

LES PULSARS MILLISECONDES

François Biraud

Directeur de recherches au CNRS
Observatoire de Paris-Meudon-Nançay

Avant de parler des pulsars millisecondes et des observations et mesures qu'on peut tirer de leurs étonnantes propriétés, il est sans doute opportun de rappeler quelques données de base concernant les pulsars en général.

Les signaux que nous recevons en radioastronomie sont des bruits informes car les rayonnements captés proviennent de sources qui émettent dans toutes les longueurs d'onde, à quelques exceptions près. La première est celle des sources de raies spectrales parfois assez fines, de quelques centaines de hertz (2 à 300), pour correspondre à des structures temporelles audibles. Une autre exception est celle des brouillages qui correspondent à des émissions terrestres et qu'il faut, bien sûr, éliminer de nos observations. La troisième est justement celle des pulsars qui émettent à toutes les longueurs d'onde sous forme d'impulsions périodiques particulières.

Leur découverte date de 1968. Une équipe de Cambridge, dirigée par A.Hewish, étudiait les scintillations des radiosources provoquées par l'inhomogénéité du plasma de la couronne solaire. Un membre de l'équipe, l'étudiante J.Bell remarqua une source qui scintillait même la nuit ; de plus les fluctuations se révélaient très régulières, des impulsions d'environ 50 millisecondes se répétant à une période voisine de la seconde. On interpréta d'abord ces signaux étonnants comme étant d'origine humaine. Puis on finit par reconnaître que ces sources étaient très extérieures au système solaire. Deux autres sources de même nature ayant été détectées, on leur donna le nom de pulsar (pour PULsating AStronomical Radiosource).

La découverte avait été faite en 1967. L'article l'annonçant a été publié en 1968. On découvrit ensuite beaucoup d'autres pulsars, on en connaît aujourd'hui plus de 500 dans le voisinage du Soleil ce qui n'est pas sans poser de question comme nous le verrons plus loin.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons dont l'existence avait été prévue par F.Zwicky et W.Baade dès 1934, qui pensaient qu'elles devaient se former dans les explosions de supernovae. On considère aujourd'hui qu'elles sont le terme de l'évolution d'étoiles dont les masses sont initialement comprises entre 8 et 15 masses solaires. Ces étoiles ont consommé leur hydrogène dans une première phase relativement rapide, de l'ordre de quelques millions d'années - alors que pour une étoile de masse solaire cette même phase est de l'ordre de dix milliards d'années. Dans une seconde phase, l'étoile consomme son hélium et l'évolution conduit enfin à l'éjection d'une vaste enveloppe : il reste un coeur très dense. Le sort de ce coeur

va dépendre de sa masse : pour une masse comprise entre 1,9 et 2,5 masses solaires, donc dans une marge assez étroite, le coeur s'effondre pour donner une étoile à neutrons qui pourra être un pulsar. Pour un coeur de masse inférieure à 1,9 masse solaire, il y aura éjection de l'ensemble ; pour une masse supérieure à 2,5 masses solaires, l'effondrement se poursuit jusqu'à formation d'un trou noir.

L'étoile à neutrons a donc la densité du noyau atomique et est essentiellement constituée de neutrons. Dans l'effondrement, l'étoile a conservé son moment cinétique. Sa période a été à l'origine de quelques dizaines de jours (27 jours dans le cas du Soleil) et décroît du fait de l'effondrement à quelques dizaines de millisecondes, soit une fréquence de quelques dizaines de hertz.

En même temps, il y a conservation du flux magnétique. Le champ magnétique de l'étoile passe ainsi, du fait de l'effondrement, d'un champ de l'ordre de 10^{-2} Tesla (c'est à dire la centaine de Gauss) à un champ de l'ordre de 10^8 Tesla (la centaine de millions de Gauss).

Voici donc un pulsar qui vient de naître : une étoile toute petite, d'un diamètre de l'ordre de la dizaine de kilomètres, tournant sur elle-même avec une période de quelques dizaines de millisecondes et un champ magnétique de l'ordre de 10^{12} Gauss. Cet astre va rayonner des ondes selon des modes encore mal compris (il y a bien quelques dizaines de théories pour l'expliquer dont la plupart sont probablement fausses). Au moins est-on d'accord sur le modèle suivant (fig.1) : l'étoile tourne autour d'un axe qui n'est pas, en général, celui du champ magnétique ; l'émission a lieu dans la direction du champ dans un cône plus ou moins creux. On voit que, dans ces conditions, toute étoile à neutrons ne sera pas nécessairement un pulsar. Elle le sera seulement si le système solaire est bien placé pour recevoir l'émission à chaque rotation.

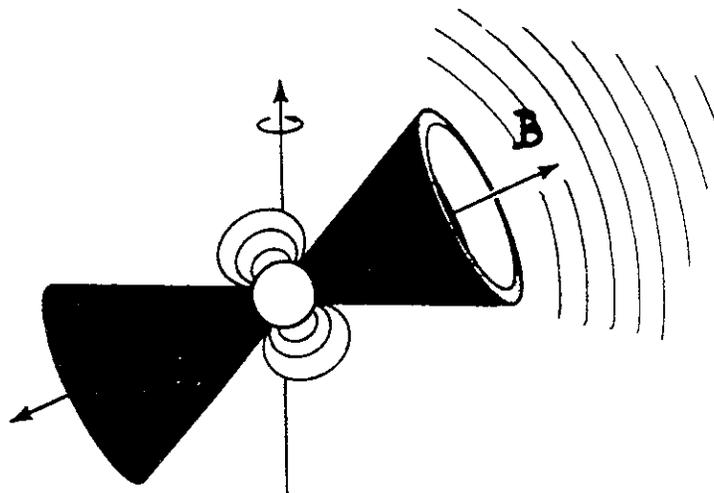


Fig. 1 - Schéma du processus d'émission d'un pulsar. Le rayonnement se produit le long d'un cône axé sur le champ magnétique, lequel est incliné sur l'axe de rotation.

De plus, le rapport cyclique, qui exprime le temps pendant lequel on perçoit l'émission relativement à la durée d'une révolution est de l'ordre de 3% de la période. Cela signifie qu'on ne perçoit l'émission que pendant le trentième du temps d'une période ou encore que la surface d'émission couvre un trentième de la surface de l'étoile. En ajoutant les deux surfaces découpées par les deux nappes du cône, il en résulte qu'une étoile à neutrons sur quinze est placée pour être géométriquement bien orientée par rapport à nous. On connaît aujourd'hui quelques 500 pulsars qui sont dans une région proche du Soleil, au plus à 15 kiloparsecs ; il y aurait donc 7500 étoiles à neutrons dans ce petit coin de Galaxie.

Cette évaluation pose problème. L'hypothèse sur la formation des étoiles à neutrons par effondrement que nous avons résumée ci-dessus ne suffit pas à expliquer cette relative abondance de cette catégorie d'étoile dans notre voisinage, d'autant que nous avons l'idée que la durée d'activité d'un pulsar est relativement brève. Conclusion : ou bien on se trompe sur le processus de formation des pulsars ou bien sur la durée de leur activité.

Une fois formé, le pulsar émet un rayonnement complexe, lumière, radio et même rayons gamma, toute l'énergie émise étant empruntée à l'énergie cinétique de rotation de l'astre. Cette rotation est donc freinée, la période de rotation croît. Pour le pulsar du Crabe qui provient de la supernova de l'an 1054, nous avons une période de 30 millisecondes, typique d'un pulsar jeune ; le record observé est une période de 4 secondes, typique d'un pulsar vieux.

Signalons aussi l'existence de pulsars doubles ; on en connaît actuellement 17 ce qui est peu dans la quantité des 500 pulsars connus mais ce sont des objets spécialement intéressants dont nous aurons à reparler.

Pour clore ces généralités, je vous montre à quoi ressemble un enregistrement de pulsar. Spécialement à l'intention de l'assemblée générale du CLEA, à votre intention, j'ai fait enregistrer ce 20 novembre à Nançay, le pulsar 0329+54 (qui se trouve donc à 03h 29 mn d'ascension droite et +54° de déclinaison) et qui est le plus intense connu (fig. 2). Sur cet enregistrement analogique, chaque impulsion correspond à un tour du pulsar sur lui-même (le flux reçu augmente vers le haut). Il a une période de 0.71451866398 seconde (rares sont les quantités physiques mesurées avec cette précision !) et elle diminue de $p' = 2.04959 \times 10^{-15}$ seconde par seconde. Le rapport p/p' , de l'ordre de 10^{14} secondes donne l'ordre de grandeur de l'âge du pulsar soit environ cent millions d'années, ce qui est très court par rapport aux durées d'évolution dans l'Univers, ou même, par exemple, à la durée d'une révolution de la Galaxie dans le voisinage



PSR 0329+54

$P = 0.71451866398 \text{ s}$

$P' = 2.04959 \times 10^{-15} \text{ (ss}^{-1}\text{)}$

20 Nov 1992 at Nançay

Fig. 2

du Soleil, au moins trois fois plus grande. Avec une durée de vie aussi courte et si les pulsars ne se forment qu'à partir des supernovae, on ne devrait pas en trouver 500 dans le voisinage du Soleil.

LES PULSARS MILLISECONDES

Tel était l'état des connaissances sur les pulsars en 1982 quand on découvrit, à la suite de cogitations et d'observations sur une radiosource étrange, un pulsar de période 1,6 milliseconde qui tournait donc sur lui-même avec une fréquence de 600 hertz. Cela posait un nouveau problème : en appliquant toujours la conservation du moment cinétique, on ne parvient pas à une période aussi courte qui, dans le cas de ce pulsar 1937+21 est 1.557806473356882 milliseconde.

On en a découvert d'autres et on connaît aujourd'hui 29 pulsars millisecondes. On peut croire cette statistique peu fiable en se demandant si on peut vraiment distinguer, pour un pulsar de période 30 millisecondes, s'il s'agit d'un pulsar typique jeune ou d'un pulsar milliseconde vieilli. On va voir que la distinction est possible.

Les pulsars millisecondes ont des dérivées de la période, p' , très faible, de l'ordre de 10^{-19} ss^{-1} , et même pour certains une dérivée positive. Ces pulsars sont accélérés en rotation. Ce sont des pulsars vieux qui ont été réactivés ; les Américains les ont appelés des Spun-up-Pulsars.

Comment cela a-t-il pu se produire ? On constate que sur 29 pulsars millisecondes, 7 sont doubles : c'est beaucoup plus en proportion que les 17 pulsars doubles sur 500 pulsars typiques. On comprend alors que la réaccélération des pulsars millisecondes provient de l'absorption du deuxième composant par le composant principal de la paire. Les 7 pulsars doubles millisecondes sont en train d'absorber leur compagnon avec son moment cinétique ; leur p' est positive. Les autres pulsars millisecondes ont déjà consommé leur compagnon, ils ont été réaccélérés.

Des pulsars jeunes, type Pulsar du Crabe, sont des pulsars très actifs où il se passe beaucoup de choses ; leur période est peu stable. Au contraire les pulsars millisecondes sont des pulsars vieux qui ont dépassé leur période d'activité ; ils sont particulièrement stables dans leur comportement et c'est sur eux que nous allons pouvoir faire des observations intéressantes.

Beaucoup de ces pulsars millisecondes actuellement connus sont situés dans des amas globulaires. Pourquoi ? Pour deux raisons équivalentes : on a tendance à les chercher là de préférence car la concentration d'étoiles y étant plus élevée, la probabilité d'observer des binaires y est plus grande. Dans l'amas 47 Toucan, on observe 12 pulsars millisecondes sur les 29 connus. Ils sont particulièrement étudiés par les astronomes australiens.

CHRONOMETRAGE DES PULSARS

Entendons nous bien sur la signification de l'expression: par chronométrage d'un pulsar, il faut entendre le repérage du temps d'arrivée des impulsions. Ne pas confondre cette opération avec la détermination de la période qui s'en déduira.

Je prends l'exemples des opérations telles qu'elles sont pratiquées en ce moment à l'Observatoire de Nançay. Nous y disposons d'une échelle de temps construite localement à partir d'une horloge atomique comparée chaque jour au temps atomique (TA) défini à l'Observatoire de Paris, la synchronisation étant réalisée par les signaux de la télévision. On dispose finalement d'un temps qui est celui de l'Observatoire de Paris (rattaché ultérieurement au TAI) avec la précision de 10^{-8} seconde.

La mesure est compliquée par le phénomène de la dispersion interstellaire. A l'émission par le pulsar, les impulsions sont émises simultanément quelle que soit la fréquence du rayonnement (cf fig. 3). Alors qu'à l'arrivée, après dispersion par le plasma interstellaire, il y a un retard inversement proportionnel au carré de la fréquence. On le constate sur la figure 4, observation du pulsar 1937+21 réalisée à Greenbank aux USA. (Entre deux impulsions, on voit "l'interpulse" émis par l'autre nappe du cône d'émission). Sans entrer dans les détails techniques, on mélange le signal reçu du pulsar à un signal généré localement et reproduisant la même variation de la fréquence en fonction du temps. La différence de fréquence est donc constante et c'est elle que l'on mesure. On est passé

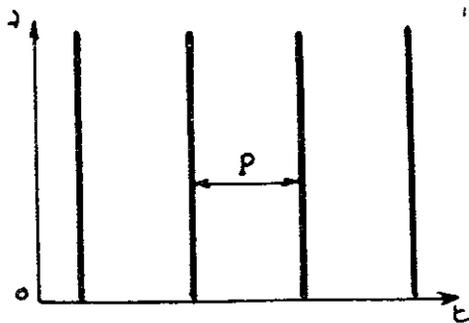


Fig. 3

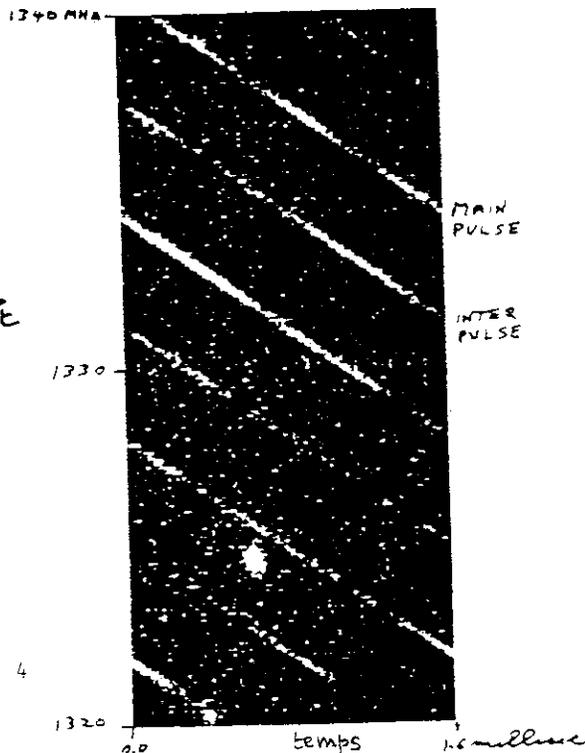


Fig. 4

Fig. 3 - Le spectre dynamique émis par un pulsar : les impulsions sont émises à toutes les fréquences au même moment.

Fig. 4 - Le même spectre reçu après traversée du milieu interstellaire : le retard variant avec la fréquence, les impulsions sont inclinées sur l'axe du temps.

d'une mesure dans le domaine du temps à une mesure dans le domaine des fréquences. A Nançay, avec le grand télescope, on a une bonne sensibilité et une excellente résolution temporelle car les impulsions des pulsars sont très fines.

Cependant, vous notez que sur la figure 2 vous voyez l'enregistrement d'impulsions individuelles. Ce qui était réalisable avec le pulsar le plus intense du ciel. Pour la plupart des pulsars, il faut additionner les impulsions reçues pendant un temps assez long. Voici ce qu'on a obtenu à Nançay en intégrant plusieurs milliards d'impulsions du pulsar 1937+21 (cf fig.5).

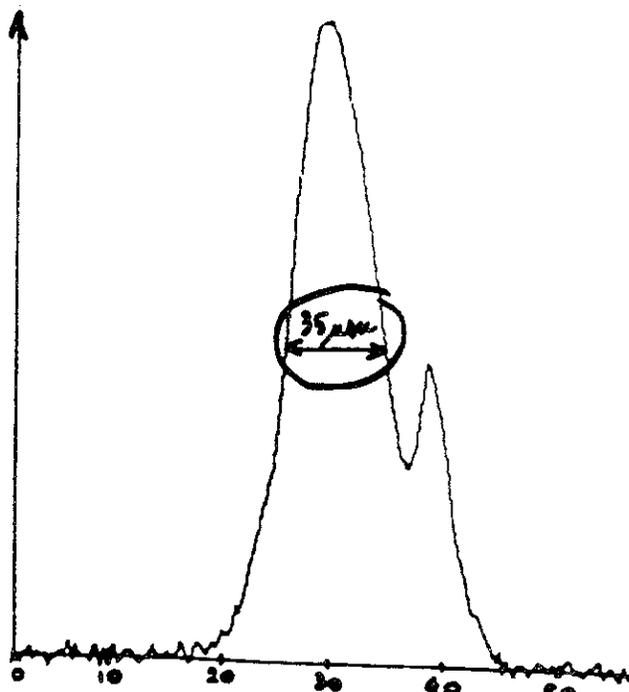


Fig. 5 - Le profil moyen du pulsar milliseconde 1937+21, observé à Nançay. L'intensité est représentée en fonction de la phase en degrés.

Résultat : on obtient une qualité de chronométrage de 0,3 milliseconde pour un pulsar typique dont la période est de l'ordre de la seconde, ou de 0,3 microseconde pour un pulsar milliseconde. Précision qui ouvre des domaines de recherche qui, sans cela, resteraient interdits.

A Nançay, nous mesurons donc les temps d'arrivée avec une précision de 300 nanosecondes. Ces temps varieront avec la position de la Terre sur son orbite par rapport au pulsar. Avec la précision obtenue, on peut déterminer la position de la Terre à 100 mètres près ; aucun autre procédé ne peut faire aussi bien. Il s'agit donc d'une acquisition de portée révolutionnaire. Nous allons voir quelques unes des conquêtes qu'elle a permises.

Première partie

1. LA PHYSIQUE DES PULSARS "NORMAUX"

Sur les pulsars "normaux", c'est à dire autres que les millisecondes, le fin chronométrage des impulsions reçues fournit des renseignements précieux sur la physique de ces astres : comment ils rayonnent, comment leur rotation décélère et quel est leur âge. Un exemple de ces informations : on observe parfois de brusques modifications de la période d'un pulsar. On interprète cette discontinuité par des réarrangements de la matière de l'étoile dont la surface aurait une structure cristalline. Les variations observées dans la fréquence reflètent une variation de la rotation et par conséquent une variation du rayon de l'étoile. A la précision obtenue, une variation du rayon de l'ordre du millimètre est ainsi perçue à une distance de l'ordre du kiloparsec : sans doute un record de précision dans les mesures de longueur ! Une telle discontinuité a été observée pour la première fois dans le pulsar de Vela.

Écoutons à titre d'exemples trois enregistrements : un pulsar d'âge moyen, un autre plus vieux, plus lent, et enfin celui de Vela, très rapide.

2. LA DETECTION DES PLANETES

Depuis longtemps on essaye de détecter la présence de planètes en dehors du système solaire. Le procédé le plus utilisé consiste à comparer la position d'étoiles proches par rapport aux étoiles lointaines servant de repère et à déceler des oscillations des étoiles proches, ces oscillations étant dues par l'effet de gravitation d'une planète assez massive orbitant autour de l'étoile. Une bonne demi douzaine de candidats existent mais le phénomène est trop peu important pour que la conclusion soit assurée.

En mesurant les déplacements longitudinaux par effet Doppler, on ne parvient pas à des assurances plus grandes. D'autres procédés plus complexes n'ont pas donné des résultats plus performants et jusqu'en 1991 on restait dans l'incertitude.

En juillet 1991, une équipe de Jodrell Bank, en Grande-Bretagne, annonce qu'elle a découvert une planète autour d'un pulsar. Ces astronomes avaient constaté une composante périodique dans le chronométrage du pulsar qu'ils enregistraient. La dite période étant d'une demi année, à un jour près, les astronomes de Jodrell Bank se méfiaient mais ne voyant pas quel phénomène terrestre pouvait s'être introduit dans leurs mesures, ils se décidèrent à annoncer leur découverte. Scrupuleux, ils reprirent pourtant leurs calculs et finirent par découvrir que la composante périodique s'était introduite fortuitement par suite d'une erreur de manipulation

informatique.

En janvier 1992, l'équipe de Jodrell Bank publia donc un démenti de sa première information. Mais le principe invoqué la première fois était bon puisque quelques jours après, en appliquant la même méthode, l'observatoire d'Arecibo décelait sans ambiguïté la présence de deux compagnons obscurs autour du pulsar PSR 1257+12. On pouvait même préciser que l'une des planètes d'une masse égale à 2,7 masses terrestres se trouvait à 0,47 unité astronomique de l'étoile et tournait autour en 98,2 jours ; l'autre planète de masse égale à 3,4 masses terrestres se trouve à 0,36 unité astronomique de l'étoile et gravite autour en 66,6 jours.

Pour comprendre la délicate technique de la détection, comparons les enregistrements du pulsar du Crabe (fig.6.a), un pulsar jeune avec des variations imprévisibles et l'enregistrement de PSR 1257+12 (fig.6.b). Vous remarquez que les périodes des planètes sont presque commensurables, la seconde les deux tiers de la première. On continue le chronométrage. Des effets de résonance devraient être observés et cela constituera une preuve irréfutable de l'existence de deux planètes autour de ce pulsar.

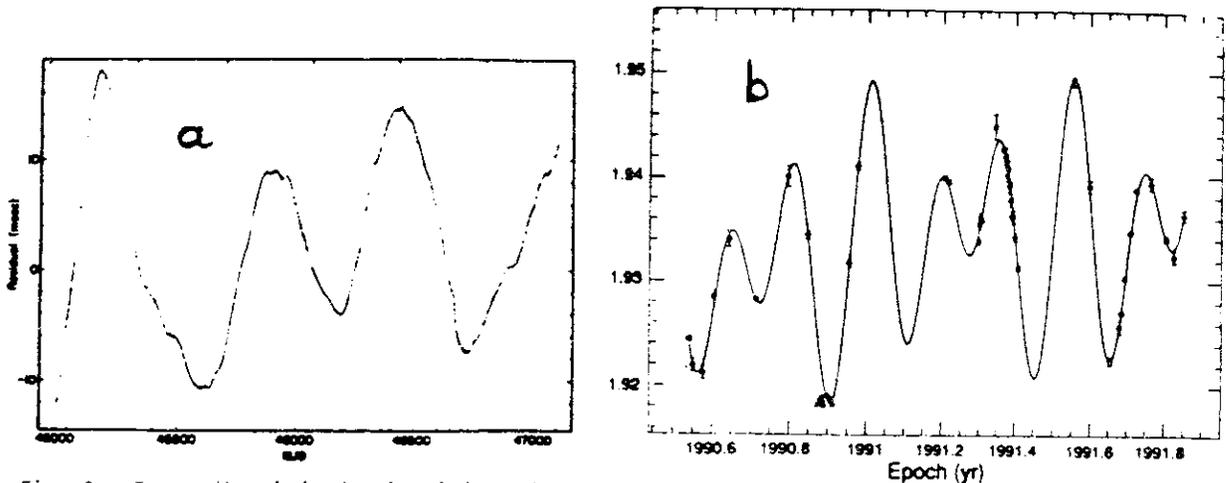


Fig. 6 - Temps d'arrivée des impulsions de deux pulsars.
- en a, le pulsar de la nébuleuse du Crabe : les variations sont erratiques ;
- en b, PSR 1257+12 : les variations sont dues à la présence de deux planètes.

Deux remarques : 1°) Les planètes trouvées, tant par leurs masses que par leurs distances à l'étoile donnent une configuration qui s'apparente à celle du système solaire ; le système détecté n'est en rien exotique. 2°) Mais on ne s'attendait vraiment pas à trouver des planètes autour d'un pulsar ; comment ces planètes ont-elles pu survivre à l'explosion de supernova qui a donné lieu à la formation de l'étoile à neutrons ? On se trouve devant une situation contradictoire : grâce au chronométrage,

on découvre des planètes qu'on ne s'attendait pas à trouver autour d'un pulsar alors qu'autour des étoiles normales où on s'attend à trouver des planètes, on ne dispose pas du chronométrage pour les détecter. On peut aussi penser que les pulsars peuvent avoir une autre origine ; en particulier, dans les amas globulaires où les étoiles sont très serrées, par un phénomène de coalescence de naines blanches allant jusqu'à la formation d'une masse suffisante à l'évolution en étoile à neutrons.

De toute façon, la détection de planètes autour d'un pulsar est un indice très fort de l'existence de planètes autour des autres étoiles.

3. DISTANCE DES PULSARS

De façon accessoire, en chronométrant les arrivées des impulsions, on obtient une "mesure de dispersion" qui est l'intégrale de la densité électronique sur la ligne de visée. Donc en prenant une valeur moyenne de cette densité, on peut en déduire une distance du pulsar.

° °

Deuxième partie

Etudions maintenant plus particulièrement les questions résolues grâce aux propriétés des pulsars millisecondes.

1. MESURE DE PARALLAXES

Grâce au chronométrage, on peut déterminer la position des pulsars millisecondes à la précision de 10^{-4} seconde d'arc. On peut donc déterminer directement leur parallaxe annuelle jusqu'à des distances de plusieurs kiloparsecs.

2. INFORMATIONS SUR LE MILIEU INTERSTELLAIRE

Nous avons observé le pulsar 1937+21 depuis 1989 (cf fig.7) et nous constatons, à certaines dates (fin de 1989), un effet de scintillation : sur le trajet du rayonnement, il est passé une grosse bulle de plasma provoquant une sorte de focalisation, le flux a augmenté et diminué, le retard augmentant de plusieurs microsecondes.

On constate que la mesure de dispersion varie dans le temps. Cela s'explique par l'agitation plus ou moins turbulente du plasma interstellaire.

3. ASTROMETRIE

Le chronométrage du pulsar dépend de la position de la Terre sur son orbite. Il en résulte que la position du pulsar est rapportée au référentiel de l'écliptique (avec la précision de 10^{-4} seconde d'arc)-

Un autre procédé de mesure de la position du pulsar est l'interférométrie à longue base qui a été réalisée également entre Nançay, Effelsberg et Jodrell Bank, mesure qui, elle, est rapportée au référentiel équatorial. Le chronométrage du pulsar est le seul moyen de relier avec cette précision

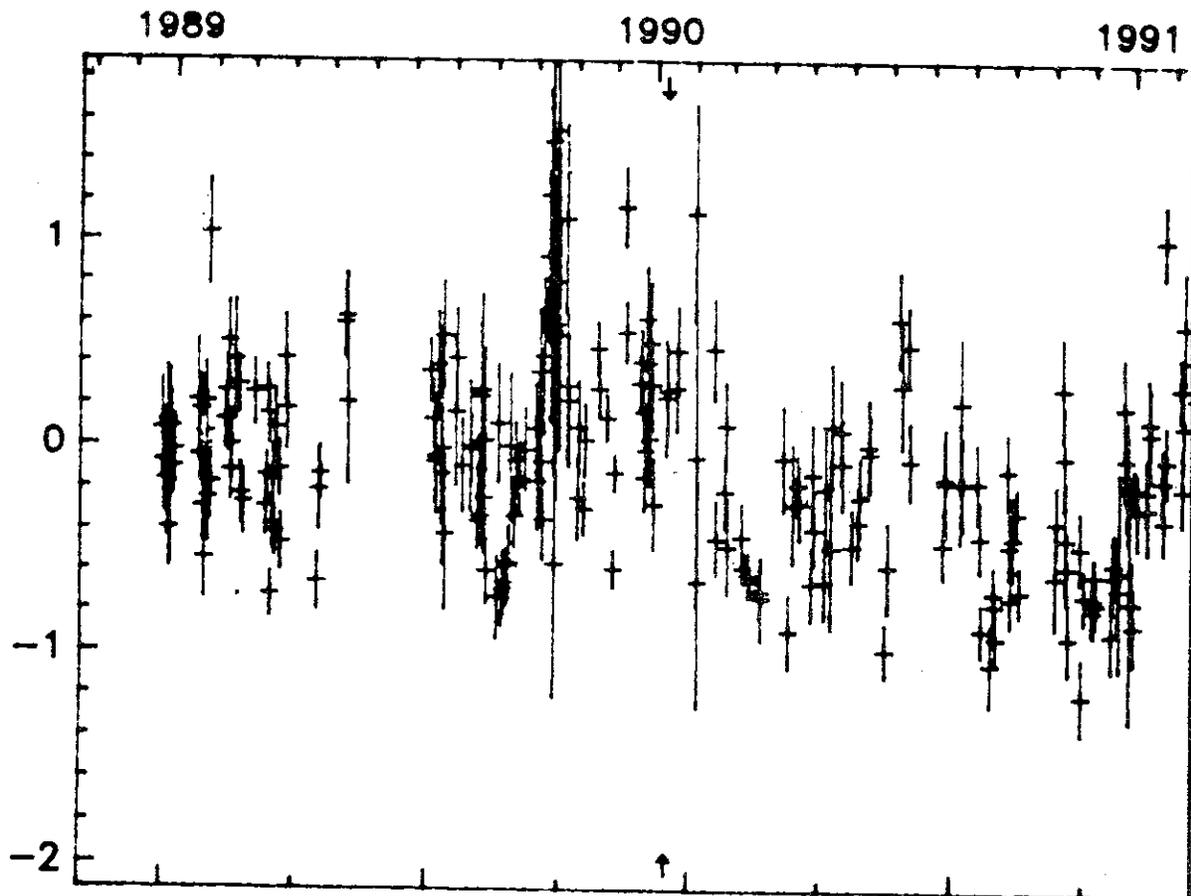


Fig. 7 - Temps d'arrivée, observés à Nançay, des impulsions de PSR 1937+21. On remarque, en octobre 1989, "l'événement de scintillation réfractive" discuté dans le texte.

ces deux référentiels. Cette utilisation astrométrique des pulsars est certainement d'une grande importance.

4. METROLOGIE DU TEMPS

On ne peut disposer d'un étalon de temps conservé au pavillon de Breteuil. On définit donc des échelles de temps par référence à des horloges bien choisies. On a commencé par se fier à la rotation de la Terre sur elle-même. Puis on a trouvé mieux, les physiciens ont construit l'horloge à césium.

L'horloge à hydrogène serait peut-être la meilleure avec une stabilité relative de 10^{-15} (ce qui représenterait un quart d'heure de variation depuis le big bang !) mais sur quelques milliers de secondes et sa stabilité n'est pas garantie sur une durée beaucoup plus longue.

On préfère donc, pour le moment, la référence à l'horloge au césium mais les métrologues pensent qu'un jour les échelles de temps seront vérifiées et raccordées aux échelles de temps définies à partir des pulsars car ces derniers semblent bien être plus stables à long terme (quelques années) que les horloges à césium. Le problème sera difficile car il faudra de très grands radiotélescopes et il y en a peu dans le monde capables de faire ces mesures. En tout cas, cela permettra aux astronomes

de reprendre leurs prérogatives dans la définition du temps...

5. DYNAMIQUE DU SYSTEME SOLAIRE

Le chronométrage d'un pulsar à Nançay à 300 nanosecondes près signifie qu'on connaît la distance de la Terre au pulsar à 100 m près. Or les perturbations de Jupiter sur la Terre sont de l'ordre de dix mille kilomètres. Le chronométrage des impulsions de pulsar devient ainsi le meilleur moyen de mesurer, par exemple la masse de Jupiter. Ce qui est vrai pour Jupiter, l'étant de la même façon pour les autres planètes. Je passe sur le détail des opérations nécessaires mais on comprend que c'est l'extraordinaire précision des mesures qui est ainsi exploitée.

6. VERIFICATIONS DE LA RELATIVITE

On sait quels furent, historiquement, les deux grands tests de la théorie de la Relativité : l'explication du résidu encore injustifié dans l'avance du périhélie de Mercure et la déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil.

L'avance du périhélie de Mercure était plus élevée de 43" par siècle que celle qui avait été calculée selon la mécanique de Newton. La Relativité Générale corrige cet écart.

La déviation des rayons lumineux a été observée lors de l'éclipse totale de Soleil de 1919 : on a mesuré une déviation angulaire des rayons lumineux des étoiles. Avec les pulsars, on mesure un retard des rayons d'autant plus important qu'ils frôlent de plus près une grande masse comme celle du Soleil. Ce retard peut atteindre 125 microsecondes; autrement dit l'effet relativiste sur les pulsars est 400 fois les erreurs de mesure.

Soulignons l'intérêt de ce résultat. Il réfute une opinion trop répandue que les corrections relativistes ne portent que sur des quantités négligeables. Ici, dans un chronométrage de pulsar, ne pas tenir compte de l'effet relativiste pourrait masquer le phénomène étudié.

Le chronométrage des pulsars permet donc deux vérifications de la Relativité Générale. 1°) Le mouvement des planètes est affecté d'une correction relativiste, importante comme on vient de le dire pour Mercure mais qui a été aussi vérifiée pour Vénus, pour la Terre et même pour des astéroïdes comme Icare. 2°) Le retard des arrivées des impulsions d'un pulsar lorsque le Soleil passe près de la direction du pulsar cumule deux effets, le retard dû au plasma solaire et la correction relativiste. Cette mesure a été faite à Nançay pour le pulsar 1821-24 qui est occulté par le Soleil aux environs de Noël ; les mesures effectuées ont confirmé un retard relativiste de 60 microsecondes donné par la théorie.

Les mesures précédentes concernant des phénomènes du système solaire sont donc relatives à un champ gravitationnel faible, celui du Soleil. On observe aussi des phénomènes intéressants par le chronométrage

de pulsars doubles, les champs gravitationnels y sont très importants, les effets relativistes sont énormes. Dans le cas du pulsar double 1913+16 on a mis en évidence qu'une partie de l'énergie qu'il émet est sous la forme d'ondes gravitationnelles, conformément à ce que prédit la Relativité Générale. D'autres pulsars doubles sont étudiés dans cette même perspective : détecter des ondes gravitationnelles.

7. COSMOLOGIE

Les temps d'arrivée des impulsions dépendent de la distance des pulsars et par conséquent de la métrique de l'espace entre eux et nous. S'il y a des ondes gravitationnelles sur le trajet, nos estimations de distances en seront affectées. Ces ondes peuvent avoir diverses origines, des événements ponctuels (tels que des supernovae, ...) ou des résidus de ce qui s'est passé peu après le Big Bang.

°°

En guise de conclusion, il faut insister sur la variété des applications du chronométrage des pulsars. A partir de techniques qui ne sont certes pas évidentes mais qui sont bien maîtrisées, on apporte des possibilités exploratoires étonnantes et nouvelles dans des domaines très variés de l'astrophysique.

L'UNIVERSITE DE GAP 1992 EN DEVINETTES

Essayez, nous dit Cecylia Iwaniszewska, de deviner qui aurait pu faire les remarques suivantes

1. Mon assistante, savez-vous où z'ai mis mon appareil ? Si ze ne prend pas de photos des participants, ze ne pourrait pas dessiner ensuite les caricatures pour les Cahiers Clairaut !
2. Tu avais l'air très bien avec ce chapeau de Galilée à larges bords. Pourquoi ne pas le porter tous les jours pour aller au lycée ?
3. C'est vrai qu'il y a eu en 1930 le grand débat sur les galaxies entre Shapley et Curtis, mais maintenant, on n'a plus le temps d'y penser, car il faut vite ranger les tables et les chaises ! Le camion de Gap va arriver tout à l'heure !
4. Si seulement je pouvais enregistrer dès maintenant tous ceux qui veulent participer à la prochaine Université d'été !
5. Où sont passées mes pincettes et ma corde à linge ? Es-tu déjà en train de préparer ton cours d'histoire de la physique ?
6. Que c'est bon de manger à nouveau du fromage et des salades après le riz de Pékin !
7. Est-ce que tout le monde est content ? Il ne manque rien ?
8. La prochaine fois que je viens en France, j'apporte mon gros "Dictionnaire Astronomique en 6 langues" et un recueil international de chansons !
9. Pour le prochain cours sur le repérage, je prendrai mon magnétophone et une cassette de musique moderne ; je pourrai alors manipuler la grande sphère sans qu'on l'entende grincer !
10. Ah, je me suis tellement appliqué à parler français correctement, et me voilà tout confus : est-ce que "ça tourne, le Saturne ?", ou bien "Saturne ne tourne pas" ?
11. Ah, j'ai fait un beau rêve de parapluies bleus ; c'est beau n'est-ce pas ? Mets-toi vite au lit, car demain nous allons voyager toute la nuit pour rentrer à temps pour la rencontre avec les enseignants de la région !

(Réponse, page 22)