REE REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE
ARTICLE EXTRAIT DE LA REE 2023-2, TOUS DROITS RESERVES

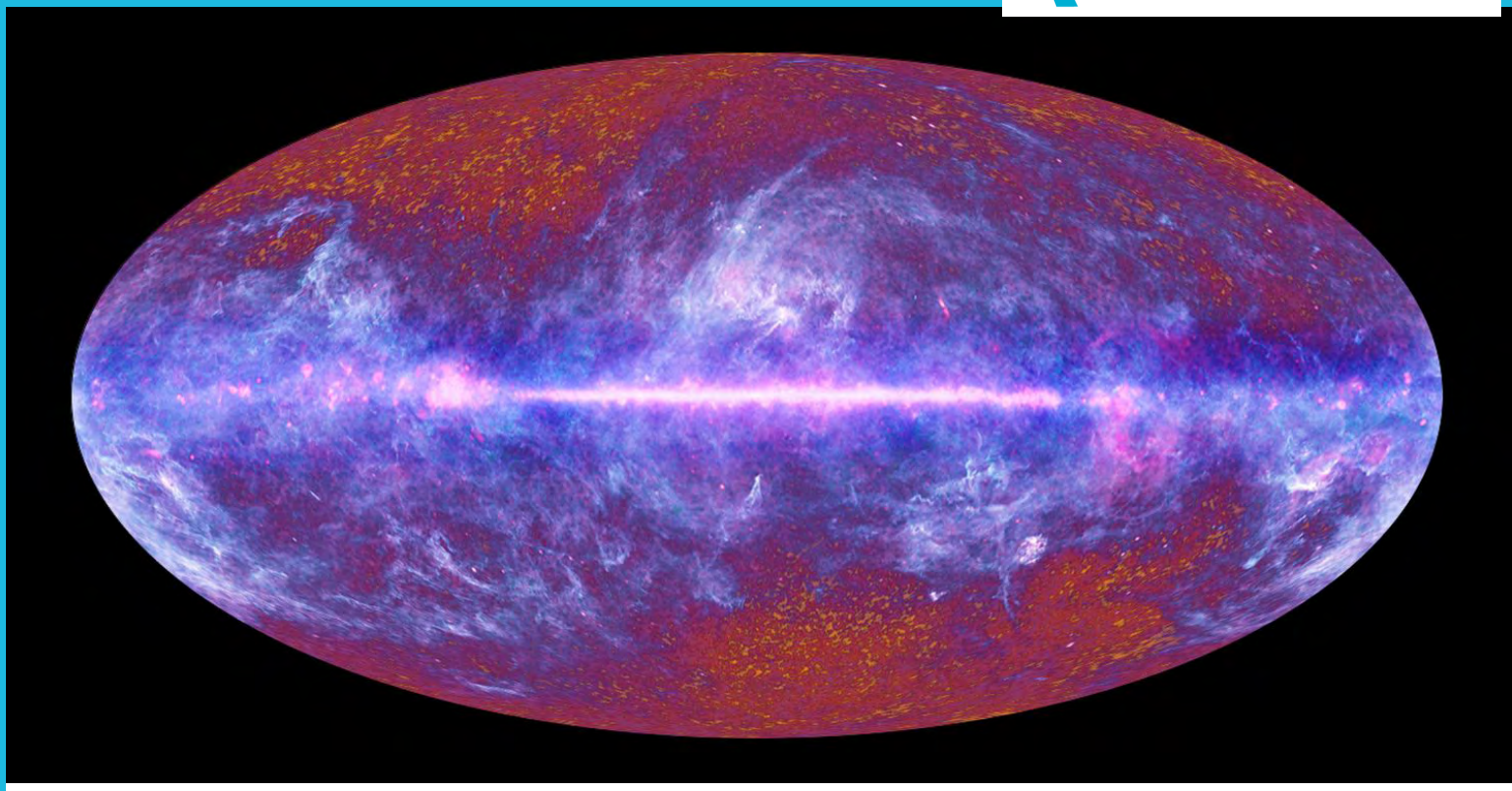


Image du fond diffus cosmologique observé par satellite (source : HO / ESA/LFI & HFI CONSORTIA).

Introduction aux ondes gravitationnelles

Il existe des ondes associées à la gravitation. Elles sont produites par le mouvement rapide d'une quantité importante de matière. Ce sont des moyens d'observation pour tous les phénomènes d'origine gravitationnelle comme par exemple les trous noirs. Ainsi les ondes gravitationnelles sont une nouvelle fenêtre de perception et de compréhension de l'univers. Les moyens d'observation ont longtemps été optiques et plus tard radioélectriques et ont permis de commencer à écrire l'histoire de l'univers. Observer le ciel, c'est remonter dans le passé et par conséquent scruter l'histoire qui est gravée dans les objets lointains. L'univers a une histoire et, les télescopes et les radiotélescopes et maintenant les ondes gravitationnelles nous la racontent.

Marc Leconte

Membre émérite de la SEE

Le dossier Ondes gravitationnelles

La première mesure directe des ondes gravitationnelles justifie que la REE consacre un dossier à cette détection déjà couronnée par un prix Nobel en 2017. Le nom qui va revenir de manière récurrente dans ce qui suit est celui d'Albert Einstein. Ce dernier en effet est l'auteur unique d'une théorie de la gravitation qui fait suite à la théorie de la relativité restreinte et appelée relativité générale. Cette théorie a permis de donner un socle physico-mathématique à l'étude de l'univers décrit depuis longtemps par de nombreuses observations astronomiques. Le premier article de ce dossier qui sert d'introduction expose comment on a découvert grâce à la relativité générale que l'univers n'est pas stable et qu'il présente une évolution, peut-être une origine et peut-être une fin, en bref qu'il a une histoire. Les moyens d'observation de cette histoire depuis l'antiquité reposent sur l'observation du spectre visible et, au XX^{ème} siècle, sur un élargissement considérable du spectre électromagnétique analysé notamment avec les radiotélescopes. La découverte expérimentale des ondes gravitationnelles

ouvre une nouvelle ère dans l'exploration de cette histoire.

Les solutions des équations de la relativité générale

La découverte de l'histoire de l'univers n'est pas la seule application des solutions de l'équation de la relativité générale. **Pierre Spagnou** expose dans cet article les mathématiques à l'œuvre qui ont permis de prédire l'existence des ondes gravitationnelles. La physique de la relativité générale était complètement nouvelle et utilisait des espaces mathématiques non euclidiens caractérisés par leur courbure et leur énergie. L'auteur insiste aussi sur les interrogations d'Einstein, dès 1916, relatives aux solutions d'ondes gravitationnelles sur lesquelles son point de vue a changé plusieurs fois.

Les observations directes des ondes gravitationnelles depuis leur première découverte.

En 2015, la première découverte directe des ondes gravitationnelles a fait les titres de la grande presse mais, depuis, un très grand nombre d'autres découvertes ont été effectués par les détecteurs Ligo ou Virgo. **Pierre Spagnou,** dans un deuxième article, expose de manière détaillée l'histoire récente des observations et surtout leur interprétation sur la nature de la perturbation de l'espace-temps. En effet, selon la forme de la variation d'amplitude de l'onde gravitationnelle détectée, il existe une bibliothèque d'évènements plutôt violents qui ont concerné des trous noirs, des étoiles à neutrons ou les deux à la fois.

La réduction du bruit quantique par *squeezing*

La détection des ondes gravitationnelles avait paru à l'époque d'Einstein quasiment impossible à concevoir tant les variations de l'espace-temps à mesurer étaient infinitésimales. Le moyen choisi repose sur l'utilisation de l'interférométrie qui permet des mesures de très petites variations. Ce sont des interféromètres de Michelson qui sont utilisés avec l'ajout de cavités résonantes constituées de miroirs réfléchissants sur les deux bras perpendiculaires. L'article de **Matteo Barsuglia** et **Eléonora Capocasa** expose les défis posés par la détection d'ondes gravitationnelles dans les détecteurs Virgo et LIGO. Après des premières détections encourageantes qui validaient le procédé, il est vite apparu qu'il fallait augmenter la sensibilité des détecteurs. Comme les interféromètres étaient déjà isolés des vibrations extérieures par des suspensions, c'est sur la limitation de l'interféromètre lui-même qu'il fallait porter l'effort, c'est-à-dire sur le bruit quantique de celui-ci.

Matteo Barsuglia et **Eleonora Capocasa** exposent ainsi la technique de réduction de bruit quantique appelé *squeezing* et les améliorations apportées dans les détections d'ondes gravitationnelles.

Evolution de la cosmologie

Dans les temps anciens, le ciel a été observé et même scruté par les hommes afin d'obtenir des réponses aux interrogations métaphysiques des époques pré-scientifiques. Mais, plus prosaïquement, il a fallu observer le ciel dès que l'agriculture s'est développée car cette activité dépendait des saisons et, en premier lieu, de la hauteur du soleil dans le ciel à une heure donnée. Après la révolution néolithique et les débuts des premières civilisations, la Mésopotamie abritait déjà des astronomes qui étudiaient les mouvements des étoiles et des planètes et en faisait des dieux. L'époque était propice aux interprétations religieuses et mystiques, ce qui avait pour conséquence que l'observation astronomique, déjà très avancée au temps des Babyloniens, pouvait également se confondre avec l'astrologie qui prétendait lire l'avenir ou les caractères dans les positions des astres du ciel relativement aux figures mythologiques dessinées dans le ciel. La prégnance de ces mythes était si forte que les noms de ces figures comme par exemple l'amas de la Vierge ou la constellation d'Orion sont encore en usage de nos jours tout en ayant perdu leurs caractères symboliques. Mais effectuer une observation est une chose, l'expliquer en est une autre et c'est ce que firent les grecs qui élaborèrent les premières explications et interprétations des mouvements des objets célestes. Au moyen âge et dans les siècles suivants, les navigateurs utilisaient les positions des astres pour déterminer leur propre localisation. Copernic brisa l'anthropocentrisme en vigueur avec Kepler et Newton établit la raison pour laquelle les planètes tournaient autour du soleil avec la gravitation universelle. Kepler, Laplace et bien d'autres continueront à formaliser les observations. Emmanuel Kant, dans sa théorie du ciel, posait les fondements philosophiques de la cosmologie avec un univers euclidien immuable et éternel. L'astronomie resta gouvernée par les lois de Newton jusqu'au début du XX^{ème} siècle.

Les débuts de la cosmologie scientifique

En 1915, Albert Einstein (figure 1) mettait un point final à la théorie de la relativité générale qu'il avait été seul à élaborer à partir des années 1910. Avec la relativité générale la cosmologie devint scientifique car cette théorie du champ de gravitation ●●●

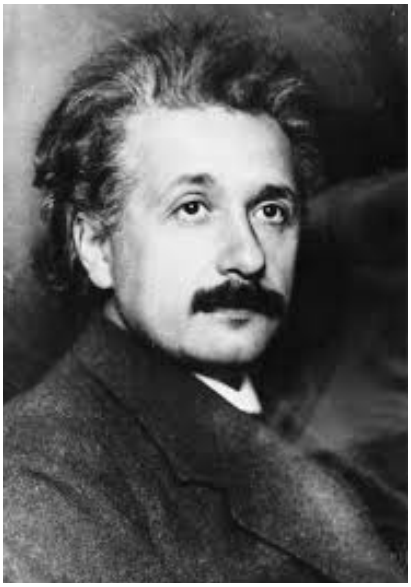


Figure 1 : Albert Einstein.

permettait de définir les propriétés d'un ensemble dont les limites étaient encore à déterminer, appelé l'univers. Cela supposait d'accepter deux principes : les lois de la physique étaient des lois universelles valables dans le passé comme dans le futur et l'univers était identique partout sans lieu d'observation privilégié. Grace à la relativité générale, l'univers objet était décrit par une équation dans un espace géométrique non euclidien. La relativité générale traitait comme la théorie de Newton des objets célestes et, en 1919, soit un peu moins de 4 ans après sa publication elle fut vérifiée de manière éclatante avec la déviation, à proximité du soleil, des rayons lumineux des étoiles et par l'avance du périhélie de la planète Mercure non vérifiée par la théorie de Newton. Au seuil des années 20, même si peu de scientifiques, la comprenaient vraiment, la relativité semblait une théorie solide et révolutionnaire remettant en cause la géométrie euclidienne de l'ancien monde newtonien et kantien. La relativité générale se présentait comme la théorie capable de décrire de manière mathématique l'univers et les objets qui le composent grâce aux solutions des équations qui en sont le socle physico-mathématique. Comme souvent en mathématique, il y avait plusieurs solutions possibles qui étaient dépendantes soit de conditions initiales ou encore de valeurs attribuées à la courbure dépendante des masses en jeu. Les différentes solutions des équations de la relativité générales ou certaines d'entre elles pouvaient modéliser l'univers dans son ensemble et marquaient la naissance de la cosmologie scientifique.

Le modèle d'Einstein

En 1917, dans un article fondateur, Einstein publia le premier modèle cosmologique issu de la relativité générale. Ce modèle, dans l'esprit d'Einstein, voulait que l'espace fût d'extension finie bien que sans limite ce que permettait la géométrie non euclidienne de la théorie. Cela répondait à une position philosophique qui supposait, à l'instar des grands scientifiques et philosophes du XIX^{ème} siècle, un univers statique. Dans cette conception, l'univers était une hyper sphère dans un espace à quatre dimensions de rayon constant. Pour que le rayon reste constant en empêchant que l'attraction de la matière entraîne un effondrement, Einstein opposa une force répulsive et introduisit dans ses équations un terme additionnel appelé constante cosmologique, notée Λ, maintenant un l'équilibre entre les forces antagonistes. La géométrie de l'espace-temps dans son modèle était déterminée par son contenu matériel et Λ. Peu de temps après, l'astronome hollandais Willem de Sitter développa un autre modèle d'univers, solution des équations, mais avec une densité de matière nulle. Deux observations astronomiques complétèrent ces modèles. En 1924, Edwin Hubble (figure 2) clôtura un débat vieux de plusieurs années, en montrant que les nébuleuses spirales se situaient en dehors de notre galaxie, la voie lactée, et étaient identifiables à d'autres galaxies. Ainsi l'univers s'étendait bien au-delà de ce qu'on imaginait jusque-là. Ce constat était une révolution expérimentale considérable et changeait l'échelle de la cosmologie. Une autre série d'observations tout aussi extraordinaire fut effectuée par l'astronome américain Vesto Slipher (figure 3) qui montra les mesures de galaxies de plus en plus éloignées présentant un décalage de leur spectre vers le rouge ce qui fut alors interprété comme une vitesse d'éloignement. Plus les objets étaient lointains plus ils s'éloignaient à grande vitesse. Slipher interpréta ce phénomène comme une expansion globale de l'univers. Hubble conforta ces observations et, en 1929, publia la loi empirique qui porta son nom : le décalage fréquentiel du signal électromagnétique d'une galaxie était proportionnel à sa distance.



Figure 2 : Edwin Hubble.



Figure 3 : Vesto Slipher.

" Les astronomes ne s'attardèrent pas à l'idée que notre point d'observation sur Terre puisse être un centre de répulsion, le principe d'isotropie, posé précédemment, impliquait alors que c'était l'univers dans sa totalité qui était en expansion. "

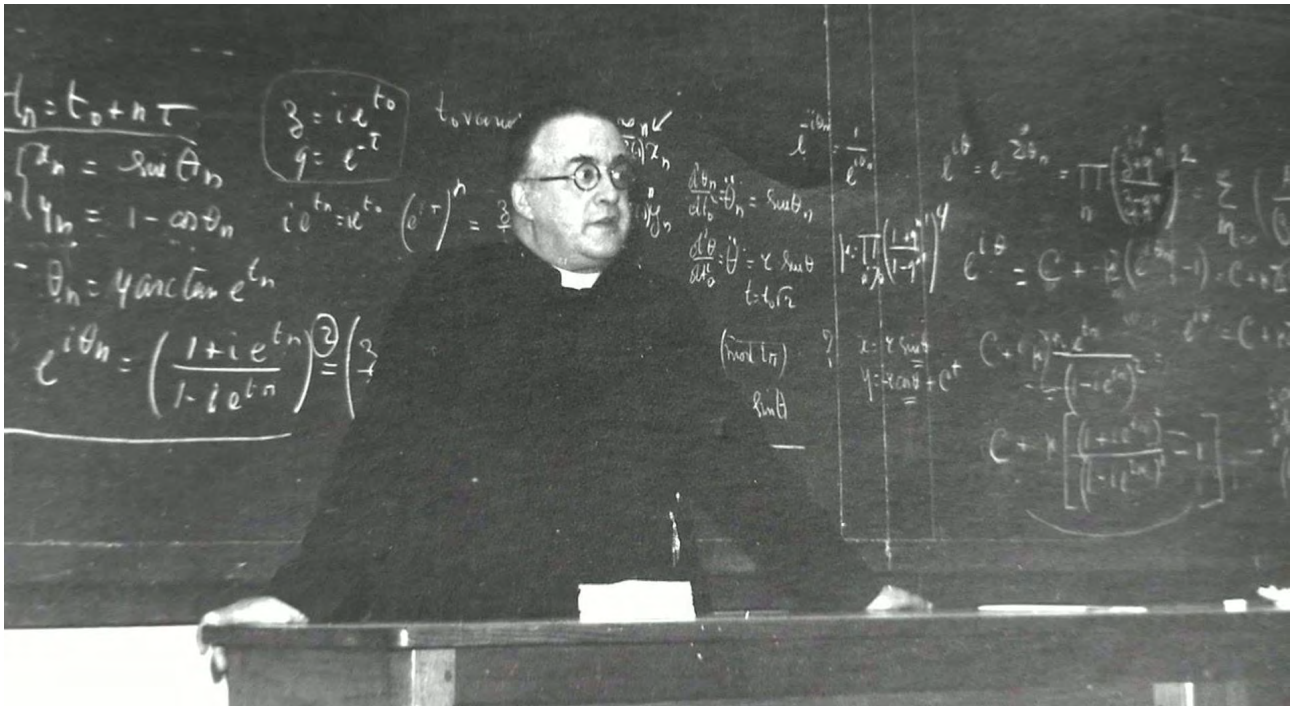


Figure 4 : Georges Lemaître.

L'expansion de l'univers

Les astronomes ne s'attardèrent pas à l'idée que notre point d'observation sur Terre puisse être un centre de répulsion, le principe d'isotropie, posé précédemment, impliquait alors que c'était l'univers dans sa totalité qui était en expansion. Le modèle statique d'Einstein n'était donc pas réaliste et le mystère de l'expansion resta entier jusqu'à l'explication donnée par le physicien belge George Lemaître (figure 4), vers la fin des années 1920. Dès 1927, Lemaître proposa une nouvelle solution des équations de la relativité qui montra que la taille de l'univers augmentait de manière exponentielle et pourrait rejoindre les deux modèles d'Einstein et de Sitter comme cas limite. Lemaître établit alors le premier modèle théorique d'univers en expansion confirmant la loi empirique de Hubble. Les conséquences étaient dès lors considérables ; si l'univers était en expansion dans le futur, il semblait possible de remonter le temps et en conséquence d'affirmer qu'il avait une histoire et possiblement un commencement. Indépendamment, un physicien soviétique, Alexandre Friedmann, découvrait des modèles proches de celui de Lemaître, d'où leur apellation de modèles de Friedmann-Lemaître. Ces modèles successifs aboutissaient à des scenarii dans lesquels l'univers dans le passé avait connu un état de la matière extrêmement dense et conduisait à une singularité. L'idée d'un instant initial à partir d'une densité infinie a été appelé Big Bang, au début de manière péjorative, puis cette appellation est entrée dans le langage courant pour désigner le début de l'univers, tout au moins dans la plupart des modèles. L'âge de l'univers était ainsi estimé à 13,7 milliards d'années. L'expansion de l'univers et la découverte du rayonnement cosmologique, en 1965, confortèrent encore le modèle du Big Bang.

En guise de conclusion : Les ondes gravitationnelles et la cosmologie

Un projet spatial envisagé par l'ESA (l'Agence spatiale européenne) pour les années 2050 aurait pour objectif premier la détection d'ondes gravitationnelles primordiales, émises peu après le Big Bang, c'est-à-dire au début de l'expansion de l'Univers. Une douzaine de satellites seraient répartis en quatre triangles équilatéraux : deux triangles isolés et deux autres formant un hexagramme dans l'espace. Chacun des triangles aurait un côté de 50 000 km de long. Ainsi la détection d'ondes gravitationnelles rejoindrait l'astrophysique électromagnétique pour de nouvelles découvertes. ■

Les articles

Les solutions des équations de la relativité générale p.104
Le zoo des ondes gravitationnelles détectées depuis 2015 ..... p.111
Utilisation des corrélations quantiques dans le détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo p.118