

523.841.2

LES ÉTOILES VARIABLES INTRINSEQUES.

(Suite et fin.) ⁽¹⁾

IV. — Les céphéides.

Comme nous l'avons déjà rappelé, les périodes théoriques pour les modèles stellaires courants ($\rho_c/\bar{\rho} \approx 50$ à 100) et $\Gamma = 5/3$ sont deux à trois fois trop petites. D'après la formule approchée (2), on pourrait cependant rétablir l'accord en adoptant un modèle à faible concentration massique ($\rho_c/\bar{\rho} \approx 10$) pour lequel le rapport des intégrales dans cette relation aurait la valeur requise.

D'autre part, pour pouvoir expliquer l'énergie énorme rayonnée par ces étoiles géantes, il faudrait au contraire choisir des modèles à très grande concentration massique ($\rho_c/\bar{\rho} \approx 10^6$) conduisant à des températures centrales suffisamment élevées pour accélérer les réactions nucléaires jusqu'aux vitesses nécessaires.

A première vue, ces deux critères peuvent paraître inconciliables; toutefois Epstein a montré que pour ces derniers modèles, l'accroissement de la fréquence est beaucoup plus faible que ne l'indique la formule approchée et en réalité ils ne sont guère plus défavorables que les modèles ordinaires. La formule (2), en effet, n'est applicable que si $\xi = \delta r/r$ ne grandit pas trop vite du centre à la surface; or pour ces modèles ξ_R/ξ_0 peut atteindre une valeur de l'ordre de 10^6 et il faut recourir à la formule exacte

$$\sigma^2 = \frac{4 \pi G \bar{\rho}}{3} (3 \Gamma - 4) \frac{\int_0^1 \xi \frac{q dq}{x}}{\int_0^1 \xi x^2 dq} \quad (5)$$

qui montre qu'en pareil cas, les couches extérieures jouent un rôle important dans la détermination des périodes. Ceci conduisit même Epstein à suggérer qu'il suffirait que ces couches soient en équilibre convectif pour rétablir l'accord entre les périodes théoriques et observées. Cependant, une investigation numérique n'a pas confirmé cette suggestion et il semble fort douteux que le désaccord puisse jamais être réduit complètement de cette façon.

Mais d'autre part, cette difficulté est-elle imputable à la théorie? Les dernières recherches de Stebbins sur la photométrie en six couleurs des céphéides suggèrent que leurs rayons devraient être approximativement doublés, ce qui serait en bon accord avec un accroissement général de la luminosité absolue des céphéides de

(1) Voir *Ciel et Terre*, 1953, n° 1-2, p. 12.

l'ordre de 1,5 magnitude comme Baade (*) l'a proposé. Ceci conduirait à une diminution de $\bar{\rho}$ capable à elle seule de ramener l'accord cherché.

Quoiqu'il en soit, les modèles à grande concentration massique gardent leur intérêt puisqu'ils sont les seuls à pouvoir expliquer la génération d'énergie dans les géantes. L'accroissement extraordinaire de ξ qui les caractérise confère aux couches extérieures un rôle important dont les conséquences sur différents aspects du problème mériteraient d'être étudiées en détail.

En ce qui concerne la stabilité vibrationnelle, ces modèles devraient être extrêmement stables, car, en général, seuls les termes stabilisants subsistent dans les couches extérieures et, à ce point de vue, ils paraissent particulièrement peu adaptés à la représentation des étoiles variables.

Pourtant, si la concentration massique augmentait encore, un stade pourrait être atteint où les réactions de l'hélium proposées récemment par Salpeter entreraient en jeu dans les régions centrales, tandis que les réactions plus familières de l'hydrogène se déplaceraient vers la surface favorisant ainsi l'instabilité. A ce sujet, il faut cependant remarquer que la contribution d'une réaction nucléaire particulière au second membre de la formule (3) est proportionnelle à la fraction de la luminosité totale L libérée par cette réaction et si celle-ci est faible l'effet sur la stabilité le sera également.

Enfin, remarquons que les couches extérieures sont également le siège de phénomènes non-adiabatiques dont les effets pourraient être particulièrement importants pour ces modèles. Jusqu'ici, l'étude de ces phénomènes n'a guère été entreprise que pour essayer d'expliquer la correspondance particulière entre la courbe de lumière et la courbe de vitesse radiale qui caractérise les céphéides. En effet, d'après la théorie adiabatique, on s'attendrait à ce que le maximum et le minimum de lumière correspondent respectivement au minimum et au maximum du rayon, c'est-à-dire aux moments où la vitesse radiale s'annule. La figure (4) montre qu'au contraire, ils se produisent à peu près un quart de période plus tard.

Pendant longtemps, les efforts faits en vue d'expliquer ce déphasage se sont heurtés à la faible capacité calorifique des couches extérieures. En 1942, Eddington attira l'attention sur l'importance à ce point de vue de l'ionisation de l'hydrogène qui crée à quelque distance sous la photosphère une zone critique où les chaleurs spécifiques deviennent très grandes. Au cours de la contraction, de l'énergie s'accumule dans cette zone sous forme d'énergie d'ionisation et est libérée au cours de la dilatation suivante. Evidemment, le déphasage qui en résulte entre le flux et le

(*) Ici et dans la suite, les astérisques désignent des résultats présentés au VIII^e Congrès de l'U.A.I., Rome, septembre 1952.

déplacement dépend du rapport de la capacité totale de la couche à la luminosité de l'étoile. Les avis sont restés partagés quant à la valeur de ce rapport dont une évaluation quantitative sérieuse constitue un problème difficile, car plusieurs aspects du phénomène restent obscurs. Par exemple, que se passe-t-il exactement aux limites de la zone d'ionisation de l'hydrogène ?

En première approximation comme Γ est très petit dans cette zone, la variation adiabatique de température $(\delta T)_n$ y est beaucoup plus faible qu'à l'extérieur et le gradient de température devrait devenir très grand à la base et diminuer au contraire au sommet au cours de la contraction, l'inverse se produisant à la dilatation. Ceci favoriserait naturellement l'accumulation d'énergie dans cette zone à la contraction et son écoulement à la dilatation y causant des variations de température $(\delta T)_n$ non-adiabatiques importantes et en quadrature de phases avec $d(\delta L)/dm$. D'autre part, la convection qui règne dans cette zone serait tantôt renforcée à la base, tantôt au sommet, et à ce moment notamment, pourrait provoquer un afflux brusque d'hydrogène ionisé dans les couches photosphériques. Enfin, ces phénomènes pourraient avoir des conséquences dynamiques (notamment l'apparition d'un excès de pression dans la zone d'ionisation de l'hydrogène à la contraction) qui n'ont jamais été discutées.

La suggestion d'Eddington présente encore un autre mérite. En effet, si nous assimilons les couches extérieures à une machine thermodynamique, l'intérieur de l'étoile jouant le rôle d'un réservoir de chaleur pratiquement inexhaustible, nous nous trouvons dans des conditions idéales pour son fonctionnement, puisque de l'énergie s'y accumule à la contraction et est libérée à la dilatation. Dans ces conditions, on doit s'attendre à ce que le coefficient d'amortissement soit très faible ou même négatif. D'ailleurs, si on tient compte de ce que nous avons dit précédemment de la phase de $(\delta T)_n$ et si l'effet invoqué par Eddington est suffisant pour introduire vers la surface un déphasage de $1/4$ de période entre δL et δr (et partant aussi $(\delta T)_n$ qui est en phase avec δr), on vérifie aisément à partir de l'équation (3) que W est toujours négatif et la cause de l'instabilité vibrationnelle des étoiles variables serait donc expliquée.

Si cette théorie correspond à la réalité, il faut donc que la zone d'ionisation de l'hydrogène jouisse dans les étoiles variables de quelque propriété spéciale, telle qu'une extension particulièrement considérable. Bien que ceci ne soit pas exclu pour les céphéides et les variables à longue période, la chose paraît de plus en plus difficile pour les étoiles variables qui se rapprochent de la séquence principale, à moins que l'hélium ne soit particulièrement abondant dans ces étoiles et que son ionisation n'y joue un rôle important.

Une autre approche du problème due à M. Schwarzschild consiste à supposer que l'onde devient progressive dans les couches extérieures de l'étoile mais à une profondeur suffisante pour que

l'approximation adiabatique reste toujours valide. Dans ce cas, toutes les variations $\delta\rho$, δT , δL dépendent non seulement de δr mais aussi de la vitesse $v = d(\delta r)/dt$. Si dans le cas de δL , les termes dominants sont ceux qui dépendent de v , on aurait ainsi un moyen simple d'expliquer le parallélisme entre les courbes de lumière et de vitesse radiale. Malheureusement, certaines des valeurs qu'il faut donner aux différents paramètres pour pouvoir recouvrer ainsi la courbe de lumière à partir de celle des vitesses radiales sont difficiles à justifier physiquement ou incompatibles avec les hypothèses de départ.

D'autre part, il faut supposer qu'aucun déphasage supplémentaire ne s'introduit au travers des couches plus extérieures qui sont le siège des phénomènes non-adiabatiques.

Remarquons aussi que le déphasage ainsi obtenu ne favorise en rien l'instabilité vibrationnelle car ici δL et la composante principale de δT restent toujours en phase.

De plus il faudrait justifier le caractère progressif de l'onde qui ne peut naître que d'une dissipation d'énergie vibratoire dans les couches extérieures, ce qui doit fatalement ramener à la discussion des phénomènes non-adiabatiques dans ces couches.

En dépit de ces difficultés, certaines observations sont d'ailleurs assez favorables à cette notion et, en réalité, les premières références au caractère progressif de l'onde dans l'atmosphère des céphéides semblent avoir été suggérées directement par les différences entre les vitesses déduites de raies formées à différents niveaux.

D'autre part, si l'amplitude d'une telle onde progressive grandit rapidement vers l'extérieur, le front de l'onde se redresse peu à peu et elle peut éventuellement prendre le caractère d'une onde de choc. Or dans le cas de W Virginis, les observations récentes de R.-F. Sanford* ont révélé toute une série de faits intrigants : dédoublement de certaines raies d'absorption au maximum, apparition un peu après le minimum de raies d'émission de l'hydrogène dont les vitesses d'approche d'abord faibles vont en augmentant jusqu'à leur disparition un peu après le maximum de lumière. Comme Schwarzschild* l'a fait remarquer, ceci peut s'interpréter en faisant appel à une onde de choc prenant naissance dans les couches profondes un peu après le minimum de lumière et provoquant d'abord l'apparition de raies d'émission. Lors de son passage au travers des couches renversantes, aux environs du maximum de lumière, elle cause le dédoublement des raies d'absorption, la matière ayant des vitesses opposées de part et d'autre du front de l'onde. Comme ces vitesses sont considérables, l'élévation de température et de pression à la surface de discontinuité doivent être considérables et il est un peu étonnant que ceci ne se révèle pas plus directement dans les caractères généraux du spectre.

En ce qui concerne les raies d'émission, il serait assez tentant d'essayer de rattacher leur origine aux phénomènes qui prennent

place dans la zone d'ionisation de l'hydrogène, mais il est plus difficile de trouver une alternative pour le dédoublement des raies d'absorption.

RU Camelopardalis qui est à l'étude à Cointe et qui par ses propriétés générales rappelle fort W Virginis présente également un élargissement considérable de certaines raies de Sr. II au maximum et il ne serait pas étonnant qu'à plus grande dispersion elles soient réellement dédoublées. Cette étoile constitue un cas idéal pour tester certains aspects de la théorie, car les variations intenses des bandes moléculaires permettraient sans doute de déterminer d'une façon indépendante les variations de densité dans son atmosphère.

D'autre part, RU Camelopardalis, comme W Virginis, appartient probablement à la classe des céphéides de type II et la forme de leur courbe de lumière ainsi que la correspondance de celle-ci avec la courbe de vitesse radiale n'est pas du tout typique des céphéides de type I de même période et, peut-être, toute généralisation à partir de ces cas est-elle un peu dangereuse ?

Enfin dans beaucoup de cas, les courbes de lumière et de vitesse radiale des céphéides présentent une asymétrie marquée (voir figure 4) qui ne peut être expliquée au moyen d'une théorie linéaire où toutes les variations en fonction du temps sont purement harmoniques. D'autre part, les nombreuses tentatives suscitées par la « George Darwin Lecture » de Rosseland en 1943, ont montré que si l'on conserve l'hypothèse adiabatique, l'asymétrie que l'on peut obtenir en tenant compte du caractère fini des amplitudes n'est qu'une faible fraction de celle observée. Dans ces conditions, il semble donc que la solution doive être cherchée dans le caractère non-adiabatique de la pulsation dans les couches extérieures et que les problèmes de l'asymétrie et du déphasage soient plus étroitement liés qu'on ne l'a supposé jusqu'ici.

V. — Les variables à longue période ($\tau > 50$ jours).

Les variables à longue période ont souvent été considérées comme une extension naturelle des céphéides vers les étoiles froides et la relation période-type spectral commune aux deux groupes tend à confirmer ce point de vue. Par contre, la relation période-luminosité ne peut être étendue à ces étoiles et au fur et à mesure que la précision des observations augmente, des irrégularités de plus en plus marquées apparaissent dans leurs courbes de lumière et de vitesse radiale. D'après Joy*, la réduction des observations de vitesses radiales d'un cycle à l'autre est même dangereuse et si une pulsation régulière existe, son amplitude doit être faible et il s'y superpose des mouvements irréguliers du même ordre de grandeur dont les amplitudes sont proportionnelles aux variations d'éclat dans chaque cycle. De plus, contrairement au cas des céphéides, les raies d'absorption donnent ici un maximum de vitesse de récession au moment du maximum de lumière.

L'une des caractéristiques les plus marquantes de ces variables est la présence dans leur spectre durant une fraction appréciable du cycle, de raies d'émission toujours déplacées vers le violet par rapport aux raies d'absorption et qui donnent une courbe de vitesse radiale plus semblable à celle des céphéides. Les réabsorptions qui déforment les raies d'émission de l'hydrogène prouvent qu'elles ont leur origine dans des couches profondes. D'après Merrill*, chaque cycle serait caractérisé par une perturbation de densité et de température élevée prenant naissance à quelque profondeur sous la photosphère et donnant lieu au maximum de lumière en traversant celle-ci. Quelque temps auparavant, les raies d'émission de l'hydrogène auraient déjà signalé son approche et son passage un peu plus tard au travers des couches renversantes ferait apparaître progressivement les différentes raies d'émission métalliques.

Cette image très analogue à celle invoquée pour W Virginis est sujette aux mêmes objections. Les irrégularités présentes et la variation continue du type spectral s'interprèteraient peut-être plus facilement en termes d'une perturbation procédant plutôt sous forme de colonnes ascendantes de gaz très chauds qui, comme dans le cas d'une convection très active, couvriraient une fraction de la surface totale nettement plus faible que les courants descendants dont les vitesses seraient plus faibles. Au cours du cycle, cette « convection » devrait passer par des phases d'accalmie et d'activité accrue qui pourraient être provoquées par les effets de la pulsation générale sur la zone d'ionisation de l'hydrogène.

C'est une hypothèse de ce genre que A. McKellar et G.-J. Odgers* ont récemment développée et il est difficile d'échapper à la conclusion que cette zone joue un rôle important, d'autant plus qu'ici aussi, c'est l'apparition des raies d'émission de l'hydrogène qui semble amorcer toute la séquence de phénomènes à expliquer.

A part leurs amplitudes plus faibles, les variables semi-régulières qui appartiennent également aux classes spectrales les plus froides M, S, R ou N ne semblent pas poser de problèmes essentiellement différents de ceux rencontrés dans la discussion des variables à longue période.

Un fait curieux doit encore être mentionné cependant et c'est la découverte récente, dans le spectre des étoiles variables de type S, de raies de technetium (43), élément préparé artificiellement sur terre et dont aucun isotope stable n'est connu. Aucune explication de l'existence de cet élément dans ces étoiles n'est immédiate mais on peut se demander si elle n'a pas quelque rapport avec leur variabilité ?

VI. — Les variables à très courte période ($\tau < 1$ jour).

Ce groupe est essentiellement composé des variables d'amas qui appartiennent à la population de type II et qui ne satisfont ni à la relation période-luminosité ni à la relation période-type spectral des céphéides classiques. Cependant, d'après M^{me} Iwanowska*,

de même qu'on a reconnu l'existence de quelques rares céphéides de type II, certaines de ces étoiles variables à très courtes périodes seraient réellement de type I. Il serait alors possible de distinguer deux relations période-luminosité et période-type spectral, une pour chaque type de population, et dans ce cas, la continuité entre céphéides et variables à courte période serait vérifiée pour les étoiles du même type. En tout cas, dans les rares cas où la courbe de vitesse radiale a pu être établie, elle constitue, comme dans les céphéides, une image renversée de la courbe de lumière et les problèmes théoriques ont généralement été considérés comme identiques dans les deux cas.

La différence la plus significative est peut-être la tendance assez marquée dans ces étoiles à la présence dans les courbes de lumière de plusieurs périodes incommensurables qui font penser à l'excitation simultanée de plusieurs modes. Dans Messier 3, Schwarzschild avait même cru pouvoir distinguer un certain nombre de variables dans lesquelles ce serait le premier mode plutôt que le mode fondamental qui serait excité, ce qui théoriquement serait assez difficile à justifier. En vue de la distinction introduite par M^{me} Iwanowska on serait plutôt tenté de croire que ces étoiles à périodes plus courtes pour un même type spectral sont en réalité des représentants de la population de type I et que la différence entre les périodes est liée aux différences soit de structure soit de composition chimique des deux populations.

En tout cas, la coexistence de plusieurs périodes prend un aspect particulièrement intéressant dans certains membres de cette classe dont RR Lyrae offre l'exemple le plus typique. Dans ce cas, les courbes de lumière et de vitesse radiale présentent une espèce de modulation à longue période qui peut être interprétée comme résultant d'un phénomène de battement entre deux périodes très voisines l'une de l'autre et de l'ordre de la période principale. L'interprétation la plus souvent avancée est basée sur les travaux de Woltjer qui étudia la possibilité de couplage entre les différents modes. En particulier, s'il existe un mode de période τ_1 , à peu près égale à la moitié de la période τ_0 du mode fondamental, le couplage peut renforcer considérablement les termes de période $\tau_0/2$ et $\tau'_0 = (\tau_0\tau_1)/(\tau_0 - \tau_1)$ qui est à peu près égale à τ_0 . Le premier terme modifie seulement la forme de l'oscillation tandis que le second, en interférant avec le mode fondamental, donne le battement observé.

Malheureusement, dans tous ces cas, pour que les périodes des différents modes d'oscillation radiale soient dans le rapport voulu, il faut choisir pour les paramètres du problème et notamment pour Γ , des valeurs qui paraissent physiquement impossibles.

Si on pouvait faire appel à des oscillations plus générales du type I, le nombre de possibilités serait beaucoup plus grand. Notamment, si une faible rotation ω , était présente par exemple, les fréquences correspondant aux différentes valeurs du rang m de l'harmonique sphérique pour un même degré n deviendraient diffé-

rentes et au lieu d'une seule fréquence σ_n , nous aurions $(2n + 1)$ fréquences données par $\sigma_{n,m} = \sigma_n \pm mC\omega$ ($m = 0, 1, 2 \dots n$) la correction étant d'ailleurs très petite. Si on se borne au cas $n = 2$ qui correspond à l'oscillation la plus facilement excitable, et si on néglige les oscillations asymétriques ($m = 1$) on aurait trois possibilités dont l'une pourrait encore être négligeable suivant les circonstances d'excitation. Il nous resterait donc deux modes d'oscillations de périodes très voisines qui pourraient très naturellement donner lieu au phénomène de battement. En somme, la rotation lève la dégénérescence de ces différents harmoniques par l'introduction de la force de Coriolis, de même que la présence d'un champ magnétique, par exemple, fait disparaître la dégénérescence des niveaux de l'atome et provoque l'effet Zeeman bien connu. L'introduction d'un autre champ de force que celui dû à la rotation et en particulier, d'un champ magnétique, pourrait conduire à des effets analogues. Remarquons aussi que les vitesses de rotation nécessaires sont très faibles ici et ne donneraient lieu à aucun autre effet observable et que, d'autre part, nous nous rapprochons avec ces variables, de la région du diagramme de Hertzsprung-Russell caractérisée par de fortes rotations.

Et cependant, comme dans le cas des céphéides, toute une série d'observations pointent plutôt vers une symétrie sphérique du phénomène que, seules peut-être, des oscillations purement radiales peuvent assurer.

Dans certains cas, comme celui de A I Velorum étudié récemment avec grand soin par Walraven, la complexité est encore beaucoup plus grande car suivant ses dernières observations, au moins quatre périodes différentes seraient présentes qui donneraient lieu à des phénomènes de couplages et de battements, ces derniers étant d'ailleurs beaucoup moins serrés que dans le cas de RR Lyrae. Sans aucun doute, un tel cas, s'il est confirmé constituera un test extrêmement critique pour n'importe quelle théorie.

VII. — Les étoiles du type de β Canis Majoris.

Ces étoiles dont l'étude a été négligée presque complètement durant un quart de siècle ont été récemment remises à l'honneur par les travaux de Struve et de ses collaborateurs à Berkeley. Les périodes de ces étoiles sont extrêmement courtes, de l'ordre de quelques heures. Trois de ces étoiles sur sept ou huit qui sont connues présentent un phénomène de battement dans leur courbe de vitesse radiale entre deux oscillations V_1 et V_2 de périodes P_1 et P_2 analogue à celui que nous venons de décrire.

De plus, la largeur des raies d'absorption varie avec la période P_2 et est maximum quand la vitesse V_2 s'annule en passant de vitesses de récession à des vitesses d'approche. L'amplitude de cet effet est proportionnelle à celle de V_2 et dans certains cas, l'élargissement va jusqu'au dédoublement.

Les variations de lumière sont très faibles, de l'ordre de 0,1 mag. mais dans quelques cas les observations photoélectriques ont permis d'établir néanmoins des courbes de lumière qui montrent les mêmes phénomènes de battement. Il se pourrait même qu'elles soient plus significatives à ce point de vue que les courbes de vitesse radiale; ainsi dans le cas de 12 Lacertae où seule V_2 apparaît, De Jaeger a pu déduire de la courbe de lumière, l'existence d'une seconde période P_1 très voisine de P_2 . Contrairement aux céphéides, le maximum de lumière correspond ici à la phase où la vitesse s'annule en passant de valeurs positives à des valeurs négatives. Par contre, les changements de type spectral et de température sont très faibles.

Différentes indications aussi bien que leur position dans le diagramme de Hertzsprung-Russell poussent à croire que la rotation joue un rôle pour ces étoiles et que les variations sont provoquées ici par des oscillations qui ne présentent pas une symétrie aussi élevée que dans le cas des céphéides ou des variables d'amas. Ces conditions sont très favorables à la théorie des oscillations non-radiales en présence d'une rotation que nous avons esquissée plus haut mais son application quantitative rencontre cependant certaines difficultés dont l'importance ne pourra réellement être évaluée que lorsque nos connaissances seront étendues à un plus grand nombre de ces objets.

VIII. — Les étoiles à champ magnétique variable.

En 1947, H.-W. Babcock guidé par la suggestion souvent répétée d'une association entre rotation et champ magnétique appliqua la technique de la mesure de l'effet Zeeman développée au Mont Wilson, aux étoiles du type A, notables pour les grandes vitesses de rotation qui les caractérisent. Naturellement, pour pouvoir mesurer un effet Zeeman, les raies doivent être assez piquées, ce qui doit correspondre dans ces étoiles soit à un axe de rotation à peu près parallèle à la ligne de visée soit à une vitesse de rotation nettement inférieure à la vitesse moyenne de la classe.

Cette investigation conduisit immédiatement à la découverte de champs magnétiques importants de l'ordre de plusieurs milliers de gauss, souvent variables et allant parfois jusqu'à renverser complètement leur polarité en des périodes de quelques jours. Le spectre de ces étoiles subit également des modifications considérables de même période et ceci les apparente aux étoiles à spectres variables de classe A étudiées spécialement par Morgan et Deutsch. Un des traits les plus frappants, c'est que les variations de l'intensité des raies de certains éléments tels que l'Europium et le Chrome sont décalées d'une demi-période, le maximum des premières correspondant au minimum des secondes, les extrema dans tous les cas coïncidant avec ceux du champ magnétique. Ces variations d'intensité peuvent s'expliquer en partie par l'élargissement dû à l'effet Zeeman de raies saturées, mais le déphasage

entre certains éléments semble requérir une séparation de ceux-ci en fonction de la latitude magnétique.

De même, la mesure des vitesses radiales met en évidence une oscillation associée à celle du champ magnétique, mais il existe des vitesses différentielles considérables entre différents éléments, ce qui est sans doute à rapprocher de l'hypothèse de leur séparation magnétique.

Les changements de polarité du champ magnétique posent un problème théorique nouveau et jusqu'ici deux possibilités ont été considérées. La plus simple consiste à supposer que l'axe de rotation ne coïncide ni avec l'axe magnétique, ni avec la ligne de visée et que les angles que ces directions font entre elles soient tels qu'au cours d'une rotation, nous voyions alternativement les pôles opposés. Babcock a soulevé toute une série de critiques à cette interprétation mais il est possible qu'une certaine complexité du champ à la surface de l'étoile permette d'y répondre.

L'autre possibilité proposée par Runcorn et développée par Schwarzschild consiste à attribuer ces variations à une oscillation non-radiale. En effet, l'étoile possédant une conductivité pratiquement infinie, les lignes de force qui sont « gelées » dans la matière doivent se déformer en même temps que l'étoile et on peut même imaginer que l'effet intégré sur tout un hémisphère puisse donner un renversement de la polarité.

Dans son investigation, Schwarzschild considère les oscillations non-radiales infiniment petites d'une sphère homogène et incompressible plongée dans un champ magnétique uniforme H_0 en négligeant complètement l'effet du champ gravifique. Il trouve ainsi une fréquence proportionnelle à H_0 , à l'inverse du rayon et de la racine carrée de la densité et qui est comparable aux fréquences observées si H_0 est de l'ordre de 10^6 gauss, ce que Schwarzschild considère comme caractéristique des régions centrales de l'étoile. Cependant, comme Ferraro et Memory l'ont montré, si on remplace H_0 par un champ de dipôle, conservant toutes les autres hypothèses de Schwarzschild, ce n'est pas la valeur au centre qui détermine la période mais un faible multiple de sa valeur H_s à la surface et si celle-ci est de l'ordre de quelques milliers de gauss, la période est de l'ordre de l'année. De plus, dans cette solution, le champ résultant est fourni par la superposition à un champ magnétique important d'une composante variable très petite et ne peut jamais changer de polarité.

Enfin, les forces de rappel dues à l'attraction gravifique ne sont nullement négligeables, mais au contraire nettement plus grandes que celles qui résultent des tensions magnétiques. Dans ce cas, comme on peut le déduire d'un travail de Miss Gjellestad ou du principe de Rayleigh, les effets du champ magnétique se traduiront simplement par une petite correction à la fréquence hydrodynamique du même genre que celle due à la rotation que nous avons discutée précédemment. Dans ce cas, la période sera beaucoup trop

courte, sauf pour certains types d'oscillations à composante principale le long des surfaces de niveau qui, de plus, présenteraient l'avantage, si l'amplitude grandit assez vite vers la surface, de pouvoir affecter fortement la direction des lignes de force, ce qui est nécessaire pour expliquer le renversement de polarité. Mais il semble que Cowling en étudiant ce cas, ait rencontré des difficultés d'un nouveau genre qui rendraient cette solution inutilisable.

Ainsi, l'interprétation en termes de pulsations n'est pas très prometteuse et peut-être devra-t-on réétudier sérieusement la première possibilité ? D'autant plus que A. Deutsch* a récemment avancé toute une série d'arguments tirés directement de l'observation et tendant à prouver que la période des variations spectrales dans une dizaine d'étoiles y compris quatre variables magnétiques, est identique à la période de rotation de ces étoiles.

Naturellement dans un cas comme dans l'autre, il semble que la relation simple entre champ magnétique et rotation qui avait primitivement suggéré ces recherches, doit subir quelque révision. Notons toutefois que Stoyko à Paris, a découvert une corrélation intéressante entre les variations du champ magnétique et de la rotation terrestre.

IX. — Les variables explosives.

Nous rangeons dans cette classe les novæ, spécialement celles qui sont récurrentes et les étoiles du type de SS Cygni. Comme Kukarkin et Parenago l'ont remarqué, il semble que dans tous ces cas, la période de récurrence soit proportionnelle au rapport E/L si E est l'énergie émise au cours de l'explosion et L , la luminosité normale de l'étoile.

Dans ces étoiles, particulièrement dans le cas des novæ, l'augmentation de la luminosité est si rapide qu'elle fait songer à quelque instabilité dynamique plutôt qu'à l'instabilité vibrationnelle que nous avons discutée pour les variables régulières. Biermann a proposé une théorie où une instabilité de ce genre résulte de l'établissement lent et progressif d'un gradient de température superadiabatique dans des couches extérieures étendues de l'étoile. Il est assez difficile de comprendre comment la convection ne s'installe pas aussitôt que le gradient dépasse la valeur adiabatique. D'autre part, cette instabilité ne pourrait pas se manifester vis-à-vis d'une perturbation à symétrie sphérique, si bien que l'éjection de matière devrait avoir lieu principalement sous forme de masses détachées ou d'anneaux, ce qui d'ailleurs, dans beaucoup de cas, n'est pas contraire aux observations.

Une autre ligne d'attaque a été formulée par S. Rosseland, qui a considéré la possibilité d'une libération subite d'énergie dans les régions centrales de l'étoile qui donnerait naissance à une espèce d'onde de détonation se propageant vers la surface où elle provoquerait les phénomènes observés. Depuis, Schatzman en particulier, a recherché les réactions nucléaires capables de libérer l'énergie

nécessaire et Kopal et un groupe d'associés ont discuté les possibilités de propagation d'une telle onde du centre vers la surface et ses modifications au cours de cette propagation. De part et d'autre, les résultats ne sont pas trop encourageants.

D'autre part, ces variables sont très proches dans le diagramme de Hertzsprung-Russell des naines blanches et comme ces dernières sont les seules étoiles connues jusqu'à présent où des réactions nucléaires peuvent conduire à l'instabilité vibrationnelle, on peut se demander si malgré tout, cette instabilité n'a pas quelque relation avec les phénomènes étudiés ici. Par exemple, Schatzman considère le cas d'une étoile proche de l'état de naine blanche dans laquelle la génération d'énergie est due à la réaction $H - H$ dans les couches extérieures et qui doit être très proche de l'instabilité vibrationnelle. D'après Schatzman une légère accumulation de H_c^3 serait possible et déclencherait cette instabilité qui conduirait à une « explosion » où tout l'excès de H_c^3 serait transformé rapidement en H_c^4 . L'étoile pourrait alors retrouver son état d'équilibre jusqu'à ce que la nouvelle accumulation de H_c^3 soit suffisante pour que le processus recommence. Evidemment, cette hypothèse conduit directement à une relation du type observé, entre la période de récurrence, l'énergie libérée et la luminosité, mais une théorie comme celle de Biermann permettrait également de la retrouver, quoique d'une façon un peu plus indirecte.

Il faut aussi remarquer que l'instabilité vibrationnelle ne conduit pas d'elle-même à une explosion. Tout ce qu'elle peut faire c'est d'accroître l'amplitude d'une oscillation jusqu'à ce que, par exemple, les variations de température et de densité correspondantes soient suffisantes pour provoquer l'explosion. Naturellement pour une naine blanche ou une étoile située dans cette région du diagramme de Hertzsprung-Russell, la période d'oscillation est extrêmement courte et les oscillations préalables à l'explosion pourraient échapper complètement à l'observation.

X. — Conclusions :

La littérature concernant les étoiles variables est considérable et malgré la longueur de cet exposé bien des aspects intéressants de la question ont dû être ignorés : interprétation détaillée du spectre des céphéides, exploitation des observations spectrophotométriques, tests semi-empiriques de l'hypothèse des oscillations radiales, étude de la variation du contour des raies au cours du cycle, etc...

Par ses caractères les plus fondamentaux, le problème est lié intimement à celui de la structure interne des étoiles et de leur évolution et, à ce point de vue, son étude promet d'être une des sources les plus fécondes de progrès. En particulier, quand les propriétés différentielles des étoiles variables de type I et II auront été bien dégagées, il est probable qu'elles nous fourniront une des indica-

tions les plus sûres quant aux différences profondes de constitution entre les deux populations.

D'autre part, en ce qui concerne les aspects secondaires dont certains sont d'ailleurs fort intrigants, les couches extérieures jouent probablement un rôle dominant et tout progrès dans l'interprétation de ces phénomènes apportera également des renseignements précieux sur la structure de ces couches.

Enfin, la grande diversité des phénomènes qu'on rencontre parmi ces étoiles constitue un aiguillon précieux tant pour l'ingéniosité des observateurs que pour l'imagination des théoriciens.

P. LEDOUX,

Associé du F.N.R.S.

Institut d'Astrophysique, Coïnte-Sclessin.

BIBLIOGRAPHIE

La littérature concernant les étoiles variables est si vaste que nous nous bornerons ici à quelques livres ou articles d'intérêt suffisamment général et où le lecteur intéressé trouvera des références détaillées aux travaux originaux.

En ce qui concerne l'histoire des premiers essais d'interprétation, les articles suivants sont particulièrement intéressants :

D. BRUNT, *The Observatory*, 36, 59, 1913.

H. SHAPLEY, *Ap. J.*, 40, 448, 1914.

A. EDDINGTON, *The Observatory*, 40, 290, 1917.

Parmi les ouvrages généraux consacrés à la systématisation des observations et aux inférences qu'on peut en déduire directement, citons :

Variable Stars, C. PAYNE-GAPOSCHKIN and S. GAPOSCHKIN, Harvard Observatory monographs n° 5, 1938.

The Nature of Variable Stars, P. W. MERRILL, 1938.

The Story of Variable Stars, L. CAMPBELL and L. JACCHIA, The Harvard books on Astronomy, 1946.

Astrophysics, A. Topical symposium edited by J. A. Hynek, 1951, chap. 12 by C. PAYNE-GAPOSCHKIN.

Du point de vue théorique, les ouvrages généraux sont plus rares mais on peut en citer trois excellents :

The Internal Constitution of the Stars, A. EDDINGTON, Cambridge, 1926, chap. 8.

Un article par E. A. MILNE dans le *Handbuch der Astrophysik*, Bd. III, 2, p. 804, 1930.

The Pulsation Theory of Variable Stars, S. ROSSELAND, Oxford, 1949.

Sous les différentes rubriques qui suivent, nous mentionnons quelques travaux ou bien trop récents pour être repris dans les exposés d'ensemble cités plus haut ou bien consacrés à la discussion d'un aspect du problème négligé dans ceux-ci. Cette liste est forcément très incomplète.

1) **Les céphéïdes.**

a) Observations spectroscopiques et leur interprétation.

O. STRUVE, *The Observatory*, 65, 257, 1944.

M. SCHWARZSCHILD, B. SCHWARZSCHILD and W.S. ADAMS, *Ap. J.*, 108, 207, 1948.

Th. WALRAVEN, *Pub. Astr. Inst. Amsterdam*, n° 8, 1948.

R. CANAVAGGIA, *An. Astr.* 12, n° 1 et 2, 1949.

R. F. SANFORD, *P.A.S.P.*, 61, 135, 1949.

A. H. JOY, *Ap. J.* 110, 105, 1949.

O. J. EGGEN, *Ap. J.*, 113, 367, 1951.

J. STEBBINS, *Ap. J.*, 115, 292, 1952.

A. VAN HOOFF et DEURINCK, *Ap. J.*, 115, 166, 1952.

b) Périodes.

I. EPSTEIN, *Ap. J.* 112, 6, 1950.

P. LEDOUX, *Bull. Soc. Roy. Sc. Liège*, sous presse.

c) Déphasage.

E. A. MILNE, *M. N.*, 109, 517, 1949.

S. ROSSELAND, *M. N.*, 110, 440, 1950.

P. LEDOUX, III Congrès National des Sciences, Bruxelles, Vol. II, section 3, p. 137, 1950.

P. DUMÉZIL-CURIEN, *C. R.* 233, 1575, 1951 et *C. R.* 235, 1011, 1952.

d) Asymétrie.

M. SCHWARZSCHILD and M. P. SAVEDOFF, *Ap. J.*, 109, 298, 1949.

C. A. JEVAKIN, *C. R. Ac. Sc. U. R. S. S.*, 62, 191, 1948.

P. LEDOUX, *Bul. Cl. des Sc. Ac. Roy. Belgique*, 38, 5^e série, p. 352, 1952.

2) Variables d'amas.

R. F. SANFORD, *Ap. J.* 109, 208, 1949.

Th. WALRAVEN, *B. A. N.*, 11, 421, 1952.

3) Variables à longue période.

R. F. SANFORD, *Ap. J.*, 111, 270, 1950.

P. W. MERRILL, *J. R. A. S. Canada* 43, 181, 1952.

A. MCKELLAR and G.-J. ODGERS, *P. A. S. P.*, 64, 222, 1952.

4) Variables magnétiques.

H. W. BABCOCK, de nombreux articles dans *Ap. J.* et *P. A. S. P.* et notamment *Ap. J.*, 114, 1, 1949; un résumé intéressant dans *Nature*, 166, 249, 1950.

M. SCHWARZSCHILD, *An. Astr.* 12, 148, 1949.

G. GJELLESTAD, The Institute of Theoretical Astrophysics, Oslo, Report n° 1, 1950.

FERRARO and MEMORY, *The Observatory*, 72, 56, 1952.

N. STOYKO, *C. R.* 235, 122, 1952.

5) Variables du type de β Canis Majoris.

On trouvera un excellent résumé de la question tant au point de vue des observations que des idées avancées en vue de l'interprétation dans O. STRUVE, *An. Astr.*, 15, 157, 1952.

Pour plus de détails concernant l'application de la théorie des oscillations non-radiales à ce problème, voir

P. LEDOUX, *Ap. J.*, 114, 373, 1951.

6) Variables explosives.

E. SCHATZMAN, *Bul. Cl. Sc. Ac. Roy. Belgique*, 34, 5^e série, 828, 1948.

An. Astr., 14, 294 et 305, 1951.

Z. KOPAL etc. *Ap. J.*, 113, 193 et 496, 1951.

Enfin, certains résultats auxquels il a été fait allusion ici ont été présentés au cours du symposium sur les étoiles variables tenu à Rome à l'occasion du VIII^e Congrès de l'Union Astronomique Internationale et sont marqués dans le texte d'un astérisque. Un compte-rendu de ce symposium sera publié par les soins de l'Union.