

Les pulsars radio : 50 ans de découvertes !

Ismaël Cognard (ismael.cognard@cns-orleans.fr)

Laboratoire de physique et chimie de l'environnement et de l'espace (LPC2E),
45071 Orléans Cedex 2

À la fin des années 1960, des impulsions radio régulières sont découvertes en provenance d'astres de notre galaxie.

Analogue à celle d'un phare au bord de la mer, l'émission de ces « pulsars » est interprétée comme le passage d'un faisceau radio collimaté (peu divergent) sur la Terre. Parmi les milliers de pulsars connus aujourd'hui, certains sont dotés d'une stabilité de rotation hors du commun les rendant utilisables pour un grand nombre d'applications en physique fondamentale.

Un réseau de pulsars ultra-stables est actuellement utilisé pour chercher la signature des déformations de l'espace-temps induites par les ondes gravitationnelles prédites dans la foulée des travaux d'Albert Einstein. Ces ondes seraient émises par les couples de trous noirs de milliards de masses solaires situés aux centres des galaxies voisines.

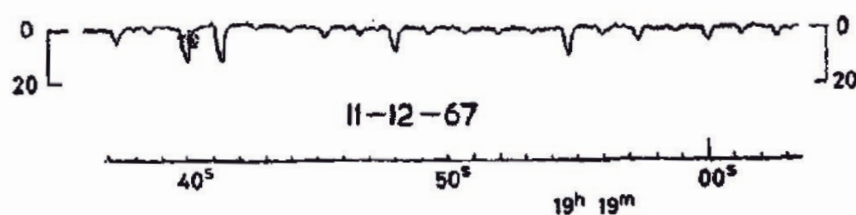
Une découverte inattendue

Au milieu des années 1960 à Cambridge, sous la direction du professeur Antony Hewish, la jeune étudiante Jocelyn Bell aida à la construction d'un nouvel instrument capable d'observer le ciel dans le domaine des ondes radio de basse fréquence (fig. 1). Les antennes, constituées de longs câbles suspendus à des poteaux de bois, s'étendaient sur environ deux hectares et captaient les ondes radio autour de 80 MHz (un peu en dessous de notre modulation de fréquence actuelle). L'équipe souhaitait étudier les quasars^(a), des astres extrêmement brillants qui venaient alors d'être découverts. Pour obtenir des informations sur la taille de ces sources à très grande distance, les astrophysiciens ont cherché à s'aider de la scintillation interplanétaire rapide dont elles souffraient du fait de leur aspect quasi-ponctuel. En effet, comme l'atmosphère terrestre pour le rayonnement visible, le milieu interplanétaire est turbulent et produit sur le rayonnement radio de la scintillation dont les caractéristiques dépendent de la taille des objets. Pour ces études, un récepteur novateur capable d'enregistrer le signal avec une résolution temporelle courte ($\sim 0,1$ seconde) a donc été déployé.

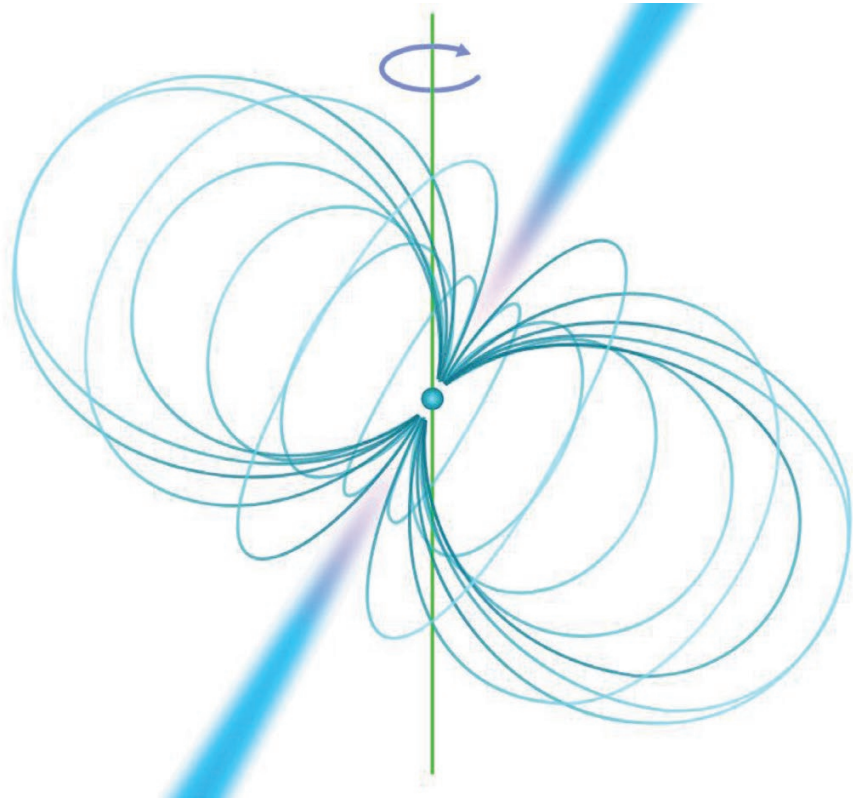


1. **Jocelyn Bell.** Alors étudiante en thèse, Jocelyn Bell est responsable du câblage des antennes de l'interféromètre de Cambridge et fera la découverte de sources radio répétitives, maintenant appelées « pulsars ».

C'est ainsi que fin 1967, une première succession d'impulsions radio espacées de 1,34 seconde a été découverte (fig. 2) sur le papier déroulant enregistrant le signal. Après une courte période d'incertitude, le grand éloignement de la source (située quelque part dans notre galaxie) et la découverte d'une seconde source similaire (présentant des impulsions toutes les 1,25 seconde) ont permis de confirmer l'origine naturelle de ces signaux. Après quelques



2. Tracé du dérouleur papier de décembre 1967, montrant l'enregistrement du pulsar CP1919 découvert par Jocelyn Bell. (*Nature*, 217 (1968) 709-713).



mois et quelques hésitations, ces impulsions régulières ont été interprétées comme la manifestation du passage d'un faisceau d'onde radio directif attaché à une étoile à neutrons en rotation rapide. L'évolution stellaire prédit en effet que le stade ultime d'une étoile massive (de 10 à 20 masses solaires environ), après explosion en supernova, est une toute petite étoile presque uniquement constituée de neutrons. D'un diamètre d'une vingtaine de kilomètres pour une masse de 1,4 masse solaire, elle possède souvent un très fort champ magnétique qui lui fait émettre deux faisceaux radio très directifs le long de son axe magnétique (fig. 3). À la manière d'un phare au bord de la mer, ces faisceaux balayent l'espace et « éclairent » parfois brièvement la Terre, produisant les impulsions radio observées. Notons que l'étoile à neutrons avait été imaginée dès 1934, très peu de temps après la découverte du neutron, par les astronomes Baade et Zwicky. En 1974, Antony Hewish et Martin Hyle ont obtenu le prix Nobel de physique pour leurs travaux pionniers en radioastronomie. Pour A. Hewish, ce fut pour son rôle clé dans la découverte des pulsars, en oubliant malheureusement la contribution de Jocelyn Bell^(b).

Un pulsar recyclé

À la fin des années 1960 et au début des années 1970, les découvertes se multiplient. D'abord il est observé qu'avec la sommation de quelques centaines ou milliers d'impulsions individuelles, une impulsion moyenne très stable est obtenue, ouvrant la voie à des mesures de beaucoup plus grande précision. Ainsi, un très faible ralentissement de la rotation est maintenant mesuré au niveau de 10^{-15} s/s sur tous les

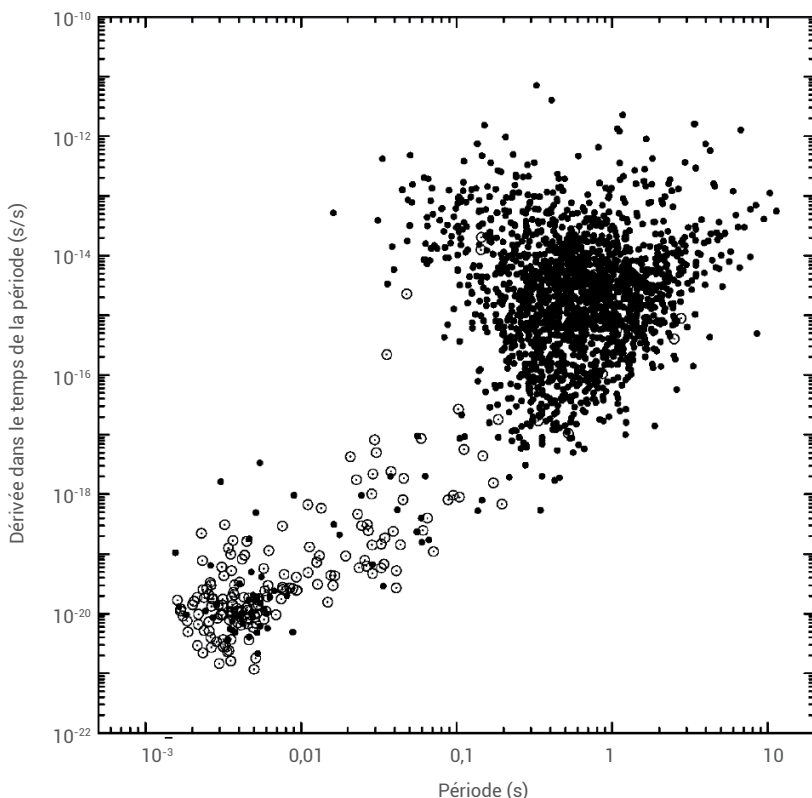
3. Vue d'artiste d'un pulsar, c'est-à-dire d'une étoile à neutrons dotée d'un champ magnétique intense et émettant deux faisceaux radio entraînés par la rotation rapide de l'étoile. Balayant l'espace, ils sont perçus sous la forme d'impulsions régulièrement espacées, à la manière d'un phare au bord de la mer. (Source : commons.wikipedia.org, auteurs : Mysid et Roy Smits).

pulsars. Notons que certains d'entre eux peuvent présenter deux formes d'impulsions moyennes bien distinctes et permuter de l'une à l'autre aléatoirement. Certains pulsars n'émettent même plus aucun signal pendant plusieurs rotations !

En 1982, une découverte majeure est effectuée par le professeur D.C. Backer, de Berkeley, à Arecibo sur l'île de Porto Rico. Avec le plus grand télescope du monde de l'époque (300 m de diamètre), c'est un pulsar doté d'une rotation extrême de 642 tours par seconde (1,5 ms de période !) qui vient bouleverser la discipline. En effet, ce pulsar présente une période très courte comme s'il était extrêmement jeune, mais un minuscule ralentissement comme s'il était très âgé... Il est maintenant admis qu'il s'agit d'un vieux pulsar, dit « recyclé ». Ce pulsar a été membre d'un système double qui a survécu à l'explosion de la supernova qui lui a donné naissance. Lorsqu'en fin de vie, avant son explosion potentielle, la seconde étoile s'est réchauffée et a grossi, le pulsar éteint a réussi à en capter de la matière et à se réaccélérer par transfert de moment cinétique jusqu'à atteindre une vitesse de rotation de plus de

500 tours par seconde, bien supérieure à celle qu'il avait à sa « naissance ». À l'image du diagramme de Hertzsprung-Russell, qui positionne les étoiles selon leur température et luminosité, il est possible de construire un diagramme « période – dérivée dans le temps de la période » des pulsars (fig. 4), qui permet de se faire une idée générale de l'évolution de ces astres. À l'explosion des grosses étoiles, une étoile à neutrons/pulsar apparaît en haut un peu à gauche du diagramme (vers 30 ms de période). Avec son champ magnétique élevé et son ralentissement important, il se déplace alors rapidement vers le centre du diagramme, là où la très grande majorité des pulsars est observée. Quand la période devient trop élevée et la dérivée de la période devient trop faible, au bout de quelques dizaines ou centaines de millions d'années, le rayonnement radio cesse et les pulsars disparaissent en bas à droite du diagramme. Comme vu précédemment, le pulsar peut se faire réaccélérer (recycler) pour réapparaître dans le coin inférieur gauche sous forme d'un pulsar en rotation extrêmement rapide et au freinage quasi inexistant (très faible valeur de la dérivée de la période : $\sim 10^{-20}$ s/s).





4. Diagramme « période – dérivée dans le temps de la période » de l'ensemble des pulsars radio connus en 2018. Les pulsars marqués d'un point entouré d'un cercle sont situés dans un système double avec une autre étoile (voir le texte pour explications).

>>>

Débarrassés de toutes les instabilités observées sur les pulsars jeunes à fort champ magnétique, ces vieux pulsars recyclés émettent des impulsions très étroites (car la période de rotation est courte) et ont une stabilité hors du commun qui les transforment en véritables « horloges cosmiques », dont même Albert Einstein n'avait osé rêver dans ses expériences de pensée !

Observation des pulsars avec le grand radiotélescope de Nançay

En France, depuis la fin des années 1980, le radiotélescope de Nançay (dans le département du Cher) s'est petit à petit spécialisé dans l'observation des pulsars recyclés. Ce radiotélescope, équivalent à une antenne unique de 100 mètres de diamètre environ, a été construit dans les années 1960 sur un concept un peu atypique, dit « de Kraus » (fig. 5). Un grand miroir mobile, de 200 m x 40 m, fait face au Sud et est orientable sur un axe horizontal pour aller chercher différentes hauteurs dans le ciel. Le regardant en face, à près de

500 mètres, se trouve un miroir fixe de 300 m x 35 m, découpé dans une sphère permettant de concentrer les ondes radio vers les récepteurs situés entre ces deux grandes structures. Deux récepteurs, travaillant à basse et haute fréquence respectivement (1,1-1,8 GHz et 1,7-3,5 GHz), sont installés dans un chariot de 40 tonnes, mobile sur une voie ferrée de 80 mètres de long pour compenser la rotation de la Terre et permettre des observations d'une durée d'un peu plus d'une heure.

Plusieurs générations d'instrumentations « pulsar » ont été développées et installées dans le laboratoire situé à proximité, où le signal est transporté par câble souterrain. Deux difficultés principales sont rencontrées lors des observations de pulsars rapides. Du fait de la *dispersion* provoquée par les électrons libres rencontrés sur le parcours entre le pulsar et la Terre, les impulsions ne se propagent pas tout à fait à la même vitesse selon leur fréquence radio. Cette variation d'indice selon la fréquence des ondes produit des retards qui sont souvent bien supérieurs à la période de rotation du pulsar, et il est absolument nécessaire de les corriger pour détecter les pulsars

rapides. Grâce à la disponibilité d'une grande puissance de calcul dans les cartes graphiques haut de gamme (GPUs pour Graphic Processing Units), la correction du décalage temporel est maintenant effectuée dans l'espace de Fourier par application de filtres de déphasage inverse. La seconde difficulté consiste à effectuer parfaitement l'*intégration* temporelle, par empilement, des impulsions radio les unes sur les autres pendant environ 15 secondes pour réduire drastiquement la quantité de données à stocker. Cet empilement synchrone doit être le plus exact possible pour conserver une qualité de datation optimale inférieure au millionième de seconde, malgré les nombreux effets Doppler dont le signal souffre du fait de tous les mouvements du pulsar et du radiotélescope. La dernière instrumentation « pulsar », installée à Nançay depuis quelques années, est ainsi capable de traiter en temps réel (suppression de la dispersion et empilement synchrone) une bande passante en fréquence de 512 MHz, correspondant à un flux de données de 2 Go par seconde.

L'analyse des nombreux temps d'arrivée mesurés, appelée *chronométrie*, consiste à choisir et ajuster les paramètres décrivant la rotation du pulsar observé. Ceci se fait en minimisant les différences (appelées résidus) entre ces temps d'arrivée mesurés et des temps d'arrivée calculés à partir des paramètres. Pour être raisonnablement confiant dans le modèle construit, l'inspection des résidus de temps d'arrivée ne doit évidemment révéler aucune structure, mais uniquement du bruit. L'un des meilleurs pulsars observés à Nançay est ainsi J1909-3744 (le nom d'un pulsar renseigne sur sa position dans le ciel). L'écart quadratique moyen de ses résidus de temps d'arrivée n'est que de ~ 80 ns sur près de 15 ans (fig. 6).

Les applications en physique fondamentale

Quelques centaines de pulsars, dits « recyclés », sont maintenant connus, et une cinquantaine d'entre eux présentent une impulsion étroite et des qualités de stabilité exceptionnelle qui permettent de les utiliser pour des applications de physique fondamentale. Certains de ces pulsars ont même une stabilité qui vient rivaliser avec les meilleures horloges atomiques. Sur le court terme (quelques secondes), les impulsions individuelles, qui ne sont pas



© J.-P. Letourneur, CRDP Orléans.



5. Photo aérienne du grand radiotélescope de Nançay. À droite, le miroir mobile est orientable selon un axe horizontal qui permet d'observer plus ou moins haut dans le ciel. Après cette première réflexion, les ondes sont réfléchies et concentrées par le miroir fixe à gauche, avant d'être détectées par l'un des récepteurs situés sur le chariot mobile de 40 tonnes au centre sur la voie ferrée (voir zoom).

strictement identiques, présentent de petites avances et retards que n'ont pas les horloges atomiques de laboratoire. Mais sur le long terme (quelques années), la cadence des impulsions, emmenées par la rotation régulière d'une étoile compacte de 1,5 fois la masse du Soleil, est extrêmement stable et ne souffre pas des variations d'environnement que subissent les horloges des laboratoires terrestres. La stabilité de

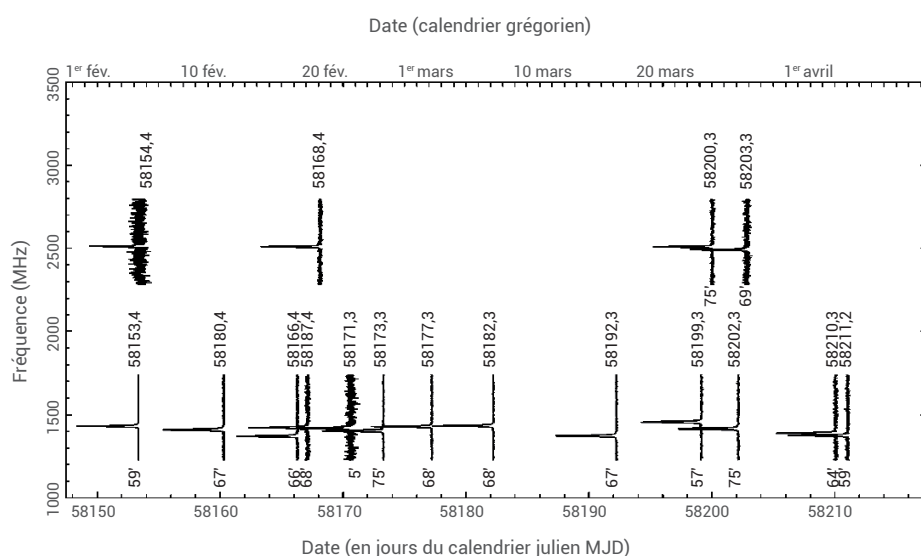
rotation des pulsars, dont les temps d'arrivée des impulsions sont mesurés par rapport à une échelle de temps construite avec les horloges terrestres, ne peut théoriquement pas dépasser celle de ces dernières, mais peut être utilisée pour en améliorer le comportement à long terme.

La mesure précise d'effets relativistes en surnombre dans des systèmes doubles rend

possible les tests des théories de la gravitation. Ces effets relativistes sont quantifiés par les paramètres dits « post-képlériens », car il s'agit de les modéliser par une extension des cinq paramètres décrivant le mouvement des deux étoiles à l'aide des lois de Kepler. En relativité générale, tous les paramètres post-képlériens dépendent des masses des deux étoiles qui sont inaccessibles pour des raisons de géométrie (l'angle entre le plan de l'orbite et le ciel est inconnu). La mesure de deux paramètres détermine les deux masses et tout paramètre post-képlérien supplémentaire permet de vérifier la cohérence de la théorie.

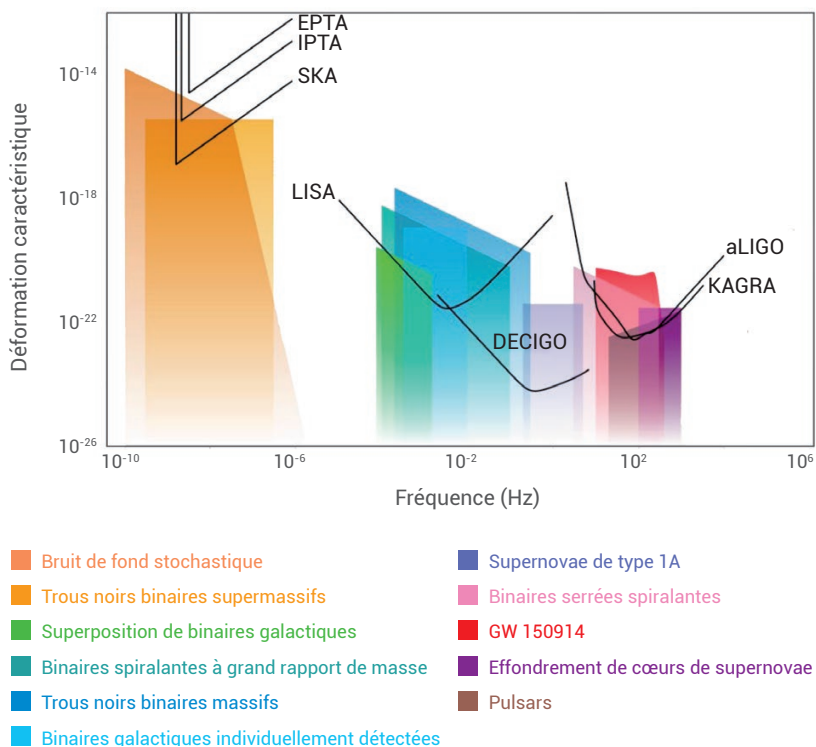
La physique fondamentale entre ainsi en jeu dès 1974 au grand radiotélescope d'Arecibo. Le professeur J.H. Taylor et son étudiant R. Hulse y découvrent un pulsar, d'environ 59 ms de période, dans un système double relativiste constitué de deux étoiles à neutrons en rotation rapide en ~ 8 heures l'une autour de l'autre (dont l'une est donc visible sous forme de pulsar). Les mesures de temps d'arrivée des impulsions du pulsar observées en radio permettent de tester de façon inégalée les prédictions de la relativité générale en champ gravitationnel fort. Elles fournissent même, à l'époque, la première preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles, ces déformations de l'espace produites par des masses accélérées et se propageant dans tout l'Univers. Ici, la diminution de la période orbitale des deux étoiles qui tombent lentement l'une sur l'autre se fait exactement au taux prédit par la relativité générale, avec une perte d'énergie du système double provenant de l'émission d'ondes gravitationnelles. J.H. Taylor et R. Hulse se verront décerner le prix Nobel de physique en 1993 pour la découverte du pulsar double relativiste et les tests de la relativité générale effectués.

C'est plus d'une trentaine d'années plus tard, en 2015, que les collaborations LIGO et Virgo ont directement mesuré le signal associé à la fusion de trous noirs (malheureusement, à l'époque, seuls les deux détecteurs américains LIGO étaient réellement opérationnels, le détecteur franco-italien Virgo étant à l'arrêt). Pour mémoire, les détecteurs de LIGO et Virgo sont de gigantesques interféromètres optiques dont les ondes gravitationnelles viennent changer de façon infime les 3 ou 4 km de longueur des bras.



6. Observations du pulsar J1909-3744 (période de 2,95 ms, en rotation avec une naine blanche en 1,5 jours), conduites en février et mars 2018 avec le grand radiotélescope de Nançay. Les impulsions très fines de ce pulsar ultra-stable sont positionnées à leur date d'observation (calendrier grégorien en haut, julien modifié MJD en bas) et s'étalent en vertical sur les 512 MHz de signal intégré autour de 1,5 et 2,5 GHz. Ce pulsar est le plus stable observé à Nançay, et l'écart quadratique moyen entre les temps d'arrivée mesurés et ceux calculés n'est que de ~ 80 ns sur ~ 15 ans !

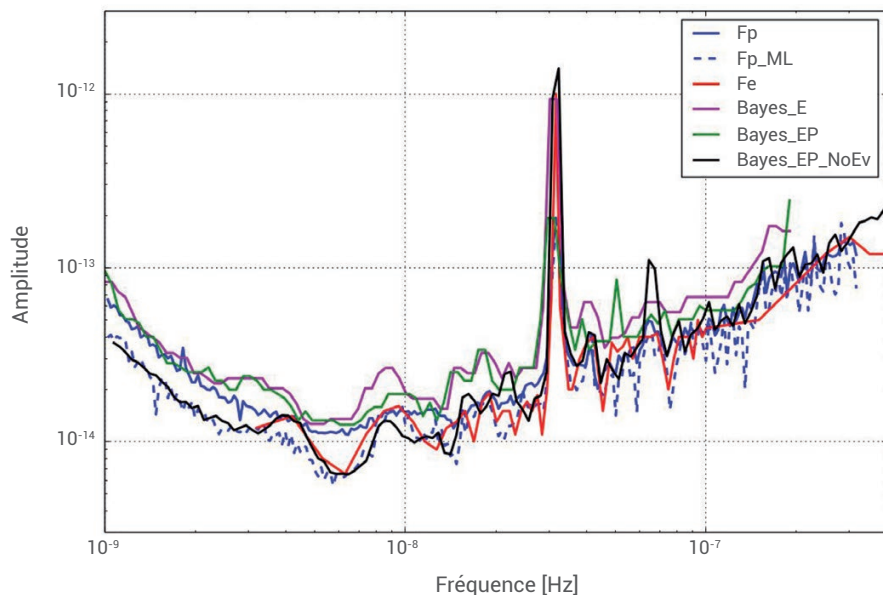




7. Spectres des ondes gravitationnelles avec les sources et les détecteurs actuels ou prévus.

À haute fréquence, les instruments aLIGO/Virgo ont déjà détecté une poignée de fusions de trous noirs (dont GW150914). À moyenne fréquence, l'instrument eLISA est en cours de définition et construction par l'ESA (Agence spatiale européenne). À très basse fréquence, les réseaux de pulsars (Pulsar Timing Array) mettent des limites de plus en plus contraignantes sur les populations de doubles trous noirs supermassifs.

(Source : www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2017.pdf).



8. Limites obtenues sur l'amplitude des ondes gravitationnelles émises par des sources individuelles grâce aux données des six meilleurs pulsars ultra-stables de l'European PTA. Trois analyses fréquentistes et trois bayésiennes sont tracées ici.

(Source : S. Babak et al., *MNRAS* 455 (2016) 1665-1679).



À ce jour, les meilleurs tests de la relativité générale en champ fort sont obtenus sur le pulsar double J0737-3039A, de période de rotation 22 ms, de période orbitale 2 h 27 min et d'excentricité $\sim 0,1$, avec une vérification à 0,005% près. Ce système, assez similaire au premier pulsar double découvert en 1974, émet aussi des ondes gravitationnelles qui font rapetisser le mouvement orbital et mèneront à la fusion des deux étoiles à neutrons dans quelques centaines de millions d'années. Notons que c'est ce type de fin cataclysmique qui a été observé par les détecteurs d'ondes gravitationnelles des collaborations LIGO et Virgo fin 2017.

La mesure précise des masses des étoiles à neutrons par les effets relativistes mentionnés plus haut met aussi des contraintes fortes sur les équations d'état de la matière qui régissent ces densités extraordinaires (1,5 fois la masse du Soleil dans ~ 20 km de diamètre). Avec deux étoiles à neutrons, chacune dotée d'une masse d'environ deux masses solaires, de nombreuses équations d'état sont d'ores et déjà écartées.

En 2012, c'est un pulsar rapide situé dans un système triple qui est découvert. Une étoile à neutrons, vue donc en radio comme le pulsar, et une naine blanche tournent en un peu plus d'un jour l'une autour de l'autre. Ce système, dit « interne », est en orbite avec une seconde naine blanche avec une période d'un peu moins d'un an, constituant ce qu'on appelle un système à trois corps, ou triple, hiérarchique. Passées les complications d'analyse, car il n'y a pas de solution analytique, ce système triple sera utilisé pour tester le principe d'équivalence qui est le constat de l'égalité entre masse inertielle et masse gravifique. Quelles que soient leurs masses et leurs compositions, deux corps soumis à un même champ gravitationnel doivent tomber de façon identique. Ici, il suffit donc de regarder comment tombent différemment l'étoile à neutrons et la naine blanche du système « interne » dans le champ gravitationnel de la naine blanche externe ! Les résultats préliminaires de recherche de déformation des orbites, tant à partir des données des radiotélescopes américains que des données de Nançay, permettent d'entrevoir une contrainte sur le principe d'équivalence en champ fort améliorée de plusieurs ordres de grandeur.

Les ondes gravitationnelles peuvent être détectées dès maintenant par des instruments

sur Terre, plus tard dans l'espace avec l'instrument eLISA et même avec un réseau de pulsars ultra-stables. En effet, ici les bras de quelques kilomètres de long des interféromètres LIGO et Virgo sont remplacés par les lignes de visée vers les pulsars, soit quelques milliers d'années-lumière. Avec quelques dizaines de pulsars ultra-stables, on construit ainsi un détecteur qui sera sensible aux ondes gravitationnelles de très grandes longueurs d'onde ou de très longues périodes (de quelques mois à quelques années, soit des fréquences de l'ordre de quelques dizaines de nanohertz), le Pulsar Timing Array (PTA). En étant sensible aux très basses fréquences, le PTA

est complémentaire des autres instruments construits ou en projet (fig. 7). Seuls les systèmes doubles de trous noirs supermassifs (dix milliards de fois notre Soleil) sont capables d'émettre de telles ondes gravitationnelles de basse fréquence.

À ce jour, des limites supérieures sur l'amplitude des ondes gravitationnelles qui existeraient ont été déterminées grâce à la combinaison des temps d'arrivée mesurés dans tous les grands radiotélescopes européens (European PTA, fig. 8) et mondiaux (International PTA, voir l'encadré ci-dessous), et commencent à poser des contraintes sur les modèles de formation de ces systèmes.

Les instruments utilisés dans le cadre du Pulsar Timing Array

Les grands radiotélescopes du monde se sont regroupés pour échanger les données de temps d'arrivée obtenus sur les pulsars ultra-stables et construire un International Pulsar Timing Array (IPTA) plus sensible aux effets subtils des ondes gravitationnelles.

Au niveau européen, ce sont les radiotélescopes de Nançay (~ 100 m) en France, d'Effelsberg (100 m) en Allemagne, de Jodrell Bank (76 m) en Angleterre, de Westerbork (~ 100 m) aux Pays-Bas et de Cagliari (64 m) en Italie-Sardaigne, qui forment l'European PTA (EPTA).

En Australie, le télescope de Parkes (64 m) forme à lui tout seul le Parkes PTA (PPTA), tandis que les télescopes de Green-Bank (110 m) et Arecibo (300 m) forment la version nord-américaine, appelée NanoGRAV. Les tout nouveaux radiotélescopes chinois, FAST (500 m), et sud-africain, Meerkat (100 m), sont en train de rejoindre la collaboration mondiale IPTA.

Conclusion

Il y a une cinquantaine d'années, de véritables « horloges cosmiques » ont été découvertes avec les premiers radiotélescopes. Restes de l'explosion des grosses étoiles, les étoiles à neutrons fortement magnétisées émettent des faisceaux d'ondes radio reçus sur Terre à la manière des phares au bord de la mer. La stabilité hors du commun des impulsions radio reçues permet de nombreuses applications à la physique fondamentale. Conséquence des travaux d'Albert Einstein, les ondes gravitationnelles semblent à portée de détection dans le domaine des très basses fréquences, grâce au suivi d'un réseau de pulsars ultra-stables. Complémentaire des détections déjà effectuées dans le domaine des centaines de hertz, il s'agit ici de détecter dans le domaine du nanohertz la trace de doubles trous noirs de milliards de masses solaires situés aux centres des galaxies. ■

(a) Nous savons maintenant que les quasars ("quasi stellar radio sources"), découverts au début des années 1960, sont les régions centrales de grosses galaxies très lointaines, émettant sur une large gamme du spectre électromagnétique.

(b) Jocelyn Bell Burnell vient de recevoir le Breakthrough Prize 2019 de physique fondamentale pour sa contribution essentielle à la découverte des pulsars en 1968. Ce prix, fondé en 2012 par plusieurs personnalités dont Mark Zuckerberg (Facebook) et Sergey Brin (fondateur de Google), est doté de trois millions de dollars pour chaque lauréat.