

L'OBJET UNIVERS

Note de la Rédaction: Nous avons le plaisir de reproduire ci-dessous le texte de la conférence donnée par Jean Schneider lors de l'Assemblée Générale du CLEA en janvier 1985. Nous remercions Béatrice Sandré qui a rédigé ce texte à partir de ses notes et Jean Schneider qui a bien voulu relire le texte avant sa publication.

L'astronomie traditionnellement étudie les astres dans leur diversité. La cosmologie elle, n'étudie qu'un seul objet, l'Univers global, accessible aux observations. Elle doit observer, décrire la composition de l'Univers. C'est d'abord une géographie de l'Univers. Mais la vitesse de la lumière étant finie,

REGARDER LOIN, C'EST REGARDER DANS LE PASSE

La cosmologie est donc aussi l'histoire de l'Univers.

Lorsqu'on observe l'Univers, on constate d'abord qu'il est peuplé de galaxies et qu'à très grande échelle, elles sont réparties de façon uniforme. L'Univers peut être assimilé à un "gaz" de galaxies homogène et isotrope. Il a une densité uniforme ρ et sa géométrie, en tout point à symétrie sphérique, est caractérisée par un "rayon de courbure" R.

En 1929, Hubble montre sur un échantillon de galaxies qu'elles présentent un décalage spectral vers le rouge proportionnel à leur distance. Il interprète ce décalage comme un effet Doppler-Fizeau et énonce la loi qui porte son nom : les galaxies s'éloignent les unes des autres avec une vitesse proportionnelle à leur distance. Autrement dit,

L'UNIVERS EST EN EXPANSION ISOTROPE

Son rayon de courbure et sa densité sont des fonctions du temps : R(t) et ρ(t).

Considérant un élément d'Univers de volume unité, son énergie cinétique est proportionnelle au carré de sa vitesse et donc à (Ḙ/R)²; Son énergie potentielle, d'origine gravitationnelle, est proportionnelle à G . ρ(t) (G est la constante de gravitation universelle et Ḙ représente dR/dt).

La loi de conservation de l'énergie permet d'écrire une relation entre énergie cinétique et énergie potentielle qui régit la variation de R en fonction du temps :

(Ḙ/R)² = G . ρ

Cependant, la géométrie de l'Univers étant liée à son contenu matériel, on devra plutôt utiliser les lois de la mécanique relativiste, les équations d'Einstein. Elles permettent d'établir que ḘḘ = d²R/dt² est négatif quel que soit t. La courbe R = f(t)

a toujours une concavité tournée "vers le bas". Ceci impose dans l'histoire de l'Univers une date à laquelle R était nul. Cet instant, appelé "Big Bang" sera choisi comme origine des temps : si R = 0, t = 0 (fig. 1).

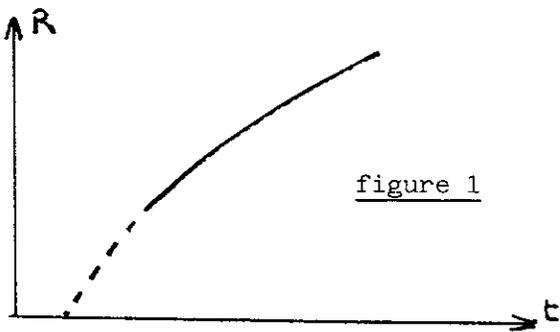


figure 1

Plus précisément, trois évolutions de l'Univers sont envisageables selon sa géométrie :

- \* si l'espace est euclidien, son expansion sera éternelle, R augmentant comme t<sup>2/3</sup>
- \* si l'espace est hyperbolique, son expansion sera aussi éternelle et R augmentera plus vite que t<sup>2/3</sup>
- \* si l'espace est sphérique, son expansion sera suivie d'une contraction

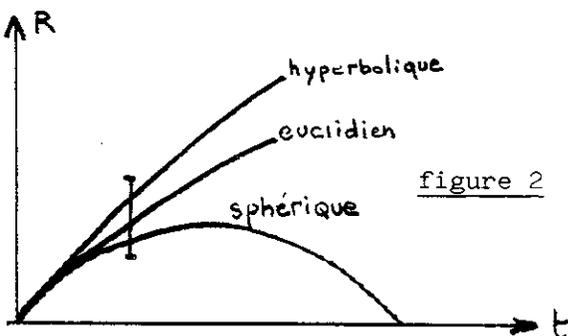
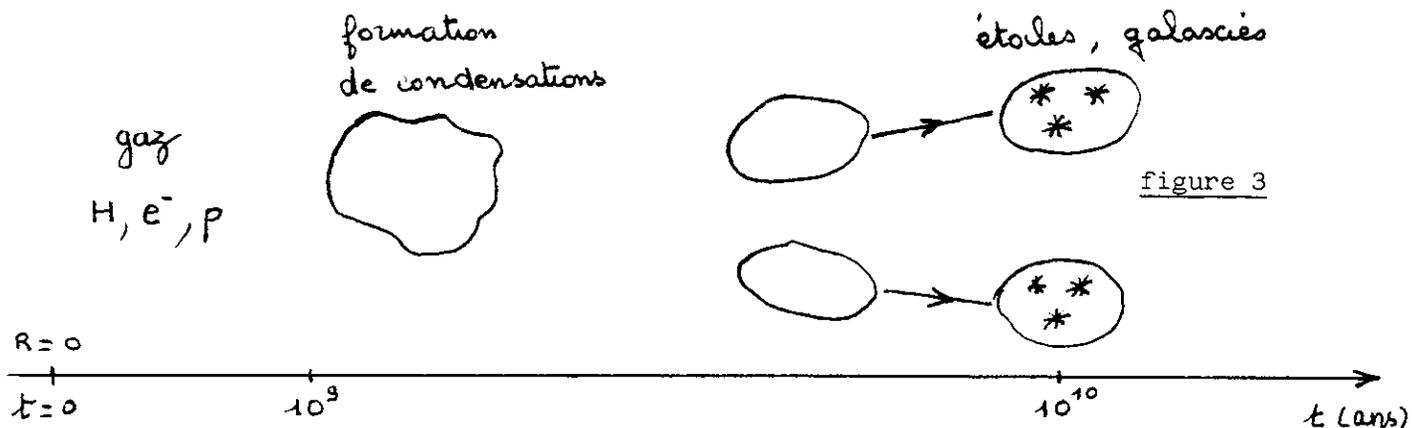


figure 2

La connaissance actuelle de l'Univers, ne permet pas de savoir sur quelle courbe il se place.

Les grands traits de l'histoire cosmique

A l'heure actuelle, l'Univers est constitué de galaxies, elles mêmes formées d'étoiles et de gaz. Ces galaxies résulteraient de condensations de nuages gazeux qui se seraient produites lorsque l'Univers était agé d'un milliard d'années environ.

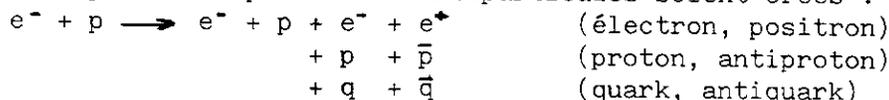


Avant cette période, l'Univers était rempli d'un gaz, essentiellement de l'hydrogène neutre (H) ou ionisé ( $e^-$ , p).

La densité  $\rho$ , masse par unité de volume, est proportionnelle à  $1/R^3$ . Lorsqu'on s'approche de l'origine des temps,  $R$  tend vers zéro et  $\rho$  vers l'infini. Le gaz est de plus en plus comprimé et donc de plus en plus chaud. On peut montrer qu'en première approximation la température  $T$  du gaz est inversement proportionnelle à  $R$  :

$$R.T \approx \text{constante}$$

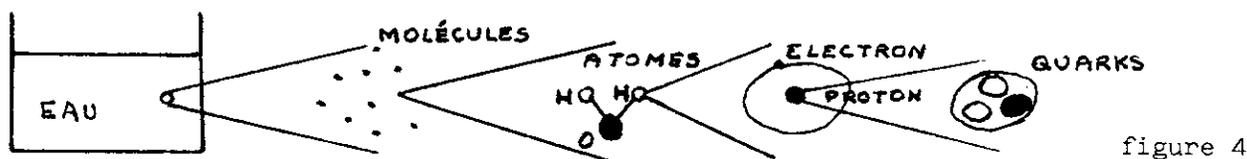
et puisque l'énergie cinétique des particules est proportionnelle à la température :  $E_c \sim kT$ , lorsque  $R$  tend vers zéro, la température du gaz et donc l'énergie cinétique des particules tendent vers l'infini. Dans ses "début" l'Univers était assez chaud pour que, lors de chocs, des paires de particules-antiparticules soient créées :



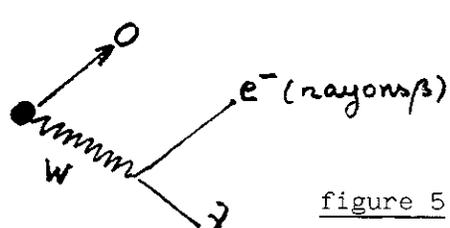
L'univers était rempli de particules et d'antiparticules en équilibre thermique. La cosmologie, géographie et histoire de l'Univers est alors régie par les lois de la physique, physique des particules, physique de l'infiniment petit. D'où le détour nécessaire par une ...

Plongée dans l'infiniment petit

La physique atomique nous apprend que la matière, l'eau par exemple, est constituée de molécules. Ces molécules sont constituées d'atomes et ces atomes d'électrons, de protons et de neutrons. Neutrons et protons sont constitués de quarks et, pour l'instant, cela semble s'arrêter là.



Le neutron, lorsqu'il est libre, est une particule instable. Par radioactivité  $\beta$  il se désintègre en proton. Cette désintégration est due à l'interaction faible.

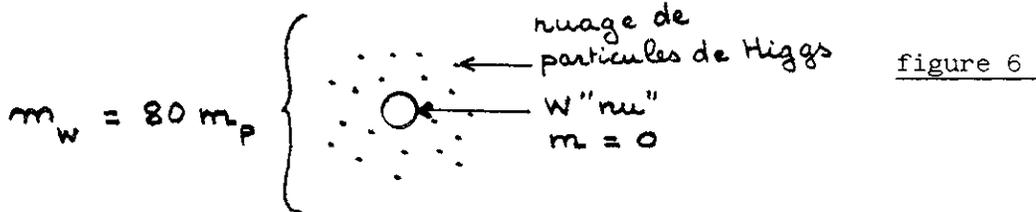


La théorie d'unification des forces électromagnétiques et faibles de Glashow, Salam et Weinberg décrit cette interaction par un échange entre les partenaires de la réaction d'un boson appelé boson intermédiaire et noté  $W$ .

La théorie électrofaible prédisait l'existence de trois bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . Ils ont été mis en évidence en 1983 au CERN par Rubbia et al. Leurs masses ont pu être mesurées et concordent parfaitement avec les prédictions :

$$m_W = 80 m_{\text{proton}} \qquad m_Z = 90 m_{\text{proton}}$$

En réalité, ces bosons "nus" doivent théoriquement avoir une masse nulle, mais ils sont toujours couplés à des particules appelées particules de Higgs. Seule la masse de l'ensemble est observable.



La protohistoire

Les connaissances actuelles en physique des particules permettent donc de retracer les principales étapes de l'histoire de l'Univers et en particulier de ses premiers instants.

Vers  $10^{-5}$ s après le Big Bang, lorsque la température était de  $10^{12}$  K, l'Univers était rempli de quarks, électrons, neutrinos, de leurs antiparticules ainsi que de photons. Les quarks se sont alors regroupés pour former des protons et des neutrons. Les neutrons, instables, se désintègrent progressivement en protons; mais au bout de 100 s environ, la température est suffisamment basse pour que les neutrons restant et des protons se regroupent et forment de l'Hélium. L'Univers contient alors 75 % d'hydrogène et 25 % d'Hélium.

Les éléments plus lourds, et en particulier le Carbone et l'Oxygène ne seront synthétisés que beaucoup plus tard ( $10^{16}$  s) dans le coeur des étoiles.



figure 7



Le rayonnement à 3 K et ses contradictions

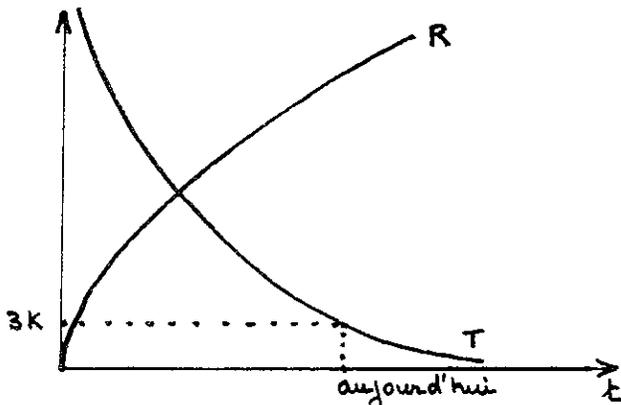


figure 8

En 1965, deux américains Penzias et Wilson détectent par hasard un rayonnement présentant une isotropie presque parfaite, identique à celui d'un corps noir de température 3K (c'est donc dans le domaine radio qu'il a été observé). Subissant l'expansion de l'Univers, sa température a diminué comme l'inverse de R.

Son existence avait été prédite vingt ans plus tôt par G.Gamow comme fossile d'une époque reculée où les photons étaient en équilibre avec la matière. Quelle est cette époque ?

L'Univers contient 75 % d'hydrogène, hydrogène à l'état neutre compte tenu de sa température. Les interactions photons-matière sont pratiquement inexistantes; l'Univers est transparent. Mais plus l'Univers était jeune, plus R était faible et T élevé. Au dessus de 4200 K l'Hydrogène était ionisé; les photons interagissaient avec la matière, l'Univers était opaque.

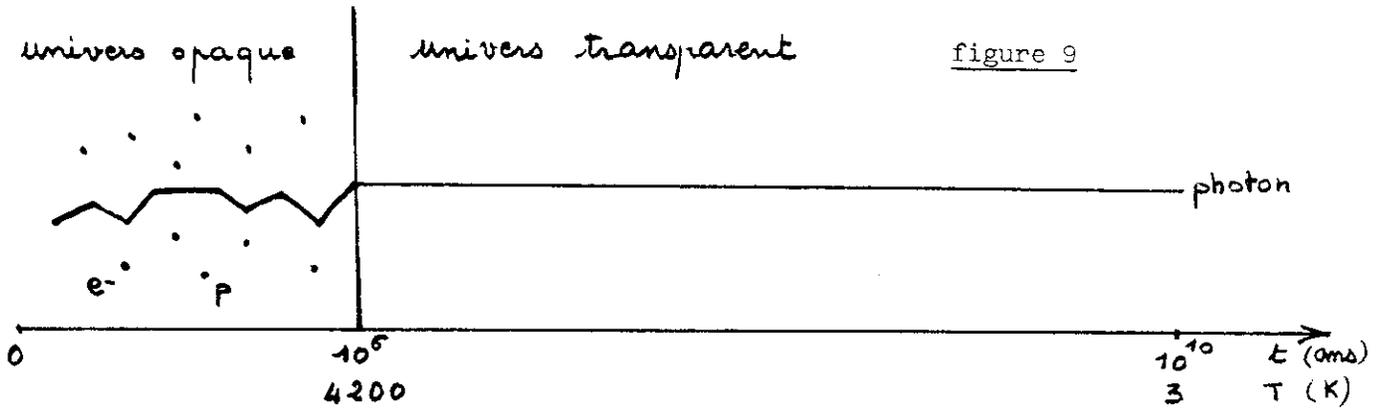


figure 9

Les photons que nous recevons proviennent de l'époque où l'Univers est passé de l'opacité à la transparence, alors que sa température était de 4200 K. C'est le signal le plus ancien et donc le plus lointain que nous pouvons recevoir. D'où provient-il ?

Les photons se déplacent à la vitesse  $c$ ; pendant le temps  $t$ , ils parcourent  $l = ct$ . Dans un repère  $l, t$  un photon décrit une droite de pente  $c$ .  $O$  étant notre position actuelle dans ce repère, chacun des photons qui nous parviennent maintenant a décrit au cours du temps l'une des génératrices d'un cône de sommet  $O$ , dit cône de lumière.

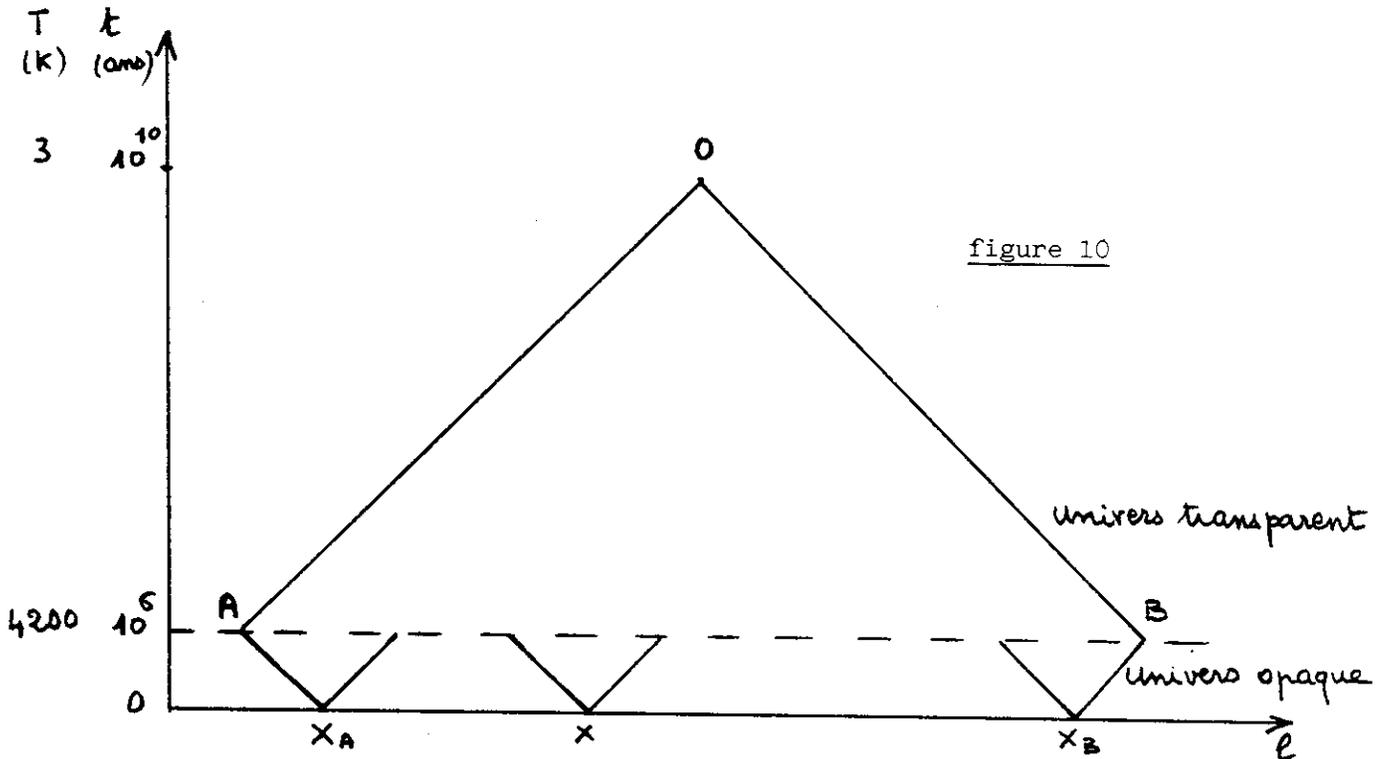


figure 10

Deux photons du rayonnement à 3 K nous parvenant de deux directions opposées, proviennent de deux points A et B. A cause de l'isotropie du rayonnement on a :

$$\left| T_A^{\text{obs}} - T_B^{\text{obs}} \right| < 10^{-4} \text{ K}$$

où  $T_A^{\text{obs}}$  et  $T_B^{\text{obs}}$  sont les températures observées aujourd'hui dans les directions de A et de B. Or cette quasi égalité pose un problème grave. En effet, par définition, aux points A et B eux-mêmes  $T^{\text{em}} = T_A = T_B = 4200 \text{ K}$ . Soient  $t_A$  et  $t_B$  les époques où  $T = 4200 \text{ K}$  en A et B. Il leur correspond un décalage spectral cosmologique  $z_A$  et  $z_B$ . A cause de la relation :

$$T^{\text{obs}} = \frac{T^{\text{em}}}{1 + z}$$

on déduit de  $T_A^{\text{em}} = T_B^{\text{em}} = 4200 \text{ K}$  et  $T_A^{\text{obs}} = T_B^{\text{obs}}$  que  $z_A = z_B$  donc  $t_A = t_B$ .

Comment se fait-il que en A et B la température du gaz cosmologique soit de 4200 K exactement au même moment ? Il y a là un problème.

En effet, un évènement X contemporain du Big Bang, n'a pu influencer que les points situés à l'intérieur du cône de sommet X (figure 10). Les points A et B ne peuvent se trouver à l'intérieur d'un même cône de sommet X. Alors, comment expliquer  $t_A = t_B$  ? C'est le paradoxe de l'horizon.

Solution du paradoxe de l'horizon : "l'inflation"

la propagation de la lumière en relativité générale

En écrivant  $l = c t$ , on a supposé les distances invariables, on a négligé l'expansion de l'Univers. Pour en tenir compte, on doit utiliser les équations de la relativité générale. Le mouvement d'un photon est caractérisé par :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R^2 \theta_r dr^2 = 0$$

$\theta_r$  dépend de la géométrie de l'espace mais est voisin de 1 si r reste petit, ce que l'on supposera. En posant  $dl = R dr$  on peut donc écrire :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dl^2 = 0 \quad \text{soit} \quad dl = c dt = R dr \quad \text{et} \quad r = \int \frac{c dt}{R(t)}$$

R étant une fonction croissante du temps, lorsque t augmente, r croît de moins en moins vite. C'est l'effet d'entraînement de l'expansion. Les cônes de lumière sont curvilignes. Mais le paradoxe de l'horizon n'est pas pour autant résolu, le calcul montre qu'il est même accru.

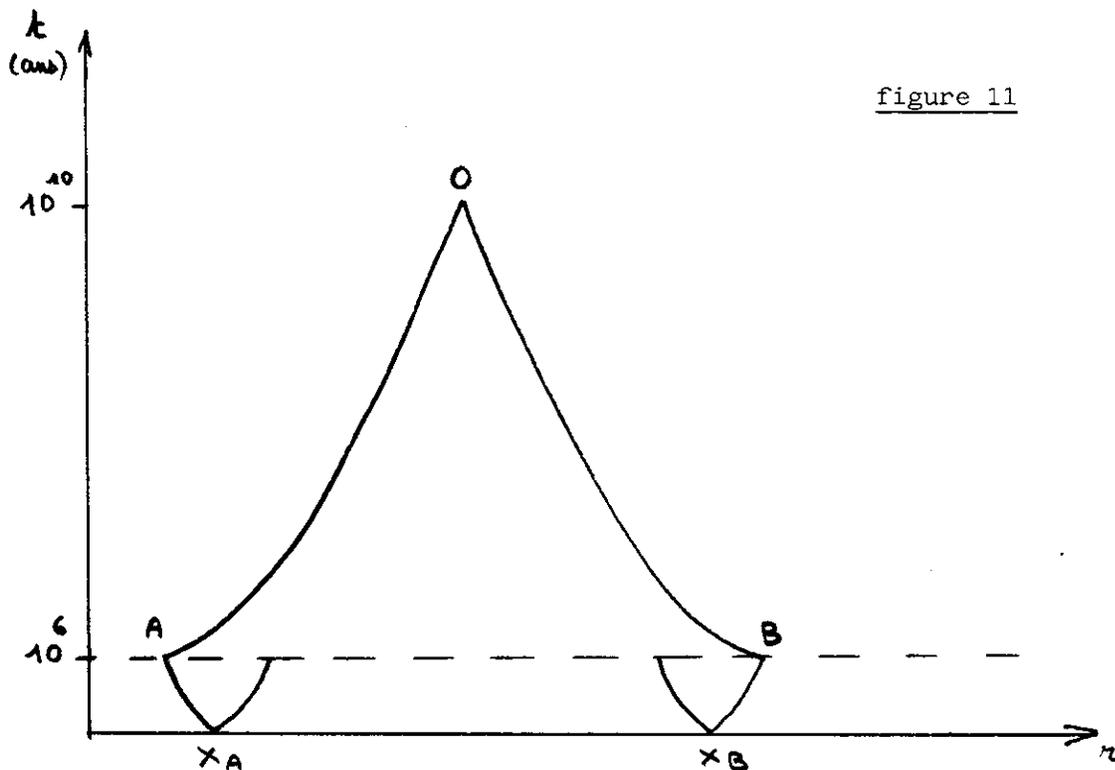


figure 11

les particules de Higgs dans un gaz à haute température en expansion

La densité d'un gaz "normal" est inversement proportionnelle à son volume :

$$\rho \sim V^{-1} = R^{-3}$$

L'Univers étant en expansion, son rayon de courbure augmente et sa densité diminue.

Les théories de grande unification qui unifient les interactions électrofaibles et nucléaires semblent imposer l'existence de particules, déjà mentionnées au sujet des bosons W et Z, les particules de Higgs. Elles n'ont jamais à ce jour été détectées mais on prévoit certaines de leurs caractéristiques : un spin nul, une masse comprise

entre  $10^4$  et  $10^{15}$  GeV d'après la théorie électrofaible de Weinberg et Salam, et de  $10^{15}$  GeV d'après les théories de grande unification. Ces dernières attribuent au gaz de Higgs une propriété très remarquable : pour des températures voisines de  $10^{28}$  K ( $m_{\text{Higgs}} = kT$ ) sa densité est indépendante de la température (alors que la densité d'un gaz de photons, électrons, quarks, neutrinos ... est proportionnelle à  $T^4$ ). Dans ce domaine de température, l'expansion de l'Univers a donc été accompagnée d'une création considérable de particules de Higgs afin de maintenir, malgré l'expansion, leur densité constante. Ce phénomène aurait duré de  $10^{-35}$  s à  $10^{-30}$  s après le Big Bang, temps pendant lequel la densité de l'Univers est donc restée constante.

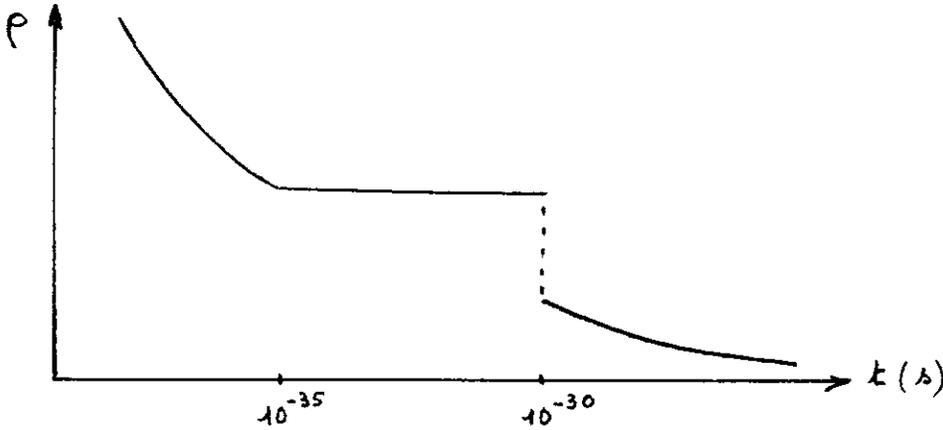


figure 12

L'équation régissant l'expansion de l'Univers :  $E_{\text{cin}} \approx E_{\text{pot}}$  ou  $\frac{\dot{R}}{R} = \sqrt{\rho G}$  s'écrit de  $10^{-35}$  à  $10^{-30}$  s :  $\frac{\dot{R}}{R} = \text{constante}$ . Sa solution est :

$$R = R_0 \exp ( t \sqrt{\rho G} )$$

C'est "l'explosion" exponentielle de  $R(t)$  appelée INFLATION COSMIQUE. Avant et après l'inflation, les cônes de lumière ont un comportement normal. Pendant l'inflation, de  $10^{-35}$  à  $10^{-30}$  s, il y a une explosion exponentielle de ces cônes. C'est très bref, mais le caractère est suffisamment violent pour que le point C puisse être une cause d'influence unique sur A et B (figure 13). Il devient possible qu'une cause commune ait équilibré les températures  $T_A$  et  $T_B$  au même instant en A et B. L'inflation cosmique résout le paradoxe de l'horizon<sup>A</sup>. Cette solution a été proposée par A. Guth en 1981.

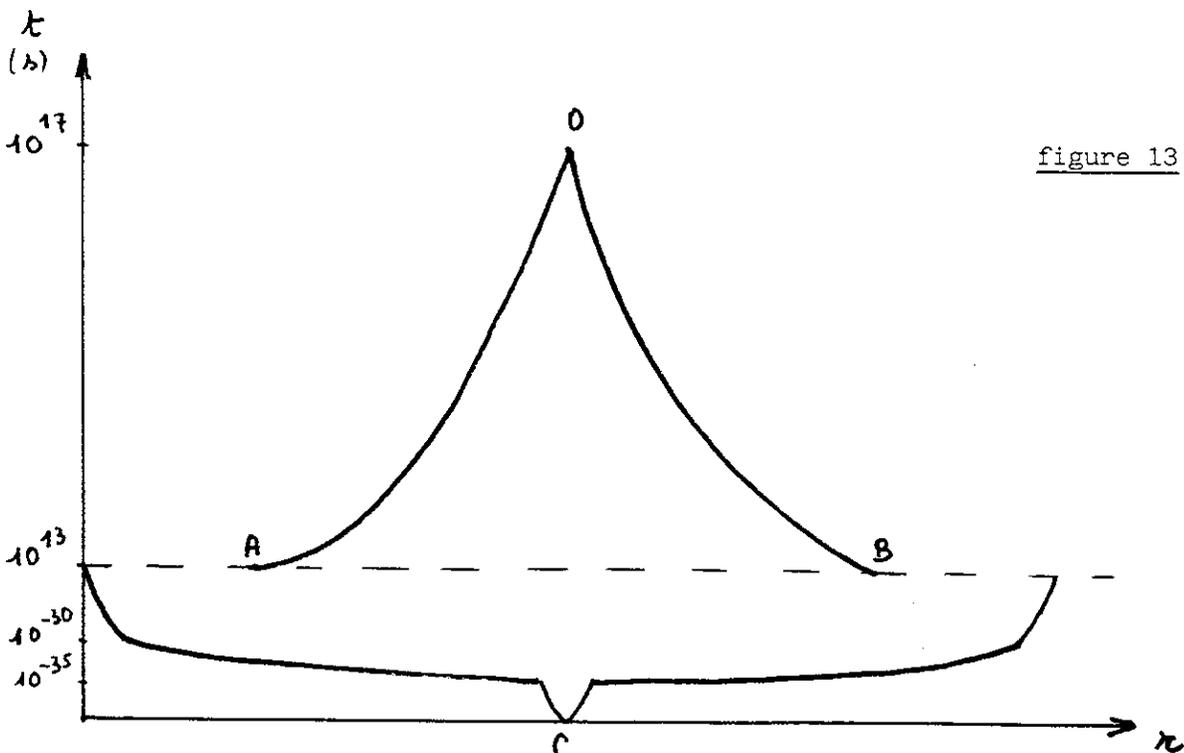


figure 13

Eschatologie

Jusqu'ici nous avons évoqué le passé; mais maintenant il y a des spéculations cosmologiques qui commencent à s'intéresser à l'avenir à très long terme de l'Univers et même à ultra long terme.

Parlons un instant pour décrire la figure 14 à l'indicatif et au futur. Il faudrait en réalité parler au conditionnel. Les deux axes parallèles représentent l'un les températures, l'autre le temps. Aujourd'hui, l'Univers est âgé de  $10^{10}$  ans environ. Vue l'échelle choisie, nous sommes tout à fait "en bas" de l'axe des temps. Nous connaissons une évolution normale des étoiles, mais leur combustible nucléaire va progressivement s'épuiser. Après l'explosion donnant lieu au phénomène de supernova, elles

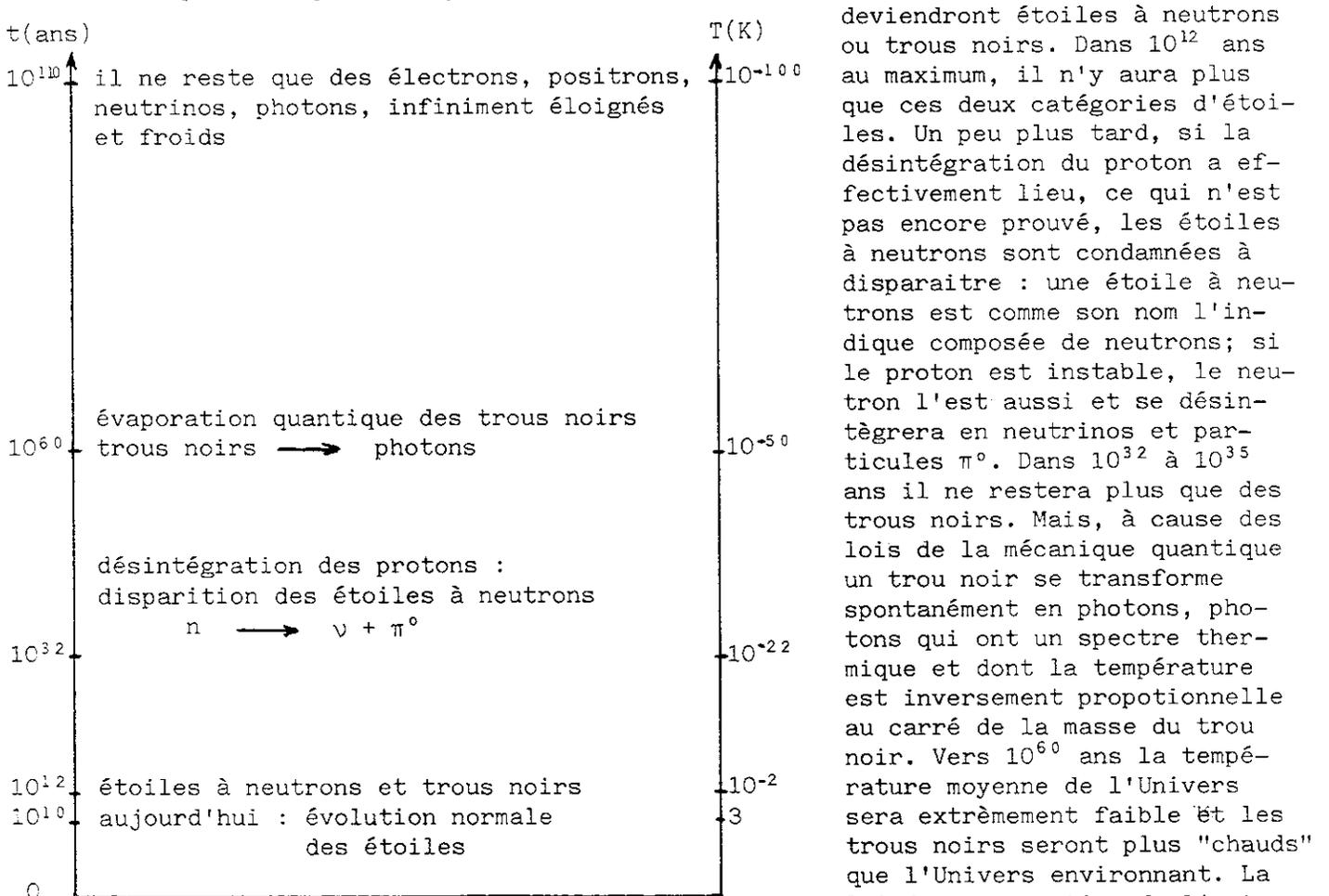


figure 14

deviendront étoiles à neutrons ou trous noirs. Dans  $10^{12}$  ans au maximum, il n'y aura plus que ces deux catégories d'étoiles. Un peu plus tard, si la désintégration du proton a effectivement lieu, ce qui n'est pas encore prouvé, les étoiles à neutrons sont condamnées à disparaître : une étoile à neutrons est comme son nom l'indique composée de neutrons; si le proton est instable, le neutron l'est aussi et se désintégrera en neutrinos et particules  $\pi^0$ . Dans  $10^{32}$  à  $10^{35}$  ans il ne restera plus que des trous noirs. Mais, à cause des lois de la mécanique quantique un trou noir se transforme spontanément en photons, photons qui ont un spectre thermique et dont la température est inversement proportionnelle au carré de la masse du trou noir. Vers  $10^{60}$  ans la température moyenne de l'Univers sera extrêmement faible et les trous noirs seront plus "chauds" que l'Univers environnant. La loi de conservation de l'entropie permet alors un déversement des trous noirs dans le reste de l'Univers. C'est l'évaporation

quantique des trous noirs. Elle dure de  $10^{60}$  à  $10^{100}$  ans. Dans  $10^{110}$  ans, il ne restera plus que des électrons, des positrons, des photons et des neutrinos isolés, c'est à dire à des distances kilométriques et il ne se passera plus jamais rien. Voilà le scénario, simplifié il faut bien le dire, auquel on est conduit lorsqu'on déroule de façon logique la mécanique de l'expansion de l'Univers (on trouvera plus de détails dans le livre d'Islam, "le destin ultime de l'Univers" chez Belfont). C'est l'eschatologie officielle mais peut-être trop simpliste !

En effet, le rapport entre l'âge de l'Univers pendant la période d'inflation et son âge aujourd'hui est environ  $10^{50}$ . Entre aujourd'hui et ces temps eschatologiques il est de  $10^{100}$  soit  $10^{50}$  fois plus :

$$\frac{t \text{ inflation}}{t \text{ aujourd'hui}} = 10^{-52}$$

$$\frac{t \text{ aujourd'hui}}{t \text{ eschatologique}} = 10^{-100}$$

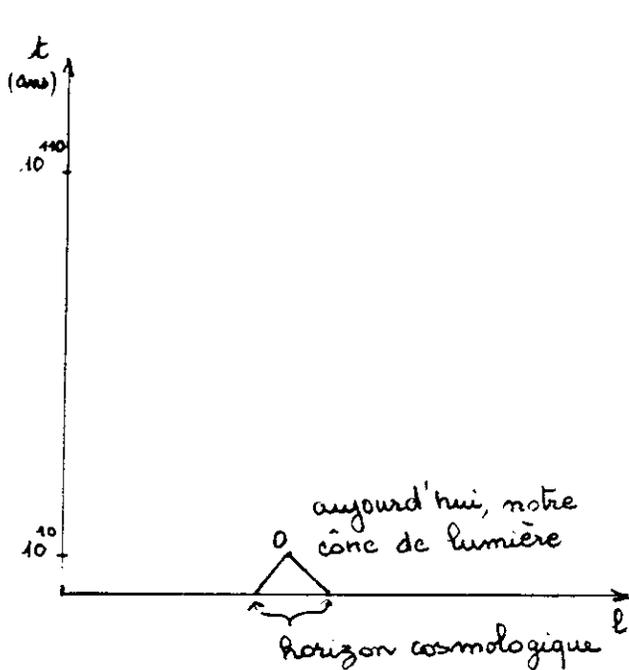


figure 15

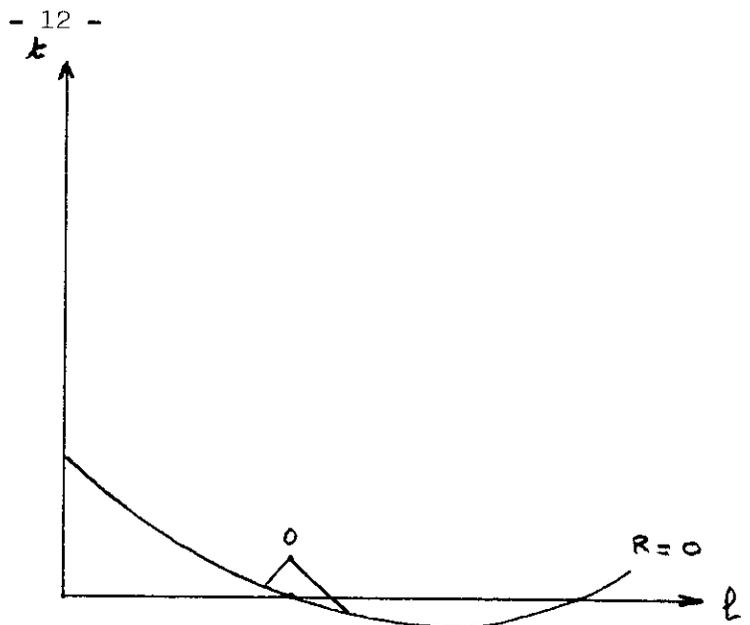


figure 16

Avec un axe des temps gradué de 0 à  $10^{110}$  ans, représentons le cône de lumière au sommet duquel nous nous trouvons aujourd'hui et qui nous permet de regarder dans le passé (figure 15). Le trait de crayon, aussi fin soit-il, ne pourra jamais nous montrer la période d'inflation.

Cette extrapolation extraordinaire semble naïve et rappelle celle qui au XIX siècle identifiait la Galaxie, seule connue, à tout l'Univers.

Aujourd'hui nous n'avons, par l'horizon cosmologique, qu'une vision extrêmement limitée de l'Univers. Au delà de ce qui nous est accessible, la distribution de la matière est peut-être inhomogène. De plus, il n'y a aucune raison pour que le Big Bang (caractérisé par  $R=0$ ) ait eu lieu partout au même moment. Dans le repère  $l, t$  la courbe  $R=0$  n'a aucune raison d'être la droite  $t=0$  (figure 16).

Au fur et à mesure de l'expansion, notre cône de lumière "remontera" et donnera accès à des régions de l'Univers toujours plus grandes (figure 17). Dans  $10^{50}$  ans nous pourrions par exemple être soumis à un Big Bang qui réchaufferait l'Univers et provoquerait une nouvelle contraction. Ce Big Bang retardé ne nous influence pas encore car il est trop loin. En ce sens là, regarder dans le futur c'est regarder loin aussi !

N'ayant jamais accès qu'à un volume limité de l'Univers, au fur et à mesure de l'expansion, on en découvrira toujours plus et

LA COSMOLOGIE NE SERA JAMAIS TERMINEE.

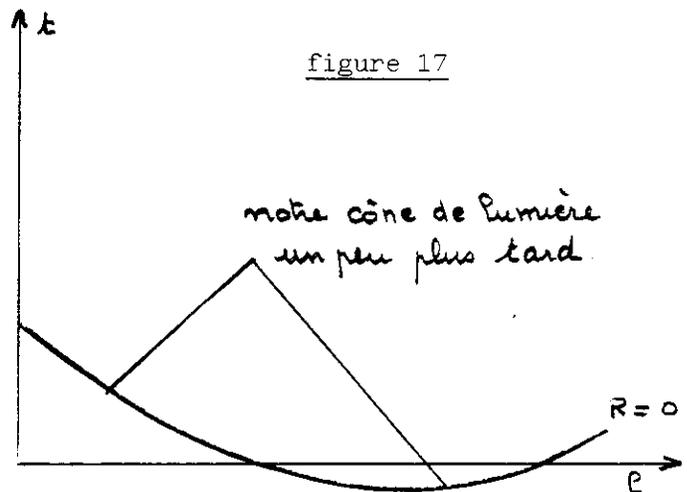


figure 17

Une dernière question que l'on peut se poser, c'est celle du statut de l'instant  $t=0$ . Il est possible que ce soit une véritable origine. Mais il est aussi possible que ce soit une phase transitoire nous séparant d'une période de contraction précédente. Nous avons accès au passé soit par les photons, soit en étudiant sur place des fossiles, l'abondance d'hydrogène mesurée localement dans les quelques kiloparsecs qui nous entourent par exemple. S'il existait des fossiles suffisamment résistants pour survivre au Big Bang, nous saurions éventuellement ce qui s'est passé avant. Mais actuellement, aucune théorie ne permettant de décrire la période avant  $10^{-43}$  s, nous n'en connaissons pas. On n'imagine rien qui puisse résister à cet "incendie cosmique" que serait dans ce cas là le Big Bang.