

Les ondes gravitationnelles

« Une découverte qui ouvre un champ vaste de recherches pour comprendre notre univers »

Table des matières

Les ondes gravitationnelles.....	1
I. Introduction.....	2
II. La relativité générale et les ondes gravitationnelles.....	2
A. Théorie de la relativité générale	2
B. Prédiction du phénomène des ondes gravitationnelles	3
III. Définition des ondes gravitationnelles	3
A. Caractéristiques des ondes gravitationnelles	3
B. Sources et types d'ondes gravitationnelles.....	4
C. Effets des ondes gravitationnelles sur la matière.....	6
IV. Détection des ondes gravitationnelles	6
A. Méthode indirecte	6
B. Méthode directe	7
V. Projet VIRGO.....	7
A. Principe de détection des signaux gravitationnels.....	7
B. Limites	7
VI. Conclusion.....	8
VII. Bibliographie.....	8

I. Introduction

En 2016, soit cent ans après leurs prédictions par le physicien Allemand Albert Einstein, des ondes gravitationnelles ont été détectées de façon directe par des chercheurs du LIGO.

Cette onde détectée était issue de la fusion de deux trous noirs de masse suffisamment grande pour produire un signal détectable sur terre.

Bien que la réalité de ces ondes gravitationnelles a été longuement débattue, cette première détection fut la preuve de la réalité physique de l'onde gravitationnelle et a valu le prix Nobel de physique de 2017 conjointement à trois physiciens pour récompenser leurs recherches.

Alors, Comment les ondes gravitationnelles ont été prédites? Quelle est la nature des ondes gravitationnelles? Comment peut-on les détecter ? Et enfin quelle place occupe la projet VIRGO dans la détection des ondes gravitationnelles?

II. La relativité générale et les ondes gravitationnelles

A. Théorie de la relativité générale

La théorie de la **relativité générale** est une des avancées de la physique moderne du début du 20^{ème} siècle. Elle a été énoncée en 1916 [1] par Albert Einstein qu'il l'a élaborée entre 1907-1915. [2]

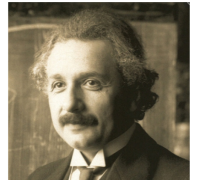


Figure 1 : Albert Einstein [5]

Cette théorie tient compte des principes de la **relativité restreinte** annoncée en 1905 qui est basée sur les principes suivants :

- 1- La vitesse de la lumière est constante dans le vide. En effet, la lumière se déplace à la vitesse **$c = 299\,792\,458\text{ m/s}$** , indépendamment du mouvement de la source ou de l'observateur.
- 2- La notion du temps **dépend du référentiel** (du fait de l'invariance de c).
- 3- Contrairement à la mécanique classique, il n'existe pas de référentiel absolu, le temps et les longueurs sont deux **quantités relatives** (qui dépendent du référentiel considéré).
- 4- Du fait du lien qui existe entre la dilatation du temps et la contraction des longueurs, on ne raisonne plus dans un espace géométrique seul mais plutôt dans **un espace-temps**. [3]

La relativité générale apporte une donnée supplémentaire: **La gravitation**. Elle donne un cadre de compréhension pour cerner la nature de la gravitation.

En effet, la gravité ou la gravitation, ce phénomène qui tend à unir les objets entre eux, n'est plus représentée comme une force Newtonienne attractive qui s'exerce entre des objets qui ont une masse, mais plutôt comme **une déformation de l'espace-temps**.



Figure 2 : Représentation de la gravitation, selon Newton.

Grâce à la relativité générale, l'univers est représenté comme une grille d'espace et de temps. La présence d'un objet possédant une masse, courbe l'espace-temps autour de lui ce qui influence les trajectoires des autres objets et perturbent la notion d'écoulement du temps (Comme l'illustre les schémas suivants).

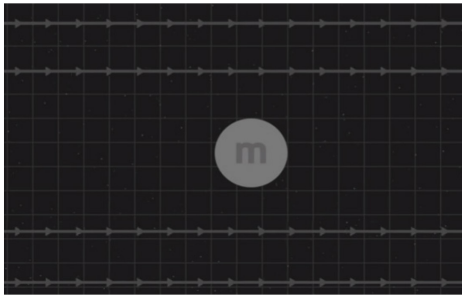


Figure 4 : Représentation de l'espace-temps. [4]

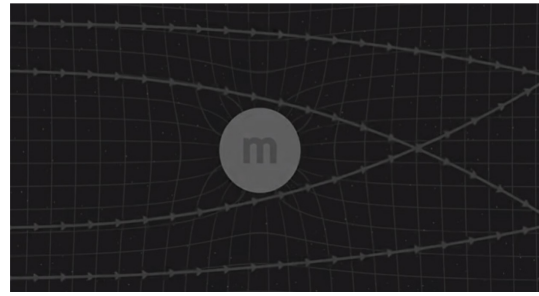


Figure 3 : Courbure de l'espace par un objet massif. [4]

Un trou noir est le résultat de l'effondrement d'une étoile ultra dense. Il s'agit d'un objet massif dont toute la matière est concentrée en un point : **une singularité**.

A cet endroit, l'espace-temps est distordu à l'infini, toutes les lignes droites pointent dans cette direction. Donc aucun objet ne peut s'échapper du trou noir et toutes les trajectoires possibles mènent directement vers cette singularité. [2]

B. Prédiction du phénomène des ondes gravitationnelles

Avant de décrire les ondes gravitationnelles il faut tout d'abord définir la force de gravitation lié à la loi de Newton. **La gravitation ou la force de gravité** est l'une des 4 interactions fondamentales qui régissent l'univers qui permet de décrire l'attraction entre les corps massifs. Plusieurs théories sont apparues tentant d'expliquer le phénomène de la gravitation notamment celle de Newton sur la loi de la gravitation universelle. En effet dans la mécanique classique, il est intéressant de constater que cette force se transmet de manière instantanée entre les objets, c'est à dire que quand la force se modifie (par exemple on change les objets ou on enlève un), le changement s'aperçoit directement. Ceci peut s'avérer être absurde car l'information ne peut pas se transmettre instantanément lorsque la force se modifie. Malgré le fait que les lois de Newton ont longuement été utilisées et fonctionnent très bien, ceci montre que les méthodes et théories de la mécanique classique sont incapables d'expliquer les phénomènes liés à la relativité. [6]

Par analogie avec l'électromagnétisme, on a postulé l'existence **des ondes gravitationnelles**. En effet, l'espace-temps ne se déforme pas de façon instantanée, mais de façon progressive à la vitesse de la lumière c . [2] [4]

Les ondes gravitationnelles transportent l'énergie sous forme de rayonnement gravitationnel comme les ondes sonores ou les ondes électromagnétiques. [7] D'après Albert Einstein, il existe un **champ gravitationnel** dans l'univers déformé par les éléments massifs qui le compose. Lorsqu'ils se mettent en mouvement accélérés, ces déformations du champ vont alors se propager à la vitesse de la lumière comme les ondes électromagnétiques émises par les particules électriques chargés en mouvement accéléré. [8]

III. Définition des ondes gravitationnelles

A. Caractéristiques des ondes gravitationnelles

Une onde gravitationnelle est donc une **onde de déformation de l'espace-temps**, appelé aussi une onde de courbure. Ces ondes ont certaines caractéristiques intéressantes pour l'astrophysique notamment le fait d'entraîner une impulsion linéaire. Ceci peut s'observer dans le cas de **la fusion de deux trous noirs**, lors

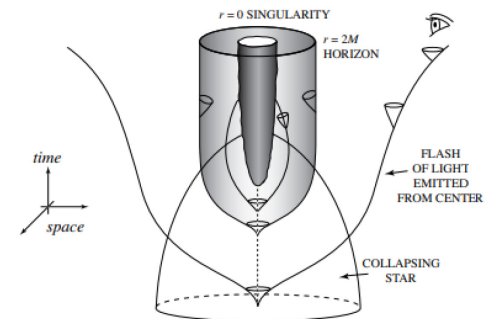


Figure 5 : Trou noir

de l'émission d'une impulsion linéaire où le trou noir fusionné est éjecté ou séparé du noyau de sa galaxie hôte. [9]

Les ondes gravitationnelles ont deux propriétés importantes et uniques :

- 1- Il n'est pas nécessaire d'avoir de la matière à proximité de deux trous noirs en fusion pour qu'ils génèrent des ondes gravitationnelles
- 2- Alors que la lumière des étoiles est bloquée par les poussières de l'espace, ces ondes traversent la matière sans se diffuser.

De plus, plusieurs théories de « **gravité quantique** » proposent, comme pour les ondes électromagnétique, l'**aspect onde-particule des ondes gravitationnelles**. Dans le cadre de la théorie quantique des champs, le graviton est le nom donné à une hypothétique particule élémentaire qui assure la médiation de la gravité. Cependant, malgré les nombreuses tentatives de concilier la relativité générale, qui décrit la gravité, avec le modèle standard, qui décrit toutes les autres forces fondamentales, l'existence du gravillon reste encore à prouver. [10]

Comme toute onde, une onde gravitationnelle présente certaines caractéristiques qui permettent de la décrire:

- 1- Amplitude: Habituellement notée h , c'est la taille de l'onde qui montre la fraction d'étirement ou de compression
- 2- Fréquence: Habituellement notée f , c'est la fréquence avec laquelle l'onde oscille
- 3- Longueur d'onde: Habituellement notée λ , il s'agit de la distance le long de l'onde entre les points d'étirement ou de compression maximum.
- 4- Vitesse: il s'agit de la vitesse à laquelle un point de l'onde (par exemple, un point d'étirement ou de compression maximal) se déplace. Pour les ondes gravitationnelles de faibles amplitudes, cette vitesse d'onde est égale à la vitesse de la lumière (c).
- 5- La vitesse, la longueur d'onde et la fréquence d'une onde gravitationnelle sont liées par l'équation $c = \lambda * f$, tout comme l'équation d'une onde lumineuse.

Les ondes gravitationnelles sont **polarisées** en raison de la nature de leur source. La polarisation d'une onde gravitationnelle est semblable à la polarisation d'une onde lumineuse, sauf que le degré de polarisation n'est pas le même. Dans la relativité générale on retrouve, la **polarisation « plus »** notée h_+ (polarisation linéaire) et la **polarisation « croisée »** notée h_x (polarisation circulaire) [11].

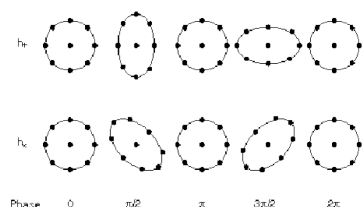


Figure 6 : Illustration de la polarisation [35]

B. Sources et types d'ondes gravitationnelles

Tout objet qui possède une masse dans un espace-temps peu courbé émet des ondes gravitationnelles. En temps normal il est très compliqué, voire même impossible de détecter ces ondes en raison des faibles déformations qu'elles entraînent dans l'espace et de la faible masse des objets qui nous entourent. Pour arriver à les détecter, il faut observer dans l'univers des corps très massifs en mouvement accéléré et avoir un appareil de mesure suffisamment puissant et très sensible. Il faut savoir que la gravitation est l'interaction élémentaire la plus faible (une intensité relative de 10^{-39} pour la force de gravitation contre 10^{-2} pour la force électromagnétique). [12] En effet dans l'astronomie gravitationnelle, on se sert de ces ondes pour collecter des informations sur leurs sources qui sont difficilement observables avec les télescopes [13]. Ces sources sont des **systèmes d'étoiles binaires compactes et massifs** composés de naines blanches, d'étoiles à neutrons et de trous noirs. Elles représentent également des événements cataclysmiques tels que les **supernovæ** ou la **formation de l'univers peu de temps après le Bigbang**. Plus généralement, les ondes gravitationnelles sont rayonnées par **un objet massif en rotation** ou **deux objets en orbite** tel que la terre qui tourne autour du soleil [14]. Cependant, les planètes qui se tournent autour dans une parfaite symétrie sphérique ou en rotation axisymétrique (centré dans son axe de symétrie) ne rayonnent pas d'ondes

gravitationnelles. De même, les objets qui ne sont pas en rotation et qui se déplacent à une vitesse constante n'émettent pas d'ondes gravitationnelles.

Si on reprend l'exemple de **la terre et le soleil**, chacune en orbite circulaire l'une de l'autre, le système émet des ondes gravitationnelles qui s'éloignent de leurs sources. Il s'agit d'une perte d'énergie du système sous forme d'onde gravitationnelle provoquant une **diminution de la taille l'orbite**. Ainsi, lorsque la terre et le soleil tournent en spirale l'un vers l'autre, le système perd son moment angulaire et ce moment est rayonné par ces ondes. [15] Cependant la terre ne tombe pas sur le soleil car ils sont assez éloignés avec une vitesse très faible et l'énergie rayonnée est extrêmement faible pour provoquer une décroissance importante de l'orbite. Cette différence de rayon d'orbite est donc sans importance.

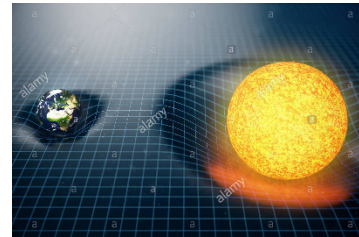


Figure 7 : Déformation de l'espace-temps [Alamy stock]

Néanmoins, on peut prendre l'exemple des étoiles très lourdes comme **les étoiles à neutrons** qui se tournent autour tout en faisant vibrer l'espace-temps sous la forme d'onde gravitationnelle. Ces étoiles à neutrons sont le stade ultime de la vie de certaines étoiles massives qui ont explosé en supernova et laissent un cœur dense. Quand elles sont sur le point de rentrer en collision, elles ont une vitesse très élevée (proche de celle de la lumière) et émettent ces ondes gravitationnelles en très grandes quantités, assez pour être mesurées. [16]

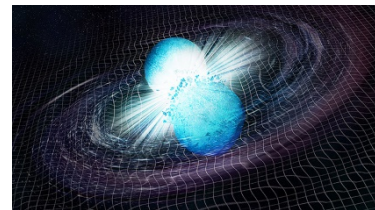


Figure 8 : Collision de deux étoiles à neutrons [34]

De plus lorsqu'on retrouve une étoile massive en rotation sur elle-même, par exemple une étoile à neutron, on a l'émission **d'ondes gravitationnelles de types « continues »**. Cela est dû aux bosses et aux imperfections de la forme sphérique de cette étoile lors de sa rotation asymétrique. Ces ondes sont dites continues car l'étoile présente un taux de rotation constant générant ainsi continuellement des ondes de même amplitude et fréquence. [17]

Les étoiles compactes comme **les naines blanches** constituant un système binaire ont une période orbitale et une taille proches du système soleil-terre. Elles émettent des ondes gravitationnelles comparables à celles des étoiles à neutrons binaires avant de fusionner et exploser en une supernova. [18]

On peut aussi citer l'exemple de **deux trous noirs** qui fusionnent : un phénomène appelé **coalescence**. Les binaires de trous noirs émettent des ondes gravitationnelles comme les binaires précédents au cours de leurs phases en **spirale, fusion et annulation**. La plus grande amplitude d'émission se produit pendant la phase de fusion. [19] Avec la détection d'une petite déformation de l'espace-temps provenant de cette coalescence, on a pu apprendre un peu plus sur ces astres (taille, masse, moment de la fusion). La première détection directe des ondes gravitationnelles est venue de la fusion de deux trous noirs. En effet, ces événements ont été détectés 2 (voire même 3 fois) en quelques mois ce qui confirme leur abondance dans l'univers. [20]

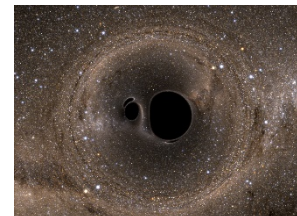


Figure 9: Coalescence de deux trous noirs [33]

Les **supernovæ** sont des événements astronomiques transitoires qui se produisent au cours des dernières étapes évolutives stellaires de la vie d'une étoile massive. Cette destruction catastrophique est marquée par une dernière explosion titanesque. Au cours de cet événement, une importante quantité de matière dans l'étoile est projetée dans tous les sens à des vitesses extrêmement élevées. Si ces matières sont projetées de manière asymétriques (non uniforme dans toutes les directions), on a un rayonnement d'ondes gravitationnelles provenant de l'explosion. Cependant ces phénomènes ont lieu de manière quasi-instantanée et ne sont pas entièrement compris pour bien modéliser leurs ondes gravitationnelles. [21]

Il existe également une autre théorie, qui reste à prouver, qui est **l'expansion de l'univers de manière asymétrique** dans toutes les directions. De nombreux modèles sont proposés suggérant qu'il y a eu une **période d'inflation de l'univers** c'est à dire que l'espace s'est élargi très rapidement en peu de temps. Cette élargissement non uniforme a potentiellement émit des rayonnements sous formes de petites ondes gravitationnelles « stochastiques ». Ces ondes proviennent de partout dans l'espace et sont toutes mélangées d'où le mot stochastique car aléatoire et non prévisible. Pour l'instant, si ces théories sont prouvées vraies, il est tout de même impossible de détecter ces ondes avec nos appareils actuels. [22] [17]

C. Effets des ondes gravitationnelles sur la matière

La force de gravité est la réponse de la matière aux ondes gravitationnelles qui la traversent en entraînant avec elles les atomes constitutifs. Il n'existe donc pas de « connexion magique » directe entre les atomes du Soleil et les atomes de la Terre, comme l'a proposé à tort Isaac Newton. Les ondes gravitationnelles traversent constamment la Terre mais **leurs effets sont minimes** en raison de la grande distance depuis leur source. Sur Terre, ces effets ont été observés sur l'un des bras du détecteur LIGO. La longueur du bras de 4 km a varié d'un **millième de la largeur d'un proton** ce qui est extrêmement petit. Dans l'infiniment grand, ceci est équivalent à faire varier d'une épaisseur d'un cheveu, la distance entre la terre et l'étoile la plus proche en dehors du système solaire. Ces petits changements de distances sont détectables uniquement avec les détecteurs les plus sensibles. [23]

Lorsqu'une onde gravitationnelle passe devant un observateur, cet observateur trouvera l'espace-temps déformé. Les distances entre les objets **augmentent** et **diminuent** de manière **rythmique** au fur et à mesure que l'onde passe, à une fréquence égale à celle de l'onde. L'ampleur de cet effet diminue proportionnellement à la distance inverse de la source. Quand ces ondes passent à travers un objet, il se **contracte** et se **dilate** de manière successive. Les variations de longueur des objets qu'elles traversent sont de l'ordre de **10^{-19} m** soit **1 milliard de fois plus petit que la taille d'un atome**. [24] Pour illustrer ces variations de manière exagérée, il faut imaginer des particules réparties sous forme d'un cercle dans un plan 2D. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse les particules le long d'une ligne perpendiculaire au plan des particules, les particules suivront la distorsion dans l'espace-temps de l'onde en oscillant de manière « cruciforme ». C'est à dire que quand le cercle est étiré dans le sens vertical, il est comprimé dans le sens horizontal, et vice versa : c'est ce qu'on appelle la « distorsion quadripolaire ». [25]

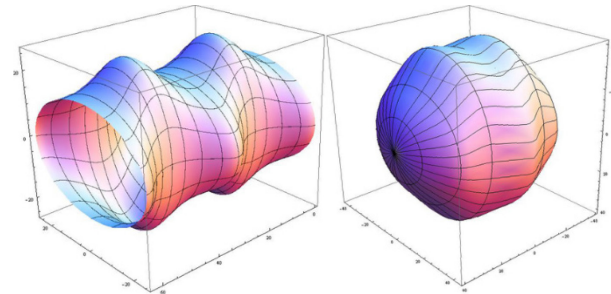


Figure 10 : Illustration des contractions/dilatations [36]

En outre, il est possible que les effets de distorsions provoquées par les ondes gravitationnelles sont durables dans le temps. Elles entraînent notamment des changements de vitesse, des trajectoires et des positions relatives des objets et des particules sur leur chemin. Ces caractéristiques ne retournent pas à leur état initial tout de suite après le passage des ondes. Ces ondes laissent donc des traces qui persistent pendant leur passage et qui sont par la suite détectables. [26]

De la même manière que la lumière est absorbée par l'eau, de sorte qu'il n'en reste plus à mille mètres de profondeur, les ondes gravitationnelles traversant une planète ou une étoile sont **légèrement absorbées**, abandonnant l'énergie pour créer une force de traînée infime sur chaque atome. En raison de la faiblesse du couplage de la gravité à la matière, les ondes gravitationnelles subissent très peu d'absorption ou de diffusion, même lorsqu'elles se déplacent sur des distances astronomiques. En particulier, les ondes gravitationnelles ne devraient pas être affectées par l'opacité de l'univers très précoce. [27]

IV. Détection des ondes gravitationnelles

Il existe plusieurs façons de détecter une onde gravitationnelle et notamment par méthode **indirecte** ou **directe**.

A. Méthode indirecte

Cette méthode fut la première utilisée pour détecter l'existence des ondes gravitationnelles.

En 1974 est découvert le pulsar binaire PSR B1913+16 alors parfait candidat pour la détection indirecte d'éventuelles ondes gravitationnelles dont l'existence faisait toujours débat car reposant uniquement sur la théorie d'Einstein.

Ce **pulsar binaire** est constitué d'un pulsar tournant autour d'un autre objet massif à très haute vitesse. Pendant six ans, les variations de leur orbite ont été mesurées et il s'est avéré qu'il y avait une perte

d'énergie très proche de celle calculée par la théorie proposée par Einstein. Cela a permis de **confirmer**, pour la première fois, **par l'expérience**, la théorie d'Einstein sur les ondes gravitationnelles. [28]

B. Méthode directe

Nous allons plus nous attarder sur cette méthode car c'est celle qui est utilisée de nos jours et notamment à travers le projet VIRGO. Il en existe d'autres à grande échelle comme **LIGO aux Etats-Unis** qui collabore étroitement avec VIRGO. Ces deux installations utilisent la technologie de **l'interféromètre**.

V. Projet VIRGO

VIRGO est donc un interféromètre de Michelson à très grande échelle puisque ses deux bras **perpendiculaires** font chacun **3 kilomètres de long**.

A. Principe de détection des signaux gravitationnels

Laser

La première étape consiste à créer un signal lumineux **cohérent** avec la plus grande précision possible sur la fréquence. Un laser esclave produisant un signal lumineux de +20W est contrôlé par un laser maître d'1W dont on va pouvoir faire varier la fréquence contrôlant alors celle du laser esclave. Au final, la fréquence sortie est donc celle du laser maître. [29]

Chambre d'injection

Le signal lumineux est alors envoyée dans une **chambre d'injection suspendue** et dans laquelle règne le **vide**. Un ensemble de miroirs et orifices vont permettre de stabiliser le rayon. En effet, les vibrations sismiques du sol sont des milliards de fois supérieures aux variations qu'on veut observer. A ce même niveau, la puissance du signal lumineux juste avant qu'il soit envoyé un miroir de recyclage qui fait la limite entre la partie laser et la partie interféromètre. Ce miroir de recyclage permet de renvoyer l'énergie lumineuse en provenance de l'interféromètre vers celui-ci. Cela permet d'augmenter à plusieurs kilowatts la puissance du signal et donc augmenter la sensibilité totale. [29]

Partie interféromètre

Ici, le rayon lumineux est envoyé sur une lame séparatrice qui va **diviser le rayon lumineux en deux perpendiculairement**. Suite à cela, chaque rayon va être envoyé vers un miroir d'entrée dans un long tube de 3km et d'un diamètre d'1,2m. Dans ce tube, le vide est fait afin d'éviter la réfraction du signal lumineux dans du gaz : cela représente plus de 6000m³ de vide. Ces tubes sont des cavités optiques de Fabry-Perot : une fois le signal lumineux entré, il va faire le trajet de 3km une trentaine de fois pour au final avoir parcouru presque une centaine de kilomètres avant d'être renvoyé vers la lame séparatrice. [29]

Détection

La partie détection est constituée **d'une diode photoréceptrice principale** qui reçoit le rayon lumineux réuni. Si une onde gravitationnelle passe, alors la contraction des longueurs va entraîner d'infimes changement de phases entre les deux rayons initiaux puisque les longueurs des bras vont varier. Ainsi, lors de leur réunion, la puissance totale aura légèrement diminué par interférence destructives par rapport à la lumière en sortie du laser.

La diode finale est capable de détecter des variations de l'ordre de 10⁻¹¹ watts, soit une variation 10⁻¹⁹m de la longueur des bras. [29]

Découvertes [30]

Le 14 août 2017, VIRGO détectait pour la première fois des ondes gravitationnelles issues de la coalescence de deux trous noirs, en collaboration étroite avec LIGO. Cela a été possible suite à une amélioration significative des installations initiales donnant alors naissance à **Advanced Virgo**. [30]

B. Limites

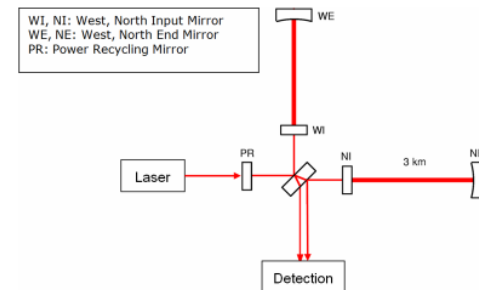


Figure 11 : Schéma d'un interféromètre type VIRGO [29]

Une des grandes limites de ces interféromètres, c'est la **dépendance à de très grandes longueurs** alors sujettes à des forces beaucoup plus élevées que celles des ondes gravitationnelles comme les ondes sismiques. Il est alors nécessaire de déployer des stratégies très complexes afin d'éliminer au maximum ces forces parasites. [29]

Les équipes travaillant sur ce projet (de même que LIGO) travaillent continuellement à essayer d'augmenter la sensibilité de ce dispositif en augmentent notamment la puissance lumineuse envoyée tout en stabilisant les appareils. [31]

VI. Conclusion

Nous n'en sommes qu'au début de la recherche sur les ondes gravitationnelles avec la détection directe datant d'il n'y a que 3 ans. La confirmation de l'existence de ces ondes ouvre un nouveau chapitre sur le cosmos car on pourra élucider les mystères liés à la formation de ces couples d'étoiles ou de trous noirs. Les scientifiques annoncent que cela va contribuer à l'étude et à l'exploration de l'univers. Ces ondes vont également permettre de découvrir la nature de la gravitation. [32]

A terme, leur étude nous permettra de comprendre plus encore le fonctionnement de l'Univers en permettant, notamment, d'aller capter des signaux beaucoup plus lointains. Par conséquent, elles devraient en principe avoir le potentiel de fournir une multitude de données d'observation sur l'univers très précoce après le Bigbang. Ainsi grâce à ces signaux gravitationnels envoyé par ces astres, on arrive à comprendre ces événements qui nous échappent depuis longtemps. Dans d'autre cas, on pourra confronter la réalité observée aux différentes théories qui ne pouvait être démontré jusqu'à aujourd'hui.

VII. Bibliographie

[1] FONTAINE, Didier, 2002. La Relativité Restreinte et Générale [en ligne]. [Consulté le 14 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.areopage.net/relat2.html>.

[2] DAMOUR, Thibault, 2006. La relativité générale d'aujourd'hui, Séminaire Pointcarré [en ligne]. [Consulté le 11 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.bourbaphy.fr/damour4.pdf>.

[3] CHAUVET, Olivier, 2020. Cours de PEIP2 : Relativité restreinte.

[4] RUSSEL, Alessandro, 2018. La Relativité Générale.[en ligne]. 2018. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=efQNpe7GOAw>.

[5] SCHMUTZER, Ferdinand, 1921. Albert Einstein - Wikiquote, le recueil de citations libres. [Consulté le 19 avril 2020]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikiquote.org/wiki/Albert_Einstein.

[6] FINLEY, Dave, 2013. Einstein's gravity theory passes toughest test yet: Bizarre binary star system pushes study of relativity to new limits [en ligne]. [Consulté le 14 mai 2020 b]. Disponible à l'adresse : <https://phys.org/news/2013-04-einstein-gravity-theory-toughest-bizarre.html>.

[7] EINSTEIN, A. et ROSEN, N., 1937. On gravitational waves. In : Journal of the Franklin Institute. Janvier 1937. Vol. 223, n° 1, p. 43-54. DOI 10.1016/S0016-0032(37)90583-0.

[8] GREGERSEN, Erik, 2008. Gravitational wave | Detectors, Discovery, & Speed. In : Encyclopedia Britannica [en ligne]. [Consulté le 9 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.britannica.com/science/gravitational-wave>.

[9] GUALANDRIS, Alessia et MERRITT, David, 2008. Ejection of Supermassive Black Holes from Galaxy Cores. In : The Astrophysical Journal. 10 mai 2008. Vol. 678, n° 2, p. 780-797. DOI 10.1086/586877.

[10] KASLIWAL, Vishal, 2008. Gravitational waves and gravitons. In : [en ligne]. 2008. Disponible à l'adresse : <http://www.physics.drexel.edu/~vkasli/phys676/Gravitational%20Waves%20&%20Gravitons.pdf>.

[11] GONG, Yungui et HOU, Shaoqi, 2018. The Polarizations of Gravitational Waves. In : Universe. 6 août 2018. Vol. 4, n° 8, p. 85. DOI 10.3390/universe4080085.

[12] GOULU, 2014. Le point sur les ondes gravitationnelles. In : Techniques de l'Ingénieur [en ligne]. [Consulté le 13 Avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-point-sur-les-ondes-gravitationnelles-2139/>.

[13] BERRY, Christopher, 2015. Listening to the gravitational universe: what... - unibirmingham. In : University of Birmingham [en ligne]. [Consulté le 13 Avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://unibirmingham.tumblr.com/post/118939268978/listening-to-the-gravitational-universe-what>.

[14] ERICKSON, Kristen, 2019. What Is a Gravitational Wave? | NASA Space Place – NASA Science for Kids. In : [en ligne]. [Consulté le 8 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://spaceplace.nasa.gov/gravitational-waves/en/>.

[15] PETERS, P. C., 1964. Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses. In : Physical Review. 23 novembre 1964. Vol. 136, n° 4B, p. B1224-B1232. DOI 10.1103/PhysRev.136.B1224.

[16] FRAGIONE, Giacomo, GRISHIN, Evgeni, LEIGH, Nathan W C, PERETS, Hagai B et PERNA, Rosalba, 2019. Black hole and neutron star mergers in galactic nuclei. In : Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1 septembre 2019. Vol. 488, n° 1, p. 47-63. DOI 10.1093/mnras/stz1651.

[17] OTT, C.D., O'CONNOR, E.P., GOSSAN, S., ABDIKAMALOV, E., GAMMA, U.C.T. et DRASCO, S., 2013. Core-Collapse Supernovae, Neutrinos, and Gravitational Waves. In : Nuclear Physics B - Proceedings Supplements. février 2013. Vol. 235-236, p. 381-387. DOI 10.1016/j.nuclphysbps.2013.04.036.

[18] PRETORIUS, Frans, 2005. Evolution of Binary Black-Hole Spacetimes. In : Physical Review Letters. 14 septembre 2005. Vol. 95, n° 12, p. 121101. DOI 10.1103/PhysRevLett.95.121101.

[19] GOULU, 2014. Le point sur les ondes gravitationnelles. In : Techniques de l'Ingénieur [en ligne]. [Consulté le 13 Avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-point-sur-les-ondes-gravitationnelles-2139/>.

[20] ANON., 2013. Astronomers Discover Merging Star Systems that Might Explode. In : www.cfa.harvard.edu/ [en ligne]. 22 octobre 2013. [Consulté le 8 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.cfa.harvard.edu/news/2010-24>.

[21] SIB, 2016. Ondes gravitationnelles : et de deux ! In : Techniques de l'Ingénieur [en ligne]. [Consulté le 4 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/ondes-gravitationnelles-et-de-deux-34736/>.

[22] CLAVIN, Whitney, 2015. Gravitational Waves from Early Universe Remain Elusive. In : NASA/JPL [en ligne]. [Consulté le 8 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4469>.

[23] TAVERNIER, Lyle 2017. Modeling Gravitational Waves - Teachable Moments. In : NASA/JPL Edu [en ligne]. [Consulté le 3 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2016/3/23/modeling-gravitational-waves/>.

[24] COMISSARIAT, Tushna, 2016. LIGO detects first ever gravitational waves – from two merging black holes. In : Physics World [en ligne]. 11 février 2016. [Consulté le 18 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://physicsworld.com/a/ligo-detects-first-ever-gravitational-waves-from-two-merging-black-holes/>.

[25] PÖSSEL, Markus, 2016. Gravitational Waves and How They Distort Space. In : Universe Today [en ligne]. 8 février 2016. [Consulté le 17 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.universetoday.com/127255/gravitational-waves-101/>.

[26] STARR, Michelle, 2019. Gravitational Waves Could Be Leaving Some Weird Lasting Effects in Their Wake. In : ScienceAlert [en ligne]. [Consulté le 9 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencealert.com/gravitational-waves-could-be-leaving-some-weird-lasting-effects-in-their-wake>.

- [27] FLAUGER, Raphael et WEINBERG, Steven, 2019. Absorption of Gravitational Waves from Distant Sources. In : Physical Review D. 28 juin 2019. Vol. 99, n° 12, p. 123030. DOI 10.1103/PhysRevD.99.123030.
- [28] WEISBERG, Joel M., TAYLOR, Joseph H. et FOWLER, Lee A., 1981. Gravitational Waves from an Orbiting Pulsar. In : Scientific American. octobre 1981. Vol. 245, n° 4, p. 74-82. DOI 10.1038/scientificamerican1081-74.
- [29] ACCADIA, T et all, 2012. Virgo: a laser interferometer to detect gravitational waves. Journal of Instrumentation. 29 mars 2012. Vol. 7, n° 03, pp. P03012P03012. DOI 10.1088/1748-0221/7/03/P03012.
- [30] Les informations sur GW170814 | Advanced Virgo,[en ligne]. [Consulté le 10 avril 2020]. Disponible à l'adresse : http://public.virgo-gw.eu/gw170814_fr/.
- [31] Virgo Website, [en ligne]. [Consulté le 11 avril 2020]. Disponible à l'adresse : <http://www.virgo-gw.eu/>
- [32] CNRS, 20.16. Les ondes gravitationnelles détectées 100 ans après la prédiction d'Einstein. In : Techniques de l'Ingénieur [en ligne]. [Consulté le 9 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-ondes-gravitationnelles-detectees-100-ans-apres-la-prediction-deinstein-31893/>.
- [33]https://www.reddit.com/r/spaceporn/comments/47c83s/simulation_of_two_merging_black_holes_in_front_of/
- [34] O'NEILL, 2018. What Do You Get When Two Neutron Stars Collide? In : HowStuffWorks [en ligne]. 5 juin 2018. [Consulté le 8 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://science.howstuffworks.com/what-do-get-when-two-neutron-stars-collide.htm>.
- [35] Jgl, 2015. general relativity - Gravitational wave solutions to the Einstein field equations. In : Physics Stack Exchange [en ligne]. [Consulté le 9 mai 2020]. Disponible à l'adresse : <https://physics.stackexchange.com/questions/159159/gravitational-wave-solutions-to-the-einstein-field-equations>.
- [36] JAIN, Akash, 2015. Gravitational Waves - Ripples in the Spacetime. In : [en ligne]. 2015. [Consulté le 14 mai 2020]. DOI 10.13140/RG.2.1.3919.9844. Disponible à l'adresse : <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3919.9844>.