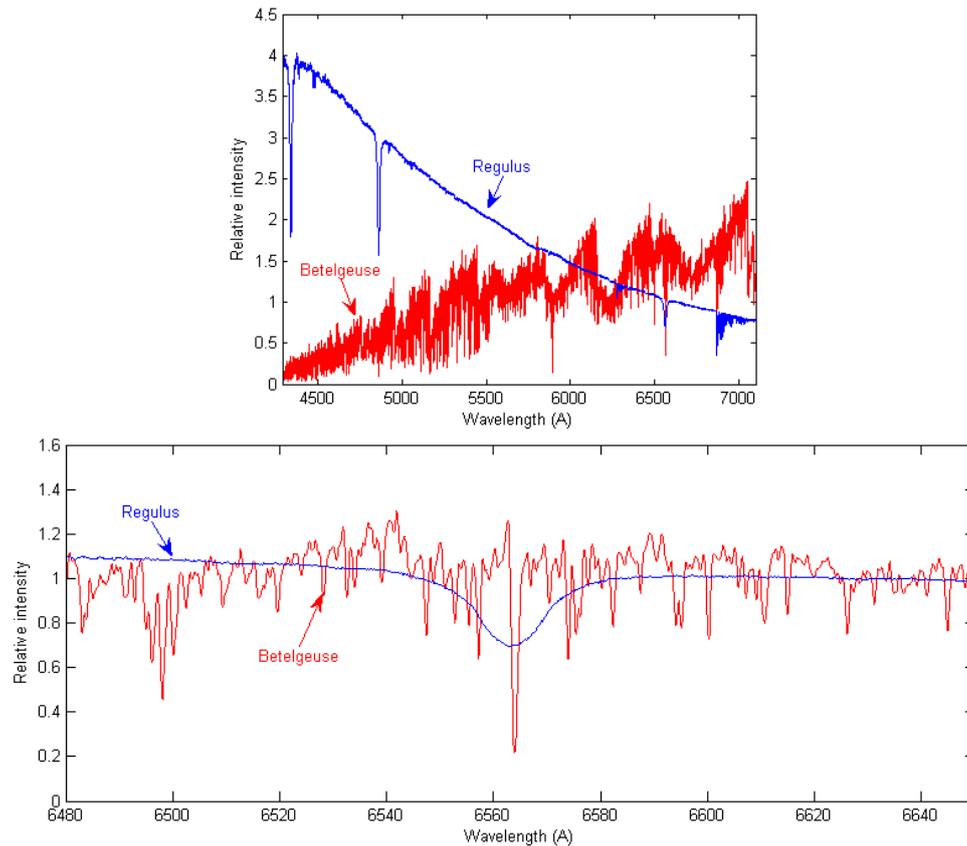
Above is a spectrum of Deneb covering 4280-7100Å spectral domain taken with a Celestron 11 on May 17th, 2009 (combination of 9x120sec exposures). Left to right: details of Hg, Si II at 6347Å and Hα line (note emission on the red side of the line).



A gauche, extrait de deux spectres eShel montrant l'évolution temporelle de la raie Hα de l'étoile Deneb entre le 22 mars 2009 et le 17 mai 2009. Un profil dit type P-Cygni caractérise la raie (il indique un nuage en expansion autour de l'étoile). L'évolution constatée trahit un taux de matière éjectée variable, notamment lié à la rotation de l'étoile. Les raies telluriques de la vapeur d'eau (H₂O), nombreuses dans cette région du spectre, ont été retiré (via un spectre synthétique de la molécule H₂O réalisé sous VisualSpec). Les longueurs données sont ramenées à un même référentiel héliocentrique (c-a-d, l'effet Doppler induit par la rotation de la Terre autour du Soleil et sur elle-même est éliminé).

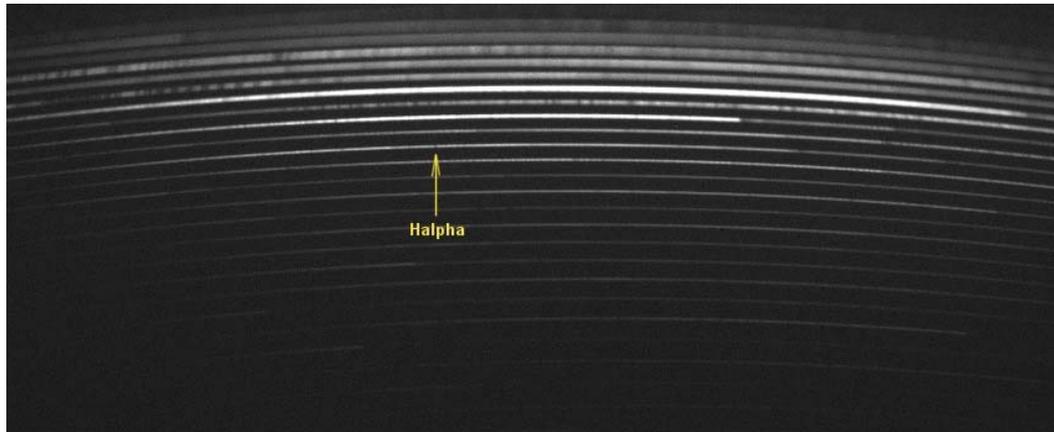
Above: two spectra showing temporal evolution of Hα line of Deneb (March 22nd, 2009 and May 17th, 2009). A P-Cygni typical profile is displayed on Halp̄a (indicating an envelop in expansion around the star). Time evolution is due to variable material ejection rate, linked for example to the star rotation. Telluric lines (H₂O from our Earth atmosphere) have been removed with VisualSpec as they are numerous in this spectral domain. Heliocentric correction (movement of Earth around the Sun) has also been applied.





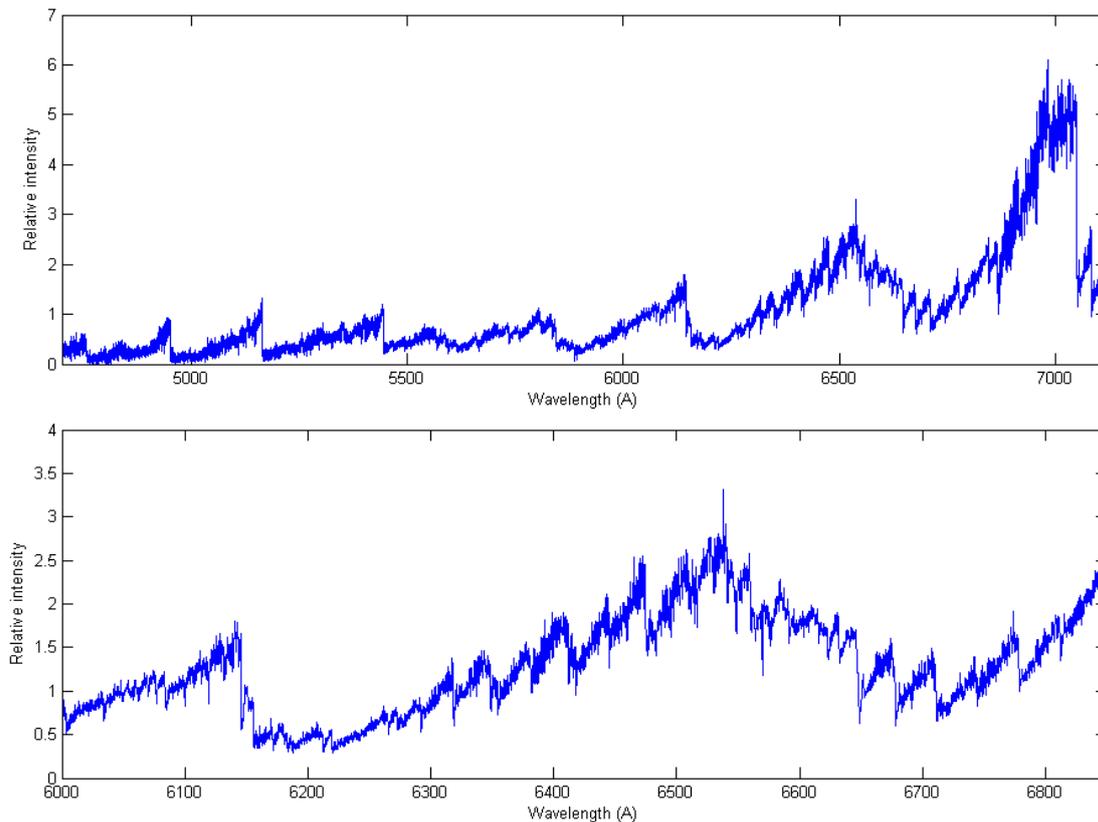
L'aspect du spectre d'une étoile peut changer du tout au tout suivant le type spectral. Ici par exemple, on compare les spectres de l'étoile Regulus (de type B7V) et l'étoile Betelgeuse (de type M2I). La graphie du bas montre un détail autour de la raie Halpha. La différence de température et de gravité (pression en surface) sont des causes de cette disparité entre les deux spectres.

The spectrum of a star can vary a lot depending on spectral type. Above is a comparison of Regulus (B7V type) and Betelgeuse (M2I). Bottom graph shows details around Halpha. Differences in temperature and gravity (surface pressure) explain the huge difference between the two spectra.



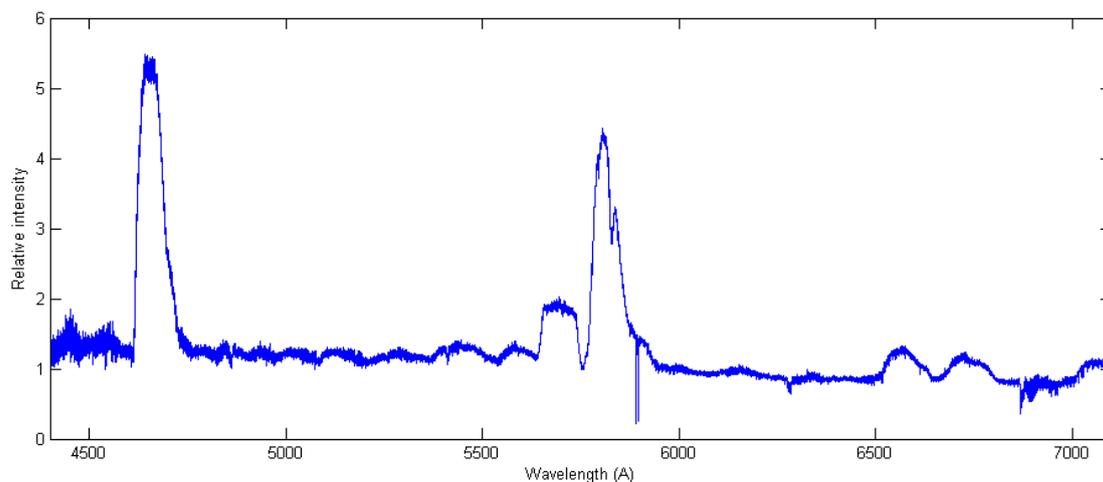
Extrait du spectre échelle en deux dimensions de l'étoile BG Cyg, une variable de type Mira. La quasi-totalité de la lumière émise par cet objet est concentrée dans la partie infrarouge du spectre (les ordres situés tout en haut dans cette image). La position de la raie rouge de l'hydrogène est indiquée.

Portion of the echelle spectrum of BG Cyg, a Mira type variable star. Almost all the star light emitted by this object is in the InfraRed part of the spectrum (orders on top of the image). Hydrogen Halpha line position is shown on the image.



Ci-dessus, le profil spectrale de BG Cyg (en haut, le spectre global acquis, en bas, un détail). L'objet est ici observé le 2 juin 2009, proche de son maximum d'éclat, vers la magnitude $V = 10$. Cette étoile froide est de type spectral M7e. Le spectre est dominé par les bandes de l'oxyde de titane (TiO), qui masquent complètement le continuum. L'étude du spectre des étoiles variables est fondamentale pour la compréhension des phénomènes mis en jeu. Elle doit être couplée si possible avec des observations photométriques simultanées, ce qui implique des collaborations interdisciplinaires entre observateurs. Par exemple, l'émission de la raie H α peu être surveillée dans le spectre des étoiles Mira (elle est le signe d'ondes de choc se déplaçant dans l'atmosphère peu dense de ces astres géants, instables par excellence). Spectre eShel réalisé avec le télescope Celestron 11 en additionnant 5 prises de vues exposées chacune 600 secondes.

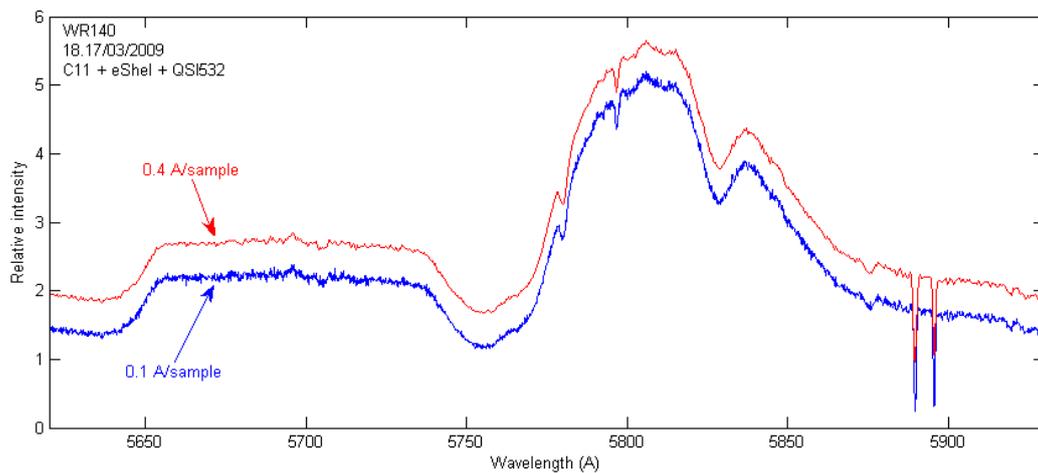
Above: BG Cyg spectral profile (top: overall spectrum; bottom: a detail). Recorded on June 2nd, 2009, close to maximum $V=10$ of this cold M7e type star. The spectrum is dominated by TiO titanium oxyd bands which completely mask the continuum. Study of variable stars is fundamental to explain the phenomenon in play. It must be coupled with simultaneous photometrical measurements which are possible with close collaboration between observers. For example, H α line emission can be monitored in Mira type star spectra, indication of the shockwaves moving inside the low density star atmosphere of those unstable giant objects. eShel echelle spectrum taken with a Celestron 11; 5x600sec exposure.



L'étoile WR140 (HD193793) fait partie de la classe des étoiles Wolf-Rayet, des astres massifs (25 fois la masse solaire) et à la température de surface extrêmement élevée (100 000 K) ([voir une liste ici](#)). Le spectre très particulier montre des raies d'émission d'ions du carbone, d'azote et d'oxygène. Un vent stellaire expulse en continu l'atmosphère de l'étoile ce qui met à nu des structures profondes de l'astres, qui ne devraient pas être normalement visibles. L'étoile WR140 en particulier fait l'objet d'une campagne internationale d'observation réunissant professionnels et amateurs - cliquer sur ce lien pour obtenir des détails : http://www.stsci.de/wr140/index_e.htm et sur la page de Williams Peredur (The Royal Observatory, Edinburgh) : <http://www.roe.ac.uk/~pmw/Wr140phen.htm>. Le spectre eShel présenté ci-dessus a été réalisé le 18,2 mars 2009 depuis l'observatoire de Castanet-Tolosan avec le C11 et un temps de pose de 7 x 300 secondes.

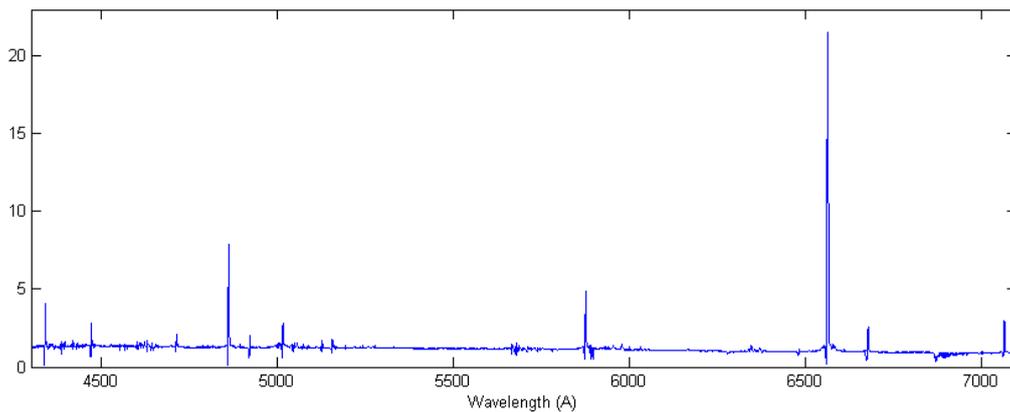
WR140 (HD193793) is classified as a Wolf Rayet star, very massive (25 times mass of the Sun) and extremely high effective photosphere temperature (100000K): see a [list of Wolf Rayet stars](#). Those particular spectra show emission due to Carbon, Nitrogen and Oxygen ions. Stellar winds continuously eject material which reveals deep structures inside the star which could not be seen otherwise. WR140 star is a specific object which has been the target of an international campaign combining the effort of professional and amateur astronomers (more details on http://www.stsci.de/wr140/index_e.htm and Williams Peredur of The Royal Observatory in Edinburgh: <http://www.roe.ac.uk/~pmw/Wr140phen.htm>). eShel spectrum taken on March 18.2, 2009 from Castanet-Tolosan observatory with

a C11 and 7x300 secondes exposure.



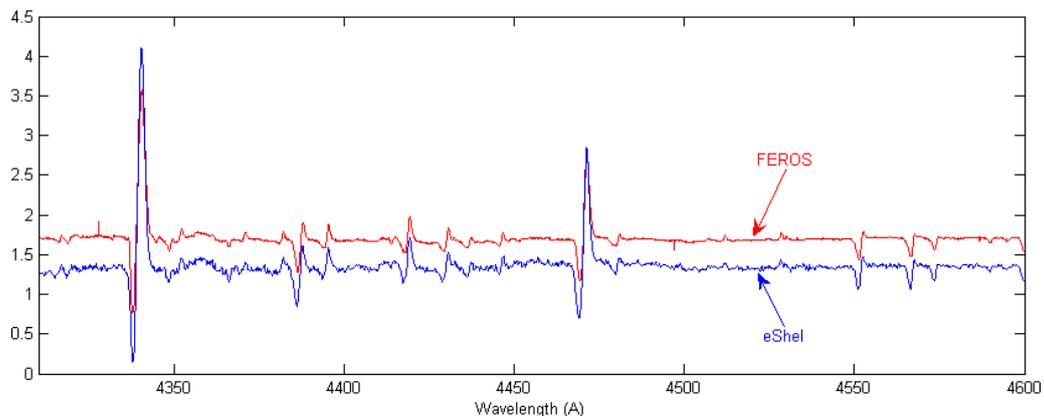
Un détail du spectre de WR140. Le profil spectral en bleu est présenté à un échantillonnage spectral constant de 0,1 angstroms par point, proche de l'échantillonnage moyen en $\text{\AA}/\text{pixel}$ lors de l'acquisition. Le spectre visualisé en rouge est issu des mêmes données, mais en appliquant une simple agglomération des points du spectre d'un facteur 4 (binning numérique). Il est décalé verticalement pour une raison de clarté. Le binning est ici une opération filtrage qui vise à réduire le bruit tout en ne dégradant que modestement la résolution spectrale.

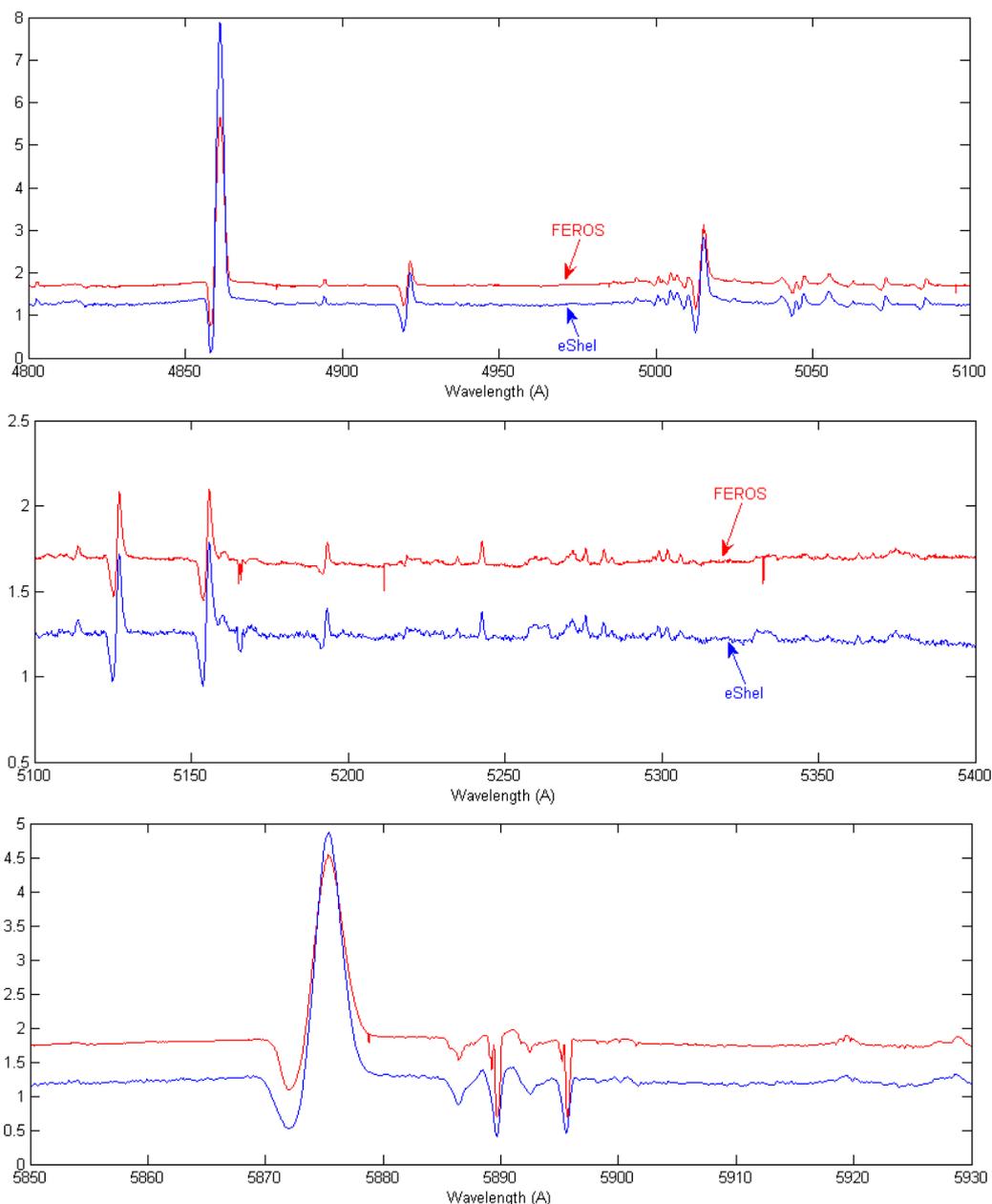
Above: details of WR140 spectrum. Blue spectral profile is displayed with a $0.1\text{\AA}/\text{point}$ constant sampling, close to the acquired $\text{\AA}/\text{pixel}$ sampling. Red plot is from the same data with a simple combination of a factor 4 (numerical binning). It is vertically shifted for better clarity. Binning is here a filtering operation which reduce the noise while slightly degrading spectral resolution.



Ci-dessus, le spectre de l'étoile [P Cygni](#) (34 Cyg), une étoile supergiante particulière faisant partie de la catégorie des étoiles LBV (Luminous Bleu Variable). L'étoile Eta Carina est un autre membre célèbre de cette catégorie. La surveillance spectroscopique de P Cygni est fortement recommandée. Spectre eShel obtenu en un temps de pose de 4×300 s avec le télescope Celestron 11.

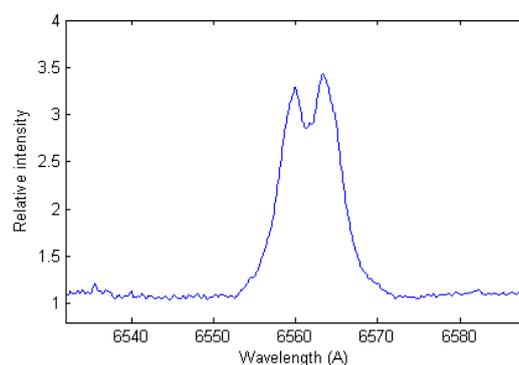
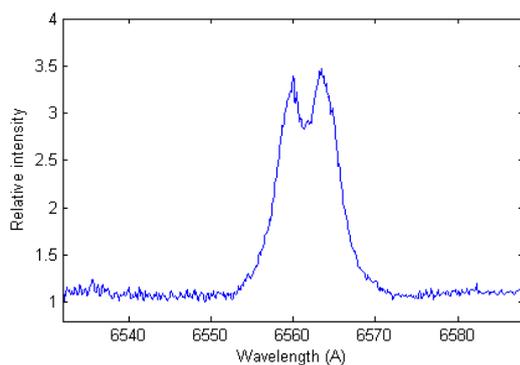
Above: spectrum of [P Cygni](#) (34 Cyg), a peculiar supergiant star called LBV (Luminous Bleu Variable). Eta Carina is another famous member of this rare type of stars. Continuous monitoring of P Cygni is highly recommended. eShel spectrum taken with a Celestron 11: $4 \times 300\text{sec}$ exposure.





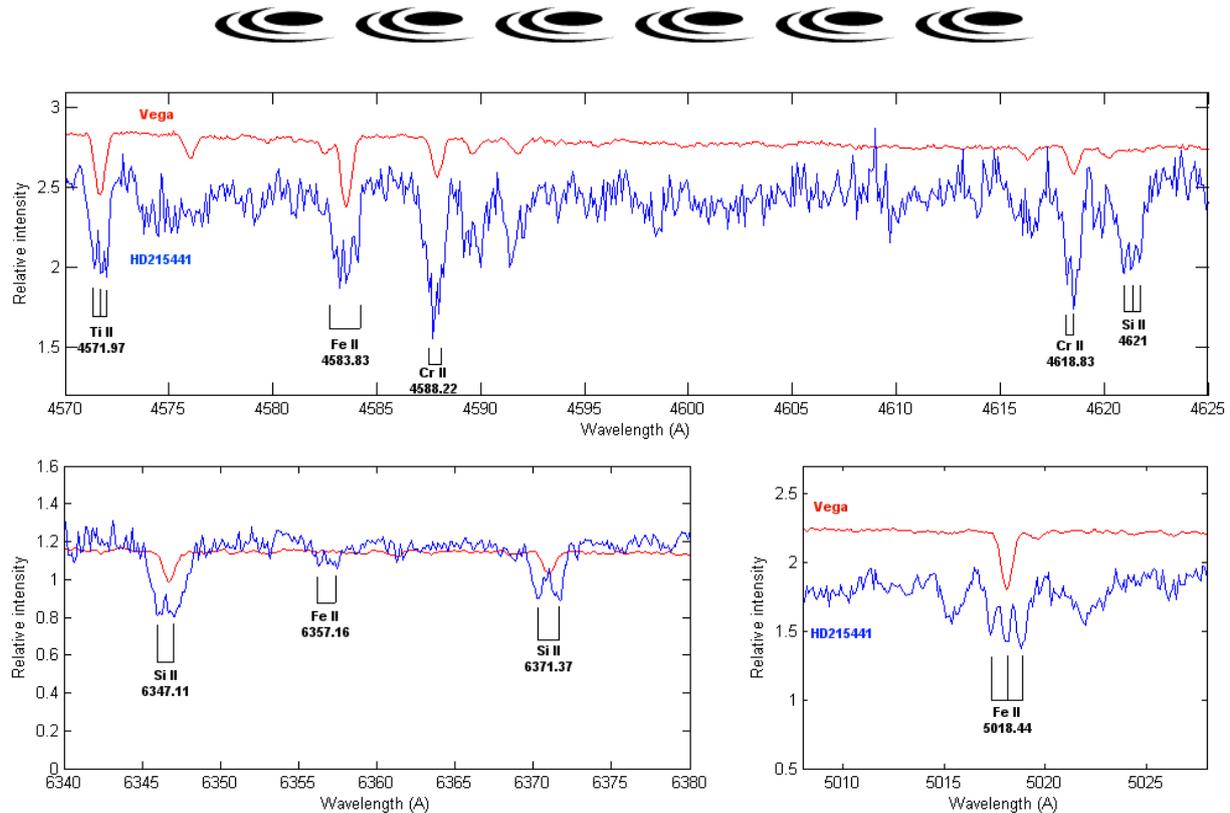
Ci-dessus, quelques détails du spectre eShel de P Cygni obtenu le 23 mars 2009 (4 poses de 300 secondes), comparés avec un spectre de la même étoile obtenu le 2 août 1999 avec le spectrographe FEROS équipant le télescope de 1,52 mètre de La Silla (pose de 360 secondes) (ce spectre peut être téléchargé [ici](#)). La plupart des détails ont le même aspect entre le spectre eShel et le spectre FEROS car eShel résoud les raies naturellement élargies de P Cygni. En revanche, le surcroît de résolution de FEROS est évident au niveau des détails sur le doublet du sodium interstellaire (voir le dernier spectre de cette série, vers 5890 Å). Le pouvoir de résolution de FEROS est $R=48000$ alors que celui de eShel atteint seulement $R=12000$. Noter qu'entre ces deux dates, l'intensité de la raie H α a sensiblement évoluée.

Above, some detailed of the eShel spectrum taken on march 23rd, 2009 (4x300sec exposure) compared with a spectrum obtained August 2nd, 1999 with FEROS spectrograph on a 1.52m telescope at La Silla (360sec exposure); this spectrum can be downloaded [here](#). Most details have similar shapes between the eShel and the FEROS spectra. FEROS spectrum shows much more details on the interstellar sodium (near 5890Å): the resolving power of FEROS is $R=48000$, compared to $R=12000$ of the eShel. Note that between the two dates, the H α line intensity has evolved.



Ci-dessus, une portion du spectre de l'étoile de type Be HD162428, de magnitude 7,11. Le temps de pose est de 4 x 600 secondes avec le Celestron 11 et un seeing évalué à 4 secondes d'arc. A gauche, le spectre est présenté à l'échantillonnage original donné par le CCD KAF-3200ME. Les petits pixels (6,8 microns) de ce capteur CCD échantillonnent le spectre avec un pas significativement plus fin que la résolution spectrale (c'est un cas caractéristique dit de *sur-échantillonnage*, ici d'un facteur 2,6 par rapport à la fréquence de Nyquist limite pour résoudre un élément spectral à R=11000). A droite, le spectre est convolué par une fonction gaussienne de telle manière à ce que le pouvoir de résolution atteigne de l'ordre de R=11000. Le rapport signal sur bruit, déjà correct compte tenu de la faiblesse de l'étoile, est amélioré sans perte très significative d'information.

Above is a portion of the spectrum of the Be star HD162428 (mag 7.11). Exposure time of 4x600sec with a Celestron 11 and a seeing of around 4". Left is the spectrum with the original sampling given by the KAF-3200ME ccd chip. With pixel size of 6.8 microns, this chip oversample the spectrum: a factor of 2.6 is applied compared to the Nyquist limit to resolve a spectral element of R=11000. Right, the spectrum convolved with a gaussian to reduce the sampling to the R=11000 equivalent. Signal/Noise ratio, already acceptable regarding the faint magnitude of this star, is improved without significant data loss.



Observation du magnétisme de surface de l'étoile HD215441, de type A0p. Le champ magnétique est considérable sur cet objet. Il atteint 34 000 gauss (c'est l'un des champs magnétiques les plus élevés connus en dehors de celui rencontré dans les étoiles dégénérées. Le dédoublement en plusieurs composantes des raies du Si II, Fe II, ... est la signature Zeeman du champ magnétique (comparer avec l'étoile normale Vega, de type A0V, pose de 3 x 60 s). La structure du multiplet du Fe II 5018,45 Å est spectaculaire en particulier. Le champ magnétique de cette étoile est irrégulier, avec de fortes variations temporelles possibles de jours en jours. L'analyse de ce champ magnétique est à la portée du spectrographe eShel alors que l'étoile est pourtant faible ($V=8,6$) et que le télescope utilisé est de diamètre modeste. La spectropolarimétrie est même envisageable. Le spectre présenté est la somme de 9 poses de 600 secondes prises avec le Celestron 11 (11 juin 2009).

Surface magnetic fields observation of A0p star HD215441. The magnetic fields is very strong, of about 34 000 gauss (110 000 times the Earth field). Many of the spectral lines are clearly resolved into Zeeman patterns (compare with Vega spectrum, a normal A0V star, 3x 60 s exposure). The pattern and amount of splitting are a signature of magnetic field and of its strength. The Zeeman splitting of Fe II 5018.45 Å multiplet line is spectacular. The field fluctuates irregularly and monitoring is helpful. Note that HD215441 is a faint star ($V=8.6$). The eShel spectrum is the stack of 9 x 600 seconds exposures taken at the focus of Celestron 11 telescope (June 11, 2009).



Le spectrographe eShel est optimisé pour être exploité sur des télescopes ouverts entre f/3.5 et f/6. Leurs diamètres peuvent aller de quelques centimètres de diamètre jusqu'à atteindre 1 mètre. Une caméra équipée d'un capteur CCD type KAF-1600 convient tout à fait pour acquérir les spectres délivrés par le spectrographe. Bien sûr il n'y a pas d'inconvénient à utiliser un plus grand capteur. eShel est aussi compatible avec les appareils photo numériques. Avec un CCD type KAF-1603E (pixels de 9 microns) l'échantillonnage spectral caractéristique est de 0,13 angström/pixel. Le spectre peut être acquis en continu sans refocalisation avec un pouvoir de résolution (I/d) de 11000 entre 4450 et 7100 angströms et avec un pouvoir de résolution de 8700 entre 4300 et 4450 angströms. En refocalisant, le spectre infrarouge est accessible entre 7100 et 8000 angströms avec un pouvoir de résolution de 10000.

eShel spectrograph is optimized for f/3 to f/6 telescope, with diameter up to 1 meter (depending on seeing). A KAF-1600 based ccd camera is well suited to acquire spectra images from the spectrograph. Using a large ccd chip is possible but won't bring additional benefit. eShel is also compatible with digital SLR. With a KAF-1603E (9 microns pixel size), the typical sampling is 0.13Å/pixel. Spectrum can be acquired continuously without having to refocus with a resolving power (I/d) of R=11000 between 4450Å and 7100Å and R=8700 between 4300Å and 4450Å. One can refocus around the Infra-Red portion with a resolving power R=10000 between 7100Å and 8000Å.

Le spectrographe eShel utilise des composants haute performance pour assurer un bon rendement, notamment un réseau à diffraction R2 de qualité professionnelle d'origine Richardson et un prisme F2 pour la dispersion croisée traitée antireflet. Le rendement global caractéristique (*throughput*) pour une configuration Celestron 11 F/5.9, un seeing de 3 secondes d'arc et une caméra Quantum Imaging QSI-532 est évalué à 3,6% à 450 nm, 6,8% à 550 nm et 6,9% à 650 nm (ce rendement tient compte du télescope, de l'unité de fibre optique, du spectrographe et de la caméra CCD). L'efficacité optique du spectrographe à 550 nm est 13% (hors télescope et caméra CCD).

eShel spectrograph uses high performance components (specially the R2 Richardson professional quality grating and a coated F2 prism for cross dispersion) to achieve an overall good flux efficiency. Overall throughput with a Celestron 11 f/5.9, a 3" seeing and QSI532 ccd camera is evaluated at 3.6% at 4500Å, 6.8% at 5500Å, and 6.9% at 6500Å. At 5500Å, excluding telescope and CCD camera, efficiency of the eShel system is 13%.

Le tableau ci-dessous donne la magnitude limite attendue pour un certain signal sur bruit objectif. On a choisi les rapports signal sur bruit de 20, 50 et 100. En général, un rapport signal sur bruit de 50 est le minimum pour commencer à réaliser des travaux astrophysiques sérieux, mais dans certains cas, un S/B de 20 peut déjà convenir (détection d'activité, ...). Les paramètres du calcul sont les suivants :

- Seeing (turbulence) : 3 secondes d'arc.

- Observation au niveau de la mer avec une étoile située 45° au dessus de l'horizon.
- Etoile de type spectral A0.
- Rapport signal sur bruit mesuré à 550 nm.
- Temps de pose de 1 heure décomposé en 6 poses individuelles de 600 secondes.
- Caméra CCD QSI-532 équipée d'un CCD KAF-3200ME (pixels de 6.8 microns, bruit de lecture de 11,4 électrons, gain de 1,3 électron/ADU et signal d'obscurité de 0,05 électron/seconde).

Table below provides limiting magnitude to reach a specific signal/noise ratio. We choosed signal/noise ratio of 20, 50, and 100. In general, a S/N of 50 is required for astrophysical work; but a S/N=20 is useful in some project (activity monitoring for exemple). Parameters are:

- Seeing : 3"
- sea level observation, star 45° above horizon
- A0 spectral type star
- S/N measured at 5500A (550nm)
- Exposure time of 1 hour (6*600sec)
- QSI532 ccd camera with KAF-3200ME (6.8 microns pixel size, 11.4 electron read noise level, 1.3 electron/ADU gain, dark current of 0.05 electron/sec)

	S/B = 20	S/B = 50	S/B = 100
D=20 cm F/D=5.9 (Celestron 8)	8.9	8.0	7.1
D=28 cm F/D=5.9 (Celestron 11)	9.6	8.7	7.7
D=35 cm F/D=5.9 (Celestron 14)	10.0	9.0	8.1
D=40 cm F/D=4.0 (Dobson)	10.3	9.2	8.4
D=60 cm F/D=3.5	11.0	10.0	9.1
D=100 cm F/D=3.5	11.5	10.5	9.6

Par exemple, avec un Celestron 11 équipé d'un réducteur ramenant le rapport d'ouverture à F/D=5.9, une étoile de magnitude 7,7 sera observé avec un rapport signal sur bruit de 100 à la résolution spectrale équivalente de R=11000 après un temps de pose d'une heure (6 x 600 sec.). Nota : certaines valeurs de ce tableau, issues d'un modèle numérique de performance du spectrographe eShel, ont pu être vérifiées expérimentalement.

For exemple, a Celestron 11 with a f/5.9 focal reducer, a 7.7 magnitude A0V type star will reach a Signal/noise ratio of 100 with a resolving power R=11000 in a 6*600sec exposure. Note that the numerical simulation has been checked/tested with experimental observations.

Le tableau ci-après donne la magnitude limite (S/B=20) pour une résolution spectrale équivalente de 11000 et pour un télescope C11 f/5.9 en fonction du type de caméra utilisée. Le surcroît de performance du KAF-3200ME provient de son rendement quantique plus élevée et de sont faible bruit de lecture :

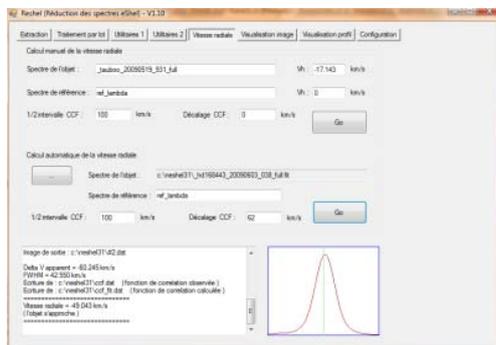
The following table provide the limiting magnitude for a resolving power of R=11000 with a Celestron 11 f/5.9 telescope depending on CCD camera used; the additional performance of the KAF-3200ME chip comes from higher quantum efficiency and lower read-out noise level):

	S/B = 20	S/B = 50	S/B = 100
CCD KAF-1602ME (Pixels de 9 microns, RON = 16 e-, gain 2,5 électrons/ADU, signal thermique de 0,05 électrons/seconde)	9.3	8.3	7.3
CCD KAF-3200ME (Pixels de 6.8 microns, RON = 11,4e-, gain 1,3 électrons/ADU, signal thermique de 0,05 électrons/seconde)	9.6	8.7	7.7

Enfin, le tableau ci-dessous donne une idée de l'impact du seeing sur la performance en détectabilité. La magnitude limite est donnée pour un rapport signal sur bruit objectif de 100 et une heure d'observation :

Last but not least, the table below gives an indication of the seeing on the detectivity performance. Limiting magnitude is given for a S/N of 100 and 1 hour exposure:

	Celestron 11 - F/D = 5.9	60 cm - F/D = 3.5
Seeing 2 secondes d'arc	7.8	9.3
Seeing 3 secondes d'arc	7.7	9.1
Seeing 4 secondes d'arc	7.5	8.8
Seeing 5 secondes d'arc	7.3	8.5



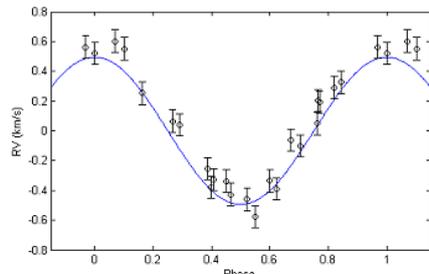
Plusieurs outils ont été créés pour faciliter l'exploitation des spectres eShel. L'un d'eux permet d'extraire des données les vitesses radiales avec une haute précision grâce à la technique de la corrélation croisée. La méthode, qui exploite de très nombreuses raies simultanément, est utilisée quasi universellement aujourd'hui pour détecter des exoplanètes. Un calcul, indispensable, permet de ramener les vitesses apparentes à ce qu'elles seraient si l'observateur était situé au centre de masse du système solaire. Ceci permet de retirer la contribution du mouvement de l'observateur entraîné par la Terre (la Terre tourne autour du Soleil à une vitesse proche de 29 km/s, très supérieure aux vitesses qu'il faut détecter pour l'étude des exoplanètes). Ces techniques deviennent à présent accessibles aux amateurs.

La détection de l'exoplanète gravitant autour de l'étoile Tau Boo. [Voir ici les détails de cette observation.](#) Le choix technique de découpler le spectrographe eShel du télescope en faisant un lien par fibre optique entre les deux est tout à fait déterminant pour ce type d'observation. Pour s'en rendre compte, voyons l'enjeu : il est question de détecter le mouvement du centre de masse du système de tau Boo causé par la course orbitale d'une planète. La signature spectrale est un déplacement Doppler des raies spectrales de +/- 500 m/s environ. C'est la signature de la planète tau Boo b tournant autour de son étoile.

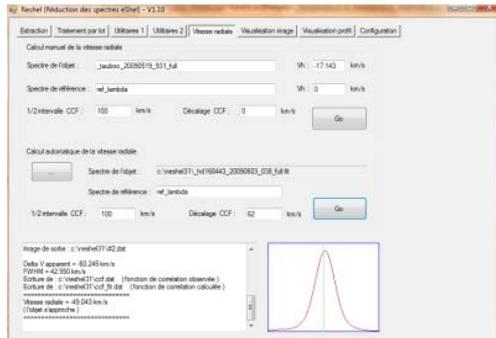
Pour ce qui concerne la présente mesure, l'erreur caractéristique en vitesse radiale est ici estimée à 75 mètres par seconde. Cela correspond dans le spectre à une précision d'étalement de 0,0014 angström environ. Pour donner une idée de cette valeur, soulignons que le spectre dans eShel est échantillonné en moyenne par le détecteur au pas de 0,1 Å/pixel. Un mouvement de 75 mètres/seconde du centre de masse équivaut donc à 1/70 pixel. La stabilité du spectrographe apparaît cruciale lors des mesures. Cette condition ne serait pas respectée si le spectrographe était accroché au foyer du télescope, les flexions mécaniques (déformations variables de l'instrument sous son propre poids) et les déformations thermoélastiques (la variation de la température causant l'étirement ou la contraction de l'instrument) ruinant alors la possibilité de réussir cette observation difficile.

L'usage d'une fibre optique et l'intégration d'un système d'étalement spectral efficace et automatisé (unité Thorium-Argon) fait du spectrographe eShel un instrument de haute précision tout en étant très simple d'usage (par exemple, la masse ajoutée sur le télescope n'est que de 600 grammes - eShel peut être employé sur de tout petits télescopes). L'accès est mis aussi sur la sûreté et la simplicité d'usage. Par exemple, la vitesse radiale est obtenue de manière automatique quelques instants après l'observation, quasiment en tache de fond de l'observation d'une autre étoile, ce qui inclue aussi tout le prétraitement des données qui est entièrement transparent pour l'utilisateur. La spectrographie n'a jamais été aussi simple.

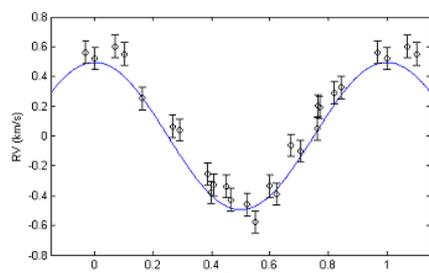
Pour autant, la détection d'exoplanètes avec le spectrographe eShel est une opération difficile, on l'a dit. D'abord, le pouvoir de résolution est relativement modeste, de l'ordre de 10000, alors que les spectrographes professionnels spécialisés affichent typiquement 50000 (voir même 115000 dans le cas du fameux spectrographe HARPS installé sur le 3,6 m de La Silla). Un autre point majeur est que la mesure du spectre de l'étoile et la mesure du spectre de référence thorium/argon ne sont pas simultanées. Malgré que l'on prenne bien soin ici d'encadrer chaque mesure élémentaire de l'étoile par des mesures du ThAr, les déformées thermo-élastiques du spectrographe altère clairement la



23 mesures de vitesses radiales accumulées de mars à juin 2009 mises en phases. Les points s'organisent suivant un profil périodique qui est la signature non ambiguë d'un corps d'une masse équivalente à 4 fois celle de Jupiter tournant autour de l'étoile en 3,3 jours. La barre d'erreur affichée est ici de 75 m/s.



Several tools have been written to help the eShel spectra analysis (acquiring and processing is one step... analysis is another one!). One of them is to extract radial velocities with a very high accuracy using the cross correlation function (CCF). This method, using several lines at the same time, is used almost every where to detect and measure exoplanets.
 First, measures are corrected from Earth rotation around the Sun (up to 29km/s, way above the measured radial velocities).
 Those measures are now accessible to amateurs.



23 radial velocities measurements between march and June 2009 are combined in a single phase. RV measures swing in a periodical shape which is the clear signature of a M-4 Jupiter masses body orbiting around tau Boo star in 3.3 days. The error margin displayed here is 75m/s.

précision (l'environnement thermique autour du spectrographe est actuellement loin d'être stable). Le télescope a une taille modeste, ce qui a aussi un impact direct sur la précision. Soulignons enfin que parmi le monde des exoplanètes le système tau Boo est un cas "facile" (tout est relatif !). Le tableau ci-après donne l'estimation des plus petites vitesses radiales détectables avec eShel pour une étoile de type G en fonction de la magnitude et du type de télescope. Pour mémoire, l'étoile historique 51 Pégase (la première exoplanète a été détectée autour de cette étoile en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz) est de magnitude 5,5 et présente une semi-amplitude de vitesse radiale 56 m/s. En l'état des méthodes de traitement des données eShel et du conditionnement du spectrographe, la planète 51 Peg b est à la limite de l'accessibilité avec un télescope de 60 cm.

Magnitude	Celestron 11 - f/5.9	60 cm - f/3.5
3	37 m/s	18 m/s
4	56 m/s	28 m/s
5	95 m/s	46 m/s
6	175 m/s	75 m/s
7	360 m/s	140 m/s

On notera pour finir que le spectrographe eShel à la puissance nécessaire pour enregistrer avec un relatif confort les pulsations et modes vibratoires de nombreux type d'astres, ou encore pour préciser les orbites de systèmes stellaires multiples. Une belle astrophysique est a portée avec un tel outil.

Detection of tau Boo B exoplanet around tau Boo ([see here additional details of the observation](#)).
 The eShel technical choice of coupling the spectrograph to the spectrograph is key for this type of observation. Let's look at what is at stake: we are looking at the movement of the star implied by the mass of the planet. Spectral signature is around +/- 500 meter/secondes!

For the actual measurement, typical radial velocity error is estimated at 75 meters/secondes. This is precision in wavelength calibration of 0.0014Å! Keep in mind the eShel dispersion is around 0.1Å/pixels. A movement of 70 meters/secondes of the star implies a Doppler shift of 1/70th of a pixel. Mechanical and thermal stability of the spectrograph are key for this result which couldn't be achieved with the spectrograph mounted on the telescope: mechanical flexure due to the instrument on its own weight and thermal changes causing dilatation of the instrument would kill the ability to succeed in those measurements.

The use of an optical fibre and an integrated, automated and efficient calibration system brings the eShel spectrograph into the world of high accuracy instruments while being very easy to use (the total mass at the telescope is only 600gr for exemple!); the eShel system can be used on small telescope even if it is originally design for large telescopes. The overall eShel system has also been designed for secure and easy to use. For exemple, radial velocities are obtained automatically few minutes after the observation; calculation - including preprocessing - are made in the background while observing another star. Spectrography has never been so simple.

Still, exoplanet detection is a difficult project even with the eShel spectrograph. The relatively small resolving power (R around 10000 while professional spectrograph have at least R>50000 - 150000 for HARPS spectrograph at the ESO La Silla 3.6 m telescope). Also, Thorium-Argon calibrations are done before/after the star, not at the same time such as SOPHIE or HARPS spectrographs. Specially as the thermal environment of the spectrograph is not currently very stable (professional astronomer put their spectrograph in temperature controlled room and even in empty chambers for HARPS grating). The telescope is also a modest size one which limit the accuracy. tau Boo is actually an easy target (relatively speaking!) in the exoplanet world. Table below shows an estimation of the radial velocities which can be detected based on telescope and G-type star magnitude:

Magnitude	Celestron 11 - f/5.9	60 cm - f/3.5
3	37 m/s	18 m/s
4	56 m/s	28 m/s
5	95 m/s	46 m/s
6	175 m/s	75 m/s
7	360 m/s	140 m/s

As a reminder, 51 Pegasi (the first exoplanet discovered in 1995 by Michel Mayor and Didier Queloz) is a magnitude 5.5 with half amplitude of 56 meters/sec. today, it will be at the limit of a 60cm telescope for the eShel spectrograph.

Last but not least, the eShel has the power to record relatively easily pulsations and vibrations of several stars or to improve multiple star system orbits. A great astrophysics is brought by such tool!



[Back](#)