

# Stage spectroscopie à l'OHP

D. Katz ([david.katz@obspm.fr](mailto:david.katz@obspm.fr) – 01 45 07 78 45)

Recommandation pour les lecteurs pressés : si vous ne devez lire qu'un paragraphe, lisez les consignes de sécurité !!!.

**Attention** : l'essentiel du texte a été rédigé de mémoire (et le soutien de quelques notes) à Meudon. Des inexactitudes on pu s'immiscer dans la description des instruments ou des commandes du spectrographe, etc...

## 1 Présentation et objectifs du stage :

Voici une brève présentation du stage de spectroscopie à l'OHP des étudiants de M2 filière DSG. Le stage comprend 5 nuits d'observation. Les étudiants sont répartis en groupe de 3 à 4 sur 3 télescopes : 80, 120 et 152. Chaque soir, les groupes permutent. En cas de beau temps, chaque groupe passe un peu plus de 1.5 nuits par télescope. La spectroscopie se déroule sur le télescope de 152 cm avec le spectrographe Aurélie.

Les objectifs du volet spectroscopie du stage sont de familiariser les étudiants avec:

1. Les observations astronomiques : choix des sources, pointage du télescope, etc...
  2. Les observations spectroscopiques: instrument, concepts de spectroscopie (dispersion, résolution, etc...), interface utilisateur, calibrations, logiciels de réduction et d'analyse (MIDAS), etc...
  3. La spectroscopie stellaire : morphologie des spectres stellaires en fonction des paramètres atmosphériques, mécanismes de formation des raies, etc...
  4. Autres (suivant météo) : rotation des planètes géantes, redshift d'un quasar (3C273), étoiles binaires courte période, identification d'étoiles d'amas via leurs vitesse radiale, etc...
- Les 3 premiers points sont traités durant la première nuit d'observation. Si la météo le permet, la deuxième nuit permet de traiter certains aspects du point 4.

## 2 Première nuit d'observation

### 2.1 Chronologie

La première nuit suit la chronologie suivante : • Présentation du télescope • Présentation du spectrographe Aurélie • Présentation de la salle de contrôle • Mise en œuvre du TP de spectroscopie stellaire

### 2.2 Le télescope

La salle du télescope comprend deux parties : • La partie basse où se trouve la console de pointage du télescope (plus ouverture de la trappe de la coupole, rotation de la coupole, etc...). La partie basse comprend un plancher mobile que l'on peut monter si besoin pour accéder au chercheur pour le pointage fin du télescope. •

Une galerie (partie haute), qui permet notamment d'accéder au chercheur pour le pointage fin du télescope.

A partir de la galerie, on présente aux étudiants le télescope et parcours de la lumière : miroir primaire, miroir secondaire, miroir coudé, puis via l'axe du télescope jusqu'au spectrographe qui se trouve dans la salle de contrôle.

A partir de la partie basse, on explique le pointage du télescope. C'est également le moment de présenter les consignes de sécurité aux étudiants (voir ci-dessous). Le pointage s'effectue en trois temps :

- Les mouvements rapides. Ils sont commandés à partir de la console de pointage en partie basse. Deux cadrans permettent de lire l'ascension droite et la déclinaison que pointe le télescope. Deux grosses molettes permettent de faire varier les coordonnées de pointage. Ces molettes permettent de mettre le télescope en mouvement (plus ou moins rapide) et de l'arrêter, mais ne définissent pas le sens du mouvement. Ce sont deux petits boutons qui définissent si l'on va vers les alpha (respectivement delta) croissants ou décroissants. Attention à ne pas forcer les molettes au-delà du point d'arrêt du télescope. C'est un réflexe « classique », que peuvent avoir les étudiants quand ils dépassent les coordonnées de pointage et qu'ils désirent revenir en arrière. Il ne faut surtout pas le faire car la conséquence est de casser l'axe en graphite de la molette et de perdre le contrôle du télescope (auquel cas, il faut appuyer sur le bouton rouge d'arrêt d'urgence). On peut affiner une première fois le pointage avec les boutons de mouvements lents qui se trouvent sous les cadrans.

- On utilise ensuite le chercheur (petit télescope situé le long du télescope de 152) pour positionner l'image de l'étoile au plus près du trou d'entrée du spectrographe. Le trou d'entrée est légèrement excentré par rapport au champ du chercheur. En général un dessein scotché sur la console montre où positionner l'étoile dans le champ du chercheur. Cette position peut varier. En Mars 2011, il fallait positionner l'étoile « 2 graduations » à droite et « 2 graduations » vers le bas par rapport au centre du champ (une graduation est définie par le carré formé par les croisillons au centre du champ). Une raquette permet de contrôler le télescope pendant que l'on affine le pointage au chercheur (appuyer simultanément sur le bouton rouge à l'arrière pour accélérer les mouvements).

- La dernière étape se déroule dans la salle de contrôle du spectrographe. Une petite télévision permet de visualiser la lumière qui n'entre pas dans le spectrographe. Une croix sur l'écran matérialise le trou d'entrée du spectrographe. A l'aide d'une raquette, on « déplace l'étoile » sur la croix (appuyer simultanément sur le bouton rouge à l'arrière pour accélérer les mouvements). Une fois l'étoile correctement positionné on peut lancer le guidage automatique du télescope en appuyant sur la touche G de la console grise se trouvant en bas à gauche par rapport à la télévision. La coupole ne suit pas les mouvements du télescope. Durant les poses longues, il faut aller tourner la coupole (une fois ou plus suivant la durée de la pose) pour éviter de pointer la coupole plutôt que la trappe.

### **Consignes de sécurité :**

- Durant ses mouvements rapides, le télescope peut heurter (i) le pilier nord et (ii) la rambarde de sécurité si l'on pointe vers le bas. La personne manipulant le télescope à la console (mouvements rapides) doit toujours également garder un œil sur le télescope.

- Durant les mouvements du télescope, le petit télescope servant de chercheur ne peut pas heurter la rambarde de sécurité. En revanche, dans certaines directions de pointage, l'espace entre le chercheur et la rambarde est de l'ordre du centimètre. Il n'y a pas la place pour la tête ou le bras d'un observateur. En conséquence, quand des mouvements rapides du télescope sont effectués, il ne doit y avoir aucun observateur en haut. En particulier, quand une erreur de pointage nécessitant des mouvements rapides est constatée alors qu'un observateur est au chercheur, ce dernier doit redescendre dans la partie basse avant que le moindre mouvement rapide soit effectué.

- Lors de certains mouvements du télescope, le contrepoids passe à côté de la console de contrôle du télescope. Les personnes présentes doivent garder un œil sur le contrepoids. • En cas de problème, il y a un gros bouton rouge d'arrêt d'urgence à droite de la console de pointage du télescope.

- Il doit toujours y avoir un encadrant sous la coupole avec les étudiants durant le pointage du télescope pour s'assurer du bon respect des règles ci-dessus.

## **2.3 Le spectrographe Aurélie**

Le spectrographe Aurélie se trouve dans la salle de contrôle du spectrographe derrière le drap

noir. Avec l'accord de l'assistant de nuit, on peut ouvrir la trappe à l'arrière pour montrer une partie du chemin optique. La lumière est dispersée par un réseau en réflexion. On a le choix entre plusieurs réseaux suivant la résolution spectrale que l'on désire (voir page web Aurélie pour tous les détails). Le CCD est refroidi à  $-110^{\circ}\text{C}$  (si ma mémoire est juste). Un afficheur digital permet de vérifier que le CCD est bien à la bonne température.

À l'entrée du spectrographe, un découpeur d'image (« image slicer ») permet de découper la PSF circulaire en 5 « bouts » et de les projeter en ligne les uns au-dessus des autres sur la fente du spectrographe. C'est ce dispositif qui fait que l'image du spectre sur le CCD est constituée de 5 bandes parallèles s'étendant au total sur environ 80 pixels de large. Le spectrographe n'étant isolé du reste de la salle que par un drap, on baisse en général la lumière quand on commence les observations. Le spectrographe Aurélie et son environnement logiciel sont parfaits pour l'enseignement.

TBD : A DETAILLER.

## 2.4 La salle de contrôle du spectrographe

Outre le spectrographe, la salle comprend dans sa partie Est, trois ordinateurs. En allant de la gauche vers la droite quand on est face au mur Est :

- Le premier ordinateur collecte les images du CCD. MIDAS est installé sur l'ordinateur. Les commandes de base ainsi que plusieurs procédures OHP permettent d'effectuer de nombreuses réductions et mesures au fur et à mesure des observations.

- Le second ordinateur commande le spectrographe : choix de la longueur d'onde centrale, mise au point, poses de calibrations, pose sur les objets, etc...

- Le troisième ordinateur permet d'accéder à internet pour obtenir des cartes de champs (en cas d'ambiguïté sur l'objet pointé), pour choisir les cibles dans les catalogues du CDS, etc...

Le spectrographe se commande via une fenêtre contenant plusieurs menus. En allant dans le menu « conduite des poses » (libellé exact à confirmer) puis dans « pose d'un seul type » (libellé exact à confirmer) on peut choisir de lancer des poses de calibration (offset, flat-field, Thorium-Argon pour la calibration en longueur d'onde, dark en général négligeable) ou une pose sur le ciel. En général il suffit de renseigner le temps de pose désiré, la densité que l'on désire insérer dans le faisceau pour l'atténuer (pour les poses de calibration), le nom de l'objet, le nombre de pose.

TBD : A COMPLETER.

L'ordinateur recevant les observations permet de les visualiser et de les traiter. On peut avoir besoin de changer/retrouver le répertoire contenant les images des spectres. Ces images sont stockées dans `/vol3/images/`

## 2.5 Le TP

L'objectif scientifique du TP est que les étudiants :

- observent comment la morphologie des spectres évolue avec les paramètres atmosphériques : température effective, logarithme de la gravité de surface, métallicité.

- Qu'ils déduisent (eux-mêmes! ☺) de ces observations des critères visuels permettant de déterminer ces paramètres.

- discuter avec eux des mécanismes physiques qui sous-tendent les critères visuels. En guidant un peu les étudiants de M2, ils arrivent à trouver une (grande) partie des explications par eux-mêmes.

- On peut conclure par un « jeu » : l'encadrant choisit des étoiles et les étudiants les observent et doivent deviner l'ordre de grandeur de leurs paramètres atmosphériques. Le réseau utilisé pour ce TP est le réseau numéro 3 qui offre une résolution  $R = 10\,000$  (dans le domaine spectral considéré). On utilise le domaine spectral 4800 à 5200 angströms. Ce domaine contient notamment la raie H $\beta$  (4861.323 Å, série de Balmer de l'hydrogène), le triplet vert du magnésium et de fortes bandes moléculaires dans les étoiles froides.

Pour réaliser avec brio ce TP, les étudiants vont :

- Choisir leurs cibles. Ils peuvent pour cela utiliser le catalogue Pastel (Soubiran et al.) disponible via Vizier au CDS. Ce catalogue permet de faire des requêtes à la fois sur les coordonnées, la magnitude et les paramètres atmosphériques. Il est bien sur recommander de faire des « séries » en ne faisant varier qu'un paramètre à la fois.
- Les observer en pointant le télescope et en lançant les poses du spectrographe.
- Réduire les spectres.
- Examiner les séries de spectres pour en déduire des critères visuels de classification stellaire.

Pour ne pas perdre de temps en début de nuit, on peut choisir la (les 2) première(s) cible(s) pour les étudiants. Une étoile de type solaire de magnitude comprise entre 5 et 7 permettra un démarrage rapide et offrira un point de départ « intéressant ».

Critères pour une classification spectrale « à l'œil » :

#### **Température :**

- Présence de bandes moléculaires très forte dans les étoiles « très froides », moins de ~4 000 K. Les molécules sont assez fragiles et se dissocient en atomes quand on monte en température. Les bandes moléculaires dominent donc les spectres des étoiles froides. A plus haute température, elles sont progressivement « noyées » dans les raies atomiques. Finalement les molécules sont complètement dissociées.
- De ~5 000 K à ~8 000 K, les ailes de la raie Hbeta deviennent de plus en plus large. Ceci est du (entre autre) à l'effet Stark, des collisions (i.e. rencontres proches modifiant les niveaux d'énergie) entre atomes d'Hydrogènes et ions.
- Les raies des atomes neutres (qui dominent à basse température) deviennent de moins en moins intenses (nombreuses) quand on monte en température. C'est la conséquence de l'ionisation progressive des éléments avec la montée en température.

#### **Gravité :**

- Les ailes des raies du triplet du magnésium sont plus larges dans les étoiles naines que dans les étoiles géantes. L'effet n'étant pas aussi fort que pour Hbeta, il est recommandé de zoomer sur le triplet et de superposer un spectre de naine et un spectre de géante (on pourra guider un peu les étudiants ici). Attention, les raies du triplet sont également sensibles à la température, à la métallicité et à l'abondance en magnésium. Il faudra donc en particulier comparer deux spectres de températures et métallicités proches.

#### **Métallicité**

- L'intensité des raies décroît avec la métallicité. On voit que température et métallicité influent tous deux (en ce sens opposés) sur l'intensité des raies. La raie Hbeta est un critère bien venu pour lever la dégénérescence.

On peut évoquer le fait qu'il ne s'agit là que de quelques critères pour déterminer les paramètres atmosphériques et qu'il en existe d'autres. Avec des étudiants de niveau M2 ou plus, on peut présenter les bases de l'analyse détaillée : équilibre d'excitation, équilibre d'ionisation, etc...

**Observations complémentaires :** Etoiles Wolf Rayet, Etoiles Be, Nébuleuses planétaires, planètes, galaxie M31.

# Exercice: Réduction du spectre d'une étoile

M. Puech

**ImageJ** est un logiciel bien adapté pour travailler sur des images. Pour travailler sur des spectres 1D, nous allons utiliser le logiciel SPLAT, plus adapté. Celui-ci peut être téléchargé ici:

<http://astro.dur.ac.uk/~pdraper/splat/splat-vo/> . Un mode d'emploi (en anglais) est également disponible <http://astro.dur.ac.uk/~pdraper/splat/sun243.htx/sun243.html>

Nous allons utiliser ce logiciel pour réduire les spectres d'une étoile observée au télescope de 152 cm de l'OHP (vous effectuerez des observations similaires pendant le stage OHP).

ANCIEN Stage : Les données brutes ainsi que les fichiers de calibration se trouvent dans le fichier sur [sympa.obsprm.fr](http://sympa.obsprm.fr) (Documents partagés, dossier informatique/Seance1).

## 1. Inspection des données brutes

Ouvrez les trois fichiers correspondants aux trois spectres brutes : File > Open... et sélectionnez les trois fichiers à . Inspectez le header des trois fichiers en cliquant sur View > View FITS header. Vérifiez si le temps d'exposition des trois images est identique et calculez le temps d'exposition total. Le logiciel affiche une nouvelle fenêtre montrant les trois spectres superposés. Sur la fenêtre principale, sélectionnez le spectre correspondant au fichier en cliquant tour à tour sur les items Spectrum du menu de gauche. Le nom de fichier correspondant s'affiche en haut de la partie de droite de la même fenêtre. Sur la ligne Short Name, remplacez le nom Spectrum par quelque chose de plus explicite pour chacun des spectres afin de vous y retrouver et éviter que tous les fichiers ne portent le même nom, par exemple : , etc.

Cliquez sur le spectre et de-sélectionnez-le de la fenêtre d'affichage en dé-cliquant la boîte Displayed située en bas à droite. Cliquez maintenant sur le spectre correspondant au fichier . Changez sa couleur d'affichage (par exemple en rouge) en utilisant la fonction Colour disponible sur la partie de droite de la fenêtre principale. Ré-affichez le spectre mais en utilisant une troisième couleur (par exemple en vert).

Que remarquez-vous autour du pixel 780 ? Est-ce une raie en absorption ? Zoomez sur cette région en utilisant le bouton central de la souris pour vous faire une idée de sa largeur.

Fermez la fenêtre d'affichage.

## 2. Construction du MASTER BIAIS

Ouvrez les fichiers contenant les spectres de biais (10 fichiers). Les instruments modernes sont en général suffisamment stables pour qu'il soit suffisant de mesurer le courant de biais en début et en fin de nuit uniquement. Inspectez les fichiers correspondant aux mesures de début de nuit tour à tour. Vérifier qu'il n'y a pas d'artefacts sur aucun des fichiers. Remplacez la ligne Short Name pour tous les fichiers par , etc. afin d'utiliser des noms explicites.

Nous allons d'abord construire un biais moyen de début de nuit. Cliquez sur Operations > Simple maths of two spectra. Ajoutez les spectres et en les sélectionnant dans les listes de gauche et de droite puis cliquez sur ADD. Un nouvel item apparaît dans la liste de spectres correspondant au résultat de cette addition. Sélectionnez-le et ajoutez-lui le spectre . Répétez

l'opération jusqu'à que vous ayez construit la somme de tous les biais de début de nuit (attention à bien re-sélectionner le résultat de l'addition précédente à chaque nouvelle addition !). Fermez la fenêtre Simple maths of two spectra. Cliquez maintenant sur Operations > Simple maths constant. Sélectionnez l'addition de tous les biais de début de nuit et divisez la par le nombre de biais individuels. Fermez la fenêtre.

Répétez ces opérations pour construire un biais moyen de fin de nuit.

Affichez le biais moyen de début et de fin de nuit dans une même fenêtre avec des couleurs différentes et vérifiez qu'il n'y a pas eu de variation notable du courant de biais pendant la nuit. Nous pouvons donc construire un master biais en combinant les mesures de début et de fin de nuit. Pour cela, ajoutez les biais moyens de début et de fin de nuit et divisez le résultat par deux en vous inspirant des étapes précédentes.

Donnez lui un Short Name explicite comme , par exemple. Affichez le master biais dans une fenêtre et superposez un biais individuel. Quel est le bénéfice d'avoir sommé toutes les mesures individuelles? Fermez la fenêtre d'affichage. La réduction est un processus mettant en jeu un nombre important de fichiers et il est important de bien s'organiser. Une bonne règle à suivre est de fermer les fichiers dont nous n'avons plus besoin au fur et à mesure : sélectionnez l'ensemble des biais individuels et les résultats des calculs intermédiaires dans la liste des spectres de la fenêtre principale et appuyer sur la touche Suppr pour les enlever de la liste et ne pas risquer de les confondre avec les données brutes ou le Master Biais.

### 3. Construction du MASTER FLAT

Les flats ont également été mesurés en début et fin de nuit seulement car nous n'allons pas effectuer de mesure photométrique demandant une calibration très précise. Ouvrez les fichiers correspondants aux mesures de flat-field (6 fichiers). Commencez par leur donner des Short Names explicites, par exemple , etc.

Inspectez les fichiers individuellement : y-a-t-il des variations entre chaque mesure et plus spécifiquement entre le début et la fin de la nuit ? Peut-on directement sommer les mesures de début et de fin de nuit ? Que remarquez-vous autour du pixel 800 ? Qu'en concluez-vous sur l'origine de ce pic ?

Construisez un flat moyen à partir des mesures individuelles en vous inspirant de la manière dont nous avons construit le Master Biais. Affichez les valeurs de ce flat moyen en cliquant sur View > View/modify a spectrum, puis cherchez la valeur maximale et notez-la. Pour obtenir le master flat, normalisez le flat moyen en le divisant par la valeur maximale. Affichez la résultat et vérifiez qu'il est bien normalisé à 1. Une fois le Master Flat construit, n'oubliez de lui donner un Short Name explicite, par exemple

. Fermez les flats individuels et les calculs intermédiaires.

### 4. Réduction des spectres individuels

Réduisez chacun des trois spectres individuels en suivant l'équation fondamentale de la réduction.

N'oubliez de donner des Short Names explicites aux spectres réduits, par exemple : , etc.

Affichez dans une même fenêtre le spectre et sa version réduite. Observez comment la région autour du pixel 800 a été corrigée. Comparez la pente du spectre avant et après réduction.

Fermez la fenêtre d'affichage et les spectres brutes non réduits ainsi que les calculs intermédiaires.

#### 5. Combinaison des spectres

Faites la somme des trois spectres individuels réduits. Divisez le résultat par le temps d'exposition total. Cliquez sur View > View/modify data units. Dans la ligne Units écrire « Counts/s » et cliquez sur Set. La fenêtre d'affichage indique maintenant que nous avons affiché le spectre en comptes (ADU) par seconde. Pour une calibration plus physique, il faudrait mesurer le flux provenant d'une étoile de référence appelée « étoile standard » et la comparer à son flux théorique pour en déduire un facteur de conversion et passer en unités physiques de type  $\text{erg/s/cm}^2/\text{\AA}$ .

Fermez la fenêtre d'affichage et les spectres individuels réduits.

#### 6. Calibration en longueur d'onde

Il reste à calibrer l'axe des abscisses pour transformer les pixels en longueurs d'onde. Pour cela, deux spectres d'une lampe au Thorium ont été mesurés avec le même instrument juste avant les observations de l'étoile. Ouvrir ces deux spectres (fichiers et ) et donnez-leurs des Short Names explicites, par exemple et . Comparez les deux spectres et vérifiez qu'ils sont identiques (on a doublé la mesure au cas où l'une des deux serait défectueuse).

La calibration en longueur d'onde consiste à comparer la position de deux raies (de préférences brillantes) dans un des spectres de Thorium réalisés juste avant les poses scientifiques avec un spectre de référence de la même lampe mais dont la calibration en longueur d'onde est déjà très bien connue. Ouvrez (par exemple avec le logiciel GIMP) le fichier et repérez dans le spectre mesuré deux raies, de préférence aux deux extrémités du spectre (aidez-vous des groupes de raies pour ne pas vous tromper !). Relever leurs positions en pixels sur le spectre mesuré et en longueurs d'onde sur le spectre de référence. En déduire la dispersion par pixel du spectrographe en  $\text{\AA}/\text{pix}$ . A partir de la position d'une des raies que vous avez choisie, en déduire la longueur d'onde correspondant au premier pixel du spectre réduit. Dans la réalité, cette procédure se fait de manière automatique en utilisant l'ensemble des raies de référence, ce qui conduit à une calibration beaucoup plus précise. Pour appliquer la calibration en longueur d'onde au spectre réduit, cliquez sur View > View/modify spectra values. Dans la fenêtre qui s'affiche, désélectionnez la case Readonly puis cliquez sur

Operations > Modify coordinates. Dans la nouvelle fenêtre, vérifiez que vous êtes bien sous l'onglet Linear et que Transform coordinates est bien sélectionné. Entrez sur la ligne Scale Factor la dispersion que vous avez calculé en Å /pix (vous devriez trouver quelque chose comme 0.2314 Å/pix), et dans la ligne Offset la longueur d'onde du premier pixel que vous avez également calculé (quelque chose comme 4760 Å). Cliquez sur Apply et fermez les deux fenêtres. Dans la fenêtre principale, cliquez sur View > View/Modify spectral coordinates. Dans la nouvelle fenêtre qui s'affiche, sélectionnez sur la ligne Units les unités en Angstroms (Å) puis cliquez sur Set et fermez la fenêtre. Affichez à nouveau le spectre réduit final. Le logiciel à maintenant « calibré » l'axe des abscisses en longueur d'onde. Vous pouvez maintenant sauvegarder le spectre final réduit et calibré en cliquant sur File > Save et en entrant un nom de fichier comme . Vous pouvez également sauvegarder le résultat de la fenêtre d'affichage en cliquant sur l'icône JPEG/PNG situé en haut de cette fenêtre qui sera sauvegardé sous le nom .

## 7. Identification de raies

Pour finir, vous pouvez essayer d'identifier quelques raies typiques de ce type d'étoiles. Commencer par identifier les régions du spectre utilisables. Que pouvez-vous dire des régions  $\lambda < 4770 \text{ \AA}$ ,  $\lambda > 5245 \text{ \AA}$  et  $\lambda \sim 4940 \text{ \AA}$  ?

Quelle est l'origine de la raie la plus intense/large ? Identifiez d'autres éléments en vous aidant du catalogue de Coluzzi et al. disponible sur Vizier (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>): recherchez le mot-clé « Coluzzi » puis sélectionnez le catalogue illss. Cherchez dans ce catalogue les éléments présents dans les étoiles de même type spectral entre  $\sim 4800$  et  $5300 \text{ \AA}$ . Pour simplifier, on pourra d'abord rechercher le type spectral exact de cette étoile (HD196379) à partir de la base de données Simbad (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) pour ensuite chercher les raies correspondantes.

Pendant le stage OHP, nous chercherons à observer au T152 plusieurs étoiles de type spectral différent pour comprendre la relation entre les propriétés fondamentales des étoiles (métallicité, gravité, température) et la morphologie des raies spectrales (largeur, intensité, etc.).