

matière diminue; donc, si la hiérarchie se poursuivait indéfiniment, la densité de l'Univers serait quasi nulle. Cela est important, car, selon la valeur de sa densité, l'Univers est en expansion indéfinie ou, au contraire, retombe sur lui-même.

Le Soleil a une densité de l'ordre de l'unité, mais, si l'on considère cette masse dans le volume du Système solaire, la densité correspondante est très faible. La densité de la galaxie est encore inférieure, car les étoiles sont distantes. Et ainsi de suite. Pour savoir ce que devient la densité à l'infini, il faut faire un inventaire qui n'est pas terminé.

La fragmentation est le second inattendu inexplicable : à partir d'un univers homogène au moment du Big Bang, comment se fait-il que des entités -étoiles, galaxies, amas- se soient constituées? Comment ces objets de masse très particulière se sont-ils isolés? Grand mystère. Toutes les galaxies ont des masses du même ordre de grandeur ; il faut donc savoir comment ces objets se sont individualisés.

L'ÉVOLUTION DES ÊTRES STELLAIRES

Un autre sujet d'étonnement est la variabilité du monde céleste. Les étoiles, comme chacun de nous, pauvres hères, naissent, vivent et meurent. Tout évolue dans l'Univers. Évidemment, pas beaucoup à l'échelle humaine, mais, en regardant finement, les astronomes savent rendre compte de cette évolution. Ce n'est qu'à la fin des années 1930 et au milieu des années 1940 que l'on a compris pourquoi les étoiles brillaient et pourquoi elles évoluaient en épuisant leur combustible.

La durée de vie d'une étoile dépend de sa masse. Une étoile massive, par exemple dix fois la masse du Soleil, vit bien ; elle fait la fête tous les jours, elle est très lumineuse, elle rayonne beaucoup, mais ne dure pas longtemps. À l'inverse, une petite étoile, par exemple un dixième de la masse solaire, fait des économies, ne dépense pas beaucoup, n'émet pas beaucoup d'énergie, vit tristement, mais longtemps. Ces scénarios n'expliquent toutefois pas la répartition actuelle des masses des étoiles ni la fragmentation initiale. Nous sommes limités au constat de l'évolution.

Ce constat n'allait pas de soi : avant 1644, avant Descartes, le dogme était la fixité d'un monde créé par un dieu. Dans le ciel, seuls les nuages évoluaient. Dogme fort, car les contradicteurs, comme Giordano Bruno, finissaient sur le bûcher. Newton aurait pu imaginer une évolution du monde en raison de l'attraction des masses, mais, conservateur prudent,

n'osa pas franchir le pas. 1644 est la date clef. Descartes écrit que le Système solaire a dû être formé à un moment donné et évoluer. Pendant presque deux siècles, deux écoles anglaise et française se sont combattues.

L'école anglaise disait : le Système solaire a été formé par une catastrophe. Une étoile s'est approchée du Soleil, a arraché de la matière qui a constitué les planètes. La probabilité qu'une étoile passe près d'une autre dans la Galaxie est extrêmement faible, l'événement doit se produire une fois tous les 7 à 8 milliards d'années. Cela signifiait que le Système solaire est unique. Conclusion : nous sommes unique(s)!

Les Français, derrière Laplace, raisonnaient différemment : quand une étoile se forme, argumentaient-ils, la périphérie de l'étoile est un milieu plus froid où se forment les planètes. Pour une fois, les Français auront raison : pas de catastrophisme, une évolution banale, et donc nous ne sommes pas uniques : il doit y avoir des planètes autour d'autres étoiles.

Bien plus tard, une autre polémique a opposé les écoles soviétique et américaine : les Américains soutenaient qu'une planète se forme par la contraction d'une protoplanète géante ; les Soviétiques affirmaient qu'elle se constitue par accumulation de corps plus petits. La suite a donné raison aux Soviétiques : une planète se forme par agglomération de planétoïdes, de petits objets de 500 mètres de dimension en moyenne. Quand le choc de deux planétoïdes est violent, les objets se cassent et redonnent de la poussière. Quand le choc est doux, les objets fusionnent. De cette succession de divorces et de mariages sont nées les planètes du Système solaire. Là encore, selon ce raisonnement, il doit exister des planètes hors du Système solaire.

La difficulté est que l'on ne peut expérimenter. L'astronome ne peut casser la Terre en deux, tordre le plan de la Galaxie, ni augmenter la température du Soleil. Heureusement l'exploration spatiale supplée, dans une certaine mesure, à nos manques. Grâce à elle, nous voyons des objets qui sont plus gros que la Terre, d'autres plus petits, d'autres plus chauds, d'autres plus froids, certains plus denses, d'autres moins denses. Cette variation des paramètres physiques, impossible à reproduire en laboratoire, existe naturellement dans la variété des objets observés.

Ainsi le volcanisme n'est pas spécifique de la Terre, et l'on peut mesurer les paramètres sur les autres planètes pour mieux comprendre les mécanismes qui le régissent. Autre exemple, la climatologie. On sait mal modéliser les échanges océan-atmosphère et l'effet de la rotation

rapide de la Terre sur le climat. Sur Vénus, il n'y a pas d'océan, et la rotation de l'astre est lente. En étudiant Vénus, on isole les paramètres importants sur Terre.

Ce n'est pas en restant le nez au niveau des marguerites qu'on comprend les problèmes : relevons la tête, la diversité des objets de l'Univers est la richesse de demain.

Un progrès qui a été à la source de découvertes inattendues est l'observation à d'autres longueurs d'onde que le visible. Le rayonnement électromagnétique couvre un large spectre, et les informations captées dans chaque domaine de longueur d'onde sont d'égale importance. Mais nous n'avions que nos yeux pour voir, et les observations se sont, pendant des siècles, cantonnées au visible. L'histoire de notre reconstitution de l'Univers ressemble au monde perçu par un enfant qui, à la naissance, serait affublé de lunettes vertes. Il n'aurait vu que les feuilles et n'aurait pas imaginé que les arbres ont un tronc. Imaginez sa joie quand, débarrassé de ses lunettes, il verrait le bleu, le rouge, le marron, découvrirait que les feuilles s'accrochent aux branches, qu'il existe des voitures rouges.

LES QUASARS

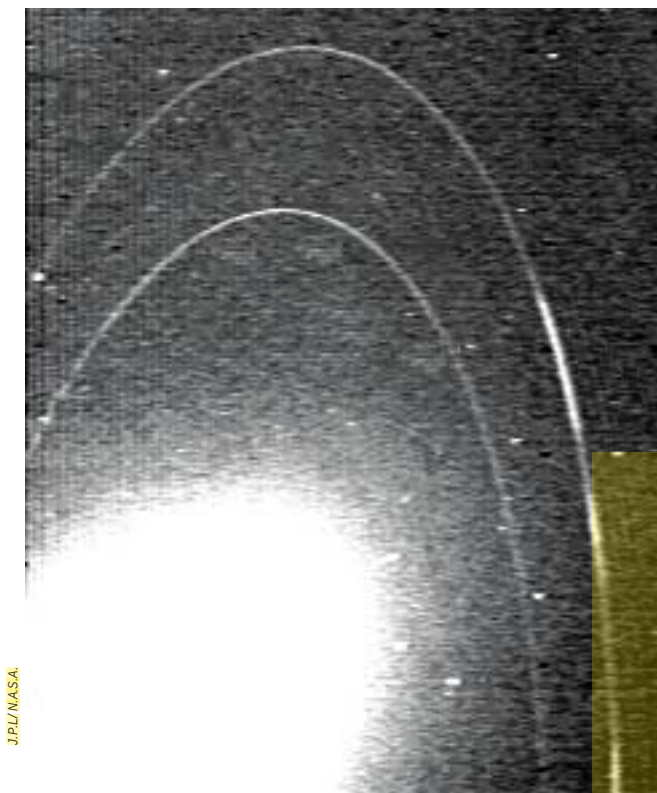
Les astronomes ont vécu cet émerveillement au cours des 20 dernières années : ils ont découvert l'Univers en rayons X, en rayons gamma, en ultraviolets, en infrarouges et vu que le visible ne rend compte que d'une partie de l'Univers. Les quasars ont été découverts par un tel élargissement de notre champ de vision.

Nombre de techniques mises en œuvre en astronomie sont des retombées des recherches militaires. Les astronomes sont de grands récupérateurs de matériel de guerre : la lunette astronomique de Galilée en est le premier exemple. De même, les Anglais, durant la Seconde Guerre mondiale, avaient remarqué que les radars chargés de détecter les avions de la *Luftwaffe* étaient troublés quand on les pointait en direction du Soleil : le Soleil est un émetteur radio.

Les astronomes ont récupéré les radars militaires et ont cartographié les sources radio de l'Univers. Certaines sources sont très violentes, très brillantes, très puissantes, mais la technique de résolution des radiosources n'était pas bonne et leur localisation imprécise. Un jour, une de ces sources est occultée par la Lune, dont on connaît la position à 14 décimales près, et l'on obtient ainsi sa position. À cet endroit, on trouve une petite source visible, de magnitude 14, et ce que les

Anglais appelaient un *quasy stellar object*, un quasar, dont l'essentiel de l'énergie est émise dans les longueurs d'onde radiométriques.

Des théories, des scénarios s'échafaudent pour expliquer la nature de ce nouvel être stellaire. La meilleure explication du moteur des quasars, c'est un immense trou noir, un Gargantua qui mange la matière qu'il attire. Ces quasars sont jeunes parce qu'ils sont loin, et que plus on regarde loin, plus on regarde dans le passé, la vitesse de la lumière étant limitée à 300 000 kilomètres par seconde ; certains quasars sont à neuf milliards d'années-lumière. Nous avons des nouvelles qui datent de neuf milliards d'années. Comment est cet objet aujourd'hui ? Nous le saurons dans neuf milliards d'années.



JPL/NASA

LES ANNEAUX DES PLANÈTES

La structure et la physique des anneaux autour des planètes sont des problèmes ouverts qui datent de Galilée, le premier à avoir vu les anneaux de Saturne. La loi de Kepler énonce qu'un objet tourne d'autant plus vite autour d'un corps central qu'il est plus proche ; l'objet éloigné tourne moins vite. La partie interne d'un petit objet irrégulier dans un anneau tournant plus vite que la partie externe, cet objet s'étale et redonne un anneau bien circulaire. L'extraordinaire inattendu est qu'il y ait des arcs de matière autour de Neptune. J'ai eu la chance de les découvrir en 1984 avec William Hubbard, et cette découverte a été confirmée par les observations de la sonde spatiale *Viking*. Ces arcs sont fort intéressants : ils sont peut-être le siège de processus de confinement qui ont joué un rôle important dans la formation des planètes. Soit ces arcs sont instables et, telles les vagues au bord du rivage, ils sont détruits et recréés sans arrêt, mais comment et pourquoi ? Soit ils sont stables, ce que nous ne savons pas encore expliquer.

Nous avons inventé des accélérateurs de particules de plus en plus puissants ; hélas, le jour se pointe où les États n'auront plus assez d'argent pour les construire. Les crédits pour l'accélérateur américain a été coupé et le superaccélérateur qui sera en place au CERN, à Genève, en 2005 n'aura peut-être pas de successeur immédiat.

2. Les arcs des anneaux de Neptune, découverts en 1984. On distingue à droite, de bas en haut, les arcs nommés Liberté, Égalité, Fraternité. Certains astronomes avaient prédits qu'en raison des perturbations du satellite Triton, il ne pouvait pas y avoir d'anneaux autour de Neptune. Tous les astronomes pensaient que des arcs seraient rapidement détruits. Comprendre leur formation et leur stabilité est une des tâches prioritaires des astronomes.

Le futur de la physique est l'astrophysique, et une nouvelle discipline vient de naître : la physique des astroparticules. La compréhension de la physique subatomique passe par les messages du ciel, les rayons cosmiques qui nous arrivent gratuitement. Il n'est donc pas toujours nécessaire de construire des accélérateurs, là où des détecteurs d'astroparticules appropriés suffiraient.

En même temps, nous espérons découvrir le mécanisme de production d'énergie de ces sources extrêmement puissantes. Il faut continuer l'inventaire du magasin astronomie. Une des difficultés est d'intéresser le contribuable et ses élus pour une discipline qui n'est pas enseignée à l'école.

LES PULSARS

Un autre inattendu total fut la découverte des pulsars. Jocelyne Bell, étudiante en stage, découvre un petit parasite dans un signal. Son patron de stage n'y croit guère. Jocelyne insiste, et le parasite continue à se manifester. Les astrophysiciens de Cambridge sont émus, certains pensent à des signaux envoyés par des petits hommes verts : les extraterrestres nous téléphonent-ils ? On a très

vite compris que la source du signal était une étoile à neutrons en rotation rapide, et que son rayonnement balayait la Terre comme le faisceau d'un phare balaie les flots. Hélas pour la morale, les deux patrons de Jocelyne ont eu le prix Nobel, et la jeune fille n'a pas obtenu de poste immédiatement. Toutefois, l'humanité se souviendra que c'est Jocelyne Bell, étudiante très consciencieuse, qui a fait une découverte fondamentale. Beaucoup d'astronomes l'envient.

Les trous noirs n'ont pas grand-chose d'inattendu, du moment où vous comprenez la loi de Newton. Pour un objet de masse et de rayon donnés, il y a une vitesse d'évasion : elle est de 11 kilomètres par seconde pour la Terre. Pour un rayon très petit et une masse très grosse, cette vitesse de libération atteint la vitesse de la lumière. Donc un trou noir ne laisse rien échapper, même pas la lumière ; en revanche, il avale tout ce qui passe à sa portée.

Laplace savait cela, et dans sa deuxième édition du *Système du monde*, il imagine ces trous noirs. C'était pendant la Révolution française ; quand la réaction revient au pouvoir, ce passage hardi est supprimé.

La grande difficulté est d'observer ces objets invisibles. On voit les disques d'accrétion de la matière en train de tomber, on voit les trous noirs en train de manger et l'on voit les plats qu'on leur apporte, mais on ne voit pas le convive. Actuellement, les présomptions d'existence sont tout de même assez fortes.

Finalement, rares sont les objets que l'on a imaginés avant de les observer ; plus rares encore ceux qui sont prévus, comme les trous noirs, et que l'on n'a pas vus. Et la plupart des êtres astronomiques sont imprévus : Uranie, muse de l'astronomie, ne dévoile que lentement ses attraits.

André BRAHIC est professeur à l'Université de Paris VII-Denis Diderot et astrophysicien à l'Observatoire de Paris et au CEA Saclay.

Ce texte est une transcription par la revue du débat enregistré, avec Émile Noël, au Palais de la Découverte. Ce débat sera diffusé sur France Culture, le 10 septembre 1997, à 9h05.