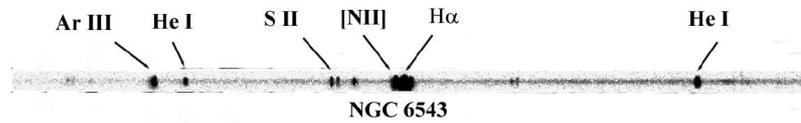
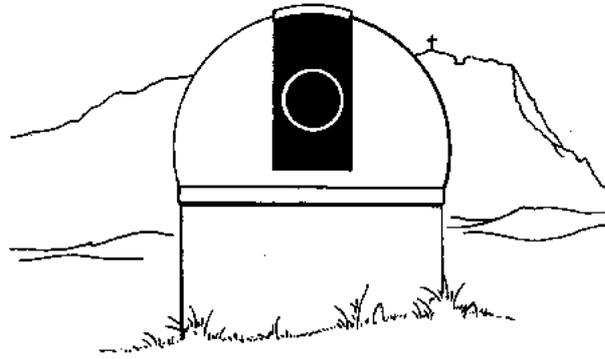


# La spectroscopie appliquée aux nébuleuses planétaires



*par*  
*Benjamin MAUCLAIRE*

## Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction :</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>La spectro késako? :</b>  | <b>2</b>  |
| <b>3</b> | <b>Comment cela fonctionne :</b>                                     | <b>2</b>  |
| 3.1      | Qu'est-ce qu'un spectromètre : . . . . .                             | 2         |
| 3.2      | Relation couleur-température : . . . . .                             | 4         |
| 3.3      | Matière brillante ou noire? : . . . . .                              | 5         |
| 3.4      | Les différents types de mécanismes de rayonnement : . . . . .        | 7         |
| 3.5      | Les effets des conditions physiques : . . . . .                      | 8         |
| <b>4</b> | <b>Ce que l'on peut obtenir de la spectroscopie :</b>                | <b>9</b>  |
| 4.1      | Détermination des espèces chimiques présentes : . . . . .            | 9         |
| 4.2      | Description de la distribution des différentes espèces atomiques : . | 9         |
| 4.3      | Mesure de quelques grandeurs physiques : . . . . .                   | 10        |
| <b>5</b> | <b>Applications pratiques :</b>                                      | <b>12</b> |
| 5.1      | La campagne d'étude de NOVAE : . . . . .                             | 12        |
| 5.2      | La spectroscopie visuelle : . . . . .                                | 13        |
| <b>6</b> | <b>Conclusion :</b>  | <b>15</b> |
| <b>7</b> | <b>Bibliographie :</b>   | <b>16</b> |

## 1 Introduction :

Parmi tous les objets célestes, les étoiles en fin de vie produisent une variété impressionnante de formes qui n'a cesse de nous étonner.

Celles dont il est question ici ne connaissent pas une fin de vie explosive (supergéantes rouges donnant les supernovae) mais, au contraire, une lente expulsion de leur enveloppe gazeuse (géantes rouges, destin de notre Soleil) qui reste visible pendant environ 30 000 ans.

De ces restes naissent les nébuleuses planétaires (NP), dont le nombre dans notre galaxie est estimé à 50 000. Seulement quelques 1500 de ces spécimens sont visibles et peuvent alors livrer leur secret.

Nous allons voir dans ce document que la spectroscopie est un moyen remarquable de tirer de l'information à partir de ces objets.

## 2 La spectro késako? :

Depuis bien longtemps, l'objectif des astronomes a convergé vers l'étude des caractéristiques des astres qu'ils ont observés. Mais, pour cela, il faudrait pouvoir manipuler ces objets, les scruter de près, les décortiquer pour les analyser ... bref tout ce que l'on peut faire avec les objets que l'on rencontre sur Terre.

Or, les étoiles et les astres en général ne sont pas atteignables et seul leur rayonnement parvient à nous. Il faut donc nous résoudre à *faire parler la lumière*. Nous avons dû d'abord supposer que les lois physiques qui régissaient les astres étaient les mêmes que celles que nous utilisions sur notre planète.

Les physiciens ont alors été amenés à se poser la question suivante: **pourquoi un corps est-il lumineux?** C'est ainsi que des modèles de rayonnement succédèrent à des modèles atomiques et qu'une théorie établissant la correspondance entre les particularités du spectre (obtenu en dispersant la lumière) et les propriétés de la matière fut élaborée.

C'est cette théorie et ses applications que nous utilisons aujourd'hui pour percer les mystères qui résident derrière le cocon gazeux des nébuleuses planétaires.

## 3 Comment cela fonctionne :

### 3.1 Qu'est-ce qu'un spectromètre :

Il s'avère qu'aujourd'hui, la majeure partie de nos connaissances sur les astres découlent de l'étude spectrale. La **spectroscopie** est *l'étude de la répartition de l'énergie lumineuse selon la longueur d'onde*.

L'étude de la lumière nous venant des astres peut se faire principalement chez l'amateur à l'aide de deux moyens:

- Méthode des filtres

– Méthode de décomposition de la lumière

Nous allons voir comment mettre en œuvre ces deux méthodes, leurs inconvénients et avantages respectifs.

• **Grâce à des filtres :**

Les longueurs d'onde à étudier sont sélectionnées et le reste de la lumière est soit absorbé soit réfléchi. Cette méthode possède un faible rendement spectral car elle ne tient pas compte de l'information contenue dans les longueurs d'onde qui ne sont pas choisies.

Cependant ces filtres dits interférentiels sont efficaces pour augmenter le contraste de l'objet. En effet, si l'on souhaite observer une nébuleuse rayonnant surtout dans les longueurs d'ondes de l'azote, nous aurons tout intérêt à utiliser un filtre type NII ou NI<sup>1</sup> pour nous faciliter l'observation: le contraste avec le fond du ciel est ainsi augmenté.

Les types de filtres accessibles aux amateurs sont les suivant:

| NOM            | LONGUEURS D'ONDES     | UTILISATION                            |
|----------------|-----------------------|--|
| UHC            | 6563Å, 4959Å et 5007Å | Nébuleuses diffuses, NP                |
| OIII           | 4959Å et 5007Å        | NP et quelques nébuleuses              |
| H <sub>β</sub> | 4861Å                 | Très sélectif: tête de cheval, etc ... |

UHC : Ultra High Contrast.

Voici le diagramme de transmission (trait plein) de ces filtres; ils nous permettent de mieux comprendre le contraste ainsi gagné par rapport à la luminosité du fond du ciel (trait grisé):

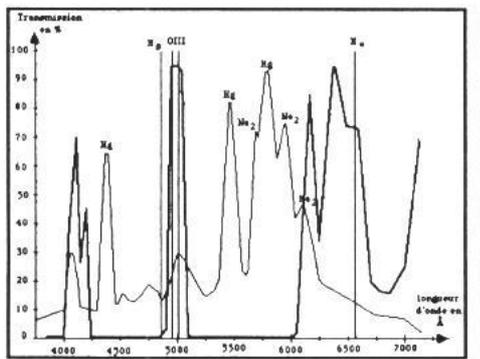


Fig. 1 : Transmission du filtre OIII.

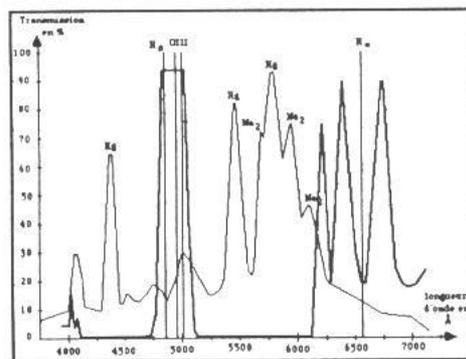


Fig. 2 : Transmission du filtre UHC.

D'ailleurs, nous pourrions consulter à ce sujet l'excellente suite d'articles de Yann POTHIER [16] traitant des différents filtres existant.

1. La notation des raies d'émissions telles qu'utilisées ici est décrite dans le paragraphe traitant de l'origine des raies.

- **A l'aide d'un disperser :**

Nous pouvons aussi procéder par décomposition de la lumière avec un *dispositif disperser* tel un **prisme** ou un **réseau**. C'est donc ce dernier qui fait apparaître un arc-en-ciel qui représente le spectre proprement dit de l'objet observé.

Leur utilisation se fait comme suit:

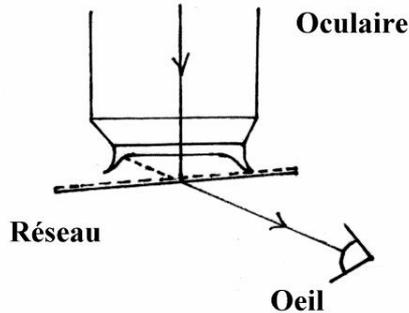


Fig. 3 : Observation à travers un réseau.

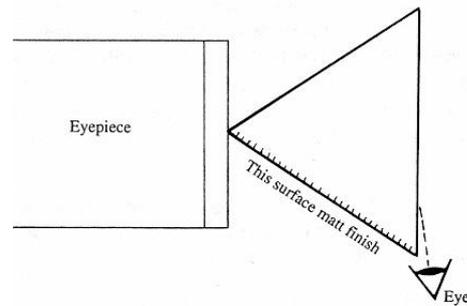


Fig. 4 : Utilisation du prisme.

En bref, pour obtenir la séparation de la lumière de l'astre étudié en ses différentes longueurs d'onde, nous ferons passer les faisceaux lumineux de l'objet sur un système dispersif. Le réseau est l'outil qui comporte le plus d'avantages.

### 3.2 Relation couleur-température :

Nous avons tous remarqué un jour que lorsque nous chauffons un bout de métal il se mettait à rougir et produisait spontanément de la lumière. Les physiciens établirent alors une loi du "bout de métal chaud" dont la généralisation est la *loi du corps noir*: **la couleur renseigne sur la température.**

Aussi, entendons-nous "couleur" au sens large car l'ultra-violet et l'infra-rouge ainsi que les rayonnements radio en sont. Par la suite, il a été associé à chaque "couleur" une longueur d'onde  $\lambda$  en *nanomètres nm* ou en *Angstroms Å* ( $10^{-10}$  mètres).

En fait nous savons que les photons ("particules" médiatrices de la lumière) possèdent une énergie égale à:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Car, la fréquence  $\nu$  est proportionnelle à la longueur d'onde  $\lambda$ :  $\nu = c/\lambda$  (c: vitesse de la lumière).

Il est donc naturel de **faire correspondre à une température une couleur, et à une couleur une longueur d'onde**.

Nous avons vu aussi que la couleur “renseigne” sur la température. Des études qualitatives ont montré que **la température** d’un corps chauffé jusqu’à être **rouge** était **inférieure** à un corps qui était parvenu à une couleur **bleue**.

Il ressort deux lois importantes de ces constatations:

- Loi de STEFAN<sup>2</sup>
- Loi de WIEN<sup>3</sup>

C’est cette dernière loi qui peut être utilisée pour déterminer la température de l’astre rayonnant.

### 3.3 Matière brillante ou noire? :

Voyons maintenant de quelle manière rayonne la matière. La seconde grande idée qui permet de constituer **la théorie mettant en relation la lumière avec la matière** est *la quantification des niveaux d’énergie*. C’est à dire que l’énergie d’un atome ne peut avoir que certaines valeurs; on dit qu’elle est **quantifiée** et chacune de ces valeurs porte le nom de **niveaux d’énergie**.

Lorsque des électrons de cet atome se trouvent dans une “orbite” plus haute que celle par défaut, l’énergie de l’atome est grande. Comme ces “orbites” sont bien définies, les électrons “sautent” d’une couche à une autre, donc l’énergie prend des valeurs par paliers. Et lorsque qu’il est dans son état énergétique le plus bas, on dit qu’il est dans son *état fondamental*.

Lorsqu’un électron passe d’une “orbite” haute à une plus basse, il y a émission d’un photon qui possède une longueur d’onde (donc une couleur) proportionnelle à la différence d’énergie entre les deux “orbites”.

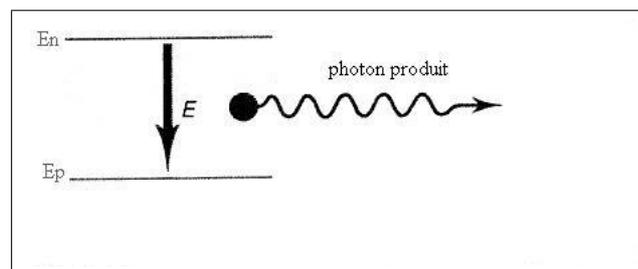


Fig. 5: Émission d’un photon.

Il apparaîtra dans le spectre une raie brillante. C’est un **spectre d’émission**. Ainsi, **l’énergie du photon produit (ou absorbé) est égale à l’énergie de la transition électronique**.

2. Loi de STEFAN:  $E_{emise\ totale} = \sigma.T^4$ .

3. Loi de WIEN:  $\lambda_{max}T = C_{steconnue}$  (cste  $\simeq 0.29$ ).

Concrètement, le spectre d'émission est provoqué par du gaz ionisé et émettant de la lumière dans les longueurs d'onde spécifiques. Pour peu que les gaz (ou le corps incandescent) émettent dans toutes les longueurs d'onde, le spectre peut paraître "continu".

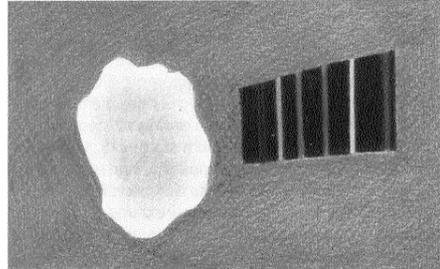


Fig. 6 : Spectre d'émission.

Réciproquement, lorsqu'il absorbe un photon, il passant dans une "orbite" plus haute.

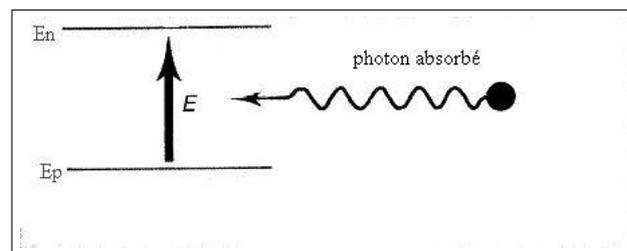


Fig. 7 : Absorption d'un photon.

Ici, la situation produisant un tel spectre correspondra à un gaz inerte qui s'interpose entre la source d'émission et l'observateur. Ce gaz absorbera la lumière à des longueurs d'onde spécifiques au gaz et des raies sombres apparaissent sur le fond continu : il se forme alors un spectre d'absorption.

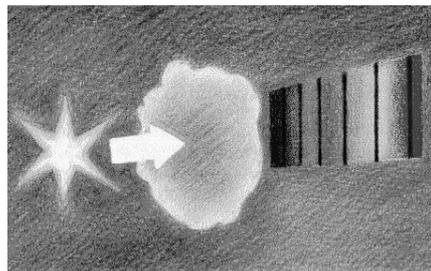


Fig. 8 : Spectre d'absorption.

On constate que **les raies brillantes des spectres d'émission correspondent aux transitions électroniques au cours desquelles l'énergie de l'atome diminue** et que **les raies sombres des spectres d'absorption correspondent aux transitions électroniques pour lesquelles l'énergie de l'atome augmente.**

### 3.4 Les différents types de mécanismes de rayonnement :

Du fait que l'étoile centrale est très chaude (100 000K), de type O ou Wolf-Rayet, elle émet un rayonnement UV qui réchauffe l'enveloppe gazeuse jusqu'à des température de 10 000 à 20 000 K.

L'excitation du gaz produit les raies permises comme celles de BALMER. Par ailleurs, comme la densité du gaz est faible (5 000 à 15 000 atomes/cm<sup>3</sup>) des raies interdites<sup>4</sup> intenses peuvent se former (doublet d'[OIII], [NeV], etc...).

- **Photoionisation et recombinaison :**

Comme nous l'avons vu, le **rayonnement UV ionise la matière**, surtout les espèces atomiques ayant un petit potentiel  $E_i$  d'ionisation (l'hydrogène entre autre).

L'électron ainsi "éjecté" de l'atome devenu un ion par absorption d'un photon UV, peut être alors être capturé par un autre ion hydrogène: **il y aura recombinaison**. Lors de cette dernière, deux types d'émission possible ont lieu en formant un spectre bien particulier:

- **Spectre d'émission :** L'électron redescend au niveau fondamental par sauts en émettant ainsi une série de raies ( $H_\alpha$  est la plus intense des raies de BALMER).
- **Spectre continu :** L'électron arrive directement au niveau fondamental. Ce spectre se superpose aux raies de la série associée à l'électron de même énergie.

- **L'excitation des raies interdites :**

Cependant, les électrons libres peuvent aussi **entrer en collision avec un ion O<sup>2+</sup>** projetant ainsi un de ses électrons externes sur une "orbite" plus élevée. A ce moment là, plusieurs cas de figure se présentent selon la stabilité du niveau énergétique excité:

- **Niveau instable :**  
C'est le type de niveaux à partir desquels se produisent les **transitions conduisant aux raies permises** de BALMER et autres séries. L'électron reste dans ce niveaux pendant environ 10<sup>-8</sup> secondes.
- **Niveau métastable :**  
Ce sont des niveaux proches du niveau fondamental et où une transition spontanée ne se fait qu'au bout d'une durée relativement longue de l'ordre de quelques secondes à quelques heures.

---

4. Une raie est dite interdite si elle est produite lors d'une transition électronique très peu probable mettant quelques secondes à quelques heures avant de s'effectuer.

Mais quand le milieu est assez dense, **un choc** avec une autre particule **intervient toujours avant qu'aît lieu l'émission spontanée**. L'énergie cinétique est transmise à l'électron et aucune radiation n'est alors émise.

Remarquons que sur Terre, les vides les plus poussés ne vont pas en dessous de  $10^{-10}$  bars et que par conséquent, l'émission spontanée de ces raies est inobservable, ce qui qualifie alors **ces transitions "d'interdites"**.

**L'intensité** de ces raies **est liée à l'agitation thermique des atomes** et donc à la température électronique. C'est ainsi que, grâce aux raies interdites de l' $O^{2+}$  notées [OIII] l'on peut déterminer cette température. On tire aussi des raies interdites du soufre [SII] la densité électronique. Les valeurs trouvées oscillent autour de  $10\,000 \pm 5\,000$  atomes/cm<sup>3</sup>.

- **Emission par fluorescence :**

Ce type d'émission concerne les atomes qui émettent un photon UV très énergétique lorsqu'ils se dés excitent. C'est le cas de l'ion HeII qui en retrouvant son état fondamental va produire un photon UV qui aura l'énergie nécessaire pour exciter l'ion  $O^{2+}$ .

Quand ce dernier se dés excite, l'électron redescend par cascades en émettant quelques raies permises, dont une identique à une transition possible de NIII.

Ainsi, les atomes absorbent les photons UV qu'ils réémettent avec une énergie légèrement différente mais qui coïncide fortuitement avec l'énergie de transition d'un autre atome.

### 3.5 Les effets des conditions physiques :

- **La pression électronique :**

Il est clair que l'augmentation de la pression électronique dans le plasma formant la nébulosité fait accroître le nombre de chocs électron-atome. Le nombre de ionisation-recombinaison est alors plus élevé.

Cela aura pour conséquence une production plus importante des espèces ioniques présentes dans la zone de haute pression et donc des raies plus intenses.

- **Les conditions électriques et magnétiques :**

Sous l'action de champ magnétique ou électrique (généralement dû à la rotation de l'étoile centrale), le comportement énergétique des atomes n'est plus le même. Il s'agit respectivement de l'**effet ZEEMAN et STARCK**.

Ainsi, une **raie est multipliée en plusieurs composantes** (généralement trois) en présence d'un champ magnétique. L'étude de la forme de ces raies renseigne sur l'intensité et la structure de ce champ.

A l'heure actuelle, c'est le moyen utilisé pour analyser le champ magnétique de notre étoile le Soleil.

– **La nature binaire de l'étoile centrale :**

Lorsque la composante centrale est binaire, les gaz sont projetés à grande vitesse le long d'un axe perpendiculaire à l'anneau équatorial caractéristique.

Le gaz est alors comprimé autour de cet axe (formant généralement des petits arcs brillants) et possède un mouvement tournant. Les atomes et ions constituant ces gaz subissent alors les effets de ce mouvement et produisent des raies qui sont dédoublées.

## 4 Ce que l'on peut obtenir de la spectroscopie :

### 4.1 Détermination des espèces chimiques présentes :

Voici un récapitulatif des raies d'émissions que l'on détecte couramment: elles sont présentées par l'atome source de l'émission suivies de leur longueur d'onde.

- Un faible continuum produit par l'étoile centrale
- $H_\alpha$  et  $H_\beta$  (raies de Balmer de l'Hydrogène) :  $\lambda=6563\text{\AA}$  et  $4861\text{\AA}$
- $[N^+] = [NII]$  :  $\lambda=6548\text{\AA}$  et  $6584\text{\AA}$
- $[O^+] = [OII]$  :  $\lambda=7319\text{\AA}$  et  $7330\text{\AA}$
- $[O^{++}] = [OIII]$  :  $\lambda=4959\text{\AA}$  et  $5007\text{\AA}$
- S II :  $\lambda=6716\text{\AA}$  et  $6731\text{\AA}$
- He :  $\lambda=5875\text{\AA}$
- $H_\beta$  :  $\lambda=4861\text{\AA}$
- ArIII :  $\lambda=7136\text{\AA}$  et HeI :  $\lambda=5875, 6677$  et  $7065\text{\AA}$

### 4.2 Description de la distribution des différentes espèces atomiques :

En effectuant des spectres sans fente et avec fente placée selon le demi-grand axe de la nébuleuse planétaire, BOWEN puis STRÖMGREN ont constaté qu'il existait une véritable **stratification des espèces atomiques** autour de l'étoile centrale.

Il s'avère que dans le cas où chaque espèce atomique "neutre" (non ionisée) est distribuée de façon homogène dans toute l'enveloppe constituant la nébuleuse planétaire, il n'en est pas de même pour la partie des ces atomes se trouvant dans

un état plus ou moins ionisé.

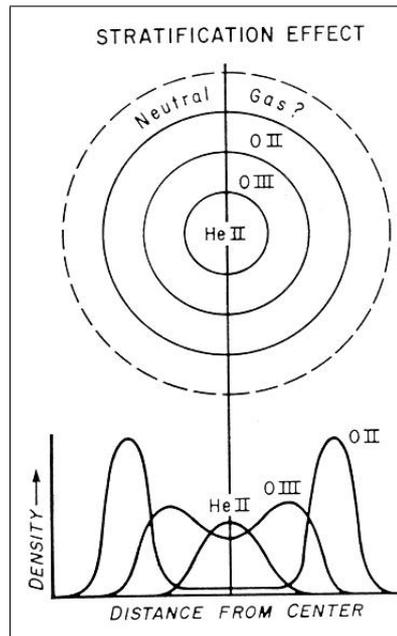


Fig. 9 : Sphères de Strömgren.

Les radiations dans l'ultra-violet et l'ultra-violet lointain émises par l'étoile centrale sont assez puissantes pour ioniser l'hydrogène et l'oxygène ([5] p.22).

En effet, comme le décrit L. ALLER ([5] p.22), parmi tous les photons ultra-violet émis par la centrale, **les plus énergétiques** (c'est-à-dire les plus bleus) **seront utilisés pour ioniser l'hélium** donnant la raie HeII.

Ensuite, **ceux un peu moins énergétiques ioniseront l'oxygène** faisant naître les raies [OIII] et ainsi de suite, la contrainte étant la difficulté d'ionisation de l'atome (voir **table des potentiels d'ionisation** p.37-40 [4]). Ceci amène à la structure de sphères successives de STRÖMGREN.

D'autre part, **la température de l'étoile centrale** conditionne énormément le **degré d'ionisation et la quantité d'atomes ionisés** pour une espèce donnée.

### 4.3 Mesure de quelques grandeurs physiques :

Ce paragraphe sous-entend l'emploi d'une caméra CCD et de l'outil informatique. Cependant, il m'a semblé utile de décrire ce que des astronomes amateurs pouvaient obtenir des nébuleuses les plus brillantes. D'ailleurs, à ce sujet, j'ai inclus dans ce document les spectres acquis lors d'une survey à l'Observatoire de Nice. Dans les formules,  $I_n$  représente l'intensité de la raie de l'atome inscrit en indice.

Hormis le repérage des différentes espèces chimiques, certaines grandeurs physiques sont accessibles à l'amateur pour des objets brillants et des prises de vue

peu bruitées.

- **Abondances des espèces atomiques :**

Si l'on **mesure la largeur équivalente des raies** (c'est-à-dire ramener à une hauteur d'une unité les raies tout en conservant l'aire contenue sous le profil: ceci amène le rectangle obtenu à avoir une certaine largeur), nous déterminons **l'abondance de l'espèce chimique à l'origine de la raie.**

- **Vitesse radiale de l'astre :**

Une vitesse radiale représente la composante orientée vers la Terre de la vitesse totale de l'astre. Elle est calculée à l'aide de **l'effet DOPPLER-FIZEAU**:

$$\boxed{\frac{v}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}}$$

Il est démontré que lorsque de la matière rayonnante, faisant partie de l'astre étudié, s'éloigne de nous, les longueurs d'onde de ces espèces atomiques se décalent vers celles du rouge d'une quantité  $\Delta\lambda$  (positif ou négatif comme la vitesse). Et lorsqu'elle se rapproche de nous, les raies sont déplacées vers le bleu.

Cela nécessite d'avoir au préalable étalonné en longueur d'onde notre appareillage.

- **Détermination de la densité électronique :**

Avec le *calcul du rapport de l'intensité des deux raies interdites du soufre*, la théorie nous montre que l'on obtient la densité électronique.

$$D_{elec} = \frac{In_{[SII]'}}{In_{[SII]''}}$$

- **Détermination de la température électronique :**

De la même manière, nous avons accès à la température électronique:

$$T_{elec} = \frac{In_{[OIII]'}}{In_{[OIII]''} + In_{[OIII]'''}}$$

- **Détermination de la température du gaz :**

ZANSTRA a élaboré un modèle physique qui permettrait d'obtenir la température du gaz.

Cette méthode nécessite de posséder la raie  $H_\gamma$  dans notre spectre; cette raie est positionnée dans le bleu et est souvent faible.

La relation est:

$$T_{gaz} = Cste.In_{H_\gamma}$$

## 5 Applications pratiques :

### 5.1 La campagne d'étude de NOVAE :

Les spectres suivants ont été réalisés avec une HiSIS22, un réseau de 600 traits/mm et la lunette coudée de Nice (45 cm).

On peut distinguer différentes morphologies (raies longues ou courtes, petits boulets ...) qui sont représentatives des distributions distinctes des espèces ionisées dans le cocon de la nébuleuse.

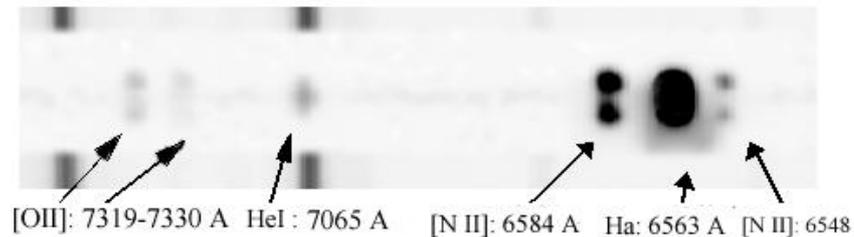


Fig. 10: Spectre de NGC6543 en  $H_{\alpha}$ .

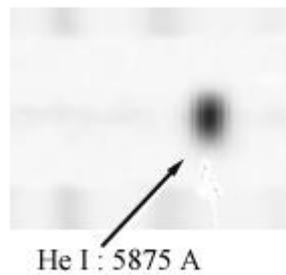


Fig. 11: Spectre de NGC6543 en HeI.

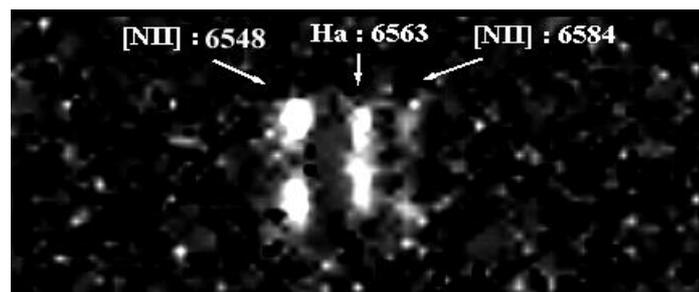


Fig. 12: Spectre de M57 en  $H_{\alpha}$ .

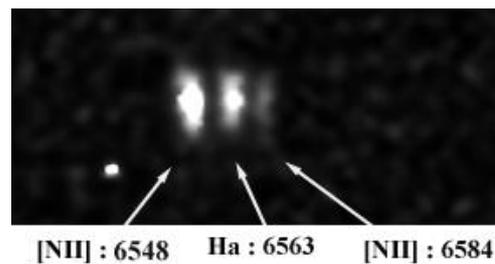


Fig. 13: Spectre de M76 en  $H_{\alpha}$ .

Nous n'avons pas fait ici de mesures physiques, mais cet exemple montre qu'avec une lunette coudée de 45 cm de diamètre absorbant 60% de la lumière, un réseau 600 traits/mm et des poses de 60s, il est possible d'acquérir des spectres, même en pleine ville<sup>5</sup>. Un première analyse permet de faire quelques remarques.

Sachant que **la température de l'étoile centrale** conditionne énormément le **degré d'ionisation et la quantité d'atomes ionisés** pour une espèce donnée, les raies en seront d'autant plus intenses.

Ainsi, de façon générale on retrouvera des **raies de taille variable selon les ions** (taille selon la verticale car la fente du spectromètre est positionnée selon un axe passant par le centre de la nébuleuse planétaire) allant même jusqu'à constituer **deux petits boulets** (ions présents seulement dans l'anneau ...) selon leur distribution.

## 5.2 La spectroscopie visuelle :

Lors d'une soirée avec les astronomes aubagnais, nous avons observé la décomposition de la lumière verte de *NGC 7662*: un continuum qui s'épaissit au centre où se superpose trois "bourellets" verticaux (les images de l'astre à travers le réseau sont orientées dans le sens des traits du réseau).

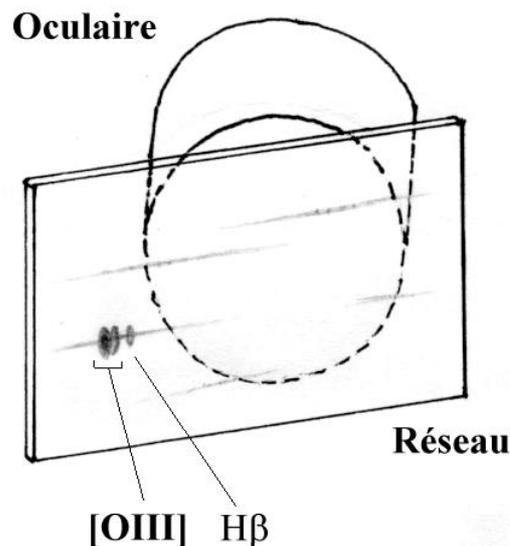


Fig. 14 : Spectre visuel de *NGC 7662* au T450 à 287×.

Aussi ai-je été curieux de voir ce que cela pouvait donner sur un objet nébulaire particulier (qui contient de l'eau!), voir peut-être proto-nébuleuse planétaire tel que *Frosty Leo* qui est associé à l'étoile GSC 0824-1094 à l'ouest d'omicron du Lion.

5. En effet, l'observatoire de Nice se trouvant sur la grande Corniche, subit de plein fouet la pollution lumineuse de la ville.

L'observation à été réalisée à 572 $\times$  avec un T445 ouvert à 4.5 et une météo ventée et irrégulière.

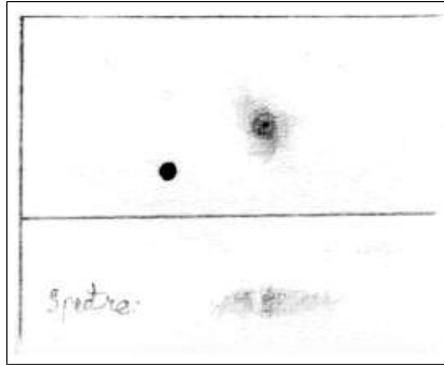


Fig. 15 : Spectre et nébulosité de l'étrange Frosty Leo.

Un autre application de la spectroscopie visuelle est la recherche des nébuleuses planétaires stellaires ayant un spectre discontinu<sup>6</sup> situées dans un champ riche d'étoiles.

En effet, les étoiles produiront des trainées (spectres continus) tandis que la nébuleuse planétaire présentera un spectre constitué de condensations et éparses bien caractéristiques.

---

6. La majorité des nébuleuses planétaires possèdent un spectre de raies d'émission à l'exception de quelques une comme la très particulière NGC 2242.

## **6 Conclusion :**

La spectroscopie se révèle être un outil formidablement puissant pour obtenir des informations sur les objets distants telles les étoiles et nébuleuses du ciel.

Malgré tout, les nébuleuses planétaires et les astres en général n'ont pas fini de nous livrer tous leurs secrets. On peut donc espérer encore bien des nuits d'observations en perspective.

## 7 Bibliographie :

### Références

- [1] Agnès ACKER. *Astronomie introduction*. Masson, 1992.
- [2] Agnès ACKER. La saga des étoiles. In *La tempête avant la mort douce*, number 8 in Ciel et Espace n° spécial, 1995.
- [3] Agnès ACKER. In *Les nébuleuses planétaires*, number 72 in Les Cahiers Clairaut, Hiver 1995-96 1996.
- [4] C. W. ALLEN. *Astrophysical quantities*. University of London, 1963.
- [5] Lawrence H. ALLER. *The planetary nebulae*. Sky and Telescope Monographic Series, 1965.
- [6] Bruce BALICK and Joel KASTNER. In *Ring nebula reality*, Sky & Telescope, juin 1994.
- [7] Guy FONTAINE, Jean-Claude PAUL, and Adolphe TOMASINO. *Physique, Terminales C.E.* Nathan, 1989.
- [8] Adam FRANCK. In *Blowing cosmic bubbles*, Astronomy, mai 1994.
- [9] Adam FRANCK. In *Blowing cosmic bubbles*, Astronomy, février 1997.
- [10] J.P. HARRINGTON, K.J. BORKOWSKI, and NASA. In *Anatomy of a Cat's Eye*, Sky & Telescope, avril 1995.
- [11] Sreven J. HYNES. *Planetary nebulae*. Willmann-Bell, 1991.
- [12] James KALER. *Les étoiles - Vie et mort des soleils lointains*. Pour la Science, 1992.
- [13] Sun KWOK. In *A modern view of planetary nebulae*, Sky & Telescope, juin 1996.
- [14] Benjamin MAUCLAIRE. In *Cendres d'étoiles*, Conférences mensuelles. AAAOV, janvier 1997.
- [15] Benjamin MAUCLAIRE. *Projet d'étude spectrale des nébuleuses planétaires à l'Observatoire de la Sinne*. AAAOV, 1997.
- [16] Yann POTHIER. In *La saga des filtres*, number 10, 11, 12 in Ciel Extrême.
- [17] Yann POTHIER. In *NGC 6818 et NGC 7027 imagées en [OIII], [H $\beta$ ] et [HeII]*, number 9 in Ciel Extrême, avril 1998.