

**SOCIETE
ASTRONOMIQUE
DE LYON**



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 6 — 1976

Notre couverture :

Nébuleuse America.

Dans la Constellation du Cygne, cette nébuleuse appelée ainsi à cause de sa forme, se trouve dans la Voie Lactée.

C'est une nébuleuse gazeuse, la luminosité des gaz est excitée par des étoiles chaudes. Remarquez la faible densité des étoiles en certaines régions où se trouvent des poussières.

LA RELATIVITÉ

par M. Paturel - Astronome à l'Observatoire

HISTORIQUE :

Le principe de relativité n'a pas été inventé par Einstein puisque Galilée, déjà, l'avait adopté ; pour la mécanique, il est d'application courante, comme le montre l'exemple du voyageur dans un compartiment de train, ou dans le salon d'un paquebot voguant sur une mer d'huile. (Il nous est tous arrivé, alors que notre train se mettait en mouvement dans une gare, de nous demander un instant si c'était notre wagon ou le voisin qui bougeait). Il a même été formulé très exactement par Newton en 1687 : « Les mouvements d'un corps dans un espace donné sont identiques, que cet espace soit au repos ou qu'il se meuve uniformément en ligne droite ». Ce qui signifie par exemple que le passager du paquebot, si son salon est dépourvu de hublot, peut abandonner tout espoir de trouver une expérience mécanique lui indiquant si le paquebot est à l'ancre ou s'il navigue en ligne droite par très beau temps.

Les physiciens ont cherché, Newton entre autres, à distinguer le mouvement relatif du mouvement absolu, lequel nécessitait l'existence, très loin dans l'univers, d'un objet de référence absolument immobile. Assez flou à l'époque de Newton, où il s'identifiait plus ou moins à l'omniprésence divine, il s'est finalement précisé au point de devenir tout simplement « l'espace » dans lequel évoluent les objets de l'univers, espace qui prenait ainsi une certaine réalité physique. Au XIXe siècle, la théorie ondulatoire de la lumière semblait apporter de l'eau au moulin newtonien ; il fallait que l'espace ait une certaine substance pour servir de support aux ondes lumineuses dans le vide. On l'appela « l'éther » et la théorie électromagnétique de Maxwell acheva de consacrer le principe. On disposait donc d'un bon corps de référence qui remplissait tout l'univers, qualité bien agréable. Une grande ombre se profilait sur ce tableau idyllique : on n'avait jamais pu prouver l'existence de cet « éther ».

En 1881, Michelson et Morley entreprirent de mettre en évidence, si possible, cet éther insaisissable.

Ils construisirent pour cela un appareil nommé interféromètre, servant à analyser les ondes lumineuses, et qui par son principe même aurait été extrêmement sensible aux variations de la vitesse de la lumière.

La vitesse de la Terre sur son orbite étant de 30 km/s, la vitesse des ondes lumineuses se propageant dans l'éther devait varier apparemment de la même quantité, selon qu'on la mesurait dans le sens du « vent d'éther » ou perpendiculairement à celui-ci, d'après le principe bien connu de l'addition des vitesses. Or les mesures successives, de plus en plus précises, donnèrent toujours un résultat négatif. On chercha toutes sortes d'explications, par exemple en invoquant un entraînement de l'éther au voisinage de la Terre par effet de couche limite ; les physiciens s'arrachaient les cheveux, leur indispensable éther devenait un monstre embarrassant : infiniment rigide, se laissant pénétrer sans aucun frottement par les corps en mouvement, et suffisamment visqueux pour donner des effets de couche limite ! De plus, à la réflexion, on s'aperçut que l'effet d'entraînement de l'éther interdisait le phénomène de l'aberration des étoiles fixes qui était pourtant bien réel. Lorentz trouva une solution mathématique à ce dilemme en introduisant un effet de contraction des objets matériels dans le sens du vent d'éther.

Si l est la longueur d'un objet quand on le mesure au repos, sa longueur l' mesurée quand il passe devant nous en se déplaçant à la vitesse v dirigée dans le sens de cette longueur est donnée par :

$$l' = l \cdot \alpha \quad \text{si} \quad \alpha = \sqrt{1 - (v/c)^2} \leq 1$$

On essaya de mettre cette contraction en évidence, sans résultat. Cette nouvelle expérience négative obligea même à admettre que la masse elle-même était variable avec la vitesse ! Avec les mêmes notations que plus haut, il fallait prendre :

$$m' = m / \alpha$$

Enfin, Lorentz et Poincaré montrèrent que pour avoir des équations satisfaisantes, on devait en outre admettre que le temps lui-même était relatif, dépendant de la vitesse, et que l'on avait :

$$t' = t \cdot \alpha$$

ce qui signifie par exemple que de deux montres identiques parfaitement accordées au sol, celle qui effectuera un voyage se trouvera par la suite en retard sur celle qui sera restée dans un tiroir. Ou encore que le temps s'écoule un peu moins vite pour une personne qui court toujours sur les trottoirs que pour celle qui flâne paresseusement.

On remarque toutefois que pour les vitesses dont nous avons l'expérience courant, le terme α est pratiquement égal à 1, ce qui fait que ces effets relativistes sont indétectables.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE :

Avec Einstein, la marque du génie apparaît. Il comprend que le résultat négatif des expériences qui cherchaient à déceler le mouvement absolu de la Terre a une signification profonde, et qu'en s'obstinant à n'y voir que l'intervention d'un phénomène perturbateur, les physiciens font fausse route.

Einstein comprend que la seule chose certaine dans tout ce fatras est l'invariance de la vitesse de la lumière, quel que soit le système dans lequel on la mesure. Il prend ce fait comme base de travail, ce qui revient à étendre le principe de relativité aux phénomènes électromagnétiques (électricité et lumière), lequel s'énonce alors : «Toutes les lois de la nature (et non plus seulement les lois mécaniques comme le pensaient les physiciens) sont identiques pour tous les systèmes qui se meuvent uniformément l'un par rapport à l'autre». Ce principe contient celui de Newton, bien sûr, et a pour conséquence l'indécidabilité d'une proposition du genre : «je suis immobile». On sait depuis Einstein qu'aucune expérience de physique ne permet de distinguer l'immobilité du mouvement uniforme. Il n'existe aucun repère absolu, c'est-à-dire aucun corps absolument immobile et en particulier pas d'éther.

Ce rejet de l'espace absolu entraîne le rejet du temps absolu identique pour tout l'univers, car toute mesure de temps est une mesure d'espace (par exemple, dire «il est 18 heures», c'est dire que sur une certaine horloge une certaine aiguille est en face d'un certain point) et réciproquement (par exemple, dire qu'il y a 8 cm entre deux points A et B, c'est dire qu'à un certain instant t on a constaté qu'en posant un double décimètre le long de AB, A se plaçait en face de O et B en face de 8). Très précisément, par l'exemple célèbre du train, des deux observateurs et des deux éclairs, Einstein a montré que la notion de *simultanéité* qui est à la base de toute mesure physique, est subjective, et que deux événements jugés simultanés par un premier observateur n'ont aucune raison de l'être pour un second observateur placé ailleurs. Il a pris l'exemple suivant : au milieu d'un train, un voyageur téméraire est juché sur le toit d'un wagon, par temps orageux ; un second observateur est sur le ballast. A l'instant où les deux observateurs passent l'un en face de l'autre (il s'agit de la coïncidence de deux points, définie sans ambiguïté), deux éclairs frappent la voie, l'un à la tête, l'autre à la queue du train. Les deux observateurs sont munis d'appareils leur permettant de viser simultanément la tête et la queue du train. Il est alors évident que la lumière des deux éclairs parviendra au même instant à l'observateur de la voie puisqu'il est situé à mi-chemin de la distance qui les sépare, alors que l'observateur du toit recevra d'abord la lumière de l'éclair de tête puisqu'il va à la rencontre des ondes lumineuses émises par celui-ci, alors qu'il fuit celles émises par l'éclair de queue. Les deux événements sont donc simultanés pour le premier observateur, mais pas pour l'autre.

L'invariance de la vitesse de la lumière interdit de conserver la loi d'addition des vitesses de Galilée qui s'écrit :

$$V = v_1 + v_2$$

et les formules de Lorentz amènent au contraire à prendre :

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

Applications et vérifications expérimentales :

1) Durée de vie des mésons μ : formés dans la haute atmosphère par interaction du rayonnement cosmique primaire avec les atomes de l'atmosphère ; leur durée de vie est de 2,2 microsecondes, et compte tenu de leur vitesse voisine de celle de la lumière (à $5 \cdot 10^{-3}$ près), ils peuvent parcourir 650 mètres avant de disparaître, en mécanique classique. Or l'expérience montre qu'ils atteignent le sol, parcourant ainsi plusieurs kilomètres. Cela provient de ce que leur temps propre, par effet relativiste, est 10 fois plus lent que le nôtre ; ils ont donc le temps de parcourir en fait 6 500 m, et donc d'arriver au sol.

2) Effet Doppler relativiste : on a réussi, en étudiant la lumière émise par des atomes d'hydrogène en mouvement rapide, à faire apparaître les écarts à la loi Doppler de la mécanique classique. Rappelons que l'effet Doppler-Fizeau établit, par exemple, la variation de la couleur apparente d'une source lumineuse, selon que celle-ci s'approche de nous (elle semble alors plus bleue) ou s'éloigne (elle semble alors rouge).

3) Accélérateurs de particules : ils mettent constamment en application la loi relativiste de variation de la masse avec la vitesse, en particulier les synchro-cyclotrons (modulation de la fréquence du champ électrique) et les synchrotrons (augmentation progressive de l'intensité du champ magnétique).

Le cyclotron, par exemple, se charge d'accélérer des électrons et leur fait décrire des trajectoires en spirale dans un champ magnétique. En mécanique classique, le temps mis par un électron pour faire un tour dans la spirale est constant, quelle que soit sa vitesse. Ce qui s'est avéré faux, et il a fallu tenir compte de la variation de la masse avec la vitesse, et synchroniser le champ électrique accélérateur avec cette variation ; d'où le nom de synchro-cyclotron.

4) Réactions nucléaires : la relativité restreinte a permis à Einstein d'établir la plus célèbre équation de tous les temps : $E = m c^2$ qui exprime qu'une masse m renferme en elle-même une énergie $m c^2$. Le problème, c'est d'amener cette énergie à se libérer ; c'est heureusement très difficile, sans quoi nous ne serions plus là pour en parler car même pour des masses petites, $m c^2$ est énorme en raison de la valeur de $c^2 : 9 \cdot 10^{16}$ en $(m/s)^2$. Par exemple, 1 kg de charbon (ou de n'importe quoi d'ailleurs), en se dématérialisant, produirait $25 \cdot 10^{18}$ kWh, soit à peu près la production de toutes les centrales des USA pendant un mois ! Dieu merci, le charbon a toujours refusé obstinément de se dématérialiser... Parmi les applications on peut citer Hiroshima et Nagasaki. Les étoiles elles-mêmes tirent leur énergie de réactions nucléaires. Par exemple, le soleil nous chauffe en transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, les 4 millions de tonnes manquants étant convertis en 100 milliards de milliards de kWh. Ne nous affolons pas : le soleil ne perd ainsi que le millième de sa masse en 15 milliards d'années !

L'espace à quatre dimensions :

Seul un effet physiologique fait que nous ressentons le temps de façon particulière, et que nous le séparons nettement du groupe des dimensions spatiales usuelles longueur, largeur, hauteur. En fait, même dans notre vie de tous les jours, il joue un rôle tout à fait semblable (voir par exemple tous les problèmes de rendez-vous, ou le plan de vol d'un avion). (L'indication de la latitude, de la longitude et de l'altitude prévues, ne renseigne guère les services de la navigation aérienne si le plan de vol ne précise pas à quel instant ces prévisions sont valables).

Il n'y a donc pas de raison mathématique de le séparer des autres, et c'est pourquoi on dit que nous vivons dans un espace à quatre dimensions ; cela signifie simplement que, par exemple, pour situer un événement de l'histoire de façon complète, il faut préciser non seulement le lieu (c'est-à-dire les trois coordonnées spatiales latitude, longitude, altitude), mais aussi la date.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALISÉE :

Après cette belle construction, Einstein avait encore des angoisses. En effet, les mouvements non uniformes (avec accélération) semblaient être des mouvements absolus, c'est-à-dire pouvaient être mis en évidence par des expériences internes au système en mouvement, sans aucune référence extérieure (exemple du voyageur dans un

compartiment de train, au freinage). Par une expérience fictive et simple (les physiciens dans l'ascenseur), Einstein montra qu'il n'en était rien, et que les effets produits par la gravitation étaient indiscernables de ceux produits par une accélération.

Einstein imagine des physiciens enfermés dans un ascenseur sans aucun moyen de communication avec le monde extérieur. Une créature fantastique tire la cabine par une de ses faces, que nous appellerons le plafond, avec une force constante : l'accélération subie par la cabine est alors constante. A l'intérieur, les physiciens font des expériences : l'un d'eux lâche une bille à hauteur de son nez ; la bille, qui n'est plus liée à la cabine, poursuit dans l'espace sa trajectoire avec un mouvement uniforme. Mais la cabine, dont le mouvement est accéléré, la rattrape : le plancher monte à la rencontre de la bille. Le physicien a donc le droit de dire : « la bille lâchée tombe d'un mouvement uniformément accéléré sur le plancher, j'en déduis que la cabine est immobile, et soumise à un champ de pesanteur, posée sur une planète par exemple. L'observateur extérieur, lui, dit : « cette cabine est animée d'un mouvement uniformément accéléré dans un espace vide ». Et la physique ne peut donner tort ni à l'un ni à l'autre.

Le mouvement absolu était ainsi définitivement enterré ; ce que nous pensons être une accélération provenant d'un mouvement non uniforme sera jugé par un autre observateur comme étant une simple variation de la gravité, et il n'aura pas plus tort que nous. Aucune expérience de physique ne permet de distinguer les deux choses, c'est-à-dire que pour nous il s'agit d'une seule et même chose.

Cette identification des forces d'inertie et des forces de gravitation a résolu du même coup le problème de l'égalité miraculeuse de la masse pesante et de la masse inerte.

La gravitation vue par Einstein n'est qu'un aspect de l'inertie : les planètes tournent autour du Soleil parce que celui-ci courbe l'espace autour de lui. N'étant soumises à aucune force (Einstein n'a jamais pu admettre que deux objets puissent s'attirer dans le vide, sans liaison entre eux, et il était dans le vrai), les planètes, par inertie, s'en vont en ligne droite dans un espace courbe, c'est-à-dire tournent !

La notion de force de gravitation a totalement disparu (exemple du petit garçon jouant aux billes). On imagine la situation suivante : un petit garçon joue aux billes sur un trottoir comportant une bosse, devant un immeuble. Du haut de l'immeuble, Newton surveille les opérations ; Einstein est à côté du garçon. Celui-ci lance la bille vers la bosse : sa course est déviée, et elle s'éloigne de la bosse. Newton se dit alors : « Il est évident qu'une force horizontale s'est exercée sur cette bille et a dévié sa trajectoire ». Einstein remarque de son côté que la bille n'est soumise à aucune force horizontale, et a dévié dans sa course tout simplement parce que celle-ci s'inscrivait dans un espace courbé par la présence de la bosse.

Applications et vérifications expérimentales :

1) Mouvement du périhélie de Mercure : Ce décalage de 43'' par siècle n'a pu être expliqué que par la Relativité Généralisée.

2) Courbure des rayons lumineux au voisinage d'une masse : vérifié lors des éclipses de Soleil (expérience de l'ascenseur). Si un trou est pratiqué dans une paroi latérale de la cabine et qu'un rayon lumineux soit projeté dans la cabine par ce trou, alors pendant que le rayon traverse la cabine, celle-ci aura « monté » un peu, et pour les physiciens le rayon se sera donc incurvé vers le plancher, ce qui pour eux traduira l'influence de la gravitation sur la lumière.

3) Le temps dépend de l'intensité du champ gravitationnel : c'est ce que montrent les équations, et cela a été vérifié sur les naines blanches, étoiles très petites où la pesanteur est énorme. En toute rigueur, cet effet se fait sentir sur la Terre : le temps s'écoule plus vite à l'équateur qu'au pôle, mais la différence est inappréciable.

4) Courbure globale de l'univers. On peut montrer que si la densité de matière de l'univers est suffisante, il possède une courbure générale qui le fait se refermer sur lui-même : l'univers serait fermé, ce qui ne signifie pas qu'il est borné ! On peut aussi discuter cette courbure au moyen de dénombrements de galaxies. Actuellement, on manque de moyens d'information, et il est impossible de trancher.

EXEMPLE D'EFFETS RELATIVISTES DANS UN VOYAGE INTERSTELLAIRE :

Il s'agit d'un voyage hypothétique vers 61 Cygni, étoile proche suspectée de posséder des compagnons planétaires.

La première colonne du tableau donne la valeur du rapport de la vitesse de la fusée à celle de la lumière ; par exemple $V/C = 0.500\dots$ signifie que la vitesse de la fusée est égale à la moitié de celle de la lumière (l'ordinateur, en bon anglo-saxon, remplace les virgules par des points).

La première ligne correspond aux performances actuelles des fusées (10 km/s). On voit que le voyage serait vraiment long : 528 000 ans !

Les lignes suivantes donnent pour les différentes valeurs choisies pour V/C , la masse apparente, telle que la mesurerait un observateur resté sur la Terre à l'instant où la fusée passe à pleine vitesse près de lui, la durée du voyage pour les parents restés sur Terre à attendre les cosmonautes, la durée dans la fusée, c'est-à-dire mesurée par les cosmonautes eux-mêmes (en années AN, mois MS, jour JR), et enfin la longueur apparente de la fusée telle que la mesurerait l'observateur terrestre à l'instant où celle-ci passe devant lui à pleine vitesse toujours.

La dernière ligne porte apparemment sur le cas $V/C = 1$, ce qui est impossible ; il s'agit en fait de $V/C = 0.99999999$ que l'ordinateur a abusivement arrondi à 1 au moment de l'impression.

ÉTOILE 61 DU CYGNE

DISTANCE : 8,8 ANNÉES-LUMIERE

LONGUEUR DU VÉHICULE SPATIAL : 100 M ; MASSE : 1 000 TONNES

VITESSE DE LA LUMIERE : 300 000 KM/S

V/C	MASSE	DURÉE POUR LA TERRE			DURÉE DANS LA FUSÉE			LONGUEUR APPARENTE DE LA FUSÉE
		AN	MS	JR	AN	MS	JR	
0.00003333	1000	528 000			528 000			100.00 mètres
0.50000000	1155	35	2	12	30	5	24	86.603
0.60000000	1250	29	4	0	23	5	18	80.000
0.70000000	1400	25	1	21	17	11	14	71.414
0.80000000	1667	22	0	0	13	2	12	60.000
0.90000000	2294	19	6	20	8	6	8	43.589
0.95000000	3203	18	6	9	5	9	12	31.225
0.99000000	7089	17	9	10	2	6	2	14.107
0.99500000	10013	17	8	7	1	9	5	9.988
0.99900000	22366	17	7	12	0	9	13	4.471
0.99950000	31627	17	7	9	0	6	20	3.162
0.99990000	70712	17	7	6	0	2	29	1.414
0.99995000	100001	17	7	6	0	2	3	1.000
0.99999000	223605	17	7	6	0	0	28	0.447
0.99999500	316223	17	7	6	0	0	20	0.316
0.99999900	707042	17	7	6	0	0	8	0.142
0.99999950	999764	17	7	6	0	0	6	0.100
0.99999990	2233461	17	7	6	0	0	2	0.045
0.99999995	3153102	17	7	6	0	0	2	0.032
1.00000000	23170475	17	7	6	0	0	0	0.004

Dans ce dernier cas, le temps de parcours s'élève à 13 minutes pour l'aller et retour !

ÉVOLUTION DES ÉTOILES

L'idée que les étoiles suivent une évolution est ancienne : elle semble remonter à W. Hershell qui fut l'un des premiers à penser que les différences que l'on observe dans les spectres stellaires sont dues au fait que toutes les étoiles ne sont pas parvenues au même stade de développement. De nombreuses théories, certaines fort ingénieuses, furent élaborées pour tenter d'expliquer cette évolution, mais il faut attendre les progrès de la Physique nucléaire pour obtenir des théories qui soient satisfaisantes. L'évolution des étoiles s'expliquant essentiellement à partir des connaissances que l'on a de l'intérieur des étoiles, nous allons essayer de voir, dans une première partie, quelles sont les conditions physiques qui règnent à l'intérieur des étoiles et quelles sont les réactions qui s'y déroulent.

Conditions physiques à l'intérieur des étoiles :

En écrivant qu'en chaque point de l'étoile la pression (somme de la pression gazeuse et de la pression de radiation) équilibre les forces de gravitation, on obtient l'équation :

$$\frac{dP}{dr} = -f \frac{\mathcal{M}_G(r)}{r^2} \rho$$

(P = pression ; r = distance du point considéré au centre ; $\mathcal{M}_G(r)$ = masse contenue à l'intérieur de la couche de rayon r ; ρ = densité ; f = constante de la gravitation). Celle-ci permet de calculer (ou du moins d'avoir une idée de l'ordre de grandeur) la pression. On la trouve extrêmement élevée au centre (par exemple égale à $1,38 \times 10^9$ atm au centre du Soleil).

On parvient aussi (en étudiant l'interaction entre la matière et le rayonnement), à déterminer le gradient de température, c'est-à-dire la façon dont varie la température en fonction de la distance au centre. La température centrale est de l'ordre de plusieurs millions de degrés (11,5 millions au centre du Soleil, d'après Lane).

A des températures aussi élevées, les chocs entre atomes sont si nombreux que ceux-ci perdent presque tous leurs électrons : la matière stellaire est donc presque complètement ionisée. Cela permet de considérer cette matière comme un gaz parfait ; en effet, ce qui importe pour qu'un gaz soit parfait, c'est que les molécules occupent un volume réel faible par rapport au volume occupé par le gaz ; or, dans le cas de la matière stellaire ionisée (même lorsqu'elle a une densité voisine de celle de l'eau), étant donné qu'un atome ionisé occupe un volume environ un million de fois moindre que s'il n'était pas ionisé, le rapport du volume occupé par les particules au volume occupé par la matière reste faible, de sorte que l'on peut considérer celle-ci comme un gaz parfait.

Si l'on prend pour unité de masse la masse du proton, un atome d'hydrogène (de masse 1) se scinde en deux particules (lorsqu'il est ionisé), chacune ayant une masse moyenne égale à $\frac{1}{2}$; un atome d'hélium (de masse 4) se scinde en trois particules de masse moyenne $\frac{4}{3}$; un atome plus lourd (de masse A), ayant Z électrons, se scinde en Z + 1 particules et, comme $A \approx 2Z$, chacune aura une masse moyenne peu différente de 2. Connaissant les proportions de ces différents éléments, on pourra calculer la masse atomique moyenne de la matière stellaire.

Origine de l'énergie stellaire :

La formidable énergie rayonnée par les étoiles (le Soleil rayonne en une seconde une énergie 8 milliards de fois supérieure à l'énergie électrique consommée en une année en France) a, depuis bien longtemps, posé aux astronomes le problème de son origine. On a pensé à une origine chimique (par exemple une combustion) mais Kelvin a montré qu'aucune réaction chimique ne pouvait libérer assez d'énergie pour maintenir le Soleil à sa température pendant plus de quelques milliers d'années. On a voulu faire intervenir la chute de météores Eddington a montré qu'il est impossible de leur attribuer l'énergie solaire. Helmholtz et Kelvin ont proposé pour le Soleil une origine due à la contraction, mais cela conduisait à attribuer au Soleil un âge de 20 millions d'années, ce que contredit la géologie. Lorsqu'on a eu des connaissances précises sur

l'énergie nucléaire, on a tout d'abord songé aux éléments qui libèrent spontanément de l'énergie radioactive, mais parmi ceux-ci, le radium a une vie moyenne beaucoup trop courte (3 000 ans) et l'uranium (ou les éléments voisins) ne pourrait pas fournir assez d'énergie. On a montré, de plus, que la radioactivité conduirait à une étoile instable.

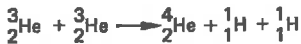
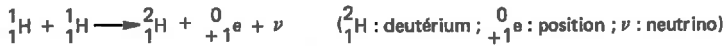
Pour avoir une solution satisfaisante, il a fallu attendre les travaux de Bethe et Gamov, à partir de 1938 ; ils ont montré que l'énergie stellaire est due à des transmutations.

Réactions nucléaires à l'intérieur des étoiles :

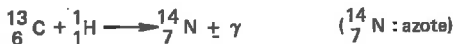
On sait que si l'on bombarde certains noyaux atomiques avec des protons, ceux-ci se combinent aux noyaux pour former des noyaux plus lourds et qu'il y a libération d'une très grande quantité d'énergie. De telles réactions sont difficiles à obtenir en laboratoire parce que les noyaux et les protons, tous deux chargés positivement, ont tendance à se repousser ; il faut donc communiquer aux protons une très grande énergie cinétique. Cependant, vers le centre des étoiles où la température est extrêmement élevée, l'agitation thermique suffit pour communiquer aux protons l'énergie nécessaire et alors ces réactions peuvent avoir lieu.

La réaction fondamentale à l'intérieur des étoiles consiste en la fusion d'hydrogène en hélium. Elle se réalise suivant la chaîne proton-proton ou suivant le cycle du carbone.

La chaîne proton-proton comprend les réactions :



Le cycle du carbone comprend les réactions



Le résultat global de chacun de ces deux cycles est la production d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ à partir de quatre protons ${}^1_1\text{H}$.

L'énergie libérée dans les deux cycles est du même ordre de grandeur et croît avec la température.

Jusqu'à une température d'une quinzaine de millions de degrés, la chaîne proton-proton est prépondérante ; au-dessus, c'est le cycle du carbone qui devient

prépondérant. L'énergie des étoiles de la séquence principale est due à la chaîne proton-proton pour les types spectraux G 4 à M et au cycle du carbone pour les types O à GO. Pour le Soleil, c'est surtout la chaîne proton-proton qui est importante (mais il est à la limite).

On a longtemps pensé que les géantes rouges devaient leur énergie uniquement à la contraction mais cela impliquerait une diminution sensible de magnitude (par exemple ξ Aurigae diminuerait de 0,2 magnitude en 10 ans), ce qui est infirmé par l'observation. On a voulu attribuer leur énergie aux réactions des protons avec les éléments légers (deutérium, bore, béryllium, lithium), mais ce fut sans succès car on a pu savoir que ceux-ci sont trop peu abondants. On a alors élaboré pour ces étoiles des modèles inhomogènes dont la composition chimique varie du centre au bord. On aboutit alors à des températures centrales de 100 à 200 millions de degrés. Vers la centaine de millions de degrés, la chaîne de réactions suivante, dite « chaîne triple α » :



commence à se produire. Son résultat est la production d'un noyau de carbone ${}^{12}_6\text{C}$ à partir de trois noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$. De telles réactions, en se poursuivant, aboutissent à la formation de noyaux de plus en plus lourds, oxygène ${}^{16}_8\text{O}$, néon ${}^{20}_{10}\text{Ne}$, calcium ${}^{40}_{20}\text{Ca}$.

Premières phases de l'évolution :

On pense que les étoiles se forment par contraction gravitationnelle de matière interstellaire dense (10 à $1\,000$ atomes/cm³). L'étude des diverses étapes de cette formation est assez compliquée ; elle a été menée notamment par l'astronome japonais Hayashi. La contraction a pour effet d'élever la température centrale et elle se poursuit jusqu'à ce que cette dernière soit suffisamment élevée pour que les réactions dont nous venons de parler puissent s'amorcer. Si t_c désigne le temps que dure la contraction avant le début des réactions thermonucléaires, on trouve que t_c est une fonction décroissante de la masse. Par exemple, $t_c = 10^7$ années pour une étoile ayant la masse du Soleil et $t_c = 10^3$ années pour une étoile de masse égale à 7 masses solaires. On trouve que la température centrale du nuage en contraction est proportionnelle à la masse de ce nuage et inversement proportionnelle au rayon. Si ce nuage a une masse trop faible ($< 0,1$ masse solaire), les réactions thermonucléaires ne peuvent pas s'amorcer et il devient une naine noire constituée d'hydrogène dégénéré.

L'étoile dont nous suivons l'évolution se trouve maintenant sur la séquence principale du diagramme d'Hertzsprung-Russell. Dans le noyau central, l'hydrogène se transforme progressivement en hélium et la composition chimique du reste de l'étoile varie peu car on peut montrer que les courants de convection y sont peu importants. Quand tout l'hydrogène du noyau a été transformé en hélium, ce noyau se contracte, ce qui libère de l'énergie et cette énergie chauffe les couches entourant immédiatement le noyau ; l'hydrogène de ces couches se trouve alors à la température nécessaire pour que s'amorcent les réactions de fusion en hélium. La masse du noyau d'hélium augmente donc (et on peut montrer que ce noyau tend à devenir isotherme).

Schönberg et Chandrasekhar ont démontré que lorsque la masse du noyau d'hélium atteint une fraction critique q_c de la masse totale (q_c est un peu supérieure à 10 %), le noyau poursuit sa contraction tandis que les couches externes se dilatent rapidement, ce qui a pour effet d'augmenter considérablement le rayon de l'étoile. Celle-ci quitte la séquence principale et, dans le diagramme de Hertzsprung-Russell, s'avance vers le haut et la droite, en direction des géantes rouges.

Si t_{sp} désigne la durée qui s'écoule entre l'instant où l'étoile arrive sur la séquence principale et l'instant où elle la quitte, on trouve que t_{sp} est une fonction décroissante de la masse. Par exemple, $t_{sp} = 10^{10}$ années pour une étoile ayant la masse du Soleil et $t_{sp} = 10^7$ années pour une étoile de masse égale à 7 masses solaires. Avant d'aborder l'étude des phases ultérieures de l'évolution, montrons comment on peut confronter ces théories avec l'observation.

Diagrammes d'amas :

On peut représenter les étoiles d'un même amas (galactique ou globulaire) sur un diagramme de Hertzsprung-Russell. On sait, de façon à peu près sûre, que les étoiles d'un même amas ont le même âge, donc ne diffèrent au départ que par leurs masses. A l'origine, toutes les étoiles de l'amas étaient sur la séquence principale et leurs masses décroissaient de gauche à droite (on sait en effet, d'après la relation masse-luminosité, que la luminosité est proportionnelle à la quatrième puissance de la masse). Le diagramme H.R. d'un amas doit donc représenter les différents stades d'évolution d'étoiles de masses différentes.

Qu'observe-t-on sur le diagramme H.R. d'un amas galactique ? Une séquence principale fine s'arrêtant brusquement du côté des grandes luminosités après s'être

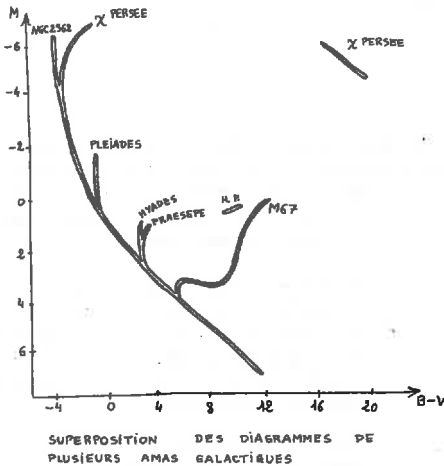


FIGURE 1

relevée, quelques géantes et parfois des naines blanches. L'astronome Sandage a eu l'idée de superposer les diagrammes H.R. de différents amas galactiques. On constate que leurs séquences principales coïncident en une séquence dite «standard» mais que la limite supérieure de la séquence de chaque amas se situe plus ou moins haut sur la séquence standard et que la séquence de chaque amas se redresse par rapport à la séquence standard avant d'atteindre sa limite supérieure.

Ceci cadre très bien avec la théorie dont nous avons parlé précédemment. Soit T l'âge de l'amas considéré. Les étoiles pour lesquelles $t_c + t_{sp} < T$ (donc les plus massives) ont quitté la séquence principale et sont

devenues des géantes, voire des naines blanches ; celles pour lesquelles $t_c + t_{sp} = T$ sont à la limite supérieure de la séquence principale ; celles pour lesquelles $t_c + t_{sp}$ est légèrement supérieur à T se trouvent sur la partie redressée ; celles pour lesquelles $t_c + t_{sp} > T$ avec toutefois $t_c < T$ sont sur la séquence principale ; celles pour lesquelles $t_c > T$ sont en cours de contraction (elles expliquent une traînée que l'on aperçoit parfois sur le diagramme).

La position du coude que fait la séquence individuelle d'un amas après avoir quitté la séquence standard est donc d'autant plus à gauche que l'amas est plus jeune (en effet les étoiles quittent d'autant plus vite la séquence principale qu'elles sont plus massives et elles sont d'autant plus massives qu'elles sont plus à gauche, à l'origine, sur la séquence principale). Ceci a permis de calculer l'âge de différents amas galactiques : on a trouvé que l'amas M67 a 5 milliards d'années, l'amas de Praesepe 600 millions, celui des Pléiades 60 millions, l'amas X de Persée 4 millions.

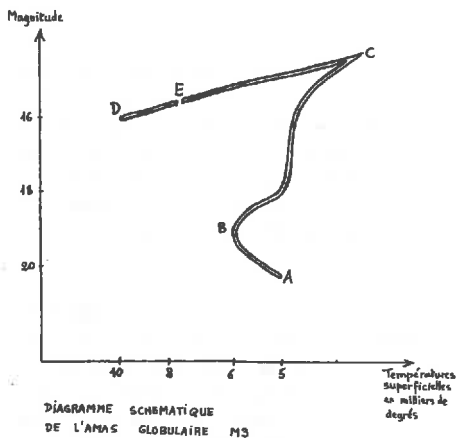


FIGURE 2

Phases ultérieures de l'évolution :

Que devient une étoile devenue géante rouge ? On a interprété le point de rebroussement C du diagramme des amas globulaires comme étant le début des réactions des noyaux d'hélium entre eux pour former des éléments plus lourds (carbone, oxygène, néon).

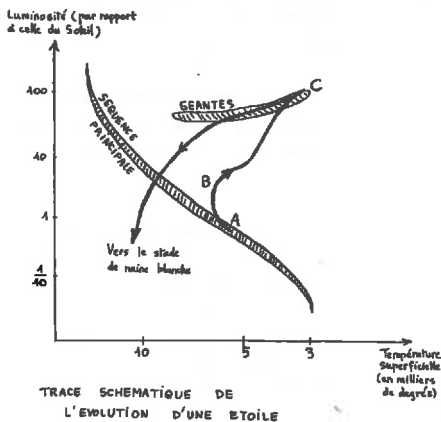


FIGURE 3

En se refroidissant une naine blanche devient une naine noire ne rayonnant plus.

Chandrasekhar a démontré, dès 1931, qu'aucune naine blanche ne peut avoir une masse supérieure à 1,4 masse solaire (celles dont on a pu mesurer la masse ont effectivement une masse inférieure à 1,4 masse solaire). On est donc forcé d'admettre que les étoiles plus massives perdent une partie de leur masse au cours de leur évolution, soit de façon lente et continue (nous l'envisagerons ultérieurement), soit de façon rapide et brutale comme nous allons le voir. L'étoile massive que nous considérons, va passer par le stade de naine blanche, mais de façon instable, avec une température centrale de plusieurs milliards de degrés ; les conditions de température et de pression engendrent alors un processus explosif qui fait de l'étoile une supernova qui rayonne pendant quelques jours autant qu'une galaxie entière et qui perd 90 % de sa matière. Après ce cataclysme, il ne restera qu'un nuage de gaz en expansion avec, au centre, un noyau : ce noyau est une étoile à neutrons ayant un rayon de quelques dizaines de kilomètres et une densité formidable (10^8 fois celle d'une naine blanche). Oppenheimer avait prévu l'existence de telles étoiles dès 1938-39, mais l'on n'en connaît que depuis une époque très récente.

Quant aux diagrammes H.R. des amas globulaires, ils ont été étudiés en particulier par Hoyle et Schwarzschild et présentent à peu près la forme indiquée sur la figure. La position B du coude indique qu'il s'agit de vieux amas (environ 6 milliards d'années). En E se placent les étoiles variables du type RR Lyrae (périodiques de période inférieure à un jour).

Au fur et à mesure de la diminution du combustible nucléaire, la pression de radiation diminue et n'équilibre plus les forces gravitationnelles, ce qui provoque une contraction de l'étoile et l'amène au stade de naine blanche.

Une naine blanche est une étoile de faible rayon (de l'ordre de celui de la Lune), constituée de matière dégénérée, formée d'atomes ionisés « serrés » les uns contre les autres, ce qui explique la très forte densité (par exemple $110 \text{ t/m}^3 \text{ dm}^3$). Cette matière ne peut pas rayonner d'énergie ; le rayonnement que ces étoiles nous envoient est dû à une couche gazeuse normale entourant le

On montre qu'il ne peut exister d'étoiles à neutrons en équilibre au-dessus d'une certaine masse (non connue avec certitude, mais inférieure à 3 masses solaires). Une étoile très massive ne pourra certainement pas perdre suffisamment de matière pour former une étoile à neutrons stable. On pense qu'elle terminera son évolution en formant un « trou noir ». On appelle ainsi un être physique extrêmement dense, tel que les rayons lumineux qu'il émet sont courbés au point de « tourner en rond » dans la région où se trouve ce trou noir et de ne pouvoir en sortir. Pour donner une image, si l'on voulait transformer le Soleil en un trou noir, il faudrait faire entrer toute sa masse dans une sphère de 3 km de rayon. On essaie de détecter de tels trous noirs en tentant de capter des ondes gravitationnelles qu'ils émettraient dans certaines circonstances. Les résultats des observations, dans ce domaine, sont pour l'instant incertains.

Autres phénomènes susceptibles d'intervenir au cours de l'évolution :

L'observation des étoiles très chaudes et des étoiles de Wolf-Rayet montre qu'elles émettent un intense rayonnement corpusculaire. Partant de ceci, l'astronome Fessenkov et son école, ont imaginé que les étoiles, au cours de leur évolution, perdent de la matière à un taux proportionnel à leur luminosité. Cela permet d'expliquer certaines observations : on remarque en particulier que les étoiles très chaudes tournent rapidement sur elles-mêmes et que cette vitesse de rotation diminue lorsqu'on considère des étoiles de moins en moins chaudes (la vitesse équatoriale de rotation d'une étoile O est de l'ordre de 250 km/s, celle du Soleil est de 2 km/s) ; or, il est facile de montrer que lorsqu'un corps en rotation perd de la matière, sa vitesse de rotation ~~diminue~~ *augmente*.

Il nous faut enfin parler du phénomène d'accrétion : on nomme ainsi la capture de matière par une étoile. Ce phénomène, étudié en particulier par Hoyle, reste un phénomène secondaire pour l'évolution stellaire.

Conférence de D. SONDAZ — 25 janvier 1975

Société Astronomique de Lyon

69230 — Saint-Genis-Laval

Sommaire

1 — La relativité *par M. Paturel.*

6 — Évolution des étoiles *par D. Sondaz.*

Prix : 5 F