

Les 1001 utilisations d'une horloge parfaite

Yaël Nazé

Fig. 1 : Un pulsar cannibale en train de dévorer son compagnon stellaire – © NASA

Les pulsars sont bien connus pour leur régularité. Ils émettent de la lumière dans un faisceau étroit, qui balaie l'espace quand ils tournent. Si la Terre se trouve dans la bonne direction, elle voit alors un point du ciel clignoter régulièrement – un phare céleste qui est en fait une horloge quasi parfaite.

Incroyable mais vrai!

Vous ne me croyez pas ? Prenons PSR J0437-4715. La période de ce pulsar au nom poétique (!) a été mesurée : elle vaut 5,757451831072007ms à 0,0000000000000008 près ! Soit une précision de 8 attosecondes, ou une précision relative d'un milliardième de milliardième ! S'il s'agissait de mesurer une taille, cela équivaldrait à mesurer le diamètre de la Terre à 20 nanomètres près, soit 5000 fois plus fin que l'épaisseur d'un cheveu !

Évidemment, une précision aussi extraordinaire ne vient pas en un jour... Tout d'abord, il faut bien choisir son pulsar. Les jeunes pulsars, tout juste nés d'une explosion de supernova, sont plutôt turbulents et instables : leur période change parfois brusquement suite

à des réajustements internes... Pour avoir de la précision, il vaut mieux se tourner vers les vénérables anciens, mais pas n'importe lesquels : les vieux *rajeunis*. Il s'agit de pulsars ayant un compagnon stellaire, qu'ils cannibalisent. Le transfert de matière provoque une accélération de la rotation du pulsar, jusqu'à atteindre des rotations prenant seulement quelques millisecondes. Ces pulsars sont donc dits *rajeunis* car la rotation devrait ralentir naturellement avec l'âge, or ces pulsars-ci sont très rapides. Ils sont très stables, même lorsqu'on les observe sur des décennies : ils peuvent donc servir de repère temporel.

Après avoir choisi sa cible, il faut l'observer, l'observer et encore l'observer, avec la meilleure précision possible. Après avoir enregistré des milliers de clignotements ou « pulses », on peut déterminer leur profil moyen, qui s'avère assez stable pour un pulsar donné. On choisit alors un événement particulier comme repère, par exemple l'augmentation brusque du signal marquant le démarrage du « pulse ». On mesure alors, grâce à des horloges atomiques, le temps d'arrivée au télescope

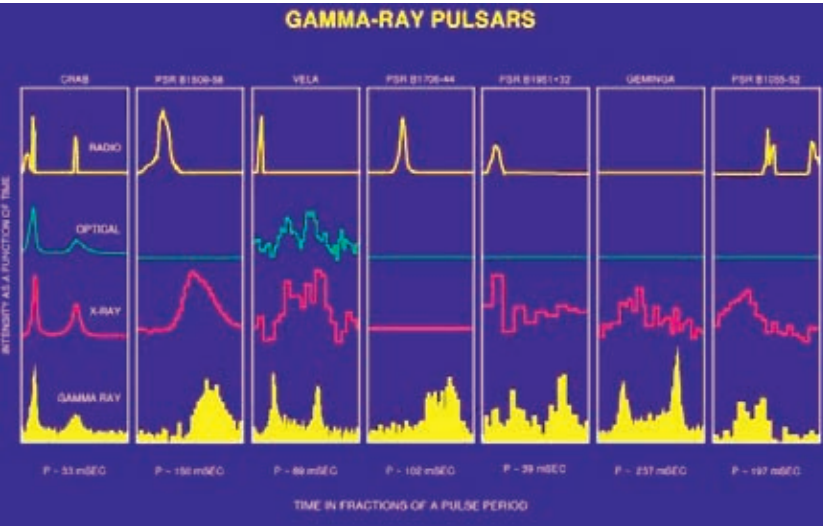


Fig. 2 :
Exemples de
« pulse ».
© EVASAS

Problème supplémentaire : pulsar et Système solaire tournent dans la Galaxie, mais pas au même rythme. Du coup, la distance entre eux change, provoquant un décalage progressif des

de ces événements lors de chaque campagne d'observation. Pour un événement individuel, la précision de mesure peut valoir jusqu'à une microseconde – cela semble bien éloigné de l'exactitude temporelle mentionnée plus haut, mais celle-là s'obtient en faisant la moyenne d'un énorme nombre d'observations réparties sur des décennies, d'où le gain en précision.

Enfin, il faut corriger ces temps d'arrivée car, malheureusement, il se passe pas mal de choses entre l'émission de la lumière par le pulsar et l'enregistrement sur Terre. Par exemple, le signal radio du pulsar traverse le milieu interstellaire ionisé, la bulle de vent solaire dans lequel se trouve notre planète, et les couches atmosphériques notamment l'ionosphère. Tout cela provoque un certain délai, qu'il faut éliminer. Il y a aussi les problèmes basement pratiques : les horloges atomiques sont imparfaites, même si leur précision atteint au moins la femtoseconde. Du coup, les mesures venant de différents observatoires (ce qui est inévitable car il est impossible d'observer en continu un objet céleste depuis un seul endroit sur Terre) seront un peu décalées les unes par rapport aux autres, et celles provenant du même observatoire mais pas enregistrées le même jour peuvent aussi être légèrement décalées...

temps d'arrivée des « pulses ». Pire encore : la Terre n'est pas vraiment le centre du Système solaire ! Du coup, on se trouve parfois devant ce centre, vu depuis le pulsar : le trajet est alors plus court que six mois plus tard, lorsque la Terre se trouve dans la situation inverse. Ce changement continu, dû au mouvement de la Terre est embêtant, et l'on préfère naturellement se positionner dans un repère plus stable. Toutefois, ce petit changement peut paraître négligeable, au vu des distances en jeu. Mais s'il n'y a que 150 millions de km entre le centre du Système solaire et nous, contre des milliers voire des millions de milliards entre le Système solaire et les pulsars, ces 150 petits millions de km correspondent à un délai de... huit minutes pour les signaux radio ! Huit minutes en plus ou en moins, lorsqu'on cherche à atteindre une précision de l'ordre de la femtoseconde, c'est évidemment énorme. Il faut donc corriger soigneusement les temps d'arrivée de notre mouvement dans le Système solaire, pour nous remettre dans un repère lié à son centre. Enfin, le signal radio du pulsar se baladant dans notre Système solaire se déplace dans un espace-temps courbé par les masses des planètes et du Soleil. Cela provoque un délai supplémentaire, appelé délai de Shapiro.

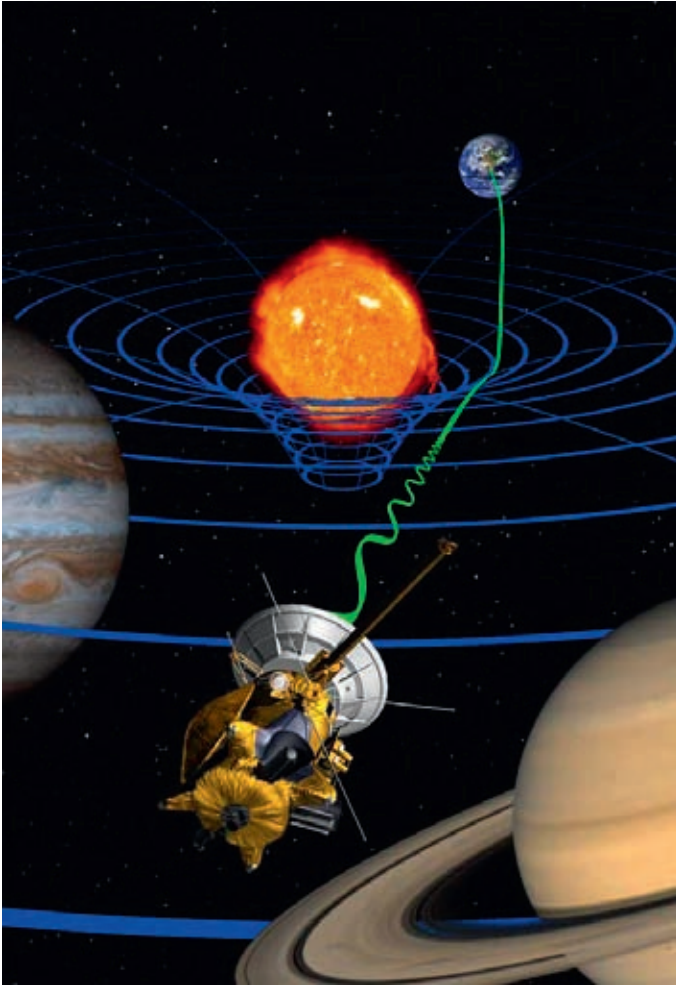


Fig. 3 : La position de la Terre, dans son trajet autour du Soleil, par rapport au pulsar provoque un délai supplémentaire. Les signaux qui passent près des masses de notre Système solaire subissent un retard. Cet effet relativiste, appelé délai de Shapiro, est bien connu et a été mesuré de nombreuses fois, comme ici avec la sonde Cassini. © NASA

fait, on peut même en profiter pour améliorer la connaissance des coordonnées du pulsar ou... des éphémérides du Système solaire ! En effet, si la correction de « remise au centre » est mal faite, c'est qu'on a mal déterminé le centre du Système solaire. Sa position dépend des masses en jeu : celle du Soleil, bien sûr, mais aussi celles des planètes. En analysant les signaux de pulsars, on peut ainsi déterminer la masse des planètes à un dix-milliardième de masse solaire (soit un trente-millième de masse terrestre) près – c'est quatre fois mieux qu'en analysant les déviations de trajectoires des sondes Pioneer ou Voyager !

Ça sert à quoi ?

On possède alors des mesures précises des temps d'arrivée de chaque pulse, et après ? Eh, bien, après, il reste les choses intéressantes...

Par exemple : il arrive que le « pulse » arrive tantôt un peu trop tôt, tantôt un peu trop tard par rapport à ce qui est prévu. Pourquoi ? Tout simplement parce que le signal n'est pas émis depuis un point fixe : le pulsar est en fait en orbite autour du centre de son système. Ce système peut être composé du pulsar et d'une autre étoile à neutrons, ou du pulsar et d'une

Toutes ces corrections, cela semble insurmontable. Pas de panique, toutefois : ces délais possèdent des signatures typiques, différentes les unes des autres. Même si la valeur de ces corrections n'est pas connue a priori, on peut la déterminer simplement en regardant les données ! En effet, si l'on se trompe de valeur, les temps d'arrivée mal corrigés vont subitement se mettre à osciller au fil du temps, à augmenter soudainement ou à adopter un comportement bizarre mais facilement attribuable à l'une ou l'autre cause évoquée ci-dessus. En

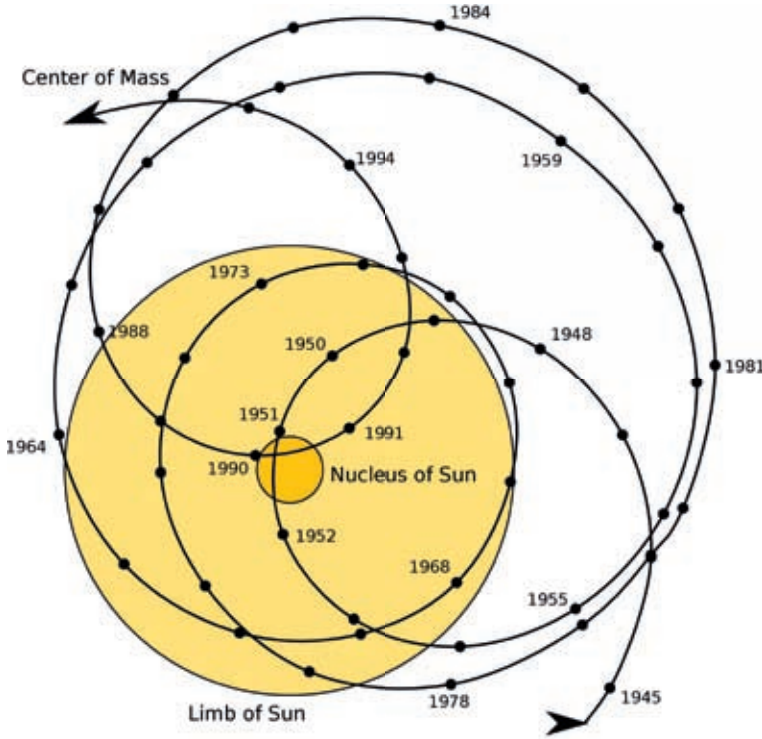


Fig 4 : Le (bary) centre de notre Système solaire n'est pas le centre du Soleil, à cause de la présence des planètes autour de lui, et ce centre change de position avec le temps en fonction de la disposition planétaire.

d'ailleurs le Nobel de physique en 1993 à ses deux « pères », Hulse et Taylor!

Et ce n'est pas fini, une nouvelle révolution se profile à l'horizon. Divers projets s'échinent à tenter de mesurer *directement* les ondes gravitationnelles (la détection mention-

née ci-dessus étant évidemment indirecte, puisqu'on n'a pas mesuré les ondes elles-mêmes). Les projets LIGO, VIRGO, ou LISA n'ont pas encore touché au but, malgré des années de travaux préparatoires. Leur machinerie complexe pourrait se faire doubler par une idée élégante : observer un ensemble de pulsars !

L'idée, proposée fin des années 1970, est simple. Elle ressemble au départ aux projets « classiques » : observer la déformation d'un « bras » de longueur donnée, à cause du passage d'une onde gravitationnelle. Cependant, cette fois-ci, le « bras » en question ne relie pas deux satellites (comme pour LISA) ou deux stations terrestres peu éloignées (comme pour LIGO ou VIRGO) – non, cette fois, on

exoplanète ! C'est d'ailleurs grâce à cette technique que l'on repéra les trois premières exoplanètes, en 1992 autour de PSR B1257+12 (et 14 autres depuis, voir exoplanet.eu) : la plus petite avait une masse de deux fois la Lune, et les deux autres de quatre fois la Terre – elles figurent, aujourd'hui encore, parmi les plus petites exoplanètes connues. Quant à la première observation d'un pulsar accompagné d'un compagnon étoile à neutrons, elle fut tout aussi révolutionnaire ! En effet, on remarqua rapidement que les deux objets se rapprochaient l'un de l'autre – l'orbite se resserrait donc petit à petit. Ce phénomène a priori étrange marque tout simplement une perte d'énergie du système : ce phénomène, prédit par la Relativité Générale, est dû à l'émission d'ondes gravitationnelles par le système, et le taux théorique correspond parfaitement au taux observé. Cette exceptionnelle découverte valut

1 À noter que le délai de Shapiro se produit ici aussi, cette fois pas à cause du Soleil ou d'une planète de notre Système solaire, mais à cause du champ gravitationnel du compagnon.

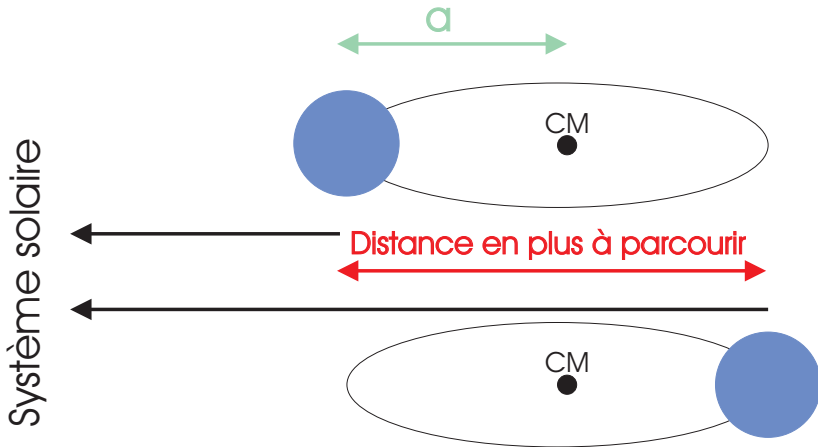


Fig 5 : Méthode du délai temporel : les pulses arrivent trop tôt quand le pulsar est plus près de la Terre que son compagnon, et trop tard dans le cas contraire. Ce délai (avance puis retard en alternance) est directement lié à la taille de l'orbite, via la vitesse de la lumière ; l'orbite dépend, elle, de la période orbitale (facilement mesurable, puisque c'est le rythme des cycles avance-retard) et de la masse des objets en présence.

travaille sur une échelle céleste : les extrémités du bras sont le Système solaire, d'une part, et le pulsar, de l'autre ! L'observation est a priori peu complexe : si les « pulses » n'arrivent pas à l'heure, c'est tout simplement que l'espace-temps a subi une modification, due au passage d'une onde gravitationnelle. Évidemment, si l'on n'observe qu'un seul pulsar, on pourrait confondre ce signal avec l'une ou l'autre des perturbations à corriger. Mais si l'on observe plusieurs pulsars, alors les problèmes disparaissent : les corrections des problèmes d'horloge seront les mêmes quel que soit le pulsar, par exemple, alors que le signal gravitationnel dépendra bien sûr de la direction dans laquelle il a été émis !

Plusieurs projets ont ainsi vu le jour : EPTA (*European Pulse Timing Array*, utilise les radiotélescopes de Nançay, d'Effelsberg, de Westerbork, de Jodrell Bank et de Sardaigne), PPTA (*Parkes Pulsar Timing Array*, utilise, comme son nom l'indique, le radiotélescope de Parkes), et NanoGrav (utilise les radiotélescopes de Green Bank et d'Arecibo). Les trois projets collaborent au sein de l'IPTA (*International Pulsar Timing Array*). Ils obser-

vent chacun une vingtaine de pulsars, soit une quarantaine de pulsars en tout (certains étant observés par plusieurs équipes). Le rythme est soutenu : une observation toutes les trois semaines environ pendant au moins cinq ans. Cela demande donc pas mal de temps : ainsi, 10% des observations d'Arecibo et 20% de celles de Green Bank sont consacrées au projet NanoGrav...

Le résultat vaut évidemment la chandelle. Les espoirs ne sont d'ailleurs pas vains, puisque les observations actuelles permettent déjà d'exclure la présence d'un couple de

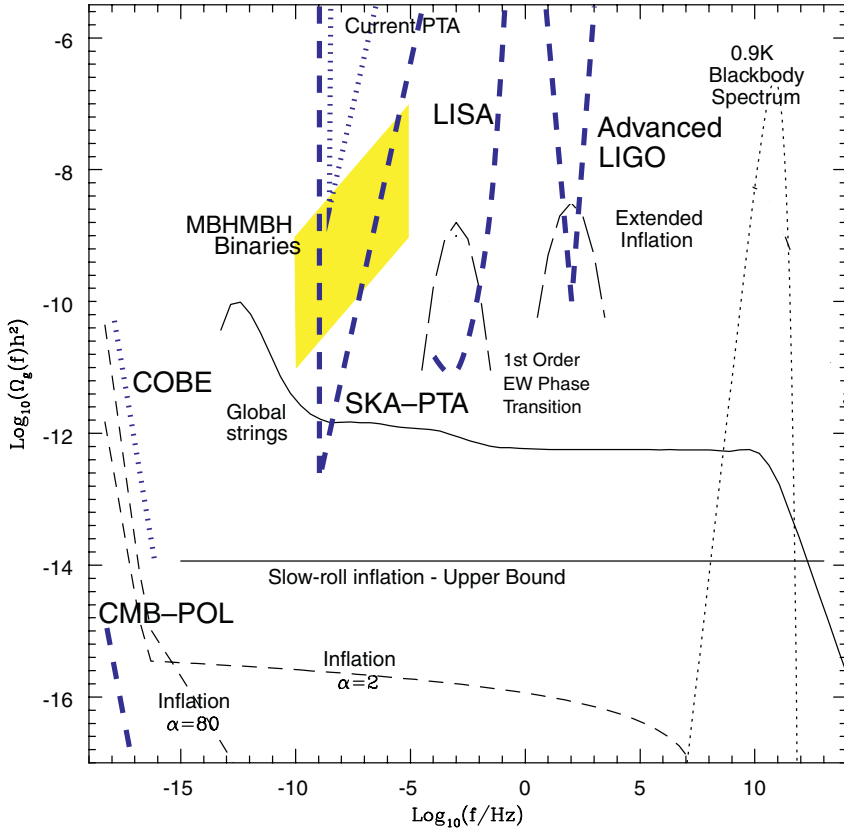


Fig. 6 : la sensibilité des PTA

trous noirs supermassifs jumeaux au centre de notre Galaxie, et de rejeter la proposition d'un système similaire dans la galaxie 3C66B. Le but avoué est de détecter bientôt les fusions lointaines de trous noirs supermassifs, ou le fond cosmologique d'ondes gravitationnelles, ou encore de contraindre certains théories de cordes cosmiques ou des modèles de supercordes. Et même s'ils espèrent bien leur faire de l'ombre, ces projets pulsarisés s'avèrent complémentaires des autres LISA/LIGO/VIRGO, car ils « tâtent » les ondes gravitationnelles de plus basses fréquences (du nanoHerz au microHerz).

Il ne reste donc qu'à... attendre. La patience constitue l'ingrédient principal de ces projets. La première étape, en cours, est d'améliorer les éphémérides de ces cibles – toutes ne sont pas (encore) aussi bien connues que le fameux PSR J0437-4715 cité plus haut. Une fois la précision atteinte, alors on pourra commencer à détecter ces ondes, s'il en passe une dans la bonne direction. Patience, on devrait avoir des résultats d'ici moins de dix ans !