

L'Univers est l'avenir de l'Homme

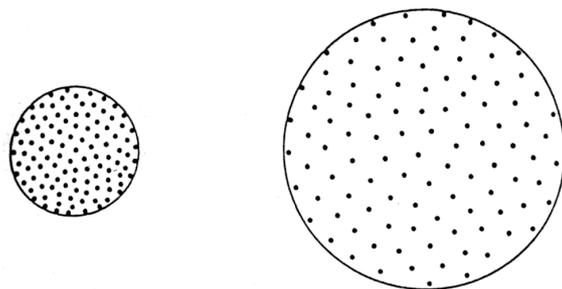
Le futur préoccupe les êtres humains depuis leur naissance. Leur propre avenir, bien sûr, mais aussi celui, plus global, de notre Monde. L'univers des anciens était immuable : il existait depuis toujours et il existerait jusqu'à la fin des temps. Il était à l'image des dieux, bien que moins querelleur, et comportait une part de mystère... « divin ». Cette conception perdura longtemps. Personne n'osait la mettre en doute. Et puis vint un certain Hubble...

1. L'Univers change

Le spectre de la lumière qui nous parvient des étoiles se révèle interrompu par un certain nombre de raies. Celles-ci proviennent des étoiles elles-mêmes ou de la matière placée sur le trajet. Chaque élément de la nature possède dans le spectre sa propre signature : un ensemble de raies plus ou moins fines et plus ou moins serrées. On peut ainsi identifier la composition stellaire et interstellaire. Cependant, les raies qui nous parviennent ne se trouvent pas toujours à l'endroit prévu, mais peuvent être décalées en bloc vers l'extrémité rouge ou bleue du spectre.

Ce « rougissement » (ou « bleuissement ») peut traduire la vitesse de l'objet observé par rapport à la Terre. Cet effet est analogue à l'effet Doppler sonore, mais pour les ondes lumineuses : si une voiture de police ou une ambulance s'approche de nous à grande vitesse, le son de la sirène nous paraît plus aigu, et lorsqu'elle nous a dépassés et s'éloigne, le son devient plus grave. « Plus aigu » (plus grave) indique que le son se décale vers les hautes (basses) fréquences et correspond alors à « plus bleu » (plus rouge) dans le cas lumineux.

En 1929, Edwin Hubble, celui qui a laissé son nom au télescope spatial, entreprit de mesurer le décalage Doppler de certaines galaxies. Il remarqua que les galaxies s'éloignent de nous (décalage vers le rouge ou *redshift*), et cela d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. N'en croyant pas ses yeux, il n'osa pas tirer de conclusion immédiatement. Il fallut cependant se rendre à l'évidence : l'Univers est en expansion ! C'est ce que traduit la célèbre loi de Hubble, qui postule que la vitesse de fuite V des galaxies est proportionnelle à leur distance d : $V = H_0 \times d$, où H_0 est la « constante de Hubble ».



L'expansion de l'Univers

Utilisons l'analogie du ballon : des pièces disposées sur un ballon qui se gonfle s'éloignent les unes des autres d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées

Cependant, Hubble extrapola ses résultats de manière plutôt hasardeuse : à l'époque, seules les distances des galaxies proches étaient évaluées assez précisément. Hubble étendit les résultats, trouvés au « voisinage » de la Voie Lactée, à l'ensemble des galaxies, y compris les plus lointaines.

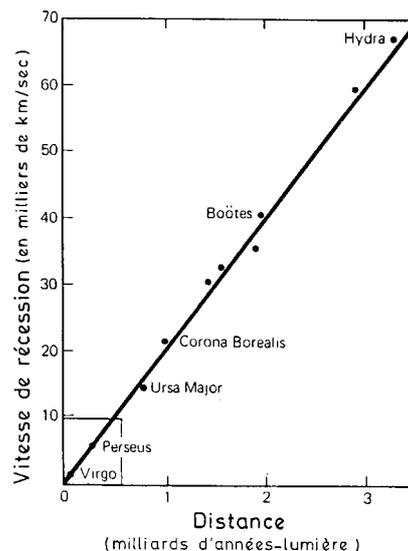
« Cette expansion, je l'avais déjà prédite en 1927 ! Et si l'Univers grossit, c'est donc que, dans un lointain passé, il était minuscule, aussi petit qu'un atome ! » clama le physicien belge Georges Lemaître. Ce remue-ménage universel provoqua des réactions négatives. « Impossible ! » s'écria en cœur la vieille garde, Einstein en tête.

Ce dernier aurait pu prédire théoriquement l'expansion de l'Univers dès 1917 grâce à ses équations de Relativité Générale, mais il préféra « ignorer » la question et introduire une « constante cosmologique » dans ses équations pour garder un univers statique... qui ne « gonfle » pas. Il reconnut plus tard avoir là commis la plus grande erreur de sa vie. Pourtant, en 1923 déjà, Friedmann, un météorologiste russe, avait prouvé l'existence d'univers non statiques, mais il ne se préoccupa pas du tout des conséquences... astronomiques de ses calculs !

D'aucuns persistent, comme Hoyle, qui, depuis 1948, revendique encore sa théorie de création continue de matière. Dans cette théorie, le rayon de l'Univers grandit, mais l'expansion est compensée par la création de matière nouvelle. Cela paraît impossible actuellement (la théorie ne permet pas de justifier certaines observations comme le rayonnement fossile – voir encadré page 11) mais le bouillant Hoyle continua de persifler en affublant la théorie de l'atome primitif de Lemaître du surnom ironique de « Big Bang ». Erreur ! Ce surnom popularisa la théorie, tant auprès des scientifiques que du grand public.

2. Et l'avenir ?

Néanmoins, le débat restait ouvert : et après ? L'Univers est en expansion, soit, mais le restera-t-il toujours ? La réponse à cette question repose sur la densité de matière actuelle. Il faut comparer celle-ci à la densité critique $\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G$ ¹, soit environ 10^{-29} g/cm³ (60 atomes d'hydrogène par m³). Il en résulte globalement trois possibilités :



La loi de Hubble

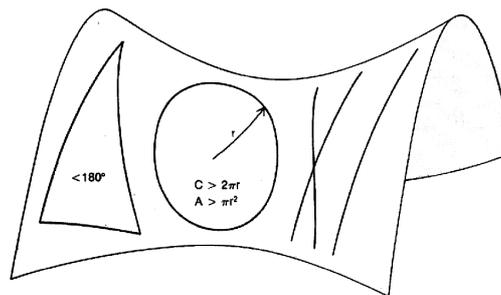
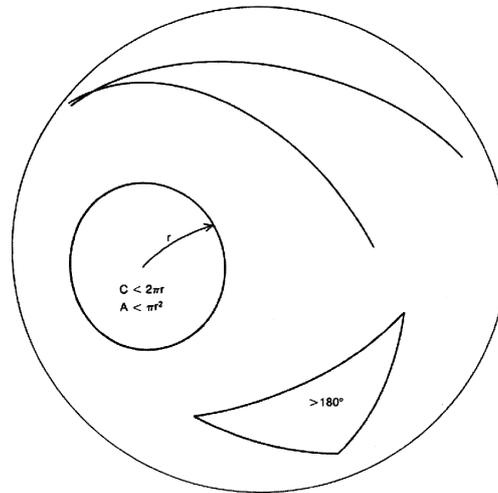
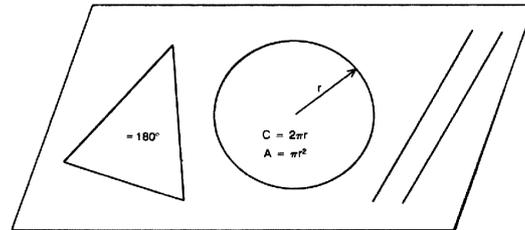
Dans le coin inférieur gauche, les observations réalisées en 1929

¹ la densité critique change donc avec la valeur attribuée à la constante de Hubble H_0 . La valeur de cette constante n'est pas bien connue : elle varie entre 50 et 100 km s⁻¹ Mpc⁻¹ suivant les méthodes de mesure.

1°) L'Univers est dense ($\rho > \rho_c$) : il est *fermé*. L'attraction gravitationnelle finira par vaincre l'expansion. L'Univers se recontractera un jour et le Big Bang sera suivi d'un Big Crunch (ou Big Splash). Ce dernier pourrait être suivi d'un nouveau Big Bang, puis d'un autre Big Crunch,... A un instant donné, la géométrie de l'Univers est analogue à celle d'une sphère : deux « droites parallèles » se croisent finalement, et la somme des angles intérieurs d'un triangle est supérieure à 180° .

2°) L'Univers est peu dense ($\rho < \rho_c$) : il est *ouvert*. L'expansion continuera indéfiniment et l'Univers se diluera de plus en plus. Dans un tel univers, à géométrie hyperbolique, deux droites parallèles finissent par diverger, et la somme des angles intérieurs d'un triangle est inférieure à 180° .

3°) Entre ces deux cas extrêmes, il existe un univers *plat* ($\rho = \rho_c$) dans lequel l'expansion se ralentit indéfiniment, sans jamais s'arrêter : deux parallèles restent parallèles, et la somme des angles intérieurs d'un triangle est exactement égale à 180° . La géométrie d'Euclide peut s'appliquer. Ce dernier cas est a priori très improbable. Une particule en plus ou en moins et l'Univers devient fermé ou ouvert : c'est une configuration instable, toute perturbation, si minime soit-elle, force le basculement dans l'un des deux cas précédents.

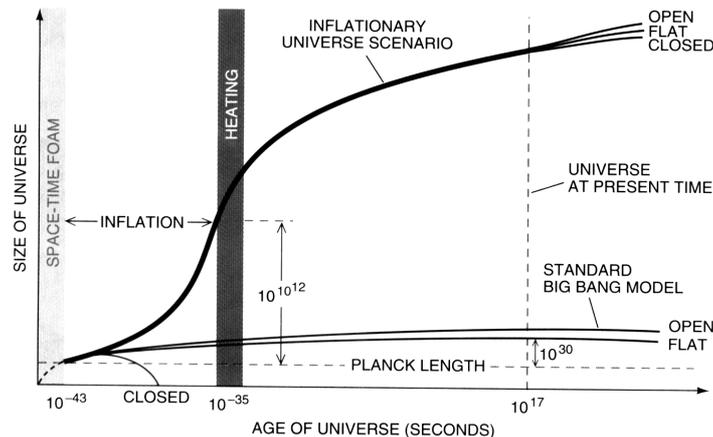


Représentation des propriétés géométriques d'un univers plat, fermé, et ouvert à deux dimensions spatiales

A quelle catégorie appartient notre Univers ? Il n'est pas facile de répondre à cette question : des méthodes de mesure différentes de la densité moyenne conduisent à des résultats contradictoires.

Cependant, plusieurs arguments tendent à montrer que l'Univers est plat. En particulier, le rayonnement fossile (voir encadré) présente une homogénéité trop parfaite : deux points opposés de l'Univers, qui n'ont jamais pu échanger aucune information et n'ont jamais été en contact, sont pourtant rigoureusement à la même température ! C'est la théorie

révolutionnaire de l'*inflation*, véritable Saint Graal de la cosmologie contemporaine, qui a permis de résoudre ce problème : l'Univers a dû connaître très tôt dans son histoire une période d'expansion exponentielle, l'inflation. Celle-ci permet de lisser les inhomogénéités préexistantes de l'Univers et conduit à un univers très plat et homogène, dont la densité doit donc être proche de la densité critique. Les premières théories inflatoires naquirent au début des années 80 avec Alan Guth.



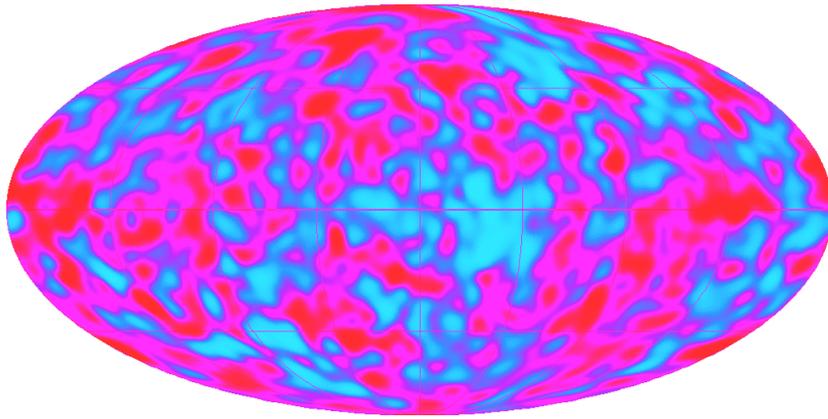
L'évolution de l'Univers avec et sans inflation

Avant 10^{-43} s, on ne peut rien dire : l'Univers avait la taille d'une particule et les théories actuelles ne sont alors plus valables

Le rayonnement fossile de l'Univers ou fond cosmologique

En 1965, Penzias et Wilson découvrirent par hasard un rayonnement radio isotrope (c'est-à-dire identique dans toutes les directions) : ce rayonnement provient des premiers instants de l'Univers. Imaginez les sept cent premiers milliers d'années après le Big Bang : l'Univers était alors si dense qu'un photon (un « grain » de lumière) ne pouvait voyager librement. Il trouvait sur son chemin des électrons pour l'absorber ou le diffuser, il pouvait se « cogner » aux protons et aux noyaux d'hélium et de quelques autres éléments déjà synthétisés : les photons interagissaient avec la matière, l'Univers était opaque au rayonnement.

Mais l'expansion continuait, et la densité et la température baissèrent : après 700 000 ans, la température n'était plus que de 3000 kelvins, et les photons ne purent plus séparer efficacement électrons et noyaux. Ces derniers formèrent alors les premiers atomes stables. Ces atomes neutres n'interagissaient plus avec les photons : l'Univers était devenu transparent. Dès lors, les photons purent se déplacer plus tranquillement. Ce rayonnement primordial s'est progressivement « refroidi » en raison de l'expansion de l'Univers, et est aujourd'hui à la température de 2,7 kelvins. Les dernières mesures de ce rayonnement ont été enregistrées par le satellite COBE (Cosmic Background Explorer). Ce dernier a mis en évidence d'infimes fluctuations de température (de l'ordre du dix millième de degré) dans le rayonnement cosmologique. Ces minuscules « rides » traduisent les fluctuations de densité associées à la formation des galaxies actuelles.



Le rayonnement de fond vu par COBE

Ces théories n'ont cependant pas résolu tous les problèmes. En effet, si l'on estime la densité moyenne de l'Univers sur base de la seule matière visible, il paraît plutôt de type ouvert car la valeur obtenue ne représente que quelques pour-cent de la densité critique. Il semble donc manquer de la masse (90% environ) pour rendre compte des observations.

3. Bizarre, vous avez dit bizarre ?

Cependant, de nombreux indices expérimentaux semblent indiquer la présence de *matière sombre*, non directement observable. Ainsi, des comportements étranges sont observés dans de nombreuses galaxies : certaines étoiles se meuvent tellement rapidement que les galaxies elles-mêmes auraient dû se disloquer si celles-ci n'étaient enrobées dans un halo de matière invisible. Déjà en 1933, Fred Zwicky avait évalué la masse d'une galaxie en ne tenant compte que de sa seule luminosité, et il l'avait estimée indépendamment par d'autres méthodes, notamment basées sur les mouvements de ses étoiles : cette dernière estimation se révéla 400 fois plus élevée que la première.

De plus, certaines composantes d'amas galactiques se meuvent trop rapidement les unes par rapport aux autres : l'attraction gravitationnelle est plus forte que celle prévue sur base de la masse « visible » des galaxies. De même, dans la constellation de Céphée, un énorme nuage de gaz enrobe trois galaxies : pour le retenir, il faut que ces dernières pèsent entre 12 et 25 fois plus que semble l'indiquer leur luminosité !

On observe aussi des étoiles qui gravitent autour d'objets invisibles : connaissant la période de révolution du système et la masse de l'étoile visible, on peut déterminer la masse de l'objet manquant.

La masse « visible » ne représenterait que 5 à 10% de la masse totale des galaxies : il doit donc y avoir un « quelque chose » de plus, communément appelé *matière cachée* ou *matière sombre* (*dark matter*).

4. Eros prouve que les MACHOs existent !

On se heurte ensuite à un autre problème. Si cette matière existe, de quoi est-elle constituée ?

Le premier candidat est un gaz chaud (100 millions de kelvins) non primordial (c'est-à-dire qui ne s'est pas constitué juste après le Big Bang) dans lequel baigneraient les galaxies. Son existence est établie car il a pu être observé directement grâce aux rayons X que les électrons émettent quand ils sont freinés par les ions qui le composent ; sa présence se traduit aussi par des écarts très localisés, de l'ordre du cent millième de degré, dans le rayonnement cosmologique à 2,7 kelvins². Selon les premières estimations, ce gaz contribuerait à la masse totale de l'Univers pour un pourcentage équivalent à celui de la masse visible. C'est donc un bon début dans la quête de la matière sombre, mais c'est encore insuffisant pour atteindre la densité critique.

Autre possibilité envisagée : des étoiles en fin d'évolution, difficiles à observer, comme les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs, ou même des corps trop petits pour s'être transformés en étoiles. Ces derniers petits objets, appelés naines brunes, ressemblent un peu à Jupiter : composés de gaz, trop gros pour être des planètes, mais trop petits pour « allumer » des réactions nucléaires comme les étoiles ordinaires.

On regroupe ces objets formés de matière ordinaire (neutrons, protons, électrons), mais non brillants, sous le nom de *MACHOs* (Massive Compact Halo Objects).

Cette solution est toutefois improbable car la matière sombre semble uniformément distribuée dans le halo des galaxies. Pourquoi ces étoiles se seraient-elles donc formées dans le halo des galaxies et non dans le plan galactique comme d'habitude ? Notons au passage que cette restriction ne s'applique pas au cas des trous noirs primordiaux (c'est-à-dire non issus d'étoiles). Si ceux-ci sont assez gros pour ne pas s'être « évaporés » complètement depuis leur formation, peu après le Big Bang, ils pourraient constituer une piste intéressante pour la recherche de matière cachée.

Comment détecter ces petits objets ? La Relativité Générale prédit que la matière peut courber les faisceaux lumineux : ainsi, vers la fin des années 10, Einstein annonça que la position angulaire d'étoiles proches du limbe solaire devrait être légèrement modifiée. Ce très petit effet (on s'attend à un déplacement de 1,75") fut observé lors de l'éclipse du 29 mai 1919 : ce fut là l'une des premières vérifications expérimentales de la Relativité Générale.

Aujourd'hui, cette déviation des rayons lumineux permet de mettre en évidence des quantités non négligeables de matière cachée : c'est l'effet de *lentille* ou de *mirage gravitationnel*. On observe ainsi des images multiples et distordues (en arcs) d'objets lointains, les quasars. Ces derniers semblent correspondre aux premiers stades de la formation des galaxies.

² effet Sunyaev-Zel'dovich.

Ces images distordues prouvent qu'il existe donc, entre le quasar et nous, une masse très importante, mais invisible. L'Univers « grossit » donc un peu plus...

Pour la recherche des petits corps massifs, on utilise un phénomène analogue prévu par la théorie : l'effet de *microlentille gravitationnelle*. Imaginez qu'un petit objet massif de notre galaxie se glisse entre une étoile lointaine et la Terre : il se comportera comme une lentille optique, et nous observerons une brusque augmentation dans la luminosité de l'étoile, puis une diminution lorsque le petit objet quitte la ligne de mire.

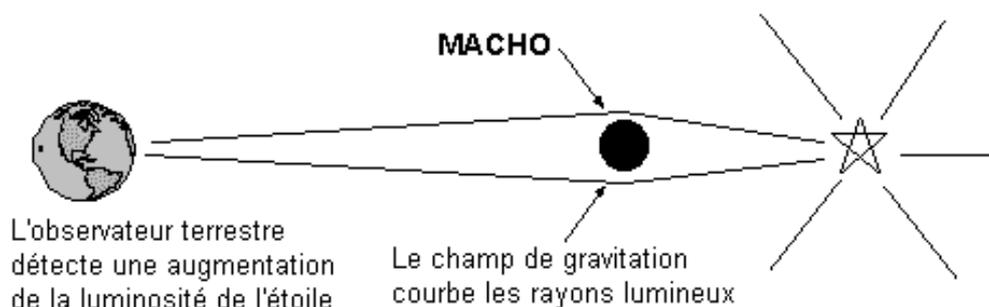


Schéma illustrant sommairement le phénomène de microlentille gravitationnelle

Bien sûr, il faut alors surveiller des milliers d'étoiles pour voir un tel effet de (micro)lentille. Des expériences, dont la française EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres), ont été menées : les MACHOs existent vraiment ! Toutefois, si l'on pensait avant d'entamer une recherche systématique qu'ils pourraient contribuer pour 50% à la masse de l'Univers, il faut aujourd'hui, au vu des premiers résultats, revoir ces estimations à la baisse...

5. AMANDA traque les WIMPs au pôle Sud

Par conséquent, les problèmes ne s'évanouissent pas pour autant : en fait, il s'avère que si la matière se composait seulement de protons, de neutrons et des autres particules usuelles regroupées sous le nom de *baryons*, on observerait des hétérogénéités beaucoup plus importantes dans le fond cosmologique que celles décelées par COBE... La matière ordinaire comporte également des *leptons*, comme l'électron ordinaire et l'énigmatique neutrino, une particule de masse très faible, sinon nulle. Si la masse du neutrino est nulle, la matière leptonique est également insuffisante. Si, par contre, les neutrinos possèdent une masse comprise entre un dix millième et un cent millième de la masse de l'électron, l'Univers se referme ! En effet, on pense aujourd'hui que les neutrinos sont présents en même quantité que les particules les plus répandues dans l'Univers, les photons. Un des buts poursuivis par les physiciens des particules élémentaires est de mesurer la masse éventuelle de ces neutrinos. Des expériences, comme le projet américain « AMANDA » (Antarctica Muon And Neutrino Detector Array), essaient de détecter ces WIMPs (« Weakly Interacting Massive Particles »

c'est-à-dire « particules massives interagissant faiblement ») en utilisant la glace de l'Antarctique comme un gigantesque détecteur.

D'autres mécanismes plus exotiques ont aussi été invoqués comme notamment l'existence de compagnons de la matière ordinaire prédits par une théorie récente des particules élémentaires, la Supersymétrie (SUSY). Selon cette théorie, chaque particule ordinaire aurait un « double » supersymétrique, image d'elle-même à travers un « supermiroir » : aux photons correspondraient ainsi les photinos ; aux neutrons, les neutroninos, ... Malheureusement, on n'a encore détecté aucune de ces particules hypothétiques dans les accélérateurs de particules !

6. Finalement....

Hoyle, encore lui, assure que cette masse manquante jette le discrédit sur la théorie du Big Bang et que cette dernière devrait être abandonnée. D'autres adversaires de la théorie du Big Bang expliquent que le décalage vers le rouge est juste un effet du vieillissement de la lumière au cours de son long voyage et non un reflet de l'expansion de l'Univers. Néanmoins, la théorie dite « standard » est acceptée par la majorité des scientifiques qui se querellent quand même pour savoir quelle solution choisir au problème de la matière sombre.

Quel sera finalement la « bonne » solution ? Probablement un mélange des théories (« exotique » et « ordinaire »). Mais seul l'avenir (toujours lui !) nous le confirmera.... Jusque là continuez de rêver à votre avenir : il est sûrement inscrit dans les étoiles !

Yaël Nazé

Références :

- « What is dark matter ? », *Astronomy*, juin 97.
- « The phantino universe », *Newsweek*, 25 mai 92.
- « The self-reproducing inflationary universe », *Scientific American*, janvier 94.
- « Searching for dark matter », *Sky & Telescope*, novembre 94.