

Cours de cosmologie: Première partie

Adapté librement par Jacques Fric du cours de Cosmologie du Pr Edward Wright (avec son aimable autorisation) Printemps 2009

Observations et propriétés globales.

Il y a quelques centaines d'années l'univers se limitait au système solaire et 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.

Introduction : Naissance 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), avec comme hypothèses:

- Univers homogène et isotrope (hypothèse 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 fameuse constante Cosmologique Λ^{**} .

* 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)

Introduction : Naissance de la

Sa publication "Kosmologische Betrachtungen" en février 1917 marque le début de 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 l'Univers par son contenu.

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.

Einstein mettra plus de 10 ans à l'admettre, puis Lemaître (1932) pour allonger l'âge de l'Univers réintroduit Λ , permettant d'enrichir les solutions.

Indépendamment de la validité des hypothèses, tous les ingrédients de la Cosmologie Contemporaine étaient déjà là...

Introduction : Naissance de la Cosmologie moderne

La Cosmologie moderne procède d'une matérialisation de la chronogéométrie et non pas de l'inverse

Cosmologie contemporaine

Pas de cadre imposé comme en mécanique Newtonienne.

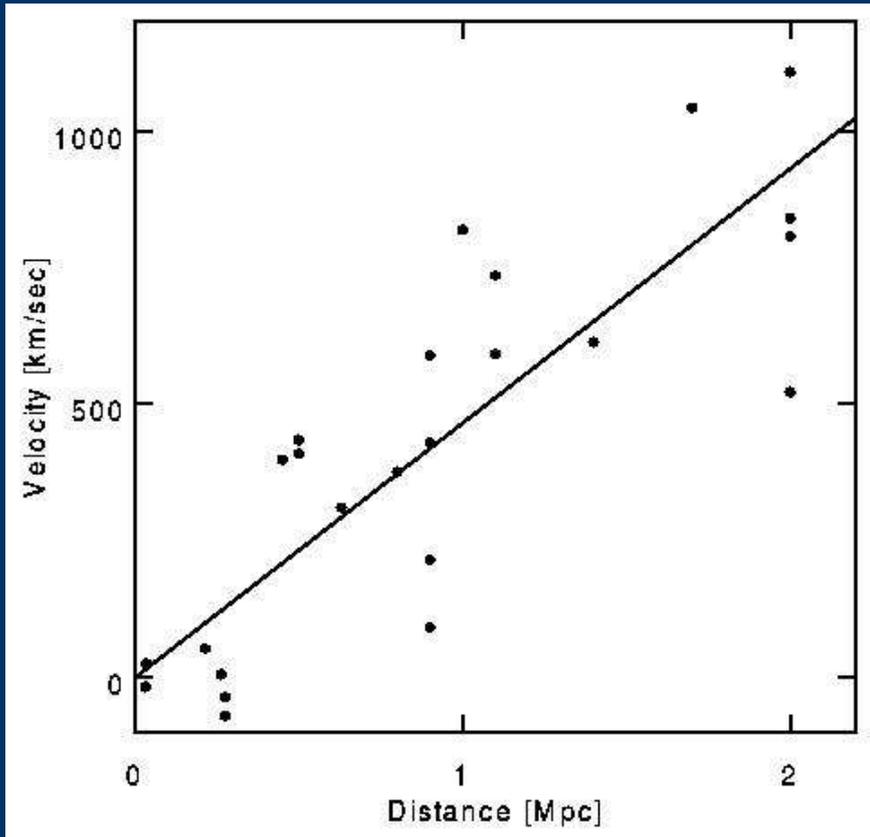
L'univers n'est plus une entité à part entière qui serait le contenant de toute chose.

Ses propriétés dépendent uniquement de ses constituants.

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

La cosmologie scientifique était née.

Observations critiques



En 1929 Hubble déclara 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: $1/H_0 = (978 \text{ Giga-années})/(H_0 \text{ en km/sec/Mpc})$

Observations critiques

Donc l'inverse de la valeur de la constante de Hubble est environ de 2 Ga . Ceci est censé être l'âge de l'Univers et nous savons (et cela était connu en 1929) que l'âge de la terre est supérieur à 2 milliards d'années.

Cette valeur de H_0 , pour ce modèle cosmologique, fut accueillie avec le plus grand scepticisme et motiva le développement du modèle d'état stationnaire

Cependant des travaux ultérieurs montrèrent que Hubble avait confondu deux types de Céphéides (étoiles variables) utilisées pour étalonner les distances et aussi que ce que Hubble croyait avoir identifié à des étoiles brillantes dans des galaxies lointaines étaient en fait des régions $H II$.

Ces corrections conduisirent à diminuer la valeur de la constante de Hubble : Il y a actuellement principalement deux groupes qui utilisent les Céphéides:

Observations critiques

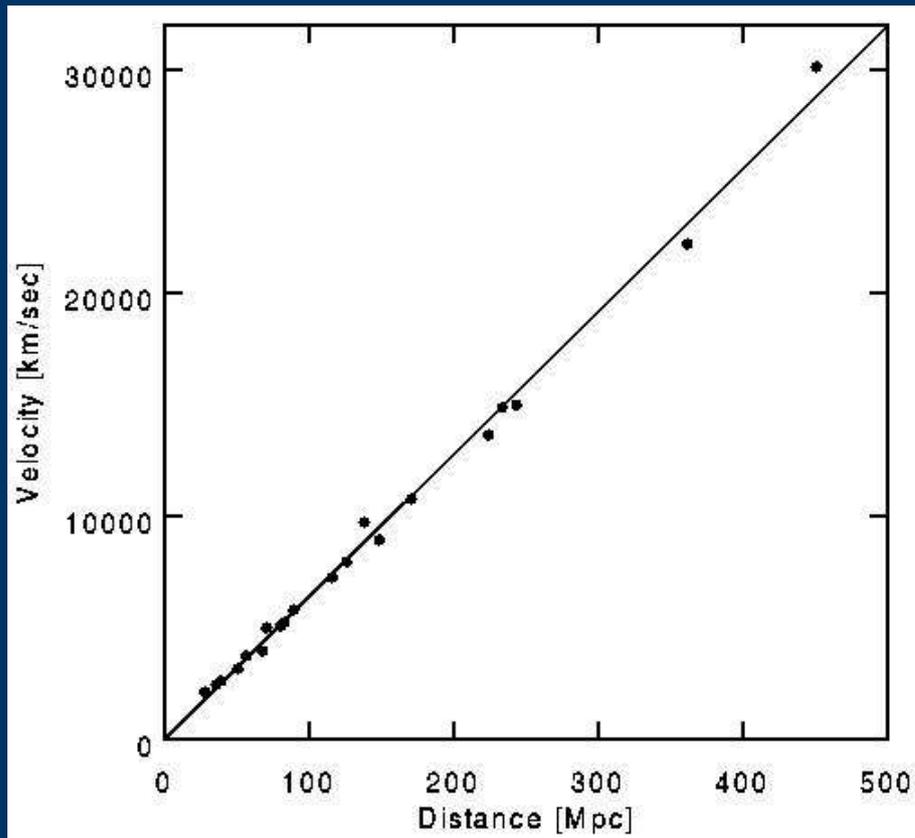
L'équipe ([HST Distance Scale Key Project](#)) (Freedman, Kennicutt, Mould et al) a obtenu 72 km/sec/Mpc , tandis que le groupe Sandage, utilisant aussi les observations du HST des Céphéides pour étalonner les supernovae de Type Ia, a obtenu $57 \pm 4 \text{ km/sec/Mpc}$.

D'autres méthodes pour déterminer l'échelle des distances s'appuient sur le retard temporel des lentilles gravitationnelles et l'effet Sunyaev-Zeldovich dans les amas distants : ces méthodes sont indépendantes de l'étalonnage par les Céphéides et donnent des valeurs cohérentes avec les moyennes de celles obtenues par les deux autres groupes utilisant le HST: $65 \pm 8 \text{ km/sec/Mpc}$.

Ces résultats sont cohérents avec la combinaison de ceux résultants de l'anisotropie du RFC et de l'expansion accélérée qui donne $71 \pm 3,5 \text{ km/sec/Mpc}$. De cette valeur de H_0 on déduit un âge $1/H_0$ de 14 Ga , alors que l'âge effectif déduit du modèle donne $13,7 \pm 0,2 \text{ Ga}$.

[WMAP (2008) donne: $H_0 = 70,1 \text{ km/s par Mpc} \pm 1,3$, âge de l'Univers $13,73 \cdot 10^9 \text{ années} \pm 0,12$]

Observations critiques



Les données de Hubble en 1929 étaient en fait imprécises, du fait que les galaxies ont aussi des vitesses propres "erratiques" de plusieurs centaines de km/s alors que ses données n'allaient pas au delà de *1200 km/sec*. Ceci a conduit certains à proposer une loi de type quadratique de décalage vers le rouge mais les données représentées ci contre sur les supernovae de Type Ia par Riess, Press and Kirshner (1996) portant au delà de *30000 km/sec* nous offrent une confirmation spectaculaire de la loi de Hubble. $v = dD/dt = H * D$. La ligne interpolée dans ce graphique correspond à *64 km/sec/Mpc*.

Observations critiques

Comme nous mesurons la vitesse radiale en utilisant l'effet Doppler cela est souvent appelé le décalage spectral (vers le rouge) *redshift*.

Ce décalage spectral z est défini tel que :

$$1 + z = \lambda(\text{observé})/\lambda(\text{émis})$$

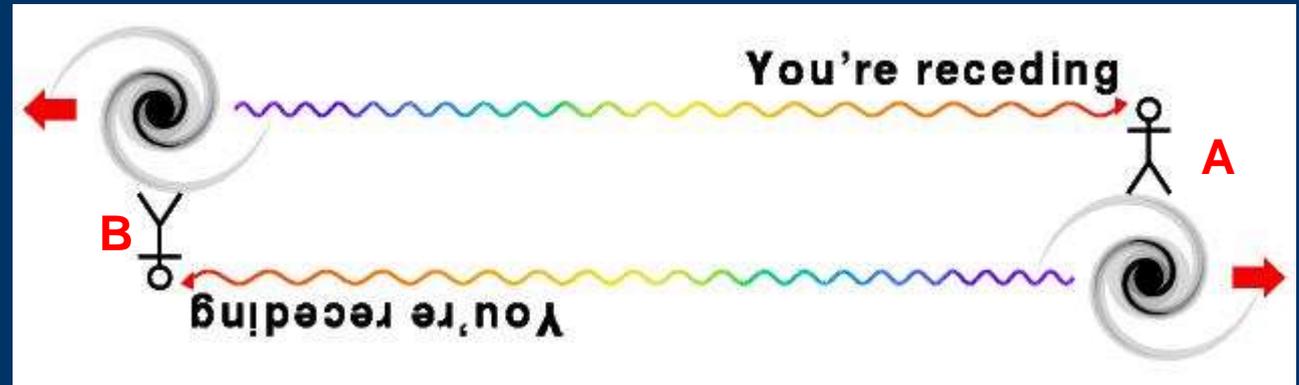
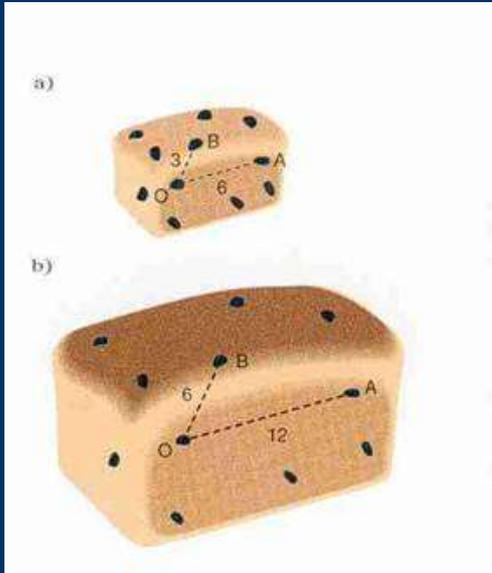
où λ est la longueur d'onde caractéristique d'une raie ou d'un motif dans le spectre d'un objet. La relativité restreinte nous dit que z est donné par:

$$1 + z = [((1+v/c)/(1-v/c))]^{1/2} \text{ alors } v = cz + \dots$$

Mais les corrections d'ordre supérieur (les) dépendent de la relativité générale et du modèle particulier d'univers.

L'indice "0" dans H_0 indique la valeur actuelle de cette variable dépendant du temps. Comme $1/H_0$ est approximativement l'âge de l'Univers , la valeur de H dépend du temps. Une autre variable d'indice 0 est t_0 , l'âge de l'Univers.

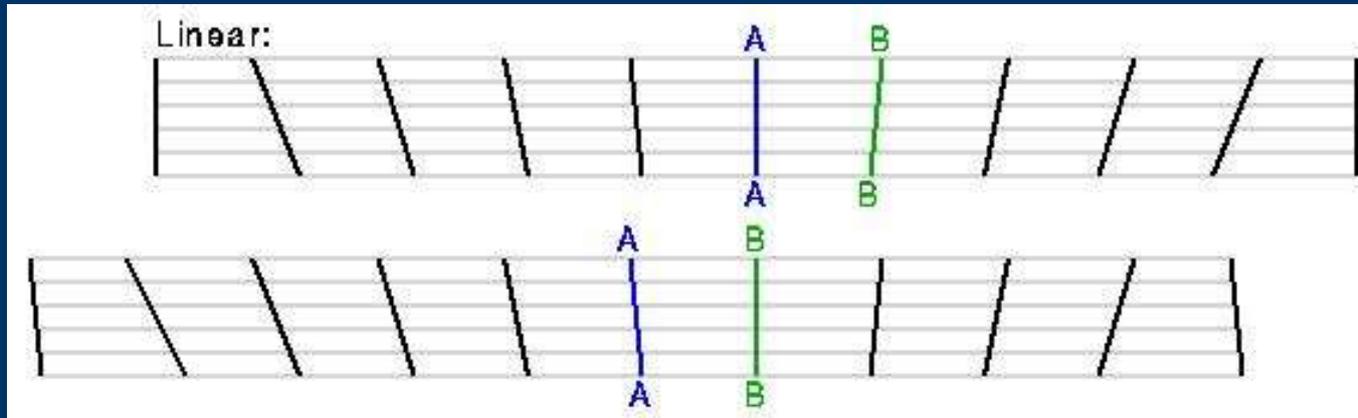
Observations critiques



La relation linéaire entre z et la distance est compatible avec le principe Copernicien : nous ne sommes pas dans une position privilégiée dans l'Univers. Tous les points s'éloignent les uns des autres comme le montre l'image du pudding (à gauche).

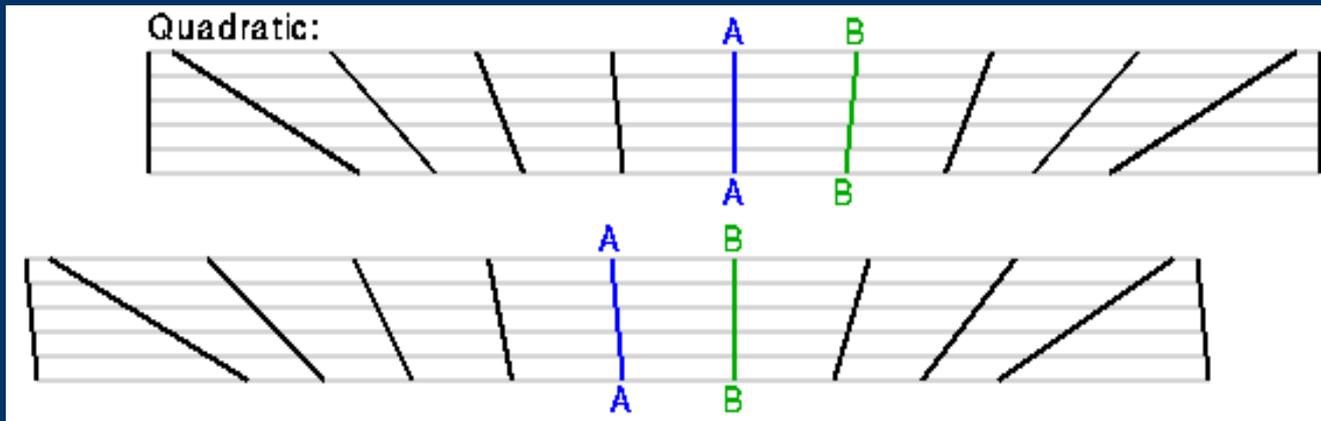
La vitesse de récession est symétrique: Si A voit B s'éloigner (observe un rayonnement bleu émis par B décalé vers le rouge), alors B voit A s'éloigner (observe un rayonnement bleu émis par A également décalé vers le rouge), comme montré dans ce diagramme ci dessous, basé sur un croquis de Bob Kirshner à droite

Observations critiques



Considérons maintenant le diagramme d'espace temps montrant plusieurs galaxies voisines s'éloignant de nous de notre point de vue, (nous supposons que nous sommes dans la galaxie A, représentée par la ligne d'univers bleue) en haut et du point de vue de la Galaxie B (la ligne d'Univers verte) en bas. Ces diagrammes montrant différents points de vue sont identiques à l'exception du nom des Galaxies.

Observations critiques

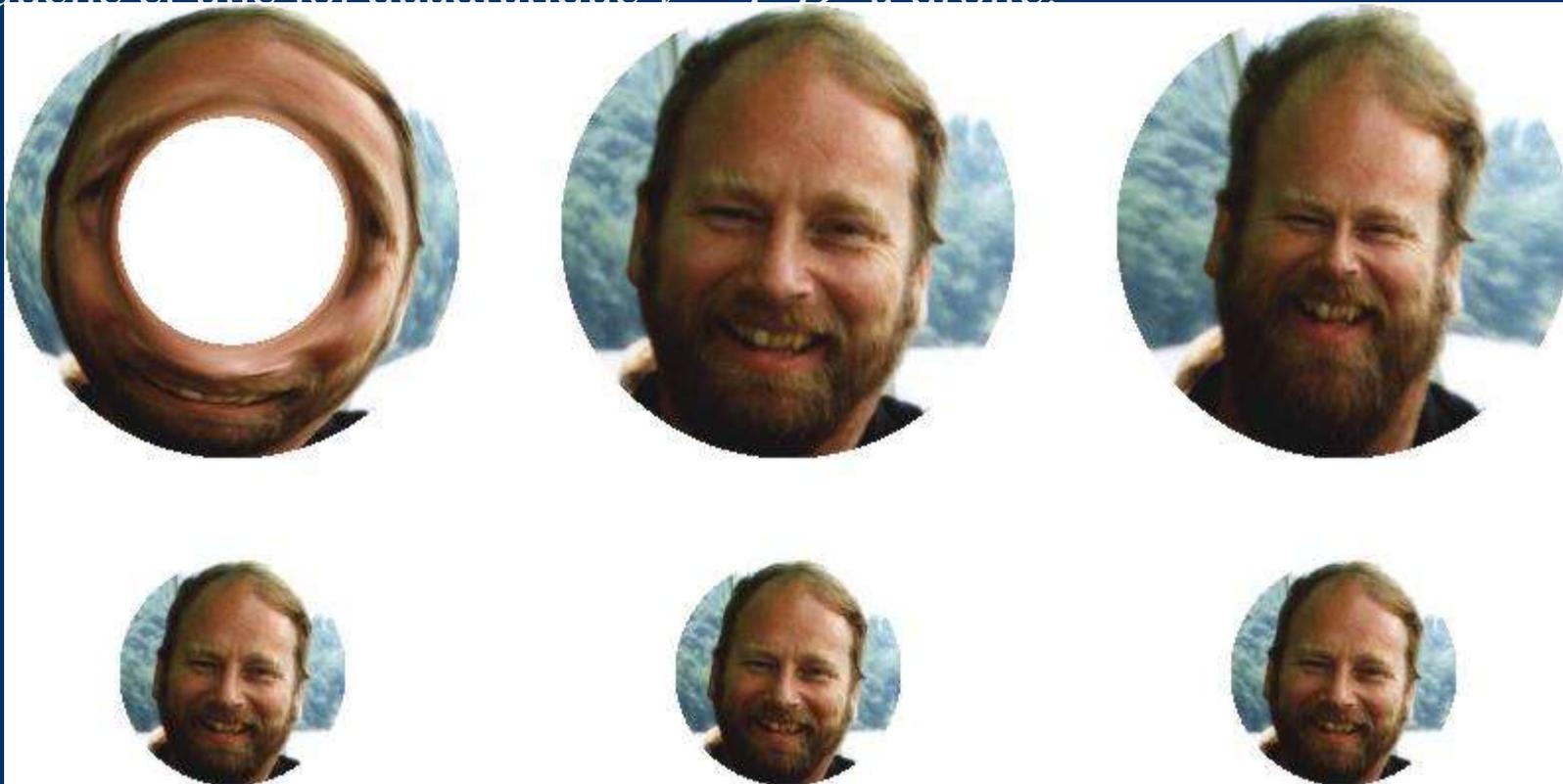


Une loi quadratique $v(sq) = D^2$ par contre se transforme en une loi non quadratique anisotropique quand on change de point de vue comme montré ci dessus. Donc si nous supposons une loi quadratique vitesse/distance [par rapport à nous], un observateur dans une autre Galaxie va constater une loi différente qui va être différente dans les différentes directions [non isotrope]. Donc si nous voyons une loi quadratique, alors B verra des vitesses radiales plus élevées dans une direction que dans l'autre [+ élevé vers la droite sur la figure ci dessus]. Ceci conduit à un point privilégié dans l'Univers, un "centre", seul point d'où on voit une loi de récession isotrope dans toutes les directions. Comme nous constatons une loi de Hubble isotrope soit nous sommes au centre de l'Univers, ce qui est anti- Copernicien soit la loi est linéaire, seule possibilité pour être compatible avec l'homogénéité et l'isotropie de l'Univers.

Observations critiques

La loi de Hubble génère une expansion homologue qui ne change pas la forme des objets alors que les autres lois possibles liant vitesse et distance conduisent à des distorsions pendant l'expansion.

La figure ci dessous montre le résultat de l'expansion d'un objet d'un facteur 2 en utilisant la loi de Hubble $v = H * D$ au milieu, une loi à vitesse constante $v = G * D^0$ à gauche et une loi quadratique $v = I * D^2$ à droite.



Observations critiques

La loi de Hubble définit un référentiel privilégié en tout point de l'Univers. Un observateur en mouvement propre par rapport au "flot de Hubble" va observer des décalages vers le bleu dans la direction du mouvement et vers le rouge dans l'autre au lieu d'un décalage isotrope vers le rouge des galaxies.

Nous pouvons donc observer notre mouvement par rapport au flot de Hubble, qui caractérise notre mouvement relatif par rapport à l'Univers observable.

Un observateur co-mobile est au repos par rapport à ce référentiel privilégié. Notre système solaire n'est pas co-mobile, nous avons une vitesse relative de *370 km/sec* par rapport à l'univers observable.

Le groupe local de galaxies, dans lequel la voie lactée est incluse laisse apparaître un mouvement relatif de *600 km/sec* par rapport à l'Univers observable.

Observations critiques

Hubble mesura aussi le nombre de galaxies et leurs luminosités dans les différentes directions du ciel.

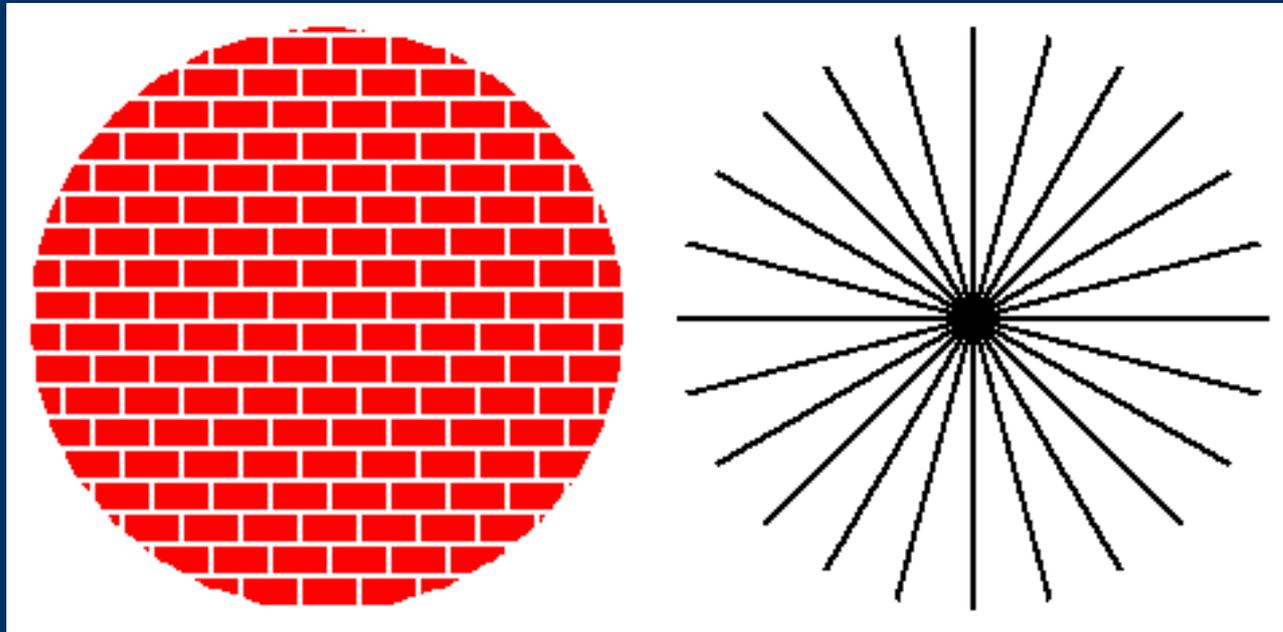
Il trouva environ le même nombre de galaxies peu brillantes dans toutes les directions , même s'il y a excès important de galaxies brillantes dans la partie nord du ciel.

Quand une distribution est la même dans toutes les directions, elle est *isotrope*.

Ensuite il observa les galaxies de luminosité apparente supérieure à $F/4$, et il en compta 8 fois plus que de galaxies de luminosité apparente supérieure à F .

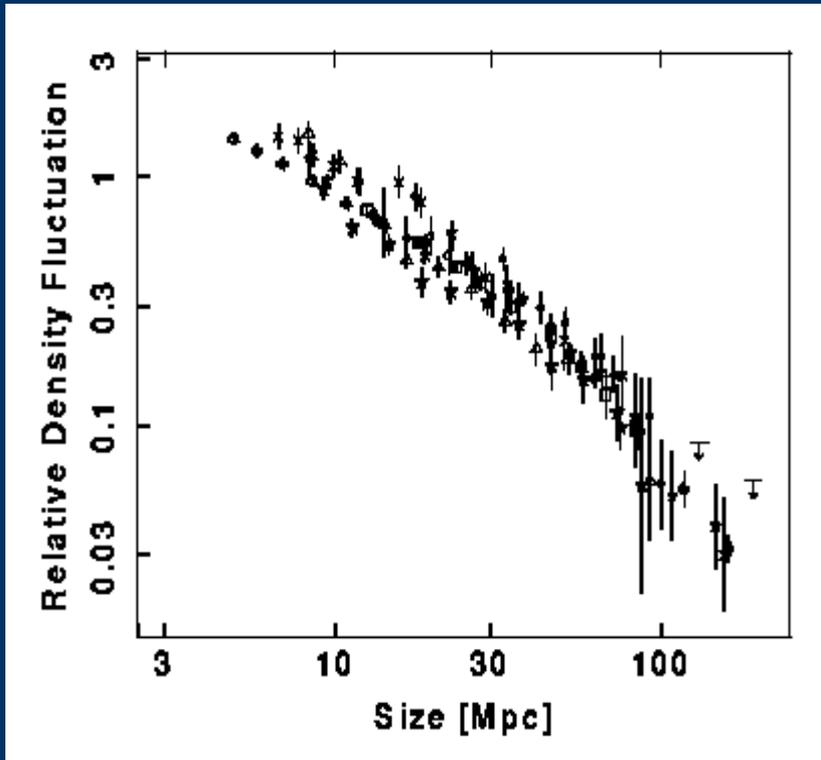
Comme une luminosité divisée par 4 correspond à une distance double , le volume correspondant est 8 fois plus grand, son observation confirme donc *l'homogénéité* approchée (densité uniforme) de l'Univers à grande échelle .

Observations critiques



La figure ci dessus montre un motif homogène mais non isotrope à gauche et isotrope mais non homogène à droite. Si une figure est isotrope en plus d'un point (deux sur une sphère) , elle est de plus homogène.

Observations critiques



Bien sûr l'Univers n'est que approximativement homogène et isotrope même à grande échelle, car il y a des régions notoirement plus denses comme la Terre. Mais il peut être statistiquement homogène et isotrope comme le montre un champ simulé de galaxies après lissage des détails.

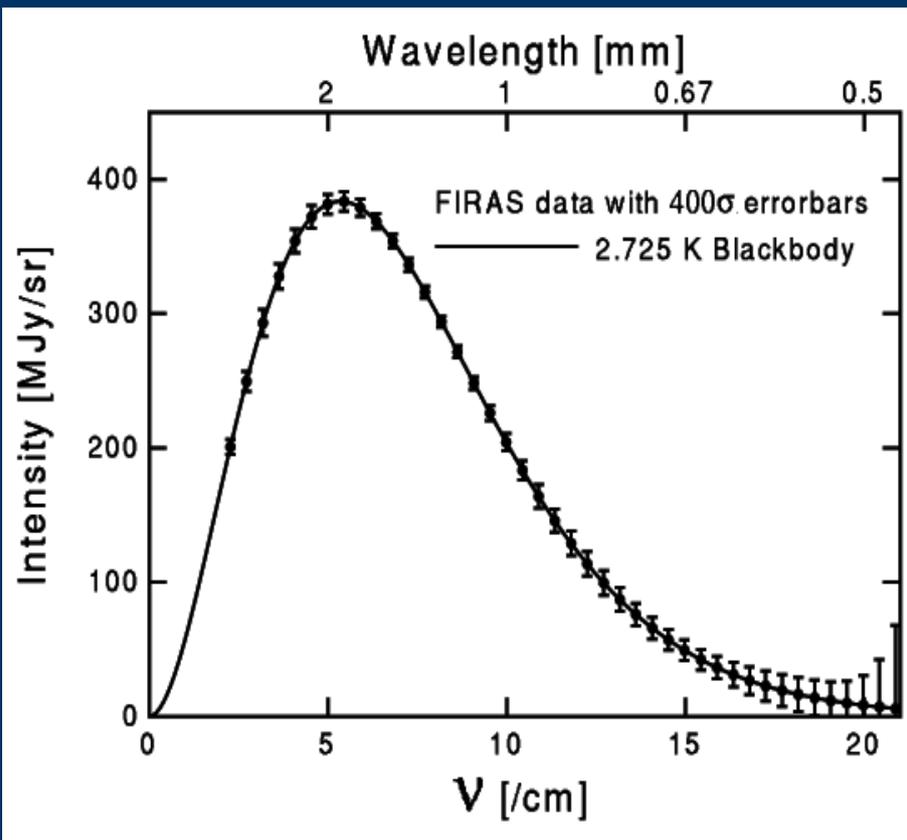
[Peacock and Dodds \(1994, MNRAS, 267, 1020\)](#) ont examiné les proportions de fluctuation de densité dans l'Univers proche, fonction du rayon de la région considérée et après passage par un filtre "haut de forme", ils

Pour des régions de 100 Mpc , l'Univers est homogène à quelques % près.

ont trouvé.

Des études sur le décalage spectral de régions très grandes ont confirmé cette tendance vers une homogénéité croissante lorsque l'échelle s'accroît, même si la distribution des galaxies proches sont très inhomogènes (Amas de Virgo, ...).

Observations critiques

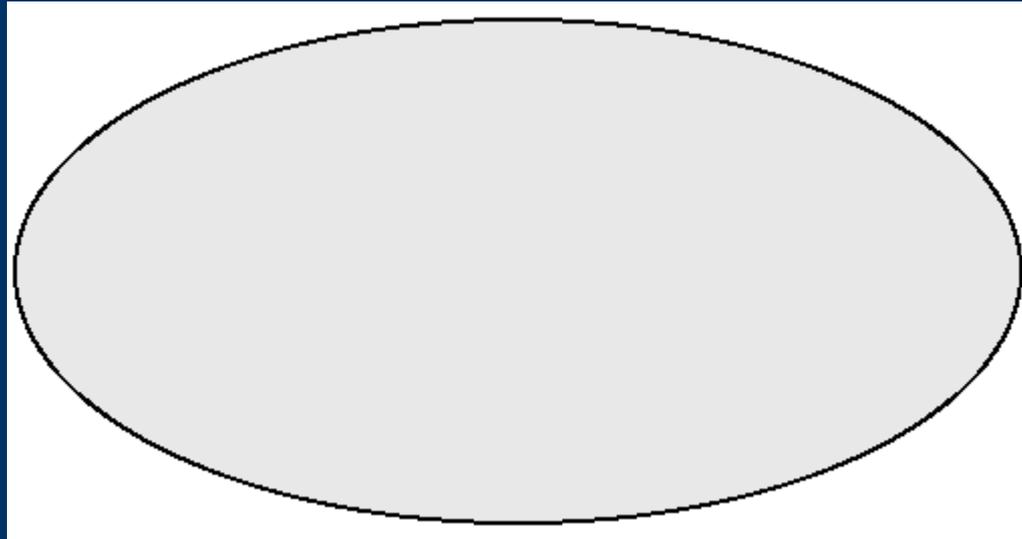


L'hypothèse d'isotropie et d'homogénéité de l'Univers s'est trouvée confortée après que Penzias et Wilson eurent découvert le rayonnement de fond cosmologique (RFC) en 1965. Il ont observé un rayonnement isotrope, provenant de toutes les directions du ciel, de 7.35 cm de longueur d'onde de type "corps noir" équivalent à une température de 3.5 ± 1 degrés Kelvin à l'époque. [2,725 K selon WMAP]

[Les degrés Kelvin ont la même échelle que les degrés Celsius mais leur référence est le zéro absolu, ainsi la glace fond à 273.15 K.]

Un corps noir absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit et a une température constante. Les caractéristiques du RFC ont été mesurées par de nombreuses expériences. Ci dessous les mesures faites l'instrument FIRAS sur le satellite [COBE](#) [confirmé et amélioré par WMAP]:

Observations critiques



Sur l'axe des x , on représente l'inverse de la longueur d'onde en $1/[longueur\ d'onde\ en\ cm]$. Sur l'axe des y , on représente la puissance par unité de surface par unité de fréquence [dans des bandes de largeur constante], par unité d'angle solide en Méga-Janskies par stéradian. 1 Jansky vaut 10^{-26} Watts par mètre carré par Hertz. Les barres d'erreurs ont été dilatées d'un facteur 400, on peut ainsi voir l'excellente adéquation avec le spectre de rayonnement d'un corps noir à une température $T_o = 2.725\ K$. La température du RFC est presque la même dans tout le ciel. . La figure ci dessous montre cela avec une échelle linéaire de gris telle que $3^{\circ}K$ est blanc et $0^{\circ}K$ est noir..

L'Univers est Homogène et Isotrope

Un autre élément favorable au big bang est l'abondance des éléments légers tels que l'hydrogène, le deutérium (hydrogène lourd) l'hélium et le lithium. Pendant l'expansion les photons du RFC perdent de l'énergie du fait du décalage vers le rouge et le RFC se refroidit.

Vu à l'envers, ceci signifie que la température du RFC était très élevée dans le passé.

Quand il était âgé de seulement quelques minutes, la température était suffisamment élevée pour produire ces éléments légers par fusion nucléaire..

La théorie de la Nucléosynthèse du Big bang prédit qu'environ $1/4$ de la masse de l'Univers doit être constituée d'hélium, ce qu'on observe approximativement.

L'abondance du deutérium est inversement proportionnelle à la densité de nucléons dans l'univers, et l'abondance observée de deutérium correspond à un nucléon pour 4 mètres cubes d'espace de l'Univers.
