

par des spécialistes de mécanique céleste, modèle qui comporte lui-même des incertitudes. Il faut ensuite considérer la position instantanée du radiotélescope par rapport au centre de la Terre, des éventuels délais induits par le trajet optique dans le télescope, des éventuelles imperfections du récepteur, puis des délais induits par le passage du signal électrique dans les câbles.

On compare alors la forme temporelle de l'impulsion reçue à un modèle moyen de l'impulsion que l'on connaît *a priori* et on relie cette mesure à une horloge de référence. Dans le cas du radiotélescope de Nançay, il s'agit d'une horloge atomique au rubidium, qui est elle-même asservie, *via* un satellite GPS, à la référence de temps atomique international produite par l'observatoire de Paris. Avec un tel système, cette référence de temps est perturbée par un double passage à travers l'ionosphère, puisque l'information transite par un satellite pour relier temporellement Paris et Nançay.

Cette longue énumération semble insurmontable. Pourtant, grâce à un effort constant de modélisation des bruits et d'amélioration des instruments, nous avons atteint un niveau de précision suffisant pour exploiter un réseau

de pulsars afin de traquer des ondes gravitationnelles (voir la figure ci-dessous). En prenant en compte tous les effets mentionnés, nous sommes capables de dater un signal avec une incertitude de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes. Cette variabilité dépend de la saison et du moment de la journée, car l'activité et les perturbations de l'ionosphère sont liées à l'incidence du rayonnement ultraviolet venant du Soleil.

UN SIGNAL DANS LE CHAOS

Au milieu de tout ce chaos de bruits et variations multiples se cache la signature de l'émission gravitationnelle que l'on cherche à mesurer. Celle-ci correspond à des oscillations entre retards et avances dans les signaux des pulsars d'au mieux quelques dizaines de nanosecondes. La détection du signal gravitationnel est possible grâce au fait que la plupart des autres sources de perturbations sont spécifiques à chaque pulsar, ou bien à un radiotélescope particulier, alors que le « bruit » gravitationnel est, lui, commun aux différents pulsars avec une signature attendue bien caractéristique. En corrélant les signaux des pulsars du réseau, il est possible d'exhiber cette

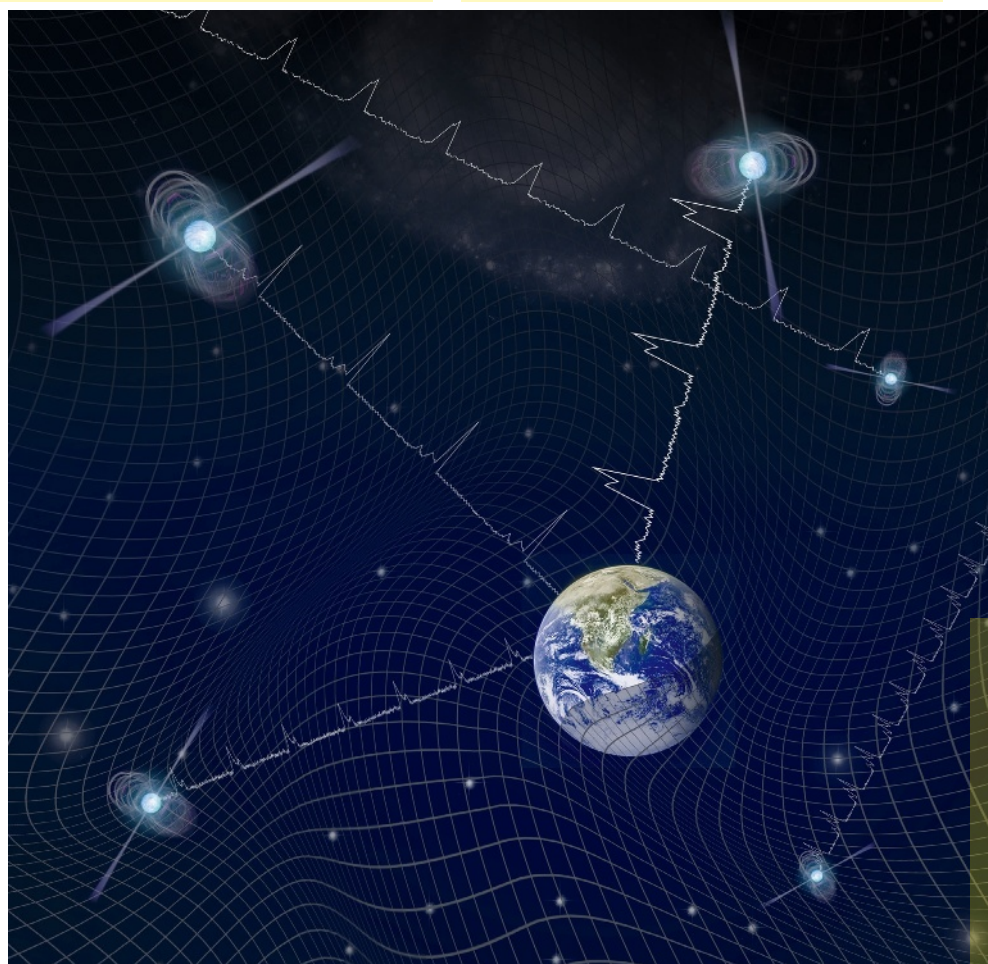
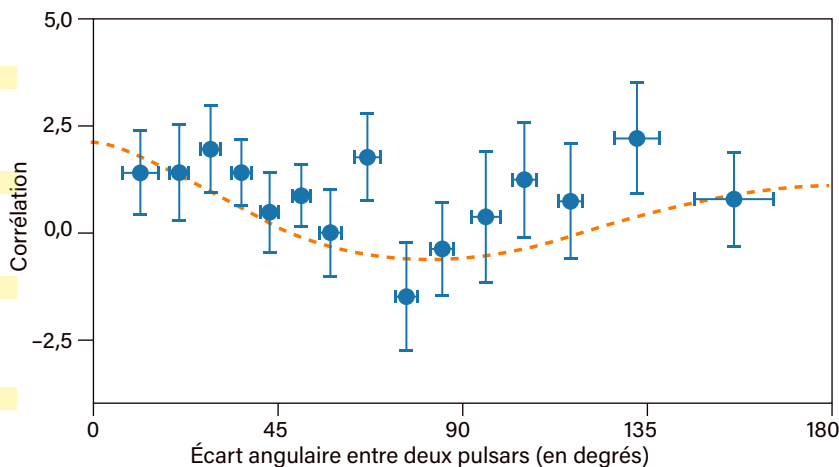


Schéma de principe d'un système de détection à base de réseau de pulsars. Les signaux des pulsars traversent un espace-temps courbé et arrivent sur Terre avec une grande régularité. Lors du passage d'une onde gravitationnelle, l'espace-temps est perturbé et induit une oscillation entre avance et retard pour le temps d'arrivée des signaux de chaque pulsar. Pour mettre en évidence cette perturbation, l'idée consiste à examiner les corrélations entre les signaux des différents pulsars du réseau.



signature. Notons cependant que le bruit des éphémérides planétaires et celui de l'horloge de la référence de temps internationale sont eux aussi partagés par tous les signaux que nous mesurons. Mais leur signature spatiale est différente du signal gravitationnel, et l'on sait *a priori* les séparer.

Qu'entend-on exactement par «signal gravitationnel commun» à tous les pulsars? Si l'on avait une source unique d'ondes gravitationnelles, c'est-à-dire un seul couple de trous noirs supermassifs, on verrait apparaître pour chaque pulsar une modulation sinusoïdale dans les mesures du temps d'arrivée des pulsations. Les variations apparaîtraient d'autant plus grandes que la direction du pulsar dans le ciel est proche, angulairement, de la direction de cette source. D'un pulsar à l'autre, l'empreinte du signal gravitationnel dépend donc à la fois de la direction de la source (le couple de trous noirs) et des directions des deux pulsars vus depuis la Terre.

Or en réalité, les signaux des pulsars ne sont pas perturbés par une source unique, mais par toute une population de trous noirs binaires répartis de façon isotrope dans le ciel, avec autant de modulations sinusoïdales différentes (c'est-à-dire autant de fréquences gravitationnelles différentes) qu'il y a de couples de trous noirs. Dès lors, chaque pulsar est soumis au cumul de toutes ces perturbations. Vis-à-vis de ce signal isotrope, seul l'écart angulaire entre les directions des deux pulsars du réseau fait une différence dans nos mesures.

En 1983, Ronald Hellings et George Downs, de Caltech (l'institut de technologie de Californie), ont calculé pour la première fois la forme spécifique de la signature spatiale du signal gravitationnel en fonction de l'écart angulaire entre deux pulsars. C'est la «courbe de Hellings et Downs» (voir la figure ci-dessus). La reproduction de cette courbe à partir des données serait la preuve indiscutable de la détection d'une onde gravitationnelle grâce au réseau de pulsars.

Répartis de façon isotrope sur la voûte céleste, un grand nombre de couples de trous noirs supermassifs émettent des ondes gravitationnelles. Celles-ci perturbent les temps d'arrivée des signaux des pulsars en fonction de leurs positions relatives dans le ciel. Cela se traduit par une signature spatiale (axe vertical) qui dépend de l'écart angulaire (axe horizontal) entre les différents pulsars du réseau : la courbe de Hellings et Downs (courbe orange). Les points correspondent aux mesures de l'équipe NANOGrav avec douze ans et demi de données. Ils indiquent une tendance, mais ne permettent pas encore de franchir. Davantage de mesures sont nécessaires, mais la détection de la signature spatiale du signal sera la preuve ultime de la détection d'une onde gravitationnelle.

Comme nous l'avons dit, la population de trous noirs supermassifs qui forment des systèmes binaires au gré des épisodes de fusion entre galaxies est la source dominante des signaux auxquels sont sensibles les réseaux de pulsars. Ces trous noirs trônent au centre de la plupart des galaxies massives. Grâce à des études de dynamique galactique, leur existence ne fait plus aucun doute. L'exemple le plus notable est bien évidemment le cas de la Voie lactée. L'équipe de Reinhard Genzel, de l'institut Max-Planck de physique extraterrestre, près de Munich, et celle d'Andrea Ghez, de l'université de Californie à Los Angeles, ont commencé à suivre le mouvement des étoiles proches du centre galactique à partir du début des années 1990. Elles ont ainsi mis en évidence la présence du trou noir supermassif Sagittarius A*, d'environ quatre millions de masses solaires.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, avec un Univers dominé par de la matière noire froide et la constante cosmologique (responsable de l'accélération de l'expansion cosmique), les galaxies se forment par étapes. D'abord, des halos de matière noire s'agrègent et entraînent avec eux la matière ordinaire sous la forme d'un gaz froid qui se condense en leur cœur pour constituer les premières galaxies et les premières étoiles. Les plus petits halos de matière noire chutent vers les plus massifs, et les galaxies des premiers deviennent des satellites de leur nouvel hôte, avant de fusionner avec les galaxies les plus massives. Dans ce contexte, les collisions de galaxies conduisent dans la plupart des cas à la coalescence de leurs trous noirs centraux. Ainsi, de nombreux trous noirs supermassifs binaires se sont formés au cours de l'histoire cosmique (voir la figure page 44).

Lorsqu'un tel système binaire se constitue, ses membres devraient se rapprocher si lentement que la fusion n'opérerait pas en un temps inférieur à l'âge de l'Univers. De nombreux phénomènes contribuent à accélérer le processus : friction dynamique avec le gaz et les étoiles, interactions à trois corps avec une



Il y aurait une fusion tous les 100000 ans dans un volume comparable à celui du Groupe local

