

La nouvelle astronomie

Paul Ledoux

Citer ce document / Cite this document :

Ledoux Paul. La nouvelle astronomie. In: Bulletin de la Classe des sciences, tome 59, 1973. pp. 1221-1243;

https://www.persee.fr/doc/barb_0001-4141_1973_num_59_1_60837

Fichier pdf généré le 04/06/2020

DISCOURS

La nouvelle astronomie

par Paul LEDOUX
Directeur de la Classe

Si j'ai choisi ce titre ce n'est certes pas pour marquer une coupure avec quelque astronomie antérieure qui serait périmée mais bien pour forcer l'attention sur les objets extraordinaires que l'observation a découverts au cours de ces dix dernières années et qui posent tant de problèmes nouveaux souvent fondamentaux. Je ne peux ici qu'en brosser un tableau quelque peu sommaire et superficiel sans référence aux contributions individuelles déjà si nombreuses qu'on trouvera par exemple dans les ouvrages généraux repris dans la bibliographie à la fin de cet exposé.

Pendant des millénaires, des Chaldéens à Newton et ses prédécesseurs immédiats, Tycho Brahé, Copernic, Képler, Galilée en passant par les Ioniens et les Grecs, la régularité et l'ordonnance presque immuables des saisons, des jours et des nuits, des phases de la lune, du mouvement des planètes, des éclipses de la lune et du soleil ont inlassablement retenu l'attention des hommes. Pour une large part, ce sont ces observations et les tentatives d'interprétation qui ont poussé l'homme dans l'aventure de la science et l'ont forcé pour la première fois à prendre une vue plus objective de sa position dans l'univers connu abandonnant à regret le centre du monde qu'il lui paraissait si naturel d'occuper. Ce sont elles aussi qui ont conduit au développement de la mécanique et de la théorie du champ universel de l'attraction gravifique, premiers chapitres des sciences physiques à se mathématiser et qui serviront de modèles à tant de développements ultérieurs.

Pourtant quand Copernic, dont nous fêtons le 500^e anniversaire de naissance cette année, ressuscite près de deux mille ans plus tard

la théorie héliocentrique d'Aristarque de Samos, pour de bonnes raisons d'ailleurs et notamment comme le moyen le plus simple d'éliminer d'un seul coup pour les cinq planètes les épicycles d'un an de Ptolémée et d'obtenir leur distance moyenne en terme du rayon de l'orbite terrestre, les moyens instrumentaux font toujours défaut pour lever l'objection millénaire de l'absence apparente de parallaxes des étoiles (petites déviations angulaires des directions de celles-ci qui devraient refléter les déplacements périodiques de la terre dans l'espace au cours de son mouvement autour du soleil). Bien sûr, la découverte des quatre satellites principaux de Jupiter par Galilée quand il braqua la première lunette astronomique sur le ciel fournit, par analogie, un argument important à la thèse de Copernic. Mais il fallut attendre près de trois siècles et les développements de l'optique et de la construction mécanique avant qu'une lunette puisse être construite possédant le pouvoir de résolution et la stabilité nécessaire pour permettre à Bessel de mesurer enfin cette parallaxe qui, même pour une des étoiles les plus proches est inférieure à 1 seconde d'arc impliquant une distance au soleil plus de 250.000 fois plus grande que celle de la Terre, c'est-à-dire de l'ordre de 4 années-lumière. Ainsi, tout en apportant la preuve définitive du mouvement périodique de la Terre autour du Soleil, cette mesure consacrait l'immensité des distances stellaires.

On notera la lenteur, en ces débuts de l'astronomie, du mouvement de va-et-vient, si fondamental pour toutes les sciences, entre l'observation et la théorie, ralenti encore, dans ce cas, par l'impossibilité de toute expérimentation directe et l'éloignement des objets étudiés qui réduit notre source d'information, dans l'immense majorité des cas, à la radiation électromagnétique qu'ils nous envoient. Et encore, jusqu'il y a quelque trente ans celle-ci était-elle limitée essentiellement au domaine optique qui n'en constitue qu'une bien petite fraction. Les seules exceptions restent les météorites et, depuis quelques années, grâce aux satellites artificiels, quelques corps rapprochés du système solaire.

Naturellement, dans la suite, l'interaction théorie-observation va s'intensifier et s'accélérer dans les deux sens mais il faudra encore attendre plus de cent cinquante ans pour que les idées de Wright et Kant sur le groupement des étoiles en univers-îles, immenses systèmes isolés les uns des autres dans les profondeurs de l'espace, puissent

être confirmées grâce au grand télescope de cent pouces du Mont Wilson qui, au cours des années vingt, permit enfin de résoudre en étoiles individuelles les nébuleuses extragalactiques les plus proches, faisant d'elles définitivement des objets semblables à notre propre galaxie, comptant chacune quelques centaines de milliards d'étoiles.

Entre-temps, la spectroscopie couplée bientôt à la photographie avait donné naissance à l'astrophysique qui, dans la première moitié du 20^e siècle, provoqua un essor prodigieux de notre connaissance des astres qu'il s'agisse de leur composition chimique ou des conditions qui règnent dans les couches visibles dont leur lumière est issue ou encore de leurs mouvements.

Ranimée vers le milieu du 19^e siècle par l'établissement d'un principe général de conservation de l'énergie, la vieille question d'Anaxagore concernant l'origine de l'énergie rayonnée par les étoiles reçut, vers 1939, une réponse satisfaisante du moins pour la plupart d'entre elles en terme de réactions thermonucléaires dont les principales transforment l'hydrogène en hélium et ce dernier en carbone, les autres réactions étant sans doute plus significatives pour la synthèse des éléments lourds, éventuellement au cours d'explosions gigantesques qui, croyons-nous, expliquent les supernovae, que pour leur contribution à la radiation stellaire.

La fécondité de cette période remarquable dérive surtout de l'utilisation d'une part de techniques raffinées souvent à la pointe du progrès et d'autre part de l'application, on pourrait dire presque au jour le jour, des conquêtes de la physique particulièrement de la physique atomique et de la physique nucléaire aux basses énergies.

Sans doute, les astrophysiciens ont-ils découvert l'hélium et l'argon dans le soleil avant que les chimistes et les physiciens ne les isolent sur Terre. Sans doute, leurs découvertes et leurs suggestions ont-elles orienté les recherches au laboratoire vers certaines molécules ou radicaux libres peu connus. Et sans doute, la découverte, dans les milieux extrêmement ténus comme les nébuleuses gazeuses, la couronne solaire ou les queues de comètes, de raies « interdites » correspondant à des probabilités de transition extrêmement faibles illustre-elle, à propos, un aspect incontrôlable au laboratoire de la théorie quantique de l'atome. Et de même, l'interprétation des naines blanches, ces étoiles aux densités énormes de quelque 10^6 g/cm³, offrait-elle, vers la fin des années vingt une application spectaculaire à la statistique de Fermi-Dirac fraîchement émoulue.

Jusqu'à quel point, d'autre part, l'explication du rayonnement stellaire par la transmutation d'hydrogène en hélium n'a-t-elle pas influencé nos vues sur la possibilité de réaliser cette fusion sur Terre ou tout au moins renforcé notre confiance dans l'entreprise. D'autre part, les grains de poussière interstellaire, les météorites et les planètes exceptés, encore que les couches très extérieures des atmosphères de ces dernières n'y échappent pas, l'état de plasma, gaz composé de particules de charges électriques opposées mais neutre en moyenne est pratiquement universel. Aussi n'est-il pas étonnant que des géophysiciens des hautes couches de l'atmosphère terrestre ou des astrophysiciens aient été parmi les premiers à y consacrer une attention sérieuse et que la magnétohydrodynamique si fondamentale également pour le phénomène de fusion au laboratoire soit née de leurs travaux.

Dans un autre domaine, celui de la Relativité Générale, l'astronomie fut pendant longtemps la seule à pouvoir fournir des confirmations observationnelles et ceci reste vrai aujourd'hui en ce qui concerne les conséquences les plus spectaculaires de cette théorie. D'ailleurs elle ne manqua pas à son devoir et, quelques années seulement après les premiers travaux d'Einstein, elle avait vérifié les trois tests classiques sur le mouvement du périhélie de Mercure, la déviation des rayons lumineux au voisinage du soleil et le décalage gravitationnel des raies spectrales dans un champ gravifique important. Un peu plus tard, une des possibilités les plus fondamentales de la théorie mise en évidence par les travaux de Friedmann et de Lemaître, l'expansion de l'Univers, était confirmée par la découverte de la récession des galaxies dont les spectres, comme le montra Hubble au Mont Wilson, révélaient des décalages vers le rouge proportionnels aux distances de ces nébuleuses. Ainsi cette fois l'observation avait répondu sans délai aux sollicitations de la théorie et leur collaboration dans le domaine de la cosmologie ne pouvait que s'affirmer au cours des années ultérieures.

Mais quand Janski, en 1931, fit état de ses premières observations d'une émission radio en provenance des régions centrales de la galaxie, personne, je crois, ne pouvait prévoir ni l'importance ni l'étendue des acquisitions que l'ouverture de cette nouvelle fenêtre sur l'univers allait entraîner ni que certaines d'entre elles, quarante ans plus tard, allaient poser à la physique elle-même de nouvelles

questions dont elle n'est pas sûre de détenir les éléments d'une réponse satisfaisante.

Je ne m'arrêterai pas aux développements technologiques extraordinaires qui devaient conduire des modestes récepteurs paraboliques initiaux au pouvoir de résolution ridiculement faible même comparé à celui d'un petit télescope optique d'amateur, aux mastodontes automatisés actuels et qui, par couplage interférométrique, parfois indirectement au travers des continents ou des océans, peuvent mesurer des diamètres angulaires du millième voire du dix-millième de seconde d'arc battant ainsi et de loin les meilleurs et les plus grands télescopes optiques. Ajoutons-y leur pouvoir collecteur fantastique assuré par leurs grandes dimensions et qui, combiné au fait que les ondes de longueur d'onde radio sont infiniment moins absorbées ou diffusées par la matière interstellaire, leur permet d'atteindre l'intérieur de régions optiquement obscurcies et les objets les plus éloignés que nous connaissions.

Je passerai également sous silence les applications pourtant si fécondes aux problèmes de la structure de notre propre galaxie notamment grâce à l'observation de la raie à 21 cm de l'hydrogène. De même, je ne peux que signaler en passant la découverte dans la matière interstellaire, depuis 1968 et à un rythme sans cesse accéléré, de plus d'une vingtaine de molécules polyatomiques complexes, pour le moins inattendues dans ce milieu de densité moyenne extrêmement faible (moins d'un atome H par cm^3 en moyenne), surtout lorsqu'il s'agit de molécules comme l'acide formique (HCOOH), la formamide ($\text{NH}_2\text{-CH}=\text{O}$) ou la méthanimine ($\text{CH}_2=\text{NH}$) avec lesquelles on frôle pour ainsi dire la biochimie. Et qui sait si un de ces jours on n'y découvrira pas un acide aminé simple tel la glycine ($\text{NH}_2\text{-CH}_2\text{-COOH}$) par exemple? Quoiqu'il en soit, la discussion détaillée de ces observations, surtout pour des molécules comme OH et H_2O , tant en ce qui concerne les mécanismes masers qui excitent et amplifient leur émission qu'en ce qui concerne leur distribution dans l'espace nous a déjà révélé un milieu interstellaire bien plus riche, bien plus différencié qu'on ne pouvait l'imaginer il y a seulement cinq ans et où, déjà peut-être, nous pouvons voir s'amorcer les phénomènes de condensation qui accompagnent la naissance de nouvelles étoiles.

Mais ce sont les « radio-sources », ces régions de petits diamètres angulaires émettant des ondes-radio intenses qui allaient poser bientôt

les problèmes les plus fondamentaux. Les premiers signes s'en manifestèrent dès l'identification, en 1951, de la radio-source Cygnus A avec une galaxie lointaine émettant plus d'énergie dans le domaine radio que tous ses 100 milliards d'étoiles réunies, dans le domaine optique. On s'aperçut d'ailleurs bientôt que beaucoup de nébuleuses elliptiques géantes donnaient lieu au même phénomène extraordinaire que Cygnus A. L'émission radio provient souvent de deux régions situées de part et d'autre de la galaxie optique, elle-même parfois déformée ou pourvue d'un appendice donnant l'impression d'un jet puissant de matière lumineuse, comme dans M 87. Dans tous les cas, même quand leur apparence reste bien régulière, elles sont toujours caractérisées par des raies d'émission issues d'états de potentiels d'ionisation bien plus élevés que ceux caractéristiques des mêmes types de galaxies sans émission radio importante.

Des signes de violence analogues, haute excitation, haute ionisation, apparence de mouvements éruptifs, émission de rayons X, rayonnements infrarouge et radio intenses, incompatibles avec le spectre thermique des galaxies ordinaires, se sont révélés peu à peu beaucoup plus communs que nous ne l'avions soupçonné et particulièrement typiques des « noyaux » des galaxies dites de Seyfert ou des galaxies de type N, noyaux qui ont souvent une apparence presque ponctuelle. Mais c'est surtout après que certaines radio-sources d'apparence vraiment stellaire aient soudain, en 1963, posé un problème entièrement nouveau que l'intérêt pour tous ces objets anormaux a rebondi et que nos connaissances à leur sujet se sont développées parallèlement d'ailleurs à celles de cette nouvelle classe de radio-source assez communément désignées à présent sous le nom de « quasars ».

En effet, au début des années soixante, l'ingéniosité des radio-astronomes et des circonstances fortuites comme l'occultation de certaines de ces sources par la lune avaient permis de préciser suffisamment la position de quelques-unes d'entre elles pour que leur identification à ce qui apparaissait comme des étoiles bleues ne laisse plus de doute. Elles étaient d'ailleurs assez brillantes optiquement pour que leurs spectres puissent être obtenus aux grands télescopes. Ce n'est cependant qu'en 1963 que l'interprétation de ceux-ci s'éclaircit tout à coup lorsqu'on réalisa que, dans un cas, les raies pouvaient être identifiées aux raies de la série de Balmer à

condition d'admettre un décalage relatif de ces raies ($\Delta\lambda/\lambda = z$) vers le rouge de 0,16. Un deuxième cas suivit presque immédiatement moyennant cette fois un z de 0,37. Mais des « redshifts » de cet ordre n'avaient jamais été rencontrés à l'époque que pour des nébuleuses extragalactiques très lointaines. Et l'on réalisa immédiatement que si ces deux quasars devaient être reportés aux distances correspondantes définies par la relation de Hubble relative à l'expansion de l'univers, la luminosité optique intrinsèque de ces soi-disant étoiles devait être beaucoup plus grande, 10 à 100 fois, que celle d'une galaxie normale tandis que son émission radio devenait du même ordre que celle des galaxies elliptiques géantes.

Depuis 1963, le nombre des quasars connus s'est accru rapidement et aujourd'hui, les « redshifts » ont été mesurés pour plus de 250 révélant une gamme extraordinaire de valeurs de z , allant jusqu'à $z = 3,53$. Évidemment, ces valeurs extrêmes ne peuvent plus s'interpréter comme un effet Doppler classique et correspondent dans les modèles cosmologiques relativistes à des distances énormes de l'ordre de 10 milliards d'années ou plus rendant ainsi la lumière qui nous parvient de ces objets contemporaine des premières phases de l'expansion de l'univers.

D'autre part, l'apparence stellaire de ces objets, les dimensions angulaires des régions radio-émettrices établies par les méthodes interférométriques rappelées plus haut (souvent $< 0.001''$), les variations qui affectent leur luminosité optique et radio en des périodes incroyablement courtes de l'ordre de quelques années ou de quelques mois leur imposent des dimensions de l'ordre au plus de quelques années lumières et une cohérence de comportement jamais imaginée pour des objets cosmiques dont les masses ne peuvent guère être inférieures à quelques 10^9 à $10^{10} M_{\odot}$.

D'ailleurs, les bilans d'énergie minima requis pour expliquer les spectres radio par radiation synchrotron dans des champs magnétiques faibles conduisent, comme pour les galaxies elliptiques géantes, à une libération totale d'énergie sous forme d'électrons relativistes de l'ordre de 10^{60} à 10^{61} ergs en des périodes de l'ordre de 10^6 ans. Mais ceci correspond à la transformation en hélium d'une masse d'hydrogène de 10^8 à $10^9 M_{\odot}$ ce qui, dans une galaxie ordinaire, prend au moins 10^{10} années. Et ces exigences énergétiques pourraient être plus extrêmes encore dans le cas de certains quasars où des explosions

d'une extrême violence donnant lieu à des variations tant optiques que radio se succèdent parfois à des intervalles de quelques mois.

Grâce aux méthodes interférométriques, les positions relatives des régions radio-émettrices dans un même objet peuvent être étudiées au cours du temps. Les déplacements angulaires mesurés ainsi correspondent souvent, aux distances cosmologiques correspondant aux « redshifts », à des vitesses qui, à première vue, dépasseraient de loin la vitesse de la lumière. On peut cependant échapper au paradoxe de différentes façons et notamment, comme ces mesures sont associées à des phases de variation importantes du flux radio, on peut se demander si elles correspondent réellement à des déplacements ou simplement à la distance entre les sièges d'explosions distinctes successives. Toute autre résolution du paradoxe laisse subsister des vitesses souvent très proches de celle de la lumière.

Il faut encore y ajouter le problème des raies d'absorption observées dans de nombreux quasars et qui, dans un même objet, présentent des décalages vers le rouge non seulement différents de celui des raies d'émissions mais aussi souvent différents entre eux. Toutefois ces « redshifts » d'absorption qui, en moyenne, s'élèvent aussi avec le « redshift » d'émission leur restent cependant toujours inférieurs. Il est donc tentant de les interpréter comme étant associés à des masses de gaz éjectées successivement vers nous par le quasar lui-même, et dont les vitesses d'approche (décalage vers le bleu) diminuent d'autant le « redshift » cosmologique. Toutefois comme les différences de « redshifts » sont parfois considérables, ces vitesses d'éjection doivent être élevées et peuvent atteindre aussi une fraction importante de la vitesse de la lumière.

Toutes ces caractéristiques extrêmes ont depuis longtemps induit chez certains une espèce d'aversion pour l'interprétation cosmologique des « redshifts ». En effet, si une partie importante du « redshift » pouvait être due à quelque autre cause que l'expansion générale de l'univers, la distance des quasars pourrait être réduite d'autant ainsi que les vitesses de leurs mouvements internes et leur débit d'énergie. Et une série d'arguments observationnels en faveur d'une telle hypothèse ont été avancés sur la base d'associations, dans des régions de très faible diamètre angulaire, soit entre des galaxies, soit entre des quasars et des galaxies ou soit entre des quasars qui ont des « redshifts » nettement différents. Certaines de ces associations sont

certainement troublantes mais il reste malgré tout difficile d'en établir rigoureusement la réalité physique. D'ailleurs s'il s'agit réellement de groupements dans une même région de l'espace et non de coïncidences angulaires fortuites, un problème tout nouveau se pose quant à l'origine de ces « redshifts » différentiels car il est improbable qu'ils puissent être attribués à de purs effets Doppler cinétiques. En effet, les vitesses différentielles requises seraient si grandes dans certains cas et, par conséquent, la durée de vie de l'association si courte que les chances de l'observer seraient pratiquement négligeables.

D'autre part, les arguments en faveur d'une pure interprétation cosmologique des « redshifts » des quasars se sont multipliés également depuis leur découverte. Notons d'abord que du point de vue des énergies mises en jeu, le sentiment d'incrédulité des débuts n'est plus de mise puisque des phénomènes aussi violents impliquant une libération d'énergie du même ordre ont maintenant été observés dans les noyaux des galaxies de Seyfert dont les distances « normales » ne peuvent être contestées. De même, l'étude des galaxies N a révélé que leurs noyaux presque ponctuels, qui ressemblent en tout point à des mini-quasars, sont essentiellement immergés dans une source étendue qui a toutes les caractéristiques des galaxies elliptiques géantes et qui, aux distances correspondant aux redshifts des noyaux, ont des dimensions tout à fait normales pour ces dernières. De plus, tous les quasars proprement dits qui, sur la base de leurs distances cosmologiques, sont assez proches pour qu'une galaxie elliptique géante qui leur serait associée puisse être visible, se révèlent effectivement entourés d'une nébulosité lumineuse. Enfin, tout récemment, la raie de l'hydrogène à 21 cm a été découverte en absorption dans le spectre radio du quasar 3 C 286 mais décalée à peu près à $\lambda = 35,5$ cm ce qui correspond à un « redshift » $z = 0,69$ alors que celui du quasar lui-même est $z = 0,85$. Tout porte à croire que la raie à 21 cm décalée vers le rouge mais d'autre part remarquablement étroite prend naissance dans une galaxie de redshift cosmologique 0,69 derrière laquelle doit se trouver le quasar. Ainsi il n'y a guère de doute que la plus grande partie en tout cas du redshift de ce dernier (0,85) est aussi effectivement de nature cosmologique.

Enfin, si le diagramme de Hubble (z , m = magnitude apparente) des quasars présente une dispersion considérable, celle-ci n'est tout de

même pas négligeable non plus pour les galaxies et, dans les deux cas, le phénomène peut très bien être dû à une dispersion intrinsèque des luminosités de ces objets. Si on sélectionne les quasars les plus brillants par classes de « redshifts » (z à $z + \Delta z$) ou ceux qui ont des spectres radio à grandes pentes, le diagramme en question s'améliore beaucoup et, prolonge vers les z élevés celui obtenu en ne retenant que les nébuleuses extragalactiques qui sont les membres les plus brillants des amas de galaxies.

Ainsi voici notre univers enrichi d'objets extraordinairement plus lointains que les plus lointaines des galaxies connues qui, même avec les télescopes les plus puissants, ne sont guère visibles pour des « redshifts » supérieurs à $z = 0,4$. Mais à des « redshifts » de l'ordre de $z = 3,5$, l'une des principales caractéristiques optiques des quasars, leur excès d'énergie dans le bleu qui jusqu'ici a joué un rôle capital dans leur recherche et leur identification, s'atténue ou disparaît car l'excès intrinsèque dans l'ultraviolet se trouve déplacé vers le rouge par cet énorme « redshift ». Et qui sait ce que nous réserve la recherche à peine commencée sur les sources radio intenses coïncidant avec des objets rouges? Allons-nous enfin toucher vraiment à des commencements fondamentaux? Déjà maintenant, si nous disposions d'une méthode indépendante de déterminer la distance des quasars, quelles confrontations définitives avec les théories cosmologiques ne pourrions-nous espérer?

D'autre part, ce sont les quasars qui ont attiré l'attention sur ces variations globales et cohérentes en des périodes de quelques mois ou de quelques années, de systèmes si prodigieusement énormes que l'homme n'avait jamais pensé que des changements sensibles puissent s'y produire autrement qu'en des millions ou des milliards d'années.

Sans doute ne peut-on affirmer que leur interprétation échappe à la physique conventionnelle mais les taux de génération d'énergie nécessaire tendent à l'extrême limite les possibilités des réactions nucléaires. Et comment peut-on accumuler cette énergie sur les électrons pour leur donner les vitesses relativistes nécessaires pour qu'ils puissent émettre le rayonnement synchrotron observé? De même, quels sont les mécanismes capables d'accélérer en des temps très courts et jusqu'à des vitesses proches de celle de la lumière les immenses bouffées de plasma responsables des raies d'absorption ou des mouvements internes?

Certes, tout système autogravitant en présence de dissipation (éjection de membres du système, collisions directes entre eux, émission d'ondes gravitationnelles ou électromagnétiques) tend à se contracter, éventuellement surtout suivant les directions parallèles à son moment cinétique général et les « disques » en rotation rapide qui peuvent en résulter ont fort retenu l'attention ces derniers temps. Peut-on imaginer que les noyaux des galaxies et les quasars se forment ainsi? La matière qui s'y condense est-elle composée d'étoiles ou consiste-t-elle de gaz et de poussières où peuvent plus tard naître de nouvelles étoiles? Et dans ce dernier cas, les champs magnétiques, si essentiels pour la conversion d'énergie cinétique en radiation électromagnétique mais qui restent si énigmatiques quant à leur origine, doivent sûrement être pris en considération bien que leurs effets dynamiques puissent rester négligeables pendant une bonne partie de la contraction.

Jusqu'à quelles densités d'étoiles ou de gaz cette condensation peut-elle procéder? Une étude optique récente du noyau d'une galaxie de Seyfert conclut que s'il est composé d'étoiles normales au moins deux collisions devraient s'y produire par année. C'est certes encore beaucoup trop peu pour expliquer la libération d'énergie nécessaire mais assez déjà pour affecter la dynamique et l'évolution du noyau. Mais s'agit-il d'étoiles normales ou au contraire d'étoiles supermassives de dix-mille à cent-mille fois la masse du soleil résultant de la coalescence d'étoiles ordinaires ou nées telles quelles dans un gaz à très haute densité? C'est une image qui a été invoquée à propos des quasars et de leurs variations. Mais si de telles étoiles entrent en collision, ne doivent-elles pas conduire à la formation d'objets encore plus massifs ou de tels objets de masses aussi grandes que 10^8 à $10^{10} M_{\odot}$, ne peuvent-ils naître spontanément par condensation? C'est l'une des premières hypothèses avancées en fait pour expliquer les quasars. Mais pour de telles masses, les corrections de relativité générale en GM/Rc^2 deviennent importantes à de faibles densités et températures internes bien avant que les réactions nucléaires n'arrivent, en balançant exactement la luminosité, à stabiliser la configuration sur le prolongement de la séquence principale des étoiles ordinaires. Et en l'absence de rotation, ces corrections entraînent une instabilité dynamique violente pour toute masse supérieure à quelque $5.10^5 M_{\odot}$ dont la matière, pratiquement en chute libre, va

s'engouffrer dans la sphère de Schwarzschild. Certes, pendant un certain temps, c'est là un moyen de libérer une quantité d'énergie potentielle gravifique considérable mais qu'il n'est pas nécessairement aisé de transformer directement ou indirectement en radiation électromagnétique qui est toujours essentiellement la forme sous laquelle nous l'observons. Rappelons que, dans les circonstances envisagées, ce processus d'accrétion gravifique est en fait beaucoup plus efficient que les réactions nucléaires puisque la fraction de l'énergie de masse propre (mc^2) libérable est de l'ordre de 6 % dans le cas où la surface critique est sphérique (Schwarzschild) c'est-à-dire à peu près dix fois plus que dans la transformation d'hydrogène en hélium. De plus, si la matière qui se condense est dotée d'un moment cinétique suffisant, cette fraction peut monter jusqu'à 42 % de mc^2 .

Quoiqu'il en soit, une fois toute la masse à l'intérieur de la surface critique, il ne nous restera plus qu'un de ces « trous noirs » sans aucune communication avec le monde extérieur sauf par l'intermédiaire de son champ gravifique. Sans doute, s'il subsiste d'autres étoiles dans les environs pourrait-il les attirer et en « gober » une de temps à autre, ou toute autre forme de matière d'ailleurs, suivant un processus éventuellement capable de transformer une partie de l'énergie potentielle gravifique en radiation électromagnétique observable. En fait, une image analogue a été proposée pour expliquer l'activité de certains noyaux galactiques.

Rappelons aussi que la rotation et particulièrement une rotation différentielle à vitesse angulaire croissante vers l'intérieur peut stabiliser momentanément ces étoiles supermassives du moins jusqu'à des masses de l'ordre de 10^8 à $10^9 M_{\odot}$ en contrebalançant les corrections de relativité générale. Pour des masses aux environs de la masse critique ($10^5 M_{\odot}$ sans rotation, $10^8 M_{\odot}$ avec rotation), il est possible, si les éléments lourds y sont déjà suffisamment abondants, que le mouvement d'implosion dû à l'instabilité dynamique puisse être arrêté et transformé, par l'accélération extrême des réactions nucléaires, en une gigantesque explosion libérant jusqu'à 10^{60} ergs dans le cas d'une masse de $10^8 M_{\odot}$. Dans le cadre de la physique classique, cette possibilité, si elle est confirmée, constituerait sans doute une des solutions les plus satisfaisantes. Mais les sources variables à explosions successives exigeraient la présence en leur sein d'un nombre appréciable de tels objets. D'autre part, cette possibilité n'empêche-

rait pas des masses encore plus grandes de s'évanouir dans leur surface critique pour former des « trous noirs » extrêmement massifs dont le champ de gravitation en tout cas modifierait certainement l'évolution des galaxies qui les contiennent.

En quelque sorte, l'observation nous a forcé à reconnaître l'existence d'objets extrêmement massifs et très compacts capables d'émettre des quantités fantastiques d'énergie. On peut même dire que, suivant toutes les apparences, formes, couleur, redshift, variabilité, proportion de la composante non-thermique à la luminosité totale, les plus typiques de ces objets, quasars, galaxies-N, galaxies de Seyfert, radio-galaxies peut-être, forment une séquence bien établie dont nous ne savons pas trop malheureusement dans quel sens elle doit être prise si nous voulons lui donner une signification évolutive.

Nous en sommes venus à la conclusion qu'il était naturel après tout que les systèmes auto-gravitants développent par contraction gravifique des noyaux massifs qui, dans le cadre de la relativité générale, ne peuvent guère éviter l'effondrement définitif dans l'abîme des « trous noirs ». Mais ceci fait naturellement penser aux phases terminales d'un processus d'évolution plutôt qu'à ses débuts. Et peut-on réconcilier cette conclusion avec l'interprétation cosmologique du « redshift » des quasars qui les range parmi les tout premiers objets à se former dans un univers en expansion ? On se sent peu incliné à les considérer comme le résultat ultime de la condensation de galaxies ordinaires et en auraient-elles eu d'ailleurs le temps ? Ou faut-il admettre que ce phénomène est universel et s'est manifesté dès la formation des premières condensations matérielles dans l'univers mais en se déroulant à un taux d'autant plus rapide que l'univers était plus jeune, ces condensations n'apparaissant en quelque sorte que pour être englouties un peu plus tard aux accompagnements d'un immense feu d'artifice dans des « trous noirs » qui devraient dès lors peupler l'espace y entretenant des champs gravifiques bien supérieurs à celui de la matière visible ?

Ou faut-il, suivant un vieux schéma d'Ambarzumian, considérer au contraire ces quasars et ces noyaux comme des « sources » où une matière et une énergie jusque-là invisibles nous deviennent tout à coup perceptibles ? Solution en quelque sorte inverse de celle correspondant à un « trou noir » et qui permettrait l'émergence, hors de régions dont l'expansion a été jusque-là retardée par quelque

inhomogénéité accidentelle, de radiation et de matière projetées au travers de la sphère critique de Schwarzschild. Peut-être pourrait-on également trouver des solutions compatibles avec les idées d'Ambarzumian dans les cosmologies stationnaires en concentrant la création de matière qui les caractérise dans de petites régions favorisées peut-être par une densité préalable suffisante?

D'autre part, il reste difficile d'exclure a priori l'idée qu'il puisse subsister assez d'antimatière ici et là pour y provoquer par annihilation avec de la matière ordinaire, une libération intense d'énergie s'accompagnant d'une violente répulsion qui pourrait donner lieu, au terme d'une chaîne de mécanismes non explicités jusqu'ici, aux phénomènes observés.

Enfin, ne peut-on, avec certains, se demander si, dans des régions comme les environs de la surface critique de Schwarzschild où l'énergie potentielle gravifique d'une particule devient du même ordre que son énergie propre, la matière continue à obéir aux lois connues de la physique? Ou, dans de telles circonstances, les interactions entre les propriétés locales et l'univers en gros ne sont-elles pas radicalement modifiées permettant des solutions inattendues?

Nous nous sommes longuement attardés aux quasars car ils me paraissent poser quelques-uns des problèmes les plus fondamentaux surgis au cours de ces dix dernières années. Mais l'émoi provoqué par la découverte des premiers était à peine apaisé que d'autres observations dans le domaine radio de courtes longueurs d'onde, lourdes également de conséquences pour nos vues sur l'univers et son évolution, étaient annoncées. Il s'agit de la découverte d'une radiation de fond très générale correspondant, croyons-nous, à celle d'un corps noir à peu près à 3°K et dont les premières mesures à $\lambda = 7,35$ cm et 3,2 cm remontent à 1964-65. Depuis, les observations se sont multipliées et, à l'heure actuelle, des mesures directes d'intensité à des λ allant de 100 à 0,32 cm tombent exactement sur la branche ascendante du rayonnement d'un corps noir à 2,8°K. Aux environs du maximum et sur la branche descendante, disons de 3 à 0,5 mm les observations directes au-dessus de l'atmosphère par ballons et fusées sont difficiles et les résultats restent quelque peu controversés. Par contre, l'observation des raies optiques et radio du radical CN identifié dans la matière interstellaire en 1937 par Swings et Rosenfeld confirme entièrement le rayonnement noir de température 2,8°K à

$\lambda = 2,64$ mm. Les raies de CN, CH et CH^+ fournissent aussi des limites supérieures au flux à λ 1,32, 0,56 et 0,36 mm qui sont compatibles avec le rayonnement noir à $2,8^\circ\text{K}$ mais qui laissent néanmoins de la place pour un excès appréciable.

D'autre part, la distribution de cette radiation sur tout le ciel s'est révélée d'une uniformité extraordinaire. Les dernières mesures en date excluent définitivement toute origine due à une distribution de sources discrètes plus ou moins comparable à celle des galaxies qui sont les seuls objets connus auxquels on pourrait tenter de les identifier.

Dès le début d'ailleurs, l'interprétation la plus communément acceptée fut qu'il s'agissait de la radiation initiale accompagnant l'origine de l'univers dans les cosmologies du type « big-bang » et adiabatiquement refroidie depuis par l'expansion subséquente. S'il en est ainsi, les observations présentes nous fournissent une donnée fondamentale supplémentaire à partir de laquelle remonter l'histoire de l'univers jusqu'à des instants extrêmement proches de ses débuts. Ceci a donné lieu à des extrapolations fort intéressantes de la physique des particules élémentaires et de la thermodynamique applicables à ces phases initiales prodigieusement chaudes. Un peu plus tard ($\tau \approx 200$ sec), à des températures de l'ordre de 10^9°K , neutrons et protons donnent lieu à la formation des éléments légers D, He^3 , He^4 , Li^7 fixant leurs abondances cosmiques originelles, celle de l'hélium X_{He} étant toujours de l'ordre de 0,27 en masse. D'une part, ceci semble résoudre en gros le problème de l'hélium dont l'abondance actuelle (jusqu'à $X_{\text{He}} = 0,4$) ne peut apparemment pas être expliquée entièrement par nucléosynthèse dans les étoiles. Mais, d'autre part, on ne peut négliger quelques données discordantes concernant des déficiences importantes en He dans certaines étoiles et même dans la matière interstellaire et qui, si elles s'avéraient réelles, seraient difficiles à réconcilier avec cette haute abondance originelle. Enfin, l'isotropie remarquable ($\Delta T/T < 7 \cdot 10^{-4}$) de cette radiation, si elle n'est pas due à une réhomogénéisation tardive ($\tau = 10^7$ sec) après la recombinaison vers 3000°K de l'hydrogène devrait nous aider considérablement à déterminer le type d'univers dans lequel nous vivons et, dans le cadre de la relativité générale par exemple, semble déjà indiquer un modèle fortement fermé.

En plus de ces conséquences cosmologiques importantes, le simple fait que la radiation de fond à $2,8^\circ\text{K}$ constitue le réservoir dominant

d'énergie électromagnétique dans l'univers, dépassant celui de la radiation stellaire moyenne par un facteur de l'ordre de cent, est sans doute très significatif aussi pour la physique toute entière.

A peine deux ans plus tard, en 1967, de nouveaux signaux mystérieux étaient captés par les radioastronomes. Il s'agissait de pulses de radiation électromagnétique de très courte durée et se succédant à intervalles extrêmement réguliers de 1,337 seconde. Cette période si courte pour un phénomène global cohérent était tellement en dehors des habitudes astronomiques qu'il fallut attendre quelque temps et la découverte ultérieure de trois autres sources de ce type pour que l'on se réconciliât définitivement à l'idée qu'il s'agissait bien d'un phénomène cosmique. Il fallait aussi un nouveau nom et quoi de plus naturel, du moins pour nos amis anglo-saxons, que de les baptiser « pulsars ».

Depuis, une septantaine de radio-pulsars ont été découverts dont les périodes se distribuent entre 0,033 et 4 secondes et qui appartiennent tous à notre galaxie comme leur grande concentration vers le plan de la voie lactée l'indique. La plupart sont à des distances inférieures à 2 kpc. Un seul a pu être identifié avec certitude à une source optique; c'est le pulsar de la nébuleuse du Crabe qui détient le record de la plus courte période 0,033 sec et qui coïncide avec l'objet brillant considéré comme le résidu central de l'explosion de la supernova de 1054 qui donna lieu à la formation de la nébuleuse elle-même. Dans ce cas, l'émission optique présente des pulses tout à fait analogues aux pulses radio et en phase avec eux. Il en est de même dans le domaine des rayons X qui a pu être étudié récemment grâce au satellite Uhuru.

La période des pulsars, c'est-à-dire l'intervalle entre pulses principaux successifs, peut être déterminée avec une précision extraordinaire qui en fait de véritables horloges atomiques célestes. Cette précision a permis de mettre en évidence un accroissement très lent de la période entrecoupé, dans le cas des deux pulsars les plus rapides, de sautes brusques (glitches) au cours desquelles la période subit une diminution relative dans un cas de l'ordre de quelques milliardièmes dans l'autre de quelques millièmes de seconde sans que la forme du pulse soit affectée. Immédiatement après, la période recommence à croître en fait à un taux un peu plus rapide sans cependant rejoindre complètement les valeurs qu'elle aurait atteintes en l'absence de cette saute.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail des observations sur la forme détaillée du pulse ou de ses variations avec la longueur d'onde de la radiation observée, ni des mesures de polarisation linéaire qui peut atteindre 100 % avec rotation de la direction de polarisation de plus de 90° au cours du pulse lui-même malgré leur intérêt capital pour l'interprétation de l'origine du pulse. De même, nous ne pouvons, malgré tout leur intérêt, nous attarder aux conséquences indirectes de l'étude des pulsars pour la connaissance du milieu interstellaire: mesure de la dispersion et densité électronique interstellaire, rotation Faraday du signal linéairement polarisé et champ magnétique interstellaire, scintillations et inhomogénéités de la matière interstellaire.

Le seul point sur lequel nous voulons insister c'est que, dès le début, il fut clair que quelle que soit l'interprétation considérée, oscillations radiale ou non radiale, rotation, orbite binaire, la période étant dans tous les cas proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la densité, cette dernière doit être énorme pour conduire à des périodes aussi courtes que celles observées. Après la découverte du pulsar du Crabe, avec sa période de 0,033 sec, on put même éliminer les naines blanches auxquelles on avait d'abord pensé car leurs périodes d'oscillation les plus courtes sont de quelques secondes et, d'autre part, avec des rayons de quelques milliers de kilomètres, elles ne résisteraient pas à la force centrifuge correspondant à des rotations aussi rapides. Il ne restait donc qu'à se rabattre sur les étoiles de neutrons qui, avec des densités de l'ordre de 10^{13} à 10^{15} g/cm³ et des rayons de quelque dix kilomètres, peuvent très bien être soumises à de telles rotations sans coup férir. Comme d'autre part, les périodes de leurs oscillations les plus vraisemblables sont de l'ordre de la milliseconde, c'est la théorie de la rotation qui l'a emporté bien que les oscillations puissent jouer un rôle indirect dans tout le phénomène.

A cette rotation rapide due à la conservation du moment cinétique au cours de la contraction doit être associé un champ magnétique intense de l'ordre de 10^{12} à 10^{13} gauss à la surface de l'étoile dû à la conservation du flux magnétique. Ceci permet d'utiliser l'énergie de rotation pour accélérer des particules chargées arrachées à la surface de l'étoile jusqu'à des vitesses très proches de la vitesse de la lumière et peupler ainsi une gigantesque magnétosphère de parti-

cules relativistes capables par rayonnement synchrotron d'émettre les radiations polarisées observées. Le processus exact d'émission reste malgré tout difficile à établir univoquement mais l'image la plus courante est celle de l'émission d'un faisceau d'ouverture assez faible un peu à la manière d'un phare qui, chaque fois qu'il passe sur nous, donne lieu à un pulse. Quoiqu'il en soit exactement, l'important c'est qu'au cours de la contraction jusqu'à l'état d'étoile de neutrons on puisse accumuler, dans le cas du pulsar du Crabe par exemple, une énergie de rotation de l'ordre de 10^{52} erg qui pourrait entretenir non seulement la radiation du pulsar ($\simeq 10^{38}$ erg/sec) mais aussi l'expansion de la nébuleuse qui l'entoure ($\simeq 2 \cdot 10^{38}$ erg/sec) pendant des temps très considérables de l'ordre du million d'années.

De plus, et c'est sans doute l'argument le plus fort en faveur de la rotation, le ralentissement de celle-ci correspondant au taux de perte d'énergie ci-dessus, est tout à fait du même ordre que celui observé.

Et comment expliquer les sautes brusques que nous avons signalées plus haut? Évidemment, l'identification des pulsars à des étoiles de neutrons a provoqué un prodigieux intérêt dans celles-ci et dans la physique de la matière à ces très hautes densités. Les nombreux travaux théoriques qui en ont résultés tout en confirmant, comme dans le cas des naines blanches, l'existence d'une masse critique de l'ordre ici de 2 à 3 fois la masse du soleil suivant l'équation d'état adoptée, ont montré également que la structure d'une étoile de neutrons était beaucoup plus complexe qu'on ne l'avait pu croire initialement. Il semble bien qu'on doive y distinguer au moins deux ou trois régions principales: une croûte solide où des régimes différents peuvent se rencontrer suivant l'état des atomes comprimés magnétiquement dans une couche superficielle de quelques mètres d'abord, puis des noyaux distribués aux sommets d'un réseau cristallin cubique baignant dans un fluide de neutrons qui finit par dominer complètement pour former un noyau superfluide occupant au moins les 7/8 du rayon mais au centre duquel on retrouve peut-être une graine de neutrons cristallisés à des densités de l'ordre de 10^{15} g/cm³.

Il est amusant de faire le rapprochement avec la structure de la Terre qui, bien sûr dans un domaine de densités infiniment plus faibles, présente néanmoins une analogie formelle frappante avec ce

modèle. Et une partie des vocables qui sont devenus courants, comme les séismes stellaires (dans la croûte ou dans le noyau solide) invoqués pour expliquer les changements brusques de périodes, sont empruntés à cette analogie.

Évidemment, la poursuite de toutes ces idées et hypothèses, leur adaptation de plus en plus serrée aux observations demandent des améliorations considérables de nos théories de la matière. Une fois de plus, l'astronomie assiège la physique pour lui demander cette fois non des lois toutes faites et prêtes à être appliquées, mais pour l'inciter à se dépasser elle-même dans un domaine où malheureusement l'expérimentation directe semble impossible. Et nous voyons l'espoir naître du côté des physiciens que l'interprétation d'observations encore plus nombreuses et plus détaillées permette de canaliser en quelque sorte les extrapolations nécessaires et d'arriver à des vues définitives sur la constitution de la matière à ces densités fantastiques.

Et voici que, depuis un an ou deux, d'autres exemples de ces étoiles de neutrons peuvent être trouvés parmi les nombreuses sources de rayons X (plus de 150 connues à présent dont un peu moins de la moitié sont sans doute extragalactiques) révélées par les fusées et les satellites artificiels surtout Uhuru dont la moisson aura été particulièrement abondante tant en ce qui concerne le nombre de sources découvertes que les propriétés détaillées de certaines d'entre elles.

Celles qui nous intéressent le plus ici constituent une des composantes d'une binaire spectroscopique, particulièrement si elle est à éclipses puisque, dans ce cas, des méthodes classiques éprouvées permettent de déterminer la masse des composantes ou au moins d'établir des limites pour ces masses. L'objet de cette classe le mieux étudié jusqu'ici est Herculis X-1 dans la binaire HZ Herculis. La source X est éclipsée par son compagnon géant pendant environ 6 heures au cours de chaque période qui est de 1,7 jour. De plus, elle « pulse » avec une période extrêmement courte de 1,24 seconde. Enfin, l'émission X semble modulée par une autre longue période quelque peu irrégulière de l'ordre de 35 à 36 jours au cours de laquelle le rayonnement X est présent pendant une dizaine de jours et absent le reste du temps. La luminosité dans le domaine X est de l'ordre de 10^{36} à 10^{37} ergs c'est-à-dire quelque mille à dix mille fois la luminosité du soleil alors que la masse de la composante X ne peut guère être supérieure à la masse du soleil.

D'autre part, la courte période tend à diminuer (6 microsecondes en 15 mois) contrairement au cas des pulsars, si bien que le mécanisme d'émission X ne peut être le même que dans ces derniers. Néanmoins l'interprétation la plus courante fait également appel à une étoile de neutrons, l'énergie étant libérée cette fois par la matière tombant de la composante principale, qui est supposée remplir son lobe de Roche, sur l'étoile de neutrons par le goulot du premier point de Lagrange instable ce qui peut libérer jusqu'à 10 % de l'énergie de masse au repos. Dans cette hypothèse, beaucoup pensent encore que la période de 1,24 seconde est celle de la rotation de l'étoile de neutrons qui pourrait être accélérée par l'apport de moment cinétique associé à l'accrétion de matière et que l'énergie émise dans le domaine X est concentré dans un faisceau plus ou moins ouvert qui balaie les environs de la Terre.

Dans ce cadre, on pourrait interpréter l'apparition et la disparition du rayonnement X comme étant dû à une précession de l'étoile de neutrons qui dévierait le faisceau de la Terre pendant 25 jours et le ramènerait sur celle-ci pendant une dizaine de jours. Ceci impliquerait l'existence d'un noyau solide au centre de l'étoile de neutrons et fournirait une des meilleures chances de pouvoir déduire des données astronomiques des renseignements significatifs sur le comportement de la matière aux très hautes densités. Mais d'autres explications ont été envisagées comme le blocage périodique par exemple du transfert de matière de la composante principale vers l'étoile de neutrons.

Centaurus X-3 ressemble à Herculis X-1 avec sa période orbitale de 2,1 jours et sa pulsation rapide de 4,8 secondes. La masse de l'étoile responsable du rayonnement X est comprise entre 0,2 et 1,4 M_{\odot} et est donc aussi compatible avec l'hypothèse qu'elle a atteint l'état d'une étoile de neutrons. Plusieurs autres systèmes binaires du même type ont été découverts par Uhuru y compris un dans le petit nuage de Magellan dont la luminosité X atteindrait 10^{38} erg/sec.

Mais l'objet le plus intrigant est sans doute Cygnus X-1 qui manifeste des variations rapides non-périodiques sur des échelles de temps qui s'échelonnent de 0.1 à 10 secondes ou plus ce qui implique certainement des dimensions très petites pour la source. Cygnus X-1 a pu être identifiée récemment comme l'une des composantes de la

binaire spectroscopique HDE 226868 dont la composante principale est une étoile B0 qui doit posséder une masse considérable de l'ordre de $20 M_{\odot}$. L'étude spectroscopique de l'orbite conduit ainsi à une masse de l'objet X qui ne peut guère être inférieure à $6 M_{\odot}$. Mais ceci est définitivement bien supérieur à la masse limite d'une étoile de neutrons. Dans ces conditions, la pression des neutrons dégénérés ne peut supporter l'attraction gravifique de la masse qui doit s'écrouler sur elle-même pour former un de ces « trous noirs » auxquels nous avons déjà fait allusion précédemment et qui, comme nous l'avons indiqué, sont susceptibles de créer les conditions exceptionnelles où la transformation de masse en énergie peut atteindre un maximum de 40 %. La source X dans le petit nuage de Magellan gravitant autour d'un compagnon massif ($20 M_{\odot}$) semble bien constituer un exemple du même type avec une masse de l'ordre de $5 M_{\odot}$ et Circinus X-1 pourrait en être un autre mais où cette fois la plus grande partie de la masse pourrait être concentrée dans la source X.

Il ne faut pas oublier toutefois que, dans bien des cas, comme celui de Scorpion X-1, la source X la plus brillante du ciel, ou Cygnus X-3 avec sa période de 4,8 heures et ses sursauts intenses d'émission radio qui requièrent l'émission en quelques heures de nuages d'électrons relativistes d'une énergie totale de 10^{40} ergs, la nature de ces sources X restent encore mystérieuse.

Ainsi les nouvelles techniques d'observations en astronomie nous ont révélé en ces dix dernières années un univers à la fois immensément plus vaste et plus riche que celui qui est directement accessible à notre sens de la vue même aidé par les moyens les plus puissants. Et ces découvertes fixent notre attention sur les conséquences les plus extrêmes de la relativité générale tout en nous offrant, dans certains cas, la possibilité de les tester, dans d'autres peut-être, de constater leur incongruité physique et éventuellement de rassembler ainsi un nouveau faisceau d'évidences dont l'application pourrait requérir un nouveau dépassement dans la théorie de la gravitation universelle.

En même temps, elles mettent la physique face à face avec des objets comme les étoiles de neutrons, prévues certes qualitativement depuis longtemps, mais dont une explication détaillée nécessite un approfondissement de la connaissance de la matière et de ses particules

ultimes. Ou encore, elles lui posent des problèmes nouveaux comme ceux que soulèvent les quelques premières secondes de l'existence de l'Univers. Elles matérialisent sous les yeux de l'homme des sources d'énergie prodigieuses où, en fin de compte, la gravitation se révèle comme le plus puissant convertisseur de masse en énergie. Elles lui posent plus que jamais des problèmes de commencement peut-être dans un éblouissement de radiation et une balance critique entre matière et antimatière et d'aboutissement au travers de la surface critique de Schwarzschild vers la singularité jusqu'ici impénétrable qui se cache dans les « trous noirs ».

Et je n'ai rien dit de cette radiation gravitationnelle prévue également par la théorie mais dont la détection expérimentale donne lieu à présent à tant de controverses. Si certains des résultats annoncés étaient confirmés, nous nous trouverions devant une énigme de plus, la plus grande peut-être qui nous ait jamais été posée puisqu'elle impliquerait une perte de masse transformée en radiation gravitationnelle dans la galaxie, de loin supérieure à toutes nos prévisions et en contradiction avec toutes nos idées sur la masse, l'évolution et la durée de vie de la galaxie. On peut espérer que les plans actuels pour des détecteurs de radiation gravitationnelle 100.000 fois plus sensibles grâce à leur refroidissement à 0.003°K permettront de trancher la question et de tester la théorie sur des sources connues de radiation gravitationnelle.

Ainsi l'astronomie théorique et jusqu'à un certain point toute la physique théorique qui ont commencé avec la théorie de la gravitation de Newton, se retrouvent aujourd'hui confrontées avec d'autres aspects de la gravitation qui suscitent des problèmes parmi les plus fondamentaux et les plus importants qu'elles puissent résoudre.

BIBLIOGRAPHIE

- PEDERSEN, Olaf, *Les étapes des révolutions célestes*, Le Courrier, Unesco, XXVI^e année, avril 1973, p. 14.
- BURBIDGE, G. R., *The Nuclei of Galaxies*, Ann. Rev. of Astron. and Astrophys. 8, 369, 1970.
- XVIth Solvay Conference, « *Astrophysics and Gravitation* », Bruxelles 24-29 septembre 1973 (in press).

- MISNER, C. W., THORNE, K. S. and WHEELER, J. A., *Gravitation*, San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1973.
- ZELDOVICH, Ya. B. and NOVIKOV, I. D., *Relativistic Astrophysics*, Vol. 1, Chicago: University of Chicago Press, 1971.
- THADDEUS, P., *The Short-Wavelength Spectrum of the Microwave Background*, *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.*, **10**, 305, 1972.
- DEMARET, J., *L'énigme des objets quasi-stellaires*, *Revue des Questions Scientifiques*, **140**, 450-477, **141**, 27-115, 1970.
- RUDERMAN, M., *Pulsars: Structure and Dynamics*, *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.*, **10**, 427, 1972.
- HARRISON, E. R., *Standard Model of the Early Universe*, *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.*, **11**, 155, 1973.
- FRIEDMAN, H., *Cosmic X-ray Sources: A Progress Report*, *Science*, **181**, 395, 1973.