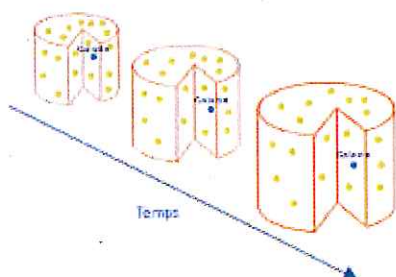
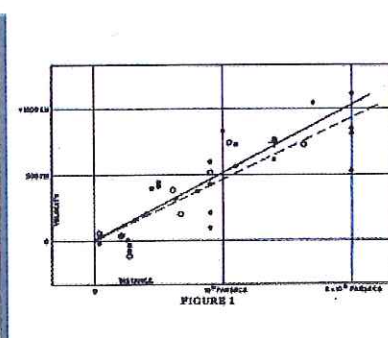
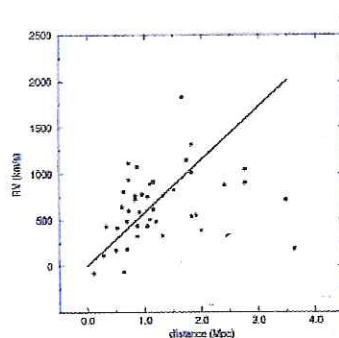


Cette figure montre les raies spectrales d'une galaxie proche et d'une galaxie lointaine : la galaxie lointaine s'éloigne de nous plus rapidement que la proche, donc les raies spectrales se déplacent plus vers le rouge.



Le fait que les galaxies s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont plus distantes prouve que c'est l'Univers tout entier qui est en expansion.

Ce n'est rien de moins que la fameuse « loi de Hubble » que celui-ci va découvrir deux ans plus tard et qui fera sa gloire.



Comparaison entre les données utilisées par Lemaître en 1927 qui lui donnent une valeur du taux d'expansion de 570 km/s/Mpc (à gauche), et celles de Hubble en 1929 qui donnent 530 km/s/Mpc (à droite).

1929 : Hubble, qui a rassemblé tous les résultats connus de vitesses radiales et de distances des galaxies, en y adjoignant ses observations personnelles avec Humason, publie dans les *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* un article qui fait immédiatement grand bruit : « A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae » (« Une relation entre la distance et la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques ») valeur assez proche de celle proposée par Lemaître.

Hubble ne cite pas le nom de Slipher, dont les mesures de vitesses radiales sont pourtant fondamentales dans cet article, ni naturellement celui de Lemaître, qu'il connaît sans doute pourtant, car il avait certainement été mis au courant de ses résultats lors du congrès Solvay de 1927 où ils étaient présents tous les deux.

De plus, Hubble ne croit pas à l'expansion de l'Univers, pour lui ce sont les vitesses réelles des galaxies.

Lemaître traduit son propre article en 1931 et Eddington le publie dans la prestigieuse revue *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Mais Lemaître a supprimé le paragraphe clef donnant la valeur de la constante de proportionnalité prouvant l'antériorité de sa découverte par rapport à celle de Hubble. Il trouve en effet que son calcul est dépassé à cause de nouvelles mesures de distances !

1931, Lemaître tire les conséquences de l'expansion : si l'Univers grossit, c'est qu'il a été petit ! C'est « l'atome primitif ».

Très peu de scientifiques y croient, Einstein moins que tout autre : « *Vos calculs sont justes, mais votre physique est abominable* », dit-il à Lemaître.

Si l'Univers est en expansion, c'est qu'il est né à un moment donné, et on peut calculer son âge grâce à la constante de Hubble H_0 . En effet, si une galaxie s'éloigne de nous avec une certaine vitesse, que l'on suppose que cette vitesse reste constante, et que l'on connaît la distance actuelle de la galaxie, on peut en déduire quel temps s'est écoulé depuis qu'elle a quitté notre galaxie : c'est $1/H_0$. Mais on sait que l'expansion après le Big Bang doit être ralentie par la gravité de la matière que contient l'Univers (voir encadré fig. 1), et dans ce cas, l'âge de l'Univers est plus petit que $1/H_0$ (voir encadré fig. 2). Par exemple, dans le cas de l'Univers d'Einstein-de Sitter, l'âge est seulement les deux tiers de $1/H_0$.

Lemaître s'est toujours défendu, y compris contre le pape Pie XII, de prôner une interprétation religieuse de sa théorie en termes de création.

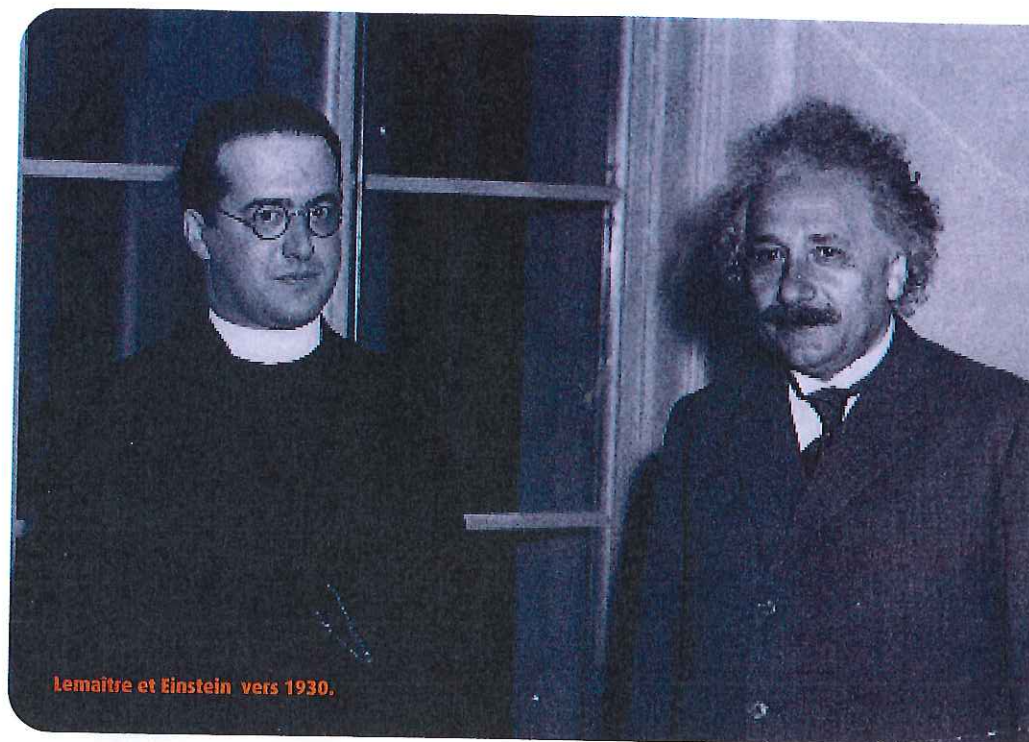
Mais il y a un grave problème

Avec $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$, l'Univers a moins de deux milliards d'années. Or, déjà à cette époque, on pensait que la Terre était plus âgée, et lorsque les datations par radioactivité arrivent dans les années 1940, il est clair que...

ça ne marche pas !

En fait, ça marcherait si l'on tenait compte d'une constante cosmologique Λ , mais on croit au modèle Einstein-de Sitter qui n'en a pas...

Donc, 1940-1965 : Univers stationnaire ($H_0 = 0$), contre Univers en expansion avec Big Bang.



Lemaître et Einstein vers 1930.

Deux géants qui se déchirent : Hoyle contre Gamow

Fred Hoyle est un brillant et imaginatif astronome britannique, qui répugne pour des raisons philosophiques à accepter l'idée d'un Univers en expansion avec un Big Bang. Il propose donc avec ses collègues Thomas Gold et Hermann Bondi la théorie de « l'Univers stationnaire ». L'Univers serait non seulement identique en tout point de l'espace mais également à toutes les époques. C'est ce que l'on appelle

« le principe cosmologique parfait ».

Il y aurait création continue de matière qui ferait apparaître l'Univers en expansion, sans qu'il ait pour autant un âge donné par la constante de Hubble.

**L'Univers est donc éternel et immuable.
Cette théorie rallie beaucoup d'astronomes,
car elle résout le problème de l'âge de l'Univers.**

Un autre brillant et imaginatif astronome est le Soviétique Georges Gamow, qui émigre aux États-Unis en 1934. Élève de Friedmann, il croit à l'expansion. Il corrige « l'atome primitif », en montrant que la matière devait être non seulement beaucoup plus dense que maintenant, mais également beaucoup plus chaude. C'est le « Big Bang chaud ». *Le terme de Big Bang a été donné par dérision par Hoyle lors d'une émission à la BBC en 1949.*

Hoyle et Gamow se battent sur tous les fronts

Gamow : Tous les éléments – y compris l'hydrogène – sont synthétisés dans les cinq minutes qui suivent le Big Bang (1948, avec Alpher et Herman).

Hoyle : Non, tous les éléments – sauf l'hydrogène – sont synthétisés dans les étoiles (1954, avec les Burbidge et Fowler).

Tous deux se trompent !

Les éléments « légers » – hydrogène, hélium jusqu'au béryllium – sont synthétisés pendant les trois premières minutes qui suivent le Big Bang. Les éléments plus lourds (carbone, azote, oxygène...) sont synthétisés dans les étoiles plusieurs milliards d'années après le Big Bang.

1948 : Gamow fait une prédiction extraordinaire

Avec ses deux collègues Ralph Alpher et Robert Herman, il prédit l'existence peu après le Big Bang d'une intense émission de

lumière, que nous devrions observer actuellement sous forme d'un rayonnement radio très affaibli, le rayonnement fossile, ou fond diffus cosmologique².

En fait, ce sont Alpher et Herman qui font le travail, Gamow lance les idées...

Cette prédiction reste ignorée, sauf de quelques cosmologistes

En 1965, le rayonnement fossile – ce bruit provenant du fond des âges – sera découvert sans qu'ils le cherchent par deux ingénieurs de la Bell Telephone, Arno Penzias et Robert Wilson, qui recevront par la suite le prix Nobel pour cette découverte majeure.



En 1965, le physicien Robert Dicke, aidé du cosmologiste Jim Peebles, était en train de construire à Princeton un radiomètre destiné à capter ce rayonnement. Il ne sera au point que l'année suivante.

Ce sont eux qui ont révélé à Penzias et Wilson la nature de ce qu'ils avaient découvert...

N'auraient-ils pas mérité également le prix Nobel, avec Gamow ?

Penzias et Wilson devant le radiotélescope qui leur a permis de découvrir le rayonnement fossile du ciel.

C'est le coup d'arrêt pour l'Univers stationnaire, bien que Hoyle et d'autres tenteront de l'adapter par la suite.

Mais encore faut-il résoudre le problème de l'âge de l'Univers. Ce sera fait à travers les tribulations de la constante de Hubble et de la constante cosmologique dont nous parlerons la prochaine fois.

1. Comme une pomme posée sur le faite d'un toit ne peut rester en équilibre, elle va forcément tomber d'un côté ou de l'autre.

2. Ce rayonnement a été émis lorsque la température de l'Univers ayant suffisamment diminué (à 3 000 degrés, 380 000 années après le Big Bang), les électrons et les protons qui le constituaient se sont « recombinaisonnés » pour donner des atomes d'hydrogène. Les photons de lumière ont pu alors circuler librement et parvenir jusqu'à nous, mais en perdant de l'énergie par suite de l'expansion de l'Univers. De visibles, ils sont devenus des photons dans le domaine radio.

POUR APPROFONDIR : les équations de Friedmann-Lemaître et les constantes cosmologiques

Friedmann et indépendamment Lemaître ont réécrit les équations d'Einstein dans le cas d'un Univers homogène et isotrope sous forme de deux équations indépendantes. La première relie le facteur d'échelle spatiale a (la taille de l'Univers en quelque sorte), le taux d'expansion $(1/a) da/dt$, qu'on a appelé par la suite le paramètre de Hubble H , la courbure spatiale k/a^2 et la densité d'énergie ρ (constante dans l'espace, mais non dans le temps, égale à la densité massique fois c^2). La seconde équation relie la pression p et la dérivée temporelle de H , dH/dt . Une équation supplémentaire donne la dépendance de p en fonction de ρ pour différents fluides (matière relativiste ou non relativiste, énergie noire...). Pour un fluide parfait, on a la relation $p = w\rho$, où w est une constante indépendante du temps (par exemple, égale à -1 dans le cas de l'énergie du vide, et à $+1$ dans le cas d'un gaz non relativiste). La variable de temps utilisée est le temps cosmique, ou temps mesuré par nous.

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

et
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

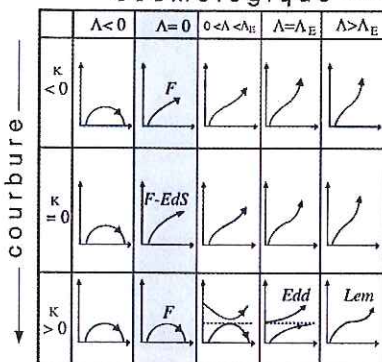
G et c sont respectivement la constante de la gravitation et la vitesse de la lumière. k est une constante égale à -1 pour un espace à courbure ouverte (correspondant à une géométrie hyperbolique), à 0 pour un espace à courbure nulle (ou euclidien) et à $+1$ pour un espace à courbure fermée (correspondant à une géométrie sphérique). Les deux premiers espaces sont infinis et le troisième est fini. Einstein avait ajouté à ses équations la constante Λ appelée « constante cosmologique » s'opposant à l'effet de la gravité (Lemaître avait d'ailleurs anticipé très tôt que ce paramètre pouvait bien être « l'énergie du vide »). Ce système dépend des deux constantes k et Λ . En le résolvant (ce qui n'est possible analytiquement que dans des cas particuliers), on peut trouver la variation de H et de ρ en fonction du temps, pour une valeur donnée de H à l'époque actuelle, H_0 , que l'on appelle la « constante de Hubble ».

Or, Einstein avait donné à Λ une valeur telle

que le deuxième terme de la première équation était nul : il s'ensuivait que le facteur d'échelle restait constant et que l'Univers était statique. Peu de temps après, Willem de Sitter supposa un Univers avec une constante cosmologique, mais vide de matière, qui était également statique.

En résolvant ces équations, on trouve des modèles d'Univers possibles extraordinairement variés ! La figure 1 montre la variation du facteur d'échelle en fonction du temps pour différentes valeurs de la courbure k et de la constante cosmologique Λ . L'univers d'Einstein correspond à la ligne en tirets, et λ est la valeur proposée par Einstein pour la constante cosmologique (pour une explication plus détaillée, voir le livre de Jean-Pierre Luminet *L'Invention du Big Bang*, Annexe 1).

Fig 01 ——— constante cosmologique ———→



On a pris l'habitude d'exprimer les équations de Friedmann en fonction du paramètre Ω qui est la densité en masse-énergie de l'Univers rapportée à la « densité critique ».

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{crit}}, \text{ avec } \rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

On voit alors que la deuxième équation de Friedmann-Lemaître peut s'écrire sous la forme :

$$\Omega - 1 = \frac{k}{H^2 a^2}$$

montrant clairement le rôle de la densité critique. En effet, si Ω est égal à 1 (donc la densité est égale à la densité critique), k est nul et l'Univers est plat, si Ω est plus petit que 1, k est égal à -1 et l'Univers est

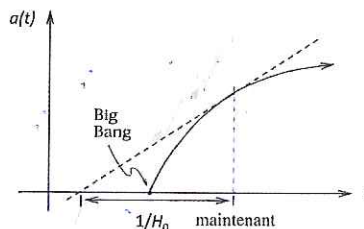


Fig 02

ouvert et infini, et si Ω est supérieur à 1, k est égal à $+1$ et l'Univers est fermé et fini. On conçoit l'intérêt de déterminer la valeur de Ω entre autres à l'époque actuelle, que nous appellerons Ω_0 .

Notons que dans la densité Ω entrent diverses composantes : la densité de la matière, normale ou « noire », mais également l'énergie, celle des photons ou « l'énergie sombre » correspondant à la constante cosmologique Λ .

En définitive, trois constantes (que nous appelons ici toutes les trois « cosmologiques », bien que le nom soit en général réservé à la seule constante Λ) permettent de déterminer la géométrie et la dynamique de l'Univers. Ce sont H_0 , Λ et Ω_0 .

MODÈLE EINSTEIN-DE SITTER

C'est un modèle de Friedmann-Lemaître où Λ et k sont nuls. Il est constitué uniquement de la matière, ayant une densité égale à la densité critique. Il est donc plat et infini dans le temps et dans l'espace, le taux d'expansion décroissant toujours mais ne s'annulant jamais. La relation entre l'âge de l'Univers t_0 et son taux d'expansion H s'écrit :

$$\Omega - 1 = \frac{k}{H^2 a^2}$$

Avec la valeur de H mesurée de l'ordre de 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec, l'âge actuel qu'aurait l'Univers serait de l'ordre de 10 milliards d'années. Il faut une valeur non nulle de Λ pour que l'âge devienne de l'ordre de 14 milliards d'années, compatible avec celui des plus vieilles étoiles.