

# Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

---

---

## L'explosion primordiale de l'Univers

par Henri ANDRILLAT,

Professeur

à l'Université des Sciences et Techniques  
du Languedoc.

---

*Lors des Journées Nationales de l'Union des Physiciens, à Montpellier, M. le Professeur Andrillat nous a donné une belle conférence. Elle a enthousiasmé l'auditoire.*

*Le B.U.P. est heureux d'en publier le texte, complété par l'auteur.*

---

### I. LA RELATIVITE GENERALE ET LA COSMOLOGIE.

La cosmologie est la science de l'Univers à grande échelle. Elle s'appuie évidemment sur l'ensemble des connaissances astronomiques d'une époque donnée mais, à elle seule, la compilation de ces connaissances ne constitue pas une cosmologie qui, pour exister, suppose une modélisation du monde physique, un certain modèle mathématique bien déterminé d'Univers, que viendront confirmer ou infirmer les observations astronomiques.

C'est ainsi que l'idée de l'Univers sphérique que PLATON exprime dans le *Timée* constitue déjà l'amorce d'une cosmologie. Par contre, tous les développements de la théorie newtonienne de la gravitation, qui allaient faire de la mécanique céleste la science par excellence jusqu'à la fin du siècle dernier, ne débouchaient pas sur une véritable cosmologie, non pas parce que leur objet se limitait au système solaire, mais parce que cette théorie est développée à l'aide d'un espace plat, sans courbure, l'espace euclidien, qui est non-signifiant par rapport à tout essai de modélisation de l'Univers.

C'est donc avec les idées d'EINSTEIN, au début de ce siècle, que la cosmologie va réellement prendre son essor. L'idée

féconde est celle de l'espace courbe qui conduit au contraire à des géométries hautement significatives du point de vue de la connaissance de l'Univers à grande échelle.

C'est, de nos jours, une habitude de pensée très répandue chez les physiciens de considérer que l'espace euclidien à trois dimensions et un temps absolu, c'est-à-dire indépendant de cet espace, ne permettent de rendre compte correctement que de phénomènes macroscopiques dont l'échelle se situe à un ordre de grandeur voisin de celui de l'échelle humaine.

Mais que nous plongeons nos investigations vers le microscopique ou vers le cosmique à sa plus grande échelle ou que nous cherchions à interpréter les lois les plus profondes de la physique, alors la représentation du réel à l'aide de l'espace euclidien et du temps absolu n'est plus possible. Il n'est pas surprenant que ces notions induites de nos expériences premières ne soient efficaces qu'à l'échelle humaine et que l'on ressente la nécessité de généraliser ces concepts intuitifs d'espace et de temps. Toutefois, devant l'impossibilité mentale de le faire, notre seule ressource est de généraliser leur *représentation mathématique*. Telle fut l'idée géniale d'EINSTEIN qui, par une remise en cause de nos concepts intuitifs d'espace et de temps, réussit à repenser l'ensemble de la physique et à lever certaines antinomies dues précisément à l'étroitesse de ces concepts intuitifs.

Ce fut d'abord le renoncement à la notion du temps absolu par la réunion du temps et de l'espace, en une même entité mathématique, *l'espace-temps*.

Toute la construction de la théorie de la relativité restreinte, avec en particulier la découverte de la loi  $E = mc^2$ , repose en effet sur l'utilisation de l'espace-temps de MINKOWSKI.

La seconde généralisation consiste à introduire la *courbure* de l'espace-temps. Cette idée de base de la théorie de la relativité générale permet de résoudre l'antinomie du problème de la gravitation : pourquoi une planète, particule libre de l'espace, n'est-elle pas animée, conformément au principe de GALILÉE d'un mouvement rectiligne et uniforme par rapport à un système de référence inertiel lié au soleil ?

La théorie de NEWTON élude ce problème en introduisant une force qui, appliquée à la planète, détruit son caractère de particule *libre*. Certes, cette force rend compte alors correctement de son mouvement orbital mais comment expliquer physiquement cette action à distance entre la masse du soleil et celle de la planète ?

La notion de courbure de l'espace généralise au contraire le principe de GALILÉE en une loi des géodésiques de l'espace. Le

principe en cause est en fait le principe de moindre action qui impose à la particule libre de décrire une géodésique de l'espace, ligne de plus courte distance entre deux points de sa trajectoire. Cette trajectoire n'est une ligne droite que dans l'espace euclidien où s'applique alors le principe de GALILÉE mais elle est en général une courbe dans un espace courbe. La bille que nous lançons à la surface d'une table semble décrire une ligne droite uniformément et on induit de cette expérience le principe de GALILÉE. En fait, libérée de l'attraction terrestre par le support qui constitue la table, la bille décrit un très court fragment de son immense trajectoire orbitale autour du Soleil. D'une façon précise, la loi des géodésiques s'énonce de la manière suivante : les équations des géodésiques de l'espace-temps *sont* les équations de tous les mouvements possibles de la particule libre. Appliquée aux problèmes des deux corps, elle donne du mouvement d'une planète une description plus précise que la théorie de NEWTON, rendant compte notamment des avances périhéliques des trajectoires.

Le succès de cette idée d'un espace-temps courbe pour interpréter le phénomène de la gravitation incita EINSTEIN à l'utiliser encore pour construire une théorie de l'Univers dans son ensemble et l'on peut dire que la cosmologie moderne est née avec le modèle d'univers sphérique qu'il présenta en 1916. Dans ce modèle, l'Univers n'était pas constitué par des astres situés à la *surface* d'une gigantesque sphère euclidienne dont la Terre occuperait le centre, comme dans le modèle de PLATON, mais l'espace universel (à *trois* dimensions), non euclidien, et uniformément peuplé de galaxies, était doté d'une courbure telle qu'il puisse se refermer sur lui-même, comme, à deux dimensions, la surface d'une sphère se referme sur elle-même.

Avec une telle hypothèse, l'Univers était fini. Qu'on veuille bien se l'imaginer, la possibilité de finitude de l'Univers introduite scientifiquement par les équations-mêmes de la relativité générale constituait à l'époque une révolution conceptuelle aussi grande que le fut au 16<sup>e</sup> siècle la révolution copernicienne.

Les années qui suivirent allaient contribuer grandement à l'essor de la cosmologie observationnelle. Avec la mise en service en 1924 du télescope de 2,5 m de diamètre du *Mont Wilson* aux *Etats-Unis*, et avec la découverte du monde extragalactique par Edwin HUBBLE, le concept d'univers observationnel allait éclater. L'Univers aurait pu n'être constitué que de notre Galaxie. Il n'en était rien. Après la découverte de la Galaxie d'*Andromède*, c'est par millions, de 1924 à 1929, que les galaxies apparurent sur les clichés du *Mont Wilson*. On les compterait aujourd'hui par milliards jusqu'à des distances de milliards d'années-lumière. Et sur cette immensité, règne la loi physique la plus étonnante qui soit :

la loi de Hubble, relative au décalage,  $z$ , vers le rouge du spectre de toute galaxie, décalage cosmologique proportionnel à la distance,  $d$ , de la source.

On écrit la loi de HUBBLE :

$$cz = Hd \quad (c, \text{vitesse de la lumière}).$$

La constante de HUBBLE,  $H$ , est estimée actuellement à :

$$50 \text{ km/sec/mpc} \quad (1 \text{ mpc} = 1 \text{ mégaparsec} = 3,08 \cdot 10^{19} \text{ km}).$$

Quelle que soit l'interprétation que l'on donne de cette loi d'observation, il s'en dégage une idée de toute première importance, celle d'un univers *évolutif*. Cette idée essentielle s'oppose fondamentalement au concept ancien de l'immuabilité de l'Univers à grande échelle.

C'est le moment de rappeler les deux grandes attitudes intellectuelles devant cette découverte de l'évolution de l'Univers :

1) Cette évolution consiste, dans un espace euclidien, en un vaste *mouvement de récession* de toutes les galaxies les unes par rapport aux autres. Leur décalage spectral est dû à l'effet DOPPLER-FIZEAU. La loi de HUBBLE s'écrit alors :

$$cz = v_r = Hd$$

où  $v_r$  est la vitesse radiale de la Galaxie observée.

Mais alors comment expliquer physiquement l'énergie cinétique fantastique des galaxies lointaines ?

2) Cette évolution est une structure fondamentale de l'espace-temps. Le décalage spectral des galaxies (qui restent immobiles par rapport au référentiel) est d'une autre nature que le décalage Doppler. Il est dû à une variation de la courbure de l'espace entre l'instant d'émission des photons par la source et l'instant de leur réception par l'observateur. En somme, nous ne pouvons pas décrire l'Univers avec les mêmes normes d'espace et de temps entre ces deux instants et, d'une façon générale, tout au long de son évolution.

La cosmologie relativiste fondée sur un espace-temps courbe est particulièrement bien adaptée à rendre compte de cette loi physique très profonde qu'est la loi de HUBBLE. Il lui suffit de procéder à la troisième et dernière généralisation des concepts d'espace et de temps : un espace-temps à courbure *variable*.

Voici, à cause de son importance, l'interprétation de la loi de HUBBLE dans cette théorie relativiste de la cosmologie. Cette démonstration est due à Mc VITTIE. À côté de la métrique de l'espace-temps de MINKOWSKI en coordonnées sphériques d'espace :

$$ds^2 = -dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\Phi^2 + c^2 dt^2$$

la métrique la plus générale d'un espace-temps à courbure variable est celle de ROBERTSON-WALKER, qui s'écrit :

$$ds^2 = -R(t)^2 \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\Phi^2) \right] + c^2 dt^2$$

où  $R(t)$  est le facteur de courbure, variable avec le temps, et  $k$  une constante égale à  $+1$ ,  $0$  ou  $-1$  suivant le type de géométrie de l'espace.

Les photons quittent une galaxie  $G$  à l'instant  $t_e$  et arrivent à l'observateur en sa galaxie  $G_o$  à l'instant  $t_0$  en suivant une trajectoire radiale ( $G_o$  est supposée au centre du système de coordonnées) (fig. 1).

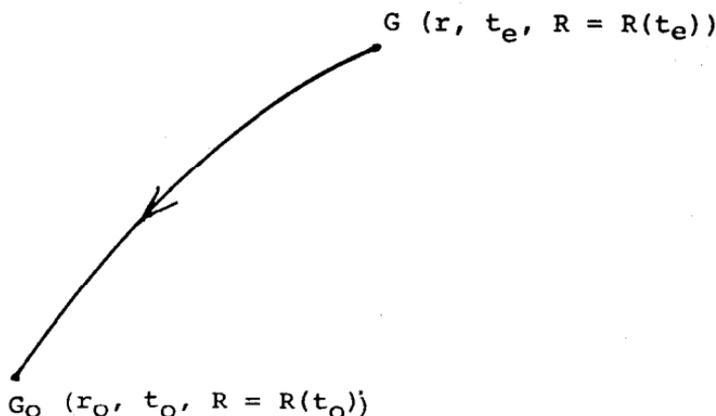


Fig. 1. — Trajectoire radiale des photons apportant à l'observateur en  $G_o$  l'information des événements en  $G$  avec un décalage  $z$ , donné par :

$$1 + z = \frac{R(t_0)}{R(t_e)}$$

Le mouvement des photons est régi par une loi générale de la relativité (géodésiques de longueur nulle) qui s'exprime par l'équation :

$$ds = 0$$

à laquelle on adjoint les équations de trajectoire radiale,

$$d\theta = d\Phi = 0.$$

Portées dans l'équation de la métrique, ces conditions fournissent l'équation différentielle du mouvement des photons entre  $G$  et  $G_o$  :

$$0 = -R(t)^2 \frac{dr^2}{1 - kr^2} + c^2 dt^2$$

ou, en extrayant les racines carrées et en levant l'ambiguïté de signe,

$$\int_0^r \frac{dr}{\sqrt{1 - kr^2}} = \int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{R(t)}$$

La galaxie  $G_0$  a pour coordonnée radiale  $r = 0$  et la galaxie  $G$  pour coordonnée radiale une certaine valeur  $r$ , constante, puisque l'on suppose les galaxies *immobiles* par rapport au référentiel  $r, \vartheta, \Phi$ . La première intégrale définie est donc une constante et de :

$$\int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{R(t)} = C^{te},$$

on déduit :

$$\frac{cdt_0}{cdt_e} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)}$$

La comobilité de toutes les galaxies avec le référentiel entraîne l'existence d'un temps propre *commun* à toutes les galaxies. C'est le *temps cosmique*. C'est dans cette échelle de temps unique que sont repérés tous les événements de l'histoire de l'Univers. Ainsi, un événement de durée  $dt_e$  qui se produit dans l'échelle du temps cosmique à l'instant  $t_e$  en  $G$  est observé en  $G_0$  (après que les photons en aient apporté l'information) à l'instant  $t_0$  avec une durée  $dt_0$ , reliée à la durée  $dt_e$  par la relation précédente.

En particulier un rayonnement émis avec la période  $dt_e$  est reçue en  $G_0$  avec la période différente  $dt_0$  et donc avec un décalage spectral  $z$  donné par :

$$1 + z = 1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda} = \frac{dt_0}{dt_e} = \frac{R(t_0)}{R(t_e)}$$

Ici  $\lambda$  est la longueur d'onde du rayonnement émis,  $\lambda + \Delta\lambda$  celle du rayonnement reçu. Le décalage a lieu vers le rouge ( $z > 0$ ), si  $R(t)$  est une fonction croissante. C'est l'explication du décalage cosmologique par *l'expansion de l'Univers*.

Le développement en série de TAYLOR de  $R(t_0)$  par rapport à l'argument  $t_0 - t_e$  donne :

$$1 + z = \frac{R(t_e)}{R(t_e)} + \frac{\dot{R}(t_e)}{R(t_e)} (t_0 - t_e) + \dots (\dot{R}(t) \text{ dérivée première})$$

ou, en le limitant aux 2 premiers termes :

$$cz = Hd$$

avec :

$$H = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} \quad \text{et} \quad d = c \cdot (t_0 - t_e).$$

La loi linéaire de HUBBLE apparaît donc comme une approximation valable tant que la distance des galaxies n'est pas trop grande, pratiquement quelques milliards d'années-lumière.

On voit sur la métrique de ROBERTSON-WALKER que le problème cosmologique présente un double aspect :

- celui de la *géométrie* de l'espace (détermination de la valeur de la constante  $k$ );
- celui de l'*évolution* de sa courbure (détermination de la fonction  $R(t)$ ).

On montre aisément que la théorie relativiste n'offre, en toute généralité, que 3 types de *géométrie possibles* pour l'espace universel, à savoir les géométries du second degré (les courbes du second degré, espaces à une dimension, sont les coniques. A la droite du premier degré, correspond l'espace euclidien sans courbure). Ces géométries sont :

- l'espace elliptique (en fait sphérique) refermé sur lui-même correspondant à un univers fini ( $k = 1$ )
- l'espace hyperbolique ( $k = -1$ )
- l'espace parabolique ( $k = 0$ ).

Ces deux derniers espaces sont ouverts et correspondent à un univers infini. C'est la densité de matière dans l'espace qui détermine sa géométrie.

On notera l'analogie avec le type géométrique de la trajectoire d'une particule en mouvement orbital autour d'une masse : l'ellipse (courbe fermée), la parabole ou la branche d'hyperbole (courbes ouvertes et infinies).

La discussion générale de toutes les formes possibles de la loi d'évolution  $R(t)$  a été faite en 1935 par TOLMAN. Depuis le problème s'est considérablement simplifié, après qu'on eut rattaché la loi d'expansion à une propriété intrinsèque de la composante énergétique de l'Univers (son rayonnement), alors que sa composante matérielle apporte, par les forces de gravitation entre ses éléments, une *décélération* à cette expansion de l'espace.

Les modèles à expansion décélérée se réduisent pratiquement aux seuls modèles de FRIEDMANN dont les courbes représentatives sont représentées sur la fig. 2 et sur la validité desquels s'accordent la plupart des astrophysiciens actuels.

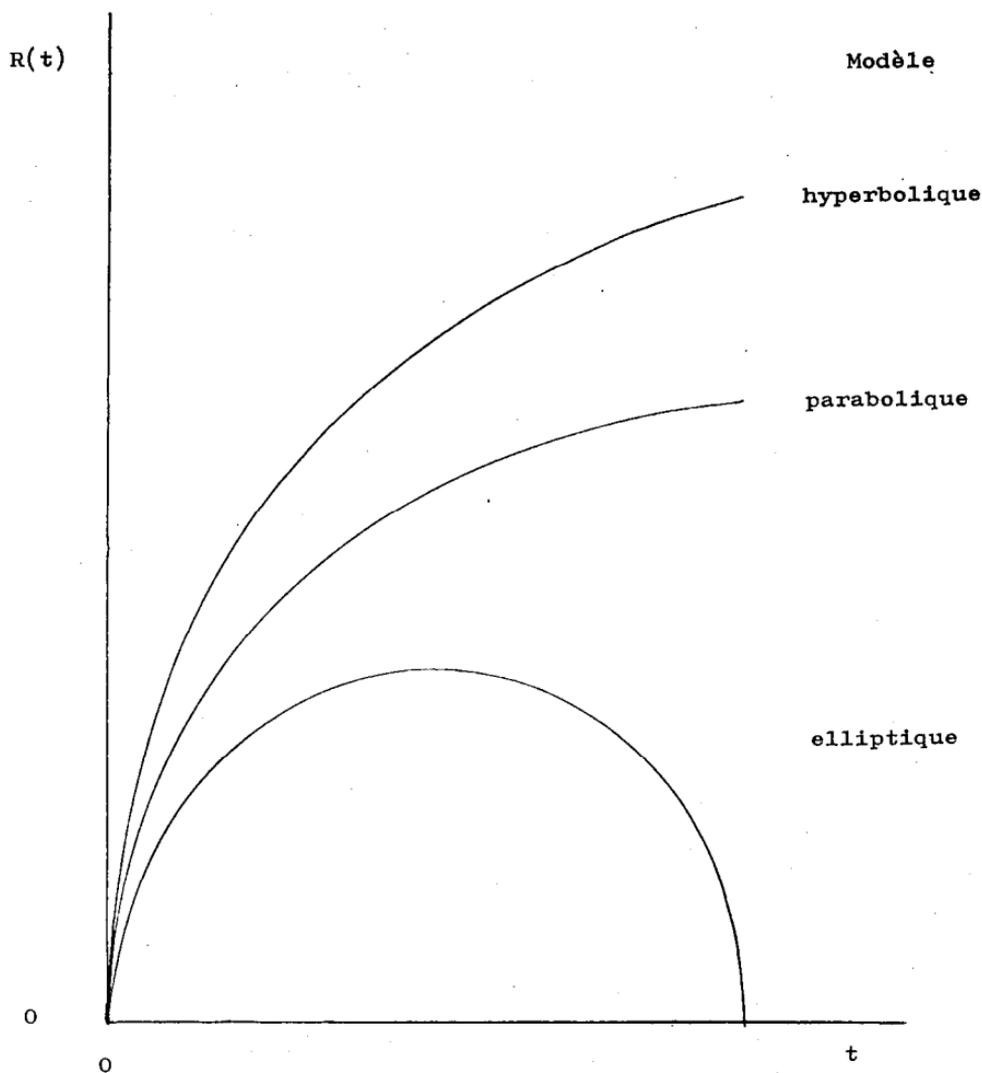


Fig. 2. — Variation du facteur de courbure  $R(t)$  en fonction du temps cosmique  $t$  dans les modèles de Friedmann.

La loi thermique de l'Univers est :  $R(t) \cdot T = C^{te}$ .

Ces modèles ont, tous trois, la particularité de présenter une *explosion primordiale*, le Big Bang, ( $\frac{dR}{dt}$  est infini en  $R = 0$ ,  $t = 0$ ).

Par ailleurs, les équations de la cosmologie relativiste fournissent une loi thermique simple pour l'Univers, quel que soit d'ailleurs le modèle adopté. C'est la relation :

$$R(t) \cdot T = C^{\text{te}}$$

où  $R(t)$  est la valeur du facteur de courbure à l'instant  $t$  et  $T$  la température du rayonnement de l'Univers en cet instant.

Si l'on veut voir le refroidissement de l'Univers au cours du temps comme une conséquence du second principe de la thermodynamique, l'expansion de l'espace qui en est le corollaire ( $R(t) \uparrow$  si  $T \downarrow$ ) peut apparaître comme l'expression géométrique de ce principe (voir légende de la fig. 3).

En tout cas, en remontant le passé de l'Univers vers la singularité initiale, la température augmente indéfiniment,

$$(T \rightarrow \infty \text{ si } R \rightarrow 0),$$

au moins théoriquement. L'Univers primordial apparaît alors comme le laboratoire par excellence de la physique des hautes énergies. C'est ce que nous nous proposons de montrer dans la suite de cet exposé qui est précisément consacré à la physique de l'Univers primordial.

D'un point de vue épistémologique, on notera que si la singularité ( $R = 0, t = 0, T = \infty$ ) du Big Bang apparaît comme l'origine de la phase d'expansion actuelle de l'espace, elle n'est pas une origine *absolue* de l'Univers, cette singularité ayant pu être précédée d'une phase de contraction de l'espace.

Dans le même ordre d'idées, un modèle elliptique d'Univers fini n'est pas nécessairement représentatif d'une *seule* arche d'émergence au monde physique d'un réel métaphysique, sous-jacent aux deux singularités,  $R = 0$ , qui la bornent ; il peut s'agir d'une phase d'un Univers pulsant. Le trou noir a une telle géométrie pulsante. Notre Univers serait-il un trou noir d'un Univers d'ordre supérieur ?

## II. LA PHYSIQUE DE L'EXPLOSION PRIMORDIALE.

### a) La thermodynamique de l'Univers.

En 1965, les radioastronomes PENZIAS et WILSON découvraient le rayonnement de  $3 K$ . Ce gaz de photons constitue la composante *énergétique* de l'Univers, comme le gaz de galaxies en constitue la composante *matérielle*. Parce que cette dernière s'impose avec évidence aux observations astronomiques depuis 1924, il était naturel que la loi qui la régit, la loi de HUBBLE, fut découverte bien avant celle qui régit la composante de rayon-

nement. On notera que toute une partie de l'étude du rayonnement de 3 K doit s'effectuer hors de l'atmosphère terrestre, avec des moyens spatiaux. Ces observations établissent *le caractère thermique du rayonnement de 3 K*, qui constitue, avec la loi de HUBBLE, la seconde loi cosmologique régissant la physique de l'Univers à grande échelle.

Cette loi thermique du gaz de photons pose un problème essentiel. S'il est bien connu que, dans l'enceinte d'un corps noir par exemple, le rayonnement acquiert une distribution de son énergie en fonction de la longueur d'onde, conforme à la loi de PLANCK (fig. 3), (par interaction avec les parois du corps noir), par contre, on ne voit pas immédiatement comment une telle distribution statistique des énergies spectrales se produit dans un univers totalement transparent, (actuellement le temps de libre parcours moyen d'un photon dans l'Univers est de  $10^{28}$  ans, alors que l'âge de l'Univers est seulement de l'ordre de  $10^{10}$  ans).

Un modèle d'Univers décrit par une métrique de ROBERTSON-WALKER à *explosion primordiale* (dont tout modèle de FRIEDMANN est un cas particulier), apporte une explication à ce problème.

Ce type de métrique est solution des équations d'EINSTEIN qui établissent de la façon la plus générale la dépendance de la courbure de l'espace à son contenu, caractérisé par la densité  $\rho$  et la pression  $p$  du milieu physique universel.

On établit alors les équations dites des cosmologies :

$$\frac{8\pi G}{c^4} p = -\frac{k}{R^2} - \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{2\ddot{R}}{R} + \Lambda \quad (1)$$

$$\frac{8\pi G}{3c^4} \cdot \rho c^2 = \frac{k}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{\Lambda}{3} \quad (2)$$

$\Lambda$  est une constante appelée constante cosmologique ;

$\dot{R}$  et  $\ddot{R}$  sont respectivement les dérivées première et seconde de la fonction  $R(t)$  de ROBERTSON-WALKER par rapport au temps  $t$  ;

$k$  est la constante géométrique ( $k = 1, 0$  ou  $-1$ ) ;

$G$  est la constante de gravitation et  $c$  la vitesse de la lumière.

Les équations (1) et (2) possèdent l'intégrale première suivante :

$$\frac{d(\rho R^3) c^2}{dt} + p \frac{d(R^3)}{dt} = 0. \quad (3)$$

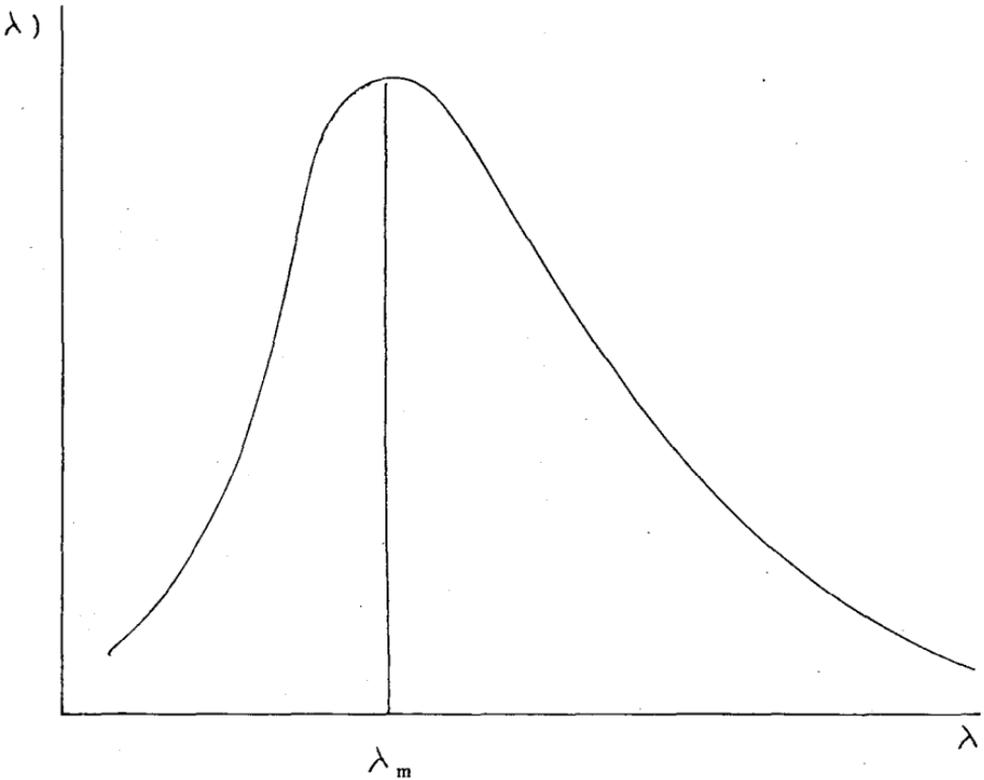


Fig. 3. — Répartition spectrale de l'énergie dans le rayonnement thermique à la température T.

La densité d'énergie est donnée par la relation de PLANCK :

$$d u(\lambda) = 8 \pi \cdot h c \cdot \frac{\lambda^{-5} \cdot d \lambda}{e^{h c / k T \lambda} - 1}.$$

Cette énergie est maximale pour la longueur d'onde  $\lambda_m$ .

Cette longueur d'onde est donnée par la loi de WIEN :

$$\lambda_m \cdot T = 2\,885 \text{ microns-degrés}$$

$\lambda_m$  varie comme  $R(t)$  dans l'Univers, car c'est une longueur.

La loi thermique de l'Univers est donc :  $R(t) \cdot T = C^{\text{te}}$ .

On introduit alors la notion de *volume comobile* avec l'expansion de l'espace.

C'est tout volume contenu à l'intérieur d'une surface  $r = C^{\text{te}}$  ( $r$ , arbitraire).

On s'assurera aisément, en se reportant à l'expression de la métrique de ROBERTSON-WALKER, que cette surface ( $r = C^{\text{te}}$  ou  $dr = 0$ ) a même métrique que la surface de la sphère euclidienne de rayon  $R(t) \cdot r$ . Le volume considéré est donc proportionnel à  $R(t)^3 \cdot r^3$ , (avec un facteur numérique petit qui dépend du type de géométrie considéré). Il croît au cours de l'expansion comme  $R(t)^3$ . Il est dit comobile avec l'expansion, et, au même facteur numérique près, la masse-énergie de ce volume est  $(\rho R^3) \cdot c^2$ .

L'équation (3) apparaît donc comme l'équation thermodynamique régissant la transformation de tout volume comobile d'univers au cours de l'expansion de l'espace :

$$dE + p dV = 0.$$

En rapprochant ce résultat de l'équation thermodynamique générale de la conservation de l'énergie totale, U :

$dU = dE$  (énergie interne) +  $dQ$  (chaleur) +  $p dV$  (travail) = 0, on trouve :  $dQ = 0$ . L'expansion est une transformation adiabatique.

On notera que la métrique de ROBERTSON-WALKER a été établie comme la métrique d'espace-temps à courbure variable la plus générale qu'on puisse déduire des équations d'EINSTEIN, sous l'hypothèse de l'isotropie de l'espace. Il n'est donc pas surprenant qu'elle entraîne l'adiabaticité de l'expansion de l'espace. Des échanges non nuls de chaleur entre des volumes comobiles quelconques détruiraient en effet l'isotropie des propriétés physiques de l'Univers.

On rappelle que, si S désigne l'entropie, pour une transformation réversible :

$$dS = \frac{dQ}{T}.$$

Nous allons montrer que l'entropie de tout volume comobile reste constante au cours de l'expansion, comme si cette dernière se comportait comme une transformation réversible.

Aujourd'hui, l'entropie cosmique est celle du seul rayonnement, le nombre de photons par  $\text{cm}^3$  du rayonnement de 3 K étant environ  $10^9$  fois plus grand que celui des particules matérielles.

La théorie du rayonnement thermique de PLANCK donne pour la densité numérique du gaz de photons à la température T :

$$n_\gamma \approx 20 \cdot T^3$$

soit  $n_\gamma \approx 400$  pour  $T = 2,7$  K (estimation la plus récente de la température du « 3 K »).

De son côté, l'observation de la composante matérielle (galaxies), conduit, par dénombrement de ces dernières notamment, à une densité massique moyenne de la matière dans l'espace égale à :

$$\rho \simeq 10^{-30} \text{ g/cm}^{-3}.$$

Dans l'Univers actuel, cette matière est constituée exclusivement de protons, de neutrons et d'électrons. Ces derniers ayant une masse négligeable par rapport au proton ou au neutron et ces deux baryons ayant d'ailleurs pratiquement la même masse, la densité  $\rho$  est essentiellement la densité baryonique qui correspond à une densité numérique de baryons :

$$n_B \simeq \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \text{ (baryons par cm}^3\text{)}$$

car la masse du proton (ou du neutron) est de  $1,66 \cdot 10^{-24}$  g.

Le rapport  $n_\nu/n_B \simeq 800 \cdot 10^6$  est de l'ordre du milliard et cet ordre de grandeur ne serait pas modifié par la prise en compte du nombre d'électrons. Il y a autant d'électrons que de protons.

Une étude plus exhaustive montre aussi que la prise en compte du gaz de neutrinos avec leur température propre revien-

draît à multiplier  $n_\nu$  par le facteur  $\frac{43}{22}$ .

L'entropie est donc proportionnelle à celle du rayonnement qui a, les observations le prouvent, le caractère thermique.

Alors la densité énergétique du rayonnement est :

$$U = a T^4$$

(loi de STEFAN ;  $a$ , constante de STEFAN)

et la densité d'entropie est :

$$s = \frac{4}{3} a T^3.$$

Tout volume comobile a donc une entropie  $S$  proportionnelle à :

$$s \cdot R(t)^3 = \frac{4}{3} a R^3 T^3$$

et cette entropie est constante au cours de l'expansion, car on déduit de la loi de WIEN (fig. 3) la loi thermique de l'Univers :

$$R(t) \cdot T = C^{te}.$$

La température du rayonnement croît indéfiniment quand  $R(t)$  tend vers zéro. Dans les modèles de FRIEDMANN, le Big Bang est chaud.

Par ailleurs, en se refroidissant au cours de l'expansion ( $T \downarrow$  si  $R \uparrow$ ), l'Univers est passé par la température de 3 000 K qui correspond au passage de l'état ionisé de la matière à son état neutre et, parallèlement, au passage de l'état d'opacité à l'état de transparence de l'Univers. En effet, la section efficace de l'électron libre pour le photon est beaucoup plus grande que celle de l'atome neutre ( $10^4$  fois plus grande à 3 000 K).

On trouve pour le photon un temps de libre parcours moyen de  $3 \cdot 10^3$  ans dans l'Univers ionisé, à 3 000 K, compte tenu de sa densité matérielle à cette époque, où l'âge de l'Univers est d'environ 500 000 ans. Tous les photons sont absorbés dans un laps de temps court par rapport à l'âge de l'Univers. Celui-ci se comporte donc comme un milieu opaque. Le passage à l'état neutre de la matière est brusque et le temps de libre parcours moyen des photons passe soudainement à  $3 \cdot 10^7$  ans. Les photons ne peuvent plus être absorbés pendant le temps d'existence de l'Univers ; c'est l'état de transparence.

Par ailleurs, l'interaction entre le rayonnement et la matière (photons-électrons libres) pendant la phase d'opacité va conférer au rayonnement son caractère thermique (comme dans un corps noir). Le rayonnement de 3 K est le résidu actuel de la dernière frange d'opacité de l'Univers, juste au moment du passage à la transparence. Ses photons ont le décalage :

$$1 + z = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} = \frac{T_e}{T_0} = \frac{3\,000}{3} = 1\,000.$$

Enfin ce caractère thermique se conservera pendant la phase de transparence, car la relation de PLANCK est invariante par rapport à l'expansion de l'espace.

En effet, dans l'intervalle spectral  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ , la densité énergétique du rayonnement thermique est donnée par la relation de PLANCK :

$$du = 8\pi hc \frac{\lambda^{-5} \cdot d\lambda}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

$h$  est la constante de PLANCK,  $k$  celle de BOLTZMANN.

Si  $du$  est cette densité à l'instant  $t$ , à l'instant  $t'$ , toute longueur  $\lambda$  aura été multipliée par le facteur d'expansion :

$$f = \frac{R(t')}{R(t)} = \frac{T}{T'} = \frac{\lambda'}{\lambda} \quad (\text{à cause de } RT = C^{te})$$

et la nouvelle densité  $du'$  à l'instant  $t'$  se trouve à nouveau donnée par la relation de PLANCK, mais pour la température  $T' = \frac{T}{f}$ .

(On pensera que  $du$  comme  $du'$  sont les valeurs pour  $1 \text{ cm}^3$ , mais qu'à l'instant  $t'$ , l'énergie  $du$  se trouve dans un volume de  $f^3 \text{ cm}^3$  et que chaque photon qui la compose a vu son énergie  $h\nu$

diminuée par le facteur  $f$ , car  $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ . Ainsi  $du' = du/f^4$ ).

Ainsi se trouve expliqué de façon remarquable par un modèle de FRIEDMANN le caractère thermique du rayonnement de 3 K.

### b) L'Univers et les particules élémentaires.

On remarquera que toute particule de masse  $m$ , peut être créée dans l'Univers, à partir de l'énergie du rayonnement. En effet, on peut toujours trouver la température suffisante (*température de seuil*) dans un passé suffisamment reculé. Elle est donnée par :

$$mc^2 = kT$$

$c$  = vitesse de la lumière =  $3 \cdot 10^{10}$  c. g. s.,

$k$  = constante de BOLTZMANN =  $1,38 \cdot 10^{-16}$  c. g. s.

On trouve, par exemple, pour le proton de masse :

$$m_p = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g.},$$

$$T = 10^{13} \text{ K.},$$

pour  $m_p c^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ erg} = 1 \text{ GeV}$

$$(1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}; 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}).$$

Mais toute particule est créée simultanément avec son antiparticule.

A de très hautes températures, l'excès d'énergie au-dessus de la température de seuil se retrouve sous la forme d'énergie cinétique, conférant aux particules des vitesses relativistes (proches de celle de la lumière). Ces particules relativistes se comportent comme les photons et se trouvent en équilibre thermique avec eux. L'entropie, toujours constante, de tout volume comobile n'est plus la seule entropie du rayonnement. Il s'y ajoute celle des particules à la même température. On montre que l'entropie des particules relativistes est égale à celle du rayonnement à un facteur près, appelé nombre effectif d'espèces, caractéristique des particules considérées et qui ne dépasse pas un ordre de grandeur de 100, même aux plus hautes températures envisageables.

Particules et antiparticules se forment constamment à partir de l'énergie mais aussi s'annihilent constamment par paires. C'est un état de l'Univers qui réalise parfaitement l'équivalence masse-énergie, révélée par la relation d'EINSTEIN,  $E = mc^2$ . Un observateur éventuel n'aurait su dire alors si l'Univers était matière ou énergie.

Par ailleurs quand la température approche (en décroissant) la température de seuil d'un type de particules, leurs annihilations deviennent plus nombreuses que leurs créations et ce type de particules disparaît finalement de l'Univers à la température de seuil. Mais ce scénario pose le problème de l'Univers matériel lui-même :

Au-dessous de  $10^{13}$  K, tous les protons (et les neutrons de même masse) auraient dû s'annihiler avec leurs antiparticules, créées en nombre rigoureusement égal. Ce n'est évidemment pas le cas.

On notera toutefois que l'annihilation de ces baryons a été presque totale. Initialement en nombre égal au nombre des photons, leur nombre résiduel, figé, en dessous de la température du seuil, n'est que de 1 baryon pour 1 milliard de photons (voir précédemment).

Il conviendra néanmoins d'expliquer la cause de cette légère asymétrie, responsable de l'existence du monde matériel.

L'annihilation d'un type de particules provoque le réchauffement du milieu subsistant à cause de la conservation de l'entropie. L'exemple suivant est de grand intérêt :

A  $10^{13}$  K, les protons sont annihilés (au résidu près de 1 sur 1 milliard) et réchauffent également le gaz de photons, le gaz de neutrinos, le gaz d'électrons.

A  $10^{10}$  K, les neutrinos se découplent du reste de l'Univers, qui devient transparent pour eux, comme il le deviendra pour les photons plus tard à 3 000 K et par un processus analogue de brusque diminution de la section efficace électron libre-neutrino. Désormais les neutrinos demeureront sans interaction avec le reste de l'Univers. De masse nulle ou très petite, ils subsisteront indéfiniment, comme les photons.

A  $6 \cdot 10^9$  K, les électrons s'annihilent (avec les positrons), au résidu près de 1 sur 1 milliard (conservation de la charge électrique totale de l'Univers).

Leurs annihilations ne réchauffent que le gaz de photons, puisque les neutrinos sont découplés.

Dans un volume comobile, l'entropie du mélange des photons et des électrons, juste avant l'annihilation de ces derniers, est proportionnelle à :

$$(2 + 7/2) R^3 T^3_{\text{avant}} = \frac{11}{2} R^3 T^3_{\text{avant}}$$

2 est la contribution des photons (nombre effectif d'espèce),

7/2 est la contribution des électrons.

Juste après, les électrons ayant disparu, l'entropie est proportionnelle à :  $2 R^3 T^3_{\text{après}}$  et sa loi de conservation s'écrit :

$$T^3_{\text{après}} = \frac{11}{4} T^3_{\text{avant}}$$

Le réchauffement du gaz de photons est donc donné par :

$$\frac{T_{\text{après}}}{T_{\text{avant}}} = \left( \frac{11}{4} \right)^{1/3} = 1,4.$$

On remarquera que les neutrinos, découplés, ont gardé la loi thermique d'avant les annihilations des électrons et donc désormais, la température du gaz de neutrinos est toujours celle

du gaz de photons divisée par 1,4, soit actuellement  $\frac{2,7}{1,4} \simeq 2 \text{ K}$ .

L'observation d'un rayonnement de 2 K serait à la fois celle de l'existence du gaz des neutrinos cosmiques et une vérification de toute la théorie. Mais cette observation reste très difficile à cause de la très faible intensité d'un rayonnement de 2 K.

Par contre, une autre vérification est accessible : l'abondance de l'hélium dans l'Univers.

Après leur annihilation globale à  $10^{13} \text{ K}$ , les neutrons subsistants font partie du résidu de baryons de 1 pour 1 milliard. Ils sont, pour un temps, maintenus en nombre sensiblement égal à celui des protons (presque de même masse), par les réactions d'interactions faibles :



$p$  (proton),  $n$  (neutron),  $\nu$  (neutrino),  $\bar{\nu}$  (antineutrino),  $e$  (électron).

Mais à  $10^{10} \text{ K}$ , les neutrinos sont découplés et les réactions (1) et (2) ne s'effectuent plus que de droite à gauche ; la réaction (2) est alors légèrement favorisée à cause de la masse légèrement plus grande du neutron :

$$\Delta m = (m_n - m_p) c^2 = 1,2 \text{ MeV}.$$

Le nombre des neutrons va donc diminuer et ce, suivant la loi statistique des masses :

$$\frac{N_n}{N_p} = e^{-(m_n - m_p) c^2 / kT}.$$

Ce rapport est figé quand les électrons s'annihilent à  $T = 6 \cdot 10^9$  K ( $kT = 0,6$  MeV), soit à la valeur  $e^{-2} = 0,135$  qui correspond à un pourcentage de 12 % de neutrons contre 88 % de protons.

Le refroidissement ultérieur de l'Univers conduit à la formation de noyaux atomiques. Il est facile de constater que cette nucléosynthèse primordiale s'est limitée à la formation de l'hélium. En effet, si tous les 12 % de neutrons figés ont servi à la formation de l'hélium (1 noyau d'hélium possède 2 neutrons et 2 protons), l'abondance de l'hélium sera de 24 % contre 76 % d'hydrogène. Les spectres stellaires, comme ceux de la matière interstellaire révèlent très exactement cette abondance d'hélium par l'intensité relative de leurs raies.

Ainsi, tous les neutrons primordiaux ont été utilisés à la formation de l'hélium et il n'en est pas resté pour étendre la nucléosynthèse cosmique à d'autres éléments. On sait que ces derniers ont été formés dans les cœurs nucléaires des étoiles gigantesques de première génération qui, en explosant sous forme de supernovae, ont enrichi le milieu interstellaire de ces éléments lourds que l'on retrouve actuellement dans les étoiles de deuxième génération et dans leurs cortèges planétaires.

### c) L'Univers et la grande unification.

Notre monde physique actuel de basse énergie exhibe 3 sortes de particules fondamentales : les *électrons* et les *neutrinos* (leptons) et les *quarks*, éléments constitutifs des particules plus lourdes, appelées baryons, (comme le proton ou le neutron) et entre lesquels seuls existent les interactions fortes qui font donner à ces particules lourdes le nom de hadrons.

Entre ces particules fondamentales, s'exercent 3 types de forces :

- l'interaction électromagnétique entre particules chargées, par exemple les électrons,
- l'interaction faible qui s'exerce surtout sur les neutrinos,
- l'interaction forte qui assure principalement la liaison des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques.

La quatrième force cosmique (l'interaction gravitationnelle) ne semble pas avoir d'effets sensibles, à l'échelle de la micro-

physique, entre les particules, les autres interactions étant largement prépondérantes.

Les interactions ne sont pas des actions à distance entre particules, mais sont interprétées comme l'échange, entre 2 particules réelles d'une troisième particule, dite virtuelle à cause de sa durée de vie si brève qu'elle est indécélable expérimentalement.

Les particules qui créent les interactions (électrons, neutrinos, quarks) participent à la statistique de FERMI-DIRAC et sont appelées des *fermions*. Les particules qui véhiculent l'interaction participent à la statistique de BOSE-EINSTEIN et sont appelées des *bosons*. C'est ainsi que la particule vecteur de l'interaction électromagnétique est le *photon virtuel* qui est un boson.

L'interaction forte est véhiculée par 8 types différents de bosons, les *gluons*.

Par ailleurs, la mécanique quantique attribue à toute particule une fonction d'onde à laquelle la particule s'identifie mathématiquement. Cette fonction des coordonnées ou ce système de fonctions constitue donc un champ (scalaire ou vectoriel, ou tensoriel...).

Les théories modernes traitent uniformément les bosons vecteurs des interactions comme des champs dits de *jauge*, parce que dans le lagrangien général du système quantique considéré, ils viendront compenser l'effet de certaines invariances profondes imposées à la physique quantique.

Dans le cadre de ces théories de jauge, certaines particules peuvent s'échanger entre elles suivant les règles de certaines symétries. Par exemple, le proton et le neutron seront considérés comme 2 états différents d'une même particule, le nucléon.

L'idée de haute intelligence a été d'imaginer une symétrie d'ordre élevé où les particules *distinctes* que nous connaissons ne seraient plus que des états interchangeables d'une seule et même particule, les interactions s'unifiant aussi en une interaction unique.

Le succès de la théorie de WEINBERG et SALAM pour unifier l'interaction faible et l'interaction électromagnétique a suscité la recherche d'une *grande unification* où les 3 forces seraient unifiées et où les hadrons et leptons seraient des états interchangeables.

Une telle interaction échangeant par exemple un quark avec un lepton (électron ou neutrino) est véhiculée par un boson qui n'existe plus couramment aujourd'hui, puisque aucune expérience habituelle sur la physique des particules ne révèle un tel échange. C'est donc que ce boson a une grande masse dont l'énergie de seuil dépasse largement l'énergie moyenne de l'Univers actuel.

Aux très hautes énergies, les bosons d'unification existent, et les particules s'échangent suivant une symétrie d'ordre élevé. Mais que l'énergie de l'expérience s'abaisse au-dessous de l'énergie de seuil de ces bosons, ceux-ci disparaîtront ; les particules ne s'échangeront plus et deviendront des entités distinctes. La symétrie générale sera brisée.

L'énergie de l'unification partielle (électrofaible) est de l'ordre de 100 GeV, les bosons échangeant électrons et neutrinos sont au nombre de 3 : 2 bosons chargés  $W^+$  et  $W^-$ , 1 boson neutre  $Z^0$ . La découverte expérimentale du boson W à 80 GeV est la preuve éclatante de l'efficacité de cette théorie.

L'énergie de grande unification est à une toute autre échelle,  $10^{15}$  GeV, hors de portée de notre instrumentation. Les bosons échangeant protons et leptons, par exemple, ont donc une masse égale à  $10^{15}$  fois celle du proton ( $m_p c^2 = 1$  GeV).

Mais si l'Univers primordial a connu le Big Bang, de telles énergies s'y sont produites, assurant notamment la désintégration du proton (un de ses 3 quarks transformé en lepton). Ces désintégrations aléatoires n'avaient pas de raison d'affecter *également* les protons et les antiprotons, créés, eux, en nombre rigoureusement égal.

L'asymétrie, qui va ultérieurement, au-dessous de la température de seuil du proton, laisser pour compte un résidu de 1 proton sur 1 milliard, trouve donc son origine dans la phase de grande unification de l'Univers primordial. Le développement quantitatif de la théorie, basé sur le groupe de symétrie SU(5), retrouve le rapport de dissymétrie de  $1/10^9$ .

Aujourd'hui, l'apparition de bosons X ne peut se faire que dans le cadre des fluctuations statistiques d'énergie de l'espace-temps et, avec des masses de l'ordre de  $10^{15}$  GeV pour les bosons X, la durée de vie du proton est portée à  $10^{32}$  ans, ce qui n'est pas contradictoire avec l'idée qu'on se faisait de la stabilité parfaite de cette particule. Mais la différence avec une stabilité absolue est essentielle. Des expériences portant sur des masses énormes d'hydrogène, dans l'espoir de déceler quelques désintégrations par an, apporteront peut-être une confirmation directe de cette théorie. L'existence même de l'Univers matériel en est déjà une.

Vouloir résumer l'histoire de l'Univers est une entreprise dérisoire ; récapitulons seulement nos connaissances à ce sujet.

A des énergies supérieures à  $10^{19}$  GeV (énergie de seuil de la masse de PLANCK), l'âge de l'Univers est inférieur au temps de PLANCK,  $10^{-43}$  sec, l'interaction gravitationnelle, quantifiée, intervient dans la physique des particules. C'est la *superunification*

où toutes les particules, y compris les bosons de jauge, sont unifiées, ainsi que les 4 types d'interactions. C'est la symétrie parfaite, un seul type de particules, un seul type d'interactions, une équivalence totale masse-énergie.

Puis, dans le milliardième de seconde qui suit, c'est la fulgurante succession des ruptures de symétries qui va découpler d'abord à  $10^{19}$  GeV, l'interaction gravitationnelle, puis à  $10^{15}$  GeV l'interaction forte, distinguant à jamais quarks et leptons, ceux-ci restant unifiés par interaction électrofaible jusqu'à  $10^2$  GeV, énergie de rupture de cette dernière unification. Le monde prend alors son aspect actuel, avec ses 4 forces fondamentales et ses particules distinctes, quarks, électrons et neutrinos.

Au voisinage d'une énergie de 1 GeV ( $10^{13}$  K), se produit la condensation du résidu matériel.

La période dite hadronique est achevée. Une courte période *leptonique* (de 1 GeV à 0,6 MeV) voit se produire le découplage des neutrinos et l'annihilation des électrons.

Au résidu matériel près, l'Univers n'est plus alors constitué que par le gaz de photons et celui des neutrinos qui n'interagissent plus avec les premiers. Mais les photons interagissent avec le résidu d'électrons libres de la matière encore ionisée. L'Univers est opaque. Le rayonnement acquiert son caractère thermique. C'est la *période de rayonnement* qui cesse à 3 000 K quand la matière passant à l'état neutre, l'Univers devient transparent. L'âge de l'Univers est de 500 000 ans environ.

Suivra ensuite la longue *période matérielle* où la matière s'organisera en galaxies, étoiles, planètes.

L'histoire de l'Univers est celle d'une succession de ruptures de symétries qui le conduisent de l'homogénéité initiale totale à un état d'organisation de plus en plus diversifié, dont le phénomène de la vie semble être la forme actuelle la plus développée.

Vers quel avenir est tournée cette évolution de l'Univers ? L'avenir infini des modèles hyperboliques ou paraboliques ou le retour à une singularité du futur des modèles elliptiques ? Les connaissances les plus récentes, tant théoriques qu'expérimentales, sur les neutrinos semblent leur attribuer une masse. Ne serait-elle que de quelques dizaines d'électrons-volt, que la densité de l'Univers serait alors suffisante à refermer l'espace sur lui-même en une géométrie elliptique qui reconduirait l'Univers à une nouvelle singularité.

Il y a peu de temps encore, on s'imaginait l'homme placé entre deux infinis, le microscopique et le cosmique. Les modèles à explosion primordiale détruisent cette idée : l'exploration loin-

taine de l'Univers passe certes par des espaces gigantesques mais elle converge, à l'approche de la singularité initiale, vers un microscopique primordial qui est le même que le microscopique quantique du monde actuel.

Le monde physique serait ainsi une arche d'émergence de phénomènes connaissables, représentations d'un réel inaccessible.

On notera à ce sujet l'analogie avec l'idée principale que développe SCHOPENHAUER dans son ouvrage « Le monde comme volonté et comme *représentation* ».

Ne doutons pas que la nouvelle symbiose de la cosmologie et de la physique des particules élémentaires n'apporte au monde de demain les découvertes les plus étonnantes et les plus enrichissantes pour l'humanité, avec peut-être aussi l'apparition d'une morale scientifique.

Dans l'Univers évolutif, l'heure de la pensée consciente est peut-être brève. L'homme a-t-il le droit de la gaspiller en des activités futiles ou destructives, face à l'édification de la connaissance et de la beauté qui est peut-être sa mission cosmique ?

---