
UNE NOUVELLE VISION DE L'UNIVERS À TRAVERS L'ASTRONOMIE DU DÉBUT DU 20ÈME SIÈCLE

TRAVAIL DE MATURITÉ
N°187

ANTONIN BUSSAT
OS PHYSIQUE ET APPLICATION DES MATHS



“THE COSMOS IS WITHIN US. WE ARE MADE OF STAR-STUFF. WE ARE A WAY FOR THE
UNIVERSE TO KNOW ITSELF.”

- Carl Sagan

VOLÉE 2021-2023
COLLÈGE DE SAUSSURE

MAÎTRE ACCOMPAGNANT : DENIS BOEHM

RENDU LE 3 NOVEMBRE 2022

Table des matières

1	Avant-propos	iii
2	Introduction	1
3	Notre compréhension de l'univers avant le 20ème siècle	2
3.1	Préhistoire et Egypte	2
3.2	Les anciens grecs	3
3.3	Débuts de l'astronomie moderne	5
3.4	Astronomie au 19ème siècle	7
4	De grandes avancées dans l'étude scientifique des étoiles	10
4.1	Progrès théoriques	10
4.2	Classification des étoiles	12
4.3	Nucléosynthèse stellaire	13
4.4	Evolution stellaire	15
5	Une remise en question de notre place et de nos origines dans l'Univers	18
5.1	Les observations de Edwin Hubble	18
5.2	Un univers en expansion	20
5.3	Le modèle du Big Bang	23
6	Des réflexions sur la place de l'homme au sein de l'univers	25
6.1	Une secousse existentielle	25
6.2	Sommes-nous seuls dans l'univers ?	26
6.3	Au sommet de la pyramide de la complexité	28
7	Conclusion	31
8	Bibliographie	32
9	Glossaire	35

1 Avant-propos

En tant que personne curieuse et intéressée par les sciences, il va de soi que l'astronomie a éveillé mon intérêt depuis mon plus jeune âge. À travers ce domaine scientifique, la plupart des questions qui m'ont traversé l'esprit ont pu être répondues grâce à l'abondance de contenu audiovisuel et de littérature. Des questions simples au sujet de l'univers en général se sont transformées, au fil de mes lectures et au cours des années, en questions de plus en plus complexes et parfois philosophiques. Heureusement, la vulgarisation scientifique a pu m'éclairer là où les articles scientifiques bourrés d'équations me donnaient le tournis. Un jour, après avoir fini le livre intitulé "Cosmos" de Carl Sagan, tous mes doutes se sont dissipés ; il fallait que mon travail de maturité porte sur l'astronomie.

C'est pourquoi j'ai décidé de mettre les fruits de mes recherches sur papier en mettant à la fois un accent sur le côté scientifique mais également historique et philosophique des avancées en astronomie au début du 20ème siècle. J'ai décidé de choisir ce laps de temps parce que je le considère comme le plus riche et intéressant surtout en considérant les questions plus générales et philosophiques que ces découvertes ont soulevées. De plus, ce choix me permet de mettre en avant un bref historique de l'astronomie et de ces bouleversements.

Je tiens également ici à remercier mon professeur accompagnant, M. Denis Boehm, qui m'a conseillé sur certains aspects et a relevé les parties à revoir. Ma reconnaissance va également à mes parents pour avoir relus attentivement mon travail afin d'y soigner la présentation. Pour finir, je souhaite exprimer ma gratitude pour tous les youtubers et auteurs qui m'ont apporté la motivation et les connaissances pour réaliser ce travail.

2 Introduction

L'astronomie est sans doute l'une des sciences les plus anciennes du monde. Les hommes, avec leur curiosité sans limites, ont levé la tête en direction du ciel nocturne, ébahis par ce qu'ils pouvaient voir. Ce même ciel à uni d'innombrables cultures éparpillées tout autour du globe depuis la nuit des temps. À la recherche d'explications, nos ancêtres ont attribué aux mystérieuses lumières constellant le ciel nocturne des caractéristiques divines et ont inventé des histoires au sujet des constellations. Le grand philosophe Socrate asserta que

”L'homme doit s'élever au-dessus de la Terre - aux limites de l'atmosphère et au-delà - ainsi seulement pourra-t-il comprendre tout à fait le monde dans lequel il vit.”

et c'est exactement ce que les astronomes font.

Les hommes de l'ancienne grèce, tout comme ceux du Moyen Âge lorsque l'Eglise européenne avait plongé la recherche de la vérité dans les profondeurs de l'obscurantisme par sa forte autorité, jusqu'aux chercheurs d'aujourd'hui observent le ciel nocturne et tente de dévoiler les mystères du cosmos avec des moyens de plus en plus sophistiqué. D'après la définition de wikipédia, *“l'astronomie est la science de l'observation des astres, cherchant à expliquer leur origine, leur évolution, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques.”*[1] Les objets célestes peuvent paraître dépourvus d'importance à cause des distances qui nous en séparent, mais nous y sommes étroitement liés et leur étude nous ont permis de remettre en question la nature de notre existence. Au fur et à mesure des découvertes faites par nos ancêtres, l'homme s'est vu retirer de plus en plus d'importance et c'est durant la première moitié du 20ème siècle que cet intime lien entre le cosmos, notre existence et notre place dans l'univers fut le plus bouleversé. C'est grâce aux fruits de l'intelligence des scientifiques de cette période que l'immensité de l'univers put être mise en évidence ainsi que la structure et l'évolution de son infinité d'étoiles. L'astronomie, au cours de la première moitié du 20ème siècle, se démarque par l'apparition d'une nouvelle branche de la physique intitulée physique quantique, apportant du sens et décrivant le monde subatomique. Les avancées théoriques et technologiques nous ont permis d'analyser de plus en plus précisément le fonctionnement, l'histoire et la composition de notre univers. Après un chapitre consacré à un bref historique du lien entre l'homme et le cosmos jusqu'à la fin du 19ème siècle, nous allons nous intéresser aux avancées théoriques du début du 20ème siècle ainsi qu'au bouleversement scientifique dans le champ de l'étude des étoiles. Ensuite, nous examinerons la façon avec laquelle notre perception de la taille de l'univers fut remise en question ainsi que la création d'un modèle cosmologique en s'intéressant à ce qui s'est produit au début de l'univers. Pour finir, nous prendrons du recul et examinerons l'empreinte que ces découvertes ont laissé sur l'Homme et les réflexions qui en découlent.

3 Notre compréhension de l'univers avant le 20ème siècle

3.1 Préhistoire et Egypte

Les hommes de la préhistoire, au milieu de leur vie périlleuse, sachant peu et ne comprenant encore moins, étaient unis par le ciel nocturne. Par nature, nous voulons comprendre ce qui nous entoure et, pour ce faire, nos ancêtres, dépourvus de télescopes et de connaissances scientifiques, vénéraient les étoiles et inventèrent des histoires à leurs sujet. Les historiens de l'astronomie doivent travailler avec peu d'informations, seuls de rares indices sous la forme d'instruments ou d'observatoires ont survécu les milliers d'années qui nous séparent de leur création. Les gravures dans certains monuments de pierre sont souvent difficile à interpréter. Il est donc impossible d'être convaincu que leur signification soit bien de nature astronomique. Nous pouvons prendre comme exemple certaines peintures présentes sur les murs des grottes du sud de la France, qui pourraient correspondre à des solstices ou des constellations. Il est possible que ces peintures rupestres soient des cartographies stellaires mais le manque de preuves nous empêche de le confirmer. Plusieurs sépultures retrouvées en Europe Occidentale datant de l'âge de pierre partage la même orientation, à savoir vers l'est faisant face au lever du soleil. De plus, des études montrent que le célèbre monument Stonehenge au sud de l'Angleterre construit il y a environ 5000 ans fut construit pour prédire les cycles du soleil et de la lune en plus de servir comme lieu d'enterrement. Nous pouvons être certains que la cosmologie a joué un rôle lors de la période préhistorique.

En sautant quelques milliers d'années, au bord du Nil, l'astronomie et plus particulièrement la cosmologie possédait également un rôle important dans la culture égyptienne de l'antiquité. La culture égyptienne se basait sur des mythes cosmologiques liés à des entités créatrices du cosmos, dominant les hommes depuis les cieux. Leur intérêt pour l'univers et la création de mythes cosmologiques ont rassemblé les égyptiens. Les pyramides, une des sept merveilles du monde, fut construite comme site d'enterrement pour les figures les plus importantes. Situées sur la rive ouest du Nil associées au lieu du coucher du soleil et du passage vers l'autre monde. De plus, leurs grandes tailles ont pour but de se rapprocher du ciel et de nombreuses ouvertures, qui ont d'abord été considérées comme des conduits d'aération, s'avèrent pointer certaines constellations ou zones intéressantes dans le ciel nocturne afin de guider les âmes des défunts.

La cosmologie égyptienne procurait un sens à la vie, à savoir prendre soin de la création confiée aux humains par les dieux en préservant l'harmonie et l'ordre de l'univers. Les égyptiens étaient donc obsédés par la mort et l'idée d'une vie après

cette dernière afin de préserver leur civilisation. Peu importe notre opinion sur leur manière de penser, il faut reconnaître que les Égyptiens ont réussi à maintenir leur civilisation pendant plus de trois millénaires.

3.2 Les anciens grecs

Au fil du temps, les visions du monde évoluent et, avec elles, la manière dont nous nous percevons et voyons notre place au sein de l'univers. Le passage du mythe à la science pour expliquer le fonctionnement de la nature s'est produit dans la Grèce antique, à partir de 550 avant notre ère. Les grecs, en quête de vérité, ont véritablement bouleversé un univers qui, jusque-là, était gouverné par les caprices des dieux. Nous pouvons l'expliquer par la naissance de la philosophie et de la fondation des idées principales gouvernant la méthode scientifique par Thales de Milet, à savoir que le monde peut être expliqué par des interactions gouvernées par des lois naturelles absolues. En mettant les dieux de côté, le monde a pu s'approcher un peu plus de la vérité scientifique que recherchaient les philosophes de l'époque. En effet, ces derniers critiquaient l'art de la rhétorique permettant aux grands orateurs de manipuler la foule et, comme insistait le grand philosophe Socrate, ce n'était pas une manière pour atteindre la vérité mais pour manipuler les émotions. Ce changement paradigmatique permit aux grecs de concevoir les premiers modèles universels et d'associer l'astronomie à une branche scientifique et non pas théologique, sans pour autant nier l'existence de divinités.

Un grand bouleversement dans notre vision de notre planète eu lieu lorsque les observations du philosophe Aristote (384-322 avant J.-C) de l'ombre de la Terre sur la lune au cours des éclipses ont prouvées que la Terre est sphérique et qu'elle est plus grande que la lune. Quelques décennies plus tard, le mathématicien grec Ératosthène réussit à estimer avec une précision remarquable le rayon de notre Terre, malgré les limitations technologiques de l'époque. En se basant sur l'angle créé par des ombres projetées sur le sol à Syène (Assouan actuelle) et à Alexandrie au même moment de la journée, il a estimé une circonférence d'environ 250'000 stades, soit, avec 157,2 m pour un stade, un périmètre de la Terre de 39'300 km.

Les Pythagoriciens ont marqué le début de la cosmologie en mettant en avant des théories sur les mouvements des astres en se basant sur des observations astronomiques et des relations mathématiques plutôt que des mythes. Le mot cosmos ne reflétait pas encore l'univers mais plutôt un monde ordonné et arrangé par opposition au chaos. Les premiers modèles cosmologiques situaient la Terre au centre de l'univers avec des sphères parfaites faites en cristal transportant les planètes, la lune, le soleil et les étoiles.

La création d'un traité mathématique et astronomique "l'Almageste" par Claude Ptolémée, au deuxième siècle av.J.-C, regroupe les connaissances les plus avancées en mathématiques et en astronomie de l'époque. Il propose une théorie géométrique

décrivant les mouvements des planètes et des étoiles. Y figure également la théorie des *épicycles* développée par Hipparque. Cet ouvrage présente un modèle géocentrique de l'univers qui fut reconnu pendant plus de 1200 ans jusqu'à la Renaissance, il fait partie des textes scientifiques les plus influents de l'histoire. Hipparque fut également le premier à proposer un catalogue des étoiles en fonction de leur luminosité en établissant une échelle de luminosité propre à chaque étoiles qu'il observait.

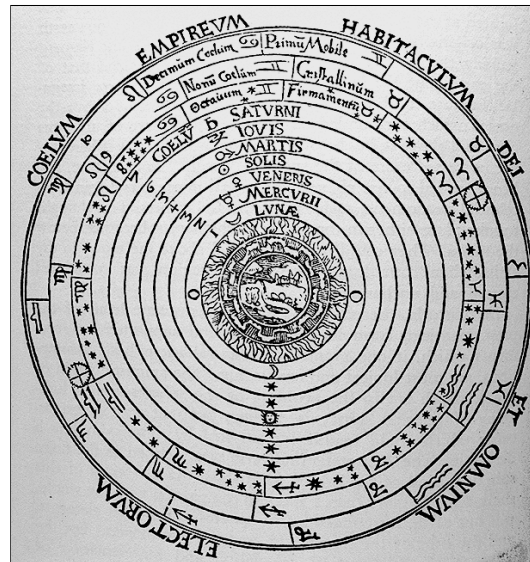


FIGURE 1 – Représentation de l'univers selon Aristote et Ptolémée

Malgré tous ces progrès, les limites technologiques modèrent la précision des observations. La Terre se trouve au centre de l'univers et les planètes tournent autour d'elle. Malgré ce grand pas en avant, nous vivions encore dans un univers largement anthropocentré. Certaines contradictions entre les prédictions et les observations demeuraient irrésolues, comme des variations importantes de la taille apparente de la lune ou des imprécisions aux niveaux des positions de Vénus et Mercure. De plus, le modèle géométrique décrivant l'orbite des planètes était basé sur le principe cosmologique de l'époque soutenant un mouvement circulaire uniforme. Les modèles de l'Almageste continuèrent d'être affinés dans les années qui ont suivi sa parution. Il fallut attendre 14 siècles pour que ses défauts soient considérés trop fondamentaux et sujets d'une correction.

La période du Moyen Âge est marquée par la censure morale et intellectuelle de l'Église catholique qui ralentit les recherches et les découvertes. Cependant, l'intelligence et le courage de certaines personnalités scientifiques s'opposant à cette autorité ont donné naissance à l'astronomie moderne.

3.3 Début de l'astronomie moderne

L'obscurantisme ralentit les progrès de la science en mettant les interprétations astrologiques et théologiques en avant. Cependant, à l'aube du siècle des Lumières, un combat entre le rationalisme et l'autorité de l'Eglise fait rage.

Plus d'un millénaire après les modèles cosmologiques d'Aristote et de Ptolémée, l'astronome polonais Nicolas Copernic reprend en 1543 la façon d'expliquer les mouvements des astres qu'Aristarque supposa des siècles auparavant en plaçant notre Soleil au centre de l'univers. La Terre devint alors la troisième planète orbitant notre étoile de manière parfaitement circulaire. Ce modèle est appelé héliocentrique et s'oppose au modèle géocentrique défendu par l'Eglise Catholique. Malgré le fait que ce modèle permettait de répondre à plusieurs questions que l'on se posait concernant le mouvement de certaines planètes comme Mars et Vénus, la proposition de Copernic allait à l'encontre de la théorie d'Aristote. Le public et l'Eglise s'opposèrent à ce modèle hérétique et ses travaux furent censurés et bannis. Il faudra attendre quelques décennies pour que les travaux de Nicolas Copernic soient acceptés.

Au début du 17^{ème} siècle, Galilée révolutionne l'astronomie en observant avec succès le ciel nocturne à l'aide d'une lunette. Il observe la surface de la Lune avec son propre perfectionnement de l'instrument et décrit ses cratères ce qui viole la théorie aristotélicienne¹ qui faisait autorité à l'époque. De plus, il révèle les 4 lunes principales de Jupiter en 1610 montrant l'existence de nouveaux mondes jusque là inconnus tournant autour d'une autre planète que la Terre ! Le scientifique soutient également l'hypothèse héliocentrique malgré les dangers et est censuré puis condamné pour hérésie quelques années après la publication de son traité d'astronomie "Sidereus Nuncius". Giordano Bruno, un moine dominicain dont les travaux mettent en avant la pertinence d'un univers héliocentrique, partage le même sort que Galilée en posant l'hypothèse en 1600 qu'il existe une infinité d'étoiles avec leurs mondes, il fut condamné par l'Eglise et brûlé en place publique. Cette idée peut paraître assez évidente aujourd'hui mais elle était extrêmement absurde pour l'époque.

On ignorait la vraie nature des mouvements des corps célestes, ça faisait plus d'un millénaire qu'Aristote avait proposé ses lois de mouvements mais certaines observations contradictoires poussèrent l'astronome allemand Johannes Kepler à développer un modèle mathématique pouvant décrire la trajectoire périodique des planètes. La vision de l'époque était que les corps célestes suivaient un cercle parfait, mais Kepler prouva le contraire grâce à ses trois lois avec l'aide de l'astronome Tycho Brahe qui lui partageait ses observations réalisées avec son observatoire. Allant à l'encontre de l'harmonie parfaite soutenue jusque là, les corps suivaient maintenant des tra-

1. La théorie aristotélicienne soutient, entre autre, que tout les objets célestes à part la Terre sont des sphères parfaites et lisses

jectoires elliptiques. Cependant, Kepler ne comprenait pas la vraie nature de ces mouvements et a dû se contenter de former diverses hypothèses.

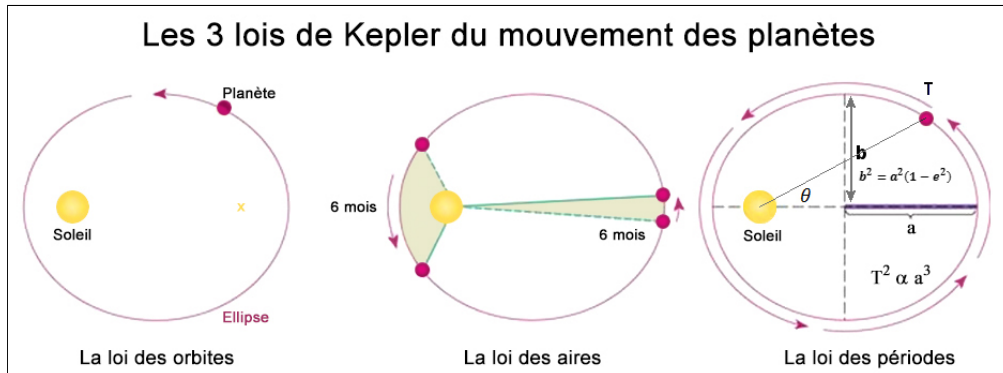


FIGURE 2 – Les trois lois de Kepler

La quête de Johannes Kepler pour comprendre le mouvement des planètes, qui a duré toute sa vie, a culminé trente-six ans après sa mort grâce aux travaux d'Isaac Newton. C'est sans doute l'un des plus grands scientifiques de tous les temps à l'égal des plus grands noms comme Albert Einstein ou Max Planck. Il a révolutionné beaucoup de domaines scientifiques, particulièrement la mécanique et l'optique. En 1687, il publie *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (en français : Principes mathématiques de la philosophie naturelle). Dans ce dernier, il met en place ses trois lois de mouvements révolutionnaires et sa loi de gravitation universelle. En découvrant la loi d'inertie, à savoir la tendance que possède un objet de continuer à se déplacer de manière rectiligne à vitesse constante si aucune force résultante externe ne l'influence, Newton s'est rendu compte que la lune ne devrait pas continuer à orbiter autour de la Terre, mais devrait être éjectée tangentiellement à son orbite et suivre une trajectoire rectiligne à moins qu'une force soit présente l'attirant à la Terre. En utilisant la troisième loi de Kepler, Newton pu déduire l'existence de la force gravitationnelle dont voici la formule :

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Avec :

- G la constante d'attraction gravitationnel
- m1 et m2 deux corps
- r la distance séparant ces deux corps

Pour la première fois de l'histoire, les règles physiques qui s'appliquent sur Terre peuvent également être appliquées aux mouvements des corps célestes. En d'autres termes, la force qui nous permet de rester collé sur la surface de la Terre est la

même que celle qui garde notre planète en orbite autour de notre étoile. On attribue également la naissance du télescope à Newton qui, en 1666, révolutionna l'astronomie d'observation moins d'un siècle après la lunette astronomique de Galilée.

Au cours des siècles qui suivent, le mouvement rationaliste devenant de plus en plus influent au sein du mouvement révolutionnaire des Lumières, les découvertes se multiplièrent.

3.4 Astronomie au 19ème siècle

Après la mise en avant du rationalisme et de la philosophie empirique au détriment de la superstition et de l'obscurantisme de l'Eglise catholique, la science fut popularisée dans le monde et la majorité des gens commencent à se représenter un univers Newtonien dirigé par des règles universelles et déterminables mathématiquement.

À partir du 19ème siècle, les méthodes d'observation astronomique s'améliorent en qualité et en quantité grâce aux diverses avancées technologiques. De nouveaux télescopes réfracteurs de plus en plus massifs et puissants sont conçus. Parallèlement, la naissance de la photographie rend la collecte de données plus efficace. Neptune, la huitième planète de notre système solaire est observée pour la première fois et d'autres objets célestes sont découverts et étudiés. La distance et le déplacement de certaines étoiles sont mesurés pour la première fois et révèlent des distances de plusieurs années-lumières. De plus en plus d'étoiles et types d'étoiles sont découverts ainsi que de nombreuses nébuleuses, le parallaxe stellaire nous a permis d'estimer les distances des étoiles les plus proches grâce aux progrès technologiques. Notre vision de l'univers a évolué énormément : les étoiles, que l'on pensait être situées un peu plus loin que les planètes étaient maintenant des millions de fois plus distantes.

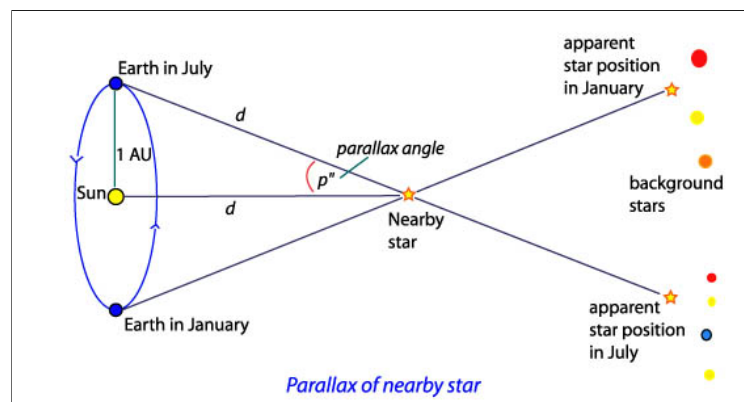


FIGURE 3 – parallax stellaire

Des avancées en physique et en chimie notamment ont permis d'en savoir plus sur la composition chimique du soleil. Le développement de la spectroscopie en particulier a projeté le domaine de l'astronomie en avant et a donné naissance à l'astrophysique. Newton découvre en 1666 que la lumière blanche est composée de couleurs élémentaires en expérimentant avec des prismes. Plus d'un siècle plus tard, l'anglais William Wollaston révèle la présence de raies d'absorption dans le spectre solaire. Au cours des années 1850, le physicien Gustave Kirchhoff et le chimiste Robert Bunsen ont découvert que chaque corps gazeux excité par une décharge électrique ou par l'agitation thermique à température élevée, émet des ondes électromagnétiques à des longueurs d'ondes bien déterminées et discontinues, caractéristiques de la substance considérée. Cette lumière d'une longueur d'onde propre à l'élément excité peut servir de caractéristique d'identification[2].

Grâce à cette découverte très importante, on en profite pour analyser le spectre lumineux du soleil pour remarquer la présence de métaux en petite quantité ainsi que d'un élément jusqu'ici inconnu. On le nomma plus tard "hélium" et il fut découvert sur Terre quelques années plus tard. Joseph von Fraunhofer développe le premier spectrographe qui permet de faire apparaître les lignes spectrales d'un objet émettant de la lumière. On découvre également qu'il existe des longueurs d'ondes lumineuses qui n'appartiennent pas à la lumière visible à l'œil nu en expérimentant avec un thermomètre et la séparation des couleurs du soleil avec un prisme. Quelques années plus tard, le brillant physicien James Clerk Maxwell publia ses recherches concernant l'électromagnétisme et la lumière et prédit qu'en effet, il devrait y avoir différentes longueurs d'onde de lumière visibles et invisibles. Ces prédictions furent démontrées expérimentalement par Heinrich Hertz quelques années plus tard en produisant des ondes radio dans son laboratoire.

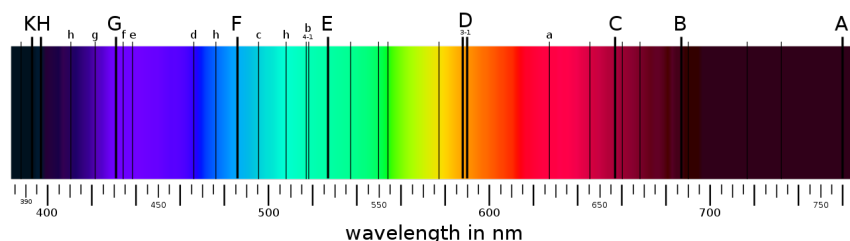


FIGURE 4 – Spectre d'absorption du Soleil

La popularisation de l'observation astronomique a entraîné certains astronomes et philosophes adhérant à la philosophie naturaliste à se concentrer sur des questions plus générales concernant notre univers comme : Quel âge à l'univers ? A-t-il un commencement ? Quelle est sa taille ? De quoi est-il composé ?

Néanmoins, ces questions sont restées pour la plupart sans réponse faute de technologie qui n'était toujours pas suffisante pour assurer la collecte de données empiriques assez convaincantes pour avancer des réponses. En effet, la précision

des télescopes empêchait d'analyser les objets les plus lointains. De plus, nous ignorions encore beaucoup de choses concernant la nature des lignes spectrales et, par conséquent, la composition chimique des étoiles. De nombreux paradoxes et problèmes théoriques ne pouvant pas être expliqués par la physique classique ont vu le jour. Il n'y avait encore aucune façon de déterminer la taille de notre voie lactée, deux écoles se sont formées. Certains scientifiques pensaient que la voie lactée n'était qu'une galaxie parmi pleins d'autres alors que les autres pensaient que la voie lactée était tout ce qu'il y avait dans l'univers. Il faut attendre le 20ème siècle pour avoir les réponses à ces questions et pour apporter un changement paradigmatique sur cette question de l'Homme dans l'univers.

4 De grandes avancées dans l'étude scientifique des étoiles

Avec la découverte de l'électron en 1897 et les travaux du physicien Max Planck, le monde microscopique commença à s'ouvrir de plus en plus. Au début du 20ème siècle, on assiste à la naissance de la physique quantique. Les implications des nouvelles avancées théoriques en physique quantique ont permis d'éclaircir certains phénomènes physiques et astronomiques encore mystérieux. Les progrès dans l'étude des étoiles ont bouleversé plusieurs idées que nous possédions à leur sujet ainsi que la façon dont la composition chimique de l'univers a évolué.

4.1 Progrès théoriques

Au cours des premières années du 20ème siècle, les physiciens ont remarqué que la mécanique classique prédisait que l'énergie électromagnétique émise par un corps noir (un objet chaud qui absorbe toute la lumière) donnerait des infinis dans le cas de longueurs d'onde plus courtes que la gamme ultraviolette du spectre électromagnétique, rendant ainsi la théorie fautive. Le modèle de l'atome de Rutherford étant lié à la physique classique devait donc être corrigé.

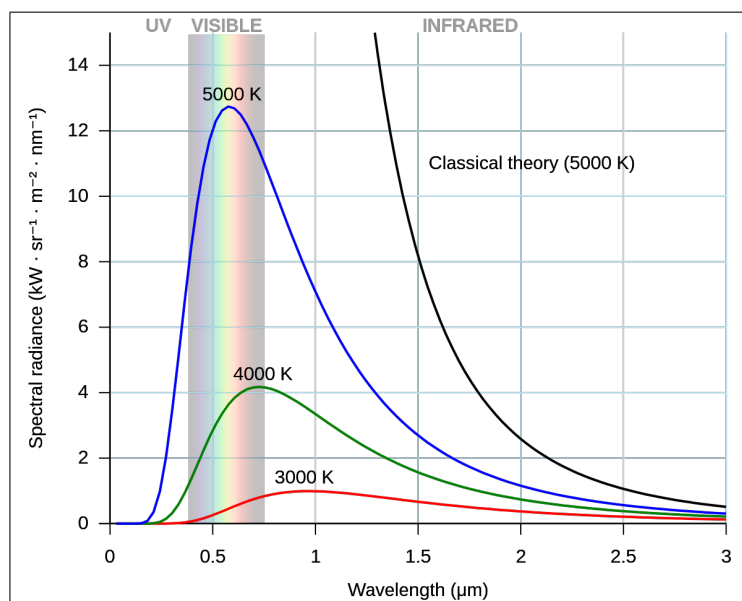


FIGURE 5 – courbe de radiation d'un corps chaud à différentes températures

En se basant sur les travaux du physicien Max Planck de l'aube du siècle, Niels

Bohr a émis l'hypothèse que les électrons ne pouvaient que suivre des orbites fixes et être capables de "sauter" d'une orbite à l'autre, sans jamais occuper l'espace entre ces orbites stables. Grâce à ce nouveau modèle, on a pu comprendre que les électrons d'un atome peuvent être dans un état excité lorsqu'ils ont un niveau d'énergie supérieure à celui de l'état fondamentale et l'absorption d'un *photon* par un des électrons engendre un saut quantique qui excite l'électron. la différence d'énergie entre les niveaux orbitaux E nous permet de déduire quels types d'éléments on a à faire. Cette confirmation théorique des observations du siècle précédent nous ont éclairci vis-à-vis de la compréhension de l'atome et les lignes spectrales malgré son application réduite à cause du lien étroit que possède le modèle de Bohr avec la mécanique classique.

À la même époque, plusieurs avancées dans la description des lignes spectrales ont vu le jour. En effet, des relations mathématiques ont pu être appliqués aux phénomènes de formations des lignes spectrales de l'hydrogène avant d'être généralisé dans la formule de Rydberg². Quelques années plus tard, Walther Ritz proposa une méthode permettant de généraliser cette formule pour tous les atomes. Toutes ces nouvelles connaissances apportées par les physiciens du début de l'ère quantique ont offert aux astronomes une meilleure compréhension sur la nature des lignes spectrales.

Avec un outil si puissant et l'obtention du spectre de plusieurs centaines de milliers d'étoiles, il fallut attendre 1925 pour que la brillante astronome Cecilia Payne publie sa thèse de doctorat révolutionnaire, dévoilant au monde entier la composition des étoiles. Inspirée par Arthur Eddington, sa passion pour l'astronomie la poussa à s'intéresser à la spectroscopie à l'aide de ses connaissances de la nouvelle physique quantique. En se basant sur les travaux du physicien Indien M.N. Saha sur la corrélation entre la température et la pression de l'atmosphère d'une étoile avec *l'ionisation des atomes*. Elle a pu, après deux ans de travail, mettre en avant le lien entre la température d'une étoile et ses raies spectrales. De par ce fait, elle mit un terme à la pensée partagée que les étoiles étaient composées des mêmes éléments que sur Terre. En effet, les étoiles sont composées principalement d'hydrogène et d'hélium. Les autres éléments lourds que nous pouvons également trouver sur Terre et qui ont été détectés dans les analyses de lignes spectrales constituent moins que deux pourcents de la masse des étoiles. Cette révélation fut choquante pour la communauté scientifique et plusieurs grandes personnalités comme Russel ou Eddington s'opposèrent initialement à ces résultats. Cependant, Cecilia Payne avait bien raison et ses recherches sont aujourd'hui reconnues comme des plus remarquables en astronomie et elles ont fortement impacté la façon dont nous voyons les étoiles et les classifications.

2. Une formule donnant avec une grande précision les longueurs d'ondes des raies visibles de l'hydrogène existait déjà à la fin du 20ème siècle. Elle s'intitule la formule de Balmer

4.2 Classification des étoiles

Avec une meilleure compréhension des lignes d'absorption dans le spectre lumineux des étoiles, nous avons pu estimer leur composition et leur température. On utilise une classification spectrale partant de O pour les étoiles les plus chaudes et lumineuses jusqu'à M pour les étoiles les moins chaudes³.

Nous pouvons remarquer une corrélation entre la couleur d'une étoile et la température à sa surface. En effet, la distribution thermique du rayonnement thermique qu'émet un corps noir (un corp idéal absorbant toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit) ne dépend seulement de sa température et peut être représenté par une courbe de rayonnement du corps noir (Figure 5). À l'aide de la loi de déplacement de Wien⁴,

$$\lambda_{peak} = \frac{b}{T}$$

Avec :

- λ_{peak} la plus grande longueur d'onde émise
- b une constante de proportionnalité appelé constante de Wien
- T la température absolue

nous pouvons remarquer que la température et la longueur d'onde à laquelle ce corps émet le plus de flux lumineux énergétiques sont inversement proportionnelles. En d'autres termes, les étoiles les plus froides nous apparaissent comme rouges alors que les étoiles les plus chaudes et brillantes sont bleues.

Les progrès importants au niveau de la compréhension de la structure physique des étoiles, au début du 20ème siècle, permit aux astronomes d'interpréter correctement les diagrammes Hertzsprung Russel créés en 1913 par deux astronomes Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russel mettant en relation la *magnitude absolue* des étoiles et leur type spectral.

Grâce aux calculs de distances et d'analyses spectrales, 90% des étoiles, y compris notre Soleil, présentes sur ces diagrammes suivent une courbe qu'on appelle séquence principale. Les autres étoiles sont soit des géantes, des naines blanches ou autres types d'étoiles exotiques comme des *étoiles à neutron*. Cette façon de cataloguer les étoiles a facilité le travail des astronomes. En plaçant l'étoile sur le diagramme, on peut connaître quelques autres de ses caractéristiques importantes comme sa masse, son rayon, et son état évolutif. Il s'agit en quelque sorte du tableau périodique des éléments en chimie mais pour les étoiles en astronomie. On en déduit que les étoiles présentes en haut à gauche du diagramme doivent avoir une plus

3. On nomme cette classification : Classification de Harvard. Elle fut finalisée en 1912

4. Il s'agit d'un cas particulier de l'équation plus générale de Planck formulée quelques années plus tard

grande masse pour expliquer leur température et luminosité. En effet, pour supporter leur poids, elles doivent produire plus d'énergie pour maintenir un équilibre. En revanche, les étoiles très chaudes situées en bas à gauche du diagramme doivent être très petites pour expliquer leur relative faible luminosité. Ces étoiles sont des naines blanches et leur rayon est similaire à celui de la Terre.

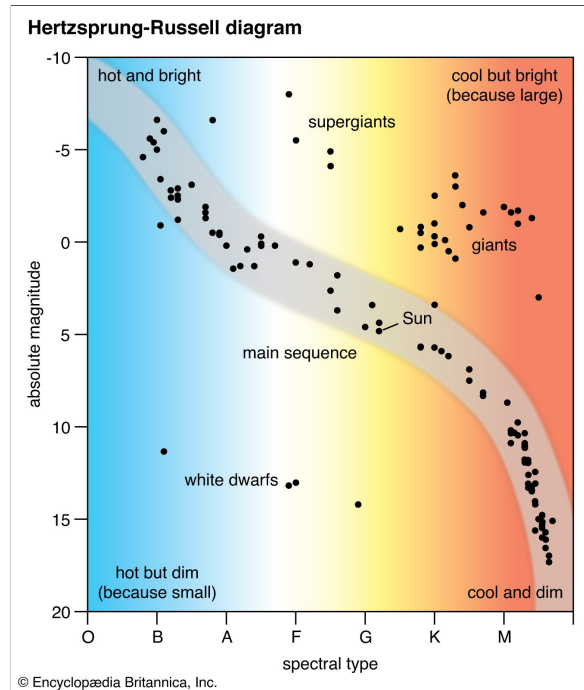


FIGURE 6 – Diagramme Hertzsprung-Russel

Maintenant que nous pouvons déterminer les caractéristiques importantes de ces étoiles qui parsèment notre univers, il reste une question fondamentale : Comment font les étoiles pour continuer à briller ? Vont-elles continuer à le faire pendant toute l'éternité ?

4.3 Nucléosynthèse stellaire

Nous devons l'émergence de la vie sur Terre à notre Soleil, ce dernier fournissant l'énergie nécessaire pour que la vie puisse prospérer. Toute personne légèrement curieuse s'est sûrement déjà posé la question suivante : comment peut-on ressentir la chaleur de notre étoile alors qu'elle se trouve à plus de 100 million de kilomètres de la Terre ? Avec l'avancée fulgurante de l'astronomie au début du 20ème siècle et l'apparition des diagrammes Hertzsprung Russell, il est naturel que l'on ait reçu

une réponse à cette question. C'est en 1939 que l'astronome Hans Bethe propose sa théorie de production énergétique stellaire qui lui valu le prix Nobel de physique. La théorie sera affinée et améliorée au cours des années suivantes notamment par Fred Hoyle.

Cette théorie s'appuie sur les travaux révolutionnaires d'Albert Einstein au début du siècle. Sa théorie de relativité restreinte mis en avant la relation intime entre l'énergie et la matière illustré sans doute par une des équations les plus élégantes et connues du monde :

$$E = mc^2$$

Avec :

- E l'énergie de l'objet
- m la masse de l'objet
- c la vitesse de la lumière

En s'appuyant sur cette relation, on en déduit qu'une petite masse peut être transformé en beaucoup d'énergie.

La production d'énergie dans le noyau des étoiles de masse relativement faible s'appuie sur cette relation lors de la fusion de protons pour former de l'hélium lors de la chaîne proton-proton. En effet, il a été confirmé théoriquement que le Soleil et toutes les autres étoiles sont composés principalement d'hydrogène et d'Hélium avec une répartition d'environ 75% et 25% respectivement avec une petite partie d'autres métaux. On appelle une réaction de fusion nucléaire une réaction chimique où deux noyaux d'atomes fusionnés créent un autre élément. La fusion est un phénomène extrême qui a lieu seulement dans les lieux aux conditions les plus intenses. En ce qui concerne notre Soleil, la fusion se déroule en son cœur où la température peut être estimée mathématiquement à plus de 15'000'000 Kelvin[3]. Cette température et la pression au cœur du Soleil sont assez élevées pour arracher les électrons des atomes d'hydrogène et rapprocher les protons entre eux. Or, pour fusionner des protons il faut surmonter la barrière de Coulomb. Cette dernière correspond à une barrière d'énergie électromagnétique que les protons doivent franchir afin de pouvoir fusionner. En effet, les protons sont tous positivement chargés et, par nature, se repoussent. Afin de pouvoir assurer une réaction de fusion nucléaire la température au cœur du soleil n'est tout de même pas suffisante et il faut faire appel à l'effet tunnel en physique quantique qui découle du *principe d'incertitude de Heisenberg*. La *fonction d'onde* qui décrit l'état quantique des protons leur permet rarement de passer cette barrière d'énergie, ce qui permet à la force nucléaire forte de prendre le dessus et de coller les protons ensemble.

Les trois équations ci dessous décrivent la première et plus abondante chaîne proton-proton (PP 1) à des températures dans l'ordre de celle présente au coeur du soleil :



Tout d'abord, en (1) deux protons fusionnent pour former du deutérium un positron et un neutrino. En effet, un des deux protons a subi une réaction de désintégration β^+ par l'intermédiaire de la *force nucléaire faible*. Le positron va rapidement s'annihiler avec un électron pour produire deux rayons gamma. Ensuite ce deutérium va fusionner avec un proton pour produire un isotope d'hélium (hélium 3) et un photon (2). Pour finir, la troisième réaction (3) est une fusion entre deux isotopes d'hélium pour donner une particule alpha⁵ et relâcher 2 protons. Il existe deux autres chaînes proton proton dominantes dans les étoiles plus massives que notre Soleil où la température régnant à leur cœur est plus élevée. En comparant la masse des quatre protons et de l'atome d'hélium 4, on trouve que 0,7% de la masse des protons avant la réaction est manquante. La différence de masse a été convertie en énergie principalement sous la forme de chaleur et de photons grâce à la relation entre masse et énergie proposée par Einstein. Nous avons pour une chaîne 26.73 MeV d'énergie produite avec 1 MeV = $1,602 \times 10^{-19}$ joules. Ce nombre peut paraître insignifiant sachant que monter une marche d'escalier nécessite 4×10^{12} MeV d'énergie. Cependant, nous sous-estimons souvent la concentration de particule au coeur de notre soleil car il se produit environ 10^{38} réactions par secondes! [4]

4.4 Evolution stellaire

Comme nous l'avons vu précédemment avec les diagrammes Hertzsprung Russell, les étoiles ne partagent pas toutes les mêmes caractéristiques. Certaines étoiles sont plus grandes ou plus massives que d'autres. Après s'être intéressé à la façon principale dont la majorité des étoiles produisent de l'énergie au cours de leur vie, il faut maintenant mettre l'accent sur l'autre aspect révolutionnaire que le 20ème siècle nous a fait découvrir au sujet des étoiles, à savoir leur évolution.

Toutes les étoiles finiront un jour par mourir lorsqu'elles ne pourront plus soutenir leur masse avec de l'énergie provenant de leur cœur. Le facteur qui détermine la durée

5. En physique nucléaire, le noyau d'un atome d'hélium 4 est souvent appelé particule alpha

de vie et par conséquent l'évolution d'une étoile, est sa masse.

Comme nous l'avons vu avec les diagrammes Hertzsprung Russell, les étoiles les plus massives sont les étoiles les plus brillantes et, par conséquent, qui ont la plus petite durée de vie. Cela peut paraître contre-intuitif sachant que plus une étoile est massive plus elle a de particules à disposition pour produire de l'énergie. Cependant, le facteur qui influence le plus le taux de fusion au cœur d'une étoile est sa température, et plus une étoile est massive, plus la pression (et donc la température) augmente. Alors que les étoiles les moins massives peuvent rester sur la séquence principale pendant quelques centaines de milliards d'années, les étoiles les plus massives ont une durée de vie inférieure à 1 million d'années.

Lorsqu'une étoile épuise son stock d'hydrogène dans son cœur et qu'il ne reste plus qu'un résidu d'hélium ne pouvant fusionner seulement à des températures bien plus hautes, la force gravitationnelle prend le dessus et l'étoile se contracte sur elle-même. Lors de cette contraction, l'énergie potentielle gravitationnelle est convertie en chaleur qui réchauffe une couche d'hydrogène se situant juste à l'extérieur du noyau et permet à cette hydrogène de fusionner. Ce nouvel apport d'énergie, encore plus massif que lorsque l'étoile fusionne de l'hydrogène en son cœur, entraîne une augmentation en luminosité et les couches externes de l'étoile se dilatent jusqu'à atteindre d'énormes proportions. Cette expansion résulte en une baisse de température de l'étoile à sa surface. L'étoile est devenue une géante rouge.

Si l'étoile a une masse inférieure à deux fois celle du Soleil ($2 M_{\odot}$), il se produit un phénomène qui s'appelle "flash de l'hélium" quand le cœur dégénéré de l'étoile atteint finalement la température critique d'environ 1×10^8 K. L'étoile se contracte avant de recommencer une séquence de fusion cette fois-ci avec de l'hélium en carbone alors qu'une couche à l'extérieur peut recommencer à fusionner de l'hydrogène. Les étoiles dont la masse ne dépasse pas $8 M_{\odot}$ peuvent continuer ces cycles de fusions jusqu'à, pour les étoiles les plus massives, arriver au silicone (Figure 7).

L'évolution d'une étoile après sa phase en tant que géante rouge dépend largement de sa masse. Elle s'écroule sur elle-même à partir du moment où elle ne peut plus commencer un nouveau cycle de réaction nucléaire. Les étoiles les moins massives finissent par se débarrasser de leurs couches externes après quelques milliards d'années, laissant derrière elles leur noyau stable grâce à la dégénérescence électronique. On appelle ces vestiges stellaires des naines blanches. En effet, la densité est tellement grande que les électrons ne peuvent physiquement pas être plus proches les uns des autres. En d'autres termes, la loi d'exclusion de Pauli empêche aux fermions d'occuper le même état quantique. La mort de ces étoiles donne naissance à de magnifiques nébuleuses planétaires et relâche les éléments qu'elles ont fusionné dans l'espace.

Les étoiles dont la masse dépasse $8 M_{\odot}$ ont une mort bien plus spectaculaire. En effet, lorsque l'étoile n'a plus d'autres choix que de devoir fusionner du fer, les réactions de fusions n'apportent plus d'énergie. En une fraction de seconde, l'étoile

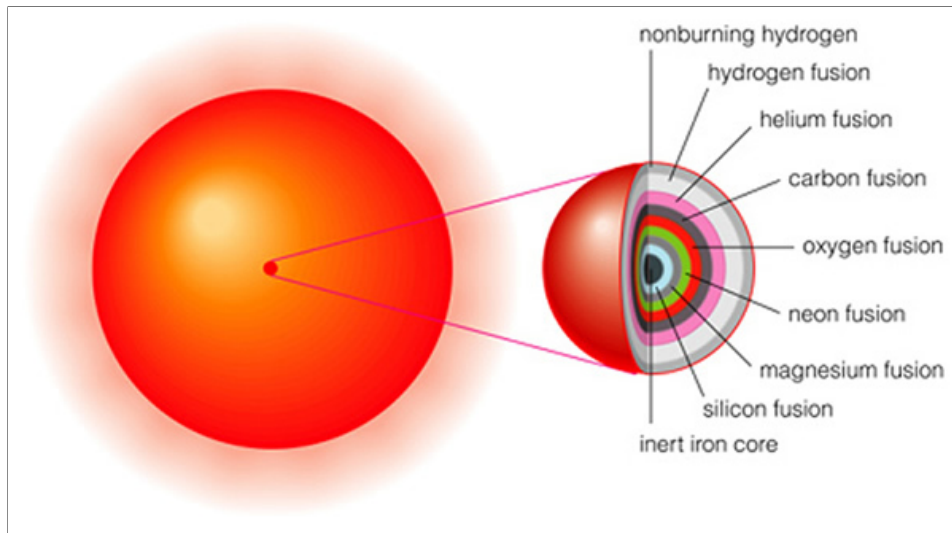


FIGURE 7 – Synthèse des éléments dans une étoile où $m > 8M_{\odot}$

s'écroule sur elle-même et la densité en son cœur est si forte que même la répulsion des électrons grâce au principe d'exclusion de Pauli ne permet pas à l'étoile de devenir une naine blanche mais est destinée à devenir une étoile à neutron ou un *trou noir*. Leurs morts sont accompagnées par un des événements les plus extrêmes de l'univers, à savoir une supernova relâchant également les métaux de l'étoile dans le vide de l'espace et en permettant la création d'autres métaux lourds grâce à l'immense quantité d'énergie présente à ce moment là.

Nous sommes fait de poussières d'étoiles comme l'a dit le brillant astronome Carl Sagan. Nous devons notre existence aux étoiles et aux processus de fusion nucléaire qui ont lieu dans leur cœur pendant des millions ou des milliards d'années. Tous les éléments lourds qui composent notre corps (carbone, azote, oxygène, calcium, phosphate, ...) ont été synthétisés au cœur d'une étoile ou lors d'événements cataclysmique pouvant surpasser la luminosité d'une galaxie entière pendant quelques instants.

5 Une remise en question de notre place et de nos origines dans l'Univers

Au début du 20ème siècle, une grande partie de la communauté scientifique pensait que la voie lactée était l'univers tout entier et d'autres pensaient que les nébuleuses, comme Andromède, étaient en fait des galaxies indépendantes ou des "univers îles". Le manque et l'imprécision des données empiriques nous empêchait de déterminer quels côtés avaient raison. Dans le courant des années 1920, un événement communément appelé le "grand débat" fut tenu au musée national d'histoire naturelle des Etats-Unis opposant les vues de deux astronomes, Harlow Shapley et Heber Curtis. La controverse concernait la nature de certains objets célestes appelés nébuleuses à spirale ainsi que la taille de l'univers. Alors que Shapley soutenait que l'univers n'était composé que d'une unique galaxie, la nôtre, Curtis pensait que les multitudes de nébuleuses à spirales observées jusqu'à ce jour étaient en fait des galaxies indépendantes et externes à notre voie lactée.

Rétrospectivement, les deux astronomes avaient raison sur certains aspects, mais les imprécisions liées à certaines erreurs de mesures empêcha au débat de se clore avec un vainqueur. Cependant, quelques années plus tard, en 1926, l'un des plus grands astronomes de l'histoire bouleversa notre vision de l'univers et la place qu'on y occupe en mettant fin au grand débat.

5.1 Les observations de Edwin Hubble

Appartenant à la lignée de scientifiques ayant comme volonté de dévoiler la vraie structure de l'univers, Edwin Hubble est sans doute une des figures les plus importantes du 20ème siècle, montrant au monde entier la vraie face de notre univers. Il pu confirmer ce qu'un personnage du XVIème siècle, Giordano Bruno, déclara au prix de sa vie sous l'autorité d'une société dominée par la pensée chrétienne : il existe bel et bien une infinité de mondes dans un univers infiniment grand.

Edwin Hubble a toujours aimé l'astronomie. Après trois années d'études en droit sans succès pour satisfaire les souhaits de son père, Hubble continue ses études en astronomie à l'Observatoire Yerkes à Chicago. Il mettra en avant dans sa dissertation de doctorat l'hypothèse que les nébuleuses à spirales observées jusqu'à ce jour étaient en fait des galaxies indépendantes situées hors de notre voie lactée.

"Considering the problematic nature of the data, the agreement is such as to lend some color to the hypothesis that the spirals are stellar systems at distances to be measured often in millions of light-years." [5]

Afin de vérifier son hypothèse, il est nécessaire de mesurer les distances auxquelles

se trouvent ces nébuleuses à spirales. Edwin Hubble va pouvoir profiter du nouveau télescope Hooker de 2,5 m situé au mont Wilson pour lui permettre d'observer le ciel nocturne avec une précision encore jamais atteinte. Afin de pouvoir mesurer des distances aussi lointaines, Hubble se servit d'étoiles céphéides. Ces dernières sont des étoiles bien plus grandes et lumineuses que notre soleil dont l'éclat varie faiblement selon une certaine période. Elle possède une caractéristique clé en astronomie qui fut découverte par Henrietta Swan Leavitt.

Cette femme est souvent ignorée malgré sa contribution remarquable dans le domaine de l'astronomie. Au cours des années 1910, elle travaillait comme calculatrice⁶ à l'université d'Harvard et s'occupait de cataloguer la luminosité d'étoiles. Ces étoiles étaient pour la plupart des étoiles variables céphéides et elle en profita pour mettre en avant la relation entre leur période de pulsation et leur magnitude absolue. Dans un article scientifique publié en 1912, elle créa un graphique représentant les périodes et éclat de 25 céphéides situées dans les nuages de Magellan. Ce choix permet de supposer que toutes ces étoiles se trouvaient à la même distance de la terre afin de simplifier la détermination de leur magnitude absolue à partir de leur *magnitude apparente*. Selon ses propres mots :

“A straight line can be readily drawn among each of the two series of points corresponding to maxima and minima, thus showing that there is a simple relation between the brightness of the Cepheid variables and their periods.” [6]

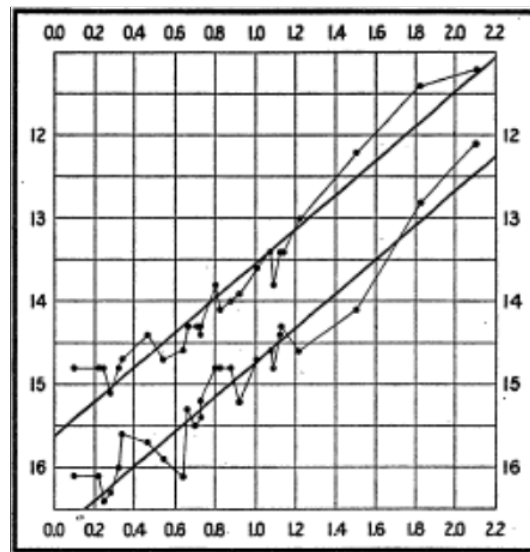


FIGURE 8 – relation période-luminosité des étoiles céphéides situés dans les nuages de Magellan. L'axe des abscisses correspond au périodes en jour et les ordonnées sont égales au magnitudes absolues maximales et minimales.

6. Avant l'apparition des ordinateurs, les recherches nécessitait des calculs manuels

L'astronome remarqua que plus la période de pulsation est longue, plus la magnitude absolue de l'étoile est petite. Cette découverte peut paraître triviale à première vue, mais elle est révolutionnaire. Après que son échelle période-luminosité fut calibrée, la relation période-luminosité donna naissance aux premières *chandelles standards*. En effet, il suffit de connaître la période d'une céphéïdes pour déterminer son éclat à l'aide de ce qui est maintenant appelé la loi de Leavitt. Les céphéïdes sont devenues des bougies parsemées dans l'univers nous permettant de calculer les distances d'objets astronomiques trop lointains pour les méthodes standards de parallaxe stellaire.

Quelques années après la mort tragique de Henrietta en 1921 suite à un cancer, Edwin Hubble put s'appuyer sur sa découverte afin de mesurer la distance d'étoiles céphéïdes qu'il a pu trouver dans la galaxie Andromède. Il conclut que ces étoiles situées dans la galaxie Andromède étaient bien plus lointaines que celles présentes dans notre propre voie lactée. Il estima une première distance séparant notre galaxie d'Andromède d'environ 900'000 années lumière, confirmant ainsi son hypothèse qu'il s'agit bien d'une galaxie indépendante et non d'une simple nébuleuse à spirales située à l'intérieur de notre voie lactée comme le soutenait Shapley. En effet, les estimations de la taille de notre galaxie à l'époque indiquait environ 100'000 années lumières. L'estimation de la distance d'Andromède fut ensuite améliorée après avoir pris en compte des erreurs de mesures qui est en fait située à plus de 2'000'000 d'années lumières.

Cette révélation secoua les fondements de l'astronomie en mettant fin au grand débat concernant la taille de l'univers.

5.2 Un univers en expansion

Edwin Hubble ne s'arrêta pas là et calcula la distance de plusieurs autres galaxies ; il découvrit quelque chose d'encore plus extraordinaire. Il remarqua que les lignes spectrales de ces galaxies devenaient de plus en plus décalées vers de plus grandes longueurs d'ondes en fonction de leur distance. Il en conclut dans un article scientifique révolutionnaire en 1929 que la vitesse de récession d'une galaxie est proportionnelle à sa distance. En d'autres termes, plus une galaxie est lointaine, plus elle s'éloigne de nous rapidement. Comment en est-il arrivé à cette conclusion ?

Il existe en physique un phénomène qui s'appelle l'effet doppler. Cet effet concerne toutes les ondes. Tout le monde connaît ce phénomène, il suffit de se placer au bord d'une route et écouter les voitures passer. Le son d'une sirène de police qui s'approche est plus aigu que si elle s'éloigne. La façon la plus simple de comprendre cet effet est de se rappeler que le son dépend de la longueur d'onde des ondes provenant d'une source. Un son aigu est lié à une petite longueur d'onde.

Si on imagine une voiture se déplaçant à une très grande vitesse, les ondes auront tendance à se rapprocher à l'avant du véhicule alors qu'elles s'éloignent à l'arrière, ce qui explique la différence de ton du son. La lumière, comme l'a montré James Clark Maxwell, peut être décrite comme une onde et, de par ce fait, subit également l'effet doppler.

En revenant à nos galaxies, on peut maintenant comprendre le rapprochement qu'Edwin Hubble a fait. La longueur d'onde de la lumière provenant des galaxies plus lointaines doit être expliquée par un décalage vers le rouge. En d'autres termes, la longueur d'onde diminue et, comme nous pouvons le remarquer avec la figure 9, une petite longueur d'onde équivaut à de la lumière bleue alors qu'une grande longueur d'onde équivaut à du rouge.

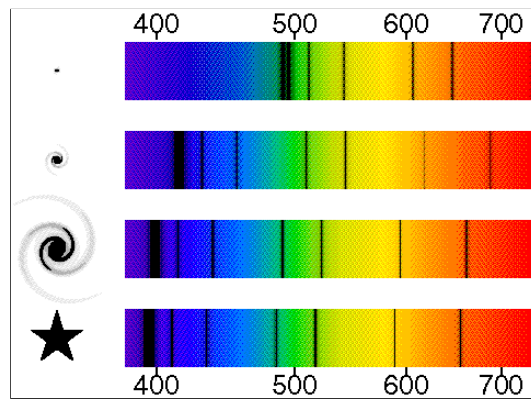


FIGURE 9 – décalage des lignes d'absorption d'un objet astronomique en fonction de sa distance

Le décalage spectral z est proportionnelle à la vitesse de l'objet sur la vitesse à laquelle se propage les ondes à savoir c , la vitesse de la lumière. Le décalage de Doppler peut être déterminé en comparant la longueur d'onde correspondant au lignes d'absorptions du spectre d'un objet au repos et en mouvement de cette manière⁷ :

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{rest}} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} = \frac{v}{c}$$

Avec :

- λ la longueur d'onde
- v la vitesse de récession
- c la vitesse de la lumière

7. Cette équation n'est valable seulement pour les objets possédant de petites vitesses de récession. Si la vitesse de récession de l'objet est proche de la vitesse de la lumière, il faut utiliser une autre équation : $z = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$ [7]

Nous pouvons remarquer que la vitesse de récession est proportionnelle au décalage vers le rouge comme conclut Edwin Hubble au sujet des galaxies.

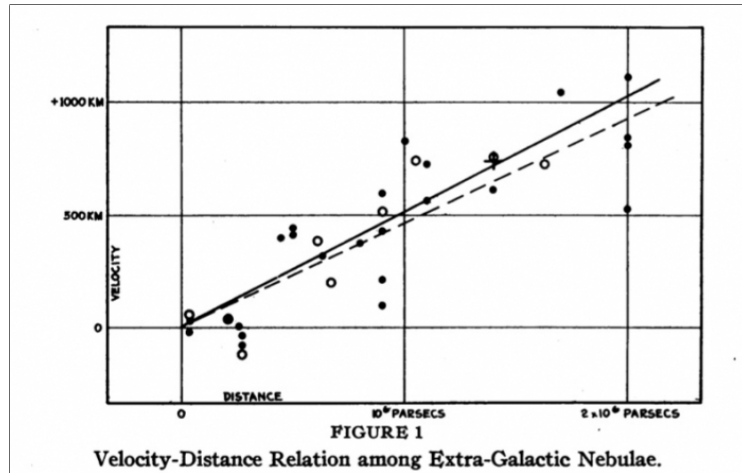


FIGURE 10 – relation entre la distance et la vitesse de nébuleuses extra-galactique

L'astronome mit en place une loi portant son nom : la loi d'Hubble :

$$v = H_0 d$$

Avec :

- v la vitesse de récession
- H_0 la constante de Hubble
- d la distance

Le physicien russe Alexander Friedmann et le prêtre belge Georges Lemaître sont les deux premiers scientifiques à avoir appliqué les résultats d'Hubble à la création de modèle mathématique d'un univers en expansion. Friedmann utilisa les équations de champs d'Einstein formulées quelques années auparavant. Ces accomplissements sont tout autant remarquables sachant qu'il devait travailler dans les conditions horribles de la première guerre mondiale et de la Révolution de février faisant rage en Russie en 1919. Après avoir publié ses résultats en 1922, il succomba 3 ans plus tard avant de recevoir la reconnaissance méritée pour ses recherches. C'est le prêtre belge Lemaître qui obtient les mêmes résultats, indépendamment et quelques années plus tard, qui propagea ces résultats en Occident. Ces modèles mathématiques nécessitent un univers en expansion continue dont nous nous trouvons au centre. Cette conclusion peut paraître surprenante sachant qu'elle viole le principe Copernicien, à savoir le postulat selon lequel nous n'occupons pas une place privilégiée dans l'univers. Cependant, cela n'a rien de particulier. En effet, tout observateur voit le contenu de l'univers s'éloigner de lui. Il faut voir l'univers comme un ballon marqué de points

qu'on gonfle. Il s'agit de l'espace entre ces points qui augmente. Évidemment, cette conclusion était difficile à accepter sachant que depuis Aristote, personne ne doutait que l'univers était fixe. Plusieurs astronomes, et même Albert Einstein, adhéraient au modèle de l'état stationnaire qui décrivait un univers éternel et fixe. En produisant sa théorie de *relativité générale* en 1915, Einstein a ajouté un terme dans son équation car cette dernière, contre toute attente, prédisait un univers en expansion. Ce terme s'appelle la constante cosmologique et il était nécessaire pour Einstein afin de rendre l'univers décrit par ses équations, statique. En rétrospective, l'ajout de la constante cosmologique fut considérée par le physicien comme "sa plus grosse gaffe". Une fois présenté avec les observations et les calculs favorisant un univers en expansion, Einstein accepta toute suite son erreur et changea son point de vue.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

FIGURE 11 – La constante cosmologique $\Lambda g_{\mu\nu}$ dans l'équation de champ d'Einstein

En s'intéressant aux implications d'un univers en expansion, une autre question fondamentale a toujours été dans la tête de l'Homme : En acceptant l'idée que l'univers est en expansion et qu'on remonte le temps, la question suivante se pose : L'univers a-t-il eu un commencement ?

5.3 Le modèle du Big Bang

Georges Lemaître fut l'un des premiers à s'intéresser à la question et à nommer ce point "œuf cosmique". Par conséquent, l'âge de l'univers devrait être fini contrairement à ce que mettait en avant la théorie la plus acceptée à l'époque qui attribuait un âge infini à notre univers. Cependant il fallut attendre quelques années avant que le modèle soit développé à cause d'erreurs dans le calcul de l'âge de l'univers avec la loi d'Hubble. En effet, l'âge de l'univers est assez simple à calculer en utilisant cette loi, car il revient à prendre l'inverse de la constante d'Hubble⁸. Les premiers résultats indiquèrent un univers moins âgé que la Terre. Ces résultats décourageant ont pu être expliqués par une erreur lors d'observation où le mauvais type d'étoiles céphéides avait été choisi pour déterminer la constante d'Hubble. Les nouveaux résultats fixèrent l'âge de l'univers à environ 15 milliards d'années. Le

8. calcul : $t_H = d/v = 1/H_0$ et pour la valeur actuelle de H_0 , $t_H \approx 15$ milliards d'années

terme “Big Bang” fut créé par Fred Hoyle en 1950 afin de décrire le moment où ce point de densité infini “explosa”, ce qui engendra le début de notre univers. Selon les modèles de Friedmann, le destin de l’univers dépend de sa densité. En se basant sur la théorie de la relativité générale, l’espace temps peut être courbé en présence de masse ou d’énergie. De par ce fait, nous pouvons nous intéresser à la géométrie de l’univers tout entier dépendant de la quantité totale de matière présente dans notre univers. Il existe trois types de géométrie possible pour l’univers, à savoir : ouvert, fermé ou plat. L’idée d’un univers tridimensionnel courbé peut paraître difficile à se représenter. Cependant, la conséquence de leur existence est bien plus intéressante. Selon la relativité générale, un univers fermé où la densité énergétique est largement dominée par de la *matière baryonique*, l’univers serait destiné à s’effondrer sur lui-même lors d’un événement appelé Big Crunch. Un univers ouvert continue à s’étendre indéfiniment et un univers plat continue de s’étendre de plus en plus lentement mais sans jamais s’arrêter.

Dans les années 40, alors que le modèle était pris plus au sérieux, on commença à s’interroger sur la raison pour laquelle l’univers a la composition chimique qu’il a et pas une autre. Nous savons que les étoiles et les supernovas produisent des éléments lourds, mais qu’en est-il de l’hydrogène et de l’hélium ? Les scientifiques Alpher, Bethe et Gamow ont proposé un modèle dans lequel la nucléosynthèse aurait eu lieu lors des premiers instants de l’univers alors que ce dernier était beaucoup plus dense et, de par ce fait, beaucoup plus chaud. La nucléosynthèse primordiale s’agit d’une période durant environ 20 minutes, qui a débuté alors que l’Univers n’a commencé il y a seulement quelques secondes, et que sa température est d’environ 1 milliards de Kelvin. Avant cet événement, les protons et les neutrons sont créés de manière égale et ils sont tous les deux stables. Cependant quand la température de l’univers atteignit les 1 milliards de degrés, les neutrons sont devenus instables et la seule façon de ne pas être convertie en proton via désintégration β^+ par l’intermédiaire de l’interaction faible était de s’unir avec des protons. Pendant ces 20 minutes, les neutrons qui ont survécu se sont unis avec des protons pour créer des noyaux d’hélium, un peu de deutérium, d’hélium 3 et de lithium. Ce phénomène explique les proportions d’hydrogène et d’hélium dans l’univers à savoir environ 75% et 24% respectivement.

Les mêmes scientifiques ont également prédit l’existence d’un reste de radiation provenant de cette époque qui, à cause de l’effet Doppler, aurait une température de 5 Kelvin si on devait la mesurer aujourd’hui. Cette prédiction s’est avérée vraie et fut vérifiée en 1965⁹. Il s’agit d’une preuve très importante soutenant le modèle du Big Bang. De plus, des calculs trigonométriques ont pu déterminer que notre univers est plat, et par conséquent mourra non pas de manière cataclysmique avec un Big Crunch, mais silencieusement lorsque l’*entropie* atteindra son maximum.

9. Il s’agit du rayonnement cosmologique

6 Des réflexions sur la place de l'homme au sein de l'univers

Après s'être intéressé à la manière dont l'ingéniosité de l'homme les a propulsés dans l'espace pour découvrir ses mystères, il est nécessaire de prendre du recul et de s'intéresser à l'impact de ces recherches scientifiques sur l'homme et sa vision de l'univers.

6.1 Une secousse existentielle

Notre vision de l'univers s'est beaucoup développée depuis que l'Homme a commencé à contempler les étoiles. Un cosmos, que l'on pensait être constitué de notre soleil, notre lune, quelques planètes et des étoiles fixes dans l'arrière-plan, est devenu d'une immensité inconcevable remplie de galaxies. En effet, nos télescopes ont révélé au grand public l'immensité de l'univers, notamment le télescope spatial Hubble qui porte le nom adéquat du fameux astronome qui ouvrit nos yeux vis-à-vis de la vraie taille de l'univers. Le Hubble Deep Field fait partie des images les plus iconiques de notre univers (voir couverture). Sans compter les quelques étoiles en avant-plan, chaque point lumineux est une galaxie comportant plus de 100 milliards d'étoiles. Cette région de l'espace vue depuis la Terre équivaut au rayon angulaire d'une balle de tennis à 100 mètres de distance. Nous n'habitons plus l'univers de nos ancêtres vivant au paléolithique ou au Moyen Âge. La réalisation de l'immensité de l'univers a drastiquement réduit notre vision de nous-mêmes. Nous sommes, comme l'écrit Stephen Hawking dans *A brief history of time* “*just a chemical scum on a moderate-sized planet, orbiting around a very average star in the outer suburb of one among a hundred billion galaxies*”. En contemplant l'univers dans lequel nous vivons, la vie humaine peut paraître insignifiante. Ce sentiment pessimiste d'insignifiante cosmique est assez commun et nous pouvons le trouver à plusieurs reprises dans la littérature. Le mathématicien Blaise Pascal écrit :

“Le silence éternel de ces espaces infinis m'effraie“

Nous pouvons trouver des réflexions similaires chez d'autres figures comme Voltaire, Schopenhauer, Tolstoy, Camus et plein d'autres. En effet, les choses ont tendance à perdre en importance quand le contexte s'élargit. Une pandémie peut fortement impacter le monde entier pendant deux ans mais lorsque le contexte s'agrandit et que l'on s'intéresse à l'histoire des virus qui ont ravagé le monde depuis le début de l'humanité, cette pandémie perd toute suite son importance. Il en va de même pour l'existence de l'humanité dans un univers aussi vaste. Nos plus grandes tragédies ou accomplissements perdent toute importance. Il est également question de l'importance de notre existence. En effet, d'un point de vue cosmique, notre existence n'a

aucune importance et l'univers serait le même si l'on n'existait pas. Nous arrivons à cette conclusion suite au fait déprimant que l'espèce humaine mourra un jour ou l'autre et nous ne pouvons rien y faire. Ce sentiment d'insignifiance cosmique est le produit de la science moderne et par conséquent, du déclin de la croyance religieuse. Depuis Copernic, plusieurs penseurs arrivent à la conclusion que l'humanité fait face aux conséquences nihilistes de la curiosité humaine. Selon Friedrich Nietzsche, Dieu est mort et nous sommes responsables. Il écrit :

“Since Copernicus it seems that man has found himself on a descending slope—he always rolls further and further away from his point of departure toward . . . —where is that ? Towards nothingness ?”

Comme nous l'avons vu, le 20ème siècle retira notre galaxie du centre de l'univers comme nous l'avions pensé depuis longtemps. Nous devons maintenant faire face courageusement à l'apparente indifférence de notre univers en abandonnant le confort des religions et en créant notre propre sens à la vie, car selon Nietzsche, l'homme ne peut pas vivre sans sens ou sans guide. Malgré ces faits démoralisant, il reste un espoir. Si l'Homme est seul dans l'univers, alors son intelligence se démarque de tout le contenu inanimé de l'univers. Or, une des questions les plus importantes occupant une partie de l'esprit des hommes depuis des millénaires se pose : Sommes-nous seuls dans l'univers ?

6.2 Sommes-nous seuls dans l'univers ?

La révélation de la vraie taille du cosmos a certainement engendré une énorme fascination pour le grand public. Nous vivons maintenant dans un univers contenant quelques centaines de milliards de galaxies elles-mêmes contenant le même nombre immense d'étoiles qui offre leur lumière à des multitudes de planètes. La possibilité pour de la vie extraterrestre n'a jamais été aussi importante, et ça serait assez égocentrique de soutenir l'idée que nous sommes seul dans un univers aussi vaste. De plus, le principe copernicien confirme que nous n'occupons pas une place importante dans l'univers. La vie extraterrestre a gagné beaucoup de popularité et est apparue dans de nombreux médias. Les aliens mal-intentionnés des films hollywoodiens à l'apparence étrangement similaire à celle des humains n'ont pas cessé de captiver le grand public. Quand on pense à la diversité de la vie sur Terre, il est absurde de penser que des millions d'années d'évolution auraient donné à ces aliens une apparence aussi familière. Certaines exceptions comme *2001 : l'odyssée de l'espace* (1968) ou *Contact* (1997) nous laissent avec une image un peu plus réaliste de ce à quoi nous devrions nous attendre. En retournant à la réalité, il faut s'interroger sur la manière dont nous pouvons communiquer avec ces autres formes de vies. La vitesse maximale à laquelle de l'information peut se propager dans le vide de l'espace est la vitesse de la lumière $c = 300\,000\,000 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$. Nous pouvons approcher cette vitesse non pas avec des vaisseaux spatiaux ou des sondes spatiales

à cause de l'immense quantité d'énergie qu'il serait nécessaire mais avec des ondes électromagnétiques. L'humanité n'a pas cessé d'émettre des ondes radios dans l'espace depuis la première diffusion à la radio en 1906, c'est-à-dire depuis 116 ans. Il existe donc une bulle d'onde radios d'un rayon de 116 années lumières ayant comme origine la Terre. Nous sommes pratiquement muets à l'échelle de la voie lactée et encore plus à l'échelle de l'univers. Cependant, maintenant que nous savons que l'univers à environ 15 milliards d'années, il est extrêmement probable que d'autres civilisations plus avancées aient commencé à émettre des ondes électromagnétiques dans l'espace. Des organisations sur Terre comme SETI (*Search for extraterrestrial intelligence*) ont comme objectif d'écouter le ciel et d'analyser les éventuels signaux qui parviennent à atteindre la Terre. Il est également possible d'analyser la baisse en luminosité apparente d'étoiles qui pourrait indiquer la présence de civilisations extraterrestres bien plus avancées que la nôtre. Bien qu'une courte baisse de luminosité puisse être expliqué par des planètes passant entre nos instruments et l'étoile, une civilisation suffisamment avancée pourrait construire une structure appelée Dyson Sphere qui consiste à entourer leur étoile de satellites qui récupérerait énormément d'énergie.

Il existe une équation célèbre appelée l'équation de Drake portant le nom du scientifique Frank Drake :

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_h \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

Avec :

- N : le nombre de civilisations avec qui on pourrait communiquer dans notre voie lactée.
- R_* : la fréquence de formation d'étoiles dans une Galaxie comme la nôtre (en étoiles par années).
- f_p : le nombre d'étoiles avec des planètes en orbite.
- n_h : le nombre moyen de planètes appartenant à la zone habitable et dont les conditions permettent l'apparition de la vie.
- f_l : le nombre de ces planètes où la vie c'est effectivement développée.
- f_c : le taux de civilisation intelligentes ayant la capacité et qui essaient de communiquer à travers l'univers.
- L : la durée de vie d'une de ces civilisations.

Le nombre de civilisations varie beaucoup selon les facteurs qu'on choisit. En effet, il est difficile d'être exact avec ce genre de données et il y a encore beaucoup de spéculations. En utilisant les estimations les plus modernes, on arrive à $N = 47.3175$ [8]. Ce nombre est très petit par rapport au nombre de planètes dans la voie lactée ce qui nous montre que la formation d'une vie intelligente est très rare mais

tout de même possible. Jusqu'à aujourd'hui, aucune trace d'intelligence ou même de simple vie extraterrestre n'a été détectée. Le contraste entre l'immensité de l'espace accompagné de la quantité de temps à disposition pour l'évolution de vie dans l'univers et le silence total que nous détectons a été nommé le paradoxe de Fermi. Il est possible que ces formes de vies ne soient simplement pas intéressées ou qu'elles ne voient pas l'intérêt de communiquer avec la Terre car, il faut le rappeler que toutes civilisations situées plus loin que 116 années lumière de la Terre n'auraient aucune idée que des être vivant y habitent. Une approche plus pessimiste serait de conclure que les civilisations intelligentes n'arrivent pas à évoluer de telle manière à explorer l'univers à cause de conflit ou catastrophe climatique menant à une extinction de la forme de vie. Toutes ces réflexions au sujet de potentielles cousins cosmiques séparées par des distances inimaginables partageant le même univers nous laissent réfléchir à notre propre civilisation et société. Qu'est ce qu'il faut retenir de notre place dans l'univers et de la chance que nous avons d'en faire partie ?

6.3 Au sommet de la pyramide de la complexité

Située dans un recoin de l'univers indifférent, la Terre contient à sa surface ce qui se trouve au sommet de la pyramide de complexité. Notre civilisation se démarque par son incroyable complexité dans un univers où l'entropie ne cesse d'augmenter jusqu'à sa mort thermique. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, l'humanité, malgré sa ridicule présence dans un univers si grand et riche en galaxies, est la seule forme de vie connue. Notre présence est rare et précieuse car nous sommes à l'heure actuelle les seuls êtres capables de penser et découvrir les mystères du cosmos. Après des milliards d'années d'évolution cosmique, la poussière d'étoiles s'est réunie et a formé des êtres complexes dotés d'une imagination sans fin. En quelque sorte, nous sommes les organes sensoriels de l'univers. Les divinités dont nous avons vénéré l'existence ne sont qu'un produit de notre imagination. Nous sommes un moyen pour l'univers de se connaître lui-même.

En prenant du recul quelques minutes de nos vies occupées, il est nécessaire de se rendre compte de la chance que nous avons en tant que créatures vivantes et dotées de raison d'exister. Tout au long de ce travail, nous avons découvert une partie de ce qu'est l'univers et son fonctionnement. Or, la simple question : Pourquoi ? revient beaucoup en physique et après une série de questions de la sorte, nous arrivons à questionner la nature de la réalité elle-même et c'est à ce moment précis qu'on se rend compte qu'au milieu de notre ignorance, se démarque la reconnaissance de notre incroyable chance. L'univers est remplie de constante fondamentale permettant son fonctionnement tel qu'on le connaît. La vitesse de la lumière est la vitesse maximale à laquelle toutes informations peut se propager, la force nucléaire forte garde les protons et neutrons qui forment nos atomes ensemble alors que la force nucléaire faible garantie des processus de désintégrations qui garantie le fonctionnement de notre

propre soleil auquel on doit notre vie. Évidemment, il en existe beaucoup d'autres. Nous avons de la peine à réaliser qu'une petite variation de ces constantes rendrait notre univers complètement hostile à toute forme de vie basée sur le carbone. Un univers où la gravité est trop faible est dépourvu d'étoiles alors qu'un univers où la force électromagnétique est un peu plus forte, les étoiles de la séquence principale ne seraient pas assez chaudes pour garantir l'existence de vie complexe. Pourquoi est-ce que les constantes fondamentales ont les valeurs qu'elles ont ? Nous pouvons prendre le chemin plus confortable qui consiste à appeler un créateur ou une force divine. Cependant la science n'espère pas mais fait de son mieux pour comprendre le monde qui nous entoure et notre meilleure réponse à l'heure actuelle est que nous n'avons absolument aucune idée. Ce questionnement est appelé le principe anthropique et il existe plusieurs hypothèses. Il est possible qu'il existe une infinité d'autres univers chacun doté de constantes différentes ou alors, le fait qu'on soit conscient oblige à l'univers d'avoir les constantes qu'il possède. Cependant, une chose est sûre, nous sommes extrêmement chanceux et nous devrions être satisfaits de notre place dans l'univers où la vie est un miracle.

Si tous les Hommes réalisaient cette réalité, peut-être que nos actions sur cette planète changeraient pour le mieux. La seule intelligence de l'univers connue à l'heure actuelle profite de sa chance incroyable pour ravager sa planète et terroriser des populations entières pour des profits économiques ou territoriaux depuis des millénaires. L'absurdité de la situation devient de plus en plus apparente lorsqu'on regarde notre Terre de loin. Une des images astronomiques les plus célèbres intitulée Pale Blue Dot, capturée par la sonde spatiale *Voyager 1* et nommée en l'honneur du brillant astronome Carl Sagan, est une photographie de notre Terre à une distance d'environ 6 milliards de kilomètres. Notre planète apparaît comme un grain de poussière au milieu du vide de l'espace. À sa vue, nous nous rendons compte de la fragilité de notre planète.

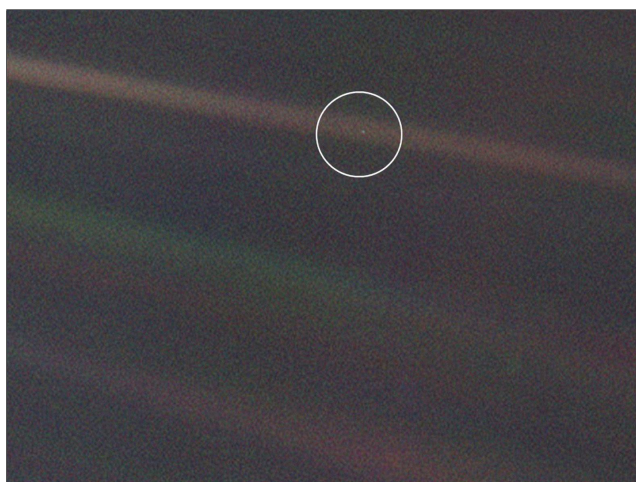


FIGURE 12 – La Terre, photographiée à plus de 6 milliards de kilomètres par la sonde spatiale Voyager 1

Il est clair que l'homme doit s'adapter à l'hostilité de l'univers s'il veut survivre après la mort de son étoile. Les distances qui nous séparent de ces autres mondes potentiellement habitables rendent pratiquement impossible même avec énormément d'argent de traverser la galaxie et l'univers. Il est crucial qu'on arrive à manipuler notre biologie pour s'adapter à un univers qui n'a pas été conçu pour nous. C'est pourquoi il faut se concentrer sur la préservation de notre planète et accepter le cadeau que l'univers nous a donné.

7 Conclusion

L'astronomie est une science qui nous ouvre les yeux. En fonction de son évolution, la société a dû s'adapter pour répondre à ce que nous continuons de découvrir. Depuis les anciens grecs, la poursuite de la science et l'astronomie nous a forcé de réduire l'importance qu'on s'était attribué en tant qu'êtres conscients dans l'univers. Ces changements nous ont bouleversés et il est compliqué pour l'homme, comme nous l'avons constaté par exemple au Moyen Âge, d'accepter ces réalités. Lors de la première moitié du 20^{ème} siècle, l'infinité du cosmos s'est révélé sous nos yeux ébahis. On a réalisé le lien intime qu'on partage avec les étoiles, que certains pensaient autrefois être des divinités et, à travers nos télescopes, nous avons appris beaucoup de choses sur notre origine et le futur qui nous attend. En laissant ces découvertes décanter, plusieurs questions ont été posées et continuent de l'être à leur sujet. Comment devons nous les interpréter ? La question reste ouverte.

En prenant du recul, il est clair que l'astronomie, comme toutes les autres branches scientifiques, est en constante évolution et, par conséquent, il ne faut pas se convaincre que nous savons tout. Qu'est-ce que le futur de l'astronomie nous réserve ? Une remise en question d'une ampleur comparable à celle mise en avant dans ce travail serait-elle envisageable dans le futur proche ? La technologie s'améliore de manière exponentielle, de nouveaux télescopes comme le *James Webb Space Telescope* nous révèle des clichés exceptionnels et riches en informations supplémentaires sur les objets les plus lointains de l'univers. Plusieurs nouvelles méthodes d'observation sont en cours de développement comme, notamment, les ondes gravitationnelles qui promettent un flot de nouvelles découvertes. Une chose est claire, l'astronomie nous réserve beaucoup de surprises. Nous avons de la chance de pouvoir vivre dans un univers si mystérieux car, en fin de compte, ne serait-il pas ennuyant d'avoir les réponses à toutes les questions ?

8 Bibliographie

Livres :

BERTONE Gianfranco, A tale of two infinities : gravitational waves and the quantum origin of the universe's biggest mysteries. Oxford : Oxford University press, 2021. 125 p.

CARROLL Bradley W.; OSTLIE Dale A., An introduction to modern astrophysics. San Francisco : Pearson, 2007. 1278 p.

COLES Peter, Cosmology : a very short introduction. Oxford : Oxford University press, 2001. 139 p.

HAWKING Stephen, Brief answers to the big questions. London : John Murray, 2020. 247 p.

HOSKIN Michael, The history of astronomy : a very short introduction. Oxford : Oxford University press, 2003. 123 p.

KALER James B., Extreme Stars : at the edge of creation. Cambridge : Cambridge University press, 2001. 228 p.

KING Andrew, Stars : a very short introduction. Oxford : Oxford University press, 2012. 120 p.

KRAUSS Lawrence M., A universe from nothing : why there is something rather than nothing. London : Simon Schuster, 2012. 202 p.

PRIMACK Joel R.; ABRAMS Nancy Ellen, The view from the center of the universe. New York : Riverhead Books, 2006. 386 p.

SAGAN Carl, Cosmos. New York : Ballantine Books trade Paperbacks, 2013. 396 p.

SAGAN Carl, Pale blue dot. New York : Ballantine Books, 1997. 360 p.

TYSON Neil deGrasse, Death by black hole; and other cosmic quandaries. New York : W. W. Norton Company, 2007. 385 p.

WAGONER Robert V.; GOLDSMITH Donald W., Cosmic horizons : understanding the universe. San Francisco : W.H Freeman and Company, 1983. 195 p.

Travail de doctorat :

[5] Photographic investigations of faint nebulae : Hubble, Edwin Powell, 1889-1953 : Free Download, Borrow, and Streaming : (s. d.). Internet Archive. <https://archive.org/details/photographicinve00hubbrich/page/2/mode/2up>, (Consulté le 9 juillet 2022)

Article scientifique :

[6] Henrietta S. Leavitt Edward C. Pickering. (1912). Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud. Harvard College Observatory Circular, 173, 1-3. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L/abstract> (Consulté le 8 juillet 2022)

Article en ligne :

[8] Veisdal, J. (2019). How to estimate the number of aliens in the milky way. The Drake equation. Understanding the Drake equation — by Jørgen Veisdal — Cantor's Paradise. <https://www.cantorsparadise.com/how-to-estimate-the-number-of-f-alien-in-the-milky-way-3e9a43c17a5> (Consulté le 12 juillet 2022)

Document non publiés :

[2] Laboratoire de physique sur la spectroscopie 4OS - Collège de Saussure, (Consulté le 20 septembre 2022)

Sites Web :

[1] Wikipedia contributors. (2022, 21 septembre). Astronomie. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Astronomie>, (Consulté le 3 mars 2022)

[3] Estimating Central Pressure and Temperature. (s. d.). <http://burro.case.edu/Academics/Astr221/StarPhys/estcent.html>, (Consulté le 10 juillet 2022)

[7] Formulas - Relativistic Redshift. (s. d.). Copyright ©2004 - 2006. <http://astronomyonline.org/Science/RelativisticRedshift.asp>, (Consulté le 2 août 2022)

[4] Lucid Nick (2020, 24 février). The Sun can't work without Quantum Tunneling [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lQapfUcf4Do>, (Consulté le 4 juillet 2022)

Source des images :

- page de garde : <https://cdn.spacetelescope.org/archives/images/thumb700x/heic0406a.jpg>
- Figure 1 : <http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/ptolemy.html>
- Figure 2 : <http://www.astrosurf.com/luxorion/Physique/lois-kepler.jpg>
- Figure 3 : https://useruploads.socratic.org/ZsFxDVu9QL0eyMsLQbAU_parallax_566x304.jpg
- Figure 4 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2f/Fraunhofer_lines.svg/1280px-Fraunhofer_lines.svg.png
- Figure 5 : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/19/Black_body.svg/1200px-Black_body.svg.png
- Figure 6 : <https://cdn.britannica.com/17/143617-050-DA3F8537/diagram-Hertzsprung-Russell-Annie-Jump-Cannon-type-order.jpg>
- Figure 7 : https://i0.wp.com/astronomy.nmsu.edu/tharriso/ast110/1322_1616.jpg
- Figure 8 : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1912HarCi.173....1L/abstract>
- Figure 9 : <https://www.astro.ucla.edu/~wright/doppler.htm>
- Figure 10 : https://www.e-education.psu.edu/astro801/sites/www.e-education.psu.edu/astro801/files/image/hubbleslaw_plot.jpg
- Figure 11 : <https://thespectrumofriemannium.files.wordpress.com/2015/06/einsteinfieldeq.jpg>
- Figure 12 : <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/530ac7aae4b05a4d61d45fb1/1522847668795-20MK4209BCWXQ88RHGKI/pale+blue+dott.jpg>

9 Glossaire

L'épicycle : composant essentiel du système astronomique de Ptolémée. Les astronomes grecs ont introduit l'épicycle au cours du 3ème siècle avant Jesus Christ afin d'expliquer les mouvements des planètes qui semblait parfois rétrograder.

Magnitude apparente : la perception de la luminosité d'un objet céleste depuis la terre.

Magnite absolue : la perception de la luminosité d'un objet céleste si il était situé à 10 parsecs.

Vitesse de la lumière : Selon la théorie de la relativité restreinte avancée par Albert Einstein en 1905, la vitesse de la lumière est la vitesse maximale à laquelle tout objet peut se déplacer.

Photon : quantum d'énergie associé aux ondes électromagnétiques. Il s'agit d'un boson.

Etoile à neutron : Le vestige d'une étoile massive.

Trou noir : Un objet céleste possédant un champ gravitationnel si intense que la lumière ne peut pas l'échapper.

Relativité générale : Avancée par Albert Einstein en 1915, la théorie de la relativité générale décrit l'influence que possède la matière et plus généralement l'énergie sur l'espace-temps.

Matière baryonique : Tout ce qui est composé de protons et de neutrons.

Entropie : Le principe d'entropie caractérise le degré de désorganisation, ou d'impredictibilité d'un système. Selon la deuxième loi de la thermodynamique, l'énergie d'un système isolé à tendance à se disperser le plus possible. Par conséquence, son entropie augmente également

Fonction d'onde : Concept provenant de la physique quantique. Elle sert à décrire l'état quantique d'une particule.

Chandelle standard : Ces objets célestes ont des luminosités connues. Plusieurs méthodes nous permettent d'estimer des distances extra-galactiques grâce à elles.