

L'évolution stellaire (aspect historique)

par M. GABRIEL

L'évolution stellaire est la branche de l'astrophysique qui étudie la façon dont les étoiles se modifient depuis leur naissance, à partir de la matière inter-stellaire, jusqu'à leur mort.

Nos conceptions sur l'évolution des étoiles ont varié considérablement en même temps que nos idées sur ce qu'est une étoile ; celles-ci étant, comme nous le verrons, étroitement liées au développement de la physique. Ainsi, pour pouvoir décrire l'évolution des étoiles, il faut pouvoir calculer leur structure, c'est-à-dire savoir comment elles sont faites. Il faut savoir si la matière y est solide, liquide ou gazeuse et être à même de calculer comment la température et la pression varient lorsque l'on s'enfonce vers l'intérieur. Structure et évolution stellaires sont donc intimement liées.

L'histoire de l'astronomie stellaire peut se diviser en deux grandes phases. Pendant la première qui s'étend jusqu'au 17^e siècle, le monde stellaire n'évolue pas, il est l'œuvre immuable d'un Dieu architecte. Dans la seconde, on voit apparaître la notion d'évolution. Celle-ci est d'abord due uniquement aux lois de la mécanique. Ensuite, l'évolution sera la conséquence des lois de la thermodynamique et de la physique toute entière.

Les conceptions les plus anciennes des étoiles sont liées à des cosmologies fort naïves. Par exemple, pour les Egyptiens, le ciel est le couvercle de la Terre et les étoiles sont des lampions qui y sont accrochés. Lors du miracle grec, les cosmologies restent d'abord très simplistes. Ainsi *Thales de Milet*, vers 600 avant J.C., considère les étoiles comme des auges flottant sur les eaux d'en haut (c'est-à-dire celles qui produisent les pluies et par opposition aux eaux d'en bas qui constituent les océans). Elles recueillent les exhalaisons de la Terre qui s'y enflamment. *Anaximandre* vers 550 avant J.C. considère que la Terre est cylindrique et qu'elle est entourée de roues tubulaires opaques contenant du feu. Celles-ci sont percées d'évents qui laissent apercevoir ce feu.

Au cours du 5^e siècle avant J.C., les Grecs vont comprendre que le jour est lié à la présence du Soleil dans le ciel et la nuit à son absence. Ce fait n'est pas aussi évident que nous avons tendance à le croire. En effet, les jours de temps couvert, on n'aperçoit pas le Soleil et même par beau temps, il fait clair avant le lever du Soleil et la nuit tombe nettement après son coucher. C'est

en observant que la face éclairée de la Lune est toujours dirigée vers le Soleil que les Grecs sont arrivés à comprendre que celui-ci est l'astre du jour.

Suite à ces progrès, les Grecs en vinrent à diviser les corps célestes en deux groupes. Dans le premier on retrouve la Lune et les planètes qui sont de nature terrestre et ne font que réfléchir la lumière solaire. Le second est formé par le Soleil et les étoiles dont la nature est inconnue. *Parménide et Anaxagore* furent les principaux promoteurs de ces idées nouvelles. Selon ce dernier qui enseigne à Athènes vers 450 avant J.C., le Soleil est un rocher chauffé « infiniment plus vaste que le Péloponèse » ; les étoiles sont de même nature et décrivent des orbites circulaires dans l'éther qui les freine lentement. Elles finissent par tomber sur Terre et nous observons à ce moment une étoile filante. Ces conceptions lui attribuèrent des difficultés. Cléon, le rival de Périclès, l'accusa d'impiété pour avoir osé décrire le Soleil qui était considéré comme un dieu. Les Athéniens le condamnèrent à mort. Toutefois, il put quitter la ville à temps pour échapper au châtement et il se réfugia à Lampsaque sur l'Hellespont (Dardanelles).

Il faut remarquer que pour Anaxagore, la Terre et les astres sont encore plats.

Ce sont les pythagoriciens qui, vers 400 avant J.C., généraliseront l'opinion que la Terre et les astres sont sphériques. C'est aussi eux qui vont faire du mouvement circulaire uniforme le mouvement idéal, le seul digne de la perfection des corps célestes. Ceux-ci sont aussi parfaits et, de ce fait, immuables. Ces idées vont être reprises par *Platon* et il va leur donner un prestige tel que personne avant *Kepler* n'osera s'en écarter.

On retrouvera exactement ce point de vue 2 000 ans plus tard chez *Copernic*. Celui-ci écrit dans « Des Révolutions des Orbes Célestes » : « Tout d'abord et au-dessus de tout se trouve la sphère des étoiles fixes se contenant elle-même ainsi que toutes choses et par cette raison même immuable ». Cette idée de l'immutabilité des étoiles est tellement profondément ancrée dans les mentalités que lorsque *Tycho Brahé* publie son travail sur la supernova apparue en 1572 dans Cassiopée, il acquit immédiatement une réputation européenne dans le monde scientifique essentiellement parce qu'il démontrait que l'étoile nouvelle était située bien au-delà de la sphère de la Lune et appartenait donc à la sphère des étoiles.

Les observations qui, comme celles de Tycho Brahé, ébranlent fortement le mythe de l'immutabilité du monde stellaire vont se multiplier. Elles conduiront à un changement progressif des mentalités qui conduira au passage de la première à la deuxième période.

Parmi ces observations, nous citerons en 1596 la découverte de la première étoile variable, Mira Ceti, les découvertes faites par *Galilée* en braquant sa lunette vers le ciel en 1610 (satellites de Jupiter, taches solaires). Enfin, en 1718, *Halley* mesure le mouvement propre de Sirius et Arcturus — les étoiles « fixes » se déplacent sur la voûte céleste !

Les découvertes faites en astronomie ne sont pas le seul facteur qui favorisera l'abandon des théories que nous avait léguées l'Antiquité. Bien au contraire, elles s'inscrivent dans un courant général de remise en question des théories de Platon et d'Aristote dont la cause première est la fin de l'Age de la Foi. On peut diviser les nombreux facteurs qui ont provoqué cette division en deux groupes. Dans le premier, nous trouvons ceux qui sont liés à la Réforme : la proclamation du libre arbitre par les Eglises réformées (qui le condamnèrent ultérieurement) et les luttes entre les sectes protestantes qui, se multipliant, engendrèrent des discussions critiques des Ecritures. Dans le second groupe, nous trouvons les facteurs liés à la situation sociale ; l'amélioration de l'ordre social et de la sécurité diminuaient la terreur et l'accroissement de la richesse poussait à une existence moins sévère.

C'est ainsi qu'apparurent les philosophes sceptiques. Parmi ceux-ci, nous retiendrons en premier lieu *Giordano Bruno* (1548-1600). Celui-ci, ardent copernicien, élargit de façon extraordinaire notre conception de l'Univers. Pour lui, ni la Terre ni le Soleil ne sont au centre du monde ; au-delà du monde visible, il y a d'autres mondes et ainsi de suite à l'infini ; les étoiles « fixes » ne le sont pas, elles sont toutes en mouvement ; ce mouvement diffère selon qu'il est vu d'un endroit ou d'un autre et comme le temps est la mesure du mouvement, le temps tout comme le mouvement est relatif. La vision que Bruno avait de l'Univers était avant tout esthétique. Nous devons aussi retenir *Francis Bacon* (1561-1626) qui est le fondateur de la recherche expérimentale pour avoir défini la méthode inductive et *René Descartes* (1596-1650) qui introduisit le rationalisme. Il affirmait que l'Univers tout entier (à l'exception de Dieu et de l'âme) peut être considéré comme mécanique et que, si nos connaissances étaient complètes, nous serions capables de réduire toutes les sciences à la mécanique.

Pour éventuellement y parvenir, il fallait encore que *Newton* publie ses *Principes* (1687) et que ses vues soient admises ce qui ne se fit que très lentement, même en Angleterre. Selon Voltaire, 40 ans après la publication des « Principes », il n'y avait guère que 20 savants en Europe qui y étaient favorables. Celui-ci ainsi que Clairaut jouèrent un rôle prédominant dans la diffusion de la mécanique de Newton en France.

Dans son « Exposition du Système du Monde », où il expose sa célèbre théorie de formation du système solaire, *Laplace* (1749-1827) tente de démontrer que les idées de Descartes sont correctes. Le problème de l'évolution de la nébuleuse d'où est issue le système solaire est traité d'un point de vue purement mécanique et Laplace ne s'intéresse pas au Soleil lui-même.

Il faudra attendre le développement de la thermodynamique au 19^e siècle pour que le problème de l'évolution des étoiles se pose. En 1842, *Mayer* découvre le principe de conservation de l'énergie. Celui-ci implique que le Soleil, par exemple, doit aller puiser dans une réserve les quantités phénoménales d'énergie qu'il dissipe dans l'espace sous forme de lumière. Il implique également que cette réserve d'énergie qui ne peut être infinie, s'épuisera un jour et que le Soleil

s'éteindra ; il mourra. Avant la découverte du principe de conservation de l'énergie, il était facile d'admettre que les étoiles ne changent pas et brilleront toujours puisqu'on n'observe pas de modification de leur éclat pendant la durée d'une vie humaine ou même d'une civilisation.

Il est donc évident que la réserve d'énergie dans laquelle puisent les étoiles doit être énorme. Ainsi le Soleil rayonne par seconde $4 \cdot 10^{33}$ erg/sec ou $4 \cdot 10^{23}$ kilowatts. C'est-à-dire que, si toute l'énergie du Soleil était utilisée pour chauffer la Terre, sa température augmenterait d'un degré toutes les minutes.

On s'aperçut immédiatement que les réactions chimiques libèrent beaucoup trop peu d'énergie. Ainsi, si le Soleil était formé initialement de charbon, il ne laisserait que des scories après 5 800 ans.

Mayer suggéra alors que la chute des météorites sur le Soleil pouvait fournir suffisamment d'énergie. En effet en tombant celles-ci doivent perdre leur vitesse et échauffer l'atmosphère du Soleil. Malheureusement cette hypothèse se heurte à de nombreuses difficultés. Les plus évidentes à l'époque relevaient de la mécanique céleste. Pour assurer la luminosité du Soleil, il faudrait que la quantité de météorites tombant sur le Soleil soit telle que sa masse doublerait en 40 millions d'années. Ceci entraînerait dans le même temps la diminution du rayon de l'orbite terrestre d'un facteur 2 et de l'année d'un facteur 4. De telles variations peuvent être rejetées sur la base de nombreuses observations.

En 1854, *Helmholtz* émit l'hypothèse de la contraction gravifique. Celle-ci fut reprise en 1862 par *Kelvin*. Lorsqu'une étoile rayonne, elle a tendance à se refroidir et, de ce fait, à se contracter. Après la contraction, l'étoile sera-t-elle plus chaude ou plus froide ? La réponse à cette question n'est pas évidente et demande une étude détaillée.

En fait, si la matière de l'étoile est solide ou liquide ou encore si le gaz est dégénéré (comme dans les naines blanches), l'étoile se refroidit. Par contre, si elle est formée d'un gaz monoatomique ou, à la limite, diatomique, elle s'est échauffée. Si finalement elle est formée par un gaz dont les molécules contiennent plus de 2 atomes, l'étoile ne peut se contracter lentement et s'écroule sur elle-même jusqu'à ce que les molécules se soient brisées en morceaux pour être remplacées par un gaz d'atomes.

Si le Soleil est formé d'un gaz monoatomique (nous verrons que c'est le cas), ce mécanisme peut assurer la luminosité actuelle pendant 50 millions d'années et ne requerrait, à l'heure actuelle, qu'une contraction de 40 mètres par an. Bien sûr, une diminution aussi lente passerait complètement inaperçue.

Nous sommes maintenant persuadés que ce mécanisme est la source de l'énergie rayonnée par les étoiles pendant leur prime jeunesse avant que les sources subnucléaires ne soient libérées.

Cependant, déjà à la fin du 19^e siècle, ces 50 millions d'années apparaissaient insuffisants aux géologues. Ceux-ci avaient besoin de 200 millions pour

expliquer les sédimentations observées depuis le dévonien. L'érosion d'une chaîne de montagne comme les Alpes requiert 27 millions d'années et certaines chaînes sont érodées depuis très longtemps... De plus, il fallait ajouter le temps nécessaire à la lente formation préalable de l'écorce terrestre. A l'heure actuelle, on estime l'âge du système solaire à 4,6 milliards d'années.

Ainsi, dès la fin du 19^e siècle, on se rendait compte qu'il fallait trouver d'autres réserves d'énergies dans lesquelles le Soleil pourrait puiser pendant beaucoup plus longtemps.

Au début de ce siècle, suite à la découverte de la radioactivité d'une part et, d'autre part, de la relativité restreinte qui, entre autre, implique l'équivalence de la masse (m) et de l'énergie (E) par la célèbre relation :

$$E = mc^2$$

(où c désigne la vitesse de la lumière), les physiciens réalisèrent que des énergies énormes sont mises en jeu dans les processus nucléaires et les astrophysiciens pensèrent avoir trouvé la réserve d'énergie qu'ils cherchaient.

Ils pensèrent d'abord à la radioactivité. Toutefois, le taux de désintégration et, de ce fait, la quantité d'énergie libérée par seconde ne dépend que de la nature de la matière radioactive considérée et est indépendante de la densité et de sa température. Ainsi, si le Soleil était formé d'uranium pur, les désintégrations ne fourniraient que la moitié de l'énergie rayonnée par le Soleil. Par contre, pour assurer la luminosité, il suffirait que dans chaque gramme une partie sur 8 000 000 soit du radium. Toutefois, après 2 800 ans, la moitié de ce radium serait détruit et la fraction restante ne pourrait plus fournir que la moitié de la luminosité actuelle du Soleil ; sa vie serait donc beaucoup trop courte. Ces deux exemples illustrent les difficultés rencontrées si on fait appel aux éléments radioactifs et permettent de comprendre pourquoi, une fois de plus, il a fallu chercher ailleurs.

En 1919, *Jean Perrin*, suggéra de faire appel aux réactions thermonucléaires de fusion. Il émit l'hypothèse que la synthèse d'éléments légers en atomes plus lourds est la source de l'énergie fusionnée par le Soleil et les étoiles. En effet, si les éléments qui fusionnent sont plus légers que le fer, la réaction libère de l'énergie. Par contre, si on veut recueillir de l'énergie à partir d'éléments plus lourds que le fer, il faut les casser c'est-à-dire provoquer des réactions de fission semblables à celles qui ont lieu spontanément pour les éléments radioactifs.

En 1929, *Atkinson* et *Houtermans* montrèrent que, aux températures de quelques dizaines de millions de degrés règnant au centre de la plupart des étoiles, seuls les protons (noyau de l'atome d'hydrogène) peuvent réagir entre eux pour former de l'hélium. Il fallut toutefois attendre 1939 pour que *von Weizsäcker* d'une part et *Bethe* d'autre part isolent les 2 groupes de réactions, la chaîne proton-proton et le cycle du carbone, qui transforment l'hydrogène en hélium.

Dans les étoiles plus vieilles, ayant brûlé tout leur hydrogène dans les régions centrales, l'hélium réagit à des températures de l'ordre de 200 millions de degrés et est transformé en carbone et en oxygène. Ceux-ci réagiront à leur tour à des températures plus élevées encore. Si aucun avatar ne vient précipiter la mort de l'étoile, le processus se poursuivra jusqu'à ce qu'un noyau de fer soit formé. A ce moment, ayant épuisé ses sources d'énergie nucléaire, l'étoile explosera. Celle-ci sera observable comme supernova.

Revenons maintenant au problème de la structure et de l'évolution des étoiles. Dans ce domaine, les premiers travaux sont basés uniquement sur l'étude de la lumière que nous recevons des étoiles par les méthodes de la spectroscopie. C'est *Fraunhofer* qui, en 1814, inaugure ce nouveau domaine de recherche en dirigeant un spectrographe vers le Soleil. Il découvre que sur son spectre continu, qui reproduit les couleurs de l'arc-en-ciel, se superpose une série de raies sombres dont l'origine sera expliquée en 1859 par *Kirchhoff*.

A partir de 1864, *Huggins* et *Miller* se consacrent à l'étude détaillée du spectre de quelques étoiles brillantes et ils identifient les différents éléments chimiques responsables de la présence de raies sombres (raies d'absorption).

Par contre, *Secchi* choisit d'étudier de façon sommaire les spectres de plus de 3 000 étoiles. Il constate que leurs caractéristiques ne dépendent que de la température superficielle des étoiles et il propose en 1867 de les répartir en trois classes spectrales : les bleues (les plus chaudes), les jaunes et les rouges (les plus froides). Cette première classification fut précisée par les astronomes de Harvard dans le « Henry Draper Catalogue » qui répartit les étoiles en 8 groupes : B - A - F - G - K - M - R - N. Cette séquence, à laquelle s'ajouteront ultérieurement les étoiles de type O, correspond à des températures décroissantes.

A ce moment où la physique stellaire était encore inexistante, il n'est pas étonnant que l'on ait pensé, par analogie avec un bloc de métal qui se refroidit, que les étoiles chaudes étaient les plus jeunes et qu'elles se refroidissaient en vieillissant, passant ainsi par tous les types spectraux de O à M. Cette théorie a laissé sa marque dans le vocabulaire technique anglais. Les étoiles chaudes sont appelées des « early type stars » et les froides des « late type stars ».

Cette théorie a prévalu jusque vers la fin du 19^e siècle. En 1890 *Sir Norman Lockyer* identifia des différences secondaires entre les spectres de certaines étoiles froides de même type spectral. Nous savons maintenant que ces différences sont dues au fait que la plupart des étoiles froides sont des naines ayant un petit rayon tandis qu'une minorité est constituée d'étoiles géantes de grand rayon. Au moment de cette découverte, la physique n'était pas suffisamment développée pour que Lockyer puisse comprendre la cause des différences observées. Il en donna une interprétation qui apparaît aujourd'hui assez fantaisiste et qui faisait intervenir la notion de « proto-métal ». Il en conclut que les étoiles géantes étaient jeunes alors que les naines étaient vieilles.

On pouvait donc s'attendre à ce que les étoiles les plus jeunes soient gazeuses et aient un grand rayon, et donc soient des géantes, tandis que les plus vieilles auraient des densités nettement plus élevées et un petit rayon.

Pour vérifier les idées de Lockyer, il était nécessaire de « mesurer » le rayon des étoiles. Une mesure directe était impensable, mais le rayon R , la luminosité L et la température de surface T_e (plus exactement la température effective) des étoiles sont reliés par la relation :

$$L = 4 \pi \sigma R^2 T_e^4$$

où $(4 \pi \sigma)$ est une constante.

Nous avons vu que la température de surface peut être obtenue à partir du spectre. La luminosité peut se déduire de l'éclat apparent de l'étoile pour autant que sa distance soit connue. On peut donc ainsi connaître le rayon des étoiles proches.

Cependant, il faut bien réaliser que la mesure de la parallaxe d'une étoile, et donc de sa distance, est très délicate puisqu'elle nécessite la mesure d'angle inférieur à une seconde d'arc (une seconde d'arc est l'angle sous lequel on voit un mètre placé à 206 km). De plus, elle n'est possible que pour les étoiles proches et, en observant une étoile, on ne sait jamais a priori si on réussira à en mesurer la parallaxe. Ainsi, bien que la première mesure ait été faite en 1838 par *Bessel*, on ne connaissait encore qu'une cinquantaine de distances stellaires vers 1900. C'est finalement l'introduction de la photographie astronomique qui a permis d'accélérer l'acquisition des données.

Ainsi, en 1905, *Hertzsprung* découvrit que les étoiles rouges se répartissaient en deux classes : les naines et les grandes. Le même problème fut réexaminé par *Russell* en 1910 avec 52 étoiles et en 1913 avec 300 et il confirma les conclusions de *Hertzsprung*. C'est à l'occasion de ces travaux qu'il introduisit le célèbre diagramme, appelé maintenant diagramme de Hertzsprung-Russell, donnant en abscisse le type spectral ou la température de surface (Attention ! celle-ci diminue si on se déplace de gauche à droite) et en ordonnée la luminosité ou la magnitude absolue. Un des premiers diagrammes de Hertzsprung-Russell est donné à la figure 1.

On aperçoit très bien la division en deux groupes pour les étoiles froides. L'écart entre ceux-ci diminuant lorsque la température de surface augmente.

Ces observations semblent confirmer les vues de Lockyer et elles conduisirent *Russell* à suggérer une nouvelle théorie de l'évolution des étoiles. Celle-ci est illustrée par la figure 2.

Dans cette théorie, les étoiles jeunes apparaissaient au voisinage du point P dans le diagramme de Hertzsprung-Russell. Elles avaient alors une faible température et un grand rayon — cela semble normal. De plus, les observations montraient que les densités moyennes des géantes de type M, K et G étaient respectivement de l'ordre de 0,000002, 0,0005 et 0,004. Les étoiles

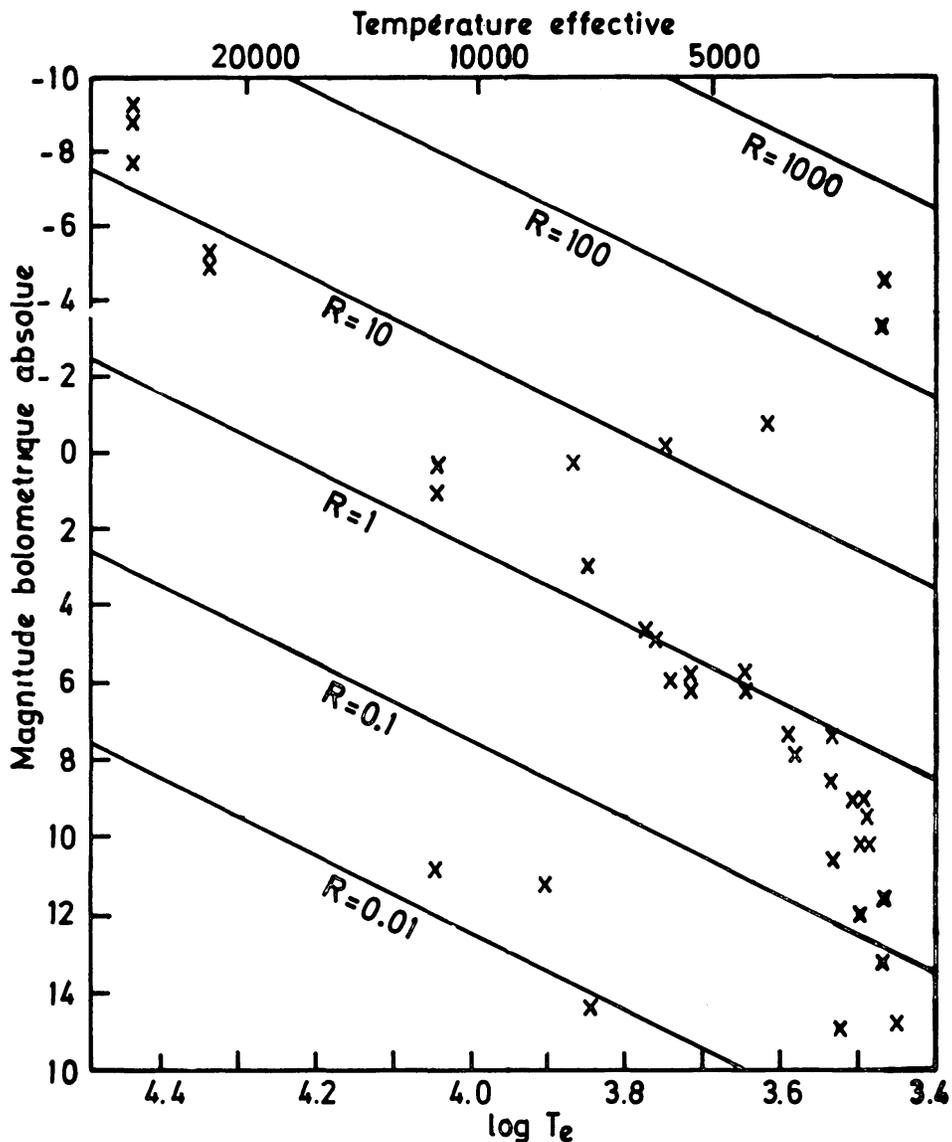


Fig. 1. — Un des premiers diagrammes de Hertzsprung-Russell donnant la magnitude bolométrique absolue des étoiles en fonction de la température effective T_e (ou de son logarithme décimal). Les droites de rayon stellaire constant donne celui-ci en prenant le rayon du Soleil comme unité.

géantes devaient donc être gazeuses et elles pouvaient se contracter de la façon prédite par la théorie de Helmholtz et Kelvin. Cette contraction produisant un échauffement des étoiles, leur point représentatif dans le diagramme de Hertzsprung-Russell allait se déplacer vers la gauche. Simultanément, la densité moyenne augmentait pour finalement atteindre des valeurs de l'ordre de l'unité. Arrivé à ce stade, on peut s'attendre à ce que la matière se liquéfie. Ceci devait se produire aux environs du point Q. Etant devenues liquides, où même ultérieurement solides, les étoiles ne pouvaient plus diminuer leur rayon que légèrement et elles se refroidissaient alors comme dans la première théorie proposée

par Secchi et, dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, elles se déplaçaient vers le point R. A nouveau l'observation montrait que la densité moyenne des naines est de l'ordre de l'unité, celle du Soleil est de 1,4, ce qui semble corroborer la théorie.

Cette théorie, quelque peu adaptée, se maintiendra, faute de mieux, jusque vers 1935. Les difficultés qu'elle rencontrera viendront de l'amélioration de nos connaissances de la structure des étoiles.

Les premiers travaux dans ce domaine furent réalisés par *Lane*, *Ritter* et *Kelvin* à la fin du siècle passé. Ceux-ci, basés sur l'étude des polytropes, eurent le grand mérite de démontrer que la température, la densité et la pression sont très élevées à l'intérieur des étoiles, respectivement de l'ordre de 10 millions de degrés, de 100 et de 10 milliards d'atmosphères au centre du Soleil.

Toutefois ce n'est qu'après le développement de la théorie atomique de la matière, entre 1910 et 1920, qu'il fut possible de bien comprendre les propriétés de la matière stellaire. Vers 1920, *Eddington* entreprit d'étudier les

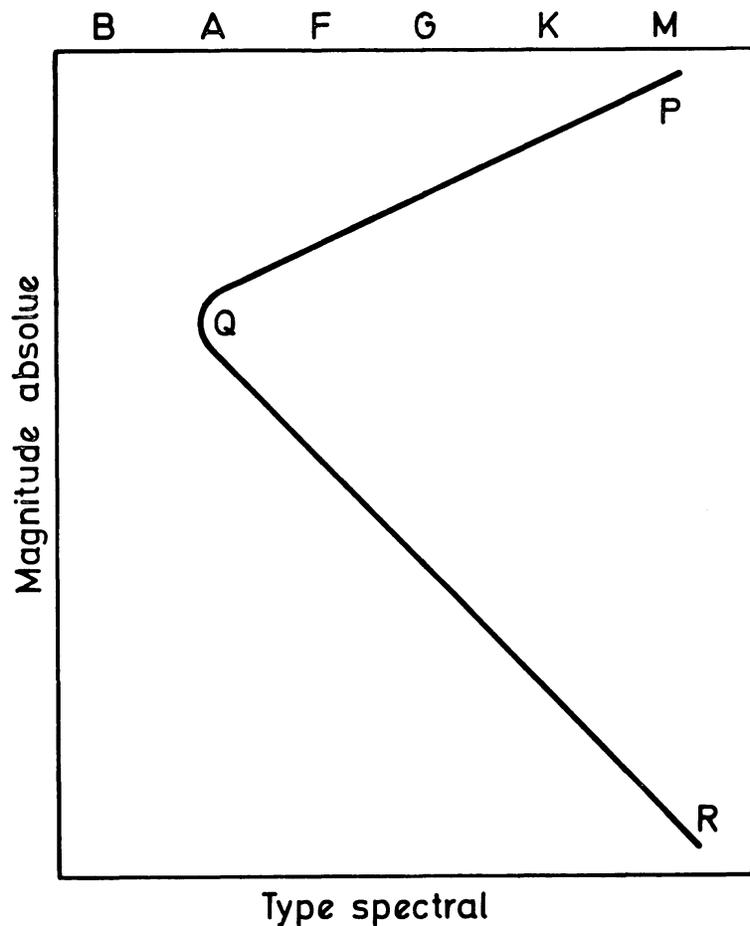


Fig. 2. — Chemin d'évolution du point représentatif d'une étoile dans le diagramme de Hertzsprung-Russell selon la première théorie de l'évolution stellaire de Russell.

étoiles variables supergéantes du type δ Céphée (les Céphéides). Pour ce faire, il avait besoin de connaître leur structure. Il supposa donc qu'elles étaient constituées de matière gazeuse puisque les Céphéides sont des géantes. Eddington montra alors, et c'est un de ses grands mérites, qu'aux températures élevées régnant dans les étoiles, les atomes se décomposent en leurs parties constituantes. Ils s'ionisent c'est-à-dire que les électrons tournant autour du noyau sont arrachés les uns après les autres et se déplacent dans le gaz sans plus être attachés à un noyau. Le noyau et les électrons ayant un volume beaucoup plus petit que l'atome, le gaz garde alors les propriétés d'un gaz parfait (il obéit à la loi de Boyle et Mariotte) jusqu'à des densités très élevées, bien supérieures à celles rencontrées dans la plupart des étoiles. Eddington montra aussi que l'énergie est transportée de l'intérieur vers l'extérieur par transfert radiatif et non par convection.

Bien que ne connaissant pas encore le taux de réactions nucléaires dans les étoiles, il réussit grâce à une hypothèse judicieuse à obtenir le premier vrai modèle d'étoile. C'est le modèle standard. Ce modèle prédit une relation entre la masse et la luminosité des étoiles, cette dernière devant varier comme la cinquième puissance de la masse. On remarqua naturellement avec surprise que les étoiles de la séquence principale (c'est-à-dire la bande la plus peuplée du diagramme de Hertzsprung-Russell et qui correspond à des étoiles naines) obéissent à cette même relation masse-luminosité. Cela signifiait donc que la matière à l'intérieur des étoiles naines était aussi à l'état de gaz et non de liquide.

L'accord n'était cependant pas parfait, la relation théorique étant décalée par rapport à celle qui était observée, mais cette difficulté n'était pas essentielle car la physique de transport de l'énergie vers l'extérieur n'était encore que très imparfaitement connue. L'accord put être obtenu en 1935 après que *B. Strömngren* eut amélioré cette partie de la théorie.

Cependant pour obtenir cet accord, il fallait à nouveau remettre en cause une conception admise depuis longtemps. Il fallait accepter que la matière stellaire était constituée essentiellement d'hydrogène et d'hélium, ceux-ci représentant respectivement 73 et 25 % de la masse totale et que les éléments plus lourds ne contribuaient au total que pour 2 à 3 %. L'analyse spectrale des étoiles, si elle avait révélé la présence de nombreuses espèces chimiques dans les couches extérieures des étoiles, n'avait pas permis de déterminer leur abondance ni de reconnaître la forte prédominance de l'hydrogène et de l'hélium qui ne manifestent leur présence que dans le spectre des étoiles de types A, B et O. De ce fait, on pensait que la composition chimique des étoiles était essentiellement la même que celle de la Terre. Aussi il fallut un certain temps et quelques révisions successives des chiffres pour que les abondances données plus haut soient finalement admises.

Il est clair que ces travaux maltraitaient la théorie de Russell. Très tôt Eddington admit qu'il ne disposait plus de théorie de l'évolution stellaire.

D'autres ont essayé de l'aménager. Toutefois, pour expliquer la relation masse-luminosité, il fallait admettre que l'énergie subnucléaire était libérée par annihilation de matière. De cette façon, la masse de l'étoile pouvait diminuer au fur et à mesure que son âge augmentait. Cependant, il aurait fallu 30 000 milliards d'années pour que la masse d'une étoile soit réduite de 3 à 1/3 de masse solaire. Des temps aussi longs étaient difficilement acceptables puisque l'observation de la récession des galaxies conduisait à un âge de l'Univers de l'ordre de 10 à 20 milliards d'années. La théorie de Russell devra être définitivement abandonnée en 1939 suite aux travaux de Bethe et von Weizsäcker.

A ce moment presque tous les éléments essentiels de la théorie de l'évolution stellaire étaient connus. Un seul point restait à éclaircir. L'hélium produit par la combustion de l'hydrogène allait-il rester où il était produit ou de vastes mouvements liés à la rotation des étoiles allaient-ils brasser la matière et la maintenir homogène ? Les premières estimations, toujours suite aux incertitudes de la physique, permettaient les deux points de vue. *Öpik* à l'Observatoire de Tartu se fit un ardent défenseur de la première thèse qui se révéla être correcte tandis que Russell adoptait la seconde. Cette dernière théorie prédit que la température de surface augmente avec l'âge et, très vite, on se rendit compte que cela était en contradiction flagrante avec les observations.

La théorie d'*Öpik* fut donc admise. De plus la révision des premières estimations conduisit *Sweets* et *Mestel* vers 1953 à montrer définitivement que la rotation des étoiles est incapable de produire les mélanges initialement envisagés.

Dès lors, la théorie actuelle de l'évolution stellaire était complètement développée. Rien jusqu'à ce jour ne nous a conduit à la remettre en cause. Les perfectionnements ultérieurs résultent surtout du développement des ordinateurs qui ont accru de façon phénoménale nos capacités de calcul.

(Extrait du *Bulletin de la Société Astronomique de Liège*, septembre 1979).

« Lunettes et télescopes » (d'A. Danjon et A. Couder) ouvrage classique, paru en 1935, sur l'utilisation d'instruments astronomiques, vient d'être réédité par les éditions Blanchard (715 pages, 346 figures, 140 FF). Un conseil : profitez de ce nouveau tirage de l'édition originale.