

# E existe-il des étoiles supermassives ?

Tout récemment, une étoile du nom guère poétique de Sk-66°41 a fait beaucoup parler d'elle à travers le monde, non seulement dans les revues spécialisées mais également dans les journaux grand public: Sk-66°41 était considérée comme l'une des étoiles les plus lumineuses, avec une masse qui aurait dépassée cent vingt fois celle du Soleil ( $M_{\odot}$  par la suite)! Or, à la suite d'observations à l'Observatoire européen austral (ESO), nous avons montré qu'en réalité Sk-66°41 est un système multiple<sup>(1)</sup>, ce qui porte un coup sérieux à l'idée d'étoile supermassive. Ces travaux ont été menés par les astronomes belges P. Magain et M. Remy, et par moi-même, détaché de l'Observatoire de Paris. Comme nous le verrons plus loin, ce résultat a plusieurs conséquences astrophysiques importantes, notamment en ce qui concerne les théories de la formation des étoiles et la mesure des distances dans l'Univers. En particulier, la question de la masse maximale que peut posséder une étoile est l'une des plus fondamentales de l'astrophysique. S'il n'existe pas d'étoile supermassive, c'est un changement total de conception qui en résulte!

## Des étoiles cent fois plus massives que le Soleil ?

Vers les années 1960, on pensait que la limite supérieure de la masse des étoiles était de l'ordre d'environ  $60 M_{\odot}$ . Au-dessus de cette masse critique, appelée limite Ledoux-Schwarzschild-Härm, les étoiles devenaient instables du fait de l'apparition de vibrations qui entraînaient leur destruction. (Ces instabilités surviennent quand les processus de formation d'énergie dans le centre de l'étoile l'emportent sur l'amortissement par l'enveloppe stellaire.) Plus tard, on s'est rendu compte que les vibrations elles-mêmes engendrent des ondes de choc qui, en retour, amortissent l'instabilité vibrationnelle. L'étude de ces effets non linéaires conduisit à repousser la limite supérieure de la masse au-delà de  $200 M_{\odot}$  environ.

Ces résultats ont en quelque sorte amené l'idée des étoiles supermassives ( $> 500 M_{\odot}$ ). Il y a quelques années, R136a, l'objet central de la nébuleuse de la Tarantule a passionné beaucoup d'astronomes. La nébuleuse en question est une région HII, c'est-à-dire un nuage de gaz ionisé par des étoiles. Elle se situe dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie très proche de la nôtre. Selon plusieurs indices, R136a aurait été une étoile de  $1\ 000$  à  $3\ 500 M_{\odot}$ ! Cet objet apparaissait donc extraordinaire et il devint la cible de nombreux programmes de recherche utilisant une vaste gamme de longueurs d'ondes depuis l'ultraviolet jusqu'à la radio. Aujourd'hui, nous savons que R136a est un objet multiple: sa composante

principale est un amas très serré d'au moins huit étoiles réunies dans un diamètre apparent d'une seconde d'arc<sup>(2)</sup>!

Mais le problème n'est pas pour autant résolu: l'analyse de la luminosité et des caractéristiques spectrales semble encore indiquer une masse voisine de  $250 M_{\odot}$  pour l'étoile la plus importante de cet amas! Une étoile d'une telle masse peut-elle ou non exister? Certains astrophysiciens sont totalement opposés à cette idée. Ils considèrent le problème non pas au niveau de l'instabilité vibrationnelle, un phénomène qui se produit lorsque l'étoile est formée, mais lors de la formation, pendant l'effondrement pré-stellaire du nuage initial. La pression du rayonnement électromagnétique peut à ce moment freiner, et même empêcher, l'effondrement du gaz qui va former l'étoile. Les calculs suggèrent une masse maximale possible, de l'ordre d'une soixantaine de masses solaires: ils ramènent aux prévisions classiques. Qui a raison et jusqu'où la limite supérieure de la masse

peut-elle aller? Seules les observations peuvent trancher la question.

L'étoile Sk-66°41 se trouve elle aussi dans le Grand Nuage de Magellan. Elle apparaît sous le numéro 41 dans le catalogue de Sanduleak<sup>(3)</sup>, à une déclinaison de  $66^{\circ}$  dans le ciel austral. Très lumineuse, elle a été cataloguée comme l'une des étoiles servant à déterminer les distances intergalactiques<sup>(4)</sup>. Nous nous sommes intéressés à Sk-66°41 à l'occasion de l'étude de la zone qui l'entoure où se forment actuellement d'autres étoiles. Sk-66°41 se trouve à peu près au centre de cette région, baptisée N11C. Par ailleurs, la plupart des autres étoiles associées à cette région semblent jeunes et massives, et sont classées dans le type O<sup>(5)</sup>. En mesurant les flux lumineux émis par cette région, aux longueurs d'onde correspondant aux différentes raies d'émission de l'hydrogène, on peut faire le bilan d'énergie de la région HII. Connaissant l'énergie totale émise par cette zone, et sachant qu'elle provient des

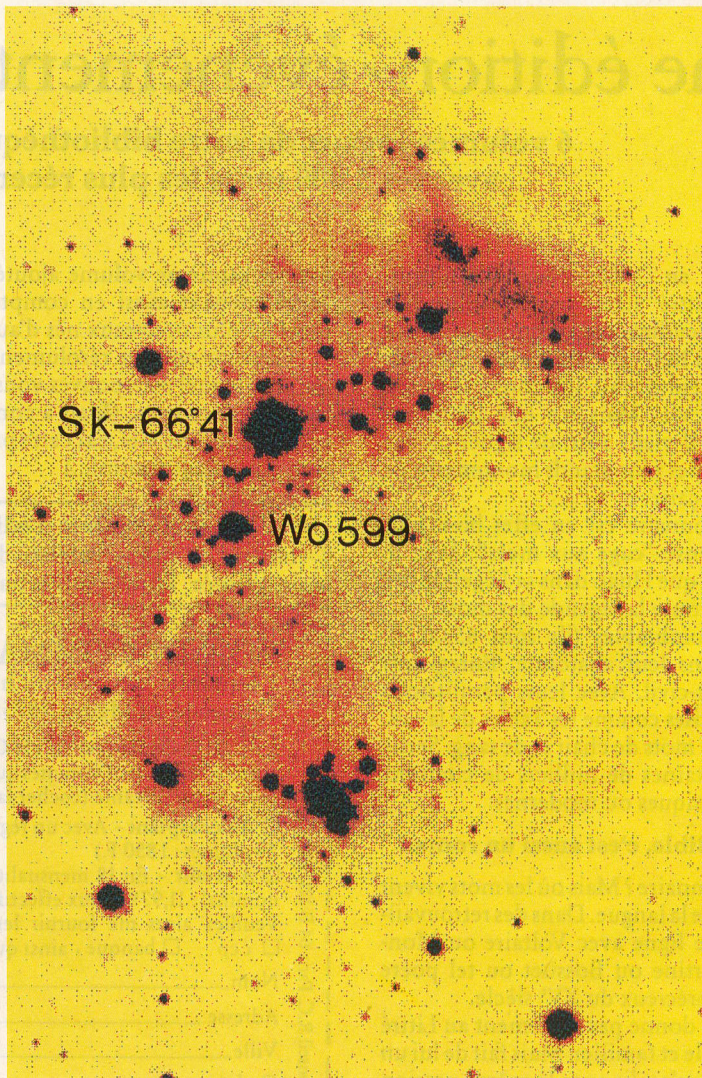


Figure 1. Dans la galaxie la plus proche de la nôtre, le Grand Nuage de Magellan, les astronomes ont détecté une étoile apparemment très brillante, cataloguée sous le nom de Sk-66°41. Elle est si lumineuse qu'il semblait naturel de lui attribuer une masse énorme, plus de cent fois celle du Soleil! Pourtant les modèles de formation ou d'évolution des étoiles ne s'accordaient guère avec l'existence de tels objets supermassifs. Comment résoudre ce problème. Le cliché montre la région du ciel autour de cette étoile. On distingue, dans ce champ de  $172 \times 102$  secondes d'arc, l'étoile Sk-66°41, apparemment supermassive. (Cliché ESO)

étoiles présentes, qui excitent et chauffent le gaz, on peut calculer le nombre de ces étoiles. Parmi plusieurs solutions possibles, nous favorisons celle selon laquelle N11C serait excitée par une étoile de  $80 M_{\odot}$  (qui doit être de type O4 V), accompagnée de six étoiles de  $60 M_{\odot}$  (type O5 V), et deux étoiles de  $40 M_{\odot}$  (type O6 V).

Nous avons alors, pour vérifier nos hypothèses, effectué des observations spectroscopiques d'étoiles dans N11C. L'étoile Wo 599 (fig. 1), située à 15 secondes d'arc au sud-est de Sk-66°41, s'est avérée très intéressante, car c'est justement une étoile chaude du type O4 V, telle que nous l'attendions. Par ailleurs, plusieurs spectres de Sk-66°41 nous ont permis de la classer du type O5 V, donc moins chaude et moins massive que Wo 599<sup>(5)</sup>. Ce résultat est assez surprenant: contrairement à ce qu'on pensait, l'étoile excitatrice principale de N11C n'est pas l'étoile très massive Sk-66°41, mais l'étoile insoupçonnée Wo 599! Quelle honte pour une étoile réputée comme l'une des plus massives qui soit! Quant à Sk-66°41, nous avons également mesuré avec précision ses caractéristiques: sa luminosité totale atteint  $2,63 \times 10^6$  celle du Soleil. Il en résulte une température effective de 56 000 K et une masse supérieure à  $120 M_{\odot}$ .

Il y a apparemment un problème: tous les astronomes sont d'accord pour penser qu'une étoile de la séquence principale, du type O5, ne peut avoir une masse supérieure à  $120 M_{\odot}$ . D'autant plus que l'on rencontre, à côté, une étoile de type O4 V de masse plus faible, alors que l'on attend des masses élevées pour celles-là. Il se pourrait que les mécanismes de formation d'étoiles, dans une galaxie particulièrement pauvre en métaux comme le Grand Nuage de Magellan, soient capables de produire une étoile particulièrement massive. Mais avant d'explorer une telle hypothèse, nous avons décidé de vérifier si Sk-66°41 ne pouvait pas être une étoile multiple.

#### Grandeur et misère d'une étoile supermassive.

Nous avons obtenu, en mars 1988, les images directes de Sk-66°41 en utilisant les télescopes 3,60 et 2,20 mètres de l'observatoire de l'ESO à La Silla au Chili. Les détecteurs employés étaient des CCD de haute résolution ayant 1 024 x 640 éléments d'image, ou pixels, de 15 microns chacun. Pour le télescope 2,20 mètres, la taille de chaque pixel correspond à 0,176 seconde d'arc sur le ciel. Par ailleurs, ayant bénéficié de conditions météorologiques relativement exceptionnelles (faible turbulence atmosphérique) nous avons obtenu des images d'une grande finesse, ce que, dans le jargon des astronomes, on appelle un bon « seeing ». La résolution spatiale des images a de plus été améliorée par deux techniques de traitement d'images. La première a été mise

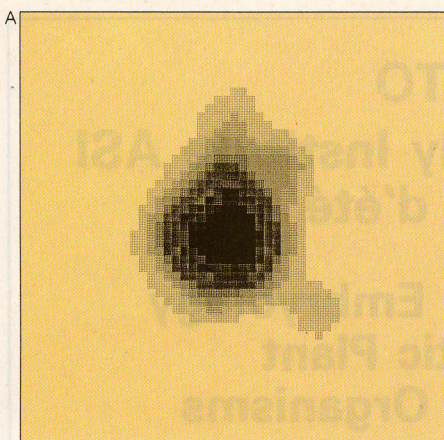
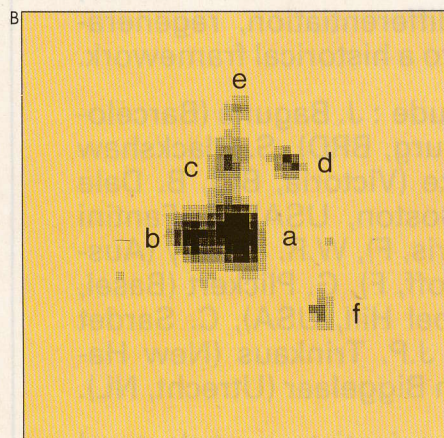


Figure 2. La masse de l'étoile Sk-66°41 pourrait dépasser cent fois celle du Soleil. Cette possibilité est si surprenante que les astronomes ont observé cet objet avec une grande attention. Déjà, une image « ordinaire » prise avec une bonne résolution (A), montre que cette étoile n'apparaît pas circulaire, ce qui laisse supposer qu'elle est faite de plusieurs composantes. Pour s'en persuader, il est nécessaire de réduire les effets de la turbulence atmosphérique qui dégradent la qualité des images. Il existe des programmes de traitement d'images — de déconvolution — qui effectuent cette tâche (B). L'objet apparaît alors nettement fait de plusieurs étoiles distinctes. Les deux composantes principales, a et b, sont séparées de 0,8 seconde d'arc seulement. Ces résultats mettent en doute l'existence des étoiles supermassives.



au point par P. Magain, actuellement à l'observatoire de Liège, la seconde, implantée par M. Remy, utilise une méthode dite de maximisation d'entropie<sup>(6)</sup>.

Ainsi par exemple, l'image obtenue avec un filtre R (dans le rouge, autour de 650 nm) montre déjà Sk-66°41 comme une tache lumineuse non circulaire (fig. 2A), où l'on semble déjà distinguer plusieurs composantes. La même image, restaurée à l'aide des programmes de déconvolution (fig. 2B), montre clairement que Sk-66°41 est résolue en au moins six composantes, notées de a à f! Les deux composantes principales sont séparées par 0,8 seconde d'arc. D'ailleurs, grâce au bon « seeing », la composante (f) située à 2,4 secondes d'arc sud-ouest de l'étoile principale se distingue déjà sur l'image originale.

La composante principale (a) semble

correspondre à une étoile de  $90 M_{\odot}$  environ. La seconde (b) doit avoir une masse de  $60 M_{\odot}$  (correspondant à une étoile O5 V). Pourtant, globalement, le type spectral de Sk-66°41 est lui aussi O5 V. Se pourrait-il que ce soit la composante la moins lumineuse (b) qui impose la forme de son spectre à l'ensemble du système? Cela semble difficilement admissible; il est donc probable que la composante la plus brillante (a) est elle-même multiple, formée d'étoiles de type O5 V. D'ailleurs, sur l'image déconvoluée, cette composante n'apparaît pas tout à fait sphérique mais allongée dans une direction nord-sud. Si les observations futures confirment la multiplicité de cette composante principale, l'évaluation de sa masse baissera encore significativement.

Les composantes de l'amas Sk-66°41 se sont probablement formées en même temps à partir de l'effondrement d'un nuage de gaz interstellaire. Les composantes les moins lumineuses devraient alors aussi être du type O, car la formation d'étoiles de faible masse prend beaucoup plus de temps. Il semble d'ailleurs que les étoiles O, en général, se forment en groupe. Cette impression est confirmée par les résultats récents obtenus sur deux objets supermassifs: l'objet central de la nébuleuse de la Tarentule d'une part, dont nous avons déjà parlé, et l'une des étoiles les plus brillantes de notre Galaxie d'autre part, nommée  $\tau_1$  de la Carène<sup>(7)</sup>.

L'évolution de chacune des étoiles de l'amas dépend de sa masse; les plus massives (les plus lumineuses) évoluent plus rapidement. La supernova qui a explosé le 23 février 1987 dans le Grand Nuage de Magellan était probablement le membre le plus massif d'un amas d'étoiles comparables à Sk-66°41. Mais l'étoile qui a explosé se trouvait à un stade très avancé de son évolution, ce qui n'est apparemment pas le cas des membres de Sk-66°41.

#### La fin des étoiles supermassives?

La multiplicité de Sk-66°41 porte un coup sévère à l'idée de l'existence des étoiles très massives. Certains de nos résultats plus récents sur d'autres candidats resserrent encore davantage l'étau autour d'elles. A titre d'exemple, nous venons de résoudre une autre étoile très massive du Grand Nuage de Magellan, Sk-69°253. Cette étoile, dont la masse était estimée, elle aussi, à plus de  $120 M_{\odot}$ , se disperse en une quinzaine de composantes! La discussion détaillée paraîtra bientôt dans le journal européen *Astronomy & Astrophysics*<sup>(8)</sup>.

Ces résultats mettent profondément en doute l'existence des étoiles très massives. Il n'est pas exclu que le concept d'étoile très massive provienne essentiellement de résultats observationnels biaisés, dus à un manque de résolution spatiale des instruments. Si cette résolution spatiale est déjà cruciale pour observer des étoiles proches, elle l'est encore da-

- (1) M. Heydari-Malayeri et al., *Astron. Astrophys.*, 201, L41, 1988.
- (2) G. Weigelt, G. Baier, *Astron. Astrophys.*, 150, L18, 1985.
- (3) N. Sanduleak, *Cerro-Tololo-Inter-American Obs. Contr.*, 89, 1969.
- (4) R. Hymphreys, *Astron. J.*, 269, 335, 1983.
- (5) M. Heydari-Malayeri et al., *Astron. Astrophys.*, 184, 300, 1987.
- (6) J. Skilling, R.K. Bryan, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, 211, 111, 1984.
- (7) G. Weigelt, J. Ebersberger, *Astron. Astrophys.*, 163, L5, 1986.
- (8) M. Heydari-Malayeri et al., *Astron. Astrophys.*, sous presse.

## **NATO Advanced Study Institute ASI Cours d'été**

### **Experimental Embryology in Aquatic Plant and Animal Organisms**

(molecular, cellular, genetic, organismic,  
historical and technical aspects).

Banyuls-sur-Mer, France : September 11-23, 1989

By a series of review and special lectures, practical instructions and group discussions, the ASI will be a comprehensive course on selected model systems which are successfully used for studying essential phases and basic mechanisms of embryonic development. The presentations will focus on topics such as fertilisation events, control of mitotic activity, cell migration and communication, morphogens, neuronal differentiation, regeneration, etc. and be placed into a historical framework.

The lecturer team will include : J. Bagunà (Barcelona, E), S. Berger (Ladenburg, BRD), S. Blackshaw (Glasgow, UK), R.D. Burke (Victoria, BC), B. Dale (Napoli, I), G. Eichele (Boston, USA), B. Fantini (Roma, I), J.L. Fischer (Paris, F), W.R. Jeffery (Austin, USA), L. Meijer (Roscoff, F), G. Plickert (Basel, CH), R.S. Quatrano (Chapel Hill, USA), C. Sardet (Villefranche-sur-Mer, F), J.P. Trinkaus (New Haven, USA), J.A.M. Van den Biggelaar (Utrecht, NL).

The course will be open to scientists, post-doctoral workers and advanced students in embryology, classical and molecular biology, genetics, medicine, history of sciences, physiology, biochemistry and related fields. A limited amount of financial assistance in the form of grants will be available. Deadline for application is May 1, 1989.

**For information contact : Dr. H.-J. Marthy**  
**Laboratoire Arago/CNRS UA 117**  
**Université Pierre et Marie Curie**  
**(Paris VI)**  
**66650 Banyuls-sur-Mer (France)**

**Tél. : 68 88 00 40**  
**Télex : Aragoba 505020 F**  
**Téléfax : 68 88 16 99**

(9) E. Vangioni-Flam *et al.*, *Astron. Astrophys.*, 90, 73, 1980.  
(10) Pour en savoir plus voir page 571.

vantage en ce qui concerne des étoiles situées dans d'autres galaxies. Il semble très difficile de croire aux découvertes d'étoiles très massives dans ces autres galaxies.

#### **Formation des étoiles.**

Si les étoiles très massives n'existent pas, cela implique de réviser nos idées sur la formation des étoiles: les processus de formation d'étoiles créent beaucoup moins d'objets massifs (et donc plus d'objets peu massifs), que ce qu'une analyse naïve, à partir d'observations à faible résolution spatiale, laissait entrevoir. Or il est capital, pour comprendre l'évolution des galaxies, de connaître les proportions relatives d'étoiles de différentes masses qui s'y trouvent.

Par exemple, la présence soupçonnée d'étoiles supermassives avait amené certains à conclure que la répartition du nombre d'étoiles en fonction de leur masse (ou, ce qui revient à peu près au même, en fonction de leur luminosité), varie d'une galaxie à l'autre, en fonction des abondances des éléments chimiques. Ainsi, le nombre d'étoiles lumineuses augmenterait depuis la Voie lactée jusqu'aux Grand et Petit Nuages de Magellan, et à IZw 18, la galaxie connue la plus pauvre en métaux<sup>(9)</sup>. Mais ces résultats sont difficiles à soutenir. Il est à peu près certain que la multiplicité des étoiles crée des confusions: avant de comparer les abondances relatives des étoiles brillantes dans différents types de galaxies, il faudrait s'assurer que l'échantillon ne souffre pas de confusion.

#### **Comment agrandir l'Univers ?**

La multiplicité des étoiles massives affecte également l'échelle des distances cosmiques. En effet, comme ces étoiles sont les plus lumineuses, on peut les observer dans des galaxies très lointaines. Il est naturel de supposer que ces étoiles sont comparables aux étoiles massives de notre Galaxie et ses compagnons (le Grand et le Petit Nuages de Magellan) et émettent donc la même quantité connue d'énergie. Mesurer une luminosité apparente, en supposant la luminosité absolue connue, permet d'estimer l'éloignement de la galaxie qui abrite l'étoile.

Ces étoiles très lumineuses, appelées « chandelles » standard, sont souvent utilisées pour la détermination des distances jusqu'à 30 millions d'années-lumière. Si ces chandelles ne sont pas des étoiles individuelles mais des groupes compacts d'étoiles, on ne peut les utiliser pour la mesure des distances: un amas émet plus de lumière qu'une étoile seule. Pour la même luminosité apparente, l'amas est donc plus éloigné que l'étoile seule: les galaxies, dont les distances étaient mesurées uniquement ainsi, sont plus éloignées qu'on ne le pensait et l'Univers serait plus « grand » que ce que l'on estime!<sup>(10)</sup>

*Mohammad Heydari-Malayeri*