Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 34 (1976)
Heft: 155

Artikel: Le problème cosmologique et ses hypothèses
Autor: Dubois, Jean
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-899521

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ORION

Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Bulletin de la Société Astronomique de Suisse

34. Jahrgang, Seiten 81–102, Nr. 155, August 1976

34e année, pages 81–102, No. 155, Août 1976

Le problème cosmologique et ses hypothèses

par Jean Dubois, Lausanne

Introduction

La lecture de nombreux articles de vulgarisation consacrés à la cosmologie et dans lesquels certains résultats et certaines idées sont présentés comme s'ils étaient définitivement acquis, m'ont incité à examiner d'aussi près que possible les hypothèses qui sont à la base des théories cosmologiques actuelles.

Ces hypothèses ne sont pas toujours faciles à déceler. De plus, elles n'ont pas toutes la même fonction dans le cadre d'une théorie. Certaines sont parties intégrantes du problème cosmologique, ou sont directement liées à la théorie physique utilisée. D'autres apparaissent presque uniquement dans le but de simplifier des équations qui sans cela seraient pratiquement insolubles. Enfin, il y en a qui sont nécessaires pour adapter la théorie à l'observation. Bien souvent d'ailleurs, une hypothèse remplit ces deux fonctions, en ce sens que l'on utilise les résultats de l'observation pour énoncer une hypothèse simplificatrice du point de vue mathématique.

Dans ce texte, il m'arrivera de présenter quelques formules. Il ne s'agit pas de les comprendre dans le détail, mais certaines hypothèses seront plus claires si l'on a ces relations sous les yeux. Par ailleurs, quelques notions seront décrites dans un appendice afin de ne pas trop charger le texte principal. Le but étant de bien mettre en évidence des hypothèses, et non de faire de la cosmologie. A l'intention des lecteurs qui ne les connaîtraient pas, je présenterai très sommairement les modèles d'univers obtenus en utilisant les hypothèses mentionnées. Et en références, je citerai plusieurs titres de livres de cosmologie de niveaux différents, ainsi que quelques articles.

Objet de la cosmologie et hypothèses générales

On dit assez volontiers que l'objet de la cosmologie est l'étude de l'univers dans son ensemble, non seulement tel qu'il existe actuellement mais aussi de son histoire et de son futur.

En y regardant d'un peu plus près, on constate que cet énoncé est très imprécis. Qu'entend-on par univers physique? S'agit-il de tout ce qu'il nous est possible d'observer, que ce soit en laboratoire ou par l'intermédiaire des téléscopes optiques ou autres? S'agit-il de tout ce qui existe mais ne sera peut-être jamais observé dans sa totalité, car il faut bien comprendre que l'on observe qu'une partie de l'univers?

Du point de vue de la théorie, va-t-on essayer de donner une description valable pour tous les constituants de cet univers, de la particule élémentaire aux

Titelbild

JUPITER mit dem GROSSEN ROTEN FLECK (GRF).

Aufnahme:
NASA, Pioneer 11, Dezember 1974.

Der GRF wurde erstmals von Lohse am 3. 6. 1878 bewusst beobachtet. Ältere Jupiterzeichnungen lassen aber vermuten, dass er bereits früher existierte. Farbe, Form und Grösse (im Mittel 40 000 km lang und 13 000 km breit) vom GRF sind veränderlich. In den Jahren 1888, 1912, 1916, 1938 und 1944 verschwand er sogar gänzlich. Nach früheren Vorstellungen war der GRF eine schwimmende Scholle auf einer flüssigen Jupiteroberfläche. Später wurde er als eruptive Zone interpretiert. Heute vermutet man, im GRF eine zyklonische Störung (ähnlich einem Hurrikan) auf Jupiter zu erblicken. Die lange Lebensdauer ist offensichtlich durch seine immense Grösse bedingt. 1972 traten auf der nördlichen Hemisphäre vom Jupiter kleine Flecken auf. Pioneer 10 konnte im Dezember 1973 zeigen, dass es sich um kleine GRF's handelte. Ihre Grösse erlaubte jedoch nur eine kurze Lebensdauer von ca. 18 Monaten. Auf den Bilder von Pioneer 11 waren sie tatsächlich auch nicht mehr zu sehen.

amas de galaxies, en passant par l'atome, l'étoile, etc., ou va-t-on se restreindre aux très grandes structures (amas de galaxies) et aux phénomènes qui paraissent les concerner comme le décalage spectral vers le rouge dans le spectre des galaxies et des quasars, ou encore aux phénomènes de très grande ampleur comme le rayonnement thermique à 3 °K? Il y a donc un choix à faire. Disons d'emblée, qu'en général, les cosmologies concernent les grandes structures en ce sens qu'elles doivent fournir un cadre spatio-temporel dans lequel on puisse décrire le mouvement et l'évolution de ces grandes structures en accord avec les résultats de l'observation. L'atome comme l'étoile et la galaxie n'y sont point étudiés en tant que tels. Naturellement ils interviennent en tant que constituants de ces grandes structures.

D'autre part, on ne voit pas très bien comment prendre en considération des objets non observés. Alors certains cosmologistes font l'hypothèse suivante:

A un instant donné, tout observateur, quel que soit sa position dans l'univers, doit faire les mêmes observations.

Par exemple, situé sur une planète autour d'une étoile appartenant à une galaxie lointaine, un observateur doit lui aussi déceler le décalage spectral vers le rouge dans le spectre des autres galaxies et obtenir la même loi de Hubble.

Cette hypothèse est connue sous le nom de principe cosmologique. Elle impose une certaine isotropie et homogénéité aux modèles d'univers. Une théorie reposant sur ce principe peut concerner tout l'univers par opposition à l'univers observable. Mais l'un est mis en relation avec l'autre en ce sens que les hypothèses faites sur l'univers existant sont confrontées avec l'univers observable. Ainsi l'hypothèse précédente peut aussi être énoncée:
avec l'univers observable. Ainsi l'hypothèse suivante peut aussi être énoncée:

La partie observable de l'univers est représentative du tout.

Mais il faut bien noter que nous pouvons rencontrer des théories dans lesquelles cette hypothèse n'est pas faite et telles que l'univers observable n'ait pas le même aspect selon la position de l'observateur. En effet, certains cosmologistes retiennent le principe cosmologique comme hypothèse de travail, faute de mieux, car ils estiment que l'observation ne confirme pas de manière certaine l'homogénéité et l'isotropie de la répartition de la matière dans l'espace.

D'autres cosmologistes proposent un principe cosmologique dit strict ou parfait. Il s'énonce:

Tout observateur voit la même chose indépendamment de sa position et de l'instant de l'observation.

Ce principe impose un modèle d'univers non seulement isotrope et homogène, mais encore dont le contenu ne change pas d'aspect au cours du temps, globalement tout au moins. Les théories élaborées en tenant compte de ce principe sont dites stationnaires.

Comment peut procéder le cosmologiste pour réaliser son but? Etant donné que c'est l'aspect physique des choses qui l'intéresse, il est évident qu'il s'adresse à la physique et à l'astronomie pour élaborer un modèle. Il faut en particulier disposer d'une théorie de la gravitation. Cette attitude tout à fait évidente ne va pas sans provoquer l'apparition de nouveaux problèmes.

La physique, y compris la mécanique rationnelle, est née de l'observation de phénomènes et d'expériences exécutées en laboratoire, de l'étude du mouvement des planètes autour du soleil. Depuis, cette science a beaucoup évolué, mais elle est restée essentiellement une science de laboratoire. Or l'astronomie, qui nous renseigne sur les grandes structures, nous confronte avec des distances de l'ordre du milliard d'années-lumières. Alors, il faut bien avoir présent à l'esprit qu'en observant loin dans l'espace, on observe loin dans le passé. Certains objets célestes sont vus tels qu'ils étaient il y a des millions, voire des milliards d'années. Et les lois et les principes de la physique que nous savons être vrais (jusqu'à preuve du contraire, et cela s'est produit) à la surface de la terre et vraisemblablement dans toute notre galaxie, peuvent-ils être en toute sécurité utilisés pour étudier des objets situés à des distances incomparablement plus grandes que le diamètre de notre galaxie, dans lesquels les énergies mises en jeu sont énormes et sans commune mesure avec ce qu'il est possible de réaliser en laboratoire, et tout cela à une époque où le soleil n'existait peut-être pas encore? En résumé, a-t-on le droit d'étendre à l'univers ce qui est vrai à l'échelle du laboratoire? En fait le choix n'existe pas. Il n'y a rien que l'on puisse substituer à la physique. Il faut l'utiliser, mais il est possible d'adopter diverses attitudes qui peuvent conduire à des cosmologies différentes et chacune de ces attitudes constitue une hypothèse. Nous pouvons en formuler trois.

La première hypothèse est très stricte:

Les principes et les lois de la physique tels que nous les connaissons en laboratoire sont vrais en tout temps et tout lieu. Il n'y a pas à chercher ou imaginer d'autres lois pour décrire ce que nous observons dans l'univers, et décrire les divers états éventuels de son histoire.

On peut dire que ces cosmologistes utilisent l'univers comme champ d'application des lois de la physique.

Il y a une deuxième hypothèse un peu plus souple:

Les principes et les lois de la physique sont toujours vrais qualitativement, mais les valeurs de certaines constantes pourraient varier lentement au cours du temps.

Par exemple, on peut imaginer que la loi de la gravitation était vraie il y a trois milliards d'années comme aujourd'hui, mais avec une valeur différente de la constante de gravitation. Il ne semble pas d'ailleurs que l'on puisse imaginer arbitrairement une variation pour n'importe quelle constante.

La troisième hypothèse est encore plus souple:

Il pourrait exister des lois sans effet à l'échelle du système solaire, mais au contraire très importantes à celle d'un

amas de galaxies ou encore dans des conditions physiques très différentes des nôtres.

On cherche à utiliser le mieux possible les lois de la physique tout en étant conscient qu'elles ne sont peut-être pas en mesure de permettre la description de tous les phénomènes observés, quasars par exemple, et que l'astronomie est capable de nous révéler de nouvelles lois régissant le comportement de la matière et du rayonnement dans des conditions très éloignées de celles actuellement réalisables en laboratoire. Après tout, rien ne nous permet d'affirmer que toutes les lois de la physique nous soient connues, ni même qu'elles puissent être découvertes uniquement par des expériences de laboratoire.

Il est intéressant de noter que la description correcte des phénomènes atomiques n'a pas été possible dans le cadre de la physique dite classique et que les physiciens ont été dans l'obligation d'inventer de nouvelles lois.

La troisième hypothèse peut d'ailleurs se combiner avec les idées d'immuabilité des lois de la physique au cours du temps et d'un champ d'application universel. Il est alors intéressant de noter que quelques cosmologistes ne considèrent pas le principe cosmologique strict comme indépendant de ce point de vue sur la validité des lois de la physique et de leur emploi à l'échelle de l'univers, mais pensent, au contraire, que l'un est la conséquence de l'autre, en ce sens que l'immuabilité postulée des lois de la physique ne serait pas possible si l'univers ne demeurait pas pareil à lui-même au cours du temps, globalement tout au moins et réciproquement.

Principe de MACH

L'idée de ce principe remonte au problème de la détermination d'un système de référence dans lequel la deuxième loi de NEWTON est valable de façon absolue et non pas approximativement comme à la surface de la terre. On sait qu'un tel système nous est fourni par le plan d'oscillation du pendule simple. Or, si ce pendule est situé à un pôle de la terre, son plan d'oscillation conserve une direction invariable par rapport aux étoiles très lointaines (dites étoiles «fixes»). Alors, pour les uns la chose va de soi, pour d'autres au contraire, cette observation exprime un fait fondamental, à savoir que l'univers dans son ensemble a une influence directe sur la physique terrestre, et que cette influence ou interaction s'effectue par l'intermédiaire de la masse inerte des corps. Le principe de MACH s'énonce alors:

La masse d'un corps est déterminée par la masse de tous les corps qui constituent l'univers.

Matière et anti-matière

Nous connaissons par des expériences de laboratoire l'existence de l'anti-matière (anti-proton, anti-neutron, etc.). Alors rien n'empêche de supposer un univers dont certaines parties seraient faites d'anti-matière. Par exemple, rien ne permet d'affirmer que telle étoile que nous observons est faite de matière. Son spectre serait identique si elle était constituée par de l'anti-matière. Aussi, nous trouvons dans presque toutes les cosmologies l'hypothèse suivante:

L'univers est constitué par de la matière.

Il existe néanmoins, pour autant que je sois bien informé, au moins une théorie dans laquelle on suppose l'existence de la matière et de l'anti-matière. Cela, pour des raisons évidentes, dans des régions distinctes.

Finalement, nous devons nous souvenir que l'univers dans lequel nous vivons, qu'il ait une structure simple ou compliquée, est unique. Il serait donc souhaitable qu'une théorie cosmologique produise un modèle d'univers et non pas plusieurs comme c'est parfois le cas.

Hypothèses des modèles relativistes

On fait appel à la théorie de la relativité générale pour nous donner le cadre spatio-temporel de l'univers et une théorie de la gravitation.

L'espace-temps est un espace de RIEMANN (l'espace euclidien ou ordinaire est un espace de RIEMANN particulier) caractérisé par 10 fonctions g_{ij} des coordonnées x^1, x^2, x^3, x^4 des points de l'espace-temps. Ces fonctions sont notées:

$$g_{11}, g_{12}, g_{13}, g_{14}, g_{22}, g_{23}, g_{24}, g_{33}, g_{34}, g_{44}$$

En abrégé, on note: $g_{ij}(x^1, x^2, x^3, x^4)$ ou $g_{ij}(x^i)$, les indices i et j variant de 1 à 4, les fonctions g_{ij} vérifiant: $g_{ij} = g_{ji}$.

Ces 10 fonctions permettent de calculer la «distance» ds entre deux points voisins de coordonnées x^i et $x^i + dx^i$, par la relation:

$$(ds)^2 = g_{11}(dx^1)^2 + g_{12}\,dx^1\,dx^2 + \ldots\ldots + g_{44}(dx^4)^2 \qquad (1)$$

en notation abrégée:

$$ds^2 = g_{ij}\,dx^i\,dx^j \qquad (2)$$

En cosmologie ces fonctions ne sont pas connues a priori. Elles doivent être déterminées par la théorie du modèle cosmologique.

Hypothèse no. 1:

La matière telle que nous l'observons est remplacée par un fluide parfait.

Alors dans un tel univers, les étoiles, les planètes ne sauraient exister.

Hypothèse no. 2 (Principe des géodésiques):

On suppose qu'en l'absence de champ électromagnétique, les lignes d'univers des particules du fluide sont des géodésiques de l'espace-temps introduit par l'hypothèse No. 1, et qu'un rayon lumineux suit une géodésique dite de «longueur nulle», c'est-à-dire telle que la distance ds *entre deux points voisins de cette géodésique soit nulle.*

Il faut remarquer que certain auteur affirme que ce principe peut se déduire des équations d'EINSTEIN (il cesserait alors d'être un principe). D'autres pensent, au contraire, que cela n'est pas possible dans tous les cas et préfèrent conserver cette hypothèse.

Hypothèse no. 3:

On suppose que l'espace-temps peut être décrit par un système de coordonnées orthogonales.

C'est une hypothèse purement mathématique destinée à simplifier les équations.

Alors les fonctions g_{ij} où $i = j$ sont nulles et la formule (1) se récrit:

$$(ds)^2 = g_{11}(dx^1)^2 + g_{22}(dx^2)^2 + g_{33}(dx^3)^2 + g_{44}(dx^4)^2 \quad (3)$$

Cette hypothèse réduit à quatre le nombre de fonctions g_{ij} à déterminer.

Hypothèse no. 4:

On suppose que l'espace-temps a une symétrie sphérique par rapport à l'observateur (c'est-à-dire nous).

Cette hypothèse s'accorde avec la relative isotropie des observations portant sur des échantillons assez considérables d'objets lointains, ainsi que sur l'isotropie du rayonnement thermique à 3 °K. C'est typiquement une hypothèse simplificatrice du point de vue mathématique basée sur l'observation.

En désignant les coordonnées d'un point de l'espace-temps par

$$x^1 = r \quad x^2 = \theta \quad x^3 = \varphi \quad x^4 = t$$

(r, θ, φ) étant les coordonnées sphériques d'un point, et en caractérisant l'observateur (nous) par $r = 0$, la formule (3) peut s'écrire:

$$(ds)^2 = f(r, t)dt^2 - \frac{h(r, t)}{c^2}(dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta \, d\varphi^2) \quad (4)$$

où $f(r, t)$ et $h(r, t)$ sont des fonctions auxquelles on impose d'être toujours positives.

Hypothèse no. 5:

Parmi la collection des espaces-temps qui satisfont aux hypothèses 3 et 4, on en choisit une sous-classe de sorte que la coordonnée spatiale r *d'un point du fluide en mouvement soit constante. On parle alors de coordonnées comobiles.*

Les hypothèses faites jusqu'à présent entraînent que l'espace-temps est homogène et isotrope. C'est-à-dire, qu'à un instant donné, on peut placer l'observateur n'importe où dans l'espace, on aura une description semblable de l'univers. On retrouve ici l'idée du principe cosmologique au sens large.

Cela se remarque aussi dans les équations différentielles (déduites des équations d'EINSTEIN en tenant compte des hypothèses précédentes), équations qui donnent la pression et la densité du fluide. On remarque que ces deux grandeurs physiques ne dépendent que du temps. En effet, ces équations sont:

$$\frac{8\pi G p}{c^2} = -\frac{2R''}{R} - \frac{R'^2}{R^2} - \frac{kc^2}{R^2} + \Lambda \quad (5)$$

$$8\pi G\varrho = \frac{3}{R^2}(kc^2 + R'^2) - \Lambda \quad (6)$$

p: pression du fluide

ϱ: densité du fluide

R: fonction arbitraire du temps, ayant la dimension d'une longueur.

R′, R″: dérivée première et seconde de cette fonction par rapport au temps.

c: vitesse de la lumière.

G: constante de la gravitation newtonienne

Λ: constante cosmologique (constante d'intégration qui apparaît dans les équations d'EINSTEIN)

k: constante de courbure pouvant prendre les valeurs −1, 0, 1.

et la relation (4) se récrit:

$$(ds)^2 = dt^2 - \frac{R^2(t)}{c^2}\left[\frac{dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\varphi^2}{(1 + k\, r^2/4)}\right] \quad (7)$$

Les modèles cosmologiques ainsi obtenus sont dits uniformes.

Hypothèse no. 6:

Les lignes d'univers retenues pour décrire le mouvement des particules du fluide sont des solutions particulières des équations différentielles des geodésiques, équations établies en tenant compte des hypothèses précédentes sur l'espace-temps.

Le choix de cette solution est encore une hypothèse, laquelle a d'ailleurs une conséquence très importante, à savoir qu'elle permet de définir une variable temps unique pour toutes ces géodésiques. On parle de temps cosmique t. Mais il faut bien noter que ce n'est pas le temps absolu de la mécanique de NEWTON.

Les équations différentielles (5) et (6) qui donnent la pression et la densité en fonction du temps cosmique, contiennent la fonction inconnue R(t), appelée facteur ou paramètre d'échelle, car elle permet de décrire l'expansion ou la concentration de l'univers dans les modèles uniformes.

En résumé, nous avons trois fonctions inconnues p(t), ϱ(t), R(t) et deux équations. Par conséquent, la résolution du problème cosmologique nécessite l'introduction d'une troisième équation arbitraire reliant la pression à la densité.

On peut alors supposer:

Hypothèse no. 7a:

$$p = 0$$

Dans ce cas on parle de modèles uniformes à pression nulle.

Cette hypothèse est soutenue par l'observation. En effet, la matière qui constitue l'univers a des mouvements propres très faibles par rapport au mouvement d'ensemble (expansion) si bien que l'on peut considérer que l'énergie cinétique du fluide, donc sa pression, est presque nulle.

Hypothèse no. 7b:

On suppose qu'il existe entre la pression p *et la densité une relation polytropique.*

$$\frac{p}{p_o} = \left(\frac{\varrho}{\varrho_o}\right)^{1+\frac{1}{n}}$$

p_0: valeur actuelle de la pression
ϱ_0: valeur actuelle de la densité
n: indice polytropique.

Hypothèse no. 8:

On fait une dernière hypothèse en attribuant une valeur à la constante cosmologique.

Pratiquement on trouve soit l'hypothèse $\Lambda = 0$, *soit* $\Lambda \neq 0$

L'hypothèse $\Lambda = 0$ repose essentiellement sur l'application de la relativité générale aux mouvements des planètes et a l'avantage de simplifier les équations (5) et (6). Mais de là à déduire que $\Lambda = 0$ dans tout l'univers, il y a un pas de géant que tous les cosmologistes ne franchissent pas.

Nous avons présenté ici les hypothèses propres aux modèles relativistes. Il y a lieu d'examiner la position de cette théorie par rapport aux hypothèses présentées dans l'introduction.

Nous avons déjà vu que cette théorie est conforme au principe cosmologique. Ensuite, elle suppose implicitement que l'univers est fait de matière. Enfin, en supposant $\Lambda = 0$, la gravitation selon la relativité générale, est vérifiée par l'observation du mouvement de Mercure autour du Soleil et de la déviation des rayons lumineux provenant d'une étoile et passant près du bord du soleil. Donc par des observations faites à l'échelle du système solaire. Et c'est cette théorie qui est appliquée à tout l'univers. On fait alors l'hypothèse d'une part que les lois de la physique sont vraies en tout temps et en tout lieu et d'autre part qu'il n'y a pas à imaginer d'autres lois que celles que nous connaissons déjà.

Finalement, en ce qui concerne le principe de MACH, il faut remarquer qu'EINSTEIN a cherché à construire un modèle cosmologique en accord avec ce principe. Mais quant à décider si les différents modèles cosmologiques relativistes sont conformes à ce principe, les opinions des spécialistes sont partagées.

Conséquences des hypothèses

Bien que cela ne soit pas l'objet principal de cet article, il y a lieu je pense, d'indiquer brièvement au lecteur les différents modèles que l'on peut obtenir dans le cadre de la relativité générale en utilisant les hypothèses mentionnées. Le lecteur qui souhaite obtenir des détails sur ces modèles consultera avec profit les livres cités en références [4, 6, 7, 9]).

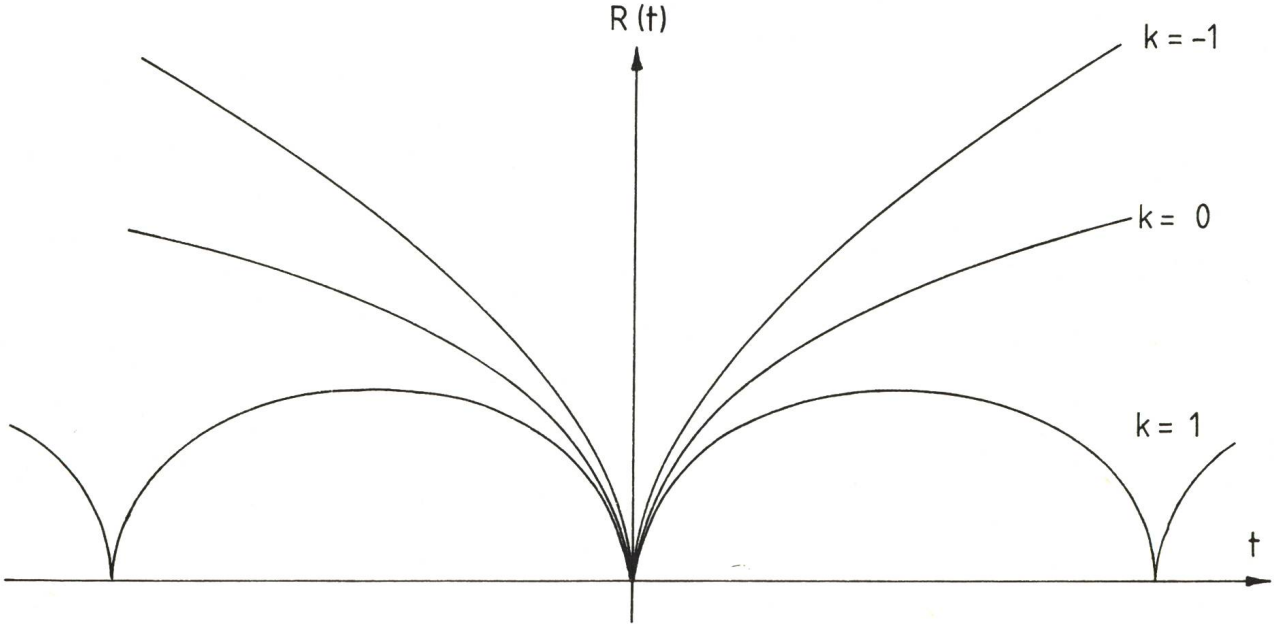
Nous indiquerons en particulier le comportement de la fonction R(t) laquelle permet de déterminer, à un instant donné, la distance de deux points matériels auxquels on assimile les galaxies.

Avec les hypothèses $p = 0$, $\Lambda = 0$, les équations (5) et (6) donnent trois modèles dits de FRIEDMANN.

Le premier caractérisé par $k = 1$ dans les équations (5) et (6) est un modèle à espace sphérique, donc fermé et de volume fini. La fonction R(t) est périodique et s'annule périodiquement pour certaines valeurs du temps. Comme R(t) est solution d'une équation différentielle, on peut choisir $R(t) = 0$ pour $t = 0$. Cela sous-entend que l'époque actuelle correspond à une valeur $t > 0$, mais antérieure à la prochaine valeur de t qui annulera R. Entre deux zéros, la fonction passe par un maximum. On a ainsi un modèle d'univers oscillant ou cyclique.

Le deuxième modèle correspond à $k = 0$. L'espace est alors euclidien et l'univers est infini. La fonction R(t) est nulle pour $t = 0$. Elle est décroissante si t est négatif et croissante si t est positif.

Le troisième modèle correspond à $k = -1$. L'espace est dit hyperbolique et l'univers est infini. La fonction R(t) se comporte comme dans le cas pré-



Modèles de FRIEDMANN

cédent, mais avec une décroissance et une croissance plus prononcée.

Le point commun à ces trois modèles est l'existence d'au moins une valeur de t pour laquelle $R(t) = 0$. Ce qui signifie qu'à cet instant toute la matière est condensée en un point.

Il faut bien comprendre que tout ce que nous venons de dire est une conséquence inéluctable des équations obtenues une fois admises toutes les hypothèses sur lesquelles elles reposent.

Etant donné le caractère très particulier de l'état d'extrême condensation de la matière lorsque $R(t) = 0$, certains cosmologistes pensent que l'univers n'existait pas avant cet instant. On parle alors d'origine de l'univers, d'explosion primordiale ou de «bigbang». Dans le même ordre d'idée, le retour à un état condensé prévu dans le modèle cyclique ne serait pas suivi d'un nouveau cycle. Par ailleurs certains cosmologistes sont opposés à un modèle oscillant en se basant sur des idées relatives à la «flèche du temps» ou encore à l'entropie, au sens de propagation des signaux électromagnétiques.

Mais il est très important de bien comprendre que toutes ces considérations, aussi importantes et justifiées qu'elles soient, sont extérieures à la théorie élaborée et conduisant aux modèles cités.

Ce que l'on peut dire, c'est que probablement certaines hypothèses faites ne conviennent pas pour des valeurs de la fonction R(t) nettement inférieure à sa valeur actuelle (si l'on admet naturellement que l'un ou l'autre des modèles de FRIEDMANN donne une bonne description de l'univers tel que nous l'observons actuellement). Par exemple, l'hypothèse $p = 0$ doit certainement être remplacée par $p \neq 0$. Enfin si R(t) est très petit, la relativité générale elle-même n'est peut-être pas en mesure de décrire un état d'extrême condensation.

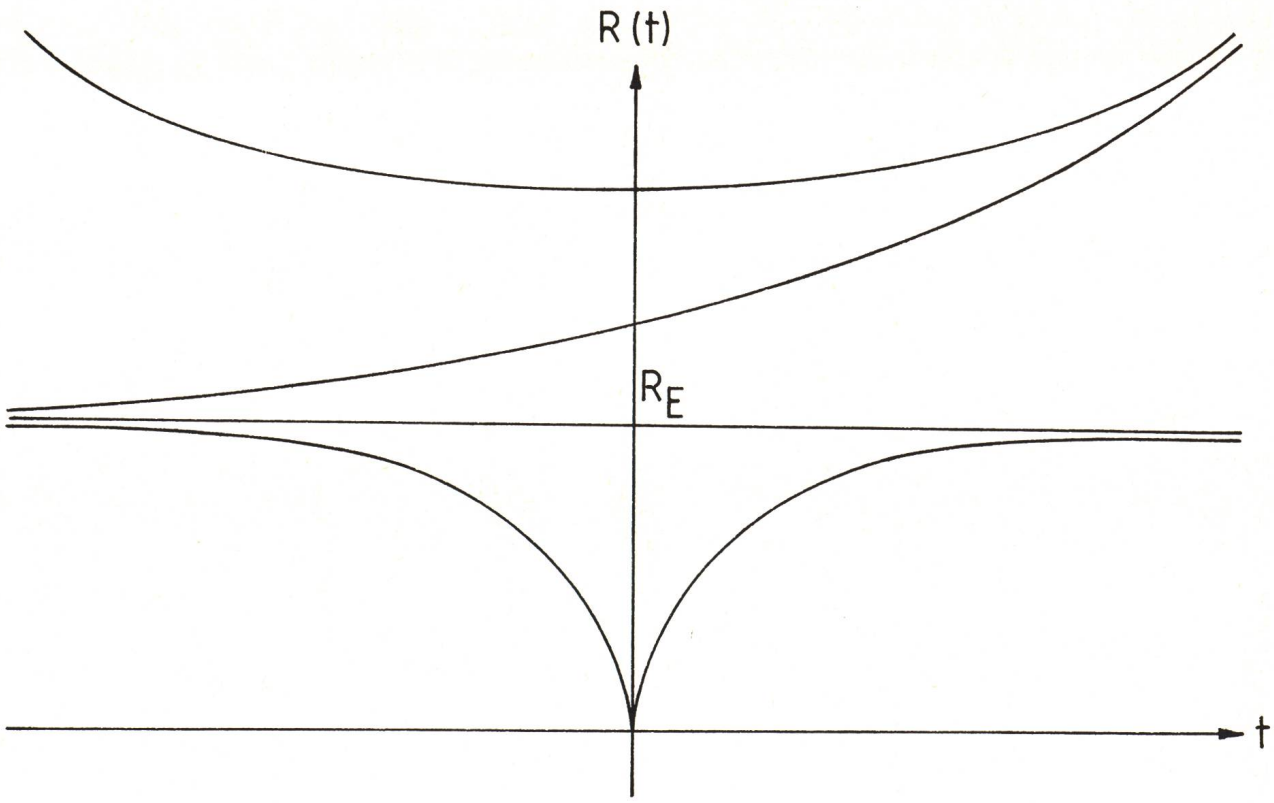
On obtient une collection plus vaste de modèles relativistes en faisant les hypothèses $p = 0$, $\Lambda \neq 0$.

On y retrouve des modèles dans lesquels R(t) s'annule. Certains sont oscillants. Il est intéressant de noter que l'on a pour $\Lambda < 0$ un modèle oscillant à géométrie hyperbolique. D'autres se contractent jusqu'à $R = 0$ puis se dilatent indéfiniment comme dans le cas précédent. Mais les équations (5) et (6) nous donnent encore d'autres modèles. Pour une valeur bien particulière de R(t) dite valeur critique, on a par exemple un modèle où R est constant (on note cette valeur R_E). C'est le modèle d'EINSTEIN. L'espace est sphérique et de volume fini, invariable au cours du temps. On trouve encore d'autres modèles sphériques dans lesquels R(t) se comporte comme je l'ai indiqué sur le dessin suivant.

Dans l'un (le modèle d'EDDINGTON-LEMAITRE) la fonction R(t) prend des valeurs toujours supérieures à R_E et croît indéfiniment. Dans l'autre, la fonction R(t), après s'être annulée tend asymptotiquement vers R_E.

Finalement pour $0 < \Lambda < \Lambda_E$, on a un modèle sphérique dans lequel la fonction R(t) décroît jusqu'à un minimum non nul, puis croît à nouveau indéfiniment lorsque t augmente.

Ainsi nous sommes loin du modèle unique souhaitable. Néanmoins, on peut se demander lequel de



ces modèles décrit le mieux possible l'univers tel que nous l'observons. En fait, et pour autant que je sois bien informé, on ne peut pas répondre à cette question de façon précise et définitive. Si la constante cosmologique est supposée nulle, tout ce que l'on peut dire est que la géométrie de notre univers est peut-être hyperbolique. Ce résultat, contesté par certains, nous est fourni par l'estimation de la densité moyenne de la matière dans la partie observable de l'univers[10]). Alors l'univers serait à expansion indéfinie, après avoir passé par un éventuel état d'extrême condensation.

Si l'on fait l'hypothèse $p \neq 0$ et $\wedge = 0$[11]) en introduisant une relation polytropique entre la pression et la densité du fluide, on n'obtient pas de nouveaux modèles. Par contre, certains modèles oscillants dans le cas où $p = 0$ deviennent des modèles à expansion indéfinie. Plus intéressant encore est de constater que l'état initial, caractérisé par une densité et une pression infinies, se produit pour une valeur non nulle de la fonction R(t) (sauf si la pression est proportionnelle à la densité). Cela revient à supprimer la singularité existant dans les modèles correspondants lorsque $p = 0$.

Mais cette singularité se retrouve si l'on néglige comme précédemment la pression du fluide et que l'on introduise en lieu et place la pression de radiation. Ce qui paraît être raisonnable lorsque R est beaucoup plus petit que sa valeur actuelle. On a alors un modèle dit radiatif avec $\wedge = 0$.

On voit donc que l'on peut imaginer un modèle composite. Par exemple radiatif pour $0 \leqslant R \leqslant R_1$, puis avec pression du fluide pour $R_1 \leqslant R \leqslant R_2$ se raccordant avec un modèle à pression nulle.

Appendice

1. *Les équations d'*Einstein

Ces équations s'écrivent:

$$-Kc^2T_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij}(R - 2\wedge) \qquad (A.1)$$

i et j varient séparément de 1 à 4 et de plus $T_{ij} = T_{ji}$, $R_{ij} = R_{ji}$, donc (A.1) représente en fait un système de 10 équations.

Le membre de droite décrit la géométrie de l'espace-temps considéré.

Le membre de gauche décrit le contenu matériel de l'espace-temps et T_{ij} est donné par:

$$T_{ij} = (\varrho + \frac{p}{c^2})u_i u_j - g_{ij}\frac{p}{c^2} \qquad (A.2)$$

Les équations (A.1) expriment l'influence du milieu matériel sur la géométrie de l'espace-temps.

La forme donnée à T_{ij} suppose que la matière est un fluide parfait de densité ϱ et pression p.

Les u_i sont les composantes de la vitesse d'une particule du fluide.

$$K = \frac{8\pi G}{c^2}$$

où G est la constante de la gravitation newtonnienne.

Ce sont des équations (A.1) que sont déduites les équations (5) et (6) de l'exposé principal en utilisant les hypothèses mentionnées. Le lecteur qui souhaite davantage de renseignements consultera avec beaucoup de profit les ouvrages cités en référence (7) et (8).

2. *Lignes d'univers*

Considérons un point mobile se déplaçant sur une trajectoire connue. Si, sur une feuille de papier on dessine des points ayant pour abscisse la position du mobile à un instant donné, position mesurée à partir d'un point origine choisi arbitrairement sur la trajectoire, et pour ordonnée l'instant considéré, ces points sont en général disposés sur une courbe que l'on appelle la ligne d'univers du point mobile dans cet espace-temps à deux dimensions.

Par exemple, les graphiques qui représentent le mouvement des trains sont des lignes d'univers.

En cosmologie, on a affaire à des lignes d'univers d'un espace-temps à 4 dimensions.

3. *Géodésiques*

Dans un espace-temps quelconque, on appelle ligne géodésique, la ligne joignant deux points de sorte que la distance (notion à définir au préalable dans l'espace considéré) entre ces deux points, mesurée le long de la ligne soit un minimum ou un maximum par rapport aux valeurs obtenues en mesurant cette distance le long de lignes voisines.

Dans notre espace euclidien à trois dimensions, la ligne géodésique joignant deux points quelconques est la droite.

Sur une sphère, espace non-euclidien à deux dimensions, la ligne géodésique est un arc de grand cercle.

Références

Livres de niveau élémentaire

1) L'univers, de P. Couderc. Collection «Que sais-je?» no. 687. 5e édition, 1971.
2) Les métamorphoses de l'univers, de R. Omnès, Hermann, Paris, 1973.
3) Relativity and Cosmology, de W. J. Kaufmann. Harper and Row, Londres, 1973.

Livres de niveau moyen

4) L'expansion de l'univers, de P. Couderc. Presses Universitaires de France, 1950.
5) The Nature of the Universe, de C. Kilmister. Thames and Hudson, Londres, 1971.

Livres de niveau universitaire

6) Cosmology, de H. Bondi. Cambridge University Press, 1960, 2e édition.
7) Introduction à la cosmologie, de J. Heidmann. Collection Sup. Presses Universitaires de France, 1973.
8) General Relativity and Cosmology, de G. C. McVittie. Chapman and Hall, Londres, 1965, 2e édition.

Articles

9) Stabell R., Refsdal S., (1966), Mon. Not. R. astr. Soc. Vol. 132, p. 379.
10) Gott J. R., Gunn J. E., Schramm D. N., Tinsley B. M. (1974) Astrophys. J. Vol. 194, p. 543.
11) Stabell R., (1968) Mon. Not. R. astr. Soc. Vol. 138, p. 313.

Adresse de l'auteur:
Jean Dubois, Pierrefleur 42, 1018 Lausanne.