



QUAND URANIE S'ÉGARE | Suzy Collin-Zahn | Observatoire de Paris

| Jean-Pierre Luminet | Laboratoire d'astrophysique de Marseille



Fritz Zwicky

La saga des constantes cosmologiques

2. DES ANNÉES SOIXANTE À NOS JOURS

Après avoir décrit la grande bataille entre la théorie de l'Univers stationnaire et celle de l'Univers en expansion, et rappelé que la première a été rapidement abandonnée en 1965 en faveur de la seconde après la découverte du rayonnement fossile, nous revenons sur l'histoire des constantes cosmologiques.

La constante de Hubble

Rappelons tout d'abord que la « constante » de Hubble n'est pas une vraie constante universelle, comme la constante de gravitation ou la constante de Planck. Elle mesure en effet le taux d'expansion actuel de l'Univers. Elle ne garde donc pas la même valeur au cours du temps, puisque dans tous les modèles de Big Bang, le taux d'expansion varie lui-même au cours du temps – il peut décélérer, accélérer, mais jamais rester constant ! Il vaudrait donc mieux parler du « paramètre de Hubble ». Sa valeur mesurée aujourd'hui, notée H_0 , fournit toutefois de précieuses indications cosmologiques. Nous l'avions quittée au début des années 1930 lorsque, estimée d'abord par Lemaître puis mesurée par Hubble, elle valait environ 500 km par seconde et par mégaparsec. Nous avons expliqué que cette valeur posait problème si on l'interprétait comme un indicateur de l'âge de l'Univers. En effet, l'in-

verse de la constante de Hubble, appelée « temps de Hubble », constitue une borne supérieure à l'âge de l'Univers quand on néglige la constante cosmologique (une vraie constante celle-là, dans l'espace et dans le temps). Or, $500 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ donnait un temps de Hubble d'environ deux milliards d'années, trop petit par rapport à l'âge géologique de la Terre, qui, à partir des années 1930 et grâce à la datation radioactive des roches, était estimé à 3 milliards d'années. Ce désaccord explique pourquoi de nombreux astronomes avaient préféré le modèle d'Univers stationnaire de Hoyle. Comment a-t-on pu résoudre ce problème d'apparente incompatibilité ?

1952 : H_0 est divisé par deux et l'Univers pourrait être deux fois plus vieux.

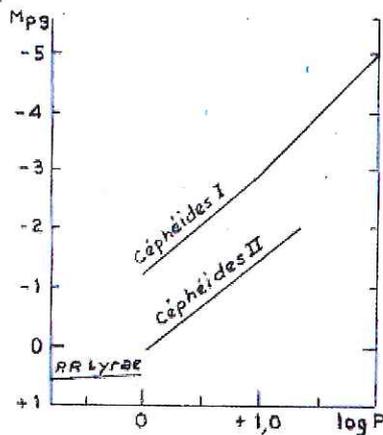
L'astronome américain Walter Baade travaille avec le télescope du Mont Wilson. Il s'aperçoit qu'en fait les céphéides se classent en deux catégories distinctes n'ayant pas la même relation période-luminosité.

Cela le conduit à diviser par deux la valeur expérimentale de la constante de Hubble.

C'est l'extinction des lumières de Los Angeles (black-out) durant la Deuxième Guerre mondiale qui a permis à Baade de résoudre pour la première fois les étoiles de la région centrale d'Andromède.

En fait, le français Henri Mineur avait déjà montré en 1944 la division des céphéides en deux

classes, mais à l'époque on n'avait pas compris qu'il s'agissait d'étoiles de population I et 2, ce que Baade a compris. Mineur, astronome très brillant, reçu premier à l'École normale à 18 ans, fonda l'Institut d'astrophysique de Paris et fut un grand résistant.



1 : La relation période-luminosité des deux classes de céphéïdes, telle que montrée en 1964 dans l'Astronomie par Renée Canavaglia.

Paul Couderc (presque le seul astronome français à croire au Big Bang à cette époque) écrit en 1952 dans l'Astronomie : « Le temps d'expansion est doublé... Cet allongement est le bienvenu : il comble à peu près totalement l'abîme inacceptable qui séparait l'âge de l'expansion de l'âge de la Terre. Nous arrivons maintenant à 3 milliards d'années pour l'un comme pour l'autre : nous ne nous sentons pas encore très à l'aise mais la contradiction flagrante s'est estompée. La Terre demeure un os un peu difficile à avaler par la théorie de l'expansion, mais il ne se met plus franchement en travers. »

La valeur mesurée de H_0 continue à diminuer

En 1956, trois astronomes américains, Milton Humason (l'ancien muletier du Mont Wilson et collaborateur de Hubble), Nicholas Mayall et Allan Sandage, publient un gros article : « Redshifts and magnitudes of extragalactic nebulae ». Ils rassemblent les redshifts d'un millier de galaxies et déduisent H_0 grâce à la relation qu'ils trouvent entre la magnitude et la distance. Ils concluent à une valeur de

H_0 de 180 km.s⁻¹.Mpc⁻¹. Le temps de Hubble devient proche de cinq milliards d'années.

Cependant l'« os » de Paul Couderc est toujours présent ; ce n'est plus la Terre qui pose problème, mais les plus vieilles étoiles des amas globulaires : on pense qu'elles ont au moins vingt milliards d'années.

En fait, les déterminations actuelles précises montrent que l'âge des plus vieilles étoiles est au plus de 14 milliards d'années.

Cela ne suffit donc pas à résoudre le conflit ! Faisons encore un effort sur la constante de Hubble !

À peine trois ans après l'article de Humason, Mayall et Sandage, ce dernier ramène H_0 à 75 km.s⁻¹.Mpc⁻¹ (avec toutefois une erreur possible d'un facteur deux, précise-t-il), en faisant une analyse très détaillée de divers tests de distance, en particulier en révisant la relation période-luminosité des céphéïdes.

Mais Sandage n'est pas encore satisfait. Le temps de Hubble reste incompatible avec l'âge des plus vieilles étoiles. On persiste aussi à croire que la constante cosmologique Λ est nulle, alors que si on lui attribuait une valeur suffisamment grande, le problème d'âge de l'Univers disparaîtrait de facto, comme l'avait déjà montré Lemaître.

Rappelons que le modèle préféré à cette époque est celui qu'Einstein et de Sitter ont proposé en 1932,

postulant que la densité est égale à la densité critique et que la constante Λ est nulle.

En outre, on ne sait pas quelle est la valeur de la densité de l'Univers. Si son contenu se limite à la matière visible, sa densité est très inférieure à la densité critique ; il est alors ouvert, en expansion perpétuelle décélérée, et son âge est de 13 milliards d'années. S'il est plus dense – par exemple empli aussi de matière noire, comme l'avait suggéré Fritz Zwicky dès 1933 –, son âge est encore plus petit.

H_0 semble encore trop grand pour valider le modèle du Big Bang !

Sandage se consacre désormais essentiellement à la mesure de la constante de Hubble. Dès 1970, il annonce qu'elle est probablement voisine de 50 km.s⁻¹.Mpc⁻¹. Avec le Suisse Gustav Tammann, il va produire une série d'articles intitulée « Steps toward the Hubble constant » (Étapes vers la détermination de la constante de Hubble), où ils confirment et précisent cette valeur de 50 km.s⁻¹.Mpc⁻¹. Dans le dernier article de la série, en 1995 (le dixième), ils concèdent une valeur un peu plus grande : 55 km.s⁻¹.Mpc⁻¹.

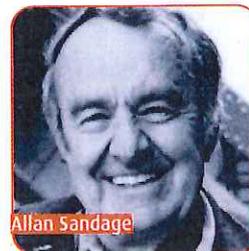
Ils tentent également de déterminer par les mêmes méthodes la densité totale de matière Ω car elle est liée à H_0 , mais à cette époque les observations ne portent pas encore suffisamment loin.

Une bataille féroce ENTRE L'ÉCOLE ANGLO-SAXONNE ET L'ÉCOLE FRANÇAISE

De Vaucouleurs, un astronome français installé à Austin au Texas, propose dans les années 1970, sur la base de différents critères optiques, une valeur de 100 km.s⁻¹.Mpc⁻¹ pour la constante de Hubble. Il est bientôt rejoint par deux radioastronomes françaises, Lucienne Gouguenheim et Lucette Bottinelli (disparue tout récemment, voir l'hommage dans ce même numéro de l'Astronomie), et leur étudiant Georges Patrel, qui observent les galaxies dans la raie 21 cm de l'hydrogène. La bataille se livre à coups d'articles et de tests.

Dans les années 1980, la valeur mesurée par l'école française est $75 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$. Pourtant, pendant plus de trente ans, la valeur de $50 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$ préconisée par Sandage contre l'école française prévaut, même en France !

À ce jour, les résultats des satellites *WMAP* puis *Planck* donnent une valeur voisine de $70 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$.



Allan Sandage



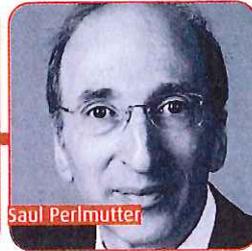
Gustav Tammann



Milton Humason



Adam Riess



Saul Perlmutter



Jeremy Ostriker

À partir des années 2000, c'est cette valeur qui est adoptée, et il faut refaire de nombreux calculs en tenant compte de ce changement. Par exemple, la luminosité des galaxies et des quasars correspondant à la distance tirée de la loi de Hubble devient deux fois plus faible...

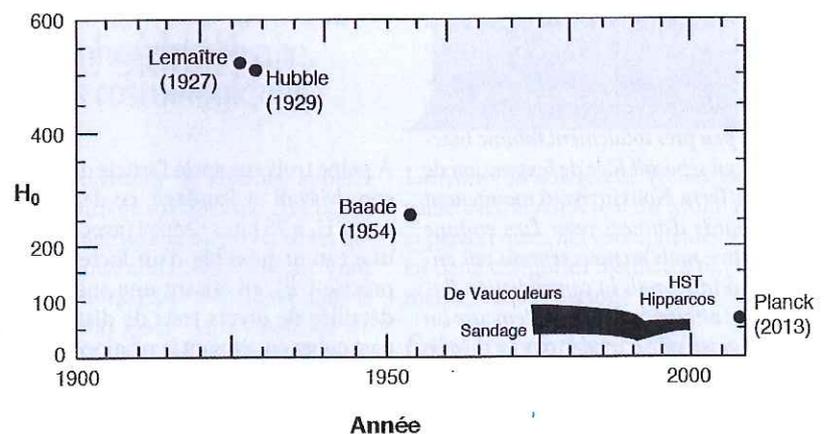
Morale de l'histoire:
n'essayons jamais de « tirer » les résultats vers ce que nous espérons, on risque souvent de se tromper !

Cela n'est toutefois pas la fin de l'histoire, car...

... dans les années 1970

L'HYPOTHÈSE DE LA « MATIÈRE NOIRE » S'AFFIRME

On découvre d'abord, grâce aux études radio des vitesses du gaz, que les galaxies s'étendent beaucoup plus loin que leur région visible, et qu'elles sont environ dix



Incertitudes sur le taux d'expansion. Ce tableau historique montre les diverses valeurs du taux d'expansion adoptées par les astronomes, depuis les travaux pionniers de Lemaitre et Hubble jusqu'aux données les plus récentes obtenues par des télescopes en orbite. En 80 ans d'observations, la valeur a été divisée par huit !

fois plus massives qu'on ne le croyait. Puis ce sont les galaxies, dont les vitesses particulières au sein de leurs amas montrent que là aussi la masse est cette fois au moins cent fois la masse visible. On cherche pendant de nombreuses années à identifier cette matière invisible avec des petites étoiles, des trous noirs, des

planètes ou d'autres constituants plus exotiques, mais sans succès.

Fritz Zwicky avait déjà fait cette découverte dans les amas de galaxies quarante ans plus tôt, mais personne n'avait cru en ses observations. Il était connu pour ses idées géniales, et