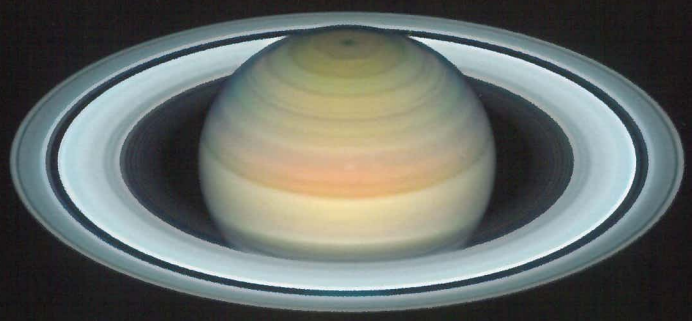
ASTRONOMIE

Astrosurf Magazine

Numéro 88 Septembre/Octobre 2017

Découvrir, observer et photographier les objets du ciel



Observer

Le Maïdo
M15 à l'honneur
L'amas de galaxies du Paon
La tête et l'encolure de Pégase
A l'extrêmité du ciel : Barkhatova 2
Helix Nebula, merveille du Verseau

Photographier le ciel

Cap vers l'extrême sud
Caméra couleur ou noir et blanc ?
Triton, une occultation peu commune
Le super pouvoir de l'effet Doppler-Fizeau

Tests de matériels et logiciels

Le Skyvision MT250
Six accessoires au banc d'essais
Dobson de 600mm : un télescope sur mesure
Vos jumelles sont héritières de 400 ans de progrès

Traitement d'images

Le traitement d'images avec Pixinsight (7)

88

Et aussi : Ephémérides de septembre et octobre 2017 • Le ciel en 9x13
Les essentiels de l'Astronomie • Etoiles et toiles • Galerie d'images
Actualités cométaire et météorique • Vie des clubs • Rencontres astronomiques
Ciel d'encre • Vues sur la Lune : le Mur Droit

Photos : D. Peach, E. Kraaikamp, F. Colas, M. Delcroix, R. Hueso, C. Spiridonov, G. Thérin, Pic du Midi Observatory (OMP-IRAP), Paris Observatory (IMCCE / LESIA), CNRS (INP), Europlanet 2020 RI, S2P

Prix : 7,20 euros

www.astrosurf-magazine.com

Par David Antao

Spectroscopie :

Le super pouvoir de l'effet Doppler-Fizeau !

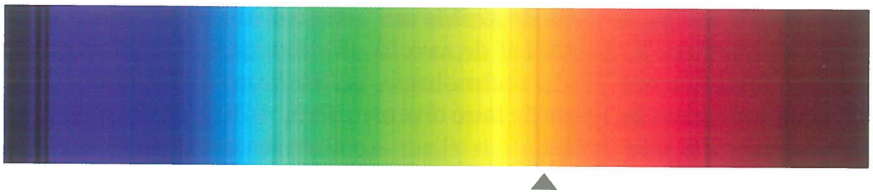
Après la petite introduction à la spectroscopie dans le précédent article (Astrosurf-Magazine N°85), je vais vous dévoiler le super pouvoir de l'effet Doppler-Fizeau

Comme j'ai pu le dire dans le précédent article : "*La matière a une propriété intéressante : elle interagit avec le rayonnement électromagnétique. Elle peut échanger de l'énergie sous forme de lumière, en absorbant ou en émettant des photons. Tous les éléments atomiques ont leurs signatures propres. C'est-à-dire qu'ils ont un jeu de raies spectrales situées à des longueurs d'ondes bien précises. C'est comme cela qu'on va pouvoir les reconnaître. Les molécules, qui sont des ensembles d'atomes, ont également leurs signatures. On peut même en voir sous forme de bandes dans les atmosphères des étoiles dites froides (3000°K). Cela va compliquer grandement l'identification des raies spectrales. Pour identifier un élément une seule raie ne va pas suffire. C'est un ensemble de raies qui va nous indiquer la présence ou non de l'élément. Exactement comme un code barre.*"

J'ai commencé à parler des raies spectrales. Mais qu'est-ce que c'est exactement ?

Regardons un spectre de plus près. On y voit bien sûr l'arc-en-ciel de couleurs (qui est le spectre du Soleil dont Newton a fait l'observation en 1666) mais aussi des raies sombres (les plus faciles à repérer !) et des raies claires qui sont moins évidentes (voir figure 1).

Il aura fallu attendre 1802 pour que William Hyde Wollaston découvre les raies spectrales pour la première fois ! Il en informe Joseph Von Fraunhofer en 1814 qui les observe le premier avec un télescope et mesure les longueurs d'onde de 324 raies sur les 574 qu'il avait vues dans le spectre solaire. Mais personne ne savait à quoi étaient dues ces raies. C'est Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff qui comprennent que chaque élément chimique a sa propre combinaison de raies ! Ce devait être une époque formidable où tout devait brûler facilement pour passer à la lumière des spectroscopes ! On remarque vite qu'il y a trois types de spectres.



1. Un spectre avec ses raies sombres et ses raies claires

En 1859 Gustav Kirchhoff énonce les **trois lois du rayonnement** de Kirchhoff. C'est la base de toute l'astrophysique :

- un spectre continu est émis par tout corps solide ou gazeux chaud **sous forte pression** (comme le cœur d'une étoile).
- un spectre avec des raies en émission est produit par du gaz **peu dense et chaud** (par exemple une nébuleuse diffuse),
- un spectre avec des raies d'absorption est produit par **du gaz placé entre l'observateur et une source de rayonnement continu** (enveloppe extérieure d'une étoile, nuage interstellaire froid, atmosphère terrestre, etc.).

Pour un gaz donné, les raies en émission ou en absorption **se situent exactement au même endroit sur le spectre**

L'auteur

David Antao a commencé l'astronomie en 2001. Après une longue phase d'observation en visuel, en 2008 il attrape le virus de la spectrométrie et fait de nombreuses présentations de cette discipline lors de rencontres d'astronomes amateurs. David est également président du club d'astronomie APAM (www.astrosurf.com/apam). Il anime également un petit club d'astronomie pour les enfants de son village (6-12 ans) auxquels il n'oublie pas de donner des notions de spectroscopie.

électromagnétique. J'insiste fortement sur les points-clés en gras !

Il aura fallu attendre le développement de la physique quantique pour mieux comprendre ce qu'il se passait vraiment. C'est au niveau des atomes qu'on trouve l'origine des raies spectrales.

Je vais tenter de vous l'expliquer simplement en quelques lignes, pour l'atome d'hydrogène qui est le plus simple des éléments. C'est aussi le plus abondant dans l'Univers (92 % en nombre et 75 % en masse). Enfin, c'est celui que l'on va mesurer en tant qu'astronome/astrophysicien amateur avec nos petits moyens. Mais vous allez voir, il y a de quoi être surpris des résultats ! Cet atome d'hydrogène est composé d'un noyau qui contient un seul proton, et un seul électron qui lui tourne autour, et dont on peut situer la probabilité de présence sur une "sphère" à une distance bien précise.

C'est l'électron l'élément principal. C'est lui qui va produire les fameuses raies spectrales ! Lorsque l'atome est au repos, c'est-à-dire quand on n'apporte pas d'énergie à l'atome, son électron va circuler dans ce qu'on appelle le niveau d'énergie 1, ou le "niveau fondamental". Mais si on apporte de l'énergie par exemple sous forme de photon (ça peut être de la chaleur aussi) l'atome va être excité et l'électron va faire un saut sur le ou les niveaux d'énergie supérieurs, c'est-à-dire sur les sphères d'énergie juste au-dessus, aux endroits où il peut exister (il ne peut pas aller où il veut !). L'atome va être, soit à un niveau d'énergie, soit à un autre. Il ne peut pas être entre les deux. Cela a été décrit par Niels Bohr en 1913. Les sauts se font par quanta (paquet) d'énergie, ce qui a conduit à la physique quantique. Le saut va dépendre de l'énergie absorbée par l'atome. En fonction de celle-ci, il va lui faire sauter 1 ou 2 ou 3, etc. niveaux d'énergie d'un coup[1] . Si la quantité d'énergie n'est pas exactement la bonne, il ne se produira rien. Une fois le saut de l'électron réalisé, l'atome n'a qu'un seul désir : revenir à son niveau fondamental. Pour ce faire, il va se libérer de l'énergie qu'il a en trop en émettant un photon et l'électron va passer sur l'orbite inférieure.

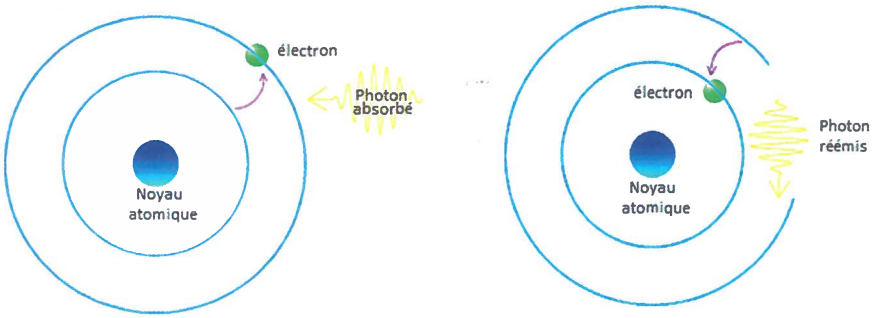
Pour résumer (voir figures 2 et 3) :

1. L'atome est au repos, on dit qu'il est à son niveau fondamental.
2. S'il reçoit un photon de la bonne quantité d'énergie, l'atome va réaliser un saut quantique sur le ou les niveaux d'énergie supérieurs. On dira qu'il a absorbé un photon.
3. Enfin, il va réémettre ce photon pour revenir à son niveau fondamental. Ce qui est important ici c'est que le photon va être réémis dans n'importe quelle direction !

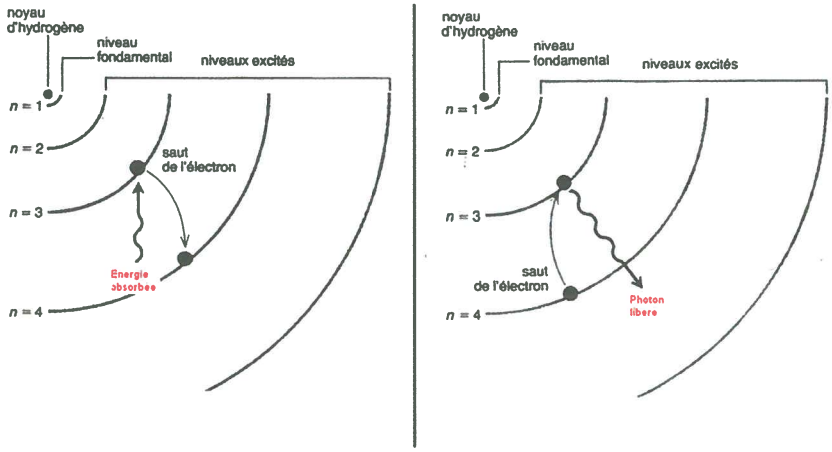
Ce qu'il faut bien comprendre c'est :

- S'il reçoit un photon de la bonne quantité d'énergie, celui-ci est absorbé, donc, **la quantité de photons dans cette direction diminue**. On va produire une **raie en absorption** qui sera plus sombre que l'environnement proche du spectre lumineux.
- Puis il va réémettre ce photon pour revenir à son niveau fondamental **dans n'importe quelle direction !** Donc si on prend une direction au hasard on va voir arriver des photons, ce qui va produire **des raies brillantes, dites en émission**.

La figure 4 reprend tout cela sous forme imagée et résume les trois lois de Kirchhoff



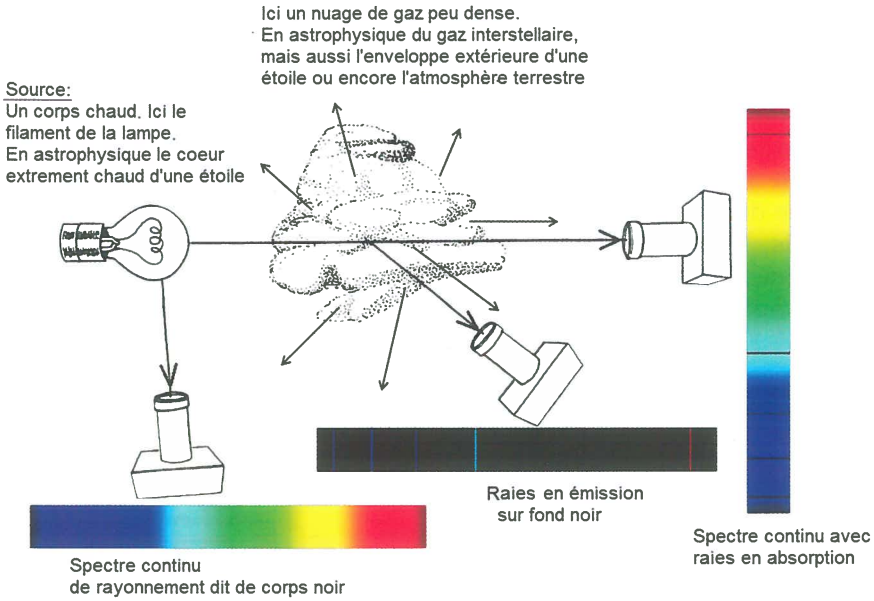
2. Absorption et réémission de photons



2. Absorption et réémission de photons dans le cas de l'atome d'hydrogène

(1) Une animation présentant ce phénomène est proposée sur le site http://astro.unl.edu/classaction/animations/light/hydrogenatom.html

4. Représentation schématique des trois lois de Kirchhoff du rayonnement.



du rayonnement. En fonction de la direction où l'on vise avec le spectroscope, on va avoir des spectres différents : spectre continu, à émission ou à absorption.

La figure 5 donne la liste des longueurs d'onde que doivent avoir les photons pour interagir avec l'électron de l'atome d'hydrogène et uniquement celui-ci afin de produire des sauts de niveau d'énergie. On remarque que pour passer du niveau 1 aux autres niveaux, il faut apporter de l'énergie à 94 nm ou à 95 nm ou à 97 nm ou à 103 nm ou à 122 nm (voir schéma pour identifier les sauts auxquels cela correspond). On appelle ces différents sauts et donc les raies correspondantes, la série de Lyman, qui correspond à des photons situés dans l'ultraviolet (UV).

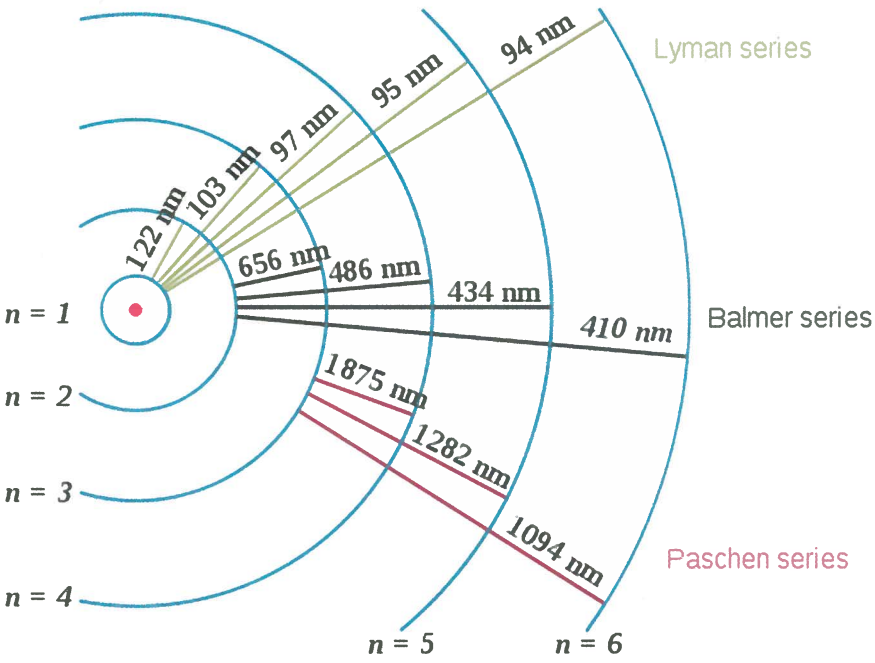
Puis pour passer du niveau 2 au suivant il faut une énergie correspondant à 410 nm (saut du niveau N=2 au niveau N=6) ou à 434 nm (saut du niveau N=2 au niveau N=5) ou à 486 nm (saut du niveau N=2 au niveau N=4) ou à 656 nm (saut du niveau N=2 au niveau N=3). C'est ce qu'on appelle la série de Balmer et c'est elle qui va nous intéresser principalement, car elle est située dans le visible.

Ensuite on aura la série de Paschen pour passer du niveau 3 aux niveaux suivants avec des énergies de 1094 nm ou de 1282 nm ou de 1875 nm , située elle dans l'infrarouge (IR) (voir figure 5 pour identifier les sauts).

Avec notre spectroscope, sur une étoile chaude (de type spectral A), les raies de l'hydrogène sont intenses et bien visibles (voir figure 6 un exemple de spectre 2D pris avec une caméra noir et blanc, ce qui est dommage pour la beauté de l'arc-en-ciel, mais qui est nécessaire pour gagner en sensibilté). On voit déjà très bien (voir figure 6) les raies en absorption (les trous, les vides) sur le spectre continu (l'arc-en-ciel, la ligne blanche ici) qu'on nommera continuum avec des raies en absorption.

Pour passer de l'image 2D à celle 1D, il faut d'abord réaliser une transformation géométrique de l'image tout d'abord pour mettre le continuum du spectre bien horizontal et ensuite pour que les raies spectrales soient les plus verticales possible. Et là on dit merci à l'outil informatique ! Comme l'image 2D est composée de pixels rangés en X et Y, chaque pixel porte l'information de son intensité lumineuse. Pour une caméra de 16 bits,

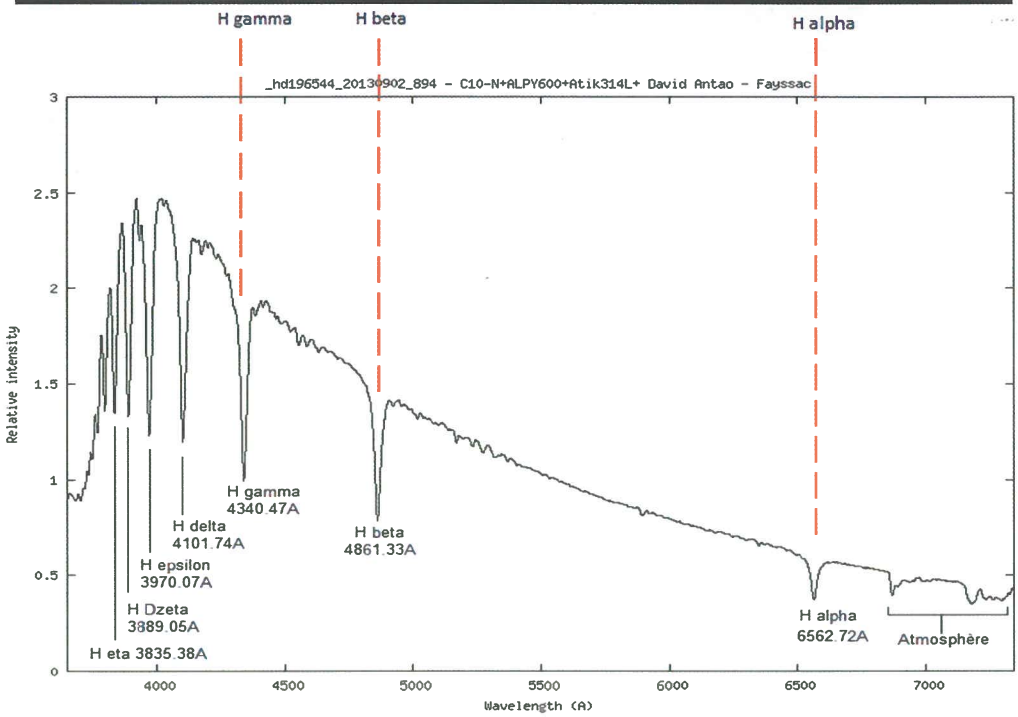
5. Liste des longueurs d'onde que doivent avoir les photons pour interagir avec l'électron de l'atome d'hydrogène pour produire des sauts de niveau d'énergie



Nom	Hα H alpha	Hβ H beta	Hγ H gamma	Hδ H delta	Hε H epsilon	Hζ H Dzêta	Hη H êta
Longueur d'onde (nm)	656,3	486,1	434,1	410,2	397,0	388,9	383,5
Longueur d'onde En Angström (A)	6563	4861	4341	4102	3970	3889	3835
Couleur	Rouge	Cyan	Bleu	Violet	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)	(Ultraviolet)
Transition d' n Absorption	2 → 3	2 → 4	2 → 5	2 → 6	2 → 7	2 → 8	2 → 9
Transition d' n Emission	2 ← 3	2 ← 4	2 ← 5	2 ← 6	2 ← 7	2 ← 8	2 ← 9

Source Wikipédia

6. Spectre d'une étoile de type A, sur lequel les raies de l'hydrogène sont bien visibles



7. Spectre d'une étoile de type A, en version 1D

qu'on utilise couramment, chaque bit porte pour l'information de l'intensité, le niveau de gris qui va du noir absolu, valeur 0, au blanc saturé, 65536 ADU (soit 2^{16}). En spectroscopie, il ne faudra jamais aller dans les valeurs limites, sinon on va perdre de l'information !

Donc quand le spectre 2D a subi la bonne transformation géométrique, il suffit d'additionner dans chaque colonne la valeur des pixels pour aboutir à un spectre ne faisant alors plus qu'une seule ligne : c'est le "profil de raies" ou "spectre 1D". Cela nous donne le flux relatif que l'on va trouver sur l'axe des ordonnées et on associera une longueur d'onde à chaque pixel en abscisses sur notre spectre 1D (une fois que ce dernier sera calibré en longueur d'onde). Pour ceux qui veulent aller plus loin dans cette compréhension, je vous conseille l'excellent cours de Christian Buil que vous retrouverez ici : http://www.astrosurf.com/buil/us/stage/tutorial.htm

La figure 8 montre le même spectre en version 1D représentant la longueur d'onde en angström (1 angström = 10^{-10} m) par rapport à l'intensité relative. Les astronomes vont préférer parler en angström plutôt qu'en nanomètre. La relation est la suivante : 1A = 0,1 nm. Le flux relatif est normalisé pour une longueur d'onde précise, dans notre cas entre 5540 et 5580 Å qui correspondra au 1, afin de pouvoir comparer les spectres les uns avec les autres plus facilement.

Arrêtons-nous un instant pour prendre un peu de recul sur tout cela ! On est en train d'observer un spectre d'un objet astronomique, ici une étoile, située à plusieurs années-lumière de nous. Une année-lumière représente environ dix mille milliards de kilomètres, et l'on parle ici de plusieurs fois cette distance ! Les raies qui sont visibles sur notre spectre, sont produites par des électrons dont la taille est d'environ 10^{-12} mètres. Pour ma part, et je ne sais pas si vous partagez cela avec moi, je trouve que c'est tout simplement vertigineux ! C'est là que réside toute la beauté de la spectroscopie qui relie l'infiniment grand à l'infiniment petit.

L'effet Doppler-Fizeau

Nous venons de voir à quoi sont dues les raies spectrales, nous pouvons maintenant passer à l'effet Doppler.

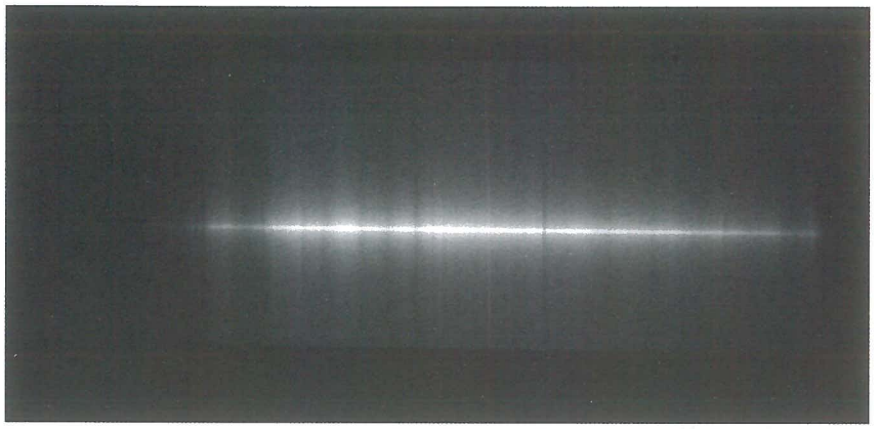
Conjointement pour l'époque, c'est-à-dire à quelques années d'écart, Christian Doppler en 1842 et Hippolyte Fizeau en 1848 découvrent que si une source est en mouvement et qu'elle produit des ondes, sonores ou électromagnétiques, celles-ci vont être modifiées en fonction du sens de déplacement de la source lumineuse ou sonore. Pour faire simple, si la source est en mouvement, celui-ci va modifier la position des raies spectrales, exactement comme les ondes sonores qui sont modifiées lorsque l'ambulance vient vers

nous puis s'éloigne à toute vitesse !
Si la source se rapproche de nous, les ondes vont être comprimées et donc les raies décalées vont être déplacées vers les plus courtes longueurs d'ondes, c'est à dire vers le bleu. Si elle s'éloigne, celles-ci vont être décalées vers les plus grandes longueurs d'onde, soit vers le rouge. Dans la première moitié du XXème siècle, on s'est rendu compte que presque toutes les galaxies (nébuleuses spirales à l'époque) s'éloignaient de nous, car leurs raies étaient décalées vers le rouge. Le terme "redshift" est né à ce moment-là.
Très bien tout cela ! Mais nous, simples amateurs avec notre petit télescope de 20 cm ou guère plus et notre spectroscope, pouvons-nous avoir accès à ces informations-là ?
La meilleure façon de répondre est de faire des essais. Pointons une galaxie, celle d'Andromède au hasard. Et laissons rentrer sa lumière dans notre spectroscope. Sur la figure 8 on peut voir le spectre 2D réalisé avec un spectroscope Alpy 600 et un télescope Newton de 250 mm monté sur une monture EQ6. Le résultat est le compositage de 10 poses de 1200 s avec une caméra ATIK314L+.
La figure 9 montre le spectre 1D de cette même série. On voit bien la correspondance de l'un vers l'autre.
Maintenant il ne reste plus qu'à mesurer la position des raies et à les comparer à leurs valeurs au repos et avec une formule relativement simple (la loi Doppler-Fizeau), on pourra ainsi estimer la vitesse de cette galaxie par rapport à nous.
Voici la formule :

$$Vr = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{repos}}{\lambda_{repos}} \cdot c$$

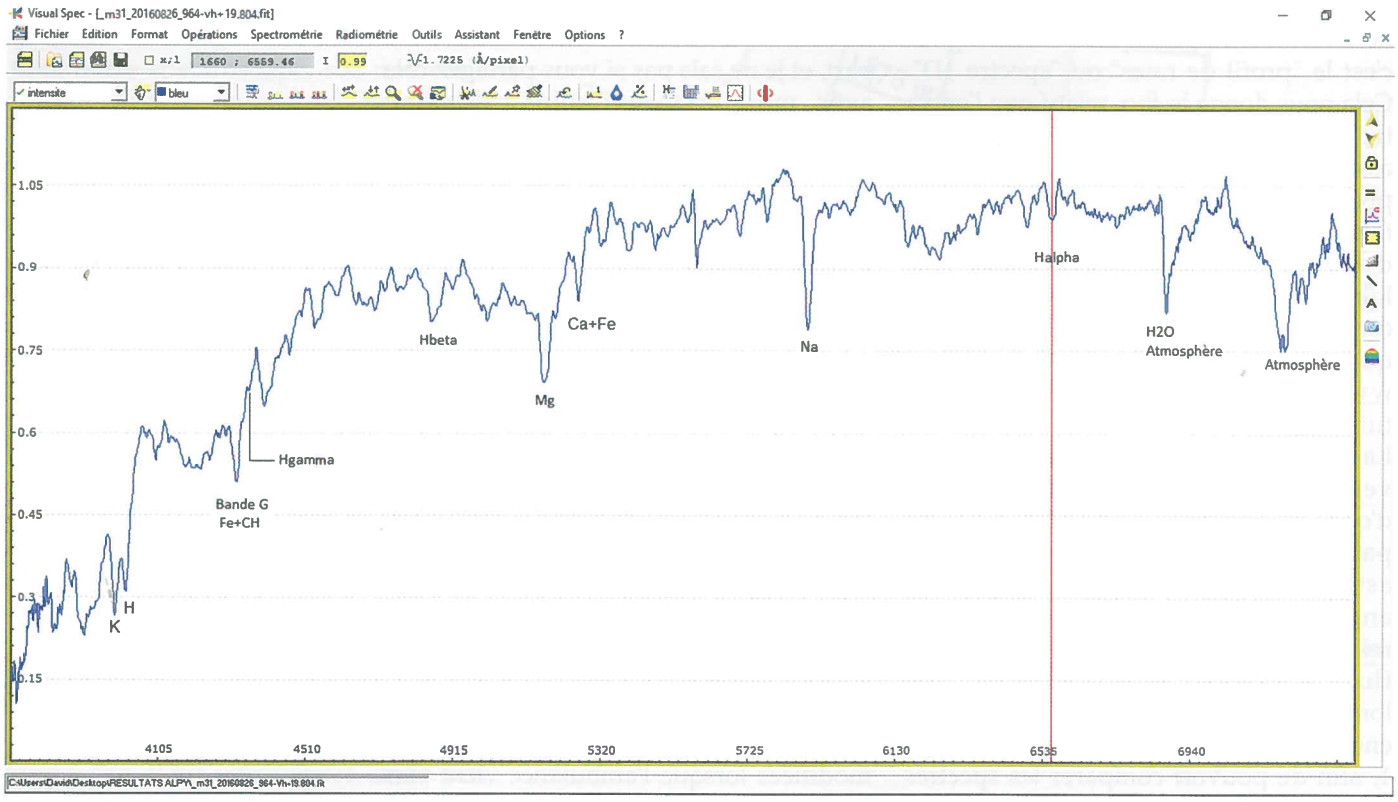
Avec :
Vr : vitesse radiale en km/s (la valeur que l'on cherche à mesurer)
λ_{obs} : longueur d'onde observée (mesurée avec le spectroscope)
λ_{repos} : longueur d'onde au repos (donnée par les tables spectrales)
c : vitesse de la lumière en km/s

Si Vr est positif, cela signifie que l'objet s'éloigne de nous. Si Vr est négatif, cela signifie que l'objet se rapproche de nous.



8. Spectre 2D de la galaxie d'Andromède

9. Spectre 1D de la galaxie d'Andromède sur lequel plusieurs raies principales ont été identifiées



Mesure de la vitesse relative de M31

Le tableau de la figure 10 présente les résultats des mesures de λ_{obs} effectuées sur plusieurs raies de la galaxie d'Andromède et la vitesse radiale calculée avec la formule précédente.

J'ai réalisé 5 mesures pour chaque raie spectrale grâce au logiciel gratuit Visual Spec[2]. L'incertitude correspond uniquement à l'incertitude des mesures.

La galaxie d'Andromède est la galaxie spirale la plus proche de nous. La valeur de sa vitesse radiale est négative, cela signifie donc qu'elle se rapproche de nous, ou par principe de relativité que nous nous rapprochons d'elle à 277,5 km/s d'après nos mesures.

Maintenant, comparons avec le CDS, le centre de données astronomiques de Strasbourg et sa base de données astronomiques SIMBAD[3] :

Valeurs fournies par des astrophysiciens professionnels : -300 km/s

Notre valeur : -277,5 km/s ±16 km/s

Erreur de 22,5 km/s soit 8,1%

M31	Mesures				
Raies	Moyenne	Incertitude	Valeur au repos	Calcul Vr en Km/s	Incertitude en Km/s
raie H du calcium	3964.79	0.32	3968.49	-279.4	24.1
Na I	5887.77	0.03	5892.94	-263.2	1.5
Mg I	5169.56	0.59	5174.54	-288.6	34.4
H alpha	6556.71	0.08	6562.81	-278.8	3.9
			Moyenne	-277.5	16.0

10. Mesures de λ_{obs} et de Vr pour la galaxie M31. Les longueurs d'onde sont exprimées en angström.

Mesure de la vitesse relative de la galaxie NGC1700

Reproduisons la même expérience avec une galaxie un peu plus éloignée, NGC1700, située à une distance d'environ 177 millions d'années-lumière.

La figure 11 montre une comparaison entre les spectres de NGC1700 et de M31. On remarque qu'on a le même type de spectre, mais qu'il y a du décalage vers le rouge, sauf sur les raies atmosphériques H2O, car ces raies font partie de notre atmosphère terrestre.

Le tableau de la figure 12 présente les résultats des mesures de λ_{obs} et de Vr pour la galaxie NGC1700. Comme pour M31, chaque raie est mesurée 5 fois.

Nous trouvons une valeur de Vr égale à 3 960 km/s ± 44,6 km/s, contre une valeur de 3 892km/s mesurée par les astrophysiciens professionnels, soit une erreur de 68 km/s (environ 1,7%).

Je vous laisse juger des possibilités qu'offrent les spectroscopes montés sur nos télescopes d'amateurs. J'espère avoir partagé avec vous, le vertige que j'ai ressenti et que procure cette discipline, qui est, je le répète encore une fois, à la portée de tout astronome amateur un tout petit peu rigoureux.

Les idées et les sujets d'études sont divers et variés, de l'étude d'une seule nuit à des suivis de plusieurs jours, semaines, mois ou années. Chacun devrait y trouver son propre intérêt. Quelques idées : étude de comètes (voir article sur Astrosurf-Magazine N°67), d'étoiles doubles, d'étoiles variables en tout genre, novae, supernovae, galaxies, nébuleuses, le monde des planètes du Système Solaire, observation de la Lune, etc.

Je remercie mes collègues du groupe **ARAS**[1] (Astronomical Ring for Access to Spectroscopy) , la société **Shelyak**[2] qui fournit beaucoup de documents pédagogiques et **Christian Buil**[3] qui fait énormément pour nous ouvrir les portes du monde merveilleux de la spectroscopie.

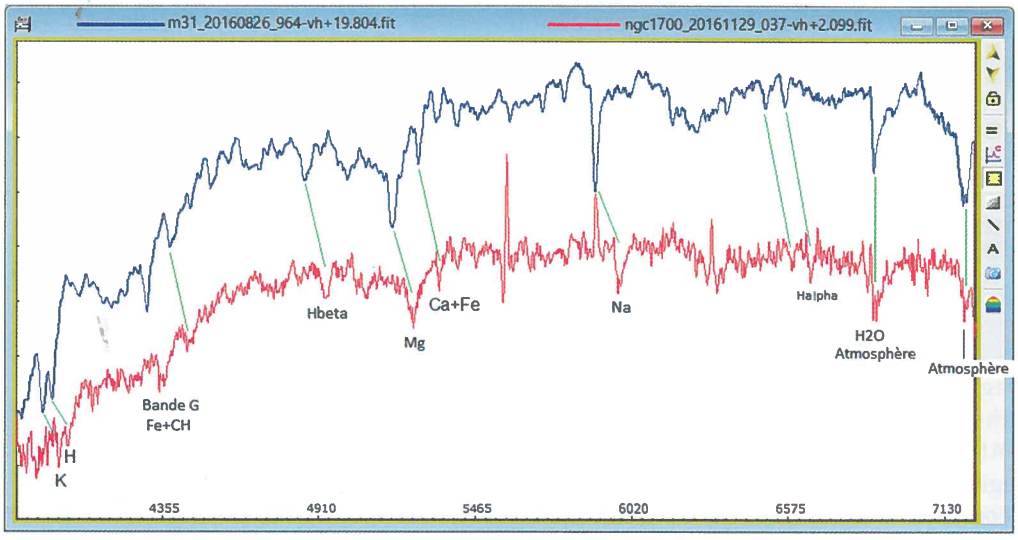
(1) www.astrosurf.com/aras

(2) www.shelyak.com

(3) www.astrosurf.com/buil

12. Mesures de λ_{obs} et de Vr pour la galaxie NGC1700. Les longueurs d'onde sont exprimées en angström.

NGC1700	Mesures				
Raies	Moyenne	Incertitude	Valeur au repos	Calcul Vr en Km/s	Incertitude en Km/s
raie H du calcium	4020.76	0.21	3968.49	3948.8	16.1
Na I	5970.33	2.33	5892.94	3936.9	118.7
Mg I	5243.22	0.33	5174.54	3979.0	19.2
H alpha	6649.79	0.54	6562.81	3973.3	24.6
			Moyenne	3959.5	44.6



11. Comparaison des spectres des galaxies M31 et NGC1700

(2) On peut le télécharger sur le site de l'auteur, Valérie Desnoux : http://www.astrosurf.com/vdesnoux

(3) Site Internet : http://simbad.u-strasbg.fr/simbad