

9. L'EVOLUTION DES ETOILES ET LES NAINES BLANCHES

Par EVRY SCHATZMAN

L'abondance des naines blanches dans notre voisinage est très considérable. C'est ainsi que Parenago⁽¹⁾, procédant en 1946 à une révision des analyses antérieures du nombre de naines blanches par parsec cube en a trouvé 0.15, c'est-à-dire un nombre du même ordre de grandeur que le nombre communément admis d'étoiles par parsec cube dans notre voisinage. Le nombre obtenu par Parenago est en bon accord avec les dénombrements d'étoiles de Krieger dans le nuage de Scutum. Ce nombre est beaucoup plus élevé que les nombres antérieurement admis, compris entre 1 et 10 centièmes du nombre total d'étoiles par parsec cube dans notre voisinage.*

Une proportion aussi élevée de naines blanches a certainement une importante signification, aussi bien, en ce qui concerne la cosmogonie que l'évolution des étoiles.

Rappelons les caractéristiques essentielles des naines blanches. Pour cela, nous prendrons l'exemple de α_2 Eridani B, dont le rayon a été redéterminé récemment d'une façon originale par Chalonge et ses élèves⁽²⁾. Si l'on joint à cette détermination celle de la température superficielle que Chalonge et ses élèves donnent en même temps, on peut, après évaluation de la température effective obtenir la luminosité sans passer par la correction bolométrique. La masse étant connue par ailleurs, on peut résumer notre connaissance de α_2 Eridani B par les nombres contenus dans le tableau I.

TABLEAU I
 α_2 Eridani B

M^*	0.45†	...
R^*	0.014‡	0.016§
T_0	10750	...
T_{eff}	13260	...
L^*	0.054	0.080§

† Masse donnée par Kuiper: *Ap. J.* **88**, 472, 1938.

‡ Nombre donné par Berger, Chalonge, Divan, Fringant.

§ Donné par Kuiper⁽³⁾ dans *Novae and White Dwarfs*. Paris: Hermann, 1941.

|| Nombre calculé.

Ces valeurs correspondent à une densité moyenne $\bar{\rho} = 5.1 \cdot 10^8$ g.cm.⁻³.

On sait que pour l'essentiel, l'explication de la structure des naines blanches a été donné par Fowler en 1926⁽⁴⁾ et que Chandrasekhar a tenu compte des dégénérescences relativistes⁽⁵⁾. Plus récemment, Rudkjøbing⁽⁶⁾, par un calcul quantique plus complet a obtenu une relation différent légèrement de celle de Chandrasekhar entre la masse et le rayon des configurations entièrement dégénérées. Du point de vue de l'évolution des étoiles, il nous suffira de connaître l'existence de ces travaux, les difficultés essentielles, en raison même de ces travaux, se trouvant reportées plus loin.

L'origine des naines blanches semblait tout naturellement être due à la contraction des étoiles. Cette théorie découlait directement de la vieille théorie de Lord Kelvin de l'origine du débit d'énergie des étoiles par transformation de l'énergie potentielle en énergie d'agitation thermique avec libération d'énergie gravitationnelle. Ce chemin évolutif paraissait si naturel qu'en 1939 encore, Gamow⁽⁷⁾ et Eddington⁽⁸⁾ étudiaient en détail de quelle façon cette transformation des étoiles en naines blanches pouvait s'effectuer.

Pour Gamow, les naines blanches apparaîtraient au terme de l'évolution à masse constante d'étoiles de composition chimique uniforme. Au cours de l'évolution, l'hydrogène se transforme en helium. Lorsque l'abondance en hydrogène serait assez faible, l'étoile commencerait à se contracter. Le raisonnement d'Eddington relativement à la période de contraction, mérite d'être rappelé. Eddington, supposant l'étoile homogène,

* D'après Parenago (*Contr. Inst. Sternberg*, No. 30, 1949) ce nombre serait celui des sous-naines, le nombre de naines blanches étant plus petit. Cela ne change pas les présentes conclusions.

montre qu'au cours de la contraction, avant qu'apparaisse la dégénérescence du gaz d'électrons, la température centrale de l'étoile s'élèverait tant que même des quantités infinitésimales d'hydrogène suffiraient à produire plus d'énergie que l'étoile ne pourrait en rayonner. Eddington concluait alors à l'élimination du carbone et de l'azote de l'intérieur de l'étoile. Nous examinerons tout à l'heure, à la lumière des calculs de Salpeter⁽¹⁰⁾, la validité des calculs d'Eddington.

La durée d'évolution des étoiles est d'autant plus longue que leur masse est plus faible. Que leur évolution ait lieu avec ou sans perte de matière, il faut à une étoile de la masse du Soleil plusieurs dizaines de milliards d'années pour épuiser leur hydrogène. On peut calculer l'ordre de grandeur du nombre d'étoiles qui épuisent leur hydrogène par unité de temps de la façon suivante: admettons que toutes les étoiles de masse comprise entre $1/20$ de \odot et $100 \odot$ se transforment en naines blanches, une fois épuisé tout leur hydrogène. Admettons également que le nombre d'étoiles de magnitude absolue comprise entre M et $M + dM$ peut être représenté par une exponentielle

$$dN = A \exp kM dM$$

dans laquelle $k \cong 1/2$. Cette exponentielle peut être employée car elle représente de façon satisfaisante la courbe de luminosité donnée par A. Danjon et P. Couderc⁽¹¹⁾ et son extrapolation. Si l'on admet également une relation masse luminosité unique, $L \sim M^\alpha$, ce qui est inexact, comme on sait depuis le travail de A. G. Masevich et P. P. Parenago⁽¹²⁾, mais est suffisant pour le but que nous nous proposons ici, on peut évaluer le nombre d'étoiles dN/dt qui, par unité de temps et par unité de volume, épuisent leur hydrogène.

On a pour le nombre d'étoiles par unité de masse

$$\frac{dN}{dM} = B M^{-2.5k\alpha\mu-1},$$

où $\mu = 0.43429 = \log_{10} e$; la durée de vie étant

$$T = K M^{1-\alpha},$$

on trouve alors

$$\frac{dN}{dt} = \frac{B}{K} \frac{\left[M^{-2.5k\alpha\mu-1+\alpha} \right]_{\odot/20}^{100 \odot}}{2.5k\alpha\mu+2-\alpha} \approx \frac{B}{K} \frac{[100]^{0.47}}{0.63}.$$

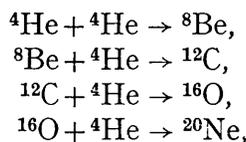
Numériquement, avec $N = 0.1 * pc^{-3}$ et avec l'année pour unité de temps, et en supposant $T(\odot) = 5 \cdot 10^{10}$ ans,

$$\frac{dN}{dt} = 10^{-12.5} * pc^{-3} a^{-1}.$$

On voit que si l'on continue à admettre une échelle de temps galactique de l'ordre de 10^{10} ans qu'un nombre de naines blanches aussi considérable que celui obtenu par Parenago ne saurait être le produit final de l'évolution des étoiles ordinaires, même en admettant que toutes les naines blanches produites dans le passé sont encore visibles à nos yeux sous l'aspect de naines blanches.

De même, dans le cas envisagé par Hoyle⁽⁹⁾ où les naines blanches seraient un résidu laissé par les explosions des supernovae et des novae, le nombre d'étoiles ainsi produites serait inférieur au nombre observé au moins par un facteur 100.

Ajoutons qu'au cours de la contraction, l'élévation de la température est telle que les réactions



signalées par E. E. Salpeter⁽¹⁰⁾ peuvent fournir assez d'énergie pour retarder la contraction et prolonger de plusieurs centaines de millions d'années la durée de vie de l'étoile.

D'après Eddington, une température de deux cent millions de degrés régnerait au centre d'une étoile de la masse du Soleil, au cours de sa contraction. A cette température, la réaction



peut procéder à une vitesse notable. La durée de vie de ^{12}C , pour une température de 200 millions de degrés et une densité de 1000, est de l'ordre de quelques millions d'années. Un état stationnaire peut être rapidement atteint pour l'abondance du carbone ^{12}C . Notons que cette abondance est d'autant plus grande que la température est plus élevée, car la vitesse de destruction de ^{12}C , croît moins vite avec la température que sa vitesse de formation. Avec le reste d'hydrogène présent, les réactions du cycle du carbone pourraient alors se produire.

Si l'on admet que l'abondance en hélium de l'étoile en contraction est très grande, on peut en raison de la haute température, supposer le coefficient d'absorption constant (diffusion des électrons). On a donc :

$$L \sim M^3 = \text{Cte}$$

et compte tenu des processus envisagés par Salpeter on trouve bien comme il a été annoncé tout à l'heure que la durée de vie de l'étoile serait prolongée de plusieurs centaines de millions d'années, retardant d'autant son passage à l'état de naine blanche.

Les autres hypothèses de Hoyle⁽⁹⁾ concernant la contraction des étoiles vers l'état de naine blanche et particulièrement sur le rôle des supernovae ne peuvent être discutées dans le cadre du symposium.

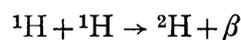
Nous avons raisonné sur l'évolution d'hypothétiques modèles d'étoiles. Mais il faut noter que nous ne possédons pas actuellement de modèle stellaire assez étudié pour pouvoir discuter valablement de l'hypothèse de Vorontsov Velyaminov⁽¹³⁾ suivant laquelle les étoiles Wolf Rayet, les novae, les noyaux des nébuleuses planétaires et les naines blanches forment une séquence unique dont les différents termes procèdent par filiation.

On sait que Beals⁽¹⁴⁾ plaçait le long d'une même séquence les étoiles Wolf Rayet, les étoiles P Cygni, et les supergéantes de classe A. Mais ainsi que le fait remarquer G. A. Gurzadian⁽¹⁵⁾, malgré leur évolution rapide, il est encore difficile de dire en quels objets se transforment les étoiles Wolf Rayet et les étoiles P Cygni.

La présence de naines blanches dans un nombre considérable d'étoiles doubles, dont l'autre composante est une étoile normale, telles que α_2 Eridani B, Procyon B, Sirius B ne saurait s'expliquer dans l'hypothèse de la génération des naines blanches par contraction des étoiles gazeuses après épuisement de leurs réserves d'hydrogène, mais ne soulèverait aucune difficulté dans l'hypothèse de Vorontsov Velyaminov.

L'étude de la structure des naines blanches va nous donner d'autres raisons d'abandonner l'hypothèse que les étoiles gazeuses au terme de leur évolution se transforment en naines blanches et va au contraire nous suggérer que les naines blanches et les étoiles gazeuses ont une origine distincte.

L'absence d'hydrogène à l'intérieur des naines blanches est nécessaire. Ainsi que Marshak⁽¹⁶⁾ l'a montré il y a longtemps déjà et comme il a été retrouvé récemment par les calculs de Lee⁽¹⁷⁾ l'éclat des naines blanches est incompatible avec la présence d'hydrogène en quantité notable à l'intérieur. Par surcroît, l'effet spécial des grandes densités est d'augmenter considérablement la vitesse des réactions thermonucléaires en facilitant la pénétration mutuelle des noyaux atomiques. Ainsi, pour la réaction



on trouve que le nombre de réactions par centimètre cube varie avec la densité et la température comme

$$\rho^2 \tau^2 e^{-\tau + \lambda \tau}$$

avec

$$\tau = \frac{10^{3.529}}{T^{\frac{1}{2}}}$$

$$\lambda \tau = 10^{6.031} \frac{\rho^{\frac{1}{2}}}{T}$$

pour l'hydrogène pur. Avec $T = 10^7$, $\rho = 5.10^7$ (conditions approximative au centre de α_2 Eridani B, pour fixer les idées),

$$\lambda\tau = 39.5$$

et le facteur d'accélération de la réaction est de l'ordre de 10^{17} . On peut de même calculer le facteur d'accélération de la réaction



On trouve $\lambda\tau = 115$ et un facteur d'accélération de l'ordre de 10^{50} . La durée de vie de l'hélium au centre de α_2 Eridani B est alors de l'ordre de 3 secondes. On doit donc conclure également à l'absence de l'hélium dans les régions centrales des naines blanches.

D'autre part, l'intensité du champ de pesanteur de l'ordre de 10^8 c.g.s. favorise la stratification des éléments. L'équilibre statistique ne pourrait régner à travers toute l'étoile qu'au bout de plusieurs milliards d'années, mais quelques millions d'années suffisent pour que tous les éléments autres que l'hydrogène qui pourraient se trouver dans les régions extérieures de l'étoile, tombent à l'intérieur de celle-ci et que subsiste seulement une enveloppe d'hydrogène surnageant à la surface de l'étoile. On sait que pour toutes les naines blanches dont on a obtenu le spectre, sauf deux, les seules raies présentes sont celles de l'hydrogène. Ceci s'explique aisément en admettant que l'hydrogène en quelque sorte flotte à la surface de l'étoile.

On peut chercher si la mince couche d'hydrogène enveloppant l'étoile est suffisante pour produire l'éclat observé. On doit pour cela déterminer en premier lieu la température interne des naines blanches. De nouveaux calculs m'ont conduit à représenter la relation entre la température interne, la masse et la luminosité par la relation :

$$T = 10^{7.567} \left(\frac{L^*}{M^*} \right)^{0.349}$$

conduisant, dans le cas particulier de α_2 Eridani B à la valeur de 8 millions de degrés. On peut alors calculer, en utilisant les formules pour le débit d'énergie, telles qu'elles ont été revues par Salpeter, la proportion d'hydrogène dans l'étoile que représente son enveloppe, et la densité régnant à la base de cette enveloppe d'hydrogène. Pour α_2 Eridani B, on trouve :

$$X = 0.00186,$$

$$\rho_H = 10^{+3.43}.$$

On pourrait également envisager le cas où l'éclat des naines blanches proviendrait de la libération d'un reste d'énergie gravitationnelle. C'est ce qu'avait déjà supposé Marshak (16) et c'est également ce que supposait Kaplan (18), au moins pour les naines blanches les moins brillantes.

Examinons de plus près certaines des conséquences de ces deux hypothèses, spécialement à la lumière des travaux de Sauvenier Goffin (19) et de Ledoux et Sauvenier Goffin (20) sur la stabilité vibrationnelle des naines blanches.

Supposons que par suite d'une perturbation, une naine blanche entreprenne des vibrations radiales. Deux cas sont possibles : ou bien au cours de la pulsation, l'énergie rayonnée est en excès de l'énergie produite, ou bien elle est en défaut. Dans le premier cas la pulsation s'amortit et l'étoile retourne à l'équilibre. Dans le deuxième, la pulsation augmente d'amplitude exponentiellement avec le temps. Dans le premier cas, l'étoile est dite vibrationnellement stable ; dans le deuxième cas l'étoile est dite vibrationnellement instable.

Au cours de la pulsation, température et densité varient. Si les variations de température et de densité entraînent de grandes variations relatives dans la production d'énergie, l'énergie produite au cours de la pulsation excède l'énergie rayonnée et l'étoile est vibrationnellement instable.

Si l'on écrit les variations du débit d'énergie par gramme

$$\frac{\delta \epsilon}{\epsilon} = \mu \frac{\delta \rho}{\rho} + \nu \frac{\delta T}{T}.$$

on définit des exposants effectifs μ et ν de la température et de la densité dans la loi de débit d'énergie. De grandes valeurs de μ et ν entraînent l'instabilité vibrationnelle. Connaissant la structure d'une étoile on peut déterminer par le calcul une combinaison linéaire $a\mu + b\nu$ des exposants μ et ν dont existe une valeur critique c .

Si $a\mu + b\nu > c$

l'étoile est vibrationnellement instable.

Dans le cas des naines blanches, Ledoux et Sauvenier Goffin trouvent pour les modèles dans lesquels l'énergie est produite dans une couche sphérique la condition d'instabilité:

$$9(\Gamma_T - 1) \mu + g(\Gamma_T - 1)^2 \nu > 16.2$$

où Γ_T exprime la relation entre les variations adiabatiques de température et de densité de la matière dégénérée des naines blanches dans la région productrice d'énergie.

Lorsque la densité n'est pas trop élevée dans la région productrice d'énergie, on a approximativement:

$$6\mu + 4\nu > 16.2.$$

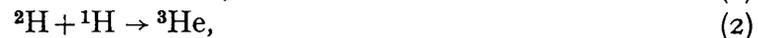
Tant que l'on peut admettre que $\mu \cong 1$ on a la condition d'instabilité vibrationnelle suivante

$$\nu < 2.6$$

qui est le résultat de Ledoux et Sauvenier Goffin.

Examinons les valeurs de μ et ν .

Tant que la densité n'est pas trop élevée, l'énergie est produite par la suite de réactions.



mais dès que la densité s'élève suffisamment, l'énergie des électrons devient suffisante pour que la réaction



devienne plus rapide que la réaction (3). La transformation de l'hydrogène en hélium s'achevant alors suivant la réaction



La vitesse de transformation de l'hélium en tritium ne devient notable que lorsque la densité ρ s'élève au dessus de

$$\rho_c = 10^{4.308}.$$

Pour cette densité, l'énergie maximum des électrons dégénérés est de 18,5 kev, qui est l'énergie nécessaire à la transformation. Pour fixer les idées, à la densité $\rho = 10^{4.308}$ et à la température de 10^7 degrés, la durée de vie de ${}^3\text{He}$ suivant les réactions (3) et (4) est respectivement

$$P_3 = 10^{12.98} \text{ sec.}$$

$$P_4 = 10^{10.81} \text{ sec.}$$

Dans ces conditions physiques la réaction (4) est donc plus de cent fois plus rapide que la réaction (3).

Aux densités inférieures à 1000, les exposants effectifs de la densité et de la température sont approximativement

$$\mu = 1,$$

$$\nu = -\frac{2}{3} + \frac{2620}{T^{\frac{1}{3}}}.$$

Pour fixer les idées, à $T = 10^7$ degrés $\nu = 11.5$.

Au voisinage de la densité critique, ν diminue, mais μ augmente considérablement. Avec

$$\log \Lambda = 10^{5.478} \rho^{\frac{2}{3}} T^{-1}$$

on a

$$\nu = 0.0362z + 3 - \log \Lambda,$$

$$\mu = \frac{2}{3} \log \Lambda,$$

avec

$$z = \frac{5.9 \cdot 10^9}{T}.$$

Pour fixer les idées, à $T = 10^7$, $\rho = 10^4$, on a

$$\nu = 3.90,$$

$$\mu = 13.61.$$

Le calcul de μ pour la densité critique elle-même donne les résultats rassemblés dans le tableau I

TABLEAU I

T	μ
4×10^6	31.9
6×10^6	21.2
8×10^6	15.9
10×10^6	12.75

Ce n'est qu'au delà de densité critique que ν s'annule et que μ tend, lentement, vers la valeur limite $5/3$.

Les conclusions suivantes apparaissent clairement. Tant que la densité à la base de la couche d'hydrogène est au voisinage de la densité critique, ou inférieure, la stabilité vibrationnelle des naines blanches est impossible, l'impossibilité de la stabilité vibrationnelle étant particulièrement accusée lorsque la densité à la base de la couche d'hydrogène a la valeur critique.

Sans entrer dans les détails, examinons le cas de σ_2 Eridani B. La densité à la base de la couche d'hydrogène, telle qu'elle résulte des hypothèses faites et des valeurs admises pour l'éclat, la masse et le rayon tombe dans le domaine de densités entraînant l'instabilité vibrationnelle des naines blanches.

En procédant comme il est dit ici, on s'aperçoit que seules les naines blanches les plus froides, comme Wolf 489, possédant une couche d'hydrogène assez épaisse, de densité à la base assez élevée peuvent être vibrationnellement stables. Si les raisonnements faits jusqu'ici sont corrects, on voit que les naines blanches brillantes ne sauraient tirer leur énergie des réactions nucléaires, mais de la contraction, qui elle au moins, assure leur stabilité vibrationnelle.

La difficulté que nous venons de rencontrer exige que nous examinions de plus près la physique de notre problème, bien que cette question ne soit pas en relation directe avec le problème de l'évolution des étoiles.

Je serais guidé ici par une remarque de E. E. Salpeter, s'appuyant sur une étude de Bondi⁽²¹⁾ des sources d'énergie dans la séquence principale et sur des travaux d'Aller⁽²²⁾ et Aller *et al.*⁽²³⁾ sur les naines rouges de la séquence principale. Un travail de l'auteur, destiné à l'étude des propriétés des deux parties de la séquence principale, de O à G 4 et de G 8 à M, découvertes par A. G. Masevich et P. P. Parenago⁽¹²⁾, a confirmé ces résultats de façon indépendante⁽²⁴⁾.

Lorsque l'on utilise la relation entre magnitude absolue et excès de couleur, due à Eggen⁽²⁵⁾, puis qu'à l'aide des relations de Kuiper⁽²⁶⁾ entre le type spectral et la température effective on peut calculer la relation entre magnitude absolue et rayon. On remarquera que le long de la séquence principale, dans cette représentation, le rayon passe par un maximum, décroît faiblement puis croît rapidement. On peut aisément montrer que la branche inférieure de la courbe correspond au débit d'énergie par la réaction proton-proton, la branche supérieure au débit d'énergie par les réactions du cycle du carbone. Le Soleil se situe nettement sur la branche supérieure, parmi les étoiles dont le débit d'énergie est dû aux réactions du cycle du Carbone, alors que les calculs d'Epstein⁽¹⁷⁾ indiquent que l'hydrogène s'y transforme en hélium principalement par la réaction proton-proton. D'après Epstein, la réaction proton-proton excède environ 10 fois le cycle du carbone, alors que la position du Soleil dans la série principale indiquerait qu'au contraire le cycle du carbone excède environ 10 fois la réaction proton-proton.

Une différence d'un facteur 1/100 peut être dû à différentes causes. Mais avant d'examiner ces causes, on notera que le même facteur (ou un facteur un peu plus grand), appliqué au taux de production d'énergie dans les naines blanches, permettrait de résoudre les difficultés relatives à la stabilité vibrationnelle de ces étoiles.

En effet, si le débit d'énergie par gramme, dans les mêmes conditions de température et de densité était mille fois plus petit qu'il n'a été supposé, la densité à la base de la couche d'hydrogène serait plus grande. Dans le cas de σ_2 Eridani B, la densité à la base de la couche d'hydrogène serait alors $\rho = 10^{4.56}$. L'exposant effectif de la densité dans la loi de production d'énergie est alors 4.2, en faible excès cette fois-ci sur l'exposant critique calculé d'après le travail de Sauvenier Goffin, $\mu = 2.9$.

Il apparaît donc que l'une des difficultés que présente l'étude des naines blanches peut se résoudre par l'introduction d'une hypothèse plus ou moins arbitraire sur le taux de production d'énergie.

Ce n'est qu'avec beaucoup de prudence qu'il faut chercher à résoudre les difficultés posées par un problème astrophysique par une modification des données physiques. Néanmoins, le fait que cette difficulté se présente à la fois pour les étoiles de la série principale et pour les naines blanches, semble bien indiquer qu'il s'agit là d'un problème physique.

Examinons les explications possibles suggérées par Salpeter :

(a) Une erreur importante dans la valeur de l'opacité de la matière stellaire. Cette erreur n'est sans doute pas commise dans le cas des naines blanches, et les nouveaux calculs de température interne sont sans doute exempts d'erreurs importantes.

(b) Une faible concentration en hydrogène à l'intérieur de naines rouges. Ceci ne permettrait de résoudre les difficultés relatives aux naines blanches qu'en supposant qu'elles tirent toutes leur énergie de la contraction.

(c) Une erreur importante dans les calculs de la vitesse de réaction proton-proton, bien que la section de choc soit présumée être exacte maintenant à 15 % près.

(d) Un écart important à la répartition des vitesses par rapport à la répartition de Maxwell. On sait en effet que seuls les noyaux les plus rapides réagissent, c'est la queue de la répartition de Maxwell qui intervient dans le calcul du débit d'énergie. Une faible modification de la répartition des vitesses suffirait à changer appréciablement le résultat du calcul du taux de production d'énergie.

Il est probable que seules les suggestions (c) et (d) méritent d'être retenues. Il serait souhaitable que le problème de la section de choc de la réaction proton-proton soit réexaminé à fond ainsi que les problèmes de mécanique statistique que pose le calcul des réactions thermonucléaires.

Si l'on veut bien admettre que ces raisonnements ne sont pas trop aventurés, on peut trouver dans la description de ce nouveau modèle de naine blanche des arguments supplémentaires contre l'hypothèse d'Eddington sur l'origine des naines blanches. En effet, au cours de la contraction, la densité dans la couche d'hydrogène augmenterait progressivement. La densité, peu avant que la contraction soit achevée, passerait par la valeur critique $\rho_c = 10^{4.308}$. A ce moment, la contribution de l'hydrogène au débit d'énergie serait suffisante pour que l'étoile devienne vibrationnellement instable.

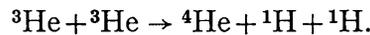
Ainsi nous voyons, par tout un faisceau d'arguments, que les naines blanches ont probablement une origine distincte de celle des autres étoiles.

La parenté des naines blanches avec les planètes qui, de point de vue de l'état de la matière sont également des corps froids, renforce cette conception. En effet, il semble établi maintenant que des corps comparables aux planètes ne sauraient se former par contraction et refroidissement d'une masse gazeuse chaude. Leur formation, comme celle des compagnons invisibles des étoiles doubles doit écouler d'un processus distinct du processus de formation des autres étoiles, même s'il se produit simultanément.

Il nous reste à examiner l'évolution possible des naines blanches. Cette évolution ne peut être connue pour le moment que par des considérations théoriques, car nous ne possédons pour ainsi dire pas de données empiriques.

Au cours de l'évolution des naines blanches, la couche d'hydrogène diminue d'épaisseur. La densité à la base de la couche critique diminue si bien que ces étoiles peuvent devenir vibrationnellement instables. Il n'est peut être pas impossible de rapprocher ce résultat de l'existence des novae naines, pour lesquelles les pre novae et les post novae sont situées par Ch. Berthod⁽²⁸⁾ dans le domaine des naines blanches.

On peut en effet imaginer que l'instabilité vibrationnelle provoque une véritable explosion au cours de laquelle une partie de l'hélium ^3He , porté à haute température, est transformée en ^4He , suivant la réaction



Après l'explosion, en raison de la diminution de la concentration en ^3He , donc de la diminution du rôle de la réaction de capture des électrons, peut se produire un retour à la stabilité. L'augmentation séculaire de la concentration en ^3He , ainsi que l'évolution de l'étoile provoquent un retour à l'instabilité vibrationnelle. Les conséquences d'une telle évolution, avec perte de matière au cours d'explosions successives, n'ont pas encore été examinées en détail.

Il serait naturellement possible que des naines blanches soient formées de la même façon que les planètes ou les compagnons invisibles des étoiles doubles, et qu'elles achèvent de dissiper leur énergie gravitationnelle en rayonnement. Cette évolution, qui a été envisagée par Kaplan⁽¹⁸⁾, prend quelques centaines de millions d'années ou quelques milliards d'années. Néanmoins, ceci ne peut se produire que si l'abondance de l'hydrogène est très faible. Presque au terme de la contraction, ce sont les réactions nucléaires qui commanderaient le débit d'énergie, et elles entraîneraient l'instabilité vibrationnelle.

Notre conclusion est l'expression de notre ignorance: la majeure partie des naines blanches ont une origine distincte des autres étoiles, elles n'en découlent pas par filiation. Mais leur structure reste encore partiellement mystérieuse et leur origine est encore inconnue.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) P. P. Parago: *A.J. U.R.S.S.* **23**, 349, 1946.
- (2) J. Berger, D. Chalonge, L. Divan, A. M. Fringant: *C.R.* **235**, 348, 1952.
- (3) *Novae, Supernovae, White Dwarfs*. Paris: Hermann, 1941.
- (4) Fowler: *M.N.R.A.S.* **87**, 114, 1926.
- (5) Chandrasekhar: *An Introduction to the Study of the Stellar Structures*. Chicago University Press, 1939.
- (6) Rudkjøbing: *Publ. Obs. Copenhagen*, No. 160.
- (7) Gamow: *Phys. Rev.* **55**, 718, 1939.
- (8) Eddington: dans *Novae, Supernovae, White Dwarfs*. Paris, 1941.
- (9) Hoyle: *M.N.* **107**, 253, 1947.
- (10) E. E. Salpeter: *Ap. J.* **115**, 326, 1952.
- (11) A. Danjon, P. Couderc: *Ann. d'Ap.* **13**, 211, 1950.
- (12) A. G. Masevich, P. P. Parago: *A.J. U.R.S.S.* Nos. 3 and 4, 1950.

- (13) Vorontsov Velyaminov: *Nébuleuses gazeuses et Novae*. Moscou, 1948.
- (14) Beals: dans *Novae, Supernovae, White Dwarfs*. Paris, 1941.
- (15) Gurzadian: *A.J. U.R.S.S.* **26**, 329, 1949.
- (16) Marshak: *Ap. J* **92**, 321, 1940.
- (17) Lee: *Ap. J* **III**, 625, 1950.
- (18) Kaplan: *A.J. U.R.S.S.* **27**, no. 2, 1950.
- (19) Sauvenier Goffin: *Mem. Soc. R. Liège*, **10**, série 4, 1950.
- (20) Ledoux et Sauvenier Goffin: *Ap. J* **III**, 611, 1950.
- (21) Bondi: *M.N.* **110**, 595, 1950.
- (22) Aller: *Ap. J.* **III**, 173, 1950.
- (23) Aller *et al.*: *Ap. J* **115**, 328, 1952.
- (24) Schatzman: *Ann. d'Ap.* **14**, 278, 1951.
- (25) Eggen: *Ap. J* **92**, 27, 1940.
- (26) Kuiper: *Ap. J* **88**, 429, 1938.
- (27) Epstein: *Ap. J.* **112**, 207, 1950.
- (28) Ch. Berthaud: *Ann. d'Ap.* **11**, 1, 1948.

Conclusion

O. Struve conclut les travaux du Symposium par un hommage à tous ses participants, et par une approbation sans réserve des paroles d'Ambartsumian:

'Dans notre travail, nous nous appuyons sur la vaste documentation réunie dans les observatoires astronomiques du monde entier, ainsi que sur les recherches théoriques des savants de différentes nations. Voilà pourquoi nous attachons une importance énorme à la collaboration pacifique des astronomes du monde entier. Respectant profondément les travaux des vrais scientifiques, des vrais travailleurs de la Science, nous pensons que l'étude en commun des grands problèmes scientifiques, y compris le grand problème de l'évolution des corps célestes, contribuera au rapprochement culturel entre les peuples et à leur compréhension mutuelle.

'Ce sera ainsi notre modeste contribution à la noble cause de la consolidation de la Paix dans le monde entier.'