

La distribution des différentes espèces atomiques dans les NP

1 Origine de cette lettre:

Dans l'article "NGC 6818 et NGC 7027 imagées en [OIII], [H β] et [HeII]" du CE no 9 [17], plusieurs choses ont attiré mon attention, hormis le titre (N7009 plutôt que N7027). Suite à quoi je me décidai d'écrire ces mots.

2 La ionisation et la recombinaison atomique:

Je ne détaillerai pas ces deux principes, mais les ouvrages où l'on peut trouver leur description sont:

- *Livre de physique de Terminale* [9]: $E = h\nu = hc/\lambda$.
- *Astronomie introduction* de A. ACKER [1]: p.28, p.30 (recombinaison et raies interdites).
- *Cahiers Clairaut* [3] et *Astrophysical Quantities* de C.W. ALLEN: p.27 (raies permises), p.74 (raies interdites), p.92 (coefficients d'absorption et de recombinaison atomique).

D'autre part, grâce à la formule:

$$E = \frac{h.c}{\lambda}$$

on pourra constater qu'il y a un rapport direct entre l'énergie de transition d'un atome et la longueur d'onde λ du photon mis en jeu.

Ainsi, plus λ est grand (lumière rouge, raie H α , etc ...), moins l'énergie nécessaire à l'excitation de l'atome est importante, car " E est inversement proportionnelle à λ ".

Néanmoins, ceci est sans compter les deux types de phénomènes qui sont à l'origine des raies vues au spectromètre: **la recombinaison et la ionisation atomique**.

Aussi, tu conçois comme moi comme que proche de l'étoile centrale, les atomes sont soumis à des UV plus intenses que dans la banlieue de celle-ci. Par suite, les atomes seront plus ionisés (OIII, etc ...) et les atomes difficilement ionisables (d'après les tables: HeII ...) visibles seulement près du centre.

3 Sculpture d'une NP:

Il y a facteurs qui sont en jeu pour modeler la matière éjectée par les étoiles en fin de vie:

- Le modèle de l'hydrodynamique (voir article et simulations de l'équipe de Adam FRANCK [7], [8], de KWOK [13] et de A. ACKER [3]) dans à partir duquel se sont basées les classifications suivantes:
 - la plus utilisée (I, IIabc, IIIab, IV, V et VI) de VORONTSOV-VELYAMINOV ([10] p.25).
 - celle de KHROMOV-KOHOUTEK ([5] p.26) basée sur les profils morphologiques.
 - la table des S et N de B. BALICK ([10] p.23-24) décrite à partir des étapes de formation de la NP.

Le modèle des **vents interactifs** proposé en 1978 rend bien compte que 80% des NP possèdent une structure bipolaire (scénario résumé dans un article d'Agnès ACKER [3] et [2]).

- La présence d'un couple au centre.
- L'effet du champ magnétique intense de l'étoile centrale ?

En bref, à partir des étapes de la formation des NP, on peut tirer trois conséquences influençant leur structure:

1. Une des premières éjections (de la première des trois séries) crée l'enveloppe externe bipolaire.
2. Le vent stellaire rapide crée l'enveloppe interne (un disque équatorial dense se forme aussi).
3. Des jets violents compriment le gaz, soit de l'anneau, soit de l'hélice de la NP.

C'est le modèle de l'**hydrodynamique des vents interactifs** qui est majoritairement admis aujourd'hui. Il est d'ailleurs appliqué à plusieurs spécimens bien connus dans des articles de *Sky & Telescope* entre autre ([11], [6]).

4 Modèle des sphères de STRÖMGREN:

Bien que le modèle des **vents interactifs** soit puissant, il n'explique naturellement pas **la distribution** des différentes **espèces atomiques ionisées** dans la NP (sachant les atomes neutres sont généralement répartis de façon uniforme).

Il est évident que la matière est brassée par ces vents. Mais durant les étapes de la formation de la NP ([14] et [2]), les différentes bouffées d'éjection de gaz ne contiennent pas forcément les mêmes atomes chacune et n'ont pas les mêmes vitesses.

En effectuant des spectres sans fente et avec fente placée selon le demi-grand axe de la NP, 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 NP, il n'en est pas de même pour la partie des ces atomes se trouvant dans un état plus ou moins ionisé.

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 bleu) **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. Le contrainte étant la difficulté d'ionisation de l'atome (voir **table des potentiels de ionisation** p.37-40 [4]). Ceci amène à la structure de sphères successive suivante:

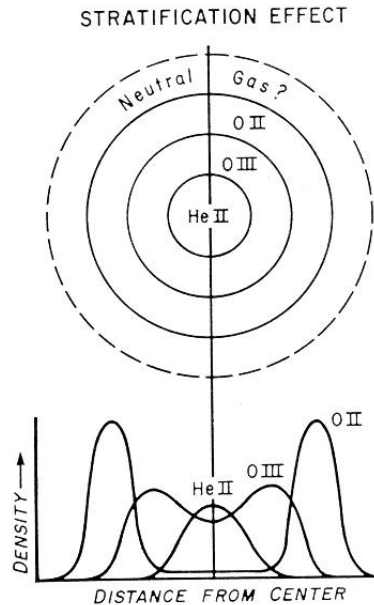


Fig.1: Sphères de Strömngren.

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.

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 NP) allant même jusqu'à constituer **deux petits boulets** (ions présents seulement dans l'anneau ...).

L'intensité de la raie entre ses deux extrémités (c'est-à-dire entre les deux lobes) est liée à la température de l'étoile centrale, donc à l'importance de l'énergie des photons ultra-violet.

Ceci est bien exprimé dans les spectres suivants (raies longues ou courtes, petits boulets ...) réalisés avec une HiSIS22, un réseau de 600 traits/mm et la lunette coudée de Nice (45cm):

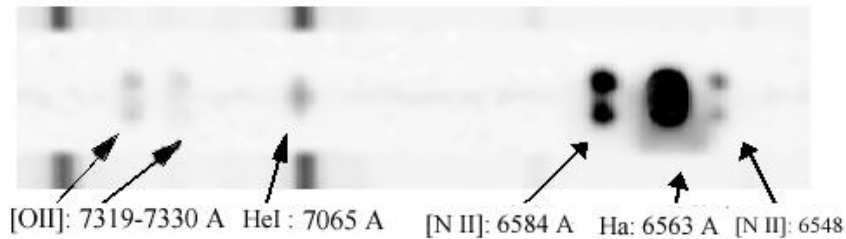


Fig.2: Spectre de NGC6543 en H_{α} .

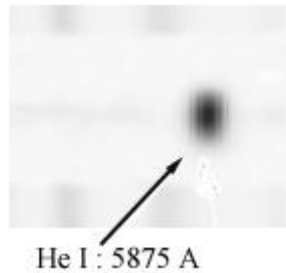


Fig.3: Spectre de NGC6543 en HeI.

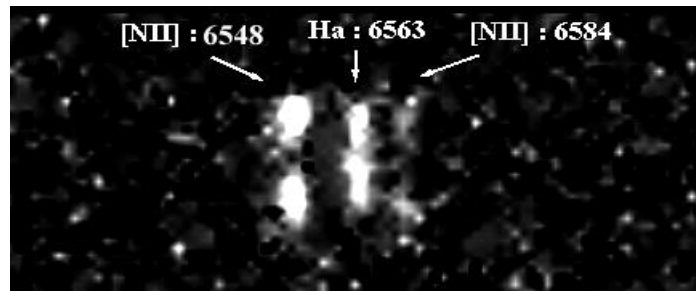


Fig.4: Spectre de M57 en H_{α} .

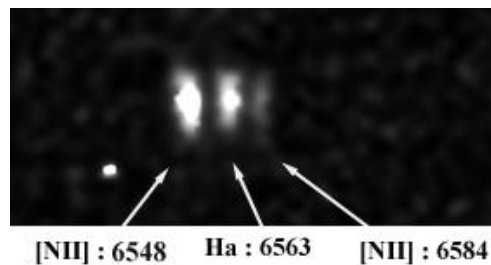


Fig.5: Spectre de M76 en H_{α} .

5 Applications sur N6818 et N7009:

Je vais ici commenter les conclusions tirées des spectres réalisés à Château-Renard.

- Il est clair que les étoiles centrales ressortent mieux dans le bleu (H_β et HeII) car ces dernières émettent principalement dans l'ultra-violet.
- Plus clairement, un filtre professionnel possédant une bande passante étroite entraînera un **meilleur contraste** car la composante spectrale $\lambda + \Delta\lambda$ est plus **mince** ($\Delta\lambda$ plus petit ici) que celle d'un filtre amateur.
- Deux éléments peuvent expliquer pourquoi la composante H_α semble être distribuée de façon moins homogène que [OIII].

Bien que l'hydrogène soit plus facilement ionisable que l'oxygène (voir tables p.37 de [4]), il se peut que l'hydrogène se trouve en plus petites quantités que l'oxygène. D'autre part, l'hydrogène ne peut être ionisé qu'une fois tandis que la ionisation de l'oxygène peut continuer (il totalise 8 électrons).

En effet, l'intensité des raies de [OIII] (et parfois [OII]) est plus importante que celle des raies de la série de BALMER (tables p.246 [4]) et peut-être que cela constitue une indication sur la quantité de ces espèces.

Il se peut aussi que les atomes d'hydrogène ne soient pas distribués de façon homogène (effets des vents plus importants sur des atomes légers) et que par suite les ions H^+ suivent cette même distribution.

Les ions O^{2+} restés un certain temps dans cet état vont émettre un photon si il y a des électrons libres (provenant principalement de la ionisation de l'hydrogène) qui entrent en collision avec eux. Cette **recombinaison** se fait de façon plus ou moins importante **selon la densité du milieu**.

Ainsi, **si la masse de l'étoile centrale est peu importante, le confinement équatorial de la matière sera faible** (par effet gravitationnel) **et les anses bipolaires denses**. Donc par transparence de ces anses, l'hydrogène ionisé (H_α) formerait des condensations, tandis que les ions O^{2+} , présents aussi dans les anses, apparaîtraient de manière plus homogène.

Mais il serait nécessaire de calculer à partir des spectres la densité électronique [15]. Aussi faut-il bien avoir à l'esprit que la NP est tridimensionnelle et que **selon l'axe de vision ces condensations apparaîtront totalement différentes**. Ce point reste donc en suspens et il faudrait le développer.

- En ce qui concerne [OI] et [NII], on peut appliquer le même raisonnement. Cependant il faut toujours savoir que ce que l'on voit de la NP est sa projection dans le plan de visée. Ce qui peut être trompeur quant aux interprétations que l'on peut faire !

Enfin, nous n'avons pas encore extirpé tous les mystères que les NP cachent ... l'aventure continue ...

Benjamin MAUCLAIRE

6 Annexes:

6.1 Rayonnement par ionisation et recombinaison:

- L'étoile centrale des NP rayonne des photons ultraviolet très énergétiques. Ces derniers rentrent en collision avec un électron appartenant à un atome d'hydrogène. L'électron est éjecté, tandis que le photon est absorbé (voir l'excellent ouvrage de James KALER [12]).

Cet électron possède alors une énergie supérieure à la limite d'ionisation, il peut ainsi se déplacer librement dans le gaz.

Au cours de son cheminement, il perd de l'énergie au profit d'autres électrons: c'est le **processus** par lequel s'établit **l'équilibre thermodynamique et la valeur de la température cinétique**.

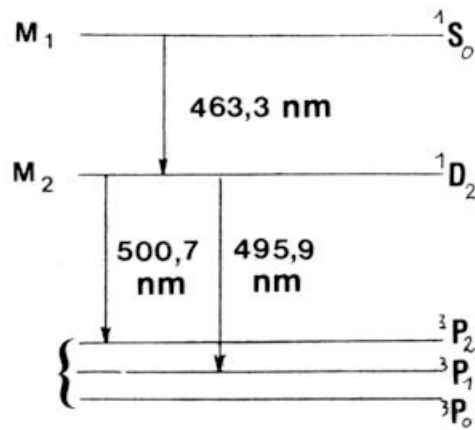
Ensuite, cet électron rentre en collision avec un des volumineux ions d'oxygène O^{2+} et projette son électron périphérique sur une orbite plus élevée.

Après quoi, notre électron libre rentrera en interaction (rayonnement Bound-free) avec un ion H^+ (donc un proton), pour redescendre l'échelle des niveaux énergétiques (après 10^{-8} secondes) en **produisant les raies d'émission de l'hydrogène**.

- L'électron de l'oxygène excité finit aussi par retomber (à son tour, respectivement après 0.6 et 35.5 secondes ! cf. [2]) sur un niveau inférieur en produisant les célèbres raies [OIII] à 4959 et 5007 angströms.

La probabilité de ces raies (**de recombinaison pour H_α et interdite pour [OIII]**) est proportionnelle à l'inverse de la durée moyenne de vie de ces niveaux.

Lorsque l'électron retombe, il effectue dans ce cas des **transitions à travers des niveaux "métastables"** M_i en donnant ainsi les deux raies vertes intenses et une bleue, dont les rapports dépendent de la température (cf. [3] p.32).



Raies interdites de [OIII]

- A partir des **probabilités de collision, de recapture et de désexcitation**, on déduit les composition chimiques de ces nébuleuses.

6.2 Rayonnement free-free:

A haute température, les électrons arrachés aux atomes d'hydrogène voyagent dans le gaz. A chaque fois qu'ils passent près d'un ion positif, ils sont soumis aux forces électromagnétiques d'attraction (cf. [3] p.33).

Les **faibles pertes d'énergie** qui en résultent sont **accompagnées de l'émission d'ondes radio**, rayonnement par freinage dit de BREMSSTRAHLUNG. L'énergie de ces électrons libres n'étant pas quantifiée, il en résulte un spectre continu.

Ce rayonnement peut être émis dans toutes les longueurs d'onde, selon la température du milieu: λ plus petit lorsque T est importante.

6.3 Raies par fluorescence:

Ces raies se produisent lorsque les électrons d'un atome qui a été excité, effectuent **spontanément des transitions vers le niveau fondamental**.

Ces transitions se font soit par l'intermédiaire de plusieurs niveaux, soit directement.

Les raies sont dites "de résonance" quand la radiation émise lors de la désexcitation possède la même fréquence que la radiation qui a excité l'atome.

Ces raies sont observées dans les nébuleuses.

7 Bibliographie:

References

- [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 No 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] Joel KASTNER Bruce BALICK. In *Ring Nebula Reality*, Sky & Telescope, Juin 1994.
- [7] Adam FRANCK. In *Blowing Cosmic Bubbles*, Astronomy, Mai 1994.
- [8] Adam FRANCK. In *Blowing Cosmic Bubbles*, Astronomy, Fevrier 1997.
- [9] Adolphe TOMASINO Guy FONTAINE, Jean-Claude PAUL. *Physique, Terminales C.E.* NATHAN, 1989.
- [10] Sreven J. HYNES. *Planetary Nebulae*. Willmann-Bell, 1991.
- [11] NASA J.P. HARRINGTON, K.J. BORKOWSKI. In *Anatomy of a Cat's Eye*, Sky & Telescope, Avril 1995.
- [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 β] et [HeII]*, number 9 in Ciel Extrême, Avril 1998.