Zeitschrift: Archives des sciences et compte rendu des séances de la Société
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 46 (1993)
Heft: 2: Archives des Sciences

Artikel: Les datations en astronomie
Autor: Maeder, André
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-740448

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: 05.08.2025

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

Archs Sci. Genève	Vol. 46	Fasc. 2	pp. 147-159	Septembre 1993

LES DATATIONS EN ASTRONOMIE

PAR

André MAEDER*

L'ÂGE DE L'UNIVERS

Brève chronologie de l'Histoire de l'Univers

L'Astronomie est fille de la curiosité humaine, qui depuis l'Antiquité conduit l'homme à s'interroger sur les mouvements et la nature des astres, la structure, l'origine et les limites de l'Univers.

Les échelles d'espace et de temps caractéristiques de l'Univers sont immenses par rapport à ce que l'expérience commune nous enseigne. La vie humaine n'est qu'un instant comparée à l'évolution des étoiles et de l'Univers. Ainsi, l'âge du Soleil (et de la Terre) est d'environ 4.5 milliards d'années. L'âge des plus vieilles étoiles est d'environ 15 milliards d'années, ce qui nous fournit une estimation de l'âge minimum de l'Univers. C'est donc à partir d'une expérience quasi ponctuelle dans le temps et l'espace que l'Astronomie essaie de saisir l'Univers.

Le tableau 1 donne une très brève chronologie de l'histoire de l'Univers, comparée aux événements des temps géologiques. L'Univers a eu une origine, le Big-Bang, qui s'est produit il y a environ 15 milliards d'années. La naissance du système solaire est plus récente. Selon une représentation imagée, si l'on fait correspondre la vie de l'Univers à une journée de 24 heures, la lointaine extinction des dinosaures, qui marqua la fin de l'ère secondaire il y a 65 millions d'années, ne se serait produite qu'à 23 h 54. Cela illustre bien la brièveté des événements de l'histoire terrestre face à l'histoire de l'Univers. Quant à l'apparition de l'Homo sapiens il y a 250'000 ans, elle ne serait survenue qu'à 23 h 59 min 58.6 sec. Et le début de la période historique de l'humanité, il y a 4'000 ans, ne se serait produit que 2 centièmes de seconde avant minuit!

Comment les astrophysiciens peuvent-ils dater l'origine de l'univers, comment peuvent-ils dater les étoiles et le Soleil? C'est ce que nous allons examiner de manière simple.

L'évolution et l'existence d'une origine de l'Univers

La cosmologie est la partie de l'Astronomie qui étudie la structure, l'origine et l'évolution de l'Univers dans son ensemble. C'est un domaine passionnant, tant scienti-

* Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny.

TABLEAU 1.

BRÈVE CHRONOLOGIE COMPARÉE DES ÉVOLUTIONS ASTRONOMIQUE ET TERRESTRE

Âge avant le présent		Événement astronomique	Événement terrestre
15	milliards	Big Bang: naissance explosive de l'Univers. Formation de l'hydrogène et de l'hélium.	
14		Naissance des premières galaxies et étoiles. Formation de notre Galaxie. Début de la formation des autres éléments chimiques. Amas globulaires, p. ex. M92	
6		Plus vieil amas ouvert (NGC 188)	
4.55		Formation du Soleil	Naissance de la Terre
3.5		Naissance de l'amas M67 (p. ex.)	Premières formes de vie
1.5	milliard	Naissance de l'amas NGC 752 (p. ex.)	Age du bouclier canadien
570	millions	Naissance de l'amas des Hyades	Début de l'ère primaire
235		Dernière période de rotation galactique	Début de l'ère secondaire
140			Oiseaux et mammifères
100		La lumière que nous recevons est partie de Virgo, centre du Super Amas Local de galaxies. Naissance des Pléiades.	
65		Amas de Persée (p. ex.)	Disparition des dinosaures. Début de l'ère tertiaire
30		Demi-période d'oscillation du Soleil perpendiculairement au plan galactique.	
4		Naissance de l'amas d'Orion, de Scorpion-Centaure.	
2		La lumière que nous recevons est partie d'Andromède	Début de l'ère quaternaire
1.5	millions	Age du Trapèze d'Orion	Apparition de l'Australopithèque
250000	ans		Apparition de l'Homo sapiens
170000	ans	La lumière que nous recevons est partie du Grand Nuage de Magellan, galaxie satellite de notre Voie Lactée	
40000	ans		Apparition de l'homme moderne
25000	ans	La lumière que nous recevons est partie du centre de notre Galaxie	
20000	ans	Age de l'explosion de supernova qui a produit la Dentelle du Cygne.	Glaciation de Würm
4000	ans		Début de l'Histoire
8	minutes	La lumière que nous recevons est partie du Soleil.	

fiquement que philosophiquement. Dans ce domaine, il faut se méfier des déductions et échafaudages mentaux inspirés de l'expérience commune et d'un soi-disant bon sens. L'histoire fourmille de modèles cosmologiques, proposés pour les raisons les plus diverses, qui n'ont pas résisté à l'épreuve de l'observation soignée.

Parmi les diverses forces fondamentales dont le physicien a discerné l'action, la gravitation est la seule interaction dont l'influence puisse se faire sentir jusqu'aux parties les plus distantes de l'Univers; c'est elle qui modèle l'Univers. Ce fait explique que ce

soit la théorie du champ de gravitation, c'est-à-dire la théorie de la *Relativité Générale d'Einstein*, qui fournisse le cadre théorique approprié pour étudier la structure et l'évolution de l'Univers.

Les astronomes du 19ème siècle imaginaient l'Univers statique et infini; même les premiers modèles d'Einstein en 1917 étaient statiques, c'est-à-dire sans évolution, qu'ils fussent ou non finis. Cet attachement aux modèles statiques a plusieurs raisons, mais la principale semble avoir été d'origine philosophique: on souhaitait un Univers au repos et immuable.

En 1929, E. Hubble découvrit le mouvement de récession des galaxies, ce qui mit un terme aux modèles statiques. Ce mouvement jouit de deux propriétés: d'une part les galaxies s'écartent de nous à des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont éloignées, selon la loi de Hubble.

$$v = H \cdot d$$

où v est la vitesse, d est la distance et H la constante de Hubble. La valeur de H est telle que chaque fois que l'on s'éloigne de 1 million d'années-lumière, la vitesse de fuite des galaxies augmente d'environ 15 km/s, ($H = 50\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$). Il reste une assez grande incertitude sur la valeur de H; certains auteurs proposent une valeur deux fois plus élevée.

La seconde propriété est que le mouvement de récession des galaxies est isotrope. Cela signifie que le mouvement de fuite est le même dans toutes les directions. Est-ce à dire que nous sommes au centre de l'Univers et de l'expansion de celui-ci? Il y a une autre explication plus satisfaisante: celle de l'expansion généralisée, dont l'image simplifiée suivante, due à Gamov, donne une bonne illustration. Considérons une pâte contenant des raisins secs, représentant les galaxies dans l'Univers. Lors de la cuisson, la pâte gonfle. Chaque observateur, qui serait attaché à l'une de ces «galaxies» verrait les autres galaxies s'éloigner de lui, avec des vitesses proportionnelles à leurs distances (loi de Hubble); il aurait aussi l'impression d'être au centre de l'expansion (isotropie). L'expansion généralisée rend donc bien compte des propriétés observées, sans conférer à l'observateur une position privilégiée. Notre galaxie (et la gare de Perpignan, comme le suggérait Salvador Dali) peut se considérer comme le centre de l'Univers, et il en va de même pour toutes les galaxies.

Le mouvement d'expansion observé nous indique que dans le passé les galaxies étaient plus proches les unes des autres. Cela suggère qu'en remontant suffisamment loin dans le temps, il a dû exister une phase de l'évolution où toute la matière de l'Univers était infiniment concentrée. C'est l'hypothèse de l'explosion primordiale (Big-Bang), au cours de laquelle l'Univers serait né d'une singularité caractérisée par un état de concentration infinie, que l'on situe il y a environ 15 milliards d'années. Les modèles de Relativité Générale nous apprennent qu'il ne faut pas voir la récession des galaxies comme le mouvement des galaxies dans un espace préexistant, mais comme une expansion de l'espace lui-même. De même, le Big-Bang n'est pas une explosion dans

l'espace, mais c'est l'explosion de l'espace lui-même. Donc, la question «où a eu lieu le Big-Bang?» ne peut admettre dans ce contexte que la réponse «partout».

Jusqu'en 1965, on assista à un foisonnement de modèles cosmologiques qui, chacun à sa manière, tentait d'interpréter la découverte de Hubble. Beaucoup de ces modèles étaient nés des réticences de leurs auteurs à admettre l'existence d'un Big-Bang. C'est une nouvelle découverte qui balaya la plupart de ces modèles, en particulier ceux qui n'étaient pas fondés sur la théorie d'Einstein. Cette année-là, A. Penzias et R. Wilson, en utilisant un radio-télescope dans le domaine centimétrique, découvrirent l'existence d'un fonds de rayonnement remplissant l'Univers de manière isotrope. Ce rayonnement de caractéristique thermique a une température très basse de 3 degrés K (-270 degrés C). L'interprétation détaillée montra que ce rayonnement devrait résulter des phases initiales très concentrées et très chaudes de l'Univers: c'est la chaleur résiduelle du Big-Bang. Cette découverte, comme celle de Hubble, est l'une des plus importantes de l'astronomie. Elle confirme l'idée d'une origine explosive de l'Univers. Penzias et Wilson reçurent, en 1978, le Prix Nobel de physique pour leur contribution.

La géométrie et l'âge de l'Univers

L'âge de l'Univers dépend de sa géométrie, qui elle-même, selon la théorie de la Relativité Générale, dépend du contenu matériel de l'Univers. Nous allons voir comment s'établit cette relation entre ces diverses propriétés.

L'Univers est-il fini ou infini? Cette très ancienne question, qui concerne la géométrie de l'Univers, est probablement à la base de la démarche cosmologique et demeure toujours actuelle. Les termes *fini* et *infini* correspondent, dans le cadre de la Relativité Générale, à des géométries de l'espace-temps différentes. En effet, selon cette théorie, la géométrie dépend du contenu matériel de l'Univers. Si la densité moyenne de matière est supérieure à une densité critique, on a un Univers fini et le modèle est fermé: en suivant un rayon lumineux, un observateur reviendrait à son point de départ. La phase d'expansion d'un tel modèle fermé est suivie d'une phase de contraction qui se termine par un Big-Crush final, dans lequel les événements se déroulent de manière inverse à ceux du Big-Bang initial.

Au contraire, pour une densité moyenne de l'Univers inférieure à la valeur critique, le modèle est ouvert et l'Univers infini: la trajectoire d'un rayon lumineux ne reviendrait pas à son point de départ. Dans ce modèle, l'expansion se poursuit toujours et l'Univers évolue vers un état de plus en plus vide.

Ces deux modèles, d'un côté «fini» et qui se recontracte après une expansion initiale, et de l'autre côté, «infini», ouvert et toujours en expansion, sont séparés par un modèle critique, appelé modèle de Einstein-de Sitter. Dans ce modèle, la densité de l'Univers a une valeur critique ($\rho_c = 3\ H^2/(8\pi\ G)$) d'environ $4 \cdot 10^{-29}\ kg/dm^3$, qui constitue la limite entre les deux cas ci-dessus. Pour une densité plus élevée, l'attraction gravifique entre galaxies sera suffisante pour freiner l'expansion et conduire à une contraction finale. Pour une densité moins élevée, l'expansion se poursuivra toujours.

On peut représenter l'évolution de l'Univers par une fonction $R(t)$, dite facteur d'échelle. Cette fonction caractérise la manière dont évoluent les distances typiques dans l'Univers, par exemple la distance entre deux galaxies quelconques. Dans un mouvement d'expansion, $R(t)$ grandit avec le temps t; au contraire dans un mouvement de contraction $R(t)$ diminue avec le temps t.

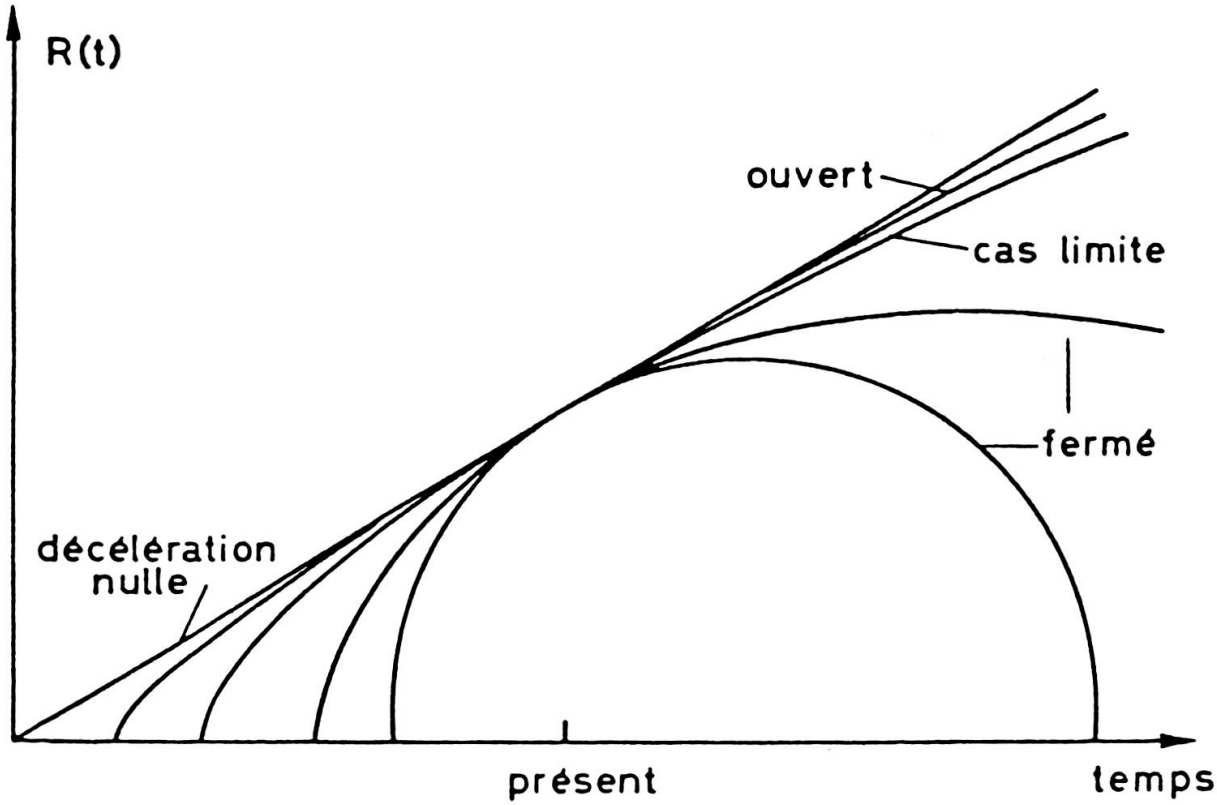

FIG. 1.

Evolution du facteur d'échelle en fonction du temps pour les divers modèles d'Univers: fermé, cas limite (Einstein-de Sitter), ouvert et modèle d'Univers vide (décélération nulle).

Les modèles finis sont caractérisés par une courbe $R(t)$ qui croît d'abord avec le temps, passe par un maximum puis décroît à nouveau avec le temps. Au contraire, les modèles ouverts montrent une courbe $R(t)$ qui croît toujours avec le temps. Entre les deux, le cas limite du modèle de Einstein-de Sitter; celui-ci est caractérisé par une fonction $R(t) \sim t^{2/3}$.

Dans la figure 1, nous avons représenté la fonction $R(t)$ non pas en faisant partir toutes les courbes au temps $t = 0$, comme on le fait souvent mais, comme nous sommes intéressés au problème de l'âge de l'Univers, nous avons ajusté les courbes au temps présent. La figure 1 nous montre immédiatement que dans le cas d'un Univers fini, c'est-à-dire fortement décéléré, l'origine est plus proche dans le passé que dans le cas d'un modèle ouvert, c'est-à-dire peu décéléré.

Le cas d'un âge extrême est celui d'un modèle de décélération nulle. Ce modèle correspond à un Univers vide de matière. En effet, autrement il y aurait un freinage dû à

l'interaction gravifique des galaxies et le modèle serait décéléré. Dans le cas vide, l'âge de l'Univers correspondrait à

$$t = 1/H$$

où H est la constante de Hubble. Pour la valeur vue plus haut, on aurait t = 19 milliards d'années. Dans le cas du modèle limite de Einstein-de Sitter, on aurait

$$t = \frac{2}{3}\ 1/H$$

c'est-à-dire environ 13 milliards d'années. Dans le cas des modèles fermés, l'âge de l'Univers serait inférieur.

Savoir auquel des deux modèles ci-dessus (ou éventuellement au cas limite qui les sépare) notre Univers correspond, est considéré comme l'un des problèmes très importants de la cosmologie observationnelle et des moyens importants sont mis en oeuvre dans ce but. C'est une des missions prioritaires du Télescope Spatial, des grands télescopes au sol et notamment du futur VLT (Very Large Telescope).

Les résultats actuels sur la densité de matière dans l'Univers, et divers autres tests cosmologiques, favorisent un modèle ouvert pas très éloigné du modèle de Einstein-de Sitter. C'est-à-dire que l'âge de l'Univers est compris entre 2/3 ($1/H$) et $1/H$; c'est la raison pour laquelle une valeur de 15 milliards d'années constitue à l'heure actuelle une estimation très raisonnable. Cette valeur est compatible avec les estimations de l'âge des plus vieilles étoiles observées.

L'Univers initial

L'Univers initial et le Big-Bang sont des questions majeures. On assiste actuellement à une convergence remarquable de l'astrophysique et de la physique des particules, telle qu'on la pratique au CERN par exemple. En effet, les phases initiales ont connu des températures très élevées (supérieures à des milliards de degrés), donc des énergies très élevées. Et pour étudier la physique des hautes énergies, il faut de grands accélérateurs de particules, d'où la convergence des deux disciplines mentionnées.

Des succès intéressants ont déjà été obtenus. Ainsi, on a pu calculer les réactions nucléaires qui se sont produites dans les trois premières minutes de l'Univers et montrer que ce sont elles qui ont synthétisé plusieurs éléments légers (He, Li, Be, B), dans une proportion correspondant très bien à celle observée dans l'Univers. On a donc pu ainsi tester avec succès la physique des premières minutes de l'Univers et les physiciens des hautes énergies et les astrophysiciens cherchent maintenant à comprendre la première seconde...

La singularité initiale est bien évidemment l'objet de toutes les interrogations. S.W. Hawking a apporté quelques éléments essentiels à cette discussion. Il a montré que la singularité est entourée d'un horizon, c'est-à-dire une surface à travers laquelle aucune information ne peut être transmise. Cette limitation est imposée par le *Principe*

d'Incertitude de Heisenberg en physique quantique, qui dit qu'on ne peut pas connaître avec une précision infinie à la fois le temps d'un événement et son énergie. La singularité du Big-Bang est donc entourée d'une surface (à $t = 10^{-43}$ *sec*) à travers laquelle aucune information ne peut circuler. On rapporte qu'Einstein, qui n'aimait guère l'indétermination de la mécanique quantique, avait dit: "Dieu ne joue pas aux dés". A la suite de ses travaux sur les singularités, Hawking ajoute en guise de boutade: "Non seulement Dieu joue aux dés, mais il jette parfois les dés là où on ne peut pas les voir".

L'ÂGE DU SOLEIL ET DES ÉTOILES

Après avoir discuté l'âge de l'Univers, tournons-nous vers la détermination de l'âge des étoiles. C'est un problème très important car ce sont les âges des étoiles qui nous fournissent des repères chronologiques dans tous les systèmes cosmiques, tels que amas stellaires et galaxies. Pour comprendre la détermination des âges, il nous faut tout d'abord rappeler quelques principes fondamentaux qui gouvernent la structure et l'évolution des étoiles.

L'équilibre d'une étoile et les réactions nucléaires

L'équilibre mécanique d'une étoile est régi par deux effets très simples: d'une part, la gravitation, qui tend à attirer chaque particule du gaz stellaire vers le centre; d'autre part, les forces de pression dues notamment à l'agitation thermique des constituants du gaz, qui s'opposent à la gravitation. C'est ainsi que le Soleil et les étoiles adoptent le rayon et la structure, c'est-à-dire la densité, la température et la pression qui conviennent à l'équilibre très exact de ces deux forces; tout écart à cet équilibre serait immédiatement soumis à une force de rappel importante.

Les étoiles ne sont pas seulement en équilibre mécanique, mais aussi en équilibre énergétique et thermique. Considérons des photons émis dans le centre très chaud du Soleil. Ils vont participer, souvent conjointement avec d'autres effets comme les mouvements de brassage convectif de la matière stellaire, au transport de l'énergie vers l'extérieur de l'étoile. Ces photons subissent d'innombrables interactions avec les particules du gaz, en moyenne une tous les centimètres, et leur chemin est alors complètement aléatoire dans l'étoile. Bien qu'ils se déplacent à la vitesse de la lumière, c'est seulement quelques millions d'années après l'émission des photons initiaux que les photons résultant de toutes les interactions avec la matière arriveront à la surface de l'étoile! On réalise immédiatement que l'opacité du milieu stellaire joue un rôle capital dans le transport de l'énergie rayonnante: si le milieu est transparent, l'énergie s'évade aussitôt; s'il est opaque, l'énergie met très longtemps pour sortir de l'étoile.

Les réactions nucléaires ajustent leur taux de production d'énergie pour compenser l'énergie qui s'échappe de l'étoile. Le mécanisme d'ajustement est simple à comprendre. Si l'étoile ne produit pas assez d'énergie, elle se contracte un peu, la température

intérieure augmente et le taux de production d'énergie qui croît beaucoup avec la température, augmente jusqu'à atteindre la valeur suffisante pour compenser les pertes. Au contraire, si l'étoile produit trop d'énergie, elle s'étend, se refroidit et abaisse ainsi sa production énergétique. On a donc toujours, du moins en régime normal, une situation d'équilibre.

La fusion de l'hydrogène est la première phase nucléaire importante de l'évolution stellaire. Cela est dû au fait que les noyaux d'hydrogène ont une seule charge positive et qu'il leur est plus facile de surmonter leur répulsion électrique, que des noyaux portant plusieurs charges. D'autre part, l'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'Univers. Lors de la fusion de l'hydrogène en hélium, quatre protons sont convertis en un noyau d'hélium. Cette réaction libère une grande quantité d'énergie et contribue à rendre cette phase de l'évolution la plus longue, environ 80%, de la vie nucléaire totale de l'étoile. Dans cette phase de l'évolution (phase dite séquence principale où sont observées la majorité des étoiles, voir fig. 3), la température n'est pas suffisante pour que l'hélium, qui est comme la cendre de l'hydrogène, puisse entrer en réaction. Le tableau 1 illustre quelques-unes des propriétés essentielles des étoiles de 0,8 à 30 $M_\odot$ dans cette phase.

Ce tableau montre, et cela sera très important pour la détermination des âges des étoiles, que la luminosité croît très fortement avec la masse, la variation des autres quantités étant plus lente; on note enfin que la densité moyenne diminue quand la masse augmente.

TABLEAU 1

PROPRIÉTÉS DES ÉTOILES DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE

Masse en unité de $M_\odot$	Luminosité unité de $L_\odot$	Température en °K (surface)	Densité centrale (kg/dm^3)	Température centrale en millions de °K	Rayon en unité de $R_\odot$	Durée de vie sur la séquence principale en années
0.8	0.25	4940	84	11.4	0.68	20 milliards
1.0	0.77	5730	90	13.5	0.88	10 milliards
1.5	5.2	7290	87	18.5	1.43	1.8 milliards
2.0	16.9	9250	67	20.9	1.60	800 millions
5.0	515	17020	20	26.8	2.61	78 millions
9.0	3900	23900	10	30.5	3.64	24 millions
15.0	19230	31100	6.3	34.3	4.77	11 millions
30.0	120000	40200	3.3	37.3	7.13	5.9 millions

Rem.: Modèles au début de la phase séquence principale pour une composition chimique H: 70%, He: 27% et 3% d'éléments lourds (typique de la population récente de notre Galaxie, Population I). $M_\odot = 2.10^{30}$ kg, $L_\odot = 3.83 \,.\, 10^{26}$ watts, $R_\odot$ = 696'000 km, (valeurs solaires).

L'évolution du Soleil et des étoiles

L'étude de la structure et de l'évolution des étoiles fait appel à de multiples domaines de la physique: mécanique, thermodynamique, physique nucléaire, physique atomique pour calculer l'opacité de la matière et les états d'ionisation du gaz, hydrodynamique pour la convection et les pulsations. Tous ces processus doivent être incorporés dans le calcul des modèles stellaires qui sont effectués sur de gros ordinateurs.

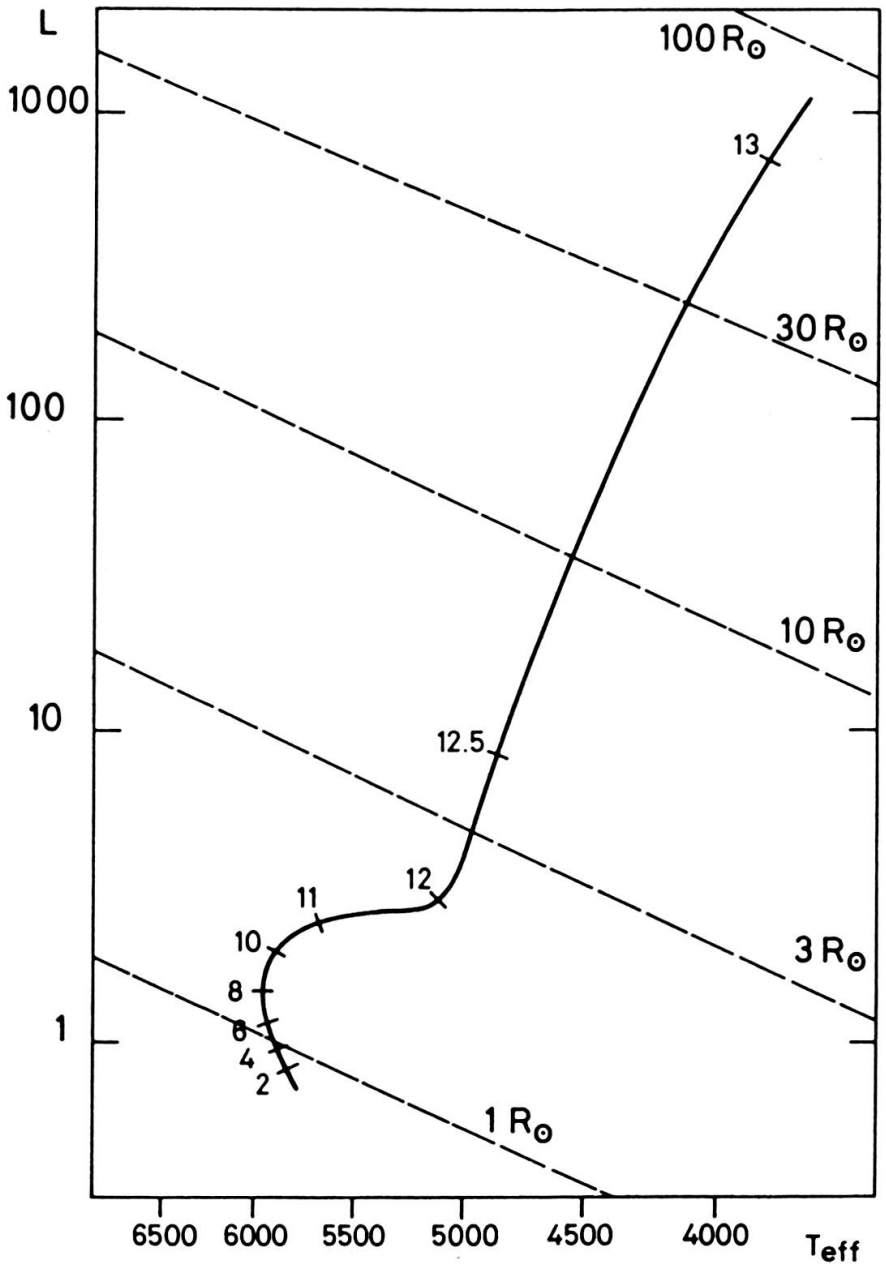

FIG. 2.

Evolution du Soleil dans le diagramme HR: luminosité en fonction de la température du surface. On a indiqué les lieux d'égal rayon en unités de rayon solaire actuel; on voit donc que la dimension du Soleil change avec l'époque. Les âges sont indiqués le long du tracé en milliards d'années.

Les réactions nucléaires modifient progressivement la composition chimique des régions centrales des étoiles et provoquent ainsi un changement très lent de leur structure. Bien que la composition des couches extérieures demeure essentiellement inaltérée, car il n'y a pas de mélange général dans les étoiles, les modifications de structure se répercutent sur les propriétés de la surface, c'est-à-dire la luminosité, la température et le rayon de l'étoile. Le diagramme de Hertzsprung-Russel (HR), qui représente la luminosité (puissance rayonnée) des étoiles en fonction de leur température de surface (T_{eff}) constitue l'outil par excellence pour étudier ces propriétés et leur évolution. Au cours de leur vie, les étoiles vont suivre un certain cheminement dans ce diagramme à cause des changements de leurs propriétés de surface: c'est ce qu'on appelle un tracé évolutif.

La figure 2 illustre le tracé évolutif du Soleil dans le diagramme HR. Pendant environ 10 milliards d'années, le Soleil brûle de l'hydrogène dans son noyau en restant dans le ruban de la séquence principale (voir fig. 3). Actuellement, le Soleil a un âge d'environ 4.5 milliards d'années, il a épuisé près de la moitié de son hydrogène au centre, et son éclat augmente d'environ 9% chaque milliard d'années. Une fois l'hydrogène épuisé au centre, une étoile de 1 $M_\odot$ possède un noyau d'hélium surmonté d'une coquille mince où se poursuit la combustion de l'hydrogène. La température du noyau est insuffisante pour que l'hélium entre en réaction: le noyau se contracte, tandis que l'enveloppe s'étend. L'étoile évolue vers la droite du diagramme HR et monte vers la zone des étoiles assez froides et de grand rayon: c'est le stade des étoiles géantes rouges. Au moment où s'amorcera la fusion de l'hélium, le Soleil aura un éclat 1000 fois supérieur à l'éclat actuel et il s'étendra sur près de 50° dans le ciel d'une Terre surchauffée!

On notera que l'âge du système solaire est aussi déterminé (avec une grande précision) par la datation des plus anciennes météorites (les chondrites carbonacées), contemporaines de l'origine du système solaire. Pour ce faire, on utilise les méthodes de datations basées sur la désintégration des radionuclides (voir exposé du Prof. Delaloye). L'âge du système solaire déterminé par les météorites correspond bien à celui que l'on obtient par l'étude de l'évolution du Soleil, ce qui confirme la qualité des deux approches.

La figure 3 montre les tracés évolutifs d'étoiles de diverses masses. Après la séquence principale, elles évoluent très rapidement vers le stade de géante rouge, où elles décrivent une boucle lors de la combustion de l'hélium (étoiles de 3 à 10 $M_\odot$). Le peuplement du diagramme HR dépend notamment de la vitesse d'évolution des étoiles. Si l'on observe la majorité des étoiles sur la séquence principale, c'est parce que l'évolution y est très lente.

Les temps d'évolution varient beaucoup suivant la masse de l'étoile considérée. Examinons le cas de la fusion de l'hydrogène. En règle générale, la durée de vie d'une étoile, comme celle d'un feu de bois, dépend de la masse du combustible disponible divisée par la puissance rayonnée. Or, la luminosité croît beaucoup avec la masse envisagée, et la durée de vie diminue considérablement lorsque la masse augmente,

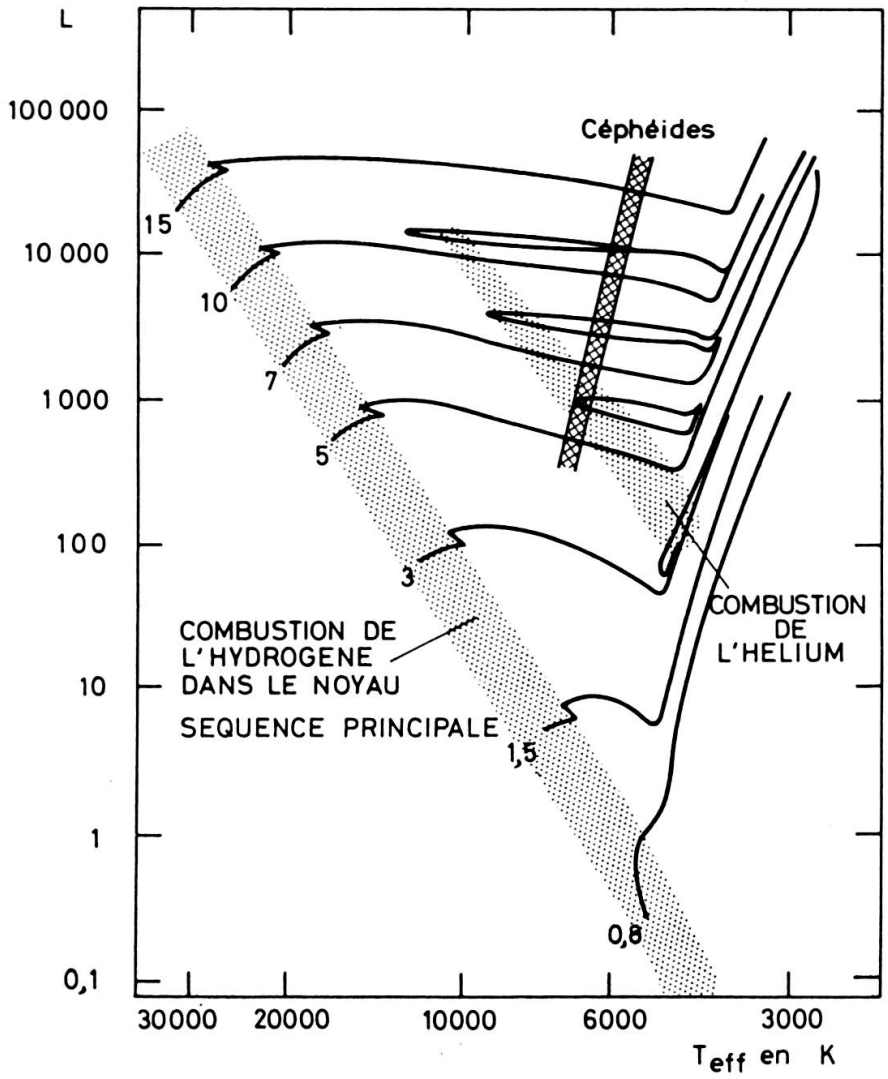

FIG. 3.

Tracés évolutifs d'étoiles de différentes masses, en unités de $M_\odot$, dans le diagramme HR. La luminosité L est donnée en unités de la luminosité solaire actuelle. La séquence principale est le lieu de combustion de l'hydrogène. La combustion de l'hélium a lieu au stade de géante rouge. La zone hachurée vers $T_{eff} = 6000$ K représente la bande où se trouvent les étoiles variables céphéides.

c'est-à-dire que la durée de fusion de l'hydrogène décroît fortement pour des étoiles de grande masse. Ces temps sont donnés dans le tableau 1: ils vont de plusieurs dizaines de milliards d'années pour les étoiles de petite masse jusqu'à quelques millions d'années pour les étoiles les plus massives. C'est là un résultat capital de la théorie de l'évolution des étoiles: il montre que ce sont elles qui joueront le rôle principal dans la synthèse nucléaire des éléments dans la Galaxie. C'est également cette variation du temps de vie des étoiles avec leur masse qui va nous permettre d'estimer l'âge des étoiles.

La détermination de l'âge des étoiles

Les amas d'étoiles sont des groupes d'étoiles de diverses masses qui, à quelques millions d'années près, sont nées simultanément. Les étoiles d'un amas définissent donc

dans le diagramme HR une courbe isochrone, c'est-à-dire caractérisée par un même âge. Les courbes de ce genre sont modelées par le fait que les étoiles massives, dans le haut de la séquence principale, évoluent plus rapidement que les étoiles de petite masse; dans un amas, elles atteignent donc plus tôt les phases avancées de l'évolution, c'est-à-dire les stades de géante rouge et d'astres condensés, alors que, pour le même âge, les étoiles moins massives sont toujours sur la séquence principale.

La figure 4 montre le diagramme HR de quelques amas d'âges différents et de composition chimique voisine de celle du Soleil, dits amas de population I. Dans l'amas double *h* et χ Per, la séquence principale est peuplée jusqu'à une luminosité d'environ

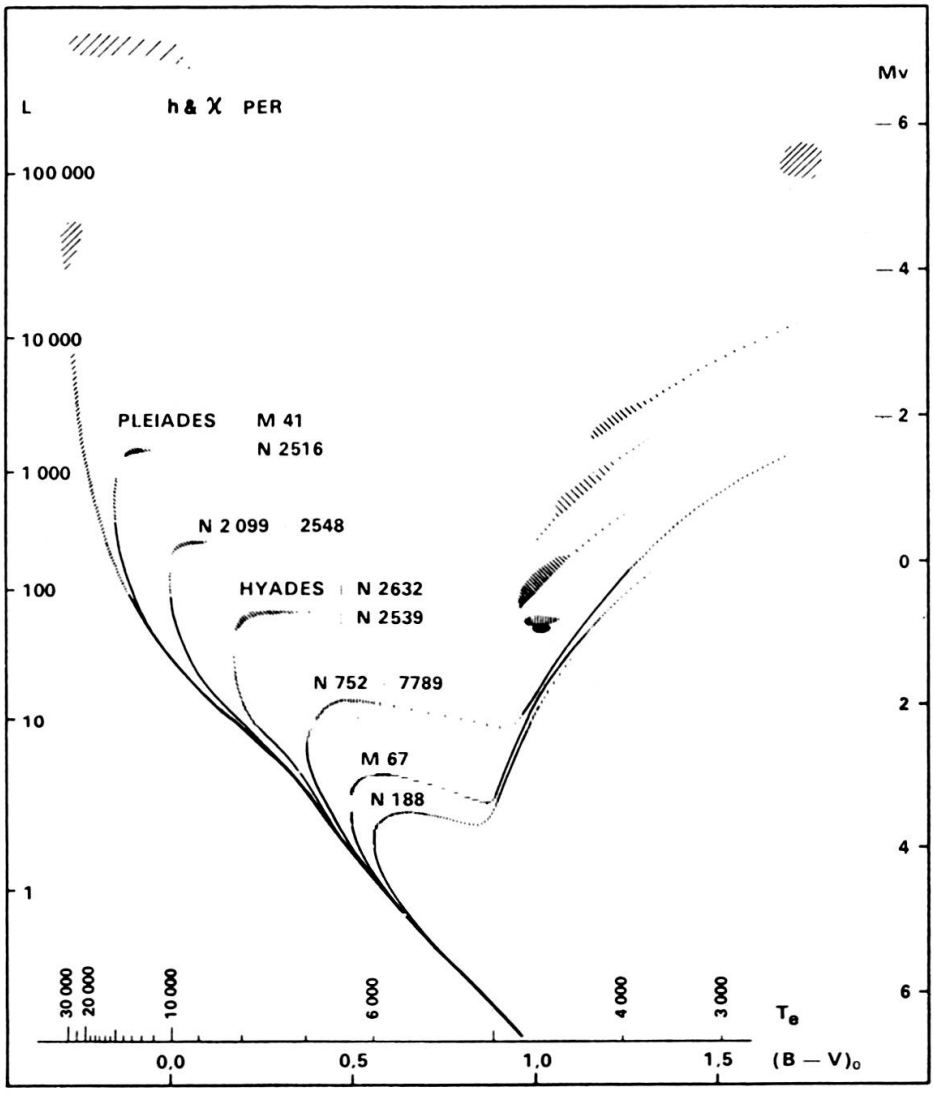

FIG. 4.

Diagramme HR pour des amas d'étoiles d'âges différents. On peut construire le diagramme HR d'un amas d'étoiles toutes les fois qu'il est possible de connaître la luminosité et la température de ses membres. Ainsi a-t-on porté, sur le dessin ci-dessus, les diagrammes de plusieurs amas. La notation Pléiades + *M* 41 + *N* 2516 signifie que le tracé correspondant est celui défini par l'amas des Pléiades et par les amas *M* 41 et *NGC* 2516, (d'après M. Grenon).

30'000 $L_\odot$: cela signifie que les étoiles de masse supérieure à environ 15 $M_\odot$ ont quitté la séquence principale, ce qui correspond (Tab. 1) à un âge de 11 millions d'années. Dans l'amas des Pléiades, d'après leur luminosité, seules restent au voisinage de la séquence principale les étoiles de masse inférieure à environ 6 $M_\odot$, ce qui conduit, pour l'amas, à un âge de 60 millions d'années. Pour l'amas des Hyades, par exemple, le décrochement de la séquence principale s'effectue au niveau de 2.5 $M_\odot$, et l'âge de cet amas est de 600 millions d'années. Les amas M67 et NGC 188, qui ont un décrochement à des luminosités encore plus basses, ont des âges de 4 et 6 milliards d'années respectivement.

On peut donc estimer les âges des amas d'étoiles en cherchant quelle est la luminosité maximum des étoiles sur la séquence principale, c'est-à-dire dans le stade de fusion d'hydrogène. Plus cette luminosité est élevée, plus massives sont les étoiles encore sur la séquence principale, et plus jeune est l'amas d'étoiles. En pratique, pour estimer l'âge des amas, on procède comme suit: les modèles calculés permettent d'obtenir des lieux isochrones théoriques, et c'est la comparaison de ces isochrones théoriques avec les séquences d'amas observées qui fournit une estimation de leur âge. Pour estimer l'âge d'une étoile isolée, on procède selon le même principe: la position de l'étoile dans le diagramme HR fournit une indication sur l'âge de l'étoile; en fait c'est souvent une limite supérieure à l'âge de l'étoile que l'on obtient dans le cas d'une étoile individuelle.

Les âges des amas d'étoiles sont indispensables pour dater les phénomènes intervenant lors de l'évolution de la Galaxie. Grâce aux grands télescopes modernes, on peut maintenant aussi appliquer la méthode évoquée ci-dessus aux galaxies voisines, en particulier au Grand et au Petit Nuage de Magellan.

Les plus vieux amas observés dans les galaxies sont les amas globulaires qui peuvent contenir jusqu'à 1 million d'étoiles. Ces amas sont contemporains de la naissance des galaxies et l'estimation de leur âge fournit une indication précieuse sur l'âge des galaxies elles-mêmes. En appliquant la méthode évoquée ci-dessus, on trouve des âges compris entre 12 et 15 milliards d'années. Les modèles de formation des galaxies suggèrent qu'il a dû s'écouler environ 1 milliard d'années entre l'origine de l'Univers et la naissance des premières galaxies. On note donc la remarquable concordance des estimations cosmologiques de l'âge de l'Univers et de l'estimation de l'âge des plus vieilles étoiles. En plus de l'âge de l'Univers, les âges des amas d'étoiles fournissent des repères chronologiques sur des temps s'étendant de l'âge de l'Univers à quelques millions d'années. C'est ainsi que l'Astronomie peut situer sur des échelles de temps très vastes les phénomènes qui marquent l'évolution de l'Univers.