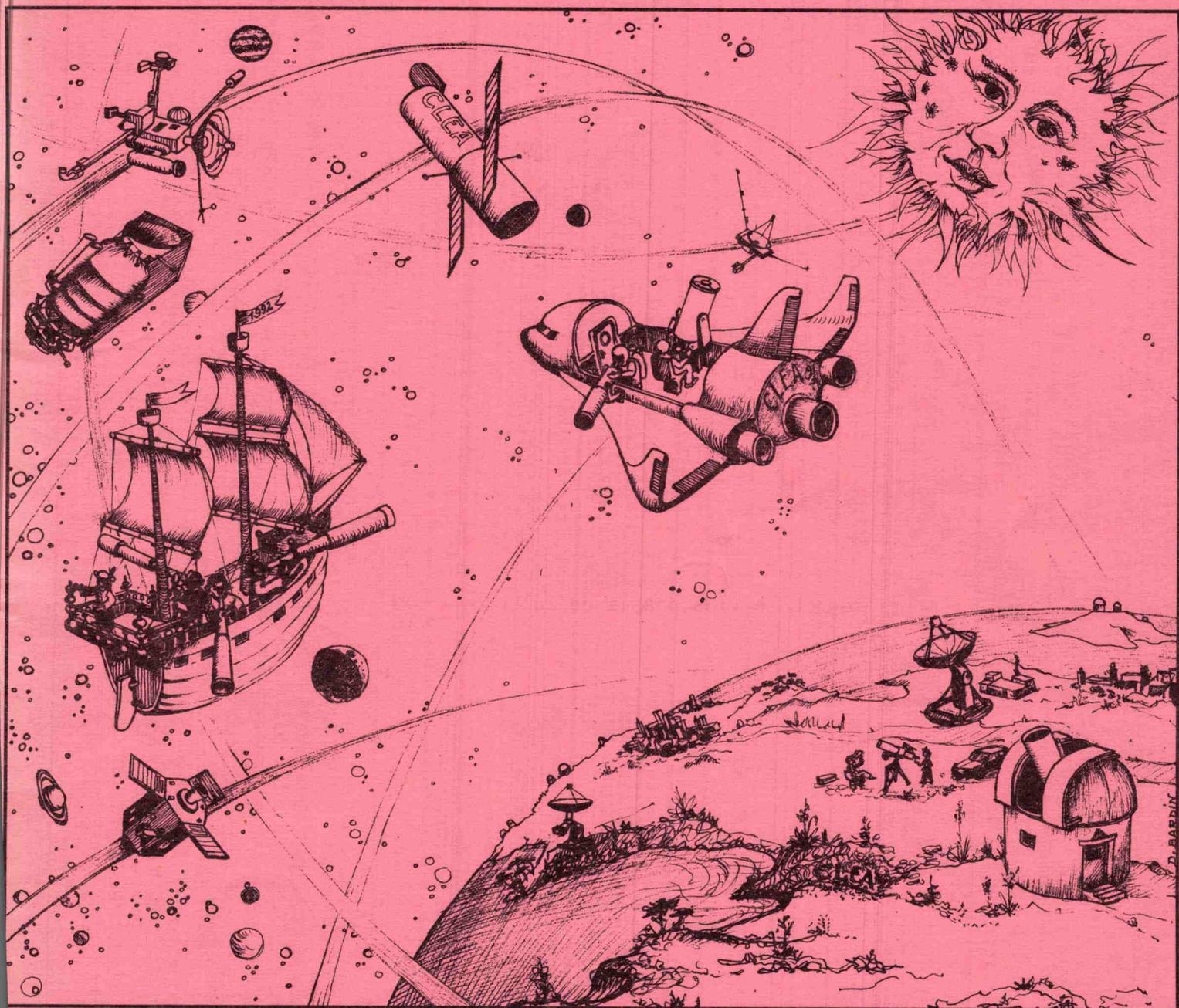


les cahiers clairaut

bulletin du comité de liaison enseignants et astronomes



N° 60 - H I V E R 1 9 9 2 - 9 3

ISSN 0758-234 X

LE C.L.E.A. - COMITE DE LIAISON ENSEIGNANTS ET ASTRONOMES

Le C.L.E.A. , Comité de Liaison Enseignants et Astronomes, est une association déclarée (loi de 1901). Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement public et dans les organismes de culture populaire. En particulier, ils agissent dans le cadre de la formation initiale et continue des enseignants.

Le CLEA intervient par l'organisation de stages et par ses diverses publications.

Le CLEA organise des stages nationaux (universités d'été) et régionaux, éventuellement en liaison avec les Missions Académiques de Formation ou tous organismes de formation des enseignants. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école primaire, du collège, du lycée et de l'IUFM. On s'efforce d'y conjuguer information théorique indispensable et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et bon usage de ces matériels).

Aussi bien dans ses stages que dans ses diverses publications, le CLEA favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes hors de toute contrainte hiérarchique.

La liste des publications du CLEA figure en page 3 et 4 de la couverture.

Bureau du CLEA pour 1992

Présidents d'honneur : Jean-Claude Pecker

Evry Schatzman

Présidente : Lucienne Gouguenheim

Vice-Présidents : Agnès Acker

Marie-France Duval

Hubert Gié

Jean Ripert

Jacques Vialle

Catherine Vignon

Secrétaire-trésorier : Gilbert Walusinski

Comité de rédaction des Cahiers Clairaut : Daniel Bardin, Lucette Bottinelli, Jacques Dupré, Michèle Gerbaldi, Lucienne Gouguenheim, Jean-Paul Parisot, Georges Paturel, Jean Ripert, Daniel Toussaint, Victor Tryoën, Jacques Vialle, Gilbert Walusinski.

LES CAHIERS CLAIRAUT

Hiver 1992

	page
Les pulsars millisecondes	2
L'Université de Gap en devinettes	14
L'évolution stellaire (suite et fin)	15
D'un observatoire à l'autre	21
Lectures pour la Marquise	23
Les problèmes du CLEA	29
Lectures (suite)	30
Pour une histoire de la Galaxie (3)	31
La Chronique du CLEA	37

EDITORIAL

Merci à François Biraud pour sa belle conférence sur les pulsars millisecondes : les participants de l'Assemblée Générale du CLEA l'ont beaucoup appréciée et les lecteurs des Cahiers peuvent en bénéficier, grâce à une collaboration efficace entre François Biraud et Gilbert Walusinski.

Nous avons reporté à ce numéro l'article "D'un observatoire à l'autre", que Jean Ripert nous avait adressé cet été. Gilbert Walusinski a reçu le renfort d'Annie Laval et de Jean-Marie Poncelet pour alimenter les Lectures de la Marquise ... et les vôtres. Bruno Morando apporte une nouvelle fois sa réponse aux questions que nous nous posons.

Fin du "feuilleton" de Christoffel Waelkens sur l'évolution stellaire et suite de celui de K. Mizar sur l'Histoire de la Galaxie.

Merci à eux tous et aussi à Pierre Bouteloup et à Roger Meunier, qui nous ont donnés de très beaux textes, respectivement sur les marées et sur la spectroscopie du Soleil : nous les publierons dans le prochain numéro des Cahiers. L'abondance des matières nous conduit à reporter également au prochain numéro l'habituel "Potin de la Voie Lactée", ainsi qu'un article de notre chère "correspondante de Torun", Cécylia Iwaniszewska sur "Astronomie et Mythologie", transcription par l'auteur d'une de ses deux conférences à l'Université d'été.

Bonne année nouvelle à vous tous ... et n'oubliez pas de vous réabonner !

La Rédaction

LES PULSARS MILLISECONDES

François Biraud

Directeur de recherches au CNRS
Observatoire de Paris-Meudon-Nançay

Avant de parler des pulsars millisecondes et des observations et mesures qu'on peut tirer de leurs étonnantes propriétés, il est sans doute opportun de rappeler quelques données de base concernant les pulsars en général.

Les signaux que nous recevons en radioastronomie sont des bruits informes car les rayonnements captés proviennent de sources qui émettent dans toutes les longueurs d'onde, à quelques exceptions près. La première est celle des sources de raies spectrales parfois assez fines, de quelques centaines de hertz (2 à 300), pour correspondre à des structures temporelles audibles. Une autre exception est celle des brouillages qui correspondent à des émissions terrestres et qu'il faut, bien sûr, éliminer de nos observations. La troisième est justement celle des pulsars qui émettent à toutes les longueurs d'onde sous forme d'impulsions périodiques particulières.

Leur découverte date de 1968. Une équipe de Cambridge, dirigée par A.Hewish, étudiait les scintillations des radiosources provoquées par l'inhomogénéité du plasma de la couronne solaire. Un membre de l'équipe, l'étudiante J.Bell remarqua une source qui scintillait même la nuit ; de plus les fluctuations se révélaient très régulières, des impulsions d'environ 50 millisecondes se répétant à une période voisine de la seconde. On interpréta d'abord ces signaux étonnants comme étant d'origine humaine. Puis on finit par reconnaître que ces sources étaient très extérieures au système solaire. Deux autres sources de même nature ayant été détectées, on leur donna le nom de pulsar (pour PULsating AStronomical Radiosource).

La découverte avait été faite en 1967. L'article l'annonçant a été publié en 1968. On découvrit ensuite beaucoup d'autres pulsars, on en connaît aujourd'hui plus de 500 dans le voisinage du Soleil ce qui n'est pas sans poser de question comme nous le verrons plus loin.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons dont l'existence avait été prévue par F.Zwicky et W.Baade dès 1934, qui pensaient qu'elles devaient se former dans les explosions de supernovae. On considère aujourd'hui qu'elles sont le terme de l'évolution d'étoiles dont les masses sont initialement comprises entre 8 et 15 masses solaires. Ces étoiles ont consommé leur hydrogène dans une première phase relativement rapide, de l'ordre de quelques millions d'années - alors que pour une étoile de masse solaire cette même phase est de l'ordre de dix milliards d'années. Dans une seconde phase, l'étoile consomme son hélium et l'évolution conduit enfin à l'éjection d'une vaste enveloppe : il reste un coeur très dense. Le sort de ce coeur

va dépendre de sa masse : pour une masse comprise entre 1,9 et 2,5 masses solaires, donc dans une marge assez étroite, le coeur s'effondre pour donner une étoile à neutrons qui pourra être un pulsar. Pour un coeur de masse inférieure à 1,9 masse solaire, il y aura éjection de l'ensemble ; pour une masse supérieure à 2,5 masses solaires, l'effondrement se poursuit jusqu'à formation d'un trou noir.

L'étoile à neutrons a donc la densité du noyau atomique et est essentiellement constituée de neutrons. Dans l'effondrement, l'étoile a conservé son moment cinétique. Sa période a été à l'origine de quelques dizaines de jours (27 jours dans le cas du Soleil) et décroît du fait de l'effondrement à quelques dizaines de millisecondes, soit une fréquence de quelques dizaines de hertz.

En même temps, il y a conservation du flux magnétique. Le champ magnétique de l'étoile passe ainsi, du fait de l'effondrement, d'un champ de l'ordre de 10^{-2} Tesla (c'est à dire la centaine de Gauss) à un champ de l'ordre de 10^8 Tesla (la centaine de millions de Gauss).

Voici donc un pulsar qui vient de naître : une étoile toute petite, d'un diamètre de l'ordre de la dizaine de kilomètres, tournant sur elle-même avec une période de quelques dizaines de millisecondes et un champ magnétique de l'ordre de 10^{12} Gauss. Cet astre va rayonner des ondes selon des modes encore mal compris (il y a bien quelques dizaines de théories pour l'expliquer dont la plupart sont probablement fausses). Au moins est-on d'accord sur le modèle suivant (fig.1) : l'étoile tourne autour d'un axe qui n'est pas, en général, celui du champ magnétique ; l'émission a lieu dans la direction du champ dans un cône plus ou moins creux. On voit que, dans ces conditions, toute étoile à neutrons ne sera pas nécessairement un pulsar. Elle le sera seulement si le système solaire est bien placé pour recevoir l'émission à chaque rotation.

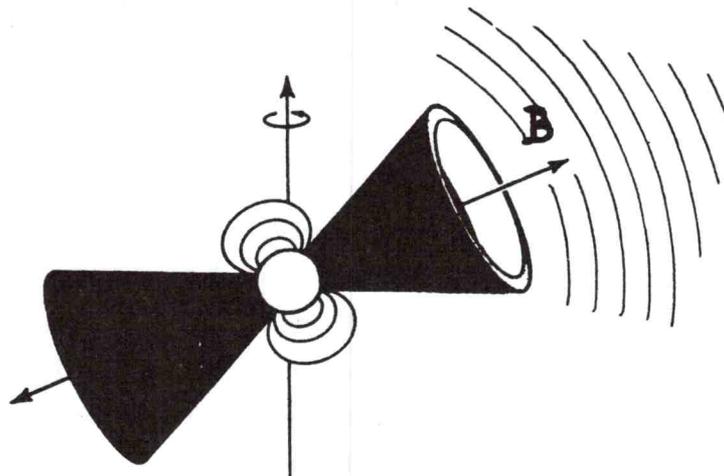


Fig. 1 - Schéma du processus d'émission d'un pulsar. Le rayonnement se produit le long d'un cône axé sur le champ magnétique, lequel est incliné sur l'axe de rotation.

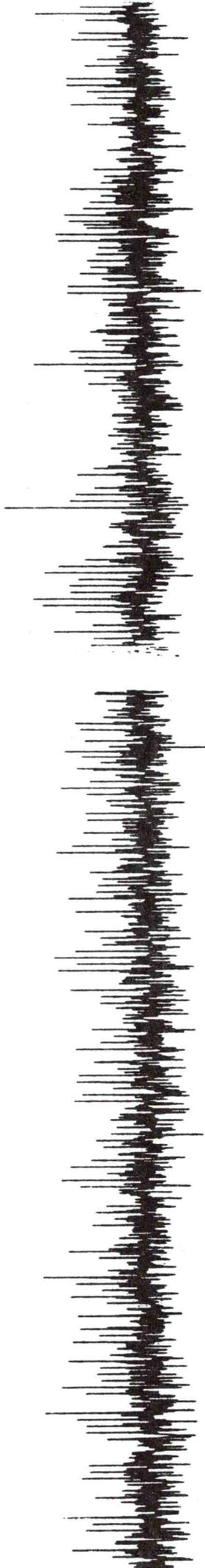
De plus, le rapport cyclique, qui exprime le temps pendant lequel on perçoit l'émission relativement à la durée d'une révolution est de l'ordre de 3% de la période. Cela signifie qu'on ne perçoit l'émission que pendant le trentième du temps d'une période ou encore que la surface d'émission couvre un trentième de la surface de l'étoile. En ajoutant les deux surfaces découpées par les deux nappes du cône, il en résulte qu'une étoile à neutrons sur quinze est placée pour être géométriquement bien orientée par rapport à nous. On connaît aujourd'hui quelques 500 pulsars qui sont dans une région proche du Soleil, au plus à 15 kiloparsecs ; il y aurait donc 7500 étoiles à neutrons dans ce petit coin de Galaxie.

Cette évaluation pose problème. L'hypothèse sur la formation des étoiles à neutrons par effondrement que nous avons résumée ci-dessus ne suffit pas à expliquer cette relative abondance de cette catégorie d'étoile dans notre voisinage, d'autant que nous avons l'idée que la durée d'activité d'un pulsar est relativement brève. Conclusion : ou bien on se trompe sur le processus de formation des pulsars ou bien sur la durée de leur activité.

Une fois formé, le pulsar émet un rayonnement complexe, lumière, radio et même rayons gamma, toute l'énergie émise étant empruntée à l'énergie cinétique de rotation de l'astre. Cette rotation est donc freinée, la période de rotation croît. Pour le pulsar du Crabe qui provient de la supernova de l'an 1054, nous avons une période de 30 millisecondes, typique d'un pulsar jeune ; le record observé est une période de 4 secondes, typique d'un pulsar vieux.

Signalons aussi l'existence de pulsars doubles ; on en connaît actuellement 17 ce qui est peu dans la quantité des 500 pulsars connus mais ce sont des objets spécialement intéressants dont nous aurons à reparler.

Pour clore ces généralités, je vous montre à quoi ressemble un enregistrement de pulsar. Spécialement à l'intention de l'assemblée générale du CLEA, à votre intention, j'ai fait enregistrer ce 20 novembre à Nançay, le pulsar 0329+54 (qui se trouve donc à 03h 29 mn d'ascension droite et +54° de déclinaison) et qui est le plus intense connu (fig. 2). Sur cet enregistrement analogique, chaque impulsion correspond à un tour du pulsar sur lui-même (le flux reçu augmente vers le haut). Il a une période de 0.71451866398 seconde (rares sont les quantités physiques mesurées avec cette précision !) et elle diminue de $p' = 2.04959 \times 10^{-15}$ seconde par seconde. Le rapport p/p' , de l'ordre de 10^{14} secondes donne l'ordre de grandeur de l'âge du pulsar soit environ cent millions d'années, ce qui est très court par rapport aux durées d'évolution dans l'Univers, ou même, par exemple, à la durée d'une révolution de la Galaxie dans le voisinage



PSR 0329+54

$P = 0.71451866398 \text{ s}$

$P' = 2.04959 \times 10^{-15} \text{ (ss}^{-1}\text{)}$

20 Nov 1992 at Nançay

Fig. 2

du Soleil, au moins trois fois plus grande. Avec une durée de vie aussi courte et si les pulsars ne se forment qu'à partir des supernovae, on ne devrait pas en trouver 500 dans le voisinage du Soleil.

LES PULSARS MILLISECONDES

Tel était l'état des connaissances sur les pulsars en 1982 quand on découvrit, à la suite de cogitations et d'observations sur une radiosource étrange, un pulsar de période 1,6 milliseconde qui tournait donc sur lui-même avec une fréquence de 600 hertz. Cela posait un nouveau problème : en appliquant toujours la conservation du moment cinétique, on ne parvient pas à une période aussi courte qui, dans le cas de ce pulsar 1937+21 est 1.557806473356882 milliseconde.

On en a découvert d'autres et on connaît aujourd'hui 29 pulsars millisecondes. On peut croire cette statistique peu fiable en se demandant si on peut vraiment distinguer, pour un pulsar de période 30 millisecondes, s'il s'agit d'un pulsar typique jeune ou d'un pulsar milliseconde vieilli. On va voir que la distinction est possible.

Les pulsars millisecondes ont des dérivées de la période, p' , très faible, de l'ordre de 10^{-19} ss^{-1} , et même pour certains une dérivée positive. Ces pulsars sont accélérés en rotation. Ce sont des pulsars vieux qui ont été réactivés ; les Américains les ont appelés des Spun-up-Pulsars.

Comment cela a-t-il pu se produire ? On constate que sur 29 pulsars millisecondes, 7 sont doubles : c'est beaucoup plus en proportion que les 17 pulsars doubles sur 500 pulsars typiques. On comprend alors que la réaccélération des pulsars millisecondes provient de l'absorption du deuxième composant par le composant principal de la paire. Les 7 pulsars doubles millisecondes sont en train d'absorber leur compagnon avec son moment cinétique ; leur p' est positive. Les autres pulsars millisecondes ont déjà consommé leur compagnon, ils ont été réaccélérés.

Des pulsars jeunes, type Pulsar du Crabe, sont des pulsars très actifs où il se passe beaucoup de choses ; leur période est peu stable. Au contraire les pulsars millisecondes sont des pulsars vieux qui ont dépassé leur période d'activité ; ils sont particulièrement stables dans leur comportement et c'est sur eux que nous allons pouvoir faire des observations intéressantes.

Beaucoup de ces pulsars millisecondes actuellement connus sont situés dans des amas globulaires. Pourquoi ? Pour deux raisons équivalentes : on a tendance à les chercher là de préférence car la concentration d'étoiles y étant plus élevée, la probabilité d'observer des binaires y est plus grande. Dans l'amas 47 Toucan, on observe 12 pulsars millisecondes sur les 29 connus. Ils sont particulièrement étudiés par les astronomes australiens.

CHRONOMETRAGE DES PULSARS

Entendons nous bien sur la signification de l'expression: par chronométrage d'un pulsar, il faut entendre le repérage du temps d'arrivée des impulsions. Ne pas confondre cette opération avec la détermination de la période qui s'en déduira.

Je prends l'exemples des opérations telles qu'elles sont pratiquées en ce moment à l'Observatoire de Nançay. Nous y disposons d'une échelle de temps construite localement à partir d'une horloge atomique comparée chaque jour au temps atomique (TA) défini à l'Observatoire de Paris, la synchronisation étant réalisée par les signaux de la télévision. On dispose finalement d'un temps qui est celui de l'Observatoire de Paris (rattaché ultérieurement au TAI) avec la précision de 10^{-8} seconde.

La mesure est compliquée par le phénomène de la dispersion interstellaire. A l'émission par le pulsar, les impulsions sont émises simultanément quelle que soit la fréquence du rayonnement (cf fig. 3). Alors qu'à l'arrivée, après dispersion par le plasma interstellaire, il y a un retard inversement proportionnel au carré de la fréquence. On le constate sur la figure 4, observation du pulsar 1937+21 réalisée à Greenbank aux USA. (Entre deux impulsions, on voit "l'interpulse" émis par l'autre nappe du cône d'émission). Sans entrer dans les détails techniques, on mélange le signal reçu du pulsar à un signal généré localement et reproduisant la même variation de la fréquence en fonction du temps. La différence de fréquence est donc constante et c'est elle que l'on mesure. On est passé

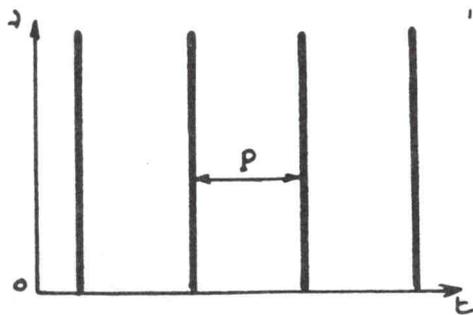


Fig. 3

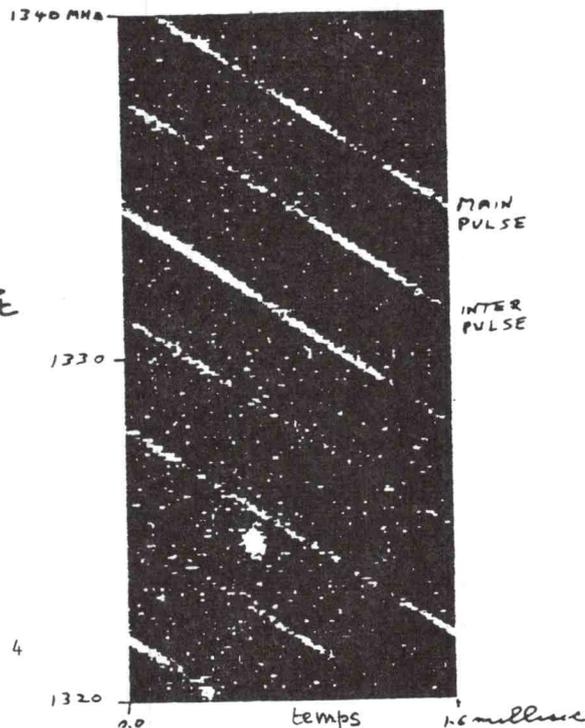


Fig. 4

Fig. 3 - Le spectre dynamique émis par un pulsar : les impulsions sont émises à toutes les fréquences au même moment.

Fig. 4 - Le même spectre reçu après traversée du milieu interstellaire : le retard variant avec la fréquence, les impulsions sont inclinées sur l'axe du temps.

d'une mesure dans le domaine du temps à une mesure dans le domaine des fréquences. A Nançay, avec le grand télescope, on a une bonne sensibilité et une excellente résolution temporelle car les impulsions des pulsars sont très fines.

Cependant, vous notez que sur la figure 2 vous voyez l'enregistrement d'impulsions individuelles. Ce qui était réalisable avec le pulsar le plus intense du ciel. Pour la plupart des pulsars, il faut additionner les impulsions reçues pendant un temps assez long. Voici ce qu'on a obtenu à Nançay en intégrant plusieurs milliards d'impulsions du pulsar 1937+21 (cf fig.5).

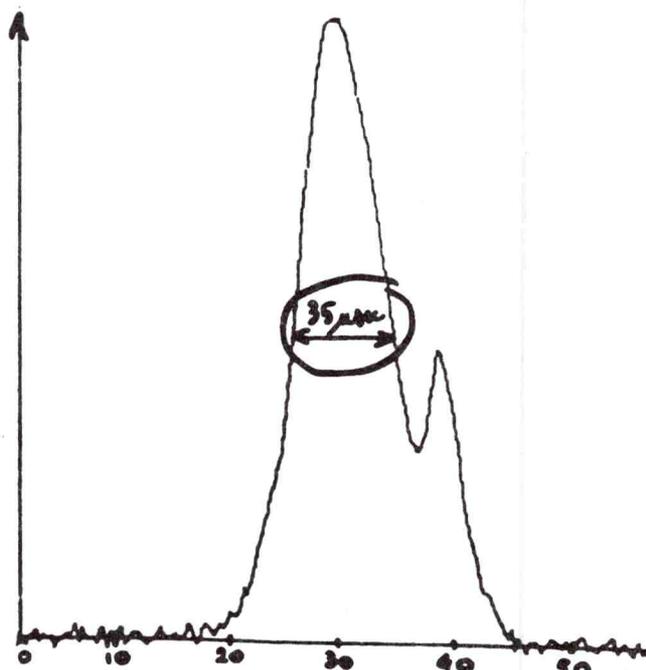


Fig. 5 - Le profil moyen du pulsar milliseconde 1937+21, observé à Nançay. L'intensité est représentée en fonction de la phase en degrés.

Résultat : on obtient une qualité de chronométrage de 0,3 milliseconde pour un pulsar typique dont la période est de l'ordre de la seconde, ou de 0,3 microseconde pour un pulsar milliseconde. Précision qui ouvre des domaines de recherche qui, sans cela, resteraient interdits.

A Nançay, nous mesurons donc les temps d'arrivée avec une précision de 300 nanosecondes. Ces temps varieront avec la position de la Terre sur son orbite par rapport au pulsar. Avec la précision obtenue, on peut déterminer la position de la Terre à 100 mètres près ; aucun autre procédé ne peut faire aussi bien. Il s'agit donc d'une acquisition de portée révolutionnaire. Nous allons voir quelques unes des conquêtes qu'elle a permises.

Première partie

1. LA PHYSIQUE DES PULSARS "NORMAUX"

Sur les pulsars "normaux", c'est à dire autres que les millisecondes, le fin chronométrage des impulsions reçues fournit des renseignements précieux sur la physique de ces astres : comment ils rayonnent, comment leur rotation décélère et quel est leur âge. Un exemple de ces informations : on observe parfois de brusques modifications de la période d'un pulsar. On interprète cette discontinuité par des réarrangements de la matière de l'étoile dont la surface aurait une structure cristalline. Les variations observées dans la fréquence reflètent une variation de la rotation et par conséquent une variation du rayon de l'étoile. A la précision obtenue, une variation du rayon de l'ordre du millimètre est ainsi perçue à une distance de l'ordre du kiloparsec : sans doute un record de précision dans les mesures de longueur ! Une telle discontinuité a été observée pour la première fois dans le pulsar de Vela.

Écoutons à titre d'exemples trois enregistrements : un pulsar d'âge moyen, un autre plus vieux, plus lent, et enfin celui de Vela, très rapide.

2. LA DETECTION DES PLANETES

Depuis longtemps on essaye de détecter la présence de planètes en dehors du système solaire. Le procédé le plus utilisé consiste à comparer la position d'étoiles proches par rapport aux étoiles lointaines servant de repère et à déceler des oscillations des étoiles proches, ces oscillations étant dues par l'effet de gravitation d'une planète assez massive orbitant autour de l'étoile. Une bonne demi douzaine de candidats existent mais le phénomène est trop peu important pour que la conclusion soit assurée.

En mesurant les déplacements longitudinaux par effet Doppler, on ne parvient pas à des assurances plus grandes. D'autres procédés plus complexes n'ont pas donné des résultats plus performants et jusqu'en 1991 on restait dans l'incertitude.

En juillet 1991, une équipe de Jodrell Bank, en Grande-Bretagne, annonce qu'elle a découvert une planète autour d'un pulsar. Ces astronomes avaient constaté une composante périodique dans le chronométrage du pulsar qu'ils enregistraient. La dite période étant d'une demi année, à un jour près, les astronomes de Jodrell Bank se méfiaient mais ne voyant pas quel phénomène terrestre pouvait s'être introduit dans leurs mesures, ils se décidèrent à annoncer leur découverte. Scrupuleux, ils reprirent pourtant leurs calculs et finirent par découvrir que la composante périodique s'était introduite fortuitement par suite d'une erreur de manipulation

informatique.

En janvier 1992, l'équipe de Jodrell Bank publia donc un démenti de sa première information. Mais le principe invoqué la première fois était bon puisque quelques jours après, en appliquant la même méthode, l'observatoire d'Arecibo décelait sans ambiguïté la présence de deux compagnons obscurs autour du pulsar PSR 1257+12. On pouvait même préciser que l'une des planètes d'une masse égale à 2,7 masses terrestres se trouvait à 0,47 unité astronomique de l'étoile et tournait autour en 98,2 jours ; l'autre planète de masse égale à 3,4 masses terrestres se trouve à 0,36 unité astronomique de l'étoile et gravite autour en 66,6 jours.

Pour comprendre la délicate technique de la détection, comparons les enregistrements du pulsar du Crabe (fig.6.a), un pulsar jeune avec des variations imprévisibles et l'enregistrement de PSR 1257+12 (fig.6.b). Vous remarquez que les périodes des planètes sont presque commensurables, la seconde les deux tiers de la première. On continue le chronométrage. Des effets de résonance devraient être observés et cela constituera une preuve irréfutable de l'existence de deux planètes autour de ce pulsar.

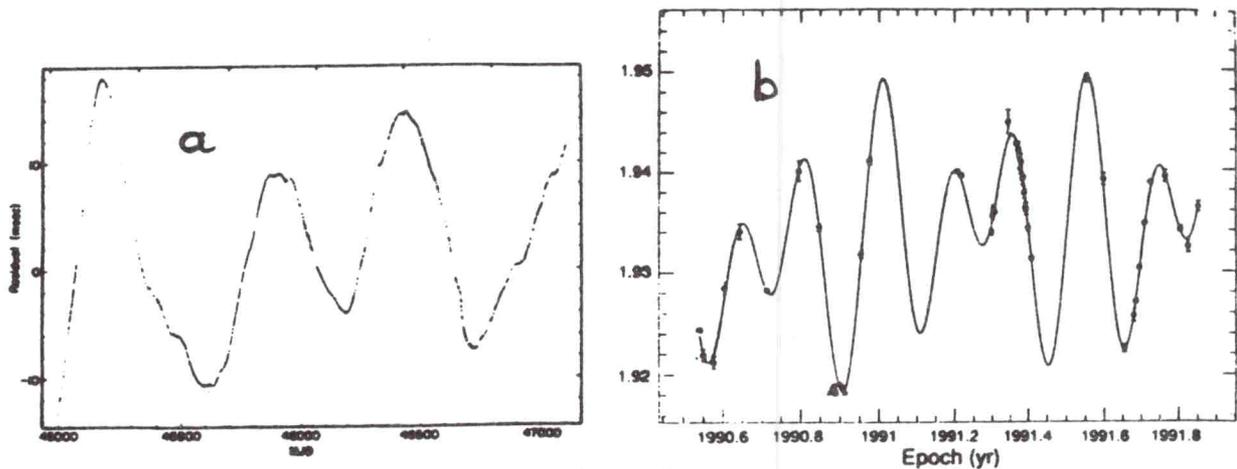


Fig. 6 - Temps d'arrivée des impulsions de deux pulsars.
- en a, le pulsar de la nébuleuse du Crabe : les variations sont erratiques ;
- en b, PSR 1257+12 : les variations sont dues à la présence de deux planètes.

Deux remarques : 1°) Les planètes trouvées, tant par leurs masses que par leurs distances à l'étoile donnent une configuration qui s'apparente à celle du système solaire ; le système détecté n'est en rien exotique. 2°) Mais on ne s'attendait vraiment pas à trouver des planètes autour d'un pulsar ; comment ces planètes ont-elles pu survivre à l'explosion de supernova qui a donné lieu à la formation de l'étoile à neutrons ? On se trouve devant une situation contradictoire : grâce au chronométrage,

on découvre des planètes qu'on ne s'attendait pas à trouver autour d'un pulsar alors qu'autour des étoiles normales où on s'attend à trouver des planètes, on ne dispose pas du chronométrage pour les détecter. On peut aussi penser que les pulsars peuvent avoir une autre origine ; en particulier, dans les amas globulaires où les étoiles sont très serrées, par un phénomène de coalescence de naines blanches allant jusqu'à la formation d'une masse suffisante à l'évolution en étoile à neutrons.

De toute façon, la détection de planètes autour d'un pulsar est un indice très fort de l'existence de planètes autour des autres étoiles.

3. DISTANCE DES PULSARS

De façon accessoire, en chronométrant les arrivées des impulsions, on obtient une "mesure de dispersion" qui est l'intégrale de la densité électronique sur la ligne de visée. Donc en prenant une valeur moyenne de cette densité, on peut en déduire une distance du pulsar.

° °

Deuxième partie

Etudions maintenant plus particulièrement les questions résolues grâce aux propriétés des pulsars millisecondes.

1. MESURE DE PARALLAXES

Grâce au chronométrage, on peut déterminer la position des pulsars millisecondes à la précision de 10^{-4} seconde d'arc. On peut donc déterminer directement leur parallaxe annuelle jusqu'à des distances de plusieurs kiloparsecs.

2. INFORMATIONS SUR LE MILIEU INTERSTELLAIRE

Nous avons observé le pulsar 1937+21 depuis 1989 (cf fig.7) et nous constatons, à certaines dates (fin de 1989), un effet de scintillation : sur le trajet du rayonnement, il est passé une grosse bulle de plasma provoquant une sorte de focalisation, le flux a augmenté et diminué, le retard augmentant de plusieurs microsecondes.

On constate que la mesure de dispersion varie dans le temps. Cela s'explique par l'agitation plus ou moins turbulente du plasma interstellaire.

3. ASTROMETRIE

Le chronométrage du pulsar dépend de la position de la Terre sur son orbite. Il en résulte que la position du pulsar est rapportée au référentiel de l'écliptique (avec la précision de 10^{-4} seconde d'arc).

Un autre procédé de mesure de la position du pulsar est l'interférométrie à longue base qui a été réalisée également entre Nançay, Effelsberg et Jodrell Bank, mesure qui, elle, est rapportée au référentiel équatorial. Le chronométrage du pulsar est le seul moyen de relier avec cette précision

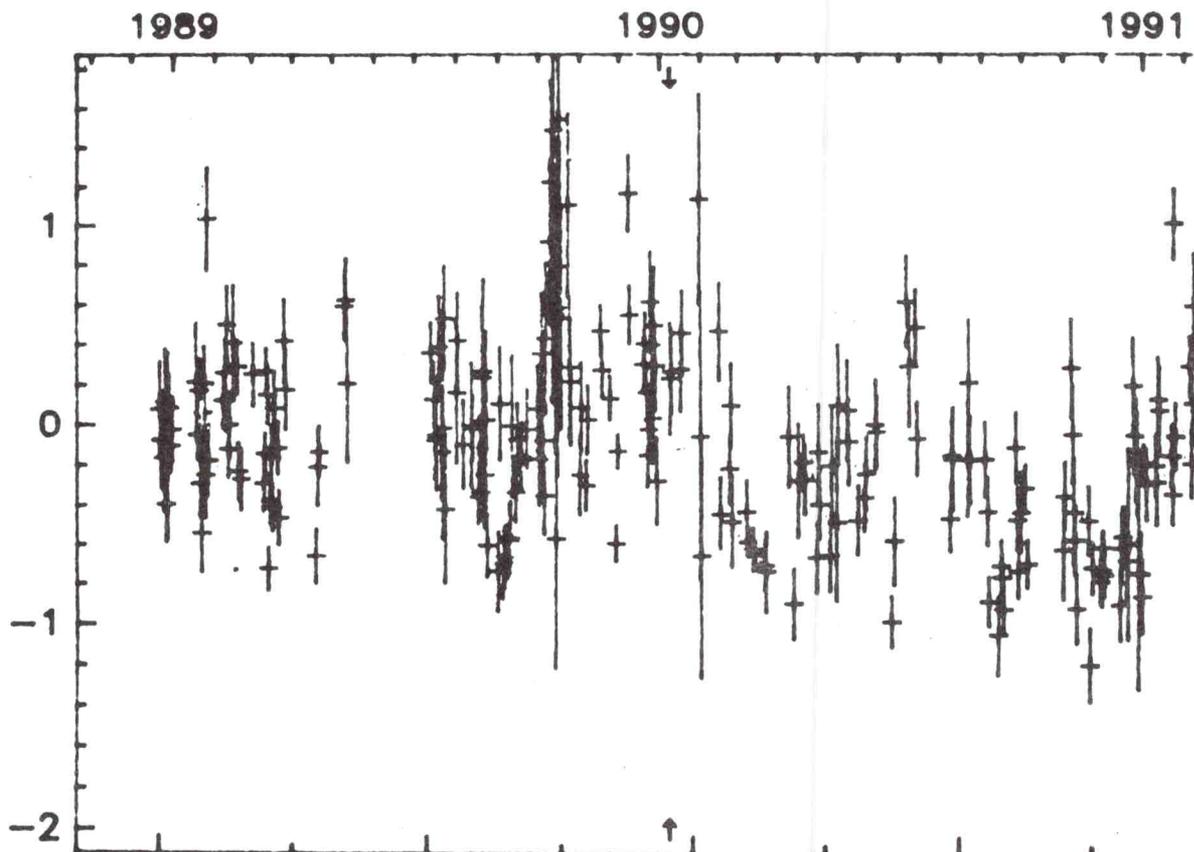


Fig. 7 - Temps d'arrivée, observés à Nançay, des impulsions de PSR 1937+21. On remarque, en octobre 1989, "l'événement de scintillation réfractive" discuté dans le texte.

ces deux référentiels. Cette utilisation astrométrique des pulsars est certainement d'une grande importance.

4. METROLOGIE DU TEMPS

On ne peut disposer d'un étalon de temps conservé au pavillon de Breteuil. On définit donc des échelles de temps par référence à des horloges bien choisies. On a commencé par se fier à la rotation de la Terre sur elle-même. Puis on a trouvé mieux, les physiciens ont construit l'horloge à césium.

L'horloge à hydrogène serait peut-être la meilleure avec une stabilité relative de 10^{-15} (ce qui représenterait un quart d'heure de variation depuis le big bang !) mais sur quelques milliers de secondes et sa stabilité n'est pas garantie sur une durée beaucoup plus longue.

On préfère donc, pour le moment, la référence à l'horloge au césium mais les métrologues pensent qu'un jour les échelles de temps seront vérifiées et raccordées aux échelles de temps définies à partir des pulsars car ces derniers semblent bien être plus stables à long terme (quelques années) que les horloges à césium. Le problème sera difficile car il faudra de très grands radiotélescopes et il y en a peu dans le monde capables de faire ces mesures. En tout cas, cela permettra aux astronomes

de reprendre leurs prérogatives dans la définition du temps...

5. DYNAMIQUE DU SYSTEME SOLAIRE

Le chronométrage d'un pulsar à Nançay à 300 nanosecondes près signifie qu'on connaît la distance de la Terre au pulsar à 100 m près. Or les perturbations de Jupiter sur la Terre sont de l'ordre de dix mille kilomètres. Le chronométrage des impulsions de pulsar devient ainsi le meilleur moyen de mesurer, par exemple la masse de Jupiter. Ce qui est vrai pour Jupiter, l'étant de la même façon pour les autres planètes. Je passe sur le détail des opérations nécessaires mais on comprend que c'est l'extraordinaire précision des mesures qui est ainsi exploitée.

6. VERIFICATIONS DE LA RELATIVITE

On sait quels furent, historiquement, les deux grands tests de la théorie de la Relativité : l'explication du résidu encore injustifié dans l'avance du périhélie de Mercure et la déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil.

L'avance du périhélie de Mercure était plus élevée de 43" par siècle que celle qui avait été calculée selon la mécanique de Newton. La Relativité Générale corrige cet écart.

La déviation des rayons lumineux a été observée lors de l'éclipse totale de Soleil de 1919 : on a mesuré une déviation angulaire des rayons lumineux des étoiles. Avec les pulsars, on mesure un retard des rayons d'autant plus important qu'ils frôlent de plus près une grande masse comme celle du Soleil. Ce retard peut atteindre 125 microsecondes; autrement dit l'effet relativiste sur les pulsars est 400 fois les erreurs de mesure.

Soulignons l'intérêt de ce résultat. Il réfute une opinion trop répandue que les corrections relativistes ne portent que sur des quantités négligeables. Ici, dans un chronométrage de pulsar, ne pas tenir compte de l'effet relativiste pourrait masquer le phénomène étudié.

Le chronométrage des pulsars permet donc deux vérifications de la Relativité Générale. 1°) Le mouvement des planètes est affecté d'une correction relativiste, importante comme on vient de le dire pour Mercure mais qui a été aussi vérifiée pour Vénus, pour la Terre et même pour des astéroïdes comme Icare. 2°) Le retard des arrivées des impulsions d'un pulsar lorsque le Soleil passe près de la direction du pulsar cumule deux effets, le retard dû au plasma solaire et la correction relativiste. Cette mesure a été faite à Nançay pour le pulsar 1821-24 qui est occulté par le Soleil aux environs de Noël ; les mesures effectuées ont confirmé un retard relativiste de 60 microsecondes donné par la théorie.

Les mesures précédentes concernant des phénomènes du système solaire sont donc relatives à un champ gravitationnel faible, celui du Soleil. On observe aussi des phénomènes intéressants par le chronométrage

de pulsars doubles, les champs gravitationnels y sont très importants, les effets relativistes sont énormes. Dans le cas du pulsar double 1913+16 on a mis en évidence qu'une partie de l'énergie qu'il émet est sous la forme d'ondes gravitationnelles, conformément à ce que prédit la Relativité Générale. D'autres pulsars doubles sont étudiés dans cette même perspective : déceler des ondes gravitationnelles.

7. COSMOLOGIE

Les temps d'arrivée des impulsions dépendent de la distance des pulsars et par conséquent de la métrique de l'espace entre eux et nous. S'il y a des ondes gravitationnelles sur le trajet, nos estimations de distances en seront affectées. Ces ondes peuvent avoir diverses origines, des événements ponctuels (tels que des supernovae, ...) ou des résidus de ce qui s'est passé peu après le Big Bang.

° °

En guise de conclusion, il faut insister sur la variété des applications du chronométrage des pulsars. A partir de techniques qui ne sont certes pas évidentes mais qui sont bien maîtrisées, on apporte des possibilités exploratoires étonnantes et nouvelles dans des domaines très variés de l'astrophysique.

L'UNIVERSITE DE GAP 1992 EN DEVINETTES

Essayez, nous dit Cecylia Iwaniszewska, de deviner qui aurait pu faire les remarques suivantes

1. Mon assistante, savez-vous où z'ai mis mon appareil ? Si ze ne prend pas de photos des participants, ze ne pourrait pas dessiner ensuite les caricatures pour les Cahiers Clairaut !
2. Tu avais l'air très bien avec ce chapeau de Galilée à larges bords. Pourquoi ne pas le porter tous les jours pour aller au lycée ?
3. C'est vrai qu'il y a eu en 1930 le grand débat sur les galaxies entre Shapley et Curtis, mais maintenant, on n'a plus le temps d'y penser, car il faut vite ranger les tables et les chaises ! Le camion de Gap va arriver tout à l'heure !
4. Si seulement je pouvais enregistrer dès maintenant tous ceux qui veulent participer à la prochaine Université d'été !
5. Où sont passées mes pinces et ma corde à linge ? Es-tu déjà en train de préparer ton cours d'histoire de la physique ?
6. Que c'est bon de manger à nouveau du fromage et des salades après le riz de Pékin !
7. Est-ce que tout le monde est content ? Il ne manque rien ?
8. La prochaine fois que je viens en France, j'apporte mon gros "Dictionnaire Astronomique en 6 langues" et un recueil international de chansons !
9. Pour le prochain cours sur le repérage, je prendrai mon magnétophone et une cassette de musique moderne ; je pourrai alors manipuler la grande sphère sans qu'on l'entende grincer !
10. Ah, je me suis tellement appliqué à parler français correctement, et me voila tout confus : est-ce-que "ça tourne, le Saturne ?", ou bien "Saturne ne tourne pas" ?
11. Ah, j'ai fait un beau rêve de parapluies bleus ; c'est beau n'est-ce pas ? Mets-toi vite au lit, car demain nous allons voyager toute la nuit pour rentrer à temps pour la rencontre avec les enseignants de la région !

(Réponse, page 22)

L'EVOLUTION STELLAIRE

(suite et fin)

C. WAELKENS

Astronomisch Instituut Katholieke Universiteit Leuven

L'évolution des étoiles massives

La figure 4 nous apprend que pendant toute l'évolution des étoiles plus massives que 8 masses solaires, les réactions nucléaires se passent dans un milieu non dégénéré. D'une part, la combustion se passera donc sans épisodes catastrophiques, mais d'autre part il n'y aura pas d'électrons dégénérés pour contribuer à la pression. L'étoile n'a alors pas d'autre choix que de continuer à produire de l'énergie par fusion nucléaire. Ainsi à la combustion d'hydrogène succédera celle d'hélium, puis le carbone sera fusionné en magnésium-24,...

Il est clair que les réactions nucléaires ne pourront pas éternellement produire la pression nécessaire dans ces étoiles. Une fois le fer-56 synthétisé dans la réaction



c'en sera fini avec les possibilités de produire de l'énergie par fusion. En plus, les différentes phases de combustion se succéderont de plus en plus rapidement, pour deux raisons. D'abord, nous voyons sur la figure 1 que la pente diminue quand on se rapproche du fer; donc, de moins en moins d'énergie sera produite par réaction et il faudra de plus en plus de réactions par unité de temps pour assouvir les besoins de l'étoile. Puis, les réactions se produiront chaque fois à des températures plus hautes, et ainsi une fraction chaque fois grandissante de l'énergie sera évacuée par des neutrinos; celles-ci sont des particules qui n'interagissent pratiquement pas avec la matière et qui donc ne contribuent point à la pression. Pour produire quand même la pression nécessaire pour contrer son autogravitation, l'étoile devra donc produire de plus en plus d'énergie! La durée de la phase de synthèse de fer à partir de silicium ne sera que de l'ordre de quelques jours!

L'évolution d'une telle étoile massive conduira finalement à une explosion de supernova "du type II". Le noyau de fer soumis à sa propre gravitation contracte, n'allume plus de réactions, et arrive à une densité telle que ses électrons forment un gaz dégénéré. Mais sa masse atteint assez vite la limite de Chandrasekhar, et l'implosion devient inévitable. Pendant cet effondrement beaucoup d'énergie potentielle gravitationnelle est libérée. Cette énergie sert en partie à défaire les atomes de fer (elles sont "photodissociées"), ce qui accélère encore le processus

d'implosion puisque la photodissociation enlève de l'énergie au milieu. Pourtant, deux facteurs peuvent arrêter l'effondrement: d'une part la matière devient tellement dense qu'elle n'est plus transparente aux neutrinos, et d'autre part les électrons et protons se rentrent dedans et forment des neutrons: l'état de la matière est alors devenu celui d'un gaz dégénéré de neutrons, et celui-ci peut soutenir son propre poids jusqu'à environ deux masses solaires. On assiste alors à la formation d'une "étoile à neutrons".

L'implosion du noyau de fer jusqu'à la formation d'une étoile à neutrons ne dure qu'une milliseconde! Le nouvel équilibre se crée de façon assez brutale. Le rebond produit une onde de choc qui se propage vers l'extérieur de l'étoile. Il se peut alors que cette onde de choc l'emporte sur le mouvement inverse qui fait s'écrouler sur le noyau les couches de l'étoile qui entourent le noyau. Dans ce cas-là, ces couches, qui forment des coquilles de composition chaque fois différente, correspondant à des phases successives de combustion nucléaire, sont éjectées dans l'espace et une partie de l'énergie libérée parvient à l'extérieur. C'est l'explosion de supernova.

On peut aussi s'imaginer que, pour des étoiles très massives, l'onde de choc soit trop faible pour souffler les couches extérieures et que tout s'écroule. Alors même la pression des neutrons ne peut plus suffire pour contrebalancer la gravitation et l'effondrement est total, tel que même la lumière n'arrive plus à sortir. Ce scénario ultime de l'écroulement gravitationnel conduit alors à un trou noir.

L'énergie gigantesque libérée dans une supernova du type II est donc à l'origine de source gravitationnelle: elle est produite par l'implosion de l'étoile sur elle-même. Une grande partie (de l'ordre de 99%) de cette énergie est libérée sous forme de neutrinos. De ce qui reste, une fraction est convertie en l'énergie mécanique nécessaire pour souffler l'enveloppe de l'étoile. Cette énergie mécanique dépend de la structure et du poids de l'enveloppe et peut bien différer d'une supernova à une autre. Par conséquent, il est difficile de prédire l'énergie qui peut encore être convertie en la luminosité d'une supernova de type II. Ainsi, la fameuse supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan a-t-elle explosé dans une étoile assez dense, où il a fallu relativement beaucoup d'énergie mécanique pour souffler l'enveloppe: l'étoile n'est donc pas devenue aussi brillante qu'on pouvait espérer.

La nucléosynthèse dans les étoiles

L'astrophysique moderne nous a apporté un certain nombre de connaissances qui sortent du contexte spécifique de cette science et qui devraient faire partie de la culture générale de chacun. Parmi celles-ci la notion d'expansion de l'univers et aussi l'explication pour l'origine des éléments chimiques.

Sur la figure 5 nous voyons ce qu'on appelle l'abondance des éléments, c'est-à-dire la fraction relative dans laquelle les différents éléments de la Table de Mendeleev sont présents dans la nature. Nous remarquons d'abord qu'environ 98% (en masse) des éléments sont sous forme d'hydrogène (72%) et d'hélium (26%). Ces chiffres sont très bien expliqués par les théories cosmologiques: la matière est émergée sous forme de protons et neutrons de la première seconde de l'univers et à peu près tous les neutrons se sont alliés à des protons pour former des atomes d'hélium. Cette "nucléosynthèse primordiale" s'est arrêtée très tôt, quand la densité de l'univers devenait trop faible pour permettre de nouvelles réactions.

Les abondances relatives des éléments dans le système solaire en fonction de leur nombre de masse A . Ces abondances sont le résultat de l'évolution chimique galactique, dans laquelle la synthèse des éléments dans les étoiles joue un rôle essentiel. Les abondances sont données en nombre d'atomes dans une échelle où celle du silicium, égale à 10^6 , soit un million, est prise pour référence. Les chiffres romains désignent les groupes des éléments pour lesquels $A \leq 45$ (pic de l'hydrogène), le pic du fer (II), les éléments plus lourds que $A \approx 65$ (III), les éléments très légers enfin (IV). On notera que l'échelle des abondances est logarithmique.

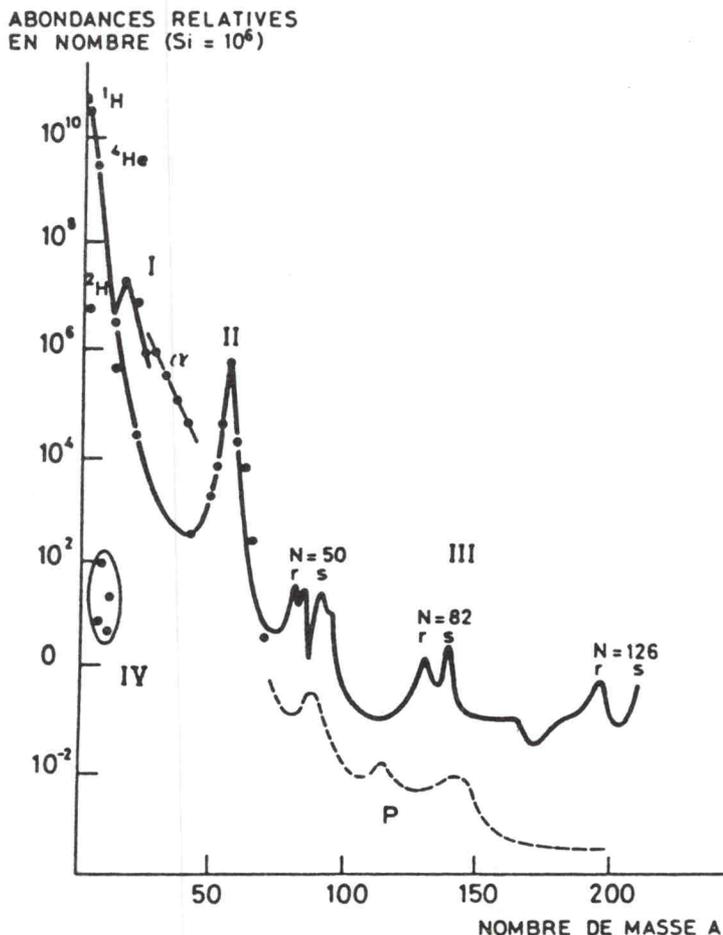


Figure 5:

Ce sont les deux pour cent d'éléments plus lourds qui nous intéressent ici, puisque l'existence de ces éléments peut être expliquée à partir de la théorie de la nucléosynthèse à l'intérieur des étoiles. En fait, par les explosions de supernovae et aussi pendant les phases ultimes des étoiles de faible masse, une partie des produits de cette nucléosynthèse est restituée au milieu interstellaire. Chaque génération d'étoiles est ainsi engendrée par un milieu enrichi chimiquement par les générations précédentes. Sur la figure 5 nous remarquons que

- (1) l'abondance des éléments décroît grossièrement avec le nombre de masse A ;
- (2) il y a une certaine prépondérance des éléments dont le nombre de masse est un multiple de 4, c'est-à-dire l'hélium, le carbone, l'oxygène, le néon, le magnésium, ...
- (3) il y a un maximum local autour du fer (le "pic du fer");
- (4) au-delà du fer, il y a encore des éléments, et là aussi il y a quelques maxima locaux.

Avec ce que nous avons vu plus haut nous pouvons expliquer les points (1) et (2). Il est assez compréhensible qu'il y'a plus d'éléments légers, puisque ceux-ci sont formés les premiers. Les noyaux d'hélium sont le matériel de base des réactions de fusion dans les étoiles évoluées et il est donc normal que les produits ont le plus souvent des nombres de masse qui sont un multiple de quatre. Les autres éléments sont formés à des abondances moins importantes dans les multiples autres réactions qui surviennent dans ces étoiles.

Pour comprendre les points (3) et (4) il faut quelques explications supplémentaires. On ne s'attend pas à qu'une explosion supernova telle que nous l'avons décrite produise du fer, puisque le fer est seulement produit dans le noyau qui justement implose et est photodissocié. Un nouveau concept qu'il faut introduire est la *nucleosynthese explosive*. L'onde de choc dans une supernova chauffe la matière dans l'enveloppe d'une façon telle que des réactions nucléaires en chaîne peuvent se produire; tous les éléments jusqu'au fer sont alors produits dans des proportions différentes. L'explosion d'une supernova n'est pas précisément une situation d'équilibre et l'énergie gigantesque libérée alors conduit aussi à des réactions nucléaires qui consomment de l'énergie au lieu d'en produire; ainsi les éléments stables plus lourds que le fer sont aussi synthétisés. Décrire toutes ces réactions en détail n'est pas simple; il nous suffit ici de dire que la théorie de la nucléosynthèse explosive parvient à expliquer beaucoup de détails de la figure 5, où en voit qu'au-delà du fer il y a certaines "bosses caractéristiques".

Pourtant, les supernovas du type II ne suffisent pas à expliquer le pic du fer. La supernova 1987A a produit plus d'une masse solaire d'oxygène, mais seulement environ 0.07 masses solaire de fer. Par contre, il existe un autre type de supernova, où les éléments du pic du fer sont produits abondamment: les supernovas du type I. Elles ont une origine bien différente des type II. Imaginons une naine blanche dans un système binaire où le companion est assez proche. Au cours de son évolution, ce compagnon grossit et à partir d'un certain moment commence à transférer de la matière sur la naine blanche. Finalement, il se peut ainsi que la naine blanche, qui croyait avoir définitivement résolu le problème de son autogravitation, finalement transgresse la limite de Chandrasekhar. C'est alors l'effondrement brutal et inévitable, le chauffage de l'intérieur allume le carbone en milieu dégénéré et c'est la "déflagration du carbone", une explosion nucléaire qui probablement conduit à l'éclatement total.

Les progéniteurs des supernova du type I sont donc des étoiles de masse initiale assez faible. L'énergie de l'explosion est d'origine nucléaire. Et dans cette explosion, la matière tend à son état d'énergie minimum, qui est celui d'un noyau de fer, l'élément le plus stable de la nature. Ce sont les supernovas de ce type qui contribuent le plus à synthétiser les éléments du pic de fer.

L'âge des étoiles, l'âge de l'univers.

Les étoiles que nous observons ont chacune leur histoire et se trouvent à des distances très différentes de nous. On observe quand même des groupements physiques d'étoiles, les *amas stellaires*. Il s'agit alors d'étoiles qui sont nées dans un même nuage et qui ont fait chemin ensemble depuis. L'observation d'amas stellaires est très intéressante pour étudier l'évolution stellaire, parce que les étoiles d'un même amas ont le même âge et sont à la même distance: si l'une est plus brillante qu'une autre, on sait qu'il s'agit alors d'une différence de luminosité intrinsèque.

Sur la figure 6 nous montrons un diagramme "magnitude—couleur" d'un amas. C'est comme un diagramme HR, mais on met en évidence la magnitude apparente et non la magnitude absolue; puisque toutes les étoiles sont à la même distance, la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue est la même pour toutes les étoiles de l'amas, comme quoi on peut la figure 6 représente bien le

diagramme HR de l'amas. On observe alors que les étoiles de l'amas définissent une ligne "isochrone": à cause de la relation masse—luminosité et donc la variation très forte de la durée de vie de la séquence principale avec la masse de l'étoile, on voit que les étoiles les plus faibles se trouvent encore sur la "séquence d'âge zéro" (en traits sur la figure), alors que les plus massives ont déjà quitté la séquence principale.

Plus un amas est vieux, plus faibles intrinsèquement sont les étoiles qui ont déjà quitté la séquence principale. Ainsi, l'étude de diagrammes tels que la figure 6 est—elle un outil puissant pour estimer l'âge des étoiles et par conséquent une limite inférieure pour l'âge de l'univers. On trouve que les amas les plus vieux, les amas globulaires, ont des âges de l'ordre de 15 milliards d'années.

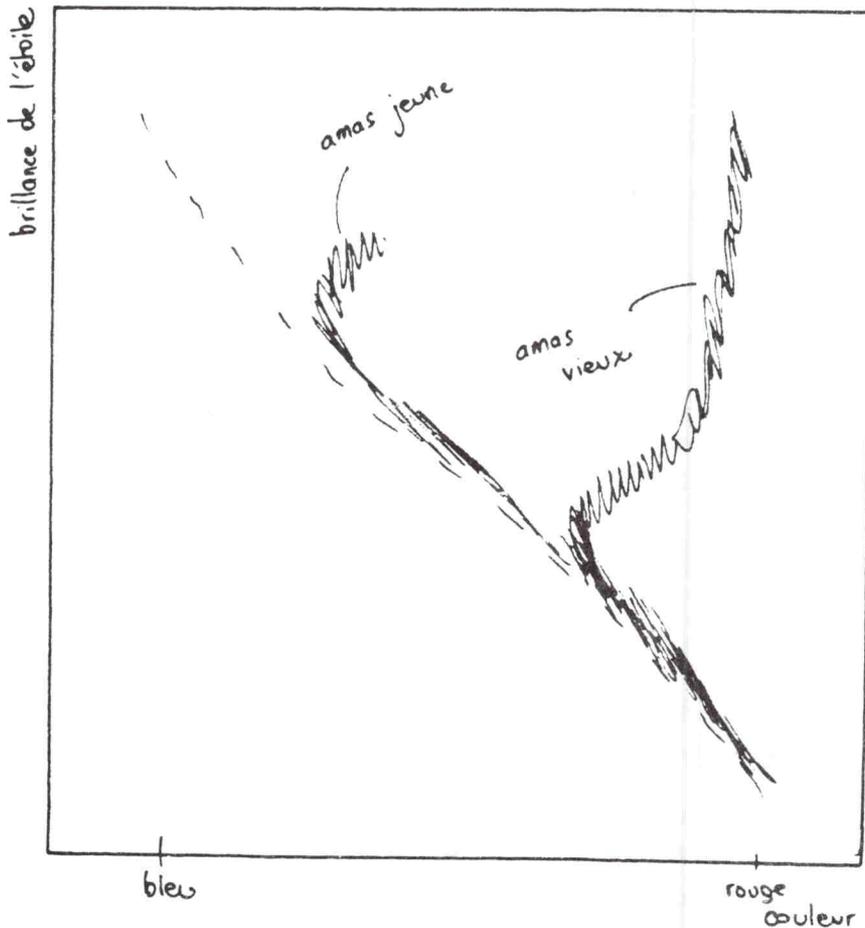


Figure 6: Diagrammes magnitude—couleur d'amas stellaires.

D'UN OBSERVATOIRE ... A L'AUTRE

Dans Les Cahiers Clairaut, vous avez souvent entendu parler de l'observatoire que la société Astronomique Hyéroise d'Amateurs (SAHA) a réalisé au Mont des Oiseaux à Hyères. Situé en un site magnifique, dominant la presqu'île de Giens avec son double tombolo et les îles d'Or, on peut à partir de là observer les cîmes enneigées des Alpes du Sud.

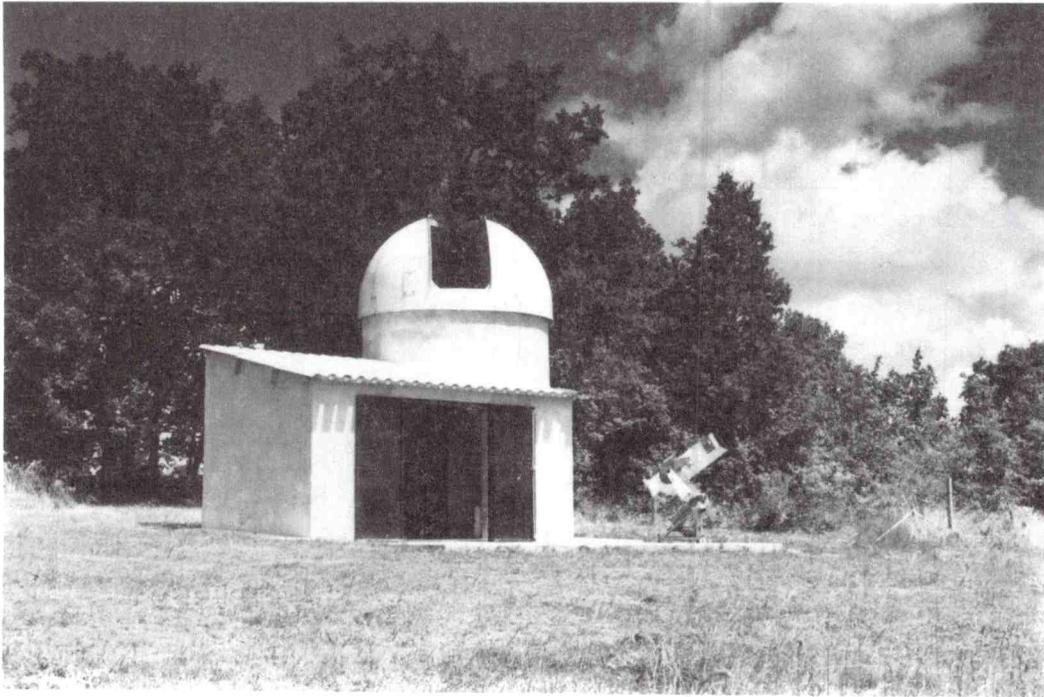
La SAHA a voulu réaliser un outil pédagogique. Il est vrai que l'Education Nationale a mis du temps pour reconnaître le cadeau qui lui était fait et il a fallu attendre plusieurs années pour que deux collègues obtiennent des heures de décharge afin d'accueillir les élèves. L'an dernier, plus de mille jeunes ont ainsi eu la chance de passer une journée à l'observatoire pour faire de l'astronomie comme nous aimons en faire au CLEA.

Sur ce superbe terrain, les coupoles semblent pousser comme des champignons, vous avez pu vous en rendre compte sur la photographie publiée dans le n°57 de ces Cahiers. La plus haute coupole, bichonnée depuis plusieurs mois, a reçu cette année son locataire : un télescope avec miroir de 52 cm et système de poursuite automatique géré par ordinateur, le tout réalisé par M. Cardoën de Puy Michel.

Invité à l'inauguration de ce remarquable instrument, j'ai retrouvé avec beaucoup de plaisir mes amis de la grande famille de la SAHA. Hommes et femmes chaleureux, dynamiques et conviviaux avec qui j'ai passé quelques années inoubliables. Si vos vacances vous mènent un jour dans le Var, allez leur rendre visite (l'actuel président est André Chevaly qui était présent à la dernière A.G. du CLEA) ; tous les samedis soir, l'observatoire est ouvert et, durant l'été, des conférences y sont données.

Ayant migré dans le Lot depuis un peu plus d'un an, j'ai pris contact avec le club situé le plus près de Cahors. En fait, il y a deux ans, le président du club avait souhaité rencontrer les membres du CLEA du Lot. J'ai ainsi découvert un petit observatoire à Gigonzac, charmant petit village de 140 habitants où le ciel est propice à l'observation.

Le président fondateur du club, Daniel Chottin (également présent à l'AG de Marseille) est un homme dynamique et ingénieux qui a monté deux télescopes (23 et 30 cm) et a construit une coupole surmontant un local. Ensemble nous avons participé le 21 août à la soirée "étoiles filantes" qui fut un réel succès puisqu'il nous a fallu caser 160 véhicules ce qui doit représenter plus de 400 personnes, trois fois la population de Gigonzac. La soirée commença par un pique-nique fort agréable. Quatre télescopes pointant chacun des astres différents ont permis à tous les visiteurs d'observer à loisir. Malgré le nombre important de participants,



tout se déroula dans de parfaites conditions car d'autres centres d'intérêt (observation à l'oeil nu, diaporama, émission sur A2) permirent une répartition en petits groupes. L'observatoire servira de site privilégié lors du stage MAFPEN qui se déroulera dans le Lot du 19 au 24 octobre.

Pour terminer, je vais vous parler d'un petit observatoire inauguré l'an dernier dans le petit village de Sabarat dans l'Ariège. C'est le Pasteur Richardot, membre du CLEA depuis plusieurs années, qui a réussi à faire naître cet observatoire afin d'abriter un télescope de 30 cm de sa conception. Claudine et Jean-Pierre Semerjian que nous sommes nombreux à connaître ont proposé un stage aux membres du club afin de former une équipe capable d'accueillir des élèves et le public. Béatrice Sandré m'a accompagné pour animer ce stage de trois jours. Les personnes présentes ont été courageuses puisque nous avons travaillé vendredi, samedi et dimanche du premier week-end de juillet. Nous avons réalisé une mini université d'été très concentrée. Il y aura sûrement des retombées au niveau des élèves puisque certains participants animent des clubs dans des établissements scolaires. Les idées et les savoir faire qui mijotent dans le creuset du CLEA ont été largement utilisés. Souhaitons que ceux qui ont eu la chance de suivre ce stage puissent s'investir dans la vie du club de Sabarat et aider les nouveaux adhérents. Nous remercions toute l'équipe de Sabarat pour l'accueil qu'elle nous a réservé.

Je suis frappé par la similitude qui existe entre ces trois observatoires. Au départ, il y a toujours eu le rêve un peu fou d'UNE personne. Laurent Rapezzi à Hyères, André Richardot à Sabarat ont réussi à convaincre les autorités locales que leur rêve n'était pas complètement fou. A Gignozac, Daniel Chottin a réalisé le sien de ses deniers avec un groupe d'amis. Comme eux, nous continuons à tenter de convaincre les instances nationales et régionales que la popularisation de la culture astronomique est une juste cause. Sachant que la présence et l'action d'un homme ou d'une femme décidés peut changer bien des choses...

Jean Ripert
(Pradines, août 1992)

Réponses aux devinettes de l'Université d'été de Gap :

1 : Daniel Bardin à Josée Sert ; 2 : Josette Berthomieu à son mari Francis ; 3 : Lucette Bottinelli ; 4 : Francette Delmas ; 5 : Janine Dupré à son mari Jacky ; 6 : Michèle Gerbaldi ; 7 : Lucienne Gouguenheim ; 8 : Cecylia Iwaniszewska ; 9 : Jean Ripert ; 10 : Roland Szostak ; 11 Denis Wacheux, à son fils Régis.

LECTURES POUR LA MARQUISE ET POUR SES AMIS

LES DEBUTS DE LA SCIENCE GRECQUE et LA SCIENCE GRECQUE APRES ARISTOTE

par Geoffrey

E.R.Lloyd, traduits de l'anglais par Jacques Brunschwig, professeur d'histoire de la philosophie ancienne à l'Université Paris I ; éd. La Découverte.

Ces deux petits livres (moins de 400 pages en tout) relatent avec beaucoup de clarté mille ans de science grecque. Le texte imprimé sur le papier rugueux des éditions La Découverte est plus attrayant que bien des publications luxueusement illustrées. Pourtant aucune concession n'est faite à la petite histoire, pas de saupoudrage ni de généralisations hâtives. A partir de quelques exemples précis, l'Auteur montre le cheminement de la réflexion du savant-philosophe depuis la formulation de la question spécifique qu'il se pose, jusqu'à l'élaboration du modèle qui y répond, le contenu du modèle ayant moins d'importance que la méthode mise en oeuvre. "Même lorsque les théories des Grecs contiennent peu de chose qui ait une valeur durable, la science ultérieure leur doit souvent la première formulation claire de problèmes fondamentaux."

Le texte est bâti de façon très large, dessinant le cadre social et technologique dans lequel s'insère le mouvement intellectuel, traitant tantôt des écoles de pensée (Milésiens, Pythagoriciens, ...) tantôt des grandes disciplines scientifiques ; l'astronomie, préoccupation majeure des penseurs grecs, y a une place de choix.

Le premier livre nous montre l'émergence de deux principes clés sur le plan méthodologique. Ce sont d'une part l'application des mathématiques à la compréhension des phénomènes naturels qui culmine avec l'élaboration des modèles géométriques par Eudoxe en astronomie, et d'autre part l'idée d'entreprendre des recherches empiriques que l'Auteur nous présente à l'occasion de l'étude de la médecine hippocratique et qui sera ensuite largement développée par Aristote. "Nous considérons aujourd'hui ces principes méthodologiques comme allant tellement de soi qu'il nous faut un effort d'imagination pour nous rendre compte qu'ils avaient besoin d'être découverts."

Dans le deuxième livre, nous voyons la science poursuivre son développement sur la lancée de ces principes, chaque discipline, maintenant mieux individualisée, prenant son propre chemin. Les mathématiques sont traitées à la brillante époque hellénistique dominée par les "Eléments" d'Euclide, modèle de système axiomatique-déductif et dont l'esprit a habité les salles de classe jusqu'au vingtième siècle. Le chapitre suivant consacré à l'astronomie hellénistique décrit des modèles de plus en plus sophistiqués, rendant compte d'observations de plus en plus précises, mais modèles si complexes que personne ne croit plus à leur réalité physique, ils servent seulement à "sauver les apparences" et surtout à permettre des prédictions fiables... à usage astrologique ; ainsi vont les choses vers le déclin.

Bien qu'en si peu de pages tout ne puisse être dit, le panorama cohérent offert par ces deux livres peut constituer une première lecture fructueuse pour le néophyte alors que le lecteur plus chevronné pourra trouver dans cette synthèse magistrale des éclairages originaux qui l'inciteront peut-être à renouveler sa propre réflexion sur la pensée scientifique dans le sillage de celle des Grecs. Et si parfois un peu de lassitude vous guette, l'Auteur a plus d'un tour pour vous en sortir : par exemple, lisez vous avec un brin de distraction ou de mélancolie le chapitre sur "le déclin de la science grecque", voici qu'entre en scène un Jean Philopon, chrétien d'Alexandrie, dont les idées rafraîchissantes nous mènent aux problèmes que Galilée soulèvera mille ans plus tard...

Annie Laval

LES TROIS HORLOGES ASTRONOMIQUES DE LA CATHEDRALE DE STRASBOURG

par Henri Bach, ingénieur à la société horlogère Ungerer, et Jean-Pierre Rieb, maître de conférence à l'Université Louis-Pasteur. Ouvrage de 240 pages abondamment illustré de documents en couleur et noir et blanc, format 23/31cm ; édition normale 395 F, édition de luxe numérotée 750 F. Editions Ronald Hirlé, 3 rue Ste Aloïse, 67100 Strasbourg.

La qualification des Auteurs à traiter ce sujet est indéniable. Henri Bach a présidé à l'entretien de l'horloge actuelle tout au long de sa carrière et Jean-Pierre Ribes est passionné d'horlogerie.

"Dès son origine, au XIV ème siècle, l'horloge astronomique fut à la fois une de ces merveilles qui fascinaient le peuple et le symbole de la recherche scientifique médiévale. Elle était aussi comme l'annonce d'une ère nouvelle qui allait substituer au temps cléricale avec son indifférence à l'exactitude, un temps laïc, urbain et rationnel. Rien ne pouvait mieux correspondre à la mentalité du XVI ème siècle, désireux de maîtriser le temps comme l'espace et de déterminer les lois qui régissent l'univers. Mais cette mentalité restait profondément religieuse et l'horloge est aussi un monument élevé à la fuite du temps, qui rappelle la vanité de l'existence humaine et le triomphe de l'éternité par toutes sortes de représentations empruntées à la mythologie aussi bien qu'aux Ecritures saintes.

L'horloge de Strasbourg est en vérité une oeuvre complexe, issue de la convergence des arts (architecture, peinture et sculpture), de la pensée, des sciences et de la technique, l'oeuvre sans doute la plus significative de la Renaissance et de l'Humanisme alsacien, une des oeuvres majeures de la cathédrale, à laquelle on aurait tort de n'accorder qu'un instant de curiosité condescendante." (R.Lehni)

Les premières pages de l'ouvrage sont consacrées à la première horloge, l'horloge des trois rois, construite entre 1352 et 1354. Il n'en reste que le fameux coq, superbe automate, l'un des plus anciens connus de nos jours.

Suit alors une description très détaillée de la deuxième horloge, celle du mathématicien Dasypodius, mise en marche en 1572. Sculptures et peintures décoratives, sonneries, cadrans solaires, éclipses et phases de la Lune, globe céleste, astrolabes, indications temporelles et astronomiques, rien n'est oublié.

Puis c'est le plongeon dans le gros morceau de l'ouvrage, une étude très approfondie de la troisième horloge, l'horloge actuelle, véritable ordinateur mécanique, oeuvre maîtresse de J-B.Schwilgué, construite de 1838 à 1842. Les auteurs décrivent les différents mécanismes, le carrousel des jours de la semaine, celui des quatre âges, sonneries des quarts d'heure et des heures, l'ange au sablier... La partie astronomique y est aussi très développée : description du planétaire, du globe lunaire, du globe céleste, des différents cadrans donnant l'heure sidérale, l'heure solaire vraie, l'heure solaire moyenne, l'heure légale, la précession des équinoxes, cadrans des mouvements apparents du Soleil et de la Lune et des éclipses. Suivent des explications relatives à la vitrine des équations solaires et lunaires (comment transformer le mouvement régulier d'un pendule en un mouvement irrégulier, par exemple celui du Soleil autour de la Terre) et à la vitrine du comput ecclésiastique indiquant le nombre d'or, l'épacte, le millésime de l'année en cours, la lettre dominicale... puis au grand panneau circulaire du calendrier automatique perpétuel.

Bref un ouvrage magnifique à posséder, traitant de mécanique horlogère et d'astronomie, ouvrage auquel on aurait pu donner comme titre : Les rouages de l'astronomie.

Jean-Marie Poncelet

LE MESSENGER CELESTE

par Galileo Galilei ; texte, traduction et notes par Isabelle Pantin ; collection "Science et Humanisme", 224 P ; ; édition Les Belles Lettres 1992 (230 F).

En saluant, dans le n°59 Des Cahiers, la première traduction complète du Sidereus Nuncius et du Dialogue sur les deux systèmes du Monde, j'avais été amené à regretter que ces traductions arrivent si tard. Et voici que presque simultanément, paraît une autre traduction du premier ouvrage. Nous sommes comblés et ravis. Galilée méritait bien ce redoublement d'attentions d'autant que le présent ouvrage me paraît d'une extraordinaire richesse.

Il est fidèle au caractère scientifique des éditions de Belles Lettres, le texte de référence est celui de l'édition de 1610 revue par Galilée lui-même et qui était en latin. L'introduction, de plus de cent pages, traite successivement de la carrière de Galilée, de son engagement copernicien, du genre de l'ouvrage et de son titre, enfin de l'invention de la lunette et de l'optique. Une bibliographie très complète donne la liste des éditions successives du Sidereus et de ses traductions en italien, en français, en allemand et en anglais. J'y apprendis qu'une première traduction française, incomplète, a paru en 1681 dans une revue de médecine protégée par Antoine Daquin, chirurgien du Roi, et réalisée par un curieux personnage, Alexandre Tinellis alias Castelet qui défendait un système du monde autre que celui de Ptolémée et autre que celui de Copernic.

Le texte complet en latin est donné avec la traduction française en regard et celle-ci comporte quelques 170 appels de notes renvoyées à la fin du livre. La traductrice justifie l'abondance de ces notes : "Etant donné que le Sidereus a été conçu à la fois comme un manifeste, une narration journalistique et un rapport expérimental, et nullement comme un rapport scientifique classique, cette annotation abondante signale les lacunes, les inconséquences, voire la poudre aux yeux de ce texte fascinant mais essentiellement elliptique." Le recours, dans ces notes, à d'autres textes de Galilée ou de ses contemporains fait de la lecture de ce livre une vraie fête. Chacun y trouvera à glaner, y compris dans la liste de tous les instruments dont disposa le savant.

Deux index (auteurs anciens cités et personnages récents) terminent cet ouvrage d'une exceptionnelle qualité. Il ne traite pas de la façon dont le Sidereus a été accueilli par les contemporains. Mais cet important aspect de l'histoire de l'astronomie sera traité à propos des traductions annoncées, en particulier la "Dissertatio cum Nuncio sidereo" de Kepler ainsi que de textes de Martin Horky, John Wedderburn, Giovanni Roffeni et Francisco Sizzi. Alléchantes promesses.

G.W.

LE DESTIN DE L'UNIVERS

Le Big Bang, et après par Trinh Xuan Thuan, collection "Découvertes Gallimard" 1992, 160 pages.

Un mot d'abord sur cette collection "Découvertes Gallimard" qui présente des ouvrages toujours abondamment illustrés et se terminant par des textes littéraires ayant quelque rapport avec le sujet traité. L'ensemble a l'ambition de constituer un encyclopédie populaire. L'astronomie y a donc sa place et nous y trouvons : "Le ciel, ordre et désordre" par Jean-Pierre Verdet (N°26), les trois ouvrages de Jean-Pierre Maury "Galilée, le messager des étoiles" (n°10), "Comment la Terre devint ronde" (n°51), "Newton et la mécanique céleste" (n°91) et maintenant sous le n°151 cette introduction élémentaire à la cosmologie.

L'Auteur a connu un grand succès de librairie avec un livre "La mélodie secrète" qui avait, aux yeux du public, l'avantage de faire beaucoup rêver. On retrouve un peu la même tendance dans le petit livre actuel, mais cette fois c'est plus dans la note de la collection. Les textes choisis, en fin de livre sont de Saint-Exupéry, Grandville, Jacques Monod, Steven Weinberg, Freeman Dyson, Edgar Allan Poe, Stephen Hawking et Carl Sagan. Tout le monde peut y trouver son compte.

INTELLIGENCES EXTRA-TERRESTRES

par Jean Heidmann ; 248 p. ; éd Odile Jacob, 1992.

L'espèce humaine est-elle seule dans l'Univers à posséder une certaine intelligence (dont elle pourrait apprendre à mieux se servir) ? Faute de contact avec des intelligences extra-terrestres, on a pu longtemps le croire. Le temps semble venu d'en douter.

Jean Heidmann, dans un livre passionnant, nous donne les bonnes raisons d'espérer pour bientôt un premier contact radio. Ce n'est pas de la science fiction pour journaux illustrés à grand tirage et faible contenu. Il participe lui-même à la grande entreprise internationale SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence) et il nous donne, avec toute la compétence de l'astronome à l'Observatoire de Paris qu'il est, les justifications rationnelles de l'espoir qu'elle fait naître.

A priori, on peut penser que l'entreprise est folle. Dans le voisinage planétaire de la Terre, aucune trace de vie n'a été décelée au cours des récentes explorations par sondes des planètes du système solaire et de leurs satellites. Peut-être trouvera-t-on des traces de vie fossile en creusant assez profondément le sol de Mars ; encore faudra-t-il pour cela perfectionner les robots qui y seront déposés pour qu'ils puissent, en profondeur, déceler les traces d'une biologie martienne primitive ; aurait-on réussi cette trouvaille, l'éventualité du développement de Marsiens intelligents reste exclue.

Jean Heidmann nous rappelle les circonstances selon lesquelles est apparue et s'est développée la vie telle que nous la connaissons sur la Terre. Il faut remonter à la formation du globe, il y a 4,5 milliards d'années. La Terre est alors soumise à un intense bombardement de météorites, c'est inhabitable, même pour des bactéries. Il faut attendre que le bombardement se ralentisse, il y a 3,8 milliards d'années pour qu'on assiste au passage de la matière inerte à la matière vivante. Notez, en passant le caractère merveilleusement pluridisciplinaire de l'astronomie, ici, Heidmann cite longuement deux spécialistes de biophysique moléculaire, André Brack et François Raulin. Il a ensuite fallu tout ce temps - 3,8 milliards d'années - pour que l'évolution fasse son ouvrage. Comparez cette durée de l'évolution des vivants terrestres à celle des humains, ces nouveaux venus : apparition des vertébrés il y a 500 millions d'années, celle des primates il y a 70 millions d'années et celle de l'homme il y a seulement 3 millions d'années. Notre planète a une histoire bien plus longue que la nôtre. Une remarque à retenir pour chercher ailleurs des êtres vivants et intelligents, qu'ils soient les hôtes d'une planète sous le chaud rayonnement d'une étoile comme notre Soleil qui aura mis dix milliards d'années à consommer son stock d'hydrogène et aura donc laissé le temps aux vivants terrestres d'évoluer tout à loisir.

Reste à mieux savoir comment les premiers êtres vivants terrestres ont pu se former et se développer. A voir le comportement des espèces actuelles, le principe, pour chacune, est de trouver une ou plusieurs autres espèces à consommer. Appliquer ce principe moderne aurait rendu difficiles les premiers pas de la vie terrestres. Y a-t-il eu apport de l'espace intersidéral ou apport par les comètes ? L'astronomie moderne découvre tous les jours de nouvelles molécules qui errent dans l'espace sidéral. Si la Terre a bénéficié d'un ensemencement venu d'ailleurs, pourquoi une autre planète n'aurait-elle pas eu la même chance ?

Pour le vérifier, il faut d'abord s'assurer qu'il existe au moins une étoile en plus du Soleil à posséder dans son voisinage immédiat et gravitant autour d'elle, une planète. On conçoit la difficulté technique de cette recherche : comment découvrir un compagnon obscur au voisinage du phare éblouissant que constitue l'étoile ? On connaît déjà le cas du ou des compagnons de l'étoile Bêta Pictoris, suffisamment massifs pour que sa ou leur révolution autour de l'étoile entraîne de minimes mais perceptibles variations de position de l'étoile elle-même. Une telle observation ne peut concerner que des étoiles proches.

Seconde difficulté, à supposer qu'on soit bien certain d'avoir découvert un autre système planétaire, encore faut-il pour qu'une de ses planètes nous intéresse qu'elle soit bien placée, ni trop près de l'étoile ni trop loin, et que celle-ci soit une bonne étoile. Pensons à nos planètes voisines, Vénus (beaucoup trop chaud !), Mars (trop froid !). Et l'étoile ? Une étoile géante qui consomme tout son stock d'hydrogène en quelques centaines de millions d'années ne laisserait pas aux êtres vivants éventuels de ses planètes le temps suffisant pour évoluer de la bactérie à l'être pensant et sachant émettre par radio des signaux intelligents. Nous sommes bien placés pour savoir que l'évolution des vivants est une longue patience. Réservons donc nos recherches de planètes habitées autour d'étoiles moyennes ou naines du type solaire, des étoiles économes.

Supposons alors qu'on découvre un certain nombre de bons candidats. C'est possible, dans les cent milliards d'étoiles de la Galaxie, il n'y a que l'embarras du choix. Commençons par les plus proches, ce qui signifie une ou plusieurs dizaines d'années de lumière de distance. Le seul moyen de déceler de si loin des êtres intelligents est de capter les messages qu'ils émettent par radio. Puisque nous les supposons intelligents, nous formons l'hypothèse qu'ils savent émettre, d'autant qu'ils peuvent très bien être plus évolués que nous.

Voici donc comment se présente le projet SETI : choisir de bonnes cibles (de bonnes étoiles répondant aux critères dont ce compte rendu ne donne qu'une faible idée), tenter ensuite de capter des émissions radio modulées donc pouvant transmettre un message intelligent en ayant eu la chance d'avoir choisi la bonne fréquence. L'originalité du projet SETI réside dans l'importance de son organisation et des moyens techniques mis en jeu. Jusqu'à maintenant, c'est un fait, aucun contact avec des intelligences extra-terrestres n'a été obtenu. Dans le livre qu'il a publié en 1986 sur le même sujet, Evry Schatzman écrivait : "Je conclurais volontiers pour ma part que l'absence de contact est tout simplement due à l'extrême difficulté de les établir, qu'il s'agisse du seuil de détection, ou de la durée d'observation nécessaire. L'absence de preuve n'est pas la preuve de l'absence..." (Les Enfants d'Uranie, p.191). Il semble que l'organisation actuelle de SETI telle que nous la présente Jean Heidmann promette un grand pas en avant dans cette recherche captivante: mobilisation du plus grand radiotélescope, celui d'Arecibo (diamètre 300 m) et celui de Nançay en Sologne, surtout le moyen d'utiliser rapidement des millions de fréquences... pour finir par tomber sur la bonne !

Evidemment, les chances de réussite immédiate sont minces. Mais avec du temps (encore lui, "matière première" essentielle de l'astronomie), dans un an, dans dix ans, dans un siècle peut-être, nous capterons le message d'extra-terrestres. Il est sage d'y penser dès maintenant, y compris pour prévoir comment nous y répondrons. Il est prévu, dans le cadre de SETI, que le message capté entrera aussitôt dans le patrimoine de l'humanité toute entière et c'est au nom de celle-ci que la réponse sera émise. En dehors des problèmes de déchiffrement du message reçu, il faudra tenir compte des délais de transmission : le message provenant d'un astre à 30 années de lumière (hypothèse optimiste) aura mis 30 années à nous parvenir, notre réponse mettra autant de temps à lui être retourné, le dialogue n'aura pas le rythme d'un duo d'opéra.

Qu'on puisse envisager, sinon pour ce millénaire finissant mais presque sûrement pour le millénaire suivant, cet échange de messages, n'est-ce pas la plus magnifique réponse de la science à l'angoisse de l'humanité se croyant seule capable de penser ? Déjà la biologie nous avait appris qu'on ne bricole pas un être humain et la sexualité en une petite semaine. Nous nous doutions bien que les vieilles légendes ou les récits épiques avaient du goût pour les raccourcis poétiques. Cependant, cette apparente solitude de l'espèce humaine dans un Univers jusqu'ici silencieux plonge encore certains représentants de cette espèce dans une inquiétude qui leur fait

chercher refuge dans des mythes irrationnels à vertu supposée apaisante. Dans la situation présente de l'humanité, le premier contact avec des intelligences extra-terrestres ne sera-t-il pas le moment de la plus grande révolution spirituelle de notre histoire ? Réfléchissez-y, bien plus importante que la découverte de l'Amérique, de la radioactivité ou de l'évolution.

Ai-je bien lu le livre de Jean Heidmann ? Cette éventualité me paraît possible et alors, bien sûr, j'aimerais être présent à ce moment-là. Un numéro spécial des Cahiers Clairaut s'imposera...

G.W.

L'ENSEIGNEMENT DE L'ASTRONOMIE DANS LE MONDE

S'il est donc possible que nous ayons un jour un contact avec des intelligences extra-terrestres, il est certain dès maintenant que les membres du CLEA ne sont pas seuls sur cette planète à oeuvrer pour l'enseignement de l'astronomie. La Newsletter de la Commission 46 de l'Union Astronomique Internationale l'atteste. Cette Commission, comme nous devrions tous le savoir, a pour titre et pour objet The Teaching of Astronomy. Son Organizing Committee comprend : J.Fierro, M.Gerbaldi, L.Houziaux, S.Isobe, C.Iwaniszewska, J.Pasachoff, R. Robbins, Aa.Sandqvist, D.Wentzel. Nous devrions aussi savoir et être fiers que la présidente de la Commission est notre Présidente à nous, Lucienne Gouguenheim.

Prenons donc connaissance de cette Newsletter en détaillant un peu son sommaire :

- Editorial par John R.Percy (University of Toronto), vice-président de la commission et Newsletter editor.

- Message from the President par Lucienne Gouguenheim qui rappelle que le premier président de la Commission nouvellement créée en 1964 fut Evry Schatzman dont elle fut l'élève. Suit la liste des activités de la Commission:

1) The International Schools for Young Astronomers lancées en 1967 et suivies maintenant par Donat G.Wentzel (USA) et Michèle Gerbaldi (France).

2) The Visiting Lecturer Programme (VLP) suivi par D.G.Wentzel au Pérou et au Paraguay.

3) The Astronomy Education Material (AEM) dresse la liste des matériels disponibles en anglais, français (Michèle Gerbaldi) et espagnol.

4) The Travelling Telescope (TT) projet dirigé par J.R.Percy.

5) La Newsletter de la Commission.

6) Les réunions avec des enseignants en marge des réunions régionales de l'UAI ; exemple : cent participants à la réunion de Buenos Aires.

Notre Présidente conclut en affirmant sa conviction que la diffusion des connaissances en astronomie ne peut être laissée à des organisations spéciales et que le meilleur ambassadeur pour l'astronomie est un astronome enthousiaste.

Autres articles de la Newsletter :

- Basic science in the developing world - Access via Astronomy (D.G.Wentzel).

- Physics teachers from all the World gather in Copernic native Town par Cecylia Iwaniszewska, Université Nicolas Copernic de Torun.

- Abstracts of Astronomy education Papers (1990 Asian-Pacific Regional IAU Meeting).

- Astronomy education at the Atlanta A.A.S. meeting (J.M.Pasachoff).

- News from the Astronomical Society of the Pacific.

- On the educational role of Astronomy (C.Iwaniszewska).

- Edinburgh Astronomy Teaching packages

- Phases of the Moon (V.Tryoën et D. Toussaint) + note sur le CLEA.

- Algol, changing spirit (Rosa-Maria Ros-Ferré).

- Astrophysics in the high school classroom (J.R.Percy).

LECTURES A VENIR

- Einstein 1905 - De l'éther aux quantas par Françoise Balibar.
- Initiation à la cosmologie par M.Lachièze-Rey
- Kepler, roman par John Banville, traduit de l'anglais par Michèle Albaret
- Macro-micro, je mesure l'Univers par Michel Crozon.

LES PROBLEMES DU CLEA

Réponses aux questions posées dans le cahier N°59
59.1 - Selon les Ephémérides 93, le Soleil sera au périhélie le 4 janvier à 03 h et à l'apogée le 4 juillet à 22 h donc la Terre aura mis 181,792 jours pour aller d'un sommet à l'autre de la ligne des apsides alors que la moitié de 365,25 jours est 182,625 jours.

"Pour suivre l'explication, reportez vous à la figure. Supposons que la Lune n'existe pas (figure du haut). La Terre T décrirait alors autour du Soleil l'ellipse dont le point P serait le périhélie et le point A l'apogée. Au périhélie la distance Soleil-Terre ST est minimum, à l'apogée cette distance est maximum. Le temps mis par la Terre pour aller de P en A serait égal à la moitié de la révolution sidérale de la Terre soit environ 182,63 jours.

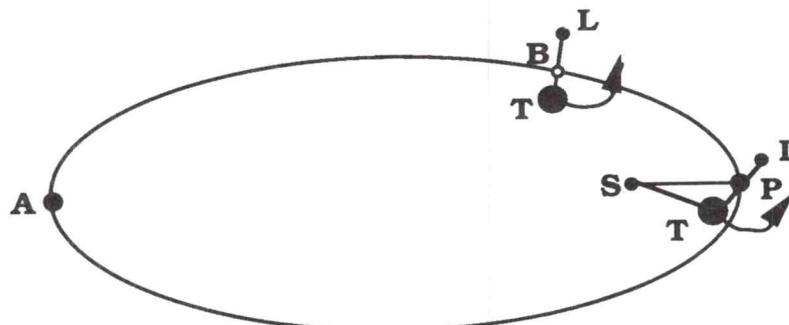
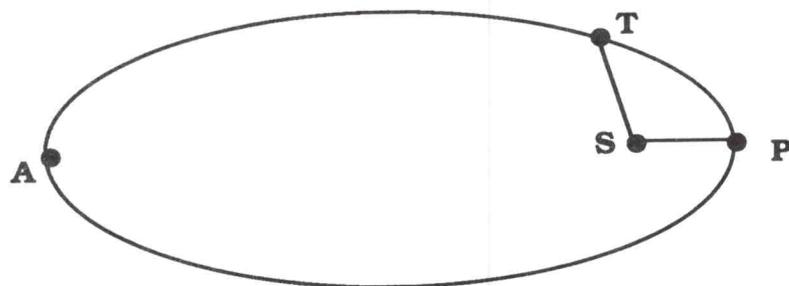
Mais en réalité c'est le barycentre B du système formé par la Terre T et la Lune L qui décrit l'ellipse de foyer S (figure du bas). Autour de B la Terre et la Lune effectuent un tour dans le sens de la flèche en un temps égal à la révolution sidérale de la Lune soit 27,32 jours environ (naturellement les proportions ne sont pas respectées sur la figure pour qu'elle soit lisible).

On voit donc que la distance ST est minimum (ce que nous appelons "périhélie") à un instant qui n'est pas forcément l'instant de passage du point B au point P de l'ellipse. Même chose au moment de "l'apogée". Comme la révolution de la Lune n'est pas commensurable avec la révolution sidérale de la Terre (et aussi à cause des nombreux termes périodiques qui figurent dans le mouvement de la Terre autour du Soleil et dans celui de la Lune autour de la Terre) l'intervalle de temps qui sépare le "périhélie" de "l'apogée" n'est pas égal à la moitié de la révolution sidérale de la Terre et, d'ailleurs, n'est pas constant. Ainsi nous avons les résultats suivants pour les années 1991 à 1994 :

Année	Périhélie	Apogée	Durée
1991	3 janvier 3h	6 juillet 15h	184.5
1992	3 janvier 15h	3 juillet 12h	181.9
1993	4 janvier 3h	4 juillet 22h	181.8
1994	2 janvier 6h	5 juillet 19h	184.5

Peut-être devrions-nous donner ces précisions dans les Ephémérides.

Bruno Morando
Astronome au Bureau des Longitudes



NDLR - Notre Collègue Philippe Mandon (76700 St Laurent de Brèvedent) nous avait donné la même explication aux détails près.

59.2 - Comment faire cuire un oeuf avec une fronde ? L'origine de cette question, tout à fait intempestive dans une revue d'astronomie, est une polémique qui opposait Galilée à un nommé Sarsi. Voici la citation tirée de Il Saggiatore (tome VI des oeuvres complètes de Galilée, p.340) telle qu'elle est reproduite et traduite dans le livre de William Shea "La Révolution galiléenne" :

"Si Sarsi veut le faire croire, sur la parole de Suidas, que les Babylo-niens faisaient cuire leurs oeufs en les faisant tourner rapidement au bout d'une fronde, je le croirai ; mais j'ajouterai que la cause de cet effet est bien loin de celle qu'il lui attribue, et pour trouver la vraie cause je dirai : "Si nous ne parvenons pas à produire un effet que d'autres produisent, il doit manquer quelque chose qui est cause de leur réussite, et s'il manque une seule chose, ce sera la véritable cause. Or nous ne manquons pas d'oeufs, ni de frondes, ni de robustes gaillards pour les faire tourner, et pourtant les oeufs ne cuisent pas, et même , s'ils étaient chauds, ils refroidissent plus rapidement ; puisqu'il ne nous manque rien d'autre que d'être Babyloniens, c'est donc d'être Babylonien qui est cause que les oeufs durcissent et non le frottement de l'air." Voilà ce que je voulais démontrer. Est-il possible que Sarsi, en courant la poste, n'ait pas senti la fraîcheur que lui porte au visage le changement continu de l'air ? Mais, s'il l'a ressenti, voudra-t-il croire des choses qui se sont passées il y a deux mille ans à Babylone, et que d'autres ont rapportées, plutôt que les choses présentes et qu'il éprouve par lui-même ?"

59.3. - Les comètes et le chant des cigales. La citation était également de Galileo Galilei dans Il Saggiatore (p.281). On sait d'ailleurs que dans cet ouvrage, Galilée s'est beaucoup fourvoyé au sujet des comètes. Mais les cigales chantent-elles ?

Voici maintenant deux nouvelles questions soumises à la sagacité de nos lecteurs :

60.1. Selon les Ephémérides 1993, Vénus passera à son périhélie le 23 février à 9h et le 5 octobre à 23h. D'un périhélie au suivant, il se sera écoulé 224.583 jours alors que l'année sidérale de Vénus est 224.701 jours. La différence est-elle explicable par une rétrogradation de la ligne des apsides de Vénus ?

60.2. De qui est-ce ? "Une autre utilité plus grande encore qu'on peut tirer des pendules, c'est que si l'on y regardait bien, à chaque chose qu'on fait ou qu'on dit, on verrait qu'il n'est presque jamais l'heure de dire ce qu'on dit ni de faire ce qu'on fait."

LECTURES (suite)

DANS LES REVUES

Pour la Science. N°180 (Octobre 1992) "Acquis et prédictions de la cosmologie" par Lucienne Gouguenheim ; à ne pas manquer, un tableau très clair des connaissances actuelles et des problèmes que la recherche peut maintenant aborder ; comment ne pas être pris par ce sujet passionnant ?

La Recherche. N°246 (septembre 92) "Neutrinos solaires, l'énigme persiste" par M.Cribier et D.Vignaud. "Les grumeaux du Big Bang" par E.Casoli. N°247 (octobre 92) "Les galaxies sous la coupe du grand attracteur" par I.Joncour.

Gnomon. Vol 12, n°1 (autumn 1992) "The search for Extra-terrestrial Intelligence", texte de Astronomical Society of the Pacific.

Journal des Astronomes français. N°42 (juillet 92) "Regards sur l'astronomie australienne" par F.Praderie.

POUR UNE HISTOIRE DE LA GALAXIE (3)

Après les grandes découvertes du XVII^{ème} siècle - la lunette, la résolution en étoiles de la Voie Lactée, ... -le siècle suivant paraît marquer une certaine pause. On perfectionne les instruments, on affine les mesures (Bradley), on accumule les bonnes observations (Messier), on lance de bonnes et grandes idées (Lalande, Kant, Lambert), on ne lâche surtout pas la mine qu'est l'héritage de Newton (Clairaut, d'Alembert, Laplace, Lagrange). Comme toujours dans l'histoire de l'astronomie un profond travail de réflexion prépare l'épanouissement d'une nouvelle grande époque.

Ce sera celle du tournant des deux siècles, le dix-huitième et le dix-neuvième, avec ce qui peut paraître le couronnement, l'achèvement de la mécanique céleste, avec ce qui ne paraîtra pas tout de suite la grande novation, les premières observations astrophysiques de Herschel. Mais avec Herschel, c'est bien la grande astrophysique qui commence.

DES PRECURSEURS

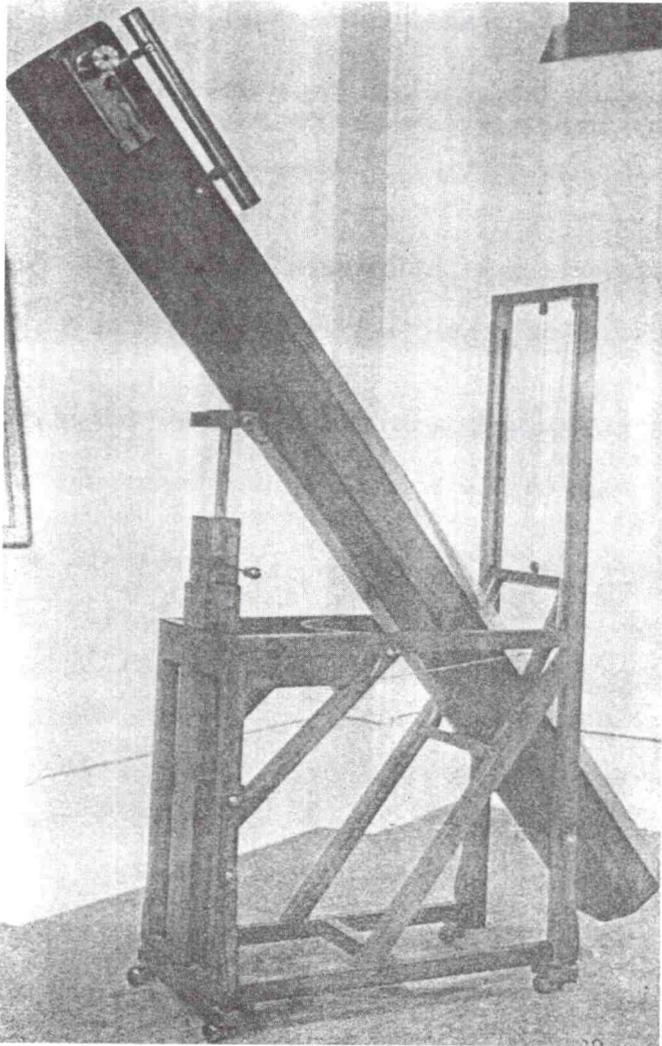
En 1774, Alexander Wilson, professeur d'astronomie à Glasgow, émet l'hypothèse que les taches du Soleil sont des dépressions dans la surface du Soleil qui révèlent des couches inférieures non lumineuses. Les bords de pénombre des taches ne sont-elles pas comme les bords escarpés d'une dépression ? Au contraire, à la même époque (deux ans plus tard), dans un grand "Mémoire sur les taches du Soleil et sur sa rotation" (Mémoires de l'Académie des Sciences pour 1776, p.457), Lalande écrit : "J'ai pensé que les taches étaient plutôt les éminences d'un noyau solide, découvertes et recouvertes alternativement par le flux et le reflux de la matière ignée où elles sont presque toujours plongées." Notons d'ailleurs que cette curieuse hypothèse sur la nature des taches n'occupe qu'une faible partie de son mémoire beaucoup plus développé sur la méthode pour calculer la position d'une tache et en déduire la vitesse de rotation du Soleil et la position de son équateur.

Autre question soulevée par ces précurseurs, le mouvement des étoiles et celui du Soleil en particulier. Tobias Mayer, à Goettingen, est persuadé, dès 1760, que l'ensemble des étoiles dites fixes est animé de mouvements divers, que la constance de l'aspect des constellations n'est que relative. Lalande a bien observé le mouvement de rotation du Soleil sur lui-même ; il écrit : "une force quelconque imprimée à un corps et capable de le faire tourner autour de son centre, ne peut manquer aussi de déplacer le centre, et l'on ne saurait concevoir l'un des mouvements sans l'autre. Il paraît donc très vraisemblable que le Soleil a un mouvement réel dans l'espace absolu ; mais comme il entraîne nécessairement la Terre, de même que toutes les planètes et les comètes qui tournent autour de lui, nous ne pouvons nous apercevoir de ce mouvement, à moins que par la suite des siècles le Soleil soit arrivé sensiblement plus près des Etoiles qui sont vers une région du ciel que de celles qui sont opposées." En note, il ajoute une précision : "Si les positions des Etoiles observées par Hipparque il y a près de deux mille ans avaient plus de précision, on pourrait commencer à voir si les différences de longitudes sont plus grandes d'un côté et plus petites de l'autre que celles qui avaient lieu de son temps ; mais un jour viendra où cette comparaison pourra nous apprendre quelque chose sur la question dont il s'agit." Enfin, dans la conclusion de son mémoire, Lalande émet une nouvelle hypothèse : "Il peut se faire aussi que le Soleil et la plupart des Etoiles soient, avec leurs systèmes, dans une espèce d'équilibre entre tous les systèmes environnants ; et dans ce cas, il n'y aurait qu'une circulation périodique du centre du Soleil autour du centre de gravité universel." L'idée est reprise par Alexander Wilson qui la développe dans un texte "Thoughts on General Gravitation" qui paraît à Londres en 1777 et que Herschel lira.

Par quelles observations, par quelles réflexions, Herschel devra-t-il commencer pour élaborer ses idées sur la Voie Lactée ? Heureusement il ne se pose pas la question. Par son origine, il est un astronome "amateur", il est curieux de tout. Il va avancer dans tous les domaines.

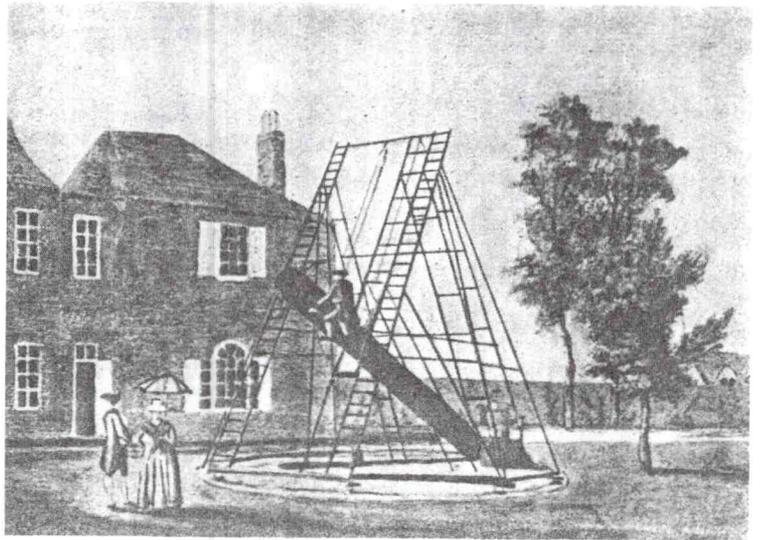
L'INGENIEUX HERSCHEL

N'oublions pas que durant ses débuts, Herschel assure la conduite d'un orchestre dans la ville d'eaux de Bath, l'astronomie n'est que son occupation de loisir. Il y prend l'habitude de s'équiper de télescopes qu'il construit lui-même. On admire d'autant plus les découvertes qu'il sut en tirer, surtout si l'on songe au ciel d'Angleterre que Shelley allait bientôt célébrer dans l'Ode to the west wind... Notre bricoleur génial voit de plus en plus grand, du premier télescope de 7 pieds aux célèbres et pittoresques télescopes de 20 pieds puis de 40 pieds dont les miroirs en bronze avaient été polis par Herschel lui-même.

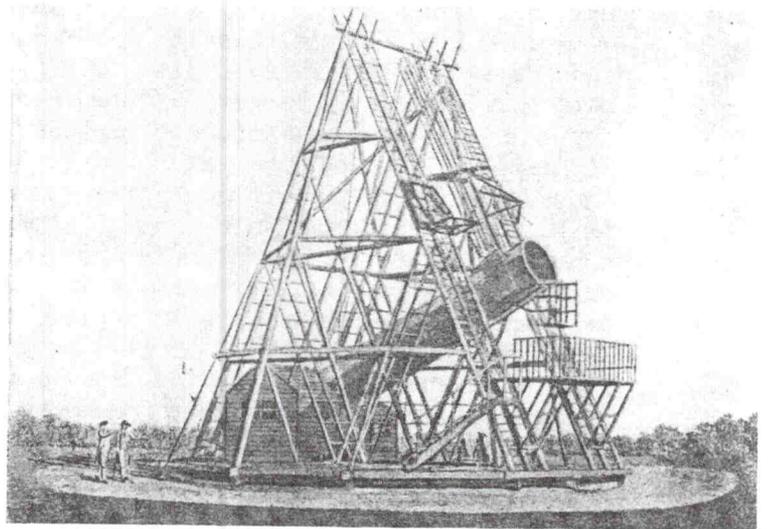


1

1. Le télescope de 7 pieds
2. Le télescope de 20 pieds
3. Le télescope de 40 pieds



2



3

C'est avec ces instruments que Herschel va donner un nouvel élan à l'exploration de la Voie Lactée comme nous tenterons de l'analyser plus loin. Mais nous ne pouvons éviter une parenthèse pour saluer ses premiers gestes d'astrophysicien. Il veut comprendre comment le rayonnement du Soleil nous chauffe. Admirons l'ingéniosité de ses dispositifs. Il pressent que l'échauffement produit varie selon la couleur du rayonnement recueilli: il sélectionne des portions du spectre solaire en ménageant des fenêtres dans un écran (fig 4). Pour les rayons rouges, verts ou violets, il trouve sur les thermomètres des échauffements proportionnels à 55, 24 et 16 respectivement. Si l'échauffement va ainsi croissant du violet au rouge, il se demande même s'il n'y a pas, dans le rayonnement, "quelque chose" au delà du rouge. De façon purement expérimentale, il découvre donc l'existence du rayonnement infra rouge (fig.5). Par contre, il ne cherche pas au delà du violet ou bien son dispositif est trop peu sensible pour donner un résultat significatif ; il laisse donc à J.W.Ritter (Munich 1801) la découverte du rayonnement ultra violet.



fig.5

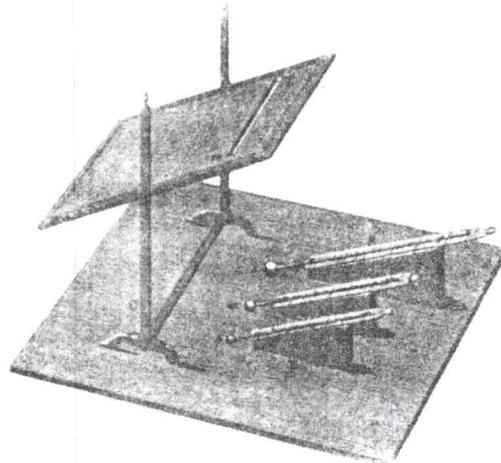


fig 4

En 1798, Herschel fixe un prisme à l'oculaire de son télescope et observe la lumière de six étoiles de première grandeur. Il note la prépondérance du rouge chez Bételgeuse, du bleu chez Procyon, de l'orange chez Arcturus. Ces premiers pas de la spectroscopie stellaire sont modestes mais ce sont les premiers pas.

LE MOUVEMENT DU SOLEIL

Fermions cette parenthèse sur l'étude des rayonnements et revenons à l'exploration de la Voie Lactée. Herschel voudrait, pour commencer, se faire une idée du comportement du Soleil parmi les étoiles, parmi ses semblables en quelque sorte.

On a vu que Mayer à Goettingen, Lalande à Paris, Wilson à Cambridge ont déjà reconnu que parmi les fixes (comme on dit), il existait des étoiles ayant des mouvements les unes par rapport aux autres. Herschel pense que si une étoile se déplace, son attraction sur les étoiles de son voisinage va changer ce qui doit altérer l'équilibre des forces en présence qui aurait pu, sans cela, maintenir l'ensemble des étoiles au repos les unes par rapport aux autres. Telle est son idée, une idée de théoricien. Lui qui est d'abord observateur, il consulte le célèbre catalogue d'étoiles établi par Flamsteed un siècle auparavant : il constate que des étoiles semblent avoir disparu, avoir varié d'éclat ou même être apparues. Comment expliquer ces changements ? Même s'il admet qu'il peut y avoir, dans le catalogue Flamsteed, quelques erreurs de mesure, prévaut chez Herschel la conviction qu'il y a mouvement général des étoiles les unes par rapport aux autres. Et par conséquent, mouvement du Soleil par rapport aux étoiles de son voisinage.

Se pose alors la question : comment trouver la direction dans laquelle se déplace le Soleil et selon quelle vitesse ? Lorsqu'on observe le déplacement apparent d'une étoile particulière, on ne peut distinguer ce qui est dû au mouvement propre de l'étoile et ce qui provient du changement de position de l'observateur (effet de parallaxe).

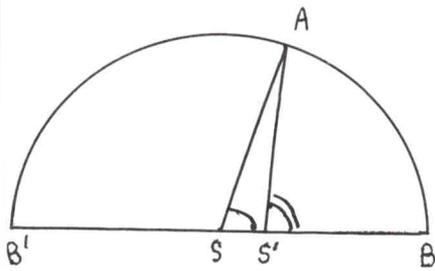


fig 6

Supposons, dit Herschel, que le Soleil se dirige dans la direction SB (fig 6) et supposons que l'étoile A soit sans mouvement propre apparent. Quelques années plus tard, le Soleil (et l'observateur terrestre) est venu en S', la direction de l'étoile A paraîtra s'être écartée de la direction SB. Autrement dit, sur la sphère céleste, les étoiles paraîtront diverger de B, la direction de l'apex et converger vers B', la direction de l'antapex. Et ces apparences traduiront le mouvement du Soleil vers l'apex.

Dans la réalité, les choses se compliquent : comment savoir si l'étoile A est au repos ou si, au contraire, elle a un important mouvement propre ? A l'époque de Herschel, la spectroscopie stellaire ne peut fournir aucun indice. Il pense qu'en prenant en compte les déplacements apparents d'un nombre assez grand d'étoiles, en moyenne leurs déplacements propres s'équilibreront et laisseront apparaître l'effet parallactique dû au déplacement du Soleil.

Herschel mena cette recherche avec acharnement et par deux voies distinctes. Dans l'une, il sélectionna un certain nombre d'étoiles doubles ; comme nous l'examinerons plus loin, ses hypothèses de base en ce domaine étaient erronées et ne pouvaient donner en la circonstance de résultat valable. Dans l'autre voie, il reprenait les treize étoiles dont les mouvements propres avaient été mesurés aussi bien par Maskeline, l'Astronome Royal que par Jérôme Lalande. A partir de ces données, il trouvait que le système solaire se déplaçait dans la direction de l'étoile Lambda Herculis. A partir de données relatives à quarante quatre étoiles observées par Tobias Mayer à Goettingen, Herschel trouvait le même résultat. Il suggérait même que si certaines étoiles paraissaient contredire cette conclusion générale, cela pouvait s'expliquer par l'appartenance du Soleil à un sous-ensemble d'étoiles voisines ayant son mouvement propre par rapport à l'ensemble des autres étoiles. Intuition remarquable qui sera confirmée par les mesures modernes sur la rotation de la Galaxie.

Herschel ne connaît pas que des réussites, il échoue dans l'évaluation de la vitesse du déplacement du Soleil. A priori, il pense qu'elle ne peut être moindre en valeur absolue que celle de la Terre sur son orbite (mais pourquoi ?). Toutes les difficultés qu'il rencontre proviennent de ses échecs à mesurer des parallaxes stellaires et de son hypothèse erronée selon laquelle toutes les étoiles auraient une même luminosité intrinsèque. De plus, il pense que les étoiles de deuxième grandeur sont deux fois plus loin que celles de première grandeur et que, se situant sur une sphère de rayon double, elles ne sont pas quatre mais deux fois plus nombreuses !

En passant, une anecdote. Herschel avait été frappé par les désaccords entre les données du catalogue de Flamsteed (publié en 1725, six ans après la mort de l'astronome) et le ciel qu'il observait. Il demanda à sa soeur Caroline de reprendre toutes les mesures de Flamsteed, un travail méticuleux de vingt mois au terme desquels Caroline découvrit que 111 étoiles mentionnées dans le catalogue n'avaient jamais été observées par Flamsteed alors que 500 étoiles qu'il avait exactement repérées avaient été omises dans le catalogue imprimé. Caroline publia en 1798 un catalogue dument révisé. Herschel savait aussi exploiter la compétence et le dévouement de sa soeur.

THE CONSTRUCTION OF THE HEAVENS

Tout au long de ses activités d'astronome, Herschel s'est préoccupé de ce qu'il appelait "the Construction of the Heavens" que nous traduirons de façon approximative par "l'Architecture de l'Univers". Il ne mentionne nulle part qu'il ait connu le schéma imaginé par Thomas Wright. Dès 1784, dans une communication à la Royal Society, il écrit qu'il est probable que le Soleil et son cortège de planètes sont placés dans la grande accumulation d'astres de la Voie Lactée "et peut-être même pas au centre de son épaisseur". Un schéma

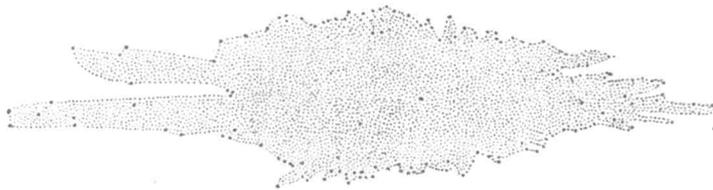


fig 7 de la région du ciel où la Voie Lactée se sépare en deux branches.

dessiné de la main de Herschel (fig7) montre comment il imagine cet ensemble, plutôt aplati et qu'un observateur placée en son sein, voit sous la forme de la Voie Lactée entourant tout le ciel. Il tente même de concilier ce schéma avec ce qu'il a trouvé concernant le mouvement du Soleil: l'apex tel qu'il l'a défini est voisin

Pour toutes ces observations, Herschel utilisait son télescope de 20 pieds (qui avait presque 50 cm d'ouverture). La monture ne permettait que des observations méridiennes. Dans la direction d'Orion, Herschel résolut la région de la grande nébuleuse en quelques 80 étoiles. Cela lui suggéra sa méthode des "jauges" : pointer le télescope successivement dans toutes les directions et compter les étoiles visibles. Il espérait en déduire les limites du monde stellaire.

Une difficulté inévitable se présenta aussitôt : la découverte d'amas et de nébulosités bien plus nombreux que ceux qui avaient été catalogués par Messier. Au début, Herschel était persuadé que toute nébulosité serait résoluble en étoiles pourvu qu'on l'observe avec un télescope assez puissant. Mais il dut finalement reconnaître que certaines nébulosités restaient floues même dans son grand télescope. Il se décida à choisir ses "jauges" de préférence dans des directions pauvres en nébulosités.

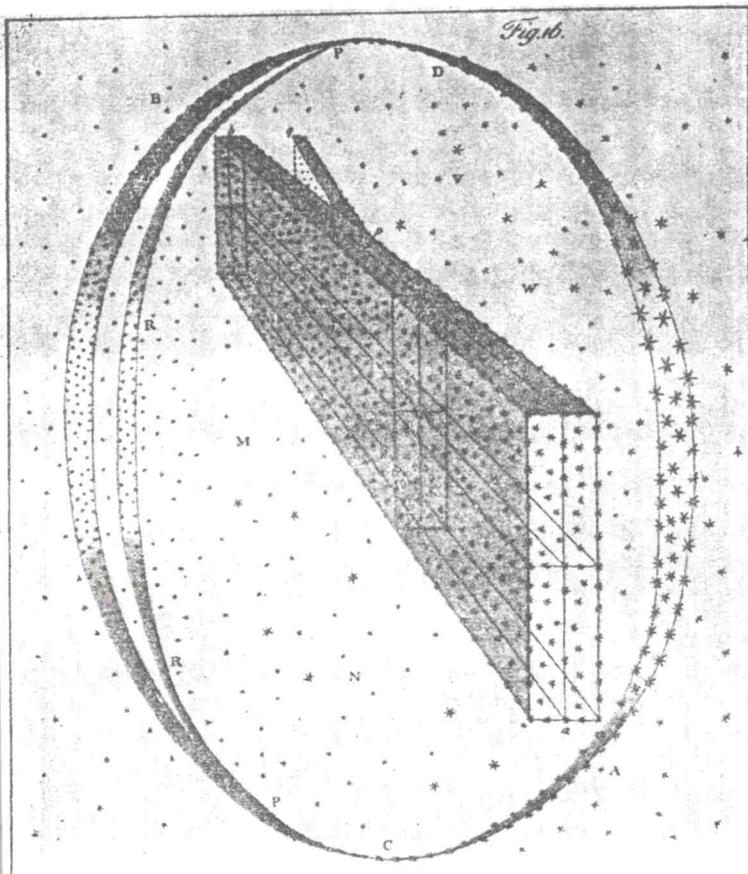


fig 8

Ses hypothèses de base restaient, pour les étoiles, leur égale luminosité intrinsèque et leur distribution uniforme dans l'espace. Chaque jauge, c'est à dire chaque dénombrement devait donc lui donner une évaluation de l'étendue du monde stellaire. En prenant pour unité de distance la distance de Sirius, l'étoile la plus brillante, donc, selon ses critères, la plus proche, il allait jusqu'à des étoiles 497 fois plus nombreuses, résumant ses conclusions en un nouveau schéma représentant une section du système des étoiles.

Il voyait donc celui-ci comme un vaste amas d'étoiles comprenant aussi des amas globulaires et des amas irréguliers, mais un ensemble relativement limité dans un espace vide au delà...

Il ajoutait l'hypothèse que la densité d'un amas mesurait la durée depuis laquelle les étoiles qui le composaient se rassemblaient. A partir de quoi l'ensemble Voie Lactée lui paraissait plutôt jeune (mais je n'ai trouvé nulle part d'ordre de grandeur pour comprendre ce que signifiait cette jeunesse). Il imaginait enfin que des systèmes stellaires analogues à la Voie Lactée pouvaient exister puisque des objets nébuleux étaient visibles dans des directions tout à fait extérieures au plan général de la Voie Lactée. Voilà une idée qui devait faire son chemin.

Il y aurait encore beaucoup à dire sur Herschel et ses observations du monde des "nébuleuses". Avec son grand télescope, un aide, sur son ordre, "balayait" une région du méridien, Herschel disait ce qu'il découvrait et Caroline notait scrupuleusement les paroles du frère : une organisation très efficace. En 1786, Herschel publia un premier catalogue de mille nébuleuses et amas découverts depuis 1783. Deux autres catalogues suivirent en 1789 et 1802. On est presque étonné que cet observateur infatigable n'ait pas décelé la forme spiralée de certains des objets découverts car, au contraire, il précisa ce qu'il appela "nébuleuses planétaires", ces objets qui ne sont pas des nébuleuses et n'ont rien de planétaire mais qui conservent le nom que leur attribua Herschel.

° °

Dans notre feuilleton "pour une histoire de la Galaxie", il fallait marquer l'étape Herschel. Avec lui, pour la première fois, une conception d'ensemble du monde stellaire est énoncée, observations à l'appui. Des idées sont proposées à la réflexion des astronomes, en particulier cette hiérarchie des structures qui nous est familière mais qui, du temps de Herschel, ne pouvait pas l'être. Pour ce savant, comme pour tous les grands précurseurs, on se prend à regretter qu'ils n'aient pu connaître certains importants acquis des décennies suivantes. Faute de connaître les premières mesures de distances stellaires, faute d'avoir une idée de la variété des types et des tailles d'étoiles, Herschel dut recourir à des hypothèses qui furent malheureusement trop simplificatrices.

Mais non, ne regrettons rien. Admirons sans arrière pensée l'ingéniosité des instruments qu'il utilisa et profitons des progrès qu'il a fait faire à notre connaissance de la Galaxie. Préparons nous, à partir de ses magnifiques catalogues de nébuleuses à la grande exploration (avec Lord Rosse) et au grand débat (avec Shapley) qui donneront corps à la Galaxie et au monde extragalactique dans lequel notre imagination trouve aujourd'hui matière à s'émerveiller.

K. Mizar

1693 : Halley découvre l'inégalité séculaire de la Lune.

1893 : Henri Poincaré poursuit l'édition de "Les Méthodes nouvelles de la Mécanique céleste".

1993 : Vous disposez de deux façons intéressantes de saluer l'année nouvelle:

1°) Utiliser la fiche d'abonnement ou de réabonnement insérée dans ce numéro 60 des Cahiers Clairaut qui clot la quinzième année de notre revue.

2°) Mettre votre planétaire à l'heure

Au premier janvier 1993 les longitudes écliptiques des planètes seront les suivantes :

Mercure 239° Vénus 45° la Terre 101°

Mars 104° Jupiter 183° Saturne 320°

L'assemblée générale annuelle du CLEA s'est réunie dans l'amphithéâtre G3 du bâtiment 450 du Centre scientifique d'Orsay, le dimanche 22 novembre 1992. La séance a été ouverte à 10 heures sous la présidence de Lucienne Gouguenheim, Présidente de l'association, et en présence d'environ 120 participants venus de toutes les régions de France. La Présidente présente et fait adopter l'ordre du jour : les comptes, puis les comptes rendus des activités des groupes puis les projets relatifs aux nouveaux programmes officiels. L'assemblée sera suivie de la conférence sur les pulsars millisecondes par François Biraud.

RAPPORT GENERAL

présenté par Gilbert Walusinski, secrétaire-trésorier.

L'organisation du secrétariat reste inchangée. Jacques Dupré continue à apporter son aide amicale et efficace en entrant sur son ordinateur les abonnements aux Cahiers et les cotisations au CLEA. La fiche qu'il a mise au point pour les abonnements et réabonnements permet aussi de passer les commandes des autres publications, n'oubliez pas de la consulter et d'en demander de nouveaux exemplaires pour faire de la publicité auprès des collègues.

Voici le relevé des recettes et des dépenses entre le 19911101 et le 19921031 :

Recettes		Dépenses	
abonnements simples	23 420	impression CC 56 à 59	81 087.3
abonnements-cotisations	93 281	routage-expédition	10 504.23
collections CC	2 665	diapositives	40 811.93
cours d'Orsay	4 880	hors série 3	47 147.95
fascicules f.m.	15 213.5	cinéciel	24 622.6
Comptes rendus Ud'été	971	célescope	2 354.24
transparents	11 408	2 lunettes	840
diapositives	25 330	papèterie	2 393.53
hors série	49 474.7	timbres postes	20 570
cinéciel	5 290	versements Strasbourg	1 903
location starlab	2 150	réimpressions fascicules	13 910
commandes pour Strasbourg	1 903	divers	2 988
divers	7 572		
subvention MEN	20 000		
		total des dépenses	249 132.78
total des recettes	263 558.2		

Quelques mots pour commenter ces données, en les comparant à celles des années précédentes. Un tassement des recettes par abonnements qui s'explique partiellement par un plus grand nombre d'abonnements sur deux ans les années impaires (donc bon espoir pour 93). La stagnation du nombre des abonnés est plus préoccupante : 981 abonnés en 1990, 1041 en 1991, et seulement 1029 en 1992. Nous restons loin de l'objectif que nous nous sommes fixé : soit 2000 abonnés en l'an 2000.

La vente des autres publications est satisfaisante même si elle pourrait être encore meilleure pour les Hors Série 2 et 3. Le Hors Série 1 a beaucoup de succès dans les IUFM et nous nous en réjouissons. Nous avons demandé au CNDP s'il accepterait de diffuser ces Hors Série ; après examens des ouvrages -ce qui a demandé presque six mois - il nous a été répondu que ce n'était pas possible parce que les couvertures n'étaient pas en couleurs. Ce jugement ne portant pas sur le contenu, nous en sommes restés là dans nos relations avec le CNDP. Depuis, nous avons eu un contact prometteur avec l'éditeur Belin qui se chargerait de l'édition d'un Hors Série 4 pour le lycée, le GRP-CLEA ayant dans ses réserves des fiches déjà presque prêtes.

Les années précédentes, le CLEA bénéficiait d'une subvention de 10 000 F qui lui était allouée par l'Académie de Versailles. Celle-ci a ignoré le CLEA en 1992 mais notre Présidente a su présenter la candidature du CLEA à une subvention du Ministère de l'Education Nationale qui est la bienvenue. Les adhérents du CLEA voudront bien cependant remarquer que, même sans cette subvention, nos comptes 92 seraient presque équilibrés, ce qui signifie que le CLEA peut vivre par ses propres moyens. En augmentant notre activité nous augmenterons la diffusion de nos publications et nous vivrons encore mieux. Merci, à ce sujet, au Collègue qui a parlé du Hors Série 1 dans le journal La Classe, ce qui nous a valu des commandes.

En conclusion de ces explications, le trésorier demande à l'assemblée d'approuver les comptes 1992 et de reconduire les tarifs actuels pour 1993. Ces deux propositions sont adoptées à l'unanimité des présents.

SUITE DU RAPPORT GENERAL

La Présidente présente les regrets de quelques collègues empêchés, Jean-Claude Pecker, Darrel Hoff (de Boston), Roland Szostak (de Münster), Victor Tryoën (de Flayosc), Cécile Decaux-Schulman (de Bourg la Reine). Caecilia Iwaniszewska (de Torun) a beaucoup apprécié d'avoir pu participer à l'école d'été de Gap 92 et est particulièrement sensible au fait que le CLEA ait choisi de tenir son assemblée le jour de sa fête. La Présidente invite les présents à cosigner des cartes amicales pour ces absents.

Avant de passer à la présentation des réalisations du CLEA, le secrétaire communique la lettre qu'il a reçue des responsables de l'Astrolabe, l'active association astronomique de La Rochelle : celle-ci propose d'accueillir à La Rochelle les participants de l'assemblée générale du CLEA. Les applaudissements de l'assemblée valent approbation de cette sympathique proposition pour 1993.

Daniel Toussaint nous avait présenté à Marseille ses diapositives sur la rétrogradation de Mars (Cf D5 sur notre catalogue). Cette année, il commente les documents d'accompagnement qu'il a mis au point. Il insiste en particulier sur l'utilisation des diapositives pour faire comprendre les conséquences d'un changement de repère.

Lucienne Gouguenheim présente la série de diapositives (D6 de notre catalogue) réalisée par notre ami Roland Szostak de l'Université de Münster. Cette série est intitulée "Une expérience pour illustrer les saisons" et comporte huit vues seulement (toutes les autres séries de diapositives comportent 20 vues). Cette série nous montre une boule colorée dont la couleur change quand elle est éclairée par une lampe ; si la boule tourne autour d'un axe, la tache provoquée par la lampe engendre une zone tachée. Du fait de l'inclinaison de l'axe de rotation sur le plan de translation de la boule, la zone chauffée varie. Cette explication des saisons est d'autant plus utile qu'un collègue a relevé dans un manuel de géographie de Sixième une pseudo explication des saisons par la variation de la distance de la Terre au Soleil au cours de l'année.

Michèle Gerbaldi présente le compte rendu de l'Université d'été Gap 1990 qui est enfin édité; Cette édition avait été retardée en raison de trésorerie insuffisante du CLEA et priorité donnée à la fabrication des Hors Série mais le Gap 90 est enfin là et son riche contenu devrait intéresser beaucoup d'entre nous. Il contient une large information sur les expériences spatiales en cours, en particulier space telescope et Hipparcos, dans sa partie théorique et, dans les activités pratiques beaucoup de réalisations proposées par Roland Szostak. Le compte rendu Gap 90 figure au catalogue des publications CLEA.

Claude Piguet présente le CINECIEL qu'elle a réalisé dans le but de visualiser les repères terrestres utilisés en astronomie et faire comprendre les mouvements apparents du ciel des fixes, du Soleil et de la Lune. Elle en montre diverses utilisations. Une remarque concernant la diffusion du cinéciel : pour les envois par la poste au prix de 100 F nous ne pouvons fournir la boîte support ; celle-ci est fournie sans augmentation de prix pour les cinéciels vendus lors des stages ou des réunions CLEA.

Lucienne Gouguenheim ouvre ici la brubrique "Informations sur les programmes officiels et sur les projets du CLEA".

Pour les collègues qui enseignent en lycée, les programmes sont parus dans le BO du 24 septembre 1992. On pourra discuter s'il est bon ou non que des notions d'astronomie apparaissent dans plusieurs disciplines, en physique ou en sciences de la vie et sciences de la Terre. L'astronomie étant par essence une science pluridisciplinaire, il n'est sans doute pas mauvais que les élèves connaissent diverses approches selon la classe où les mêmes notions seront diversement introduites.

Pour l'enseignement élémentaire, nous avons publié dans les Cahiers Clairaut ce qui a été une étape dans les travaux du groupe de travail. A partir de ces travaux, des textes définitifs sont, je crois, en passe d'être publiés officiellement.

Pour les Lycées, en physique, en Seconde, tout ce qui concerne la lumière. En Première, dans le chapitre mouvements et énergie, énergie nucléaire, il y a matière à introduire un peu d'astrophysique des étoiles. Dans les options, il est fait mention de l'effet Doppler-Fizeau et de la mesure de la vitesse de la lumière. En Seconde, en chimie, le programme mentionne l'étude de l'abondance des éléments chimiques dans l'Univers.

En filière L, en Première, sur le thème "l'Homme dans l'Univers" on aura la possibilité de traiter du calendrier, de la carte du ciel et de recherche spatiale. En projet, pour la Terminale, l'Univers et son histoire où sera traité en particulier du géocentrisme et de l'héliocentrisme.

En résumé, dans les programmes obligatoires aussi bien que dans les options, il y a une place possible à l'astronomie. Pour que cette réforme réussisse, il faut aider les enseignants et le CLEA a un rôle à jouer pour faciliter l'introduction des notions nouvelles. Nous en avons discuté déjà lors de l'Université d'été de Gap.

Josée Sert présente les projets de stages d'astrophysique en Première S sur lesquels on a discuté à Gap : 1°) sur le thème "lumière et énergie", problèmes de l'évolution stellaire, études des spectres et composition chimique, étude de la couleur ; 2°) sur le thème "lumière et mouvement", l'étude des mouvements dans le système solaire, histoire de l'héliocentrisme, Galilée, les spectres et l'effet Doppler ; 3°) stage entrant plutôt dans la catégorie "action culturelle", l'Homme, la Terre, le Soleil et leur histoire, étude des calendriers ; 4°) Stage peut-être plus réservé aux enseignants de Terminale sur la gravitation. Dans tous les cas, ces stages seraient conçus selon le mode habituel du CLEA avec équilibre entre parties théoriques et parties pratiques. Jean Ripert a écrit à toutes les académies pour proposer l'aide du CLEA à l'organisation de tels stages, celles qui ont répondu sont favorables.

Lucienne Gouguenheim cite l'initiative intéressante d'un IPR de l'académie de Versailles: puisque certains capésiens sont sans poste provisoirement du fait de la suppression de la physique en Sixième et Cinquième, il pense utiliser les services de ces capésiens pour remplacer les professeurs de physique qui suivront ces stages. Le CLEA sera mis à contribution mais malheureusement les moyens financiers manquent. Lucienne insiste cependant sur l'urgence de cette action pour que l'introduction de notions d'astronomie dans les programmes réussisse. Toujours dans cette perspective, un stage organisé par l'Unité Sciences de la Terre réunit à partir du 23 novembre 28 stagiaires, physiciens ou naturalistes, venant de toutes les académies. Le stage a lieu ; nous donnerons à chaque stagiaires une documentation à diffuser dans son académie, en souhaitant que des contacts fructueux se multiplient.

Cette action est sûrement intéressante mais encore insuffisante. On voudrait pouvoir renouveler de tels stages. Pour les universités d'été, cette année elle a eu lieu à Gap assurée par l'équipe d'Orsay, en 93 Marie-France Duval se propose d'en organiser une dans le Vaucluse. D'autre part, nous CLEA voudrions organiser une véritable formation de formateurs en concentrant cette action sur les activités pratiques qui peuvent illustrer les nouveaux programmes ; les stagiaires seraient invités à répercuter ce qu'ils auraient appris et fait durant ce stage dans des stages MAFPEN que les membres du CLEA sont invités à proposer dans toutes les académies.

Jean Ripert fait état des discussions du Groupe de Recherches Pédagogiques du CLEA sur l'intérêt de l'édition d'un manuel pour élèves ; il y a doute car ce manuel s'ajouterait à tous ceux que l'élève doit se procurer. La question reste donc débattue. Par contre, l'éditeur Belin envisage favorablement l'édition d'un nouveau recueil de fiches comme notre HS3 sur le thème "mouvements dans le système solaire". Nous avons déjà un stock de fiches expérimentées et nous ferons en sorte que ce recueil puisse paraître au printemps 1993. Son titre maintiendra sans doute la référence aux Cahiers Clairaut.

Michèle Gerbaldi relate qu'il y a environ un an, le laboratoire d'Orsay et le CLEA ont été contactés par le CNED (Centre National d'Enseignement à Distance). Celui-ci voulait créer un diplôme universitaire d'astrophysique dans le cadre de l'enseignement diffusé par le CNED. Cet enseignement comporte un cours et des documents sous forme vidéo, télématique ou diapositives. Peuvent s'inscrire au cours, des bacheliers ou des personnes ayant 5 années d'activité professionnelle ; le diplôme, après examen, est donné par l'Université d'Orsay. Une liaison avec les MAFPEN est envisagée. Début à la rentrée 93. Le GRP-CLEA prend part à la réalisation des vidéo. Les inscriptions seront gérées par le CNED.

Edith Hadamcik rend compte de la participation du CLEA aux journées 1992 de l'UdP : deux activités principales, Lucienne Gouguenheim a présidé un groupe sur l'astronomie dans les programmes de physique avec la participations de collègues de Suisse, d'Allemagne, de Belgique il y a visiblement parallélisme des évolutions des programmes dans beaucoup de pays. Le deuxième atelier a été organisé par Claude Piquet sur le Ciel des Pharaons à nos jours avec construction du cinéciel. On a pu toucher 250 collègues.

Lucienne Gouguenheim ouvre un débat sur l'enseignement de la physique et de l'astronomie dans les IUFM ; elle déplore qu'en général l'enseignement de la physique pour les futurs professeurs d'école soit réduit à très peu de chose. Confirmations de collègues de Laval, Marseille, Strasbourg, Rouen, Versailles. L'expérience dans les centres de Versailles de séances regroupant professeurs d'école et professeurs de collège nous a parue difficile parfois mais intéressante.

L'interruption du déjeuner ne constitue pas une interruption de l'assemblée générale. Elle en représente même un moment très important par les contacts multiples qu'elle permet. On échange de vieux souvenirs entre anciens, "oui, nous étions déjà à Lanslebourg en 1977", "et même à Grenoble en 1976". Et maintenant et demain, que de projets vont ici s'élaborer! Dans le meilleur climat grâce au repas préparé par l'équipe de Béatrice Sandré où l'on retrouve Lucette Bottinelli, Edith Hadamcik, Catherine Vignon, Annie Petit... Je suis presque certain d'en oublier mais le secrétaire plaide coupable, s'il a oublié l'une ou l'autre, c'est qu'il était trop absorbé à bavarder avec les amis en savourant le gâteau au chocolat.

o o

La séance est reprise à 15 heures.

Marie-France Duval nous donne un aperçu des activités CLEA à Marseille. Elle note un certain ralentissement des visites de groupes scolaires niveau collège alors que l'affluence est croissante pour les groupes niveau école élémentaire. Le groupe s'occupe de la réhabilitation du télescope de Foucault de 80 cm, appareil historique, le premier à miroir argenté. Pour les séances de planétarium itinérant, nous utilisons celui que Mathieu présente ici, en marge de l'assemblée générale. Marie-France présente une cassette vidéo "Regards sur le cosmos". Parmi ses projets : organisation de l'observation de l'éclipse de Lune du 8 décembre, stage MAFPEN, université d'été qui aura lieu à Sault (Vaucluse) avec hébergement dans des locaux mitoyens du collège où se tiendront les séances de travail ; le stage comportera aussi une soirée à l'Observatoire de St Michel

Daniel Bardin présente et commente des diapositives qui font revivre quelques scènes de travail et quelques scènes de détente de l'université d'été de Gap 1992.

Claude Mathieu présente le planétarium transportable COSMODYSSEE II qu'il a mis au point avec l'Association Ardennes Astronomie et qui se trouve maintenant fabriqué industriellement à des conditions qui peuvent intéresser beaucoup d'établissements scolaires. Les Cahiers Clairaut auront l'occasion de revenir sur cette réalisation très intéressante.

Jean Gagnier s'intéresse au recensement de tout ce qui existe dans l'audiovisuel pour l'astronomie. Il se propose pour réunir et concentrer toutes les informations dans ce domaine, informations que le CLEA pourra ensuite diffuser.

Jean-Yves Marchal rappelle les activités de l'équipe de Strasbourg animée par Agnès Acker. Une université d'été 1993 est prévue, probablement au col de Steige, sur le thème "la lumière du Soleil". Le planétarium de Strasbourg fête ses dix ans de succès constant. Sur le thème "1492-1992, 100 chefs d'oeuvre du patrimoine scientifique alsacien" une exposition a lieu du 18 novembre 1992 au 14 mars 1993 au "Jardin des sciences, en la crypte aux étoiles et au planétarium".

NDLR - Faute de place et de temps, le secrétaire réserve au numéro suivant des Cahiers d'autres échos de l'assemblée générale et des informations envoyées par des groupes de diverses régions. Que les Collègues excusent ce retard et soient assurés que leurs témoignages ne seront pas oubliés.

o o

Après la conférence de François Biraud qui a maintenu en haleine tous les participants et quelques échanges avec les conférenciers, l'assemblée est close à 18 heures.

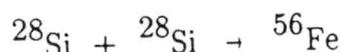
Conformément à la règle statutaire, l'assemblée a renouvelé le Conseil du CLEA. Il y a eu 60 votant qui ont élu à l'unanimité la liste suivante : (les Collègues dont le nom est suivi de celui de l'académie où ils résident sont les délégués du CLEA dans leur région)

CONSEIL DU CLEA EN 1993 : Agnès ACKER (Strasbourg), Daniel BARDIN (Aix-Marseille), Lucette BOTTINELLI, André BRAHIC, Jean CHAPPELLE (Clermont-Ferrand), Frédéric DAHRINGER (Rennes), Alain DARGENCOURT (Amiens), Françoise DELMAS, Christian DUMOULIN (groupe inter IREM), Bernadette DURIEUX (Nancy-Metz), Marie-France DUVAL, Maryse FAYDI, Jean-Luc FOUQUET (Poitiers), Christiane FROESCHLE (Nice), Michèle GERBALDI, Hubert GIE, Lucienne GOUGUENHEIM, Edith HADAMCIK (Créteil), Raymond HERNANDEZ (Dijon), Jean-Claude HERPIN (UdP), Michel LAISNE (Lille), Roger MARICEL (Rouen), Francis MINOT (APMEP), Jean-Paul PARISOT (Bordeaux), Jean-Claude PECKER, Georges PIETRI (Aniane), Claude PIGUET (Lyon), Henri REBOUL (Montpellier), Andrée RICHELME (Grenoble), Jean Ripert (Toulouse), Jean-Paul ROSENSTIEHL (Nantes), Béatrice SANDRE (Versailles), Nicole SANGLERAT Liliane SARRAZIN, Evry SCHATZMAN, Josée SERT, Françoise SUAGHER (Besançon), Daniel TOUSSAINT (Reims), Victor TRYOEN, Pierre VIDAL (APISP), Jacques VIALLE, Michel VIGNAND (La Réunion), Catherine VIGNON (Paris), Gilbert WALUSINSKI.

L'évolution des étoiles massives

La figure 4 nous apprend que pendant toute l'évolution des étoiles plus massives que 8 masses solaires, les réactions nucléaires se passent dans un milieu non dégénéré. D'une part, la combustion se passera donc sans épisodes catastrophiques, mais d'autre part il n'y aura pas d'électrons dégénérés pour contribuer à la pression. L'étoile n'a alors pas d'autre choix que de continuer à produire de l'énergie par fusion nucléaire. Ainsi à la combustion d'hydrogène succédera celle d'hélium, puis le carbone sera fusionné en magnésium-24,...

Il est clair que les réactions nucléaires ne pourront pas éternellement produire la pression nécessaire dans ces étoiles. Une fois le fer-56 synthétisé dans la réaction



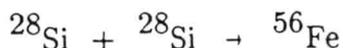
c'en sera fini avec les possibilités de produire de l'énergie par fusion. En plus, les différentes phases de combustion se succéderont de plus en plus rapidement, pour deux raisons. D'abord, nous voyons sur la figure 1 que la pente diminue quand on se rapproche du fer; donc, de moins en moins d'énergie sera produite par réaction et il faudra de plus en plus de réactions par unité de temps pour assouvir les besoins de l'étoile. Puis, les réactions se produiront chaque fois à des températures plus hautes, et ainsi une fraction chaque fois grandissante de l'énergie sera évacuée par des neutrinos; celles-ci sont des particules qui n'interagissent pratiquement pas avec la matière et qui donc ne contribuent point à la pression. Pour produire quand même la pression nécessaire pour contrer son autogravitation, l'étoile devra donc produire de plus en plus d'énergie! La durée de la phase de synthèse de fer à partir de silicium ne sera que de l'ordre de quelques jours!

L'évolution d'une telle étoile massive conduira finalement à une explosion de supernova "du type II". Le noyau de fer soumis à sa propre gravitation contracte, n'allume plus de réactions, et arrive à une densité telle que ses électrons forment un gaz dégénéré. Mais sa masse atteint assez vite la limite de Chandrasekhar, et l'implosion devient inévitable. Pendant cet effondrement beaucoup d'énergie potentielle gravitationnelle est libérée. Cette énergie sert en partie à défaire les atomes de fer (elles sont "photodissociées"), ce qui accélère encore le processus

L'évolution des étoiles massives

La figure 4 nous apprend que pendant toute l'évolution des étoiles plus massives que 8 masses solaires, les réactions nucléaires se passent dans un milieu non dégénéré. D'une part, la combustion se passera donc sans épisodes catastrophiques, mais d'autre part il n'y aura pas d'électrons dégénérés pour contribuer à la pression. L'étoile n'a alors pas d'autre choix que de continuer à produire de l'énergie par fusion nucléaire. Ainsi à la combustion d'hydrogène succédera celle d'hélium, puis le carbone sera fusionné en magnésium—24,...

Il est clair que les réactions nucléaires ne pourront pas éternellement produire la pression nécessaire dans ces étoiles. Une fois le fer—56 synthétisé dans la réaction



c'en sera fini avec les possibilités de produire de l'énergie par fusion. En plus, les différentes phases de combustion se succéderont de plus en plus rapidement, pour deux raisons. D'abord, nous voyons sur la figure 1 que la pente diminue quand on se rapproche du fer; donc, de moins en moins d'énergie sera produite par réaction et il faudra de plus en plus de réactions par unité de temps pour assouvir les besoins de l'étoile. Puis, les réactions se produiront chaque fois à des températures plus hautes, et ainsi une fraction chaque fois grandissante de l'énergie sera évacuée par des neutrinos; celles-ci sont des particules qui n'interagissent pratiquement pas avec la matière et qui donc ne contribuent point à la pression. Pour produire quand même la pression nécessaire pour contrer son autogravitation, l'étoile devra donc produire de plus en plus d'énergie! La durée de la phase de synthèse de fer à partir de silicium ne sera que de l'ordre de quelques jours!

L'évolution d'une telle étoile massive conduira finalement à une explosion de supernova "du type II". Le noyau de fer soumis à sa propre gravitation contracte, n'allume plus de réactions, et arrive à une densité telle que ses électrons forment un gaz dégénéré. Mais sa masse atteint assez vite la limite de Chandrasekhar, et l'implosion devient inévitable. Pendant cet effondrement beaucoup d'énergie potentielle gravitationnelle est libérée. Cette énergie sert en partie à défaire les atomes de fer (elles sont "photodissociées"), ce qui accélère encore le processus

d'implosion puisque la photodissociation enlève de l'énergie au milieu. Pourtant, deux facteurs peuvent arrêter l'effondrement: d'une part la matière devient tellement dense qu'elle n'est plus transparente aux neutrinos, et d'autre part les électrons et protons se rentrent dedans et forment des neutrons: l'état de la matière est alors devenu celui d'un gaz dégénéré de neutrons, et celui-ci peut soutenir son propre poids jusqu'à environ deux masses solaires. On assiste alors à la formation d'une "étoile à neutrons".

L'implosion du noyau de fer jusqu'à la formation d'une étoile à neutrons ne dure qu'une milliseconde! Le nouvel équilibre se crée de façon assez brutale. Le rebond produit une onde de choc qui se propage vers l'extérieur de l'étoile. Il se peut alors que cette onde de choc l'emporte sur le mouvement inverse qui fait s'écrouler sur le noyau les couches de l'étoile qui entourent le noyau. Dans ce cas-là, ces couches, qui forment des coquilles de composition chaque fois différente, correspondant à des phases successives de combustion nucléaire, sont éjectées dans l'espace et une partie de l'énergie libérée parvient à l'extérieur. C'est l'explosion de supernova.

On peut aussi s'imaginer que, pour des étoiles très massives, l'onde de choc soit trop faible pour souffler les couches extérieures et que tout s'écroule. Alors même la pression des neutrons ne peut plus suffire pour contrebalancer la gravitation et l'effondrement est total, tel que même la lumière n'arrive plus à sortir. Ce scénario ultime de l'écroulement gravitationnel conduit alors à un trou noir.

L'énergie gigantesque libérée dans une supernova du type II est donc à l'origine de source gravitationnelle: elle est produite par l'implosion de l'étoile sur elle-même. Une grande partie (de l'ordre de 99%) de cette énergie est libérée sous forme de neutrinos. De ce qui reste, une fraction est convertie en l'énergie mécanique nécessaire pour souffler l'enveloppe de l'étoile. Cette énergie mécanique dépend de la structure et du poids de l'enveloppe et peut bien différer d'une supernova à une autre. Par conséquent, il est difficile de prédire l'énergie qui peut encore être convertie en la luminosité d'une supernova de type II. Ainsi, la fameuse supernova 1987A dans le Grand Nuage de Magellan a-t-elle explosé dans une étoile assez dense, où il a fallu relativement beaucoup d'énergie mécanique pour souffler l'enveloppe: l'étoile n'est donc pas devenue aussi brillante qu'on pouvait espérer.

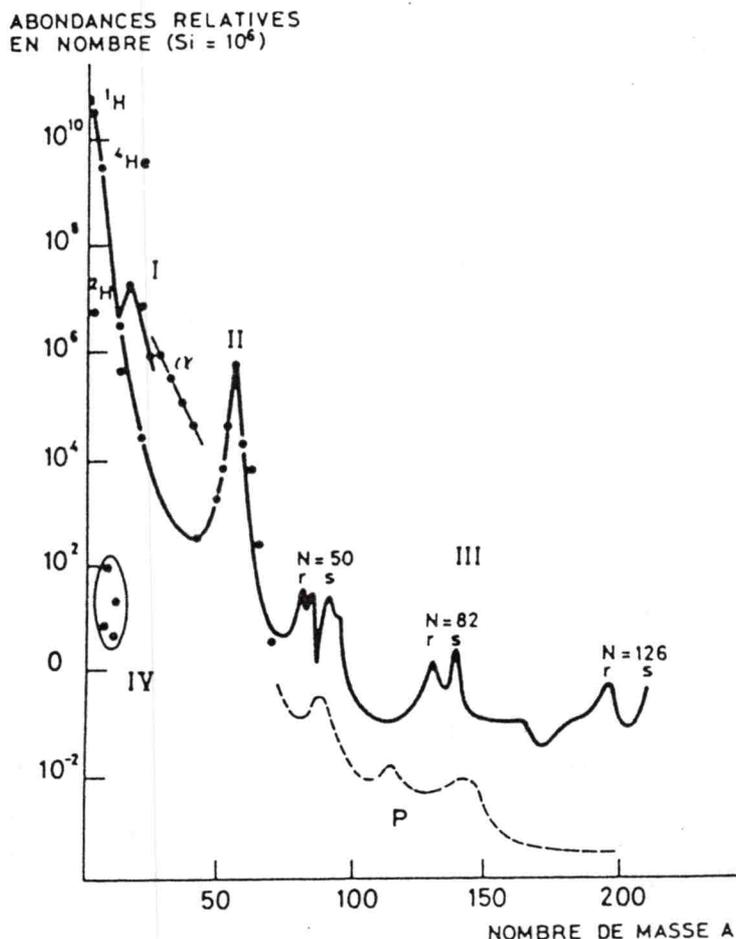
La nucléosynthèse dans les étoiles

L'astrophysique moderne nous a apporté un certain nombre de connaissances qui sortent du contexte spécifique de cette science et qui devraient faire partie de la culture générale de chacun. Parmi celles-ci la notion d'expansion de l'univers et aussi l'explication pour l'origine des éléments chimiques.

Sur la figure 5 nous voyons ce qu'on appelle l'abondance des éléments, c'est-à-dire la fraction relative dans laquelle les différents éléments de la Table de Mendeleev sont présents dans la nature. Nous remarquons d'abord qu'environ 98% (en masse) des éléments sont sous forme d'hydrogène (72%) et d'hélium (26%). Ces chiffres sont très bien expliqués par les théories cosmologiques: la matière est émergée sous forme de protons et neutrons de la première seconde de l'univers et à peu près tous les neutrons se sont alliés à des protons pour former des atomes d'hélium. Cette "nucléosynthèse primordiale" s'est arrêtée très tôt, quand la densité de l'univers devenait trop faible pour permettre de nouvelles réactions.

Les abondances relatives des éléments dans le système solaire en fonction de leur nombre de masse A . Ces abondances sont le résultat de l'évolution chimique galactique, dans laquelle la synthèse des éléments dans les étoiles joue un rôle essentiel. Les abondances sont données en nombre d'atomes dans une échelle où celle du silicium, égale à 10^6 , soit un million, est prise pour référence. Les chiffres romains désignent les groupes des éléments pour lesquels $A \lesssim 45$ (pic de l'hydrogène), le pic du fer (II), les éléments plus lourds que $A \approx 65$ (III), les éléments très légers enfin (IV). On notera que l'échelle des abondances est logarithmique.

Figure 5:



Ce sont les deux pour cent d'éléments plus lourds qui nous intéressent ici, puisque l'existence de ces éléments peut être expliquée à partir de la théorie de la nucléosynthèse à l'intérieur des étoiles. En fait, par les explosions de supernovae et aussi pendant les phases ultimes des étoiles de faible masse, une partie des produits de cette nucléosynthèse est restituée au milieu interstellaire. Chaque génération d'étoiles est ainsi engendrée par un milieu enrichi chimiquement par les générations précédentes. Sur la figure 5 nous remarquons que

- (1) l'abondance des éléments décroît grossièrement avec le nombre de masse A ;
- (2) il y a une certaine prépondérance des éléments dont le nombre de masse est un multiple de 4, c'est-à-dire l'hélium, le carbone, l'oxygène, le néon, le magnésium, ...
- (3) il y a un maximum local autour du fer (le "pic du fer");
- (4) au-delà du fer, il y a encore des éléments, et là aussi il y a quelques maxima locaux.

Avec ce que nous avons vu plus haut nous pouvons expliquer les points (1) et (2). Il est assez compréhensible qu'il y'a plus d'éléments légers, puisque ceux-ci sont formés les premiers. Les noyaux d'hélium sont le matériel de base des réactions de fusion dans les étoiles évoluées et il est donc normal que les produits ont le plus souvent des nombres de masse qui sont un multiple de quatre. Les autres éléments sont formés à des abondances moins importantes dans les multiples autres réactions qui surviennent dans ces étoiles.

Pour comprendre les points (3) et (4) il faut quelques explications supplémentaires. On ne s'attend pas à qu'une explosion supernova telle que nous l'avons décrite produise du fer, puisque le fer est seulement produit dans le noyau qui justement implose et est photodissocié. Un nouveau concept qu'il faut introduire est la *nucleosynthese explosive*. L'onde de choc dans une supernova chauffe la matière dans l'enveloppe d'une façon telle que des réactions nucléaires en chaîne peuvent se produire; tous les éléments jusqu'au fer sont alors produits dans des proportions différentes. L'explosion d'une supernova n'est pas précisément une situation d'équilibre et l'énergie gigantesque libérée alors conduit aussi à des réactions nucléaires qui consomment de l'énergie au lieu d'en produire; ainsi les éléments stables plus lourds que le fer sont aussi synthétisés. Décrire toutes ces réactions en détail n'est pas simple; il nous suffit ici de dire que la théorie de la nucléosynthèse explosive parvient à expliquer beaucoup de détails de la figure 5, où en voit qu'au-delà du fer il y a certaines "bosses caractéristiques".

Pourtant, les supernovas du type II ne suffisent pas à expliquer le pic du fer. La supernova 1987A a produit plus d'une masse solaire d'oxygène, mais seulement environ 0.07 masses solaire de fer. Par contre, il existe un autre type de supernova, où les éléments du pic du fer sont produits abondamment: les supernovas du type I. Elles ont une origine bien différente des type II. Imaginons une naine blanche dans un système binaire où le companion est assez proche. Au cours de son évolution, ce compagnon grossit et à partir d'un certain moment commence à transférer de la matière sur la naine blanche. Finalement, il se peut ainsi que la naine blanche, qui croyait avoir définitivement résolu le problème de son autogravitation, finalement transgresse la limite de Chandrasekhar. C'est alors l'effondrement brutal et inévitable, le chauffage de l'intérieur allume le carbone en milieu dégénéré et c'est la "déflagration du carbone", une explosion nucléaire qui probablement conduit à l'éclatement total.

Les progéniteurs des supernova du type I sont donc des étoiles de masse initiale assez faible. L'énergie de l'explosion est d'origine nucléaire. Et dans cette explosion, la matière tend à son état d'énergie minimum, qui est celui d'un noyau de fer, l'élément le plus stable de la nature. Ce sont les supernovas de ce type qui contribuent le plus à synthétiser les éléments du pic de fer.

L'âge des étoiles, l'âge de l'univers.

Les étoiles que nous observons ont chacune leur histoire et se trouvent à des distances très différentes de nous. On observe quand même des groupements physiques d'étoiles, les *amas stellaires*. Il s'agit alors d'étoiles qui sont nées dans un même nuage et qui ont fait chemin ensemble depuis. L'observation d'amas stellaires est très intéressante pour étudier l'évolution stellaire, parce que les étoiles d'un même amas ont le même âge et sont à la même distance: si l'une est plus brillante qu'une autre, on sait qu'il s'agit alors d'une différence de luminosité intrinsèque.

Sur la figure 6 nous montrons un diagramme "magnitude—couleur" d'un amas. C'est comme un diagramme HR, mais on met en évidence la magnitude apparente et non la magnitude absolue; puisque toutes les étoiles sont à la même distance, la différence entre la magnitude apparente et la magnitude absolue est la même pour toutes les étoiles de l'amas, comme quoi on peut la figure 6 représente bien le

diagramme HR de l'amas. On observe alors que les étoiles de l'amas définissent une ligne "isochrone": à cause de la relation masse-luminosité et donc la variation très forte de la durée de vie de la séquence principale avec la masse de l'étoile, on voit que les étoiles les plus faibles se trouvent encore sur la "séquence d'âge zéro" (en traits sur la figure), alors que les plus massives ont déjà quitté la séquence principale.

Plus un amas est vieux, plus faibles intrinsèquement sont les étoiles qui ont déjà quitté la séquence principale. Ainsi, l'étude de diagrammes tels que la figure 6 est-elle un outil puissant pour estimer l'âge des étoiles et par conséquent une limite inférieure pour l'âge de l'univers. On trouve que les amas les plus vieux, les amas globulaires, ont des âges de l'ordre de 15 milliards d'années.

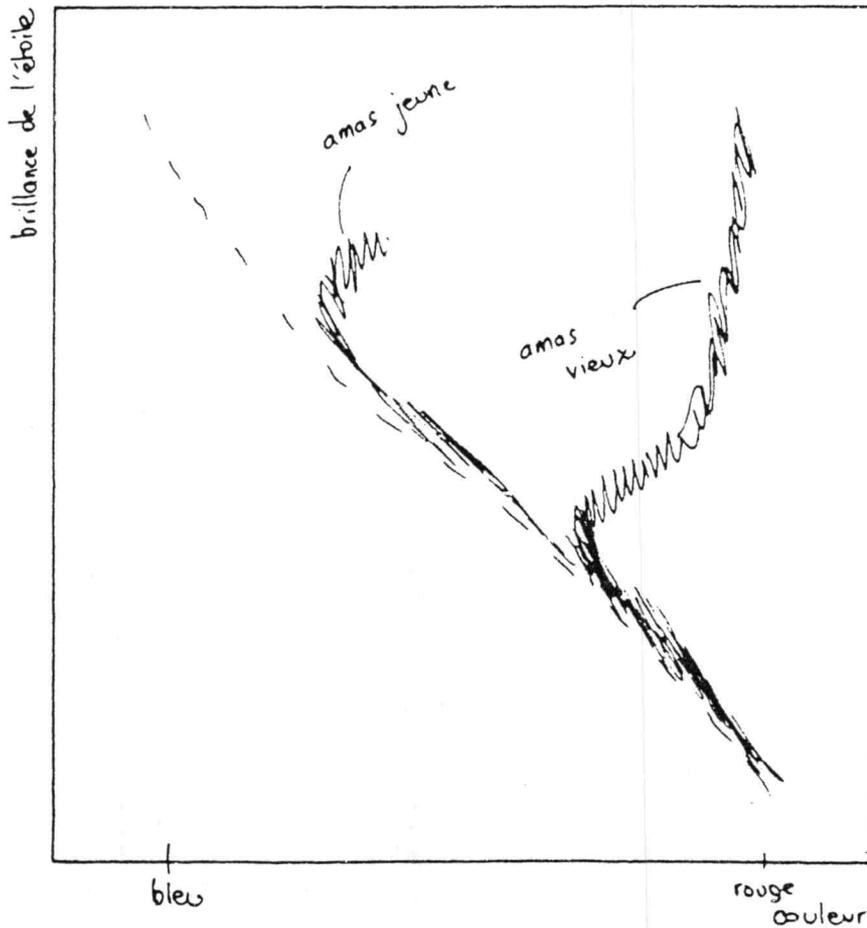


Figure 6: Diagrammes magnitude-couleur d'amas stellaires.

LES PUBLICATIONS DU C. L. E. A.

Le CLEA publie depuis quatorze ans son bulletin trimestriel de liaison, Les Cahiers Clairaut. On trouvera, page 4 de la couverture, les conditions d'abonnement et les conditions d'adhésion au CLEA.

Toutes les publications du CLEA sont conçues pour l'information des enseignants et pour les aider dans leur enseignement de l'astronomie.

FASCICULES POUR LA FORMATION DES MAITRES EN ASTRONOMIE

1. L'observation des astres, le repérage dans l'espace et le temps (20F-25F)
2. Le mouvement des astres (25F-30F)
3. La lumière messagère des astres (25F-30F)
4. Naissance, vie et mort des étoiles (30F-35F)
5. Renseignements pratiques, bibliographie pour l'astronomie (25F-30F)
- 5bis. Complément au fascicule 5 (25F-30F)
6. Univers extragalactique et cosmologie (30F-35F)
7. Une étape de la physique, la Relativité restreinte (60F-68F)
8. Moments et problèmes dans l'histoire de l'astronomie (60F-68F)
9. Le système solaire (50F-58F)
10. La Lune (30F-35F)
11. La Terre et le Soleil (40F-48F)
12. Simulation en astronomie sur ordinateur (30F-35F)

COURS POLYCOPIES D'ASTROPHYSIQUE (M3.C4 de l'Université Paris XI-Orsay)

- I. Astrophysique générale (30F-35F)
- II. Mécanisme de rayonnement en astrophysique (30F-35F)
- III. Etats dilués de la matière : le milieu interstellaire (30F-35F)
- IV. La structure interne des étoiles (30F-35F)
- V. Relativité et cosmologie (30F-35F)
- S. Cours d'astrophysique solaire : le Soleil (30F-35F)

LES FICHES PEDAGOGIQUES DU CLEA, numéros hors série des Cahiers Clairaut

- HS1. L'astronomie à l'école élémentaire (60F-68F) (40F-48F pour les abonnés)
HS2. La Lune, niveau collège 1 (60F-68F) (40F-48F pour les abonnés)
HS3. Le temps, les constellations, niveau lycée (60F-68F) (40F-48F pour abonnés)

TRANSPARENTS ANIMES POUR RETROPROJECTEUR

- T1. Le TranSoLuTe (les phases de la Lune et les éclipses) (50F-55F)
- T2. Les fuseaux horaires (50F-55F)
- T3. Les saisons (50F-55F)

DIAPPOSITIVES (séries de 20 vues + livret de commentaires) chaque 50F-55F

- D1. Les phénomènes lumineux
- D2. Les phases de la Lune
- D3. Les astres se lèvent aussi
- D4. Initiation aux constellations
- D5. Rétrogradation de Mars

LES COMPTES RENDUS DES UNIVERSITES D'ETE

Grasse 1983 (58F-66F) ; Formiguères 1984 (65F-75F)
Formiguères 1985 (100F-110) ; Formiguères 1986 (100F-110F)

PUBLICATIONS DU PLANETARIUM DE STRASBOURG

- ST1. Catalogue des étoiles les plus brillantes (75F) ; édition sur disquette
120 F les deux disquettes.
ST2. Deux séries de cartes postales : CP1. le système solaire ; CP2 Nébuleuses
et galaxies. Chaque série 23F

Pour chaque publication, le deuxième prix est celui qui comprend les frais d'expédition et concerne donc les commandes par la poste.

Chèques à l'ordre du CLEA envoyés au secrétaire :

Gilbert Walusinski, 26 Bérengère, 92210 ST CLOUD - Tél (1) 47 71 69 09

LE C.L.E.A. et LES CAHIERS CLAIRAUT

Conditions d'adhésion et d'abonnement pour 1992 :

Cotisation simple au CLEA pour 1992	25 F
Abonnements simple aux Cahiers n°57 à 60	100 F
Abonnement aux Cahiers (n°57 à 60) ET cotisation au CLEA pour 1992	120 F
Contribution de soutien (par an)	30 F
Le numéro des Cahiers Clairaut (port compris)	35 F

Possibilité de cotiser ou de s'abonner pour deux ans en doublant les tarifs précédents.

A L'INTENTION DES NOUVEAUX ABONNES, onze fascicules thématiques ont été édités ; ils réunissent des articles publiés dans les Cahiers Clairaut. Tout nouvel abonné reçoit, en témoignage de bienvenue un fascicule à choisir dans la liste suivante :

FA. L'astronomie à l'école élémentaire	FG. Astronomie et informatique
FB. L'astronomie au collège	FH. Articles de physique
FC. Construction d'une maquette	FJ. Articles d'astrophysique
FD. Construction d'un instrument	FK. Histoire de l'astronomie
FE. Réalisation d'une observation	FL. Interprétation d'un document d'observation
FF. Les potins de la Voie Lactée	

COLLECTIONS DES CAHIERS CLAIRAUT

- C1. Collection complète du n°1 au n°56 (740F-800F)
- C88. C89. Collection 1988 ou 1989 (chaque 80F-90F)
- C90. C91. Collection 1990 ou 1991 (chaque 90F-100F)

Adresser commandes et inscriptions au secrétaire du CLEA :
Gilbert Walusinski, 26 Bérengère, 92210 ST CLOUD
en joignant à votre envoi le chèque correspondant à l'ordre du CLEA.

Directeur de la publication : Lucienne Gouguenheim
Imprimerie Hauguel, 92240 Malakoff
Dépot légal : 1^{er} trimestre 1979
Numéro d'inscription CPPAP : 61660