

Les particules à la rencontre de la cosmologie

par

JEAN AUDOUZE* et MICHEL PATY**

RESUME. Le comportement des astres et de l'Univers dans son ensemble ne peut se comprendre aujourd'hui que grâce à la physique de l'infiniment petit. On retrace ici l'histoire du rapprochement de la physique des particules avec l'astrophysique et la cosmologie. L'Univers est le laboratoire le plus performant de physique des particules et ses grandes structures ne peuvent se comprendre que par la connaissance des composants les plus ténus de la matière nucléaire et de celle, pourtant très abondante, qui ne l'est pas et qui est donc invisible.

1

INTRODUCTION

Comprendre la nature de la matière et l'univers dans sa totalité est une préoccupation humaine qui remonte à des temps très lointains. Il suffira d'évoquer la doctrine atomiste de Leucipe et Démocrite, au IV^e siècle avant notre ère, reprise ensuite par Epicure (341-270 av. J.C.), et les diverses cosmologies, ou théories de la formation naturelle de l'Univers à partir des éléments premiers de la matière (la terre, l'eau, l'air, le feu), conçues par les physiciens de la Grèce ionienne vers le V^e siècle avant J.C. Le poète latin Lucrèce (Titus Lucretius Carus, I^{er} siècle av J.C.) esquissait dans son poème *De la Nature* (*De Natura rerum*) une représentation d'ensemble de la matière atomique, des phénomènes célestes et de la formation d'un Univers qu'il concevait comme infini.

Les idées sur la constitution de la matière et sur celle de l'Univers suivirent entretemps, pendant plus de quinze siècles, des chemins bien différents, et il fallut la disparition de l'ancien cosmos géocentrique aristotélicien et ptoléméen, avec l'affirmation de la conception héliocentrique par Nicolas Copernic (1473-1543), consolidée par Johannes Kepler (1571-1630) et Galileo Galilei (Galilée, 1564-1642), pour rétablir l'unité de la matière d'un cosmos désormais ouvert, que Giordano Bruno (1548-1600) fut l'un des premiers à proclamer.

Mais c'est au XVII^e siècle, avec la double invention du télescope (de la lunette de Galilée au télescope de Cassegrain et de Newton (1642-1727) et du

* Astrophysicien, Directeur de recherches au CNRS, Directeur du Palais de la Découverte.

** Philosophe des sciences et physicien, Directeur de recherche au CNRS, Equipe REHSEIS (UMR 7596, CNRS et Université Paris 7-Denis Diderot), 37 rue Jacob, F-75006 Paris.

microscope (Antoni van Loewenhoek, 1632-1723), que les deux domaines de la constitution des cieux et de la structure de la matière s'ouvrirent à l'observation précise et systématique, révélant des mondes nouveaux, des organismes cellulaires à l'immensité des espaces cosmiques (pleinement prise en compte par William Herschell (1738-1822) et ses univers-îles, ou galaxies, au début du XIX^e siècle).

L'homme abordait aux rivages de l'extrêmement petit et de l'extrêmement grand. Il réalisait en même temps l'"infirmité" de sa finitude par rapport à ces deux immensités, à ces deux infinis dont parle Blaise Pascal (1623-1662) : "Qu'est ce que l'homme dans la nature ? Un néant à l'égard de l'infini, un tout à l'égard du néant, un milieu entre rien et tout". L'un des enseignements de la science contemporaine devait porter sur la relation entre ces deux "infinis", qui furent d'abord ramenés à des grandeurs finies, soit très petites, soit très grandes : l'homme dut apprivoiser les "nombres astronomiques" (et leurs correspondants dans la petitesse), par l'évaluation précise des distances, se guérissant ainsi, provisoirement, de son infirmité consubstantielle diagnostiquée par Pascal.

L'unité de la matière inclinerait a-priori à penser que la structure des corps matériels n'est pas fondamentalement différente au niveau microscopique et au niveau macroscopique. Pourtant ces niveaux sont celui de la physique atomique et subatomique et celui de l'astronomie et de la cosmologie, dont les théories respectives ont connu au XX^e siècle un développement presque simultané et longtemps divergent. L'une s'est développée autour des notions de la physique quantique (qui est une théorie des actions discontinues) et l'autre autour de celles de la relativité générale pour les grandes structures de l'Univers (qui est une théorie du continu spatio-temporel). Cette différence et cette divergence contribua à éloigner momentanément les deux domaines. Cependant, si les deux théories fondamentales qui gouvernent à nos yeux l'ordre du microcosme et celui du macrocosme restent encore sans commune mesure, la situation a sensiblement changé par rapport à ce qu'elle était encore voici trois décennies.

La science actuelle nous dit que, loin de constituer deux domaines complètement étrangers l'un à l'autre, le monde de l'"infiniment grand" tient aux propriétés du monde de l'"infiniment petit", d'une manière beaucoup plus fondamentale que comme seulement son contenant : il y tient par sa structure même. La connaissance de l'Univers dans son ensemble et le comportement de ses grandes structures que sont les galaxies et leurs amas demandent de maîtriser la physique subatomique (qui comprend la physique nucléaire et celle des particules élémentaires). Par exemple, ce qu'on appelle la "matière noire", dont l'existence est requise par les données de l'astronomie, et qui pourrait bien gouverner le destin temporel de l'Univers, coïncide peut-être avec certaines particules "exotiques" dont font état les théories récentes de la physique des particules élémentaires et de leurs champs d'interaction, et activement recherchées du point de vue expérimental.

Nous verrons à la fin de cet article que, inversement, les propriétés de l'"infiniment petit" dans ses régions extrêmes ne nous seront éventuellement connaissables que par celles de l'"infiniment grand", si du moins ce terme est adéquat pour décrire l'Univers entier à ses débuts. En effet, l'Univers, dans son observation très distante qui correspond à son époque primitive (en raison du temps mis par la lumière pour nous parvenir), apparaît d'ores et déjà comme le seul laboratoire possible pour l'étude des propriétés de la matière dans ses ultimes retranchements.

Si la physique atomique et subatomique d'un côté, l'astronomie et la cosmologie de l'autre se sont développées indépendamment, il faut cependant rappeler que l'astrophysique, entre les deux, a toujours maintenu le contact entre les étoiles et les atomes, puis les noyaux atomiques, puisque la matière des premières ne diffère pas de la matière ordinaire, celle que nous connaissons de la Terre et du système solaire. D'un autre côté, les particules élémentaires nous ont d'abord été connues par l'étude du rayonnement cosmique, constitué de particules nucléaires (protons ou noyaux) extraterrestres de haute énergie, accélérées dans le cosmos, et de celles produites par leurs interactions sur les noyaux d'atomes de l'atmosphère.

Nous voudrions rappeler, dans ce qui suit, les différentes étapes qui ont marqué, après une période de séparation, le rapprochement de l'astrophysique et de la cosmologie avec la physique subatomique consacrée à la compréhension de ce qui se passe à l'intérieur d'un noyau d'atome. Nous évoquerons surtout les résultats positifs obtenus qui ont conduit à cette convergence, en laissant ici de côté les questions de portée plus lointaine, mais qui n'en sont pas moins ardemment explorées, comme celle de la conciliation entre la physique quantique et la théorie de la relativité.

2

DU RAYONNEMENT COSMIQUE AUX ACCELERATEURS DE PARTICULES

La physique des particules élémentaires s'est établie à partir de deux origines : l'une est la physique atomique puis nucléaire, l'autre l'étude du rayonnement cosmique. La *physique atomique* prit son essor avec la mise en évidence de l'*électron* en 1897 par Joseph-John Thomson (1856-1940), et celle du *proton* (noyau de l'atome d'hydrogène), puis avec celle du *photon* (grain de lumière), en 1916, par Albert Einstein (1879-1955) du point de vue théorique, et en 1923 par Arthur Compton (1892-1962) en ce qui concerne la vérification expérimentale (Compton travailla par ailleurs également sur les rayons cosmiques).

Le développement, à sa suite, de la *physique nucléaire* fut marqué dès ses débuts par la découverte du second constituant élémentaire du noyau (en plus du proton), le *neutron*, identifié en 1932 par James Chadwick (1891-1974), ainsi que par l'introduction d'une autre particule qui devait se situer parmi les plus fondamentales, le *neutrino*. Ce dernier fut formulé d'abord à titre d'hypothèse, en 1930, par Wolfgang Pauli (1900-1958), consolidée en 1933 par la théorie de la désintégration faible β des noyaux atomiques proposée par Enrico Fermi (1901-1954), et fut observé directement bien plus tard, par Frederick Reines et Clyde Cowan en 1954. Entretemps, d'autres particules élémentaires liées à la structure des noyaux s'étaient manifestées, dont nous reparlerons. (Presque tous les chercheurs que nous venons de nommer ont reçu le prix Nobel de Physique : Thomson en 1906, Einstein en 1921, Compton en 1927, Chadwick en 1935, Pauli en 1945, Fermi en 1939, Reines en 1995).

L'autre source de la connaissance des particules élémentaires est la *physique du rayonnement cosmique*, qui appartenait au début à la géophysique : elle commença avec la mise en évidence d'un rayonnement ionisant d'origine extra-

terrestre par la décharge d'électroscopes embarqués dans un vol en ballon entrepris par le physicien autrichien Victor Hess : il reçut le prix Nobel de Physique en 1936 avec Carl Anderson (1905-1991), qui découvrit le positon. Il fallut attendre les travaux de Robert Millikan (1868-1917), en 1919-1920, pour se convaincre que ce rayonnement est constitué de particules chargées ; Millikan pensait que ces particules étaient des électrons. C'est seulement en 1948 qu'il fut démontré, par Freier, H.V. Bradt, Richard Peters et leurs collaborateurs, que le rayonnement cosmique primaire est constitué de noyaux d'atomes complètement ionisés et portés à des énergies comprises entre 10^7 et 10^{21} électron-volts. Ces noyaux, en rencontrant les atomes de l'atmosphère, induisent des réactions nucléaires, dans lesquelles des particules élémentaires sont produites.

C'est en étudiant de tels produits de réactions que Carl Anderson mit en évidence, en 1932, le *positon*, ou anti-électron, premier exemple d'antiparticule, dont l'existence avait été prédite quelques années auparavant par Paul A. M. Dirac (1902-1984). Une autre particule élémentaire nouvelle fut détectée dans le rayonnement cosmique en 1937, mais elle ne fut exactement identifiée qu'en 1948 : le *muon*, que l'on confondit au début avec la particule d'échange des forces nucléaires proposée en 1935 par Hideki Yukawa (1907-1981), le *méson* π .

De 1930 à 1950, le rayonnement cosmique fut le laboratoire où l'on pouvait étudier la physique des particules, avant d'être détrôné par les accélérateurs. Il est d'ailleurs symptomatique de constater que les laboratoires modernes de physique des particules se sont constitués à partir d'équipes qui avaient été pionnières dans la détection et l'analyse du rayonnement cosmique. Tel est, par exemple, le cas, en France, du laboratoire de physique de l'école Polytechnique fondé par Louis Leprince-Ringuet, qui permit à des chercheurs comme Charles Peyrou, Bernard Gregory (1919-1978), André Lagarrigue (1924-1975) et d'autres, de se former à la nouvelle discipline, où ils se révélèrent comme des physiciens de premier plan, et où ils contribuèrent de manière décisive à la constitution et aux succès scientifiques du CERN (anciennement Centre Européen de Recherches Nucléaires) et des laboratoires européens associés.

C'est dans des réactions provoquées par les rayons cosmiques de haute énergie que furent mises en évidence les premières particules élémentaires nouvelles qui allaient bientôt proliférer. Les interactions étaient alors étudiées dans des émulsions nucléaires ou dans des chambres de Wilson, auprès de laboratoires situés en haute montagne, comme le Pic du Midi de Bigorre dans les Pyrénées françaises, la Jungfrau dans les Alpes suisses, le Mont Chacaltaya dans les Andes boliviennes.

Ces études révélèrent, à la fin des années 40 et au début des années 50 le méson π , particule d'échange des forces nucléaires, découvert en 1948 par Cecil Frank Powell (1903-1969), Cesar Lattes et Giuseppe Occhialini (1907-199?) (ce dernier était allé exposer les émulsions nucléaires au Pic di Midi de Bigorre), et qui valut le prix Nobel à Powell en 1955. Le méson π ou *pion* s'avéra exister sous trois états de charge ; on découvrit d'autres particules, dites «V», que l'on appellerait ensuite étranges (l'hypéron Λ et les mésons K), et qui présentaient plusieurs problèmes : l'un d'eux était leur production en association, qui fut résolue par l'attribution d'une caractéristique nouvelle, l'*étrangeté*, ou l'*hypercharge*, à ces particules ; une autre, l'"énigme τ - θ ", ou existence de deux

modes de désintégration contradictoires pour le méson κ^0 ; elle fut résolue par la *non-conservation de la parité* dans les interactions faibles, proposée en 1957 sur une base théorique par Tsung Dao Lee et Chen Nin Yang et observée dans la radioactivité β des noyaux atomiques par Mme Chien Shiung Wu.

Mais, déjà, la physique des accélérateurs était entrée en scène et assurait la relève du rayonnement cosmique. Presque aussitôt après l'identification du méson π , le jeune physicien brésilien César Lattes, qui avait participé à la découverte, avait eu l'idée de disposer la même émulsion photographique de sensibilité appropriée auprès du synchrocyclotron à protons qui venait tout juste d'être mis en service à Berkeley, conçu initialement pour étudier les réactions nucléaires. Le méson π fut détecté dans les plaques photographiques, produit en bien plus grand nombre que dans le rayonnement cosmique, en raison de l'intensité élevée du faisceau de particules incidentes.

La possibilité d'ajuster les paramètres d'une expérience (particules incidentes et cibles, énergies, diversification des techniques de détection et de mesure des particules produites) permettait de déterminer avec plus de précision les éléments d'une réaction et d'en étudier les propriétés de façon quantitative. Très vite les accélérateurs, dont la construction se diversifia, et que l'on montait sans cesse en énergie, supplantèrent les rayons cosmiques dans la recherche des particules élémentaires. La moisson obtenue ainsi au cours des années 1950 et 1960 fut considérable : plusieurs centaines de particules, dont on put donner une classification en les ramenant à un petit nombre de familles caractérisées par des valeurs de nombres quantiques élémentaires, dont elles constituaient des états distincts. Il était possible de relier les uns aux autres ces états et ces familles à l'aide de la théorie mathématique des groupes de transformation et de symétrie. Les particules hadroniques (ou à interactions fortes) pouvaient être considérées comme des groupements de particules plus élémentaires, les *quarks* (six au total à la fin des années 70), auxquels s'ajoutaient les *leptons* (six également), ainsi que les particules ou *bosons d'échange*, vecteurs des champs d'interaction. Ces dernières sont le *photon* γ pour le champ électromagnétique, trois *bosons intermédiaires*, w^\pm et z^0 , pour le champ d'interactions faibles, huit *gluons* "de couleur", dénotés g_{ij} (i et j prenant les valeurs 1, 2 ou 3), pour l'interaction forte entre les quarks.

A ce stade, la physique des particules n'entretenait plus, ou presque plus, de connexion avec le rayonnement cosmique. Elle avait également coupé son autre cordon ombilical qui la liait à la physique nucléaire. Elle se définissait comme une discipline en soi, essentiellement tournée vers la connaissance des "objets" (quantiques) matériels les plus élémentaires et vers celle de la structure des champs d'interaction fondamentaux.

Ce furent, comme nous allons le voir, les progrès mêmes de la théorie des particules élémentaires, survenus dans le courant des années 70, qui la virent se rapprocher à nouveau de ses deux disciplines génitrices, cette fois pour leur apporter ce qu'elle savait au moins autant que pour recevoir d'elles. Mais nous devons nous tourner maintenant vers la cosmologie et l'astrophysique et leur évolution parallèle à celle que nous venons d'évoquer.

COMMENT LA THEORIE DU BIG BANG S'IMPOSA

Le premier argument observationnel de la cosmologie de l'univers en expansion est dû à Edwin Hubble (1889-1953) qui montra, en 1928, l'existence d'une relation entre le décalage du spectre lumineux des galaxies et leur distance. L'observation astronomique du décalage vers le rouge de la longueur d'onde de la lumière émise par les galaxies, ou nébuleuses, observée dès 1919, était admise comme un fait empirique général vers 1924. Le décalage de la lumière des galaxies, était interprété, par l'effet Doppler-Fizeau, comme un éloignement de celles-ci les unes des autres. D'autre part, la découverte des céphéides (étoiles à éclat variable) dans la nébuleuse d'Andromède permettait une estimation précise des distances intergalactiques, et donc de la forme de l'Univers. L'abbé Georges Lemaître, (1894-1966), cosmologue belge, élève d'Eddington, acquis à l'idée d'un univers fini et illimité de la Relativité générale d'Einstein, eut l'idée d'un modèle d'Univers intermédiaire entre le modèle statique d'Einstein de 1917 et celui de Willem de Sitter (1872-1934), d'un univers statique (pratiquement euclidien) dans lequel les masses matérielles sont repoussées les unes par rapport aux autres. Pour Lemaître, c'était l'Univers lui-même qui était en expansion, ce qui impliquait une relation entre la vitesse d'éloignement et la distance : les galaxies s'éloignent les unes des autres d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées¹. Hubble établit en 1928 la loi empirique de récession des galaxies, qui correspondait à la déduction de Lemaître. On en déduisit que l'Univers est en expansion.

Georges Lemaître proposa, dès 1931, l'hypothèse de la "boule de feu" primordiale, reprise ensuite par Georges Gamow (1904-1968) comme base de la théorie dite du "Big bang". Dans son modèle, si l'on remonte le cours du temps, toute l'énergie de l'Univers apparaît concentrée en un unique "atome primitif", de nature quantique, qui se désintègre à la manière d'un atome radioactif. Cette importation (très qualitative et encore trop analogique) en cosmologie des données alors récentes de la physique de la matière élémentaire préfigurait la rencontre de la cosmologie et de la physique subatomique. Mais elle restait encore uniquement spéculative.

Vers 1947-1950, George Gamow et ses collaborateurs Ralph Alpher et Robert Herman, effectuèrent le premier véritable rapprochement entre la physique nucléaire et la cosmologie : reprenant l'idée de G. Lemaitre, ils imaginaient qu'au début de l'évolution temporelle de l'Univers, des réactions nucléaires avaient pu se déclencher entre les neutrons et les protons, supposés présents alors dans un état de haute densité, produisant les noyaux plus complexes ; ils pensaient qu'il était possible ainsi d'expliquer la nucléosynthèse de tous les éléments chimiques observés dans la nature. Leur conjecture n'était exacte pour les noyaux très légers. Car, pour les autres, ils auraient dû tenir compte, comme E. Fermi et A. Turkhevich le firent remarquer en 1950, de la très grande instabilité des noyaux de masse atomique 5 et 8 qui empêchait la nucléosynthèse dans ces conditions.

Les processus nucléosynthétiques de l'Univers primordial se limitent de fait à la formation du deutérium, de l'hélium 3 et 4 et du lithium 7. La

¹ G. Lemaître, Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques, *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*, 47A, 1927, 49-59.

nucléosynthèse des autres éléments (à l'exception du lithium, du béryllium et du bore, qui sont formés par l'interaction du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire) se produit à l'intérieur des étoiles, comme Fred Hoyle, William A. Fowler, A. G. W. Cameron, G. et M. Burbidge le montrèrent en 1957.

G. Gamow et ses collaborateurs firent une autre prédiction qui, elle, fut pleinement confirmée, à la valeur numérique près. Si l'Univers, en expansion, s'est trouvé dans un état très dense et très chaud, un fort rayonnement ultraviolet a dû être produit lorsqu'il s'est refroidi à une température inférieure à environ 10 000 K. L'hydrogène, principal constituant de l'Univers, passa de l'état ionisé (proton) à l'état atomique (H), la réaction ($p+e^- \rightarrow H+\gamma$) dégageant un rayonnement électromagnétique intense au cours de la transformation. C'est ce rayonnement intense, mais refroidi par l'expansion jusqu'à devenir un rayonnement micro-onde, que Arno Penzias et Robert Wilson détectèrent en 1965. La température correspondant au rayonnement du fond diffus radio observé (2,7 K) était cependant plus basse que celle estimée par le modèle de Gamow *et al.* (5 à 7 K).

La théorie du "Big bang" s'appuyait désormais sur trois arguments observationnels : le mouvement d'ensemble d'expansion de l'Univers, le rayonnement radio diffus et l'abondance observée de l'hélium (et aussi du deutérium et du lithium 7) . Cette abondance, résultant de la nucléosynthèse produite quand la température de l'Univers était comprise entre quelques milliards et quelques dizaines de millions de degrés, signalait l'importance de la physique nucléaire en cosmologie et marquait le rapprochement de ces deux disciplines. Des premières recherches de P. J. E. Peebles et R.V. Wagoner en 1966-1967 jusqu'à maintenant, cette question a été très étudiée, tant par les astrophysiciens que par les physiciens nucléaires : on obtient par là des informations sur la densité "baryonique" ou "nucléaire" de l'Univers et sur le nombre de familles de neutrinos (donc de leptons), égal à trois (trois doublets de leptons, dont l'un est chargé et l'autre neutre), le même que celui des familles de quarks (qui vont aussi par trois paires), confirmant ainsi sur ce point le "modèle standard" de la physique des particules (voir plus bas).

La nucléosynthèse "primordiale" se produit dans l'intervalle de temps situé entre 1 et 100 secondes sur l'axe des temps auquel on rapporte l'expansion. Le point origine, extrapolé, figure le "Big bang" : ce nom fut donné en signe de dérision, lors d'une émission radiodiffusée, par Fred Hoyle, qui n'aimait pas la théorie, à laquelle il trouvait des relents créationnistes. Avec Hermann Bondi et T. Gold, il proposa une théorie alternative dite "de la création continue" de matière, laquelle viendrait contrebalancer la diminution de la densité due à l'expansion. Cette théorie resta influente jusqu'en 1965.

Pendant l'intervalle de temps qui précède la période de nucléosynthèse, c'est-à-dire dans "la première seconde", les conditions physiques (densité, température) correspondent à des événements de très haute énergie, qui ne peuvent être approchés qu'en tenant compte des connaissances, théoriques et expérimentales, en physique des particules élémentaires.

Cette approche nécessite une collaboration étroite entre les cosmologues et les physiciens des particules. La liste des sujets qui sont ainsi intermédiaires entre les deux disciplines est assez longue : mentionnons la théorie "inflationnaire", due à Alan Guth, François Englert et Paul Steinhardt, qui propose un mécanisme capable d'accélérer le mouvement d'expansion d'ensemble de l'Univers observable

dans un temps très court, lors de la séparation (ou brisure de symétrie) des quatre forces fondamentales de la physique ; la suppression de l'antimatière par un mécanisme proposé par Andreï Sakharov (1921-1989) ; le confinement des quarks au cours de la transition qui les synthétise en hadrons (protons, neutrons...) ; l'annihilation des paires électron-positon... La théorie du "Big bang" fait appel à toute cette physique.

Les efforts se concentrent actuellement sur la description des toutes premières phases du "Big bang", qui font peut-être intervenir les "cordes cosmiques", les "défauts topologiques" ou des "mini trous noirs primordiaux". L'on espère, au bout du compte, parvenir à quantifier la gravitation, c'est-à-dire à unifier la théorie de la Relativité Générale et la mécanique quantique.

Les résultats de la nucléosynthèse "primordiale" impliquent que la densité nucléaire (encore appelée densité baryonique) est significativement plus faible que la densité globale de l'Univers, déduite de la dynamique de ses structures à grande échelle (galaxies et amas de galaxies). La recherche de la matière "sombre" ou "noire" non baryonique est devenue depuis le milieu des années 1980 l'un des sujets les plus actifs de ce rapprochement entre la cosmologie et la physique microscopique. Nous évoquerons plus loin la situation présente concernant ce type de recherches.

4

LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET SON MOUVEMENT D'UNIFICATION... VERS L'ORIGINE

Malgré la séparation apparente survenue au début des années 50 entre les astrophysiciens d'une part et les physiciens nucléaires et des particules d'autre part, avec l'entrée en fonction des grands accélérateurs de noyaux et de particules, les contacts étaient restés très étroits dans deux domaines, celui de la nucléosynthèse (en particulier, la nucléosynthèse stellaire), et celui de l'astrophysique des hautes énergies, avec l'étude du rayonnement cosmique à des énergies encore hors d'atteinte des accélérateurs, et les astronomies X et gamma.

A ce domaine commun appartenait aussi l'étude des neutrinos solaires, entreprise dès 1968 par Raymond Davis Jr. Ces particules électriquement neutres et de faible liaison avec la matière, produites dans les réactions de nucléosynthèse solaire, étaient étudiées dans un détecteur souterrain pour éviter les contaminations dues à des effets parasites. Ce détecteur était un très grand réservoir rempli de tétrachlorure de carbone, placé au fond d'une mine d'or désaffectée, à Homestack dans le Dakota du Sud, aux Etats-Unis. La détermination des flux de neutrinos solaires par la mesure du taux d'interactions obtenues donnait un taux trois fois plus bas que celui escompté à partir de la théorie des interactions faibles, bien établie, et de notre connaissance du Soleil. Ce manque pouvait être imputé soit à l'inexactitude du modèle solaire adopté (composition, densité, etc.), soit à une propriété d'"oscillations" des neutrinos (transformation périodique de l'espèce électronique à l'une des deux autres, muonique ou tauique), prévisible si leur masse n'est pas nulle. Ce type d'expérience, de longue haleine, était appelé à se poursuivre à divers endroits dans le monde à l'aide de détecteurs variés, afin de capter toute la gamme

des énergies de neutrinos ; c'est peut-être celui qui consacre le mieux le rapprochement des disciplines de physique nucléaire, de physique des particules et d'astrophysique.

Le “modèle standard” de la cosmologie suggérait de son côté des recouvrements avec certains domaines de la physique nucléaire et des “particules élémentaires”. Il posait, en particulier, le problème des états physiques de haute densité d'énergie aux premiers instants de l'expansion. Il ressort de ce rapprochement que les caractéristiques du microcosme (la structure de la matière en quarks, la masse éventuelle des neutrinos, l'existence ou non de monopoles magnétiques ou d'autres types de particules “exotiques”) influent directement sur l'évolution de la matière de l'Univers, et sur la structure à grande échelle du cosmos, telle que l'homogénéité, l'isotropie, la platitude, ainsi que sur la nature de la “matière noire” et sur les fluctuations de ces grandeurs à petite échelle.

Or, de manière symétrique, la théorie des particules élémentaires et de leurs champs d'interaction découvrait l'importance de cette même région d'énergies très élevées, où les diverses forces d'interaction se rejoignent en intensité et se réunissent en une seule.

En effet, la physique des particules élémentaires parvenait entretemps à sa phase de synthèse, avec les “quarks” (proposés indépendamment en 1964 par Murray Gell-Mann, prix Nobel de physique 1969, et par George Zweig, et découverts expérimentalement en 1971), qui allait permettre la réduction du nombre de particules et l'avancée du projet d'unification des champs d'interaction grâce aux “champs à symétrie de jauge”. Le modèle des quarks offrait la possibilité de réduire considérablement la multiplicité des particules hadroniques (ou à interactions fortes), celles-ci pouvant être vues comme des assemblages distincts de plusieurs quarks élémentaires (trois quarks pour les “baryons”, une paire quark-antiquark pour les “mésons”). Le modèle théorique, régi par la théorie mathématique des groupes de transformation, fut confirmé comme description de la constitution physique de ces particules lorsque ces dernières purent être analysées dans leur structure (comme “radiographiées”) dans des expériences à l'aide de radiations pénétrantes de haute énergies.

Toutes les particules physiques sources de champs d'interaction ont été ainsi, en définitive, ramenées à six quarks et six leptons distincts. Cette simplification jointe à d'autres considérations théoriques permirent l'élaboration des premières tentatives théoriques, couronnées de succès, pour unifier les champs d'interactions fondamentales de la matière autour de propriétés d'invariance (“invariances de jauge”) des grandeurs caractéristiques des champs et des particules (que l'on appelle globalement leurs “nombres quantiques”).

En 1973, la détection de “courants neutres faibles”, où André Lagarrigue et Paul Musset (1935-1985), tous deux prématurément disparus, eurent une grande part, constitua une confirmation de la *théorie électrofaible* de Sheldon Glashow, Abdus Salam (1926-1996) et Steven Weinberg (tous trois prix Nobel de physique en 1979), qui unifiait l'interaction électromagnétique et l'interaction nucléaire faible. (Quelque temps plus tard, S. Weinberg capta l'attention d'un large public sur la nouvelle “cosmologie des premiers instants” avec son ouvrage intitulé *Les trois premières minutes de l'Univers*, qui devint un “best seller”).

Ce succès de la théorie fut complété en 1981 par la découverte des trois bosons intermédiaires par une collaboration dirigée par Carlo Rubbia (qui partagea

le prix Nobel de physique 1984 avec Simon van der Meer, auteur des prouesses technologiques qui rendirent ces résultats possibles). A la théorie électrofaible s'adjoignit bientôt une nouvelle théorie du champ d'interaction forte, fondée sur les propriétés des quarks et du champ de gluons, la "chromodynamique quantique", également une théorie invariante de jauge, dont les corroborations expérimentales marquèrent toute la décennie suivante.

Ayant trouvé la voie des champs de jauge, qui établit des symétries exactes et des exigences très contraignantes pour la forme et les paramètres des théories, les physiciens poursuivirent leurs recherches dans cette direction de l'unification. Les trois interactions devraient se rejoindre, pensaient-ils, en un seul schéma théorique quand certaines symétries sont réalisées, à des énergies extrêmement élevées. La "grande unification" (proposée en 1973-1974 par J.C. Pati, A. Salam et S. Glashow, et qui prit de l'importance à partir de 1978) serait la théorie qui permettrait d'unifier la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique. Encore au-delà, la gravitation quantique résoudrait la question qui constitue le plus grand défi de la physique théorique actuelle, la réconciliation et l'unification de la relativité générale et de la physique quantique. Les théories de supersymétrie et les théories "de cordes" sont des essais dans cette direction.

Les données actuelles de la physique des particules posent de nombreuses questions, comme celles du mécanisme qui engendre les masses physiques des particules en brisant les symétries des champs d'interaction (existence éventuelle d'une particule très massive qui en serait responsable, le boson de Higgs), ou la raison de la multiplicité (six) des quarks et des leptons et de leur étonnant parallélisme, et encore la nature des diverses charges, notamment du nombre baryonique et la cause de l'asymétrie entre les antibaryons et les baryons (antimatière-matière). Ces questions constituent la motivation fondamentale pour aller au-delà des théories actuelles, vers des unifications et des symétries supérieures qui impliquent des énergies extrêmement élevées.

A des prédictions testables par les moyens actuels de la physique, s'ajoutaient donc désormais, d'une manière naturelle, des prédictions concernant les états de la matière à des énergies si élevées qu'elles correspondent aux états de très haute densité d'énergie du cosmos tels que ceux des premiers instants dans le modèle du "Big-bang".

C'est alors, pour reprendre la substance d'une expression du physicien Leon Lederman (prix Nobel de physique 1988 pour la découverte du deuxième neutrino en 1962), que les astrophysiciens et cosmologues, braquant leur hyper-télescopes vers l'Univers à ses états d'origine (la distance étant ici une mesure directe du temps), et les physiciens des particules élémentaires, pointant leurs hyper-microscopes vers les très petites dimensions de la matière (elles sont comme l'inverse des énergies), s'aperçurent qu'ils étaient en train de regarder le même objet².

² Voir, pour plus de détails, J. Audouze, P. Musset et M. Paty (éds.), *Les particules et l'univers. La rencontre de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie*, Presses Universitaires de France, Paris, 1990.

RAPPROCHEMENTS INTERDISCIPLINAIRES ENTRE LES CHERCHEURS

La confirmation de la théorie du Big Bang par l'observation de Penzias et Wilson en 1965, l'intérêt grandissant porté à l'astrophysique relativiste et des grandes énergies à cette époque, les découvertes majeures en physique des particules, simultanées des premières, tout cela précipita le rapprochement entre disciplines.

Les écoles d'été de physique, comme celle de Varenne en Italie et celle des Houches en France (fondée par Cécile de Witt-Maurette), organisèrent, dès les années 60, des rencontres pluridisciplinaires autour de ces différents sujets³. Elles furent les lieux idéaux de la formation des nouvelles générations de chercheurs qui allaient se consacrer à ces questions, à l'interface entre ces disciplines. Une autre initiative féconde fut la fondation d'une série de rencontres, consacrées à l'astrophysique relativiste, organisées tous les deux ans au Texas par plusieurs physiciens théoriciens comme I. Robinson, E. Schucking, J. A. Wheeler.... La série des "Texas Symposia" se poursuit aujourd'hui encore après s'être internationalisée : en 1994, le lieu de rencontre était Munich, en 1996, Chicago, et Paris en 1998.

Une rencontre internationale qui eut lieu au CERN (à Genève), en 1982, sur ce thème fut un succès, et l'affectation par cette organisation, à la même époque, d'un physicien de renom (John Ellis) à la coordination de ce genre de recherches revêtit une signification toute spéciale. Un mouvement similaire pouvait être constaté en particulier aux Etats-Unis, dans des institutions aussi diverses que l'Université du Texas, la laboratoire Fermilab, les Universités Caltech et Princeton...

En France, ce rapprochement pluridisciplinaire fut d'abord modeste, jusqu'en 1983. Il ne concernait, au début que quelques astrophysiciens et physiciens de l'Institut d'Astrophysique de Paris, du Centre de Spectrométrie de Masse d'Orsay et du Service d'Electronique Physique du C.E.A. à Saclay. En 1981, l'un de nous (J. A.) était invité par Jean Tran Thanh Van, le fondateur des Rencontres de Moriond sur la Physique des Particules, à organiser les premières rencontres en astrophysique qui se déroulèrent désormais, depuis cette date, dans le cadre de ces Rencontres qui sont, en France, le rendez-vous principal des physiciens des particules. En 1983, le directeur général du CNRS d'alors, Pierre Papon, lui demanda d'organiser l'un des "thèmes stratégiques de recherche" autour du rapprochement entre l'astrophysique, la physique nucléaire et la physique des particules. Un colloque qui se tint l'été de cette année-là à Cargèse, en Corse, sur le thème *Astrophysique et interactions fondamentales*, permit ainsi d'évaluer les "outils théoriques" communs aux différentes disciplines et étayés par l'expérience et l'observation, à savoir la physique du noyau, la théorie des forces nucléaires et des champs d'interaction des particules élémentaires, la théorie de la relativité générale,

³ Cf. en part., le compte-rendu de la session de l'école des Houches de 1979 : R. Balian, J. Audouze and D.N. Schramm (eds), *Physical Cosmology*, North Holland, Amsterdam, 1980. On trouve, en particulier, dans la contribution de F. Englert (Bruxelles) à cet ouvrage, les prémisses de la théorie de l'inflation qui serait publiée quelques années plus tard par A. Guth (M.I.T.). D. N. Schramm a trouvé la mort le 20 décembre 1997 dans un accident d'avion.

etc.. “Les observations cosmologiques, indiquait-on, requièrent ces développements, pour être comprises complètement”⁴. Il fut possible de dégager les thèmes scientifiques à aborder en priorité.

Ces thèmes étaient, en particulier, la détermination des sections efficaces des réactions nucléaires d'intérêt pour l'astrophysique, l'élaboration de nouveaux détecteurs de neutrinos solaires au gallium et à l'indium, les recherches cryogéniques indispensables à la réalisation de détecteurs de WIMPS (particules massives non baryoniques, donc à faible interaction, pour l'instant hypothétiques) et, plus généralement, des réflexions approfondies sur de nouveaux concepts comme ceux faisant appel aux techniques de détection de particules relativistes à l'imagerie dans l'ultraviolet (G. Charpak) ou à l'utilisation de grains supraconducteurs métastables dans la détection des neutrinos solaires (G. Waysand)... Le rapport du “Groupe de réflexion et de prospective sur la physique nucléaire, la physique des particules et l'astrophysique”, présenté la même année au Directeur général du CNRS⁵, recommandait de favoriser le rapprochement interdisciplinaire au niveau de la structure même des institutions.

Les deux instituts nationaux de recherche dépendant du CNRS, l'INSU (Institut National des Sciences de l'Univers) et l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules), qui étaient impliqués dans ces recherches, furent invités à établir une collaboration effective.

Cependant les pesanteurs institutionnelles constituèrent alors un obstacle ou un frein à des initiatives dont l'intérêt apparaît manifeste : méfiance entre des spécialistes ayant du mal à se comprendre, en particulier difficulté d'établir un dialogue entre expérimentateurs et théoriciens. Dans le cas qui nous occupe, une certaine irritation vis-à-vis des astronomes qui avaient un accès facile aux médias, en raison de l'engouement du public pour tout ce qui concerne le ciel et l'espace, a pu également avoir un effet négatif sur ces rapprochements. Si les décideurs de la recherche invoquent très souvent, depuis quelques décennies, la “pluridisciplinarité”, le passage des mots aux actes est difficile, au point qu'on se demande parfois si ceux-ci le souhaitent vraiment, ou s'il ne reste pas, le plus souvent, un vœu pieux. Voici, du moins, un aspect de la dimension sociale de la recherche scientifique : la logique des objets d'étude n'entraîne pas automatiquement les transformations d'attitudes nécessaires. Il y faut, de la part au moins de quelques uns, clairvoyance, volonté, énergie, voire une certaine dose d'obstination et d'optimisme...

La situation a finalement évolué dans le sens d'une étroite collaboration, en dépit des frilosités disciplinaires, puisqu'un “Programme National de Cosmologie”, rassemblant les deux organismes mentionnés avec le département Mathématiques et Physique de Base du CNRS, la Direction des Sciences de la Matière du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) a vu le jour en 1996. Cette initiative résulta de trois circonstances favorables : le sens historique de l'évolution de la cosmologie, l'existence pendant dix ans, de 1986 à 1996, d'un Groupe de Recherche interne à l'Institut des Sciences de l'Univers intitulé "Cosmologie", animé en particulier par

⁴ J. Audouze et J.-L. Basdevant (éds.), *Astrophysique et interactions fondamentales*, Colloque du C.N.R.S., Cargèse, 25-30 juillet 1983.

⁵ Ce rapport figure en appendice à J. Audouze et J.-L. Basdevant (*op. cit.*).

R. Pellat, D. Gerbal, B. Fort et bien d'autres, et peut être surtout le succès de la collaboration autour du projet EROS (DAPNIA du CEA et IAP du CNRS). Dans cette dernière collaboration, les physiciens des particules ont enseigné aux astrophysiciens à adapter les techniques de traitement de données appliqués en microphysique, où le nombre d'événements à dépouiller est très important, pour détecter les étoiles "brunes" ou "microlentilles". L'avenir de ce Programme National apparaît très prometteur puisqu'il aborde des sujets tels que les recherches de la matière "sombre", les implications des inhomogénéités du rayonnement "fossile" ou la structuration de l'Univers à toutes les échelles.

6

OBJETS ETRANGES DE L'UNIVERS

Les collaborations entre les communautés de chercheurs de disciplines différentes ont d'ores et déjà donné nombre de résultats intéressants. La cosmologie contemporaine doit désormais ses succès appréciables non seulement aux observations des astronomes, mais au moins tout autant aux contributions des physiciens des particules, théoriciens et expérimentateurs. Parmi les découvertes qui ont été le fruit de ces rapprochements, nous citerons notamment les observations de lentilles gravitationnelles, et les détections indirectes de naines brunes (programmes dits EROS et MACHOS) : ces dernières sont particulièrement significatives, puisque les techniques d'analyse des données couramment utilisées en physique des particules y sont appliquées à un problème de cosmologie observationnelle.

Le problème de la "matière noire" non baryonique (matière manquante, invisible) nécessitée par la trop faible densité observée de l'Univers, est un sujet qui connaît actuellement un grand développement. Il s'est trouvé posé quand on s'est aperçu que la densité observée de l'Univers était trop faible, soit globalement pour rendre compte de la valeur actuelle de certains paramètres (référence faite à la "platitude" de l'Univers), soit localement pour rendre compte de la dynamique de certaines structures cosmiques. La détection de la matière noire est envisagée soit indirectement, en considérant ses effets sur la dynamique des structures à grande échelle et en comparant les simulations numériques et les observations, soit directement, par le moyen de détecteurs appropriés. La matière manquante invisible ou "matière noire" pourrait être constituée de particules "exotiques", créées aux tout débuts de l'expansion du cosmos, et suffisamment nombreuses et massives pour représenter une composante prépondérante de l'énergie et de la masse de l'Univers (ce pourraient être les particules requises par les diverses théories d'unification).

Ces particules pourraient être aussi les neutrinos "fossiles" du fond du ciel, produits pratiquement en même temps et en mêmes quantités que la radiation électromagnétique isotrope, s'ils étaient dotés d'une masse non nulle de valeur suffisante. Ce pourraient être encore les particules "supersymétriques", requises, comme contreparties des particules ordinaires, par les théories de supersymétrie. Le "photino" et le "gravitino" (partenaires supersymétriques du photon et du graviton) pourraient, en fonction de la valeur de leur masse (inconnue), avoir un effet sur le taux d'expansion de l'Univers, d'où résultent d'ailleurs des contraintes sur leurs

paramètres, liées, par exemple, à l'abondance de l'hélium.

Ces particules hypothétiques pourraient avoir des effets sur d'autres phénomènes astrophysiques, outre la matière noire : la formation des galaxies, l'évolution des étoiles (par exemple, concernant les scénarios d'explosion des supernovæ).

L'étude des particules de très haute énergie du rayonnement cosmique (protons, rayons γ), produites généralement dans des phénomènes violents de l'Univers tels que l'activité de centres galactiques ou l'explosion de supernovæ, intéresse aussi bien la physique des particules par les énergies en jeu, hors d'atteinte des accélérateurs, que l'astrophysique et la cosmologie. Les particules chargées fournissent des informations sur la proportion exacte d'anti-matière par rapport à la matière (10^{-9} selon les connaissances actuelles), et les rayons γ ouvrent toute une fenêtre sur les corps émettant ces énergies élevées.

L'*astronomie par neutrinos*, complémentaire de l'astronomie optique, à rayons X et à rayons γ , est à l'ordre du jour depuis plus d'une décennie. Outre les neutrinos solaires, elle s'intéresse aux neutrinos de grande énergie provenant de sources lointaines, comme les supernovæ et les noyaux actifs de galaxies. La détection sur Terre, le 24 février 1987, aux Etats-Unis et au Japon, de neutrinos émis par la supernova SN 1987A survenue dans le Grand Nuage de Magellan, à 160 000 années-lumière de distance, a définitivement scellé l'importance de ce nouveau chapitre de l'astronomie et d'une autre rencontre spectaculaire entre astrophysique et physique des particules.

Les ondes gravitationnelles, prédites par la théorie de la relativité générale, à laquelle elles sont ce que les ondes électromagnétiques sont à la théorie de Maxwell, sont en principe produites par un changement rapide de l'intensité d'un champ de gravitation (tel qu'il s'en produirait dans l'explosion de supernovæ donnant lieu à la formation d'étoiles à neutrons ou de trous noirs). Elles ont été mises en évidence dans l'évolution dynamique de quelques systèmes de pulsars doubles par Robert A. Hulse et Joseph H. Taylor (prix Nobel de Physique 1993). Des preuves directes pourraient être obtenues avec des détecteurs suffisamment sensibles, tels ceux des projets franco-italien Virgo et américain Ligo, qui constituent une autre occasion de rapprochements féconds entre les disciplines, et leurs technologies, en particulier sous l'angle de leurs technologies des grands appareillages et des records de précisions de mesure⁶.

A tout cela s'ajoute la physique de la matière ultra-dense ou ultra-énergétique, telle que celle produite dans les collisions d'ions lourds, au cours desquelles se forment des plasmas de quarks et de gluons, où les quarks se trouvent déconfinés (alors que dans la matière nucléaire habituelle, ils sont assujettis à rester à l'intérieur des limites d'un nucléon (proton ou neutron). De tels états, étudiés à l'aide de noyaux accélérés, peuvent correspondre à des situations physiques dans certaines régions localisées de l'Univers (objets très denses, tels que des étoiles à neutrons à cœur de quarks, l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives en trous noirs, des interactions de rayons cosmiques d'énergies très élevées, etc.).

⁶ Sur tous ces sujets, voir, p. ex., R. Bimbot et M. Paty, Vingt cinq années d'évolution de la physique nucléaire et des particules, in J. Yoccoz (éd.), *Physique subatomique: 25 ans de recherche à l'IN2P3, la science, les structures, les hommes*, Editions Frontières, Gif-sur-Yvette, 1996, p. 12-99.

7

L'UNIVERS COMME LABORATOIRE DE PHYSIQUE DES PARTICULES

Les conditions physiques (énergie, distance spatiale) auxquelles correspondent les symétries et invariances des théories des champs d'interaction des particules fondamentales se trouvent être les mêmes que celles rencontrées par la cosmologie à un stade primitif de l'univers, extrapolé à partir de son évolution ultérieure (température, volume, densité d'énergie).

Le scénario initial de l'évolution de l'Univers (le déroulement de l'expansion de l'espace-temps-matière) comprend les toutes premières fractions de seconde (l'unification électrofaible serait réalisée avant 10^{-12} s, la "grande unification" concerne la période antérieure à 10^{-36} seconde environ, et la quantification du champ de gravitation est requise pour la période qui précède la valeur du temps "de Planck", $t < 10^{-43}$ seconde). C'est dans cette période primitive de l'Univers que les champs d'interactions se dissocient, que les états de matière se forment (agrégation des quarks en nucléons...), que se réalise l'asymétrie matière-antimatière et que se détermine la structure fondamentale ultérieure de l'univers (germes des galaxies, etc).

Ces conditions physiques, et l'échelle des correspondances entre la cosmologie des premiers instants et les états d'invariance de la théorie physique des particules déterminent l'Univers comme le laboratoire de physique pour étudier les états extrêmes de la matière. Cet aspect appartient pleinement désormais à la cosmologie, et fait partie des problèmes les plus importants autour desquels elle est appelée à se développer (voir encadré). Les sujets de recherche qui se trouvent à la jonction de la cosmologie et de la physique subatomique figurent en bonne place parmi les objectifs envisagés pour les prochaines années dans chacune de ces disciplines, et notamment en cosmologie : ils sont indispensables pour obtenir une vue cohérente sur la cosmologie tout entière.

Les recherches qui résultent des rapprochements que nous venons d'évoquer illustrent bien l'aspect le plus fondamental de la démarche des physiciens, tendue vers l'obtention d'une représentation conceptuelle des phénomènes de la nature qui corresponde, à chaque étape, à leur unification au moins partielle, d'un degré plus élevé...

Dans cette perspective, l'Univers est bien le laboratoire idéal de physique nucléaire et des particules élémentaires, pour élucider certains des aspects les plus complexes de la structure intime de la matière, hors d'atteinte de l'expérimentation humaine. Le "Big bang" constitue de toute évidence un champ d'observation "unique", dans les deux sens du mot : ses conditions physiques ne seront pas renouvelées...

Encadré:

Le développement de la cosmologie au cours des prochaines années.

La cosmologie est appelée à se développer encore au cours des prochaines années pour plusieurs raisons. La première est la poursuite de l'utilisation du télescope spatial Hubble et d'autres missions spatiales comme ISO (Infrared Space Observatory) et l'accès à des télescopes géants comme le télescope californien de 10 m de diamètre, "Keck" de Hawaï ?, et le Très Grand (Very Large) Telescope (VLT) européen. La seconde est la mise en opération de télescopes moins performants mais effectuant continûment des cartes du ciel dans différents domaines de longueur d'onde. La troisième réside dans la préparation et l'envol prochain de missions spatiales telles que le projet européen "Planck Surveyor", susceptibles de déterminer avec une grande précision les anisotropies du rayonnement radio diffus et, partant, les valeurs des paramètres cosmologiques fondamentaux, comme la densité globale de l'Univers ou la constante cosmologique.

La quatrième est l'espoir de détecter directement les particules non baryoniques qui constituent le gros de la masse de l'Univers. La cinquième consiste à déterminer avec précision la géométrie statique et dynamique de l'Univers dans son ensemble et de ses grandes structures. La sixième concerne tout ce qui a trait aux ondes gravitationnelles. La septième est dans la poursuite de la construction d'un modèle cohérent de physique des particules, rendant bien compte des relations possibles des interactions fondamentales entre elles. La huitième est dans l'élaboration de schémas théoriques conduisant à une meilleure description du "Big bang" lui-même et, si possible, à une unification de la mécanique quantique et de la Relativité Générale... Cette brève liste n'est aucunement exhaustive.

ILLUSTRATIONS

Voir l'article publié.

Idées avant publication :

- 1- Plaque photographique de la découverte du positon (Anderson, 1932), ou du méson π (Powell, Occhialini, Lattes, 1948).
- 2- Photographies de Georges Lemaître et de George Gamow, inventeurs respectivement de l'idée d'atome primitif et de la nucléosynthèse primordiale.
- 3- Photographie du détecteur de neutrinos de Kamiokande (Japon), qui enregistra, en 1987, des interactions de neutrinos issus de la supernova SN 1987A.
- 4- Technique de comptage en physique des particules appliquée en astrophysique (MACHO, EROS: naines brunes).
- 5- Dessin humoristique ou montage photographique: un astronome, A, regarde avec son télescope l'objet O, qu'un physicien subatomiste B regarde avec son microscope.