

Discussion sur l'exposé de SHAJN

Ch. Fehrenbach: Un travail analogue à celui entrepris à Siméïs est actuellement en train à l'Observatoire de Haute-Provence. Commencé en 1950 par B. Strömngren et Ch. Fehrenbach, il est actuellement poursuivi par G. Courtes.

1°. Une exploration de tout le plan galactique a permis de publier une importante liste de nébuleuses à émission, en accord avec le travail identique fait simultanément à Siméïs.

Deux sortes de nébuleuses apparaissent ainsi:

(1) Les nébuleuses filamenteuses signalées par Shajn.

(2) Des nébuleuses rondes avec augmentation de l'éclat vers le bord dont les plus caractéristiques sont celles de μ Cep, λ Ori, une grande nébulosité entourant Orion.

2°. Actuellement, le travail est engagé dans l'application des méthodes interférentielles:

(a) l'interféromètre de Savart-Lyot permet la détection et la mesure correcte de l'intensité des nébulosités faibles;

(b) l'interféromètre de Pérot-Fabry permet la mesure des vitesses radiales et des largeurs de raies. Il permet aussi la mise en évidence de raies faibles, telles que N II à côté de H α .

3°. Un dispositif optique permet d'adopter tous ces appareils à un grand télescope et permet ainsi des études fines.

G. Courtes a repris le diagramme de 'Sky and Telescope' de Morgan en remplaçant les données de Yerkes sur les régions H α par ses propres mesures, beaucoup plus nombreuses: il obtient un parallélisme très satisfaisant entre la distribution des associations O donnée par Ambartsumian et ses élèves et ses distributions de H α . Une structure en bras de notre spirale est indiquée nettement, mais de façon moins nette que celle donnée par les observations radioélectriques hollandaises.

5. LE RAYONNEMENT CORPUSCULAIRE, COMME FACTEUR D'EVOLUTION DU SOLEIL ET DES ETOILES

Par V. G. FESENKOV, *Membre de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*

Les propriétés les plus importantes des étoiles sont définies par ses sources d'énergie. Les réactions nucléaires représentent semble-t-il à l'heure actuelle la seule source, capable de produire une quantité suffisante d'énergie pendant toute l'existence de l'étoile. Ainsi, par exemple, notre Soleil, perdant en moyenne deux ergs par seconde et par gramme de sa masse, devrait perdre, rien que dans la période d'existence de notre Terre, sa radiation restant à peu près au niveau actuel, $2 \cdot 10^8$ milliards d'ergs par gramme au minimum. Actuellement, on suppose que pour les étoiles de la partie supérieure de la Série principale la production d'énergie s'établit par le cycle du carbone de Bethe-Weizsäcker. La production d'énergie peut être simplement exprimée avec une bonne approximation de la manière suivante⁽¹⁾:

$$\epsilon = \epsilon_0 \rho T^\gamma, \quad (1)$$

où pour les étoiles de type solaire l'exposant γ est environ égal à 18, tandis que pour les étoiles très chaudes par exemple de type B il diminue jusqu'à 15. On voit que dans tous les cas cet exposant est assez considérable.

La source d'énergie de l'étoile pour être acceptable au point de vue physique doit pouvoir satisfaire les exigences suivantes. Elle doit assurer au Soleil un débit d'énergie égal en moyenne à 2,2 ergs/gr. sec. Elle doit garantir aussi une activité très prolongée du mécanisme de libération d'énergie parce que notre Soleil rayonne comme une étoile, au moins pendant toute la période d'existence de la Terre, c'est-à-dire 3 milliards d'années au minimum. Elle doit être, enfin, extrêmement sensible aux changements des conditions physiques, surtout de la température, parce que la libération d'énergie par gramme pour les étoiles chaudes et massives varie énormément avec la masse. La

réaction nucléaire susmentionnée satisfait parfaitement à toutes ces conditions. Une autre réaction possible: la formation de deutérium à partir de l'hydrogène ne peut pas donner suffisamment d'énergie pour les étoiles du type du Soleil. Elle dépend moins de la température, c'est pourquoi elle est plus importante pour les étoiles relativement froides(2).

La densité des étoiles ordinaires diminue assez rapidement du centre vers la périphérie, de même que la température. Cela veut dire que la production réelle d'énergie est concentrée dans des régions centrales très peu étendues et que par conséquent il faut représenter une étoile réelle du type solaire par un modèle à source ponctuelle. Mais pour de tels modèles la théorie de la structure intérieure des étoiles donne une relation entre la luminosité absolue L , la masse M , le rayon R et le poids moléculaire moyen μ

$$f_1(L, M, R, \mu) = 0, \quad (2)$$

μ entre dans l'équation d'état de même que dans la formule représentant le coefficient d'opacité k .

Le poids moléculaire moyen d'une matière stellaire presque totalement ionisée se détermine comme on le sait à partir de la concentration en poids d'hydrogène X , d'hélium Y et de la concentration totale des autres éléments plus lourds Z , par la relation

$$\mu = \frac{1}{2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}Z}; \quad Z = 1 - X - Y \quad (3)$$

La connaissance du mécanisme de production d'énergie dans les parties intérieures de la masse stellaire M permet, comme l'a démontré Bethe(1) de formuler une autre relation entre ces mêmes grandeurs

$$f_2(L, M, R, \mu) = 0. \quad (4)$$

Au point de vue des réactions nucléaires l'évolution stellaire se caractérise par une lente transformation de l'hydrogène en hélium. L'abondance des éléments lourds reste sans changements, car ils ne participent pas aux réactions. Connaissant les caractéristiques fondamentales L, M, R des étoiles il est possible de déterminer au moyen des équations (2) et (4) les deux composantes du poids moléculaire, c'est-à-dire l'abondance d'hydrogène X et d'hélium Y . Pour la première fois un tel calcul pour le Soleil a été effectué par M. Schwarzschild(3). Pour le Soleil il a trouvé: $X = 47\%$; $Y = 41\%$, et pour tous les éléments lourds $Z = 12\%$ seulement. Le récent travail d'Unsöld(4, 5) donne pour la constitution solaire à peu près les mêmes résultats, à savoir $X = 50\%$, $Y = 40\%$. Des résultats analogues ont été obtenus par A. B. Severny(6), A. G. Masevich(7), M. Harrison(8) et d'autres. Le défaut essentiel d'une telle solution est dans le manque de précision du facteur guillotine entrant dans l'expression représentant l'opacité de la matière stellaire. Il y a cependant lieu de croire qu'au moins en ordre de grandeur, une solution exacte a été trouvée pour notre Soleil en ce qui concerne l'abondance d'hydrogène X et d'hélium Y et que tous les éléments lourds pris ensemble sont en très petite quantité.

En outre on peut admettre que l'abondance Z de ces éléments ne doit pas se modifier durant l'évolution entière de l'étoile. Prenons, par exemple, pour cette abondance constante $Z = 10\%$. Dans ce cas l'expression du poids moléculaire ne dépendra que de X . Ainsi on obtient deux relations entre M, L, R, X et on peut éliminer l'une de ces quantités. En éliminant, par exemple, R on obtient la formule suivante très commode pour la comparaison avec les observations(9).

$$L = \text{const} \frac{M^{5.15}}{X^{0.02}(1+X)^{1.02} (1 + \frac{7}{4}X)^{7.25}}. \quad (5)$$

On voit que si la masse ne varie pas au cours de l'évolution, et si l'abondance de l'hydrogène X diminue graduellement, alors la luminosité absolue de l'étoile s'accroît progressivement. Cela correspond parfaitement aux résultats généraux de la théorie de la structure intérieure des étoiles et au mécanisme de production d'énergie par les réactions nucléaires de Bethe-Weizsäcker, mais cela ne correspond nullement à la

réalité. En effet, comme on le sait, la majorité des étoiles réelles satisfait à une relation univoque entre la masse et la magnitude absolue, ce qui a été indiqué déjà en 1926 par Eddington⁽¹⁰⁾.

Une autre relation importante entre les caractéristiques physiques des étoiles se rapporte à leur luminosité et à leur température. Cela a lieu pour la grande majorité des étoiles de la Série principale.

En considérant simultanément ces deux relations empiriques: masse-luminosité et luminosité—température on voit que le long de la Série principale la masse de l'étoile diminue avec la luminosité, que le rayon diminue dans une faible mesure et que la densité moyenne augmente.

Ces relations ne sont pas compatibles avec la conclusion que la luminosité d'une étoile évoluant à masse constante augmente au cours de l'épuisement graduel de l'hydrogène. Pour cela, il faudrait sans doute supposer que toutes les étoiles sont apparues simultanément avec des masses appropriées et avec une abondance correspondante d'hydrogène.

Dans cette hypothèse, la relation masse-luminosité établie de quelque manière au moment initial, restera justifiée à l'avenir lorsque toutes les étoiles augmenteront leur luminosité dans les mêmes proportions. Toutefois, l'hypothèse de l'apparition simultanée de toutes les étoiles est manifestement fautive et entre en contradiction avec les données d'observation. On sait, par exemple, que les étoiles de la partie la plus élevée de la Série principale se distinguent par une telle puissance de radiation, que tout l'hydrogène de ces étoiles devrait s'épuiser complètement en quelques millions d'années—délai extrêmement court en comparaison, par exemple, avec l'âge du Soleil. De très convaincants calculs de ce genre ont été effectués, par exemple, par A. Unsöld⁽¹¹⁾. Afin d'éviter une telle conclusion, Jordan⁽¹²⁾ avance une hypothèse très radicale sur le changement continu de la constante de gravitation à partir du moment hypothétique de la 'création'. Dans ce cas il est possible d'assurer la diminution de la luminosité de l'étoile avec le temps, mais on ne peut quand même pas éviter l'hypothèse de l'apparition simultanée des étoiles. En effet dans le cas contraire on trouverait avec le temps sur la Série principale un mélange d'étoiles de même luminosité, mais de masses tout à fait différentes. Pour éviter cette nouvelle inconséquence, Jordan avance encore une hypothèse artificielle et dénuée de fondement sur la relation entre la masse de l'étoile en formation et l'âge de l'univers à un moment donné.

Par la suite nous exposerons nos arguments à l'appui du fait que l'évolution des étoiles est essentiellement déterminée par des causes internes. Dans ce cas l'unique possibilité réelle d'accorder la théorie avec les observations consiste à supposer que chaque étoile après son apparition, commence à perdre de sa masse dans l'espace inter-stellaire. Cela veut dire qu'à part la radiation connue il existe une émission corpusculaire, incomparablement plus intense pour les étoiles massives et très lumineuses. Cette conception de la radiation corpusculaire comme un phénomène général, propre à toutes les étoiles sans exception, fournit une notion extrêmement importante pour la théorie de l'évolution stellaire. Comme nous l'avons vu, elle est étroitement liée à l'idée du rôle des réactions nucléaires dans le maintien du rayonnement des étoiles et avec les principales relations empiriques de l'astrophysique moderne. En outre elle est confirmée directement par les données d'observation.

ECHANGE POSSIBLE ENTRE L'ÉTOILE ET LA MATIÈRE INTERSTELLAIRE

Les photographies directes des nébuleuses obscures constituées principalement de poussières cosmiques mélangées à une certaine quantité de gaz, faites à l'aide du nouveau télescope système Maksutov, ont révélé que certaines étoiles sont entourées de petits halos obscurs circulaires. Ces halos apparaissent généralement plus nettement sur les plaques usuelles, c'est-à-dire en lumière bleue, qu'en lumière de la raie rouge d'hydrogène H_α ⁽¹³⁾. Ce phénomène, bien que très faible, peut être expliqué le plus naturellement en supposant que l'étoile plongée dans la nébuleuse repousse les particules de poussières

cosmiques et se trouve entourée par un volume d'espace relativement 'vide'. Les observations directes montrent donc que l'étoile au sein de la nébuleuse produit une répulsion sur les particules du milieu mais non la capture, comme le supposent certains auteurs. Cette répulsion conduit non pas à une concentration locale mais à la raréfaction de la matière autour de l'étoile. Une telle conclusion se rapporte, bien entendu, aux particules de poussières cosmiques qui sont capables de diffuser la lumière avec le plus d'intensité et qui sont, en même temps, les plus soumises aux forces répulsives.

En outre, Gurzadian⁽¹⁴⁾ a examiné le problème de l'interaction des étoiles de différents types spectraux avec l'hydrogène de l'espace interstellaire. Il est arrivé à la conclusion que toutes les étoiles de divers types spectraux jusqu'à F et même G repoussent fortement les atomes d'hydrogène neutre. Il n'y a donc aucune raison de supposer la possibilité de l'augmentation de la masse des étoiles aux dépens de l'hydrogène, au moins si celui-ci se trouve à l'état neutre. D'autre part, si l'on considère un milieu ionisé constitué d'hydrogène ou d'autres éléments il est évidemment nécessaire de tenir compte des champs électromagnétiques et ne pas se contenter de la seule force gravitationnelle. D'autre part, examinant ce problème, Hoyle, Lyttleton, Bondi^(15, 16) et von Weizsäcker⁽¹⁷⁾ concluent que si l'on se contentait d'observer la transmission de quantité de mouvement de l'étoile à la matière interstellaire, on pourrait motiver la capture de matière et l'accroissement de la masse stellaire.

Pourtant, pour que cet accroissement soit sensible, il faut que la vitesse de l'étoile par rapport au milieu reste très petite, ne dépassant pas un kilomètre par seconde, et en même temps que l'étoile possède une masse considérable environ dix fois supérieure à la masse solaire. En outre on ne considère que les forces purement gravitationnelles.

von Weizsäcker parvient à la conclusion que seule une étoile dont la masse excède la masse solaire et se trouve dans une immobilité presque totale dans un nuage interstellaire privé de mouvements intérieurs est capable au moyen du mécanisme examiné d'augmenter sensiblement sa masse dans une période d'à peu près 10^7 ans.

Ainsi que nous l'avons indiqué, les données d'observation loin de confirmer de telles hypothèses sont en visible contradiction avec elles.

Il n'y a donc pas de raison de penser que l'étoile peut accroître sensiblement sa masse par une action réciproque avec le milieu ambiant. L'évolution de l'étoile doit donc être envisagée comme la conséquence de ses changements internes.

DIFFÉRENT ÂGE DES ÉTOILES ET PROCESSUS DE LA FORMATION DES ÉTOILES OBSERVÉ DANS LA GALAXIE ACTUELLE

Les observations directes montrent qu'à côté des étoiles très vieilles qui existent déjà depuis plusieurs milliards d'années, comme, par exemple, notre Soleil, il existe des étoiles relativement très récentes qui se sont réellement formées dans l'état actuel de notre galaxie. Outre les considérations fondées sur la production de l'énergie stellaire, mentionnées plus haut, l'âge insignifiant de certaines étoiles, comme l'a montré Ambartsumian⁽¹⁸⁾, résulte de l'existence d'associations stellaires. Comme on le sait, ces associations, dont la majorité est constituée d'étoiles très massives et chaudes de type O et B, constituent de très vastes ensembles qui n'augmentent que faiblement la densité moyenne du milieu stellaire dans lequel ils se trouvent. On en peut conclure qu'ils sont en état instable. En effet, d'après les calculs d'Ambartsumian, pareils groupes ne pouvaient pas exister plus de 10^7 ans dans le champ galactique—laps de temps insignifiant comparé, par exemple, à l'âge de notre terre. Ainsi que l'a montré Ambartsumian, ces associations se dilatent continuellement. C'est pourquoi elles doivent se former dans un volume d'espace relativement restreint dans lequel toutes les étoiles de l'association se formèrent, sans doute, simultanément. Ainsi, l'âge insignifiant des associations révélé par leur instabilité, signifie en même temps l'âge insignifiant des étoiles qui les composent.

En outre des indications directes sur le processus de formation des étoiles actuellement en cours ont été obtenues récemment à l'Observatoire astronomique situé dans les montagnes des environs d'Alma-Ata à 150 mètres d'altitude à l'aide du télescope du

type D. D. Maksutov qui donne des clichés extrêmement nets dans un champ assez vaste de 30 degrés environ.

Depuis l'automne de 1950 on a obtenu au moyen de ce télescope des centaines de négatifs tant en lumière bleue qu'en lumière de la raie rouge de l'hydrogène H_α . En examinant ces négatifs nous avons décelé des phénomènes directement en rapport avec le processus de formation des étoiles.

Ainsi, par exemple, à l'endroit des nébuleuses gazeuses nous avons découvert de minces filaments reliant les étoiles voisines qui dans certains cas exceptionnels se décomposent en chaînettes serrées d'étoiles faibles. Citons, une pareille chaînette dans la constellation de Cassiopée composée d'étoiles dont l'éclat est distribué régulièrement. Si l'on admet qu'une telle chaînette se trouve à la distance de la nébuleuse étendue de Cassiopée, c'est-à-dire à peu près à 1000 parsecs, la distance entre les étoiles qui la composent n'est que de 0,40 parsec, c'est-à-dire 78 mille unités astronomiques environ. A une telle distance peuvent se trouver de nombreuses comètes en rotation autour du Soleil. La période de rotation sur une orbite circulaire d'un même rayon est voisine d'un million d'années. Il est clair, qu'une chaînette serrée composée d'étoiles disposées en ligne ne peut exister tant soit peu longtemps. En quelques milliers d'années on aurait déjà pu observer le dérèglement de la disposition des étoiles d'une telle chaînette sous l'influence de leur attraction réciproque. Par conséquent, les étoiles de cette chaînette n'ont pu se former que tout récemment par la condensation de filaments gazeux suffisamment denses et instables. De tels phénomènes permettent de rendre vraisemblable la supposition que ces étoiles se forment par voie de division de filaments assez compacts et instables. Par suite de cette instabilité des condensations apparaissent qui se transforment ensuite en étoiles. Cette hypothèse a été confirmée lors de l'examen de la structure de nébuleuses typiques en filaments comme par exemple NGC 6960 et surtout NGC 6992 dans la constellation du Cygne. Il faut noter que les filaments dont sont composés ces nébuleuses se distinguent par une densité assez considérable. Il suffit de mentionner que leur intensité lumineuse est du même ordre que celle des nébuleuses diffuses et étendues.

La détermination de la brillance de ces filaments dans la lumière de la raie H_α nous conduit à la conclusion que la densité de la matière dont ils sont composés doit être de l'ordre de 10^{-19} g./cm.³, c'est-à-dire environ mille fois plus grande que la densité des nébuleuses diffuses.

Comme mon collaborateur scientifique de l'Observatoire d'Alma-Ata, D. A. Rozhkovsky (19) et moi-même l'avons établi certains de ces filaments déjà assez condensés se divisent en étoiles séparées et ce processus se poursuit actuellement. Il en résulte l'apparition de chaînettes, composées d'étoiles à éclat à peu près identique séparés par de très faibles intervalles.

Dans la nébuleuse NGC 6992 nous avons trouvé au moins 10 de ces chaînettes d'étoiles. Les unes sont composées d'étoiles relativement brillantes (16-17 mg.) encore plongées dans le milieu du filament gazeux où elles ont pris naissance. Les autres sont complètement dépourvues de matière diffuse et ressemblent tout à fait aux autres étoiles du champ stellaire environnant si l'on compare les images obtenues avec différents filtres colorés. Ces chaînettes d'étoiles font une partie intégrale de la structure interne de la nébuleuse considérée.

L'origine de ces chaînettes stellaires ne peut éveiller de doute, elles représentent des filaments gazeux ordinaires mais divisés en condensations séparées. En outre il est clair que cette formation d'étoiles a dû se produire à une époque relativement récente parce que les étoiles apparues conservent leur orientation par rapport aux autres filaments de la nébuleuse.

On peut citer trois preuves indépendantes de formation des étoiles de filaments gazeux suffisamment condensés. La première preuve consiste en ce que les étoiles apparues forment des alignements liés d'une manière organique à la nébuleuse dont elles sont issues.

La seconde preuve est que ces chaînettes stellaires sont pleinement équivalentes aux

filaments gazeux ordinaires. Pour le vérifier il suffit de déterminer la densité de la matière si les étoiles qui constituent cette chaînette étaient uniformément distribuées sur toute sa longueur. On trouve alors la même densité moyenne, à savoir 10^{-19} g./cm.³, que celle précédemment déterminée par l'intensité d'émission de l'hydrogène gazeux.

La troisième preuve qui caractérise en même temps la nature physique du processus de formation d'étoiles consiste en ceci que cette densité peut être trouvée également par la condition d'instabilité gravitationnelle. Figurons-nous, par exemple, que dans un filament gazeux, qui ne peut, bien entendu, demeurer dans un état de stabilité, commencent à se former des condensations séparées—de futures étoiles. La distance minimum possible entre ces condensations dans le filament donné doit être telle qu'elles ne puissent se détruire les unes les autres par influence gravitationnelles. Cette distance dépend, évidemment, de la densité initiale des filaments. Inversement, en considérant les distances observées comme les plus petites distances pour lesquelles les condensations peuvent exister en sécurité au voisinage l'une de l'autre il est possible de trouver la densité. Et cette densité se trouve encore du même ordre de grandeur, à savoir 10^{-19} g./cm.³.

Ainsi, l'exposé ci-dessus montre sans aucun doute qu'il se produit effectivement dans l'univers une formation d'étoiles par division des filaments des nébuleuses diffuses en condensations séparées, filaments dont la densité doit sûrement excéder de plusieurs ordres de grandeur la densité moyenne de la matière interstellaire.

LA RADIATION CORPUSCULAIRE COMME FACTEUR ESSENTIEL DE L'ÉVOLUTION STELLAIRE

Passons maintenant à la démonstration du fait que la diminution continue et systématique de la masse stellaire est une conséquence inévitable des relations et prémisses essentielles, établies par l'astrophysique contemporaine, et qu'inversement, ces mêmes relations essentielles (la répartition des étoiles dans la Série principale, la fonction de luminosité, etc.) peuvent être déduites de façon purement théorique en supposant le rayonnement corpusculaire.

Prenons pour point de départ les prémisses suivantes:

1. La relation masse-luminosité $L = \alpha M^n$ (6)

La valeur de l'exposant a été analysée dans les ouvrages de différents auteurs. Pour les étoiles au voisinage immédiat du Soleil (une sphère de rayon 5 ps) j'ai trouvé une valeur proche de 4. Dans un dernier ouvrage, consacré à la révision des relations empiriques $M-R-L$ P. P. Parenago et A. G. Masevich⁽²⁰⁾ ont montré, que pour la première partie des étoiles de la Série principale (de O à G4) les relations

$$L \sim M^{3.9}; \quad R \sim M^{0.75} \quad (7)$$

sont pratiquement satisfaites.

La grande majorité des étoiles de la Série principale, qui sont indubitablement d'âges différents, est soumise à ces relations simples. Par conséquent, on peut supposer avec un grand degré de probabilité que notre Soleil y était aussi soumis aux différentes époques de son existence.

2. Posons que le rayonnement corpusculaire a lieu d'une manière régulière et continue. Commençons par la supposition (elle sera motivée plus loin) que la perte de matière de l'étoile est proportionnelle à sa luminosité donc que

$$\frac{dM}{dt} \sim L. \quad (8)$$

3. Posons que durant toute l'existence du Soleil, de sa formation jusqu'à nos jours, son abondance en hydrogène a changé de façon sensible. Cela se confirme par les déterminations de A. B. Severny⁽⁶⁾ et de Schatzman et Pecker⁽²¹⁾ de l'abondance en hydrogène de quelques étoiles typiques des classes B et K. Il paraît très probable que

la diminution d'abondance en hydrogène a lieu quand l'étoile dans la Série principale passe à des classes plus avancées. D'après Unsöld⁽²²⁾ l'étoile τ Sco du type B contient 57% d'hydrogène, 40% d'hélium et 3% d'autres éléments. Cela se trouve en accord qualificatif avec les déductions des auteurs précités. On peut confronter ce qui est exposé plus haut avec le fait établi, que dans la matière interstellaire qui a dû servir à la formation des étoiles de telle ou telle autre façon, l'abondance en hélium est relativement insignifiante et ne dépasse pas 10% de l'abondance en hydrogène.

4. Faisons encore une dernière supposition. admettons que l'âge du Soleil est du même ordre que celui de la Terre, c'est-à-dire qu'il ne dépasse pas quelques milliards d'années. Des considérations diverses nous obligent à supposer que son âge est de 4 à 5 milliards d'années, pas davantage.

Le coefficient de proportionnalité de l'expression (8) qui détermine l'intensité de l'émission corpusculaire peut être exprimé dans le cas du Soleil par le rapport de la masse initiale à la masse finale M_0/M_1 , ainsi que par la durée de son existence T . En introduisant les valeurs numériques des constantes physiques, nous avons les expressions suivantes pour la différence des quantités relatives initiale et finale d'hydrogène à l'intérieur du Soleil (dans les cas $n=3$ et $n=4$)⁽²³⁾:

$$p_0 - p_1 = 0.0454 T \frac{k^2}{k^2 - 1} \ln k; \quad n=3, \quad (9)$$

$$p_0 - p_1 = 0.06813 T \frac{k^3}{k^3 - 1} \ln k; \quad n=4, \quad (10)$$

où
$$k = \frac{M_0}{M_1}. \quad (11)$$

Ces expressions nous montrent que la masse du Soleil peut être considérée comme constante seulement dans le cas où son contenu d'hydrogène reste le même pendant toute son existence, ce qui est évidemment impossible. Avec l'âge admis pour le Soleil le changement de sa masse se produit beaucoup plus rapidement que le changement correspondant de l'abondance en hydrogène. Ainsi, par exemple, un changement de 5% de l'abondance en hydrogène doit provoquer un changement de masse de 10%; un changement de l'abondance en hydrogène de 10% conduit à un changement de masse de 50%; des changements de 20% et de 30% provoquent respectivement des changements de 5 et 10 fois. Donc, un changement considérable de la masse du Soleil (5 à 8 fois) est une conséquence indispensable des généralisations essentielles de l'astrophysique moderne mentionnées ci-dessus.

D'un autre côté, partant des relations générales de la théorie de la structure intérieure des étoiles, des équations (2) et (4), en y ajoutant la supposition que la relation masse-luminosité

$$L \approx M^n \quad (12)$$

est satisfaite pendant toute l'existence de l'étoile, il est possible de déduire d'une façon purement théorique la courbe de la Série principale. Des recherches semblables ont été faites par A. G. Masevich en une série de communications publiées par ailleurs⁽²⁴⁾.

Remarquons que le long de la Série principale réellement observée il existe une relation empirique entre la masse et le rayon ou entre la luminosité et la température:

$$R \sim M^{0.75}. \quad (13)$$

Les équations (2), (4), (12), (13) contiennent trois inconnues M , L et R en fonction d'une variable X . En donnant à X une valeur déterminée, correspondant à l'état de l'étoile à un moment donné nous aurons deux valeurs de la masse M qui devront coïncider si la théorie est juste et reproduit réellement la Série principale.

Un tel accord a lieu pour $n=3.9$. En même temps il est possible de déduire la vitesse d'émission corpusculaire de la théorie de la structure stellaire et des réactions nucléaires.

On trouve que l'émission corpusculaire est proportionnelle à la luminosité de l'étoile, comme nous l'avons admis ci-dessus. La valeur maximum de la masse correspond évidemment à une absence complète d'hélium au moment initial et aussi à une quantité maximum d'hydrogène et dépend de l'exposant n . Ainsi, par exemple, si $n=3.3$, la valeur maximum possible de la masse est de 5.13 fois supérieure à la masse actuelle du Soleil et si $n=3.9$ (ce qui est assez proche de la réalité) ce maximum est de 14.2 \odot . De fait, au temps de la formation du Soleil il devait déjà contenir une certaine quantité d'hélium, .5 à 10% au moins, si l'on part des idées actuelles sur l'abondance des éléments dans le milieu interstellaire. Dans ce cas la masse initiale du Soleil n'a pu être supérieure à la masse actuelle que de 8 à 9 fois. Cela a été indiqué plus haut comme base de considérations tout à fait générales.

Finalement nous pouvons considérer la masse du Soleil en fonction de X (abondance d'hydrogène), déduire la loi de diminution de la masse et établir les étapes de l'évolution. D'après A. G. Masevich la durée de l'évolution du Soleil en partant de la valeur maximum possible de la masse sera si $n=3.9$ (valeur la plus probable), $6.32 \cdot 10^9$ ans. Remarquons que d'après ces calculs la diminution de la masse de l'étoile dans les premiers temps de son existence se produit avec une grande rapidité. Si $n=3.9$ la diminution de la masse de 14.2 \odot (maximum possible) à 4.88 ne dure que 62 millions d'années, puis s'établit une stabilité presque entière. Par exemple pour le Soleil actuel la perte de masse n'est que 0.07 \odot en un milliard d'années,—une quantité complètement imperceptible, mais qui dépasse cependant la diminution de la masse par la radiation lumineuse de trois ordres de grandeur au moins.

Ces calculs ont été faits par A. G. Masevich en supposant une certaine composition chimique du Soleil. On peut les répéter en variant l'abondance d'éléments lourds Z , que nous avons supposée invariable durant toute l'évolution de l'étoile, car toute la matière de l'étoile prend une part égale dans le phénomène de la radiation corpusculaire, indépendamment du poids atomique.

Ainsi on a obtenu que toutes les courbes de la Série principale déterminée théoriquement pour différentes valeurs de Z sont analogues et se déplacent seulement vers une plus grande luminosité si l'abondance d'éléments lourds augmente. Ce déplacement n'est pas très grand—de 2 magnitudes environ dans la région du type spectral G, lorsque Z s'accroît de 0.01 à 0.50. Cependant il est suffisant pour expliquer la dispersion observée des magnitudes absolues des étoiles de la Série principale de même type spectral. De cette façon on peut dire que la courbe totale de la Série principale, construite pour toutes les étoiles connues, possède une certaine dispersion, car les étoiles différentes formées en des temps et en des lieux différents, ne sont pas d'une composition chimique complètement identique, ainsi qu'il fallait s'y attendre.

Il est intéressant d'indiquer que les calculs de A. G. Masevich pour 6 amas ouverts ont montré la possibilité de représenter assez bien pour chacun d'eux la courbe correspondante de la Série principale avec une valeur donnée de l'abondance d'éléments lourds Z . Cela répond au fait bien connu que pour ces amas cette courbe se distingue par une absence presque entière de dispersion. Il s'ensuit que toutes les étoiles de l'amas ouvert considéré ont été formées, en fait, à partir d'un même milieu possédant une même composition et pratiquement d'une façon simultanée. Après la formation des étoiles l'abondance d'hydrogène et d'hélium a changé naturellement par suite de réactions nucléaires, mais l'abondance d'éléments plus lourds est resté pratiquement la même. Ainsi, toutes ces étoiles dès leur naissance étaient génétiquement liées entre elles. En outre, du fait que la dispersion dans ce cas est pratiquement absente il en résulte aussi que tous les éléments (de tous les poids atomiques) prennent part au phénomène de rayonnement corpusculaire.

Une autre application de la conception de l'émission corpusculaire a été faite par P. P. Parenago⁽²⁵⁾ pour expliquer la forme de la fonction de luminosité pour les étoiles plus brillantes que le Soleil, telle qu'elle résulte des observations. P. P. Parenago fait la supposition que les étoiles naissent continuellement, entrent après leur naissance par un point déterminé dans la Série principale et perdent une partie de leur masse, diminuant ainsi d'éclat. Dans ce cas leur nombre, représenté par la fonction de luminosité est

proportionnel à l'inverse de la vitesse de changement de la magnitude bolométrique. Nous avons donc:

$$\phi(M_{\text{bol}}) \sim \left(\frac{dM_{\text{bol}}}{dt}\right)^{-1} \quad (14)$$

Tenant compte de la relation 'masse-luminosité' et supposant que l'émission corpusculaire est proportionnelle à la luminosité, P. P. Parenago a trouvé l'expression suivante pour la fonction de luminosité:

$$\phi(M_{\text{bol}}) \sim 10^{-0.298(4.8-M_{\text{bol}})}, \quad (15)$$

qui représente assez bien la fonction empirique pour les magnitudes comprises entre -3.3 et 5.5 .

Ainsi, l'hypothèse du rayonnement corpusculaire nous permet de comprendre les relations essentielles observées dans l'univers stellaire: la répartition des étoiles en fonction de leur luminosité, leur répartition sur la Série principale nous permet de trouver une connexion entre la masse et le rayon et de connaître plus exactement la relation masse-luminosité. En outre cette conception nous indique le caractère et la vitesse de l'évolution stellaire, très rapide au commencement et ensuite de plus en plus lente. Tout ce qui est exposé plus haut nous fait présumer que le phénomène de l'émission corpusculaire est un processus général et conforme à des lois, dont l'existence est indubitable, quoique le mécanisme de ce processus ne soit pas encore tout à fait clair.

L'analyse théorique de ce mécanisme a été faite par V. A. Krat⁽²⁶⁾ et plus scrupuleusement par S. B. Pikelner⁽²⁷⁾. Ce dernier a montré que la dissipation corpusculaire de la couronne solaire est médiocre comparativement à la perte par émission. E. Schatzman⁽²⁸⁾ a analysé l'écoulement de la matière dans le plan équatorial d'une étoile, causé par sa rotation; il a établi que la perte de masse aux frais de ce mécanisme ne peut être grande.

Malgré leur intérêt incontestable, pareils calculs n'ont pas une valeur décisive, car les processus qui se passent dans les enveloppes extérieures de l'étoile sont liés à des mouvements turbulents d'une grande violence qui sont encore trop peu connus.

La perte de masse de l'étoile par radiation corpusculaire est intimement liée à la diminution de son moment cinétique. Il a été montré par J. Jeans⁽²⁹⁾ et récemment aussi par V. A. Krat⁽³⁰⁾ que le ralentissement continu de la rotation découle simplement de l'émission du rayonnement. L'émission corpusculaire est bien plus importante à cet égard.

Les corpuscules quittant la surface des étoiles emportent une certaine quantité de son moment cinétique. Il s'ensuit que l'étoile s'accommode continuellement à la nouvelle valeur du moment cinétique. (En outre il faut admettre que l'étoile tout entière se trouve à l'état de circulation interne sans quoi le mécanisme de la libération d'énergie ne peut pas subsister longtemps.) D. Ya. Martynov⁽³¹⁾ a trouvé que la diminution de ce moment par suite de l'émission corpusculaire est beaucoup plus rapide que la diminution de la masse stellaire elle-même.

Nous pouvons nous faire une idée correcte de la diminution du moment angulaire d'une étoile par suite de l'émission corpusculaire. Nous devons pour cela partir d'un simple schéma de rotation semblable à celle d'un corps rigide dont la vitesse varie avec le temps, nous devons nous imaginer qu'une couche homogène s'envole continuellement de la surface de l'étoile.

Partant de ces considérations on peut facilement déduire une équation intégrale qui détermine la vitesse angulaire de la rotation de l'étoile à chaque instant. Cette équation a la forme suivante⁽²³⁾:

$$K\omega R^2 M = K\omega_0 R_0^2 M_0 - \frac{2}{3}\gamma M_0^3 \int_0^t \frac{R^2 \omega dt}{(1 + 2\gamma M_0^2 t)^{\frac{3}{2}}},$$

pour $n = 3$.

Sous le signe d'intégration se trouve le rayon de l'étoile en fonction de la masse ou si l'on veut du temps. Cela ne soulève aucune difficulté si l'on suppose que la Série principale représente aussi la courbe représentative de l'évolution de notre Soleil.

Les calculs effectués en supposant que l'âge du Soleil est de 4 milliards d'années, nous montrent que son moment angulaire il y a 2 milliards d'années n'était que 2·53 fois plus grand qu'actuellement; il y a 3 milliards d'années il était 17 fois plus grand qu'à présent, et à mesure que nous pénétrons dans le passé il accroît de plus en plus rapidement. Est-il possible, cependant, de dire que notre Soleil actuel n'est qu'une sorte de vestige d'une étoile initiale du type B ou A, animée de la rotation rapide qui caractérise ces étoiles? Nos calculs ne le montrent point. Au cours de toute l'évolution du Soleil sa vitesse angulaire et son moment angulaire n'ont pu changer de manière suffisante pour expliquer la différence énorme qui existe entre une étoile B typique et l'état actuel du Soleil avec sa rotation extrêmement lente. Justement ce même résultat a été obtenu aussi par V. S. Safronov⁽³²⁾ après une analyse spéciale de ce problème.

En continuant nos calculs dans les profondeurs du passé, nous aurions pu obtenir un accroissement suffisant de la vitesse de rotation, mais cette grande vitesse ne correspondrait plus au modèle ordinaire en équilibre d'une étoile de la Série principale.

Remarquons néanmoins que les étoiles chaudes n'ont pas obligatoirement toutes de grandes vitesses de rotation, ainsi que l'a montré l'analyse des étoiles du type B dans les Pléiades⁽³³⁾.

Dans les premiers temps de son existence le Soleil, qui appartenait alors, selon sa masse, aux types B ou A, pouvait malgré tout avoir un moment angulaire relativement petit. Le moment angulaire initial a pu être dépensé avant l'arrivée à l'état d'équilibre. Il est très possible que cette diminution sensible du moment angulaire soit liée non seulement à la perte de masse par suite de l'émission corpusculaire, mais très probablement aussi à la formation des planètes.

L'hypothèse de l'émission corpusculaire se distingue aussi par ce fait qu'elle est confirmée dans une certaine mesure par les résultats immédiats de l'observation. La perte continue de masse est réellement observée chez toutes les étoiles ayant des caractéristiques d'émission, c'est-à-dire celles dont les spectres contiennent des raies brillantes d'émission. Ces raies sont dues à des atmosphères très étendues que l'étoile rejette continuellement et qui se dispersent dans l'espace. Dans le cas des Novae cette éjection de l'enveloppe extérieure se produit spasmodiquement après de grands intervalles de temps, mais pour les étoiles ordinaires cela arrive continuellement; l'intensité de ce processus est très difficile à évaluer au moyen des observations spectroscopiques. L'émission corpusculaire est facilitée par une rotation rapide, propre aux étoiles jeunes et massives.

O. Struve⁽³⁴⁾ a analysé les vitesses de rotation des étoiles brillantes dans les Pléiades qui ne se distinguent en rien des étoiles du type B ordinaires. Il a montré que ces étoiles grâce à une rotation rapide sont près de la limite de stabilité et que les couches équatoriales de matière doivent continuellement se détacher dans l'espace.

Une conclusion semblable découle également du travail de G. A. Shajn⁽³⁵⁾ qui a trouvé que la force de pesanteur effective à la surface des étoiles géantes est très près de zéro, et quelquefois même possède une valeur négative; par conséquent les couches extérieures de ces étoiles en fait ne leur appartiennent pas.

Le phénomène d'écoulement continu de matière a été étudié d'une manière assez complète dans le cas des variables à éclipse et des étoiles doubles spectroscopiques. Les observations sont en ce cas assez nombreuses⁽³⁴⁾.

On peut souvent observer que les deux composantes d'une variable à éclipse sont environnées d'une atmosphère commune. Cette atmosphère est sujette à des mouvements compliqués, mais ce sont les structures circulaires qui dominent. Ces formations sont propres à toutes les étoiles doubles serrées, et se trouvent presque exclusivement dans le plan de leur orbite. Dans beaucoup de systèmes les courants de matière sont instables et se dispersent dans l'espace. Quelquefois, comme pour VX Mon, on observe des protubérances de grandes dimensions qui prévalent aussi sur la face antérieure de l'étoile.

Dans beaucoup de systèmes aux composantes du type Wolf-Rayet on observe souvent des mouvements explosifs dans les enveloppes. Dans le système VX Mon cela produit une perte graduelle de la masse et du moment angulaire. Le système typique β Lyrae est

sujet à un élargissement général de l'anneau et à des mouvements compliqués de toutbillonnement et de rotation, analysés par G. P. Kuiper et O. Struve.

La quantité de matière contenue dans un anneau typique est égale à 10^{-8} fois la masse de la composante principale; si la tendance moyenne à l'élargissement n'est que de 50 m./sec., la plus grande partie de la masse doit être épuisée en 100 millions d'années seulement. Il est indiscutable que le moment angulaire diminue aussi simultanément; par conséquent un système dans le genre de V Sag et même une étoile massive du type de Plaskett peut passer graduellement, de l'avis de Struve, à l'état d'une double du type W UMa.

Les étoiles doubles du type W UMa, qui sont en même temps des variables irrégulières fournissent de bons exemples de l'évolution stellaire. Shapley a montré que ces doubles sont assez nombreuses, et plus nombreuses que toutes les autres variables. Elles sont presque du type solaire. En moyenne la composante principale possède une masse égale à celle du Soleil, le satellite a une masse égale à la moitié de celle du Soleil, la période de variation d'éclat est de 8 heures; les vitesses orbitales sont: 110 km./sec. (composante principale) et 220 km./sec. (satellite). Si un système pareil s'unissait en une seule étoile sa vitesse équatoriale atteindrait 200 km./sec. et davantage. Si l'étoile initiale avait une masse égale à 1.5 masses du Soleil, son type spectral aurait été postérieur (F) ou antérieur (G).

Cependant les observations nous montrent qu'aucune étoile de ce type ne possède un si grand moment angulaire. Il est clair que de tels systèmes n'ont pu naître à la suite d'une division et n'ont jamais composé une étoile unique. Au contraire, il est clair que ces systèmes ont dû provenir de doubles d'un type antérieur comme β Lyr, V Cep et d'autres. La répartition de ces étoiles dans l'espace nous donne un critère pour en juger.

Il a été dit plus haut que l'écoulement de matière dans les systèmes d'étoiles doubles serrées se produit dans le plan commun de leurs orbites. Néanmoins, les étoiles ordinaires à rotation rapide et suffisamment massives s'entourent d'une enveloppe qui n'est pas une sphère homogène, mais se situe aussi dans le plan de l'équateur. Ainsi, une étoile à rotation rapide s'entoure de matière gazeuse en forme de disque plat, où la matière est soumise à des mouvements turbulents violents, et malgré cela on observe une stratification plus ou moins nettement accusée dans la disposition des éléments d'après leur poids atomique.

L'étoile la plus commode pour l'analyse de la turbulence est la première de ce genre qui fut découverte— ϵ Aur, variable à éclipse, dont les deux composantes sont des supergéantes de période 27 ans. Il est d'un grand intérêt que les étoiles assez ordinaires de ce type de W UMa se distinguent aussi par une turbulence prononcée de leurs atmosphères; les raies d'absorption très diffuses et élargies de leurs spectres nous l'apprennent.

Cet élargissement dépasse de beaucoup l'effet Doppler ordinaire dû à la température et celui dû à la vitesse de rotation, elle doit être mise sur le compte de la turbulence.

Ces phénomènes contribuent à la perte de la masse même dans le cas où la rotation est insuffisamment rapide; il semble, en ce cas, que l'étoile aurait dû demeurer en équilibre. Mais il ne faut point attribuer ces phénomènes seulement aux étoiles massives et brillantes. Il a été établi récemment que même les étoiles naines très denses peuvent quelquefois tomber dans un état d'excitation extraordinaire, qui dure quelques minutes et disparaît ensuite.

Ces étoiles sont des satellites très faibles d'étoiles doubles, dont les deux composantes sont du type M 5. Celle des composantes qui est l'objet de l'excitation se distingue par de nombreuses raies d'émission de l'hydrogène et du Calcium.

Il s'agit ici d'étoiles très faibles que nous pouvons observer seulement dans notre voisinage le plus proche; il est clair que ce phénomène peut être très répandu dans l'univers.

Ainsi un nombre immense de faits nous démontre que l'émission corpusculaire est un processus réel et régulier qui doit incontestablement influencer l'évolution des étoiles, particulièrement de celles de grande masse. Cela est d'importance capitale pour la théorie de l'évolution stellaire.

La théorie de l'évolution stellaire doit tenir compte de l'existence de ce phénomène. Les études théoriques fondées sur ce processus nous permettent de résoudre avec succès une série de problèmes compliqués en bon accord avec les données des observations; nous pouvons en conclure que nous sommes sur la bonne voie en ce qui concerne la solution du problème de l'évolution stellaire.

Le problème de l'évolution du Soleil et des étoiles est d'une grande importance non seulement pour la cosmogonie, mais aussi pour l'astronomie en général et pour toutes les sciences naturelles. Engels dans sa *Dialectique de la nature* remarque que ce sont les travaux dans le domaine de la cosmogonie qui ont suggéré pour la première fois l'idée de l'évolution de la nature.

L'astrophysique et l'astronomie stellaire actuelles ont amassé une quantité énorme de données basées sur les faits concernant les étoiles, les systèmes stellaires et le milieu interstellaire.

Outre les larges possibilités d'analyse théorique et de généralisation on a créé ainsi des prémisses de grande importance pour la solution du problème de l'origine et de l'évolution des étoiles à l'époque actuelle. Il est nécessaire de rejeter de la manière la plus catégorique toutes les affirmations concernant l'impossibilité de résoudre le problème cosmogonique au niveau actuel de nos connaissances. Le problème de l'origine et de l'évolution stellaire peut et doit être résolu à notre époque sur la base de la généralisation de tous les faits fournis non seulement par l'astronomie, mais aussi par les sciences voisines, en les analysant dans leur connexion réciproque sur la base de la méthode du matérialisme dialectique.

LITTERATURE

- (1) Bethe: *Phys. Rev.* **55**, 434, 1939.
- (2) M. Waldmeier: *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung*, 1950.
- (3) M. Schwarzschild: *Ap. J.* **104**, 203, 1946.
- (4) M. Minnaert: *Transactions I.A.U.* Vol. VII, 1948.
- (5) A. Unsöld: *Z. Ap. H.* 3-4, 1948.
- (6) A. B. Severny: Voyez la préface de la traduction en langue russe du livre de Chandrasekhar: *Introduction to the study of stellar structure*, 1950.
- (7) A. G. Masevich, L. N. Tulenkova et W. P. Matveeva: *A.J. U.S.S.R.* **28**, 6, 1951.
- (8) M. N. Harrison: *Ap. J.* **108**, 310, 1948.
- (9) P. ten Bruggencate: *Z. Ap.* **24**, H. 1-2, 1947.
- (10) Eddington: *The internal constitution of the stars*. Cambridge, 1926.
- (11) A. Unsöld: *Z. Ap.* **24**, H. 3-4, 1948.
- (12) Jordan: *Phys. Zeitschr* **45**, 183, 1944.
- (13) V. G. Fesenkov: *A.J. U.S.S.R.* **28**, 1951; V. G. Fesenkov et D. L. Rozhkovsky, *A.J. U.S.S.R.* **29**, 1952.
- (14) G. A. Gurzadian: *A.J. U.S.S.R.* **26**, 104, 1949.
- (15) F. Hoyle et R. A. Lyttleton: *M.N.* **101**, 227, 1941.
- (16) F. Hoyle et H. Bondi: *M.N.* **104**, 173, 1944.
- (17) C. F. von Weizsäcker: *Ap. J.* **114**, no. 2, 1951.
- (18) V. A. Ambartsumian: *Evolution stellaire et Astrophysique*. Erevan, 1948.
- (19) V. G. Fesenkov et D. A. Rozhkovsky: *Formation des étoiles dans les filaments des nébuleuses gazeuses-poussiéreuses*.
- (20) P. P. Parenago et A. G. Masevich: *Publ. Sternberg State Astron. Institute*, No. 20, 1951.
- (21) J. Pecker et E. Schatzman: *Ann. d'Ap.* **10**, 181, 1947.
- (22) A. Unsöld: *Z. Ap.* **21**, 22, 1941; **23**, 75, 1944.
- (23) V. G. Fesenkov: *A.J. U.S.S.R.* **26**, no. 2, 1949.
- (24) A. G. Masevich: *A.J. U.S.S.R.* **26**, no. 4, 1949; **28**, no. 1, 1951; **28**, no. 5, 1951; *Dokl. Acad. Sci. U.S.S.R.* **75**, no. 2, 1950; *Messenger, M.G.U.* No. 8, 1950.
- (25) P. P. Parenago: *A.J. U.S.S.R.* **28**, no. 2, 1951.
- (26) V. A. Krat: *Dokl. Acad. Sci. U.S.S.R.* **59**, no. 3, p. 5, 1948.

- (27) S. B. Pikelner: *Bull. Crimean Obs.* 5, 34, 1950.
 (28) E. Schatzman: *Bull. Class. Sci. Acad. Belg.* Ser. 5, 35, 1141, 1949.
 (29) J. Jeans: *Astronomy and Cosmogony* (Cambridge, 1928).
 (30) V. A. Krat: *Bull. Centr. Obs.* No. 145, 1950.
 (31) D. Ya. Martynov: *Dokl. Acad. Sci. U.S.S.R.* 6, no. 7, 1948.
 (32) V. S. Safronov: *A.J. U.S.S.R.* 28, no. 4, 1951.
 (33) E. van Dien: *J.R.A.S. Canada*, Nov.–Dec. 1948.
 (34) O. Struve: *Stellar Evolution*. Princeton, 1950.
 (35) G. A. Shajn: *Bull. Abastuman Astroph. Obs.* No. 7, p. 83, 1943.

Discussion sur l'exposé de FESENKOV

Schatzman a étudié la propagation des ondes libres de compression à l'intérieur des étoiles.* Une onde libre dans une atmosphère isotherme a son amplitude qui croît au cours de son mouvement vers les régions de plus faible densité. Observée en un point fixe, son amplitude est stationnaire.

Lorsque l'on tient compte de la présence d'un flux de rayonnement et d'un gradient de température, on constate que l'amplitude d'une onde libre observée en un point fixe peut augmenter exponentiellement avec le temps. On dira alors que l'onde libre est instable. Cette instabilité des ondes libres se présente dès que leur fréquence est assez élevée. On peut calculer, en chaque point d'une étoile, au-dessus de quelle fréquence les ondes libres sont instables. Des ondes libres instables se propageant jusqu'à la surface peuvent donner naissance à des ondes de choc. Ces ondes de choc s'accompagnent nécessairement d'un rayonnement corpusculaire. Il est suggéré que l'instabilité des ondes libres est à l'origine du rayonnement corpusculaire des étoiles.

Alfvén remarked that it is well known that early-type stars have a swift rotation with equatorial velocities of the order of 10^7 cm. sec.⁻¹, whereas stars of types later than *F* rotate slowly. As probably all types of stars have been created by a similar process, it is of interest to discuss why the late-type stars have lost rotational velocity.

Our Sun belongs to the slowly rotating stars and has an equatorial velocity which is somewhat less than 10^5 cm. sec.⁻¹. Its angular momentum is less than 1% of the total angular momentum of the solar system. Hence if we could transfer the orbital momenta of the planets to the Sun, the sun would get an equatorial velocity of the same magnitude as the swiftly rotating stars.

Hence if we consider the Sun to be a typical representative of the slowly rotating stars, we have some evidence that all stars have been generated with a swift rotation but that the late-type stars have transferred most of their angular momenta to a planetary system. It remains to explain why just the late-type stars should have produced planetary systems.

When discussing the origin of the planetary system it is an interesting problem to decide whether only mechanical forces have been important or also electromagnetic forces should be considered. There seem to be many arguments in favour of the latter view, and with this as a background a theory of the origin of the solar system has been proposed, which has recently been revised and further developed.†

This theory gives certain conditions which must be satisfied in order to permit the production of a planetary system. It appears that these conditions are satisfied for late-type stars but not for early-type stars. Hence it seems to be possible that all stars initially have had swift rotations but the late-type stars have lost most of their angular momenta when producing a planetary system.

Struve se réfère au fait que si une perte de matière a lieu, l'évolution des étoiles peut se produire vers le bas de la séquence principale, au contraire de la tendance discutée par Baade le matin.

* *Ann. d'Ap.* 15, no. 2, p. 126, 1952.

† H. Alfvén, *On the Origin of the Solar System*. Oxford University Press.

G. P. Kuiper fait les remarques suivantes sur les amas galactiques et les étoiles doubles:

The HR diagrams of galactic clusters obtained by Trumpler around 1930 were a few years later interpreted on the basis of Strömrgren's work on the general HR diagram. However, when around 1940 it became clear that the helium content of stars is not negligible, the picture of the cluster sequences as lines of constant hydrogen content required revision. The success of Schwarzschild and Sandage in interpreting the HR diagram of a typical globular cluster in terms of evolutionary changes for stars of a given age and the same initial composition, but of different mass, invites an extension of these ideas to galactic clusters and binary stars. On this basis the point at which the cluster sequence turns away from the main sequence essentially determines the age of the cluster. It then follows that the Pleiades type of cluster is much younger than the Hyades type of cluster.

Before this interpretation can be definitely accepted it will be necessary to check the ages so determined for O- and B-star clusters with the ages determined from the cluster expansion rate, as done by Blaauw for the ζ Persei group and the Scorpio-Centaurus cluster. Further, it must be shown that the giants of the Hyades-type clusters are more massive than the largest 'ordinary' main-sequence stars. As Schwarzschild pointed out in the discussion, the brightest main-sequence stars may not be 'ordinary' stars, in the sense that they possess appreciable rotation and mixing.

Components of binary and multiple stars are known to follow, on the whole, the same spectral sequences as galactic clusters. Once a calibration of these sequences in terms of age has been made, the binary stars can equally be grouped by age.

Schwarzschild fait remarquer que la vitesse de mélange est un paramètre supplémentaire de l'évolution des étoiles.

Mme A. G. Masevich fait les remarques suivantes sur les relations des amas ouverts avec l'évolution des étoiles:

Open star clusters doubtlessly play a most important part in stellar evolution. All available data confirm the fact that clusters are rather young star groups. Stars belonging to the same cluster are probably of the same origin and very likely may have been formed under similar conditions (maybe even simultaneously). A careful examination of the main properties of such groups, their characteristics, particularly the spectra-luminosity diagrams, may be of great advantage and throw some light on the physical conditions determining their origin.

The spectra-luminosity diagrams for open clusters reflect certain striking properties. Clusters containing O and B stars are as a rule deprived of red and yellow giants, while in clusters where the main sequence begins with A or later spectral-type stars, the giant branch is mostly present. The dispersion of the main sequence is very slight, nearly absent. The shape of the main sequences of different clusters is not alike.

In 1938 Kuiper⁽¹⁾ assumed open clusters to be star groups of equal hydrogen content X . He tried to explain the main properties of the spectra-luminosity diagrams for different clusters by a different hydrogen content of stars belonging to each cluster. Anyway, our present conceptions concerning stellar energy sources does not allow us to agree with Kuiper's views. Hot giant stars are converting hydrogen into helium more rapidly than the faint stars do. Therefore even if the initial hydrogen content should have been the same for all the cluster stars, it ought to have changed during a certain period of time varying for stars of different luminosities.

It seems to be likely^(2,3) that the reason of the difference in the spectra-luminosity diagram for open clusters may be explained by a different abundance of the Russell-mixture of heavy elements and not by the different hydrogen content. If an open-star cluster is a group of stars originated in similar conditions, its initial chemical composition must be nearly the same. This initial composition is characterized by the 'heavier component' (the abundance of Russell's mixture Z), as the hydrogen and helium contents are changing with time.

Therefore the stars belonging to the same cluster are subjected to the same law, as all the other stars in our Galaxy, the main sequence for every cluster being theoretically

represented by a curve $Z = \text{const}$. That means that the main sequence of every cluster reflects an evolutionary curve of stars having originated at a definite place in our Galaxy under the same initial conditions. The main sequence of the Galaxy represents then the whole amount of evolutionary curves of stars having been formed under different conditions. This accounts for a dispersion on the general main sequence of the Galaxy and the absence of such dispersion on the main sequences for clusters. It also explains the different shapes of the main sequences for individual clusters and of other properties of their spectra-luminosity diagrams. Hereby we need not make any unfounded statements concerning the nature of cluster stars (for example concerning their probable different structure or a different mass-luminosity relation as Kuiper suggested).

Comparison with observations for six clusters confirmed our conclusions^(2,3,4). In each case we were able to find a theoretical curve (with applicable Z) corresponding to the observed main sequence.

It may be quite possible that not all the stars evolve with diminishing masses. If the masses of some of them remain constant, their luminosity will increase with time. Such changes will be more clearly expressed for hot and massive stars. Therefore the position of some stars in the upper left of the main sequence may deflect from the mean theoretical curve. This accounts for a 'turn up' of the top end of the main sequence in clusters, which has been actually observed.

Such an evolutionary explanation of the spectra-luminosity diagrams for clusters also permits an estimation of their ages. A cluster with O and B stars ought to be younger than one without hot stars, as the latter exists probably as long as it is necessary for O and B stars to be converted into stars of later types.

BIBLIOGRAPHY

- (1) G. P. Kuiper: *Ap. J.* **86**, 2, 176 (1937).
- (2) A. G. Masevich: *C.R. Acad. U.S.S.R.* LXXV. no. 2, p. 173, 1950.
- (3) A. G. Masevich: *A.J. U.S.S.R.* **28**, no. 5, p. 338, 1951.
- (4) P. P. Parenago et A. G. Masevich: *A.J. U.S.S.R.* **28**, no. 6, 1951.

Gold pense qu'on ne peut écarter le travail de l'École de Cambridge sur l'accrétion parce qu'il n'a pas tenu compte des forces électromagnétiques. Il fait remarquer qu'aucun calcul n'a été fait, tenant compte à la fois des forces de gravitation et des forces électromagnétiques. Il pense que la gravitation joue un rôle essentiel dans la formation des étoiles et qu'on est en droit de négliger les forces électromagnétiques.

Alfvén dit qu'il est difficile d'introduire les forces électromagnétiques. Cependant, dans certains cas, il est évident qu'elles jouent un rôle. Il est alors nécessaire de les prendre en considération, au besoin de façon très approximative.

Hoyle pense que l'abondance du mélange de Russell dans les étoiles est plus voisine de 1% que de 10% comme il est dit dans le rapport de Fesenkov.

Madame A. G. Masevich dit que ce changement de composition ne modifie en rien les conclusions du rapport de Fesenkov. Elle pense que si l'opacité de la matière stellaire était dû seulement à la diffusion, il serait impossible de placer des étoiles réelles sur la séquence principale.

Hoyle demande s'il s'agit de modèles homogènes ou hétérogènes et fait remarquer que l'éclat est peu sensible à la composition chimique choisie, alors que le rayon y est très sensible.

Madame A. G. Masevich confirme qu'avec des modèles hétérogènes et diffusion pure, il est impossible d'obtenir les étoiles de la séquence principale.

Hoyle est en désaccord.

Gratton donne des indications sur les résultats de ses travaux sur les étoiles hétérogènes, où le débit d'énergie est dû aux réactions du cycle du carbone.

Un changement de valeur de l'abondance du mélange de Russell fait glisser l'étoile le long de la séquence principale, alors qu'un changement de concentration du carbone écarte l'étoile de la série principale.