

Les planètes du pulsars PSR B1257+12 : simple coïncidence?

Autor(en): **Cramer, N.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen
Gesellschaft**

Band (Jahr): **53 (1995)**

Heft 269

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898745>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Les planètes du pulsar PSR B1257+12

Simple coïncidence?

N. CRAMER

Le pulsar milliseconde PSR B1257+12 fut découvert en février 1990 par A. WOLSZCZAN à l'aide du radiotélescope de 305m d'Arecibo lors d'une campagne visant à détecter de tels objets situés à de hautes latitudes galactiques.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, ces pulsars extrêmement rapides ne sont pas des étoiles à neutrons jeunes. La cause la plus vraisemblable de la rapidité de leur rotation serait l'interaction du pulsar avec un compagnon stellaire après sa formation.

L'existence de pulsars dans des systèmes binaires pose un certain nombre de problèmes. L'explosion supernova de type II d'une étoile suffisamment massive ($M_{\text{ini}} > 8M_{\odot}$), dont l'implosion du noyau de fer conduit à la formation d'une étoile à neutrons (et peut être dans certains cas à celle d'un trou noir) semble se dérouler généralement d'une manière qui n'est pas entièrement symétrique. Les pulsars isolés présentent, en effet, une vitesse spatiale moyenne de 400 km/s. Divers autres indices suggèrent aussi que les pulsars subissent à leur naissance une impulsion cinétique qui leur imprime une vitesse spatiale située entre 100 et 600 km/s. Une telle accélération brutale d'un des membres d'un système binaire, qui s'ajoute à l'éjection d'au moins la moitié de la masse de l'étoile qui explose, ne semble pas être a priori favorable au maintien de la liaison dynamique du couple. Toutefois, tout dépend de la direction de l'impulsion que subit le résidu de la supernova et, dans certaines circonstances (impulsion contraire au sens de la rotation orbitale, par exemple), cet effet pourrait même contribuer à *stabiliser* le système final.

Un tel scénario s'accorde avec le modèle dit du «*pulsar recyclé*»: on part d'un système double peu séparé dont la composante principale, qui a une masse initiale supérieure à la masse critique de supernova ($\approx 8M_{\odot}$) est dotée d'un compagnon peu massif ($M \leq 1 M_{\odot}$). L'évolution du primaire et la dilatation de son enveloppe provoquent un transfert de masse dynamiquement instable vers le compagnon secondaire. La friction du compagnon avec cette enveloppe dissipe son moment cinétique, et il se rapproche selon une trajectoire en forme de spirale. Le résultat est la formation d'une binaire compacte composée du noyau d'hélium évolué du primaire, et du compagnon peu massif. Après l'explosion supernova, ce dernier (si le système survit dynamiquement) aura pour compagnon l'étoile à neutrons résiduelle. Lors de l'évolution plus tardive du secondaire, un important transfert de masse a lieu vers le pulsar (déjà ancien) par la formation d'un disque d'accrétion. Le transfert de moment cinétique accélère la vitesse de rotation de l'étoile à neutrons qui atteint une période proche de la milliseconde. Selon l'importance du rayonnement corpusculaire émis par le pulsar et de la proximité du compagnon, ce dernier peut même être «*éaporé*» petit à petit et absorbé par le disque d'accrétion, conduisant à un pulsar milliseconde isolé.

D'autres mécanismes de formation d'une étoile à neutrons dans un système double ont été proposés, tel l'*effondrement induit par accrétion*: le précurseur serait une naine blanche qui

s'alimente aux dépens de son compagnon par la voie d'un disque d'accrétion, et qui finit par s'effondrer en une étoile à neutrons lorsqu'elle atteint sa limite de Chandrasekhar. Cette masse limite dépend de la composition chimique et s'exprime en unités de masse solaire par $M_{\text{ch}} = 5.75(Z/A)^2 M_{\odot}$, où Z est le nombre atomique (la charge du noyau) et A le nombre de masse (nombre total de protons et de neutrons du noyau). Pour une naine blanche, phase terminale de l'évolution d'une étoile de masse initiale M_{ini} inférieure à $8M_{\odot}$ et constituée en grande partie de carbone et d'un peu d'oxygène, cette limite vaut $1.44M_{\odot}$. L'accélération de la rotation peut ensuite se faire comme décrit plus haut. Ce scénario de «supernova tranquille» présente l'avantage de ne pas provoquer d'impulsion cinétique, et une part essentielle de la perte de masse pourrait se restreindre à la variation de l'énergie de liaison. Exprimée en fractions de masses solaires, cette variation d'énergie vaut approximativement (ZELDOVICH et NOVIKOV, 1971) $\Delta M \approx (3GM_{\text{wd}}/5R_{\text{ns}}c^2) \approx 0.2M_{\odot}$, où M_{wd} est la masse de la naine blanche ($\approx 1.5M_{\odot}$) et R_{ns} le rayon de l'étoile à neutrons (≈ 7 km). Toutefois, ce mécanisme de transfert de matière à partir de l'enveloppe du compagnon est aussi celui qui est proposé pour expliquer les variables cataclysmiques, où la couche d'hydrogène qui s'accumule graduellement par accrétion sur la naine blanche engendre épisodiquement de violentes explosions thermonucléaires superficielles. C'est également celui qui est le plus souvent admis pour interpréter l'explosion supernova de type I, qui ne laisse pas de résidu compact et dissoudrait alors le système binaire. Il n'est pas encore établi si sous certaines conditions ce processus, qui implique des réactions nucléaires lors de l'effondrement, pourrait se borner uniquement à la simple *implosion* avec formation ultérieure d'un pulsar milliseconde. Une autre difficulté, observationnelle, rencontrée par ce modèle est l'absence de pulsars binaires ayant des vitesses spatiales faibles, comme le prévoit ce scénario.

Quel que soit le mode de formation de PSR B1257+12, ce pulsar qui a une période de 6.2 millisecondes n'a pas (ou plus) de compagnon stellaire, mais présente l'intérêt de posséder le seul *système* planétaire connu excepté le nôtre.

Deux planètes sont détectées en 1992 par A. WOLSZCZAN et D.A. FRAIL grâce à l'analyse des variations du temps d'arrivée des impulsions du pulsar. L'extrême régularité de la fréquence intrinsèque d'un pulsar permet, en effet, de mesurer des variations de sa vitesse radiale, perçues par des décalages du temps d'arrivée des impulsions, avec une précision presque 2000 fois supérieure à celle des meilleures techniques spectroscopiques actuellement disponibles. Ces variations de la période apparente sont très petites. Elles atteignent dans le cas présent ± 15 picosecondes, ce qui correspond à des vitesses radiales et déplacements maximaux de ± 0.7 m/s et ± 900 km respectivement sur la ligne de visée (en comparaison, Jupiter déplace le Soleil à 10 m/s sur environ 900 000 km).

Dans leur analyse, les auteurs montrent que les variations de fréquence de PSR B1257+12 ont un comportement complexe qui correspond de manière optimale à la présence de deux

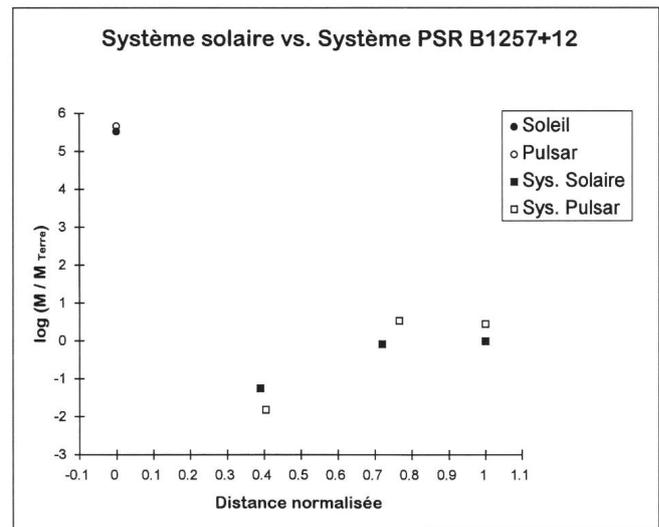


planètes ayant des masses de $3.4(M_{\oplus}/\sin i)$ et $2.8(M_{\oplus}/\sin i)$, des distances au pulsar de 0.36 et 0.47 unités astronomiques (UA) et des périodes orbitales de 66.6 et 98.2 jours, respectivement. Ici, M_{\oplus} est la masse de la Terre, et i est l'inclinaison de l'axe de l'orbite sur la ligne de visée. Ces valeurs ont été obtenues en admettant une masse de $1.4 M_{\odot}$ pour le pulsar. Le choix de cette masse n'est pas arbitraire: elle est proche de la masse de Chandrasekhar. Des modèles d'étoiles à neutrons définissent pour ces objets une zone de stabilité qui se situe entre 1.4 et 1.5 M_{\odot} . Les quelques masses d'étoiles à neutrons qui ont pu être mesurées dans des systèmes doubles donnent également des valeurs de cet ordre.

Toutefois, les auteurs notent la présence d'une variation résiduelle qui dépasse l'incertitude sur les mesures, et proposent l'existence d'une, voire deux autres planètes moins massives. Ils remarquent aussi la résonance orbitale 3/2 presque parfaite des deux planètes détectées. La planète intérieure parcourt 2.95 (≈ 3) fois son orbite lorsque la planète extérieure la parcourt deux fois. En 1994, WOLSCZAN reprend le travail et montre que l'imperfection du couplage orbital impose une limite supérieure aux masses des planètes. Ceci signifie que les plans orbitaux ne doivent pas trop s'écarter de la ligne de visée, car $\sin i$ doit être proche de l'unité. Par une nouvelle analyse des temps d'arrivée des impulsions, il trouve une troisième planète, moins massive que les deux autres, ayant $M = 0.015(M_{\oplus}/\sin i)$ et située à 0.19 UA du pulsar. On peut raisonnablement supposer que cet objet partage le plan orbital de ses deux compagnons plus massifs.

Trouver un objet aussi exotique qu'un pulsar, muni d'un système planétaire composé d'au moins trois membres de taille respectable en orbites quasi circulaires, est assez surprenant. Ce qui l'est encore plus est la similitude de l'échelle de ce système avec celle de notre système solaire intérieur, comme le montrent T. MAZEH et I. GOLDMAN (1995). En admettant que $\sin i \cong 1$, comme le suggère WOLSCZAN, et en normalisant les échelles des distances à l'unité pour chaque troisième planète (la Terre dans notre cas), on obtient le diagramme de la figure 1 qui porte le logarithme de la masse rapportée à celle de la Terre en fonction de la distance normalisée pour les deux systèmes. La similitude est très frappante. Une échelle logarithmique tend toujours à amortir la dispersion. Mais ici, les masses relatives se groupent de manière consistante pour chaque cas sur une étendue de sept ordres de grandeur. La ressemblance est encore plus remarquable à l'échelle linéaire des rapports des distances. La similitude se limite, toutefois, à ces trois planètes intérieures. Le pulsar n'a pas l'équivalent de notre système solaire extérieur, avec ses planètes géantes.

La raison pour laquelle nous détectons des planètes autour d'objets aussi inattendus, avant de le faire chez des étoiles plus «ordinaires» et semblables à notre Soleil, est l'extraordinaire sensibilité avec laquelle nous pouvons mesurer les variations de leur vitesse radiale. Cette précision résulte du fait que dans le cas particulier des pulsars, l'estimation repose sur une mesure de temps, technique très bien maîtrisée actuellement. La régularité de la fréquence émise par l'astre permet, en quelque sorte, de pratiquer une «interférométrie» de son signal avec nos horloges. Lors de la détermination classique de vitesses radiales, l'effet Doppler est perçu d'une manière plus «mécanique» sous la forme d'un déplacement spectral, et rendu de ce fait plus difficile à réaliser avec une très grande précision. On ne peut s'empêcher de penser au problème que posait la mesure de l'unité astronomique aux XVII^e et XVIII^e siècles, et où Halley conçut en 1677 la méthode du transit de Vénus pour effectuer la triangulation (voir ORION 225, avril 1988), car il était alors



Comparaison des masses et des distances normalisées des trois premières planètes des deux systèmes (d'après T. MAZEH et I. GOLDMAN). Les deux échelles des distances sont normalisées à l'unité (1 UA) pour la troisième planète (la Terre, dans notre système) en dilatant celle du pulsar d'un facteur 2.13. Les masses, exprimées en masses terrestres, n'ont pas subi de normalisation. Cette figure illustre la remarquable similitude de caractère «bidimensionnel» des deux systèmes planétaires.

(aussi) plus aisé de mesurer avec précision une différence de temps que celle de deux angles. Dans le cas d'une étoile, la mesure précise du déplacement de son centre de gravité est rendue encore plus difficile par les mouvements à grande échelle de son atmosphère d'où vient le rayonnement capté par nos instruments (pulsations, supergranulation, etc.). Mais, le jour où il sera possible de mesurer des variations de vitesse radiale d'étoiles normales avec une précision de l'ordre du m/s, il est pratiquement certain que nous découvrirons une multitude de systèmes planétaires, là où leur formation serait plus naturelle que dans le voisinage hostile d'un pulsar en pleine activité.

Les planètes du pulsar PSR B1257+12 sont certainement apparues après la naissance de l'étoile à neutrons, vraisemblablement en relation avec le disque d'accrétion alimenté par les restes de son compagnon. Les planètes de notre système solaire se sont aussi formées durant les dernières phases de l'évolution du disque d'accrétion qui a engendré le Soleil. Les circonstances sont, toutefois, très différentes dans les deux cas. Le pulsar a, par son rayonnement, probablement détruit son compagnon, et on peut se demander comment des planètes se sont formées dans un tel environnement. Mais, étant confrontés aux faits, on pourrait aussi s'interroger, comme le font MAZEH et GOLDMAN, si cette similitude à deux échelles entre les deux seuls systèmes planétaires connus actuellement ne cache pas un processus plus général qui opère lors de la formation de planètes. Ou alors sommes-nous en présence d'une simple coïncidence?

Bibliographie:

- MAZEH, T., GOLDMAN, I., 1995, Publ. Astron. Soc. Pacific, 107, 250
 WOLSCZAN, A., 1990, IAU Circ. No. 5073
 WOLSCZAN, A., FRAIL, D.A., 1992, Nature, 355, 145
 WOLSCZAN, A., 1994, Science, 264, 538
 ZELDOVICH, Y.B., NOVIKOV, I.D., 1971, Relativistic Astrophysics. Vol. 1. Univ. Chicago Press.

NOËL CRAMER