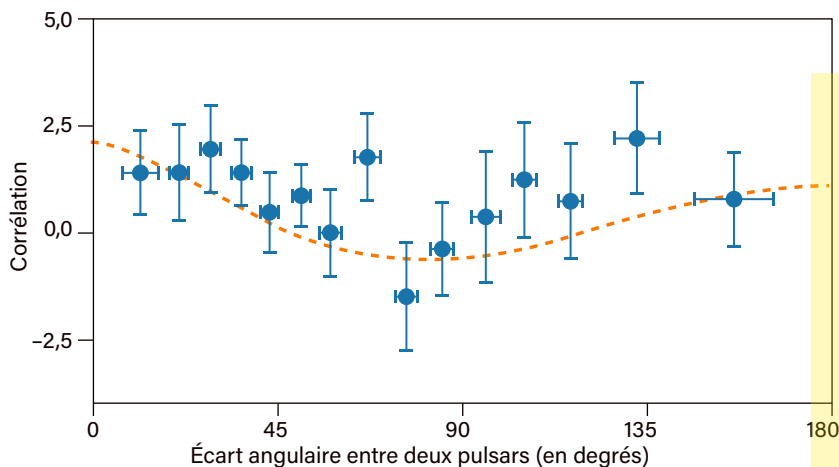




signature. Notons cependant que le bruit des éphémérides planétaires et celui de l'horloge de la référence de temps internationale sont eux aussi partagés par tous les signaux que nous mesurons. Mais leur signature spatiale est différente du signal gravitationnel, et l'on sait *a priori* les séparer.

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

