Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft

Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft

Band: 62 (2004)

Heft: 320

Artikel: L'univers, dis- moi ce que c'est? : Épisode 21 : la matière interstellaire, 2e partie

Autor: Barblan, Fabio

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898307

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

L'Univers, dis-moi ce que c'est?

Episode 21: La matière interstellaire, 2e partie

FABIO BARBLAN

Fig. 1bis: Détail de la nébuleuse d'Orion. C'est la plus proche (à environ 1500 AL) et la mieux étudié des régions de formation de nouvelles étoiles. (Image VLT)

3. Les gaz ionisés dans la matière interstellaire, en particulier l'hydrogène: 1re partie

3.1. Le processus d'ionisation

Le gaz ionisé, sous ses différents aspects, représente une partie non négligeable de la masse interstellaire et occupe une bonne partie du volume de l'univers. Dans notre galaxie, par exemple, environ la moitié du volume est occupé par des gaz interstellaires ionisés. Deux processus physiques différents sont à l'origine de l'ionisation d'un tel gaz, soit la collision des particules du gaz avec d'autres particules se déplaçant dans l'espace soit par interaction avec un photon. Dans ce dernier cas, on parle de photo-ionisation.

Parmi les gaz ionisés qui jouent un rôle important il y a évidemment l'hydrogène. Pour ioniser un atome d'hydrogène, c'est-à-dire lui faire perdre son unique électron, il doit recevoir une énergie correspondante à 13.6 eV[1]. Il peut donc soit entrer en collision avec une autre particule dont l'énergie cinétique est de 13.6 eV soit absorber un photon (grain de lumière) ayant une énergie de 13.6 eV. Les photons qui possèdent une telle énergie sont des photons dont la longueur d'onde est de 912 Ångstrom; ce sont donc des photons ultraviolets[2]. L'ionisation de l'hydrogène par photo-ionisation requiert des photons ultraviolets de longueur d'onde inférieure ou égale à 912 Å mais supérieure à 100 Å. En effet le rendement diminue fortement avec une longueur d'onde décroissante du photon.

Les sources les plus importantes de photons ayant cette énergie sont les étoiles dont la température effective dépasse les 30000 °K, il s'agit d'étoiles de type spectral O et B. Le libre parcours moyen d'un photon de longueur d'onde 900 Å dans un milieu contenant un atome d'hydrogène par cm^3 est seulement de 0.05 parsecs. Cette distance est largement inférieure à celle qui sépare deux étoiles voisines. Ainsi une étoile dont le rayonnement ultraviolet est suffisamment intense peut être entièrement entourée d'une enveloppe de gaz ionisée. Le volume total de cette enveloppe ne peut pas être infiniment grand. Il sera limité à la région qui correspond à l'établissement d'un équilibre entre le taux total de recombinaison proton – électron pour former un atome d'hydrogène neutre et le taux de re-ionisation (taux d'émission de photons ionisant de la part de l'étoile).

Dans un milieu ayant une densité de 10 ions par cm^3, un atome d'hydrogène reste ionisé pendant 100 ans avant de subir une recombinaison; par contre, il ne reste dans l'état neutre que quelques mois. Les étoiles de type spectral O et B de la séquence principale ont une durée de vie relativement courte, quelques millions d'années. Dans ce court laps de temps, elles n'ont pas la possibilité de se déplacer sur des grandes distances. Elles restent par conséquence d'un côté liées aux restes du nuage dense de matière interstellaire où elles ont pris nais-

Fig. 1: La nébuleuse d'Orion et l'amas du Trapèze.

[1] L'eV (électron-Volt) est une mesure d'énergie. Elle correspond à l'énergie emmagasinée par un électron qui passe à travers une différence de potentiel de un Volt, 1 eV = 1.6 10^{-19} Joule.

[2] La longueur d'onde λ, peut se calculer en utilisant l'expression hc/E, avec h constante de Planck et c la vitesse de la lumière. $\lambda = 6.626 \cdot 10^{-34} \cdot 2.997 \cdot 10^{8} / (13.6 \cdot 1.6 \bullet 10^{-19}) = 912 \cdot 10^{-10}$m = 912 Å.

sance et de l'autre côté au voisinage des autres étoiles engendrées par ce même nuage. On parle d'associations d'étoiles OB. La nébuleuse d'Orion (figure 1et 1bis) et celle de l'Aigle (figure 2) ainsi que celle de la Tarentule (figure 3) sont des exemples fameux de régions d'étoiles jeunes de type OB associées avec de l'hydrogène ionisé. Des régions géantes d'hydrogène ionisé ont été identifiées dans de nombreuses galaxies et représentent le terrain privilégié pour l'étude de la formation des étoiles. Le rayonnement ultraviolet intense ionise les restes de gaz du nuage originel. Les associations d'étoiles OB sont donc entourées de vastes régions de gaz hydrogène ionisé. Les astronomes les appellent les régions H II (ou H^+).

L'étude des régions H II est primordiale pour établir l'abondance actuelle des différents éléments dans la matière interstellaire (figure 4). Une récente étude a montré que la métallicité[3] de la matière interstellaire diminue avec l'augmentation de la distance au centre de la galaxie. Les régions H II qui sont plus éloignées du centre de la Galaxie contiennent moins d'éléments lourd que celles qui sont plus près du centre.

D'autres étoiles sont capables d'ioniser le milieu interstellaire: les naines blanches. Ce type d'étoile représente l'état final de l'évolution stellaire d'étoiles peu massives du type solaire. Cette évolution s'accompagne, généralement avant d'atteindre le stade de naine blanche, d'une expulsion de matière qui sera par la suite ionisée par le rayonnement ultraviolet émis par la future naine blanche, donnant ainsi naissance à une nébuleuse planétaire (figure 13).

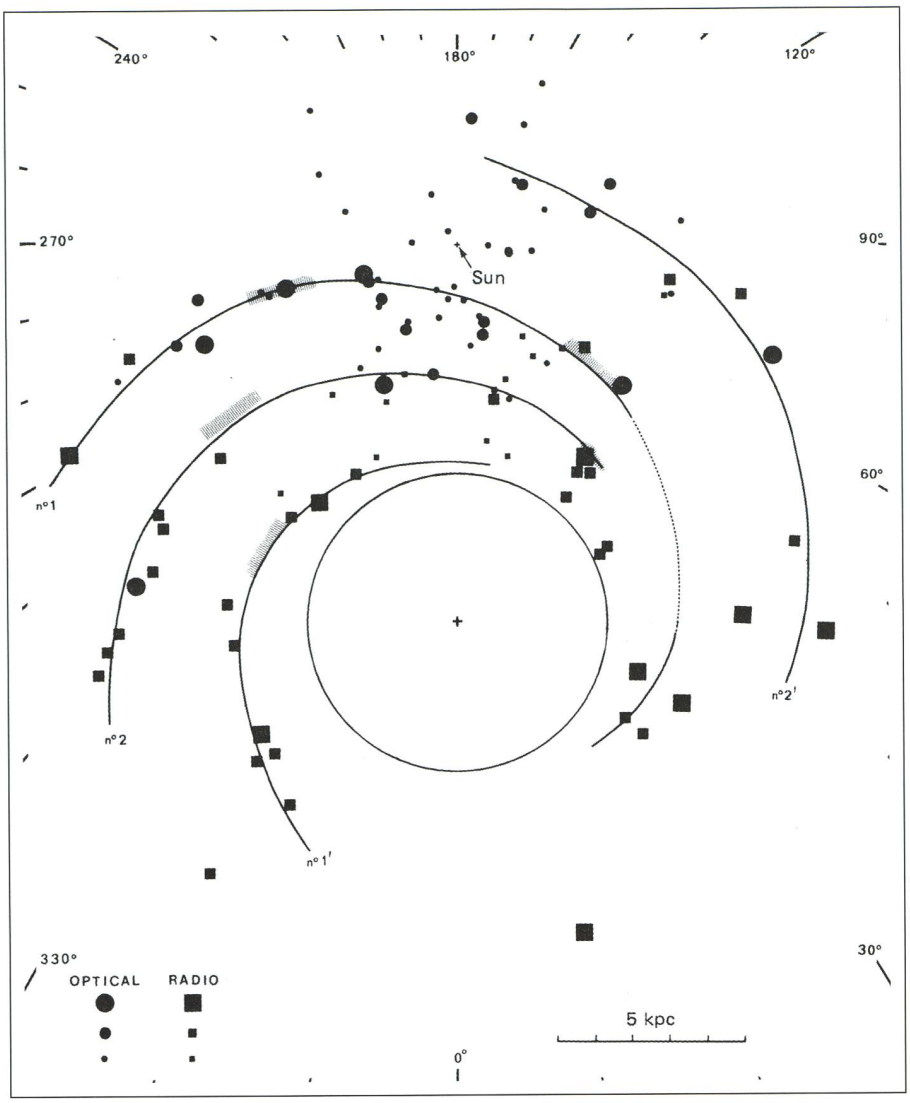


Fig. 4: La distribution des régions H II dans la Galaxie. On distingue bien la distribution des régions H II le long des bras spirales de la Galaxie. Les disques représentent les régions que l'on peut détecter dans le visible, les carrées celles qui sont détectée par radio-astronomie. (Source [6])

[3] Métallicité: on indique par ce terme le contenu en éléments lourds d'un gaz.

Fig. 2: La nébuleuse de l'Aigle. Au centre de l'image les colonnes de matière sombre dans lesquelles de jeunes étoiles sont actuellement en formation comme l'ont révélé de récentes études d'images infrarouges prises avec le VLT de l'ESO à l'observatoire du Paranal.

Fig. 3: La nébuleuse de la Tarentule dans le grand nuage de Magellan, une des plus grandes régions de formation d'étoiles connues. (Image VLT)

3.2. La lumière émise par les régions HII

La température du gaz dans d'une région H II varie entre 5000°K et 10 000°K. A ces températures, le spectre de lumière que l'on peut détecter est plutôt un spectre de raies d'émission qu'un spectre continu. Les raies de l'hydrogène sont évidemment les plus importantes, mais on y trouve aussi d'une façon non négligeable les raies de l'hélium et de l'oxygène (figure 8). Dans le cas de l'hydrogène et de l'hélium, il s'agit avant tout de raies de recombinaison. Cela correspond à la lumière émise lorsqu'un ion H ou He absorbe un électron pour donner naissance à un atome neutre.

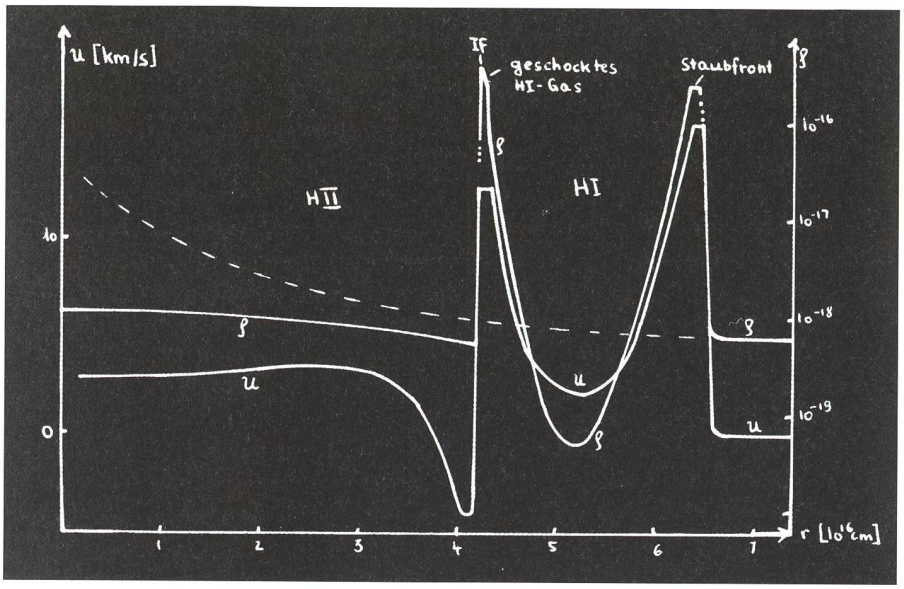


Fig. 5: Diagramme montrant l'évolution de la densité et de la vitesse du gaz dans un nuage protostellaire (voir texte). (Source [3])

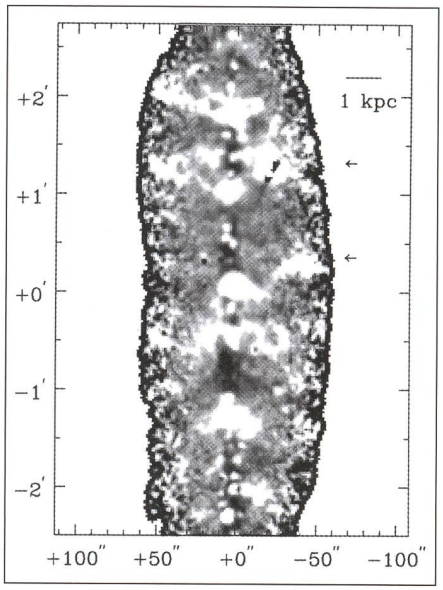


Fig. 6: Image de la répartition de l'hydrogène diffus (Hα) dans la galaxie NG 891. La région représente une bande d'environ deux kpc à gauche et à droite du plan galactique. On observe bien les colonnes (blanches) d'hydrogène diffus qui s'élèvent au dessus du plan galactique.(Source [7]).

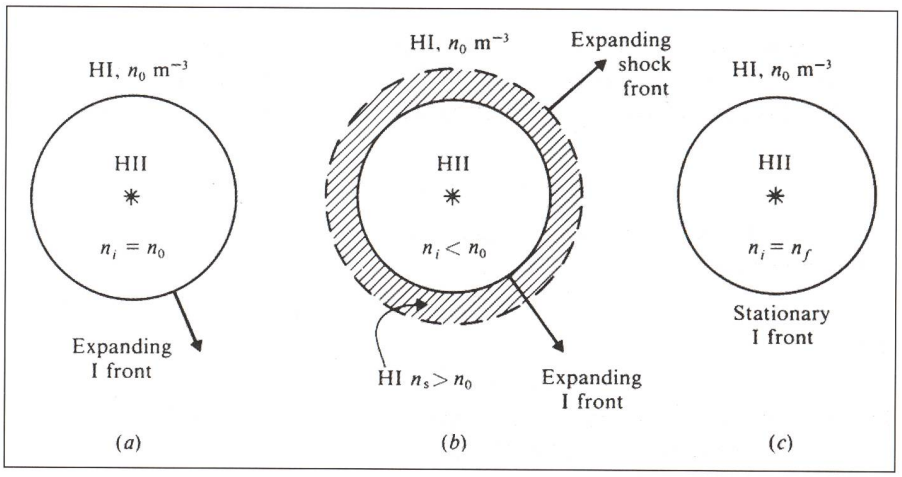
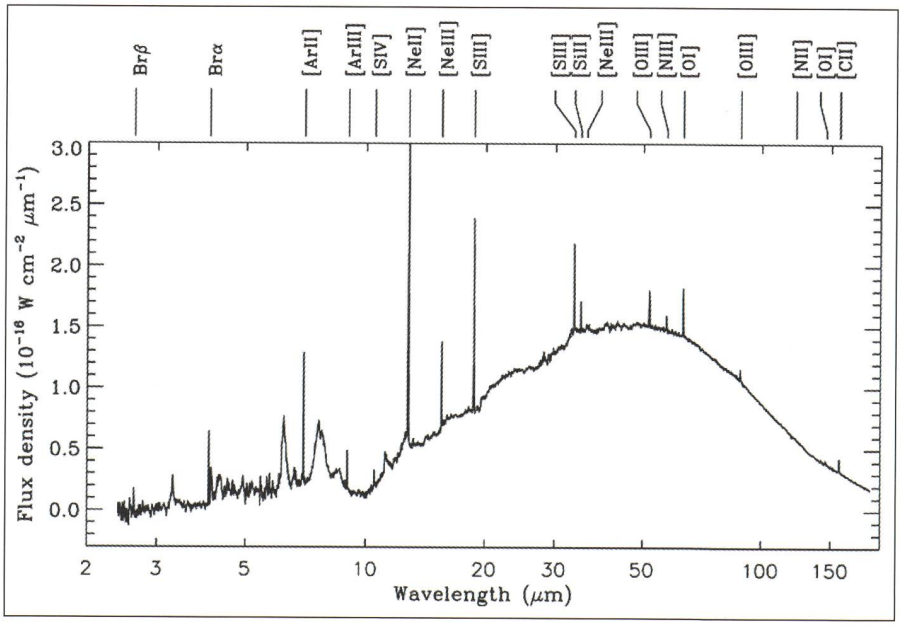


Fig. 7: Etapes de l'expansion d'une région H II. Avec a) état initial, le gaz inonisé a la même densité que le gaz neutre et ne se déplace pas par rapport à ce dernier., b) front de choc se déplaçant dans la gaz neutre et c) stade final le volume maximum d'ionisation est atteint. (Source [4]).

Fig. 8: Spectre infrarouge d'une région H II compacte obtenu avec un spectromètre du télescope infra-rouge ISO.(Source [8]).



L'absorption de l'électron produit un état excité. La désexcitation jusqu'à l'état de plus basse énergie donne lieu à une cascade de transitions avec émission, à chaque étape, d'un photon correspondant couvrant ainsi un large spectre allant des ondes radios jusqu'à l'ultraviolet.

Dans le visible, les raies d'émissions correspondent à ce que l'on appelle la série de Balmer. On nomme ces raies respectivement Hα, Hβ, Hγ, etc. ... (figure 10). L'émission Ha dans le visible est celle qui permet d'avoir des images optiques des nébuleuses H II avec leur caractéristique couleur rouge.

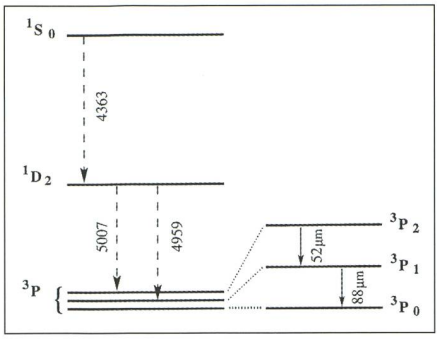


Fig. 9: Les niveaux d'énergie les plus bas de l'oxygène trois fois ionisé avec, en pointillé, les transitions donnant des raies dans le visible. (Source [8]).

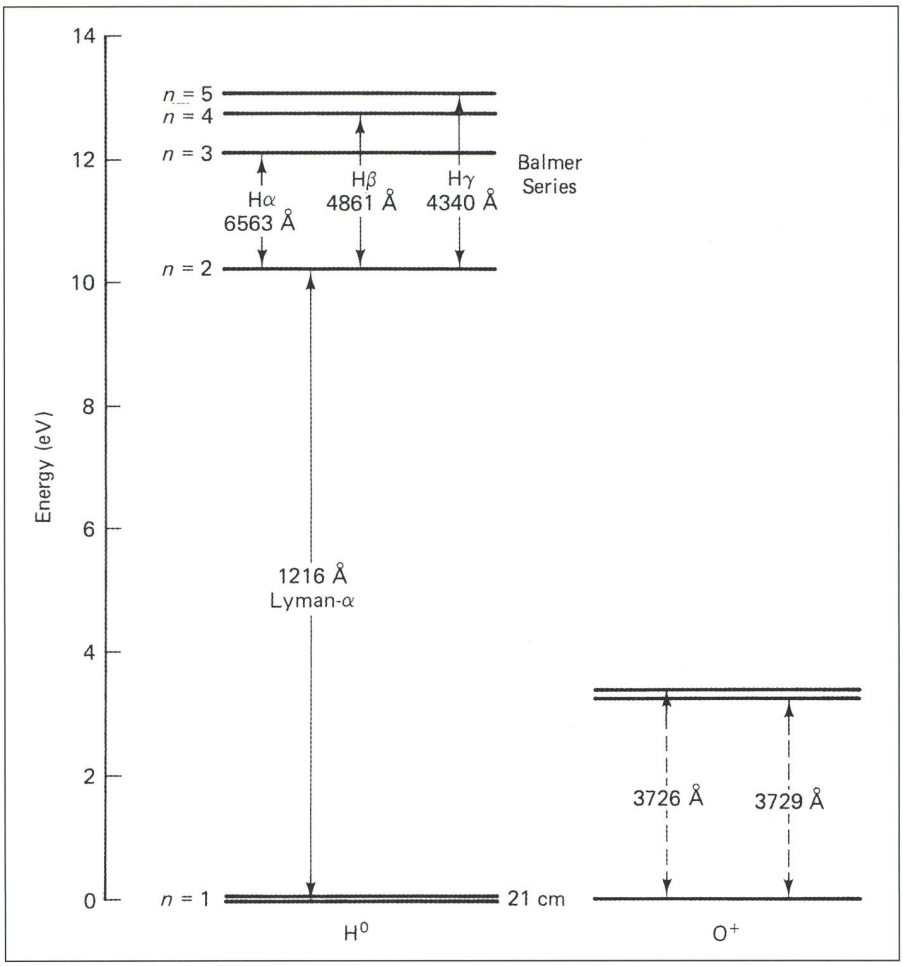
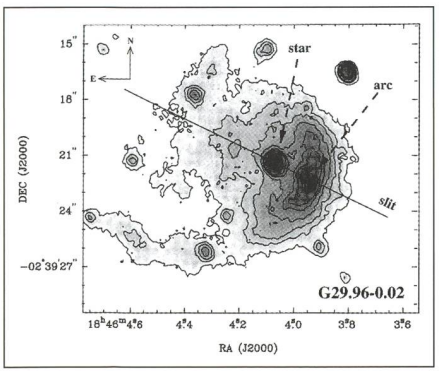


Fig. 10: Les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. La série de Balmer et la raie a de Lyman. (Source [6]).

La plus intense des raies de recombinaison pour l'hydrogène est la raie de Lyman à 1216 Å dans l'ultraviolet (figure 10). Il arrive que, dans beaucoup de nébuleuses, les raies les plus intenses ne correspondent pas à l'hydrogène mais à l'oxygène un et deux fois ionisés donnant respectivement les deux doublets à 3726 Å – 3729 Å et 4959 Å- 5007 Å (figure 9).

Un autre mécanisme de création de rayonnement produit un spectre continu et de raies allant des ondes radio à l'infrarouge. C'est le rayonnement émis par les électrons lors des changements d'accélération produits par l'interaction entre électrons eux-même ou entre électrons et ions. L'existence d'une émission dans le domaine des ondes radios permet une cartographie des régions H II. En particulier celles qui sont «cachées» par la matière interstellaire qui empêche toute observation dans les autres domaines de longueur d'onde. La radioastronomie intervient aussi dans le cas de zones de formations stellaires «récentes» ou le gaz ionisé est encore contenu à l'intérieur d'un cocon de matière interstellaire opaque. D'autre part, on constate que le maximum d'énergie rayonnée par une telle région se situe dans l'infrarouge. Cela est dû à l'échauffement des poussières contenues dans la nébuleuse. L'exploration dans l'infrarouge s'est singulièrement développée ces dernières années et le satellite ISO, (voir ORION N° 270 p. 236, 1995) lancé par l'ESA, a permis d'étudier des nombreuses régions H II.

Fig. 11: Forme «cométaire» d'une région H II hyper-compacte dans la région nommée G29.96-0.02. Etude effectuée avec le VLT. Le diagramme indique la position de l'étoile et à la droite de cette dernière la zone H II incurvée avec un arc qui se prolonge en bas vers la gauche. (Source [8]).



3.3. Régulation de l'équilibre thermique

La température d'une région HII est maintenue «constante» par l'énergie rayonnante fournie par l'étoile qui entretient l'état d'excitation du gaz. Mais ce processus d'échauffement est un processus indirect. Lorsqu'un photon ultraviolet émis par l'étoile percute un atome neutre d'hydrogène une énergie correspondante à 13.6 eV est utilisée pour l'ionisation. L'énergie qui excède cette valeur est transformée en énergie cinétique partagée entre le ion et l'électron. Ce dernier se taille la part du lion vu sa faible masse par rapport à celle du ion. L'électron est donc accéléré. Lorsqu'il va entrer en collision avec d'autres ions ou électrons, il cède dans ces collisions une partie de son énergie cinétique qui devient une partie de l'énergie thermique du gaz. Pour que la température du gaz ionisé reste stable, il faut que la gaz trouve un équilibre entre la quantité d'énergie fournie et la quantité d'énergie perdue.

Le meilleur moyen de transporter, dans l'espace, de l'énergie sur des longues distances reste le photon. Et le meilleur moyen de transformer de l'énergie cinétique des particules rapides en photon est d'exciter un atome qui spontanément retombe dans l'état fondamental. Les protons et les électrons n'ont pas d'état propre excité. Pour l'atome neutre d'hydrogène, le premier état excité correspond à la raie de 21 cm dont la longueur d'onde est trop grande pour jouer un rôle efficace d'évacuation du surplus d'énergie. D'autre part, les atomes ou ions d'hydrogène ou d'hélium nécessitent une énergie trop grande pour exciter les niveaux les plus faibles dans le domaine des hautes énergies. Donc eux aussi ne peuvent pas prendre

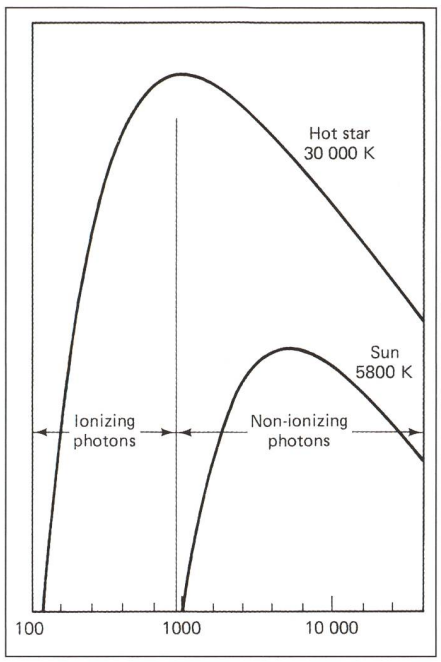


Fig. 12: Comparaison entre la partie du rayonnement ionisant d'une étoile ayant une température effective de 30 000 °K et une étoile de type solaire ayant une température de 5800 °K. On voit qu'une étoile comme le soleil ne possède pas de rayonnement ionisant.

en charge ce rôle d'évacuation du surplus d'énergie dans le gaz ionisé. Lorsqu'on passe en revue toutes les possibilités, on finit par s'apercevoir que les candidats les mieux placés sont les ions d'oxygène un et deux fois ionisés (figure 9). Il faut seulement 3.4 eV pour exciter un ion oxygène (O^+) dans l'un ou l'autre de ses deux premiers états excités. Le photon ultraviolet de longueur d'onde 3726 Å ou 3729 Å ainsi produit par la désexcitation exporte de l'énergie vers l'extérieur de la nébuleuse. Des changements faibles de la température du gaz peuvent produire des variations assez importantes dans le taux de production des ces photons par les ions O^+ et d'autres ions. Ainsi ce taux augmente d'un facteur cinq lorsque la température du gaz évolue de 8000°K à 12 000°K. C'est pour cette raison que les régions HII stabilisent leur température autour des 10 000°K, malgré des variations, qui peuvent être assez importantes, de l'énergie ultraviolette émise par l'étoile excitant le gaz.

3.4. Le milieu chaud ionisé

Tout l'hydrogène ionisé n'est pas confiné dans les régions H II. Une faible émission peut être détectée pratiquement dans toutes les direction de la galaxie. Elle atteste l'existence d'un gaz ionisé diffus non directement associé avec des groupements d'étoiles chaudes. Découvert en 1971 par R. J. REYNOLDS et ses collaborateurs, ce milieu occupe, dans une galaxie, de larges volumes et possède une température d'environ 8000°K, on l'appelle le milieu interstellaire chaud ionisé. Son étude dans les autres galaxies n'a débuté qu'en 1992. Le principal problème posé par ce gaz est celui du mécanisme d'ionisation. L'hypothèse vraisemblable de la photo-ionisation a bien entendu été envisagée, mais elle reste insatisfaisante parce que les modèles théoriques calculés ne permettent pas de reproduire les rapports observés entre les intensités de différents groupes de raies d'émission. D'autre part, et c'est un problème supplémentaire, ce gaz diffus semble posséder, aux dimensions de la galaxie, une structure à grande échelle, avec l'existence de «trous» et de «cheminées» colonnes de gaz qui s'élèvent perpendiculairement au plan galactique (figure 6).

3.5. Evolution des régions H II

Une région H II possède en fait un caractère transitoire puisqu'elle est associée à l'existence d'étoiles de type O. Or la durée de vie de ces étoiles est de l'ordre de dix millions d'années. Une fois que le rayonnement ultraviolet ionisant disparaît la nébuleuse retournera à son état initial de gaz neutre froid. Cette «courte» durée de vie détermine aussi l'extension «maximale» qu'une telle région peut acquérir. A une vitesse d'expansion de 10 km/s pendant dix millions d'années la dimension atteinte est d'environ 100 pc (1 parsec correspond à une distance de 3.26 AL). Lorsqu'une étoile de type O est formée, elle est entourée d'un gaz interstellaire dense, froid et neutre. «L'allumage» de l'étoile va produire deux effets. Premièrement, le gaz qui entoure immédiatement l'étoile sera ionisé. Les photons passant «assez librement» à travers cette couche ionisée vont à la rencontre du gaz neutre qu'ils ionisent. Il se crée entre le gaz ionisé et le gaz neutre un front d'ionisation qui va rapidement se propager vers l'extérieur. Deuxièmement, le gaz ionisé, qui a été chauffé, se trouve être à une plus grande pression que le gaz froid. Il aura donc tendance à vouloir se dilater. La vitesse de dilatation étant largement supérieure à la vitesse du son dans le gaz neutre, une onde de choc va se propager dans ce dernier. L'évolution dynamique d'une région H II est donc gouvernée par l'interaction entre le front d'ionisation, le font de choc et les mouvements des deux gaz.

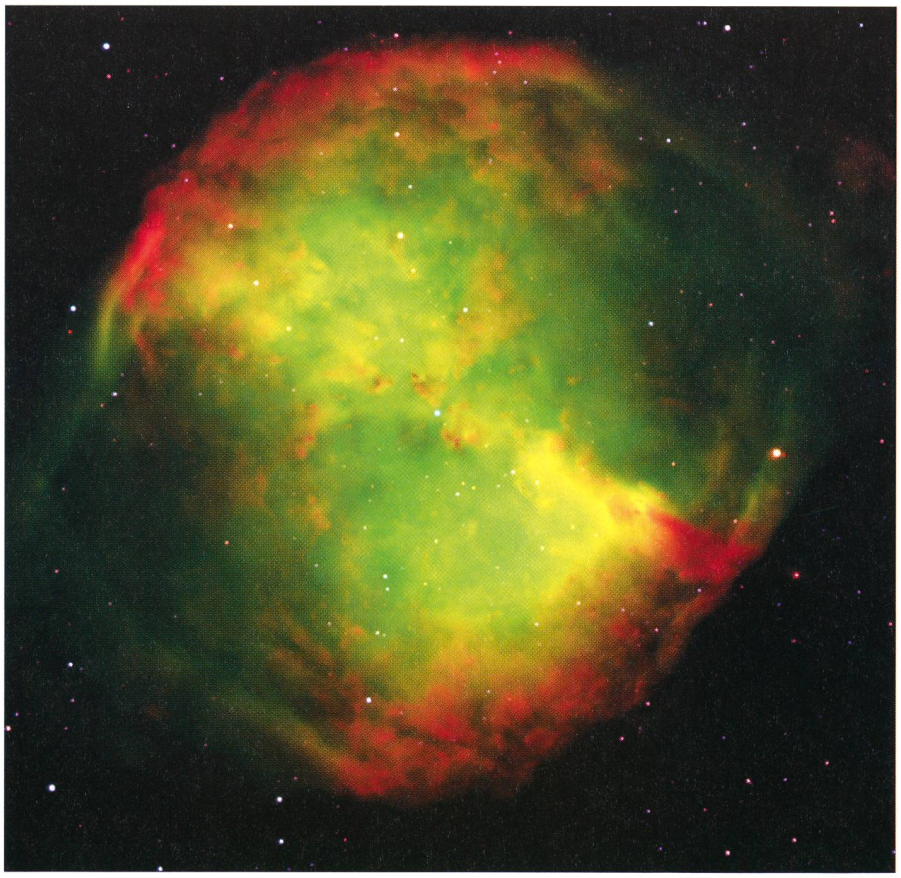


Fig. 13: La nébuleuse planétaire NGC 6853 (M27)(Photo VLT).

Le diagramme de la figure no 5 montre les résultats des calculs théoriques sur un modèle de nébuleuse protostellaire. La luminosité de la protoétoile est fixé a 1.5 10^{39} erg/s, elle n'a pas encore atteint la séquence principale et son type spectral sera à ce moment-là O6. La ligne en pointillé indique le profil de la densité initiale de la nébuleuse qui évolue comme 1/r. La région H II s'étend en gardant une densité constante de 10^{-18} g/cm^3. IF indique le front d'ionisation précédé d'une onde de choc. Malgré une extension très limitée elle contient trois fois plus de masse que toute la région HII.

On a établi une classification des régions H II en correspondance avec leur extension et leur densité électronique. Les régions étendues, que l'on peut étudier dans le visible sont les régions HII «classiques» du début de l'investigations de ce type d'objets. La radioastronomie a permis de découvrir les régions compactes, vers la fin des années 80 et au début des années 90, on a découvert les régions ultra-compactes et dernièrement les régions hyper-compactes. On pense actuellement que ces différentes types de régions ne sont en fait que les stades évolutifs d'une région HII due à son expansion. Les régions hyper-compactes étant le premier stade d'observation possible d'une nébuleuse HII. Ces dernières prennent souvent une forme dite «cométaire» (voir figure 11)

Dans les galaxies externes on observe aussi des régions «géantes» qui sont en fait une agglomération de régions plus petites occupant une large partie du nuage primitif (Nébuleuse de la Tarentule).

FABION BARBLAN
Route de l'Etraz 6a, CH-1239 Collex/GE

Bibliographies

[1] L. SPITZER, *Diffuse Matter in Space*, Interscience Publishers, 1968
[2] D. E. OSTERBROCK, *Astrophysics of Gaseous Nebulae*, W. H. Freemann and Company, 1974
[3] T. L. WILSON, D. DOWNES ED. *H II Regions and Related Topics*, Lecture Notes in Physics No 42, Springer-Verlag 1975
[4] J. E. DYSON and D. A. WILLIAMS, *The Physics of the Interstellar Medium*, Institute of Physics Publishing 1980 2nd edition.
[5] W. B. BURTON, B. G. ELMEGREEN, R. GENZEL, *The Galactic Interstellar Medium*, Saas Fee Advanced Course 21, Springer-Verlag 1991
[6] G. WYNN-WILLIAMS, *The Fullness of Space*, Cambridge University Press,1992
[7] J. M. VAN DER HULST Ed., *The Interstellar Medium ' Galaxies*, Kluwer Academic Publishers, 1997
[8] N. L. MARTIN-HERNÁNDEZ, *The Galactic Metallicity Gradient*, Infrared and Radio Studies of HII Region.