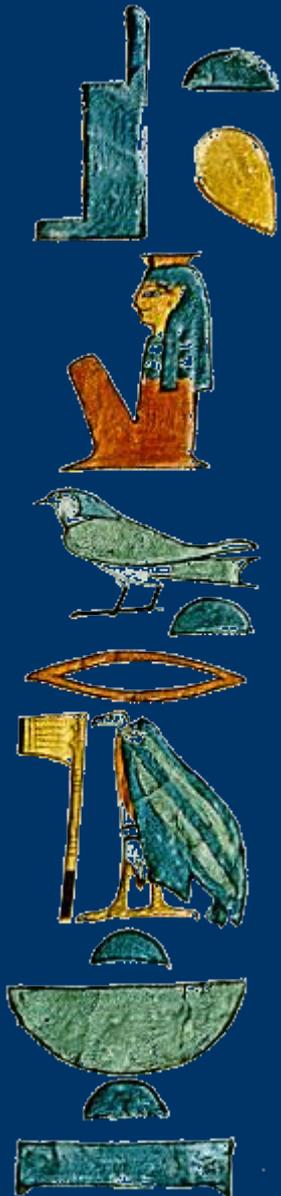


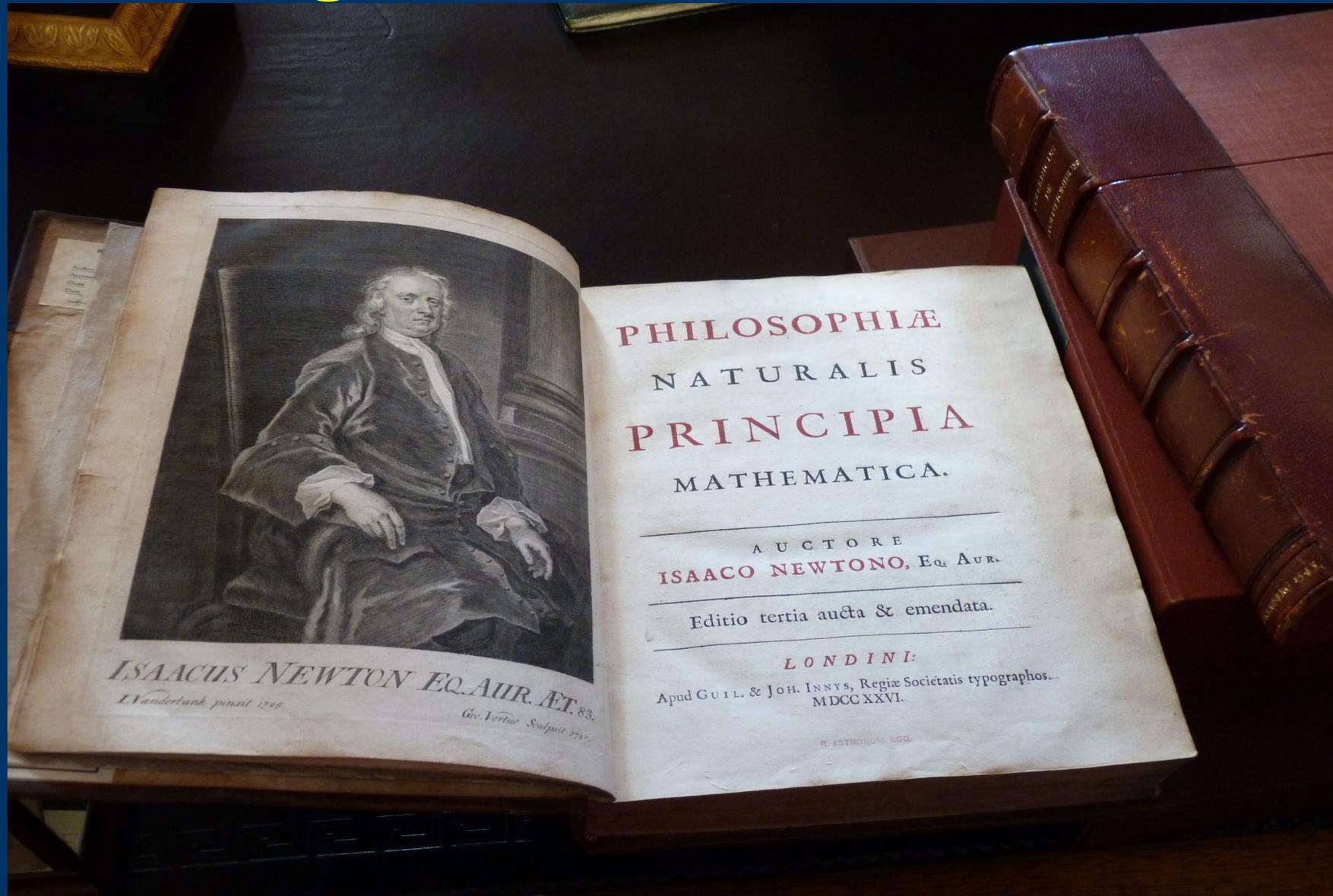
Cosmologie : Brève Introduction



Au début, la cosmologie ressemblait à cela.
La Terre était au centre de l'univers.
Pour le reste, il y avait quelques variantes locales !
Mais faisons un bond dans le temps pour nous
intéresser à la cosmologie moderne.

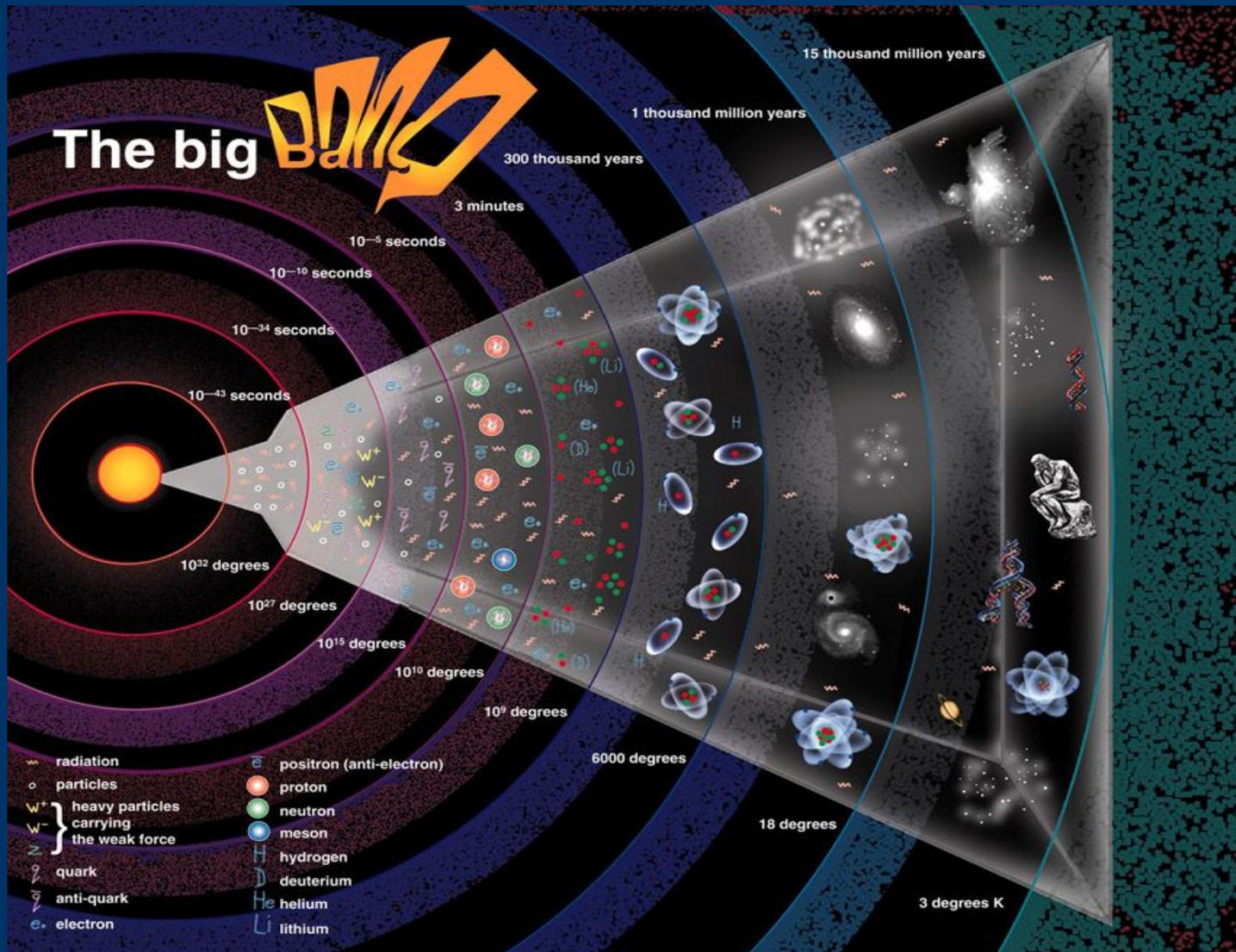
S.A.F : Cours Cosmologie 2014 par Jacques Fric

Cosmologie : Brève Introduction



Il y a eu la période classique de la cosmologie

Cosmologie : Brève Introduction



Aujourd'hui, on décrit la cosmologie plutôt comme cela !

Cosmologie

L'histoire tumultueuse de l'univers

De tout temps, sans doute, l'homme s'est interrogé sur la nature et la création de l'univers. Longtemps considérée comme relevant exclusivement de la théologie, cette discipline « la Cosmogonie » n'a pas échappé pourtant à une confrontation avec de nouvelles idées nées des découvertes scientifiques.

En effet si il y a quelques centaines d'années l'univers se limitait au système solaire, la découverte que la Terre n'était pas au centre du système solaire a été un pas important dans le développement de la Cosmologie. Au début du 20 ième siècle Shapley montra que le système solaire est loin du centre de la voie lactée.

Ainsi vers 1920 le décor était établi et prêt à recevoir les découvertes cruciales qui ont conduit au modèle du Big Bang de l'Univers. C'est dans ce contexte que la théorie de la relativité générale d'Einstein, proposant une description radicalement différente de l'espace et du temps effaçant la distinction entre contenant et contenu, va permettre la naissance de la cosmologie scientifique !

Tout paraît paisible et serein pourtant...



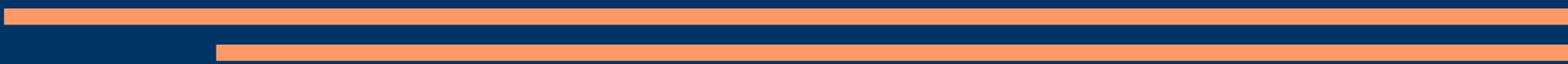
Comme le montre le VLT de l'ESO au Chili,



le télescope spatial Hubble ,



Et bien autres ..., l'univers est à son échelle de temps le théâtre de phénomènes d'une violence dévastatrice infernale et corrélativement d'une puissance créatrice inouïe tout aussi considérable ...



Une galaxie (M51), parmi les milliards connues de l'univers



HST: Galaxie du Sombrero M 104 (28Mai)



The Sombrero Galaxy — M104  HUBBLESITE.org

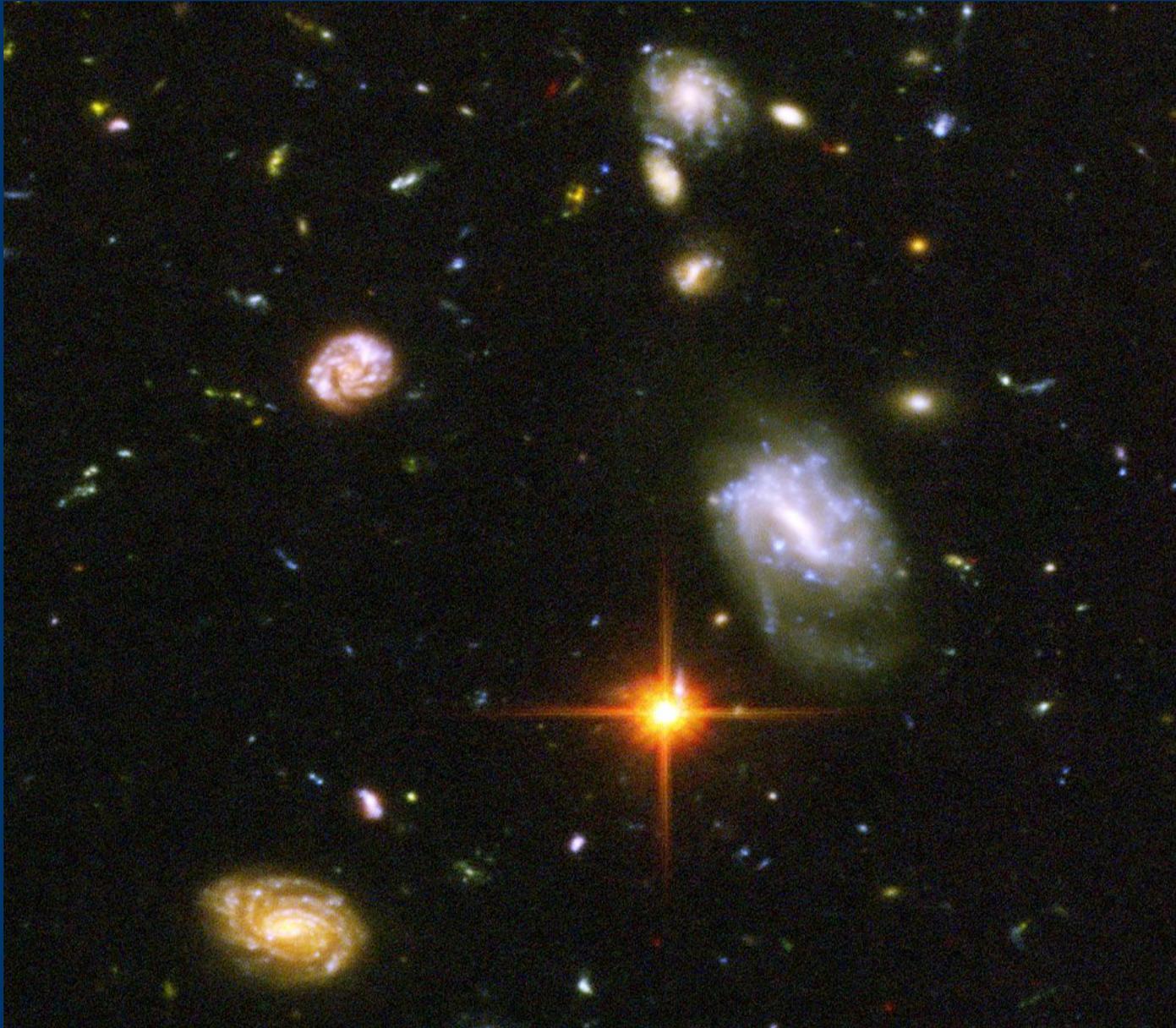
Un choc de Titans : Galaxies en interaction (Paire ARP 87)



Champ profond: Hubble Space Telescope



Champ profond: Zoom image précédente



Les bases d'une cosmologie scientifique

Fondée sur la relativité générale d'Einstein qui stipule que l'espace temps est une structure dynamique récusant l'indépendance entre contenant et contenu, la cosmologie moderne propose une représentation physique de la chrono-géométrie.

Pas de cadre imposé comme en mécanique Newtonienne : L'univers n'est plus une entité en soi qui serait le contenant immuable de toute chose, ses propriétés physiques dépendent de ses constituants.

Comme ses constituants sont des objets physiques (amas, galaxies, étoiles, nuages de gaz etc..) étudier ces objets c'est étudier également l'univers qui devient alors accessible aux investigations physiques, donc devient une science.

La cosmologie scientifique était née.

Genèse de la Cosmologie contemporaine



Après avoir établi l'équation de la Relativité générale, Einstein tente de l'appliquer à la Cosmologie, dans le contexte de l'époque (en 1916 l'univers connu est constitué des étoiles fixes, des nébuleuses, amas,...), avec comme hypothèses:

- Univers homogène et isotrope (hypothèse copernicienne, à priori quasi obligée), rempli d'un fluide parfait de densité ρ , de pression p .

- Il est clos (satisfaction du principe de Mach)

- Il est statique (arbitraire, pour se conformer à ce qui est observé). Pas de solution statique.

En 1917, il va ajouter une constante à son équation: La constante Cosmologique Λ .

Genèse de la Cosmologie contemporaine :

Rôle de la constante cosmologique

- A la différence de l'électromagnétisme où on distingue des charges électriques positives et négatives et des pôles nord et sud pour les aimants qui génèrent des forces d'attraction et de répulsion selon qu'on considère des charges ou pôles de type différent ou de même type (chacun a pu faire l'expérience avec des aimants par exemple), la gravitation est toujours attractive.

Deux masses (non chargées) s'attirent toujours.

Dans ces conditions comment un ensemble de masses dans les conditions définies par Einstein peut il être en équilibre ?

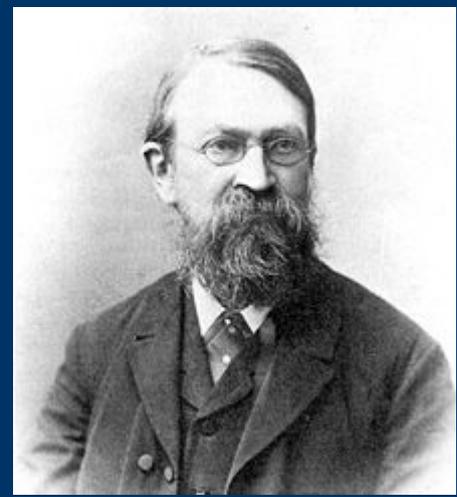
Genèse de la Cosmologie contemporaine :

Rôle de la constante cosmologique

L'attraction mutuelle devrait provoquer son effondrement, sauf si pour compenser cette attraction mutuelle des masses on introduit introduire quelque chose qui génère une répulsion qu'on ajustera pour compenser exactement l'attraction entre les masses.

C'est ce que fait précisément cette « constante cosmologique » introduite par Einstein, appelée ainsi car elle se présente sous forme de constante dans ses équations !

Genèse de la Cosmologie contemporaine



Einstein est très influencé par le principe de Mach (1883) qui stipule que l'inertie de la matière naît de l'interaction entre les corps "massifs".

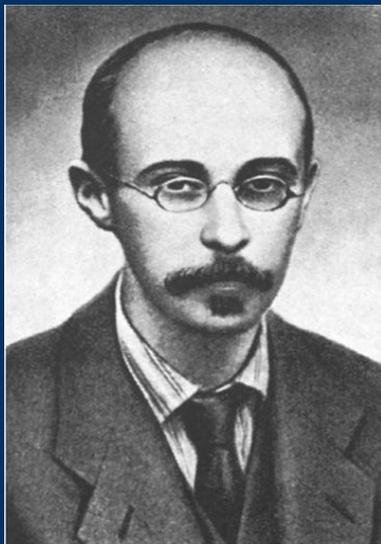
La fermeture de l'Univers (dans le contexte statique) est lié au problème à l'infini, où à la limite de Minkowski, l'inertie s'annulerait. La métrique de Schwarzschild posait déjà ce problème.

Aujourd'hui, on considère l'introduction d'une constante Cosmologique parfaitement fondée, comme une généralisation constructive de l'équation d'Einstein (le cas $\Lambda=0$ n'étant qu'un cas particulier qui conduit à une limite de Minkowski en cas de d'Univers vide).

Notons qu'Einstein a renié par la suite ce principe de Mach (comme il a renié Λ) et que cette constante a connu un destin chaotique.....

Genèse de la Cosmologie contemporaine

Sa publication "Kosmologische Betrachtungen" en février 1917 marque le début de la cosmologie contemporaine. Il y tente de justifier épistémologiquement (à posteriori) cette constante par le principe de Mach qu'il sépare en deux parties : Le principe de relativité générale et la définition totale de la géométrie de l'Univers par son contenu.



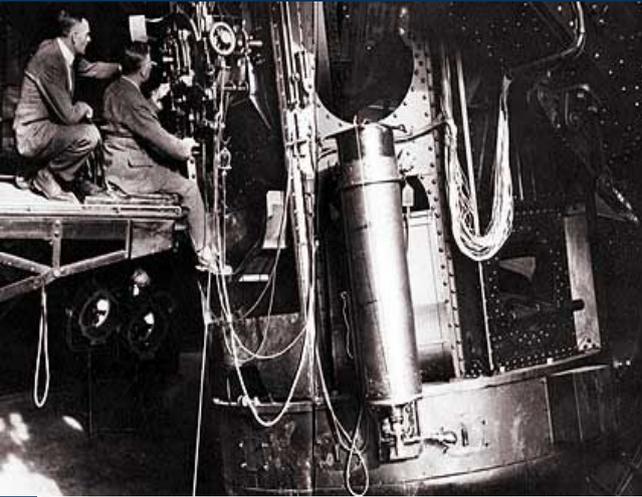
A. Einstein

Le côté "ad hoc" de cette constante donne lieu à de nombreuses polémiques.

En 1922 Friedmann (alors que la vision de l'Univers n'avait pas changé) propose à Einstein sa solution sans cette constante Λ qu'il juge arbitraire, c'est un Univers dynamique. Mais Einstein mettra 10 ans à admettre cette hypothèse

Genèse de la Cosmologie

Existence de Galaxies



Les observations faites avec le télescope du Mont Wilson (2,5m) par **Hubble** en 1923-1924 permettent d'établir que les « nébuleuses » observées précédemment avec des télescopes moins puissants ne font pas partie de notre Galaxie, mais constituent d'autres galaxies éloignées. Il annonce sa découverte le 30 décembre 1924. La première nébuleuse identifiée comme une galaxie n'est pas M31 (la Galaxie d'Andromède), mais la petite galaxie NGC 6822 située dans la constellation du Sagittaire (1925). Suivront ensuite M33 (la Galaxie du Triangle) en 1926 et M31 en 1929.

Notre voisine M81 à 2,7 millions d'a.l



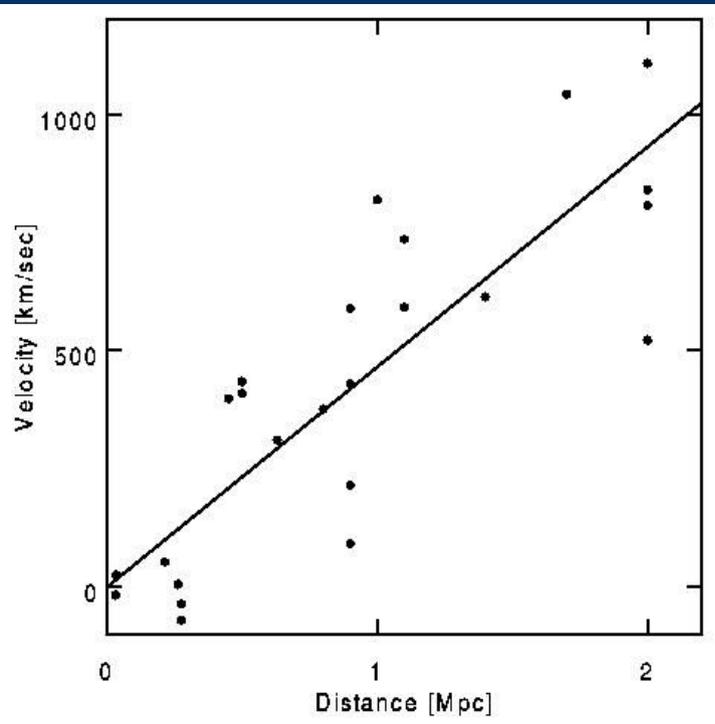
Genèse cosmologie contemporaine:

Redshift

Les travaux sur la spectroscopie astronomique étaient menés avant 1918 par James Edward Keeler (observatoire Lick), Vesto Melvin Slipher (observatoire de Lowell) et William Wallace Campbell (observatoire de Lick). Combinant leurs propres mesures de distance des galaxies avec les mesures de Vesto Slipher relatives à leur décalage vers le rouge, Hubble en collaboration avec Milton Humason établit en 1929, grâce à la spectroscopie, la relation entre la distance des galaxies et leur vitesse d'éloignement¹. Cette relation est connue sous le nom de *loi de Hubble*, à l'origine du concept d'expansion de l'univers.

Cette découverte basée sur l'observation et la mesure permet de soutenir la thèse de la théorie du Big Bang proposée par Alexandre Friedmann en 1922.

Redshift (décalage vers le rouge)



En 1929 Hubble déclara donc que les vitesses radiales des galaxies étaient proportionnelles à leur distance. Le décalage spectral (vers le rouge) est une mesure de sa vitesse radiale de fuite et peut être mesuré à l'aide d'un spectromètre pour calculer le décalage Doppler. L'abaque ci contre reprend les données de Hubble en 1929 : La pente de la ligne interpolée qui est de 464 km/sec/Mpc , est appelée constante de Hubble constant, H_0 .

Comme les kilomètres et les Mégaparsecs ($1 \text{ Mpc} = 3,086 \cdot 10^{24} \text{ cm}$) sont des unités de distance, les unités simplifiées de H_0 sont $1/\text{temps}$, et la conversion est donnée par: $1/H_0 = (978 \text{ Giga-années})/(H_0 \text{ en km/sec/Mpc})$

L'apport essentiel de Lemaître

Mais les calculs de l'âge de l'univers avec la valeur (fautive d'un facteur 7 comme les observations postérieures le montreront, car Hubble ne savait pas qu'il y avait plusieurs types de céphéïdes) de la constante de Hubble ainsi mesurée lui donnait un âge de 2 milliards d'années ! Bien trop faible puisque à l'époque on supposait que l'âge de la Terre était bien supérieur (> 4 milliards d'années).



Lemaître, synthétise magistralement ses travaux antérieurs sur la cosmologie dans un article « l'univers en expansion » et ré-introduit, à cette occasion, la constante cosmologique Λ permettant d'enrichir les solutions en particulier d'allonger l'âge de l'Univers.

Genèse de la Cosmologie contemporaine

PUBLICATIONS

DU LABORATOIRE

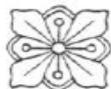
D'ASTRONOMIE ET DE GÉODÉSIE

DE L'UNIVERSITÉ DE LOUVAIN

SECRÉTAIRE : **M. G. LEMAITRE**
PROFESSEUR A LA FACULTÉ DES SCIENCES

Vol. IX (N° 85 et 86)

1932



LOUVAIN

1933

N° 86

L'Univers en expansion

par M. l'Abbé Lemaître ⁽¹⁾

INTRODUCTION ET RÉSUMÉ

Nous ne nous proposons pas dans ce travail de discuter les hypothèses sur lesquelles se fonde la théorie de l'expansion de l'Univers, ni la valeur des confirmations astronomiques qui l'étayent. Une telle discussion nous paraît actuellement prématurée et ne pourrait certes pas arriver à des conclusions définitives dans l'état actuel de la théorie et des observations.

La théorie peut être développée de deux façons : par l'étude de solutions exactes des équations de la gravitation, fournissant des modèles simplifiés, ou par le développement approché de la solution de problèmes plus complexes. Il nous paraît utile de ne pas mélanger ces deux méthodes, et dans ce travail nous ne nous occuperons que de solutions mathématiquement exactes. Lorsque nous voudrons les appliquer aux problèmes réels, nous aurons à faire appel à l'intuition physique pour réduire un problème trop complexe à un modèle simplifié, dont nous avons la solution. Plusieurs de nos résultats semblent pouvoir servir de points de départ à des méthodes de développement en série que nous espérons traiter dans un travail ultérieur.

Dans les deux premiers paragraphes, nous donnons en détail les calculs de tenseurs, dont nous aurons besoin, et que nous résumons au § 3, en introduisant des notations qui mettent en évidence l'analogie des résultats relativistes avec les formules classiques.

Nous introduisons ensuite la notion de champ quasi-statique qui permet de généraliser immédiatement des solutions statiques connues en y permettant des variations adiabatiques. Nous donnons une solution probablement nouvelle pour le cas d'une sphère à pression radiale constante, et nous en servons pour mettre en évidence le paradoxe de Schwarzschild et montrer que la limitation plus sévère du rayon d'une masse donnée introduite par la solution du problème intérieur s'évanouit lorsqu'on

⁽¹⁾ ANNALES DE LA SOCIÉTÉ SCIENTIFIQUE DE BRUXELLES, t. LIII (1933), Série A, *Sciences mathématiques*, p. 51.



Cosmologie contemporaine

Lemaître et Eddington

En 1927, il avait déjà publié le fruit de ses calculs et réflexions dans un article des "Annales de la société scientifique de Bruxelles", publication qui n'a pratiquement aucun écho. Il fait part de ses calculs à Einstein qu'il rencontre à Bruxelles la même année mais celui ci lui objecte que si ses calculs sont justes par contre son approche physique du problème cosmologique est abominable (sic)!

En 1929 suite aux observations de Edwin Hubble qui confirment le décalage systématique vers rouge des galaxies, en Angleterre la "Royal Society" s'émeut de la contradiction apparente entre les observations et ce que prédit la relativité générale dans le modèle d'Einstein, en oubliant au passage la contribution de Friedmann qui prévoyait un univers dynamique et ce dès 1922 et qu'Einstein qui en avait eu connaissance avait traité avec une certaine désinvolture.

Sir Athur Eddington se porte volontaire pour mener à bien cette redoutable mission.

Cosmologie contemporaine

Prenant connaissance de cela, Lemaître envoie une copie de son article de 1927 à Eddington qui se rend compte que Lemaître propose une solution. Eddington fait traduire en anglais l'article de Lemaître et le fait publier dans les "Monthly Notices" de mars 1931.

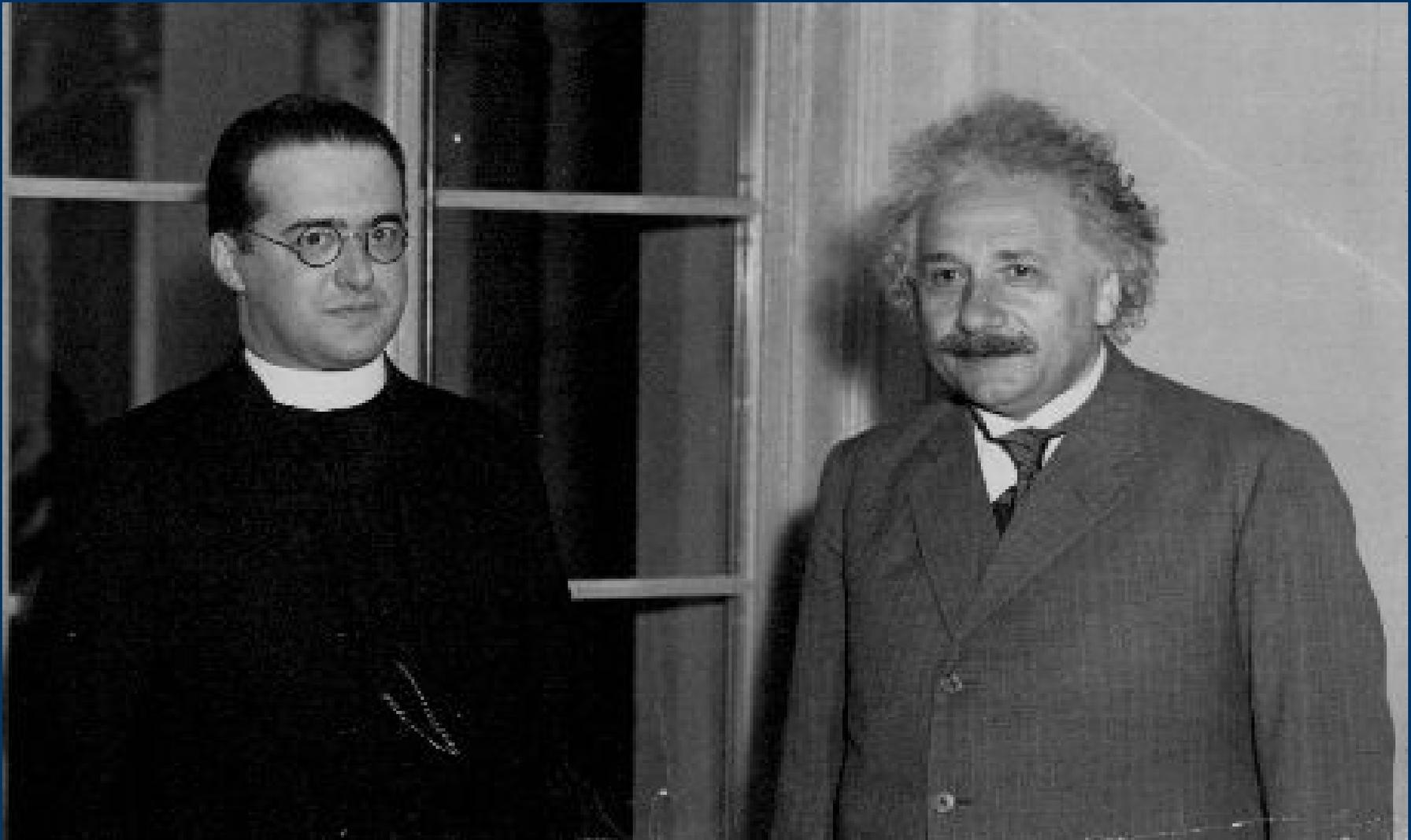
Si la communauté scientifique accepte bien l'idée que l'univers est aujourd'hui en expansion, l'idée qu'il a eu un commencement les révoluse, à commencer par Eddington qui trouve l'idée "répugnante".

Mais Lemaître qui ne se laisse pas décourager si facilement, il sait être au bon endroit au bon moment, son éducation de jésuite lui a appris que le plus court chemin n'est pas la ligne droite, continue de tisser patiemment sa toile et en janvier 1933 il obtient enfin une reconnaissance d'Einstein au cours de séminaires en Californie puisque à la fin de la présentation de Lemaître, Einstein se lève en applaudissant et déclare:

" C'est l'explication la plus belle et satisfaisante de la création que j'ai entendue".

Genèse de la Cosmologie contemporaine

Lemaître et Einstein



Problème de l'âge de l'univers.

Les théories d'expansion de l'univers n'étaient pourtant pas sans poser des problèmes. Avec les valeurs (fausses) mesurées à l'époque, en particulier la valeur très largement surestimée (environ 7 fois) de la constante de Hubble, l'âge de l'univers prédit était bien trop petit, puisqu'on connaissait des objets de l'univers (comme la Terre par exemple) qui avait un âge largement supérieur. Lemaître utilise alors la constante cosmologique pour rallonger cet âge, ce que les équations lui permettent de faire.

Ceci met Einstein dans une situation plutôt délicate puisque après dix ans de défense opiniâtre de son modèle statique, modèle qui avait nécessité l'introduction de cette constante cosmologique, il s'était résolu l'abjurer suite à des critiques diverses, en particulier la démonstration de l'instabilité d'un tel univers. Il venait juste de déclarer: " La constante cosmologique a été la plus grande erreur de ma carrière". La remise au goût du jour de cette constante cosmologique par Lemaître pour trouver des solutions cosmologiques compatibles avec nos données expérimentales faisait figure de désaveu de la déclaration fracassante d'Einstein.

Le « Big Bang » contesté !

A la mort de Arthur Eddington en 1944, la critique de la théorie de Lemaître, qualifiée ironiquement de "Big Bang" par Fred Hoyle, le chef de file du foyer de résistance situé à Cambridge, aboutit à la théorie de l'état stationnaire: L'univers a toujours existé et il est toujours "statistiquement" le même. Cette théorie résout, en l'éluant, le problème de l'origine de l'univers mais au prix d'autres problèmes pas moins critiques qui cependant choquaient moins les esprits:

La création de matière n'a pas lieu qu'une fois au moment du "Big Bang" mais se fait éternellement de façon continue dans l'espace et le temps!

La théorie de l'univers stationnaire : Le principe cosmologique parfait !



La **théorie de l'état stationnaire** est un modèle proposé à la fin des années 1940 par Fred Hoyle, Thomas Gold et Hermann Bondi, supposant que l'univers est éternel et immuable. L'origine de cette idée était double : d'une part étendre le concept du principe cosmologique dans le temps, d'autre part, réconcilier des tensions qui existaient à l'époque entre l'âge de l'univers déduit de la valeur de la constante de Hubble et l'âge des plus vieilles étoiles. La théorie de l'état stationnaire stipulait que l'univers était en expansion, mais que la dilution causée par celle-ci était compensée par un phénomène de création de matière par l'intermédiaire d'un champ appelé champ C. Ainsi, l'univers serait dans cette hypothèse éternel et stationnaire.



Où les pigeons ont failli sauver le modèle stationnaire !

En 1964, les radio-astronomes Penzias et Wilson disposent d'une antenne qui servait initialement à la communication avec les satellites Echo puis Telstar 1. Ils souhaitaient transformer cette antenne en radio-télescope pour mesurer le rayonnement dans le domaine radio de la Voie lactée. Ils avaient besoin d'étalonner correctement l'antenne, et en particulier de connaître le bruit de fond généré par celle-ci ainsi que par l'atmosphère terrestre. Ils découvrent ainsi accidentellement un bruit supplémentaire d'origine inconnue au cours d'observations faites sur la longueur d'onde 7,35 cm. D'abord attribué aux déjections de pigeons, ce bruit, converti en température d'antenne, correspondait à une température du ciel de 2,7 K, ne présentait pas de variations saisonnières, et ses éventuelles fluctuations en fonction de la direction ne dépassaient pas 10 %.



Où les pigeons ont failli sauver le modèle stationnaire !

Il ne pouvait donc s'agir du signal émis par la Voie lactée qu'ils cherchaient à découvrir. Penzias et Wilson ne connaissaient pas les travaux des cosmologistes de leur époque, et c'est presque par hasard qu'ils les découvrent. Penzias mentionne fortuitement sa découverte au radio-astronome Bernie Burke, qui lui dit savoir de Ken Turner que James Peebles a prédit l'existence d'un rayonnement de quelques kelvins, et qu'une équipe composée de Dicke, Roll et Wilkinson de l'université de Princeton est en train de construire une antenne pour le détecter. Penzias prend alors contact avec Dicke pour lui faire part de ses résultats. Ils décident alors de publier conjointement deux articles, l'un signé de Penzias et Wilson décrivant la découverte du fond diffus cosmologique, l'autre signé par Peebles et l'équipe de Dicke en décrivant les conséquences cosmologiques

Le modèle stationnaire et les observations

La théorie de l'état stationnaire prédit l'absence de phase dense et chaude dans l'univers primordial, en opposition au modèle du Big Bang.

La découverte du fond diffus cosmologique et en particulier de sa forme de corps noir, conséquence naturelle du Big Bang, a signé la fin de la théorie de l'état stationnaire comme modèle pertinent pouvant décrire l'univers observable.

De très nombreux autres effets ont également contredit la théorie de l'état stationnaire:

-La mesure explicite de la température du fond diffus cosmologique à des époques plus reculées, en effet dans la théorie de l'état stationnaire, même s'il existe un rayonnement possédant les mêmes propriétés que le fond diffus cosmologique, celui-ci doit avoir la même température à toutes les époques.

Le modèle stationnaire et les observations

- L'évolution de la répartition spatiale, de la morphologie des galaxies et du taux de formation d'étoiles au sein des galaxies doivent être absents dans la théorie de l'état stationnaire.
- La théorie de l'état stationnaire échoue également à rendre compte de l'abondance des différents atomes dans l'univers, en particulier de l'abondance d'hélium.
- La découverte de l'accélération de l'expansion de l'univers a incité les derniers tenants de l'hypothèse de l'état stationnaire, comme Jayant Narlikar, à proposer un modèle légèrement différent : la théorie de l'état quasi-stationnaire.

Ce modèle échoue à décrire l'ensemble des observations cosmologiques, en particulier la structure des anisotropies du fond diffus cosmologique, et ne fait pas partie des modèles cosmologiques privilégiés par la grande majorité des cosmologistes.

Théorie du Big Bang : Le retour !

Le modèle du Big Bang a été confronté aux observations faites avec des instruments de plus en plus performants terrestres et embarqués sur satellites, dans différents domaines de longueur d'ondes du domaine radio jusqu'au rayons gamma en passant par l'infra-rouge, le visible, l'ultra violet, les rayons X qui ont révélé (en particulier COBE puis WMAP et maintenant Planck) que dans le passé l'univers avait été très homogène et de "densité " très voisine de la densité "critique".

Ceci a amené à introduire une phase d'inflation et comme les observations de matière "baryonique" ne correspondaient qu'à 4% de cette densité critique, il a fallu considérer une mystérieuse matière noire.

Les observations à partir de 1995) de super-novae ayant révélé que l'expansion "s'accélérait", il a fallu y rajouter une encore plus mystérieuse énergie "noire".
