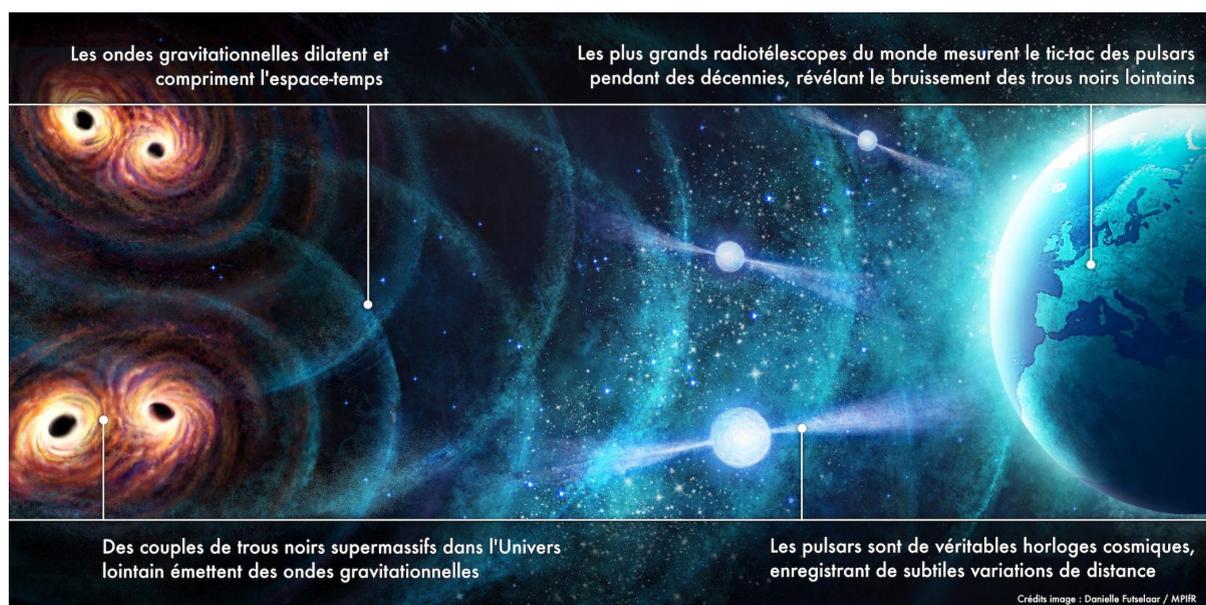


Les pulsars ouvrent une nouvelle fenêtre pour l'observation des ondes gravitationnelles

Message principal du communiqué de presse

Dans le cadre d'un réseau mondial dédié à l'observation des pulsars, un consortium européen publie le 29 juin 2023 dans la revue *Astronomy and Astrophysics* une série de résultats issus de données collectées depuis un quart de siècle, par six des radiotélescopes les plus sensibles au monde. Les données du consortium européen, de même que celles de leurs homologues américain, australien et chinois, contiennent les indices très solides de l'existence d'ondes gravitationnelles, captées dans de très basses fréquences, qui proviendraient de couples de trous noirs supermassifs situés au centre de galaxies en cours de fusion. Pour ces travaux, la participation française est importante, impliquant la contribution de chercheurs de l'Observatoire de Paris - PSL, du CNRS, du CEA, de l'Université d'Orléans et d'Université Paris Cité.



Matériel complémentaire

Ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles sont des déformations de l'espace-temps qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Prédites par la relativité générale d'Einstein dès 1915, elles ont été indirectement mises en évidence pour la première fois en 1974 à partir de la perte d'énergie d'un couple d'étoiles à neutrons en orbite serrée. La première détection directe date de

2015, quand l'interféromètre laser terrestre LIGO a mesuré l'émission produite par la coalescence de deux trous noirs de quelques dizaines de masses solaires. Une centaine d'événements de ce type a été détectée jusqu'à présent dans le domaine de fréquence d'ondes gravitationnelles entre 20 et 2000 Hz.

La communauté européenne prépare par ailleurs une nouvelle mission spatiale, LISA (dont l'adoption finale est prévue début 2024), qui étudiera le spectre des ondes gravitationnelles à basse fréquence (milli-Hz) après son lancement en 2035. LISA ciblera la population de binaires compactes de naines blanches et d'étoiles à neutrons de notre galaxie, en orbite les unes autour des autres, ainsi que la fusion de trous noirs massifs (environ un million de masses solaires) dans l'univers. LISA utilise le même concept que LIGO-Virgo, mais avec une constellation de trois satellites séparés de 2,5 millions de km flottant autour du soleil et échangeant des faisceaux laser.

À des fréquences encore plus basses, proches du nano-Hz, les astronomes utilisent des détecteurs naturels : une classe spéciale d'étoiles compactes et à rotation rapide, les "pulsars", qui se comportent comme des horloges stables. Dans ce domaine, le signal gravitationnel à basse fréquence attendu serait produit par diverses sources, certaines d'origine astrophysique, d'autres liées à l'univers primordial, la plus probable étant une population de trous noirs binaires supermassifs (de plusieurs millions à plusieurs milliards de masses solaires) formés au cours du processus hiérarchique de formation des galaxies et de l'évolution des structures à grande échelle.

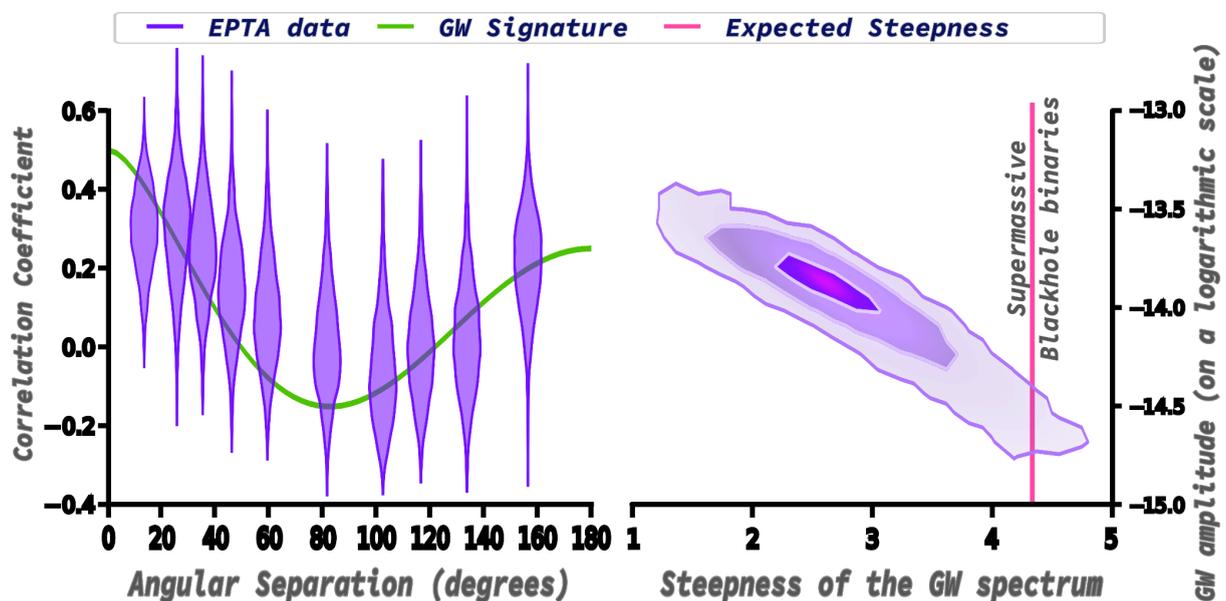
Les pulsars comme détecteurs d'ondes gravitationnelles

Les pulsars sont les vestiges de l'explosion d'étoiles massives, dont le cœur a survécu sous la forme d'une étoile à neutrons, un objet très compact de 1 à 2 masses solaires avec un rayon d'environ 13 km. Les pulsars les plus rapides tournent à une vitesse de 700 tours par seconde et émettent un faisceau de rayonnement depuis leurs pôles magnétiques. Du point de vue de l'observateur, ils se comportent comme des phares cosmiques. Ils sont perçus par un radiotélescope comme une série d'impulsions lumineuses ou de "tics" arrivant à intervalles très réguliers, fournissant un signal naturel et précis semblable à celui d'une horloge. On s'attend à ce qu'un tel signal d'horloge soit perturbé par des ondes gravitationnelles de basse fréquence. Nous avons tenté d'extraire ces perturbations en enregistrant très régulièrement plus de 50 pulsars tout au long des 20 dernières années.

L'utilisation de ces pulsars comme détecteur galactique d'ondes gravitationnelles a été suggérée par M. Sazhin (1978, Institut Astronomique Shternberg, Moscou) et S. Detweiler (1979, Université de Yale). Sazhin a proposé que les ondes gravitationnelles ultra-longues puissent être détectées par leur perturbation sur la propagation des impulsions électromagnétiques. Detweiler a montré que, compte tenu des données publiées sur les pulsars, on pouvait fixer une limite supérieure d'amplitude de 10^{-11} sur la densité d'énergie d'un bruit de fond stochastique d'ondes gravitationnelles avec des périodes d'un an. Quelques années plus tard, Hellings et Downs (1983, Jet Propulsion Laboratory) ont introduit pour la première fois le concept de réseau de pulsars et ont montré que si l'on était capable de chronométrer avec une grande précision un réseau de pulsars stables, on pourrait espérer mesurer l'émission d'un fond issu d'une population de sources binaires

compactes. En particulier, ils montraient que l'on peut déduire la nature quadrupolaire du signal d'ondes gravitationnelles de la corrélation angulaire entre les paires de pulsars, c'est-à-dire la façon dont les pulsars sont affectés en fonction de leur position relative sur le ciel. C'est ce qui définit le principe de la détection des ondes gravitationnelles à très basse fréquence avec ce que nous appelons aujourd'hui un Pulsar Timing Array (PTA).

Lorsque la technologie a commencé à permettre des mesures suffisamment précises, atteignant typiquement une datation du temps d'arrivée des pulsations (les "tic-tac") meilleure que la microseconde, plusieurs groupes dans le monde ont commencé à monitorer les rotateurs les plus rapides et les plus stables connus, les pulsars millisecondes. C'est ainsi qu'a débuté un projet de longue haleine qui devrait durer plusieurs décennies.



Principale figure illustrant le résultat : à gauche, la corrélation spatiale du signal en fonction de la séparation angulaire entre les pulsars du réseau, qui révèlent sa nature gravitationnelle (mesures en violet, courbe théorique attendue en vert). À droite, les paramètres d'amplitude A et de pente γ de la distribution spectrale d'énergie du signal d'onde gravitationnel mesuré, révélateurs du type de source (trous noirs binaires supermassifs, reliques de l'univers primordial, etc...)

La modélisation des bruits d'avant plan

Dans l'analyse des données chronométriques, il existe de nombreux bruits d'avant-plan qui doivent être caractérisés et correctement modélisés afin d'être distingués du signal d'ondes gravitationnelles. Ces bruits sont de nature différente. Leur origine peut être instrumentale (issue de l'horloge de référence, des instabilités de gain du récepteur, ou des incertitudes d'étalonnage), astrophysique (par exemple, liée à l'instabilité de l'émission radio dans la magnétosphère du pulsar ou aux variations de la rotation de l'étoile), ou due au trajet du

signal radio à travers le milieu interstellaire (créant des retards liés à la dispersion et à la diffusion du signal radio). Certains de ces bruits peuvent en effet partiellement imiter et/ou masquer la signature de l'émission gravitationnelle, et il convient de les caractériser et de les modéliser correctement avant toute autre analyse.

Enfin, les éphémérides planétaires du système solaire (SSE), qui décrivent la façon dont les planètes sont positionnées autour du Soleil en fonction du temps, jouent un rôle crucial dans le processus de chronométrage. Nous utilisons le barycentre du système solaire (SSB) comme repère de référence commun auquel nous ramenons les mesures des observations radio (temps d'arrivée des impulsions) de tous les radiotélescopes. Toute imprécision dans les positions relatives, les vitesses ou les masses des planètes peut créer des retards non comptabilisés et avoir un impact sur les mesures chronométriques de tous les pulsars du réseau, créant une corrélation spatiale factice qui imite insidieusement la géométrie de l'émission du fond d'ondes gravitationnelles. Pour résoudre ce problème, on compare soigneusement les résultats de différentes solutions SSE, notamment celles produites par le Jet Propulsion Laboratory (Folkner & Park 2018) ou par l'Observatoire de Paris (INPOP - Fienga et al 2019).

EPTA

L'Europe a été pionnière dans ce programme de recherche. Héritier de la collaboration déjà existante de l'European Pulsar Network (EPN), l'European Pulsar Timing Array (EPTA) est né fin 2006, rassemblant les équipes " pulsars " rattachées aux plus grands radiotélescopes du vieux continent : Effelsberg (Allemagne), Westerbork (Pays-Bas), Jodrell (Royaume-Uni), Bologne (Italie) et Nançay (France). Dans chacun de ces lieux, les groupes locaux avaient développé une instrumentation de pointe et une chaîne de traitement des données capables de mesurer et de chronométrer avec précision les pulsars. Dans les années qui ont suivi, ils ont été rejoints par d'autres groupes qui ont apporté leur expertise théorique et leurs compétences en analyse des données d'ondes gravitationnelles : Birmingham, Cambridge, Potsdam, Milan, Paris. Entre-temps, un nouveau télescope en Sardaigne (SRT) a rejoint l'infrastructure, et la collaboration a également inventé une installation composite en additionnant de manière cohérente le signal des cinq télescopes, résultant en une antenne de 200 m de diamètre effectif (projet LEAP, soutenu par le Conseil Européen de la Recherche). Pendant 24,5 ans, ces cinq+un instruments ont accumulé environ 60 000 mesures pour les 25 pulsars millisecondes les plus stables, permettant une cadence effective de quelques jours et atteignant une précision temporelle meilleure qu'une microseconde pour la plupart d'entre eux. Ces chiffres définissent la sensibilité et le domaine de fréquence du réseau : quelques 10^{-16} en densité d'énergie gravitationnelle en moyenne sur le ciel, entre 1,3 nHz et 5,8 μ Hz en fréquence, la sensibilité locale dans une région de la sphère céleste dépendant de la distribution réelle et de la stabilité des pulsars dans le réseau.

IPTA

L'International Pulsar Timing Array (IPTA) est né en 2009 sur la base d'une collaboration entre les trois consortiums continentaux existant à l'époque : EPTA en Europe, NANOGrav

en Amérique du Nord et PPTA en Australie. Ceux-ci ont été récemment rejoints par la collaboration indo-japonaise InPTA. Pendant des années, la principale activité commune a consisté à se réunir une fois par an lors d'une conférence scientifique (100-200 participants), à organiser une université d'été annuelle (ouverte aux étudiants en master et en doctorat du monde entier) et à échanger des étudiants et des chercheurs post-doctoraux. Deux ensembles de données combinées ont été publiés en 2016 et 2019. Ils ont été principalement utilisés pour confirmer les limites de détection précédentes obtenues individuellement par les groupes continentaux, pour traquer les effets instrumentaux et pour produire des résultats connexes tels que des contraintes sur les éphémérides planétaires du système solaire et la définition d'une référence de temps universelle indépendante à partir des pulsars. Nous collaborons désormais pleinement, dans le but de combiner et d'analyser conjointement nos données les plus récentes. En particulier, nous avons convenu de coordonner la publication de trois séries de résultats indépendants concernant les premières preuves de la détection d'un signal d'ondes gravitationnelles, qui seront dévoilées le même jour, le 29 juin 2023. A cette occasion, l'IPTA a mis en place un comité d'experts indépendants (scientifiques de renommée mondiale, pour la plupart extérieurs aux PTA) pour avoir un regard critique sur l'ensemble du processus d'analyse des données et s'assurer que les résultats et les interprétations sont légitimes. L'IPTA a également mis en place un comité de liaison composé de quelques membres de chaque PTA afin de suivre en temps réel l'évolution de l'analyse par chaque collaboration. La prochaine étape consistera à confirmer ces résultats et, espérons-le, à les améliorer d'ici un an en utilisant l'ensemble des données mondiales de l'IPTA, ce qui permettra pour la première fois une caractérisation et une interprétation détaillées du signal.

La contribution des équipes "locales"

La contribution de la France est basée sur l'utilisation intensive du grand radiotélescope décimétrique de Nançay (NRT) depuis 2004, et sur des développements instrumentaux réguliers qui ont permis au groupe français d'atteindre des précisions de mesure temporelles de l'ordre de 10 nanosecondes. L'instrument est presque entièrement dédié à l'étude des pulsars, avec 2500 heures de temps de télescope par an consacrées au programme de surveillance EPTA. Sa contribution représente près de 70% des données de la collaboration européenne. Il est financé par l'Observatoire de Paris, le CNRS-INSU et l'Université d'Orléans, et bénéficie d'un soutien important de la Région Centre Val de Loire à travers des fonds CPER et FEDER. Le projet a également nécessité une utilisation intensive du centre de calcul CC-IN2P3 pour l'exécution de l'analyse gravitationnelle (avec par exemple 2,9 millions d'heures de calcul CPU depuis 2021). Les quatre laboratoires de recherche impliqués sont le LPC2E et l'ORN, qui accueillent les radioastronomes et les experts de la chronométrie des pulsars, l'APC et le DPHP/CEA, où se trouvent tout le savoir-faire et l'expertise en matière d'analyse statistique et d'interprétation du signal gravitationnel. Le projet scientifique est soutenu depuis des années, conjointement par le Programme National Galaxies et Cosmologie (PNCG) et le Programme National Hautes Énergie (PNHE) du CNRS, ainsi que sur la période 2019-2024 par l'Agence Nationale de la Recherche (PTA-France, ANR-18-CE31-0015), par le labex First-TF (2019-2020) et le programme DIM-ACAV+ de la Région Île de France (2018-2021). Ce projet a également donné lieu à

sept thèses de doctorat et à trois contrats post-doctoraux au cours des 15 dernières années.

Participants français :

Stanislav Babak, Directeur de Recherche, CNRS-IN2P3/APC,

président du comité de pilotage de l'IPTA (mandat 2023)

Gilles Theureau, Astronome Observatoire de Paris/LUTh-ORN-LPC2E,

membre du comité de pilotage de l'EPTA (depuis 2006)

Ismaël Cognard, Directeur de Recherche, CNRS-INSU/LPC2E-ORN

Jean-Mathias Griessmeier, Astronome Adjoint, OSUC/LPC2E-ORN

Lucas Guillemot, Astronome Adjoint, OSUC/LPC2E-ORN

Antoine Petiteau, Chercheur, CEA/IRFU/DPhP

Anaïs Berthereau (engineer at THALES, ex-PhD LPC2E)

Aurélien Chalumeau (post-doc Univ Milano-Bicocca, ex-PhD APC/LPC2E)

Siyuan Chen (post-doc Univ Beijing, ex-post-doc ORN-LPC2E)

Mikel Falxa (post-doc LPC2E, ex-PhD APC)

Hippolyte Quelquejay (PhD APC)

Laboratoires français

Observatoire Radioastronomique de Nançay (ORN), Observatoire de Paris, Nançay

Laboratoire de physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPC2E), CNRS, Orléans

Laboratoire Astroparticules et Cosmologie (APC), CNRS, Paris

Département de Physique des Particules (DPhP), CEA, Saclay

Les résultats de l'EPTA :

Les résultats EPTA sont répartis en trois articles clés publiés simultanément dans le journal européen *Astronomy and Astrophysics*, complétés par trois autres articles liés à l'interprétation du signal, qui ont été soumis au journal un peu plus tard mais qui apparaîtront à la même date sur la plateforme de preprint arXiv. Les trois premiers articles font partie de l'accord formel IPTA, et des travaux similaires sont rendus publics le même jour par les consortiums NANOGrav et PPTA. Nous soulignons qu'afin d'associer pleinement nos collègues indiens et japonais de l'InPTA aux résultats communs, l'EPTA a proposé de combiner les ensembles de données issus des deux collaborations, de partager l'analyse et de signer ainsi les articles conjointement, à l'exception de la publication des données elles-mêmes qui a été effectuée séparément par l'EPTA et l'InPTA.

Le premier article intitulé "The second data release from the European Timing Array : I the dataset" présente les données chronométriques de 25 pulsars millisecondes acquises au cours des 24,5 dernières années avec les cinq radiotélescopes européens. Cet ensemble particulier de pulsars a été soigneusement choisi afin de maximiser la sensibilité de corrélation spatiale du réseau. Cet article présente les nouvelles mesures des propriétés physiques de ces pulsars et de leur étoile compagnon, telles que la mise à jour de leur parallaxe annuelle et de leur distance, de leur vitesse transverse, de la masse des pulsars binaires et de termes relativistes subtils tels que la variation séculaire de la période orbitale ou le retard Shapiro (c'est-à-dire le temps de trajet plus long de la lumière à travers le puits de potentiel gravitationnel du compagnon). Cette analyse fournit ce que l'on appelle le modèle "chronométrique" ou "de rotation" de chaque pulsar individuel, sur lequel toutes les analyses ultérieures seront basées. Les spécificités du jeu de données européen-indien sont en particulier : (i) la cadence d'observation élevée qui permet d'atteindre 3 micro-Hz en fréquence gravitationnelle et d'être particulièrement sensible aux sources uniques d'ondes gravitationnelles, (ii) la très longue période d'acquisition de données de 24,5 ans qui permet d'atteindre des fréquences aussi basses que 1,2 nHz, un domaine où le bruit de fond stochastique gravitationnel provenant de l'entière population des sources est supposé être le plus élevé ; (iii) la disponibilité de mesures radio multi-fréquences de 300 MHz à 3,5 GHz, permettant une caractérisation précise de la dispersion du signal ; et (iv) la disponibilité de nombreuses mesures multi-télescopes, permettant de suivre très efficacement tout systématisme d'origine instrumentale.

Le second article intitulé " The second data release from the European Timing Array : II Customised Pulsar Noise Models for Spatially Correlated Gravitational Waves " retrace l'analyse chronométrique de second niveau, où l'on identifie les composantes de bruit à long terme qui agissent comme des avant-plans perturbateurs vis-à-vis de la recherche ultérieure du signal gravitationnel. Pour chaque pulsar, l'objectif est de caractériser et de séparer les différentes composantes de bruit parasite : d'une part celles dues à des perturbations intrinsèques de la rotation du pulsar, et d'autre part celles liées aux variations de la dispersion et/ou à des changements dans la propagation du signal radio à travers le milieu interstellaire. On doit enfin identifier tout effet systématique d'origine instrumentale en comparant les mesures effectuées au moyen des six radiotélescopes différents. La collaboration EPTA/InPTA a produit un modèle de bruit "personnalisé " très précis, afin

d'éviter toute fuite du bruit intrinsèque de chaque pulsar vers le signal d'onde gravitationnelle, qui lui est commun à tous les pulsars du réseau. La robustesse de la caractérisation de ces bruits perturbateurs a été vérifiée par deux analyses indépendantes et validée par la confrontation inter-télescope. Pour le sous-ensemble des 10 pulsars les plus affectés par la dispersion et la diffusion, les effets dûs au milieu interstellaire ont été particulièrement bien contraints, grâce aux données basse fréquence de l'InPTA GMRT dans la bande 300-500 MHz qui sont disponibles pour les 3,5 dernières années (2018-2021).

Le troisième article intitulé " The second data release from the European Timing Array : III Search for gravitational wave signals " est le point culminant de la série. L'analyse conjointe des jeux de données EPTA+InPTA y révèle la présence d'un signal présentant les principales propriétés du signal gravitationnel recherché : une distribution spectrale d'énergie cohérente avec la loi de puissance attendue de la population de binaires de trous noirs supermassifs en orbite circulaire et une amplitude de $\sim 2.5 \cdot 10^{-15}$ à la fréquence de référence de 1 an^{-1} (soit $\sim 30 \text{ nHz}$). De plus, les corrélations spatiales observées entre les pulsars sont en bon accord avec la courbe prédite par Hellings et Downs (1983), attestant de sa nature d'onde gravitationnelle. Ces résultats vont dans la bonne direction et indiquent que le bruit commun découvert précédemment en 2021 pourrait en effet être une onde gravitationnelle dans la bande des nHz, dont on voit l'effet sur le long terme. Cependant sa significativité statistique est encore trop faible (en d'autres termes, la possibilité d'une fausse détection est non négligeable) pour prétendre à une détection fiable. En langage scientifique standard, nous mesurons aujourd'hui un signal avec un niveau de confiance de "3 sigmas", alors que le seuil de détection communément accepté dans la communauté scientifique se situe autour de "5 sigmas". Nous aurons besoin d'une combinaison de toutes les données des PTA et probablement d'une période d'observation plus longue pour confirmer la détection, c'est pourquoi nous la qualifions de "détection d'ondes gravitationnelles à petits pas", commençant par la détection du signal spectral commun par tous les PTA, suivi des premières preuves de sa nature d'onde gravitationnelle (état actuel) et enfin s'achevant sur la confirmation de la détection avec une significativité statistique élevée (ensembles de données et analyses futures).

Aujourd'hui, la qualification même du signal reste ambiguë. S'il s'agit bien d'une onde gravitationnelle, nous ne pouvons pas encore confirmer la nature de sa source avec la sensibilité actuelle : elle pourrait avoir été produite soit par un couple de trous noirs supermassifs particulièrement massif et proche, soit par l'ensemble de la population de trous noirs binaires supermassifs dans l'univers local, et elle pourrait même être le résultat de processus violents dans l'univers primitif. En outre, nous sommes également perplexes quant à la manière dont le signal prend forme au cours des presque 25 ans de données observées, étant apparemment plus faible dans le passé. Une analyse plus approfondie pourrait permettre de déterminer s'il s'agit d'un phénomène véritablement non-stationnaire ou au contraire qui résulte d'un bilan de bruit incomplet pour les données les plus anciennes disponibles. Nous espérons que la combinaison de toutes les données IPTA nous aidera à résoudre cette énigme et apportera de nouvelles confirmations sur la nature du signal observé.

Articles complémentaires et implications astrophysiques/cosmologiques préliminaires :

L'interprétation du signal comme l'émission de la population de trous noirs binaires super massifs nous permet de mettre des contraintes sur l'histoire de la formation de ces objets. L'amplitude et la forme de la distribution spectrale d'énergie, en particulier dans son extension côté basses fréquences, sont en effet étroitement liées à la masse moyenne des trous noirs centraux par rapport à leur galaxie hôte, à la fraction de paires de galaxies formées, au taux de fusion des galaxies, et au niveau d'interaction du trou noir binaire avec son environnement proche (le nuage d'étoiles central et le gaz local). Ce résultat est cohérent avec la découverte récente de trous noirs "surmassifs", mais avec ces nouvelles contraintes, et dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas facile de construire un modèle d'évolution cosmique qui soit commun au trou noir et à sa galaxie hôte.

Le cas d'une source unique et continue d'ondes gravitationnelles a été étudié en profondeur en tant que cible prioritaire, en particulier grâce à la cadence élevée des séries temporelles de l'EPTA. Dans l'article complémentaire dirigé par l'un des jeunes chercheurs de la collaboration, Mikel Falxa, il est montré que le signal observé pourrait également être expliqué par un couple unique de trous noirs supermassifs tournant en spirale l'un autour de l'autre et émettant un signal d'ondes gravitationnelles continu. Les simulations confirment que, compte tenu de la sensibilité actuelle et de l'irrégularité des données observées, il est plausible d'avoir une telle source unique à basses fréquences, laquelle produirait également les corrélations spatiales Hellings-Downs. L'analyse suggère l'existence d'une source binaire avec une période orbitale de 13,8 ans, qui est encore mal localisée dans le ciel.

Dans la section de l'article d'interprétation dirigée par le doctorant Hippolyte Quelquejay-Leclere (APC, France), un réseau de boucles de cordes cosmiques est proposé comme alternative pour expliquer le signal que nous observons. Les cordes cosmiques sont des défauts topologiques qui pourraient avoir émergé des transitions de phase de brisure de symétrie dans l'univers primitif. Ce sont des objets quasi unidimensionnels qui se caractérisent en outre par leur tension. Il arrive que ces cordes cosmiques forment des boucles, et que ces boucles oscillent et se désintègrent en libérant des ondes gravitationnelles, produisant ainsi un fond de rayonnement gravitationnel comme le fait la population de trous noirs binaires massifs. Deux modèles de cordes cosmiques ont été testés avec les données de l'EPTA et il apparaît qu'un des modèles explique bien le signal observé. De plus, dans l'hypothèse où ce signal est bien de nature gravitationnelle, l'analyse impose des limites supérieures strictes à la tension des cordes, qui sont inférieures de deux ordres de grandeur aux divers résultats précédents, issus d'expérience de mesure du fond diffus cosmologique micro-ondes (CMB) ou des mesures en ondes gravitationnelles hautes fréquences de la collaboration LIGO-Virgo-Kagra. Une autre explication plausible aurait son origine dans un univers encore plus ancien, dans la cadre de la théorie des interactions fortes, appelée chromodynamique quantique (QCD), qui prévoit également des transitions de phases produisant un fond d'ondes gravitationnelles cosmologique.