



Roan Rubiales

DE LA DOUBLE EXPANSION DE L'UNIVERS

Roan Rubiales

De la double expansion de l'univers

Préambule

Je me suis toujours demandé à propos des étoiles : pourquoi brillent-elles ? A cette question, vers mes 10 ans, on me répondait que c'est parce que ce sont d'énormes boules de plasma d'hydrogène et d'hélium, des gaz très chauds, et que ce qui est très chaud produit de la lumière, comme une ampoule. On ajoutait, lorsque j'entrais au lycée, que cette chaleur provient de la fusion nucléaire des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium : sous l'effet des forces gravitationnelles intenses qui contractent la boule de plasma, les températures augmentent dramatiquement et afin de contrer la force gravitationnelle, les atomes d'hydrogène fusionnent et créent une force de pression qui contre cette force gravitationnelle. J'obtins ainsi des réponses de plus en plus détaillées à mesure que ma culture scientifique grandissait, et que mon intérêt pour l'astronomie s'amplifiait. Mais ces réponses ne répondaient pas à ma question : elles répondaient à « comment » et non « pourquoi ». Je me suis posé une multitude de questions de la même nature sur divers objets et concepts du cosmos, mais ces questions sont restées sans réponse. L'univers est immense et étrange : il est composé d'objets tous plus extrêmes les uns que les autres, des trous noirs si denses que la lumière ne peut leur échapper jusqu'à la matière invisible liant les étoiles dans les galaxies, probablement parce qu'elle est plus petite encore que les atomes. Mais comment peut-on donner du sens à tous ces phénomènes, qui se produisent sans aucun but apparent ? L'univers est-il

condamné à rester absurde ?

Je me questionnerai ici sur un phénomène qui me tient particulièrement à cœur : l'expansion de l'univers. Cette dernière présente en fait une dualité. Son premier aspect est bien connu des astrophysiciens, et a été vérifié par l'observation et la démonstration. L'univers s'étend physiquement, et cet agrandissement s'accélère à mesure que le temps avance, mais pas de manière égale partout.

Le deuxième aspect de l'expansion de l'univers est intrinsèque à l'homme et à la connaissance scientifique. Nous ne voyons l'univers qu'à travers notre connaissance de ce dernier. Cette connaissance peut se faire par le biais de l'observation, de la découverte des lois physique régissant les choses... etc. Cependant, l'univers tel que nous le connaissons aujourd'hui n'a pas toujours été aussi bien connu : l'univers connu s'est étendu au fur et à mesure des avancées scientifiques, au cours de notre histoire.

Les deux aspects de l'expansion universelle que je vous présente ont l'air sans lien, de prime abord, mais ils sont reliés par une entité bien connue et particulièrement surveillée en astrophysique : la lumière. Elle nous permet d'observer cet univers qui grandit, et donc d'étoffer notre connaissance de ce dernier. Cela donne lieu à une course entre expansion universelle et observation astronomique. Cependant cette course est perdue d'avance : nous ne pouvons pas rivaliser avec les forces astronomiques. Alors, que faire ?

Embarquons dans cette aventure aux confins de l'univers en expansion et de la connaissance humaine, afin d'explorer ces questions qui me taraudent, et qui en soulèveront peut-être de nouvelles chez vous.

Chapitre I : Notre univers à travers le regard humain

L'univers nous apparaît naturellement dans la vie de tous les jours : la journée nous apercevons le Soleil, les étoiles apparaissent la nuit (les plus lointaines d'entre elles sont à quelques milliers d'années-lumière, la distance parcourue par la lumière en un an) ... Mais nous ne pouvons percevoir qu'une infime partie de l'univers à l'œil nu, soit parce que la lumière est trop affaiblie par les distances, soit parce que la lumière ne peut être interprétée par notre œil (les ondes électromagnétiques invisibles, notamment des infrarouges et des ultraviolets). La recherche scientifique nous a donc poussés à concevoir des outils toujours plus ingénieux pour explorer le ciel, de la première lunette astronomique inventée par Kepler au XVII^e siècle jusqu'aux télescopes spatiaux Hubble et James Webb. Chaque nouvel instrument nous permet de révéler une partie du ciel jusqu'alors inexplorée, agrandissant l'univers connu, permettant des découvertes hors du commun : des objets aux proportions gargantuesques, de nouvelles théories ou des approfondissements des théories déjà mises à l'épreuve... etc. L'univers que nous connaissons a donc grandi, d'année en année, depuis que les hommes observent le ciel, c'est ce qu'on appelle l'astronomie.

L'astronomie (« loi des astres » en grec) a pour but d'expliquer l'origine, l'évolution et les propriétés des astres. Cette discipline, beaucoup pratiquée par les amateurs, prend ses racines avant même l'Antiquité et l'invention du premier engin d'observation, dans la préhistoire.

Les premiers regards sur le monde

Dans la préhistoire, les hommes observaient déjà le ciel, mais leur ignorance ne concernait pas que ce qui est au-delà de la Terre. En effet, le premier regard de l'homme sur le monde était « lococentrique » : c'est-à-dire centré sur la localité, les environs. Les différentes communautés, qu'on peut organiser en villages, se déplaçaient peu soit parce qu'ils ne pouvaient pas, soit parce qu'ils n'en avaient pas besoin. L'univers connu se réduisait alors au village et à ses environs directs, ainsi qu'à la voûte céleste surplombant le village.

Dans l'Antiquité, avec l'avènement de l'exploration, et l'évolution des connaissances, le monde connu s'étendait grossièrement à la Terre entière, à l'exception de ses zones inexplorées qui seront découvertes plus tard. Les premiers modèles de géocentrisme firent alors leur apparition dans le monde Grec : on cherchait à déterminer la loi régissant les astres au-delà du monde nous entourant. Aristote fut le premier (dont il reste une trace écrite) à émettre un modèle où la Terre était placée au centre, entourée des astres gravitant autour d'elle. Un tel modèle fut adopté parce qu'il avait de grandes chances d'être la réalité compte tenu des connaissances en physique de l'époque : le modèle de la chute des corps n'avait pas encore été mis en équation, et la loi de l'univers devait donc se plier à la volonté humaine, à notre conception de l'harmonie. Pourtant l'idée que la Terre n'était pas au centre de l'univers fut évoquée dès le II^e siècle avant notre ère par l'astronome Hipparque qui observa que le Soleil ne tournait pas de manière constante autour de la Terre à cause de la différence de durée entre les saisons (les durées séparant les équinoxes et les solstices). Il émit alors l'hypothèse d'un point abstrait autour duquel tournerait la Terre et le Soleil, ce point étant légèrement éloigné du centre de la

Terre. Cette divergence entre les modèles montre une première « résistance » de l'univers au regard humain, qui dut alors se plier aux exigences d'un univers encore difficile à observer. Mais le modèle privilégié resta celui du géocentrisme, puisqu'il concordait avec la représentation catholique du monde au Moyen-Âge.

Un monde qui ne se plie pas au regard humain

Ainsi, Jusqu'au XVIIe siècle, l'univers connu se réduisait à la Terre qui était au centre de tout ce qui existe, entourée par le Soleil, les planètes, les étoiles, ce qu'on appelle le géocentrisme. Mais cette représentation fut secouée par l'idée neuve d'un héliocentrisme évoquée en 1502 par Copernic puis étayé par Johannes Kepler, une représentation selon laquelle le Soleil serait le centre de l'univers, et la Terre l'un des astres en révolution autour de ce dernier. Cette représentation fit énormément grossir notre univers : il ne se réduisait plus à une planète sphérique entourée d'une coquille sur laquelle les corps célestes sont au même plan, mais au système solaire quasiment tel que nous le connaissons aujourd'hui. Cette représentation fut ensuite corroborée par la théorie de la gravitation de Newton en 1687 qui remporta alors un franc succès en permettant d'expliquer les révolutions au cœur du système solaire, et donc pourquoi le corps le moins grave tourne autour du plus grave¹ et pas le contraire. Les lois du mouvement de Newton ont confirmé les lois empiriques de Kepler, et par extension son modèle.

Parallèlement à l'évolution du modèle du système solaire naissait l'idée de « galaxie » : notre système solaire ne serait

¹ « Grave » signifie massif, mais on ne parlait pas de masse à l'époque, on ne l'avait pas liée à la gravité, il faudra attendre la relativité d'Einstein pour cela.

qu'un système stellaire parmi tant d'autres, autant qu'il y a d'étoiles visibles et invisibles dans le ciel. Le nom de « Voie Lactée » remonte au Ve siècle avant J.-C., et de nombreuses observations de notre galaxie suivirent, cependant personne ne se doutait de la véritable nature de la Voie Lactée. C'est seulement au milieu du XVIIIe siècle que Thomas Wright émet l'hypothèse selon laquelle la Voie Lactée possède cette forme de trace dans le ciel, puisque nous sommes immergés dedans, et qu'elle a la forme d'un disque. Il imagine aussi qu'il existe une infinité de galaxies similaires à la nôtre. Il fut suivi par Emmanuel Kant qui parle d'« univers-île » et dit que notre galaxie n'est pas au centre d'un univers constitué d'une multitude d'îlots. Cette idée passa pratiquement inaperçue. On se contenta de dire que le centre de l'univers était celui de notre galaxie, elle-même étant l'univers entier.

Le modèle moderne de l'univers

C'est en 1923 que Edwin Hubble confirme l'idée de plusieurs galaxies : il arrive à conclure que ce qu'on appelait jusqu'alors des « nébuleuses spirales » s'éloignent de nous à grande vitesse en utilisant ses observations et la mécanique ondulatoire. C'est au même moment qu'il découvre que l'univers est en expansion.

Aujourd'hui, les progrès techniques nous permettent d'observer l'univers avec une qualité inégalée, et ce grâce à l'évolution des techniques d'observation. La première évolution considérable est la création de télescopes au diamètre imposant (le diamètre de l'ouverture permet de capter plus de lumière, et donc d'obtenir une meilleure résolution d'image), avec par exemple le Very Large Telescope (VLT) au Chili : le plus grand observatoire jamais réalisé, placé en hauteur dans la cordillère

des Andes là où le ciel est le plus pur², avec ses quatre télescopes de 8,2 mètres de diamètre d'ouverture chacun. Cependant, le réel progrès fut réalisé dans la manière dont ces télescopes sont utilisés : en les pilotant informatiquement, on peut combiner plusieurs télescopes et ainsi créer un super-télescope avec plusieurs plus petits. Les surfaces d'ouverture s'ajoutent, ce qui permet d'obtenir des images du ciel de grande qualité. La seconde évolution est l'avènement des télescopes spatiaux tels que Hubble, ou plus récemment le James Webb Telescope. En effet, la plupart des images de corps célestes présentes sur internet sont issues de ces télescopes.

Enfin, la découverte de la finitude de la vitesse de la lumière nous donna un outil d'observation très pratique : voir loin, c'est voir dans le passé. De plus, cette vitesse sert de limite : aucun objet physique ne peut la dépasser. Lorsqu'on observe un astre, sa lumière a mis un certain temps à nous parvenir, et cette lumière nous montre l'astre tel qu'il était au moment de l'émission de lumière. Par exemple, la lumière du Soleil met huit minutes à nous parvenir. S'il venait à disparaître, nous mettrions huit minutes à nous en rendre compte. Plus généralement, nous observons dans le ciel des étoiles telles qu'elles étaient des années avant, voire des millions et des milliards d'années avant avec des outils appropriés. Il n'y a aucun moyen d'accéder à l'état actuel d'un objet lointain, on ne peut se contenter que de son état passé, et modéliser son évolution avec nos connaissances.

L'univers étant en expansion et potentiellement infini, on ne peut plus parler de centre de l'univers, mais une nouvelle

² Le principal obstacle à l'observation est l'atmosphère terrestre : l'air perturbe les rayons en les déviant légèrement, ce qui réduit la résolution (capacité à séparer deux points très proches). Cet effet est réduit avec la hauteur, où il y a moins d'air, et est complètement annulé pour les télescopes spatiaux, car il n'y a plus d'air là où ils sont, au prix d'un diamètre d'ouverture plus petit.

limite vient se heurter à nous : la vitesse de la lumière étant finie et constante en tout lieu d'après la relativité restreinte d'Einstein, seule une partie s'offre à nous, une partie d'autant plus grande que l'univers est vieux, le reste étant inaccessible.

Chapitre II : Un univers infini qui grandit

Avec les moyens modernes d'observation astronomique, mais aussi grâce aux théories physiques toujours plus précises et élaborées, nous commençons à vraiment bien connaître l'univers. Ce n'est que récemment dans l'histoire de l'humanité (il y a 100 ans) que nous avons déterminé que l'univers s'étend, et que nous avons aussi émis l'hypothèse de la naissance de l'univers : le Big Bang. De plus, les questions qui se posent désormais nous transcendent complètement : notre univers est-il infini ? Quelle est la forme de l'univers (dans un espace possédant sûrement plus de quatre dimensions) ?

Notre univers grandit (très vite)

Au cours de son exploration de l'univers l'entourant, l'humanité fit une découverte vertigineuse : l'univers qui l'entoure serait en train de grandir. Cette découverte a été largement vulgarisée ces vingt dernières années : il s'agit d'un phénomène découvert par Edwin Hubble³, astronome américain, en 1929 pendant ses observations des galaxies. Il arriva au mont Wilson où avait été construit le plus puissant télescope au monde à l'époque afin d'observer les taches observer sur des télescopes moins puissants qu'on appelait « nébuleuses »⁴. Il put alors

³ En réalité, ce phénomène a en fait été observé plus tôt en 1917 par Vesto Slipher qui calculait les vitesses de « nébuleuses » et conclut par leurs vitesses bien plus grandes qu'anticipé qu'elles étaient hors de notre galaxie.

⁴ Une nébuleuse est, étymologiquement, une tache diffuse à l'observation, et sont, en astronomie, des nuages de gaz où naissent les étoiles. On considérait les galaxies comme étant des nébuleuses avant l'article de Hubble sur les galaxies, puisqu'elles se ressemblaient beaucoup avec les

prouver que ces nébuleuses étaient en réalité des objets très éloignés, en dehors même de notre galaxie : d'autres galaxies. Dans la foulée de la découverte d'autres galaxies que la Voie Lactée, il observa un phénomène anormal : le décalage vers le rouge. Ce phénomène s'observe lorsqu'on s'intéresse au spectre d'émission des galaxies, le spectre étant une sorte de carte de la lumière qu'un corps émet dans toutes les longueurs d'onde. Ces longueurs d'onde désignent des types de lumières, de la plus faible longueur d'onde à la plus grande : les rayons Gamma, les rayons X, l'ultraviolet, la lumière visible, les infrarouges, les micro-ondes, les ondes radio. Un décalage vers le rouge s'observe lorsque l'on connaît le spectre d'émission normal d'un corps, ce qui est le cas d'une galaxie puisqu'on connaît assez bien ce qui la compose et la lumière que ses composants émettent. On observe alors que le spectre entier est décalé vers les longueurs d'ondes grandes, ce qui veut dire une seule chose : le corps qu'on observe s'éloigne de nous, grâce à l'effet Doppler.

Hubble découvrit alors que toutes les galaxies extérieures à la Voie Lactée s'éloignent : c'est l'expansion de l'univers. Attention ici, ce ne sont pas les frontières de l'univers qui avancent, mais bien de l'espace qui est « créé » entre les choses. L'astrophysicien Hubert Reeves qualifie l'univers de « pudding aux raisins qui gonfle au four », et nous sommes les raisins qui s'éloignent les uns des autres sous l'effet de l'apparition d'alvéoles dans le gâteau. On impute cette expansion à une énergie qualifiée d'énergie « noire » à cause de l'impossibilité à la détecter. La détection de cette énergie serait une avancée majeure en astrophysique. Grâce à l'effet Doppler, on peut même calculer, avec une précision proportionnelle à la précision de mesure du spectre, la vitesse d'éloignement des galaxies. Il se trouve que cette vitesse est d'autant plus grande que la galaxie est lointaine, ce qui provoque une augmentation

exponentielle de la vitesse d'expansion. Hubble a mesuré une constante qui porte aujourd'hui son nom : la constante de Hubble qui quantifie la vitesse d'éloignement en fonction de la distance. La mesure de cette constante est primordiale afin de comprendre pleinement l'expansion de l'univers. Cependant, la récente réestimation de cette constante a donné un résultat plus élevé que calculé par le passé par Hubble lui-même, ou dans des travaux de recherche postérieurs. La constante de Hubble est estimée à environ 73,3 kilomètres par seconde par mégaparsec.⁵ Cela rend alors imaginable des objets s'éloignant de nous à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

Par exemple un objet à 13 milliards d'années lumières de nous s'éloigne à 297 700 km/s, soit presque la vitesse de la lumière d'environ 300 000 km/s. Cet objet reste visible puisque l'univers est assez vieux pour que sa lumière nous parvienne, mais cet objet pourrait un jour s'éloigner de nous à une vitesse dépassant la vitesse de la lumière. Attention, la vitesse de la lumière ne peut pas être dépassée par un objet physique, les objets lointains respectent toutefois cette loi, puisqu'ils ne se déplacent pas vraiment. C'est l'espace les contenant qui se déplace. Cet espace les emmène avec eux à la manière d'un tapis roulant, et l'espace lui-même n'étant pas un corps physique, il échappe à toute limite de vitesse. Les objets contenus dans un espace s'étalant plus vite que la lumière deviennent alors à jamais inaccessibles : on dit qu'ils quittent l'univers observable, même si leur version passée reste visible, puisque la lumière voyage à une vitesse finie. Comment peut-on qualifier ces objets ? Comment prouver leur existence s'il ne reste plus de trace d'eux, sinon une image de leur passé ?

⁵ Un mégaparsec vaut 3 millions d'années-lumière, soit cent milliards de fois la distance Terre-Soleil. Un parsec est défini comme la distance entre le Soleil et un observateur pour qu'il voie la distance Terre-Soleil comme une seconde d'arc (1/3600 degrés), maintenant on dit qu'il vaut 3,26 années lumières.

La naissance de l'univers, une période difficile à explorer

Cependant, la connaissance de l'univers ne se résume pas à la connaissance de ses dimensions spatiales. L'objectif de l'astrophysique est aussi d'étudier ses dimensions temporelles : le passé de l'univers ainsi que son avenir. L'univers, en plus d'être en expansion, a vu sa vitesse d'expansion varier au cours de sa vie. En effet, dans le modèle actuel, l'univers est daté. Il n'a pas toujours existé sous sa forme actuelle et a même 13,7 milliards d'années. La naissance de l'univers est appelée Big Bang en référence au nom ridicule donné à la théorie de la naissance de l'univers de Georges Lemaître⁶ par ses détracteurs, et l'expansion de l'univers serait donc une conséquence du Big Bang.

Bien que la théorie du Big Bang soit très bien corroborée par les observations, elle reste une théorie qui pourra peut-être un jour être mise en déroute. Cette incertitude provient de l'impossibilité d'observer l'univers tel qu'il était de sa naissance, à 0 an, jusqu'à environ l'âge de 300 000 ans environ. Cela provient de la trop grande densité de l'univers à l'époque : il était si dense que la lumière ne pouvait pas le traverser. Aujourd'hui, nous pouvons au mieux observer le rayonnement de l'univers à ses 300 000 ans, l'instant précis où la lumière s'est mise à traverser l'univers : c'est ce qu'on appelle rayonnement fossile ou fond diffus cosmologique. Ce rayonnement fossile, prédit par le physicien Georges Gamow en 1948, puis observé par hasard en 1964 par Penzias et Wilson, nous donne l'image d'un univers qui s'est refroidit à une température moyenne de

⁶ A l'époque, Lemaître a présenté sa théorie à Einstein qui la qualifia de « abominable » en 1927 pendant un congrès à Bruxelles. Einstein resta longtemps opposé à l'idée que l'univers ait un début, jusqu'en 1931.

5K (ou -268°C). En conséquence, on ne peut que modéliser ce qu'il s'est passé lors du Big Bang, et c'est très compliqué... En effet, il faudrait pouvoir unifier la relativité (théorie de l'infiniment grand) et la mécanique quantique (théorie de l'infiniment petit) pour étudier un milieu tel que l'univers à sa naissance, et cette unification est aujourd'hui le nerf de la guerre en astrophysique.

Cependant, une chose est sûre : l'univers n'a pas toujours grandi à la même vitesse. Je ne parle pas de l'accélération de l'éloignement des galaxies entre elles sous l'effet de la distance croissante, mais bien d'une variation de la constante de Hubble au cours du temps, et particulièrement à la naissance de l'univers. L'univers, à l'instant zéro, serait devenu infiniment plus grand en un instant infiniment court⁷. Cette période est nommée « inflation cosmique » (Fig. 1). La constante de Hubble aurait par la suite diminué pour atteindre sa valeur actuelle, et il est impossible de savoir si elle va encore varier.

L'autre inconnue du Big Bang concerne la taille de notre univers. Il est déjà difficile de s'imaginer l'espace dans lequel nous existons grandir, mais s'imaginer que cet espace est peut-être lui-même contenu dans un espace plus vaste, avec plus de dimensions, est encore plus complexe. Il est pourtant possible de déterminer la « forme » de l'univers. Cette forme est liée à la courbure de l'espace : il faut se représenter notre espace comme une feuille, on peut la replier sur elle-même et essayer de former une sphère (univers fini sphérique), on peut la plier afin que ses bords ne se touchent pas (univers infini hyperbolique) ou même la mettre à plat (univers infini plat). La courbure générale de l'espace se calcule grâce à la relativité générale d'Einstein, et ce

⁷ Soit un facteur d'expansion de 10^{27} (à peu près le nombre d'atomes dans l'univers) en 10^{-33} secondes (c'est vraiment très court, comparer cet instant à une seconde revient à comparer la taille d'un virus à celle de l'univers observable).

grâce à la quantité de matière et d'énergie dans notre univers, une quantité qu'on peut estimer avec une bonne précision. Mais n'oublions pas que notre univers est à quatre dimensions, la quatrième étant le temps. Il faut l'éliminer du modèle pour pouvoir trouver la forme de l'univers, et on peut le faire en connaissant la constante de Hubble. On trouve alors une courbure critique nulle : notre univers serait donc très plat, mais impossible de déterminer s'il est fini ou infini à cause de l'incertitude sur la mesure de la courbure de l'espace. Il est donc impossible de savoir si notre univers est fini ou infini.

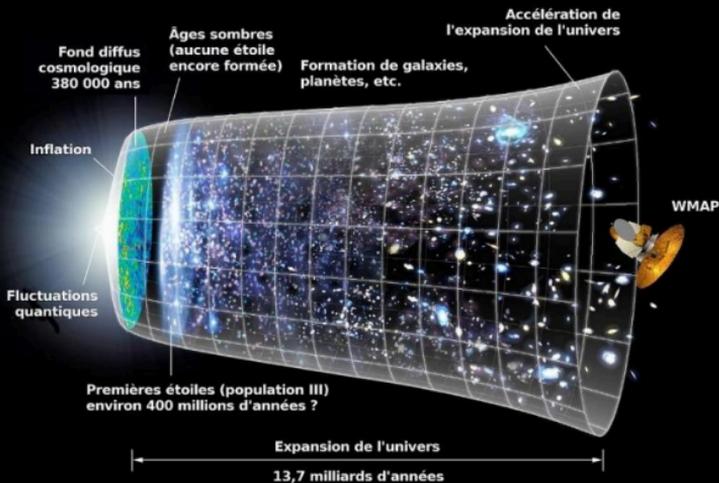


Fig. 1 : Frise chronologique de l'univers, du Big Bang à aujourd'hui.

Crédit : NASA/WMAP Science Team

Chapitre III : L'univers exploré par la connaissance humaine

Nous avons vu que le cosmos est un espace étrange. Nous l'abordons pleins de questions, et quand nous pensons en approfondir notre connaissance, nous ressortons avec encore plus de questions. La recherche scientifique, particulièrement en astrophysique, nous apprend à quel point nous sommes ignorants. Cette ignorance prend racine dans un espace qui ne semble pas vouloir de nous, à première vue. Presque tout s'éloigne de nous, et ce tout ne reviendra jamais. Pire encore, il pourrait disparaître de notre portée de vue, et deviendrait alors inatteignable à jamais. Cependant, un miracle s'est produit. Au sein d'un univers dans lequel le désordre augmente sans cesse, un phénomène à la complexité infinie s'est produit : la vie. Et cette vie aujourd'hui essaie de comprendre l'univers qui l'a enfantée, et de prédire son évolution future avec le peu de connaissance qu'elle possède.

Le problème des objets sortants

L'expansion accélérée de l'univers entraîne diverses conséquences pour nous, et la première est liée à son caractère accéléré. En effet, plus un objet est lointain, plus il s'éloigne vite de nous, et donc plus vite il va s'éloigner. Attention, ce ne sont pas les objets qui se déplacent en réalité : leur énergie de mouvement n'est pas affectée. C'est l'espace qui contient ces objets qui se dilate, de l'espace « apparaît » d'une certaine manière entre les objets. Les corps célestes sont soumis à la loi de la relativité leur interdisant de se déplacer plus vite que la lumière, cependant, l'espace n'est pas soumis à cette règle.

L'espace peut donc être déplacé à des vitesses bien plus rapides que la lumière. Et c'est ce qui se produit très loin de nous. Nous vivons une époque intéressante à ce sujet, puisque l'univers est assez vieux pour qu'il puisse exister des objets s'éloignant de nous plus vite que la lumière, et il est assez jeune pour que ces objets ne soient pas trop nombreux et que nous n'observions pas un univers en plein déchirement. Ainsi, les objets à plus de 13,4 milliards d'années-lumière de nous s'éloignent plus vite que la lumière. La lumière qu'ils émettent en se déplaçant à ces vitesses ne nous parviendra jamais car elle est distendue par l'effet doppler : son décalage vers le rouge est tel qu'elle est impossible à détecter car trop peu énergétique.

Pendant ce temps, les astronomes cartographient le cosmos. L'astronomie amateur joue un rôle déterminant dans ce processus : tout le monde peut observer, découvrir des corps célestes inconnus et le choix du nom revient à celui qui les découvre. Les astronomes amateurs s'occupent de découvrir les objets de notre système solaire et de notre galaxie comme les astéroïdes, les étoiles proches. Les astronomes professionnels découvrent de nouvelles galaxies, ou des objets plus complexes à détecter comme les exoplanètes : les planètes gravitant autour d'une autre étoile que le Soleil. Notre carte de l'univers (Fig. 2) ressemble à un sablier tordu à cause de notre position dans la galaxie : nous sommes aux deux tiers du disque. C'est assez simple d'observer en haut ou en bas du disque, mais notre champ de vision est obstrué lorsque nous regardons dans le plan du disque, d'où cette forme.

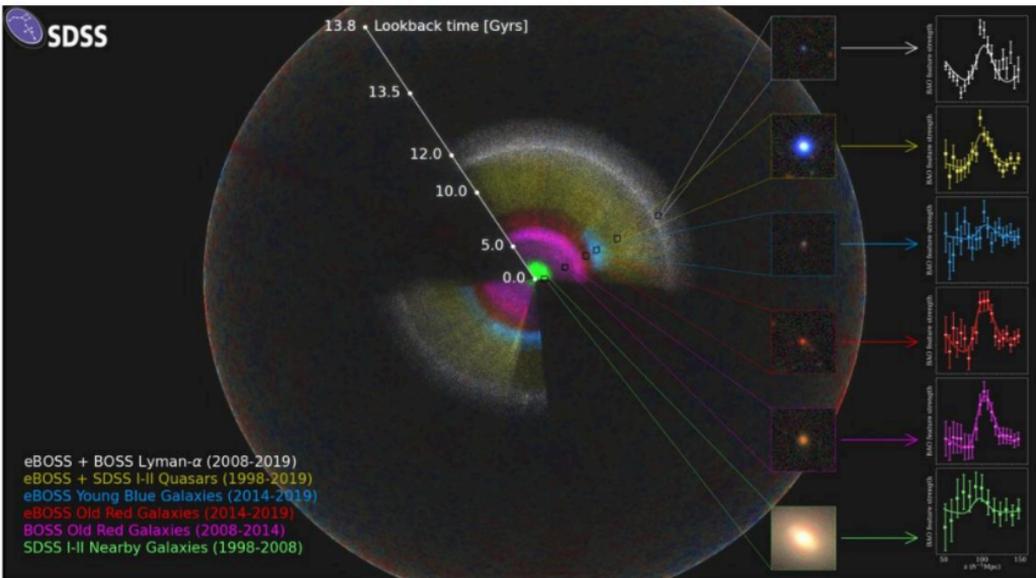


Fig. 2 : La carte de l'univers observable (parties colorées)
Crédit : Anand Raichoor (EPFL), Ashley Ross (Ohio State University) et SDSS Collaboration

Les objets sortant de notre univers observable n'ont pas à vraiment nous inquiéter, nous aurions eu énormément de mal à nous y rendre avec les moyens actuels de toute manière. Je trouvais déjà frustrant de ne pas avoir accès à tout ce que nous découvrons dans le futur, au-delà de ma propre mort. Ce qui est encore plus frustrant c'est que nous ne découvrirons jamais ces mondes disparus, personne ne le pourra. Parmi toutes ces galaxies, parmi les milliards de planètes qui disparaissent, certaines abritent peut-être la vie, une vie avec laquelle nous n'entrerons jamais en contact, même si l'humanité survivait des milliards d'années.

Le paradoxe de l'entropie : la naissance de la vie

Un autre effet de l'expansion de l'univers est lié à une grandeur physique nommée l'entropie. En physique, le domaine de la thermodynamique a pour objectif de fournir un outil de compréhension des phénomènes liés aux paramètres internes d'un système (pression, volume, quantité de matière) et à sa température. On y étudie les échanges thermiques, les changements d'état, la production d'énergie à partir de transformations du système... etc. Cette branche de la physique énonce deux propriétés fondamentales : les principes de la thermodynamique. Le premier dit que l'énergie à l'intérieur d'un système qui n'échange pas de matière (ça peut être une tasse de café, le contenu d'une piscine, le corps humain avec quelques approximations) varie selon l'énergie qu'on lui apporte sous forme de chaleur, ou de travail (d'origine mécanique). Le second, celui qui va nous intéresser, introduit la notion d'entropie : c'est une grandeur similaire à une énergie par température qui mesure l'état de désordre du système. Plus l'entropie est élevée, plus le système est désordonné. Le second principe dit que l'entropie ne peut pas diminuer dans un système fermé (qui n'échange pas de matière).⁸ Autrement dit, il garantit que les morceaux d'un verre qui s'est brisé en tombant au sol ne vont pas se recoller d'eux-mêmes en le même verre.

Ainsi, l'entropie de l'univers ne peut qu'augmenter, et elle n'y manque pas. Toute transformation irréversible augmente cette entropie, dont l'expansion de l'univers. Mais

⁸ La thermodynamique quantifie les transformations, mais ne peut pas nous donner de valeur absolue pour les grandeurs qu'elle permet d'étudier. On leur donne donc des valeurs arbitraires.

c'est au milieu de cette augmentation du désordre que s'est produit un miracle : l'univers a créé la vie. Si on reprend l'analogie du verre, l'univers a recollé ses propres morceaux. La vie n'est pas le premier à avoir été exploité accompli, l'univers a construit les étoiles, qui se sont regroupées en galaxies, elles-mêmes regroupées en amas, puis en superamas. La force prodigieuse qui a permis ces exploits est l'attraction gravitationnelle. C'est elle qui combat l'expansion de l'univers, et maintient les galaxies, les étoiles, et les planètes en un seul morceau. Puis sur ces planètes les atomes se sont assemblés en molécules, les molécules en cellules, et enfin les cellules en êtres vivants.

Ne nous méprenons pas : les lois de la physique n'ont pas été brisées. Malgré l'assemblage des différentes structures complexes du cosmos, l'entropie générale de l'univers augmente quand même. C'est simplement que les galaxies, comme les étoiles, comme la vie, n'étaient pas des systèmes fermés à leur création. Pour pouvoir aller contre le désordre, des sacrifices ont dû être faits. Pour naître, fonctionner et prospérer, la vie consomme et produit des déchets dont le plus conséquent est la chaleur (la principale source d'entropie). Mais il aurait pu en être autrement. Il a fallu qu'au milieu de tout de désordre, un peu d'ordre soit créé afin d'inventer ce qui, statistiquement, n'avait aucune chance d'arriver.

Le futur

La question du futur de l'univers est une question nous dépassant complètement. Nous ne survivrons probablement pas des millions d'années, encore moins des milliards, à cause des guerres, du réchauffement de la planète, mais aussi pour des raisons non humaines, comme le vieillissement du Soleil qui brille presque 1% plus fort chaque million d'années et qui

finira par gonfler et se désagréger dans 5 milliards d'années, s'il ne nous a déjà pas carbonisés. Or, la vie de l'univers se mesure en milliards d'années. Nous ne pouvons donc que prédire ou spéculer sur les futurs possibles de l'univers.

Le premier futur possible, et le plus probable selon les astrophysiciens, est nommé « Big Freeze ». Dans ce futur, les paramètres de l'univers sont exactement les mêmes qu'aujourd'hui. La constante de Hubble est presque la même, les lois de la physique n'ont pas changé. Seul le temps s'est écoulé, des dizaines, voire des centaines, de milliards d'années. A cette époque, tout s'est refroidi en émettant de la lumière jusqu'à atteindre la température minimale : le zéro absolu à 0K ou -273,15°C. A cette température, l'énergie est nulle, plus rien ne bouge plus rien ne se passe. L'univers est gelé, et le restera pour l'éternité (Fig. 3).⁹ C'est de loin le scénario le moins intéressant.

⁹ L'univers est tellement vide à ce stade que les chances pour qu'un photon atteigne un atome sont très petites, si petites qu'un photon absorbé apportant de l'énergie à un atome serait réémis bien avant qu'un autre arrive.

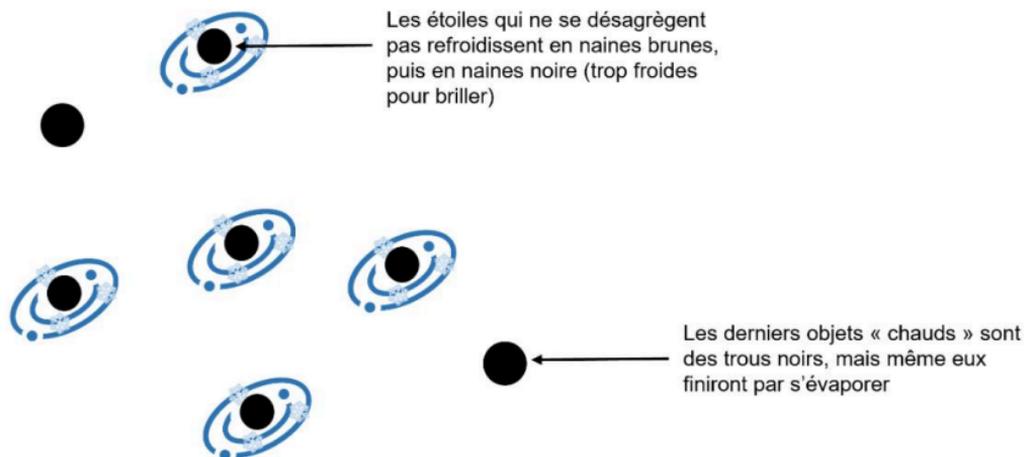
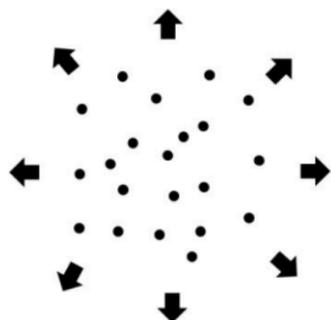


Fig. 3 : Le Big Freeze

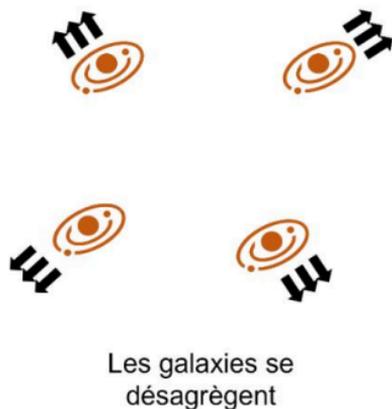
Un deuxième futur possible est lié à l'accélération de l'expansion de l'univers. C'est le « Big Rip ». La constante de Hubble a changé au cours du temps : elle était bien plus élevée lors du Big Bang, et a diminué avec le temps. Dans ce scénario, la constante se remet à augmenter jusqu'à des valeurs très élevées. Tous se déchire alors (d'où le nom de « Rip ») : les galaxies, puis les systèmes solaires, puis les planètes et étoiles, jusqu'aux molécules et les atomes. L'univers atteint alors son niveau maximal de désordre : tout a été décomposé en ses composants élémentaires (Fig. 4).

Fig. 4 : Le Big Rip

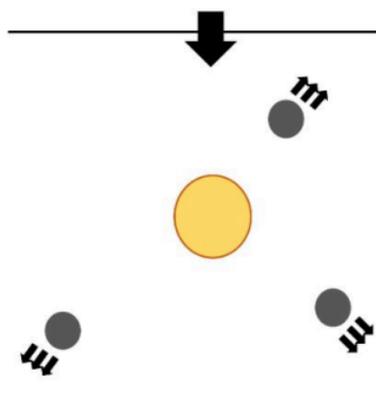
L'accélération progressive de l'expansion déchire l'univers



Puis la matière elle-même éclate (les atomes, puis leurs composants éclatent aussi)

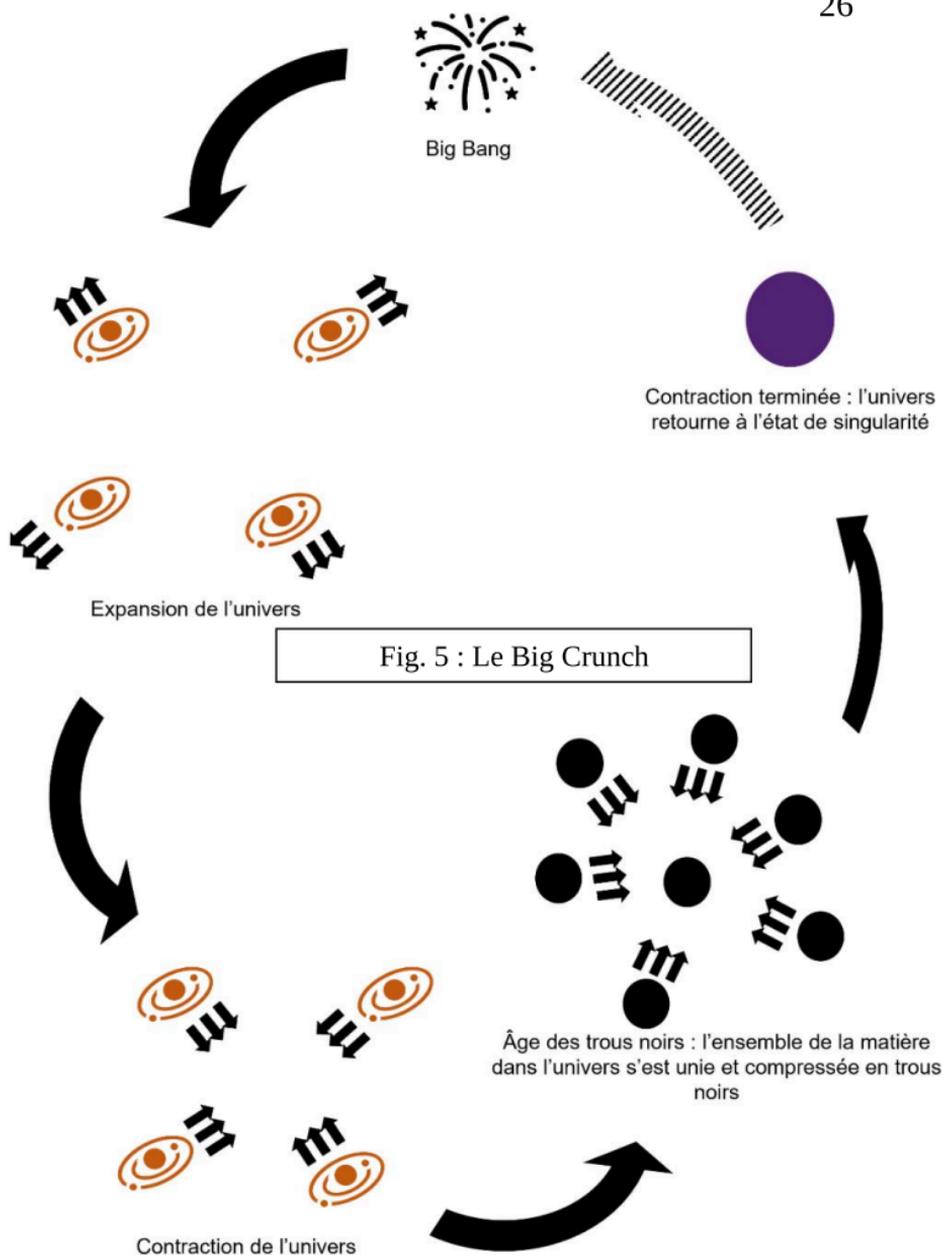


Les galaxies se désagrègent



Puis ce sont les systèmes solaires

Un troisième futur possible est l'inverse du deuxième : le « Big Crunch ». L'univers va continuer à s'étendre, mais la constante de Hubble va continuer à diminuer jusqu'à atteindre zéro. A ce moment, la constante de Hubble devient négative, et tout commence à se rapprocher. Ce rapprochement, au bout de quelques milliards d'années finit par être accéléré par la force gravitationnelle qui va tout fusionner en plein d'objets très lourds : des trous noirs. Après quelques milliards d'années, les seuls corps célestes restants sont les trous noirs qui finissent par se réunir en une singularité : la même qu'avant le Big Bang. Alors, la boucle est bouclée : l'univers est prêt à un nouveau Big Bang (Fig. 5).



Conclusion et Pour aller plus loin...

Voilà déjà la fin de notre aventure à travers l'espace et le temps. Notre voyage fut semé d'embûches et d'obstacle que nous avons surmonté ou contourné, mais nous sommes maintenant au bout du chemin. Je n'ai sûrement pas fait le tour du sujet, et mon étude aurait pu être plus précise ou plus compréhensible. C'est pour cela que les astrophysiciens tiennent très à cœur la vulgarisation de leur discipline, puisqu'elle est à la fois complexe et magnifique. J'estime que mon travail est un succès si vous ressortez avec plus de questions qu'à la lecture de la première de couverture : c'est une preuve de l'intérêt que peut susciter l'astronomie. Je vous invite alors à lire les livres de Hubert Reeves, dont l'œuvre offre des méditations métaphysiques sur divers phénomènes cosmologiques (ou pas !) mais aussi de nombreux ouvrages de vulgarisation encore bien plus talentueux et compréhensibles que le mien. Je vous invite aussi à découvrir David Elbaz, dont j'admire les ouvrages et les conférences de vulgarisation. Si l'astronomie vous intéresse, alors le festival de l'astronomie de Fleurance (Gers, 32) est un événement immanquable. C'est un lieu de découverte où de nombreux vulgarisateurs participent, dont Hubert Reeves par le passé, David Elbaz, mais aussi des pointures d'autres domaines comme le mathématicien Cédric Villani ou le philosophe des sciences Étienne Klein.

Merci de m'avoir lu, j'espère avoir pu vous fasciner avec l'astronomie et ses mystères !

Bibliographie

David Elbaz, *La plus belle ruse de la lumière. Et si l'univers avait un sens...*

Hubert Reeves, *Patience dans l'azur.*

Le site internet *Wikipédia*, dont de nombreux articles ont été utilisés pour des précisions sur certains sujets.

Les sites de la NASA (agence spatiale américaine) et de l'ESA (agence spatiale européenne) qui ont été utilisés notamment pour des détails et des images sur l'observation de l'univers.

Les vidéos de David Louapre, sur sa chaîne YouTube *Science étonnante* dont le niveau de vulgarisation est exemplaire.

Table des matières

Préambule	3
Chapitre I : Notre univers à travers le regard humain	5
Les premiers regards sur le monde	6
Un monde qui ne se plie pas au regard humain	7
Le modèle moderne de l'univers.....	8
Chapitre II : Un univers infini qui grandit	11
Notre univers grandit (très vite)	11
La naissance de l'univers, une période difficile à explorer	14
Chapitre III : L'univers exploré par la connaissance humaine	17
Le problème des objets sortants	17
Le paradoxe de l'entropie : la naissance de la vie	20

	30
Le futur	21
Conclusion et Pour aller plus loin.....	27
Bibliographie	28

DE LA DOUBLE EXPANSION DE L'UNIVERS

Il a été démontré que l'univers est en expansion, mais cette expansion présente une dualité. En effet, nos connaissances sur l'univers ne cessent de croître, agrandissant l'univers connu. Cela dessine deux frontières, délimitant l'univers connu et l'univers explorable, possédant chacun une forme et une tendance propre, et interagissant entre elles. Je propose d'étudier, philosophiquement et scientifiquement cette double expansion de notre univers.