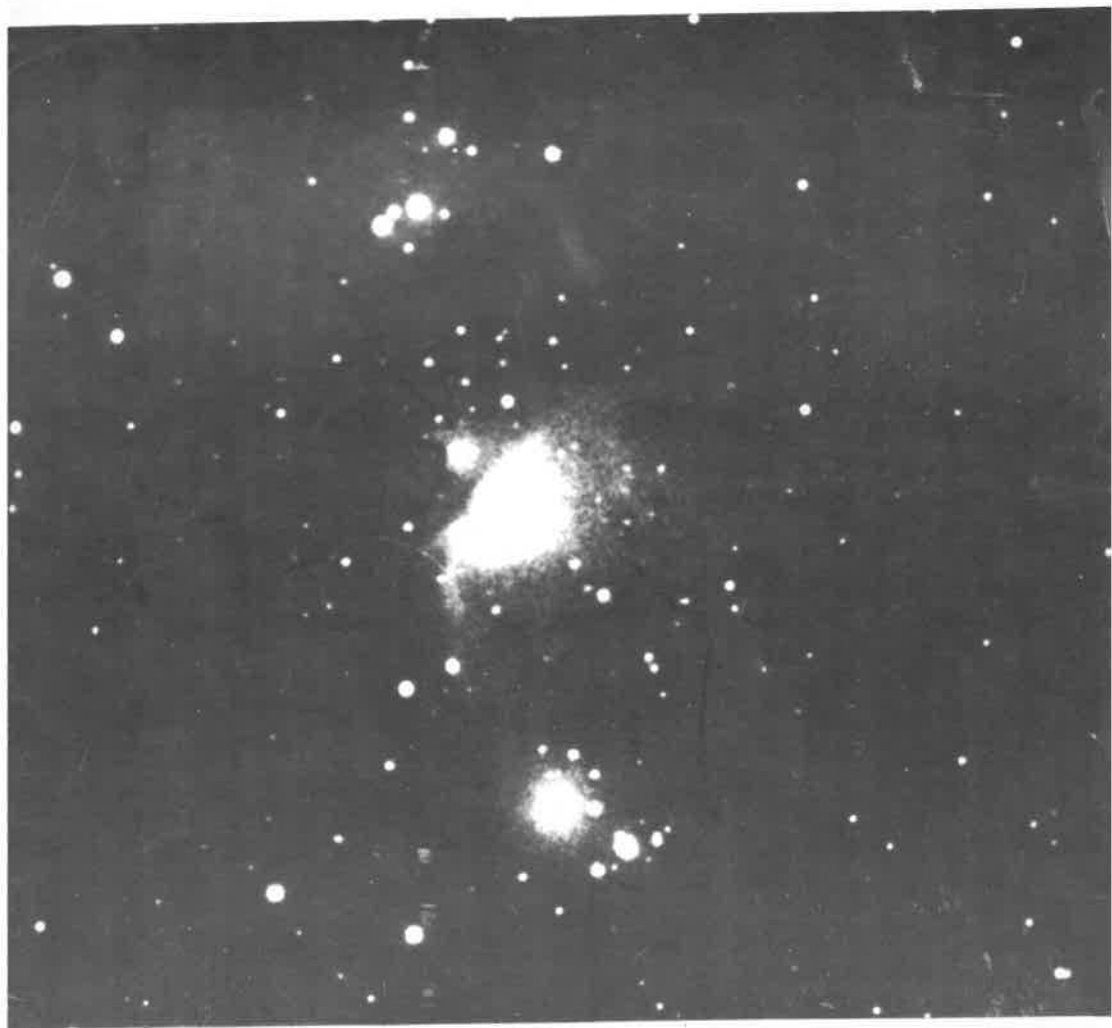


**SOCIETE
ASTRONOMIQUE
DE LYON**



REVUE TRIMESTRIELLE

Nouvelle série — N° 14 — 1979

Notre couverture :

Nébuleuse d'Orion. Ce cliché est dû à un amateur, M. Bourret, bibliothécaire de notre société.

Il a été pris le 28 novembre 1970 à Saint-Genis-Laval, de 23 h 35 à 0 h 05 TU, avec un télescope équatorial photographique équipé d'un miroir de 150 mm, instrument entièrement réalisé par son propriétaire.

RAPPORT MORAL — SAISON 1977-78

La saison 1977-78 étant maintenant terminée, voici brièvement résumé ce que nous pouvons y noter :

- Nous avons pu, grâce au concours d'astronomes professionnels et de quelques amateurs de la S.A.L., présenter dix conférences qui, nous l'espérons, ont intéressé les membres de notre association.
- Si, l'an passé, la publication de nos bulletins a subi beaucoup de retard, nous avons pu cette année, en sortir quatre éditions, soit les numéros 10, 11, 12 et 1 bis (numéro spécial sur les instruments). Pour ce dernier numéro, nous en avons fait imprimer en supplément et nous demandons à nos membres d'en parler autour d'eux afin que nous puissions en vendre le maximum, ce qui alimentera notre trésorerie.
- Nous avons pu assister, le 17 décembre 1977, à la remise du prix Henri Rey à notre Président, Monsieur Terzan, par Monsieur Philippe de La Cotardière, secrétaire de la S.A.F.
- En juin 1978, nous avons participé pour une modeste part au congrès Espace et Civilisation qui se tenait à Lyon : exposition d'instruments d'amateurs voisinant avec des instruments anciens prêtés par l'Observatoire de Lyon, conférences à la bibliothèque municipale, d'une part, par des astronomes de l'Observatoire de Lyon, d'autre part, par des membres de notre société.
- Enfin, le 1er juillet 1978 une visite au C.E.R.N. à Genève et à l'Observatoire de cette ville a réuni 98 participants qui ont été très intéressés par ce temple de la science moderne.

En conclusion, nous espérons simplement pouvoir maintenir, dans les années à venir, une activité semblable et nous nous efforcerons, dans la mesure de nos moyens, de l'améliorer.

Le Secrétaire

R. PRUD'HOMME

ERRATUM

Une malencontreuse «coquille» s'est glissée en page 8 du bulletin n° 13, que nos lecteurs auront certainement rectifiée eux-mêmes. A la quinzième ligne, il est écrit : «...les galaxies s'éloignent de nous d'autant plus vite que leur vitesse est plus grande». Chacun l'aurait deviné ! Il fallait bien sûr lire : «...les galaxies s'éloignent de nous d'autant plus vite que leur distance est plus grande».

BIBLIOGRAPHIE

Initiation à l'Astronomie par A. Acker, Masson éditeur, 1978, 150 pages.

Le livre de Mme Acker, astronome à Strasbourg, s'adresse aux étudiants de D.E.U.G. A 2 ayant choisi l'option «Astronomie», aux enseignants scientifiques désireux de s'initier à cette science et enfin à tout un vaste public que l'absence totale d'astronomie dans l'enseignement secondaire laisse sur sa faim.

Il débute par quelques rudiments d'optique et quelques résultats de théorie du rayonnement sans lesquels il serait vain de vouloir lire quoique ce soit en astronomie. Il est permis de regretter que ce chapitre ne contienne pas les définitions de base de la photométrie (éclairage, luminance, émittance, etc) souvent mal connues des débutants. Après une brève étude de l'atmosphère terrestre, l'auteur passe en revue les instruments (lunettes, télescopes) et les récepteurs (plaques photo, cellules photo-électriques, spectrographes, etc). Ensuite, un chapitre est consacré aux sujets très classiques que sont les repères en astronomie, le temps astronomique, les mouvements apparents et réels des astres. Dans le suivant, il est question des caractéristiques physiques des étoiles (magnitudes, température, distance, masse). Puis le Soleil est regardé en détail ; l'auteur explique à cette occasion ce qui se passe à l'intérieur des étoiles, ce qui permet d'enchaîner sur un chapitre où sont données des notions sur l'évolution stellaire. Nous passons alors aux étoiles variables, puis à la matière interstellaire (le texte est ici illustré de quelques belles photographies de nébuleuses). Sous le titre «Groupements stellaires», les étoiles doubles, les amas stellaires, la Galaxie et les galaxies sont successivement étudiés. Un chapitre sur le système solaire donne les principales caractéristiques des diverses planètes (on y voit figurer les résultats les plus récents : le 13e satellite de Jupiter et les anneaux d'Uranus). Comme il se doit, l'ouvrage s'achève sur la cosmologie. Les dernières pages contiennent une liste d'objets brillants faciles à observer (étoiles brillantes, étoiles doubles, nébuleuses, amas, galaxies), une bibliographie importante et un petit lexique. Les qualités pédagogiques évidentes de l'auteur en font un livre remarquable à la fois par sa concision (seulement 150 pages) et sa grande clarté. De plus, sa date très récente fait que les aspects les plus nouveaux de l'astronomie (par exemple les étoiles à neutrons, les binaires X) y sont abordés.

D. SONDAZ

b) Les quasars sont à leur distance cosmologique, mais leur z est dû à un effet physique nouveau.

. Vieillesse du photon

C'est une théorie remettant en cause l'expansion de l'Univers. Le rougissement serait dû au fait que le photon perd de l'énergie par collision avec les photons du rayonnement général de l'Univers. Pour l'instant, cela reste qualitatif, il faut assez de collisions pour rougir appréciablement la lumière, et pas trop pour ne pas gêner la propagation de la lumière... Cette théorie, encore embryonnaire, est due à Pecker et Vigier, et nécessite une masse non nulle pour le photon, ce qui constituerait une révolution en physique.

. Variation des constantes fondamentales

La valeur de la constante h de Planck fixe la fréquence des radiations lumineuses. Si elle a varié au cours de l'évolution de l'Univers, alors il n'y a pas de raison de ne pas supposer, par exemple, qu'il y a 8 milliards d'années les longueurs d'ondes des raies de l'hydrogène étaient plus longues d'un facteur $3 = (1 + z)$. Malheureusement, le même raisonnement doit s'appliquer à la structure fine des raies, et à leur largeur, et de gros ennuis apparaissent alors. On a aussi postulé une variation de la constante G de la gravitation, permettant d'obtenir, dans un lointain passé, un rougissement gravitationnel important avec des masses raisonnables.

c) Les quasars sont à leur distance cosmologique, et leur z est un effet de l'expansion.

C'est la position «classique». Quels sont apparemment les ennuis de cette voie ?

L'énergie énorme libérée par les quasars : on a vu que les théories locales ne font pas mieux, et de toute façon les grandes radiogalaxies, que l'on sait être à leur distance cosmologique, ont des dépenses énergétiques équivalentes. Il est donc vain de reculer devant les $10^{61}/10^{63}$ ergs à fournir : le cas existe déjà, parmi les objets connus.

Les variations rapides entraînent des dimensions trop faibles pour confirmer une telle puissance et la libérer en rayonnement synchrotron ? C'est faux car on s'est aperçu que les galaxies de Seyfert, qui sont à leur distance cosmologique, montrent exactement le même phénomène. Donc là encore, on ne peut plus reculer devant ce fait d'expérience.

C'est à peu près tout pour les ennuis, mais par contre on dispose de nombreux arguments «pour».

Par exemple, la plus grande densité spatiale des quasars aux grandes distances s'explique aisément en supposant que la production de tels objets est en baisse : les quasars à $z=2$ sont vus tels qu'ils étaient lorsque l'Univers était 80 % plus jeune ; la lumière qui nous parvient les a quittés il y a 8 milliards d'années. Les plus proches, avec des z plus petits, correspondent à des époques plus récentes, et sont donc plus rares. On explique même ainsi le fait que les quasars semblent se raréfier après $z=2,5$: on remonterait dans le passé avant la naissance du gros de la troupe des quasars. (fig. 6)

On a vu que les quasars avaient souvent des structures radio complexes. Si on les suppose à distance cosmologique, on peut calculer les séparations réelles des composantes, et on trouve de 1 à 450 Kpc, exactement comme pour les radio-galaxies.

Et, pour finir, l'argument qui semble vraiment décisif à beaucoup : si on construit une courbe en portant le logarithme de la luminosité radio apparente (qui dépend du carré de la distance à l'objet) en fonction du logarithme de la brillance superficielle (indépendante de la distance) pour les galaxies spirales, les radio-galaxies, les quasars supposés à distance

cosmologique, on obtient une magnifique courbe bien régulière, qui s'explique tout naturellement en supposant que ces objets sont de la même grande famille. Toutes les autres théories doivent supposer qu'il s'agit d'une coïncidence fortuite, idée peu appréciée des physiciens. (fig. 7).

On commence à voir émerger une évidence expérimentale à l'hypothèse cosmologique expansionniste : des photographies très délicates exécutées à la caméra électronique, des mesures photométriques précises des quasars variables, mettent en évidence, noyée par la luminosité du quasar, une galaxie elliptique sous-jacente ! Une idée qui est dans l'air depuis quelques années trouve sa vérification : les galaxies de Seyfert, les galaxies N et les quasars sont des témoins d'une activité cataclysmique dans le noyau des galaxies. Reste à savoir si toute galaxie passe par un de ces états au cours de son existence, ou s'il s'agit de « monstres ».

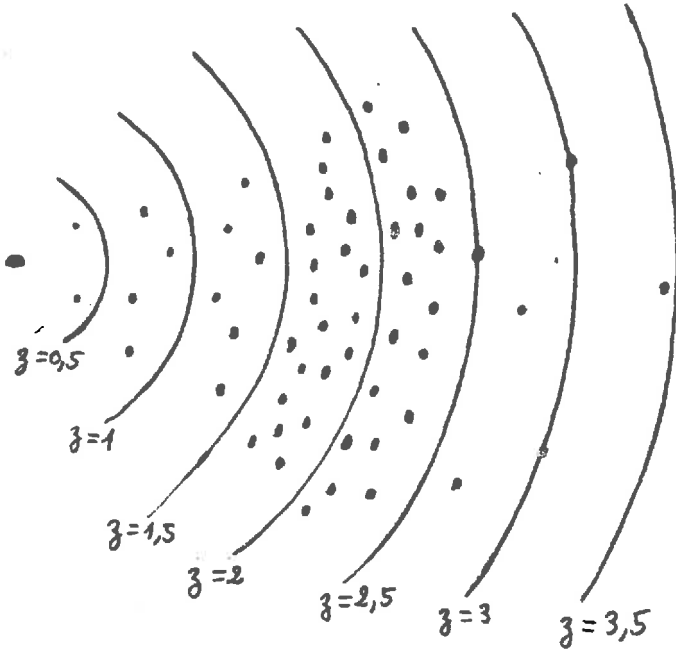


FIGURE 6

V – COMMENT DECRIRE UN QUASAR ?

1 - Modèles physiques

Compte tenu de tout ce qui a été dit auparavant, on est amené à se représenter un quasar comme une région de l'espace d'un diamètre variant de quelques parsecs à quelques dizaines de parsecs (1 pc = 3,26 années lumière) dans laquelle prennent naissance le rayonnement synchrotron et les raies d'émission, d'une masse de l'ordre de 10^5 à 10^6 masses solaires, entourée de coquilles de gaz plus froides en expansion. La température de la zone interne serait de l'ordre de $15\ 000^\circ\text{K}$.

La zone émettrice est très opaque, et ceci amène à admettre que nous ne recevons la lumière que d'une mince pellicule extérieure, ou à prendre une structure filamenteuse, ou à nuages denses flottant dans une zone plus raréfiée.

Des considérations de polarisation variable donnent à penser que les électrons relativistes responsables de l'émission synchrotron sont émis par bouffées.

Mais on ignore tout du processus d'accélération de ces électrons, c'est-à-dire, en définitive, de la source d'énergie des quasars.

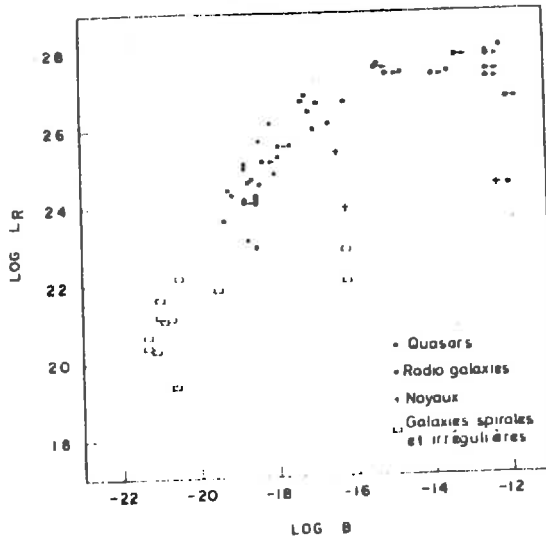


FIGURE 7

(d'après BURBIDGE : «Quasi stellar objects», p. 183)

2 - Sources d'énergie possibles

Le problème est donc le suivant : où trouver $10^{61}/10^{63}$ ergs confinés dans un diamètre de quelques années lumière, et à écouler en 10^6 ans ? Aucune théorie n'est satisfaisante pour l'instant.

a) Théories stellaires

Ce sont celles qui supposent que les quasars sont formés d'étoiles plus ou moins particulières responsables de la production de l'énergie.

. Supernovae

Une supernova libère 10^{50} ergs environ, il faudrait donc 10^{12} supernovae pour alimenter un quasar, c'est-à-dire toute une galaxie géante de supernovae, phénomène bien peu probable. Notons que la luminosité de 3C 48 s'expliquerait en considérant une galaxie où exploseraient 10 supernovae par an, contre une par siècle dans une galaxie normale.

. Effondrement d'étoiles supermassives

On a supposé que dans un noyau galactique, la densité numérique en étoiles était si élevée que des collisions fréquentes amenaient à la création de «super étoiles» de 30 à 50 masses solaires, instables et évoluant immédiatement en supernovae, au rythme de 5 à 10 par an. Des variantes font intervenir un champ magnétique. Il est nécessaire de faire exploser au moins 10^8 étoiles de 50 masses solaires en 10^6 années. Cela fait beaucoup pour un noyau, mais n'est pas impossible.

. Collisions stellaires

On suppose que dans le noyau galactique la densité est de 10^{11} étoiles par parsec cube, que les vitesses relatives sont de l'ordre de 10^4 km/s. Alors chaque collision peut libérer 10^{51} ergs par libération de l'énergie cinétique. On a donc besoin de 10^{10} collisions au moins, ce qui fait, encore, beaucoup d'étoiles à trouver puisqu'une galaxie elliptique supergéante ne contient que 10^{12} étoiles environ. Le plus grave, c'est la vie très brève de ce processus : 10^3 ans, le fait que la statistique des variations des quasars s'accorde difficilement d'une origine aléatoire des « éclairs » élémentaires produisant ces variations, et que le diamètre linéaire de certains quasars est trop faible pour contenir tant d'étoiles individualisées.

b) Théories exotiques

Ce sont celles faisant intervenir des états de la matière inconnus jusqu'ici.

. Etoile supermassive

Il s'agirait d'un objet d'une masse de l'ordre de 10^8 masses solaires. Ce modèle a de graves difficultés tant au point de vue rayonnement (beaucoup trop d'émission dans le visible par rapport au domaine radio) qu'au point de vue mécanique (instabilité inévitable, à moins de faire intervenir des rotations ou champs magnétiques ad hoc).

Une étude complète reste à faire.

. Effondrement gravitationnel

Un objet très massif et de petit diamètre, selon la Relativité Générale, s'effondre sur lui-même jusqu'à ce que son rayon apparent atteigne, en un temps infini, le « rayon de Schwarzschild » de la masse en question. Au cours de cette contraction, l'énergie gravitationnelle de l'objet est rayonnée sous forme électromagnétique. Pour le Soleil, le rayon de Schwarzschild est de 2,9 km, la densité atteinte, alors, de 2.10^{16} g/cm³. Pour une masse de 3.10^{12} masses solaires, le rayon de Schwarzschild est de une année lumière.

En fait, l'énergie rayonnée n'est que de peu supérieure à celle délivrée par une « combustion » thermonucléaire.

Le plus grave est encore que cette explication coupe totalement les quasars des radio-galaxies, et qu'il faut trouver une autre explication pour celles-ci, puisqu'elles ont les mêmes exigences énergétiques.

. Etats nouveaux de la matière

Dans la ligne des idées d'Ambartsumian, on a supposé que l'on trouvait au cœur des quasars une hypothétique matière originelle, pré-galactique, dont l'explosion libérerait des quantités énormes d'énergie. Ou bien qu'on assistait à la création de matière en cet endroit. Ou encore que les quasars étaient des mini-univers en expansion, des retardataires ayant manqué le train lors du « Big Bang » originel.

Toutes ces théories ont de grosses difficultés pour expliquer la composition chimique normale des quasars.

. Annihilation matière/antimatière

C'est encore une possibilité attrayante, mais qui pose de gros problèmes si l'antimatière existe dans l'Univers : lors du Big Bang, comment a-t-elle été séparée de la matière ? L'hypothèse d'un Univers symétrique cadre fort mal avec l'existence du rayonnement cosmologique à 3° K.

Pour Cyg A par exemple, on a fait les calculs, et on arrive à prendre un champ magnétique très élevé de 10^{-2} gauss, ce qui fait passer la quantité d'énergie nécessaire à 10^{64} ergs pour 3C 295 par exemple, et alors là l'annihilation ne suffit plus... De longs développements théoriques sont encore à prévoir...

. Intervention des quarks

Ce ne sont pas des extraterrestres mais des particules hypothétiques, au nombre de trois, qui seraient les constituants ultimes des mésons et des baryons, particules jusqu'ici élémentaires. On envisage donc un objet supermassif de quarks en expansion lente, et la dégradation des quarks en nucléons (constituants des atomes) donne une forte production d'électrons positifs et négatifs, de rayons γ et de neutrinos.

Le problème est très difficile à traiter tant que l'on n'a pas réussi à trouver une théorie mariant harmonieusement la Relativité Générale et la Mécanique Quantique, celles-ci s'ignorant totalement pour l'instant.

. Particules de masse négative

Rejetées jusqu'ici pour des motifs de «plausibilité», donc sur la foi d'une croyance plus que d'une observation physique, elles sont introduites par certains. En faisant intervenir une énergie négative, il est possible de tirer autant d'énergie W qu'on le désire de n'importe quelle source d'énergie positive W_0 classique, comme il est aisé de le voir ; on peut toujours écrire en effet $W = W_0 - (W_0 - W)$. On a donc, de l'énergie W_0 extrait l'énergie W qui lui est éventuellement supérieure, l'énergie restante étant $W_0 - W$, éventuellement négative...

VII - CONCLUSION

La tendance actuelle semble être une tendance «raisonnable» : les quasars sont des phénomènes se produisant dans les noyaux de certaines galaxies, et ne représentent que l'exaspération de cataclysmes déjà connus dans les galaxies de Seyfert et les galaxies N.

On butte toujours, toutefois, sur la question de la source d'énergie, c'est-à-dire du mécanisme d'accélération des électrons relativistes, et l'activité des théoriciens est fiévreuse dans ce domaine. Peut-on conserver des mécanismes assez classiques, ou va-t-on devoir faire intervenir de nouvelles lois physiques ?

L'atmosphère de la communauté astronomique rappelle un peu celle des années 20, lorsqu'on ignorait si les nébuleuses étaient ou non des objets extragalactiques. Articles et contre-articles se succèdent à un rythme effréné, chaque nouvelle observation est analysée fiévreusement ; car c'est bien là qu'est la plus grande difficulté : observer ces objets si faibles et si lointains qui aideront peut-être à tourner une nouvelle page du livre de la connaissance.

Bibliographie sommaire :

P. Véron - « Les Quasars » - Que sais-je ? n° 1267

J. Demaret - « L'énigme des objets Quasi-Stellaires »

Revue des questions scientifiques 140 pp. 453-477

141 pp. 73- 88

258-284

418-436

513-537

LA MATIERE DANS L'UNIVERS

Conférence de M. R. GARNIER, Ingénieur C.N.R.S.

(7 janvier 1978)

I – INTRODUCTION

Avant de parler de la matière dans l'Univers, il convient d'abord de jeter un coup d'œil sur celle qui nous est familière (ou que nous croyons nous être familière) parce qu'elle nous entoure et que nous la rencontrons à chaque instant.

Nous venons de parler de matière, mais avant de voir comment elle est constituée et d'en étudier le comportement dans l'Univers, peut-être faudrait-il d'abord la définir et nous poser cette question élémentaire : « Au fait, qu'est-ce que la matière ? ». Nous ne sommes pas ici en terminale philo, aussi laisserons-nous les potaches disserter sur le thème « esprit et matière » et nous répondrons à notre question par un euphémisme emprunté au dictionnaire Larousse : « La matière est ce dont sont faites les choses ».

II – CONDITIONS PHYSIQUES SUR TERRE ET DANS L'UNIVERS

Comme chacun le sait, une même quantité de matière peut se trouver dans des états physiques différents suivant les conditions auxquelles elle est soumise.

Considérons tout simplement de l'eau. Si nous la refroidissons, elle se transforme en glace dès que sa température atteint 0°C . Si au contraire nous la chauffons, elle bout à 100°C en se transformant en vapeur. L'aspect de l'eau dépend donc de sa température. Pour parler comme les physiciens, nous dirons que l'eau se trouve en phase solide, liquide ou gazeuse suivant la valeur du paramètre physique appelé température.

Si maintenant, nous sommes assez farfelus pour aller nous faire cuire un œuf dur au sommet de l'Everest, nous aurons quelques ennuis, car si la glace que nous chaufferons se transformera bien en eau, par contre l'eau ainsi obtenue bouillira à une température de l'ordre de 71°C et en fait d'œuf dur, nous devons nous contenter d'un œuf mollet ! Ainsi donc d'eau bout à 100°C à Lyon et à 71°C au sommet de l'Everest, alors pourquoi ? Tout simplement parce que la pression atmosphérique est plus faible sur l'Everest que sur la place Bellecour. En d'autres termes, l'état physique de l'eau dépend aussi du paramètre physique appelé pression.

En résumé, l'état physique macroscopique de la matière dépend de deux paramètres : température et pression. La branche de la physique qui traite de cette question s'appelle la thermodynamique et les lois qui la régissent sont aujourd'hui bien connues.

Il est clair, d'après ce que nous venons de dire, que l'état physique de la matière constituant l'Univers dépend des conditions physiques qui règnent dans tel ou tel canton de l'Univers.

On a établi en thermodynamique que l'échelle des températures est bornée vers le bas à -273°C qu'on appelle le zéro absolu et que par contre, elle est illimitée vers le haut. Sur notre planète Terre, les températures que nous cotoyons se situent à l'intérieur d'une gamme dont la limite inférieure avoisine le zéro absolu dans quelques laboratoires cryogéniques mais dont la borne supérieure n'excède pas $2\,000^{\circ}\text{C}$ dans les fours à arc ou à induction. Il n'en est évidemment ainsi dans l'Univers que pour des planètes présentant quelques analogies avec la Terre ; mais nous savons que la plus grande partie ou mieux la presque totalité de l'Univers est constituée non de planètes, mais d'étoiles éparpillées ça et là, baignant dans une matière interstellaire extrêmement diluée. Disons tout de suite que la température des atomes qui errent

dans l'espace intersidéral n'excède pas quelques degrés absolus, mais que le centre du Soleil se trouve à une quinzaine de millions de degrés et que le cœur des étoiles à neutrons est à une température de plusieurs milliards de degrés. Ces quelques ordres de grandeur nous font tout de suite saisir combien les conditions physiques de température auxquelles nous sommes accoutumés sont particulières et nous n'étonnerons personne en disant que la matière familière qui nous entoure ne constitue qu'un cas très particulier au sein d'une matière beaucoup plus générale.

Avant de poursuivre plus loin notre exploration de la matière dans l'Univers, il est bon de dire quelques mots de la structure fine de cette matière, en d'autres termes de parler des atomes qui la constituent.

III — L'ATOME — EXCITATION ET IONISATION

Comme chacun le sait, la matière n'est pas divisible à l'infini, elle est constituée d'atomes que nous définirons comme étant la plus petite partie d'un corps simple qu'il soit possible d'isoler. Un atome est en quelque sorte le quantum d'un corps simple ; si par exemple, nous étions assez habiles pour casser en quatre parties égales un atome d'oxygène, nous obtiendrions quatre atomes d'hélium, élément qui n'a plus rien à voir, tant par ses propriétés physiques que chimiques avec l'oxygène initial.

Mais un atome constitue encore un petit monde complexe qu'il convient que nous visitions pour la simple raison que l'atome explique l'étoile et la matière interstellaire. Transformons nous donc en ultra-lilliputiens et effectuons une petite excursion à l'intérieur du plus simple des atomes que nous fournit la nature, celui de l'hydrogène. Nous y trouverons deux parties, à savoir : un noyau lourd chargé positivement, celui qu'on appelle un proton, et un électron négatif, 1836 fois moins massif que le proton. La charge négative de l'électron équilibre la charge positive du proton de telle façon que l'atome soit électriquement neutre. Si l'électron était immobile, l'attraction de Coulomb le ferait tomber sur le noyau et les charges électriques se neutralisant, l'atome d'hydrogène aurait cessé d'exister. Pour maintenir l'électron éloigné du noyau, il faut imaginer que l'électron tourne autour du noyau comme la Terre autour du Soleil, la force centrifuge équilibrant la force de Coulomb de la même façon que la force centrifuge due à la rotation de la Terre autour du Soleil équilibre l'attraction newtonnienne exercée par le Soleil sur la Terre. Mais la comparaison de l'atome d'hydrogène à un système solaire en miniature (J. Perrin) s'arrête là. En effet, l'électron chargé négativement, en rotation autour du proton est assimilable à un courant électrique et la théorie de Maxwell nous apprend qu'il rayonne de l'énergie sous forme électromagnétique. Cette énergie qu'il dissipe autour de lui, l'électron ne peut l'emprunter qu'à son énergie mécanique cinétique et potentielle qui par conséquent diminue d'une quantité égale à celle qui a été rayonnée. L'électron tombe donc en spirale sur le noyau où il neutralise la charge du proton. Bref, le bilan de ce mécanisme est qu'au bout d'un temps très court, notre atome d'hydrogène a cessé d'exister. Cependant, l'expérience montre que l'atome d'hydrogène est stable, ce qui est incompatible avec notre description sommaire. Pour lever cette incompatibilité, sans entrer dans les détails de la mécanique ondulatoire, nous admettrons qu'il existe des orbites privilégiées que nous appellerons orbites permises, sur lesquelles l'électron peut tourner indéfiniment sans rayonner d'énergie. L'atome d'hydrogène, moyennant cette hypothèse due à Bohr, est stable. En général, l'électron se trouve sur l'orbite permise la plus proche du noyau ; on dit alors que l'atome est dans son état fondamental.

Si nous considérons maintenant des atomes plus complexes que celui de l'hydrogène, les mécanismes sont analogues ; nous aurons toujours un noyau massif chargé positivement, autour duquel gravitent non plus un seul mais n électrons. Comme dans le cas de l'hydrogène, ces électrons ne rayonnent pas d'énergie lorsqu'ils se trouvent sur des orbites permises. Afin d'équilibrer la charge négative des n électrons, le noyau est constitué de n protons positifs semblables au noyau d'hydrogène et d'un certain nombre de neutrons, particules ayant une

masse voisine de celle du proton mais sans charge électrique. Le nombre n des protons d'un noyau caractérise l'élément, par exemple le noyau d'hélium ou hélium est constitué de deux protons et de deux neutrons, celui de l'oxygène ordinaire de 8 protons et de 8 neutrons.

L'atome tel que nous l'avons sommairement décrit est un mécanisme très fragile qui peut être détraqué s'il reçoit un choc un peu brutal. Considérons donc un atome à l'état fondamental et imaginons que par un procédé quelconque, on fournisse un surcroît d'énergie à l'un de ses électrons. Ce supplément d'énergie se traduit pour l'électron en question par une augmentation de sa vitesse, donc de la force centrifuge à laquelle il est soumis. Il en résulte qu'il ne peut pas demeurer plus longtemps sur son orbite fondamentale et il va sauter sur une orbite plus éloignée du noyau que l'orbite fondamentale ; mais toutefois, cette nouvelle orbite de plus grande énergie devra être une orbite permise. On dit alors que l'atome se trouve dans un état excité. Dès que la cause de l'excitation cesse, l'électron retombe sur son orbite fondamentale en restituant le surcroît d'énergie W qu'il avait acquis lors de l'excitation sous forme d'un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire d'une lumière dont la fréquence ν est donnée par la relation de Planck $W = h\nu$, h désignant la constante de Planck.

Si maintenant, nous fournissons assez d'énergie à notre électron, il sautera sur une orbite tellement éloignée du noyau que la force de Coulomb cessera de s'exercer sur lui. L'atome sera donc cassé en deux parties : un électron devenu libre et un atome incomplet chargé positivement puisqu'il lui manque un électron et qu'on appelle un ion. On dit que l'atome a été ionisé. Dès que la cause d'ionisation cesse, l'ion positif capte un électron et redevient un atome neutre.

Les mécanismes qui provoquent l'excitation ou l'ionisation des atomes sont variés. Nous ne citerons que ceux qui présentent un intérêt astrophysique. Ces chocs peuvent être dus :

a) à l'irruption de particules électrisées rapides dans la couronne électronique entourant le noyau atomique ;

b) à l'irradiation de l'atome par un rayonnement électromagnétique de très haute énergie (rayons γ , X ou UV de très courtes longueurs d'onde) ;

c) à l'agitation thermique lorsque l'atome est chauffé par un processus quelconque.

IV – LES PLASMAS EN ASTROPHYSIQUE

Nous avons déjà dit que schématiquement, dans l'Univers, on rencontre la matière sous deux formes :

a) soit agglomérée en grosses masses portées à très haute température constituant les étoiles,

b) soit sous forme de particules gazeuses et de poussières à très basse température dispersées entre les étoiles et formant le milieu intersidéral que nous avons baptisé matière interstellaire.

Considérons d'abord notre Soleil qui n'est en fait qu'une étoile naine parmi tant d'autres. Si par temps de brouillard, il nous apparaît comme un disque circulaire, par contre lorsque ce disque est masqué par la Lune, nous pouvons voir alors une extension de la photosphère de forme plus ou moins complexe qu'on appelle la couronne solaire. L'étude spectrographique de cette couronne nous révèle que sa température atteint $1,6 \cdot 10^6$ K et que la pression y est très basse, de l'ordre des bons vides réalisés au laboratoire. On conçoit donc que tous les atomes constituant ce milieu soient ionisés par suite de l'agitation thermique résultat de la température élevée à laquelle est portée la couronne. Les atomes de calcium par exemple, y sont dépouillés de 15 de leurs 20 électrons, ceux du nickel de 16 de leurs 28 électrons. La couronne solaire est donc constituée d'un mélange d'électrons et d'ions et comme la pression du milieu est extrêmement faible, les distances séparant ses diverses particules sont très grandes, de

sorte que les les électrons et les ions issus de la destruction des édifices atomiques errent au hasard dans la couronne, un peu comme les particules d'un gaz sont agitées par le mouvement brownien. La matière se trouve donc dans la couronne dans un état qu'il n'est pas possible d'obtenir sur Terre ; on dit qu'il s'agit d'un plasma. Si maintenant quelqu'un vous posait la question classique « A quoi sert l'astronomie ? », vous pourriez déjà répondre : « A étudier le comportement de la matière dans des conditions physiques irréalisables sur Terre ».

Tournons-nous maintenant vers le milieu interstellaire. Pendant très longtemps, on a cru que l'espace qui sépare les étoiles était vide ; on sait aujourd'hui qu'il n'en est rien et qu'il est occupé par une matière très diluée certes mais que compte tenu des distances interstellaires constitue une fraction très importante de la masse totale de l'Univers. La répartition de cette matière interstellaire dans l'espace est très loin d'être homogène. Il existe dans l'univers de vastes nuages gazeux aux formes irrégulières qui peuvent revêtir trois aspects selon qu'il existe ou non des étoiles au voisinage immédiat du nuage qu'on appelle une nébuleuse.

a) Si, au voisinage ou à l'intérieur d'une nébuleuse, se trouve une étoile très chaude, de type O, on observe alors des phénomènes de luminescence et un spectre analogue à celui des nébuleuses planétaires. On est en présence d'une nébuleuse diffuse.

b) Si la température de la photosphère des étoiles voisines est insuffisante, les émissions ultraviolettes de ces étoiles sont insuffisantes pour exciter la luminescence ; la nébuleuse n'émet pas de lumière propre et se borne à réfléchir la lumière émise par l'étoile, il s'agit alors d'une nébuleuse par réflexion. L'étude polarimétrique montre que ces nuages sont formés de petits grains de $0,3 \mu$ de diamètre.

c) S'il n'y a pas d'étoile au voisinage de la nébuleuse, elle se présente sous forme d'un nuage noir qui masque les astres situés derrière, on est en présence d'une nébuleuse obscure.

La masse de ces nébuleuses est énorme et peut atteindre plusieurs centaines de milliers de masses solaires ; c'est le berceau où prennent naissance les étoiles par suite de la contraction locale des nébuleuses. En tout état de cause, la densité moyenne de la matière interstellaire est extrêmement faible puisqu'un cube de 1000 km d'arête n'en contiendrait que quelques grammes.

Quelles sont donc les conditions physiques qui outre une pression plus faible encore que celle correspondant aux meilleurs vides que nous sachions réaliser au laboratoire conditionnent le milieu ? L'espace intersidéral, généralement peu dense est parcouru en tout sens par des rayonnements électromagnétiques issus des étoiles bien sûr (formation des nébuleuses diffuses), mais aussi de toute la matière constituant l'Univers. De plus, il est parcouru par tout un grouillement de corpuscules les plus divers qui nous arrive sur Terre sous la forme du rayonnement cosmique ; parmi les particules qui constituent ce rayonnement corpusculaire, citons les mésons, les protons, les corpuscules alpha (noyaux d'hélium), certains noyaux encore plus lourds et même certaines particules étranges comme l'anti-électron (positon). Quelques-unes de ces particules n'ont d'ailleurs qu'une durée de vie très courte.

On conçoit donc que bien qu'il existe des nuages d'hydrogène neutre, une partie importante de la matière interstellaire mutilée par les rayonnements énergétiques des étoiles chaudes et par le rayonnement cosmique se trouve elle aussi dans un état ionisé, constituant tout comme la couronne solaire un gaz dégénéré, c'est-à-dire un plasma mais qui, à la différence du plasma stellaire, se trouve à une température n'excédant pas quelques degrés absolus.

En résumé, presque partout où dans l'Univers, la matière se rencontre sous des pressions extrêmement faibles, c'est sa forme ionisée qui domine, constituant ainsi une sorte de quatrième état physique : le plasma.

V — LA MATIERE DEGENEREE

Bien que les plasmas stellaires et interstellaires soient à des températures très différentes et que les processus d'ionisation n'y soient pas les mêmes, ils ont cependant un point commun : la matière ionisée y est dans tous les cas soumise à une pression extrêmement faible. Il existe cependant dans l'Univers des endroits où la matière ionisée est écrasée par des pressions extrêmement grandes. Nous voulons parler de l'intérieur des étoiles.

Considérons encore une fois notre voisin le Soleil. C'est un globe gazeux ayant un rayon de 696 000 km. La seule région du Soleil qui soit accessible à l'observation est sa couche la plus externe d'où nous parvient sa lumière : la photosphère dont la couronne ne constitue qu'une très faible partie. L'étude des régions internes du Soleil desquelles nous ne recevons aucun rayonnement électromagnétique ou corpusculaire ne peut être abordée que par des moyens théoriques basés sur des observations de la photosphère. Le Soleil est gazeux, avons-nous dit ; alors le gaz solaire doit être, en vertu des lois de l'hydrostatique, de plus en plus comprimé, au fur et à mesure que l'on se rapproche du centre. Si l'on se donne les lois de variation de la densité de la matière solaire et de sa température en fonction de la distance au centre, il est alors possible de calculer la pression et la température dans les régions centrales du Soleil et les astronomes spécialistes de la structure interne des étoiles aboutissent à des chiffres fantastiques : la pression s'élevé à quelques 125 milliards d'atmosphères, la température atteignant pour son compte 15 millions de degrés environ. Dans de telles conditions thermiques, les atomes sont complètement dépouillés de leur cortège électronique de sorte qu'au centre du Soleil, noyaux atomiques et électrons se comportent comme des particules individualisées. Nous trouvons donc un état de la matière qui par certains côtés rappelle le plasma, mais avec la différence importante que la pression est maintenant énorme. Dans le cas du plasma, la pression extrêmement faible permettait aux particules d'évoluer librement, un peu comme les particules d'un gaz. Il est clair que dans les profondeurs de la masse solaire, les forces de pression les contraignent à se rapprocher les unes des autres malgré la présence des forces répulsives de Coulomb, de telle façon qu'elles sont tassées les unes contre les autres. Le milieu possède donc par certains aspects des propriétés qui le rapprocheraient d'un gaz et par d'autres aspects des propriétés qui en font un quasi-solide. Les noyaux, dépouillés de leurs couronnes électroniques qui normalement leur permettraient de se maintenir à une distance convenable de leurs voisins sont comprimés jusqu'à se toucher. Si l'on se rappelle que la masse de la matière est presque toute entière concentrée dans le noyau, la densité du quasi-solide atteint la valeur suprenante de 100, c'est-à-dire que la masse d'un litre de matière solaire au voisinage du centre est de 100 kg environ. Les atomes étant à ce stade complètement décomposés, dire qu'au centre du Soleil on trouverait tel ou tel élément n'a plus de sens ; dans cette région, il n'a plus guère qu'une «purée» de noyaux atomiques et d'électrons. On dit que la matière a atteint un état dégénéré.

Le cas du Soleil est celui de la majorité des étoiles. A l'intérieur de toutes les étoiles, la matière plus ou moins ionisée suivant la température et plus ou moins comprimée, est réduite à un degré variable de dégénération. Sans vouloir entrer dans les détails de l'évolution stellaire, disons que les étoiles naissent, vivent et meurent. Une étoile meurt lorsqu'elle a épuisé tout son combustible nucléaire. Les forces gravitationnelles n'étant plus alors équilibrées, par un apport d'énergie en provenance de la région centrale de l'étoile, il s'ensuit que l'étoile commence à se contracter. Cette contraction fournit l'énergie nécessaire à son agonie ; mais toutes les étoiles ne terminent pas leur existence de la même façon suivant qu'elles sont plus ou moins massives.

Si la masse de l'étoile est inférieure à 1,5 masses solaires, elle termine sa vie sous forme de naine blanche. Un cas typique de naine blanche est fourni par le compagnon obscur de Sirius (Sirius B). Cette étoile est 8 millions de fois plus petite que le Soleil mais son intensité lumineuse est 4 fois plus grande, c'est dire que cette minuscule étoile est chauffée à blanc. L'effondrement des couches superficielles a conféré aux couches inférieures la masse spécifique prodigieuse de 170 tonnes par litre.

Cependant, ce degré de dégénération n'est pas un record ; il est en effet battu de loin dans les étoiles à neutrons. En effet, si la masse de l'étoile en contraction est comprise entre 1,5 et 2 masses solaires, la contraction dépasse le stade de la matière dégénérée. La masse spécifique de la matière atteignant 100 milliards de tonnes au litre, les électrons se fondent au noyau atomique, pour donner un gaz de neutrons, d'où le nom d'étoiles à neutrons qu'ont reçu ces étoiles. Nous ne sommes pas encore dans le domaine de la science-fiction car de telles étoiles ont été observées ; ce sont les pulsars dont le diamètre est de l'ordre d'une quinzaine de kilomètres.

Si la masse de l'étoile agonisante dépasse deux masses solaires, il n'existe plus d'état de la matière qui pourrait limiter la contraction qui se poursuit donc indéfiniment. La gravité à la surface de tels astres est si énorme que leur rayonnement, conformément à la relativité généralisée y serait incurvé jusqu'à s'enrouler sur lui-même au point qu'aucun rayonnement ne pourrait s'échapper de l'étoile. L'étoile devenue à jamais invisible s'est transformée en trou noir ou collapsar. La masse spécifique au centre de tels objets atteindrait 5000 milliards de tonnes au litre de sorte que les neutrons à leur tour cesseraient d'exister pour se transformer en hyperons. Mais là, nous entrons dans le domaine de la spéculation.

VI — EN CONCLUSION

Les quelques chiffres que nous avons donnés nous font rêver. Eh bien ! nous allons continuer de rêver. Le spectrographe nous enseigne que le Soleil, ainsi que les étoiles de notre galaxie sont composés d'atomes identiques à ceux qui nous entourent sur la Terre. Mais notre galaxie n'est pas isolée et les grands télescopes nous révèlent un poudroïement d'autres galaxies. D'autre part, le rayonnement cosmique nous a révélé de son côté l'existence d'un anti-électron. De plus, les physiciens nucléaires ont montré que le noyau atomique, loin d'être composé de deux particules fondamentales proton et neutron, est construit au moyen de matériaux plus nombreux et peu à peu, la liste des particules élémentaires s'est allongée. La liste des anti-particules s'est aussi allongée ; on a découvert l'antimatière, l'antiproton (proton électrisé négativement), l'antineutron, etc... D'autre part, ces artistes que sont les physiciens nucléaires ont réussi au laboratoire à bâtir des atomes originaux où les mésons ont remplacé les électrons, où les positons voire même les hyperons se sont substitués aux protons. Alors, posons-nous la question : « La nature serait-elle moins astucieuse que l'homme ? ». Et par suite n'y aurait-il pas quelque part dans l'immense univers, quelque monde fait d'atomes différents des nôtres, de ceux que nous aurions tendance à qualifier de façon égocentrique peut-être, d'atomes normaux ? Pourquoi n'existerait-il pas par exemple quelque part une antigalaxie faite d'antimatière où des électrons positifs graviteraient autour d'antinoyaux faits d'antiprotons négatifs et d'antineutrons ? Qui pourrait dire que telle galaxie lointaine n'est pas un antimonde ? Nous n'en serions même pas informés par l'analyse spectrale, puisque faite d'atomes symétriques des nôtres, cette galaxie nous donnerait le même spectre que nos galaxies familières.

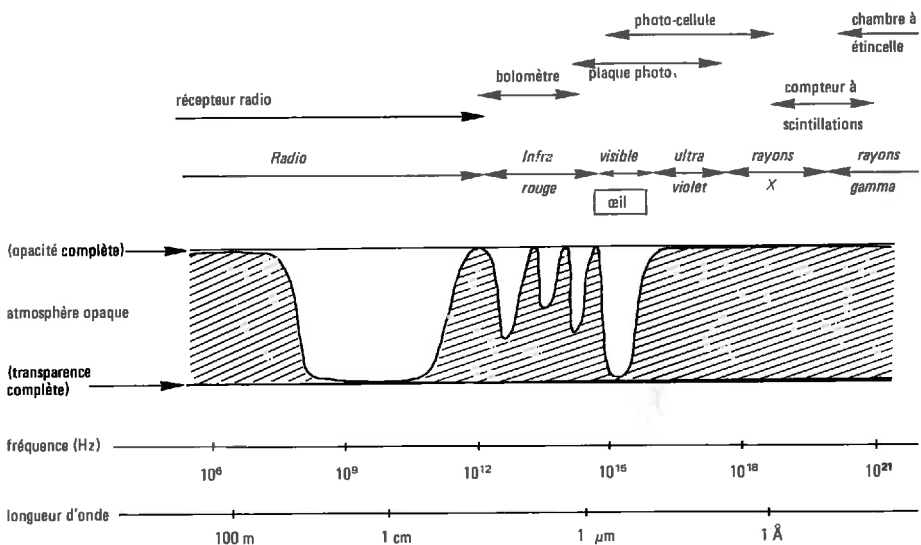
Alors peut-être vous poserez-vous la question : « Pourquoi la matière terrestre est-elle construite de particules plutôt que d'antiparticules ? É. Nous n'en savons rien ; aussi nous répondrons comme un gosse (parce qu'il en est ainsi) ».

LA RECHERCHE SPATIALE et la CONNAISSANCE DE NOTRE GALAXIE

Conférence de Monsieur SAUTE - 18 novembre 1978

Supposons qu'il y a cinquante ans environ, un habitant de la planète Terre ait pu entrer en communication avec un habitant de Mars : il suffit qu'un tel être existe pour la durée de cette introduction ! Durant cet échange d'informations, ils constatent que l'apparence du ciel est fort différente pour chacun d'eux. Le Terrien voit en particulier un ciel bien moins riche d'objets que le Martien. Nous savons que l'atmosphère de Mars est pratiquement inexistante et le Martien apprend au Terrien que le domaine de sensibilité spectrale de son «œil» est très étendu, depuis les rayons X jusqu'au domaine radio. Quel être extraordinaire ! Ce Terrien se sent quasiment aveugle...

C'est en 1932 que l'homme (on redescend maintenant sur Terre), dépourvu de tout organe sensible au rayonnement radioélectrique, a construit un récepteur capable de recevoir ce rayonnement. L'atmosphère terrestre est en effet transparente au rayonnement visible, celui que détecte notre œil, et à une partie du rayonnement radio. La figure ci-dessous montre quelle est l'importance relative de ces deux fenêtres sur l'espace extérieur, bien faible en vérité. Le domaine visible va de 4 000 Å à 7 600 Å et le domaine radio du millimètre à 15 m environ.



Avec l'avènement des radiotélescopes, un grand nombre d'objets nouveaux furent découverts : les radiosources, quelquefois ponctuelles, souvent à diamètre apparent sensible, donc étendues. Un problème très important était l'identification éventuelle de ces radiosources avec des objets visibles déjà inventoriés. La construction de récepteurs sensibles à l'infrarouge permit, dès les années 60, d'étendre notre connaissance du ciel dans ce domaine spectral pour lequel l'atmosphère n'est ni complètement absorbante, ni complètement transparente.

Le domaine d'investigations s'est élargi considérablement avec l'envoi de ballons, de fusées et enfin de satellites artificiels. La recherche spatiale a débuté il y a en réalité trois décades lorsque l'envoi de fusées permit de photographier dans le spectre de la chromosphère

solaire (mince cadre de l'atmosphère solaire situé immédiatement au-dessus du disque visible ou photosphère) des raies situées dans l'ultraviolet lointain de $1\ 200\ \text{\AA}$ à $900\ \text{\AA}$ environ et dues à l'atome d'hydrogène. Ces raies font d'ailleurs partie du spectre éclair observable lors d'une éclipse de soleil. Il ne peut être question ici de donner les noms des satellites astronomiques et leur description, leur contenu. Retenons simplement que nombre de récepteurs sensibles au rayonnement ultraviolet, infrarouge et X ont été embarqués à bord de ces vaisseaux pour analyser le rayonnement reçu hors atmosphère.

On admet très généralement que plus les étoiles sont chaudes, plus leur rayonnement est important dans les courtes longueurs d'onde. C'est la loi du corps noir. Par exemple, une étoile dont la température de surface est $5\ 000^\circ\text{K}$ rayonne le plus d'énergie à une longueur d'onde $\lambda = 6\ 000\ \text{\AA}$. Lorsque $T = 1\ 000^\circ\text{K}$, cette longueur d'onde devient $30\ 000\ \text{\AA}$ ou $30\ \mu$, dans l'infrarouge lointain et pour $T = 30\ 000^\circ\text{K}$, on obtient $1\ 000\ \text{\AA}$, dans l'UV lointain. Ainsi apparaît l'intérêt de pouvoir observer les étoiles chaudes dans l'UV et les étoiles froides dans l'infrarouge.

On peut signaler par exemple le satellite «Copernicus», OAO3, lancé en 1972 et emportant un télescope ultraviolet de 82 cm de diamètre. En 1973 fut publié un catalogue de 5 068 étoiles visibles essentiellement dans l'UV. Il a été en outre possible de détecter la présence d'atomes et d'ions dans le milieu interstellaire grâce aux raies caractéristiques de ces éléments dans l'UV ; ce sont par exemple : C, C^+ , N, N^+ , N^{++} , O, Mg, Mg^+ , Si^+ , Si^{++} , Si^{+++} , S^+ , S^{++} , S^{+++} , etc... On peut ainsi arriver à déterminer les abondances ou quantités relatives de ces éléments dans l'espace interstellaire et obtenir des renseignements nouveaux sur leur genèse ainsi que sur l'évolution de la Galaxie.

Dans le domaine des rayons X, le Soleil est connu, depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, comme une source X, relativement faible. Les recherches des années 1960 à 70 ont montré qu'il existait des sources X extrêmement puissantes. Parmi elles, on peut citer la source Scorpion X1. On peut considérer trois groupes de sources X :

- les étoiles à rayons X
- les restes de supernovae

et les sources extragalactiques que nous laisserons de côté pour cet exposé. Peu d'étoiles à rayons X ont pu, jusqu'à maintenant, être associées à des sources du domaine visible. Lorsque cela a été possible, l'identification à un objet visible a montré qu'il s'agissait le plus souvent d'une étoile double, dont l'une des composantes, très compacte, serait une étoile à neutrons, étoile dont l'existence a été prédite théoriquement depuis les années 1930. Une étoile à neutrons serait un astre écrasé sur lui-même, d'une masse de quelques dixièmes de masse solaire à 2,5 masses solaires, mais dont le diamètre n'excéderait pas une vingtaine de kilomètres. On voit quel intérêt nouveau présente l'étude des étoiles binaires pour la compréhension de l'évolution d'une étoile avec le temps qui est un problème des plus ardu.

Revenons à la partie infrarouge du spectre électromagnétique. L'espace interstellaire n'est évidemment pas vide. Il y a en particulier des nuages de poussières répartis irrégulièrement dans l'espace.

Dans le cas d'une étoile environnée de poussière (dite alors circumstellaire), le rayonnement émis par l'étoile, surtout dans le visible et l'UV, a pour effet de chauffer cette poussière qui rayonnera à des températures bien moindres, donc dans l'infrarouge. On voit ainsi comment peuvent être détectés des images de matière circumstellaire et interstellaire, lorsqu'ils sont essentiellement constitués de poussière. Leur durée de vie est limitée, ce sont des objets jeunes. Outre les étoiles jeunes encore entourées de leur cocon, des étoiles vieilles sont aussi le siège de rayonnement infrarouge, témoin des violentes manifestations d'instabilité. C'est le cas de la super géante R Coronae Borealis, étoile variable d'une température de $6\ 000^\circ\text{K}$ environ, qui émet des nuages de carbone se condensant en poussières de graphite. L'observation

infrarouge a conduit à penser qu'il existe des objets dont la température ne dépasserait pas 400° à 500°K .

Le Centre de la Galaxie lui-même est entouré d'un nuage de poussière, transparent dans le proche IR mais émetteur dans le lointain IR et le domaine radio.

On ne peut terminer cette brève et partielle revue de l'Astronomie hors atmosphère, dans les domaines de longueur d'onde inaccessible à Terre, sans dire quelques mots des résultats obtenus dans le domaine des rayons γ . Il s'agit vraiment d'une Astronomie des hautes énergies. En particulier le satellite COS-B, fruit d'une collaboration d'instituts européens, explore le ciel depuis 1975, dans une bande d'énergie comprise entre 30 MeV et 10 GeV. Hormis quelques sources γ intenses extragalactiques, la majorité du rayonnement gamma provient de l'intérieur de notre Galaxie. Jusqu'en 1977, on admettait que l'origine en était l'interaction du rayonnement cosmique de haute énergie avec la matière interstellaire. Cette interprétation est en cours de révision actuellement.

On peut enfin signaler qu'un projet de grand télescope spatial de 2,40 m de diamètre, construit en collaboration par la NASA et l'Agence Spatiale Européenne, et dont le lancement était prévu initialement en 1980, devrait enrichir la moisson actuelle de données vers une meilleure compréhension de l'Univers.

Société Astronomique de Lyon
69230 — Saint-Genis-Laval

Sommaire

- 1 — Rapport moral.
- 3 — Suite de l'article paru dans le bulletin n° 13 :
« Les Quasars ».
- 8 — La matière dans l'Univers.
- 14 — La recherche spatiale et la connaissance de
notre Galaxie.

Prix : 10 F