

QU'EST-CE QU'UNE CEPHEIDE, QUELLE EST LA CAUSE DE LA RELATION PERIODE-LUMINOSITE ?

Une céphéide est une étoile variable dont les courbes de lumière et de vitesse radiale souvent asymétriques sont pratiquement l'image l'une de l'autre dans un miroir (voir figure).

Le prototype de la classe, δ Céphée fut découvert en 1784 par l'astronome amateur Goodricke et sa période est de 5 jours 8 heures 53 minutes 27,46 secondes. Cette grande précision qui se rapporte à une période moyenne est cependant significative car, d'une façon générale, les périodes des céphéides classiques qui s'échelonnent entre 2 et 40 jours sont très stables et leurs variations séculaires sont si faibles qu'elles n'ont pu jusqu'ici être détectées avec certitude.

La relation Période-Luminosité est une relation empirique découverte en 1912 par Miss Leavitt qui montra qu'il existait une corrélation étroite entre les périodes et les magnitudes apparentes des céphéides du Petit Nuage de Magellan. Comme toutes ces céphéides sont pratiquement à la même distance de nous, leurs magnitudes apparentes sont égales, à une constante près, à leurs magnitudes absolues. Pour fixer complètement la relation Période-Magnitude Absolue ou Période-Luminosité, il restait donc simplement à déterminer cette constante ou, si l'on veut, la distance du Petit Nuage de Magellan.

Cette dernière tâche s'est cependant révélée très ardue et la valeur de la constante obtenue par Shapley et utilisée pendant de nombreuses années a été l'objet depuis 1950 de diverses révisions liées à l'échelle des distances dans notre galaxie et dans l'Univers. A l'heure actuelle, la relation peut être représentée approximativement en termes de la luminosité L et de la période par la relation

$$\log L/L_{\odot} \cong 2,9 + \log P_j \quad (1)$$

où la période P_j est exprimée en jours et la luminosité du Soleil L_{\odot} a été introduite pour faciliter la discussion, beaucoup de grandeurs stellaires étant exprimées en termes des valeurs correspondantes pour le Soleil.

La forme de la courbe de lumière des céphéides et la relation entre cette dernière et la courbe de vitesse radiale montre que les variations de lumière ne peuvent être dues à des éclipses. L'interprétation de la courbe de vitesse radiale en termes du mouvement d'une des composantes d'une étoile double conduit à des caractéristiques si improbables que l'hypothèse de la nature binaire de l'étoile et les nombreuses théories

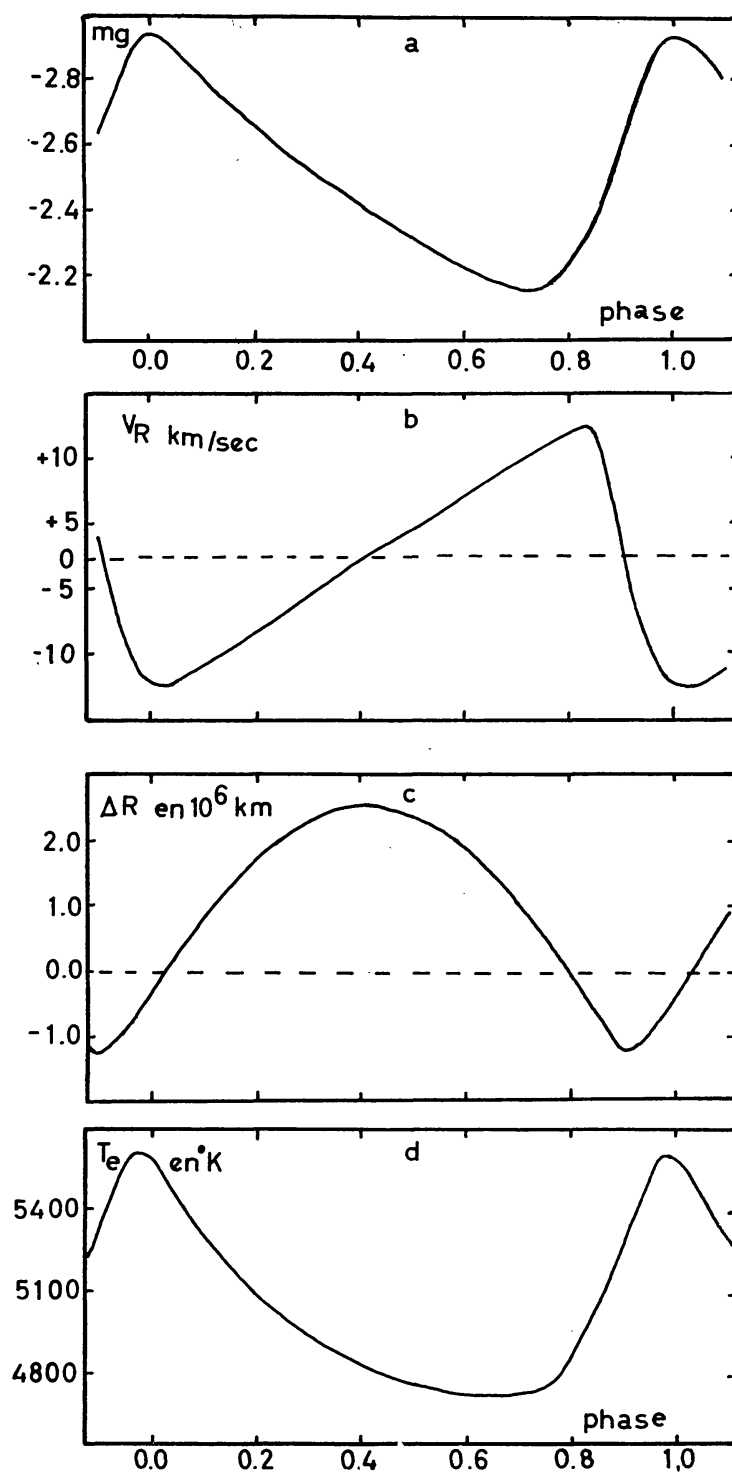


Fig. 1. — Variations de δ Céphée :

- a) courbe de lumière (magnitudes photographiques)
- b) courbe de vitesse radiale
- c) variations du rayon
- d) variations de la température effective T_e .

élaborées sur cette base doivent être rejetées comme le montra H. Shapley en 1914.

Dans le même article, Shapley suggéra que les variations observées sont dues réellement à une déformation périodique de l'étoile s'accompagnant de variations des paramètres physiques tels que la température de surface, le flux d'énergie par unité de surface et la gravité dans l'atmosphère. Ceci est en fait confirmé par l'observation qui révèle une variation périodique du type spectral fonction de ces paramètres (voir figure).

Vers 1917, Eddington s'attaqua théoriquement au problème en limitant sa discussion au cas où la déformation correspond à un mouvement purement radial durant lequel l'étoile garde à chaque instant la symétrie sphérique. Ainsi les vitesses radiales d'approches (négatives) observées correspondent à un mouvement d'expansion de l'étoile tandis que les vitesses radiales de récession (positives) correspondent à un mouvement de contraction.

Les corrélations mises en évidence récemment entre périodes et amplitudes confirment effectivement la symétrie sphérique du phénomène et la théorie généralement admise à l'heure actuelle est toujours celle d'Eddington, toutes les variations étant attribuées au mouvement périodique résultant de dilatations et de contractions successives.

Il est intéressant de noter que c'est à l'occasion de ce problème qu'Eddington posa les fondements modernes de la théorie de la structure interne des étoiles.

La théorie des pulsations radiales adiabatiques d'une étoile gazeuse (c'est-à-dire une oscillation au cours de laquelle chaque élément de masse se contracte et se dilate sans échanger d'énergie avec les éléments voisins) montre qu'en première approximation, la période est donnée par

$$P \cong \sqrt{I/(3\bar{\Gamma} - 4) (-W)} \quad (2)$$

où I est le moment d'inertie par rapport au centre

$$I = \int_0^M r^2 dm_i$$

W est l'énergie potentielle gravifique

$$W = - \int_0^M \frac{Gm(r) dm_i}{r}$$

et $\bar{\Gamma}$ la valeur moyenne du rapport des chaleurs spécifiques à pression et à volume constants pour le mélange de gaz et de radiation qui constitue l'étoile.

Nous ne possédons pas à l'heure actuelle de modèle stellaire vraiment satisfaisant pour les céphéides, la théorie de l'évolution stellaire n'étant pas assez avancée. Néanmoins, tout indique que $\bar{\Gamma}$ ne peut guère varier d'une céphéide à l'autre, le facteur $(3\bar{\Gamma} - 4)^{-1/2}$ variant au plus de 1 à 1,25 quand on passe des plus courtes périodes ($\cong 2$ jours) aux plus longues ($\cong 40$ jours). Le facteur $I/(-\bar{W})$ est proportionnel à l'inverse de la densité moyenne de l'étoile $\bar{\rho}$ mais le facteur de proportionnalité dépend de la structure du modèle adopté et notamment de son degré de condensation centrale qui peut être caractérisé, en première approximation, par le rapport $\rho_c/\bar{\rho}$ où ρ_c est la densité centrale. Etant donné l'incertitude sur les modèles, cette constante de proportionnalité ne peut être fixée à l'heure actuelle avec une très grande précision mais en tout cas, il est peu probable qu'elle varie appréciablement d'une céphéide à l'autre. On peut donc approximativement réécrire la relation (1) sous la forme

$$P \simeq C^{te} 1/\sqrt{\bar{\rho}}$$

Si les périodes P sont exprimées en jours et si nous introduisons la densité moyenne du Soleil $\bar{\rho}_\odot$, la constante est de l'ordre de 0,035 si bien que

$$P_j \simeq 0,035 \sqrt{\bar{\rho}_\odot/\bar{\rho}}$$

Cette relation peut encore s'écrire

$$P_j \simeq 0,035 \sqrt{M_\odot/M \cdot R^3/R_\odot^3} \quad (3)$$

où M est la masse et R le rayon. Si la relation Masse-Luminosité habituelle

$$L/L_\odot \simeq (M/M_\odot)^{3,82}$$

est applicable (ce qui, dans le cadre de la théorie actuelle de l'évolution stellaire, est vraisemblable) on peut transformer la relation (3) qui devient

$$P_j = 0,035 (L_\odot/L)^{0,13} (R/R_\odot)^{3/2}$$

ou

$$\log P_j = -1,46 - 0,13 \log (L/L_\odot) + 3/2 \log (R/R_\odot) \quad (4)$$

Pour obtenir une véritable relation Période-Luminosité, il faut encore éliminer (R/R_\odot) en fonction de (L/L_\odot) dans (4). Mais les céphéides occupent une bande étroite dans le diagramme de Hertzsprung-Russell ce qui implique une relation empirique entre la luminosité et la température T_e qui grâce à la relation $L = 4 \pi R^2 \sigma T_e^4$ peut être trans-

formée en une relation entre L et R qui peut s'écrire approximativement

$$\log L/L_{\odot} = 1,4 \log R/R_{\odot} + 1 \quad (5)$$

Grâce à (5), la relation (4) devient

$$\log L/L_{\odot} = 2,77 + 1,1 \log P_j \quad (6)$$

L'accord raisonnable que nous constatons entre (6) et la relation empirique (1) suggère que la théorie adiabatique de la pulsation radiale des céphéides donne bien le bon ordre de grandeur de leurs périodes, que les valeurs adoptées pour les paramètres \bar{T} et $\rho_c/\bar{\rho}$ sont aussi du bon ordre de grandeur et que la relation Masse-Luminosité habituelle leur est applicable. Cependant, ce n'est pas une justification théorique de la relation (1) car pour obtenir (6), nous avons dû recourir à une relation empirique supplémentaire entre L et R qui caractérise le lieu des céphéides dans le diagramme de Hertzsprung-Russell.

Ainsi, l'explication complète de la relation Période-Luminosité exigerait que nous découvrions la raison pour laquelle les céphéides se rencontrent justement dans cette étroite bande du diagramme de Hertzsprung-Russell. Autrement dit, pourquoi une étoile arrivant dans cette bande se met-elle à osciller alors que, de part et d'autre de cette région, elle est stable ?

Pour pouvoir répondre à cette question, il faut compléter la théorie des pulsations adiabatiques en tenant compte des termes non-adiabatiques : dissipation par friction qui tend à amortir l'oscillation, effets des réactions nucléaires qui tendent à l'amplifier, effets de la conduction radiative qui sont complexes surtout dans les couches extérieures où l'ionisation d'éléments abondants tels que l'hydrogène et l'hélium affecte le coefficient d'opacité d'une façon compliquée et augmente considérablement la capacité calorifique de ces couches. Dans des circonstances favorables, l'action de ces deux facteurs dans les couches extérieures peut se ramener à celle d'une valve qui se ferme à la compression provoquant une accumulation d'énergie dans l'étoile, énergie qui est libérée à l'expansion suivante au cours de laquelle la valve s'ouvre. L'étoile se conduit alors comme une machine thermodynamique capable de transformer de l'énergie calorifique, fournie ici en dernière analyse par les réactions nucléaires, en travail mécanique qui sert à amplifier l'oscillation.

En fait, il existe à présent des indications sérieuses qu'une telle instabilité vibrationnelle (c'est-à-dire amplification de l'oscillation) peut se produire dans la région du diagramme de Hertzsprung-Russell occupé par les céphéides. Toutefois, il reste à s'assurer que ce mécanisme n'excite que le mode fondamental et qu'il peut effectivement conduire à une oscillation d'amplitude finie limitée de l'ordre de grandeur observé.

P. LEDOUX.