

L'expansion de l'Univers : vaste programme ! 3/3

écrit par Professeur Tetenlair | 22 mai 2025



Chers passionnés d'Astronomie re-bonjour !

Cette partie de nos rencontres sur l'expansion de l'Univers, au nombre de trois, constitue la dernière. Après, tu sauras tout...☐

Les deux dernières fois, nous avons vu, dans ce thème de l'expansion de l'Univers, en première partie les éléments suivants :

1. Introduction
2. Découverte de l'expansion de l'Univers
3. Bon, alors, c'est quoi l'expansion de l'Univers ?
4. Comment se manifeste l'expansion de l'Univers et comment le savons-nous ?
5. Comment se manifeste cette expansion (plus de détails) ?

Pour relire (ou lire !) cette première partie, [clique ici](#).

Pour la deuxième partie, nous avons vu :

1. Lire l'article en entier d'affilé
2. Le décalage vers le rouge
 - Généralités
 - Différents types de décalage vers le rouge
 - Le décalage Doppler
 - Le décalage gravitationnel
 - Le décalage cosmologique
3. La constante de Hubble – Lemaître
 - Expansion de l'Univers et vitesse des galaxies
 - Mesure des distances cosmologiques
 - Échelle des distances cosmologiques
 - Prédictions théoriques de la valeur de la constante de Hubble-Lemaître
4. Mouvements dans l'espace, ou expansion de l'Univers

?

5. Quel impact a eu la découverte de l'expansion de l'Univers sur la cosmologie ?

- Émergence de la théorie du Big Bang
- Abandon du modèle d'univers éternel
- Exploration de l'énergie noire
- Nouvelle méthodologie scientifique
- Implications philosophiques

6) Historique de la découverte

7) Quelles sont les conséquences de la découverte de l'expansion de l'Univers ?

- Projet DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument)
- Télescope de cosmologie d'Atacama (ACT)
- Nouvelles données sur les supernovas de type Ia (SNIa)

8) L'expansion de l'Univers n'a pas toujours été bien acceptée !

Pour aller relire (ou lire !) cette deuxième partie, [clique ici](#).

Comme pour les deux premières parties, pour lire l'article de cette troisième et dernière partie en entier, ou pour n'en lire que certaines parties, clique sur ce qui te correspond dans le sommaire ci-dessous. Tu y arriveras immédiatement.

[1\) Lire l'article en entier d'affilé](#)

[2\) L'Univers relativiste](#)

[3\) La relativité restreinte](#)

[4\) L'univers de la Relativité Générale](#)

5) Quel est le premier modèle d'un univers en expansion proposé ?

- Présentation
- Décrire l'Univers à partir des équations d'Einstein
- L'article fondateur
- Vers le big bang

6) Conclusion

1) LECTURE DE L'ARTICLE EN ENTIER

Ci-dessous.

2) L'UNIVERS RELATIVISTE

Reconnaître l'expansion de l'Univers constituait un pas conceptuel de taille. Il fallait en effet admettre de concevoir une géométrie munie d'une évolution propre, une notion tout à fait contradictoire avec l'idée d'espace absolu et rigide que la physique newtonienne considérait, et que seule permettait d'appréhender la théorie de la relativité générale.

Mais l'impact de cette théorie, ainsi que celui de la relativité restreinte, dépassait la simple introduction de la notion d'expansion, dont certains aspects, peuvent, à la rigueur être interprétés dans un cadre newtonien.

Ces théories modifient les notions de temps et d'espace, les dépouillant de leur caractère d'absolu et d'indépendance, imposent d'abandonner les notions d'espace et de temps séparés et de les remplacer par celle d'espace-temps. Un espace-temps qui, de plus, doit être muni d'une structure géométrique complexe. Il n'y avait aucun doute que c'est dans un tel cadre que devait être décrite la cosmologie.



3) LA RELATIVITÉ RESTREINTE

C'est à Einstein que nous devons les deux théories de la relativité. L'énoncé essentiel de la relativité restreinte concerne la vitesse de la lumière, postulée constante dans le vide, quel que soit l'état de mouvement de la source ou de l'observateur.

Ainsi, nul objet que nous observons ne nous est contemporain : la lumière met 8 minutes environ pour nous parvenir du Soleil, plusieurs années d'une étoile plus éloignée, plusieurs milliards d'années d'une galaxie lointaine. Par conséquent, l'astronome qui regarde loin dans l'Univers regarde aussi loin dans le passé et observe des « tranches d'Univers » d'autant plus anciennes qu'elles sont éloignées : une galaxie lointaine est observée très jeune, surprise peu après sa naissance, telle qu'elle était il y a quelques milliards d'années ; une autre, au contraire, plus proche, nous apparaît après avoir évolué pendant plusieurs milliards d'années.

Nul doute que ces deux objets sont différents, autant que peuvent être différents un vieillard et un nourrisson. Deux effets se mélangent donc dans l'observation des galaxies lointaines : l'évolution propre de ces objets – qui nous fait observer les galaxies lointaines encore au berceau – et l'évolution cosmologique – les galaxies proches se situent dans l'espace « ancien », les galaxies lointaines dans l'espace « récent ». Une distinction qui s'impose dès que l'on admet que l'espace puisse évoluer.

Tu ne devras donc plus parler non plus de points de l'espace, ami passionné, mais d'événements de l'espace-temps : une galaxie là-bas et autrefois ; une autre ici et maintenant. C'est encore une raison pour laquelle, en cosmologie, plutôt que de caractériser un objet observé

par sa distance spatiale ou par sa distance temporelle (le temps mis par la lumière pour nous parvenir), il est beaucoup plus satisfaisant d'utiliser le décalage spectral z , grandeur « mixte » idéale pour les cosmologues.



4) L'UNIVERS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

La relativité générale joue un rôle encore plus fondamental que la relativité restreinte, car elle permet de concevoir une géométrie propre de l'Univers. Dans la physique non relativiste, la géométrie est très simple, comme tu le sais, mon ami, (elle est dite euclidienne : c'est celle que nous apprenons à l'école, où les parallèles existent et ne se rencontrent jamais, où l'on ne revient jamais à son point de départ en allant toujours tout droit, etc. tu te souviens ?) et l'Univers ne peut qu'être muni de cette géométrie ordinaire qui, unique, ne saurait évoluer au cours du temps.

Le discours sur l'Univers est alors rapidement limité, faute d'objet. Au contraire, la relativité générale offre une riche diversité de géométries possibles, dont **la géométrie euclidienne n'est qu'un cas bien particulier**. Ces géométries définissent par exemple (bien que non totalement) l'extension spatiale de l'Univers, finie ou infinie, les lois de propagation de la lumière et bien d'autres propriétés qui sont triviales dans la géométrie ordinaire. **Cette géométrie n'est pas statique, mais peut évoluer au cours du temps.**

Une première difficulté de la théorie relativiste du cosmos provient du fait que nous avons l'habitude de la géométrie à trois et non pas à quatre dimensions. De la droite au plan, puis à l'espace « ordinaire », on évolue d'une à deux et à trois dimensions, mais il nous est impossible de nous représenter ce que serait le pas

suivant pour arriver à un espace, même euclidien, à quatre dimensions. Vrai, hein ? 

Une seconde difficulté provient des propriétés structurales inhabituelles de cette géométrie. Les mathématiciens appellent variété, et plus particulièrement, dans le cas qui nous occupe, variété différentiable ou riemannienne, un tel espace généralisé. On peut dire que la variété espace-temps est aussi complexe (et donc riche en structures), par rapport à un espace euclidien à quatre dimensions, qu'une surface arbitraire peut l'être par rapport au plan.

Les mathématiques permettent heureusement de décrire de telles structures en s'intéressant, en chaque point, aux propriétés dites métriques, permettant de calculer des longueurs et des durées, en fait des « intervalles » combinant les deux puisque les propriétés temporelles doivent être adjointes aux propriétés spatiales.

Ton serviteur t'invite à relire (ou lire) l'article en six parties qu'il avait écrit sur Résistance républicaine concernant la Relativité Générale. Cet article, dont la dernière partie a été écrite le 19 janvier 2022, intitulée « *La Relativité Générale d'Albert Einstein, et oui... (partie 6 et dernière)* » peut être lue en [cliquant ici](#). À partir de cette sixième partie, tu auras les liens pour accéder aux cinq premières. 

5) QUEL EST LE PREMIER MODÈLE D'UN UNIVERS EN EXPANSION PROPOSÉ ?

▪ Présentation

Alexandre Friedmann



Le Soviétique Alexandre Alexandrovitch Friedmann (1888-1925), physicien et professeur à l'université de Petrograd, publie en 1922 un article fondateur de la cosmologie moderne. Il est le premier à montrer, à partir de la relativité générale – publiée en 1915 par Albert Einstein (1879-1955) – qu'un univers **possédant un début suivi d'une expansion est en accord avec celle-ci, ce qu'Einstein admettra difficilement.** L'expansion de l'Univers sera confirmée par des observations astronomiques dès 1929, et sa phase initiale ne cessera depuis lors d'être une des questions centrales de la cosmologie et de la physique.

• Décrire l'Univers à partir des équations d'Einstein

La relativité générale décrit la structure (ou la géométrie si tu préfères) d'un espace-temps, généralement courbe (c'est-à-dire non euclidien), comme étant déterminée par la répartition et le mouvement de la matière que cet espace contient, qu'elle soit présente sous forme de masse ou d'énergie.

Réciproquement, le mouvement de la matière est déterminé par la géométrie. Les équations d'Einstein explicitent cela sous la forme d'une relation entre deux objets mathématiques appelés tenseurs, dont les propriétés généralisent celles d'objets plus familiers tels que les nombres (scalaires) ou les vecteurs.

Dans ces équations, l'un des tenseurs décrit la **géométrie de l'espace-temps**, l'autre représente son **contenu en masse-énergie**. Deux constantes fondamentales bien connues de la physique, **et deux seulement**, interviennent dans ces équations qui fondent la relativité générale :

- la vitesse de la lumière c .
- la constante de gravitation de Newton G .

En outre, les équations comprennent un nombre, dont la valeur n'est pas fixée (c'est donc une inconnue), appelé « **constante cosmologique** » et noté Λ , dont seule l'observation de l'Univers réel pourra déterminer la valeur.

Capables de décrire une évolution au cours du temps à partir de conditions initiales, ces équations peuvent être appliquées aussi bien à un objet particulier (étoile ou trou noir, par exemple) qu'à l'Univers dans son ensemble dont traite la cosmologie.

En 1917, Albert Einstein puis le Néerlandais Willem De Sitter (1872-1934), en partant d'hypothèses différentes sur le contenu de l'Univers, calculent deux solutions



possibles des équations. Ces solutions sont telles que les univers proposés demeurent semblables à eux-mêmes au cours du temps, appelé « *temps cosmique* ». Einstein, sans doute convaincu que le cosmos ne peut être qu'immuable $\square$, estime que ce postulat d'un univers statique, qui requiert une valeur non nulle de Λ , se justifie par les rares observations astronomiques alors disponibles, telles les faibles vitesses mesurées de mouvements d'étoiles.



▪ L'article fondateur

*Ce chapitre sur l'article fondateur de l'expansion de l'Univers est passionnant, mais peut être susceptible de ne pas intéresser tous les lecteurs. Il est donc mis en **marron italique**. Si tu souhaites passer à la suite de l'article, reprend la lecture de couleur noire qui suit.*

Alexandre Friedmann s'attache à chercher des solutions à ces mêmes équations, sans toutefois s'imposer ce postulat. En 1922, il publie en allemand, dans la revue *Zeitschrift für Physik*, son article fondateur de la cosmologie actuelle, intitulé « Über die Krümmung des Raumes » (ce qui signifie « Sur la courbure de l'espace »). En effet, il a découvert, parmi d'autres également compatibles avec les équations, une famille de solutions qui implique « l'existence possible d'univers dont la courbure spatiale est constante par rapport aux trois coordonnées spatiales (celles de l'espace à trois dimensions), mais dépend du temps, c'est-à-dire de la quatrième coordonnée (temporelle) ».

Il suppose donc un univers homogène à grande échelle, c'est-à-dire renfermant de la matière-énergie uniformément répartie dans l'espace avec une densité constante. La nouveauté radicale des modèles d'univers appartenant à cette famille est que la courbure de l'espace-temps, désignée par $R(t)$, dépend du temps cosmique t . La grandeur $R(t)$ peut évoluer au cours du temps de diverses façons, la valeur de la constante inconnue Λ fixant alors un modèle particulier : un univers en expansion, un univers en contraction, éventuellement un univers cyclique. Posant $\Lambda = 0$ pour simplifier, Friedmann recherche, au sein de cette famille de solutions possibles, celle qui pourrait représenter l'univers réel. Il utilise donc les indications que peuvent donner les mesures astronomiques disponibles, à savoir une estimation du nombre total d'étoiles et du volume occupé par celles-ci, ce qui permet de déduire un contenu de masse-énergie. Il suggère alors avec prudence une contraction puis une expansion de l'Univers réel, ayant débuté il y a dix milliards d'années et qui serait suivie d'une nouvelle contraction à l'avenir. Ces dix milliards d'années sont dix fois supérieurs à l'estimation, faite à cette

époque, de l'âge des objets célestes supposés les plus anciens, telle la Terre. Ils sont remarquablement du même ordre de grandeur que l'âge de l'Univers retenu désormais par la cosmologie moderne (13,8 milliards d'années).

Einstein publie aussitôt, dans cette même revue allemande, une critique qui relève une erreur de calcul qu'aurait commise Friedmann. Il faut attendre mai 1923 pour qu'Einstein reconnaisse que l'erreur est de son fait et qu'il accepte le résultat de Friedmann.

En 1924, Friedmann publie, dans cette même revue allemande, un second article, dans lequel il complète par d'autres modèles d'univers les solutions possibles des équations d'Einstein. La brève et remarquable carrière de ce scientifique se termine prématurément par son décès en 1925, de la fièvre typhoïde, à l'âge de trente-sept ans.



▪ Vers le big bang

Georges Lemaître



L'existence et la signification physique d'un « point » de l'espace-temps, situé au début de l'expansion, singulier parce qu'impliquant des valeurs infinies pour la densité, ne vont que très lentement s'imposer. Georges Lemaître (1894-1966), jeune mathématicien, astronome et physicien belge, prêtre catholique et professeur, n'a pas connaissance des travaux de

Friedmann.

En 1927, à son tour, il publie les solutions cosmologiques non statiques qu'il a calculées et qui

portent désormais le nom **d'Univers de Friedmann-Lemaître**. En outre, ici, il les confronte à des observations de galaxies en mouvement très rapide, réalisées aux États-Unis et disponibles depuis peu.

Il confirme le modèle d'un univers en expansion, établit le taux de cette expansion en formulant la loi qui est désormais appelée « **loi de Hubble-Lemaître** », et discute l'état physique de l'Univers lors de sa phase primordiale, en la qualifiant « d'atome primitif ». Le débat autour de l'existence de cette phase primordiale se poursuivra après la Seconde Guerre mondiale.

Dans les années 1950, il conduira l'astronome britannique Fred Hoyle (1915-2001), qui en dénie la réalité, à la qualifier, par dérision, de « big bang » et à privilégier un univers dit stationnaire, où de la matière nouvelle apparaîtrait continûment au cours du temps cosmique et que les observations n'ont pas confirmé.

C'EST L'UNIVERS DE FRIEDMANN-LEMAÎTRE, AVEC SA LOI D'EXPANSION DE HUBBLE-LEMAÎTRE, QUI EST CELUI DE LA COSMOLOGIE MODERNE, TOUTE ENTIÈRE FONDÉE SUR LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE D'EINSTEIN.



6) CONCLUSION

Voilà, chers amis passionnés, quelques notions sur l'expansion de l'univers expliquées bien modestement dans les trois parties qui composent cet article. Ton serviteur a essayé de faire le tour en essayant d'être le plus complet sur l'essentiel. De nombreux astrophysiciens ont étudié, et étudient encore, cet extraordinaire phénomène de l'expansion de l'univers.

On sait que cet univers est en expansion permanente, mais comment le réaliser alors qu'on le décrit comme

étant infini, voire composé de plusieurs univers. Oui, on sait qu'il est en expansion permanente, mais comment quelque chose qui est infini, donc qui n'a aucune limite, peut-elle être en expansion ?

L'astronomie, surtout la cosmologie pour l'expansion de l'univers, découvre et explique beaucoup de choses. C'est d'ailleurs le rôle de la science d'une façon générale que d'expliquer ce qui existe de façon sûre et indiscutable par des preuves.

La science remplit bien son rôle de découvrir et d'expliquer, mais constater et expliquer, constater et expliquer encore, et constater et expliquer toujours laisse un peu ton serviteur sur sa faim.

Il arrive un moment où on se demande si toutes ces choses prodigieuses que l'on découvre et que l'on explique, ne sont-elles pas venues tout seules et n'ont-elles pas été créées ? Oui, je sais, vaste débat.

Il est de tradition depuis toujours dans le monde scientifique d'exclure ipso facto comment toutes ces magnifiques choses ont été créées. Ton serviteur pense que le scientifique le plus rigoureux qui puisse exister sur Terre, peut, et doit, se poser la question de l'existence de tout ce que la science constate et explique. Ces deux notions ne sont pas incompatibles.

Et puisque l'on est dans les confidences, ton serviteur avec ses très minces connaissances et ses efforts de rigueurs scientifiques, est persuadé que toutes ces existences naturelles et magnifiques de toutes ces choses, ont été créées par une puissance supérieure, dont on pourra lui donner le nom que l'on souhaitera.

Bien entendu, ton serviteur a une idée très précise de cette puissance supérieure. Mais le débat tombe ici dans le mystique, et ce n'est pas l'objet d'un tel article.

Au plaisir, amis passionnés, pour un autre sujet la prochaine fois.

Professeur Têtenlair

