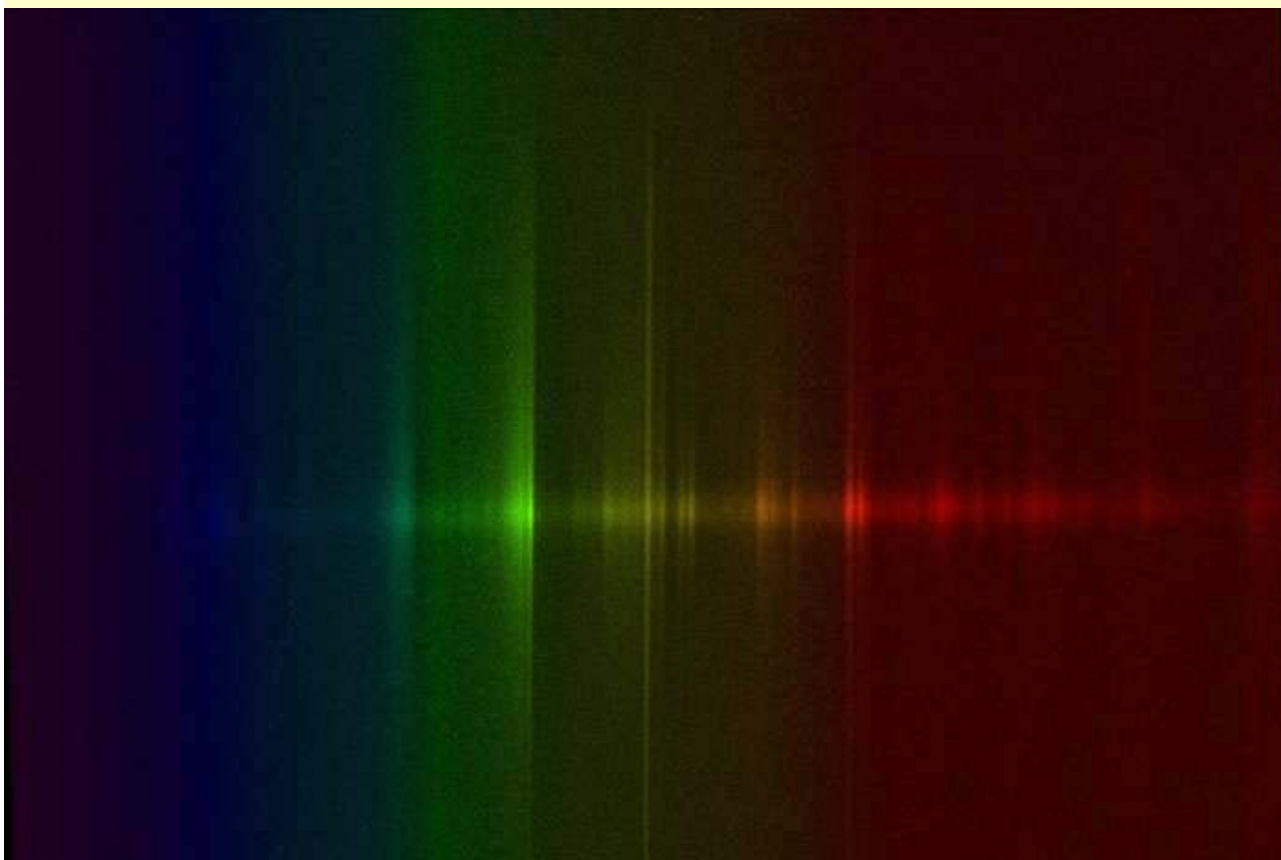
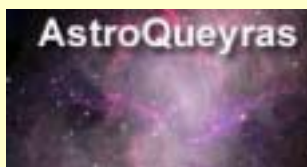


Étude du spectre de la comète C/2006 VZ 13 (LINEAR) (mission AstroQueyras/CALA juillet 2007)



Spectre colorisé de la comète C/2006 VZ 13 (LINEAR): le spectre noir et blanc a été colorisé en fonction des longueurs d'onde, et est restitué tel qu'il apparaîtrait s'il pouvait être observé directement à l'oeil.

Auteurs: Jean-Pierre MASVIEL (jp.masviel@orange.fr)
Olivier THIZY (thizy@free.fr)



Ch1: La spectrométrie cométaire: historique et théorie.....page 3

Ch2: La comète C/2006 VZ 13 (LINEAR).....page 6

Ch3: La configuration instrumentale utilisée.....page 8

Ch4: les observateurs.....page 10

Ch5: Les résultats.....page 11

Conclusion.....page 14

Ch 1: La spectrométrie cométaire: historique et théorie

(cette partie a été rédigée notamment avec l'aide de l'ouvrage de Jacques Crovisier et Thérèse Encrenaz « Les comètes » Editions BELIN 1995)

Bref histoire de la spectrométrie cométaire.

La spectrométrie cométaire commence véritablement en 1864 avec la comète Tempel 1864 II, étudiée par Giovanni Donati à Florence, puis en 1868 avec la comète Winnecke 1868 II, étudiée par William Huggins en Angleterre. A l'occasion du passage des grandes comètes 1881 III et 1882 II, William Huggins et Henry Drapper emploient pour la première fois la photographie. Ces différentes observations mettent en évidence les bandes jaune, rouge et bleue du système de Swan, que l'on obtient expérimentalement dans les spectres des décharges électriques dans des gaz d'hydrocarbures. Elles seront identifiées au spectre du radical C₂. Ces mêmes observations révélèrent également le système de bandes violettes du spectre dit « du cyanogène » (le cyanogène est la molécule C₂N₂, mais ces bandes seront en fait identifiées plus tard au radical CN). A cette époque, d'autres raies en émissions sont repérées, mais non identifiées. Par exemple, les bandes du radical C₃ ne seront définitivement identifiées que vers 1950.

A ces raies spectrales en émission se superpose un spectre continu dans lequel on observe en absorption les raies plus fines du Soleil, preuve que le rayonnement solaire se réfléchit sur la matière cométaire.

Par la suite, les observations des comètes en spectrométrie continuèrent à se développer, avec d'une part le prisme-objectif (prisme placé à l'avant de l'instrument, et permettant l'obtention de spectres de faible résolution d'objets peu lumineux), d'autre part le spectrographe à fente (fournissant des mesures précises en longueurs d'onde sur des régions bien définies d'un objet, comme, par exemple, un noyau cométaire).

Les spectres cométaires sont bien différents des spectres stellaires ou planétaires: ils montrent essentiellement des bandes moléculaires en émission. On trouve peu de signatures moléculaires dans les spectres stellaires (sauf pour les étoiles très froides). Les atmosphères planétaires montrent bien des raies moléculaires, mais elles apparaissent surtout en absorption (dans le visible).

Les premières observations spectrales de comètes concernaient la partie visible du spectre électromagnétique, seule partie facilement accessible depuis le sol avec les technologies de l'époque. Elles permirent l'étude de radicaux qui présentent justement des bandes en émission dans cette partie visible du spectre électromagnétique. Les radicaux sont des fragments de molécules (c'est le cas pour CN, C₂, C₃, CH, OH, NH, NH₂, ...), d'atomes (dans le cas de H, O, Na, ...), d'ions (cas de CO⁺, CO₂⁺, N₂⁺, H₂O⁺). L'identification de ces signaux est le résultat du travail de plusieurs générations d'astrophysiciens et de spectroscopistes moléculaires, certaines émissions n'étant pas encore totalement identifiées.

Des molécules stables et volatiles, contenues dans le noyau, sont sublimées, puis cassées par le rayonnement UV du Soleil, les *molécules mères* se dissociant en *molécules filles*. Les photons solaires correspondant aux longueurs d'onde caractéristiques des spectres des atomes ou molécules sont absorbés par ces derniers. Ils sont ensuite réémis, soit aux mêmes longueurs d'onde, soit à des longueurs d'onde plus grandes.

A partir des années 1940, d'importants travaux de modélisation (Pol Swings et le groupe d'astrophysique de Liège) ont rendu possible l'interprétation de certains détails des spectres à haute résolution (radicaux OH, C₂, ...). Aujourd'hui, la spectrométrie moléculaire est bien comprise pour ces radicaux, mais du travail reste encore nécessaire pour de nombreuses autres molécules. Par ailleurs, il ne faut pas négliger les résultats obtenus sur des régions spectrales dénuées de telles bandes. Ces travaux visent à mettre en évidence les émissions de poussière cométaire et utilisent des filtres (on parle alors de photométrie). Ce type de mesure est plus adapté à des objets faibles, et permet des études statistiques.

A partir de 1965, l'accès à l'espace a ouvert une nouvelle fenêtre en matière de spectrométrie cométaire, celle de l'ultraviolet, inaccessible depuis le sol à cause de l'atmosphère terrestre. Les premiers spectres UV cométaires furent obtenus sur les comètes Ikeya-Seki 1965 VIII, Tago-Sato-Kosaka 1969 IX, Bennett 1970 II, Kohoutek 1973 XII et West 1976 VI. Plusieurs de ces observations furent menées à l'aide de fusées, mais c'est surtout le satellite IUE (International Ultraviolet Explorer) de la NASA et de l'ESA qui permis à partir de 1978, et pendant plus de quinze années, d'obtenir des spectres UV de plusieurs dizaines de comètes, permettant d'établir une base de données sur 55 comètes. Le satellite HST (Hubble) joua également un rôle dans ce type d'observations, ainsi que plus récemment FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic explorer). Enfin, le spectromètre UV *Alice*, embarqué sur la sonde *Rosetta*, doit explorer la comète Churyumov-Gerasimenko en 2014.

Le spectre UV des comètes est dominé par la raie Lyman alpha de l'atome d'hydrogène à 121,5 nm, et par la bande électronique du radical OH, vers 300 nm. La raie Lyman alpha correspond aux émissions en provenance de l'immense nuage d'hydrogène qui entoure les têtes cométaires. OH est sans doute le radical cométaire le plus abondant car il provient essentiellement de H₂O. Il est d'ailleurs aussi suivi en radio à 18 cm de longueurs d'onde. Il est très caractéristique du niveau d'activité d'une comète. Un autre signal important dans l'UV concerne CO (vers 145 nm), qui est une molécule stable (et non un radical) pouvant provenir des glaces cométaires. Cette molécule a été détectée pour la première fois dans la comète West 1976 VI et son origine a été précisée lors de la campagne d'observation de la comète de Halley. Le HST a, quand à lui, mis en évidence un système de bandes dit « de Cameron » de CO vers 220 nm. D'autres bandes UV sont celles des atomes C et S, résultant de la photodissociation des molécules carbonées et soufrées.

La spectroscopie moléculaire (émission ou absorption d'un photon par une molécule) peut également être appliquée à l'étude des comètes: pour une molécule, plusieurs catégories d'énergie s'additionnent, correspondant à la *rotation* de la molécule, la *vibration* de ses atomes, ou le *mouvement de ses électrons*. Par exemple, les molécules CO et H₂O peuvent être détectées dans le domaine radio, les raies de rotation correspondant dans cette partie du spectre électromagnétique, à un changement de l'état de rotation de la molécule. Un changement d'état de vibration (des atomes de la molécule) donne quant à lui des raies dans l'infrarouge. Enfin, les transitions correspondant à différents niveaux d'énergie électronique (arrangement des électrons autour des noyaux atomiques de la molécule) donnent des signaux dans les domaines UV, visible et proche infrarouge.

Après les missions VEGA et Giotto (comète de Halley), Stardust (81P/Wild 2) et Deep Impact (9P/Tempel 1), les connaissances sur la composition des comètes devraient à nouveau progresser à l'occasion de la mission *Rosetta* lancée par l'Agence spatiale européenne le 2 mars 2004: les quelques survols de comètes ont montré que leur noyau était recouvert d'une couche extrêmement sombre. Cette croûte devient poreuse et peut même être brisée lorsque l'objet se rapproche du système solaire interne, permettant la sublimation des glaces et l'étude de leur composition par spectrométrie. Mais seules des analyses in situ permettront de s'assurer que la matière éjectée est bien représentative de la matière interne, cette matière primitive, formée il y a 4,5 milliards d'années en même temps que les autres corps du système solaire.

Le mécanisme de fluorescence à l'origine des spectres cométaires.

Les spectres cométaires observés dans les domaines UV, visible et infrarouge sont essentiellement gouvernés par le mécanisme de fluorescence: une molécule, ou un atome, absorbe un photon solaire de longueur d'onde déterminée. Cette molécule, ou cet atome, va être portée à un niveau d'énergie vibrationnelle et/ou électronique plus élevée. Elle va ensuite redescendre à des niveaux d'énergie inférieurs en émettant un ou plusieurs photons. Si le photon est réémis à la même fréquence que celui absorbé, on dit qu'il y a *fluorescence résonnante*. Mais une molécule excitée électroniquement ou vibrationnellement par un photon solaire peut se désexciter selon différentes voies correspondant à différents changements d'états d'énergie de rotation ou de vibration: il en résulte un spectre de fluorescence riche et caractéristique. Une excitation électrique peut également conduire à une véritable cascade de fluorescence en passant par plusieurs états électroniques intermédiaires et en émettant ainsi plusieurs photons de longueurs d'onde plus grandes que celle du photon exciteur. Le taux de fluorescence dépend d'une part du rayonnement solaire (très variable dans l'UV selon le cycle de 11 ans), d'autre part de la force intrinsèque de la bande et des rapports de branchements entre les différentes cascades de désexcitation possibles. L'interprétation de la structure des bandes moléculaires demande également la prise en compte des raies d'absorption solaires (raies de Fraunhofer) déplacées en longueurs d'onde par effet Doppler (effet Swings du à la vitesse héliocentrique de la comète).

Les radicaux, ions et atomes observés dans les spectres cométaires

RADICAUX	
CN	Visible, proche infrarouge
C ₂	visible, UV, proche infrarouge
C ₃	visible
CH	visible
OH	proche UV, infrarouge, radio
NH	visible
NH ₂	visible
CS	UV

IONS MOLECULAIRES	
CH+	Visible
OH+	visible
H ₂ O+	visible
CO+	visible, UV
N ₂ +	visible
CO ₂ +	visible, UV

ATOMES	
H	Visible, UV
C	UV
O	visible, UV
S	UV
Na, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Co, V	visible, pour les comètes passant très près du Soleil

IONS ATOMIQUES	
C+	UV
Ca+	visible

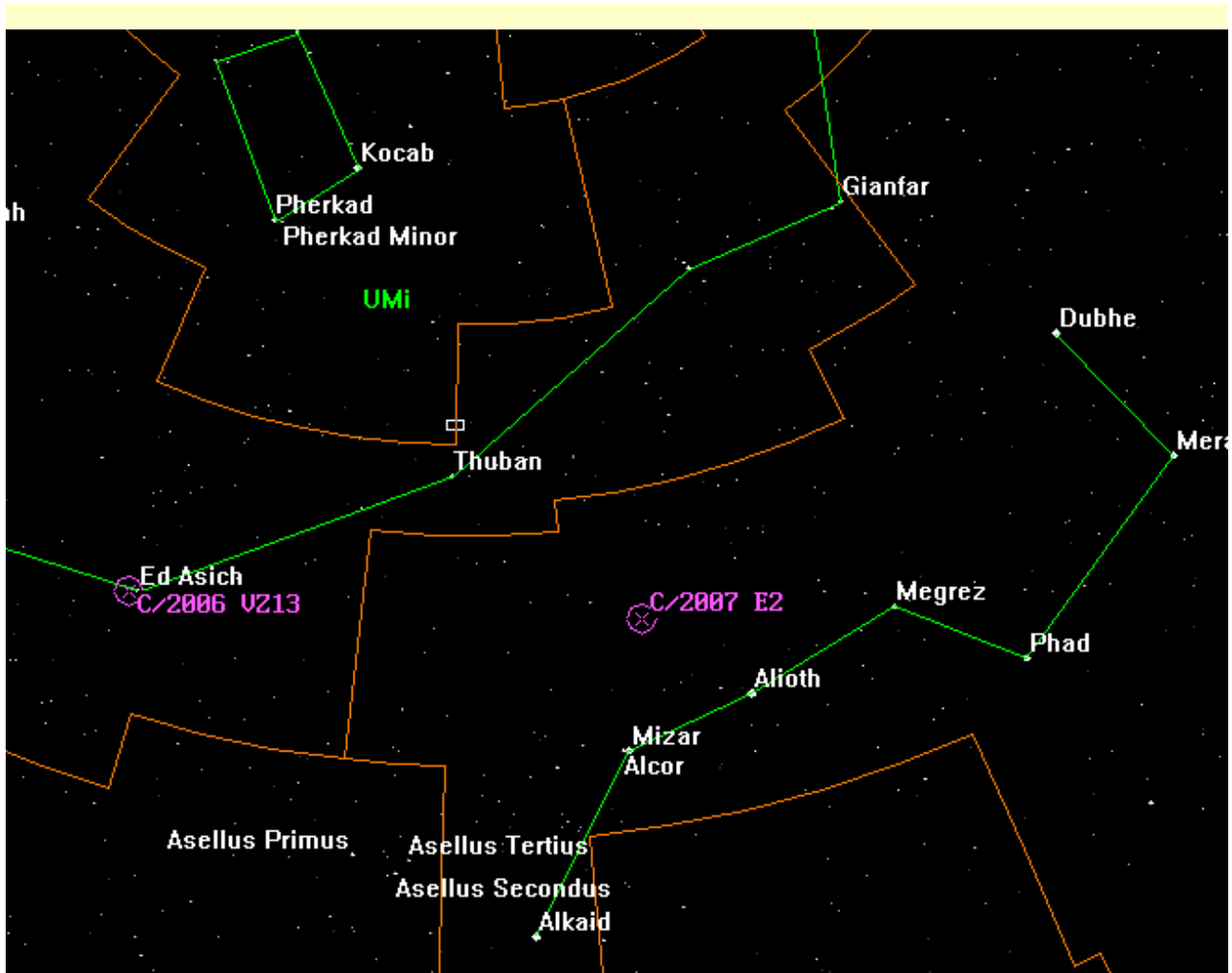
Ch 2: La comète C/2006 VZ 13 (LINEAR)



*Image: Pierre FARISSIER (Club d'Astronomie de Lyon Ampère – AstroQueyras)
Lunette de 80 mm de diamètre et APN Canon EOS 350 D
70 x 30 secondes; une image toutes les 39 secondes.
Le 14.07.2007 entre 22:42 et 23:31 TU*

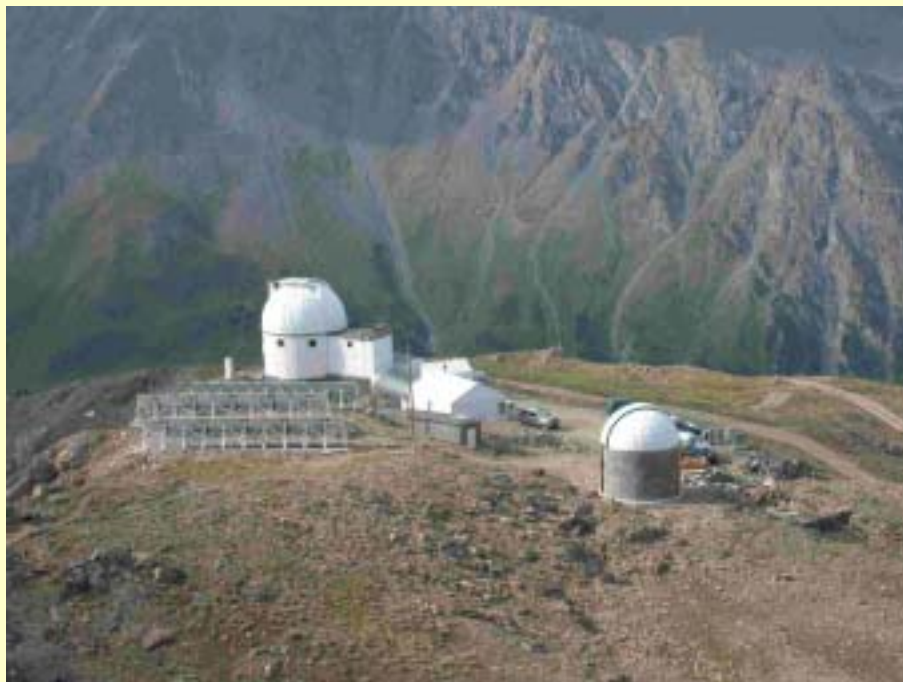


*Image: Pierre FARISSIER (Club d'Astronomie de Lyon Ampère – AstroQueyras)
Flat Field Lichtenknecker 200 mm F/D 4 et caméra CCD Apogée U 9000
60 x 30 secondes; une image toutes les 53 secondes.
Le 14.07.2007 entre 22:42 et 23:34 TU*

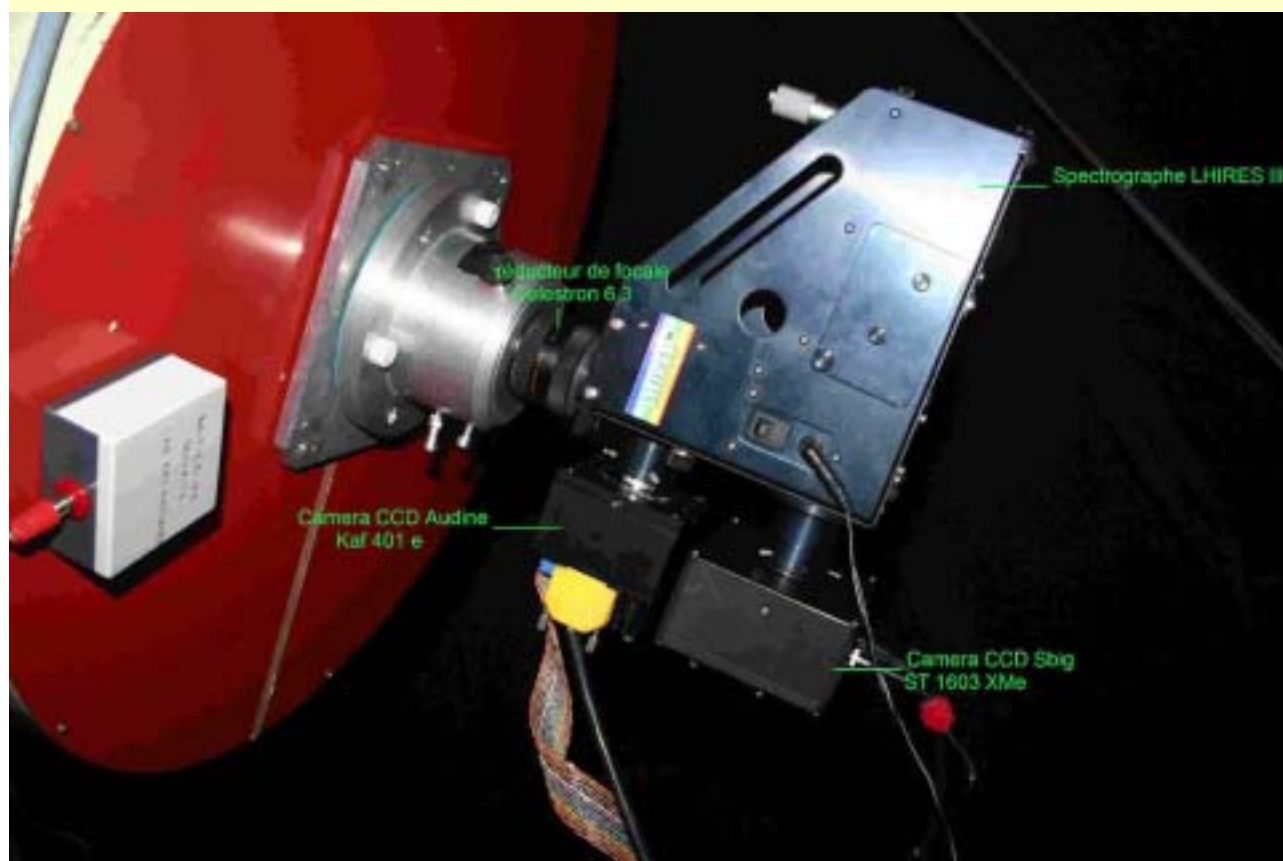


A la fin de la première quinzaine de juillet 2007, la comète était très bien placée dans le ciel, visible toute la nuit dans la constellation du Dragon. Elle se trouvait alors à près de 80 millions de kilomètres de la Terre. Sa magnitude était maximum autour du 14 juillet, la comète étant plus brillante que magnitude 8. A noter dans la même région du ciel, la comète C/2007 E2 (Lovejoy) vers magnitude 13.

CH 3: La configuration instrumentale utilisée



L'observatoire du Pic de Chateaurenard (station UAI n°614. Lat: + 44°41'57"; Long:+06° 54'30"), situé à 2930 m d'altitude, dans le parc naturel du Queyras (Hautes-Alpes), à quelques kilomètres de la frontière italienne. (crédit photo CALA)



Pour les observations en spectrométrie de la comète, la focale du télescope (62 cm de diamètre) avait été ramenée de 930 cm (F/D 15) à 585 cm (F/D 9,5) au moyen d'un réducteur de focale Celestron 6,3.

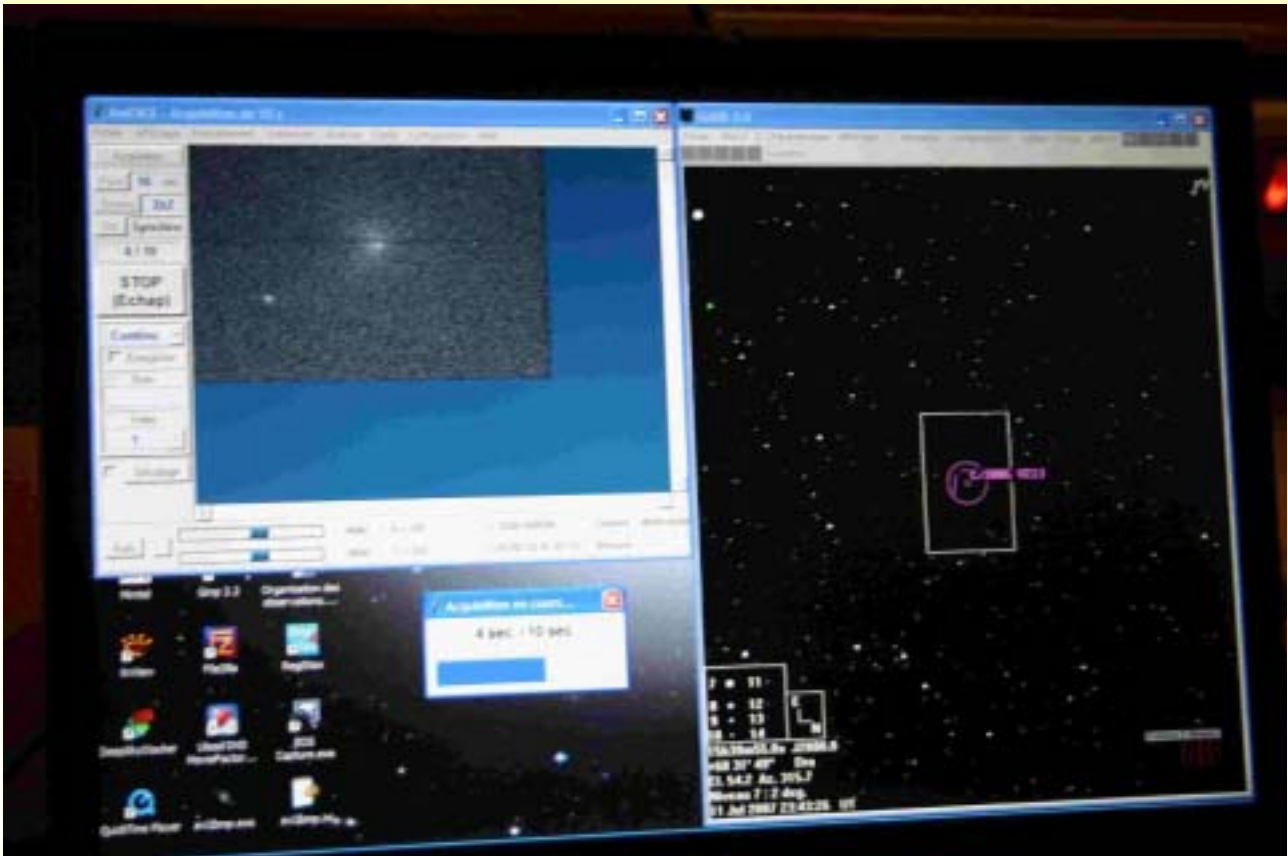
Pour les acquisitions des images spectrales, la caméra CCD utilisée était une Sbig ST 1603 Xme (1530 x 1020 pixels de $9 \mu\text{m}^2$) refroidie 30° en dessous de la température ambiante. Le suivi était assuré au moyen d'une caméra Audine Kaf 401 e (+ liaison Ethernade).

Le spectrographe était un LHIRES III (# 24 de la série réalisée dans le cadre de l'association AUDE) équipé d'un réseau de 150 traits/mm et d'une fente réglée à une largeur de 43 μm .

Pour plus d'informations sur le spectrographe LHIRES III, voir le site de **SHELYAK INSTRUMENTS**

<http://www.shelyak.com>

email: Contact@Shelyak.com



L'écran de contrôle, à gauche, permettant de suivre le déplacement de C/2006 VZ 13 et de jouer avec la raquette du télescope afin de maintenir le flux lumineux en provenance de la comète sur la fente du spectrographe. Cette fente est réalisée à partir de deux lames réfléchissantes maintenues distantes de 43 μm , rendant possible l'observation du champ proche de l'objet dont on veut obtenir le spectre. A droite, le logiciel de cartographie donne la position de la comète.

CH 4: Les observateurs



Jean-Pierre MASVIEL

Membre du CALA (Club d'Astronomie de Lyon Ampère), de l'association AstroQueyras, de l'association AUDE et de la Société Astronomique de France (commission des comètes).



Olivier THIZY

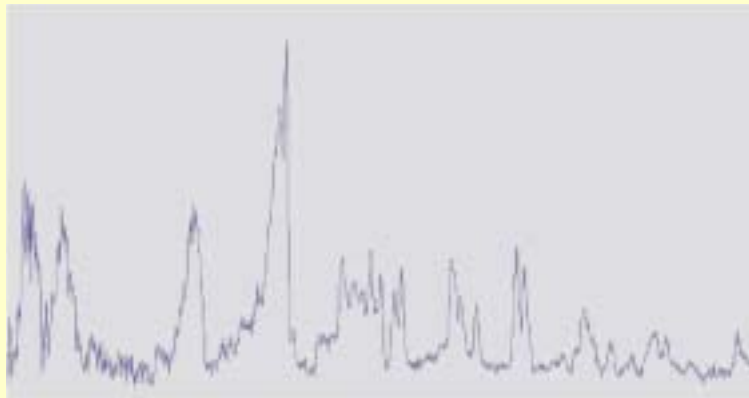
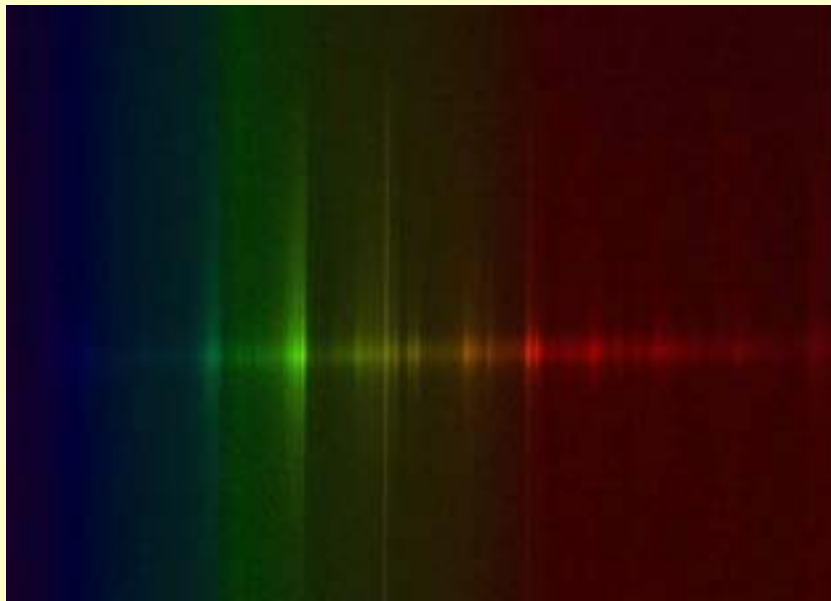
Membre du CALA (Club d'Astronomie de Lyon Ampère), de l'association AstroQueyras, de l'association AUDE.
Cofondateur de la société SHELYAK INSTRUMENTS, qui commercialise notamment le spectrographe LHIRES III.

CH 5: Les résultats

Toutes les images ont été traitées de façon classique, avec soustraction de l'offset, du noir, et division par la PLU. Les logiciels utilisés pour les prétraitements, traitements et analyses spectrales sont IRIS (<http://astrosurf.com/buil/>) et Visual Spec (<http://astrosurf.com/vdesnoux/>) .

Une étoile de référence a été choisie dans le but d'obtenir une première calibration en longueurs d'onde, complémentaire à l'acquisition de spectres d'une lampe au néon. Cette étoile, de type spectral connu, a surtout servi à obtenir *la réponse spectrale de l'instrument*, caractéristique des variations de sensibilité en fonction de la longueur d'onde de chacun des éléments de la chaîne optique: miroirs et lentilles, réseau de diffraction, capteur CCD. Le spectre de référence ainsi obtenu a également permis de corriger le spectre cométaire de la masse d'air, c'est-à-dire de l'extinction due à la couche d'atmosphère terrestre traversée par les photons en provenance de l'objet pointé, les couches d'air diffusant plus de lumière dans les courtes longueurs d'onde.

L'étoile choisie devant se situer dans le ciel à proximité de C/2006 VZ 13, le choix s'est porté sur HD 141653, de magnitude 5,2 et de type spectral A2, située à seulement 1°35 de la comète. Des poses ont été faites en début de nuit, avant de passer à notre cible, la comète C/2006 VZ 13. Le champ pointé étant circumpolaire, sa hauteur dans le ciel a relativement peu changé en cours de nuit, et il n'a donc pas été fait de nouvelle séquence de poses sur HD 141653 après la séquence sur notre cible.

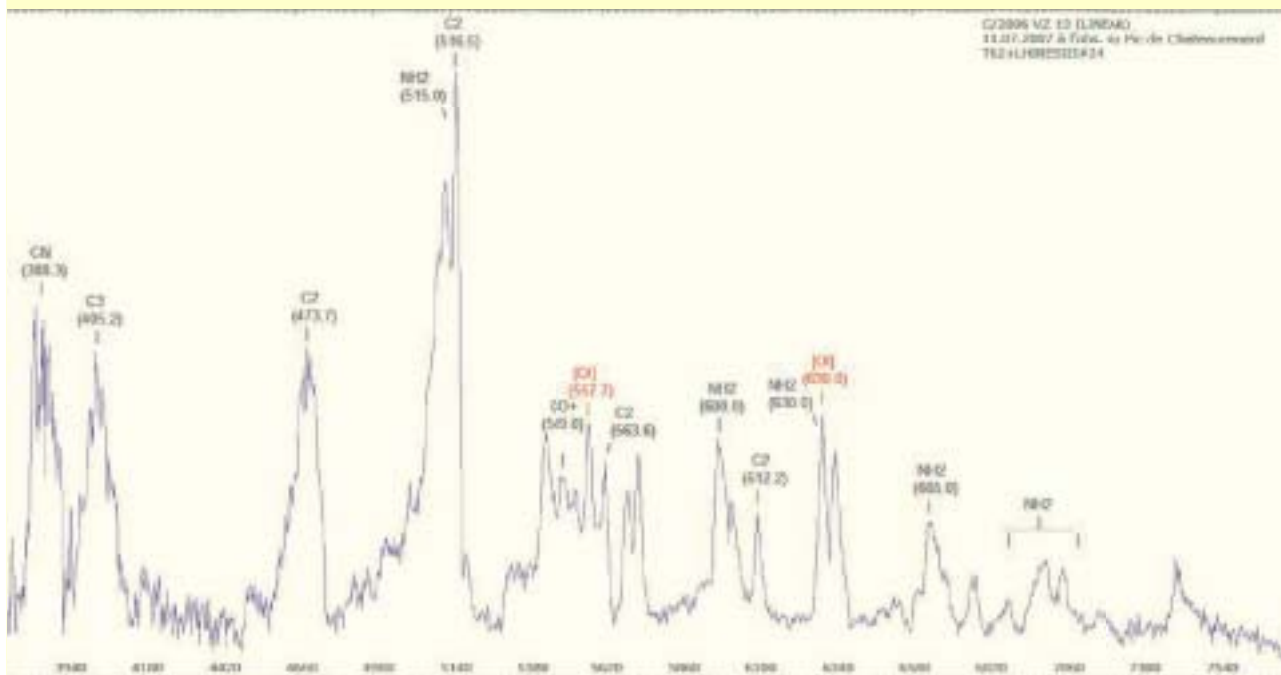


Spectre colorisé (en haut) et profil spectral corrigé de la réponse instrumentale (en bas)

Le temps de pose total sur la comète C/2006 VZ 13 (LINEAR) était de 3 heures (12 poses de 900 secondes) le 11.07.2007 de 19h52 à 22h56 TU.

Sur l'image en deux dimensions du spectre (ci-dessus), on voit nettement dans le vert et à gauche de la partie rouge deux raies fines sur toute la hauteur de l'image: il s'agit des raies de l'atome d'oxygène à 557,7 et 630,0 nm. Ces raies résultent de la photodissociation des molécules d'eau de l'atmosphère terrestre (airglow). Elles sont notées [OI] car elles désignent des *raies interdites*, c'est-à-dire des raies difficilement reproductibles expérimentalement.

Les différents constituants identifiés dans la comète C/2006 VZ 13 (LINEAR)



La partie bleue du spectre, à gauche, apparaît très bruitée. A ces longueurs d'onde, l'efficacité du capteur chute dramatiquement (35 à 40 % d'efficacité quantique) et l'obtention d'un rapport signal/bruit suffisant nécessiterait des temps de poses réhibitoires pour une comète de cette magnitude avec l'équipement dont nous disposons. Il faut également signaler que nous avons utilisé un réseau Optometrics de 150 traits/mm blazé dans l'ordre 1 à 500 nm. Vers 390 nm, ce réseau a une efficacité absolue de seulement 44 %. Un réseau blazé à 400 nm aurait donné un meilleur résultat.

De plus, le spectrographe LHIRE III est de type Littrow (la même optique est utilisée comme objectif de chambre et comme collimateur), ce qui ne permet pas d'avoir la même qualité sur une grande étendue spectrale. Il aurait donc fallu recentrer la zone bleue (autour des 400 nm) et refaire les réglages du spectrographe, puis poser pendant de nombreuses heures.

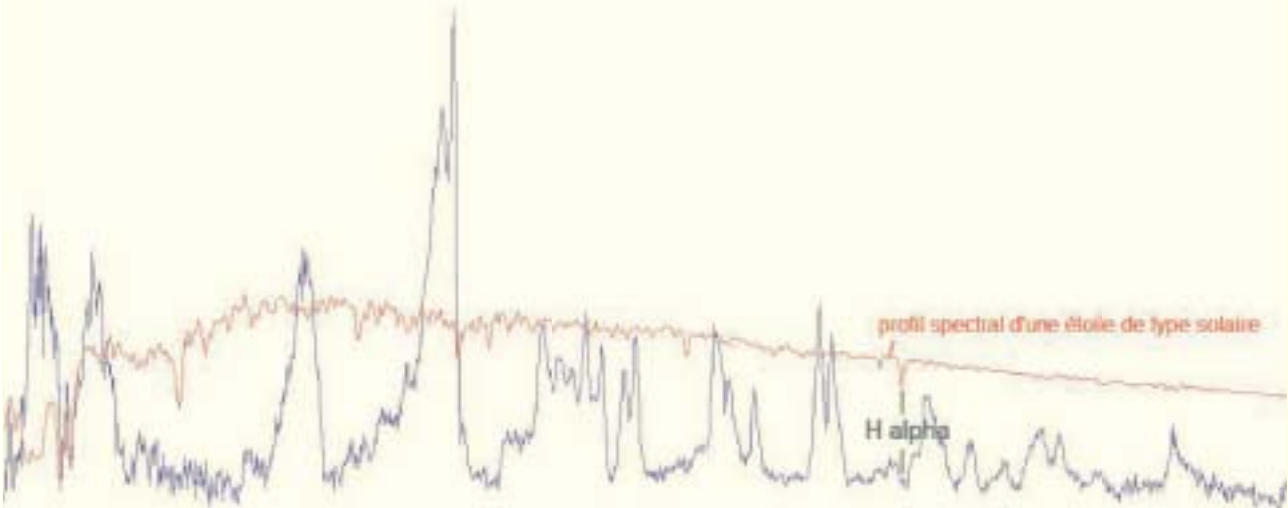


Sur cette image du spectre de l'étoile de référence HD 141653, on remarque facilement la dégradation vers l'extrême gauche. Le spectre de la comète est affecté de la même dégradation.

Zoom sur la partie centrale du spectre

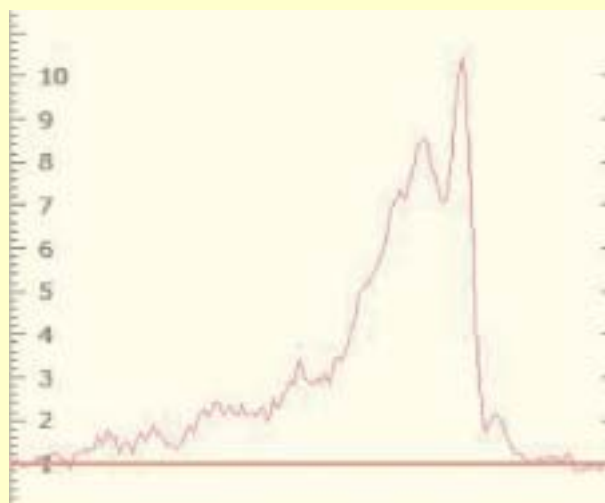


Certaines raies n'ont pas pu être clairement identifiées.



Les comètes réfléchissent le rayonnement solaire. On retrouve donc dans le spectre des comètes des raies en absorption du spectre solaire, comme la raie H alpha de l'hydrogène. Il faudrait donc en principe retirer ces raies « parasites » pour retrouver un spectre purement cométaire. On voit dans le graphe ci-dessus que le spectre solaire affecte assez peu le spectre de la comète, sauf peut-être dans sa partie la plus à gauche qui, comme nous l'avons vu plus haut, ne doit pas être prise en considération.

Un moyen de quantifier l'activité des comètes et de les comparer entre elles : le calcul de la largeur équivalente:

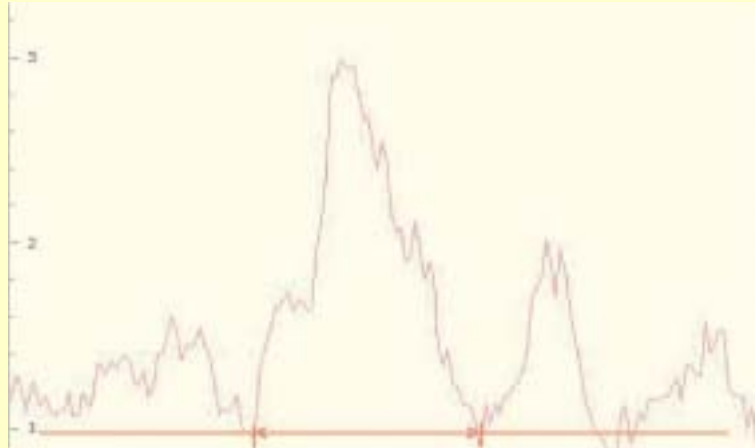


Calcul de la largeur équivalente pour la bande C2 vers 516,5 nm

Pour certaines parties du spectre, il est possible de sélectionner une bande, par exemple la bande C2 vers 516,5 nm, et d'effectuer une normalisation, c'est-à-dire d'amener le continuum à 1. Il est alors intéressant de calculer l'aire se trouvant sous la courbe et au-dessus du trait en pointillés. Cette aire, caractérisée également par la *largeur équivalente*,

est représentative de la force de la bande spectrale en émission. On peut ainsi calculer les rapports entre différentes largeurs équivalentes pour différents constituants d'un même spectre, ou bien encore comparer la largeur équivalente d'un spectre avec celle d'autres spectres (d'autres comètes) ou de la même comète observée à différentes dates.

Dans le cas de la bande C2 à 516,5 nm, on obtient une largeur équivalente de 994 Anströms. Si on appelle A l'aire comprise entre le profil spectral et le trait en pointillés, cette largeur de 994 Angströms serait celle d'une bande de hauteur 1 et d'aire A.



Calcul de la largeur équivalente pour la bande NH2 vers 6650

Pour la bande NH2 vers 665.0 nm, on trouve une largeur équivalente de 131 Angströms.

Conclusion :

Les comètes sont les témoins privilégiés des premiers âges du système solaire. En théorie, toutes les comètes, du fait de leur origine supposée commune, devraient présenter les mêmes abondances de molécules. Cependant, les observations en spectrométrie, du domaine radio à l'ultraviolet, ont montré une grande diversité de compositions chimiques. Cette diversité n'est pas encore bien comprise, et la conséquence en est qu'aucun spectre cométaire ne ressemble réellement à un autre. Ce devrait être une motivation supplémentaire pour les astronomes amateurs à s'intéresser à la spectrométrie cométaire, car leurs observations leur réserveront à coup sûr de nombreuses surprises.

Cette première expérience a montré qu'il était possible d'obtenir des spectres parfaitement exploitables sur des comètes plus brillantes que magnitude 8 avec un télescope d'environ 60 cm de diamètre et un spectrographe tel que le LHIRES III. On peut même penser que sur des comètes de magnitude 4 ou 5 l'emploi d'un réseau de 300 traits/mm améliorerait encore la résolution tout en conservant un bon rapport signal/bruit.

Il est donc probable que la spectrométrie cométaire puisse se développer à l'avenir, aidée en cela par l'accroissement récent du nombre de télescopes de mission d'un diamètre supérieur à 60 cm et la diffusion dans le milieu amateur d'un spectrographe comme le LHIRES III.