

## Les nouvelles pistes de l'astrophysique

Pour collecter des informations sur les objets astronomiques, on peut

- attendre que le ciel nous tombe sur la tête : les fragments météoritiques sont riches d'enseignements
- se servir de nos « jambes » : malheureusement, la conquête spatiale est limitée au Système solaire proche

De puis que l'homme est homme, il a pris l'habitude de lever les yeux vers les étoiles. La lumière qu'elles nous envoient constitue aujourd'hui encore la principale source d'informations les concernant. L'astronome dispose aujourd'hui de nombreux « canaux » d'observation et ne se contente plus de la seule lumière visible : des ondes radio aux rayons gamma, tous les domaines du spectre électromagnétique sont scrutés.

D'autres pistes sont maintenant creusées : celle des neutrinos, ces particules étranges qui interagissent peu avec la matière mais sont omniprésentes, et celle des ondes gravitationnelles...

## Les ondes gravitationnelles

### Qu'est-ce que c'est ?

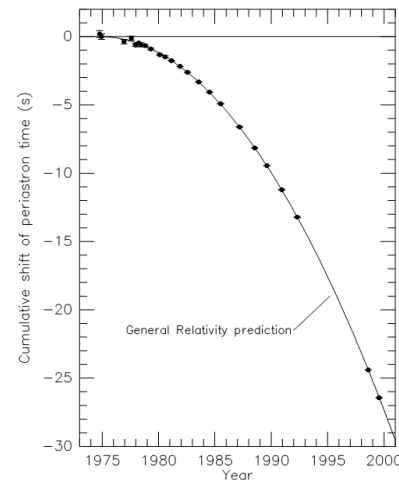
Dans la théorie de Newton, la force de gravité se déplace instantanément. Dans le cadre de la Relativité développée par Einstein, elle se déplace au mieux à la vitesse de la lumière dans le vide, soit 300 000 km/s. C'est précisément cette théorie qui prédit l'existence des ondes gravitationnelles.

Dans sa forme généralisée, la Relativité conçoit un espace-temps courbé par les masses – ceci a été vérifié à plusieurs reprises par l'expérience. Quand les masses bougent, cette courbure se déplace et, à la manière des vagues à la surface de l'eau, des ondes gravitationnelles peuvent naître. Loin des masses, ces ondes se déplacent à la vitesse de la lumière.

Au passage d'une onde gravitationnelle, l'espace-temps est légèrement modifié : en particulier, les distances changent pendant un bref moment. Après le passage de l'onde, tout reprend sa place.

### A-t-on les preuves de l'existence de ces ondes ?

En 1993, Russel Hulse et Joseph Taylor obtiennent le prix Nobel de Physique pour avoir étudié le rapprochement de deux pulsars (étoiles à neutrons) PSR1913+16 et montré que ce rapprochement est prédit avec beaucoup de précision si l'on incorpore au modèle l'émission d'ondes gravitationnelles par le système double, dont la période diminue d'une milliseconde par an à cause de cette émission.



### Comment produire des ondes gravitationnelles ?

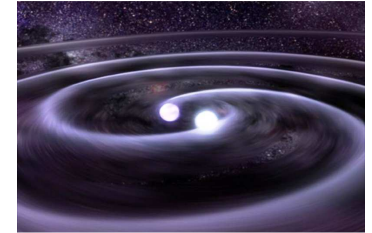
Au XIXème siècle, le physicien allemand Heinrich Hertz met en évidence les ondes électromagnétiques ; ces dernières peuvent être produites par l'accélération de charges électriques au laboratoire (et ceci se passe régulièrement à la maison !). Peut-on produire des ondes gravitationnelles par accélération de masses ?

Théoriquement, oui. Prenons un cylindre en acier d'un mètre de diamètre et de 20 mètres de long, pesant 490 tonnes, faisons le tourner à 260 trs/min (limite de rupture de l'acier) : rien ne se passe ! ou tout du moins, on ne peut rien détecter.

La Relativité générale stipule en effet que les ondes gravitationnelles les plus intenses sont produites par des masses

- qui possèdent un champ gravitationnel très intense
- qui vont à une vitesse proche de celle de la lumière
- qui n'ont pas une forme sphérique

Dans le bestiaire astronomique, les candidats les plus sérieux sont les étoiles à neutrons et les trous noirs, surtout s'ils se mettent à deux, tournant l'un autour de l'autre.

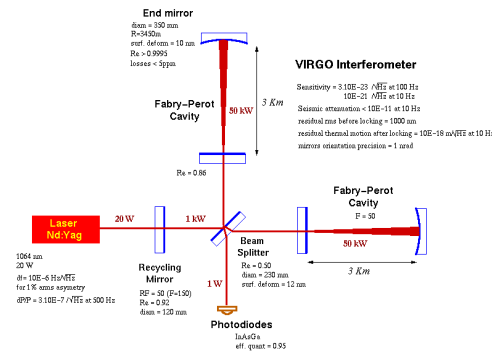


### Comment détecter les ondes gravitationnelles ?

Même avec des champions de la catégorie ondes gravitationnelles, la taille des ondes arrivant sur Terre est très faible et la variation de distance à mesurer est de l'ordre de la taille d'un atome comparé à la distance Terre-Soleil...

Pour se fixer les idées, imaginons qu'une supernova explose dans notre Galaxie. Il s'agit là d'un cas très favorable qui devrait conduire à une forte dose d'ondes gravitationnelles au niveau de la Terre. La variation relative de taille ne serait cependant que d'un milliardième de milliardième, l'équivalent d'un changement d'une fraction de micromètre dans la distance du Soleil à la Terre. Une telle précision est clairement hors de portée à l'heure actuelle.

La méthode la plus prometteuse est l'interférométrie laser, sur l'exemple historique de l'appareil de Michelson.



Le rayonnement provenant d'un laser est divisé en deux faisceaux. Ceux-ci sont envoyés dans des directions perpendiculaires, puis réfléchis par des miroirs et finalement recombinaison. L'analyse de la lumière après recombinaison permet de dire si la durée de propagation de la lumière dans l'une des directions a été perturbée. Si tel est le cas, cela signifie que la distance parcourue par l'un des faisceaux a légèrement varié sous l'effet du passage d'une onde gravitationnelle.

Étant donné la faiblesse des effets à mesurer, ces interféromètres doivent être très sensibles. En particulier, la distance parcourue par la lumière doit être aussi grande que possible. Pour cette raison, ces détecteurs sont gigantesques, leurs bras font plusieurs kilomètres de long. Il est également crucial de réduire toutes les sources de bruit parasite, tout spécialement celles d'origine sismique ou thermique.

Mais ces appareils sont démesurés : VIRGO à Pise (3 km de long) ou LIGO aux Etats-Unis (4 km de long), avec la condition expresse d'y entretenir un vide quasi-parfait, sont toujours en cours de réglage/tests.



Par ailleurs, sur Terre, les vibrations du sol (routes, activité sismique) sont dérangeantes et limitent les détecteurs. La NASA et l'ESA conjuguent leurs efforts pour lancer, dès 2012, un projet d'interféromètre spatial géant, LISA/NGO : les 3 satellites de LISA seront en orbite solaire à 5 millions de kilomètres les uns des autres !

### Que peut-on espérer apprendre ?

Les ondes gravitationnelles traversent les milieux les plus denses sans encombre : l'Univers leur est quasiment transparent, mais elles ouvrent une porte sur l'étude de phénomènes totalement inaccessibles par d'autres biais. Tout particulièrement, les supernovae et étoiles à neutrons, et les trous noirs.

## L'astrophysique des neutrinos

### Un peu d'histoire

En 1930, la communauté des physiciens est confrontée à une énigme : la désintégration ne semble pas respecter les lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du spin. Pour satisfaire ces principes, Wolfgang Ernst Pauli postule l'existence d'une nouvelle particule, de charge électrique nulle. Enrico Fermi lui donne le nom de « neutrino » en 1933, en l'incorporant dans sa théorie de l'interaction faible.

Le neutrino (en fait l'antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e$  qui accompagne la formation d'un électron lors de la transformation d'un neutron en proton) est découvert expérimentalement en 1956, par Frederick Reines et Clyde Cowan, auprès d'un réacteur nucléaire. En 1962, le neutrino muonique  $\nu_\mu$  est à son tour découvert, à Brookhaven. En 1990, le LEP, au CERN, démontre qu'il n'existe que trois familles de neutrinos légers (certaines théories prédisant l'existence d'autres neutrinos de masse beaucoup plus importante). Enfin, le neutrino tau  $\nu_\tau$  est découvert en 2000 dans l'expérience DONUT.

En 1998, l'expérience Super-Kamiokande met en évidence pour la première fois le phénomène d'oscillation des neutrinos, ce qui établit que le neutrino a une masse non nulle — bien qu'extrêmement faible.

### La masse des neutrinos

Dans le modèle standard minimal, les neutrinos n'ont pas de masse. Les oscillations de neutrinos, postulées par la mécanique quantique, ne peuvent cependant avoir lieu que s'ils en ont une, et qu'en plus, cette masse ne prend de valeur bien définie que pour des états qui sont des mélanges de saveurs différentes.

En tout état de cause, la masse des neutrinos est très faible et n'a pu actuellement être mesurée directement. Les contraintes cosmologiques apportées par le satellite WMAP et les modèles cosmologiques actuels, combinées aux résultats des expériences d'oscillations, indiquent que le plus lourd aurait une masse inférieure à  $0,23 \text{ eV}/c^2$ .

Un autre problème en astrophysique a un temps pu être expliqué par les neutrinos : c'est celui de la matière noire, la « masse manquante » de l'univers selon certaines théories. En effet, l'expansion mesurée de l'univers semble indiquer qu'il contient beaucoup plus de matière que celle qui est détectable par le rayonnement qu'elle émet. Cette matière qui n'émettrait pas de lumière — d'où l'expression « matière noire », ou « matière sombre » — est toutefois détectable par l'influence gravitationnelle qu'elle exerce sur la matière visible, et qui a pu être observée sur des astres massifs comme des étoiles et des galaxies.

On pensait jusqu'à récemment que, si les neutrinos possédaient une masse, ils pourraient peut-être constituer la matière noire. Toutefois, la masse des neutrinos semble finalement bien trop petite pour qu'ils puissent contribuer à une fraction significative de l'hypothétique matière noire.

### L'origine des neutrinos

Les premiers neutrinos seraient apparus il y a environ 13,7 milliards d'années, peu après la naissance de l'univers. Depuis, celui-ci n'a cessé de s'étendre, de se refroidir et les neutrinos ont fait leur chemin. Théoriquement, ils forment aujourd'hui un fond de rayonnement cosmique de température égale à 1,9 kelvin. L'énergie de ces neutrinos est cependant bien trop faible pour qu'ils puissent être détectés avec les technologies actuelles. Les autres neutrinos que l'on trouve dans l'univers sont créés au cours de la vie des étoiles ou lors de l'explosion des supernovae.

La majeure partie de l'énergie dégagée lors de l'effondrement d'une supernova est rayonnée au loin sous la forme de neutrinos produits quand les protons et les électrons se combinent dans le noyau pour former des neutrons. Ces effondrements de supernova produisent d'immenses quantités de neutrinos. La première preuve expérimentale de ceci fut fournie en 1987, quand des neutrinos provenant de la supernova 1987a ont été détectés par les expériences japonaise Kamiokande et américaine IMB.

### Des télescopes à neutrinos

Notre ciel a toujours été observé à l'aide des photons à des énergies très différentes allant des ondes radios aux rayons gamma. L'utilisation d'une autre particule pour observer le ciel permettrait d'ouvrir une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Le neutrino est pour cela un parfait candidat :

- il est stable et ne risque pas de se désintégrer au cours de son parcours ;
- il est neutre et n'est donc pas dévié par les champs magnétiques. Il est donc possible de localiser approximativement la direction de sa source ;
- il possède une très faible section efficace d'interaction et peut ainsi s'extirper des zones denses de l'univers comme les abords d'un trou noir ou le cœur des phénomènes cataclysmiques (il faut préciser que les photons que nous observons des objets célestes ne nous proviennent que de la surface des objets et non pas du cœur) ;
- il n'interagit que par interaction faible et transporte ainsi des informations sur les phénomènes nucléaires des sources, contrairement au photon qui est issu de processus électromagnétiques.

Une nouvelle astronomie complémentaire est ainsi en train de se créer depuis une dizaine d'années.

Un des principes possibles pour un tel télescope est d'utiliser la Terre comme cible permettant d'arrêter les neutrinos astrophysiques. Lorsqu'un neutrino muonique traverse la Terre, il a une faible chance d'interagir et ainsi d'engendrer un muon. Ce muon, s'il a une énergie au-delà d'une centaine de GeV, est aligné avec le neutrino et se propage sur une dizaine de kilomètres dans la Terre. S'il a été créé dans la croûte terrestre, il va pouvoir sortir de la Terre et se propager dans la mer où seraient installés les télescopes à neutrinos. Ce muon allant plus vite que la vitesse de la lumière dans l'eau, il engendre de la lumière Čerenkov, l'équivalent pour la lumière du bang supersonique. Il s'agit d'un cône de lumière bleutée. Ce type de télescope à neutrinos est constitué d'un réseau tridimensionnel de détecteurs de photons (des photomultiplicateurs) qui permet de reconstruire le cône Čerenkov, et donc la trajectoire du muon et du neutrino incident, et ainsi la position de la source dans le ciel. La résolution angulaire actuelle est de l'ordre du degré.

Ces télescopes à neutrinos sont déployés dans un grand volume d'eau liquide ou de glace pour que la lumière émise par le muon soit perceptible, des dimensions de l'ordre du kilomètre cube étant requises pour avoir une sensibilité suffisante aux faibles flux cosmiques. Ils doivent être placés sous des kilomètres d'eau pour, d'une part, être dans l'obscurité absolue, et, d'autre part, pour avoir un blindage aux rayons cosmiques qui constituent le bruit de fond principal de l'expérience.

Les télescopes à neutrinos, ces immenses volumes situés aux fonds des eaux et regardant sous nos pieds, constituent une étape majeure dans le développement de l'astrophysique des particules et devraient permettre de nouvelles découvertes en astrophysique, cosmologie, matière noire et oscillations de neutrinos. Sont actuellement en fonctionnement IceCube, en Antarctique, et Antares, dans la mer Méditerranée.