Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 47 (1989)
Heft: 234

Artikel: Rencontres d'étoiles dans les amas globulaires
Autor: Meylan, Georges / Verbunt, Frank
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899059

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Rencontres d'étoiles dans les amas globulaires

GEORGES MEYLAN et FRANK VERBUNT

1. Introduction

Les astronomes observent et étudient les amas globulaires depuis maintenant plus de deux siècles, poursuivant les travaux de pionniers effectués par WILLIAM HERSCHEL (1738-1822) et son fils John Herschel (1792-1871).
Si les plus brillants de ces amas apparaissent visibles à l'oeil nu sous la forme d'une petite tache floue, leur beauté exceptionnelle ne nous est révélée qu'à l'aide d'un télescope (Fig. 1). Mais les amas globulaires ne sont pas seulement magnifiques. D'un point de vue purement scientifique, ils s'avèrent extrêmement utiles. Ils aident, par exemple, à développer et affiner la théorie de la structure interne et de l'évolution des étoiles, à déterminer, par rapport au système solaire, la direction et la distance du centre de notre Galaxie, à étudier le mode de formation de notre Galaxie.

Quant à l'étude des conséquences des mouvements, des rencontres, voire des collisions d'étoiles dans les amas globulaires eux-même, elle recèle des trésors dont ont entrevoit toute la richesse depuis quelques années seulement. Les différents paramètres décrivant la structure interne globale d'un système stellaire, en particulier la distribution des étoiles ainsi que leurs vitesses, sont déterminés par les innombrables rencontres à grandes distances. Du point de vue de la dynamique stellaire - étude du mouvement des étoiles en rapport avec les forces de gravitation qui en sont la cause -, les amas globulaires se différencient des galaxies par le fait que, à cause de leurs fortes densités stellaires, les rencontres entre deux étoiles y sont nombreuses. L'évolution dynamique des amas globulaires est ainsi accélérée et s'effectue en un laps de temps plus petit que leur âge. Ainsi, contrairement aux galaxies, dont l'évolution dynamique est très lente, les amas globulaires portent les traces indélébiles des conséquences d'un vieillissement dynamique précoce.

Dans les amas globulaires ayant les plus fortes densités centrales, les probabilités de rencontres et de collisions augmentent considérablement. La formation d'étoiles doubles s'avère possible, donnant naissance à des systèmes binaires très exceptionnels d'un point de vue astrophysique. Et il semblerait même que le phénomène de formation de binaires dans les parties centrales des amas globulaires gouverne les phases avancées de l'évolution dynamique globale, après l'effondrement de ces systèmes stellaires fascinants.

2. Evolution stellaire dans les amas globulaires

Lors de sa publication en 1888, le *New General Catalogue (NGC) of Nebulae and Clusters of Stars* répertorie 102 amas globulaires. Un siècle plus tard, ce nombre n'a augmenté que d'environ 50, et l'on estime actuellement à un peu moins de 200 le nombre total d'amas globulaires dans notre Galaxie, certains d'entres eux étant probablement obscurcis par les étoiles et la poussière du disque galactique, donc difficilement visibles. Ainsi, la plupart des amas globulaires de notre Galaxie, et parmi eux les plus riches, sont connus et baptisés depuis au moins cent ans. Ces amas, dont chacun ressemble à

Figure 1: Photographie de 47 Tucanae, un amas globulaire géant du ciel austral. Cette représentation en couleurs est le résultat composite de trois plaques en noir et blanc, centrées autour de trois longueurs d'onde différentes (3850 Å, 4950 Å et 6300 Å), prises par H.E. Schuster à l'aide du télescope Schmidt de l'Observatoire Européen Austral (ESO), situé à La Silla dans les Andes chiliennes. A cause de l'énorme contraste entre le centre très brillant et les parties extérieures très peu denses, une technique photographique utilisant un masque a permis de diminuer cette différence et de distinguer des étoiles individuellement sur toute la surface de l'amas.

un énorme essaim d'environ un million d'étoiles, sont répartis uniformément au dessus et au dessous du plan galactique, mais montrent une distribution non uniforme en longitude galactique, avec une concentration évidente dans une région du ciel centrée près de la constellation du Sagittaire (Ref. 1).

Au début du siècle de nombreuses étoiles variables, semblables à la fameuse étoile variable RR Lyrae, ont été découvertes dans beaucoup d'amas globulaires galactiques. Lors d'une étude maintenant classique, HENRIETTA LEAVITT (1868-1921), de Harvard, a montré que toutes les variables du type RR Lyrae possèdent à peu près la même luminosité intrinsèque. En comparant, dans un amas globulaire donné, la luminosité apparente moyenne de toutes les RR Lyrae qu'il contient avec leur luminosité intrinsèque, on peut déterminer la distance de cet amas. HARLOW SHAPLEY (1885-1972), de Harvard, a utilisé cette méthode afin de montrer que les amas globulaires sont distribués de façon sphérique autour d'un point situé dans la constellation du Sagittaire, à des milliers d'années-lumière du soleil. Utilisant et expliquant naturellement la concentration observée d'amas, il a donné ainsi les premières indications concernant la forme et la taille de notre Galaxie, dont le centre se situe, d'après les plus récentes déterminations, entre 7 et 9 kiloparsecs du soleil (1 parsec = 1 pc = 3,26 années-lumière). Les distances des amas globulaires au centre de la Galaxie s'échelonnent entre 2 et plus de 50 kiloparsecs.

Lorsque les premières mesures photoélectriques d'étoiles individuelles dans des amas globulaires ont pu être obtenues, au cours des années 50 par HALTON ARP et ALLAN SANDAGE,

alors au California Institute of Technology, les étoiles de tous les amas globulaires présentaient la même caractéristique: des températures de surface relativement basses. L'absence d'étoiles chaudes dans les amas globulaires peut être expliquée comme suit: toutes les étoiles d'un amas globulaire donné se sont formées plus ou moins simultanément, il y a de cela environ 15 milliards d'années. Selon la théorie de l'évolution stellaire, les étoiles les plus massives évoluent très rapidement, fusionnant leur hydrogène en hélium, puis leur hélium en éléments plus massifs, ceci jusqu'à la formation d'atomes de fer.

Approximativement 10 millions d'années après la période de formation stellaire, toutes les étoiles dont la masse initiale est supérieure à environ 8 M⊙ (1 M⊙ = 1 masse solaire ~ 2 10^{30} kg) ont déjà terminé leur évolution et ont subit une explosion au cours du stade de supernova, laissant leur noyau sous la forme d'une étoile à neutrons ou, pour les plus massives, d'un trou noir. La masse d'une étoile à neutrons s'élève à environ 1.4. M⊙, mais avec un diamètre de 20 km seulement. A de telles densités la matière ne peut exister essentiellement que sous la forme de neutrons, d'où le nom de ces étoiles extraordinairement denses.

Durant les milliards d'années qui suivirent, d'autres étoiles, un peu plus légères, ont elles aussi terminé leur évolution en se transformant en naines blanches, de masses comprises entre 0,5 et 1,4 M⊙ et dont les diamètres d'environ 15000 km sont comparables au diamètre terrestre. Les naines blanches les plus lourdes, provenant de progéniteurs lourds, consistent principalement en magnésium, en néon et en oxygène. Les naines blanches légèrement moins massives consistent en carbone et en oxygène, et les naines blanches les plus légères, avec des progéniteurs de type solaire, consistent en hélium. Les trous noirs, étoiles à neutrons et naines blanches, sortes de cendres puisque produits de la combustion nucléaire, sont communément appelés rémanents.

Dans les amas globulaires de notre Galaxie, toutes les étoiles dont la masse dépasse 0,8 M⊙ (environ) ont déjà terminé leur évolution. Comme le temps d'évolution d'une étoile de 0.8 M⊙ est d'environ 15 milliards d'années, cela permet de donner une limite inférieure à l'âge des amas globulaires. Ces derniers ont-ils tous exactement le même âge? Y a-t-il au contraire une dispersion s'étendant entre 12 et 19 milliards d'années? La réponse, incertaine, est l'objet de débats très actuels. Elle requière une compréhension plus détaillée de l'évolution des étoiles de faibles masses. Mentionnons que, dans les spectres des étoiles d'amas globulaires, les raies d'éléments avec des numéros atomiques plus grands que celui de l'hélium sont moins intenses que dans des spectres similaires d'étoiles plus jeunes. Ceci indique que ces éléments lourds - les astronomes les appellent «métaux» par un malencontreux abus de language - ont été plus rares lors de la formation des amas globulaires que ce n'est le cas actuellement.

Les étoiles avec des masses inférieures à 0.8 M⊙ sont encore, en leur centre, en train de convertir de l'hydrogène en hélium. Dans un diagramme représentant la luminosité en fonction de la température de surface, de telles étoiles ne sont pas réparties au hazard mais le long d'une courbe diagonale, appelée séquence principale, découverte et étudiée pour la première fois par le danois EJNAR HERTZSPRUNG (1873-1967) et l'américain HENRY RUSSELL (1877-1957). Ce diagramme fondamental de l'évolution stellaire est dit de Hertzsprung-Russell ou plus simplement HR (Fig. 2).

Lorsque, en leur centre, la fusion de l'hydrogène s'arrête par manque de combustible, ces étoiles quittent la séquence principale pour évoluer vers la partie supérieure droite du diagramme HR, subissant une expansion de leur enveloppe jusqu'à ce que leurs rayons égalent environ 100 fois le rayon solaire. Ces étoiles, appelées géantes rouges, se meuvent dans le diagramme HR le long de la branche des géantes (Fig. 2). A cause de leur grande luminosité, elles peuvent être vues à de très grandes distances. Mais les géantes rouges voient leurs enveloppes s'évaporer par un processus dit de perte de masse. Seul leur coeur dense demeure; mis à nu il se refroidit lentement pour se transformer en une naine blanche. En évaluant, dans le diagramme HR, les nombres de géantes en différents endroits le long de la branche des géantes on peut en dériver le degré de rapidité de leur évolution: aux endroits où l'évolution est lente - près de la séquence principale - on observe beaucoup plus de géantes que dans des régions à évolution très rapide - par exemple près du sommet de la branche des géantes rouges.

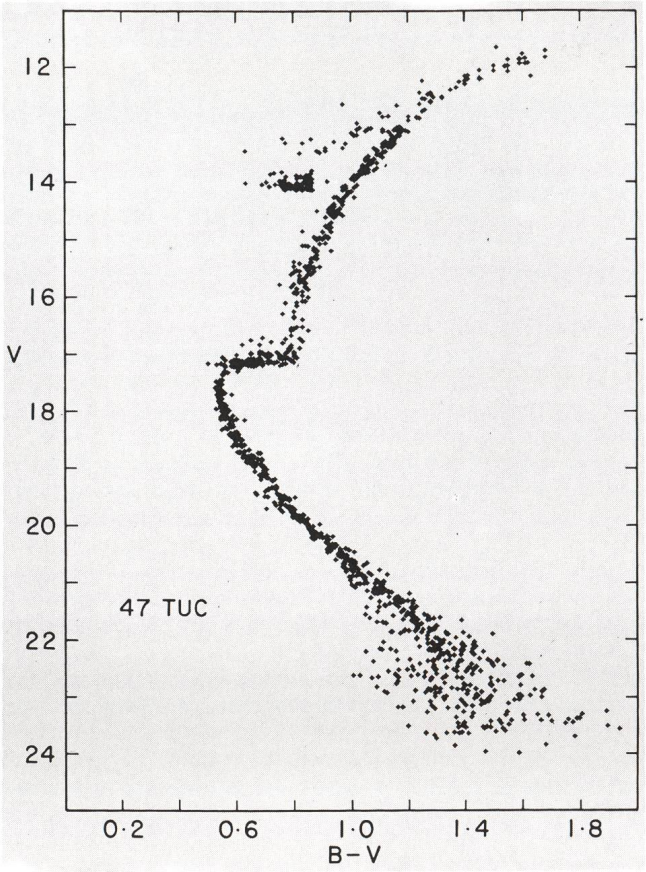


Figure 2: Diagramme couleur-magnitude (pendant observationnel du diagramme théorique de Hertzsprung-Russell) concernant l'amas globulaire 47 Tucanae, obtenu par Jim Hesser et ses collègues canadiens. Les différentes parties du diagramme, correspondant à des phases successives de l'évolution stellaire (séquence principale, branches horizontale, asymmptotique, des sous-géantes et des géantes) sont clairement visibles. Aucune naine blanche n'a encore été observée dans un amas globulaire. Les données photographiques concernant les étoiles brillantes ont été combinés avec les données CCD concernant la séquence principale. Dans un désir de clarté, le nombre d'étoiles sur la séquence principale a été fortement diminué.

Les étoiles visibles dans les photographies d'amas globulaires (Fig. 1) sont pour la plupart des géantes rouges, d'où la teinte dominante de la reproduction en couleurs. Ce n'est que depuis peu, grâce à la mise au point de nouveaux détecteurs très sensibles appelés CCD (pour Charge Coupled Device),

que les astronomes détiennent les moyens d'étudier les étoiles faibles du bas de la séquence principale. Ainsi les géantes et plus récemment les étoiles de la séquence principale peuvent être observées et recensées directement. Par contre les naines blanches et les étoiles à neutrons demeurent encore invisibles (quelques candidats au statut de naines blanches ont été détectées dernièrement lors d'observations avec CCD, mais nécessitent une confirmation spectroscopique). Leurs quantités sont pour le moment encore estimées par extrapolation à partir du nombre d'étoiles sur la séquence principale. Par exemple, si un amas contient 100000 étoiles de masses égales à 0.4 M⊙. et 50000 de 0.8 M⊙, on peut estimer brutalement qu'au moment de la formation, il y avaient 25 000 étoiles de masses égales à 1.6 M⊙, 12 500 de 3.2 M⊙, et ainsi de suite. Ces nombres de progéniteurs donnent directement les nombres de naines blanches et d'étoiles à neutrons formées dans l'amas par suite de l'évolution de ces étoiles massives.

Toutes les naines blanches restent au sein de l'amas qui les a vues naître, évoluer et mourir, par contre la fraction d'étoiles à neutrons qui demeurent dans un amas se révèle très incertaine pour deux raisons. Premièrement, les progéniteurs d'étoiles à neutrons ont des masses environ dix fois plus grandes que les masses des étoiles actuellement visibles sur la séquence principale, et extrapoler sur de telles différences comporte de grandes incertitudes. Secondement, il apparaît, à partir des observations de pulsars radio dans le disque galactique, que beaucoup d'étoiles à neutrons naissent avec de grandes vitesses, de l'ordre de 100 à 400 km/s. Seules 10 % d'entre elles environ acquièrent des vitesses inférieures à 30 km/s, valeur correspondant à la vitesse d'évasion d'un amas globulaire typique. Si les étoiles à neutrons dans un amas globulaire naissaient avec des vitesses similaires à celles des pulsars dans le disque, seules 10 % d'entre elles resteraient prisonnières du champ de gravitation de l'amas.

3. Variables cataclysmiques et binaires X de faibles masses

Dès le début de ce siècle, la quête constante d'étoiles variables dans les amas globulaires a fourni de nombreux candidats. La plupart se sont avérés de simples étoiles pulsantes, dont les variations en lumière proviennent de changements dans leur taille et dans leur température. Une autre sorte de variables, appelées binaires à éclipse, sont des étoiles binaires dont les variations régulières en luminosité proviennent du fait qu'au cours de chaque orbite une des deux étoiles passe devant l'autre et l'éclipse momentanément. Fait surprenant, jusqu'à ce jour, malgré les récentes améliorations dues à l'utilisation des CCD, aucune binaire à éclipse n'a été découverte dans aucun amas globulaire (avec la très récente exception de ω Centauri lequel contient un candidat qui nécessite encore confirmation).

Evidemment, pour qu'il y ait éclipse, l'observateur doit jouir d'une position privilègiée, ce qui est rarement le cas. Lorsque les deux composantes d'un système double ne s'éclipsent pas mutuellement, le caractère binaire de l'étoile peut être révélé grâce au spectre. Les raies présentes dans ce dernier se trouvent translatées par effet Doppler, alternativement vers le bleu et le rouge, trahissant le mouvement orbital. De telles étoiles s'appellent binaires spectroscopiques et n'ont été que très récemment mises en évidence dans quelques amas globulaires, par Michel Mayor et ses collaborateurs à l'Observatoire de Genève et par David Latham et son groupe à Harward. Cette étude montre que le nombre de binaires observées dans les amas globulaires est nettement inférieur à ceux obtenus dans les amas ouverts et le champ.

Quatre étoiles variables, de la classe des variables cataclysmiques, ont été observées dans des amas globulaires. Deux d'entre elles sont des novae naines, les deux autres des novae, et leurs découvertes respectives ont été annoncées en 1938, 1941, 1949 et 1964. Ce n'est que dans les années cinquante que les variables cataclysmiques ont été clairement identifiées comme étant des étoiles binaires. Dans ce genre de système, une étoile de faible masse de la séquence principale perd continûment de la matière récupérée par son compagnon dense, lequel est une naine blanche. On parle alors de transfert de masse par accrétion. Pendant que cette matière tombe en décrivant des spirales autour de la naine blanche, en formant un disque d'accrétion, les particules qui la constituent s'échauffent graduellement et émettent une importante quantité de rayonnements ultraviolets et X.

Dans les novae naines, l'apport de masse vers la naine blanche est variable et ces systèmes augmentent occasionnellement en luminosité lorsque le flux de matière s'accroît. Ces éruptions peuvent centupler la luminosité optique, ceci durant environ une semaine. Dans le cas des novae, la matière régulièrement ajoutée à la naine blanche forme une couche à la surface de cette dernière. Dans certains systèmes, les atomes d'hydrogène contenus dans cette couche fusionnent constamment en créant de l'hélium, alors que dans d'autres systèmes, l'hydrogène s'accumule durant une longue période et brûle soudainement en une seule fois. Durant ces éruptions, la luminosité optique devient plusieurs centaines de fois plus grande et nécessite plusieurs mois avant de retrouver son niveau antérieur. De récentes observations avec CCD ont confirmé la nature des deux novae naines, deux systèmes relativement éloignés des centres des amas globulaires auxquels ils appartiennent (Ref. 2 et 3).

L'avènement des satellites capables d'observer les rayons X a marqué le début d'une ère nouvelle. Ces satellites, dont le premier en 1976 fut UHURU, ont découvert dans notre Galaxie, une centaine de sources X brillantes environ, appelées binaires X de faibles masses. La moitié d'entre elles environ sont des pulsars X, c'est-à-dire des étoiles à neutrons avec des champs magnétiques intenses, accrétant de la matière provenant de compagnons de masses supérieures à 10 M⊙. L'autre moitié est constituée de systèmes similaires aux variables cataclysmiques, à la différence près que l'étoile qui reçoit la matière n'est pas une naine blanche mais une étoile à neutrons. A cause de l'extrême compacité de l'étoile à neutrons, la matière spiralant dans le disque d'accrétion émet beaucoup plus d'énergie, faisant de ce genre de binaires de très puissants émetteurs X.
La surprise a été grande lorsque les positions dans le ciel de ces binaires X de faibles masses ont été connues avec précision: pas moins de dix d'entre elles se trouvent dans des amas globulaires! Pour saisir l'ampleur de l'étonnement des chercheurs, il faut réaliser que notre Galaxie possède une masse totale d'environ 10^{11} M⊙, tandis que la masse de tous les amas globulaires de notre Galaxie s'élève à environ 10^{7}M⊙. Ainsi, en tenant compte de ces deux masses totales, on s'attendait à ce que, des 50 binaires X de faibles masses observées dans notre Galaxie, 0.005 d'entre elles seulement se trouvent dans un amas globulaire, et non pas 10!

La nature des sources X dans les amas globulaires est établie par l'apparition régulière de sursauts dans l'émission X, à l'exception de celle située dans M15. Observés pour la première fois dans la source appartenent à l'amas globulaire NGC 6624 (Fig. 3), à l'aide du satellite hollandais ANS à rayonnement X, ces sursauts X se caractérisent par de soudaines augmentations de la luminosité X, jusqu'à cent fois la

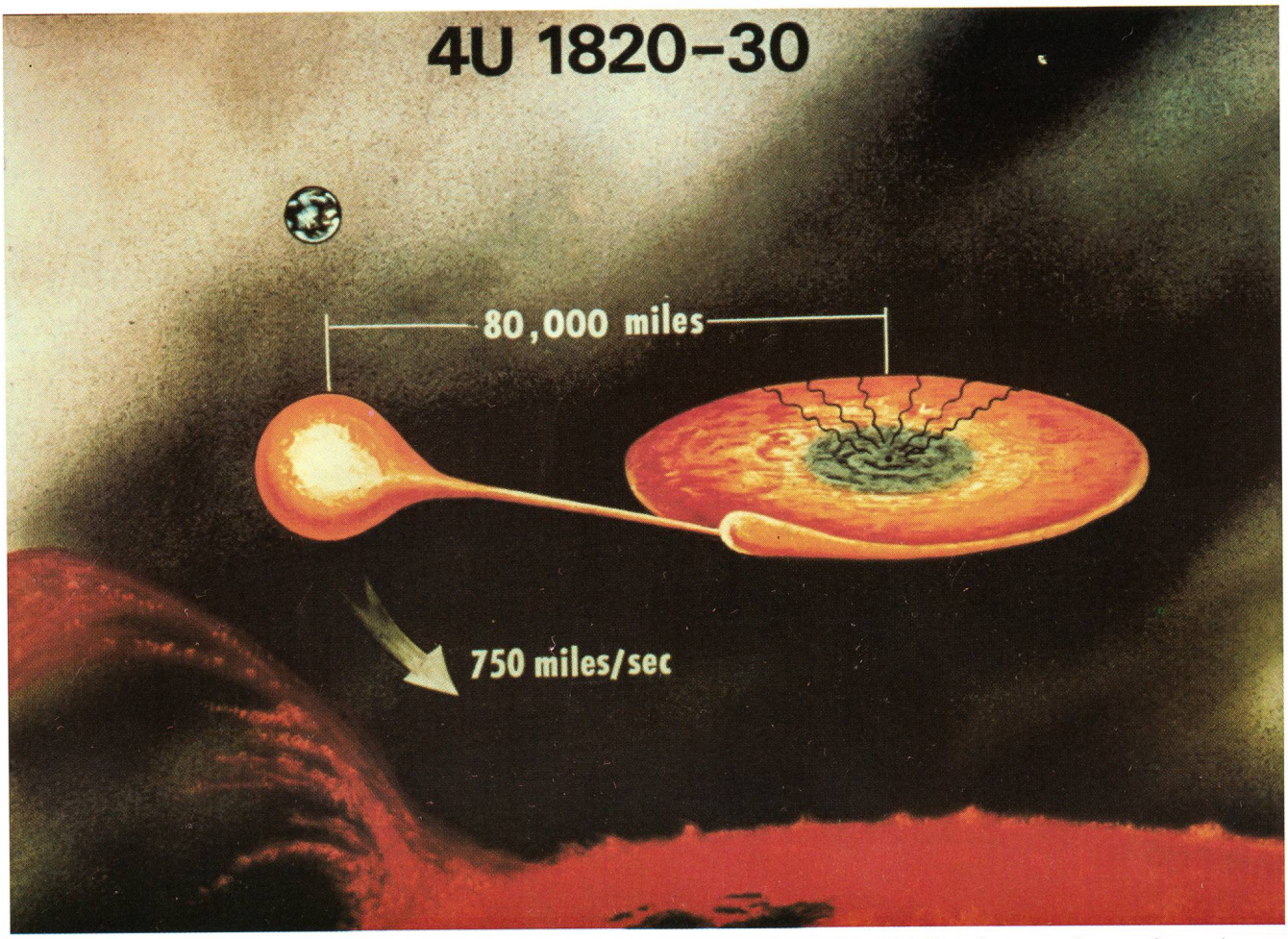


Figure 3: Représentation artistique du système binaire situé au centre de l'amas globulaire NGC 6624. C'est dans ce système que le premier sursaut X a été observé. Une naine blanche transfert de la masse au profit d'une étoile à neutrons. Cette matière tombe sur l'étoile à neutrons en décrivant des spirales, s'échauffe et émet des photos, de plus en plus énergétiques à mesure que la matière s'approche du bord intérieur du disque. La période de révolution de la naine blanche autour de l'étoile à neutrons est de 11 minutes seulement; c'est la plus courte période connue. A titre de comparaison, le système terre-lune et le soleil sont dessinés à la même échelle. (Figure prêtée par William Priedhorsky du Los Alamos National Laboratory).

valeur initiale. Ils durent environ dix secondes et ont lieu à intervalles de quelques heures. Ces sursauts X - émissions X explosives - peuvent être compris de la façon suivante: la matière accrétée par l'étoile à neutrons se répartit sur sa surface en une couche égale. Les atomes d'hydrogène dans cette couche fusionnent immédiatement en créant des atomes d'hélium. Dans certains de ces systèmes, l'hélium se transforme en carbone, azote et oxygène, mais dans beaucoup d'autres, l'hélium s'accumule pendant un certain temps pour brûler soudainement en un éclair. Ces émissions X explosives sont aux binaires X de faibles masses (contenant une étoile à neutrons) ce que les éruptions sont aux variables cataclysmiques (contenant une naine blanche). Les différences en échelle de temps provennient des différences en gravité, donc en densité à la surface des étoiles à neutrons et des naines blanches, induisant différentes réactions nucléaires.

L'explication du grand nombre de binaires X de faibles masses dans les amas globulaires a été proposée en 1975 par Fabian, Pringle et Rees (Ref. 4). A cause de la concentration d'un grand nombre d'étoiles dans le petit volume du noyau de l'amas, la distance moyenne entre les étoiles est assez petite pour que les rencontres proches entre étoiles deviennent relativement communes. Supposons qu'une étoile à neutrons approche une autre étoile, soit une étoile de la séquence principale, soit une étoile géante. L'attraction gravitationnelle de l'étoile à neutrons provoque une déformation de l'autre étoile. Cette déformation, qui croît rapidement lorsque la distance entre les deux étoiles décroît, consomme de l'énergie qui provient de l'énergie cinétique relative des deux étoiles. Pour une séparation inférieure à environ trois fois le rayon de l'étoile déformée, la quantité d'énergie extraite du mouvement relatif entre les deux étoiles et consommée par le processus de déformation devient assez grande pour empêcher l'étoile déformée de s'échapper du champ de gravitation de l'étoile à neutrons: une nouvelle binaire est formée. Sitôt que de la matière s'écoule de l'étoile normale vers l'étoile à neutrons, la binaire devient une source X.

Des estimations grossières indiquent que, dans le noyau d'un amas dense, la fréquence de telles rencontres est faible: une chaque milliard d'années. Si la phase d'émission X intense (c'est-à-dire de transfert de masse) dure environ un milliard d'années, temps après lequel la masse de l'étoile donneuse est épuisée, on s'attend à trouver un source X brillante dans chacun des 10 amas globulaires dont les noyaux sont assez denses.

Mais toutes ces prédictions s'avèrent imprécises, d'une part parce que le nombre d'étoiles à neutrons présentes dans le noyau d'un amas est incertain et d'autre part parce que la durée réelle de la phase d'émission X intense est également mal connue. On peut dire tout au plus, au vu des incertitudes appréciables, que le nombre observé de binaires X de faibles masses est en accord avec les prédictions actuelles.

4. Scénarios de formation d'étoiles binaires

Quels genres de binaires s'attend-on à voir se former? Nous décrivons dans ce qui suit les différents processus, représentés schématiquement dans la figure 4 (Ref. 5).

Considérons en premier lieu les rencontres proches entre une étoile à neutrons et une étoile de la séquence principale (moitié supérieure de la figure 4). Si l'étoile à neutrons heurte de plein fouet l'étoile de la séquence principale, cette dernière est probablement complètement disloquée. Ce genre de choc frontal ne mène évidemment pas à la création d'une binaire. Par contre, si l'étoile à neutrons s'approche étroitement de l'étoile de la séquence principale, mais sans la toucher directement, une binaire peut se former, avec une période orbitale comprise entre 2 et 8 heures. Une binaire aussi serrée émet des ondes de gravitation, provoquant un lent rapprochement des deux étoiles, conformément à avec la théorie de la Relativité Générale d'Einstein. En deçà d'une certaine distance, l'étoile à neutrons exerce un attraction sur la matière de la face la plus proche de son compagnon qui est plus forte que l'attraction du compagnon lui-même. Dans de telles conditions, un transfert de masse s'amorce et une source de rayonnement X s'allume.

En second lieu, considérons les rencontres proches entre une étoile à neutrons et une géante (moitié inférieure de la figure 4). Si l'étoile à neutrons heurte directement la géante, son orbite résultante se trouve à l'intérieur de l'enveloppe ténue de la géante. A mesure que le noyau de la géante et l'étoile à neutrons orbitent l'un autour de l'autre, la friction due à la masse de l'enveloppe entraîne les deux corps denses à spiraler l'un vers l'autre, jusqu'à ce que l'énergie libérée par la friction soit suffisante pour expulser toute l'enveloppe. Le noyau de la géante se refroidit et devient une naine blanche dont l'orbite autour de l'étoile à neutrons est bouclée en quel-

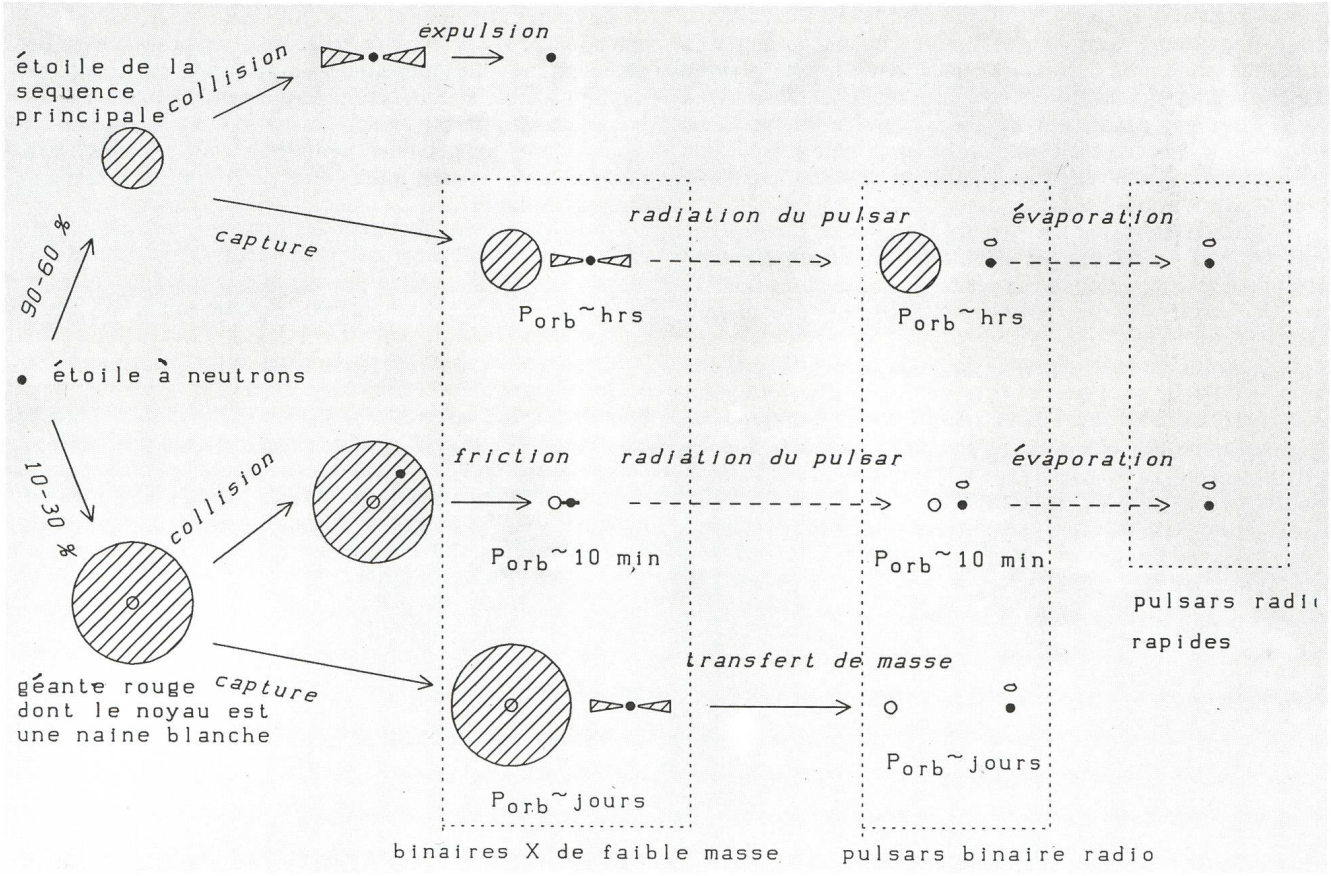


Figure 4: Sont représentés dans cette figure, les différents types de collisions qu'une étoile à neutrons peut subir dans un amas globulaire, ainsi que leurs développements ultérieurs. Moitié supérieure: Si l'étoile à neutrons heurte directement une étoile de la séquence principale, cette dernière est complètement détruite, mais une approche moins directe peut mener à la formation d'une étoile binaire, dont la période vaut quelques heures.

Moitié inférieure: Si l'étoile à neutrons heurte directement une étoile géante, la friction du mouvement en spirales de l'étoile à neutrons dans l'enveloppe de la géante peut freiner l'étoile à neutrons. L'enveloppe chauffée est expulsée, et le noyau de la géante - une naine blanche - forme avec l'étoile à neutrons une binaire très serrée, avec une période orbitale de quelques minutes. Une approche moins directe peut aussi mener à la formation d'une étoile binaire, mais de plus longue période, comprise entre 0.5 et 150 jours.

De façon générale, le transfert de masse vers l'étoile à neutrons provoque une émission abondante de rayons X. Les collisions peuvent créer des binaires X de faibles masses, avec des périodes orbitales comprises entre quelques minutes et 150 jours. Une fois le transfert de masse terminé, l'étoile à neutrons peut apparaître sous la forme d'un pulsar radio, si sa rotation est assez rapide. Dans les binaires de périodes orbitales courtes, le pulsar peut évaporer son compagnon et terminer sa vie en solitaire.

ques minutes! Dans cette binaire, les ondes de gravitation induisent également un transfert de masse de la naine blanche vers l'étoile à neutrons. Si par contre l'étoile à neutrons frôle la géante sans toucher l'enveloppe, une binaire peu serrée se forme, avec une période orbitale plus longue qu'un jour. Dans une telle binaire, le transfert de masse est la conséquence naturelle de l'expansion de la géante à mesure qu'elle évolue le long de la branche des géantes (Fig. 2). Du fait que la géante est moins massive que l'étoile à neutrons, la conservation du moment angulaire provoque un accroissement de la distance entre les deux étoiles pendant le transfert de masse. Lorsque toute l'enveloppe de la géante est transferée, il reste alors une binaire peu serrée constituée d'une naine blanche et d'une étoile à neutrons, avec une orbite lâche dont la période se situe entre dix et mille jours. La naine blanche dans un tel système est d'un type spécial. Le noyau d'une géante isolée voit sa masse croître au fur et à mesure que cette dernière évolue. A la fin de l'évolution de la géante, son noyau - une naine blanche - possède une masse d'environ 0.6 M☉. Toutefois, lorsque cette évolution se trouve raccourcie par la perte de l'enveloppe, transférée à un compagnon dense, la masse de la naine blanche ne peut pas augmenter jusqu'à une telle valeur. Ainsi, pour une géante capturée sitôt après qu'elle a quitté la séquence principale, la binaire finale possède une période d'environ dix jours et contient une naine blanche d'environ 0.2 M☉. Pour une géante plus évoluée, capturée lorsqu'elle se trouve sur la branche des géantes, la binaire finale possède une période de quelques centaines de jours et contient une naine blanche d'environ 0.3 M☉.

Il apparaît donc que les captures d'étoiles de la séquence principale et de géantes par des étoiles à neutrons peuvent créer dans les amas globulaires des binaires à rayonnement X, avec des périodes comprises entre quelques minutes et un millier de jours.

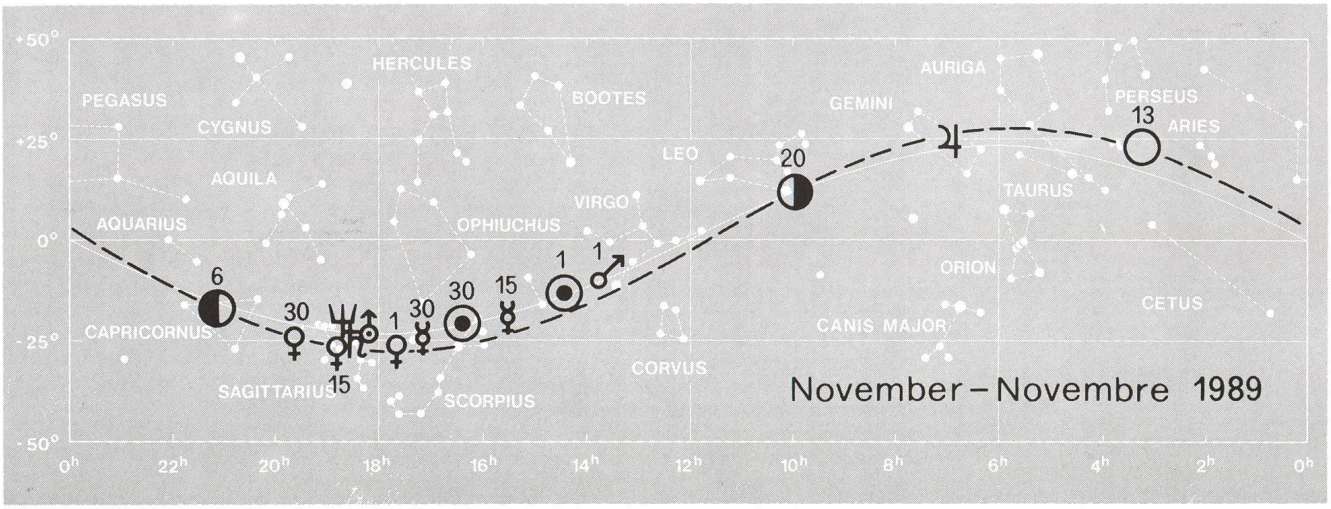
Du fait que la majeure partie de la lumière émise par une binaire X de faible masse provient du disque d'accrétion, les périodes orbitales de tels systèmes sont difficile à détecter. Ce n'est qu'après des observations longues et ardues, que les périodes orbitales de deux binaires X dans des amas globulaires ont été déterminées, ceci en 1987.

La première période orbitale a été obtenue lorsque les astronomes travaillant avec le satellite européen EXOSAT ont remarqué des variations régulières dans le flux X, de période égale à 665 secondes, provenant de la source située dans NGC 6624 (Fig. 3). Un réexamen des observations précédemment obtenues par le satellite américain SAS-3 a démontré que cette période a été constante durant ces dix dernières années, avec une précision meilleure qu'un dix millionième. Une telle précision dans la périodicité ne peut avoir son origine que dans un mouvement orbital (Ref. 6 et 7). Le scénario décrit ci-dessus, de collision avec pénétration d'une étoile à neutrons dans l'enveloppe d'une géante a été élaboré (Ref. 8) afin d'expliquer la formation de ce système.

La découverte de l'autre période résulte de la persévérance de l'astronome français MICHEL AURIÈRE et de ses collègues (Ref. 9). Surmontant le découragement naturel face à l'énorme densité d'étoiles dans le noyau d'un amas globulaire, il a entrepris de déterminer la contrepartie optique de la source X contenue dans le noyau de M15, et a découvert une étoile ultraviolette variable, qui s'est avérée présenter une période de 8.5 heures, simultanément en luminosité et dans le déplacement des raies spectrales. Postérieurement, les observations X ont montré l'existence d'une périodicité, également de 8.5 heures, permettant d'identifier sans aucun doute l'étoile ultraviolette avec la binaire X. De la période orbitale, on peut déduire que l'étoile qui perd de la masse en faveur de son compagnon semble être une étoile légèrement évoluée, probablement une sous-géante.

Jusqu'à ce jour, aucune période orbitale n'a été observée dans aucune des huit autres sources X contenues dans des amas globulaires.

Dans les amas globulaires, les densités stellaires les plus grandes se situent dans les parties centrales - le noyau - et décroissent rapidement à mesure que la distance au centre augmente. Les forces de gravitation induisent le fait que les étoiles les plus massives possèdent les vitesses les plus petites, contrairement aux étoiles plus légères qui acquièrent les vitesses les plus grandes. En conséquence, les étoiles les plus massives, c'est-à-dire les étoiles à neutrons, les naines blanches massives et les géantes, se concentrent plus vers le centre de l'amas que les étoiles plus légères de la séquence principale. Ce phénomène s'appelle ségrégation des masses. Comme pratiquement tous les processus de capture se produisent dans le noyau, la ségrégation des masses renforce les phénomènes de



captures dans lesquels les étoiles à neutrons et les géantes sont impliquées. Ceci aide à expliquer pourquoi les deux binaires X dont les périodes sont connues résultent de rencontres proches entre une étoile à neutrons et une géante (Ref. 10).

(suite dans ORION 235)

Références

1. On trouvera une vue générale de la recherche concernant les amas globulaires dans les comptes rendus de deux symposiums de l'Union Astronomique Internationale: IAU Symp # 113, *Dynamics of Star Clusters,* editors: J.GOODMAN and P.HUT (Dordrecht: Reidel), 1985, et IAU Symp # 126, *Globular Clusters Systems in Galaxies*, editors: J.E.GRINDLAY and A.G.D. PHILIP (Dordrecht: Kluwer Academic), 1988; une excellente monographie résume la théorie: L.SPITZER *Dynamical Evolution of Globular Clusters* (Princeton: University Press), 1987; une vision, maintenant plus historique, est donnée dans le papier de revue de H.C. ARP dans *Galactic Structure,* editors: A.BLAAUW and M.SCHMIDT (Chicago: University Press), 1965, p. 401.
2. AHARA, M.M. MOFFAT, A.F.J. & POTTER, M. 1987, *Astron.J.*, 94, 357.
3. MARGON, B. & DOWNES, R.A. 1983, *Astrophys. J.*,274, L31.
4. FABIAN, A.C., PRINGLEJ.E. & REES, M.J. 1975, *Mon. Not. Astron. Soc.,* 172, 15P.
5. VERBUNT, F. 1988, in *The Physics of Compact Objects, Theory vs. Observation*, editors: N.E. White and L. Fillipov (Oxford: Pergamon Press) pag. 529, and references therein.
6. STELLA, L., PRIEDHORSKY, W. & WHITE, N.E. 1987, *Astrophys. J.*312, L17
7. MORGAN, E.H. REMILLARD, R.A. & GARCIA, M.R. 1988, *Astrophys. J.,* 324, 851
8. Verbunt, F. 1987, *Astrophys. J.*, 312, L25.
9. ILOVAISKY, S.A. AURIÈRE, M.CHEVALIER, C. KOCH-MIRAMOND, L. CORDONI, J.P. & ANGEBAULT, L.P. 1987, *Astron. Astrophys.,* 179, L1.
10. VERBUNT, F. & MEYLANG. 1988, *Astron.Astrophys.,* 203, 297.

F. VERBUNT
Astronomical Institute
Postbox 80 000
3508 TA Utrecht
Holland

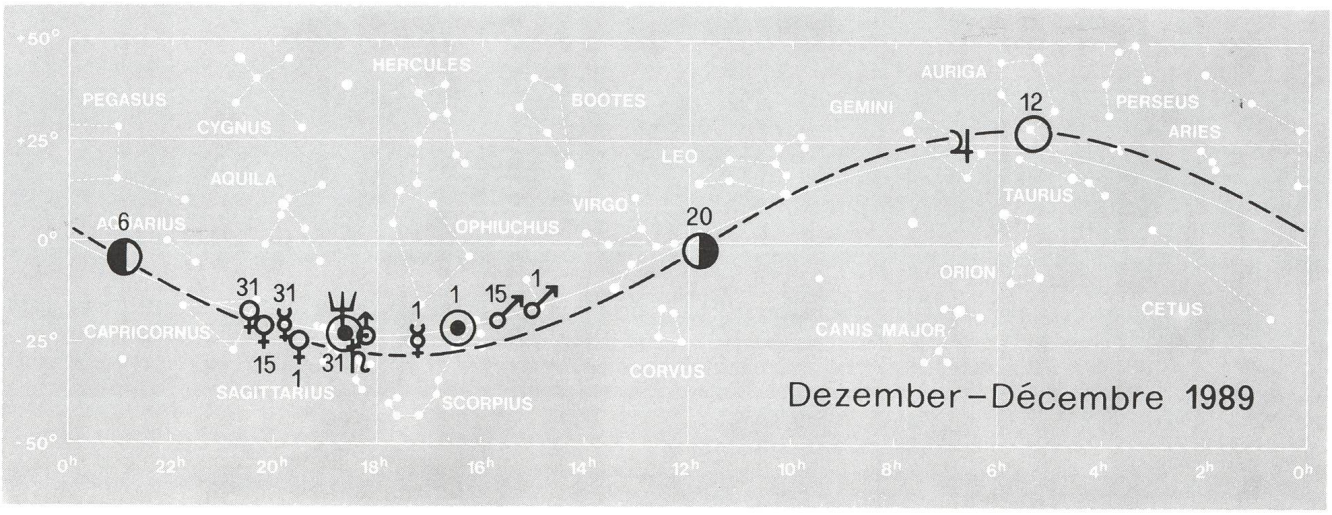
Dr. GEORGES MEYLAN
Space Telescope Science Institute
Homewood Campus
3700 San Martin Drive
Baltimore MD 21218 USA

ph. (301) 338-4766 mon bureau
ph. (301) 338-4955 ma secrétaire

BITNET address: MEYLAN©STSCI
DECNET address: SCIVAX::MEYLAN

ASTROPHOTO

Petit laboratoire spécialisé dans la photo astronomique noir et blanc, et couleur. Pour la documentation et liste de prix, écrire ou téléphoner à:

Kleines Speziallabor für Astrofotografie schwarzweiss und farbig. Unterlagen und Preisliste bei:

Craig Youmans, ASTROPHOTO, 1085 Vulliens. Tél. 021/9054094