

Au début de l'Univers

Notre analyse du début de l'Univers, remontant jusqu'à 10^{-10} seconde de l'instant initial, et nos hypothèses au-delà

Maurice JACOB

Physique de l'Univers et physique des particules	p 54
L'Univers aujourd'hui	p 63
L'expansion de l'Univers	p 69
Le bruit de fond radio	p 74
La dynamique de l'Univers	p 78
La prime jeunesse de l'Univers	p 85
La synthèse des noyaux	p 91
Au début de l'Univers	p 94
Conclusions	p 102

Physique de l'Univers et physique des particules

La recherche de l'équilibre dans un monde essentiellement instable et mouvant a toujours été au centre des préoccupations intellectuelles humaines. Au-delà du comportement apparemment chaotique, irréversible et souvent violent du monde il doit, pense-t-on, exister un ordre et la poursuite de cet ordre a sans cesse été le moteur de la recherche scientifique, comme celui, beaucoup plus ancien, de recherches et de formulations philosophiques et religieuses. Le Djed de l'Égypte antique, pilier stylisé dans l'iconographie sacrée, était régulièrement redressé avec détermination au milieu d'un monde qui le faisait vaciller par ses secousses incontrôlables. Il symbolisait cet ordre nécessaire à la vie et périodiquement retrouvé. De nombreuses civilisations ont placé l'ordre dans le ciel. Son mouvement répétitif et, semblait-il, immuable, insensible aux perturbations quotidiennes du cadre terrestre de l'existence humaine, était un symbole d'ordre et de stabilité. N'est-il pas curieux de noter à ce sujet que l'apparition des supernovae, ces astres a priori nouveaux et parfois bien visibles, qui viennent de temps en temps troubler l'ordre cosmique, ait été si souvent ignorée des chroniques, au point que l'information historique sur un phénomène aussi spectaculaire et longtemps inexplicable, soit si fragmentaire. Ce désordre dans l'ordre sidéral devait gêner au point de se voir rejeté comme un événement sans importance sitôt disparu du regard.

Un ordre cosmique, atteint avec un certain succès aujourd'hui, se trouve résumé dans les lois physiques. Les phénomènes observés sont multiples, changeants et parfois surprenants. Ils obéissent cependant à des lois dont le caractère universel et immuable, mais aussi la simplicité, frappent notre imagination. Beaucoup plus que l'équilibre, c'est le mouvement, la dynamique, que l'on peut comprendre, et parfois contrôler, grâce au caractère prédictif des lois physiques, qui nous fascine aujourd'hui. L'équilibre devient au contraire synonyme d'immobilisme et de mort. La vie ne peut d'ailleurs apparaître et se maintenir que dans une situation hors d'équilibre. Le ciel, qui apparaissait autrefois comme une référence immuable, devient aujourd'hui un objet dynamique et passionnant par son évolution irréversible.

Il faut cependant pour apprécier tout cela, dépasser largement l'échelle humaine. Il est nécessaire de considérer des temps qui se chiffrent en milliards d'années et des distances qui se chiffrent en millions de milliards de milliards de mètres. C'est cependant le propre des instruments qui prolongent nos sens et de notre description scientifique du monde de pouvoir nous entraîner avec une certaine assurance bien au-delà de ce que nous pouvons voir directement de nos yeux et bien au-delà des limites de l'expérience quotidienne.

En plongeant dans la structure de la matière jusqu'au milliardième de milliardième de mètre, nous nous sommes familiarisés avec des acteurs : quarks, leptons, gluons, photons... et avec les règles des jeux qu'ils suivent, les lois physiques auxquelles ils sont soumis et qui contrôlent les interactions qu'ils manifestent entre eux. Ceci va nous permettre de mieux comprendre la dynamique de l'Univers et de remonter dans le temps, vers ce qui apparaît comme l'instant initial, un instant où l'Univers est né d'une explosion gigantesque mettant en jeu des densités, des températures et des énergies par particule, qui sont d'autant plus élevées que l'on essaye de s'en approcher. C'est le «Big Bang» de la cosmologie moderne. Deux découvertes relativement récentes y jouent un rôle clé. La première est celle de l'expansion de l'Univers, dont nous sommes conscients depuis les observations de Edwin Hubble sur le mouvement des galaxies lointaines en 1927. La seconde est celle du bruit de fond radio qui remplit l'Univers de façon homogène. L'Univers baigne dans un rayonnement comme celui que l'on trouve à l'intérieur d'un four. Dans le cas de l'Univers le four serait cependant à très basse température, une température de 2.7 K, donc très proche du zéro absolu. Ce rayonnement fut découvert par Arno Penzias et Robert Wilson, en 1964. A partir de ces deux données de base, nous pouvons utiliser les lois de la physique pour remonter le cours du temps et décrire ce qu'à dû être l'aspect de l'Univers à des époques de plus en plus reculées. On déduit ainsi l'existence de l'explosion initiale. Elle s'est produite il y a environ 20 milliards d'années (18+3, disons). Ce «Big Bang» s'est terminé par un gigantesque éclair de lumière jaune, dont le bruit de fond radio est le fossile refroidi, environ 20 milliards d'années plus tard. Ce scénario nous apparaît aujourd'hui comme in-

contournable et nous allons le suivre sous ses phases successives. Il est riche en prédictions dont certaines sont vérifiables et vérifiées à l'aide des instruments dont nous disposons. Pour d'autres, nous n'avons pas encore les instruments adéquats. Une des prédictions vérifiées la plus brillante est l'abondance relative des éléments légers. L'Univers contient surtout de l'hydrogène. En seconde position on trouve l'hélium, qui représente environ le quart de la masse totale. Tous les autres éléments ne sont présents que dans des proportions quasi infinitésimales. Cela est vrai en moyenne mais ne correspond pas à notre terre où abonde au contraire le fer. Le fer est la cendre cosmique car le noyau de fer a la plus grande énergie de liaison par nucléon. C'est ce que la nature fait de plus compact au niveau nucléaire. Bien des événements et en particulier l'explosion d'une super-nova ont dû précéder la formation de la terre. L'abondance relative de l'hélium peut paraître a priori surprenante. Certes les étoiles brûlent l'hydrogène pour en faire de l'hélium. En plusieurs milliards d'années elles n'ont cependant pu produire toutes ensemble qu'une très faible fraction de l'hélium présent. Le «Big Bang» explique la genèse de l'hélium. Il implique aussi l'existence d'un important rayonnement radio résiduel.

Remontant le cours du temps, nous allons rencontrer des situations de plus en plus extrêmes de par les températures qui vont dans une large mesure les caractériser. Nous allons atteindre des conditions si exceptionnelles que nous ne connaissons pas encore les lois de la physique qui y prévalent. Ce que nous avons appris en physique des particules au cours de la dernière décennie doit être utilisé pour remonter de façon crédible jusqu'à 10^{-10} s. de l'instant initial. C'est alors dans un Univers de quarks, de leptons, de W et de Z, aussi bien que de photons. L'instant initial est défini comme celui où la densité et la température, dans la mesure où ces concepts garderaient un sens, deviendraient infinis.

Cette précision dans le temps peut sembler irréaliste compte tenu de l'incertitude encore importante, et juste avouée, sur l'âge, qui est de l'ordre de 20 milliards d'années. La

* Nous désignons par le signe \sim une proportionnalité et par le signe \simeq une égalité approximative. (cf p.57)

contradiction n'est cependant qu'apparente. Ce sont en effet les rapports des temps qui comptent beaucoup plus que le temps lui-même. Quand on parle de 10^{-10} seconde, c'est par rapport à 10^{-8} s, disons, un temps 100 fois plus long. La température est alors tombée d'un facteur 10 par rapport à ce qu'elle était à 10^{-10} s. La physique qui prévaut, et tout ce qui se passe a, de ce fait, énormément changé de nature. Il n'y a plus ni W ni Z. Il s'agit déjà d'un autre monde. Nous verrons plus tard, qu'au début de l'Univers, la température a chuté comme la racine carrée du temps écoulé, ce que nous écrirons $T \sim t^{-1/2}$ * où T est la température et t le temps mesuré à partir de l'instant initial. De même les choses vont beaucoup changer en passant ensuite de 10^{-8} à 10^{-6} seconde, et ainsi de suite.

Si nous appliquons ce même facteur 100 au temps présent, en remontant vers le passé, nous nous trouvons environ 200 millions d'années après le «Big Bang». L'Univers est 10.000 fois plus dense qu'aujourd'hui et les galaxies commencent seulement à s'individualiser. Il s'agit aussi d'un autre monde, mais nous l'admettons intuitivement sans problème. 20 milliards d'années est un temps énormément long ! C'est un temps au cours duquel la Nature a réalisé et développé des structures de plus en plus complexes pour lesquelles ce sont souvent les différences de température ou les différences de densité dans l'Univers qui jouent le rôle clé. Pour le physicien, chaque facteur important (10, disons) dans la baisse de la température moyenne peut apporter un changement très important des propriétés globales. Au début, ces facteurs vont apparaître régulièrement au gré des facteurs 100 de temps et vont vite entraîner bien au-delà de l'expérience quotidienne. Certes la vie propre des acteurs, qu'ils s'agissent du neutron, dont la vie moyenne est de l'ordre de 1000 s, ou d'une étoile moyenne, dont la durée de vie est de l'ordre de 10 milliards d'années, entre en jeu dans la reconstitution de l'histoire, mais l'aspect général de l'Univers évolue lui au rythme des rapports de temps dans la mesure où temps et température sont directement liés. On peut donc parler du premier dix milliardième de seconde d'un Univers dont nous ne connaissons l'âge qu'à quelques milliards d'années près.

A 10^{-10} s du «Big Bang», la température est de l'ordre de 10^{15} K (un million de

milliards de degrés). L'énergie moyenne par particule à cette température est de l'ordre de 100 GEV. Nous repérerons souvent ces températures énormes par l'énergie moyenne par particule, la relation entre température et énergie moyenne étant une simple proportionnalité. Nous comprenons aujourd'hui la physique à cette énergie. C'est le domaine des W, Z et des jets hadroniques si clairement associés aux quarks et aux gluons. C'est le monde des interactions électrofaibles et de la chromodynamique. Nous savons donc déjà assez bien ce qui se passe dans ces conditions a priori extrêmes et donc ce qui a dû se passer lorsque l'Univers avait 10^{-10} s.

On saisit une fois de plus sur cet exemple la grande unité de la physique. Pour comprendre la structure de la matière à une précision de 10^{-18} m, il est nécessaire de pouvoir concevoir et tester une formulation théorique des interactions entre particules à des énergies de l'ordre de 100 GEV. La température, ou l'énergie par particule, augmentant à mesure que l'on s'approche de l'instant initial, ceci nous permet de décrire, avec une bonne assurance encore, ce qui se passait 10^{-10} s après l'instant initial. Expérimentant à des énergies de l'ordre de 1000 GEV (1 TEV) et comprenant ce qui se passe dans ces conditions, nous pourrions décrire la structure de la matière à la précision de 10^{-19} m, un domaine sans doute riche en surprises, comme nous l'avons souligné. Nous aurions alors sans doute une description crédible du début de l'Univers 10^{-12} s après le «Big Bang». Nous tâcherons en fait d'aller jusqu'à 10^{-44} s mais ce ne sera qu'à l'aide d'une formulation théorique encore bien spéculative. Nous partirons d'abord de 10^{-10} s pour descendre le cours du temps par facteurs 10 successifs, cela à l'aide d'une physique que nous connaissons. Nous tâcherons ensuite de remonter le cours du temps par de nombreux facteurs 10, mais en utilisant une physique qui ne nous apparaît encore que comme plausible. Nous parlerons aussi du futur mais de nombreuses incertitudes subsistent quant au futur lointain car nous ne connaissons pas encore assez précisément certains paramètres actuels qui jouent un rôle clé. Le soleil est au milieu de son existence comme étoile brillante et doit entraîner la terre dans une aventure destructrice d'ici 5 milliards d'années.

Nous avons ainsi souligné une interface évidente entre physique des particules et cosmologie, mais, de façon plus générale, nombreux sont les domaines d'étude où physique des particules et astrophysique ne peuvent aujourd'hui avancer qu'ensemble. N'est-il pas d'ailleurs remarquable que pour comprendre l'évolution d'une étoile, il faille introduire la constante de Newton, G , qui contrôle la force de gravitation, ce qui est bien naturel, mais aussi la constante de Planck, h , propre a priori aux seuls phénomènes atomiques où mettant en jeu des structures encore plus fines. N'est-il pas remarquable que des objets célestes nés de la physique quantique, comme les étoiles à neutrons aient trouvé avec la découverte des **pulsars** une confirmation éclatante. C'est la physique nucléaire et la physique des particules qui permettent de comprendre, comment ces objets naissent de l'explosion d'une supernova, destin inéluctable d'une grosse étoile (notre soleil étant une étoile très moyenne typique) en permettant la formation des éléments lourds dont notre terre est faite. C'est la masse élevée du W qui permet la combustion relativement lente de l'hydrogène en hélium dans une étoile, les interactions faibles, qui doivent agir pour transformer un proton en neutron, étant encore très faibles aux énergies de quelques MEV par particule que demandent pour se manifester les réactions nucléaires. C'est ce seuil d'énergie qui définit la température au centre de l'étoile. Il est énorme, comparé au seuil d'énergie d'une réaction chimique mais très faible comparé à la masse du W .

Nous allons poursuivre un double but. L'un est de retracer l'évolution passée de l'Univers, telle que nous la connaissons aujourd'hui grâce aux progrès effectués en astrophysique bien sûr mais aussi en physique nucléaire puis en physique des particules. L'autre est de souligner l'importance de l'interface actuelle entre physique des particules et astrophysique, insistant ainsi sur de nombreux problèmes qui restent à résoudre et qui semblent solubles mais pour lesquels la compréhension du cosmos demande une descente encore plus profonde au coeur de la matière. Cet échange est d'ailleurs loin d'être à sens unique, comme les quelques exemples déjà donnés ont pu le laisser penser.

L'Univers nous montre des accélérateurs cosmiques. Ils ont noms Cygnus-X-3,

Hercule-X-1. Ils inondent le ciel de particules de très hautes énergies, bombardant la terre avec des flux mesurables jusqu'à 100 TEV. Ceci implique peut être des modes d'interaction que nous ne connaissons pas encore. La physique des particules, telle que nous la pratiquons aujourd'hui est d'ailleurs née de l'étude des effets des rayons cosmiques, un bombardement avec des flux respectables de particules ayant des énergies de l'ordre du GEV et au-delà. Nous aimerions bien savoir comment la nature réalise à grande échelle des machines qui nous sont très pratiques sur terre de par les flux importants et contrôlables qu'elles fournissent mais qui coûtent cher aux contribuables. Il y a sûrement des astuces à glaner dans le ciel. Il va sans dire cependant que l'observation et l'étude de Cygnus-X-3 ou de Hercules-X-1, pour ne prendre que ces deux exemples, demande aussi de gros instruments qui coûtent aussi cher !

Donnons deux exemples actuels en physique des neutrinos, ces particules dont la physique nucléaire, puis la physique des particules ont permis de postuler l'existence, puis de comprendre les propriétés. Le premier est l'étude des neutrinos solaires. Ils trouvent leur origine dans les réactions nucléaires à l'intérieur du soleil qui permettent la production d'énergie par fusion de l'hydrogène en hélium à la suite de processus multiples mais tous générateurs de neutrinos. Les neutrinos sont produits dans des réactions mettant en jeu l'échange de W. Les interactions de ces neutrinos de relativement faible énergie sont si faibles qu'ils s'échappent facilement. Ils nous donnent de ce fait une image du centre du soleil alors que la lumière que nous recevons provient de la surface. L'énergie des photons émis au centre du soleil n'a qu'un cheminement long et lent jusqu'à la surface car la densité est telle que les photons sont absorbés à peine émis, d'autres étant réémis pour être absorbés à leur tour. La **figure 1** apporte une note humaine à la physique en nous montrant le flux de neutrinos solaires prévu (théorie) et mesuré (expérience) en fonction du temps. Il ne s'agit très probablement pas d'une évolution solaire ! Cette variation traduit au contraire l'évolution de nos idées et de nos moyens de détection. Il est bien difficile en effet de capter ces neutrinos, qui traversent la terre entière avec une probabilité extrêmement faible d'interagir. Il est aussi peut-être encore présomptueux de vouloir décrire avec précision leur

production et leur voyage à travers le soleil, puis entre le soleil et nous, avec la physique que nous connaissons. Ne peut-on même pas supposer dans le cadre des idées théoriques actuelles que certains de ces neutrinos électroniques se transforment en cours de route en neutrinos d'un autre type par un mode d'interaction dont nous ne pouvons aujourd'hui que

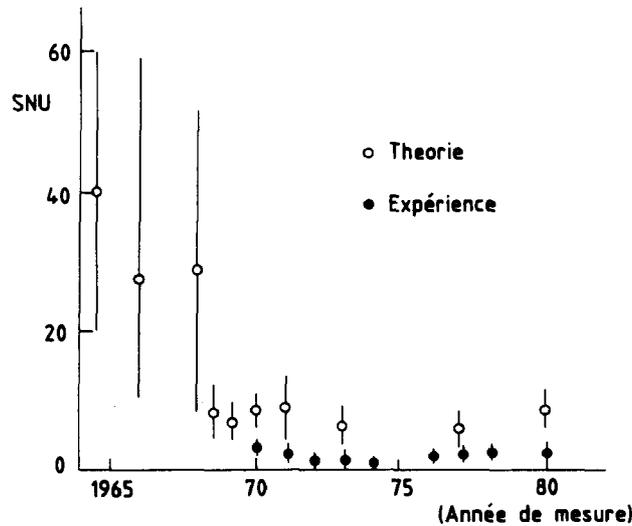


Figure 1
Evolution des flux de neutrinos solaires

supposer l'existence ? Ils échapperaient dans ce cas à un détecteur qui, spécifique pour être efficace, ne capte que les neutrinos électroniques. Le désaccord qui persiste est au centre de recherches actuelles, fondamentales, en physique des particules comme en astrophysique. La **figure 2** illustre l'autre exemple. Elle montre l'éclair de neutrinos observé au Japon lors de l'explosion de la supernova (SN 1987 A) qui s'est produite en février 87 (mais en fait il y a 180.000 ans) dans une galaxie voisine de la nôtre, le grand nuage de Magellan. On s'attendait à ce que l'implosion extrêmement rapide de l'étoile géante à bout de combustible donne un éclair de neutrinos dont l'intensité était prévisible. Cet éclair de neutrinos est suivi de l'éclat de lumière spectaculaire et prolongé bien qu'éphémère à l'échelle humaine, caractéristique d'une supernova. Le grand nuage de Magellan n'étant visible que dans l'hémisphère austral et le détecteur étant au Japon, où il avait été construit pour essayer de mettre en évidence l'instabilité du proton, les neutrinos ne sont détectés qu'après avoir

traversé la terre, mais ce n'est qu'une bien faible perturbation pour eux. Les choses se sont passées comme prévues mais pas tout à fait et, là aussi les observations et leurs analyses sont l'objet de débats passionnés. Lorsque l'enveloppe cessera de masquer l'intérieur, à l'échelle de quelques mois, nous allons être les témoins de la naissance d'une étoile à neutrons, ou d'un **trou noir**. C'est une époque passionnante pour de nombreux physiciens issus de la physique des particules comme de l'astrophysique. La limite supérieure pour la masse du

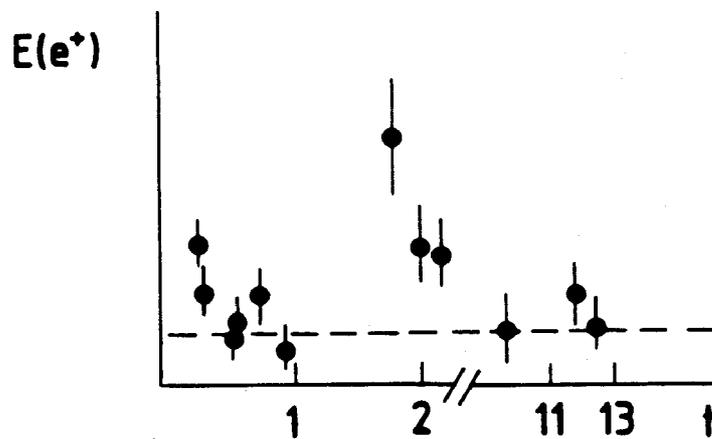


Figure 2

Eclair de neutrinos accompagnant la supernova SN 1987 A

neutrino que l'on peut déduire de l'observation de cet éclair de neutrinos est comparable à celle atteinte par les mesures les plus précises en physique nucléaire. Elle est de l'ordre de 20 eV. Si les théories de grande unification n'avaient pas soulevé la question de l'instabilité du proton, le détecteur n'aurait pas été là pour saisir l'éclair de neutrinos. Encore un exemple de l'unité de la physique et du large front d'attaque nécessaire à la recherche.

La communauté d'intérêts entre physique des particules et astrophysique est telle que l'on voit apparaître une nouvelle discipline : la physique astroparticulaire que pratiquent des physiciens également à l'aise avec la dynamique des quarks et celle des milieux stellaires. L'ESO, qui exploite le grand observatoire européen dans l'hémisphère austral et anime une collaboration européenne importante en astronomie et en astrophysique organise tous les deux ans, en collaboration avec le CERN, un symposium centré sur

les sujets d'intérêt commun en physique des particules et en astrophysique. Deux d'entre eux ont déjà eu lieu et un troisième est en préparation. Bien souvent, plus tard, en parlant de l'Univers et des problèmes que son étude soulève, nous verrons comment la physique des particules peut aider l'astrophysique et vice-versa.

Nous allons voir bien sûr comment cosmologie et physique des particules sont étroitement liées. Ceci nous entraînera bien avant 10^{-10} s vers une physique encore spéculative mais où des idées issues de la physique des particules sont en plein développement. C'est comme cela que nous plongerons de façon bien audacieuse encore jusqu'à 10^{-44} s. Les énergies par particules sont alors de 10^{19} GEV. Le début de l'Univers est la seule expérience dont on puisse parler à ce niveau d'énergie ! L'Univers de par ses paramètres actuels et ce qu'ils nous enseignent sur son passé offre ainsi une contrainte aux spéculations théoriques dans un domaine inexploré par l'expérience et inexplorable pour longtemps. L'existence de l'Univers, tel qu'il est, devient un test auquel chaque nouvelle théorie doit satisfaire et la physique des particules, au-delà du domaine visible à l'aide des grands accélérateurs actuels, dispose ainsi d'une expérience unique, passée, mais riche d'enseignements.

L'Univers aujourd'hui

L'Univers dont nous allons essayer de décrire l'histoire est un «nouveau monde» découvert dans un passé relativement très proche, grâce à un prodigieux développement de nos moyens d'observation.

Ce qui frappe en premier lieu c'est son ampleur. Le soleil à 150 millions de kilomètres de nous peut sembler déjà bien lointain. Les limites de l'Univers visible, dont nous recevons aujourd'hui pour la première fois les signaux émis il y a environ 20 milliards d'années, sont cent millions de milliards de fois plus éloignées et tout cet espace immense

semble également peuplé, le peuplement correspondant à des galaxies. Notre soleil n'est qu'un membre anodin d'une galaxie dont nous voyons à l'oeil nu la tranche dans l'accumulation d'étoiles que représente la voie lactée. Notre galaxie comprend 10^{11} (cent milliards) d'étoiles. Elle a une forme lenticulaire gonflée au centre, avec un diamètre de l'ordre de 100.000 années lumière. Notre soleil y a une position banale, assez périphérique et proche du plan équatorial. Notre voisine Andromède nous donne une idée assez juste du spectacle qu'offre notre galaxie vue de l'extérieur. On la voit sur la **figure 3**. Andromède est un peu plus grosse que la voie lactée. Elle comprend environ quatre cents milliards d'étoiles. Elle est à 3 millions d'années-lumière de nous, 30 fois la largeur de notre galaxie.

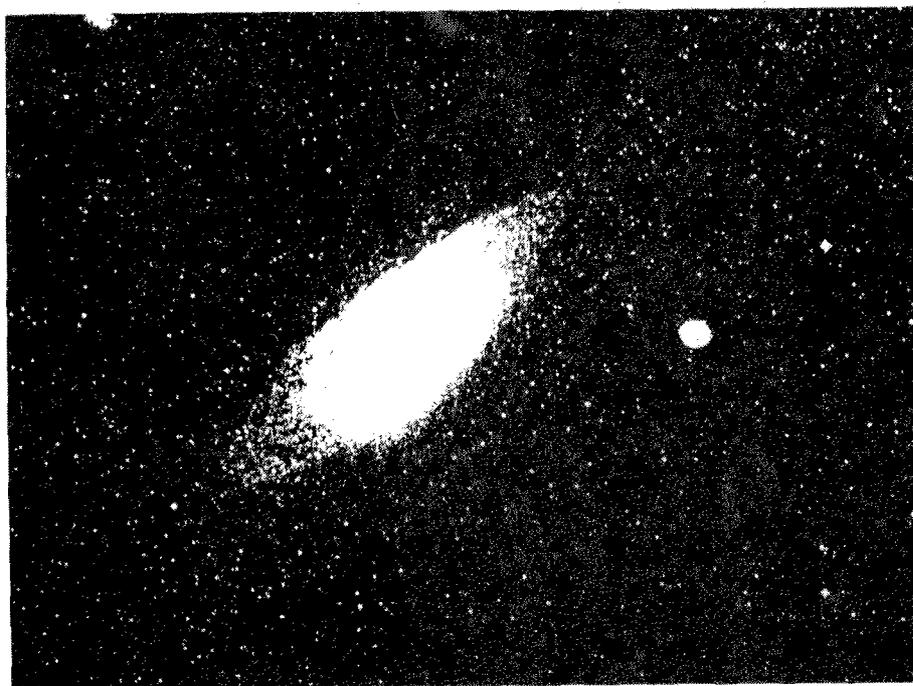
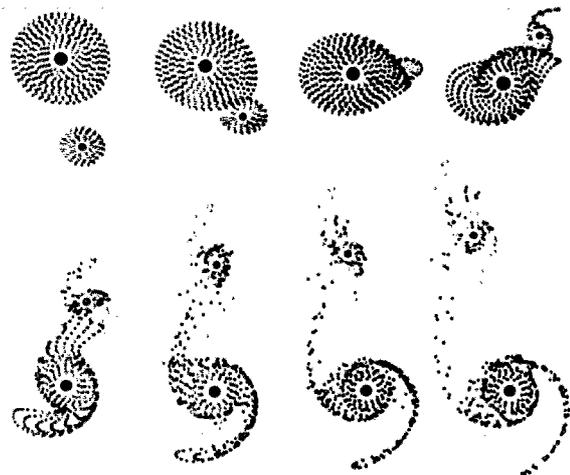
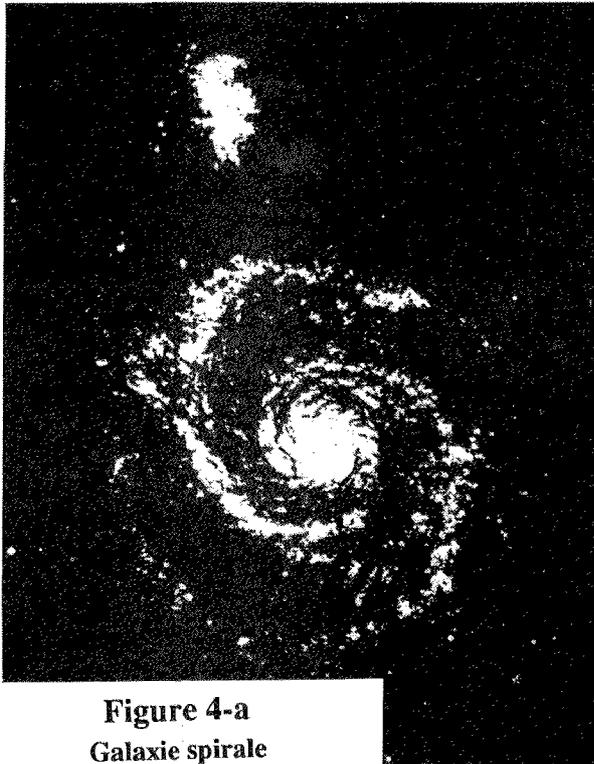


Figure 3
Une galaxie : Andromède

Les galaxies sont clairement séparées les unes des autres mais quand même relativement proches par rapport à leurs tailles. Elles entrent du coup parfois en collision et ce sont des spectacles dont nous sommes témoins en regardant le ciel. Il y a de l'ordre de 10^{11} galaxies dans l'Univers visible, s'étendant jusqu'à 20 milliards d'années-lumière de nous. Que d'étoiles au total, 10^{22} ! Mais quand même environ trente fois moins que de molécules d'eau dans un centimètre -cube. Il y a aussi seulement quatre fois moins de neurones dans le

cerveau de l'homme que d'étoiles dans une galaxie. Ces nombres énormes ne doivent donc plus nous surprendre. Il faut néanmoins reconnaître que notre vue du ciel a en quelque sorte explosé en quelques décennies, cela grâce à un grand développement de nos moyens d'observation. A l'échelle de l'Univers les galaxies jouent le rôle de particules, non élémentaires certes, mais bien individualisées. Nous ne connaissons encore qu'assez mal la structure interne des galaxies. La majeure partie d'entre elles (65%) ont une structure spirale qui, lorsque la galaxie est vue selon son axe, offre un magnifique spectacle. C'est ce que montre la **figure 4-a**. La **figure 4-b** montre comment les bras peuvent apparaître au cours de la collision périphérique de deux galaxies de formes plus ramassées. Il s'agit d'un gigantesque effet de marée que l'on peut reproduire par simulation sur ordinateur. Il



répartit la matière dans les bras où la densité permet la formation d'étoiles visibles, mais aussi au delà des bras, les dimensions de la galaxie s'étendant en fait bien au-delà des bras, soit bien au-delà de la partie visible. La matière non visible à l'aide d'un télescope parce qu'insuffisamment chaude pour donner de la lumière visible peut le devenir dans le domaine des ondes radio. En étudiant le mouvement de cette matière périphérique, visible

en radiofréquences, on déduit que la masse globale d'une galaxie est 5 à 10 fois supérieure à celle que l'on peut attribuer aux étoiles visibles qui la constituent. La densité de matière à l'intérieur d'une galaxie est de l'ordre d'un million de protons par mètre cube. Sachant que l'énergie de masse d'un proton est de l'ordre de 1 GEV, nous mesurerons systématiquement les densités en termes d'énergie. Ceci donne 10^6GEV/m^3 . La densité moyenne de l'Univers, avec ses multiples galaxies mais aussi les grands espaces qui les séparent est beaucoup plus faible. Elle est de l'ordre de 1 GEV/m^3 . Il s'agit là de la matière reconnue dont on peut mesurer les effets soit par la lumière des étoiles, soit par les mouvements observés qui répondent à l'attraction gravitationnelle des masses voisines. Cette densité moyenne n'est encore connue qu'avec une erreur importante. Elle pourrait être 10 fois plus grande que la valeur donnée de 1 GEV/m^3 . C'est une des grandes questions actuelles.

Les galaxies sont extrêmement nombreuses. La **figure 5** donne une projection plane où toutes les galaxies visibles d'une région du ciel sont chacune représentée par un point lumineux. Il y en a là un million. Des structures apparaissent et l'analyse de la

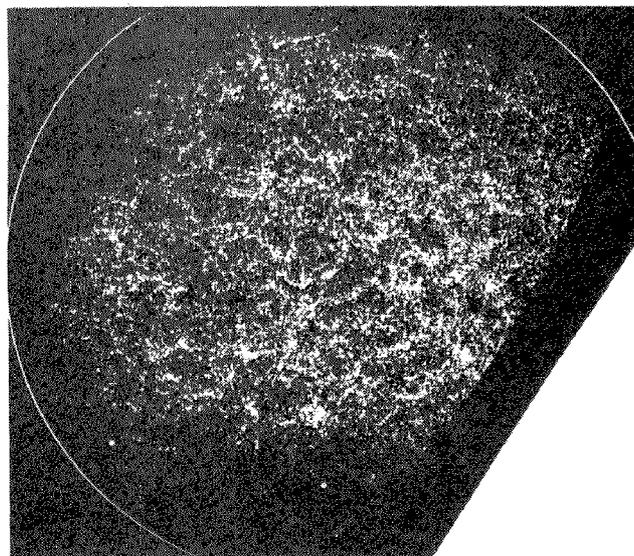


Figure 5

Les galaxies visibles dans une région du ciel

population galactique permet de les préciser. La répartition est loin d'être uniforme, ce qui est d'ailleurs naturel dans la mesure où les galaxies s'attirent l'une l'autre et ont ainsi

tendance à former des amas. Il semble cependant y avoir beaucoup plus que ça. De même pour l'étude de la structure de la matière, chaque niveau de structure correspond à une échelle particulière d'observation. L'unité de mesure couramment utilisée est le PARSEC. C'est la distance à laquelle l'orbite terrestre autour du soleil est vue sous un angle de une seconde d'arc. C'est une unité qui s'introduit de façon naturelle dans la mesure de la distance des étoiles proches que l'on voit bouger sur le fond des étoiles plus lointaines au cours de l'année, alors que la terre tourne autour du soleil. Un PARSEC vaut 3.26 années-lumière, unité plus imagée. Une année-lumière vaut 10^{16} m.

L'étoile la plus proche de nous est à une distance de l'ordre de 1 PARSEC (ps). La galaxie a un diamètre de l'ordre de 10 kilo-ps (10^4 ps). Notre galaxie fait avec Andromède (figure 3) partie d'un groupe de galaxies, le groupe local, qui manifeste son entité à l'échelle du méga-ps (10^6 ps). Un groupe comprend de l'ordre de 10 galaxies. Les groupes forment des amas à l'échelle de 3 à 5 méga-ps. Ces amas peuvent comprendre jusqu'à 1000 galaxies. Nous sommes relativement proches de l'amas de la Vierge (Virgo) vers lequel nous «plongeons» en ce moment à la vitesse de 200 km/s. Il est à 10 méga-ps de nous, 1000 fois la largeur de notre galaxie. A l'échelle de 10 à 50 méga-ps les amas se groupent en super-amas, que séparent des vides, comme si l'Univers avait une structure de bulles en roulement contigu l'une sur l'autre, la matière rassemblée dans les galaxies étant concentrée à la surface contigüe des bulles. On atteint ainsi la limite des structures actuellement identifiées. L'univers visible dont nous pouvons capter des signaux, s'étend jusqu'à 6 giga-ps ($6 \cdot 10^9$ ps).

Du système solaire aux super-amas, on obtient ainsi une riche succession de structures qui apparaissent tour à tour à mesure que l'on prend de plus en plus de recul. Cet énoncé en terme de méga-ps peut cependant sembler un peu abstrait. Reprenons le avec une image plus saisissante, en construisant un modèle de taille humaine. Nous donnerons à notre galaxie la taille de 1 cm. La distance terre-soleil ne serait alors que de 10^{-10} m, soit la taille de l'atome d'hydrogène.

A cette échelle Andromède est aussi une lentille de l'ordre de 1 cm à 1 m de la voie lactée. C'est là tout autour à une distance de l'ordre du mètre que se trouve le groupe local. Allons jusqu'à 10 m. Nous avons l'amas de la Vierge. Les limites de l'Univers visible sont elles à 6 km. A partir de 2 km, et visibles jusqu'à 5 km, nous trouvons les **quasars** au centre sans doute de jeunes galaxies dont une partie disparaît dans un trou noir avec un rayonnement énorme d'énergie.

La vue n'est pas statique. Dans notre voisinage d'abord, tout bouge, mais très lentement à l'échelle de notre modèle. Notre galaxie «plonge» vers l'amas de la Vierge à 200 km/s mais, sur le modèle, avec Virgo à 10 m, cela ne représente que 10^{-12} m par jour, soit quatre fois la taille de l'atome d'hydrogène par an ! Il faut un milliard d'années à cette vitesse, pourtant énorme à notre échelle, pour franchir une distance raisonnable sur notre modèle, 30 cm, disons. Nous nous précipitons aussi, mais selon une direction différente vers un super-amas celui de Hydra-Centaurus, et cela à la vitesse de 460 km/s. Tout ceci correspond à une vitesse globale de notre terre par rapport à ce coin d'Univers de 600 km/s, à quoi s'ajoute ou se retranche, au gré des saisons, jusqu'à 30 km/s, correspondant au mouvement de la terre autour du soleil. A plus grande échelle, on remarque aussi un mouvement d'ensemble spectaculaire. Tout gonfle ! Les distances entre chaque objet augmentent avec le temps et cela d'autant plus vite que ces objets sont éloignés les uns des autres. On peut comparer ce mouvement d'ensemble à celui de petites taches placées sur un ballon que l'on gonfle. Elles représenteraient les galaxies. Ceci est illustré par la **figure 6**. La vitesse actuelle d'éloignement de deux objets distants de 1 Méga-ps, 10 m à l'échelle de notre modèle, est de l'ordre de 500 à 1000 km/s. C'est une vitesse comparable aux vitesses relatives propres à notre mouvement vis-à-vis de nos voisins. Cela rend d'autant plus difficile la mesure du mouvement d'ensemble. Il est cependant bien présent même si les vitesses qu'il met en jeu ne sont pas encore connues de façon précise. Il devient omniprésent lorsque l'on prend plus de recul. Au niveau des quasars les plus proches, à 2 km sur notre modèle, la vitesse est 200 fois plus élevée qu'au niveau de l'amas de la Vierge.

C'est près de 4000 fois la distance terre-soleil qui est gagnée chaque année. Sur notre modèle, c'est 400 m en un milliard d'années. Au-delà des mouvements relatifs entre groupes et amas de galaxies qui vont en tous sens, l'Univers est en expansion. Dans un cas il s'agit d'un mouvement relatif dans un espace fixe, quelque chose de familier. Dans l'autre

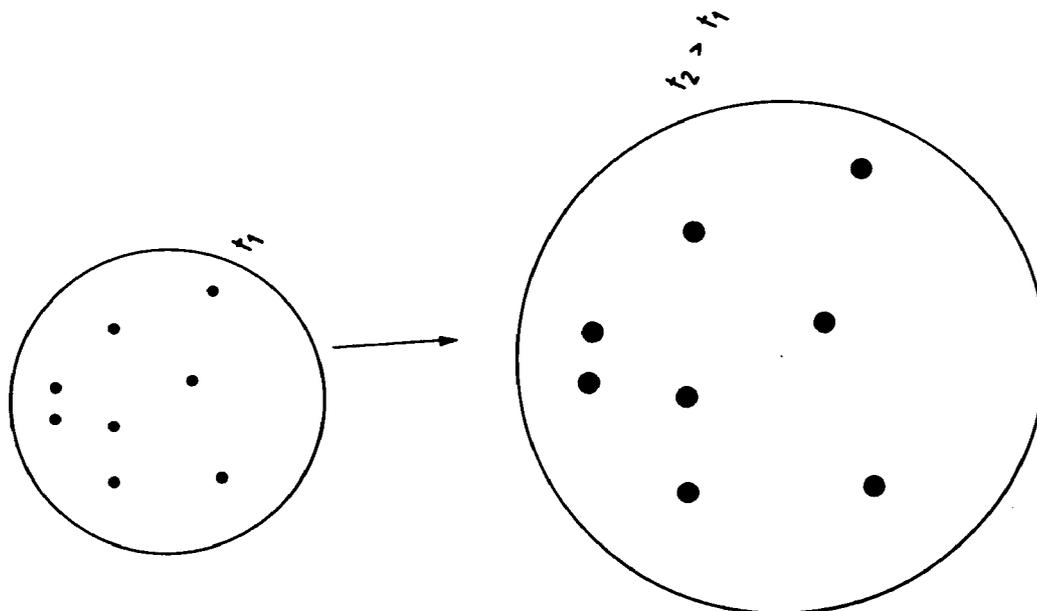


Figure 6
Représentation du mouvement d'ensemble des galaxies

cas, il s'agit d'un gonflement de l'espace, quelque chose qui n'est pas du tout intuitif et que nous ne pouvons apprécier que dans le cadre d'une théorie où l'espace n'est pas immuable. C'est le cas de la Relativité Générale. Remontons le cours du temps en inversant par la pensée le sens des vitesses. A l'échelle de quelques milliards d'années, des objets, très éloignés de nous aujourd'hui deviennent singulièrement proches.

L'expansion de l'Univers

La découverte de l'expansion de l'Univers a 60 ans. Elle se traduit de façon très simple par la loi de Hubble : la vitesse d'éloignement relative entre deux objets éloignés (en

pratique deux galaxies) est proportionnelle à leur distance. Nous ajoutons «éloignés» pour pouvoir négliger les multiples mouvements «locaux» dont nous avons parlé, mais en pratique, il se combinent bien sûr au mouvement d'ensemble. La figure 7-a a une valeur historique. C'est une des premières preuves de l'expansion de l'Univers. Chaque galaxie étudiée y correspond à un point. On y voit en abscisse la distance, mesurée par rapport à nous en Méga-ps, et en ordonnée, la vitesse, mesurée par rapport à nous en km/s. Il y a une corrélation évidente. Elle n'est pas parfaite car les multiples mouvements locaux interfèrent avec le mouvement d'ensemble. Leur importance n'était d'ailleurs pas encore connue à l'époque de la découverte de l'expansion de l'Univers et les distances couvertes sur la figure sont même loin encore d'atteindre l'amas de la Vierge, région familière aujourd'hui. Il fallait la perspicacité de Edwin Hubble pour dégager la loi qui porte son nom. La vitesse d'éloignement par unité de distance, traduite par la droite moyennant entre les points, serait 500 km/s/Méga-ps. C'est la constante de Hubble. La valeur actuellement admise est plus faible et cela par un facteur 5 à 10. Il y a eu certes des réajustements successifs des valeurs depuis 1927 mais l'existence du phénomène n'a, elle, jamais été controversée. La figure 7-b corrige l'information apportée par la figure 7-a en ajoutant elle aussi une touche humaine. Elle montre la variation de la constante de Hubble H_0 en fonction du temps, entre la découverte de l'expansion de l'Univers, en 1927, et les mesures actuelles. Rien de dramatique n'est bien sûr arrivé à l'Univers mais les mesures de distances se sont énormément améliorées et ceci a entraîné d'importantes corrections.

Nous ne pouvons en parler en détail. Ce sont des mesures difficiles. Il faut procéder par recouvrements successifs, en identifiant des objets semblables (étoiles variable, plus près, supernovae plus loin...) dans des galaxies différentes et déterminer le rapport des distances par l'inverse de la racine carrée des flux reçus. Il faut corriger pour l'absorption à travers les masses gazeuses traversées. Il est naturel que les distances mesurées aient pu changer. Elles ont en fait été corrigées vers le haut, et la constante de Hubble a corrélativement décré d'autant. Une incertitude importante persiste encore. On peut dire aujourd'hui que

H_0 vaut de 50 à 100 km/s/Méga-ps. Sa mesure plus précise est une des grandes questions actuelles.

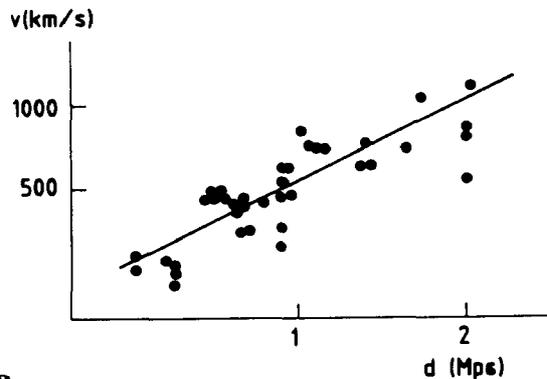


Figure 7-a

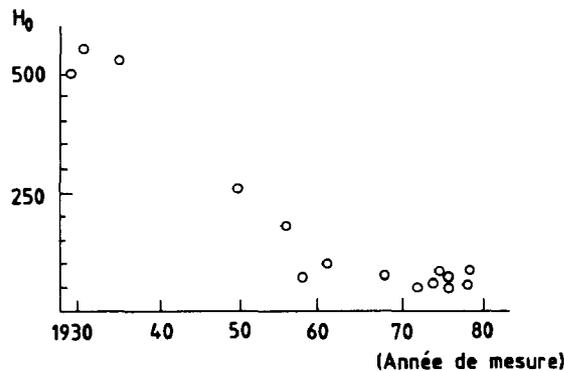


Figure 7-b

Graphiques à l'appui des preuves de l'expansion de l'univers

Les mesures de vitesses sont plus directes et faciles. La lumière émise par un objet qui s'éloigne est reçue avec une fréquence différente de la fréquence d'émission. C'est un phénomène bien connu qu'on appelle effet Doppler. Pour la lumière visible il y a déplacement vers le rouge et cela d'autant plus que le rapport v/c s'approche de 1. La vitesse de l'objet est désignée par v et c est la vitesse de la lumière. Désignant par λ_r et λ_e les longueurs d'onde de réception et d'émission de la même lumière, on écrit :

$$\lambda_r / \lambda_e = 1 + z$$

et tant que z reste petit par rapport à 1, on a $z \approx v/c$.

La figure 8 montre trois spectres d'émission de galaxies lointaines. La plus proche, la première, est située dans l'amas de la Vierge. La seconde est située deux fois plus

loin. La troisième, dans Hydra, est cinq fois plus éloignée. Dans chaque cas la superposition du spectre obtenu avec un spectre témoin fait apparaître un déplacement d'ensemble, un glissement vers le côté rouge du spectre, et cela d'autant plus que l'objet lumineux est lointain. L'effet est clair et net dans les deux derniers cas, avec la proportionnalité énoncée. Dans le premier cas, il est anormalement faible car nous plongeons vers l'amas de la Vierge alors que l'expansion de l'Univers l'éloigne de nous. Traduisant le déplacement vers la route en vitesse d'éloignement, on peut dire que les galaxies lointaines s'éloignent d'autant plus vite de nous qu'elles sont éloignées. Si R est la distance actuelle d'une galaxie lointaine, la loi de Hubble s'écrit :

$$H_0 = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t}$$

Nous n'avons cependant aucune raison d'être le pôle répulsif de l'Univers. Toutes les galaxies lointaines paraissent s'éloigner de nous mais en fait elles s'éloignent toutes les unes des autres. L'image juste est celle des tâches sur la surface d'un ballon qui gonfle (**figure 6**). L'expansion de l'Univers est perçue de la même façon quelle que soit la galaxie dont on l'observe. On ne doit pas voir dans le déplacement vers le rouge un effet Doppler classique, les galaxies fuyant à des vitesses d'autant plus grandes qu'elles sont éloignées dans un espace fournissant une référence immuable. C'est au contraire l'espace qui change, qui gonfle, et les galaxies ne font que suivre le gonflement, tout en restant fixes par rapport à l'espace. Si l'espace gonfle avec les objets qu'il contient, il en est de même des longueurs d'onde de la lumière qui s'y propage.

Le déplacement vers le rouge n'est pas un effet Doppler classique qui nous placerait au centre du phénomène alors qu'il n'y a pas de centre. Tout observateur dans l'Univers en expansion est également privilégié. Pensons encore à l'analogie avec le ballon qui gonfle. Ceci peut satisfaire un penchant démocratique mais un concept très délicat à exploiter est en fait en cause, celui de la «naturalité». Après tout pourquoi ne serions-nous pas au centre du monde, les galaxies nous fuyant toutes ? Nous avons supposé si longtemps

être au centre du monde ! Ne serait-ce pas naturel ? Il nous semble cependant aujourd'hui plus naturel d'admettre que la position de l'observateur n'a pas d'importance et que l'expansion se présente de la même façon, observée de n'importe quelle galaxie. La naturalité s'éduque et peut changer avec les paradigmes qui définissent à chaque époque le cadre de la pensée scientifique. Dans le cadre de la Relativité Générale, qui sert de base théorique à notre analyse de l'Univers, le point de vue selon lequel l'expansion de l'Univers

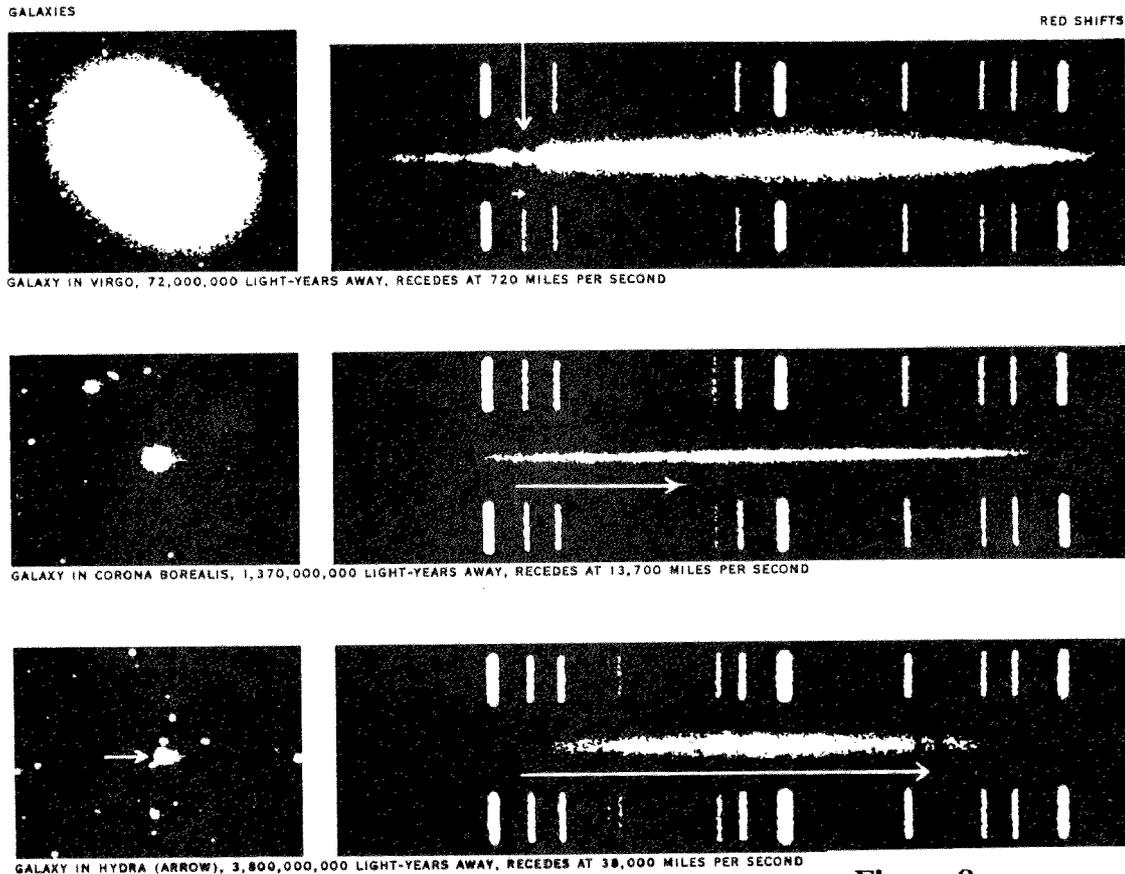


Figure 8

Spectres d'émission de galaxies lointaines

est partout identique est parfaitement naturel. Distinguer un observateur privilégié serait même contraire aux principes sur lesquels se fonde la théorie. L'image du ballon qui gonfle ne distingue aucun observateur privilégié. La loi de Hubble nous donne la variation avec le temps de n'importe quelle grande distance dans l'Univers. Il y a proportionnalité entre R et $\partial R / \partial t$. On peut interpréter R comme la graduation d'une échelle avec laquelle on mesurerait toutes les distances. L'expansion de l'Univers est un changement continu et uniforme d'échelle.

Remontons alors le cours du temps, en inversant par la pensée l'expansion actuelle, nous avons une contraction. Les distances entre galaxies sont d'autant plus faibles que l'on remonte dans le temps. Les galaxies finissent par se pénétrer. La densité de matière augmente de plus en plus. Rien ne peut a priori vaincre la croissance illimitée de la densité. Nous serions au début de l'Univers tel que nous le connaissons. Suivre par le calcul une telle évolution n'est bien sûr possible que dans le cadre d'une théorie, la Relativité Générale. Nous allons en parler mais un autre phénomène très important doit d'abord être décrit.

Le bruit de fond radio

Nous recevons de nombreux signaux du cosmos. Ils couvrent toute la gamme des ondes électromagnétiques. Chaque objet céleste a une émission qui lui est propre, mais, au-delà des objets identifiés, on trouve aussi une émission en ondes radio qui provient de partout. Sa découverte en 1964 a représenté une étape décisive dans notre connaissance de l'Univers. Tout corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique. Il faut cependant atteindre quelques milliers de degrés pour obtenir de la lumière visible, la longueur d'onde d'émission typique décroissant avec la température. Dans un four le rayonnement à l'intérieur du four est en équilibre avec les parois. Il y a à chaque instant autant de photons émis que de photons absorbés. Le spectre du rayonnement, la façon dont son énergie se répartit en fonction des différentes fréquences, est caractéristique de la température. La densité d'énergie associée au rayonnement et le nombre de photons par unité de volume sont alors déterminés. Tout se passe comme si l'Univers était l'intérieur d'un four mais à une température extrêmement faible, 2.7 K, très proche du zéro absolu. C'est une analogie qu'il ne faut cependant pas trop pousser car c'est un four qui n'aurait pas de parois. Nous ne parlerons pas de la façon dont ce rayonnement a pu être mis en évidence ni de la façon dont sa température caractéristique a pu être déterminée. C'est très difficile dans la mesure où des appareils à la température ambiante, qui est de l'ordre de 300 K, submergeraient le signal par le bruit de fond thermique qu'ils engendrent eux-mêmes. Nombreuses sont aussi les

sources parasites intenses dans notre environnement terrestre. Nous considérons simplement sa présence et ses propriétés comme des faits.

Nous baignons donc dans un rayonnement radio à la température de 2.7 K. Il nous vient de façon uniforme de toutes les directions de l'espace. Les variations d'intensité selon la direction d'observation sont inférieures au dix millième. Dans sa découverte il y eut une surprise expérimentale mais aussi la confirmation d'idées théoriques qui permirent d'apprécier tout de suite l'importance du phénomène observé. Cette découverte joue un rôle clé dans la façon dont nous allons décrire le début de l'Univers. Le «Big Bang» imposait ce rayonnement fossile.

Un rayonnement à 2.7 K implique une densité électromagnétique de $2.5 \cdot 10^{-4}$ GEV/m³. C'est une densité d'énergie qui croît comme la quatrième puissance de la température. Ce que nous écrivons :

$$\rho \sim T^4$$

La densité de photons que l'on en déduit est de $4 \cdot 10^8$ /m³, l'énergie moyenne des photons étant de $6 \cdot 10^{-4}$ EV. Nous remarquons que le nombre de photons par mètre cube est près d'un milliard de fois supérieur au nombre de protons par mètre cube, déduit de la densité de matière associée aux galaxies, Il est, comme nous l'avons mentionné de l'ordre de un proton par m³. Chaque proton représente cependant près de 1 GEV d'énergie de masse et la densité d'énergie associée à la matière reste donc bien supérieure à celle associée au rayonnement, et cela par un facteur 10.000. L'énergie de l'Univers est aujourd'hui dominée par la matière. Cela n'a cependant pas toujours été le cas.

Remontons le cours du temps. Les longueurs d'onde du rayonnement suivent les distances entre galaxies. L'énergie par photon croît comme l'inverse de la longueur d'onde, donc comme l'inverse de l'échelle de distance R, que nous avons introduite. La température qui est proportionnelle à l'énergie moyenne par photon est inversement

proportionnelle à R . Plus R décroît plus l'énergie par photon croît et plus la température croît. Lorsque l'énergie moyenne par photon atteint une valeur de l'ordre de quelques eV ils deviennent capables de briser les atomes en arrachant les électrons. Reprenons cette séquence à l'endroit, lorsque la température tombe en deçà de quelques eV, les atomes cessent d'être constamment détruits par le rayonnement et noyaux et électrons forment des atomes stables. Cela s'est passé 300.000 ans après le «Big Bang». La température était alors de 3.000 K. Les photons n'ayant plus l'énergie suffisante pour détruire les atomes, les atomes se forment et les photons s'échappent. Ils ne sont plus sans cesse arrêtés par des atomes qu'ils détruisent. Ils n'ont plus assez d'énergie pour cela. L'Univers devient transparent. Comme cela s'est passé à 3.000 K, il y a eu un grand éclair de lumière jaune et les photons cessant d'être «prisonniers» de la matière ont rempli l'Univers. Le temps s'est écoulé, les longueurs d'onde ont augmenté. Le rayonnement est passé au rouge puis à l'infrarouge, pour atteindre le noir sidéral à 2.7 K que nous avons aujourd'hui. Le bruit de fond radio est le fossile du grand éclair de lumière jaune par lequel l'Univers est devenu transparent.

Reprenons l'image du four et augmentons la température T . L'énergie par photon croît comme T , la densité d'énergie croît comme T^4 , la densité de photons croît comme T^3 . On ne fait que suivre les lois de physique habituelle. Lorsque la température atteint 10.000 degrés, l'énergie moyenne des photons est telle que, vu leur nombre, ils rassemblent plus d'énergie que les protons formant l'essentiel des galaxies. L'énergie de l'Univers qui était dominée par la matière, devient dominée par le rayonnement. Cela s'est passé 30.000 ans après le "Big Bang". Avec l'Univers le four chauffe parce qu'il se contracte ou se refroidit parce qu'il se dilate. Ce n'est pas la paroi que l'on chauffe et le rayonnement qui suit. La densité d'énergie associée au rayonnement croît comme T^4 ou R^{-4} . Pour les protons qui sont de plus en plus tassés elle ne croît que comme R^{-3} ou T^3 . lors de la contraction et de la hausse correspondante de la température, le rayonnement doit finir par gagner. La densité actuelle des protons permet de calculer quand cela s'est passé.

Lorsque la température a atteint 10 milliards de degrés (10^{10} K), l'énergie par photon était de l'ordre du MEV. Deux photons en collision peuvent dans ce cas former une paire électron-positron, car la masse de l'électron est de 0,5 MEV. Inversement, électrons et positrons peuvent mutuellement s'annihiler en deux photons. Les deux processus sont représentés par le graphe de Feynman de la **figure 9**. L'énergie du rayonnement à l'intérieur du four que représente l'Univers se distribue dans ce cas de façon équitable entre photons, électrons et positrons. La mécanique statistique permet de préciser les proportions de chaque type de particules. Pour qu'un tel équilibre apparaisse, il faut que le temps moyen entre chocs électron-positron ou photon-photon soit court par rapport au temps d'observation disponible ou à la rapidité de la contraction ou de la dilatation. Les densités et les

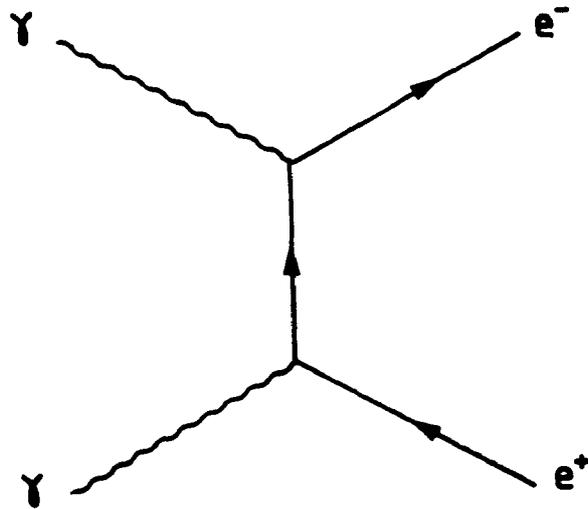


Figure 9

Représentation par un graphe de Feynman du processus d'annihilation d'une paire électron-positron en deux photons mais aussi du processus de création d'une paire électron-positron par collision de deux photons. La création d'un positron est équivalente à l'absorption d'un électron d'où le sens donné aux flèches.

sections efficaces qui déterminent ce temps sont telles que l'équilibre est quasi immédiatement réalisé. Remontons ainsi vers le début de l'Univers. Tout change. Les photons majoritaires, et de loin, au départ se transforment en un mélange de photons, d'électrons et de positrons, tous présents en nombres comparables. Reprenons la séquence à l'endroit. La température tombe en deçà du MEV. Les électrons et les positrons peuvent toujours s'annihiler en photons mais les photons perdent de leur énergie avec la baisse de la température et ils n'en ont vite plus assez pour former des paires électron-positron qui

demandent chacune un MEV d'énergie de masse. Il y a un véritable carnage de positrons et d'électrons. C'est comme ça que l'Univers a perdu tous ses positrons et presque tous ces électrons. Cela s'est passé une seconde après le «Big Bang». Il y avait avant presque autant d'électrons, de positrons et de photons. Seul le léger excédent d'électrons par rapport aux positrons est resté. Les photons ont pris le grand rôle.

Nous voyons avec ces deux événements, la transparence de l'Univers, 300.000 ans après le «Big Bang», et le carnage des électrons une seconde après le «Big Bang» toute la dynamique contenue dans le bruit de fond radio. Il y en a beaucoup plus comme nous allons le voir, mais nous avons énoncé des temps d'une façon qui a pu paraître bien arbitraire. Nous devons maintenant montrer comment tous ces temps peuvent être déterminés avec une certaine assurance et une certaine précision, cela bien sûr avec un peu de théorie.

La dynamique de l'Univers

La matière telle qu'elle est rassemblée dans les galaxies et le rayonnement radio fossile, qui remplit tout l'espace, sont les deux acteurs dont nous allons suivre le comportement. Cela va nous permettre de remonter le cours du temps à l'aide des lois physiques que nous connaissons. Les deux données de base sont d'une part, la densité de la matière et la densité d'énergie qui lui est associée et, d'autre part, la densité d'énergie du rayonnement. Nous connaissons bien la seconde mais c'est la plus faible des deux, et de loin. Nous connaissons encore mal la première. Comme nous l'avons vu, l'importance relative de ces deux densités s'est inversée dans le passé et le rayonnement fossile était au début l'acteur principal. Ces deux densités d'énergie sont donc également importantes même si l'une d'entre elles domine aujourd'hui. Y a-t-il eu d'autres acteurs importants, que nous ne connaissons pas encore ? La découverte du bruit de fond radio ne date après tout que de 1964 ! Nous ne pouvons que développer une suite logique d'événements à partir de ces deux acteurs. Comme nous le verrons, le scénario est riche en aventures, il implique d'autres acteurs, dont les rôles sont précisés, et surtout il a une valeur prédictive dans la

mesure où il nous permet de comprendre des propriétés de l'Univers, qui ne sont pas introduites au départ. Elles apparaissent comme autant de conséquences de l'histoire retrouvée. C'est en particulier le cas pour l'abondance relative des éléments légers ainsi que pour l'âge, pour lequel on trouve une valeur qui dépasse de peu celui des plus vieilles étoiles connues, alors que rien n'imposait a priori cette contrainte. Nous serons donc sans doute déjà assez proches de la vérité, même si l'histoire véridique est plus complexe. Nous verrons en effet que le tableau ne semble pas encore parfait. Il est fort possible que l'Univers comporte une masse encore cachée, correspondant à des acteurs que nous connaissons encore trop mal ou à des acteurs que nous ne connaissons pas encore. L'étude du mouvement de la matière froide à la périphérie des galaxies n'a-t-elle pas mis récemment à jour une quantité de matière bien supérieure à celle associée aux étoiles visibles. D'autres surprises peuvent arriver !

On interroge le ciel. On interroge aussi la structure de la matière et on fait l'inventaire des objets qu'elle suggère à côté de ceux qu'elle a déjà dévoilés. Nous n'avons encore qu'une limite supérieure pas très précise pour la masse du neutrino. Elle est de l'ordre de 20 eV. C'est plus de 10.000 fois l'énergie d'un photon du bruit de fond radio. Comme nous le verrons plus tard les neutrinos sont presque aussi nombreux que les photons. Ils pourraient donc au total représenter une énergie quelques dizaines de milliers de fois supérieure à celle des photons et donc bien supérieure à celle de la matière repérée. Encore faut-il pour cela que la masse du neutrino soit voisine de la borne supérieure actuelle. La masse du neutrino est une grande question cosmologique. Dans un autre ordre d'idée, les théories supersymétriques, qui offrent aujourd'hui des possibilités théoriques très intéressantes et peut être une fenêtre sur la réalité, nous laissent une particule stable, le photino, dont la masse pourrait être importante par rapport à celle du proton, et n'ayant à basse énergie que des interactions indétectables avec la matière et le rayonnement. Les photinos pourraient contribuer de façon non négligeable à la masse de l'Univers sans que nous le sachions encore. L'expérimentation à des énergies de l'ordre du TeV, soit l'étude de la structure de la matière à l'échelle de 10^{-19} m, devrait nous fixer sur son existence et, s'il

existe, sur ses propriétés. Les théories actuelles ont parmi les possibilités qu'elles suggèrent de nombreux acteurs potentiels. Certains peuvent correspondre à une réalité déjà devinée. D'autres ne sont peut-être que le produit de notre imagination. Seule l'étude plus poussée de la structure de la matière pourra nous permettre de distinguer les vrais acteurs des chimères. Comme nous le verrons, ces acteurs encore inconnus ont pu certes modifier, mais non pas bouleverser l'histoire que nous allons retrouver.

Après cette longue introduction, place à la dynamique qui va nous donner la logique du scénario. Il faut là écrire et admirer une équation. Nous ne donnerons pas sa dérivation, qui implique de longs développements en relativité générale, mais tâcherons de faire quand même saisir sa signification. C'est l'équation d'Einstein-Friedman. Elle s'écrit :

$$\left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 - \frac{8\pi G \rho}{3} = - \frac{k c^2}{R^2} - \frac{\lambda c^2}{3}$$

Avec le premier terme nous avons le carré de la variation relative des dimensions, ou du paramètre d'échelle R, en fonction du temps. C'est aujourd'hui la constante de Hubble qui chiffre l'expansion de l'Univers telle que nous l'observons. Dans le second terme nous trouvons la constante de Newton, G, qui contrôle les interactions gravitationnelles et la densité d'énergie ρ (rho), où aujourd'hui la matière domine le rayonnement. Les deux premiers termes traduisent donc comment l'échelle de l'Univers varie en réponse à la densité d'énergie qui s'y trouve et à son effet gravitationnel. Nous avons là l'essentiel pour la suite. Comme ρ varie comme R^{-3} pour la matière et comme R^{-4} pour le rayonnement, le second terme va en effet de toutes façons dominer le troisième, qui varie comme R^{-2} , pour les faibles valeurs de R, soit au début de l'Univers lorsque le paramètre d'échelle était encore petit. La dynamique de la genèse, et en tous cas celle de la séquence que nous pouvons décrire avec assurance, est pratiquement contenue dans les deux premiers termes. Le paramètre k qui apparaît dans le troisième terme repère la courbure de l'espace. Il prend les valeurs 1, 0 ou -1, selon que la géométrie propre à notre Univers est telle que la somme des angles d'un triangle formé par les géodésiques reliant trois points est supérieure à 180°

comme c'est le cas sur une sphère, égale à 180° , comme c'est le cas pour la géométrie euclidienne, ou inférieure à 180° , comme c'est le cas pour une courbure négative. Sondant l'Univers en profondeur et mesurant la façon dont la densité de matière varie avec la distance, rien ne semble aujourd'hui infirmer une distribution constante et une courbure de ce fait nulle ($k=0$). Les mesures actuelles n'ont cependant pas la précision nécessaire pour pouvoir conclure et les trois possibilités sont encore ouvertes. Si $k > 0$, l'Univers est «fermé». Il a la topologie d'une sphère. Pour les très grandes valeurs de R , le troisième terme finit par dominer le second. L'expansion finit par s'arrêter. L'accroissement de R cesse. Oubliant pour l'instant le quatrième terme, l'équation implique qu'à la phase d'expansion doit alors suivre une phase de contraction. L'Univers est fini, il oscille avec un retour à des densités énormes après la phase d'expansion actuelle. Si $k < 0$, l'Univers est «ouvert». Il est infini et se développe à jamais. Si $k=0$, l'Univers est «plat» et se développe mais en tendant vers un état asymptotique où l'expansion s'arrête pour un temps infiniment long. Il est aujourd'hui fini ou infini.

Le quatrième terme est proportionnel à λ , la constante cosmologique. La présence de ce terme est compatible avec la relativité générale, mais elle n'est pas nécessaire. Ce terme joue un rôle dynamique comparable à celui d'un ressort et peut empêcher l'Univers de se dilater. Einstein l'avait introduit dans ce but, avant la découverte de l'expansion. L'expansion étant aujourd'hui une réalité expérimentale à quoi bon le garder ! Tout se passe comme si cette constante était nulle et nous la prendrions donc nulle. Mais pourquoi est-elle nulle ? C'est une question encore mal comprise. N'est-il pas naturel qu'elle soit nulle puisqu'elle n'est pas nécessaire ? On voit là les limites de la «naturalité». A-t-elle toujours été nulle ? Changeons son signe. Au lieu du frein à l'expansion qu'avait voulu introduire Einstein, nous avons au contraire une accélération de l'expansion qui devient exponentielle. C'est ce qu'on appelle «inflation» en cosmologie. Nous verrons comment, dans le cadre des théories de grande unification, il semble naturel d'avoir eu une brève période, avant ou autour de 10^{-35} s après le «Big Bang», durant laquelle la valeur transitoirement non nulle de λ a imposé une explosion énorme des dimensions de

l'Univers. Nous en reparlerons mais nous ne savons pas assez de physique aujourd'hui pour en préciser le scénario.

Nous nous sommes ainsi débarrassés des troisième et quatrième termes pour décrire la prime jeunesse, si ce n'est le véritable début de l'Univers. Il nous reste les deux premiers termes, soit :

$$\left(\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = \frac{8\pi}{3} G \rho$$

Comme $(\partial R/\partial t)/R$ est une valeur expérimentale, la constante de Hubble, h (H_0) est fixée. La valeur ainsi obtenue est appelée la densité critique ρ_c . Elle correspond à un Univers de courbure nulle où l'expansion ne s'arrête qu'asymptotiquement puisque l'égalité des deux termes suppose $k=0$. On obtient de l'ordre de 10 GEV/m^3 , de l'ordre, doit-on dire, car la constante de Hubble n'est encore connue qu'avec une assez large incertitude. Le problème avec cette situation est que la valeur mesurée pour ρ , en tenant compte de toute la matière repérée, est au moins 5 à 10 fois plus faible. Si ρ est effectivement inférieure à la densité critique on doit avoir une courbure négative et l'expansion va continuer d'aller bon train. Pour les grandes valeurs de R , il faudra prendre en compte le troisième terme. On ne peut cependant pas exclure que la masse encore cachée ne soit pas là que pour donner une valeur ρ égale à la valeur critique, ou même supérieure. L'expansion de l'Univers s'arrêtera dans ce cas et, pour $\rho > \rho_c$, il se recontractera. Il nous semble aujourd'hui «naturel» de supposer que la densité réelle vaut juste la valeur critique car dans ce cas elle reste toujours critique, le carré de la constante de Hubble suivant la densité. Si la densité est aujourd'hui différente de la valeur critique, l'équation d'Einstein-Friedman impose qu'elle s'en approche d'autant plus que l'on remonte dans le passé et que R diminue. L'expansion de l'Univers est un amplificateur extrêmement puissant de toute différence par rapport à 1 du rapport ρ/ρ_c . Vu les paramètres actuels il aurait fallu que le rapport ρ/ρ_c ne diffère de 1 que par 10^{-16} quelques minutes après le «Big Bang», au moment de la synthèse de la matière telle que nous la connaissons aujourd'hui, pour qu'il soit encore si proche de 1 aujourd'hui, où il vaut en effet quelque chose entre 0.1 et 1, à la précision de nos

mesures. Quoi de plus naturel alors que de supposer qu'il a toujours été identique à 1, une naturalité que nous étayerons plus tard par d'autres arguments. Pour la prime jeunesse de l'Univers, que nous voulons étudier, nous pouvons partir avec seulement nos deux premiers termes et un rapport ρ/ρ_c pratiquement égal à 1. Il était de toutes façons très proche de 1 dans le passé puisqu'il n'est ni très grand ni très petit maintenant.

Si la matière domine, comme c'est le cas aujourd'hui, ρ varie comme R^{-3} . Introduisant cela dans l'équation, on la résout facilement. Ceci donne une valeur de R qui varie comme $t^{2/3}$. Nous pouvons remonter le cours du temps en calculant, pour chaque valeur de t , R , et la température, qui varie comme R^{-1} . Elle est en effet inversement proportionnelle à la longueur d'onde des photons ambiants qui suit elle la variation du paramètre d'échelle. Remontant suffisamment le cours du temps, le rayonnement se met à dominer. Dans ces conditions ρ varie comme R^{-4} . On résout de nouveau l'équation dans ce cas et l'on trouve que R varie alors comme $t^{1/2}$ et donc que **la température varie comme l'inverse de la racine carrée du temps**. C'est le régime qui a prévalu au début, lorsque la température était supérieure à 10.000 K, soit jusqu'à 30.000 ans, valeur que l'on obtient à l'aide de la température actuelle de 2.7 K et de l'âge de l'Univers. Compte tenu de la valeur actuelle de la constante de Hubble il faut revenir en arrière d'environ 20 milliards d'années pour atteindre une valeur quasi nulle de R , définissant l'origine du l'Univers actuel.

Ayant la loi de variation de T en fonction de t , nous pouvons préciser les propriétés globales de l'Univers à chaque moment. Elles découlent des lois de la physique pour les énergies par particule correspondant à ces températures. Une variation de R comme $t^{1/2}$ implique que $(\partial R / \partial t)/R$ varie comme $1/t$. La variation relative des distances est d'autant plus grande que t est petit. L'origine du temps correspond donc à une véritable explosion. C'est le «Big Bang» ! Si nous ne connaissons pas encore le destin de l'Univers, expansion infinie ou recontraction et si nous ne pouvons pas vraiment préciser son âge, vu les incertitudes actuelles sur H_0 , ρ et k , nous pouvons par contre affirmer qu'il est issu d'une gigantesque explosion qui s'est produite il y a environ 20 milliards d'années, 18 ± 3 , disons.

Remarquons aussi que nous n'avons jamais parlé du rayon de l'Univers ; Ce n'est que la variation des distances entre objets, toutes mesurées selon R qui est en cause et non pas une dimension globale. L'Univers peut être fini ou infini. Nous n'en savons encore rien. Le «Big Bang» tel qu'il sort de notre équation est une explosion de densité, qui se produit également partout. Le paramètre d'échelle R, tel qu'il peut être mesuré en chaque point, croît avec le temps et fort brutalement au début, et cela partout de la même façon. Nous avons pourtant parlé des dimensions de l'Univers visible, les chiffrant même à 6 km sur notre modèle où la galaxie avait 1 cm. Il ne s'agit cependant que de la limite actuelle de la région de l'espace dont nous pouvons recevoir des signaux. Les photons du bruit de fond radio qui en sont issus nous atteignent tout juste après un trajet qui a débuté au début de l'Univers et s'est déroulé dans un Univers en expansion. Cette limite définit notre horizon actuel, un horizon qui s'éloigne de nous à la vitesse de la lumière. L'Univers est beaucoup plus grand et peut être même infini. On peut bien sûr légitimement se demander qui assure le synchronisme qui fait que des régions très éloignées de l'Univers semblent évoluer de la même façon alors qu'elles n'ont jamais été en contact l'une avec l'autre, ayant même encore toujours été au-delà de leurs horizons respectifs. C'est un problème important sur lequel nous reviendrons . Pour l'instant, prenons notre équation et tournons-nous avec elle vers le passé.

Qu'allons-nous trouver en remontant le cours du temps ? Atteignons une température telle que deux photons peuvent donner par collision une paire particule-antiparticule. Il faut pour cela que l'énergie des photons soit supérieure à l'énergie de masse de la particule, disons particule A.

$$T \sim E_{\gamma} > m_A$$

Ces particules une fois produites se mettent en équilibre thermique avec le rayonnement. Ceci veut dire qu'il y a autant de collisions $\gamma\gamma \rightarrow A\bar{A}$ que de collisions $A\bar{A} \rightarrow \gamma\gamma$. Il y a pratiquement autant de particules A et d'anti-particules \bar{A} que de photons. L'Univers change radicalement d'aspect. Ce type d'événement va se produire au gré de chaque seuil de masse. Nous avons maintenant tous les éléments pour explorer la jeunesse

de l'Univers. Nous partions pour commencer de 10^{-10} s après le «Big Bang». On calcule en effet que c'est le temps où l'énergie par particule était de 100 GEV. C'est une physique que nous connaissons depuis quelques années.

La prime jeunesse de l'Univers.

Nous sommes à 10^{-10} s après le «Big Bang». La température est de 10^{15} K. La densité de particules est énorme puisqu'elle varie comme la troisième puissance de la température. L'énergie moyenne par particule est de l'ordre de 100 GEV. Toutes les particules de masse inférieure à 100 GEV sont en équilibre thermique. Les W et les Z se désintègrent en 10^{-24} s, mais ils sont sans cesse régénérés par collisions entre quarks ou entre leptons, ces collisions étant très fréquentes et nombreuses à cette température et à cette densité. Les W et les Z venaient d'ailleurs tout juste d'acquérir leur masse à la suite de la brisure de la symétrie propre aux interactions électrofaibles qui correspond à un changement de la nature du vide à une température de l'ordre de 200 GEV. A plus hautes températures ils avaient une masse nulle, comme les photons. Leur existence comme particules extrêmement massives, avec des masses de près de 80 et 90 GEV, telles qu'elles se sont manifestées dans les collisions proton-anti-proton, ne fut que bien brève. La température tombant un peu en deçà de 100 GEV, les W et Z cessent d'être produits et ceux qui existent se désintègrent presque immédiatement à jamais. L'Univers est un mélange extrêmement dense de photons (10^{45} fois la densité actuelle), d'électrons, de positrons, de neutrinos, de quarks, d'anti-quarks et de gluons. Toutes les espèces sont à peu près également représentées. Cependant, les quarks et les gluons dominant car, s'il y a autant de types de quarks que de leptons, chaque quark existe sous ses trois variétés de couleur. C'est l'ère des quarks. L'univers est en première approximation un plasma de quarks et de gluons. Le temps passe, la température tombe. A 10^{-6} s, la température est de 10^{13} K, l'énergie par particule est de 1 GEV. Les quarks lourds t, b, c, ne peuvent plus être produits au cours de collisions et se sont tous désintégrés en donnant des quarks légers u, d et s. Il faut tomber à 250 MEV, ce qui arrive à $5 \cdot 10^{-5}$ s, pour voir apparaître le confinement de la

couleur, le vide changeant à nouveau de nature. La température devient trop basse pour que la couleur puisse librement se propager dans le vide. Les quarks doivent se lier en hadrons, trois quarks formant un nucléon, proton ou neutron, les anti-quarks des anti-protons et des anti-neutrons et les paires quark-antiquark formant des mésons. Nous sommes cependant déjà en deçà du seuil de formation d'une paire proton-antiproton par collision de deux mésons. Ce seuil correspond en effet à des énergies par particule de l'ordre du GEV. Protons et antiprotons s'annihilent en mésons alors que les multiples collisions méson-méson, après une thermalisation quasi immédiate, n'arrivent plus à les reformer. Il va donc y avoir un véritable carnage de hadrons, dès qu'ils se lient en proton ou autre hadron. Il se trouve qu'il y avait avant 10^{-10} s un très léger excès de quarks par rapport aux antiquarks, comparable au rapport proton-photon actuel qui est de l'ordre de 10^{-9} . C'est tout ce qui va rester. Certains quarks survivent un instant au carnage, mais en compagnie d'antiquarks, liés dans des mésons. Ce n'est qu'un bref refuge. A 10^{-4} s, la température est tombée à 100 MEV. Même les mésons les plus légers, les mésons π ne peuvent plus être produits. Ils s'annihilent tous en leptons en 10^{-8} s. **L'ère des leptons** commence. En fait les muons et taus ont disparu et seuls les leptons les plus légers, électrons, positrons et neutrinos subsistent encore, mais ils sont tous en nombre comparables à celui des photons. Ils dominent donc globalement. Le monde hadronique n'est plus représenté au niveau du milliardième que par les protons et les neutrons qui ont survécu au carnage des quarks et des anti-quarks. Ils sont fortement minoritaires.

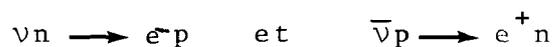
A 10^{-1} s, la température est tombée à 3 MEV. Un phénomène nouveau va se produire. Les neutrinos vont faire bande à part en se dissociant du reste, ou, comme on dit en mécanique statistique, en quittant la situation d'équilibre. Analysons le phénomène. Jusque là les neutrinos interagissent sans arrêt avec les électrons par les réactions :



Ce sont toutes deux des interactions faibles, mettant en jeu l'échange de W et de Z dans le premier cas, et de Z dans le second.

La seconde réaction, très importante dans ce contexte, est uniquement une interaction par «courant-neutre», un mode d'interaction dont la découverte remonte à une quinzaine d'années (1973). Le libre parcours moyen d'un neutrino est inversement proportionnel à la densité, qui varie comme T^3 et inversement proportionnel à la probabilité d'interaction, la section efficace qui, pour une interaction faible dans ces conditions varie comme T^2 . Ceci donne globalement un libre parcours moyen qui varie comme T^{-5} . C'est donc aussi la façon dont varie le temps moyen τ (tau) entre deux collisions successives. La distance typique séparant deux collisions successives va s'accroître comme $\tau (\partial R/\partial t)$ et donc grandir comme T^{-4} lorsque la température décroît, puisque $\partial R/\partial t$ varie comme T . L'échelle de distance de l'Univers, soit la distance moyenne entre particules, s'accroît, elle, comme T^{-1} , donc pour les valeurs suffisamment faibles de T , beaucoup moins vite que la précédente. Lorsque T a suffisamment décru, le libre parcours moyen des neutrinos devient très grand par rapport aux distances entre particules. Les neutrinos cessent d'être limités dans leurs mouvements par la présence des électrons. Ils ne partagent plus leur température et remplissent tout l'espace, indépendamment des autres constituants. Les neutrinos se découplent du reste de l'Univers. Ces neutrinos, ainsi échappés du reste du monde, doivent remplir l'Univers actuel d'un rayonnement résiduel, dont on peut calculer la température. Elle est de 1,9 K. Il s'agit d'une énergie et de flux trop faibles pour que les détecteurs actuels puissent les mettre en évidence.

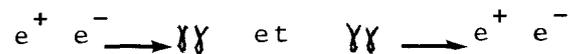
Tant que les neutrinos continuaient à interagir avec les autres constituants, ils contribuaient beaucoup, de par leur nombre, d'autant plus grand qu'il en existe plusieurs espèces, à l'équilibre thermique entre protons et neutrons. Protons et neutrons sont en effet constamment transformés les uns et les autres par les réactions :



Les neutrinos faisant bande à part, les neutrons cessent d'être aussi rapidement renouvelés à partir des protons. Or le neutron libre est instable. Il se désintègre avec une vie

moyenne de l'ordre de 1000 s. Les neutrinos cessent leur travail lorsque la température n'est que peu supérieure à la différence de masse entre le neutron et le proton qui vaut 1.3 MEV. Même en équilibre thermique il y a donc plus de protons, un peu plus légers, que de neutrons, un peu plus lourds. Le rapport en nombre vaut alors 5. Le facteur d'équilibre disparaissant, ce nombre ne peut que croître par disparition des neutrons. Certes, les électrons sont toujours à l'oeuvre mais à une seconde du «Big Bang», alors que la température tombe en deçà de 1 MEV, ou 10^{10} électrons et positrons vont disparaître dans un carnage mutuel. Ce sera la fin de l'ère des leptons.

Nous avons déjà parlé de ce carnage. Electrons, positrons et photons sont en équilibre thermique, par les réactions



Lorsque la température tombe en dessous de 1 MEV, une seconde après le «Big Bang», la première réaction continue à se produire alors que la seconde cesse vite d'être possible, la masse de l'électron étant de 0,5 MEV. Les densités sont telles que la plupart des électrons et des positrons disparaissent. Il ne reste que le léger excédent d'électrons présents au départ et qui en nombre égal aux protons assurent la neutralité globale de l'Univers. Il reste beaucoup de photons et, très minoritaires, des protons, des électrons et cinq fois moins de neutrons. Il y a aussi beaucoup de neutrinos mais il n'interagissent plus avec le reste. **L'ère des photons** commence. Nous sommes à une seconde et les neutrons commencent à disparaître.

La nature présente de nombreuses coïncidences que nous ne pouvons encore que constater. Avec une température inférieure au MEV, c'est le carnage des électrons, mais c'est aussi des énergies de choc qui ne peuvent plus briser les noyaux aussi vite qu'ils sont formés. En effet, les forces de liaison nucléaires mettent en jeu des énergies de l'ordre de quelques MEV par nucléon. Les noyaux vont pouvoir se former et stabiliser ainsi les

neutrons, qui, liés dans un noyau, ne peuvent plus se désintégrer car l'énergie de liaison excède la différence de masse entre le neutron et le proton.

Avant de décrire cette phase nouvelle, la nucléosynthèse, considérons encore ce qui s'est passé durant le temps déjà écoulé, de 10^{-10} s à 1 s, et voyons les questions pour lesquelles la physique des particules actuelle est directement en cause. Nous en retiendrons trois. La première est la transition qui se produit à $5 \cdot 10^{-5}$ s et entraîne le confinement de la couleur. Le point important est que protons et neutrons n'apparaissent pas dans une situation d'équilibre thermique, alors que la température est encore supérieure à leur énergie de masse de 1 GEV, mais plus tard quand les quarks se lient pour former des systèmes qui sont nettement plus lourds que l'énergie de masse associée à la température. Le rapport proton-neutron au début de la synthèse nucléaire dépend de la façon dont se confine la couleur avec des phases transitoires que l'on peut rapprocher de la percolation et de la surfusion. Nous ne savons pas encore comment cela se passe. Dans une série d'expériences au CERN, on essaye aujourd'hui de mettre en évidence ce plasma de quarks et de gluons qu'implique la chromodynamique et qui devait correspondre à l'état de l'Univers jusqu'à $5 \cdot 10^{-5}$ s du «Big Bang». Des collisions entre ions oxygène, soufre et, d'ici quelques années, plomb accélérés jusqu'à 200 GEV par nucléon, sur des cibles de noyaux lourds, devraient permettre d'atteindre des densités d'énergie suffisantes pour déconfiner la couleur à l'échelle de l'ion incident, soit sur un volume plusieurs dizaines de fois supérieur à celui des particules, nucléons et mésons, dans lesquels la couleur se trouve normalement emprisonnée. Aujourd'hui, après un an d'études, quelques observations sont très encourageantes mais nous ne pouvons pas encore conclure. Le plasma explose presque aussi vite qu'il est formé, l'échelle de temps propre au phénomène étudié étant de quelques 10^{-23} s. Nous ne pouvons observer que le résultat, ou le souvenir, de ce qui s'est passé, le «sourire du chat» qui reste après la disparition du chat tel qu'Alice le décrit dans son voyage au pays des merveilles ! La mise en évidence de ce nouvel état de la matière et les informations que l'on pourra obtenir sur la façon dont les hadrons se forment à partir du plasma sera riche de conséquences en physique des particules et en astrophysique. C'est, il nous semble, une

des clés pour mieux comprendre l'abondance relative des éléments, la proportion de lithium dans l'Univers étant un des paramètres particulièrement sensibles.

La seconde question est le nombre d'espèces de neutrinos. Nous en connaissons trois aujourd'hui, associées respectivement à l'électron, au muon et au tau. L'étude de la désintégration du Z, telle quelle sera possible avec le LEP, doit nous permettre de les compter. Si le nombre d'espèces de neutrinos est supérieur à 3, les neutrinos sont plus actifs à maintenir l'équilibre entre protons et neutrons au début de l'Univers. Le rapport hélium sur hydrogène augmente. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle on pense aujourd'hui qu'il n'y a pas beaucoup plus que trois espèces de neutrinos, quatre peut être, car trois semble suffire pour le rapport mesuré. Il faut les compter ! Le rapport hélium sur hydrogène soulève encore quelques questions et ces réponses sont importantes. En physique des particules, le nombre d'espèces de neutrinos est extrêmement important. La nature peut présenter d'autres types de particules que ceux que nous connaissons mais, pour chaque nouveau doublet de quarks, on attend un nouveau type de neutrino. Une nouvelle espèce de neutrino annoncerait la présence de nouveaux quarks et d'un nouveau lepton. L'enjeu est de taille.

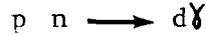
La troisième question est la masse des neutrinos. Les valeurs actuelles mesurées pour chaque type, sont toutes compatibles avec zéro mais sont elles vraiment toutes nulles, comme conséquence d'un principe qui nous échappe encore ? Cela n'est que «naturel» dans le cadre de la théorie électrofaible. L'observation d'une masse non nulle aurait des conséquences très importantes sur nos idées concernant l'origine de la masse des particules. En astrophysique, une masse non nulle contribuerait de façon importante à la masse globale de l'Univers. Les neutrinos pourraient aussi avoir, de par leur nombre, des effets gravitationnels importants dans la structure en amas observée à grande échelle. La masse du neutrino, pourtant si faible, est une question très importante en physique des particules et en astrophysique.

Reprenons notre description du début de l'Univers. Nous sommes une seconde

après le «Big Bang». La température tombe en dessous du MEV ou de 10^{10} K. Les électrons et les positrons se livrent à un véritable carnage.

La synthèse des noyaux.

Proton et neutron peuvent s'unir en formant un noyau de deutérium, selon la réaction :



Il y a seulement tant de photons par rapport au nombre de protons et de neutrons, et leur température est encore telle, que le deutérium est détruit pratiquement aussi vite qu'il est formé. Cela se passe par photodésintégration.



L'énergie de liaison du deutérium n'est que de 2.2 MEV. Ce n'est que lorsque la température est tombée à 10^9 K, que le deutérium formé a de bonnes chances de survivre. Il faut perdre un facteur 10 par rapport à ce qui prévalait à une seconde. Nous sommes donc 100 secondes après le «Big Bang». Or le temps presse ! Le neutron a une vie moyenne de 1000 secondes qui cesse d'apparaître comme énormément longue par rapport à l'évolution de l'Univers. Il ne reste déjà plus que 1 neutron pour 7 protons. Les choses peuvent cependant maintenant aller vite. Les densités sont telles qu'en 100 secondes tous les neutrons se trouvent utilisés à former des noyaux d'hélium, suivant les deux réactions successives :



qui passent par le tritium t et donnent en fin de compte un noyau d'hélium α .

L'univers est pour moins de deux minutes un réacteur de fusion nucléaire. Tout s'arrête faute de neutrons 200 secondes après le «Big Bang». Les constituants actuels de l'Univers dans leur énorme majorité ont été formés. C'est «les trois premières minutes» rendues célèbres par le livre de Steven Weinberg portant ce titre.

Les neutrons résiduels disponibles pour le processus de fusion donnent une masse totale d'hélium égale au tiers de la masse totale d'hydrogène, qui est elle associée aux protons qui restent seuls. Il y a aussi, en proportions beaucoup plus faibles, un peu de deutérium et un peu de lithium. La prédiction des rapports d'abondance observés pour les éléments légers est un des grands succès du «Big Bang». On ne saurait l'expliquer autrement.

De 200 secondes à 300.000 ans, l'Univers va se développer, la température décroissant avec le temps, d'abord comme $t^{-1/2}$, puis à partir de 30.000 ans, comme $t^{-2/3}$, la densité de matière devenant prépondérante. L'univers rassemble dans son ensemble à l'intérieur d'une étoile, un plasma d'électrons, de protons et de noyaux d'hélium. La densité de photons reste cependant très élevée. Ils sont de loin prépondérants en nombre et, jusqu'à 30.000 ans, en énergie globale. Au bout de 300.000 ans, la température est tombée à 3000 K. Les atomes peuvent se former. La réaction de formation d'un atome d'hydrogène $e^- + p \rightarrow \gamma_H$ n'est plus immédiatement compensée par la réaction inverse, $\gamma_H \rightarrow e^- + p$, les photons, vite thermalisés, n'ayant plus assez d'énergie pour cela. Les photons cessant d'être sans cesse arrêtés par des atomes qu'ils détruisent peuvent s'échapper de la matière. Ils le font dans un grand éclair de lumière jaune, la couleur étant définie par la température à laquelle elle a lieu, et remplissent uniformément l'Univers. C'est là qu'on place par convention la fin du «Big Bang». Il faut encore attendre un milliard d'années pour que la densité soit tombée à un niveau tel que les concentrations de matière localisées correspondant aux étoiles et aux galaxies puissent se différencier. Les étoiles vont brûler l'hydrogène en hélium, mais en n'apportant au total qu'une relativement faible addition à l'hélium primordial. Elles vont brûler de l'hélium vers la fin de leur vie comme étoile brillante, en formant du carbone et de l'oxygène. L'explosion des grosses étoiles à bout de combustible va donner du fer et les traces relatives d'éléments plus lourds. Notre système solaire n'a que 5 milliards d'années. Il a trouvé lors de sa formation toute une variété d'éléments produits par une évolution déjà longue.

La logique et le pouvoir prédictif de ce scénario sont tels qu'il représente ce que l'on appelle aujourd'hui le **modèle standard** de l'Univers. Certes de nombreuses questions imposent encore de longues recherches qui peuvent amener à revoir de nombreux points qui ne sont pas tous des points de détail. Le schéma global semble cependant bien établi.

Une question ouverte particulièrement importante est celle de la masse cachée. Si le rapport ρ / ρ_c est égal à 1, il faut admettre que 85% de la densité d'énergie de l'Univers correspond à des objets que nous ne connaissons pas encore. Les neutrinos peuvent certes jouer un rôle, mais il se peut aussi que leur masse soit rigoureusement nulle. La densité de protons, trop froids pour rayonner ou trop dilués pour perturber le mouvement des galaxies, peut-elle jouer un rôle ? Cela semble difficile. Si le rapport du nombre de protons au nombre de photons est nettement plus élevé que la valeur actuellement admise qui est de l'ordre de 10^{-9} , les photons sont moins efficaces à détruire tout le deutérium qui se forme entre 1 et 100 secondes. Le rapport de la masse d'hélium à la masse d'hydrogène augmente ! Dans le cadre des calculs actuels il serait difficile d'avoir une densité hadronique (hydrogène et hélium) supérieure à 15% de la densité critique. Il nous reste donc à trouver les 85% de masse cachée. On peut bien sûr dire que la densité n'a pas à avoir la valeur critique, mais sa valeur si proche de 1, tout en étant quand même différente de 1 au début de l'Univers devient alors un mystère. Qui a pu si bien ajuster les choses au début ? Un très léger décalage vers le haut aurait conduit à un Univers qui se serait refermé sur lui-même trop vite pour permettre la longue évolution nécessaire à l'apparition de la vie. Un très léger décalage vers le bas aurait donné un Univers trop dilué pour permettre la formation des galaxies. La masse cachée est une des grandes questions actuelles et, comme nous l'avons souligné, la réponse est peut être plus facilement accessible au coeur de la matière que dans le ciel.

Quel est le destin de l'Univers ? Nous ne pouvons le dire. A l'échelle de l'Univers rien ne doit beaucoup changer au cours des prochains 5 milliards d'années. La densité moyenne et la température du rayonnement radio vont décroître, mais pas dans des

proportions énormes. D'ici 5 milliards d'années, le soleil va devenir une géante rouge en détruisant la terre, puis une naine blanche semblable à beaucoup d'autres. Pour aller au-delà avec assurance, il faudrait mieux connaître des paramètres que nous ne connaissons encore que trop mal : H_0 , ρ , k , pour ne citer que ces paramètres clé. Il y a cependant peut être déjà quelques éléments de réponse dans ce qui s'est passé avant 10^{-10} s. C'est que nous allons explorer.

Au début de l'Univers

Nous avons à vrai dire laissé beaucoup de questions sans réponse, même si, et c'est là le propre de la démarche scientifique, nous avons posé moins de questions que nous n'en avons résolu. Nous avons vu qu'il est resté un léger excédent de matière par rapport à l'anti-matière. Il était là au début mais pourquoi ? Il est aussi resté autant d'électrons que de protons, la charge de l'Univers étant globalement nulle. Nous l'avons prise nulle à 10^{-10} s et l'avons laissée nulle mais pourquoi était-elle nulle ? Pourquoi ρ / ρ_c est-il si proche de 1 et sans doute égal à 1 pour l'être toujours resté ? Pourquoi l'Univers est-il si homogène, le bruit de fond radio arrivant de la même façon de partout ? Nous ne pouvons pas apporter aujourd'hui de réponses définitives à toutes ces questions. Néanmoins, nous pouvons parler des directions de recherche qui semblent les plus prometteuses. Il faut savoir, ou tâcher de deviner, ce qui s'est passé avant 10^{-10} s.

Reprenons d'abord la dernière question. Elle est liée à celle de l'horizon à partir duquel nous avons défini l'Univers visible. La façon la plus efficace de communiquer est d'échanger des particules de masse nulle qui se propagent à la vitesse de la lumière. C'est le cas du rayonnement électromagnétique et des photons qui lui sont associés. C'est aussi le cas des ondes gravitationnelles que l'on essaye de mettre en évidence et auxquelles, dans une formulation quantique, seraient associés des gravitons. Nous ne pouvons voir qu'à une distance qui augmente avec le temps à la vitesse de la lumière, en détectant les photons qui nous atteignent tout juste après un trajet qui a débuté au début de l'Univers. Ceci définit

la distance de notre horizon actuel, qui croît comme t , le temps écoulé depuis le début de l'Univers. Les distances à l'intérieur de l'Univers en expansion croissent elles comme $t^{2/3}$, après avoir crû comme $t^{1/2}$. Prenons pour simplifier les choses, la loi en $t^{1/2}$. Remontons le cours du temps, par un facteur 10.000, disons. L'horizon s'est contracté par un facteur 10.000, mais les dimensions de l'Univers ne se sont contractées que par un facteur 100. L'horizon n'englobe alors qu'une toute petite fraction de l'Univers qu'il recouvre aujourd'hui. Nous entrons ainsi constamment en vue directe avec des parties de l'Univers avec lesquelles nous n'avons eu aucun contact avant puisqu'elles étaient au-delà de notre horizon. Comment peut-il se faire que tout ce que nous découvrons pour la première fois ressemble tant à ce que nous connaissions déjà ? Qui a assuré cet ordre de marche identique pour toutes les parties de l'Univers visible aujourd'hui ? De façon quantitative cette fois, on peut calculer que les photons du bruit de fond radio qui nous arrivent de deux directions dans l'Univers distantes de plus de 2° , soit quatre fois seulement le diamètre apparent de la pleine lune, proviennent de régions qui étaient hors de leur horizon mutuel au moment où ces photons se sont échappés, 300.000 ans après le «Big Bang». Pourquoi alors cette homogénéité du rayonnement, vérifiée avec une précision de 10^{-4} ! Pourquoi la température était-elle la même au même moment dans des régions de l'espace qui n'avaient jamais pu communiquer entre elles ? La réponse à cette question, comme aux autres que nous avons posées, se trouve dans ce qui a dû se passer avant 10^{-10} s, mais peut-être avant tout, dans la compréhension de la structure de la matière au-delà de 10^{-18} m.

Nous ne connaissons pas encore la physique qui prévaut au-delà de 100 GEV et nous attendons en fait de grandes surprises et en tous cas des nouveautés entre 100 et 1000 GEV. Néanmoins, au-delà de tout ça, il semble que quelque chose de vraiment différent doit apparaître autour de 10^{15} GEV. La température serait de 10^{28} K. Nous serions 10^{-36} à 10^{-35} s après le début de l'Univers. C'est la physique qui prévaut pour l'étude de la structure de la matière à la précision de 10^{-31} m. Comme on le sait, les similitudes reconnues entre la théorie électrofaible et la chromodynamique qui, à elles deux, constituent le modèle standard de la physique des particules, sont telles qu'ils est très tentant de les considérer

comme deux aspects d'une théorie unique. C'est, comme on le sait une théorie de grande unification, une des GUTs possibles (Grand Unified Theories), le terme anglais de «guts» ayant été choisi de façon à montrer que l'on va ainsi au fond des choses. Nous ne connaissons pas encore la forme exacte que devrait prendre cette théorie. C'est un des grands sujets d'études actuels. On sait cependant que la grande symétrie propre à cette théorie qui engloberait sur le même pied les interactions fortes, électromagnétiques et faibles d'une part et les quarks et les leptons d'autre part, ne devrait se manifester de façon claire et nette qu'à une énergie de l'ordre de 10^{15} GEV, de la même façon que la symétrie propre aux interactions électrofaibles se manifeste sans appel au-delà de 100 GEV. Le W, le Z, le photon et les 8 gluons seraient sur le même pied que d'autres champs de jauge qui pourraient eux librement transformer quarks en leptons et inversement. Nous sommes déjà un peu familiers avec ces théories de grande unification. Nous savons comment la grande symétrie initiale peut être brisée de façon spontanée par un mécanisme de Higgs. La nature du vide change et les champs de jauge autres que ceux qui nous sont familiers acquièrent une masse de l'ordre de 10^{15} GEV. Comme ce sont les seuls qui peuvent transformer quarks en leptons, cela devient pratiquement interdit aux énergies actuelles qui sont de l'ordre de 100 GEV, et quarks et leptons apparaissent comme séparément conservés. Les physiciens des particules ont toutes les raisons de postuler une telle unification des modes d'interaction à très haute énergie. L'instabilité du proton, recherchée encore en vain, en serait la justification spectaculaire.

Nous allons maintenant voir comment une telle perspective théorique peut affecter la cosmologie. Un élément important est que la neutralité globale de l'Univers devient naturelle. Dans le cadre d'une telle théorie la charge du quark est reliée à celle de l'électron. Il faut que la charge du proton soit exactement opposée à celle de l'électron et l'équilibre thermique entre quarks et leptons qui prévalait à 10^{-35} s, nous conduit de façon naturelle à avoir en fin de compte un nombre global de protons égal à celui des électrons. La charge globale des quarks compense juste celle des électrons. La symétrie brisée à 10^{15} GEV par le mécanisme de Higgs, devait exister avec toute sa force à plus haute température car le

mécanisme qui, comme on le sait, entraîne la sélection d'un vide particulier parmi tous ceux également possibles dans le cadre de la grande symétrie, ne marche alors plus. Quoi de plus naturel que de partir simplement d'un champ scalaire neutre, nécessaire pour le mécanisme de Higgs et de suivre la séquence dans le sens du temps. Nous sommes autour de 10^{-35} s. La température décroît. La symétrie se trouve brisée. Champs de jauge et champs de Higgs qui acquièrent une masse de l'ordre de 10^{15} GEV dans le vide choisi se désintègrent spontanément et à jamais en quarks et en leptons. Nous sommes partis pour un Univers où protons et électrons auront des charges strictement opposées et qui sera globalement neutre. Nous avons une réponse plausible à un des problèmes importants. Ceci pose cependant un autre problème que nous n'avons pas encore. Dans le cadre de ces théories de grande unification le vide choisi n'a aucune raison d'être le même partout. Différentes régions de l'Univers, et a fortiori celles qui étaient alors au-delà de l'horizon de notre coin d'Univers, ont pu tomber dans un vide énergétiquement identique mais différent du nôtre. La présence de différents domaines, dans lesquels la brisure de la symétrie initiale, qui suit la chute de la température, se produirait de façons différentes, implique la présence de monopoles magnétiques extrêmement massifs, ayant une masse de l'ordre de 10^{17} GEV. Aucun monopole de ce type n'a été détecté, malgré d'actives recherches. Qui a alors contrôlé que toutes les régions de l'Univers ont toutes bien choisi le même vide alors qu'elles ne pouvaient pas communiquer entre elles ? Une réponse tentante est l'inflation.

Supposons qu'avec la chute de la température, la symétrie soit brisée mais que la région de l'Univers dans laquelle nous sommes n'ait pas tout de suite trouvé son bon état de vide, propre à la symétrie brisée, et soit ainsi restée comme dans un état de surfusion, le changement de phase associé au changement de l'état du vide ne se produisant qu'avec un certain retard. On peut suivre l'évolution de l'Univers dans ce mauvais état de vide. Tout se passe comme s'il y avait une constante cosmologique accélérant l'expansion. La dynamique pousse à la création accélérée d'espace dans le mauvais vide. La valeur de la constante cosmologique est déterminée par l'énergie correspondant à la brisure de symétrie, 10^{15} GEV, et la constante de Newton. On trouve une valeur de l'ordre de 10^{23} GEV² pour

la constante λ . Le paramètre d'échelle R croît exponentiellement avec le temps. S'il croit ainsi d'un facteur 10 en 10^{-35} s, il croît d'un facteur 10 milliards en 10^{-34} s ! Si l'état métastable se maintient de 10^{-35} à 10^{-33} s, l'Univers peut enfler par un énorme facteur. On parle ainsi de 10^{50} ! La température chute de façon dramatique mais, lorsque l'Univers trouve le bon vide, l'énergie contenue dans le champ scalaire se matérialise en multiples quarks et leptons à haute température, de l'ordre de 10^{14} GEV. On est prêt pour le «Big Bang» proprement dit, mais avant, quel super «Big Bang», avec une expansion de l'espace qui dépasse et de loin tout ce que l'on verra après. Tout ceci est plausible. On a des modèles qui après brisure de la symétrie donnent un certain retard dans l'obtention du bon vide mais à vrai dire on ne connaît pas encore la théorie avec laquelle il faut suivre l'inflation. On a des candidats, les plus intéressants étant super symétriques. Aucun d'entre eux n'est encore pleinement satisfaisant. On cherche.

L'idée de l'inflation date de 1981. Elle est due à Alan Guth. Elle a été depuis développée par de nombreux chercheurs. Elle est aujourd'hui très populaire car elle donne une réponse intéressante à plusieurs problèmes à la fois.

On a bien sûr une solution naturelle pour tous les problèmes de symétrie entre quarks et leptons. Ils ont tous été formés à partir d'un champ neutre. Il n'y a bien sûr plus de problème d'horizon. L'accroissement relatif des distances autour de 10^{-35} s est tel que tout l'Univers visible est issu d'une région, minuscule au départ, et, de ce fait, causalement connectée. L'Univers pendant un temps très faible mais significatif s'est développé beaucoup plus vite que l'horizon alors que la loi que nous avons utilisée pour le comportement normal implique un développement moins rapide. Tout ce que nous pouvons voir est de ce fait pratiquement issu du même point. Il n'y a plus de monopoles à chercher. L'Univers visible n'en a pas engendré. Cette petite région d'espace qui va énormément se développer a choisi son vide et c'est tout ce que nous pouvons voir, et, pour longtemps encore, avec un facteur d'inflation de 10^{50} . Il n'y a plus de courbure, $k=0$. Même s'il y avait une courbure au départ, elle a été annihilée par l'inflation. On peut prendre l'image d'un

cercle dont le rayon augmente par un tel facteur et dont la courbure, mesurée par un observateur placé sur la circonférence, diminue d'autant. La densité actuelle doit donc être égale à la densité critique, comme elle l'a toujours été depuis l'inflation.

L'inflation permet aussi de considérer comme naturelle une certaine asymétrie entre matière et anti-matière. L'idée date de 1967 et est due à Andréi Sakharov. Certaines théories de grande unification peuvent briser la symétrie entre matière et anti-matière, n'étant pas invariante par la transformation CP (inversion des charges et inversion des coordonnées d'espace). Des mécanismes d'échange peuvent ainsi créer plus de matière que d'anti-matière et cesser soudainement d'agir, le couplage diminuant de façon vertigineuse à la suite de l'inflation. Le léger excès relatif de matière se trouve gelé hors d'équilibre.

Pour toutes ces raisons, il est extrêmement tentant aujourd'hui de supposer que l'Univers est passé par une telle phase d'inflation, débutant au plus tard 10^{-35} s après sa naissance. Tous les problèmes rencontrés y trouvent une solution logique et naturelle. Notre Univers serait issu d'un domaine extrêmement petit. Sa densité et sa composition actuelle ont été déterminés par la dynamique. La densité est égale à la densité critique. L'expansion se ralentit pour s'annuler asymptotiquement au bout d'un temps infini. Il reste beaucoup de travail à faire pour trouver, peut-être, la théorie qui permettra de préciser le scénario. Pour l'instant nous n'avons qu'un ensemble d'éléments plausibles, des modèles théoriques qui reproduisent le phénomène, son démarrage et son arrêt, et des ordres de grandeur acceptables.

Il convient de souligner l'importance de l'extrapolation qui a été faite. Nous sommes passés de la physique qui prévaut à 10^{-18} m, à celle qui pourrait prévaloir à 10^{-31} m. Un facteur 10^{13} les sépare. On passerait ainsi du centimètre à la dimension du proton ! Nous sommes passés de 10^{-10} s à 10^{-35} s, un bond par un facteur 10^{25} . Appliquons ce même facteur à une microseconde et nous avons l'âge de l'Univers !

Considérons cependant cette période inflationniste comme une réalité. Que s'est-il passé avant ? Nous avons l'Univers qui va devenir l'Univers pratiquement à jamais visible tel qu'il était un peu avant 10^{-35} s de l'instant initial. Il est tout petit et toute l'énergie est dans un champ scalaire dont la présence et la nature va entraîner la brisure spontanée de la symétrie initiale avec la chute de la température. La grande symétrie se manifeste encore dans toute sa force. Remontons le cours du temps. La température augmente. A 10^{-44} s, nous atteignons 10^{19} GEV. La gravitation, que nous avons jusque là systématiquement négligée au niveau des particules, devient une interaction forte car les particules y sont sensibles proportionnellement à leur énergie. Nous n'avons pas encore la théorie quantique de la gravitation, qu'il faudrait alors utiliser. On essaye aujourd'hui d'en développer une dans le cadre des super-cordes. Il faut, comme on le sait, dépasser la notion de champ quantique et considérer les modes de vibration d'une corde quantique, une petite boucle qui serait refermée sur elle-même à l'échelle de 10^{-35} m. C'est la distance d'exploration de la structure de la matière qui correspond à une énergie de 10^{19} GEV. Le développement de telles théories est un des grands problèmes actuels en physique des particules. Il semble que ces théories n'acquiescent toute la cohérence interne nécessaire que dans des espaces ayant plus que les trois dimensions d'espace qui nous sont familières. On parle souvent de 9 dimensions, et 6 de ces dimensions se trouveraient alors compactifiées, refermées sur elles-mêmes, à l'échelle de 10^{-35} m.

La symétrie demandée par les super-cordes est si vaste qu'elle peut facilement englober toutes les symétries spécifiques, propres aux différentes interactions que nous connaissons. La variété des champs quantiques connus ou encore inconnus, ainsi que la force des différentes interactions résultent globalement des contraintes géométriques et topologiques placées sur la théorie. C'est peut être la façon dont il faut approcher le début de l'Univers. Une fluctuation quantique gravitationnelle aurait pu être suivie, même sans attendre 10^{-35} s, par une inflation passagère de 3 dimensions d'espace, les autres restant refermées sur elles-mêmes à l'échelle de 10^{-35} m. Cela aurait pu être assez pour créer tout l'Univers que peut englober pratiquement à jamais notre horizon. A 10^{-44} s, nous sortons de

l'ère quantique gravitationnelle pour entrer dans un régime que nous pouvons suivre à l'aide de l'équation d'Einstein-Friedman.

L'inflation est une idée tellement intéressante qu'on peut vouloir l'exploiter même si la grande unification attendue à 10^{15} GEV n'est pas au rendez-vous. On dispose de modèles où elle peut apparaître juste au sortir de l'ère quantique gravitationnelle, au moment où la symétrie encore plus vaste issue des super-cordes se trouve brisée, pour nous donner les symétries actuelles, visibles à 100 GEV. Il serait curieux que la nature ne soit pas plus riche que notre imagination, telle qu'elle se manifeste aujourd'hui.

Comment se figurer cela de façon imagée sans trop trahir la dynamique ? Représentons nous l'univers à deux dimensions, comme une surface quasi plane ? Supposons que sur cette surface apparaisse une singularité -ce peut être un trou noir- qui va se présenter comme un puits sans fond au milieu de cette surface. Dans une formulation quantique le puits a une profondeur infinie, mais l'espace au fond du puits peut se transformer par fluctuation quantique en un espace inflationniste où la pression est négative. Ce fond du puits aspire ainsi l'espace ambiant et gonfle extrêmement vite comme une bulle de savon. C'est la naissance possible d'un Univers comme le nôtre. L'intérieur de la bulle finit par trouver le bon vide. L'inflation s'arrête. Le «Big Bang» tel que nous l'avons décrit commence dans ce morceau d'espace. Autre part, d'autres bulles peuvent apparaître.

Comment pouvons-nous espérer progresser ? D'une part l'étude du cosmos est en plein développement. Nous avons vu la façon dont notre connaissance du ciel s'est énormément développée en moins d'un siècle. Les moyens d'investigation se perfectionnent très vite. D'ici une décennie nous en saurons beaucoup plus, au point de rire peut être de notre myopie actuelle. En physique des particules, nous espérons pouvoir explorer d'ici une décennie la physique à 1 TEV et nous connaissons très bien celle qui prévaut jusqu'à 200 GEV. Bien que ceci soit encore loin de l'échelle d'énergie propre à la grande unification, nos idées sur cette grande symétrie se seront sans doute ainsi bien précisées, au

point de nous amener à rire peut être de notre audace simplificatrice actuelle. La théorie quantique de la gravitation sortira peut être d'une intuition géniale, comme ce fut le cas pour la relativité générale, peut être de longs et patients travaux sur les super-cordes.

Conclusions

La **figure 10** nous montre une vue du cosmos telle que l'a représenté Dürer. Que de changements dans notre vue du monde sont intervenus depuis ! Nous avons largement dépassé les limites de notre galaxie et nous avons découvert des foules de choses passionnantes sur les constituants et sur la dynamique de l'Univers. Les lois de la physique que nous connaissons nous ont permis de décrire une partie particulièrement intéressante de la genèse et, prodige de l'unité de la physique, les réponses viennent souvent plus de l'analyse de la structure de la matière, de cette plongée dans cet infini juste devant nous, au fond de chaque chose, que de l'étude détaillée du cosmos, notre évasion vers l'infini du monde extérieur, tout autour et loin de nous. Nous avons clairement séparé ce qui peut être considéré comme acquis, cette évolution du monde avec ses carnages de quarks et d'électrons, son éclair de lumière et la synthèse des noyaux légers, de ce qui n'est encore qu'hypothèses ou même visions. Le passage par une phase inflationniste, au tout début de l'Univers, a manifestement beaucoup d'attraits et d'adeptes, mais elle met en jeu une physique que nous ne connaissons pas encore et que nous devons deviner. La nature est plus riche que notre imagination et de nombreuses surprises se présenteront sans aucun doute. L'histoire décrite est passionnante. Elle a pour elle le caractère logique et quantitatif, et la valeur prédictive, que doit avoir toute description scientifique, et dont ne s'embarrassent pas de nombreuses présentations mythiques. Elle ne saurait cependant en aucun cas se substituer à elles.

Au coeur de toutes les description mythiques de la Genèse on trouve la lutte entre le bien et le mal et le triomphe possible mais bien difficile de la justice sur la force brutale,

que ce soit au niveau des hommes avec Caïn et Abel, ou au niveau des dieux, avec Seth et Osiris. Si la description qu'elles donnent pour la création du monde physique répond plus à un élan poétique que scientifique, notre description de la genèse de l'Univers ne répond elle en rien à ces questions chevillées à l'âme humaine. On peut même se demander pourquoi tout est ainsi créé pour être ensuite, et souvent irrémédiablement, détruit.



Figure 10
Le ciel Boréal tel que l'a représenté Dürer

L'histoire de l'Univers, toute passionnante qu'elle soit, ne semble pas avoir de raison. Il est en tous cas extraordinaire de pouvoir la découvrir et la comprendre, admirant en cela la profonde unité et la puissante universalité de la physique, plus fascinante encore par les problèmes qu'elle laisse que par ceux qu'elle a résolus. Ce n'est pas dans une certaine modestie qu'il convient de remonter jusqu'à 10^{-10} s, et même jusqu'à 10^{-44} s du début de l'Univers. La grandeur de la physique est moins dans les certitudes qu'on lui attache, et à

juste titre, que dans les remises en question qu'elle nous impose, comme l'a si merveilleusement représenté Dürer avec sa «Mélancolie» (figure 11). C'est sur cette émouvante image qu'il convient de terminer.

Maurice JACOB

