Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 58 (2000)
Heft: 301

Artikel: L'expansion de l'espace en cosmologie relativiste
Autor: Fischer, Gaston
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-898628

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: 12.07.2025

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

L'expansion de l'espace en cosmologie relativiste

GASTON FISCHER

1. Une expérience virtuelle

Selon la théorie de la relativité, la vitesse de la lumière c est une vitesse limite. On exprime souvent cela en disant qu'il n'est pas possible de transmettre des signaux porteurs d'information à des vitesses plus grandes que c. Mais l'expansion de l'Univers est une ***expansion de l'espace lui-même*** qui n'est pas soumise à cette restriction. Comment faut-il comprendre cela?

La façon la plus simple d'illustrer ce paradoxe est peut-être d'imaginer une situation virtuelle, de faire ce qu'en allemand on nomme un «Gedankenexperiment». Imaginons un monde qui se limite à la surface d'une sphère très grande, tel qu'esquissée à la Fig. 1. Sur un endroit restreint de cette sphère habitent de très petits individus, infiniment minces et qui n'ont conscience que de deux dimensions. Pour ces êtres l'Univers semble, à première vue, n'être qu'un vaste plan qui s'étend à l'infini dans toutes les directions. Une chose est sûre, ils n'en ont jamais atteint les limites. Dans leur Univers ils font, comme nous, des recherches scientifiques. Ainsi ils ont constaté que la vitesse de la lumière est une vitesse qui ne peut pas être dépassée. En poursuivant leurs expériences ils ont observé que la somme Σ des angles de grands triangles dessinés dans leur Univers dépasse toujours la valeur de π (c.-à-d. 180°). Cette observation les conduit à penser que leur Univers n'est pas ***plat***, mais qu'il est plutôt ***sphérique***, ou pour le moins qu'il est ***fermé*** ou ***elliptique*** (dans un Univers ***ouvert*** ou ***hyperbolique*** Σ serait $<\pi$ et dans un Univers ***plat*** ou ***parabolique*** $\Sigma = \pi$).

A une époque donnée ils constatent que cette somme Σ des angles de tous les triangles qu'ils étudient est toujours égale à π plus une partie proportionnelle à l'aire A du triangle, soit

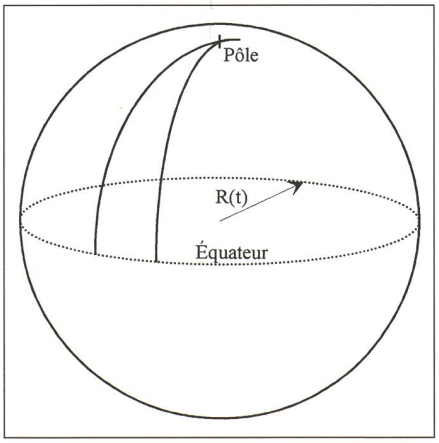
$$\Sigma = \pi + \alpha \cdot A \quad . \qquad (1)$$

Cela confirme la ***sphéricité*** de leur Univers et les pousse à la conclusion que la constante de proportionnalité α devrait être choisie égale à $1/R^2$, où ce choix de R représente le rayon de leur Univers sphérique. Des études poussées de leur passé leur montrent, toutefois, que si cette loi doit rester valable à toutes les époques, ils sont obligés d'admettre que le rayon de leur Univers est en expansion très rapide, si rapide, en fait, que la vitesse d'expansion de $R(t)$ peut dépasser celle de la lumière, c.-à-d. que $\dot{R}(t) = dR(t)/dt$ peut être plus grand que c!

Comme spectateurs extérieurs nous pouvons faire quelques observations intéressantes:

1) Sur la sphère la position des objets peut être spécifiée par des coordonnées angulaires. Un objet sera considéré comme stationnaire si, malgré l'expansion du rayon R, ses coordonnées angulaires Θ sont fixes; mais cette stationnarité ne pourra être définie que par rapport à un rayonnement fossile. L'expansion de l'espace ne déforme pourtant pas les objets de dimension restreintes, ceci jusqu'à la taille de galaxies. Dans le champ de ces objets restreints on peut choisir des coordonnées euclidiennes locales, par rapport auxquelles un point particulier pourra être stationnaire ou en mouvement relatif, stationnarité et mouvement qui n'auront cependant rien d'absolus. Dans ces coordonnées locales les lois connues de la physique resteront en général valables.
2) A cause de l'expansion $R(t)$ du rayon de l'Univers, deux galaxies de coordonnées angulaires Θ fixes paraîtront se séparer avec une vitesse proportionnelle à leur séparation. Cela sera confirmé par les mesures de décalage spectral (ou de «redshift») et correspond à la ***loi de Hubble***.
3) Dans ce «Gedankenexperiment» on admet que tout rayon de lumière émit tangentiellement à la sphère se propage en restant sur la sphère. Cela implique que la masse est répartie en respectant une parfaite symétrie sphérique, qu'elle soit distribuée dans tout l'espace ou concentrée en une mince couche juste sous la surface de la sphère. Mais la densité moyenne à l'intérieur de la sphère doit être égale à une densité bien définie, l'équivalent d'une ***densité critique***.
4) L'expansion généralisée de la sphère, décrite par la fonction $R(t)$ de la Fig. 1, peut être considérée comme un changement du ***rayon de courbure de l'Univers***. C'est en cela que la fonction $R(t)$ se différencie d'un ***mouvement relatif*** de deux objets sur la sphère et c'est aussi la raison pour laquelle cette expansion n'est pas soumise aux restrictions de la relativité. L'exemple des triangles permet de bien distinguer l'expansion de l'espace de mouvements de fuite relatifs. L'expansion de la sphère agrandit tous les triangles de coordonnées angulaires fixes, mais ne modifie pas la somme Σ de leurs angles inscrits. Par contre, un triangle qui s'agrandit par l'éloignement respectif des coordonnées angulaires de ses sommets voit Σ augmenter. Mais si $R(t)$ devient toujours plus grand, il sera aussi de plus en plus difficile d'apporter la preuve de la courbure de l'espace. Dans notre propre Univers nous nous trouvons présentement dans la même situation.
5) Pour les habitants de la sphère il y a un ***horizon visible.*** Puisque l'espace subit une expansion dont la vitesse peut dépasser celle de la lumière, le nombre de galaxies accessibles dans l'horizon visible des habitants de la sphère devra diminuer: sur cet horizon des galaxies disparaîtront progressivement de la vue des habitants de la sphère. Ce phénomène se réalise aussi pour nous dans notre Univers réel.

Fig. 1. Univers bi-dimensionnel à la surface d'une sphère. Localement cet Univers semble être plat; mais bien qu'il n'ait pas de frontières, son extension est finie. Pour cet Univers l'expansion correspond à une augmentation du ***rayon de courbure*** *R(t). La croissance de R(t) n'est pas limitée par la vitesse de la lumière, car il s'agit d'une* ***expansion de l'espace lui-même****. Cette expansion implique pourtant un éloignement réciproque de toutes les galaxies de la sphère; mais des objets de petites dimensions, jusqu'à la taille de galaxies (!), ne sont pas déformés par l'expansion: c'est* ***la loi de Hubble****. On vérifie que pour le triangle délimité par l'équateur et les deux méridiens, la somme Σ des angles inscrits vaut $\pi + A / [R(t)]^2$, où A est la surface de ce triangle sphérique.*



6) Les habitants de la sphère ont donc reconnu que leur perception bi-dimensionnelle d'un espace qui semble être euclidien et parfaitement plat est une conséquence de leur petitesse et de leur minceur. Ils savent que l'espace est effectivement tridimensionnel et que sa courbure peut, en principe du moins, être déterminée par l'étude des propriétés de grands triangles. Ayant trouvé que ces triangles satisfont la propriété donnée par la relation (1) les a fait admettre que cet espace est sphérique. Mais ils auraient pu trouver une relation un peu plus compliquée, par exemple une relation de la forme

$$\Sigma = \pi + \alpha_e(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot A \ , \qquad (2)$$

ou encore

$$\Sigma = \pi + \alpha_h(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3) \cdot A \ . \qquad (3)$$

Nous admettons ici que $\alpha_e(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)$ et $\alpha_h(\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3)$ sont des fonctions toujours positive (>0) des coordonnées angulaires Θ_i des trois sommets des triangles étudiés. Alors que la relation (1) trahissait un espace parfaitement ***sphérique,*** une relation de la forme plus générale (2) signifie seulement que l'espace est ***fermé*** ou ***elliptique*** (en tout point il peut être décrit approximativement par un ellipsoïde, mais en général tout nouveau point nécessite un ellipsoïde différent). Si la relation prend la forme (3), alors l'espace sera ***ouverts*** ou ***hyperbolique*** (ici encore l'hyperboloïde d'approximation pourra être différent en chaque point). Au contraire d'un espace qui est partout elliptique, dont l'extension est nécessairement finie comme celle d'une sphère, un espace de structure partout hyperbolique est forcément d'extension infinie. C'est vrai aussi pour un espace parfaitement plat en tout point.

7) Dans un espace en expansion le rayon de courbure $R(t)$ s'agrandit. Cela est facile à concevoir pour les espace courbes. Dans un espace plat $R(t)$ serait infini, mais pour décrire l'expansion on le remplace par une très grande dimension, comme la distance entre deux galaxies très éloignées l'une de l'autre afin de se soustraire à leur interaction gravitationnelle réciproque. En un endroit donné de l'univers de notre «Gedankenexperiment» la fonction $R(t)$ ne dépend que du temps t et on pourra considérer que cette coordonnée est une sorte d'axe du temps. Pour les habitants de l'Univers fictif que nous avons créé il devient alors plausible de considérer que leur Univers est tridimensionnel et que deux de ses coordonnées sont de caractère spatial, alors que la troisième est de caractère temporel. Mais la distinction n'est pas vraiment absolue, puisque dans leur espace la fuite réciproque de toutes les galaxies apparaît comme un mouvement spatial, alors qu'il s'agit d'une croissance du rayon de courbure $R(t)$, qui représente en fait l'écoulement du temps.

8) Dans l'Univers fictif du «Gedankenexperiment» l'expansion pourra, soit se poursuivre indéfiniment, soit s'arrêter et finalement se transformer en une contraction. Dans la seconde alternative l'aboutissement sera un total effondrement, l'antithèse du «Big Bang», souvent dénommé «Big Crunch». La fonction $R(t)$ ayant été assimilée à l'évolution du temps, la phase d'expansion pourra être comprise comme une évolution positive du temps, alors que la contraction en sera à une évolution négative.

Revenons maintenant à notre Univers réel et essayons de voir comment les propriétés attribuées à l'Univers virtuel de notre «Gedankenexperiment» se manifestent dans la réalité.

La perception habituelle que nous avons de notre environnement est celle d'un espace euclidien à trois dimensions et parfaitement plat; mais l'exemple du «Gedankenexperiment» suggère que cet espace pourrait, en réalité, être une «sous-structure» délimitée dans un espace à quatre dimensions, sous-structure en tout point de laquelle l'espace nous paraît être tridimensionnel. Son rayon de courbure $R(t)$ semble présentement augmenter très rapidement. En vérité, et comme nous le verrons plus bas, il n'est pas correct de dire que le rayon de courbure de notre Univers augmente. En effet, aujourd'hui l'Univers se présente à nous comme s'il était vraiment plat et la grande distance type $R(t)$ a pour seul but de décrire l'expansion de l'espace. Puisque par définition la courbure est l'inverse du rayon de courbure, on dira que la courbure de notre Univers est nulle. Quant à l'expansion de l'espace, des indices récents suggèrent que sa vitesse est en train de s'accélérer. Comment expliquer cela?

2. La constante cosmologique

Après avoir formulé les lois de la mécanique et de la gravitation universelle, Newton s'est immédiatement rendu compte que selon ces lois l'Univers ne pouvait que s'effondrer sur lui-même. Pour éviter un tel effondrement Newton postula une force opposée à la gravitation, sensible en tout point de l'Univers. Par un calcul très simple on peut montrer que pour obtenir la stabilité recherchée cette force doit être proportionnelle à la densité moyenne de l'Univers. Ainsi à la surface de la Terre, une masse m ne ressent pas seulement l'attraction gravitationnelle $m \cdot g$ bien connue, soit

$$F = G \cdot \frac{mM}{r^2} = \frac{4\pi mGr}{3}\rho_T = m \cdot g \ , \qquad (4)$$

où G est la constante de la gravitation ($6{,}6726 \cdot 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2}), M la masse de la Terre, r son rayon moyen (6371 km), ρ_T sa densité moyenne (5,520 kg/m^3), mais encore une force répulsive proportionnelle à la densité moyenne ρ_U de l'Univers, de l'ordre de 10^{-26} kg/m^3:

$$F = \frac{4\pi mGr}{3}(\rho_T - \rho_U) \ . \qquad (5)$$

Mais à la surface de la Terre ρ_U est totalement négligeable devant ρ_T. L'Eq. (4) décrit donc parfaitement l'attraction gravifique de la Terre sur les objets à sa surface et l'Eq. (5) n'y apporte qu'une amélioration de principe totalement négligeable.

Cette constatation reste valable à la surface des étoiles et même des galaxies, de sorte que le seul effet de cette force additionnelle est d'assurer la stabilité de la structure de l'Univers à grande échelle. C'est précisément ce que recherchait Newton, car il pensait que cette structure devait être statique, ou pour le moins stationnaire.

Dans les systèmes de dimensions restreintes liés à une galaxie, les lois de la physique classique sont valables, pour autant qu'on se limite à des vitesses petites devant celle de la lumière. Ces lois sont encore valables dans les systèmes en translation uniforme par rapport à ceux qui sont liés à la galaxie. Tous ces systèmes forment l'ensemble des systèmes inertiels. Comme ils sont équivalents d'un point de vue classique, on a longtemps cru qu'aucun d'entre eux n'était absolu. Depuis qu'on a découvert l'existence de la radiation fossile à 2,735°K, on sait qu'il y a un système plus fondamental que les autres; c'est celui qui paraît être au repos par rapport à cette radiation. Dans ce système particulier la radiation fossile est distribuée de la façon la plus uniforme possible: on reçoit la même radiation de toutes les directions. Par contre, si on est en translation uniforme par rapport à elle, la radiation paraîtra déplacée vers des longueurs d'onde plus courtes ou plus longues et paraîtra donc plus chaude ou plus froide, selon qu'on se déplace contre elle ou avec elle.

Comparant les Eq. (4) et (5) on peut écrire la seconde sous une forme un peu différente:

$$F = m\left[\frac{GM}{r^2} - \frac{\lambda r}{3}\right], \qquad (6)$$

avec pour λ:

$$\lambda = 4\pi G\, \rho_U\,. \qquad (7)$$

λ est la ***constante cosmologique de Newton*** et l'on retiendra que si λ est inférieur à la valeur donnée en (7), l'Univers finira toujours par imploser, alors que s'il est plus grand l'expansion non seulement se poursuivra indéfiniment, mais encore ***elle sera accélérée!*** De plus, si l'Univers devait se contracter on verrait des galaxies apparaître sur l'horizon visible. Par contre, dans une phase d'expansion accélérée des galaxies disparaîtront peu à peu sur cet horizon.

Lorsqu'il eut établi les équations de la cosmologie relativiste, Einstein se trouva devant le même dilemme que Newton. Ses équations cosmologiques prédisaient un effondrement de l'Univers. Tout comme Newton, Einstein était persuadé qu'à grande échelle la structure de l'Univers devait être stable. Fort heureusement, ses équations permettaient l'introduction d'une constante cosmologique par laquelle il pouvait obtenir la stabilité désirée. Il se trouve que cette ***constante cosmologique d'Einstein*** est exactement la même que celle de Newton, sinon que dans les unités de la cosmologie relativiste elle est divisée par c^2 et exprimée par le symbole $\Lambda = \lambda / c^2$.

Lorsque les observations de Hubble montrèrent que l'Univers est issu d'un «Big Bang» initial, à la suite duquel il vole tout naturellement en éclat, Einstein regretta amèrement d'avoir introduit cette constante cosmologique. On peut dire qu'à la suite d'Einstein les cosmologistes ont alors véritablement répudié cette constante. Nous allons pourtant voir que la constante cosmologique revient aujourd'hui sur le devant de la scène.

3. La densité moyenne de l'Univers

Au **paragraphe 1** nous avons postulé qu'un rayon de lumière émit parallèlement à la sphère représentant l'Univers virtuel se propagerait uniquement sur cette surface. Cela impliquait, non seulement une répartition de masse sphérique, mais aussi pour l'intérieur de la sphère une densité moyenne bien précise. Pour l'extérieur de la sphère la seule condition à satisfaire était une répartition parfaitement sphérique, sa valeur était sans importance.

Notre Univers réel étant une sous-structure d'un espace à quatre dimensions n'exige-t-il pas, lui aussi, une densité particulière? On a effectivement longtemps été persuadé que l'univers devait avoir une densité critique bien définie. Cette densité critique assurait aussi une expansion continuelle, avec, cependant, une vitesse qui convergeait vers zéro au bout d'un temps infiniment long. Mais les recensements de matière les plus soigneux ne sont jamais parvenus à des valeurs qui dépassent le tiers environ de la densité critique. D'autre part, loin de ralentir, il semble que la vitesse d'expansion s'accélère. Comment faut-il comprendre cela?

La réponse aux deux énigmes que nous venons de soulever se trouve dans la constante cosmologique. Cette constante se combine avec la densité de masse pour assurer un Univers qui, à première vue, semble être plat. Sa densité n'est pourtant que de 0,25 à 0,3 fois la densité critique; mais la constante cosmologique est un peu plus grande que la valeur qui assurerait un Univers statique. Ainsi notre Univers serait en expansion accélérée! Mais malgré sa grandeur, on voit par l'Eq. (6) que la constante cosmologique ne peut avoir qu'une influence totalement négligeable sur des objets de dimension restreinte, même s'ils sont de la taille des plus grandes galaxies.

4. L'expansion de l'espace et la loi de Hubble

Comme pour l'Univers virtuel de notre «Gedankenexperiment», l'augmentation du rayon de courbure $R(t)$ de notre Univers réel se traduit par la fuite réciproque de toutes les galaxies les unes par rapport aux autres, avec des vitesses v proportionnelles, en première approximation, à la distance d séparant les galaxies. C'est la ***loi de Hubble***:

$$v = H \cdot d\,. \qquad (8)$$

La constante de proportionnalité H est appelée «***constante de Hubble***»; sa dimension est l'inverse d'un temps. Si on exprime v en m/s et d en m, alors le temps $t_{car} = 1/H$ est une bonne estimation de l'âge de l'Univers exprimé en secondes. En général on donne H en km/sMpc, où le Mpc (Mégaparsec) vaut 3,216 millions d'années-lumière. Après des années de controverses on s'accorde aujourd'hui sur une valeur de $H = 75 \pm 7$ km/sMpc, qui correspond à un âge caractéristique t_{car} d'environ 13 milliards d'années[1].

Comme nous l'avons dit, l'expansion de l'espace, et donc aussi la fuite réciproque des galaxies, n'est pas limitée par la vitesse de la lumière. Il en va autrement des mouvements relatifs de galaxies voisines en interactions gravifiques. Ces interactions sont contrôlées par les lois de la mécanique et de la gravité et sont soumises aux restrictions de la relativité. Elles ne peuvent donc pas engendrer de vitesses dépassant celle de la lumière. A titre d'exemple on peut mentionner que sous l'influence de leur attraction gravitationnelle réciproque, la Voie Lactée et sa grande et proche voisine, la galaxie d'Andromède (M31), se rapprochent à l'énorme vitesse de 300 km/s.

5. L'Univers en expansion accélérée

A la grande surprise de tous les cosmologistes, deux équipes internationales ont récemment observé, et de façon apparemment décisive, non seulement que la densité moyenne ρ_U de l'Univers est effectivement inférieure d'un facteur de 3 à 4 à la densité critique ρ_C, et donc que l'Univers est bien promis à une expansion perpétuelle, mais surtout, comme nous l'avons dit plus haut, que cette vitesse d'expansion s'accélère. Dans le cadre des équations régissant la cosmologie cela ne peut s'expliquer que par une constante cosmologique positive, plus grande encore que celle qu'avaient déjà postulé Newton et Einstein pour assurer un Univers qu'ils ne pouvaient concevoir que statique. Par l'Eq. (5) on voit immédiatement que selon son signe, une telle constante joue le rôle d'une force attractive ou répulsive. La raison de l'émoi des cosmologistes est d'expliquer l'origine d'une telle force. Tout indique que cette force provient de causes semblables à celles qui ont donné naissance au «Big Bang». Le «Big Bang» a crée de l'énergie/matière (souvenons-nous de $E = mc^2$!) d'une façon explosive et on peut aisément démontrer que pour produire une expansion accélérée il faut une création continuelle de matière dans tout l'espace cosmique.

Il vaut tout de même la peine d'insister sur le fait que l'expansion accélérée ne pourrait pas être la conséquence de conditions initiales particulières à la suite du «Big Bang», comme p. ex. une très grande énergie cinétique initiale. Une telle énergie initiale ne pourrait pas s'opposer au freinage gravitationnel et encore moins engendrer une accélération. En vérité, aucun mécanisme classique ne peut conduire à l'accélération observée. Ce qu'il faut pour cela est cette «création» continuelle d'énergie dans tout l'espace cosmique, énergie qui se transforme ensuite en matière. Tout comme pour le «Big Bang», ce processus fait intervenir les ***fluctuations du***

1 La relation entre H en km/sMpc et t_{car} en millions d'années-lumière est $t_{car} = 978/H$.

vide, et en définitive il n'est peut-être qu'une ***incandescence résiduelle*** du «Big Bang» initial.

On pourrait d'abord penser que cette façon de comprendre l'accélération de l'expansion redonnera vie aux concepts d'Univers à l'état stationnaire. De tels Univers, proposés par Bondi et Gold et par Hoyle en 1948, ont justement besoin d'une création perpétuelle d'énergie dans tout l'espace cosmique afin d'entretenir la fuite apparente des galaxies. Mais il est hors de doute que l'accélération de l'expansion, même si elle est interprétée dans une théorie rigoureusement relativiste, ne permet pas des Univers stationnaires. Le nôtre a certainement connu un début singulier, mais n'aura probablement pas une fin abrupte. La densité de matière et la température, vont probablement toujours diminuer et l'Univers deviendra finalement totalement inhospitalier à toute forme de vie.

Notre propos n'est pas de poursuivre ce sujet, mais plutôt de parler brièvement des observations qui semblent démontrer que notre Univers est effectivement en expansion accélérée. Une discussion détaillée de ce sujet vient de paraître en allemand sous la plume de **Bernhard Parodi** dans **ORION** (no. 298, p. 4-10). Ces observations sont basées sur une étude soignée du comportement de supernovas de type Ia, situées dans des galaxies très éloignées, c.-à-d. des galaxies dotées d'un grand «redshift», ou grand décalage spectral vers le rouge par effet Doppler. Les supernovas de type Ia se produisent dans des étoiles doubles, dont un des partenaires est une naine blanche (vieille étoile ayant à peu près les dimensions de la Terre et environ une masse solaire, ce qui fait une énorme densité de plus d'une tonne par cm^3!). Le compagnon de la naine est une étoile plus jeune, une grande boule de gaz. Par gravité la naine blanche aspire sur elle du gaz de son compagnon et s´enveloppe ainsi d'une atmosphère qui devient toujours plus dense et chaude.

Lorsque cette atmosphère atteint des densité et température critiques, elle explose comme une bombe à fusion; c'est le phénomène de la supernova de type Ia. Toutes les supernovas de ce type brûlent de façon similaire: leurs courbes de luminosité passent rapidement par un maximum pour ensuite décroître, restant observables une ou deux centaines de jours. Plus l'intensité maximale a été forte, plus la luminosité décroîtra lentement. On connaît maintenant si bien les supernovas de type Ia, qu'elles sont devenues des sortes de bougies standards dans le ciel. De la forme temporelle des courbes de luminosité on peut estimer leurs distances, et donc l'éloignement des galaxies dans lesquelles elles se trouvent. Mais l'étude du redshift des spectres de lumière renseignent aussi exactement sur la vitesse de fuite des galaxies où ces supernovas sont situées. Ce que les astronomes ont trouvé, est que ces supernovas sont apparemment 10 à 15% plus éloignées que ce qu'on déduirait de leur vitesse de fuite. La Fig. 2 permet de situer ces résultats révolutionnaires dans le cadres des solutions permises par la cosmologie relativiste et paraissent effectivement confirmer une expansion accélérée de notre Univers.

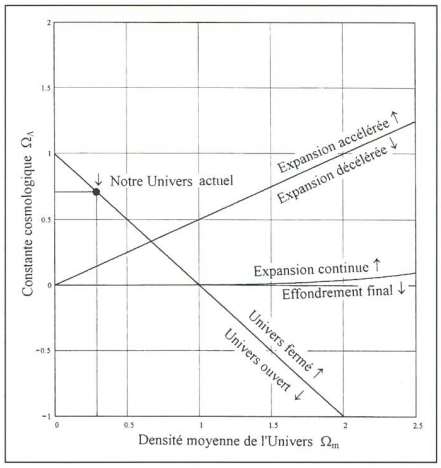


Fig. 2. Plan des solutions possibles en cosmologie relativiste. Abscisse et ordonnée de ce graphe correspondent respectivement à la densité de masse de l'Univers et à la contante cosmologique, toutes deux normées comme indiqué dans le texte. Dans le plan de ce graphe on reconnaît la droite correspondant aux Univers plats, entre Univers ouverts et fermés, la limite entre Univers en expansion continue et Univers qui finissent par s'effondrer et la limite entre Univers accélérés et décélérés. L'ensembles des données acquises récemment suggèrent un Univers plat, de faible densité de matière Ω_m, mais une importante constante cosmologique positive Ω_Λ

Cette Fig. 2 est un plan des solutions permises par la cosmologie relativiste. L'abscisse et l'ordonnée du graphe correspondent respectivement à la densité de masse de l'Univers et à la contante cosmologique; mais ces deux paramètres sont normés: Ω_m est la densité de masse moyenne de l'Univers divisée par la densité critique ρ_C, alors que Ω_Λ est la constante cosmologique d'Einstein multipliée par $(c \cdot t_{car})^2/3$, où t_{car} est tiré de la constante de Hubble selon l'Eq. (8). On peut dire que ces normalisations s'imposent au vu de la structure des équations cosmologiques. Dans le plan du graphe on note la limites entre Univers ouverts et fermés (la frontière elle-même étant celle des Univers plats), la limite entre Univers en expansion continue et Univers qui finissent par s'effondrer (la frontière correspondant aux Univers pour lesquels la vitesse d'expansion tend vers zéro lorsque le temps s'approche de l'infini) et la limite entre Univers accélérés et Univers décélérés (avec pour frontière les Univers statiques). L'ensembles des données acquises récemment suggèrent que notre Univers est plat, que sa densité de matière est de 3 à 4 fois inférieure à la densité critique, que la constante cosmologique normée Ω_Λ vaut environ 0,7 à 0,75, et que la vitesse d'expansion est bien accélérée. Il vaut aussi la peine de noter que si notre Univers paraît maintenant être parfaitement plat, cette propriété pourrait bien ne pas correspondre à la réalité. Il est en effet probable que dans les premiers instants après le «Big Bang» l'Univers était fermé. Avec l'énorme expansion subséquente il s'est progressivement approché d'une configuration plate (ou parabolique) et qu'il est maintenant impossible de mettre en évidence la très faible courbure résiduelle.

Quelques remarques concernant la Fig. 2 s'imposent encore. D'abord on note que densité de masse et constante cosmologique sont deux paramètres qui sont effectivement indépendants, leurs dimensions respectives étant des kg/m^3 et des m^{-2}; les paramètre normés Ω_m et Ω_Λ sont donc sans dimensions. Dans un premier temps on pourrait être surpris de constater que l'on a choisi de normer la constante cosmologique Λ par une fonction qui dépend du temps. En réalité, dans un Univers en évolution, comme le nôtre, Λ n'est certainement pas une constante. Une chose est sûre, Ω_Λ sera toujours <1, même s'il croîtra un peu. D'autre part, une étude approfondie de $\Omega_m = \rho_U / \rho_C$ permet de montrer que ce paramètre dépend lui aussi du temps. Plutôt qu'augmenter, il va cependant diminuer. Si le diagramme de la Fig. 2 est valable pour tous les temps futurs, la position du point marqué «**Notre Univers actuel**» ne se rapporte qu'au présent. Il concerne notre Univers dans son état actuel, tel que nous le percevons par les observations que nous faisons aujourd'hui. A mesure que le temps s'écoule, ce point se déplacera sur la droite $\Omega_\Lambda + \Omega_m = 1$ des Univers plats en direction de l'ordonnée. Comme nous venons de le dire, Ω_Λ sera toujours inférieur à l'unité et Ω_m supérieur à zéro. Mais en nous rapprochant de l'ordonnée tout en restant sur la droite des Univers plats, la courbure résiduelle de l'Univers nous échappera à jamais.

Nous avons vu que des Univers qui seraient ouverts ou parfaitement plats ($k = -1$ ou 0) s'étendraient à l'infini dans toutes les directions. Pour les créer il faudrait que le «Big Bang» ait mis en œuvre une énergie illimitée; cela est irréaliste. D'autre part, il serait difficile de concevoir que de tels Univers sans limites puissent s'effondrer. C'est la raison pour laquelle on est convaincu que notre Univers est effectivement fermé ($k = +1$), même si aujourd'hui nous ne pouvons plus mettre sa courbure en évidence.

Dans le domaine des Univers ouverts, on ne peut avoir que des Univers en expansion perpétuelle. Pour les Univers fermés un effondrement est possible dès que $\Omega_m \geq 1$. Mais nous savons qu'une constante cosmologique positive équivaut à une force répulsive, opposée à la gravité. Dès lors, si $\Omega_\Lambda > 0$ un effondrement est encore possible si la densité de masse excède la valeur critique, c.-à-d. $\Omega_m > 1$, et si Ω_Λ croît encore il faudra que Ω_m devienne nettement plus grand. Cela explique la transition entre Univers en expansion continue et Univers qui aboutissent à un effondrement final dans la Fig. 2.

Appendice mathématique

Les équations de la cosmologie relativiste d'Einstein ont la forme suivante:

$$\frac{8\pi G}{c^4} p_r = -\frac{k}{R^2} - \frac{\dot{R}^2}{c^2 R^2} - \frac{2\ddot{R}}{c^2 R} + \Lambda \ , \qquad (A.1)$$

$$\frac{8\pi G}{3c^4} \rho_U c^2 = \frac{k}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{c^2 R^2} - \frac{\Lambda}{3} \ , \qquad (A.2)$$

où p_r est la pression de radiation alors que k joue le rôle d'un signe qui prend les valeurs +1, 0, ou –1, suivant que l'Univers est *elliptique*, *parabolique*, ou *hyperbolique* (*fermé*, *plat* et *ouvert*). Les autres paramètres ont été définis dans le texte. Nous savons que $\dot{R}(t) = dR(t)/dt$ et $\ddot{R}(t)$ est simplement la deuxième dérivée de $R(t)$. L'Univers est maintenant dans une phase où la pression de radiation est négligeable; en général nous poserons donc $p_r = 0$.

L'énergie totale (cinétique et potentielle) d'une galaxie en interaction avec son entourage dépend de la densité de masse moyenne de l'Univers. Si on demande que cette énergie totale soit juste suffisante pour permettre à la galaxie de s'échapper à l'infini, où sa vitesse devra converger vers zéro, la densité requise sera la ***densité critique*** ρ_c, pour laquelle on trouve

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \ . \qquad (A.3)$$

Un calcul classique de l'expansion, freinée par la gravité, fournit une expression de la forme

$$R(t) = A \cdot t^n \ , \qquad (A.4)$$

où l'exposant prend la valeur bien définie de $n = 2/3$. Comme on doit s'y attendre, cela correspond à une décélération. Mais nous savons qu'on observe, aujourd'hui, une expansion accélérée; d'autres forces que le freinage gravifique sont donc en cause. Cette décélération ou accélération est caractérisée par un paramètre qu'on obtient par dérivation de $\dot{R} = HR$:

$$\ddot{R} = H\dot{R} + R\dot{H} = \ddot{R}_H + \ddot{R}_R \ . \qquad (A.5)$$

Le premier terme à droite de (A.5) décrit l'augmentation de la vitesse de récession à constante de Hubble H donnée, lorsque R augmente. Si H était une constante indépendante du temps, le second terme s'annulerait et le premier représenterait alors une expansion exponentielle accélérée. Le deuxième terme décrit les changements de la vitesse de récession causés par les variations temporelles de H. Sachant que $H = 1/t_{carr}$ dépend du temps, on transforme (A.5):

$$\dot{H} = \frac{\ddot{R}R - \dot{R}^2}{R^2} = -\frac{\dot{R}^2}{R^2} \cdot \left[1 - \frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2}\right] = -\frac{\dot{R}^2}{R^2} \cdot (1+q) \ , \qquad (A.6)$$

$$\text{où } q = -\frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2} \quad \text{soit } \frac{\ddot{R}}{R} = -q\frac{\dot{R}^2}{R^2} = -qH^2 \ . \qquad (A.7)$$

Par tradition on appelle q ***paramètre de décélération***. Si $q > 0$ on a $\ddot{R} < 0$ et la vitesse d'expansion décroît avec t, tandis que si $q < 0$ cette expansion est accélérée.

Avec la loi d'expansion classique représentée par l'Eq. (A.4) où $n = 2/3$ on obtient

$$q = 0.5 > 0 \ , \qquad (A.8)$$

et donc bien une ***décélération***. Avec un exposant n arbitraire l'Eq. (A.4) nous mène vers une relation très générale entre cet exposant et le paramètre de décélération q:

$$n = 1/(1+q) \quad \text{ou} \quad q = \frac{1-n}{n} \ , \qquad (A.9)$$

par laquelle on voit bien qu'une expansion décélérée correspond à $n < 1$ et $q > 0$, une expansion accélérée à $n > 1$ et $q < 0$ et une expansion à vitesse constante à $n = 1$ et $q = 0$.

En additionnant les Eq. (A.1) et (A.2) et en posant $p_r = 0$ nous obtenons les conditions nécessaires pour que l'expansion de l'Univers soit accélérée:

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{4\pi G}{3}\rho_U \ . \qquad (A.10)$$

Il faut donc $\Lambda - \frac{4\pi G}{c^2}\rho_U > 0$ (A.11)

pour une expansion accélérée.

En divisant tous les termes de (A.10) par $H^2 = \dot{R}^2/R^2$ on obtient

$$-q = \frac{\Lambda c^2}{3H^2} - \frac{4\pi G}{3H^2}\rho_U \ . \qquad (A.12)$$

On utilise maintenant (A.3) et on norme la constante cosmologique Λ comme dans le texte, soit en la multipliant par $(c \cdot t_{carr})^2/3 = (c/H)^2/3$. Le paramètre de décélération devient alors

$$q = -(\Omega_\Lambda - \frac{\Omega_m}{2}) \ . \qquad (A.13)$$

Il vaut la peine de souligner que ce résultat ne dépend pas de la courbure de l'Univers. Puisque la valeur $q = 0$ concerne les Univers statiques, la droite

$$\Omega_\Lambda = \Omega_m/2 \qquad (A.14)$$

est la frontière entre Univers accélérés (dessus) et décélérés (dessous), dans la Fig. 2.

De (A.2), on tire encore:

$$\frac{8\pi G}{3H^2} \cdot \rho_U = \frac{kc^2}{R^2 H^2} + 1 - \frac{\Lambda c^2}{3H^2} \ . \qquad (A.15)$$

Avec les mêmes substitutions que pour (A.13) cette équation nous donne pour les Univers plats ($k = 0$), c.-à-d. pour la frontière entre Univers ouverts ($k = -1$) et fermés ($k = +1$), la droite

$$\Omega_\Lambda + \Omega_m = 1 \ . \qquad (A.16)$$

Cette droite est aussi dessinée sur la Fig. 2.

Si on accepte les valeurs suggérées par la Fig. 2, soit $\Omega_m \equiv 0{,}3$ et $\Omega_\Lambda \equiv 0{,}7$ on trouve

$$q \cong -0{,}55 \text{ et avec (A.9) } n \cong 2.22 \ . \qquad (A.17)$$

Le signe de q et un exposant $n > 1$ sont bien en accord avec les observations d'un Univers en expansion accélérée, mais la grandeur de n nous surprend. Il ne serait pas étonnant que les paramètres Ω_m et Ω_Λ que nous avons utilisés subissent des révision ces prochaines années.

GASTON FISCHER
Rue de Rugin 1A
CH-2034 Peseux
gfischer@vtx.ch