



COUCHES EXTÉRIEURES ET STRUCTURE INTERNE DES ÉTOILES ⁽¹⁾

par P. LEDOUX

(*Institut d'astrophysique de Liège*)

Comme dans une étoile la masse des couches externes représente seulement une toute petite fraction de la masse totale, on pensait, en général, que son influence était négligeable et que les conditions physiques existant à la surface d'une étoile n'avaient pas beaucoup de répercussion sur ce qui se passe à l'intérieur et qu'il suffisait, pour étudier ce qui se passe dans une étoile, de supposer que la température de surface était égale à zéro. Dans une certaine mesure, c'est Milne qui, le premier, a mis en doute cette hypothèse et, bien que ses critiques aient été exagérées, quelques-unes des recherches qu'il a entreprises ont conduit à des résultats qui ont été d'une grande importance par la suite.

C'est en 1930 que Unsöld a obtenu un résultat très important lorsqu'il a montré que l'ionisation de l'hydrogène crée dans les couches situées sous la photosphère du Soleil des courants de convection et que ces courants étaient en relation avec l'activité de la surface.

(1) Résumé d'une des conférences solennelles prononcées à Prague pendant l'Union Astronomique internationale, le 2 août 1967 (*Nuncio Sidereo VI*, du 26 août).

COUCHES EXTÉRIEURES ET STRUCTURE INTERNE DES ÉTOILES

Des travaux plus récents, en particulier ceux de Bierman, ont prouvé que cette zone convective s'étend beaucoup plus profondément qu'il n'avait été envisagé au début et pouvait, en fait, affecter sérieusement la structure interne du Soleil ou de toute autre étoile dont la température effective est inférieure à 10 000 degrés.

En réalité, il a été admis plus tard, grâce aux travaux d'Osterbrock, que, dans les étoiles dont la masse est inférieure à celle du Soleil cette zone convective est encore plus profonde.

Nous pensons maintenant que les étoiles dont les masses sont inférieures à 0,27 fois la masse du Soleil sont entièrement convectives, ce qui implique aussi que ces étoiles sont probablement instables aux vibrations. On peut dès lors penser que toutes les étoiles de la séquence principale depuis le spectre F, et même certaines étoiles de type A, doivent avoir une activité de surface semblable à celle que présente le Soleil.

Cependant, c'est dans la théorie de l'évolution des étoiles et dans l'interprétation de l'existence des géantes rouges dans les amas que l'importance des conditions régnant à la surface et la structure de la zone d'ionisation de l'hydrogène a eu sa confirmation la plus spectaculaire. La structure des géantes est restée mystérieuse pendant un certain temps après l'identification des réactions principales par Bethe et von Weizsacker, en 1939, qui avait permis d'expliquer, au moins en première approximation, les étoiles de la série principale. Un très important pas en avant a été franchi par Schwarzschild et Sandage quand ils montrèrent que, lorsque le noyau d'hélium formé par le résidu de la combustion d'hydrogène a atteint 10 % de la masse, l'évolution de l'étoile comprend, d'une part, la contraction du noyau et, d'autre part, l'expansion de l'enveloppe. Dans ce cas, le point représentatif dans le diagramme d'Hertzsprung-Russell se déplace vers la droite, vers la région des géantes rouges.

Cependant, cette théorie ne permettait pas de se déplacer le long de la branche des géantes. Mais, en introduisant dans les calculs des conditions aux limites plus réalistes, avec une température de surface finie et en tenant compte de l'effet de la zone convective de l'hydrogène, Hoyle et Schwarzschild ont montré, pour la première fois, que le point représentatif sur ce diagramme se déplaçait le long de la branche des géantes.

En discutant ce problème, Hayashi comprit qu'une conséquence importante de cette structure, dotée d'une enveloppe convective et d'un noyau radiatif, était qu'aucun modèle d'étoile ne pouvait se trouver dans le diagramme d'Hertzsprung-Russell à droite d'une ligne verticale correspondant à une température effective de l'ordre de 3 000° Kelvin.

Toute étoile qui serait momentanément dans cette région se déplacerait très rapidement vers cette ligne critique et évoluerait plus tard le long de cette ligne en conservant ce caractère convectif jusqu'à ce qu'elle atteigne le voisinage de la séquence principale lorsque les réactions nucléaires commencent à se former. En particulier, cela impliquait une profonde révision de nos idées sur la contraction gravitationnelle initiale des étoiles et a eu beaucoup de conséquences sur l'interprétation des jeunes amas et de la pro-

portion de métaux légers, comme le lithium et le béryllium, qui subsistent lorsque les étoiles atteignent la séquence principale.

Le travail d'Hayashi a aussi pour conséquence que l'on ne devrait trouver aucune étoile réelle à droite de cette ligne critique et ceci nous fournit un test crucial à la théorie. Bien que l'accord de cette théorie avec les observations des étoiles des amas soit généralement très bon, nous connaissons déjà des étoiles qui semblent avoir des températures de surface plus basses que la limite inférieure extrême de $2\,500^{\circ}$ permise par cette théorie. Si l'on tient compte de l'opacité moléculaire, en particulier si les étoiles infrarouges récemment découvertes ont effectivement des températures de surface aussi basses que celles qui ont été suggérées, cela peut nous conduire à une importante amélioration de la théorie. L'existence d'une zone d'ionisation externe a aussi des conséquences importantes en ce qui concerne l'interprétation d'un grand nombre d'étoiles variables intrinsèques : Céphéides, R.R. Lyræ etc.

Eddington a été le premier à attirer l'attention sur l'importance possible de la zone d'ionisation de l'hydrogène.

A ce sujet, il est apparu plus tard que le mécanisme proposé par Eddington était insuffisant pour expliquer l'excitation des pulsations ; mais, entre temps, Zhevakin, avait remarqué l'importance à cet égard de la deuxième zone d'ionisation de l'hélium et des effets d'opacité. Ceci a été confirmé par les travaux détaillés de Baker, Kippenhahn, tandis qu'une étude directe des problèmes linéaires par Cristy, A.-N. Cox et J.-P. Cox et Alyashin a montré que les effets de la couche externe peuvent bien, en effet, conduire à l'existence de pulsations finies avec des amplitudes et des périodes qui sont en accord raisonnable avec les observations.

Tous ces travaux présentent encore des difficultés, en particulier, en raison de l'absence d'une théorie tout à fait satisfaisante de la convection surtout dans les conditions non stationnaires qui existent, par exemple, pendant la pulsation. Cependant, il est peu probable qu'un meilleur traitement de la convection remette en question les résultats qualitatifs généraux que nous avons rappelés, bien qu'il puisse y avoir quelques différences quantitatives.

Il reste que beaucoup de problèmes sont encore à résoudre, en particulier ceux concernant les effets des zones convectives sur les couches les plus externes de l'atmosphère, et, aussi, les effets plus ou moins directs qui concernent la granulation et l'activité du Soleil. Récemment, on a commencé à discuter les diverses formes possibles d'oscillations de la couche externe qui comprend la région super-adiabatique au sommet de la zone convective. Aussi, des problèmes comme celui du vent solaire ou des vents stellaires trouveront probablement leur solution dans les études de ces couches externes.

Nous pouvons conclure que de nombreux résultats importants sur des problèmes fondamentaux concernant l'évolution et la structure des étoiles ont été atteints grâce à un traitement correct des couches externes. Espérons que la poursuite de ces travaux nous conduira à la fin à une connaissance globale de l'étoile, y compris son interaction avec le milieu inter-stellaire dans lequel elle est située.