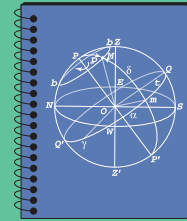


INTRODUCTION A LA COSMOLOGIE

Christian SCOTTA

Ce texte retrace l'évolution des conceptions de l'Univers, de l'Antiquité à la cosmologie moderne. Il évoque les visions de Ptolémée, Copernic, Kepler, Newton, Leibniz, Kant, et leurs divergences sur la nature, l'étendue et l'origine de l'Univers. Newton imagine un espace-temps absolu, tandis que Leibniz et Kant privilégient un Univers dynamique et structuré. Le paradoxe de la nuit noire questionne l'infinité de l'Univers. Einstein introduit la relativité : l'espace-temps est courbe, influencé par la matière. Hubble découvre la fuite des galaxies, posant les bases d'un Univers en expansion. Lemaître puis Gamow développent le modèle du Big Bang, confirmé par le rayonnement fossile découvert en 1965. La densité de l'Univers détermine son destin : expansion infinie ou effondrement. Le théorème de Birkhoff et le concept de temps cosmique permettent de décrire l'Univers global à partir d'observations locales. Le principe anthropique suggère que l'Univers est tel qu'il permet l'émergence de la vie consciente. Enfin, le texte interroge les limites de la cosmologie, entre observation, extrapolation et interprétation.



N° 20

INTRODUCTION A LA COSMOLOGIE

Christian SCOTTA



**SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES**

Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san.asso.fr - E-mail : san@san-fr.com

Les Cahiers de la SAN

INTRODUCTION A LA COSMOLOGIE

AUTEUR

Qualité auteur

Édition 2006

INTRODUCTION A LA COSMOLOGIE

La Cosmologie étudie la structure de l'Univers, les lois qui le régissent et son évolution.

Au début du ^{xvii}e siècle, la plupart des astronomes pensent que les Étoiles Fixes sont placées sur une sphère solide, centrée sur la Terre (selon le modèle de Ptolémée¹) ou centrée sur le Soleil (selon Copernic). En révélant l'existence d'étoiles invisibles à l'oeil nu, les premières lunettes astronomiques firent éclater la Sphère des Fixes. Giordano Bruno affirme l'infinité de l'Univers²: celui-ci est constitué par des étoiles dispersées dans l'espace illimité, et chacune peut être le centre d'un système planétaire.

Par contre, Kepler² refuse cette infinité²: l'Univers n'a pas le même aspect selon la position de l'observateur. Vu de la Terre, l'Univers est une sphère d'étoiles centrée sur le Soleil, toutes les étoiles étant à peu près à la même distance de nous. Mais un observateur placé sur une étoile du Baudrier d'Orion (c'est l'exemple qu'il prend) verrait les autres étoiles de ce Baudrier avec des tailles apparentes énormes³; pour lui, l'Univers doit présenter une cavité creuse au centre de laquelle se trouve une petite étoile, le Soleil³.

Galilée reste prudent⁴: il estime que les étoiles les plus lointaines sont tout au plus deux ou trois fois plus éloignées que les étoiles les plus proches⁴.

L'Univers d'Isaac Newton⁵

Chez Newton, l'espace et le temps existent indépendamment de la matière.

Les étoiles sont des corps de la même nature que le Soleil, puisque leur lumière est semblable à celle du Soleil. Mais l'attraction universelle implique que le Soleil et les étoiles s'attirent mutuellement (comme la Terre et la Lune). Dans les Principia (1687), Newton se borne à affirmer que les immenses distances qui séparent les étoiles rendent insensibles leurs attractions sur le Soleil. Cet argument est irrecevable car la force gravitationnelle diminue sans jamais disparaître.

Dans d'autres écrits, Newton mentionne l'alternative suivante⁶:

-Êl'Univers est une sphère d'étoiles finie en dimension, plongée dans un espace vide illimité (comme le pensaient les Stoïciens). Dans ce cas, les étoiles doivent tomber les unes sur les autres, à cause de leurs attractions mutuelles, et l'Univers matériel doit s'effondrer sur lui-même, si rien ne s'y oppose.

-Êl'Univers est infini et homogèneÊ: les étoiles sont uniformément dispersées dans l'espace illimité (comme le pensait Giordano Bruno). Une étoile subit des attractions égales provenant de toutes les directions. Newton justifie ainsi l'immobilité apparente des étoilesÊ: l'Univers peut donc rester stable. Cependant, cet équilibre est fragile et peut être détruitÊ: le moindre rapprochement d'étoiles constitue un centre attractif vers lequel s'effondre l'Univers⁶.

On le voit, l'attraction universelle explique très bien les propriétés locales de l'Univers (celles du Système Solaire dont s'occupe Newton) si on fait abstraction du reste (en supposant que les attractions des étoiles sur le Soleil et les planètes sont négligeables ou se compensent). Mais globalement, l'attraction universelle pose l'interrogation sur la structure globale du Cosmos.

De plus, la gravitation n'est pas une loi nécessaireÊ: Dieu aurait pu donner au monde une autre loi d'attraction. La gravitation n'est pas obligatoirement universelle. En effet, Dieu a

La Société d'Astronomie de Nantes

Résolument tournée vers le grand public, la SAN vous propose de découvrir l'astronomie ou d'approfondir vos connaissances dans ce domaine de multiples façons :

Assister aux expositions d'astronomie présentées lors des réunions du vendredi soir, ouvertes à tous les adhérents, au local de la Société à partir de 20h30.

Consulter ou emprunter l'un des mille ouvrages que possède le fonds bibliothécaire.

Participer aux observations de découverte ou de perfectionnement. Vous pouvez également emprunter un instrument.

Assister aux conférences au cours desquelles des astronomes et astrophysiciens de renom viennent présenter les derniers acquis de leurs travaux.

Solliciter la SAN pour animer des actions pédagogiques préparées à l'attention de public scolaire ou adulte.

Visiter les expositions auxquelles la SAN participe régulièrement.

Apporter votre contribution à la réalisation de travaux pratiques d'astronomie tels que la mesure de la masse de Jupiter ou l'évaluation des altitudes des reliefs lunaires.

Réfléchir et débattre des grands thèmes de la physique, de l'astrophysique et de la science en général au sein d'un groupe de réflexion théorique.

Enfin, l'astronomie nécessitant des connaissances et des compétences multiples (en optique, mécanique, électronique, etc.), offrir un peu de votre temps pour la conception ou la réalisation de projets astronomiques.

Pour participer à ces activités, il vous suffit de devenir adhérent.

La Société d'Astronomie de Nantes est une association fondée en 1971 et régie par la loi de 1901.

pu “diversifier les lois de la nature, et faire des mondes de différentes espèces en différentes parties de l'Univers”.

L'Univers de Leibniz

Pour Gottfried Wilhem Leibniz, l'espace et le temps n'existent pas en l'absence de la matière : l'espace est l'ordre des choses qui coexistent et le temps est l'ordre des choses qui se succèdent. Tous les mouvements sont relatifs puisqu'ils se rapportent aux corps matériels. Il n'existe aucun espace vide : l'espace entre les corps célestes est rempli par une matière subtile, l'éther, par laquelle le Soleil peut transmettre aux planètes leurs mouvements de révolution. Leibniz rejette l'action à distance de la physique newtonienne.

L'harmonie préétablie

Parmi tous les mondes possibles, Dieu a choisi le meilleur, celui qui offre le plus d'effets avec le minimum d'action, “celui où il règne la plus grande variété avec le plus d'ordre et où le plus d'effets sont produits par les lois les plus simples. Certes, Dieu pouvait ne pas créer le monde : mais le monde créé doit obéir à des lois nécessaires.

Un compromis entre Newton et Leibniz ?

La Marquise du Châtelet tente de concilier Leibniz et Newton en faisant de l'Univers matériel le référentiel absolu : “le lieu absolu est celui qui convient à un Être en tant qu'on considère sa manière d'exister avec l'Univers entier considéré comme immobile, et son lieu relatif est sa manière d'être avec quelques êtres particuliers ”. Par contre, le temps reste relatif parce que chaque être le mesure différemment.

L'Univers de Kant

En 1718, Edmund Halley¹² compare les positions de trois étoiles (Sirius, Procyon, Arcturus) relevées par Hipparque et Ptolémée avec celles établies par John Flamsteed : il se rend compte que ces étoiles ont bougé, de près de 20 minutes d'arc en 1800 ans (en tenant compte de la Précession des Équinoxes). Les Étoiles Fixes ne sont donc pas immobiles, comme on le croyait jusqu'alors.

En 1755, Emmanuel Kant explique cette mobilité des

étoiles. Les étoiles de notre Ciel appartiennent à un système d'étoiles en révolution autour d'un centre : ainsi, les effets centrifuges des étoiles en révolution équilibrent leurs attractions vers ce centre. A cause de l'effet centrifuge, le système, d'abord sphérique, s'est aplati pour prendre une forme lenticulaire : depuis la Terre, nous voyons notre système par la tranche, sous la forme d'une bande lumineuse que nous appelons la Voie Lactée.

Kant imagine une infinité de systèmes d'étoiles peuplant l'infinité de l'espace vide. L'Univers matériel s'articule autour d'un centre qui est le seul point immobile : tous les groupements d'étoiles sont en révolution autour de ce centre. Cela se comprend à partir de l'origine : au début, seules existaient les particules de matières répandues dans l'espace. La densité de la matière décroît avec la distance au centre absolu : par le jeu des attractions et de leurs répulsions, les particules s'organisent en systèmes. La création a commencé une fois et elle ne finira jamais.

La formation des mondes a commencé au centre, puis elle se poursuit de proche en proche : l'organisation suit l'écoulement régulier du temps. L'Univers a un début mais pas de fin.

Les mondes ne sont pas éternels : au bout d'un certain temps, ils retournent au chaos en s'effondrant sur eux-mêmes. Mais des mondes nouveaux naîtront de ces ruines. Le monde formé est entre les ruines du monde détruit et le chaos du monde non formé.

L'Univers de Kant a donc un centre mais il ne peut pas s'effondrer sur lui-même ; il a un commencement mais son histoire n'est pas finie ; et il n'est jamais partout le même.

Le paradoxe de la Nuit noire

Kepler a donné la première formulation de ce paradoxe. Les étoiles présentent toutes le même diamètre apparent : donc, leurs diamètres réels augmentent avec leurs distances, jusqu'à devenir infinis à une distance infinie : mais dans ce cas, le Ciel devrait nous apparaître brillant et non obscur. Kepler rejette l'infinité de l'Univers, les étoiles sont relativement proches de

physiques en les isolant des autres objets : par exemple, on peut étudier la structure du Système solaire en faisant abstraction des étoiles de notre Galaxie ; on peut aussi étudier la structure de notre Galaxie en faisant abstraction des autres galaxies. Mais ce "principe de séparabilité" a des limites: parfois, il faut tenir compte de la totalité. Ainsi, Newton avec l'attraction universelle, Kepler ou Halley avec le paradoxe de la Nuit Noire, Hubble ou Lemaître avec la fuite des Galaxies : il est conforme à la raison de supposer que la partie observable de l'Univers-accessible à nos instruments d'observation- est représentative de la totalité du Cosmos, laquelle nous échappera toujours²³.

Cependant, Jean-François Gautier nous donne "une leçon de rigueur". Les cosmologistes et leurs vulgarisateurs doivent clairement départager les phénomènes qu'ils observent des interprétations qu'ils en font. La "fuite des galaxies" et le rayonnement cosmologique sont les phénomènes à expliquer. L'expansion de l'Univers est la théorie qui explique ces phénomènes.

Bibliographie

Le présent fascicule n'a pas la prétention d'être exhaustif. Aussi, peut-on conseiller la lecture des livres suivants :

Astronomie-l'Encyclopédie Atlas du Ciel, tome 4, chapitre 'l'évolution de l'Univers'.

Alain Blanchard, L'Univers, édition Flammarion, collection Dominos

Jean-François Gautier, L'Univers existe-t-il?, édition Actes Sud.

Stephen Hawking : Une brève histoire du temps, édition Flammarion.

Hubert Reeves : Patience dans l'Azur, L'heure de s'enivrer, Malicorne, tous les trois aux éditions du Seuil, 'Science ouverte'.

Steven Weinberg : Les trois premières minutes de l'Univers, édition du Seuil, collection 'Point sciences'.

Nature, est déterminée dès le départ, n'est-ce pas réintroduire les causes finales? Nous quittons ici le domaine de la physique.

Hubert Reeves dit que "l'Univers possède les propriétés requises pour amener la matière à gravir les échelons de la complexité". Souvenons-nous de l'Harmonie préétablie de Leibniz : il y a plusieurs mondes possibles, mais Dieu a créé celui qui offre la plus grande perfection. Le principe anthropique ne dit pas autre chose, mais aujourd'hui, on ne parle plus de perfection, mais d'ordre et de complexité.

Les difficultés de la cosmologie

En 1994, Jean-François Gautier a proposé un certain nombre d'objections contre le concept d'Univers. Examinons-en quelques uns. Certains sont classiques : le Physicien se place toujours d'un point de vue extérieur au système qu'il étudie, réellement (physique de laboratoire) ou par l'imagination (en astronomie, par exemple). Mais dans le cas de l'Univers, le Physicien est toujours à l'intérieur du système étudié et il ne peut pas en saisir la globalité. La cosmologie ne peut répondre qu'en posant le principe d'isotropie (voir page 4).

Jean-François Gautier ajoute que "l'Univers n'est pas un objet physique" parce qu'il n'est comparable qu'à lui-même. Toute mesure dimensionnelle ou temporelle ne peut que se rapporter à lui-même. Ainsi, les questions du début ou de l'infinité de l'Univers n'ont pas de sens, parce qu'il ne peut y avoir quelque chose d'antérieur ou d'extérieur à l'Univers. A cet argument, la Physique peut seulement répondre ceci : elle détermine les propriétés du monde observable (limité à l'horizon cosmologique) puis elle les extrapole à une totalité qu'elle n'observe pas. De plus, l'âge de l'Univers n'est pas un âge absolu, mais un âge relatif à la singularité du Big Bang : des physiciens comme Stephen Hawking pensent que le problème d'une singularité initiale sera levé quand la physique aura unifié les 4 interactions de la Nature.

Par contre, on peut douter que la science puisse "se passer du concept d'Univers", comme l'affirme Jean-François Gautier. Dans la plupart des cas, on peut étudier les objets

nous.

Edmund Halley pose le paradoxe en ces termes, en supposant que l'Univers est uniformément rempli d'étoiles. Il imagine des couches d'étoiles, de même épaisseur, et concentriques à la Terre.

- la luminosité d'une couche d'étoiles augmente avec la surface de cette couche, car le nombre d'étoiles augmente avec la surface. Donc, la luminosité est proportionnelle au carré de la distance d'une couche.

- l'intensité de la lumière décroît avec le carré de la distance. En effet, la luminosité d'une étoile diminue quand sa surface apparente décroît, ou quand le carré de son rayon apparent décroît. Mais comme ce rayon apparent dépend de la distance de l'étoile, la luminosité de l'étoile décroît avec le carré de sa distance. La luminosité de la couche d'étoile décroît de la même façon.

L'accroissement du nombre d'étoiles compense la diminution de l'éclat de ces étoiles : par conséquent, toutes les couches ont le même éclat et envoient la même quantité de lumière. Si on a une infinité de couches, le Ciel doit nous apparaître très brillant.

Ce paradoxe pose le problème de la structure globale du cosmos. Il sera reformulé par De Chéseaux et par Olbers.

L'Univers d'Einstein

La Relativité d'Albert Einstein abandonne les concepts newtoniens d'espace et de temps absolus : deux observateurs en translation l'un par rapport à l'autre, et à grande vitesse relativement à la vitesse invariante de la lumière, ne mesurent pas les mêmes intervalles d'espace et de temps.

La gravitation n'est plus une force. Une masse déforme l'espace qui devient courbe, c'est-à-dire que sa géométrie n'est plus euclidienne : la trajectoire inertielle d'un corps libre de toute force n'est plus une droite mais une géodésique (courbe qui épouse la courbure de l'espace). La présence d'une masse déforme aussi le temps : le rythme d'une horloge ralentit en présence d'une masse.

La cosmologie d'Einstein s'appuie sur deux principes, celui d'isotropie et d'homogénéité.

Le principe d'isotropie suppose que les propriétés de l'Univers sont partout les mêmes. La partie est supposée semblable au tout : on peut donc extrapoler à tout l'Univers les propriétés qu'on observe localement, dans la partie observable de l'Univers.

Tous les observateurs, où qu'ils se trouvent, voient donc la même chose. Certes, on ne peut jamais vérifier ce principe puisqu'on ne peut jamais voir la totalité de l'Univers¹⁵. Mais on ne peut pas prouver qu'il est faux.

Le principe d'homogénéité en découle et affirme que la répartition de la matière par unité de volume (la densité de matière) est partout la même. Cette densité est évaluée sur de très grands volumes, puisque localement l'Univers n'est pas homogène. On n'a donc pas besoin de voir la totalité de l'Univers pour connaître certaines de ses propriétés, en l'occurrence sa densité moyenne, à condition d'admettre le principe d'isotropie. Cette "densité moyenne" est la quantité de matière par unité de volume (en grammes par centimètre cube).

Si la densité moyenne est faible, la matière est distribuée uniformément mais n'est pas assez dense pour courber l'Univers : l'Univers est presque 'plat', c'est-à-dire que sa géométrie est presque euclidienne.

Si cette densité moyenne dépasse la 'valeur critique' de 1029 g.cm^{-3} , la matière courbe l'espace jusqu'à le fermer. La lumière suit une géodésique : en allant toujours droit devant elle, elle reviendra à son point de départ au bout de quelques 100 milliards d'années. L'espace est alors une surface sphérique à trois dimensions (espace de Riemann) avec un volume fini et un rayon de 35 à 40 milliards d'années-lumière.

En élaborant ce modèle d'Univers fini mais sans limites (analogue à la surface d'une sphère), Einstein se rendit compte que cet Univers devait s'effondrer à cause de l'attraction exercée par la matière qu'il contient. Persuadé que l'Univers doit être

pensant''.

Dans la cosmologie moderne, l'espace et le temps sont indissociables. La phase de l'atome primitif est une "singularité" : les lois de la physique ne s'y appliquent pas. La question de savoir ce qu'il y avait avant le Big Bang n'a pas de signification en physique, à moins que celle-ci n'apprenne à décrire les singularités.

Ensuite, l'expansion étant la même pour tous les observateurs, où qu'ils se trouvent, chacun relève la même séquence des événements. Le rayonnement cosmologique de 3ÉK est le même pour tous. Cette température permet de nous situer dans l'histoire de l'Univers. Mais des observateurs très éloignés les uns des autres ne pourront jamais communiquer simultanément leurs observations, à cause de la vitesse finie de la lumière (et de tous les rayonnements).

Nous avons donc un référentiel universel, un 'temps cosmique', valable pour tous les observateurs mais interne à l'Univers. Ce temps est rythmé par l'expansion et ne s'écoule donc pas régulièrement, puisque l'expansion ralentit sans cesse. Le passé de l'Univers est différent de son présent : notre flèche du temps, orientée du passé vers le futur, n'est donc pas une notion entièrement subjective.

Le principe anthropique

Ce principe (formulé en 1974 par Brandon Carter) dit en substance ceci : l'Univers nous apparaît tel qu'il est parce que notre existence n'est possible que dans les conditions où s'est déroulée l'histoire de l'Univers. Une autre histoire de l'Univers n'aurait pas permis notre existence. Celle-ci était-elle déterminée par les conditions initiales, au moment du Big Bang ? Autrement dit, notre existence était-elle déterminée depuis le début ?

Il est vrai qu'en faisant varier un peu les conditions initiales (intensités des forces gravitationnelle, électromagnétique, ou nucléaire), on obtiendrait, selon les calculs, un Univers tout à fait différent : expansion trop rapide, impossibilité pour la matière de former des étoiles, etc.). Mais dire que notre existence, ou du moins celles des êtres intelligents capables de s'interroger sur la

l'extérieur se compensent. La quantité de galaxies contenues dans la sphère (la masse de la sphère) permet de calculer une vitesse minimale par laquelle la galaxie A peut s'éloigner indéfiniment de notre Galaxie. Cette vitesse augmente avec la distance de la galaxie A à notre Galaxie G. D'autre part, selon Hubble, la vitesse d'éloignement de cette galaxie A augmente aussi avec la distance à notre Galaxie. Par conséquent, le rapport entre la vitesse de récession et la vitesse de libération est le même quelque soit la sphère considérée. On peut donc calculer une densité critique où la vitesse de récession est égale à la vitesse de libération. Ce théorème est une application du principe d'isotropie: on peut connaître une propriété globale de l'Univers à partir d'un échantillon (supposé) représentatif de celui-ci. D'autre part, il permet de s'exprimer en termes de physique classique.

Si la densité est égale ou plus faible que la densité critique, la vitesse de récession est supérieure à la vitesse de libération, et l'expansion se poursuivra indéfiniment. Dans ce cas, l'Univers a un commencement (en comptant le temps depuis le début de l'expansion) mais pas de fin.

Si la densité est forte, la vitesse de récession est plus faible que la vitesse de libération: l'expansion s'arrêtera et le mouvement pourra s'inverser en une contraction. Dans ce dernier cas, l'Univers a un début et une fin, le décompte du temps étant compris entre le début de l'expansion et la fin de la contraction.

Le temps cosmique

Le temps et l'espace apparaissent au moment du Big Bang et se déploient avec l'expansion. Saint Augustin (ive siècle) pensait déjà que le chaos primitif était hors du temps puisqu'il ne s'y produisait aucun changement¹⁷. Une fois organisée, la création est soumise au temps car elle connaît le changement¹⁸. Pour Spinoza, "le temps et la durée ont commencé avec les choses. Car le temps est la mesure de la durée ou plutôt il n'est qu'un mode de pensée. Il ne présuppose donc pas seulement une chose créée quelconque, mais avant tout les hommes

statique, il introduisit une "force de répulsion cosmique" qui augmente avec la distance entre les masses et augmente avec la densité moyenne de la matière. Cette force, environ 1028 fois plus faible que la gravitation (donc imperceptible expérimentalement), doit suffire à équilibrer la tendance à l'effondrement de l'Univers.

La fuite des galaxies

En 1928, l'astronome américain Edwin Hubble annonce la découverte suivante :

- les raies spectrales de toutes les galaxies présentent un décalage vers le rouge (à l'exception de 5 galaxies proches).
- ce phénomène est interprété comme un éloignement des galaxies par rapport à nous. Cette fuite des galaxies serait due à l'effet Fizeau-Doppler : les raies d'absorption, superposées au fond continu du spectre de lumière, glissent sur ce fond continu si la source lumineuse se déplace par rapport à l'observateur, vers le bleu si la source se rapproche, et vers le rouge si la source s'éloigne.

- la vitesse de la fuite ou de la récession d'une galaxie augmente avec sa distance.

Constante de Hubble

La vitesse de fuite est une constante multipliée par le temps : c'est la constante H, dite de Hubble, dont la valeur moyenne est de 80 km.s⁻¹ par Mégaparsec ; cependant, les estimations varient entre 50 et 100 km.s⁻¹ par mégaparsec.

Temps écoulé depuis le début de l'expansion

En supposant que la constante de Hubble n'a pas varié, l'inverse de cette constante indique depuis combien de temps s'effectue la fuite des galaxies. On peut aussi parler d'âge de l'Univers, compté à partir du moment où les galaxies ont commencé à se fuir les unes les autres.

Âge de l'Univers (avec $H=75\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$)

Quand la vitesse de récession d'une galaxie devient égale à la vitesse de la lumière, la galaxie n'est plus observable car sa

lumière ne peut plus nous parvenir. On parle d'horizon cosmologique. Avec $H=75$, on trouve cet horizon

Cet horizon marque la limite de l'Univers observable, qui est une sphère de 13 milliards d'années-lumière de rayon.

L'Univers de l'Abbé Lemaître

Après avoir pris connaissance des travaux de Hubble, l'Abbé Georges Lemaître présenta en 1928 une communication intitulée : "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques¹⁶".

La masse de l'Univers est constante et son rayon croît avec le temps. La fuite des galaxies (les nébuleuses extragalactiques) relèvent d'un mouvement d'expansion : les galaxies ne s'éloignent pas les unes des autres dans un espace vide : l'Univers se dilate et entraîne les galaxies dans sa dilatation. Autrement dit, les dimensions de l'Univers augmentent avec le temps, comme une carte qui se dilaterait.

L'Univers est assimilé à un gaz dont les galaxies sont les molécules. La masse de ce gaz étant constante, sa densité décroît quand son volume augmente. Mais attention, ce gaz ne se répand pas dans un espace vide.

Un observateur placé sur une molécule de ce gaz verrait toutes les autres molécules s'éloigner de lui : c'est pourquoi nous voyons toutes les galaxies s'éloigner de nous. Nous n'occupons pas une place privilégiée.

En inversant le processus de l'expansion, on constate que toutes les galaxies se rapprochent les unes des autres jusqu'à se concentrer en un 'atome primitif'. Autrement dit, les dimensions de l'Univers diminuent et la même quantité de galaxies se

trouvent dans un espace toujours plus petit.

Le modèle de Georges Gamow (1948)

Reprenons l'analogie du gaz : la densité et la température d'un gaz augmentent quand le volume diminue. L'atome primitif devait avoir une densité et une température énormes. Les 'photons' de lumière avaient une longueur d'onde correspondant à une température d'environ 3000°K . La matière était en interaction continue avec le rayonnement.

Avec l'expansion, le Big Bang, l'Univers se refroidit (comme un gaz qui se détend) et le rayonnement peut passer sans interagir constamment avec la matière : l'Univers devient transparent. Les 'photons' de lumière se déversent dans un espace toujours plus grand. Comme on estime que la taille de l'Univers a été multipliée par mille depuis le début de l'expansion, la longueur d'onde des photons a augmenté et leur énergie a diminué : le rayonnement des photons devrait actuellement correspondre à une température de $10^{-7}888\text{K}$. En 1965, la découverte par Penzias et Wilson d'un rayonnement omnidirectionnel correspondant à une température de $3^{\circ}0000\text{K}$ a été interprété comme une confirmation de la prédiction théorique de George Gamow.

Le modèle du Big Bang permet d'expliquer le paradoxe de la nuit noire : on ne perçoit qu'une quantité finie de lumière, d'une part à cause de l'horizon cosmologique et d'autre part à cause de l'âge fini de l'Univers.

L'avenir de l'expansion

En l'absence de matière, l'expansion de l'Univers se déroulerait à un rythme constant. Mais l'attraction exercée par la matière (représentée par les galaxies) freine cette expansion : la densité de matière est donc un paramètre fondamental.

Théorème de Birkhoff (1923)

Traçons une sphère centrée sur notre Galaxie G et passant par une galaxie A. Le théorème de Birkhoff indique que seule la masse comprise à l'intérieur de cette sphère (de rayon GA) doit être prise en compte pour calculer le mouvement de la galaxie A par rapport à notre Galaxie G. En supposant que l'Univers est homogène et infini, les attractions des autres galaxies placées à