

L'expansion de l'espace

par M. G. Lemaître (1)

A la suite des cosmogonies de Laplace et de Kant, nous avons pris l'habitude de concevoir, comme point de départ de l'évolution du monde, une nébuleuse diffuse remplissant l'espace et se condensant progressivement en nébuleuses partielles, puis en étoiles.

Cette idée très ancienne a été adaptée aux progrès de nos connaissances astronomiques. Elle a récemment été exposée à nouveau dans le beau livre que Sir James Jeans a consacré à l'étude de l'univers. Il est possible maintenant de se rendre compte de la densité de la nébuleuse primitive, en estimant les masses et les distances des grandes condensations d'étoiles, appelées nébuleuses extra-galactiques, qui composent ce que nous connaissons de l'univers. En supposant que la masse des étoiles a été jadis uniformément répartie dans l'espace occupé par les nébuleuses, on trouve que la nébuleuse primitive a dû être plus raréfiée que le vide le plus extrême que nos physiciens peuvent rêver de réaliser dans leurs laboratoires. La densité de l'univers s'exprime par 10^{-31} gramme par centimètre cube, chiffre généralement considéré comme connu à un facteur cent près.

La conception de la nébuleuse primitive se heurte dès l'abord à une difficulté très sérieuse, qui n'a pu être écartée d'une manière satisfaisante qu'avec l'aide de la théorie de la relativité et des géométries non-euclidiennes : les diverses parties de la nébuleuse s'attirent les unes les autres et semblent devoir tomber vers leur centre de

(1) REVUE DES QUESTIONS SCIENTIFIQUES, 4^e série, t. 20 (1931, 3), p. 391.

gravité. Un premier élément de solution est apporté par la possibilité que l'espace réel n'est pas euclidien, mais obéit aux lois de la géométrie elliptique de Riemann. Alors il n'y a plus de centre de gravité.

Pour nous faire une idée claire de la géométrie elliptique, le plus simple est de considérer tout d'abord un plan elliptique et d'étendre ensuite la représentation obtenue à un espace à trois dimensions. Le plan elliptique peut être représenté sans déformation sur une sphère euclidienne. Naturellement la sphère euclidienne a un côté concave et un côté convexe, tandis que le plan elliptique est vraiment plan : ses deux côtés sont parfaitement équivalents et il peut être superposé à lui-même par retournement. Lorsque nous comparons le plan elliptique à une sphère euclidienne, il nous faut donc faire abstraction de toute propriété qui suppose que l'on sorte de la surface pour considérer les relations de ses points avec les points voisins de l'espace. Lorsqu'on ne quitte en aucune façon la surface, le plan elliptique et la sphère euclidienne sont parfaitement équivalents et la connaissance des propriétés de la sphère nous fait immédiatement connaître les propriétés du plan elliptique. Les droites du plan correspondent aux lignes de plus court chemin sur la sphère, c'est-à-dire aux grands cercles, la somme des angles d'un triangle est plus grande que deux droits, etc.

Il existe deux formes de la géométrie elliptique : la géométrie sphérique et la géométrie simplement elliptique. Dans cette dernière géométrie, un point de la sphère et son antipode sont supposés représenter un seul et même point du plan elliptique. Le plan elliptique est donc représenté deux fois sur la sphère. Deux droites du plan se coupent en un seul point, représenté deux fois aux deux points d'intersection des deux grands cercles. Dans la suite nous ne considérerons que cette forme de l'espace elliptique. Le plan elliptique peut donc être représenté en entier sur une demi-sphère. Les points du

cercle de base doivent être considérés comme représentant deux fois la droite correspondante, les deux points représentant le même point réel étant placés symétriquement par rapport au centre. Lorsqu'on s'approche du bord de la représentation et que l'on atteint un point du cercle de base, il faut passer au point antipode qui représente le même point réel et continuer à partir de ce point de manière à ne pas quitter la demi-sphère.

Pour étendre à l'espace à trois dimensions la représentation euclidienne de l'espace elliptique, il nous faut tout d'abord restituer à la représentation du plan sa propriété d'être plan. Dans ce but il nous faut utiliser une carte plane de la demi-sphère. Le plus simple est d'utiliser la représentation stéréographique qui représente la demi-sphère sur son cercle de base en en projetant les points à partir du pôle extérieur du cercle de base. On obtient ainsi une carte où l'échelle ne dépend pas de la direction et varie d'une valeur de un demi au centre à la valeur un sur le cercle de base. Il n'y a alors aucune difficulté à étendre la représentation à trois dimensions, en faisant tourner la carte plane autour d'un de ses diamètres. Tout l'espace elliptique est représenté à l'intérieur d'une sphère euclidienne, avec une variation d'échelle allant de un demi à un. Sur la surface extérieure la représentation est double, deux points antipodes ne représentent qu'un même point de l'espace réel. Les droites sont représentées par des cercles coupant la sphère extérieure en deux points antipodes qui représentent le point réel unique fermant la droite. La droite revient donc à son point de départ par la direction opposée sans avoir aucunement tourné.

Une nébuleuse remplissant uniformément l'espace elliptique de rayon R a un volume de grandeur finie $\pi^2 R^3$, donc une masse finie ; elle est parfaitement homogène, aucun point ne doit plus qu'un autre être considéré comme un centre de gravité. Il s'en faut pourtant que toute difficulté soit écartée. Pour nous en rendre compte,

découpons dans la nébuleuse une petite sphère qui nous servira de témoin pour étudier l'équilibre de l'univers. Le centre de cette sphère d'épreuve est un point quelconque et le rayon a une valeur arbitraire, petite par rapport au rayon de l'espace. Étudions l'action de la gravitation sur un point matériel situé à la surface de notre sphère d'épreuve. Ce point est attiré par l'action gravifique de la masse m intérieure à la sphère, qui agit sur lui comme si elle était condensée en son centre. Les masses extérieures réparties symétriquement autour de la sphère n'exerceront aucune influence gravifique; ceci est un résultat bien connu de la théorie de Newton, et Birkoff a montré qu'il restait vrai dans la théorie de la relativité. La sphère d'épreuve doit donc se contracter sous l'action de la gravitation. Mais le centre et le rayon de la sphère sont, nous l'avons dit, arbitraires ; la contraction a donc lieu autour de tout point de l'espace. Cela ne peut se concevoir que comme une variation du rayon R de l'espace. Tous les points de la nébuleuse restent uniformément répartis dans l'espace; la distance de deux d'entre eux est toujours la même fraction de la longueur totale de la droite fermée sur laquelle ils se trouvent ; mais cette longueur, égale à πR , varie avec le rayon R ; toutes les distances varient proportionnellement à la variation du rayon de l'espace.

Pour étudier en détail la variation du rayon de l'espace, il est nécessaire de faire appel aux équations de la relativité générale. Il est pourtant possible d'illustrer le résultat des calculs relativistes par des considérations élémentaires qui ne font appel qu'aux lois de la mécanique classique. Ceci est possible parce que les lois relativistes se réduisent à la limite aux lois newtoniennes, lorsqu'on les applique à un volume de dimensions infiniment petites. Appliquant le théorème de la force vive à une

masse unité située au bord de notre sphère d'épreuve supposée infiniment petite, nous obtenons l'équation

$$(dr/dt)^2 = - a^2 c^2 + 2Km/r.$$

Dans cette équation, le premier terme du second membre est la constante de l'énergie où nous avons mis en évidence, pour la facilité des calculs ultérieurs, la vitesse de la lumière c . K est la constante de la gravitation et m est la masse $4\pi r^3/3$ de la sphère d'épreuve. Nous pouvons donc écrire

$$(dr/cdt)^2 = - a^2 + 8\pi K \rho r^2/3c^2.$$

Si nous considérons des sphères d'épreuve de rayons différents, ces rayons doivent rester proportionnels entre eux; il faut donc que r soit proportionnel à la constante d'énergie a correspondant à chacune d'elles. D'autre part, la sphère d'épreuve occupe une fraction invariable de l'espace total; il faut donc que le rayon de la sphère d'épreuve varie proportionnellement au rayon R de l'espace; r doit donc être proportionnel à aR . Nos considérations élémentaires ne nous permettent pas d'aller plus loin, et nous devons emprunter à la théorie relativiste le fait que r est non seulement proportionnel, mais égal à aR . Remplaçant r par sa valeur, nous trouvons pour la variation du rayon R de l'espace

$$(1) \quad (dR/cdt)^2 = - 1 + \kappa \rho R^2/3$$

où nous avons écrit κ pour $8\pi K/c^2$. Si nous avons considéré un espace euclidien d'échelle variable proportionnelle à R , nous aurions obtenu la même équation avec suppression du terme $- 1$. Pour une géométrie hyperbolique (espace de Lobatchewski), il faudrait remplacer moins un par plus un.

Cette équation pourrait suffire à étudier la variation avec le temps du rayon de l'espace, si nous pouvons admettre que la masse totale M de la nébuleuse demeure constante. On a alors

$$M = \pi^2 \rho R^3$$

Pour nous rendre compte de la validité de cette équation, nous pouvons de nouveau nous servir de notre sphère d'épreuve. La masse comprise dans la sphère d'épreuve demeure-t-elle constante malgré la variation du rayon ? Masse et énergie sont, nous le savons, équivalentes ; la conservation de la masse revient donc à la conservation de l'énergie. Si maintenant la masse de la nébuleuse est animée en tout sens d'un certain mouvement, et exerce une certaine pression sur la surface de la sphère, il sera nécessaire de tenir compte du travail $p dV$ de cette pression durant la variation du volume V de la sphère. La variation de l'énergie contenue dans la sphère, plus le travail exercé par la pression sur sa surface sera égale à zéro.

$$d\rho r^3 + p dr^3 = 0$$

Puisque le rayon de la sphère est proportionnel au rayon de l'espace, nous pouvons remplacer r par R dans cette relation et déduire, pour le rayon de l'espace, la relation

$$(2) \quad d\rho + 3(p + \rho) dR/R = 0$$

Nous trouvons donc que, lorsque la pression est nulle, la masse de la nébuleuse demeure constante ; mais qu'elle varie quelque peu, si la pression n'est pas tout à fait négligeable vis-à-vis de la densité.

Ces relations permettent de nous rendre compte de la dynamique de l'univers ; elles nous habituent à considérer le rayon de l'univers comme une grandeur physique sus-

ceptible de varier. Les considérations par lesquelles nous les avons établies ne doivent pas être regardées comme des démonstrations rigoureuses, la seule démonstration qui ne prête flanc à aucune critique est celle qui les déduit des équations générales de la relativité ; néanmoins les considérations élémentaires par lesquelles nous les avons introduites permettent, dans une certaine mesure, de se rendre compte de la signification physique des résultats obtenus par des méthodes plus abstraites. Il nous faut maintenant expliquer et justifier la modification qu'il faut apporter à ces équations pour se rendre compte de l'équilibre de la nébuleuse de Laplace.

Un des résultats les plus importants de la théorie de la relativité est d'avoir identifié les deux notions de masse et d'énergie. L'énergie est essentiellement une grandeur qui n'est définie qu'à une constante près ; la masse au contraire, au moins en tant que facteur intervenant dans la loi de la gravitation universelle, ne comporte aucune constante arbitraire. L'identification de la masse et de l'énergie comporte donc un choix de la constante de l'énergie, ou inversement l'introduction d'une constante arbitraire dans l'expression de la masse gravifique. La théorie de la relativité nous apprend de quelle manière cette constante arbitraire doit s'introduire. Les équations de la gravitation s'obtiennent par intégration des équations qui expriment à la fois la conservation de l'énergie et celle de la quantité de mouvement. Cette intégration introduit naturellement une constante d'intégration ; mais cette constante d'intégration ne s'ajoute pas à l'énergie ou à la masse totale, elle s'ajoute à la densité. En d'autres termes, l'ajustement nécessaire entre l'énergie et la masse gravifique se fait, non sur la masse totale, mais sur la densité. Cette constante arbitraire qui s'introduit dans les équations a été appelée la *constante cosmologique*, parce qu'elle n'a d'importance que dans les problèmes relatifs à l'ensemble de l'univers. Elle ne doit être introduite que

dans l'équation (1) et non dans l'équation (2) qui exprime la conservation de l'énergie. L'équation (1) devient donc

$$(dR/cdt)^2 = -1 + \kappa \rho R^2/3 + \lambda R^2/3$$

ou, lorsque la masse totale est constante,

$$(dR/cdt)^2 = -1 + \kappa M/3\pi^2 R + \lambda R^2/3.$$

L'interprétation du terme cosmologique est immédiate. Il revient à superposer à la force newtonienne qui tend à diminuer le rayon, une force élastique qui tend à l'augmenter. Il existe une valeur du rayon, dite rayon d'équilibre, pour laquelle ces deux forces se neutralisent. La nébuleuse de Laplace peut donc subsister avec un rayon constant, pourvu que la valeur de ce rayon soit convenablement ajustée à la valeur de la masse totale de la nébuleuse.

Nous voilà donc arrivés à faire tenir en équilibre la nébuleuse de Laplace. Ne nous réjouissons pas trop vite, car il nous faudra constater que cet équilibre est bien précaire. Les équations de la dynamique de l'univers sont les mêmes que les équations du mouvement d'un point soumis à deux forces, l'une attractive en raison inverse du carré de la distance à l'origine, l'autre répulsive proportionnelle à cette distance. Il y a une position d'équilibre ; mais si nous nous en écartons tant soit peu, par exemple dans le sens des rayons croissants, la force attractive diminue et la force répulsive augmente ; le rayon tend à croître encore davantage ; l'équilibre est définitivement rompu. La nébuleuse est en équilibre, mais cet équilibre est instable ; pour peu que les conditions qui assurent l'équilibre soient altérées, la nébuleuse se mettra à se dilater ou à se contracter, et le mouvement de dilatation ou de contraction ne pourra que s'amplifier par la suite. Il ne faut pourtant pas nous exagérer l'état pré-

caire de la nébuleuse en équilibre ; car si elle est instable dans le temps, elle peut très bien être stable dans l'espace. Je veux dire par là, que, si en des endroits différents se produisent des modifications qui tendent, l'une à faire se contracter la nébuleuse, l'autre à la faire se dilater, ces deux tendances pourront très bien arriver à se neutraliser par un échange d'ondes gravifiques. La nébuleuse ne se dilatera ou ne se contractera que s'il y a une prédominance générale, d'ailleurs aussi faible que l'on veut, d'un effet sur l'autre. Il nous faut donc découvrir les causes qui tendent à produire une dilatation ou une contraction de la nébuleuse et examiner, en particulier, quel effet aura sur l'équilibre de la nébuleuse primitive, la condensation de celle-ci en nébuleuses partielles ou en étoiles.

Nous pouvons de nouveau nous rendre compte de cet effet, en étudiant l'équilibre de nos sphères d'épreuve. Cette fois nous ne choisirons plus arbitrairement le centre et le rayon de nos sphères. Nous placerons leurs centres aux centres des condensations, que nous supposerons réparties également dans l'espace. Nous imaginons l'espace divisé en un grand nombre de cellules égales et supposons qu'à l'intérieur de chacune d'elles la matière se condense vers le centre de la cellule. Si l'espace se contracte ou se dilate par suite de ces condensations locales, chacune de nos cellules se contractera ou se dilatera dans le même rapport et l'étude de la rupture d'équilibre d'une cellule nous renseignera sur la rupture d'équilibre de l'univers.

Les raisonnements que nous avons faits précédemment peuvent être reproduits. Naturellement, nous ne pouvons plus supposer que les cellules sont infiniment petites et nos raisonnements devront, plus encore que précédemment, être contrôlés par une théorie rigoureuse ; mais ils peuvent toujours nous servir pour en illustrer les résultats. Nous obtenons les mêmes équations, mais, la densité n'étant plus uniforme, ρ est une densité moyenne, tandis

•

que la pression p est essentiellement la pression à la surface de séparation des cellules, plus exactement, la pression dans la direction normale à cette surface de séparation. Puisque la densité n'est plus qu'une valeur moyenne sans signification physique immédiate, le mieux est de l'éliminer des équations. On trouve facilement

$$2R \, d^2R / c^2 dt^2 + (dR / c dt)^2 = -1 + \lambda R^2 - \kappa p R^2$$

On voit donc que la rupture de l'équilibre dépend de la valeur de la pression à la surface de séparation des cellules, ou encore à ce que nous appellerons la zone neutre entre les condensations. Si la pression à la zone neutre était nulle, les condensations locales seraient sans influence sur l'équilibre de l'univers. Mais toute augmentation de pression produit une contraction, tandis que toute diminution de pression entraîne une expansion de l'univers. La pression est proportionnelle à la densité d'énergie cinétique. Elle ne peut être nulle dans un gaz. Les condensations locales produisent nécessairement une raréfaction à la zone neutre; donc, même si la vitesse moyenne d'agitation n'était pas diminuée, la diminution de la densité devrait entraîner une diminution de la densité d'énergie cinétique; c'est-à-dire une diminution de la pression. Nous pouvons donc conclure que la formation de condensations locales dans la nébuleuse de Laplace en équilibre a dû rompre cet équilibre et déclancher l'expansion de l'univers.

L'hypothèse de Laplace a donc comme conséquence l'expansion de l'espace. Cette expansion a-t-elle réellement lieu et avec quelle vitesse se produit-elle ?

Dans un espace de rayon croissant, les points matériels, les grandes nébuleuses extra-galactiques par exemple, restent uniformément répartis dans l'espace et leurs distances mutuelles augmentent néanmoins, toutes dans le même rapport. Si donc nous observons les nébuleuses

extragalactiques, nous devons constater que leurs distances augmentent en restant proportionnelles entre elles et donc que toutes les nébuleuses extragalactiques ont des vitesses d'éloignement proportionnelles à leur distance. Les vitesses des étoiles ou des nébuleuses s'observent par le déplacement de leurs raies spectrales, connu sous le nom d'effet Doppler-Fizeau. Le spectre des nébuleuses lointaines montre des déplacements vers le rouge, correspondant à des vitesses d'éloignement allant jusqu'à 10 000 kilomètres par seconde ; et, pour autant qu'il est possible de juger de leurs distances, ces vitesses sont bien proportionnelles à cette distance. On possède jusqu'à présent une cinquantaine de mesures de vitesse et, d'après l'ensemble de ces mesures, on peut estimer qu'une nébuleuse située à une distance de cent millions d'années de lumière, distance à laquelle il est encore possible de la photographier, a une vitesse d'éloignement égale au vingtième de la vitesse de la lumière, soit 15.000 kilomètres par seconde.

Ce résultat permet de nous rendre compte de la grandeur que devait avoir à l'origine la nébuleuse de Laplace, et fixe à environ un milliard d'années de lumière le rayon initial d'équilibre de l'espace. La valeur actuelle du rayon dépend de l'estimation de la densité de la matière. En utilisant la valeur que nous indiquions au début de cet article, on trouve qu'il est égal à une vingtaine de fois le rayon initial.

L'état actuel de l'expansion permet de se faire une idée, non seulement des dimensions de la nébuleuse primitive, mais aussi de l'époque à laquelle les condensations locales s'y seraient formées en déclanchant l'expansion de l'espace. A première vue cette époque peut être reculée aussi loin que l'on veut, en supposant suffisamment faible la diminution de pression qui a déclanché l'expansion.

Comme nous l'avons vu, la formation des condensations

locales dérange les conditions d'équilibre dans la mesure où elles entraînent une diminution de la densité d'énergie cinétique à la zone neutre entre les condensations.

L'estimation de l'époque de la rupture d'équilibre dépend de la valeur de cette diminution de pression. Plus faible a été la chute de pression, plus loin nous pouvons reculer dans le passé l'époque où elle s'est produite. Nous pouvons même reculer cette époque aussi loin que nous voulons, pourvu que nous attribuions à la chute de pression une valeur suffisamment petite. Mais ceci est purement théorique, parce que l'influence de la diminution de pression sur la date du début de l'expansion est extrêmement lente. Pour reculer l'origine de l'expansion d'environ un milliard d'années, il faut réduire de moitié la chute de pression. Pour gagner dix, vingt, trente milliards d'années, il faut réduire la chute de pression au millième, au millionième, au milliardième, etc., et une telle réduction finirait rapidement par perdre tout sens physique. On trouve ainsi que, si le monde a commencé par une nébuleuse de Laplace en équilibre, la première condensation générale de quelque importance qui s'y est produite et qui a donc déclenché l'expansion de l'espace, n'a pu se produire à une époque remontant à plus de cent milliards d'années.

Pour se rendre compte de l'importance de ce résultat, il ne faut pas oublier que la cosmogonie de Laplace est essentiellement une cosmogonie lente. Les masses gazeuses primitives se condensent par suite des faibles inégalités de leur répartition initiale et forment les premières condensations : les nébuleuses extra-galactiques. Comme nous venons de le voir, cet événement ne remonte qu'à cent milliards d'années au maximum. Ces nébuleuses sont encore gazeuses à cette époque ; de faibles condensations s'y forment par hasard, et, comme l'a montré Jeans, elles doivent tendre à s'amplifier, pourvu qu'elles soient d'une dimension suffisante, comparable aux

distances mutuelles des étoiles. Mais combien de temps faudra-t-il pour que ces vastes condensations aient chance de se former et achèvent de se concentrer en un globe d'un diamètre cent mille fois plus petit que leur diamètre initial ?

Jeans demande cent mille milliards d'années pour cette évolution, et je ne suis pas sûr qu'il ait prouvé que cela suffirait ; nous ne pouvons lui accorder que le millième de ce temps.

Cent milliards d'années, c'est tout au plus cinquante fois l'âge que l'on attribue à la terre. C'est cent fois le temps nécessaire aux marées lunaires pour freiner le mouvement de rotation de notre satellite et le forcer à tourner constamment sa face vers la terre. Ce n'est que mille fois le temps qu'a mis la lumière pour nous parvenir de nébuleuses photographiées par nos télescopes. L'évolution s'est-elle vraiment faite suivant le type de Laplace, partant de l'extrêmement diffus pour arriver à l'état actuel de la matière : condensations stellaires dispersées dans un vide extrême ? La lumière n'emploierait pas une minute pour traverser le soleil, et il lui faudrait quatre ans pour atteindre l'étoile la plus proche. Le monde stellaire tout comme le monde atomique apparaît comme extraordinairement vide. Même dans un solide, il n'y a pas un millionième de millionième du volume qui soit occupé par les noyaux atomiques ou les électrons. Une cosmogonie vraiment complète devrait expliquer les atomes comme les soleils, et certainement les atomes ne peuvent avoir comme origine l'extrêmement diffus.

Dans le domaine atomique, nous connaissons une transformation spontanée qui peut nous donner quelque idée du sens de l'évolution naturelle ; c'est la transformation des corps radioactifs. Négligeant les photons et les électrons dont la masse est nulle ou très petite, un atome d'uranium se transforme finalement en un atome de plomb et sept ou huit atomes d'hélium. Ceci est une trans-

formation du plus condensé au moins condensé. L'uranium ne peut subsister en moyenne que quatre ou cinq milliards d'années avant de faire sa transformation. Le thorium se comporte d'une façon analogue.

Si nous étions apparus sur la terre cent milliards d'années plus tard, il n'y aurait plus de quantités appréciables de substances radioactives, et nous terminerions sans doute le tableau des éléments au bismuth et au plomb. Le tableau des éléments se termine-t-il réellement à l'uranium ? Ne sommes-nous pas arrivés trop tard pour connaître des éléments plus lourds qui se sont désintégrés d'une manière pratiquement complète avant notre naissance ? Les transformations radioactives ne sont-elles pas un pâle reste de l'évolution originelle du monde et n'ont-elles pas eu lieu jadis à l'échelle stellaire, il y a quelques milliards d'années ?

La tendance naturelle de la matière à se briser en particules de plus en plus nombreuses, qui se manifeste d'une façon si frappante dans les transformations radioactives, peut s'observer aussi sur les grains de lumière ou photons qui constituent les diverses formes du rayonnement : rayons X, lumière, chaleur rayonnante. Il est aisé de compter le nombre de photons qui se trouvent dans une enceinte en équilibre thermodynamique. Le nombre de photons par centimètre cube est proportionnel au cube de la température absolue, tandis que l'énergie par centimètre cube est proportionnelle à la quatrième puissance de cette température. Si nous mélangeons deux rayonnements thermiques en équilibre à des températures différentes T_1 et T_2 , en faisant communiquer les enceintes de volume V_1 et V_2 qui les renferment, l'énergie totale restera constante et donc la température T après le mélange sera déterminée par l'équation

$$V_1 T_1^4 + V_2 T_2^4 = (V_1 + V_2) T^4,$$

tandis que l'augmentation du nombre de photons sera proportionnelle à

$$(V_1 + V_2) T^3 - V_1 T_1^3 - V_2 T_2^3.$$

Il est facile de voir que cette expression est toujours positive et donc que le nombre de photons augmente. Il suffit d'ailleurs de le montrer lorsque le volume V_2 est infiniment petit, puisque le mélange peut être supposé établi progressivement. Éliminant T et négligeant les termes du second degré en V_2 , on trouve aisément

$$V_2(T_2 - T_1)^2 (3T_2^2 + 2T_1T_2 + T_1^2)/4T_2,$$

expression essentiellement positive.

D'ailleurs, ce résultat s'obtient aussi aisément en remarquant que l'entropie du rayonnement est aussi proportionnelle au cube de la température et que l'entropie doit augmenter dans les échanges thermiques. L'augmentation de l'entropie revient donc à une augmentation du nombre des photons.

Il semble donc que, tant dans les échanges thermiques que dans les transformations radioactives, l'évolution a lieu avec augmentation du nombre des particules : photons ou atomes. Ceci paraît être la forme moderne du principe de la dégradation de l'énergie : l'énergie se répartit en particules : électrons, photons ou noyaux atomiques, de plus en plus nombreuses. L'évolution se fait donc du simple au composé et non du diffus au condensé. L'origine du monde n'est pas vraisemblablement une nébuleuse primitive, mais bien plutôt une sorte d'atome primitif dont les produits de désintégration forment le monde actuel.

Si l'homme était apparu sur la terre cent milliards d'années plus tard, il n'aurait pas connu les corps radioactifs depuis longtemps épuisés, il n'aurait pas connu les

nébuleuses extra-galactiques enfuies au delà de la portée de ses télescopes, il serait vraiment venu trop tard dans un monde trop vieux.

Notre univers porte les marques de la jeunesse et nous pouvons espérer reconstituer son histoire. Les documents dont nous disposons ne sont pas enfouis dans les empilements de briques poinçonnées des Babyloniens, notre bibliothèque ne risque pas d'être détruite dans quelque incendie ; c'est l'espace admirablement vide où se conservent les ondes lumineuses mieux que le son sur la cire des phonographes. Le télescope est un instrument qui voit loin dans l'espace, mais c'est surtout un instrument qui voit loin dans le passé. La lumière des nébuleuses nous raconte l'histoire d'il y a cent millions d'années, et tous les événements de l'évolution du monde sont à notre disposition, inscrits en ondes rapides dans l'éther inter-nébulaire.

Un des hiéroglyphes les plus curieux de notre bibliothèque astronomique est la radiation ultrapénétrante ; les rayons cosmiques. Pouvons-nous le dater ? Pouvons-nous le lire ?

Radiation extra-terrestre ; phénomène manifestement atomique, d'une énergie individuelle équivalente à un quatre centième de la masse d'un atome d'hydrogène. Écriture admirablement conservée, rayonnement qui n'a pu avoir traversé antérieurement une épaisseur de matière comparable à un kilomètre d'air atmosphérique. Restes d'un phénomène d'une intensité égale au dixième de celle de la lumière qui nous vient de toutes les étoiles, le soleil excepté. Phénomène dont la source ne peut être proche, car l'intensité des rayons est remarquablement constante, quelle que soit la direction vers laquelle se tourne le zénith du lieu d'observation ; phénomène indifférent à la direction du soleil comme à celle de la voie lactée ; phénomène vraiment cosmique dont la cause semble devoir être cherchée au delà des nébuleuses les

plus lointaines, bien loin dans l'espace et le temps, si loin qu'il nous raconte peut-être l'histoire primitive de notre propre soleil qui nous revient après avoir fait le tour de l'espace.

Si les rayons ultra-pénétrants sont vraiment cosmiques, la densité d'énergie avec laquelle nous les recevons est leur densité vraie, la même partout. Elle est égale à 8.10^{-14} erg par centimètre cube soit environ 10^{-34} gramme par centimètre cube. Énergie énorme, si l'on pense que la densité de toute la matière connue est estimée à 10^{-31} gramme par centimètre cube. Les rayons cosmiques sont les témoins d'un phénomène sans égal, phénomène de nature atomique et qui a intéressé la presque totalité de la matière existante. Ils doivent dater d'avant la formation des étoiles dans leur état actuel. En effet, les étoiles sont la seule source adéquate qui puisse libérer une telle énergie et, même si chacune d'elles avait contribué pour sa part un millième de toute son énergie (énergie sub-atomique comprise), cela ne serait que tout juste suffisant. Et pourtant les étoiles ne peuvent dans leur état actuel libérer d'énergie sous forme de rayons cosmiques, puisque ces rayons sont vierges de tout passage à travers une atmosphère même réduite au dixième de l'atmosphère terrestre, et il n'existe pas d'étoile sans atmosphère. Cette difficulté est si sérieuse que l'on n'a pas hésité à envisager des phénomènes aussi hypothétiques que l'annihilation réciproque de protons et d'électrons ou la combinaison de quatre atomes d'hydrogène se rencontrant dans les espaces interstellaires et se mettant d'accord pour engendrer un atome d'hélium en libérant la radiation ultra-pénétrante. Ces hypothèses ont l'inconvénient de remplir le vide d'autant de matière qu'il y en a dans les étoiles pour en transformer une partie en radiations cosmiques. Elles ne résistent pas à la comparaison de l'énergie du rayonnement à la somme totale d'énergie disponible dans le monde.

L'explication est bien plus simple. Les rayons cosmiques datent de dix milliards d'années, cent fois plus loin dans le passé que les nébuleuses lointaines. A cette époque l'évolution du monde était dans toute son activité : les étoiles naissantes n'avaient pas encore d'atmosphère et les transformations superradioactives que subissaient leurs masses condensées en un petit nombre d'unités atomiques pouvaient libérer leur rayonnement sans qu'il ne courre risque d'être capté et transformé par les atomes voisins encore peu nombreux.

Le monde a procédé du condensé au diffus. L'augmentation de l'entropie qui caractérise le sens de l'évolution, c'est la fragmentation progressive de l'énergie qui a existé à l'origine en un paquet unique. L'atome-univers s'est brisé en fragments, chaque fragment en morceaux plus petits. Imaginant pour simplifier que cette fragmentation se soit faite en morceaux égaux, il aura fallu deux cent soixante générations pour arriver à la pulvérisation de la matière en nos pauvres petits atomes, presque tous trop petits pour pouvoir encore se briser.

L'évolution du monde peut être comparée à un feu d'artifice qui vient de se terminer. Quelques mèches rouges, cendres et fumées. Debout sur une escarbille mieux refroidie, nous voyons s'éteindre doucement les soleils et cherchons à reconstituer l'éclat disparu de la formation des mondes.

Le soleil-atome se brisant en fragments tenus ensemble par l'attraction universelle, fragments qui se brisent à leur tour en lançant dans le vide quelques particules assez rapides pour échapper à l'attraction de l'ensemble, éclaboussures échappées au creuset ardent où l'atome devenait étoile. Rayons voyageant tout droit dans le désert toujours plus vaste de l'espace, jusqu'à ce qu'ils rencontrent une oasis perdue, notre galaxie, un grain refroidi, notre terre et viennent décharger un électromètre en témoignant de la formation des soleils.

Nébuleuse primitive ou atome primitif ? Cosmogonie lente ou cosmogonie rapide ? Cosmogonie gazeuse ou cosmogonie radioactive ? Jusqu'à quel point faut-il conserver les anciennes idées ? La terre fut-elle éjectée à l'état atomique par le soleil-atome, ou s'en est-elle séparée à la phase gazeuse ? Quelles sont les propriétés des atomes géants et les lois qui président à leur désintégration ? Il serait prématuré d'essayer de répondre à ces questions.

En terminant, il nous faut indiquer comment la théorie de l'expansion de l'univers s'adapte à l'idée d'un atome primitif. Nous pouvons concevoir que l'espace a commencé avec l'atome primitif et que le commencement de l'espace a marqué le commencement du temps. Le rayon de l'espace est parti de zéro ; les premiers stades de l'expansion ont consisté en une expansion rapide déterminée par la masse de l'atome initial, égale à peu près à la masse actuelle de l'univers. Si cette masse est suffisante, et les estimations que nous pouvons en faire indiquent qu'il en est bien ainsi, l'expansion initiale a été suffisante pour permettre au rayon de dépasser la valeur du rayon d'équilibre. L'expansion s'est donc faite en trois phases : une première période d'expansion rapide où l'atome-univers s'est brisé en atomes-étoiles, une période de ralentissement, suivie d'une troisième période d'expansion accélérée. C'est sans doute à cette troisième période que nous nous trouvons maintenant, et l'accélération de l'espace qui a suivi la période d'expansion ralentie pourrait bien être responsable de la séparation des étoiles en nébuleuses extra-galactiques.

Il n'est pas tout à fait prouvé que nous n'en sommes pas encore à la première période d'expansion et, dans ce cas, que l'expansion actuelle soit capable de nous faire dépasser la valeur du rayon d'équilibre qui serait alors très considérable. Après avoir continué pendant quelques milliards d'années leur mouvement d'expansion, les nébuleuses s'arrêteraient puis retomberaient l'une vers l'autre

en finissant par se précipiter l'une sur l'autre en mettant fin à l'histoire du monde par un dernier feu d'artifice après lequel le rayon de l'espace serait à nouveau réduit à zéro.

Cette hypothèse a été proposée par Friedmann en 1922 et reprise récemment par Einstein. Elle a contre elle les estimations actuelles de la densité, mais celles-ci ne sont pas tout à fait sûres. Nous pourrions d'ailleurs nous tranquilliser, en constatant que l'espace s'étend encore et que donc si le monde doit finir de cette façon, nous vivons à une époque plus proche du commencement que de la fin du monde.

Il est plus probable que l'expansion a déjà dépassé le rayon d'équilibre et ne sera pas suivie d'une contraction. Dans ce cas nous ne devons plus nous attendre à rien de sensationnel : les soleils se refroidiront, les nébuleuses s'éloigneront, cendres et fumées du feu d'artifice originel achèveront de se refroidir et de se disperser.
