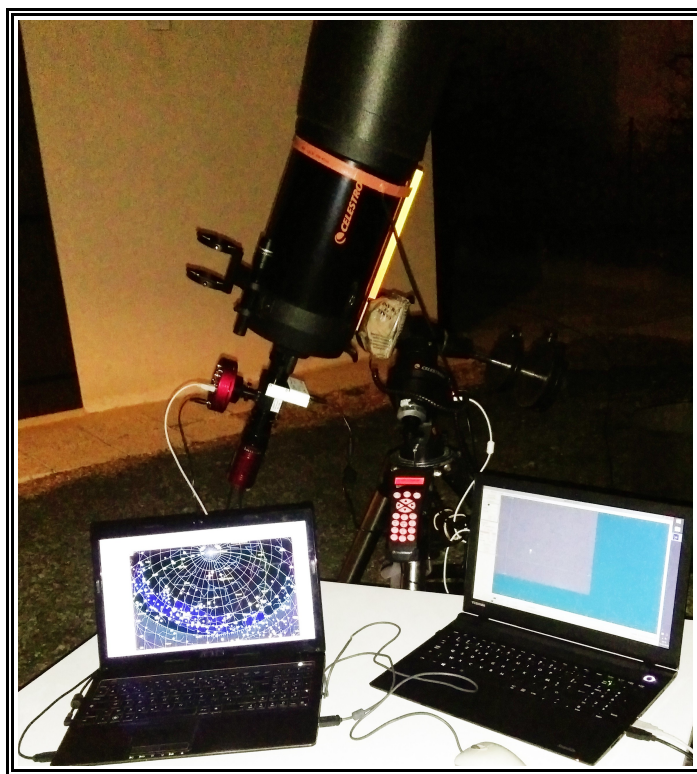


Rapport de Stage pour le DU-ECU

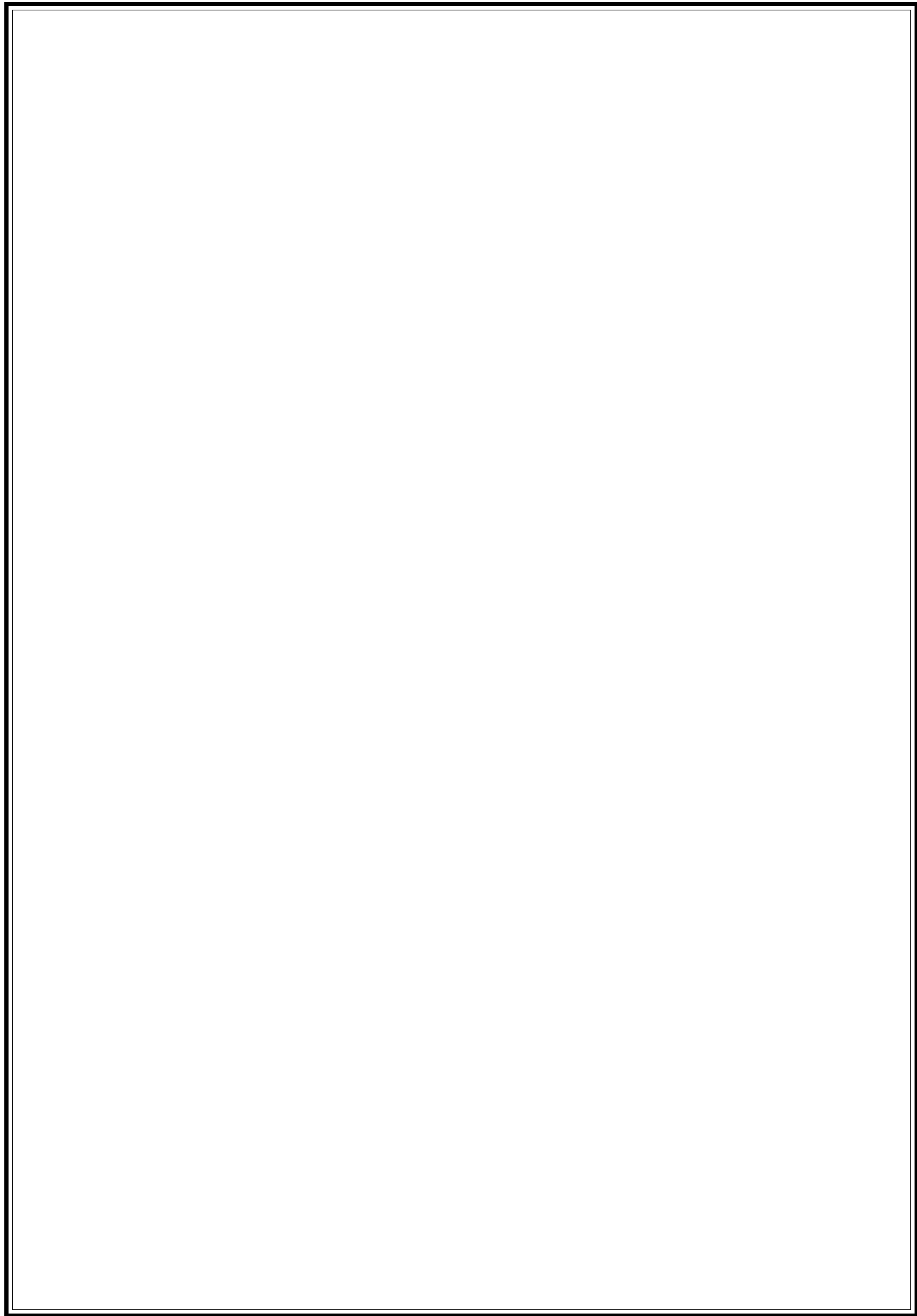
« Spectroscopie extragalactique »

avec le spectrographe

"Alpy600"



par l'élève Étienne Bertrand



Sommaire

I – Objectif des observations

page : 1

II – Présentation du matériel et du site d'observation

A – Le matériel

1 – Le tube optique

page : 1

2 – La monture

page : 2

3 – Le spectrographe

page : 2

B – Le site d'observation

page : 3

III – Description du maniement pour obtenir et résoudre un spectre

A – L'acquisition des données

page : 4

B – Le traitement des données

page : 6

IV – Présentation des résultats

A – Le duo des Chiens de Chasse (NGC5194 – NGC5195)

page : 12

B – Calcul de la loi de Hubble

page : 16

1 – Calcul de l'âge de l'Univers

page : 17

C – La supernova SN2016COJ

page : 18

D – Le quasar 3C273

page : 23

E – Le quasar KUV 18217 + 6491

page : 28

F – Le quasar PG 1634 + 706

page : 30

G – Le quasar CSO1061

page : 34

Conclusion

Fond documentaire

Annexe

Remerciements

I – Objectif des observations

Ce compte rendu sur la spectroscopie extragalactique est en fait une deuxième version du travail que l'on doit rendre pour le DU ECU. La première version, commencée au milieu de l'année, avait pour but d'analyser les objets se trouvant dans notre galaxie : étoiles, et leurs différents aspects O, B, A, ... M, symbiotiques, cataclysmiques, Mira,... puis les nébuleuses et les comètes.

Les objets lointains sont passionnants car ils collent tout à fait avec les cours qui m'ont passionné à savoir : Galaxies, Ondes et Instruments et Cosmologie.

C'est donc une belle aventure qui s'offrait au pays des Redshifts, de la constante de Hubble et des séries de Balmer et de Lyman.

Ma technique de la spectroscopie s'améliorant dans l'année, j'ai décidé de faire des objets de moins en moins lumineux, et de plus en plus lointains pour voir comment ces objets apparaissent au travers de leurs spectres, et de ce fait, mieux les comprendre avec un nouveau regard.

La présentation des résultats se répartira selon cet ordre :

- Regard sur les galaxies : le duo des chiens de chasse M51 composée de 2 galaxies NGC5194 et NGC5195.
- Le calcul de la loi de Hubble (avec les spectres que j'ai acquis).
- La supernova SN2016COJ qui a eu lieu dans la galaxie NGC4125
- L'étude de Quasar ; 3C273, KUV18217+6491, PG1634+607 et CSO1601

II – Présentation du matériel et du site d'observation

A – Le matériel

1 – Le tube optique : Celestron 8 (C8)

Le tube optique est un Celestron C8 ; Schmidt-Cassegrain de 20 cm de diamètre, d'une focale de 2000mm. Son ouverture est de $F/D = 10$. Il est appelé "C8" dans le langage des astronomes amateurs. Il est très apprécié car compact et polyvalent, est intéressant, à la fois, pour le ciel profond, le planétaire avec une barlow et d'autres utilisations comme la spectroscopie ou la photométrie. En rajoutant un **réducteur de focale**, on le fait passer à **1260mm** avec une ouverture de $F/D = 6,3$ ce qui le rend assez lumineux et fait la joie des astrophotographes. Les industriels l'apprécient aussi, car composé de miroirs sphériques ce qui le rend peu coûteux à produire.

Son principe de fonctionnement :

De conception proche du télescope de type Cassegrain, le télescope Schmidt-Cassegrain présente toutefois quelques particularités notables :

- Le miroir primaire parabolique sur le télescope de Cassegrain devient un miroir sphérique, plus simple et moins coûteux à fabriquer ;
- Pour corriger les aberrations sphériques engendrées par le miroir primaire, une lame de Schmidt est placée en entrée du télescope.

Calculons le pouvoir séparateur du tube optique. Sachant que le diamètre (D) est de 0,2 mètres, et que la longueur d'onde (λ) prise dans le visible est de 5000Å :

$$\theta = 1,22 \times (\lambda / D)$$

$$\theta = (5000 \times 10^{-10}) / 0,2$$

$$\theta = 3,05 \times 10^{-6} \text{ radians}$$

Pour faire la correspondance en degrés, on multiplie ce résultat par 180° et on le divise par π .

Ce qui fait un pouvoir séparateur de :

$$\theta = 3,05 \times 10^{-6} \times 180 / \pi$$

$$\theta = 1,7475 \times 10^{-4}^\circ$$

Sachant que $1^\circ = 3600''$

$$\theta = 1,7475 \times 10^{-4} \times 3600$$

$$\theta = 0,6921''$$

On trouve un pouvoir séparateur de 0,6921''

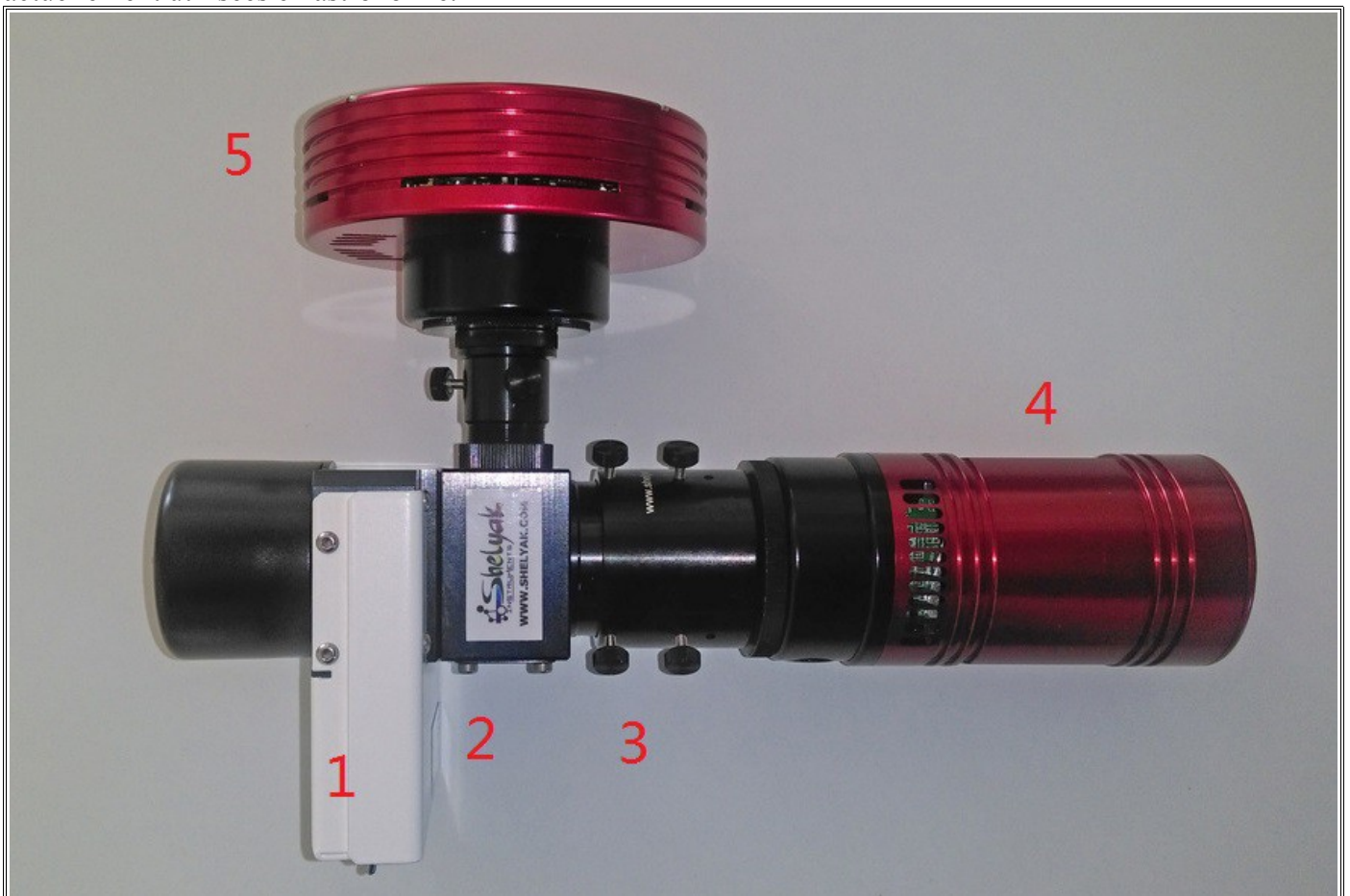
2 – La monture : NEQ6

La monture est un des éléments les plus importants car elle doit permettre la précision dans la recherche des objets faibles (y tomber dessus). Elle doit permettre une localisation facile et doit faire de longues poses en autoguidage avec une erreur périodique la plus faible possible.

La monture que j'utilise remplit ces critères. C'est une **SKY WATCHER NEQ6**. Ce qui rend cette monture très confortable est l'option EQMOD ie un câble USB relie la monture au PC pour la piloter depuis une carte du ciel. Sur cette carte du ciel on peut mettre différents catalogues d'étoiles jusqu'à magnitude ~11 et on peut même aller jusqu'à la magnitude 21 avec le catalogue USNO B1. Mais trop d'étoiles ralentissent le système car cela demande beaucoup de calculs... Achetée au cours de l'année 700€ au président du club d'astronomie de Montalivet.

3 – Le spectrographe : Alpy600

Le spectrographe Alpy 600 est un grism (réseau + prisme) de 600tt/mm. L'Alpy 600 offre une compacité, une résolution (autour de 10Å; pouvoir de résolution $R \sim 600$) et une dispersion bien adaptées aux caméras actuellement utilisées en astronomie.



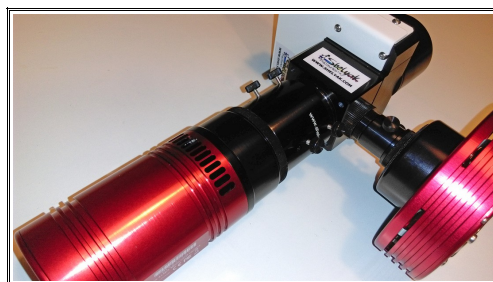
Sur cette photo le spectrographe Alpy600 est complet, composé de ses trois modules et de deux caméras. La particularité de ce spectrographe est d'être modulaire, ie, on peut commencer à faire des spectres avec seulement le module spectro, et quand on le souhaite, ou quand le budget le permet on peut le compléter avec le module de guidage et le module de calibration.

- Le spectrographe est le module **N°3** ici monté sur une caméra monochrome Atik414EX **N°4**.
- Le module de guidage est le module **N°2** qui permet d'obtenir l'image du champ ; il est monté sur une caméra monochrome Atik 314L+ (**N°5**).
- Le module de calibration qui contient les deux lampes ; celle pour faire les flats au Tungstène et celle pour la calibration des spectres à l'Argon/Néon/Hydrogène est le **N°1**.
- Le **N°4** est la caméra d'acquisition, monochrome Atik414EX.
- Le **N°5** est la caméra de guidage, monochrome aussi Atik 314L+.

Au niveau budget : (se référer à la société Shelyak : <http://www.shelyak.com>)

Prix d'indicateurs :

- Le spectro Alpy600 = 695 €
- Le module de guidage = 785 €
- Le module de calibration = 654 €
- La caméra de guidage = 1354 €
- La caméra d'acquisition = 1420€
- Total = 4908 €**



Voici le calcul pour connaître le champ de vision avec la caméra de guidage Atik 314L+ :

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{d}{2 \cdot f} \right)$$

- d est la longueur d'un bord ou de la diagonale de l'image optique, c'est-à-dire de la pellicule ou du capteur de l'appareil ;
- f est la focale de l'objectif ;
- \arctan est la fonction **arc tangente**.

$f = 1260 \times 10^3 \mu\text{m}$, α étant en degré, d étant la taille d'un bord du capteur en μm .

Atik 314L+ : capteur 1392 x 1040 pixels avec une taille de pixels de 6,45 μm .

Soit : **8978,4** x **6708** μm .

2 x \arctan x (**8978,4** / (2 x 1260 x 10³)) puis on calcule avec **6708** μm et l'on obtient un champ de : **0,408° x 0,305°** ou **24,48' x 18,3'**

B – Le site d'observation : Vaux sur Mer (17640)

Le site utilisé pour la pratique de la photographie et de la spectroscopie, est un site en bord d'océan dans la Charente-Maritime, donc moyennement bon au niveau seeing, et pour l'altitude je suis à 10 mètres au dessus du niveau de la mer. On est loin du Chili et du désert d'Atacama...

En plus de cela, mon site se trouve à 6 mètres d'un lampadaire à Sodium en bord de route ! La chance a voulu qu'il y ai juste devant mon garage, un transformateur EDF, grand comme une petite maisonnette et par chance depuis mon poste, le lampadaire est caché par ce transformateur EDF, ouf !

Bien que ce site ne soit pas extraordinaire, il est quand même extrêmement pratique car le telescope monté, dans un garage, et en le déplaçant sur 2 mètres de distance, il est près à être utilisé. Fini les observations à la campagne à 30 kms de la ville, ou il faut tout démonter, mettre dans la voiture (parfois descendre le matériel d'un étage) puis faire la route, tout remonter, mettre en station, observer, puis tout refaire en sens inverse, et avec le froid l'hiver !

L'hiver, quand les nuits sont froides, je peux aller me réchauffer avec une tasse de thé ou d'infusion.

L'avantage aussi est l'électricité : utile et indispensable pour le matériel, les ordinateurs, ainsi que pour la

lampe à Argon pour la spectroscopie.

III – Description du maniement pour obtenir et résoudre un spectre

A – L'acquisition des données

Pour traiter des spectres il faut prendre la cible, le fichier d'argon, ainsi qu'une étoile de référence à la même hauteur atmosphérique que la cible, ainsi que tous les fichiers maîtres : offsets, darks cible, darks étoile de référence, et les flats.

Pour vous montrer comment traiter et obtenir les spectres, je vais prendre comme exemple la galaxie NGC4449 avec l'étoile de référence HD115271.

Exemple d'acquisition de données, pour traiter la galaxie NGC4449 :

- **6 spectres** de la galaxie **NGC4449** d'une durée de **600 secondes**
- **51 offset** de **0 seconde**
- **8 darks** de **600 secondes**
- **41 flats** de **3 secondes**
- **8 spectres** de l'étoiles de référence **HD115271 A7V** d'une durée de **60 secondes**
- **7 darks** de **60 secondes**
- **1 spectre** de la **lampe de calibration à l'argon/néon** durée **120 secondes**.

Ci dessous les images de traitement : tels qu'ils apparaissent bruts. Le flat permet de voir la largeur de la fente du spectrographe.

Image d'offset 0 seconde



Image dark (ici pause de 60 secondes)

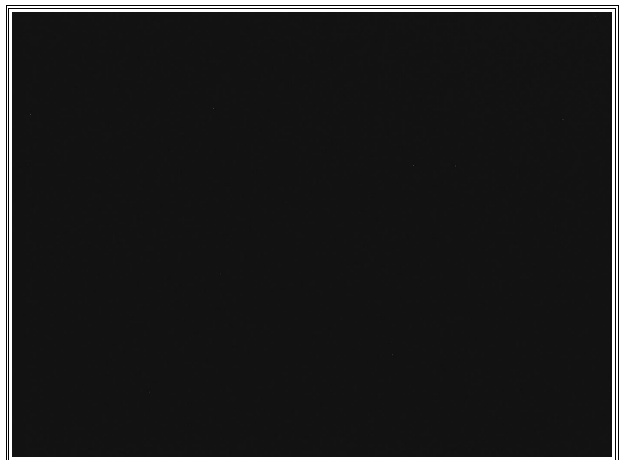
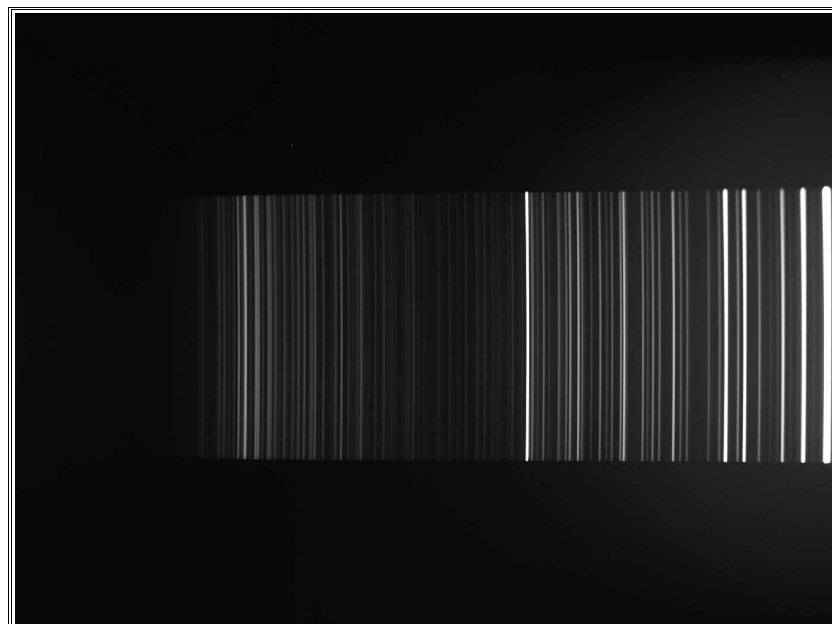


Image de Flat (avec caméra Atik414EX : 3 secondes)



Voici l'image de la lampe de calibration composée d'Argon/Hydrogène/Néon prise avec la caméra Atik 414EX d'une durée de 120 secondes) :



On remarque sur cette image seulement des raies d'émission. C'est ici le but recherché, car nous avons pris cette image, avec la même caméra et la même configuration que lors de l'acquisition des spectres.

Ce sont ces raies connues précisément, qui permettront au logiciel de calculer un polynôme afin d'étalonner en longueur d'onde chaque pixel. Chaque pixel aura une longueur d'onde attribuée, ainsi l'on pourra avoir une plage spectrale sur toute la surface du capteur CCD.

Il est à noter que le capteur CCD de cette caméra n'est plus sensible dans le proche ultraviolet (en dessous de 3600Å), donc en dessous de cette longueur d'onde on n'aura plus de signal, seulement du bruit de lecture. Le capteur étant un peu court, on ne peut plus avoir de signal dans le rouge après 7560Å.

Voici l'identification de toutes les raies présents avec la lampe de calibration Relco :

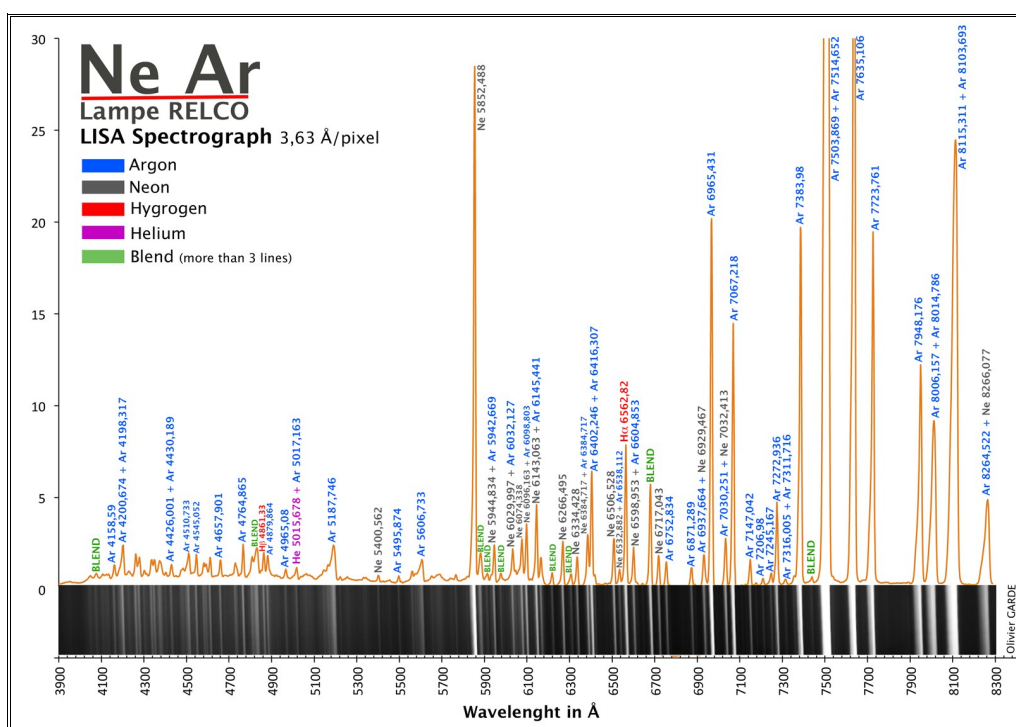


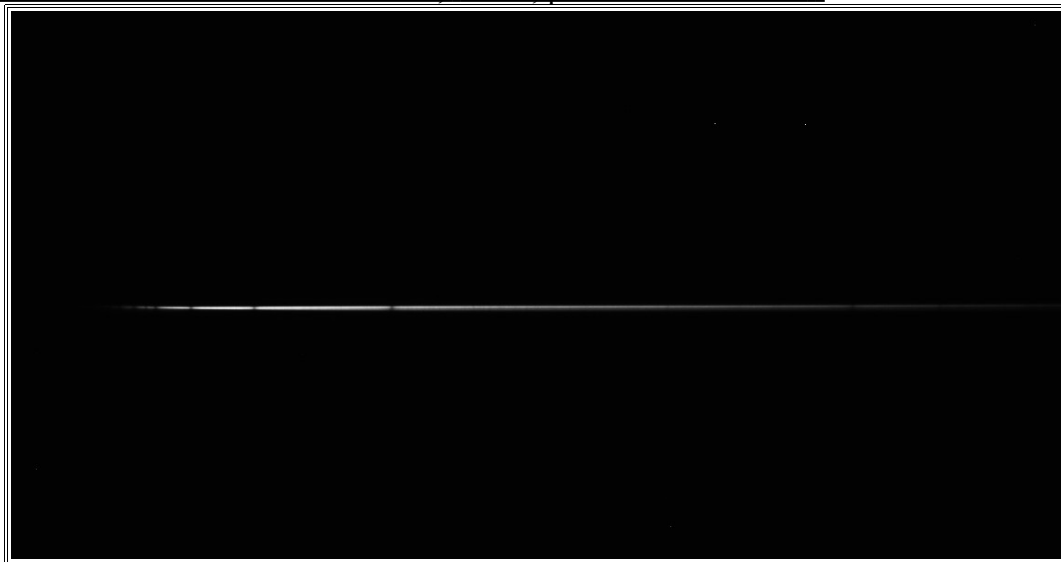
image du site shelyak.com (http://www.shelyak.com/produit.php?id_produit=113&id_rubrique=12)

B – Le traitement des données

Nous avons acquis toutes les images maîtres qui vont nous permettre de traiter. En premier, on commence à traiter le spectre de l'étoile de référence HD115271. Afin d'enlever le bruit de lecture on soustrait l'**offset**. Pour enlever les pixels chauds on soustrait le **dark** dont on a soustrait l'offset. Pour enlever la coma ainsi que les poussières présents sur l'image, on divise les images par le **flat** (médiane) auquel on aura soustrait l'offset.

Nous pourrons après ce nettoyage utiliser ces données brutes et étalonner l'étoile HD115271 avec le fichier d'argon pour avoir notre image stellaire calibrée en longueur d'onde.

Voici le spectre brut de notre étoile HD115271, A7V ; pose de 60 secondes :

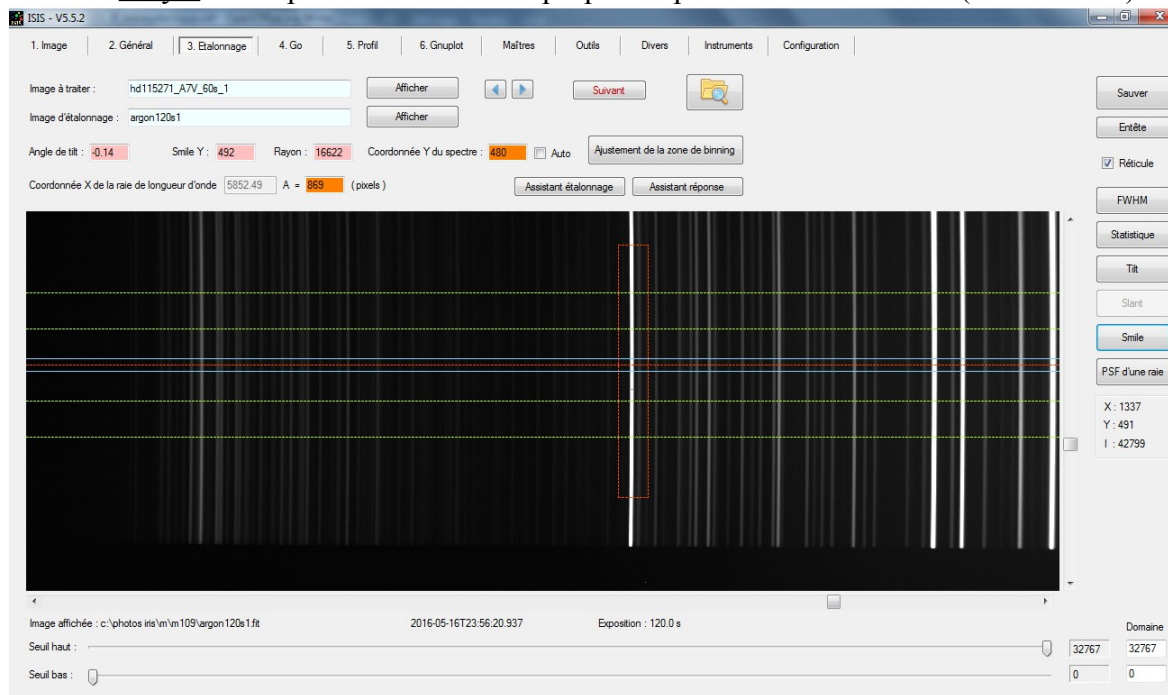


Début du traitement avec le logiciel ISIS de Christian BUIL (merci à lui pour tout ce qu'il a fait!!)

On commence par traiter l'étoile de référence afin d'obtenir la réponse instrumentale de la caméra. Il faut remplir le logiciel : Nom de l'objet, nom du fichier d'étalonnage, le nombre d'images, le nom des fichiers maîtres, la taille des pixels de la caméra, ainsi que les informations de l'observateur et de l'observatoire qui seront associées au fichier .fit

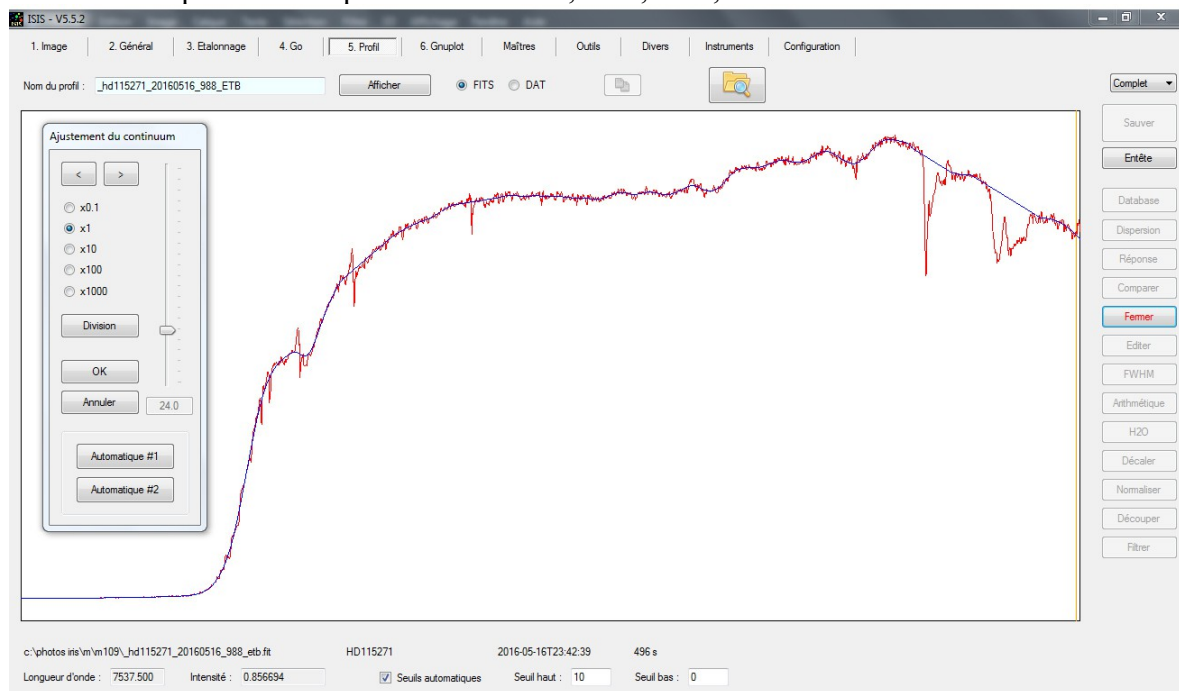
Puis 2ème étape, je superpose le spectre de l'étoile sur le fichier de calibration que voici :
Quelques données sont à prendre en compte :

- l'inclinaison du spectre ; à corriger avec l'angle de Tilt.
- l'effet Smyle causé par les distorsions optiques et présentes sur les raies (effet sourire).



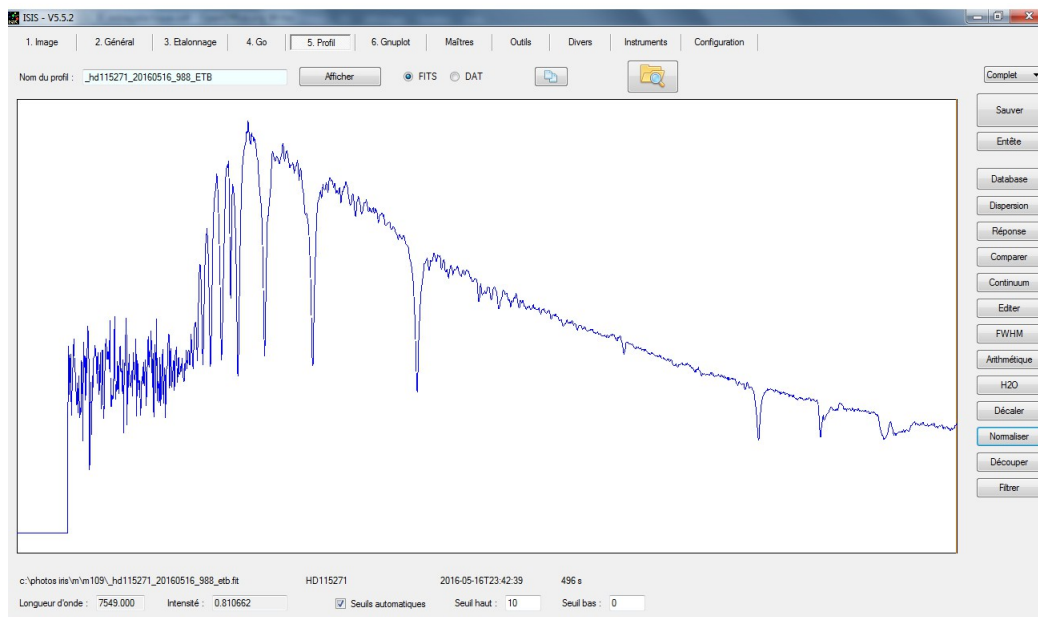
On voit que la raie de référence pour le logiciel est la raie **5852,49Å** : ici au **869**ème pixels. Ensuite le logiciel trouve les raies d'émissions dans le rouge et étalonne tout le spectre. A noter que pour calibrer dans la partie bleu du spectre, un calcul a été effectué pour calculer la taille des pixels de la CCD ; on prend comme mesure la différence en la raie H α et H β sur l'étoile de référence (série de Balmer) que l'on divise par 3123. Ainsi on trouve la vraie taille des pixels du CCD pour le spectrographe. Après cette étape, le spectre est parfaitement étalonné dans le rouge et dans la partie bleu.

3ème étape : on divise le spectre de l'étoile de référence obtenue par une étoile A7V de la banque du logiciel afin de trouver la réponse instrumentale (comment capte la CCD à travers le montage optique, spectro,...). Il faut alors lisser le plus possible le résultat obtenu. Ce n'est pas facile mais avec l'habitude on y arrive. Certaines étoiles sont plus faciles que d'autres : A2V, A3V, A5V, A7V.



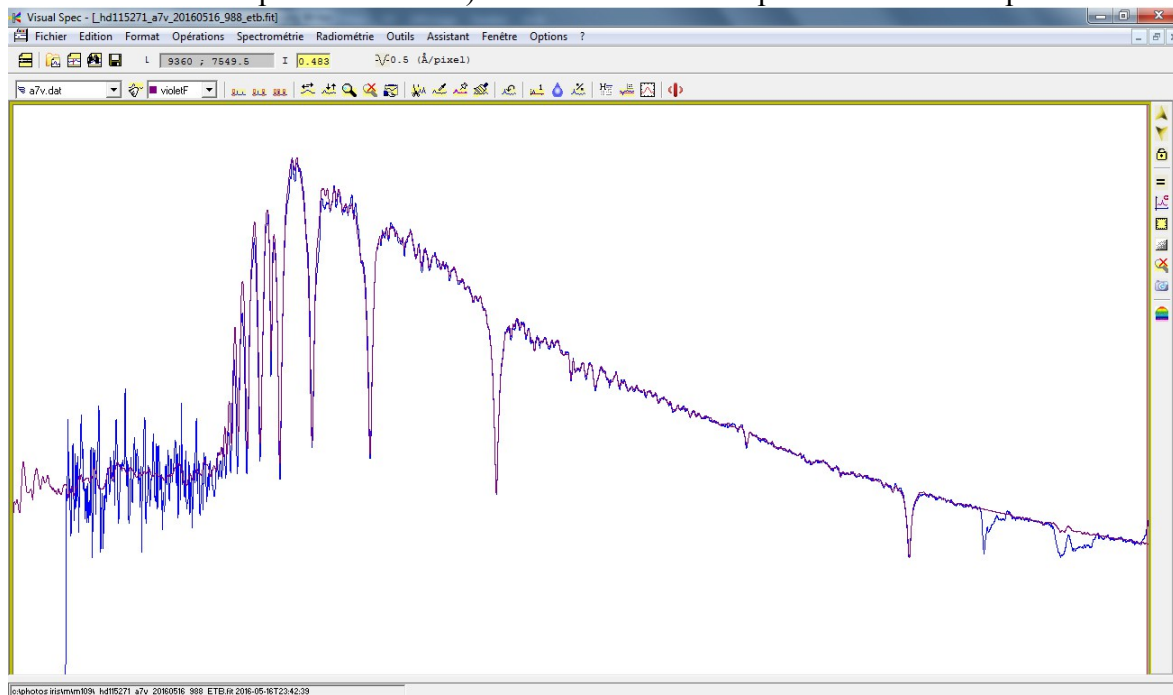
Une fois, la réponse instrumentale obtenue, on retraits l'étoile avec la réponse instrumentale. On obtient le spectre calibré de l'étoile HD11572 : A7V, et corrigé de la réponse instrumentale.

Voici le spectre traité :



On reconnaît la courbe de corps noir qui monte vers le bleu, et la série des raies de Balmer.

Vérification du résultat avec une étoile de la bibliothèque de VISUALSPEC (mon spectre est en bleu et le spectre de l'étoile de Visualspec est en violet). Les courbes doivent parfaitement correspondre :



On voit que le résultat est très bon. Les courbes sont très proches, il faudra couper le spectre vers les 3600Å pour réduire le bruit dans le bleu.

Ici quelques informations précieuses données par le logiciel :

Date début de prise de vue : 16/05/2016 23:42:39

Durée : 496.0 secondes

Date de milieu de prise de vue : 16.991/05/2016

Jour Julien du milieu de prise de vue : 2457525.4908

Pouvoir de résolution : 538.2

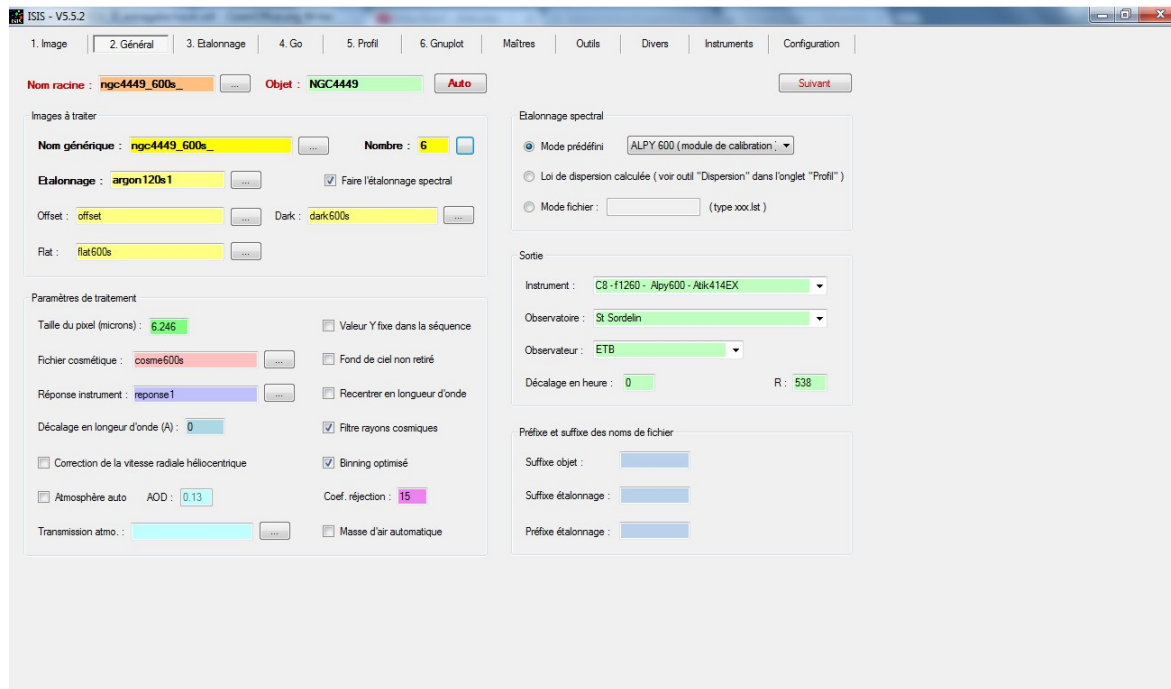
RMS : 0.100791

J'effectuerai cette même technique de traitement sur chaque étoiles de référence des cibles de mon choix.

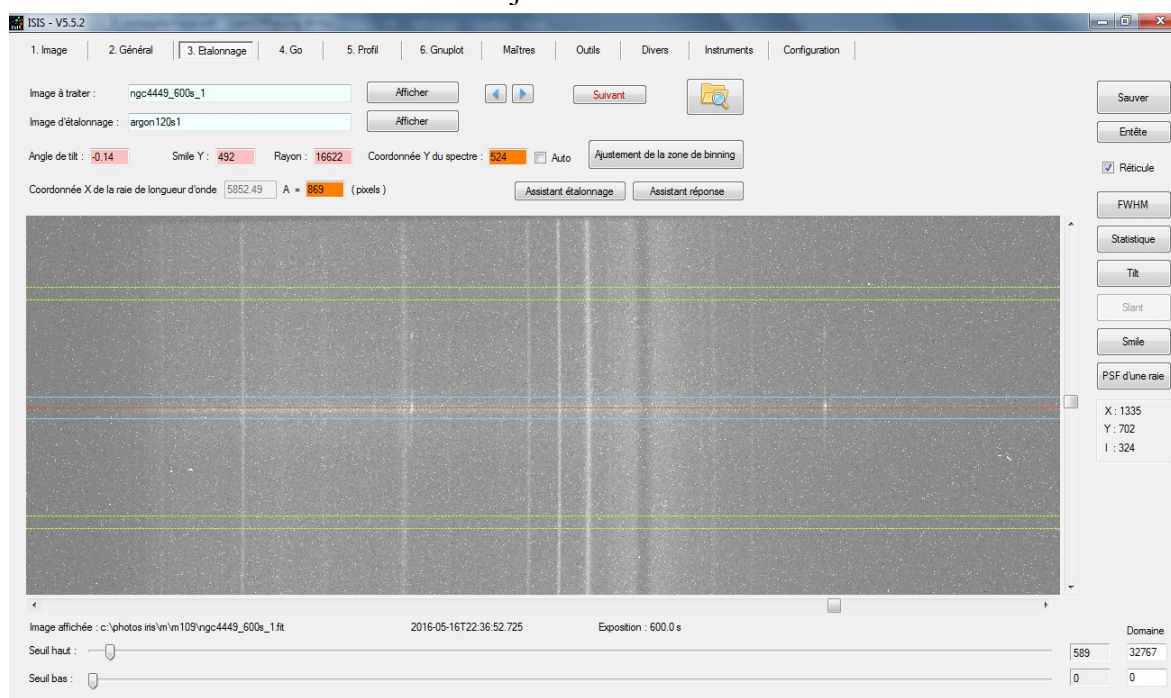
Pour chaque spectre de galaxies, de quasars, ou d'autres objets, cette démarche sera appliquée scrupuleusement pour obtenir des résultats les plus précis possible.

Une fois la réponse instrumentale acquise, on peut traiter la galaxie très facilement. Pour la traiter j'ai acquis 6 spectres de NGC4449 d'une durée de 600 secondes.

1)

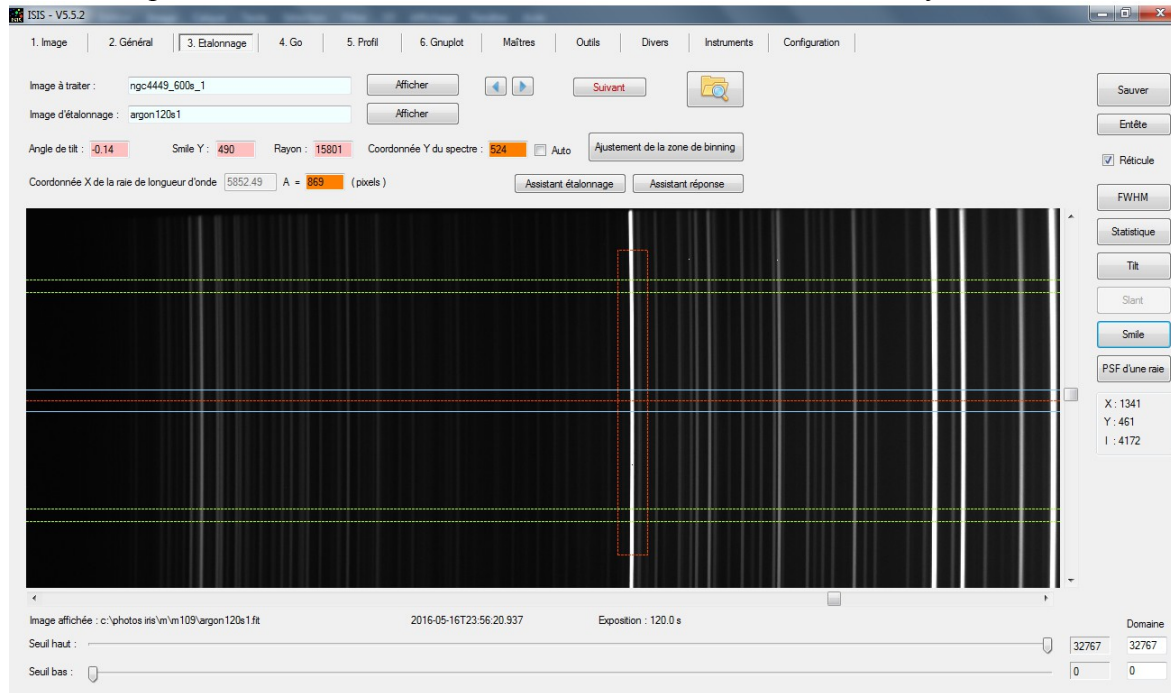


2) On sélectionne le continuum. Les bandes jaunes vont servir à soustraire le fond du ciel.

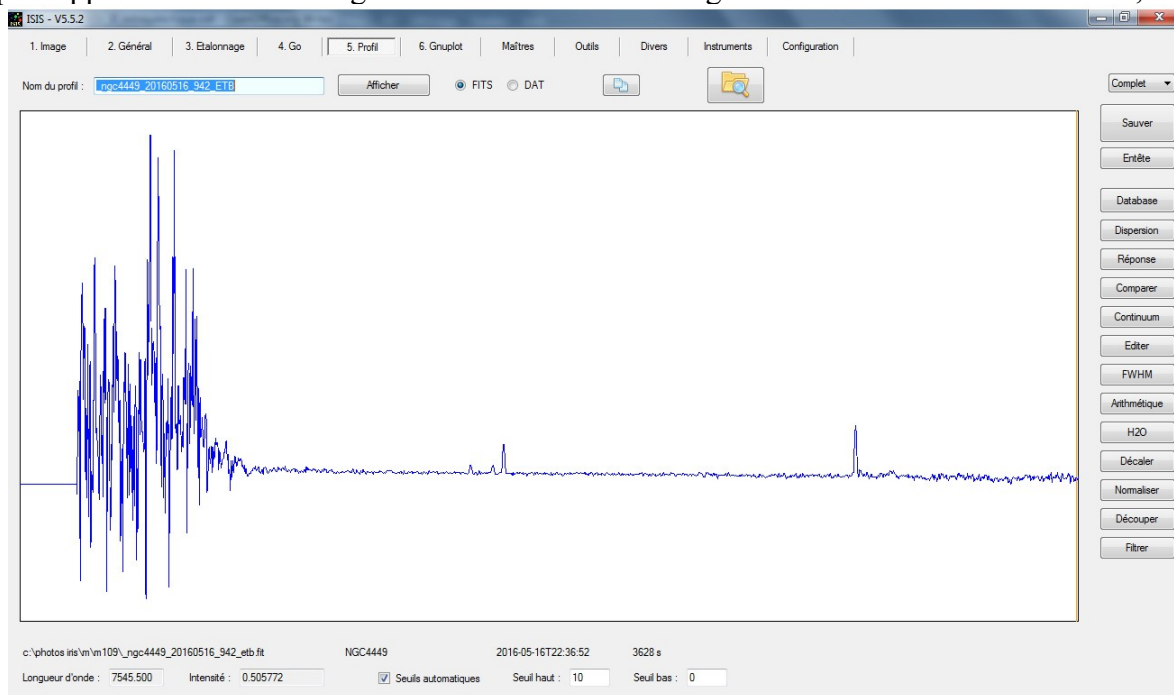


On remarque sur le spectre le fond du ciel composé de Sodium (lampadaire de ville) et on remarque aussi, proche du trait bleu, les points brillants qui sont le signal obtenue de la galaxie à savoir des raies d'émission [OIII], et H α .

3) Pour calibrer le spectre : on sélectionne la raie à 5852,49Å et on calcule le smile.

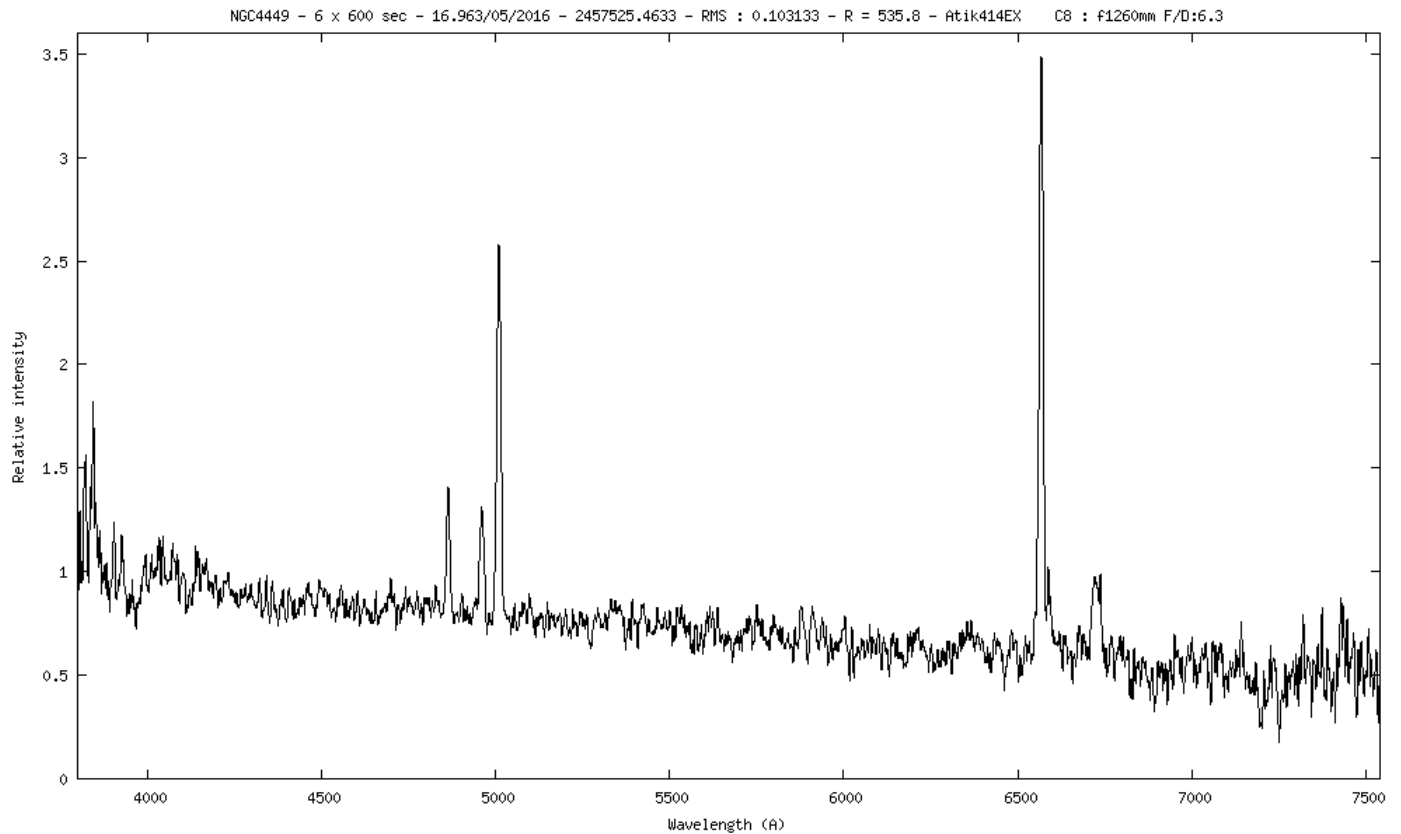


4) La réponse instrumentale ayant été calculée précédemment, c'est la même qui est utilisée pour traiter le spectre, et voici le spectre final totalement traité. On remarque que le signal obtenu est très faible par rapport à une étoile. La galaxie NGC4449 a une magnitude dans la bande V de $m = 9,64$



5) Grâce au logiciel **GNUPLLOT** rattaché à ISIS on peut exporter ce spectre sur un graphique et adapter les axes x et y pour mettre en valeur le spectre et couper les informations que l'on ne souhaite pas garder.

Voici le spectre final :

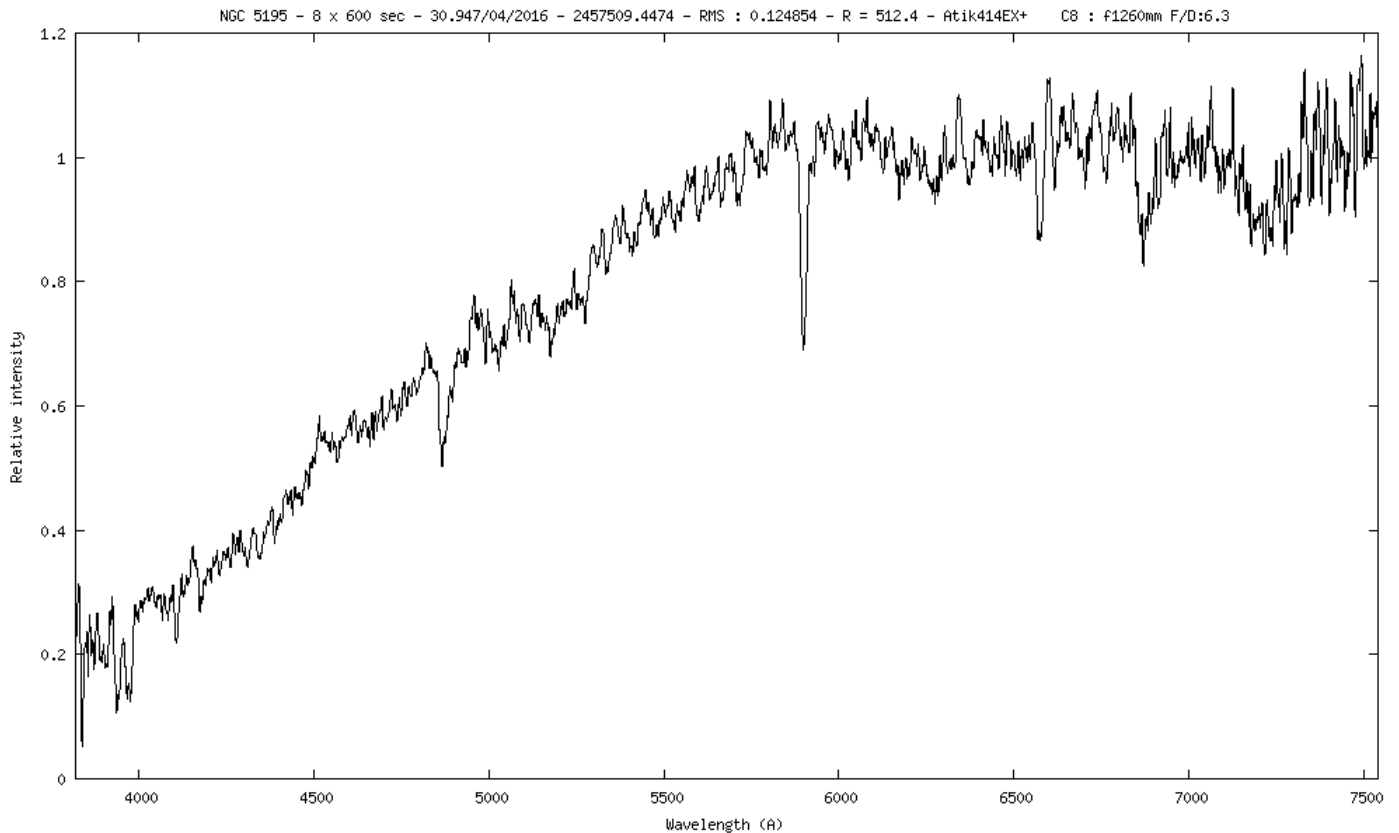


En abscisse les longueurs d'onde en Angstrom de 3700Å à 7550Å.
En ordonnée, le flux exprimé en intensité lumineuse.

IV – Présentation des résultats

A – Duo des Chiens de Chasse (galaxies NGC5194 – NGC5195)

NGC 5195 :



1) Calcul du décalage vers le rouge sur la raie H α : redshift (z) :

$$z = ((\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0) \quad (\lambda \text{ avec en Angstrom})$$

$$z = ((6575,5 - 6562,8) / 6562,5)$$

$$\mathbf{z = 0.001935}$$

2) Le redshift (z) permet de calculer la vitesse d'éloignement :

$$z = v / c \quad (\text{avec } v \text{ la vitesse d'éloignement (car positive), et } c \text{ la vitesse de la lumière en km.s}^{-1})$$

$$\text{d'où } v = z \times c$$

$$v = 0.001935 \times 299\,792.458$$

$$\mathbf{v = 580 \text{ km.s}^{-1}}$$

3) On peut aussi calculer sa distance ; par la loi qui relie vitesse, distance, et loi de Hubble :

$$D = v / H_0 \quad (\text{avec } D \text{ en Mpc, } v \text{ en km.s}^{-1}, \text{ et } H_0 \text{ en km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1} : \text{à noter que la constante de Hubble est connue avec une marge d'erreur de } \pm 10\%).$$

$$D = 580 / 70$$

$$\mathbf{D = 8,285 \text{ Mpc.}}$$

4) Sachant qu'un Mpc équivaut à 3.26×10^6 AL, on trouve une distance en années lumière :

$$D = 8,285 \times (3.26 \times 10^6)$$

D = 27 millions d'années-lumière pour cette galaxie.

5) On va convertir cette distance d'années lumière en Km :

$$1 \text{ AL} = 9.45 \times 10^{12} \text{ km}$$

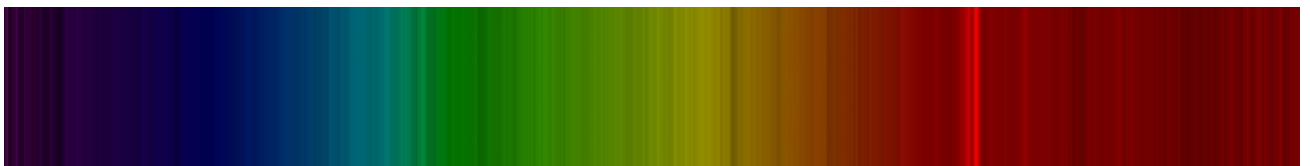
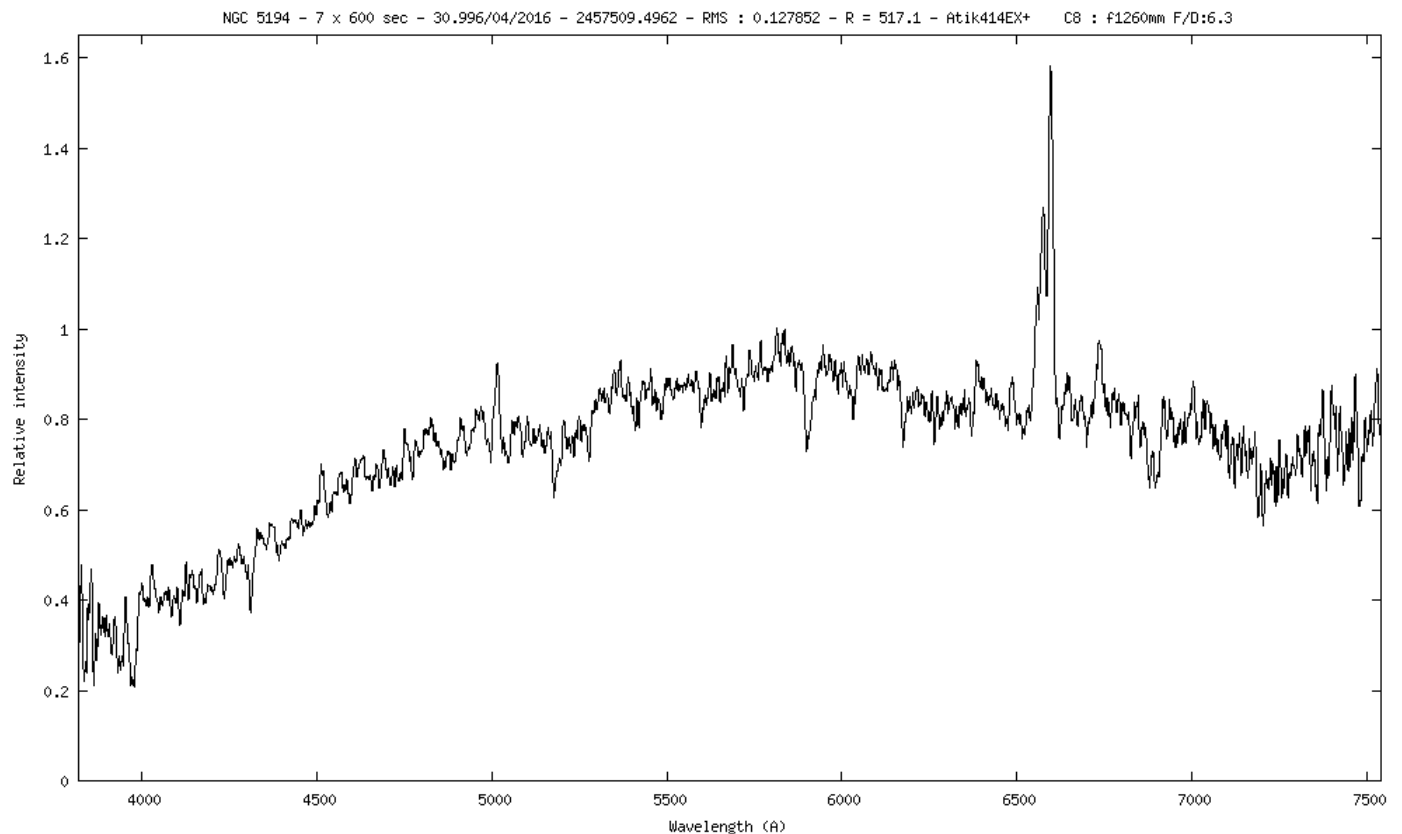
$$\text{donc } (2.7 \times 10^7) \times (9.45 \times 10^{12}) = 2.551 \times 10^{20} \text{ km.}$$

La galaxie NGC5195 est à $2,551 \times 10^{20}$ km.

Par sa courbe spectrale, on reconnaît le spectre d'étoiles de type K (raie H et K du calcium et raies Balmer), on peut dire que statistiquement cette galaxie est composée de ce type d'étoile.

NGC5195 est une galaxie naine sans région de formation stellaire.

NGC 5194 (Seyfert 2 Galaxy) :



1) Calcul du décalage vers le rouge sur la raie H α : redshift (z) :

$$z = ((\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0) \quad (\lambda \text{ avec en Angstrom})$$

$$z = ((6577 - 6562,8) / 6562,5)$$

$$\mathbf{z = 0.0021}$$

(Avec la raie [OIII] en émission, le redshift est de 0,00169 : $((5015,5 - 5007) / 5007)$, en meilleur accord avec le redshift donné par simbad (0,00155) ($cz = 465\text{km.s}^{-1}$).

2) Le redshift (z) de la raie [OIII] permet de calculer la vitesse d'éloignement :

$z = v / c$ (avec v la vitesse d'éloignement (car positive), et c la vitesse de la lumière en km.s^{-1})

d'où $v = z \times c$

$v = 0.00169 \times 299\,792.458$

$v = 506,65 \text{ km.s}^{-1}$

3) On peut aussi calculer sa distance ; par la loi qui relie vitesse, distance, et loi de Hubble :

$D = v / H_0$ (avec D en Mpc, v en km.s^{-1} , et H_0 en $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$: à noter que la constante de Hubble est connue avec une marge d'erreur de +/- 10%).

$D = 506,65 / 70$

$D = 7,23 \text{ Mpc}$

4) Sachant qu'un Mpc équivaut à 3.26×10^6 AL, on trouve une distance en années lumière :

$D = 7,23 \times (3.26 \times 10^6)$

$D = 23,6 \text{ millions d'années-lumière}$

5) On va convertir cette distance d'années lumière en Km :

$1 \text{ AL} = 9.45 \times 10^{12} \text{ km}$

donc $(2.7 \times 10^7) \times (9.45 \times 10^{12}) = 2.552 \times 10^{20} \text{ km}$.

La galaxie M51 est à $2,23 \times 10^{20} \text{ km}$.

Par sa courbe spectrale, qui monte vers l'orangé, on reconnaît le spectre typique des étoiles plus froides, avec les raies H et K du calcium, triplet du Magnesium et doublet du sodium ainsi que les raies de Balmer.

On note aussi des raies en émission bien reconnaissables : la raie de Balmer $H\alpha$ ainsi qu'à ses cotés les raies de l'azote (NII), ainsi que la raie [OIII].

NGC 5194 est de type Sabc ; la vue globale en $H\alpha$ (Grenawalt 1998) et à $7\mu\text{m}$ (ISOCAM, Roussel 2000) montre bien l'association poussières/gaz ionisé concentrés dans les bras spiraux et le pont de matière reliant M51 à NGC5195, petite galaxie de type E. (Acker p.384)

Analyse de NGC 5194 ; galaxie de Seyfert :

Les **galaxies de Seyfert** sont des galaxies spirales ou irrégulières contenant un noyau extrêmement brillant qui peut parfois surpasser la luminosité de la totalité de la galaxie environnante.

C'est un type de galaxie active, nommé d'après Carl Seyfert qui étudia ces objets durant les années 1940.

Les variations de la luminosité du noyau central s'effectuent en moins d'un an ; ce qui implique que la région émettant cette lumière doit être plus petite qu'une année-lumière, un objet ne pouvant changer plus rapidement que le temps mis par la lumière pour le parcourir.

Les galaxies de Seyfert sont caractérisées par un noyau extrêmement brillant et par un spectre présentant des **raies d'émission** très brillantes pour l'hydrogène, l'hélium, l'azote et l'oxygène.

Ces raies d'émission présentent un fort élargissement Doppler correspondant à des vitesses de l'ordre de 500 à 4 000 km/s.

On pense que ces lignes sont produites dans un disque d'accrétion entourant un trou noir.

Ceci est confirmé par le fait que les raies fines ne varient pas de façon détectable, ce qui implique que la région d'émission est grande, contrairement aux raies larges qui peuvent varier pendant des laps de temps relativement courts.

Les galaxies de Seyfert montrent aussi des émissions fortes dans les domaines radio, infrarouge, UV, et RX du spectre électromagnétique.

Classification des galaxies de Seyfert :

Historiquement, les galaxies de Seyfert furent d'abord classées en « type 1 » ou « type 2 » selon que leur spectre montrait à la fois des raies fines et des raies larges ou seulement des raies fines.

Actuellement on utilise une classification fractionnaire dépendant de l'intensité relative des composantes fines et larges (par exemple « type 1,5 » ou « type 1,9 »).

On suppose que les raies fines et les raies larges proviennent toutes deux du disque d'accrétion mais que les raies larges proviennent des régions les plus internes du disque. Ainsi, si le disque est vu par la tranche, les régions internes sont invisibles et on ne voit que les raies fines. La différence entre les galaxies de type 1 et 2 se situe donc très probablement au niveau de l'inclinaison sous laquelle est vu le disque : à faible inclinaison on a une Seyfert 1, et à plus forte inclinaison, on a une Seyfert 2.

Si la galaxie est vue de face, il est possible que l'on soit sensible à l'émission éventuelle du jet émis par le voisinage immédiat du trou noir. Dans ce cas le spectre est très différent, et on parle de blazar.

(wikipedia)

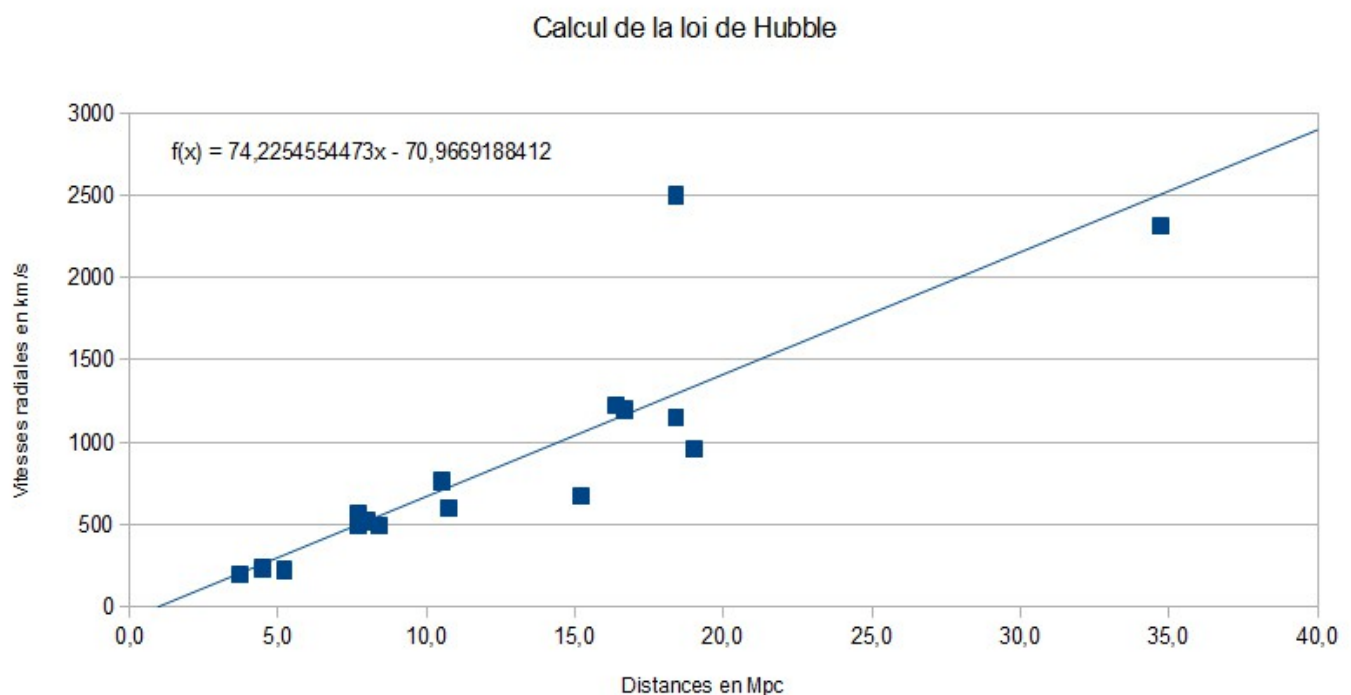
B – Calcul de la loi de Hubble

Pour terminer cette étude sur les galaxies, je vais recalculer la loi de Hubble grâce aux **16** spectres de galaxies que j'ai acquis (**voir ; à la fin du rapport dans la rubrique "Annexe"**), qui me donnent la vitesse radiale (calculée par le c.z (vitesse = redshift x vitesse de la lumière)) et je vais prendre les distances des galaxies sur Wikipédia pour voir si mes mesures collent aux valeurs trouvées dans la littérature.

Voici le tableaux des objets que je vais utiliser :

Objets	Distances en Mpc prise sur Wikipédia	Vitesses radiales en km/s (corrigées de la vitesse héliocentrique)
M63	8	518,96
M64	5,2	221,77
M65	10,5	763,84
M66	10,7	601,54
M82	4,5	233,32
M84	18,4	1150,88
M87	16,4	1223,99
M99	18,4	2500,4
M106	7,7	490,46
M109	16,7	1196,75
NGC4051	15,2	672,18
NGC4151	19	957,31
NGC4449	3,7	194,07
NGC5194	8,4	493,68
NGC5195	7,7	567,04
NGC5353	34,7	2312,47

Et voici le graphique obtenu :



On voit que le résultat obtenu est cohérent ; la courbe des valeurs moyennes donne une constante de 74,2 km.s⁻¹.Mpc⁻¹ alors que la constante de Hubble est de 70 km.s⁻¹.Mpc⁻¹ connue à +/- 10% près.

(On remarque que M99 n'est pas proche de la ligne de tendance ; on suppose que cela pourrait être due à une rencontre relativement récente avec d'autres membres de l'Amas de la Vierge, une hypothèse qui peut être confortée par le fait que sa vitesse de récession est plutôt élevée pour un membre de cet Amas : 2 324 km/sec selon le Sky Catalogue 2000.0, soit la plus grande vitesse de récession mesurée pour une galaxie de Messier).

En ne prenant pas M99, la constante de Hubble de 65 km.s⁻¹.Mpc⁻¹

1 – Calcul de l'âge de l'Univers

La constante de Hubble trouvée dans l'exercice ci-dessus est de **74,2 km.s⁻¹.Mpc⁻¹** et l'on sait que l'inverse de la constante de Hubble est un temps.

Pour trouver l'âge de l'Univers, il faut alors convertir les Mpc en Km et diviser la constante de Hubble par le Mpc en km, et il restera seulement le temps en seconde.

On sait que 1 Mpc = 3,086 x 10¹⁹ km

Alors 74,2 / 3,086 x 10¹⁹ = 2,4 x 10⁻¹⁸

Comme la constante de Hubble est l'inverse d'un temps, en faisant l'inverse du résultat obtenu on aura le temps, l'âge de l'Univers en secondes.

1 / 2,4 x 10⁻¹⁸ = 4,16 x 10¹⁷ secondes

Sachant qu'une année est égale à = 60 x 60 x 24 x 365

Une année = **3,1536 x 10⁷ secondes**

Donc **4,16 x 10¹⁷ / 3,1536 x 10⁷ = 1,319 x 10¹⁰**

On trouve un âge de l'Univers de 13,19 milliards d'années.

C – La Supernova SN2016COJ

KAIT Discovery and Classification of a Young Type Ia Supernova in NGC 4125: SN2016coj=KAIT-16X

ATel #9095: *WeiKang Zheng, Heechan Yuk (UC Berkeley), Christina Manzano-King, Gabriela Canalizo, Remington Sexton (UC Riverside), Aaron Barth (UC Irvine), Isaac Shivvers and Alexei V. Filippenko (UC Berkeley)*
on 28 May 2016; 19:04 UT

*Distributed as an Instant Email Notice Supernovae
Credential Certification: Weikang Zheng (zwk@umich.edu)*

Subjects: Optical, Supernovae

We report the discovery, with the 0.76-m Katzman Automatic Imaging Telescope (KAIT) at Lick Observatory, of a new supernova in the nearby galaxy NGC 4125 ($z=0.00448$). The new object (SN2016coj = KAIT-16X) is located at (J2000.0) coordinates RA = 12:08:06.80, Dec = +65:10:37.9. Following discovery in an unfiltered image obtained at 04:24 UT on 2016 May 28, we manually started a sequence of follow-up observations in the U, B, V, R, I, and clear (roughly R) filters beginning about 1.5 hours later. Using stars from the USNO-B1 catalog for reference, we measure $R \sim 14.8$ mag at this time. The target was also marginally detected 4 days earlier on 2016 May 24.19 UT with $R \sim 17.7$, indicating the object might be young. No detection at the SN location from an image taken on May 19.27 with a limiting mag of ~ 18.5 . A finding chart was posted at the following website: http://w.astro.berkeley.edu/~zwk/findingchart/2016coj_KAIT-16X.jpg. A CCD spectrum (range 350-800 nm) of SN2016coj was obtained on May 28.35, only 4 hours after discovery, with the Shane 3-m reflector (+Kast spectrograph) at Lick Observatory. The spectrum shows that SN2016coj is a Type Ia supernova. Cross-correlation with a library of supernova spectra using the "SuperNova Identification" code (SNID: Blondin and Tonry 2007, ApJ, 666, 1024) indicates a best match with normal Type Ia SN2002er at age -6 days, as well as a few other template around one week time before maximum light. Adopting the host redshift $z=0.00448$, the rest-frame photospheric velocity estimated from the minimum of the Si II 635.5-nm feature, is about 15400 \pm 100 km/s.

[Telegram Index]

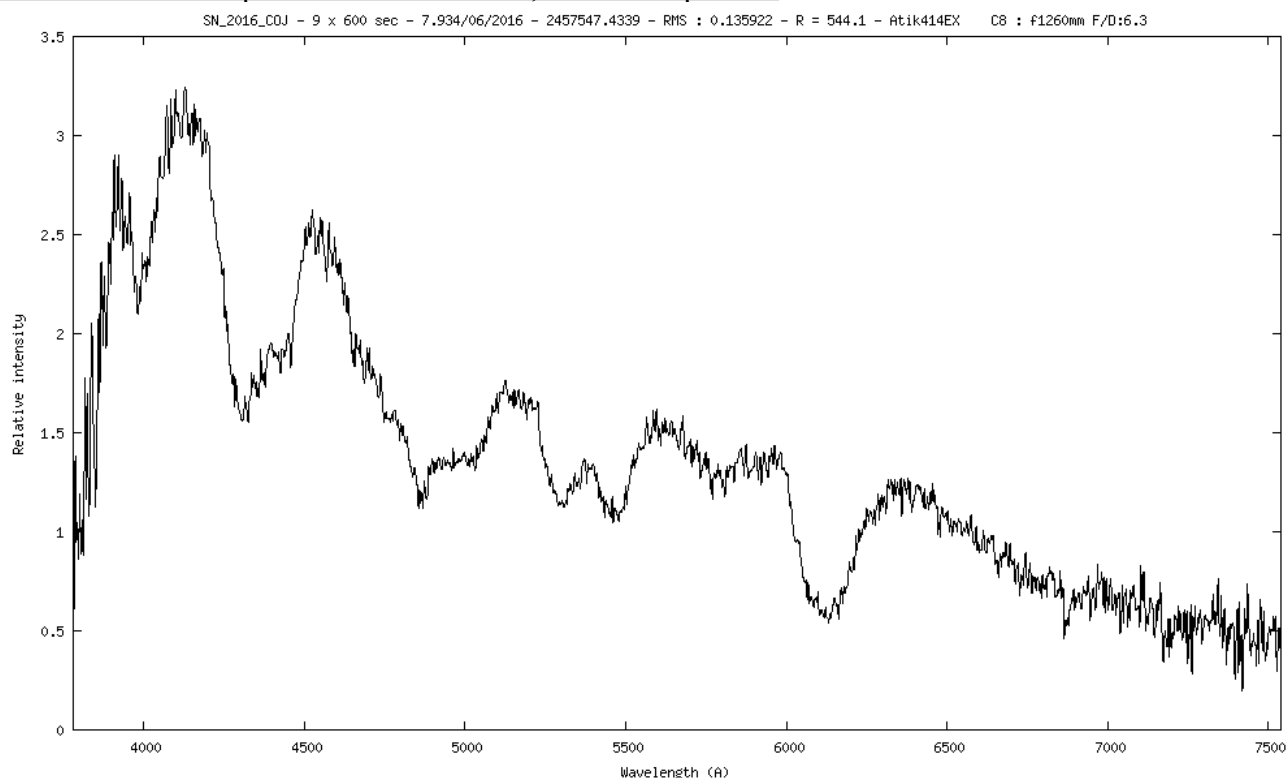
R. E. Rutledge, Editor-in-Chief	rrutledge@astronomerstelegam.org
Derek Fox, Editor	dfox@astronomerstelegam.org
Mansi M. Kasliwal, Co-Editor	mansi@astronomerstelegam.org

La supernova est observable pour diverses raisons :

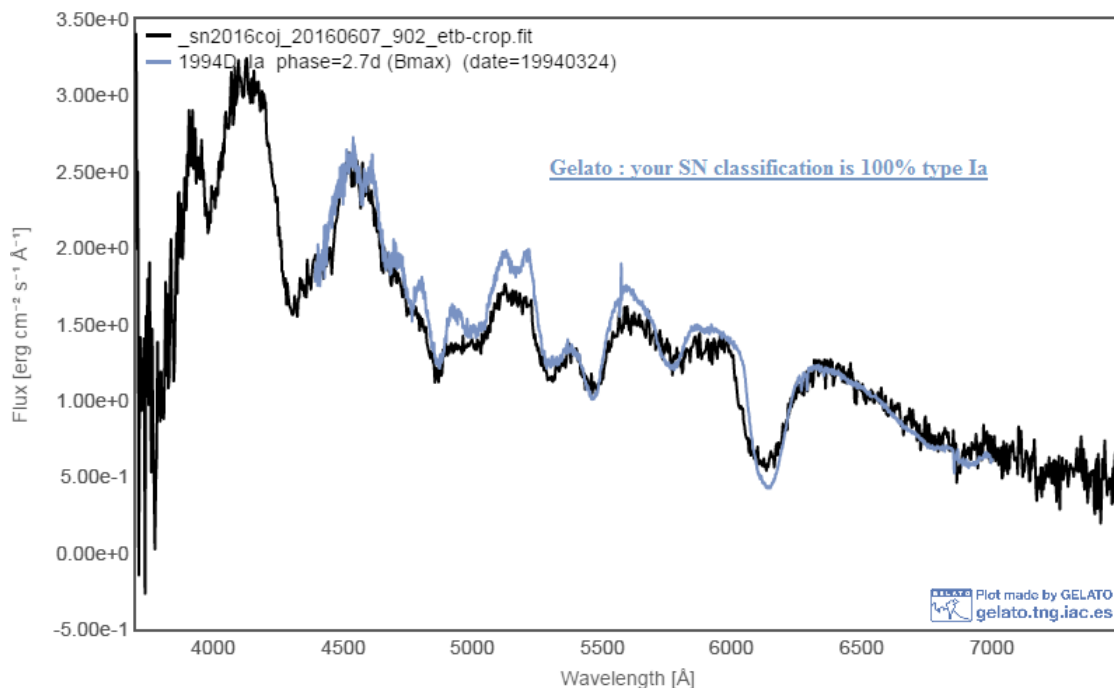
- assez brillante pour une supernova, magnitude 13 (100 000 fois moins brillante que Véga) mais quand même pour une supernova c'est plutôt bien.
- elle est assez éloignée du bulbe de la galaxie, ce qui rend son acquisition plus facile. Plus proche du bulbe, c'est vite compliqué pour la localiser et son spectre est mélangé avec celui de la galaxie.
- située dans le dragon en début de nuit vers 23h30 elle est à peu près à plus de 60° de hauteur ce qui est parfait, et idéalement située pour faire de longues poses indispensables à l'acquisition (poses de 600 secondes à faire au moins 5 ou 6 fois).

Tous les facteurs sont donc réunis pour l'observer, en plus la météo est clémente..

Après traitement de 9 poses de 600 secondes, voici son spectre :

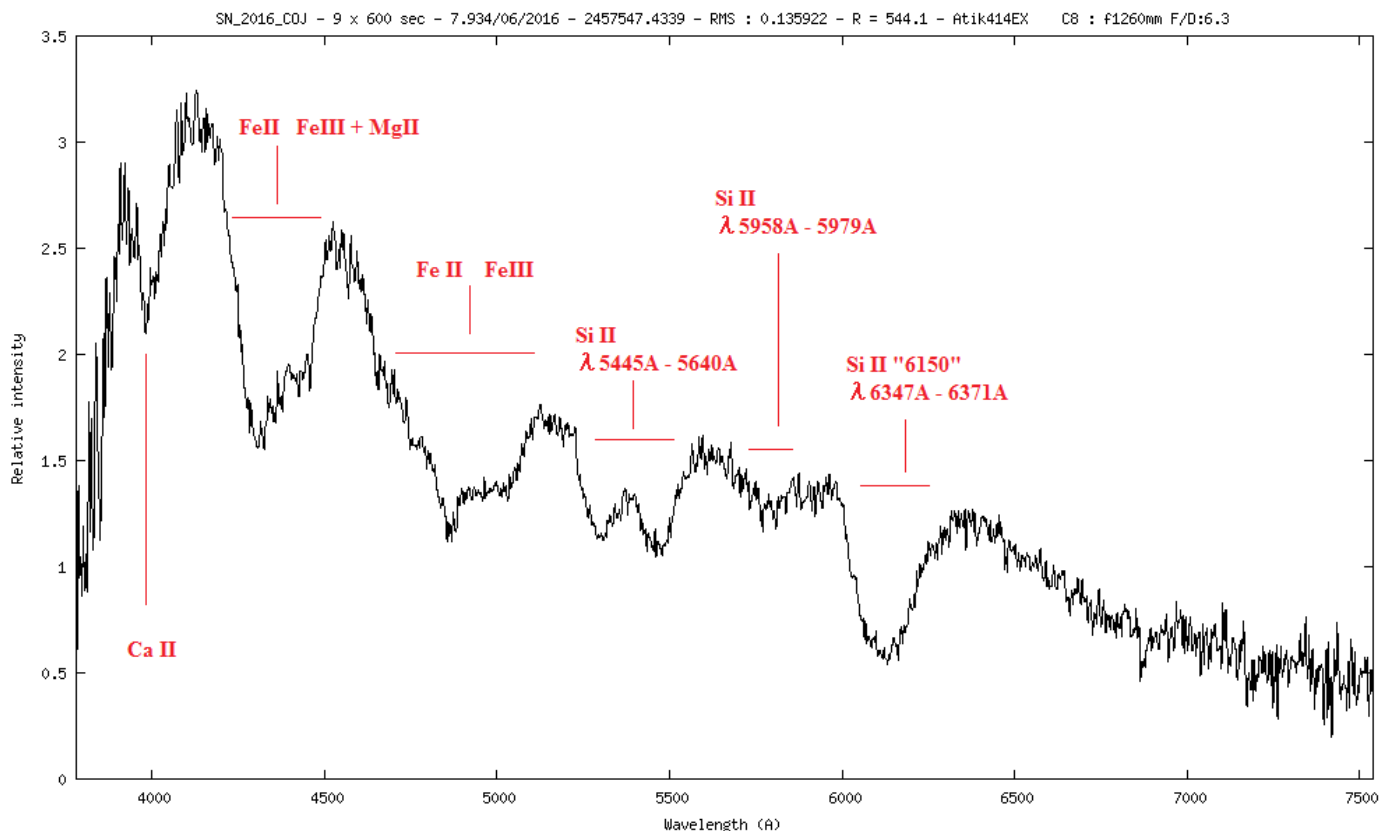


Bien que son type de supernova soit connu par le télégramme, on peut utiliser le logiciel en ligne GELATO qui va vérifier sa classification.



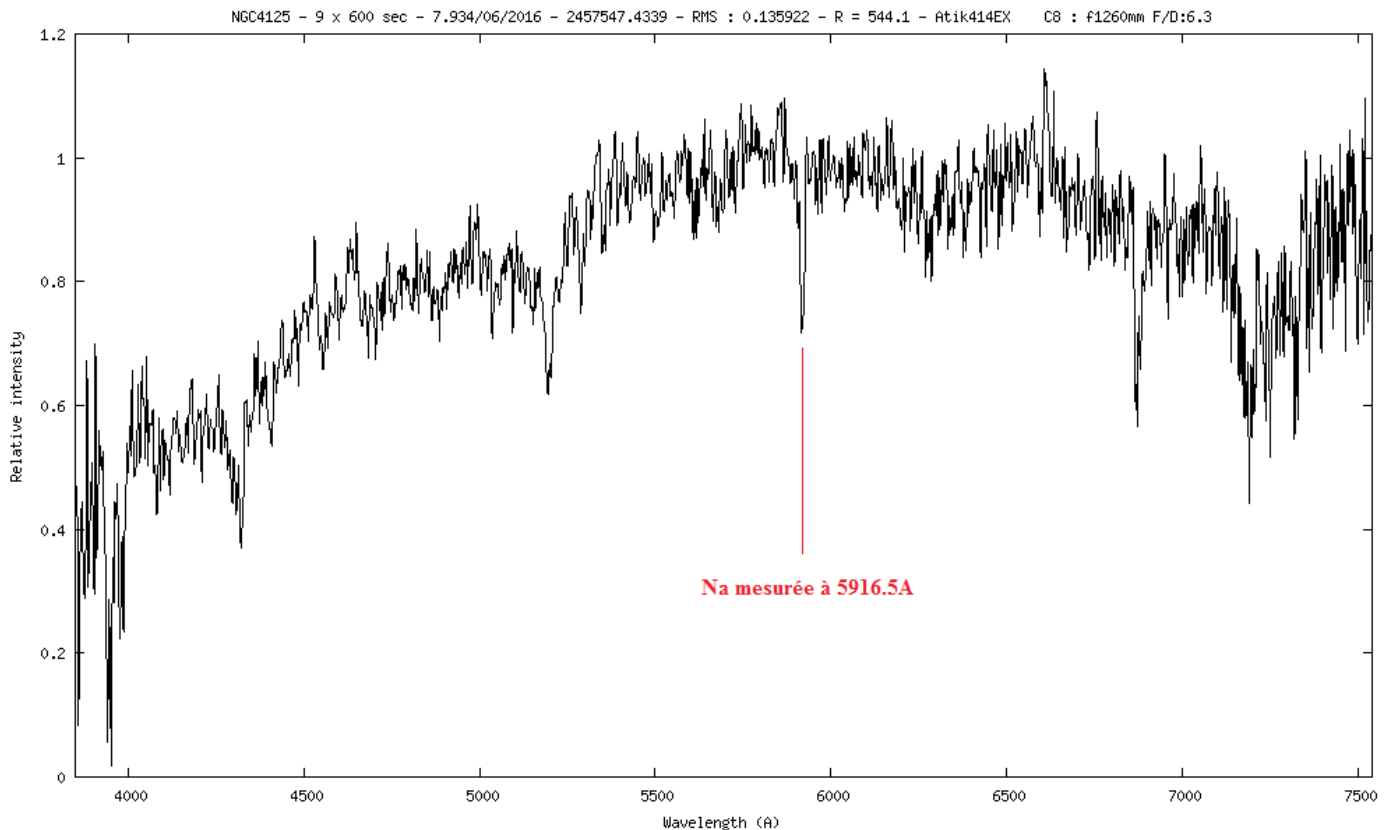
Mon spectre est en noir, et celui de GELATO en bleu. La supernova est bien de type Ia classification à 100%.

On retrouve tout à fait le type de supernova Ia sur le spectre, voici l'identification des raies :



Ayant placé la fente du spectrographe de manière à avoir la supernova et la galaxie : je peux aussi avoir des informations sur la galaxie qui me serviront à calculer la vitesse radiale de la supernova SN2016COJ.

Voici le spectre de la galaxie hôte NGC4125 de type Elliptique (E6):



On reconnaît un spectre de type "stellaire", ce qui nous permet de dire que cette galaxie est plutôt composée statistiquement de vieilles étoiles (spectre de type K ou M) caractéristique de galaxie elliptique, et on remarque qu'elle est décalée vers le rouge grâce aux raies d'absorptions.

Dans ce cas-ci le spectre étant assez bruité, on va se servir de la raie **Na** pour calculer son redshift. (la raie Na est mesurée au repos à 5893Å).

Calcul du redshift (z) de cette galaxie :

$$z = ((\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0) \quad (\lambda \text{ avec en Angstrom})$$

$$z = (5916.5 - 5893) / 5893$$

$$\mathbf{z = 0.003987}$$

De ce fait on connaît aussi la vitesse radiale qui est égale à $z \times c$ (en km/s)

$$v = 0.003987 \times 299792.458$$

$$\mathbf{v = 1195.27 \text{ km.s}^{-1}}$$

(à noter que la supernova est sur un coin de la galaxie, et que ce coin est le côté qui vient vers nous, donc le spectre sera (malheureusement) un peu décalé vers le bleu ; normalement si la fente avait été placée en plein sur le noyau de la galaxie, j'aurais trouvé un vitesse radiale plus proche des 1300km/s).

A cette vitesse radiale il faut enlever la vitesse héliocentrique de la Terre, car celle-ci tourne autour du soleil (orbite de la Terre / année). En fonction d'ou se trouve l'objet dans le ciel par rapport à la Terre, cette vitesse héliocentrique va aussi varier. Pour NGC4125 la vitesse héliocentrique est de -14.427 km/s, d'ou une vitesse de récession de la galaxie de :

$$v_r = 1195.27 - 14.427$$

$$\mathbf{v_r = 1180.843 \text{ km.s}^{-1}}$$

On sait donc que cette galaxie s'éloigne de nous à 1180.843 km.s⁻¹ ; ce qui nous permet aussi de calculer sa distance ; car la loi de Hubble le permet :

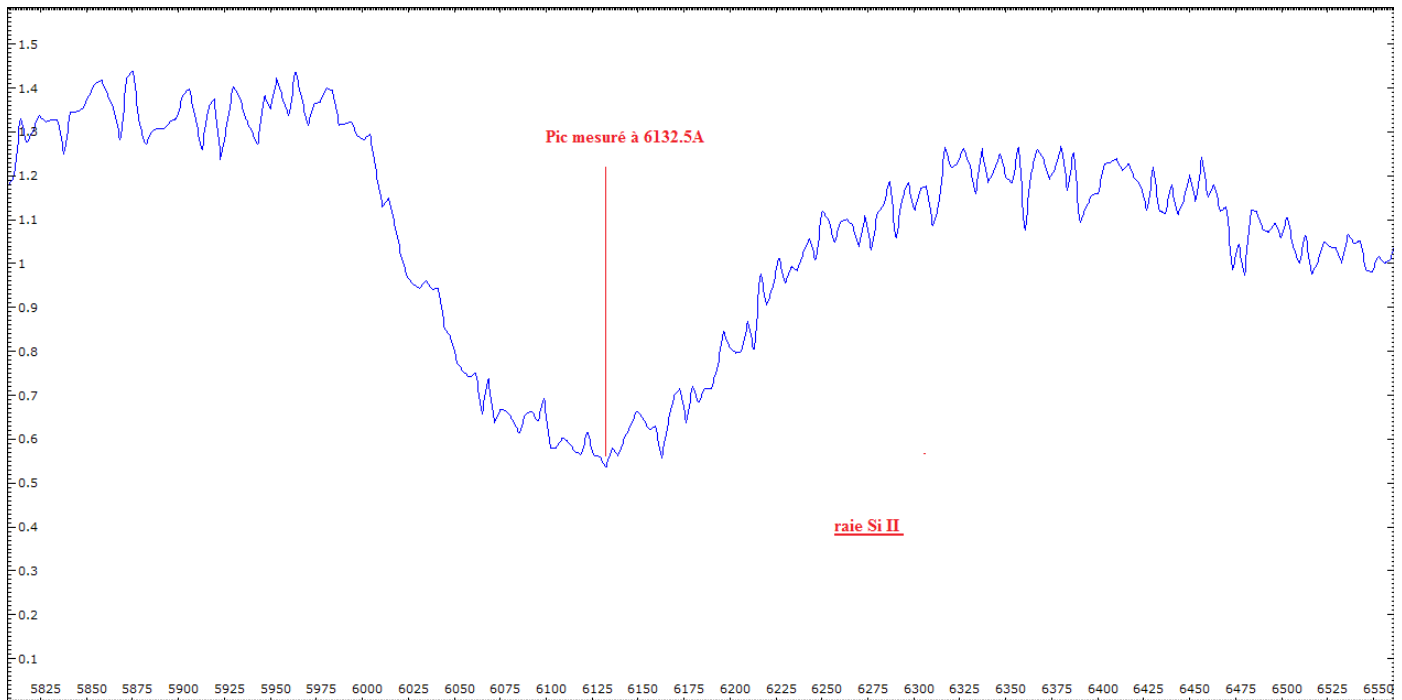
Distance = Vitesse radiale / constante de Hubble (70 km/s/Mpc connue à +/- 10% !)

$$D = 1180.843 / 70$$

D = 16.869 Mpc Ce qui fait à peu près 55 millions d'années lumière. ($16.869 \times 3.26 \times 10^6$)

Tout cela pour savoir, que la galaxie s'éloignant de nous, il va falloir corriger ces mesures dans le calcul de la vitesse radiale de la supernova.

Pour calculer la vitesse radiale de la supernova, ce n'est pas très compliqué : on prend le pic de la raie Si II, on mesure et on calcule le décalage :



Le minimum est mesuré à 6132.5A. Au repos Si II = 6355A, d'où un décalage de 222.5A

Comme tout à l'heure la vitesse radiale = $z \times c$

$$z = ((\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0) \quad (\lambda \text{ avec en Angstrom})$$

$$z = (6132.5 - 6355) / 6355$$

$$\mathbf{z = -0.03501}$$

$$z = v / c \quad (\text{avec } v \text{ la vitesse d'éloignement, et } c \text{ la vitesse de la lumière en km.s}^{-1})$$

$$\text{d'où } v = z \times c$$

$$v = z \times c \text{ (km/s)}$$

$$v = -0.03501 \times 299792.458$$

$$\mathbf{v = -10\,495.73 \text{ km.s}^{-1}}$$

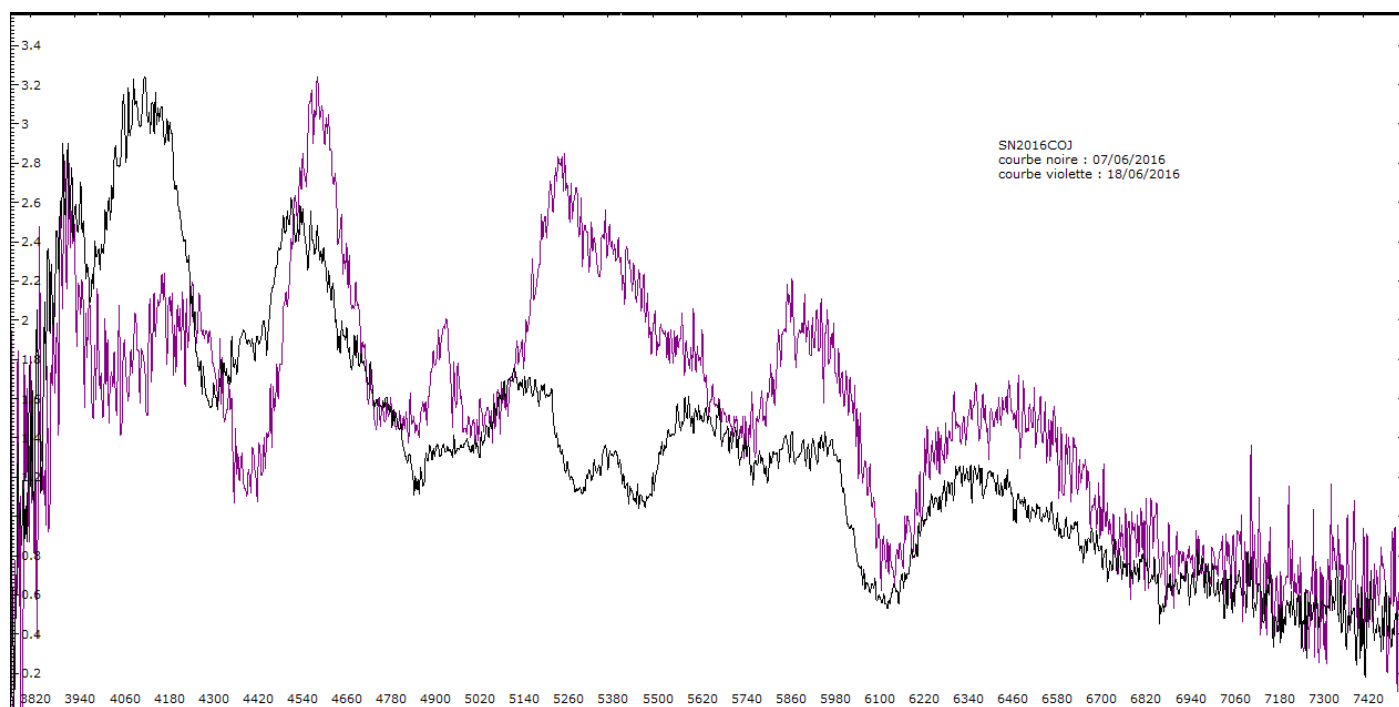
La galaxie NGC4125 s'éloignant de nous à +1180.843 km.s⁻¹, on enlève donc cette vitesse de la vitesse radiale de la supernova :

$$v = -10\,495.73 - 1180.843$$

$$\mathbf{v = -11\,676.573 \text{ km.s}^{-1}}$$

On sait que cette explosion (cette supernova) vient vers nous une vitesse radiale de 11 676 km.s⁻¹.

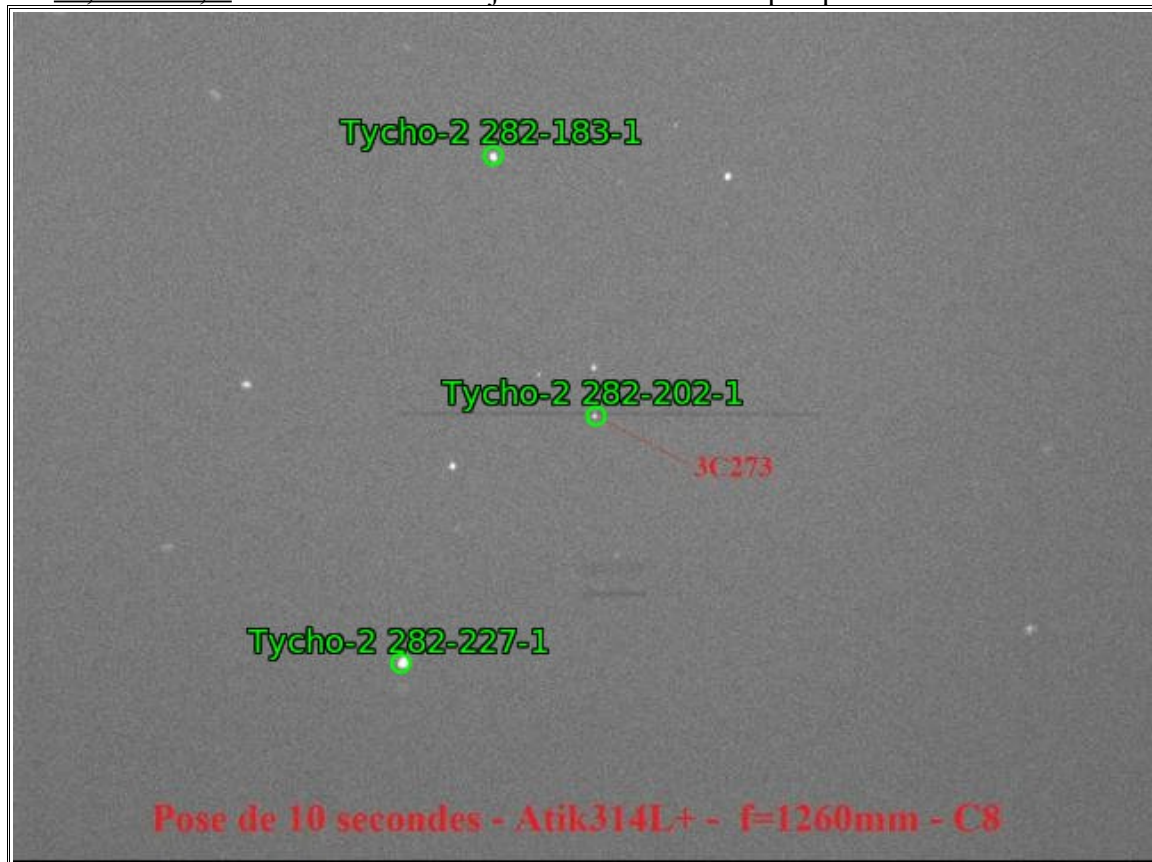
Afin de suivre l'évolution de cette supernova, j'ai pris un nouveau spectre le 18/06/2016 en violet sur le graphique, soit précisément 11 jours après le 1er spectre du 7/06/2016, en noir sur le graphique,



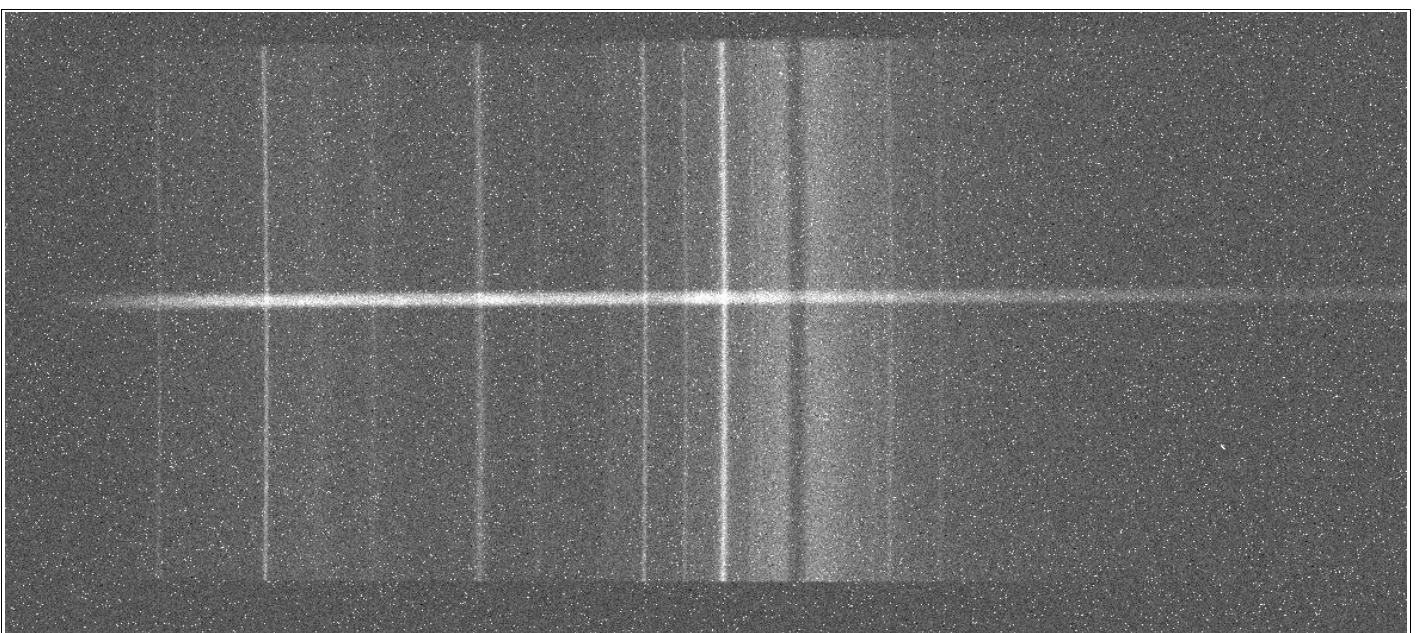
Les spectres montrent bien l'évolution de la Supernova. La photosphère se contracte ; les absorptions sont produites par des zones de l'éjecta ayant des vitesses plus faibles. Le W de SII a disparu ($\sim 5400 \text{ \AA}$).

D – Le Quasar 3C273 : m = 12,85

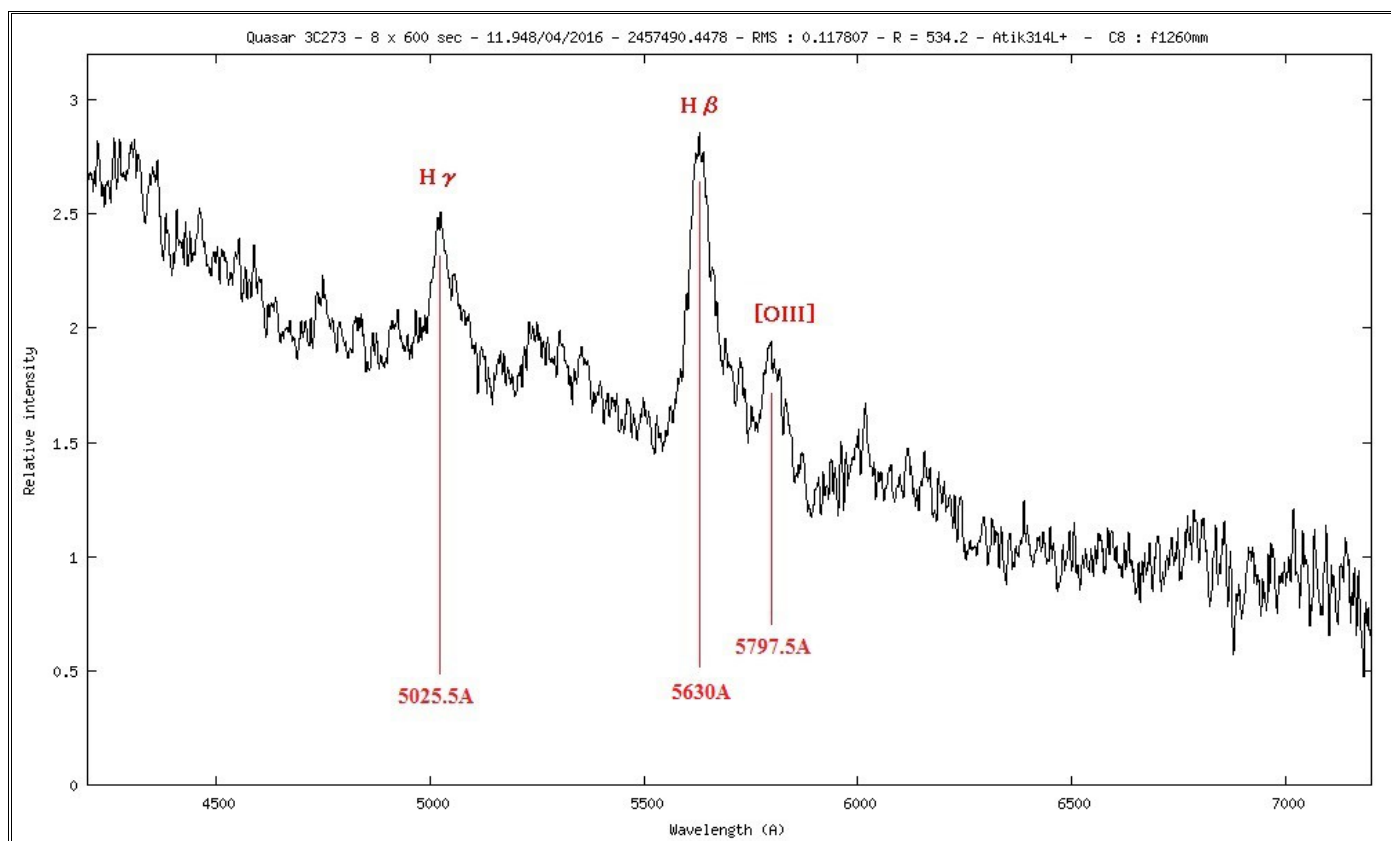
Vue depuis la caméra de guidage (on distingue la fente du spectrographe et le quasar un peu décentré afin de le voir. Trois séances ont été nécessaires pour arriver à trouver l'objet. La taille de l'image, donc du champ de vision est de 24,48' x 18,3' et la hauteur de l'objet dans le ciel était à peu près de 40/45° de hauteur.



Le spectre brut très très faible, il baigne avec le fond du ciel composé largement de sodium (lampadaire de ville) et entouré de pixels chauds car les poses ont une durée de 600 secondes.



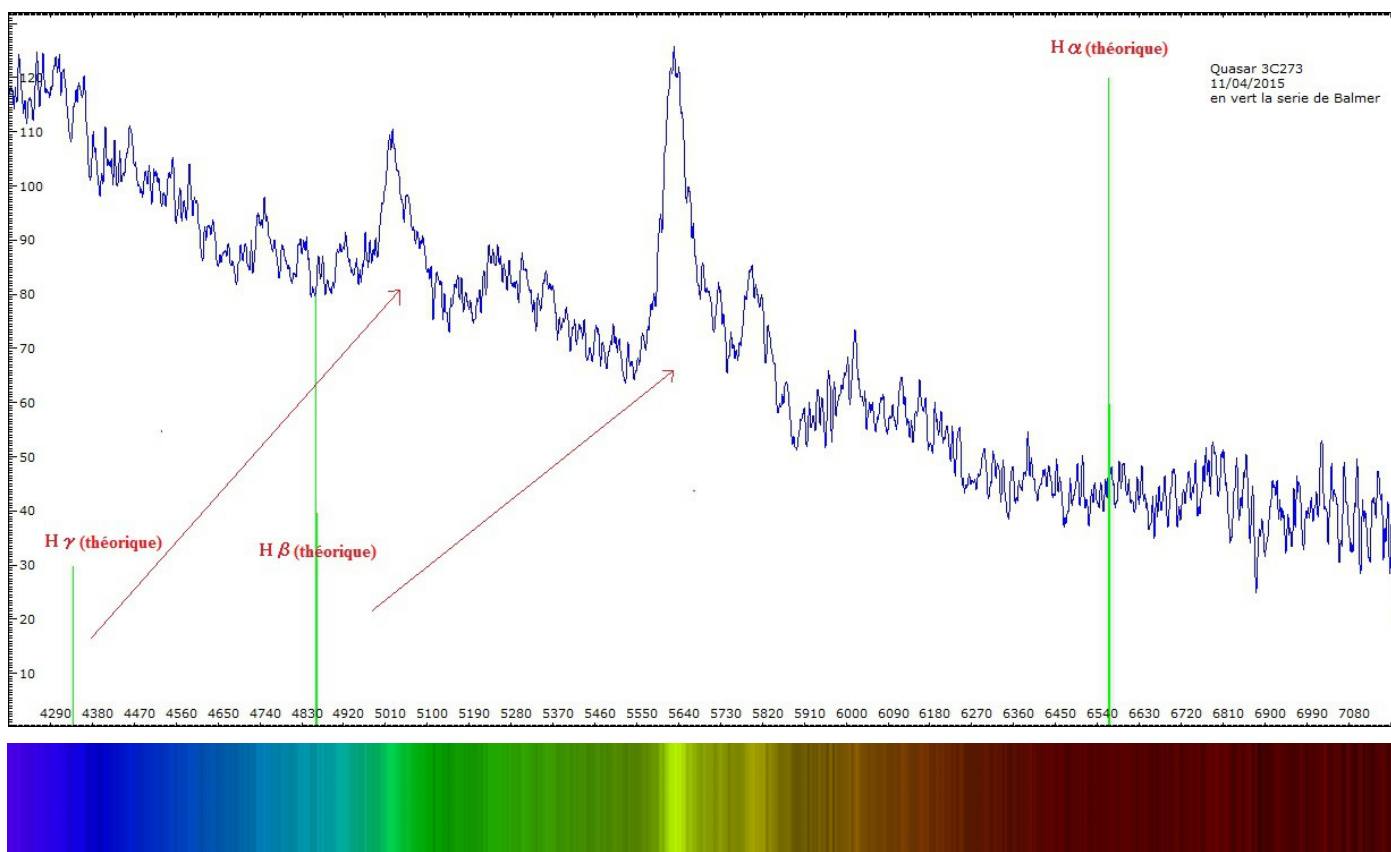
Spectre 1D du Quasar 3C273 traité avec ISIS :



Le décalage des raies vers le rouge bien visible dans ce spectre :

On observe un décalage entre les raies théoriques de $H\beta$, $H\gamma$ (en vertes sur le spectre ci-dessous) et celles observées dans le spectre en émission.

$H\alpha$ étant décalée à 7600Å, elle n'est pas présente sur le spectre obtenu car le capteur CCD n'est pas assez grand. Le continuum est typique de celui qu'un quasar montant dans le bleu (les quasars apparaissent bleu).



Cet objet est si lointain, que l'on observe un décalage spectral sur les raies d'émission qui l'objet s'éloignat sont décalées vers le rouge. C'est tout le spectre qui se retrouve décalé dans les grandes longueurs d'ondes.

La raie **H α** n'apparaît plus dans le spectre, car décalée vers **7600Å**.

La raie **H β** elle est bien présente précisément à **5629,5Å** au lieu des **4861,33Å** en laboratoire.

Par ces informations toutes simples (les décalages des raies) et les lois de la lumière on peut tirer un quantité d'informations :

1) Calcul du décalage vers le rouge: redshift (z) :

$$z = ((\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0) \quad (\lambda \text{ avec en Angstrom})$$

$$z = ((5629,5 - 4861,33) / 4861,33)$$

$$\mathbf{z = 0.158}$$

2) Le redshift (z) permet de calculer la vitesse d'éloignement :

Calcul de la vitesse de recession relativiste :

$$V_r = c \times [((z+1)^2 - 1) / ((z+1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times [((0,158 + 1)^2 - 1) / ((0,158 + 1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times (0,340964 / 2,340964)$$

$$V_r = 299792.458 \times 0,145651$$

$$\mathbf{V_r = 43\,665,1\,km.s^{-1}}$$

3) On peut aussi calculer sa distance ; par la loi qui relie vitesse, distance, et loi de Hubble :

$D = v / H_0$ (avec D en Mpc, v en km.s⁻¹, et H₀ en km.s⁻¹.Mpc⁻¹ : à noter que la constante de Hubble est connue avec une marge d'erreur de +/- 10%).

$$D = 43665,1 / 70$$

$$\mathbf{D = 623,78\,Mpc.}$$

4) Sachant qu'un Mpc équivaut à 3.26 x 10⁶ AL, on trouve que le quasar 3C273 est à une distance en années lumières :

$$D = 623,78 \times (3.26 \times 10^6)$$

$$\mathbf{D = 2.03 \times 10^9\,AL\,(AL = \text{années lumière})}$$

Notre quasar est à 2.03 milliards d'années lumière. (Pour rappel le Big Bang a eu lieu il y a 13.7 milliards d'années. La distance avec la galaxie M31 est de 2.54 millions d'années lumière, il faudrait 800 fois cette distance pour arriver à ce quasar...)

5) On va convertir cette distance d'années lumière en Km :

$$1\,AL = 9.45 \times 10^{12}\,km$$

$$\text{donc } (2.03 \times 10^9) \times (9.45 \times 10^{12}) = 1,918 \times 10^{22}\,km.$$

$$\mathbf{\underline{Le quasar est à 1,918 \times 10^{22}\,km.}}$$

6) De part sa grande distance on peut aussi déduire des paramètres cosmologiques :

(source documentaire : *Astronomie et astrophysiques d'Agnès Acker*)

Pour un photon H β 4861Å observé à 5629,5Å, le facteur d'étirement est égal à $(5629,5/4861,33) = 1.158$

Donc le facteur d'échelle au moment de l'émission était de :

$$a(t) = 1/1.158$$

$$\mathbf{a(t) = 0.8635.}$$

Le facteur d'échelle se calcule aussi par la formule :

$$a(t) = 1 / (1+z)$$

$$\text{ou } a(t) = 1 / (1 + 0,158)$$

$$\mathbf{a(t) = 0.8635}$$

(à noter que le redshift se calcule aussi par la formule : $z = (1 - a(t)) / a(t)$)

L'univers s'est agrandi de 15.8% depuis l'émission des photons jusqu'à cette réception.

Que valait la distance de ce quasar Q au moment de l'émission ? L'expansion a éloigné le quasar Q de l'observateur O , d'autant plus que le temps de voyage de la lumière était plus long. On peut calculer que la distance D_1 de $Q(t_1)$ à $O(t_0)$ est telle que :

$$D_1 = 3 \times \tau a (1-\sqrt{a}) \quad (\text{avec } \tau = 14 \text{ milliards d'années}) \text{ ce qui correspond à une valeur de :}$$

$$D_1 = 3 \times 14 \times 0,8635 \times (1-\sqrt{0.8635})$$

$$\mathbf{D_1 = 2,566 \text{ milliards d'années lumières.}}$$

Cette distance a été étirée d'un facteur $(1/a)$ donc, maintenant, le quasar Q se trouve à :

$$D_0 = 42 \times (1-\sqrt{a})$$

$$D_0 = 42 \times (1-\sqrt{0.8635})$$

$$\mathbf{D_0 = 2,971 \text{ milliards d'années.}}$$

Donc un photon émis au temps t_1 par ce quasar sera reçu 2,56 milliards d'années plus tard, quand sa distance sera de 2,97 milliards d'année-lumière (valeurs correspondant au temps de voyage de la lumière).

7) On peut aussi calculer son Flux (f)

(source documentaire : *Mooc astrophysique ANU-ASTRO1X (Greatest Unsolved Mysteries of the Univers)*)

$$f = L / (4\pi \times D^2 \times (1 + z)^2)$$

(f est le flux watts par mètres carrés ($W.m^{-2}$), D est la distance en mètres (m), L est la luminosité en Watts (W), et z le redshift).

- Sachant que le quasar 3C273 a une luminosité de 10^{12} luminosité solaire, ce qui correspond à 100 fois la luminosité de notre galaxie, la luminosité solaire étant de $3,9 \times 10^{26}W$.

- La luminosité du quasar $3C273 = 3,9 \times 10^{38}W$

- La distance trouvée étant de 623,78 Mpc, cela nous donne une distance de $1,91 \times 10^{25}$ m.
- Le redshift est de 0,158.

$$f = L / (4\pi \times D^2 \times (1+z)^2)$$

$$f = 3,9 \times 10^{38} / (4\pi \times ((1,91 \times 10^{25})^2) \times (1+0,158)^2)$$

$$f = 3,9 \times 10^{38} / (6,14 \times 10^{51})$$

$$f = 6,34 \times 10^{-14} \text{ W.m}^{-2}$$

Le flux reçu du quasar 3C273 est de $6,34 \times 10^{-14} \text{ W.m}^{-2}$

8) On peut aussi calculer la température de l'Univers à l'époque où les photons sont partis grâce au redshift :

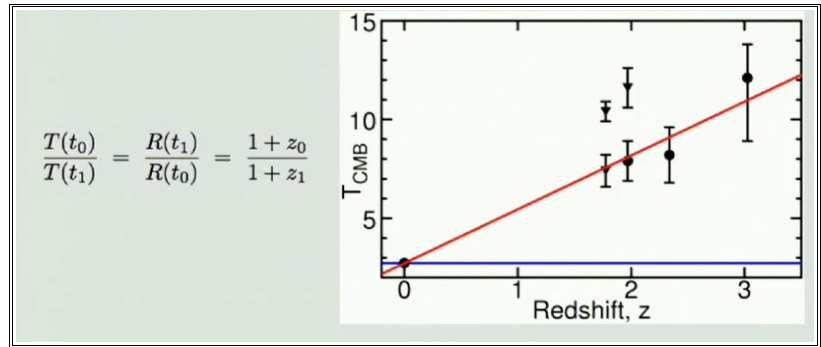
$$T(t_0) / T(t_1) = (1+z_0) / (1+z_1)$$

$$T(t_0) \times (1+z_1) = T(t_1) \times (1+z_0)$$

$$T(t_1) = (T(t_0) \times (1+z_1)) / (1+z_0)$$

$$T(t_1) = (2,725 + 1 + 0,185) / (1+0)$$

$$\underline{T(t_1) = 3,91\text{K}}$$



(documents du cours de Cosmologie de Mr Valls-Gabaub 12/04/2016)

Quand les photons sont partis l'Univers avait une température de 3,91K

Une synthèse des résultats avec ce site : <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

For $H_0 = 69.6$, $\Omega_{\text{M}} = 0.286$, $\Omega_{\text{vac}} = 0.714$, $z = 0.158$

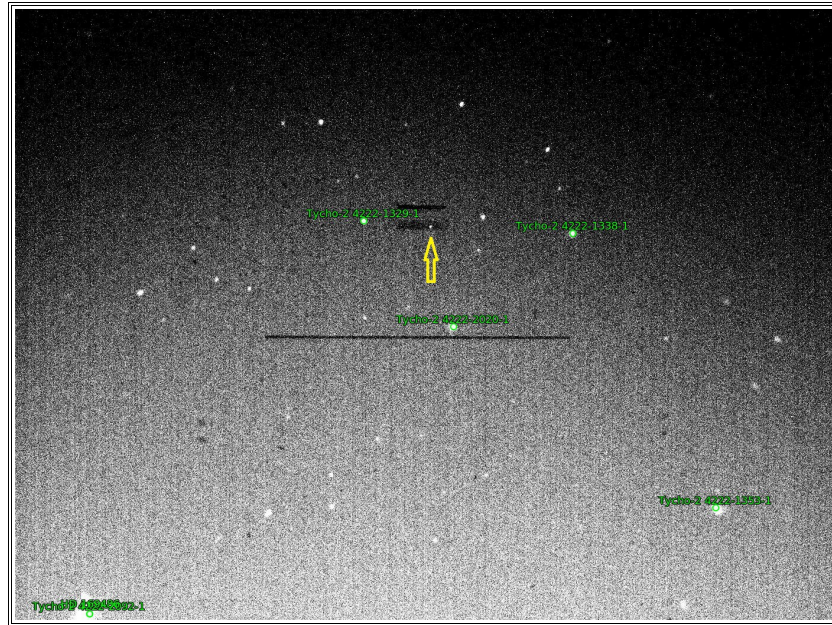
- It is now 13.721 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 11.730 Gyr.
- The [light travel time](#) was 1.991 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 656.8 Mpc or 2.142 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 1.187 Gpc^3 .
- The [angular size distance \$D_A\$](#) is 567.2 Mpc or 1.8498 Gly.
- This gives a scale of $2.750 \text{ kpc}''$.
- The [luminosity distance \$D_L\$](#) is 760.5 Mpc or 2.481 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or $9.461 \times 10^{26} \text{ cm}$.

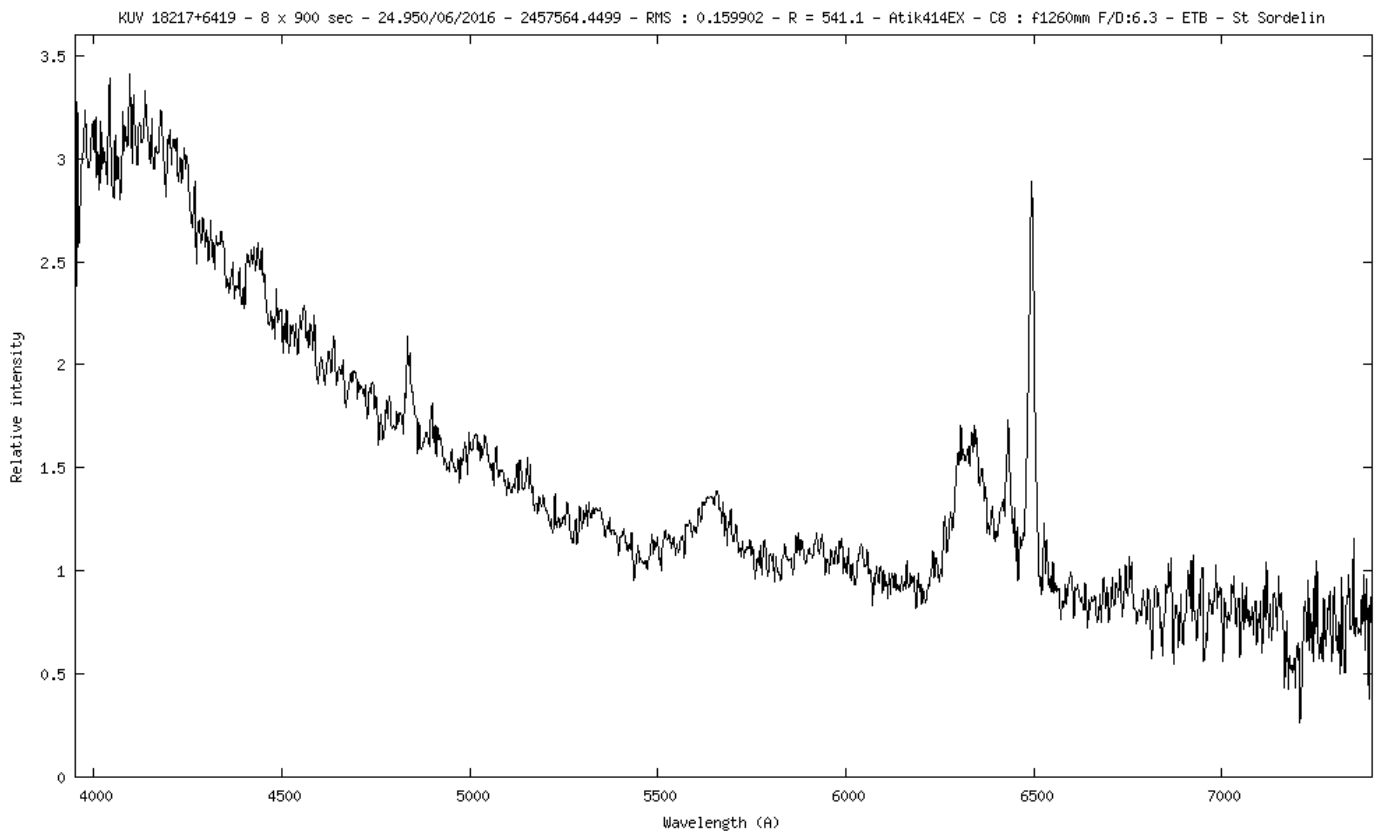
1 Gyr = 1,000,000,000 years.

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = $3.08568 \times 10^{24} \text{ cm}$, or 3,261,566 light years.

E – Le quasar KUV 18217 + 6491 : m = 14,2



Le spectre obtenue de KUV 18217 + 6491 : 8 poses de 900 secondes :



[OIII] est mesurée à 6495Å au repos à 5007.Å

$$z = (6495 - 5007) / 5007$$

$$z = \mathbf{0.29718}$$

d'ou une vitesse relativiste de :

$$V_r = c \times [((z+1)^2 - 1) / ((z+1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times [((0.29718 + 1)^2 - 1) / ((0.29718 + 1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times (0.68267 / 2.68267)$$

$$\mathbf{V_r = 76\,289.41\,km/s}$$

Distance :

$$D = V_r / H_0$$

$$D = 76289.41 / 70$$

$$\mathbf{D = 1089.84 \text{ Mpc}}$$

Il est à noter que pour des distances aussi lointaines la relation : Distance = Vitesse / constante de Hubble) c'est à dire $D = V / H_0$, ne marche plus vraiment. Pour trouver la vraie distance que l'on appellera « temps de regard en arrière » on utilise un logiciel qui utilise des paramètres cosmologiques, disponible ici :

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

For $H_0 = 69.6$, $\Omega_M = 0.286$, $\Omega_{vac} = 0.714$, $z = 0.336$

- It is now 13.721 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 9.944 Gyr.
- The [light travel time](#) was 3.777 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 1337.8 Mpc or 4.363 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 10.030 Gpc³.
- The [angular size distance \$D_A\$](#) is 1001.3 Mpc or 3.2658 Gly.
- This gives a scale of 4.854 kpc/".
- The [luminosity distance \$D_L\$](#) is 1787.5 Mpc or 5.830 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or 9.461×10^{26} cm.

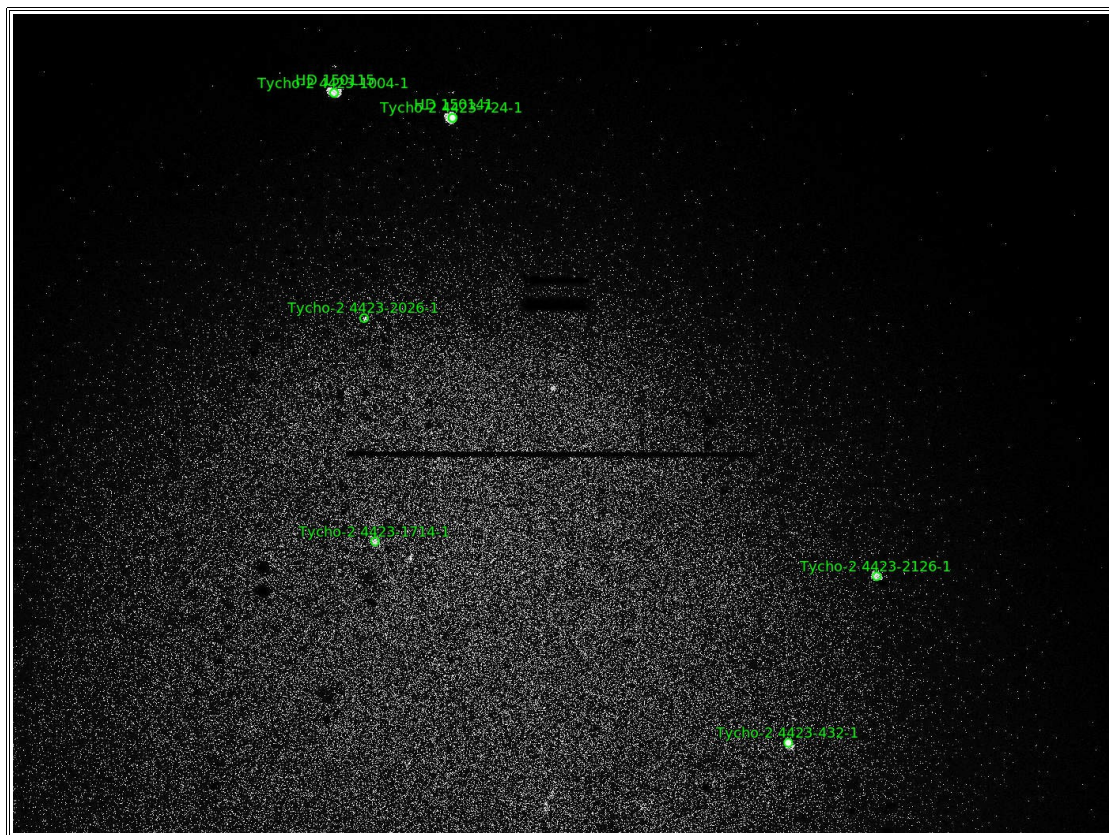
1 Gyr = 1,000,000,000 years.

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = 3.08568×10^{24} cm, or 3,261,566 light years.

E – Le Quasar PG1634 + 607 : m = 14,66

Quasar PG1634+706 ; m=14.6

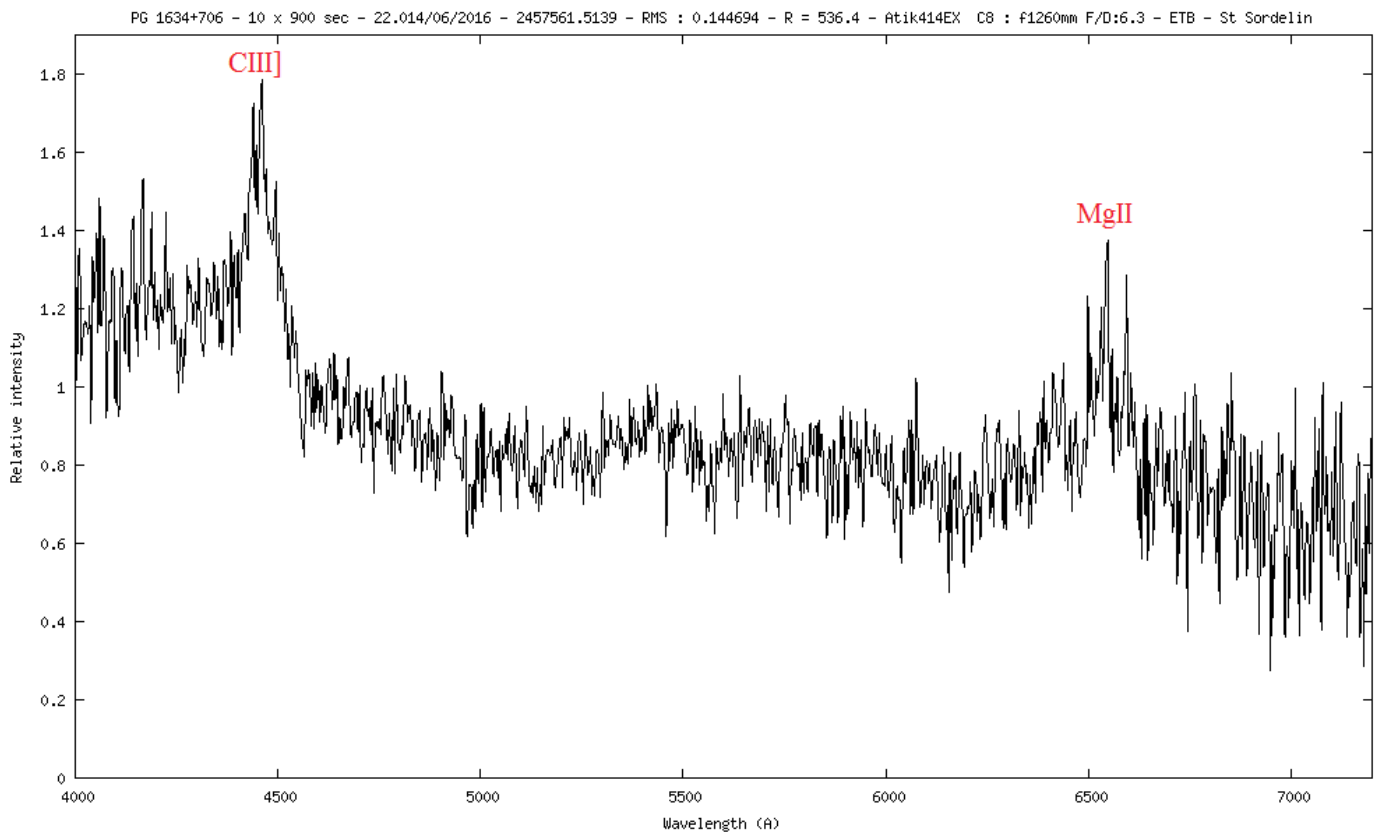
Champ autour du quasar, qui se trouve juste en dessous de la fente.



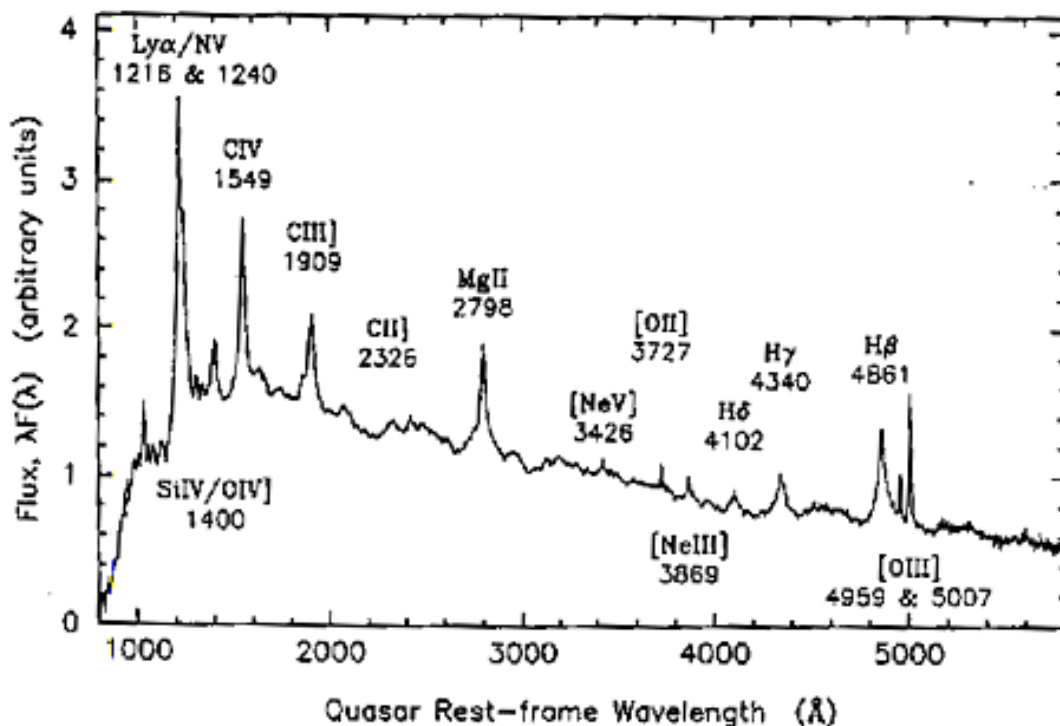
Le quasar au centre avec la croix bleu (capture d'écran sur Simbad)



Voici le spectre de PG 1634+706 :



Ci-dessous les raies d'émissions présentes dans un quasar avec les longueurs d'ondes indiquées au repos. source : <http://www.astrosurf.com/buil/quasar.htm>



Spectre synthétique d'un quasar compilé par P. J. Francis & all. (Ap J., 373, 465-470, 1991). Les longueurs d'onde sont celles d'un objet au repos. Sur la gauche du doublet, raie Lyman α (1216 Å) et raie NV (1240), soit vers les courtes longueur d'onde, le flux spectral baisse rapidement en raison des nuages de gaz situés en avant du quasar, sur la ligne de visée (de nombreuses raies Lyman α en absorption, correspondant à des nuages d'hydrogène de z inférieur à celui du quasar, ont pour conséquence de "bloquer" la lumière de ce dernier, c'est ce qu'on appelle la "forêt Lyman α ").

Revenons sur le spectre, avec la raie d'émission du CIII] mesurée à 4465.5A

1) Calcul du redshift :

$$z = (\lambda_1 - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$z = (4465,5 - 1909) / 1909$$

$$\mathbf{z = 1.3365}$$

2) Calcul de la vitesse de recession relativiste :

$$V_r = c \times [((z+1)^2 - 1) / ((z+1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times [((1.3365 + 1)^2 - 1) / ((1.3365 + 1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times (4.45923 / 6.45923)$$

$$V_r = 299792.458 \times 0.690441$$

$$\mathbf{V_r = 206\,966.39\,km.s^{-1}}$$

3) Calcul de la distance :

Pour trouver la distance de ce quasar la relation qui relie Distance = Vitesse / Ho , ne marche plus vraiment. Il faut utiliser une autre méthode qui relie des paramètres cosmologiques, redshift, facteur d'échelle, pour la trouver.

On va reprendre le site internet utilisé tout à l'heure pour calculer la distance avec les paramètres cosmologiques :

For $H_0 = 69.6$, $\Omega_M = 0.286$, $\Omega_{vac} = 0.714$, $z = 1.337$

- It is now 13.721 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 4.752 Gyr.
- The [light travel time](#) was 8.969 Gyr.
- The [comoving radial distance](#), which goes into Hubble's law, is 4112.8 Mpc or 13.414 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 291.403 Gpc³.
- The [angular size distance](#) D_A is 1760.2 Mpc or 5.7411 Gly.
- This gives a scale of 8.534 kpc/".
- The [luminosity distance](#) D_L is 9609.4 Mpc or 31.342 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or 9.461×10^{26} cm.

1 Gyr = 1,000,000,000 years.

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = 3.08568×10^{24} cm, or 3,261,566 light years.

Une autre solution :

(source documentaire : Astronomie et astrophysiques d'Agnès Acker)

Pour un photon observé à 4465,5 Å, le facteur d'étirement est égal à $(4465,5/1909) = 2,33918$

Donc le facteur d'échelle au moment de l'émission était de :

$$a(t) = 1/2,33918$$

$$\mathbf{a(t) = 0,4275}$$

Le facteur d'échelle se calcule aussi par la formule :

$$a(t) = 1 / (1+z)$$

$$\text{ou } a(t) = 1 / (1 + 1,3365)$$

$$\mathbf{a(t) = 0.4279}$$

(à noter que le redshift se calcule aussi par la formule : $z = (1 - a(t)) / a(t)$)

L'univers s'est agrandi de 57,2 % depuis l'émission des photons jusqu'à cette réception.

Que valait la distance de ce quasar Q au moment de l'émission ? L'expansion a éloigné le quasar Q de l'observateur O, d'autant plus que le temps de voyage de la lumière était plus long. On peut calculer que la distance D1 de Q(t1) à O(t0) est telle que :

$$D1 = 3 \times \tau a (1-\sqrt{a}) \quad (\text{avec } \tau = 14 \text{ milliards d'années}) \text{ ce qui correspond à une valeur de :}$$

$$D1 = 3 \times 14 \times 0,427 \times (1-\sqrt{0.427})$$

$$\mathbf{D1 = 6,21 \text{ milliards d'années lumière.}}$$

Cette distance a été étirée d'un facteur (1/a) donc maintenant le quasar Q se trouve à

$$D0 = 42 \times (1-\sqrt{a})$$

$$D0 = 42 \times (1-\sqrt{0.427})$$

$$\mathbf{D0 = 14,52 \text{ milliards d'années.}}$$

Donc un photon émis au temps t1 par ce quasar sera reçu 6.21 milliards d'années plus tard, quand sa distance sera de 14.52 milliards d'année-lumière (valeurs correspondant au temps de voyage de la lumière).

On peut aussi calculer la température de l'Univers à l'époque où les photons sont partis grâce au redshift :

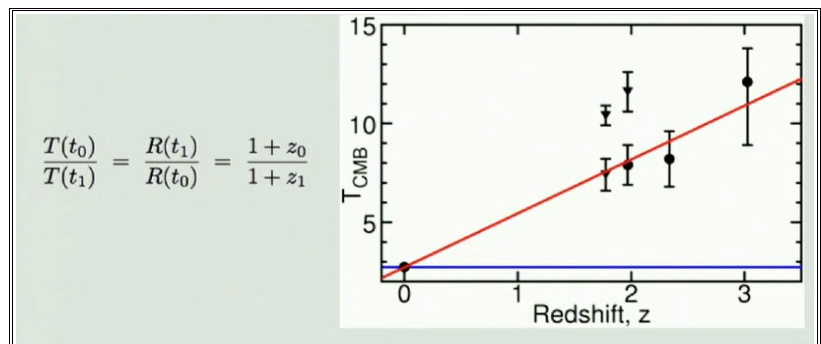
$$T(t_0) / T(t_1) = (1+z_0) / (1+z_1)$$

$$T(t_0) \times (1+z_1) = T(t_1) \times (1+z_0)$$

$$T(t_1) = (T(t_0) \times (1+z_1)) / (1+z_0)$$

$$T(t_1) = (2,725 + 1 + 1,3367) / (1+0)$$

$$\mathbf{T(t_1) = 5,0617 \text{ K}}$$



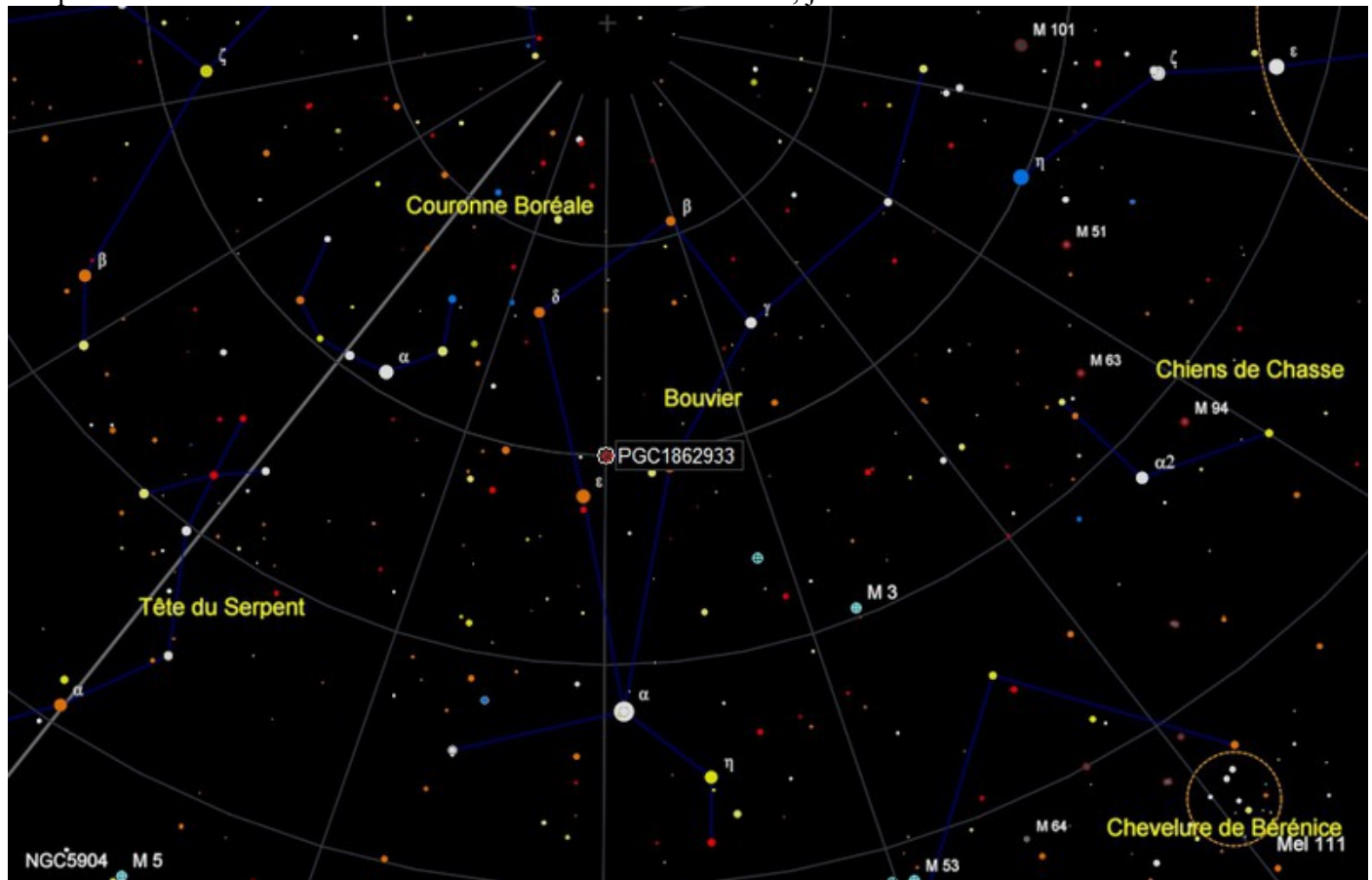
(documents du cours de Cosmologie de Mr Valls-Gabaub 12/04/2016)

Quand les photons sont partis l'Univers avait une température de 5,0617 K

E – Le Quasar CSO1061 : m = 16,38

Est l'objet faisant certainement parti des plus faiblement accessibles avec du matériel amateur en spectroscopie. Sa magnitude est de 16.38 soit un peu moins de 10 millions de fois moins lumineux que Véga (m=0). C'est la raie Lyman alpha, avec son fort flux, qui permet de l'identifier et de réaliser les mesures sur le spectre. En imagerie seulement 1 photon sur 2 arrive sur le détecteur CCD. En spectroscopie c'est pire seulement 10% des photons arriveront sur le capteur CCD...

Le quasar CSO1061 se trouve dans la constellation du Bouvier, just à coté de PGC1862933.



Dans le document ci-dessous, le tableau présente les raies d'émission des quasars et leur flux relatifs associés.

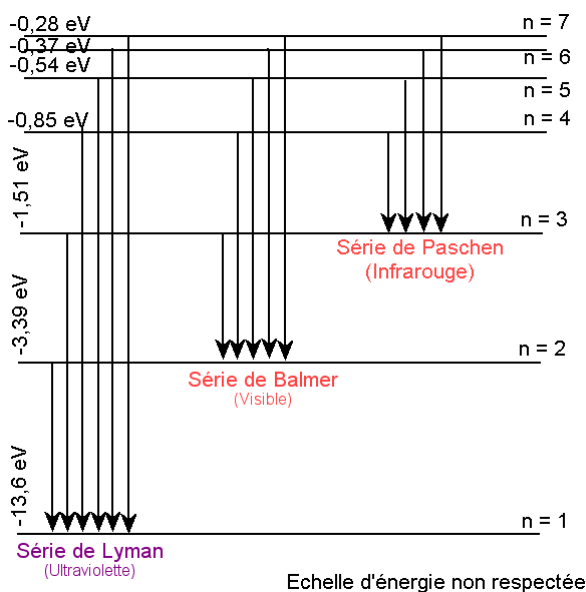
Adapté d'après P. J. Francis & All		
Indentification	Longueur d'onde en Å	Flux relatif
H α	6563	/
[OIII]	5007	3.4
[OIII]	4959	0.93
H β	4861	22
H γ + [OIII]	4340	13
MgII	2798	34
CIII]	1909	29
CIV	1549	63
SiIV + OIV	1400	19
Ly α + NV	1216	100

Pour rappel voici les niveaux d'énergie et émission de l'atome d'hydrogène.

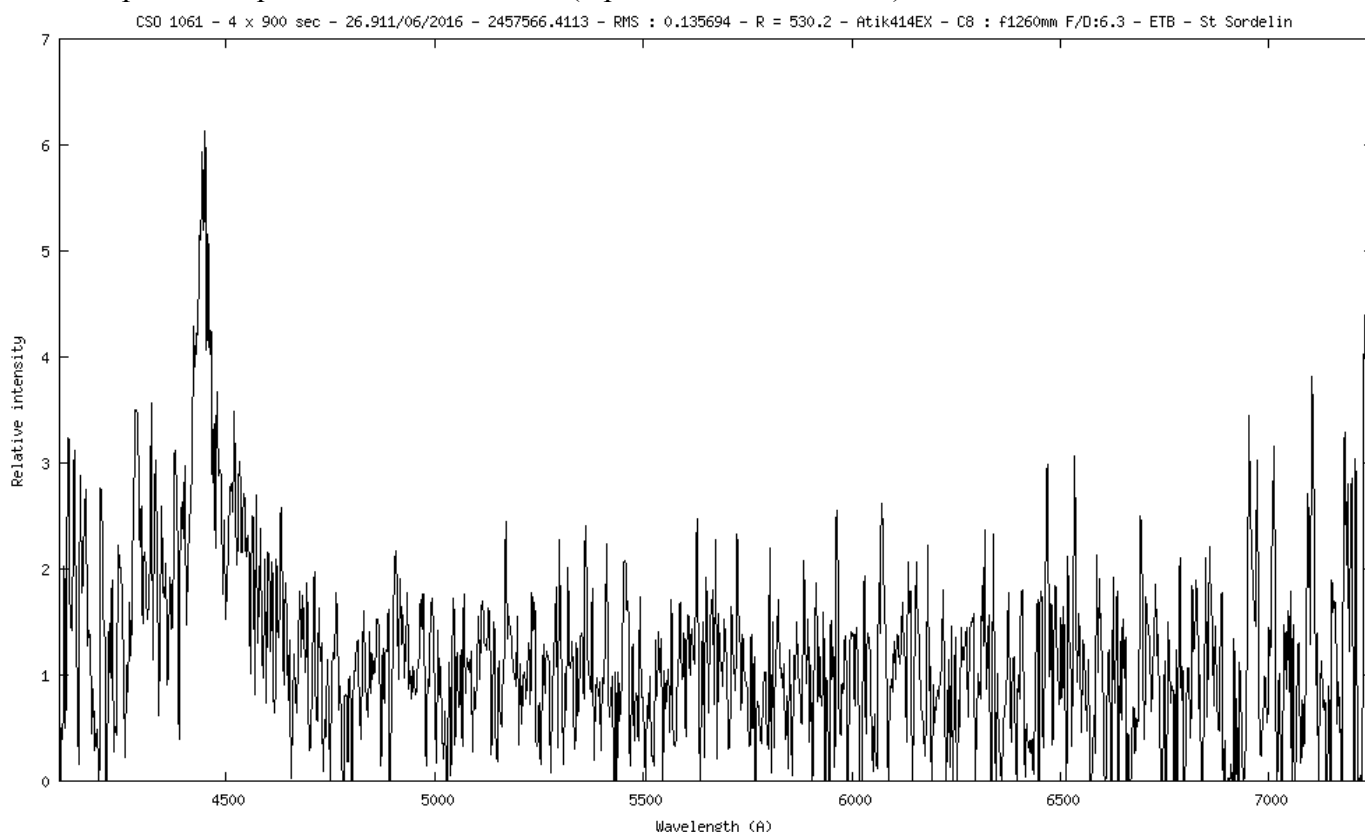
La raie Lyman alpha en émission est simplement un électron qui redescend de niveau ; de l'orbite n°2 (niveau d'énergie 2) il redescend vers l'orbite n°1 (niveau d'énergie 1) en redonnant un photon Lyman alpha.

Cette transition se fait dans l'ultraviolet mais le décalage, le redshift (z) fait qu'elle apparait ici dans notre quasar CSO1061 dans le spectre visible. De 1215A elle apparait a 4449.5A

Niveaux d'énergie et émission de lumière par l'atome H :



Voici le spectre du quasar CSO1061 obtenu (4 poses de 900 secondes) :



L'essentiel du continuum est du bruit de fond, seule apparait d'une façon nette la raie à 4449.5 Å.

C'est la raie Lyman alpha, qui au repos est à 1215 Å.

Le calcul du redshift est alors assez simple :

$$z = (\text{lambda mesurée} - \text{lambda repos}) / \text{lambda repos}$$

$$z = (4449.5 - 1215) / 1215$$

$$\mathbf{z = 2.6621}$$

Calcul de la vitesse relativiste :

$$V_r = c \times [((z+1)^2 - 1) / ((z+1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times [((2.6621+1)^2 - 1) / ((2.6621+1)^2 + 1)]$$

$$V_r = 299792.458 \times (13.41097 / 14.41097)$$

$$\mathbf{V_r = 278\,989.38\,km/s}$$

Ce qui fait 93% de la vitesse de la lumière !!!... Pour le calcul de la distance du quasar en tenant compte de différents paramètres cosmologiques on trouve 11.24 milliards d'années.... pour rappel l'Univers a un âge estimé à 13.7 milliards d'années.

Les photons sont donc partis lorsque l'Univers était âgé de 2.4 milliards d'années...

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

For $H_0 = 69.6$, $\Omega_M = 0.286$, $\Omega_{vac} = 0.714$, $z = 2.662$

- It is now 13.721 Gyr since the Big Bang.
- The age at redshift z was 2.474 Gyr.
- The light travel time was 11.246 Gyr.
- The comoving radial distance, which goes into Hubble's law, is 6125.9 Mpc or 19.980 Gly.
- The comoving volume within redshift z is 962.919 Gpc³.
- The angular size distance D_A is 1672.7 Mpc or 5.4558 Gly.
- This gives a scale of 8.110 kpc/".
- The luminosity distance D_L is 22433.1 Mpc or 73.168 Gly.

1 Gly = 1,000,000,000 light years or 9.461×10^{26} cm.

1 Gyr = 1,000,000,000 years.

1 Mpc = 1,000,000 parsecs = 3.08568×10^{24} cm, or 3,261,566 light years.

Pour comprendre sa distance, prenons la galaxie d'Andromède. Elle est à 2.53 millions d'années-lumière. Pour arriver à ce quasar il faudrait faire 4445 fois cette distance....

Plus curieux encore, du fait de l'expansion un photon émis au temps t_1 par ce quasar sera reçu 11.24 milliards d'années plus tard, quand sa distance, du fait de l'expansion, sera de 20 milliards d'année-lumière (valeurs correspondant au temps de voyage de la lumière : source documentaire : Astronomie et astrophysiques d'Agnès Acker).

Pour un photon Lyman alpha à 1215Å observé à 4449.5Å, le facteur d'étirement est égal à :

$$(4449.5 / 1215) = 3.662139$$

Donc le facteur d'échelle au moment de l'émission était de :

$$a(t) = 1/3.662139$$

$$\mathbf{a(t) = 0.27306}$$

Ce qui veut dire que depuis que les photons sont partis il y a 11.24 milliards d'années, l'univers a grandi de 72.7 %.

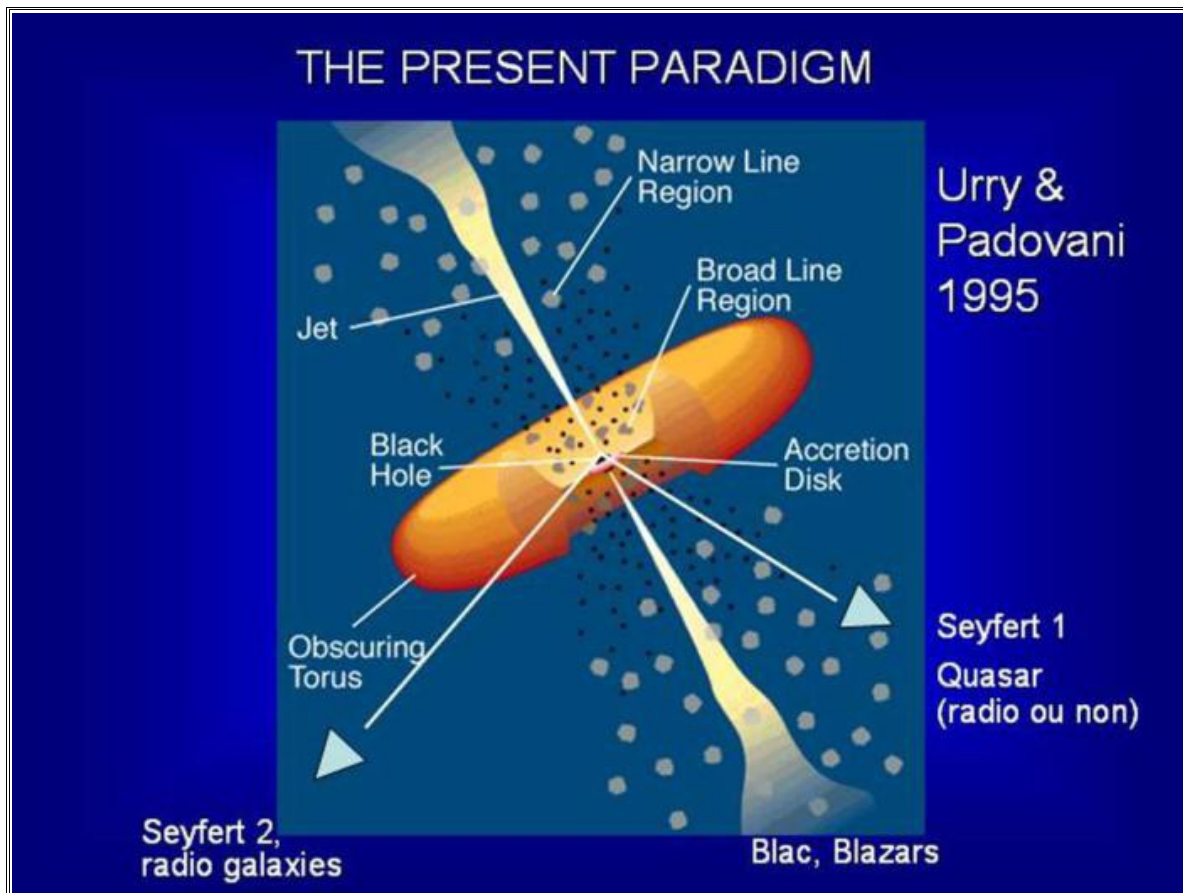
Conclusion:

En guise de conclusion de ce rapport, une nouvelle connaissance des galaxies s'est ouvert pour moi. Avec l'acquisition des spectres, et voyant leurs allures bien différents, j'ai remarqué que l'on pouvait classer les galaxies selon leurs classes spectrales. On connaît les formes de classifications conventionnelles des galaxies en : spirales, spirales barrées, lenticulaires, elliptiques,... mais certaines sont apparues "**vivantes**" avec des noyaux extrêmement brillants ainsi que des raies d'émissions sur leurs spectres.

10% des galaxies sont appelées des « **galaxie active** » ie **AGN (Galaxies à Noyaux Actifs)** laissant entre voir qu'elles ont en leur centre un trou noir.

Ce qui est intéressant avec les AGN, c'est qu'ils montrent un « **modèle d'unification** » qui relie différents objets entre eux :

Voici le modèle d'Unification :



- galaxies de seyfert 1,
- galaxies de sayfert 2,
- quasars,
- blazars,
- galaxies radio,
- BL Lac (objet de Lacertae),

sont en fait des objets assez similaires, mais vue avec une ligne de visée différente !

Une étude plus approfondie pourrait être une suite logique et intéressante à ce rapport de stage.

Fond documentaire :

Sites internet :

<https://media4.obspm.fr/>
<http://www.shelyak.com/>
http://www.shelyak.com/produit.php?id_produit=113&id_rubrique=12
<http://www.astronomie-amateur.fr/>
<http://bmauclaire.free.fr/spcaudace/>
<http://wsdiscovery.free.fr/astronomie/spectro/atlas/seriebr/>
<http://www.wikipedia.fr/index.php>
<http://crab0.astr.nthu.edu.tw/~hchang/ga1/ch05-03.htm>
<https://www.edx.org/course/greatest-unsolved-mysteries-universe-anux-anu-astro1x-2>
<http://www.cala.asso.fr/Etude-du-spectre-de-la-comete-C.html>
<http://www.astrosurf.com/buil/quasar.htm>
http://david.elbaz3.free.fr/master_m2/z_master_m2/CoursGalaxiesElbaz_7_distances_cosmologie.pdf
<http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Livres :

Astronomie Astrophysique introduction
Des quasars aux trous noirs

d'Agnès Acker
de Suzy Collin Zahn

Annexe

Spectres de galaxies pour calculer la Loi de Hubbe

Voici les spectres des galaxies : il y en a 16. Chaque objet sera renseigné de différentes informations tel que :

- sa magnitude dans la bande v
- le redshift z
- la vitesse calculée par le $c \times z$
- et la distance (vitesse / constante de Hubble (soit $70 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$))

M64 : Seyfert Galaxie : SA(rs)ab :

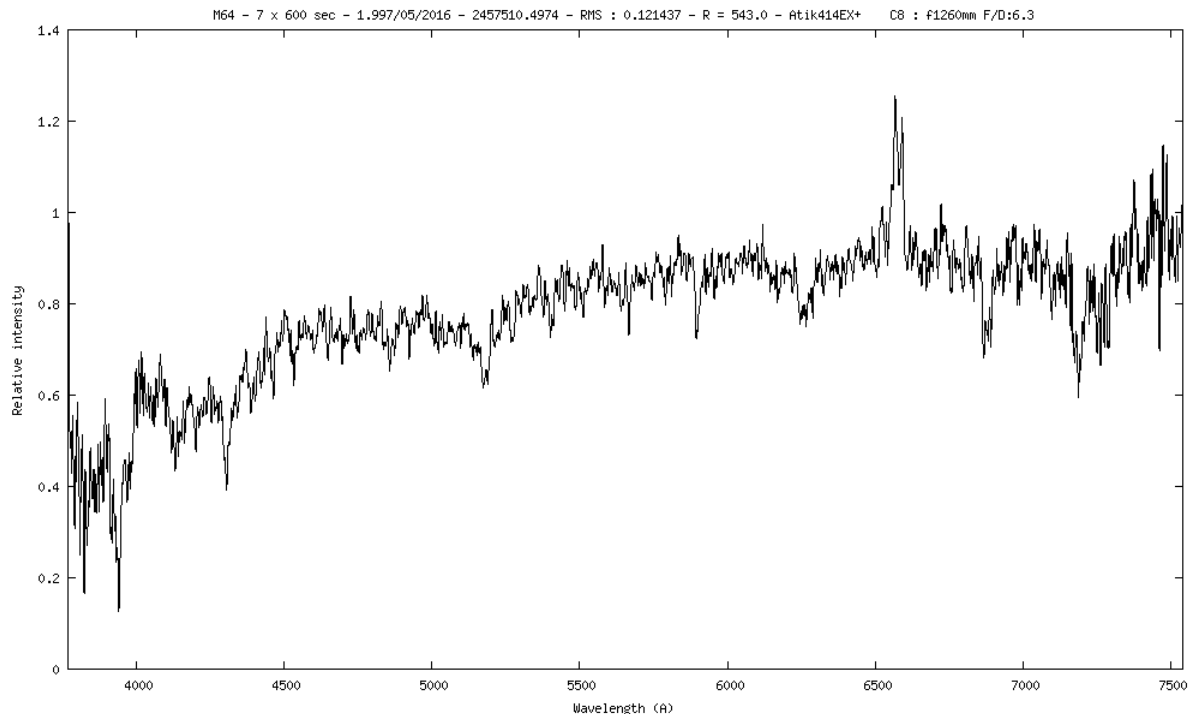
$v = 8.52$

$z = 0.000792$

$c.z = 237.6 \text{ km/s}$

$d = 3.394 \text{ Mpc} = 11,06 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 1/05/2016 = -15.835 km/s donc la vitesse de récession de **M64 est de 221.765 km/s**



M94 : Seyfert Galaxie SA(r)ab :

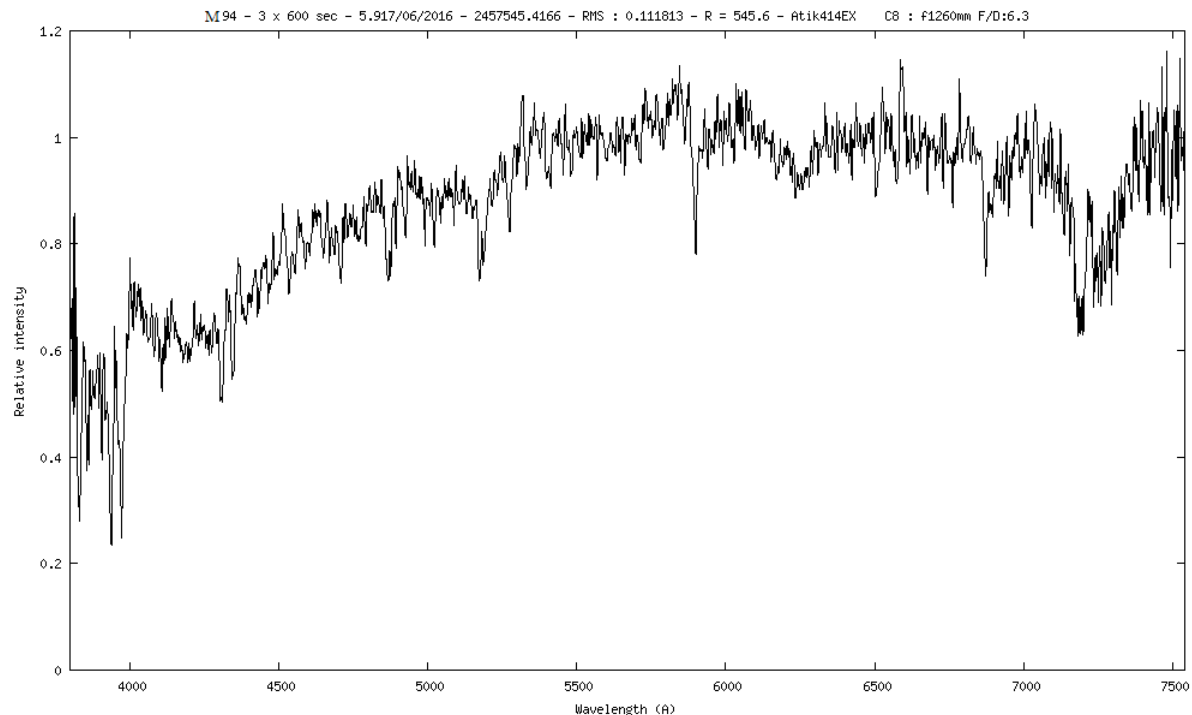
$v = 8.24$

$z = 0.001103$

$c.z = 330.67 \text{ km/s}$

$d = 4.72 \text{ Mpc} = 15.39 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 6/06/2016 = -21.894 km/s donc la vitesse de récession de **M94 est de 308.777 km/s**



M102 : Seyfert Galaxie :

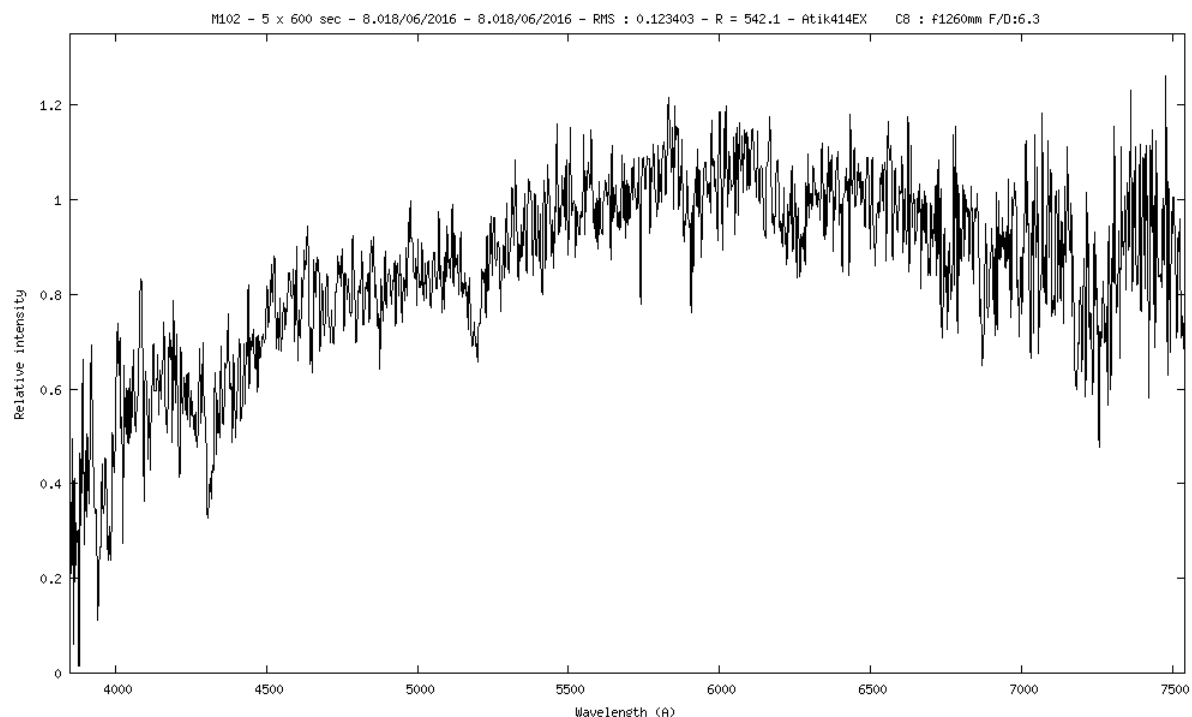
$v = 9.89$

$z = 0.002206$

$c.z = 661.34 \text{ km/s}$

$d = 9.44 \text{ Mpc} = 30.8 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 08/06/2016 = -10.841 km/s donc la vitesse de récession de **M102 est de 650.499km/s**



NGC4051 : Seyfert 1 Galaxie SABbc :

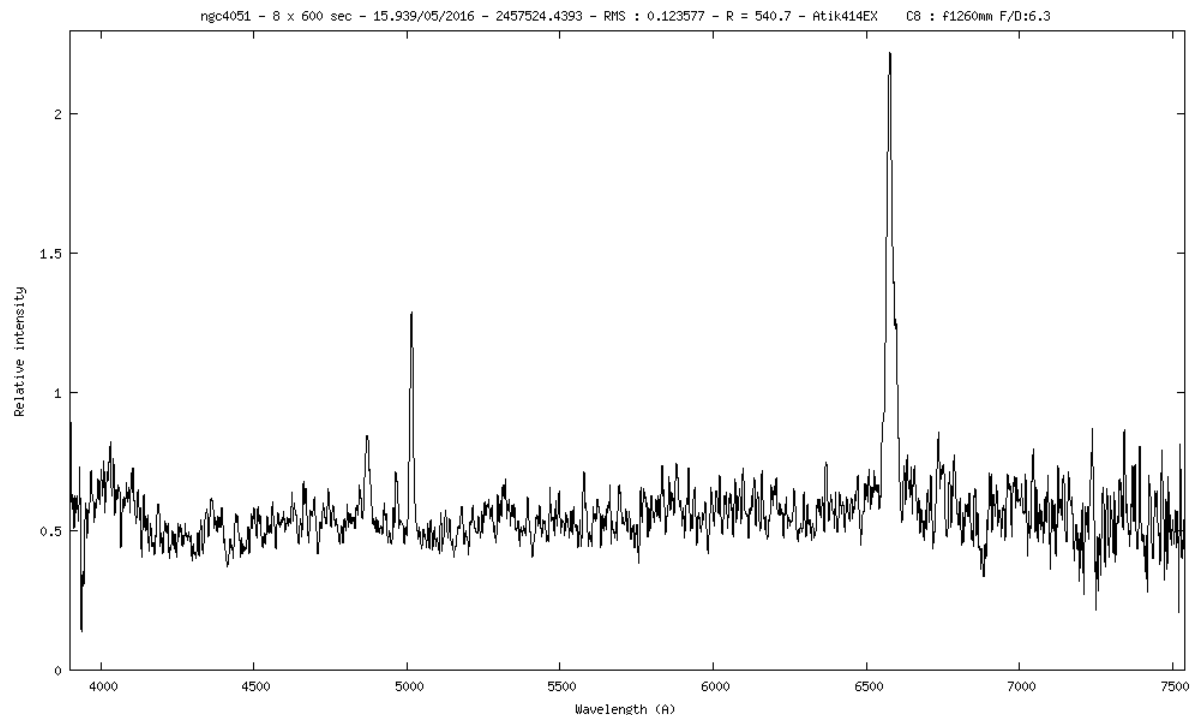
$v = 12.92$

$z = 0.002316$

$c.z = 694 \text{ km/s}$

$d = 9.914 \text{ Mpc} = 32.3 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -21.816 km/s donc la vitesse de récession de **NGC4051 est de 672.184 km/s**



NGC4151 : Seyfert 1 Galaxie SAB(rs)ab :

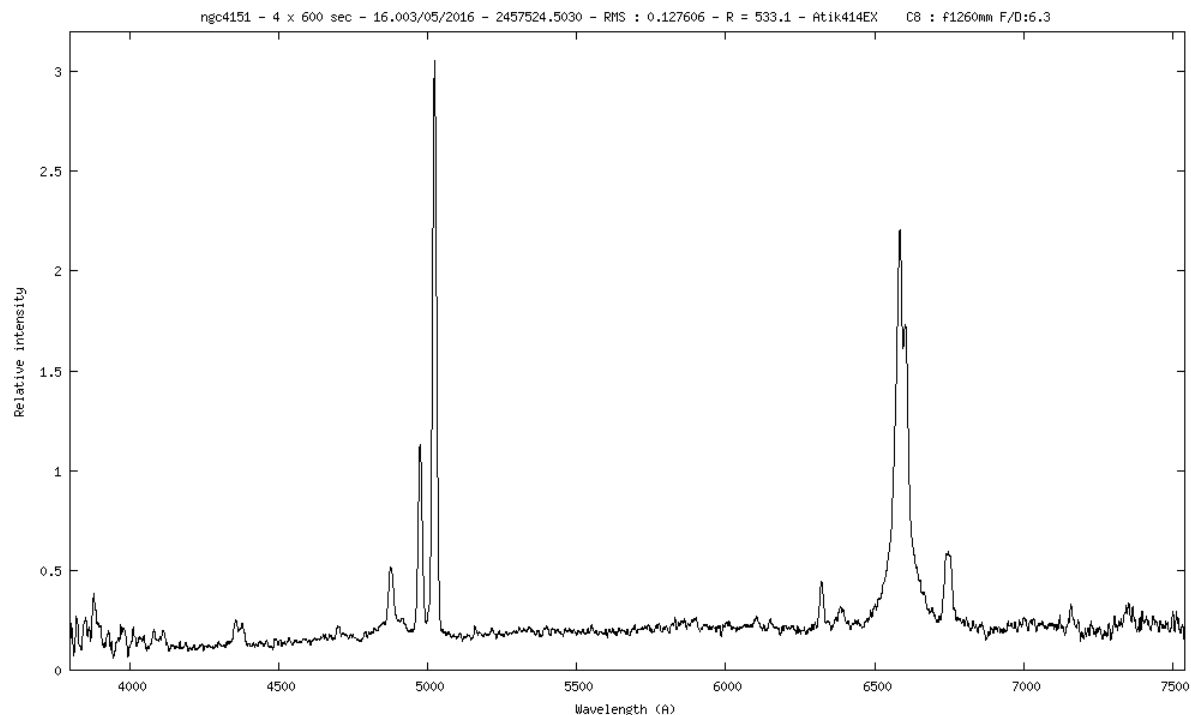
$v = 11.48$

$z = 0.003268$

$c.z = 979.8 \text{ km/s}$

$d = 13.997 \text{ Mpc} = 45.63 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -22.488 km/s donc la vitesse de récession de **NGC4151 est de 957.312 km/s**



M63 : Seyfert 2 Galaxie E1D :

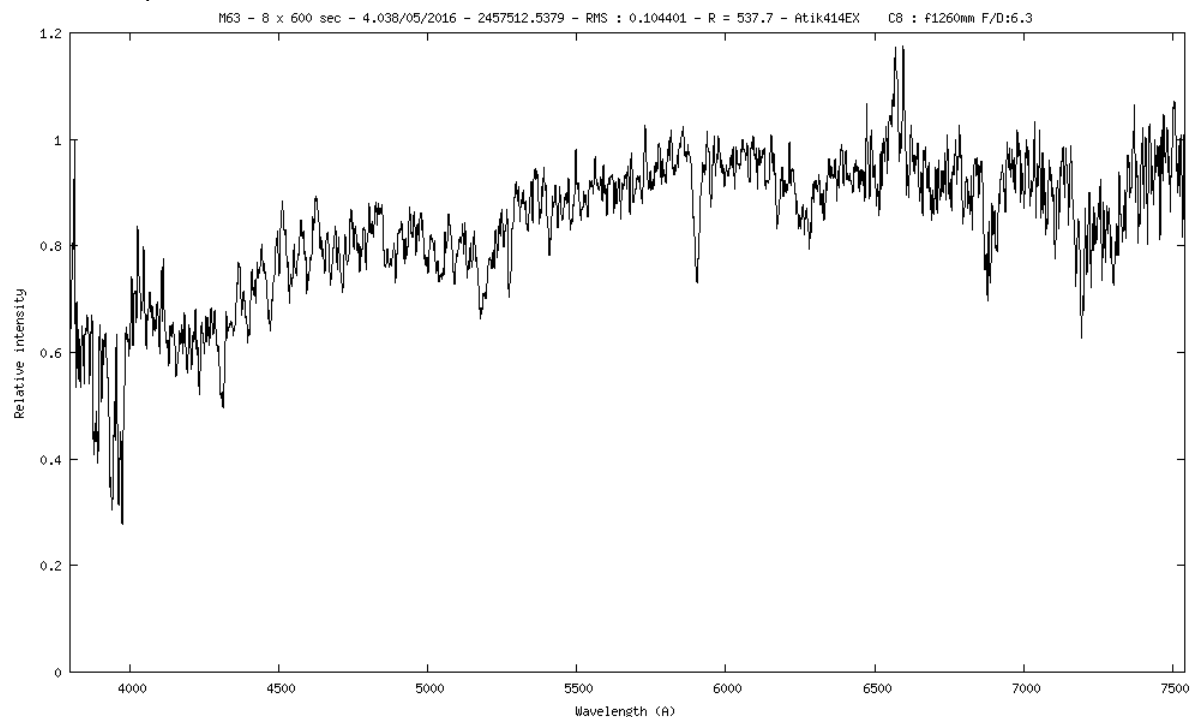
$v = 8.59$

$z = 0.0009447$ (sur H β)

$c.z = 283$ km/s

$d = 4.042$ Mpc = 13.2 millions d'années-lumière

La vitesse héliocentrique 4/05/2016 = -15.201 km/s donc la vitesse de récession de **M63 est de 267.799 km/s**



M84 : Seyfert 2 Galaxie E1D :

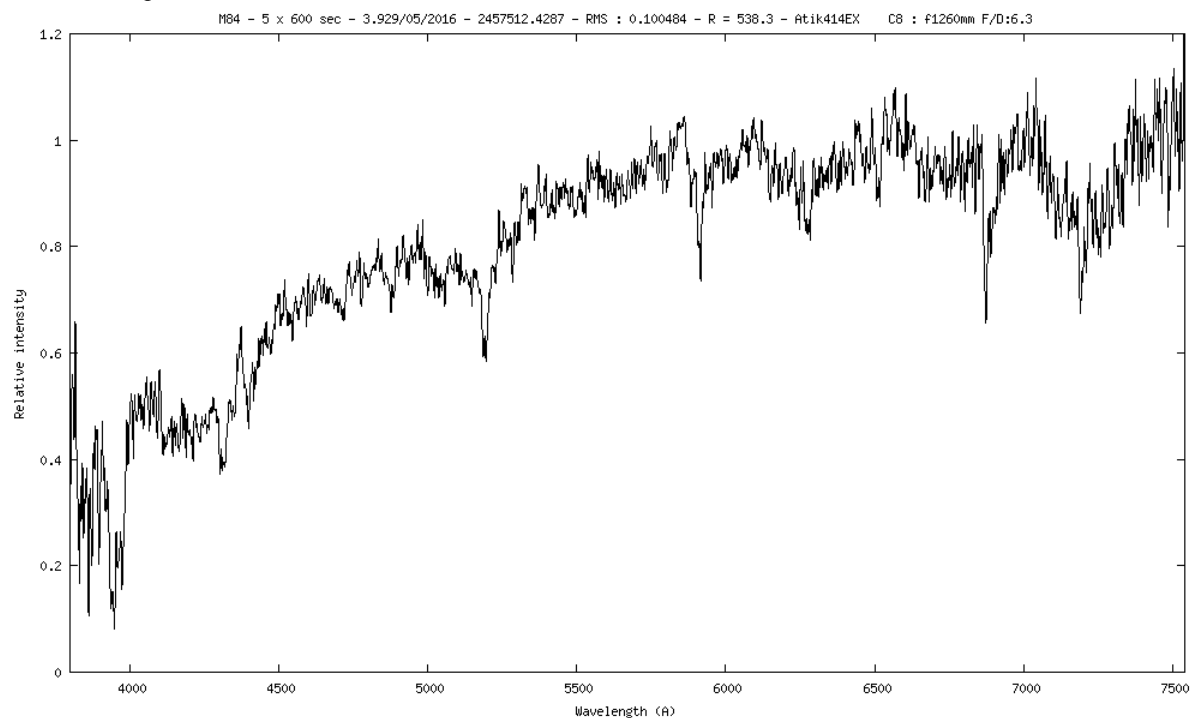
$v = 10.49$

$z = 0.0039$ (sur H β)

$c.z = 1170$ km/s

$d = 16.714$ Mpc = 54.5 millions d'années-lumière

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -19.123 km/s donc la vitesse de récession de **M84 est de 1150.877 km/s**



M106 : Seyfert 2 Galaxie SAB(s)bc :

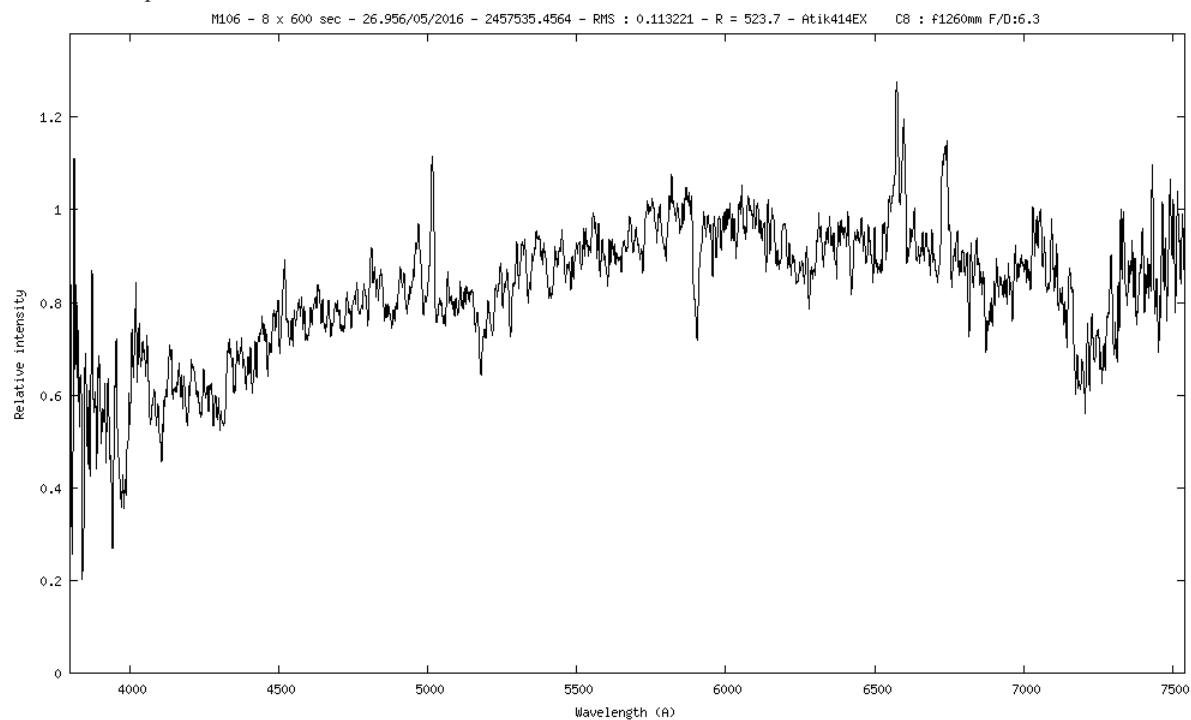
$$v = 8.41$$

$$z = 0.001706$$

$$c.z = 511.62 \text{ km/s}$$

$$d = 7.308 \text{ Mpc} = 23.82 \text{ millions d'années-lumière}$$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -21.126 km/s donc la vitesse de récession de **M106 est de 490.458 km/s**



M65 : Active Galaxy Nucleus : 1D :

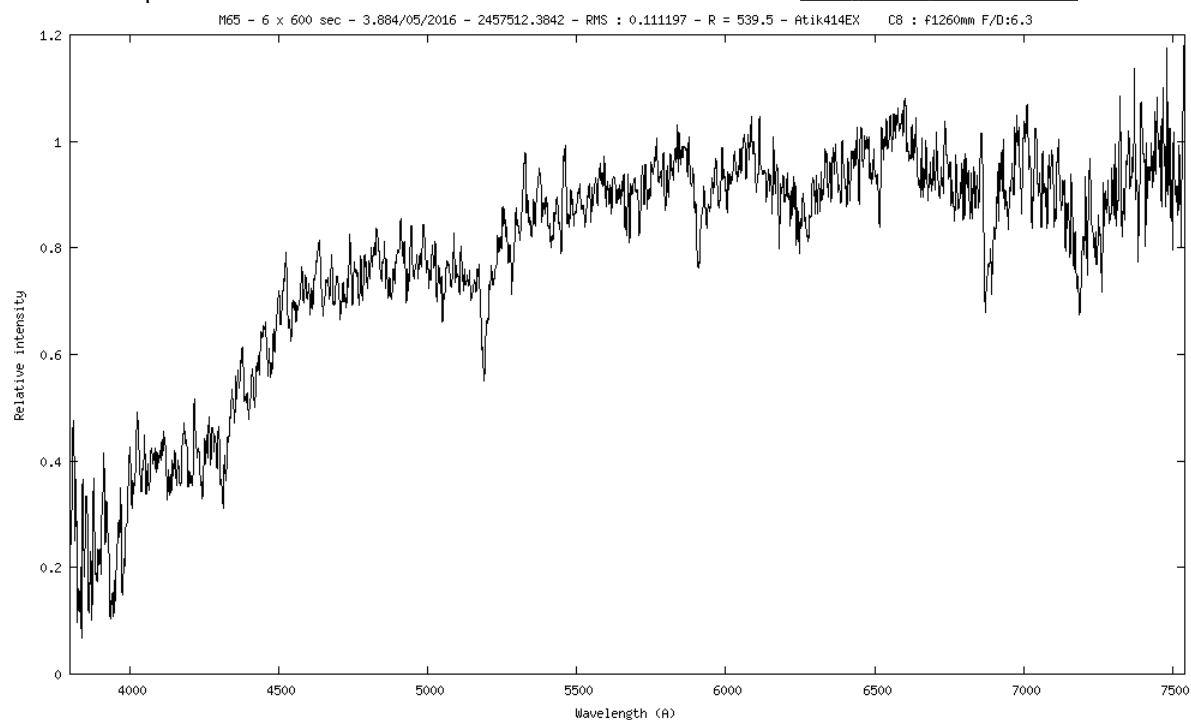
$$v = 10.25$$

$$z = 0.00263$$

$$c.z = 788.5 \text{ km/s}$$

$$d = 11.264 \text{ Mpc} = 35.37 \text{ millions d'années-lumière}$$

La vitesse héliocentrique 3/05/2016 = -12.963 km/s donc la vitesse de récession de **M65 est de 763.841 km/s**



M66 : Active Galaxy Nucleus : SAB(s)b :

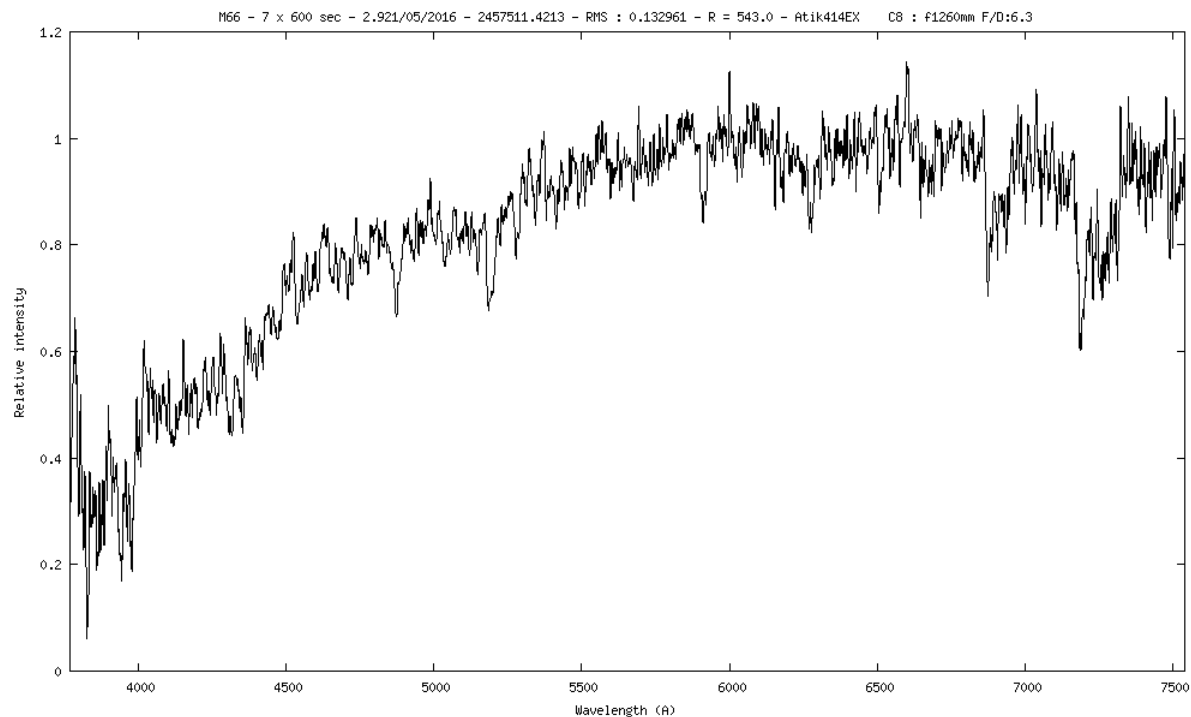
$v = 8.92$

$z = 0.002087$

$c.z = 625.82 \text{ km/s}$

$d = 8.94 \text{ Mpc} = 29.14 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 2/05/2016 = -24.278 km/s donc la vitesse de récession de **M66 est de 601.542 km/s**



M87 : Active Galaxy Nucleus : E-0+1pec :

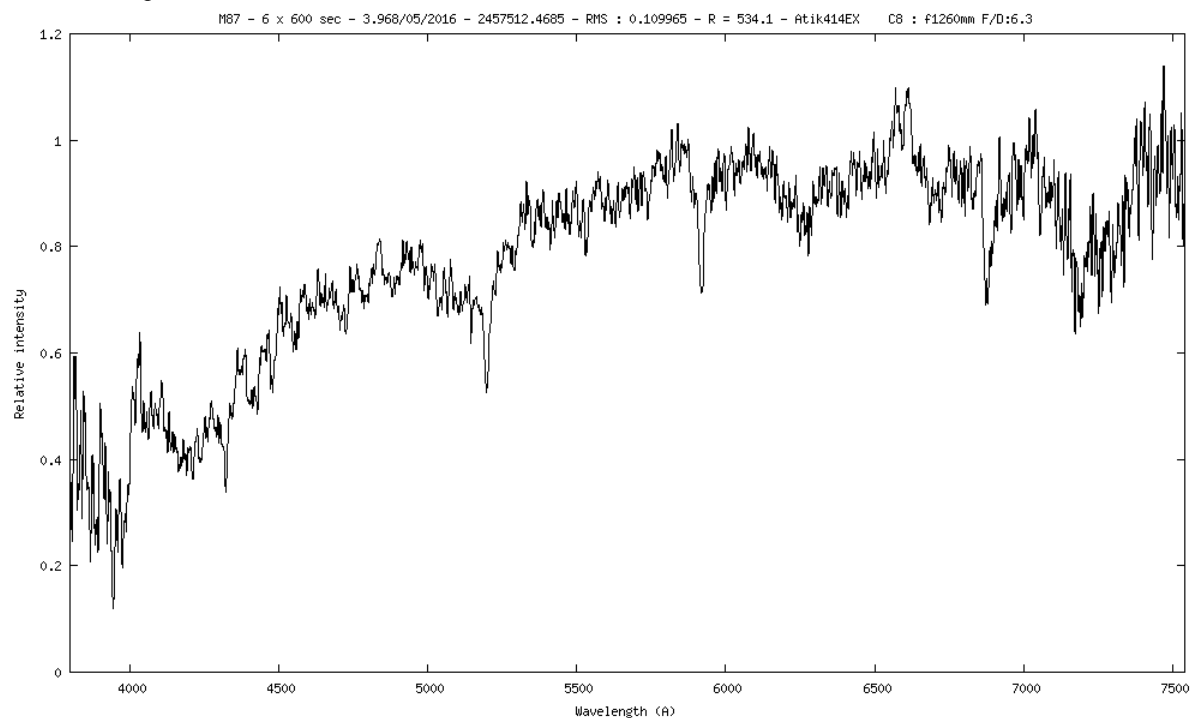
$v = 8.63$

$z = 0.004144$

$c.z = 1242.51 \text{ km/s}$

$d = 17.75 \text{ Mpc} = 57.86 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 3/05/2016 = -18.525 km/s donc la vitesse de récession de **M87 est de 1223.985 km/s**



M82 : Interacting Galaxies : IOedge :

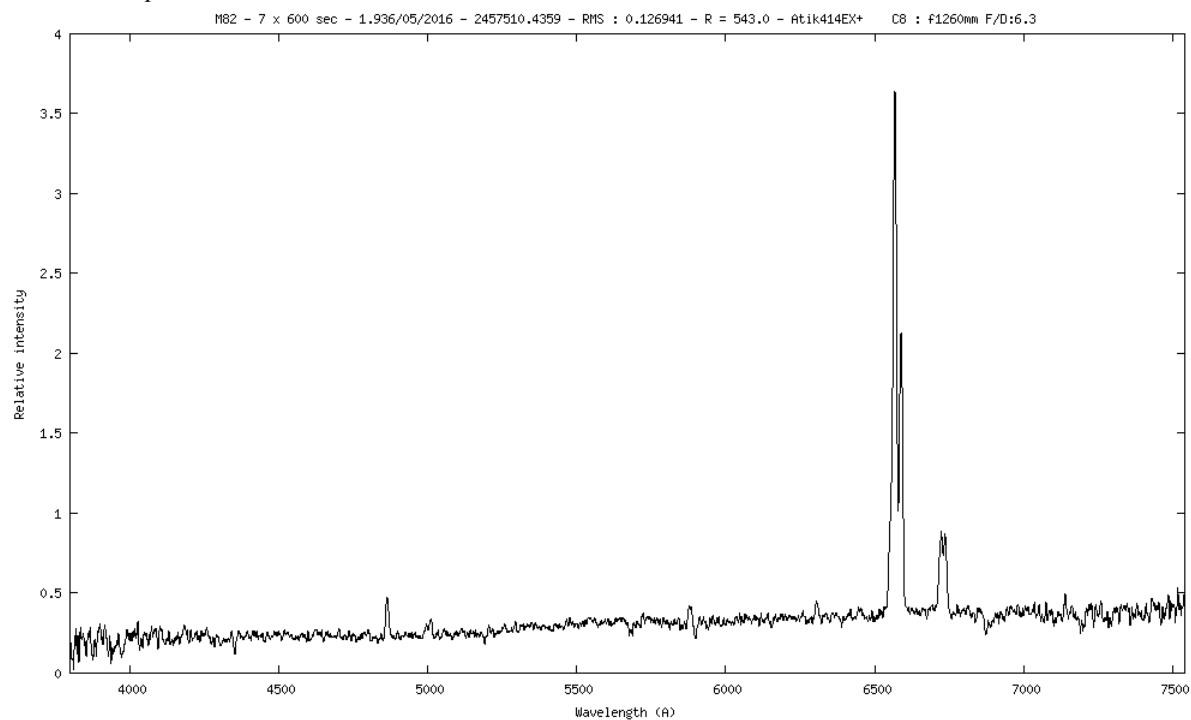
$v = 8.41$

$z = 0.0008381$

$c.z = 251.25 \text{ km/s}$

$d = 3.589 \text{ Mpc} = 11.7 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 1/05/2016 = -17.931 km/s donc la vitesse de récession de **M82 est de 233.319 km/s**



M99 : HII Galaxie SA(s)c :

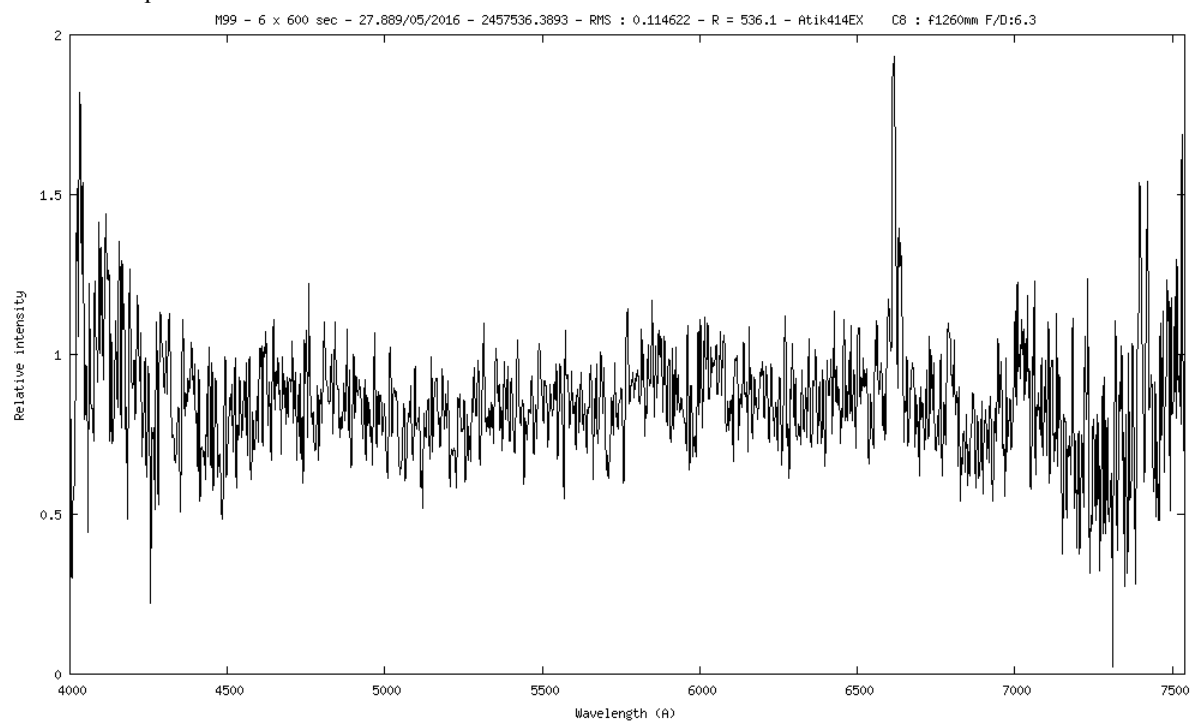
$v = 9.97$

$z = 0.008411$

$c.z = 2521.56 \text{ km/s}$

$d = 36 \text{ Mpc} = 117.43 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -21.162 km/s donc la vitesse de récession de **M99 est de 2500.398 km/s**



NGC4449 : Emission-line galaxy IBm :

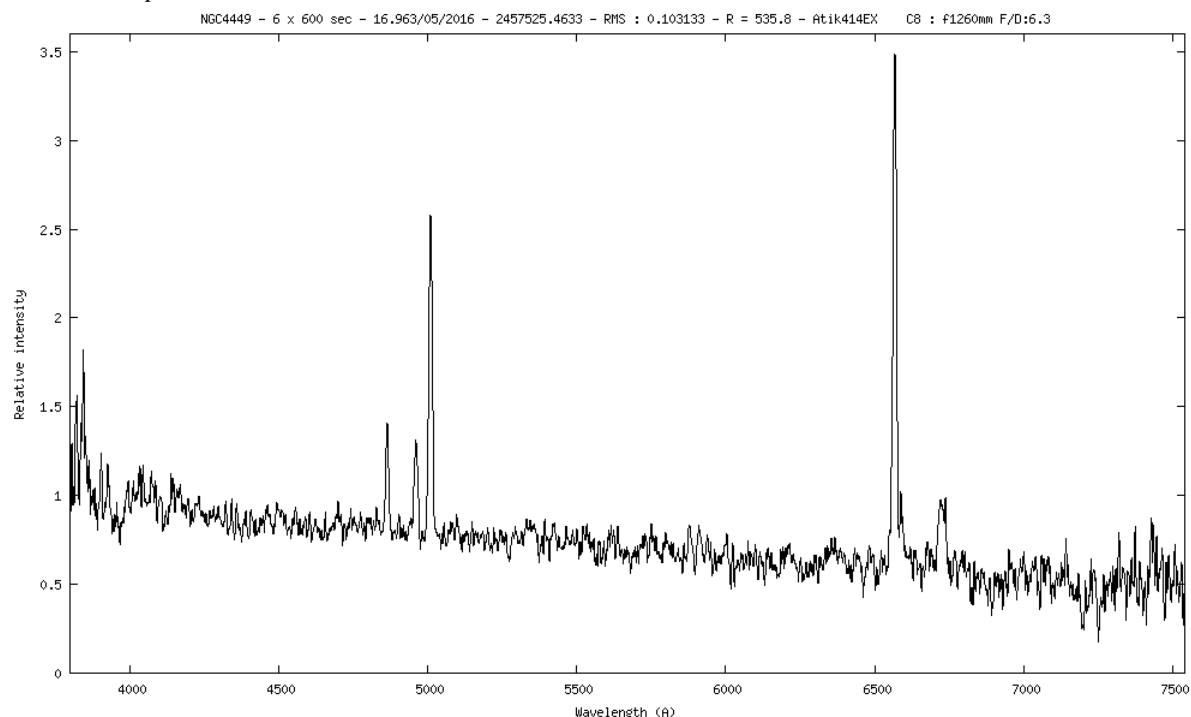
$v = 9.64$

$z = 0.000716$

$c.z = 214.7 \text{ km/s}$

$d = 3.067 \text{ Mpc} = 10 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -20.635 km/s donc la vitesse de récession de **NGC4449 est de 194.065 km/s .**



M109 : Galaxie in group of galaxies SB(rs)bc :

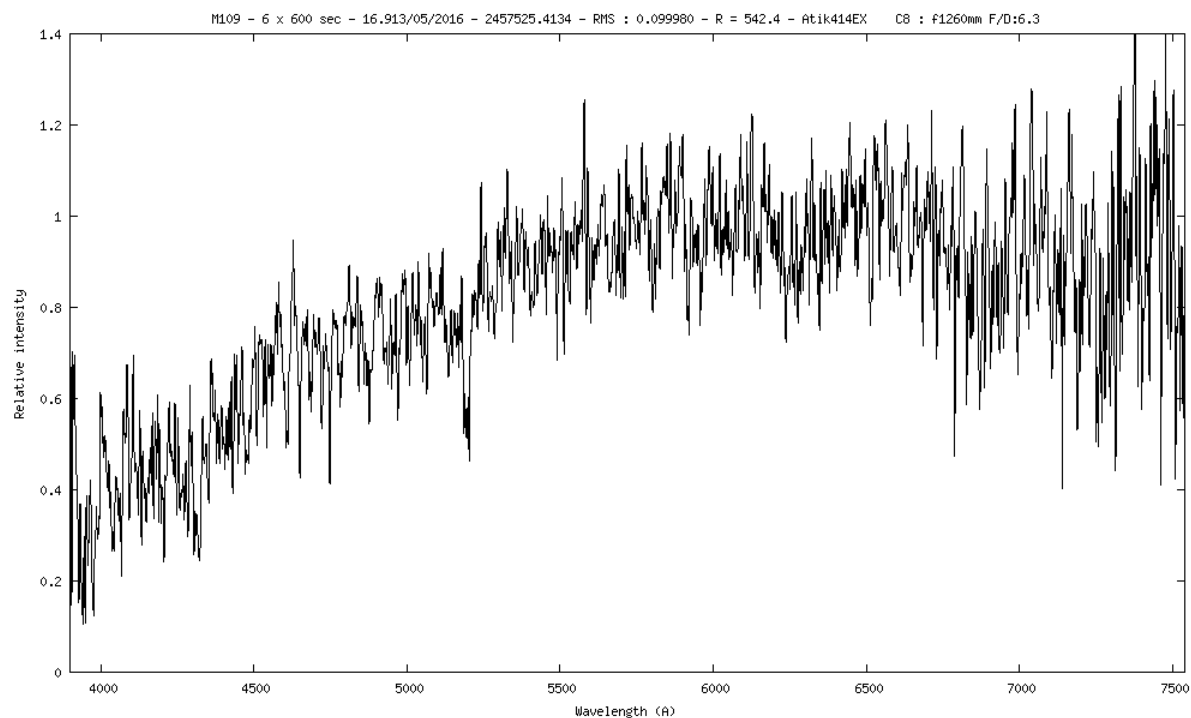
$v = 10.6$

$z = 0.004058$ (en moyennant le Mg 5195Å pour 5174Å)

$c.z = 1216.78 \text{ km/s}$

$d = 17.382 \text{ Mpc} = 56.66 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -20.029 km/s donc la vitesse de récession de **M109 est de 1196.751 km/s**



NGC4125 : Galaxy in Pair of Galaxies E(6) :

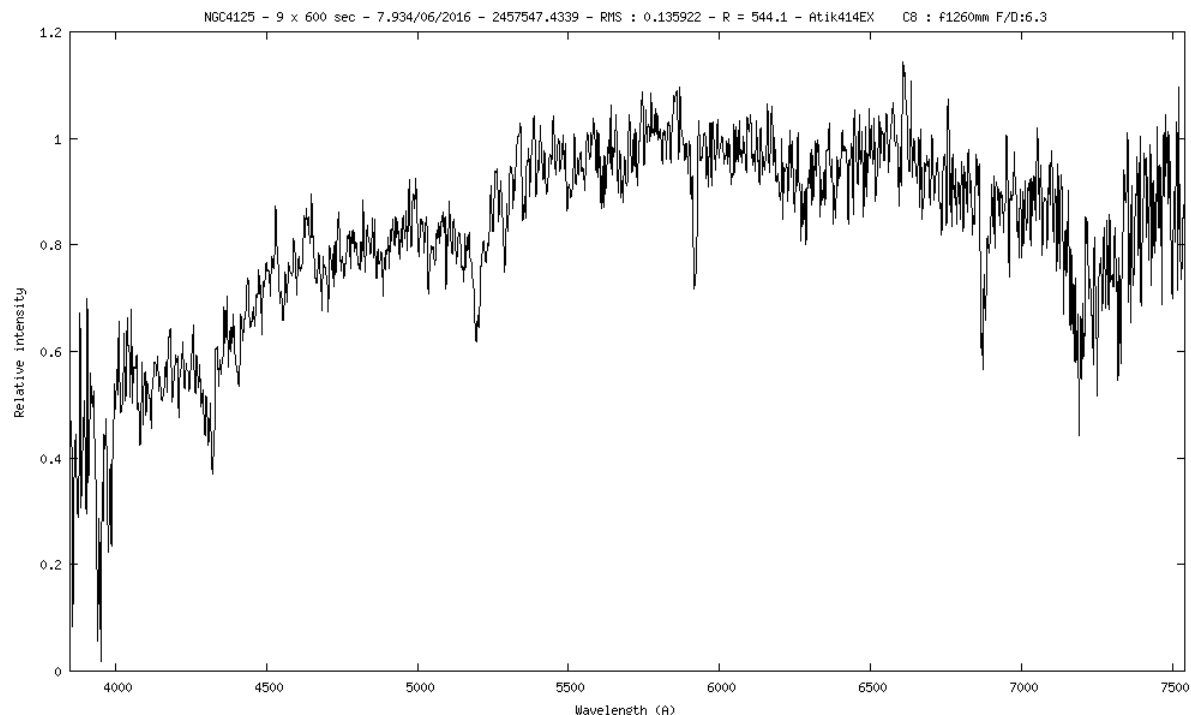
$v =$

$z = 0.003987$ (la fente du spectrographe a été mise sur un bord de la galaxie pour faire la supernova SN2016COJ)

$c.z = 1195.27 \text{ km/s}$

$d = 17.07 \text{ Mpc} = 55.6 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 6/06/2016 = -14.427 km/s donc la vitesse de récession de **NGC4125 est de 1180.843 km/s**



Ngc5353 : Blazar SO :

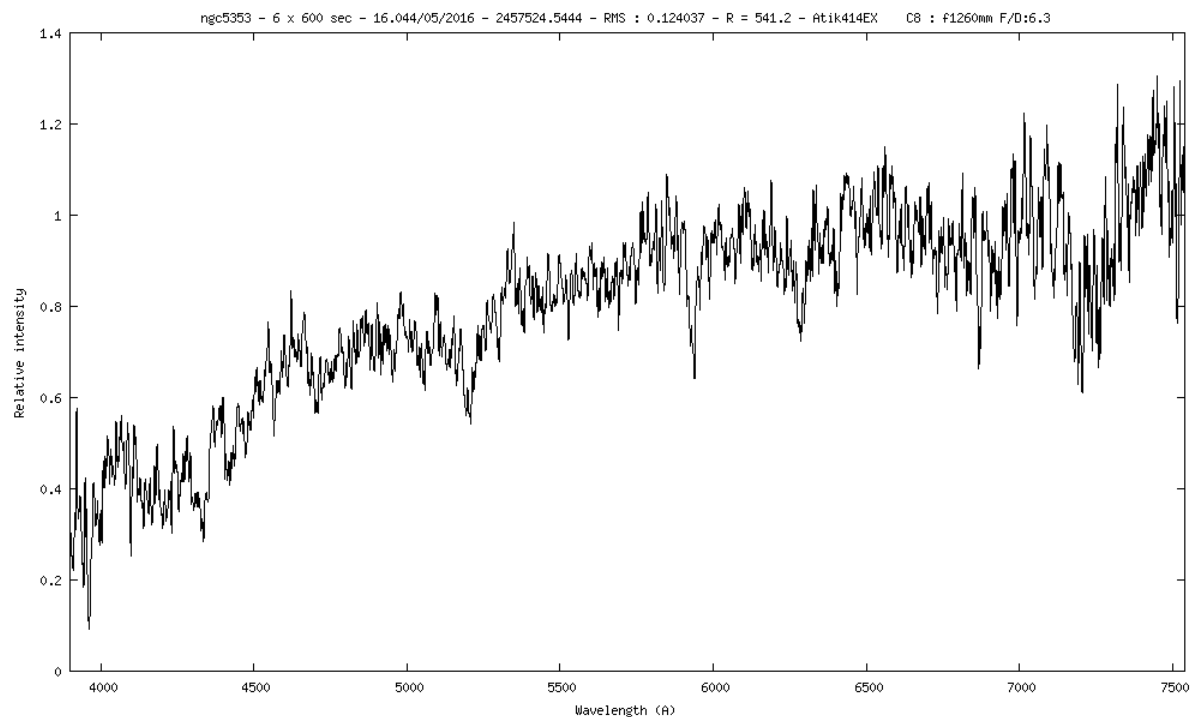
$v = 11.4$

$z = 0.0077634$ (sur Na 5893Å)

$c.z = 2327.42 \text{ km/s}$

$d = 33.248 \text{ Mpc} = 108.4 \text{ millions d'années-lumière}$

La vitesse héliocentrique 30/04/2016 = -14.954 km/s donc la vitesse de récession de **NGC5353 est de 2312.466 km/s**



Remerciements :

Aux professeurs du DU ECU pour leur engagement, leur pédagogie et les passions,

A mes parents,

Aux amis du club d'astronomie Les Céphéides,

Merci à Lydia pour la relecture pour les fautes d'orthographe,

A Alain Marbeuf pour sa conférence sur la Spectroscopie 'nuits des étoiles 2014,

Aux membres du forum Aras spectroscopie, et pour son aide et conseils Olivier Garde,

Un grand Merci à Benjamin Mauclaire, pour son logiciel, et tous ces conseils et sa bienveillance,

A François Tessier pour tout son travail sur la spectroscopie ainsi qu'à Olivier Thizi et François Cochard pour leur entreprise,

A Christian Buil et Valérie Desnoux pour leur implication dans la spectroscopie et leurs logiciels (ISIS et Visualspec).