Le quasar 3C 273

Helmut Müller

Mémoire hors stage

DU-ECU 2015-16

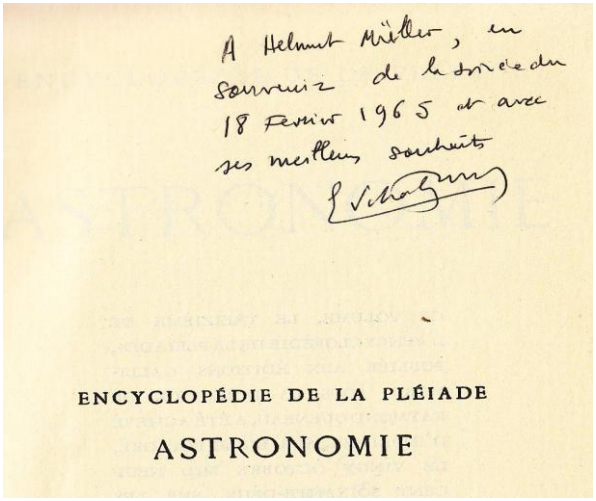
Le radiotélescope de Parkes (Nouvelle Ecosse, Australie)
qui servit à déterminer la position précise du quasar 3C 273
Photo Stephen West (Wiki Commons)

Sommaire

Pourquoi le quasar 3C273 ? 4
La radioastronomie 5
Le radiotélescope 5
Le quasar 3C 273 7
Repérage 7
Identification optique 8
Paramètres astronomiques 8
Travaux personnels 9
Localisation céleste 9
Etude du spectre optique 10
Vitesse de récession 13
Estimation de la distance 13
Conclusion 14
Références 14

Pourquoi le quasar 3C273 ?

Pour un mémoire hors-stage pour lequel il n'y avait pas de directive particulière sur le fond, il me fallait bien choisir un objet astronomique. Pour moi, l'astronomie est davantage un domaine de culture que d'expérimentation, et, si j'envie les heureux propriétaires de bons yeux et de matériel d'observation amateur de plus en plus sophistiqué avec le temps qui passe, au point que bientôt ils passeront pour de vrais professionnels, j'ai plus de goût pour le savoir que pour les nuits froides. Je n'ai donc pas de résultats d'observation personnelle à mon actif.



Mon intérêt pour l'astronomie remonte à l'adolescence. Mais il y a eu un événement que je n'ai jamais oublié et qui lui a donné un sérieux coup de pouce. En février 1965, l'année où je finissais mes études d'ingénieur à l'Institut Polytechnique de Grenoble, Evry Schatzman vint y donner une conférence sur l'astronomie. Sa réputation, déjà grande à l'époque, remplit l'amphithéâtre, mais je doute que la plupart des auditeurs, futurs électriciens, aient été particulièrement passionnés. D'ailleurs, les premières questions à la fin de la conférence, furent de peu d'intérêt et Evry Schatzman les expédia en une ou deux phrases. Alors vint ma question:

- Que sait-on aujourd'hui sur les quasars ?

C'était un sujet tout à fait neuf à une époque où les médias scientifiques grand public étaient rares et où l'Internet commençait une gestation de 30 ans, et je n'en savais guère plus que le nom.

Evry Schatzman se lança alors dans une mini-conférence qui dut bien durer un quart d'heure où il exposa l'essentiel des connaissances de l'époque.

A la sortie, il fut assailli par une poignée de fans enthousiastes (dont je faisais évidemment partie) pour lesquels il accepta de jouer les prolongations au café d'en face. C'est là que je lui demandai de me dédicacer mon exemplaire de "L'Astronomie" dont il était le directeur de publication, ce qu'il fit de bonne grâce. Quand il le vit dans mes mains, il dit d'un ton indifférent:

- Ah celui-là !

Cela me surprit car ce livre, paru depuis guère plus de deux ans, avait dû représenter pour lui un travail considérable, et, pour n'importe qui d'autre, être publié dans la "Pléiade" serait un exceptionnel titre de gloire. Mais Evry Schatzman avait sans doute compris que l'astronomie était à l'aube d'une révolution et que ce livre n'était déjà guère plus que le témoin de son passé.

En-dehors d'une certaine prédilection pour la cosmologie et ce qui ce passe aux frontières de l'Univers, il y a un domaine qui ne manque pas d'attrait pour moi et qui a été un peu négligé par le DU ECU : la radioastronomie.

Alors voilà pour mon choix d'un quasar.

Ce travail a été pour moi l'occasion de me pencher sur la bibliographie d'Evry Schatzman : les quasars et la cosmologie ne figurent apparemment pas parmi ses domaines de prédilection...

La radioastronomie

La radioastronomie, qui se consacre à l'étude des signaux radio extraterrestres (et extra-galactiques en ce qui concerne les quasars), exploite les radiations électromagnétiques dans le domaine des radiofréquences (longueurs d'onde de 1 mm à plusieurs mètres), dont on a vite compris qu'elles étaient produites par des mécanismes de génération très différents de ceux des ondes lumineuses, et qui sont essentiellement:

Le rayonnement thermique des corps solides
Il est de la même nature que celui du corps noir. Si son rôle est important dans l'étude des corps du système solaire, il est sans doute négligeable dans celle des quasars (sauf en tant que signal parasite produit par le sol et capté par les radiotélescopes).

Le rayonnement thermique des gaz ionisés
Il est dû à l'émission d'un photon par un électron libre, lequel, ne possédant pas de niveau d'énergie quantifié, peut absorber ou émettre un photon d'énergie quelconque: le spectre est continu. Quand l'électron n'est pas relativiste (sa vitesse est faible devant celle de la lumière), on peut assimiler son niveau d'énergie à son énergie cinétique : l'énergie émise est proportionnelle au carré de l'accélération qu'il subit.

L'effet synchrotron
Lorsqu'un électron relativiste se déplace dans un champ magnétique, il suit une trajectoire en hélice, ce qui le soumet à une accélération, avec émission d'ondes électromagnétiques dans une bande continue centrée sur une fréquence dépendant du champ magnétique et de l'énergie de l'électron. Les électrons étant toujours présents en grand nombre avec des énergies aléatoirement dispersées, le spectre est continu. Le rayonnement est polarisé perpendiculairement au champ magnétique, ce qui peut être un moyen de le distinguer du précédent.

La raie de l'hydrogène neutre sur 21 cm
Dans les régions de l'espace interstellaire éloignées de toute étoile, l'hydrogène est très froid, très peu dense et à l'état atomique. Loin de toute source d'excitation, les atomes sont tous dans leur niveau d'énergie le plus bas : il ne peut y avoir d'émission de lumière. Toutefois, ce niveau présente deux sous-niveaux hyperfins correspondant aux deux combinaisons possibles d'orientation relative des spins du proton et de l'électron, de même sens ou de sens opposé.
La transition entre le sous-niveau haut (spins de même sens) et le niveau bas (spins de sens opposé) s'accompagne de l'émission d'un photon à la fréquence de 1420 MHz, soit une longueur d'onde de 21,1 cm, ce qui apparaît sous la forme de la seule raie que l'on connaisse dans le spectre radioélectrique. Si un nuage d'hydrogène atomique masque une radiosource, la raie peut apparaître en absorption.
L'hydrogène moléculaire ne produit pas cette raie, la molécule mettant les électrons en commun, ce qui supprime l'effet de niveaux hyperfins.

Le radiotélescope

A quelques exceptions notables près, il se présente sous la forme d'une antenne paraboloïde de révolution. Ses principaux paramètres sont les mêmes que pour le télescope optique : la taille de la surface collectrice détermine le flux capté, le rapport λ/D la résolution. Mais du fait que les longueurs d'onde radioélectriques dépassent celles de la lumière de 3 à plus de 6 ordres de grandeur, la résolution d'un radiotélescope individuel ne dépasse jamais le domaine des minutes d'arc. Mais cet inconvénient présente des avantages technologiques : la qualité géométrique des surfaces des antennes est moins critique et l'on sait réaliser des

interféromètres à très longue base, avec lesquels on atteint des résolutions d'une fraction de seconde d'arc.
Un radiotélescope ne forme pas d'image au sens optique du terme : il n'y a pas d'équivalent radio du capteur CCD. Le radiotélescope ne peut fournir qu'un seul pixel à un instant donné. Les images radioélectriques nécessitent donc des techniques d'échantillonnage de fréquence et d'espace utilisant des interféromètres à grand nombre d'antennes ainsi que d'importants moyens de traitement informatique. De plus, un radiotélescope ne peut à lui seul déterminer la distance d'un objet très éloigné. On voit là la complémentarité entre les deux formes d'astronomie.

Le radiotélescope de Parkes *(couverture)*, qui a joué un rôle éminent dans l'étude du quasar 3C 273 a un réflecteur de 64 m monté en alt-azimutal. Il a beaucoup servi d'antenne de communication avec les engins spatiaux (Voyager, Galileo, Cassini-Huygens, les rovers martiens...) . Il fut le récepteur préféré de la NASA pour la marche sur la Lune d'Apollo 11; il a à son actif la découverte de plus de la moitié des pulsars connus.

Le quasar 3C 273

Repérage

Dans les années 1950, le groupe de radioastronomie de l'université de Cambridge publia plusieurs catalogues de radiosources célestes. Les objets énumérés dans le troisième de ces catalogues furent désignés par le préfixe 3C suivi de leur numéro d'enregistrement, ainsi 3C 273 est le 273^{e} objet du catalogue.

En 1960, le groupe de radioastronomie du Caltech, sous la direction de John Bolton, détermina avec une certaine précision la position de quelques-unes de ces radiosources par la méthode interférométrique. L'une d'elles, 3C48, fut ainsi identifiée à une étoile de 16^{e} magnitude dont Allan Sandage réalisa un spectre au Mont Palomar. Ce spectre semblait incompréhensible : on était incapable d'y identifier une quelconque raie de l'hydrogène. John Bolton proposa un redshift important, sans toutefois réussir à convaincre ses collègues, certaines incohérences subsistant.

En octobre 1961, le radiotélescope de Parkes (Nouvelle Ecosse, Australie) fut mis en service et John Bolton devint son premier directeur.

Cyril Hazard, pendant ses études à l'observatoire de Jodrell Bank, en Grande Bretagne, était devenu le pionnier de la détermination précise de la position des radiosources par leur occultation par la Lune, dont la position du bord était connue avec une grande précision. Cela lui avait déjà permis de préciser la position de 3C 273 à 3" près, ce qui était meilleur que toutes les mesures interférométriques ou même optiques de l'époque.

Les éphémérides pour 1962 publiés par le HMNAO (Her Majesty's Nautical Almanac Office) prévoyaient 5 occultations de 3C 273 par la Lune, dont 3 visibles à Parkes, une configuration qui ne se reproduit qu'une fois tous les 20 ans. John Bolton invita Cyril Hazard à participer aux observations.

La première observation (15 mai 1962) fut médiocre, l'émersion n'ayant pu être observée car elle se produisit à faible hauteur, sous la limite inférieure d'observation du télescope. Elle permit toutefois de déterminer par la qualité de la figure de diffraction obtenue que la source était de faible dimension angulaire et de puissance suffisante pour permettre une détermination précise de sa position.

La seconde observation (5 août 1962) eut lieu peu avant le coucher de la Lune, très près de l'horizon du télescope. Pour garantir l'observation de l'occultation, Bolton prit des mesures extraordinaires: il fit scier les derniers échelons d'une échelle de service qui pendait sous l'antenne et risquait de heurter le sol, et raboter une bosse du carénage d'un palier qui limitait l'inclinaison du télescope. On gagna ainsi 1° d'inclinaison (ce qui s'avéra finalement inutile). Toutes les routes menant à l'observatoire furent fermées, tous les équipements électriques non indispensables furent coupés, la radio locale suspendit ses émissions, une manœuvre manuelle du télescope fut prévue en cas de panne de courant.

L'observation eut lieu dans les bandes de fréquence 136 et 410 MHz, ce qui correspond à des résolutions de 118 et 39 minutes d'arc, plus que le diamètre de la Lune. 27 secondes après le début de l'immersion, un petit sursaut apparut dans la figure de diffraction, indiquant que la source était double. Comme ce sursaut ne se reproduisit pas à l'émersion, Hazard en conclut que la ligne joignant les deux composantes était tangente au bord de la Lune alors qu'elle ne

l'était pas à l'immersion, ce qui lui permit une détermination préliminaire précise des positions des composantes A (le jet) et B (la quasi-étoile).

A la troisième observation (26 octobre 1962), Hazard savait que l'occultation aurait lieu dans la direction de la ligne AB. Pour pouvoir évaluer la séparation entre les deux composantes avec précision et étudier la structure de B, il choisit d'observer à 410 et 1420 MHz (résolutions de 39' et 11').

Dans les calculs définitifs, pour obtenir la meilleure précision possible (0,1"), le bord réel de la Lune fut utilisé plutôt que le bord moyen, les aspérités du relief lunaire pouvant introduire une imprécision de l'ordre de 3".

Identification optique

Non loin de la position trouvée pour le quasar, il y avait une étoile de magnitude visuelle 12.9, jugée trop lumineuse de 3 magnitudes environ pour être un candidat acceptable, si l'on s'en référait aux objets associés à d'autres radiosources.
Le 20 août 1962, deux semaines après l'observation, Bolton communiqua les coordonnées provisoires du quasar (qui contenaient une erreur de calcul de 15") à Maarten Schmidt, au Caltech, afin que celui-ci tente une identification optique, ce qu'il ne put faire avant décembre, le temps que le Soleil s'éloigne suffisamment de cette partie du ciel. Schmidt pensait que le jet était l'objet associé, mais, par acquit de conscience, il commença par prendre un spectre de l'étoile, qui montra un redshift de 0,158. L'identification ne faisait pas de doute.

Paramètres astronomiques

Hubble Space Telescope

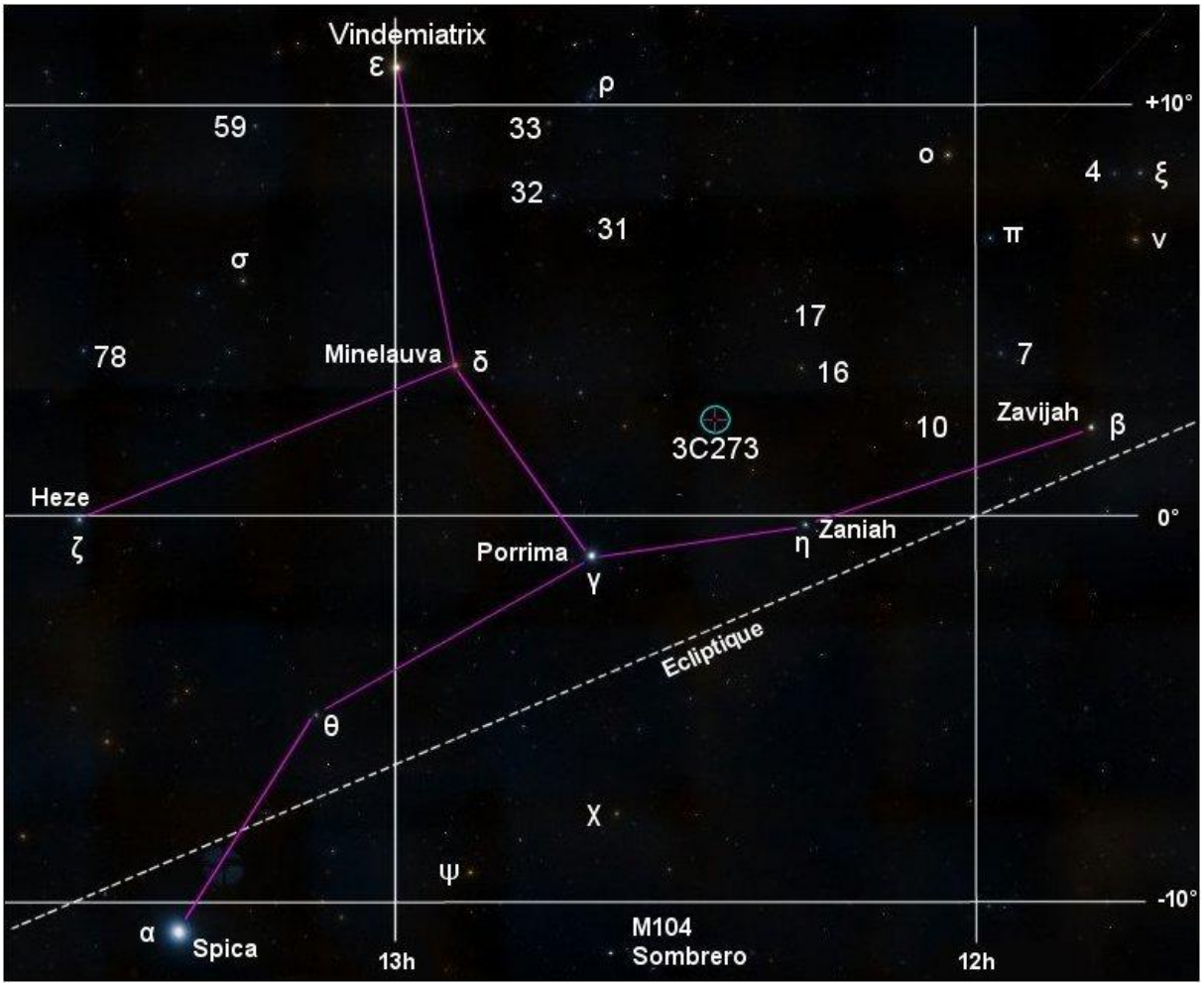
Constellation	Vierge
Ascension droite	12h 29m 06.70s (J2000)
Déclinaison	+02° 03' 08.6"
Magnitude	12.9
Redshift	0.158
Distance	660 Mpc environ
Galaxie hôte	elliptique (E4) grand axe 30" magnitude 16.4
Particularité	deux composantes: A : jet B : objet quasi stellaire
Masse du trou noir	2 à 80. 10^8 masses solaires selon les théories
Taux d'accrétion	4 à 12 masses solaires / an

Travaux personnels

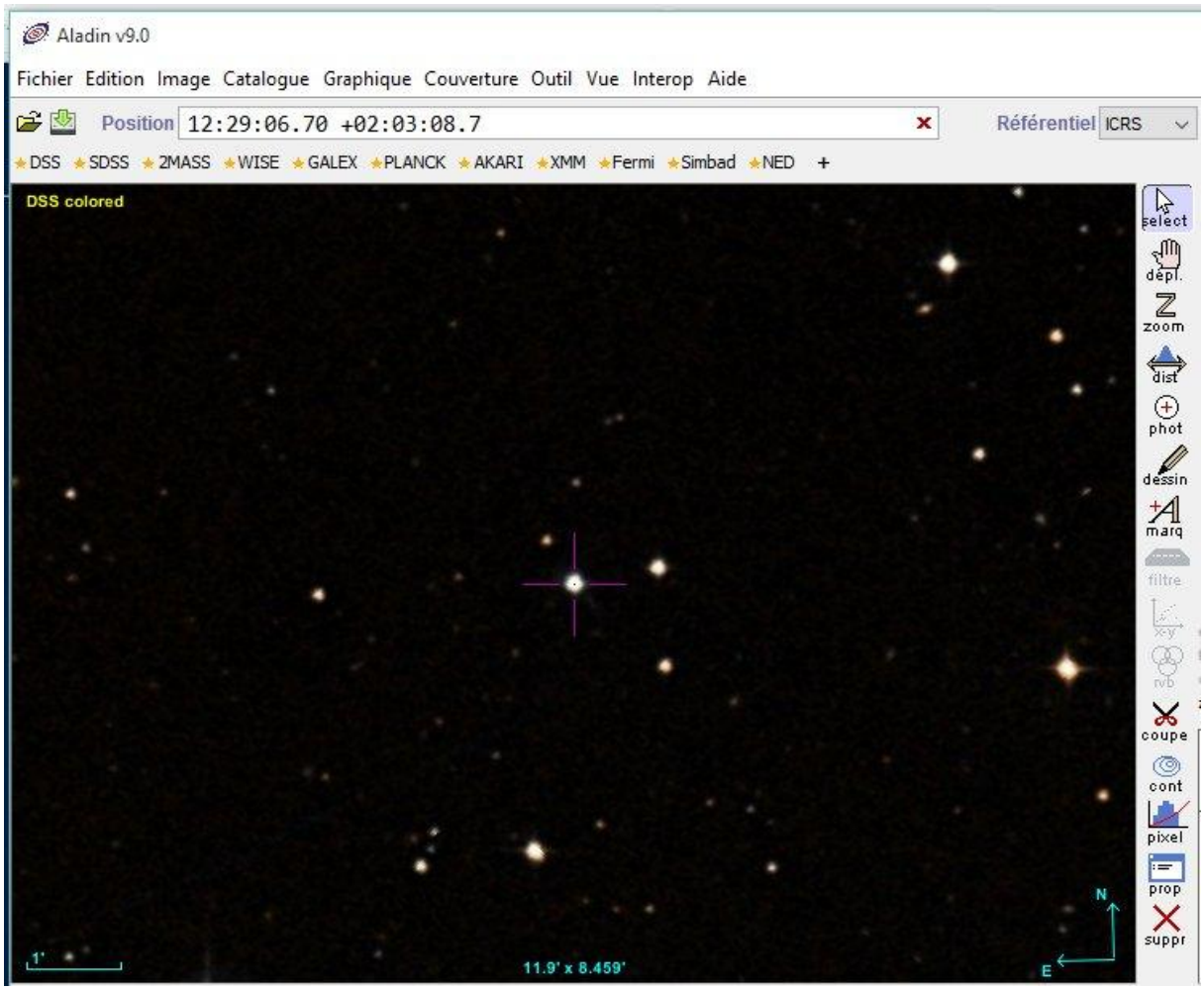
Localisation céleste

Pour localiser le quasar 3C 273 sur le ciel, j'ai utilisé l'application Aladin Desktop du Centre de Données Astronomiques de Strasbourg (http://aladin.u-strasbg.fr/AladinDesktop/).

Pour commencer j'air récupéré la carte de la constellation de la Vierge, que j'ai surchargée manuellement d'une grille de coordonnées et des identifications des étoiles.

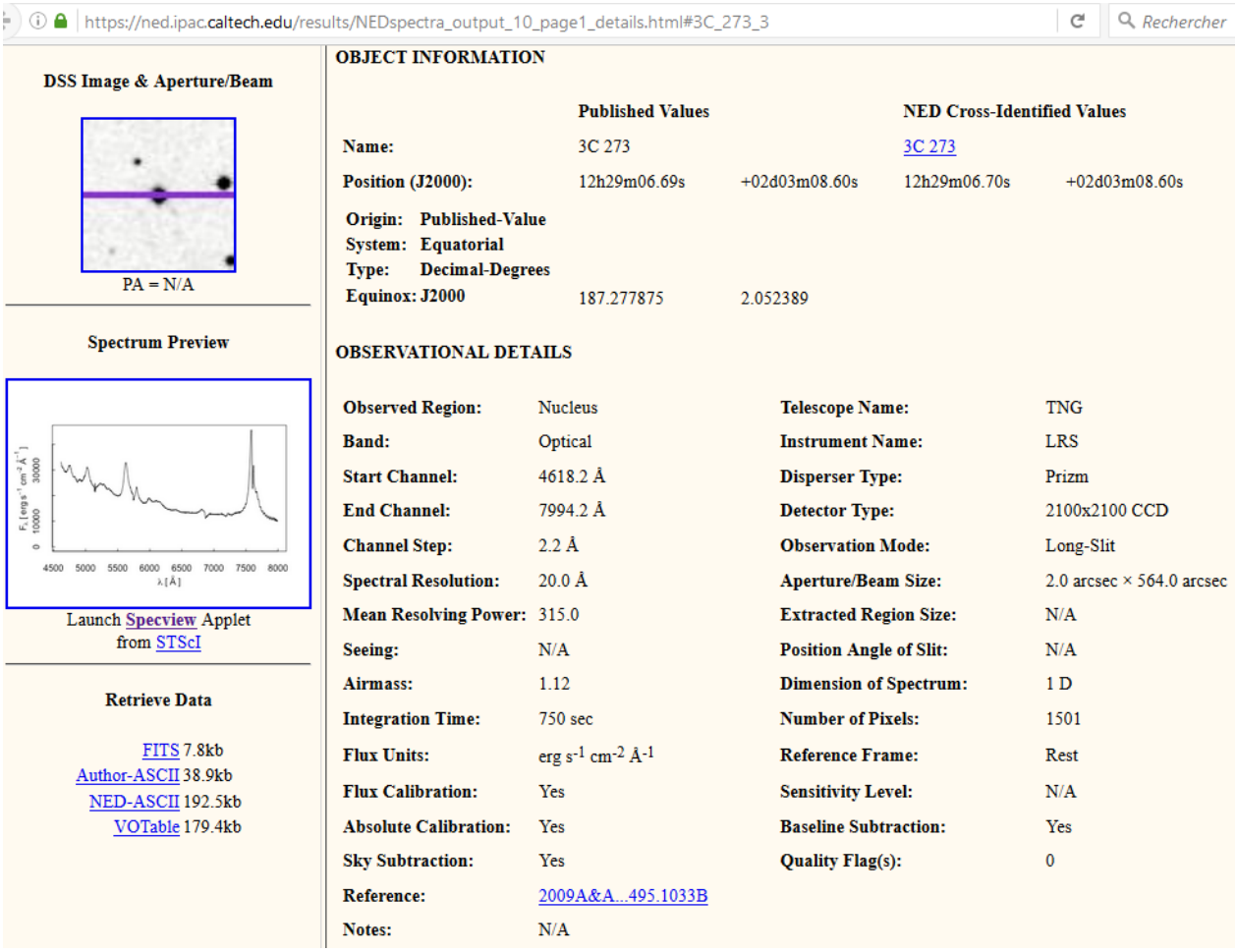


Puis, comme Aladin gère une bibliothèque d'objets, j'ai simplement saisi le nom 3C 273 dans le champ de position, nom qu'Aladin remplace automatiquement par les coordonnées J2000.



Etude du spectre optique

J'ai accédé à la **Nasa/Ipac ExtraGalactic Database** pour obtenir le spectre suivant :



https://ned.ipac.caltech.edu/results/NEDspectra_output_10_page1_details.html#3C_273_3

Rechercher

DSS Image & Aperture/Beam

PA = N/A

Spectrum Preview

Launch Specview Applet from STScI

Retrieve Data

FITS 7.8kb
Author-ASCII 38.9kb
NED-ASCII 192.5kb
VOTable 179.4kb

OBJECT INFORMATION

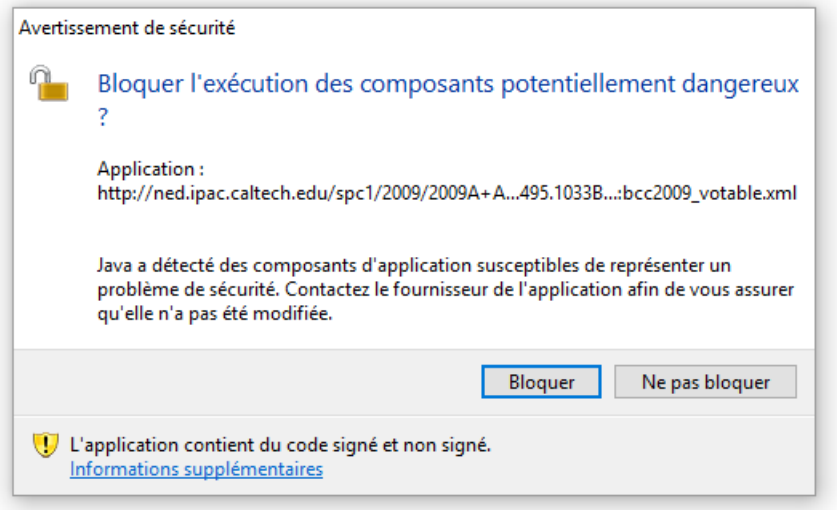
	Published Values		NED Cross-Identified Values	
Name:	3C 273		3C 273	
Position (J2000):	12h29m06.69s	+02d03m08.60s	12h29m06.70s	+02d03m08.60s
Origin: Published-Value **System:** Equatorial **Type:** Decimal-Degrees **Equinox:** J2000	187.277875	2.052389		

OBSERVATIONAL DETAILS

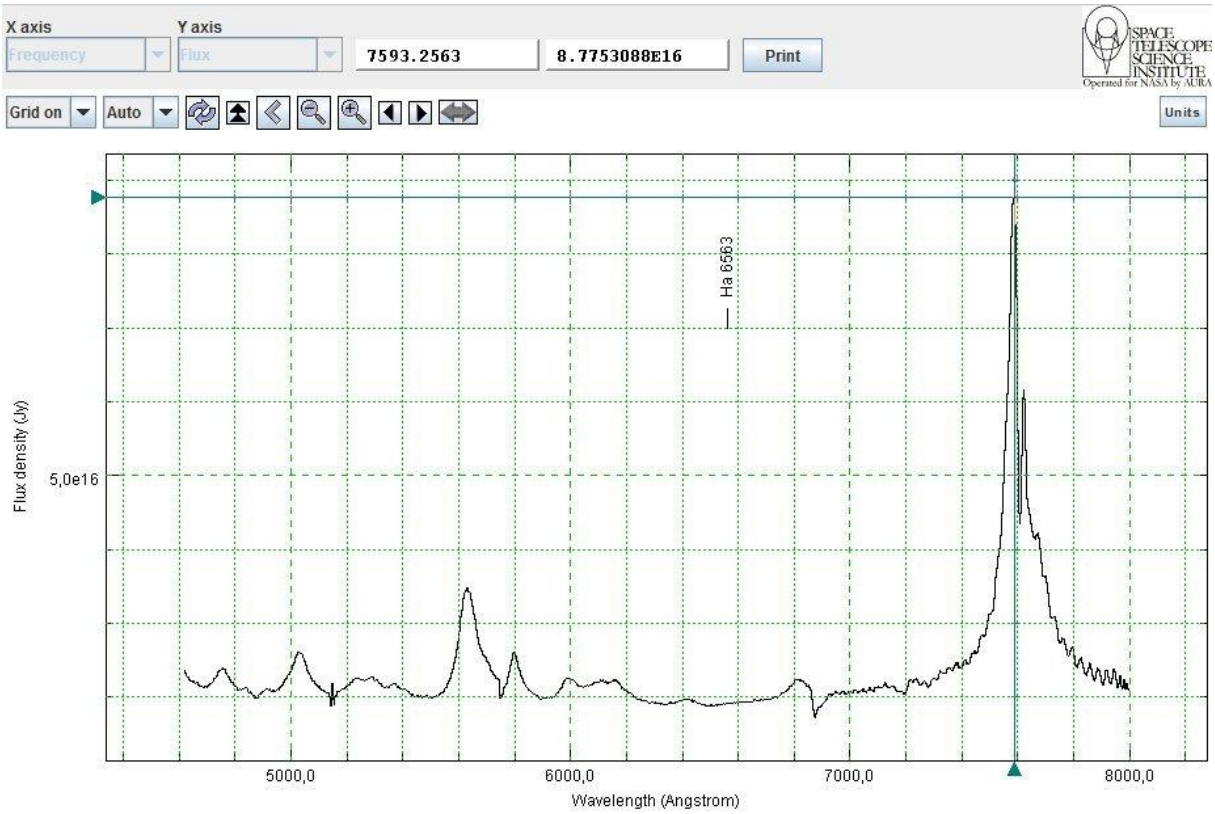
Observed Region:	Nucleus	**Telescope Name:**	TNG
Band:	Optical	**Instrument Name:**	LRS
Start Channel:	4618.2 Å	**Disperser Type:**	Prizm
End Channel:	7994.2 Å	**Detector Type:**	2100x2100 CCD
Channel Step:	2.2 Å	**Observation Mode:**	Long-Slit
Spectral Resolution:	20.0 Å	**Aperture/Beam Size:**	2.0 arcsec × 564.0 arcsec
Mean Resolving Power:	315.0	**Extracted Region Size:**	N/A
Seeing:	N/A	**Position Angle of Slit:**	N/A
Airmass:	1.12	**Dimension of Spectrum:**	1 D
Integration Time:	750 sec	**Number of Pixels:**	1501
Flux Units:	erg s^{-1} cm^{-2} $Å^{-1}$	**Reference Frame:**	Rest
Flux Calibration:	Yes	**Sensitivity Level:**	N/A
Absolute Calibration:	Yes	**Baseline Subtraction:**	Yes
Sky Subtraction:	Yes	**Quality Flag(s):**	0
Reference:	2009A&A...495.1033B		
Notes:	N/A		

que j'ai affiché au moyen du Specview Applet (version 2.13.1).

Celui-ci est écrit en Java et doit être déjà ancien et pas révisé récemment, car Java (version 8.101) a dressé une succession d'alarmes de sécurité que j'ai dû désactiver les unes après les autres avant qu'il accepte d'exécuter l'applet et d'afficher le spectre.



J'ai ensuite essayé d'identifier les raies en établissant une correspondance entre les pics du spectre et les valeurs de longueurs d'ondes au repos. Pour cela j'ai utilisé l'outil de l'applet qui permet une lecture fine de la position d'une raie. Le pic le plus élevé correspond évidemment à la raie Hα, ce qui donne une première valeur du redshift.



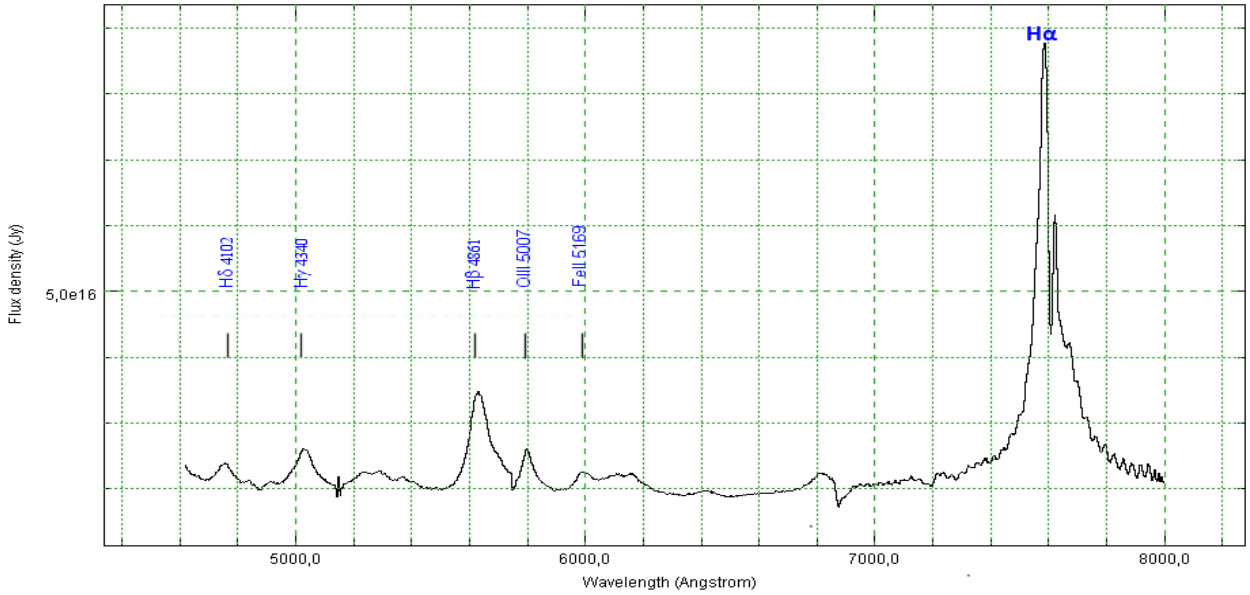
$z_{H\alpha}$ = (7593 – 6563) / 6563 = 0,157

ce qui est très voisin de la valeur communément admise 0,1583.

Utilisons notre valeur pour calculer la position d'autres raies:

Raie	λ_0	λ_{3C273}
Hα	6563	7593
Hβ	4861	5624
Hγ	4340	5021
Hδ	4102	4746
FeII	5169	5980
OIII	5007	5793

Ces longueurs d'onde correspondent bien aux pics du spectre :



Vitesse de récession

Le redshift de ce quasar a une valeur qui est au-delà du domaine où la correction relativiste est négligeable. En effet, la formule non relativiste

$$v_r = c \, . \, z$$

donne $v_r = 47100$ *km/s*, alors que la formule relativiste

$$v_r = c \, . \, \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

réduit cette valeur à $v_r = 43450$ *km/s*

Estimation de la distance

On utilise la formule de Hubble écrite sous la forme :

$$D = c \, . \, z \, / \, H$$

où D est la distance et H la constante de Hubble ($H = 73$ *km.s*$^{-1}$*.Mpc*$^{-1}$)

On trouve D = 658 Mpc, soit 2.14 milliards d'années-lumière.

Conclusion

Ma petite étude du quasar 3C 273, qui n'est que le point d'entrée d'un voyage au monde des quasars et autres objets extraordinaires, montre qu'avec des moyens simples, à la portée d'astronomes amateurs, on peut établir des résultats importants en cosmologie, l'évaluation du redshift conduisant à celle de l'expansion de l'univers puis à la théorie du Big Bang.

Mais il reste bien des terrains à défricher, où les théories en vigueur s'affrontent (ou restent encore à élaborer), par exemple:

- l'évaluation de la masse du trou noir central et le taux d'accrétion
- le processus de création, d'évolution et de mort des quasars (il y en a qui n'émettent pas d'ondes radio)
- la distribution des quasars dans l'univers : pourquoi n'y en a-t-il aucun plus proche de nous que 600 Mpc ?

Références

Aladin Sky Atlas (http://aladin.u-strasbg.fr/)
NED - Nasa/Ipac ExtraGalactic Database (https://ned.ipac.caltech.edu/)
3C 273 's Database (http://isdc.unige.ch/3c273)
Parkes and 3C 273 (http://www.parkes.atnf.csiro.au/people/sar049/3C273/)
The bright Quasar 3C 273 (https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Courvoisier/frames.html)
L'observation du spectre du quasar 3C 273 (http://www.astrosurf.com/buil/quasar.htm)
Quasar Astronomy Forty Years On (http://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/quasar40.html)
The Discovery of Quasars
(http://www.parkes.atnf.csiro.au/people/sar049/3C273/documents/Fifty_Years_of_Quasars_v2.3.pdf)