

ETOILES A NEUTRONS ET PULSARS

Pourquoi croit-on que les pulsars sont bien des étoiles à neutrons ?

La découverte des pulsars soulevait toute une série d'interrogations: quel genre d'objet peut émettre un tel rayonnement pulsé ? Pourquoi une stabilité aussi grande de la période ? Quels mécanismes physiques permettent d'expliquer les caractéristiques du rayonnement ? etc... A cette fin, et plutôt que d'inventer de nouveaux objets exotiques aux propriétés ad hoc, il fallait d'abord tenter d'épuiser l'arsenal des possibilités conventionnelles. Il existe en fait trois types naturels de systèmes astrophysiques périodiques: (i) les systèmes orbitaux où deux étoiles tournent l'une autour de l'autre; (ii) des étoiles en pulsation, qui se contractent et s'étendent périodiquement et (iii) des étoiles en rotation.

La première possibilité était éliminée par K. Thorn. La relativité générale prédit l'émission très efficace d'ondes gravitationnelles par de tels systèmes, de sorte que les deux étoiles en orbite perdraient rapidement de l'énergie (sous forme d'ondes gravitationnelles; de même que les phénomènes électromagnétiques peuvent donner lieu à la propagation d'ondes, la relativité générale prédit que les interactions gravitationnelles peuvent également se propager comme des ondes; cette prévision vient d'être vérifiée, avec une très grande précision, sur le pulsar double PSR 1913 +16 grâce à des calculs effectués en France par L. Bel, T. Damour, N. Deruelle, B. Linet et A. Papapétrou) et spiralerait l'une vers l'autre; un tel système aurait une durée de vie beaucoup trop courte.

Le second cas - celui d'une étoile en pulsation - fut éliminé en remarquant préalablement que la taille de l'émetteur était au plus de l'ordre de 6 000 km (pour le premier pulsar découvert): cette taille ne peut excéder la distance que parcourerait la lumière pendant la durée de l'impulsion (ici 20 ms). En effet, pour que les diverses parties de la source émettent en même temps, il est nécessaire qu'elles soient "informées" d'avoir à le faire. Pour cela il est indispensable que se propage un signal (une interaction) entre les diverses parties de la source. Or un tel signal ne peut se propager à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Il s'ensuit que la source aura une taille d'au plus $300\,000\text{ km/s} \times 0,02\text{ s} = 6\,000\text{ km}$. Il s'agissait donc soit d'une naine blanche soit d'une étoile à neutrons.

Cependant, les naines blanches ne peuvent avoir de période de pulsation inférieure à 0,25 seconde (la période de pulsation est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la densité moyenne, elle-même au plus de l'ordre de 10^8 g/cm^3 pour une naine blanche. Or, on sait que le pulsar du Crabe possède une période beaucoup plus courte (33 ms). il ne restait donc que la possibilité d'une étoile à neutrons en pulsation. A son tour cette hypothèse était rejetée car, au contraire des naines blanches, leurs périodes de pulsation sont beaucoup trop courtes, de l'ordre de la milliseconde.

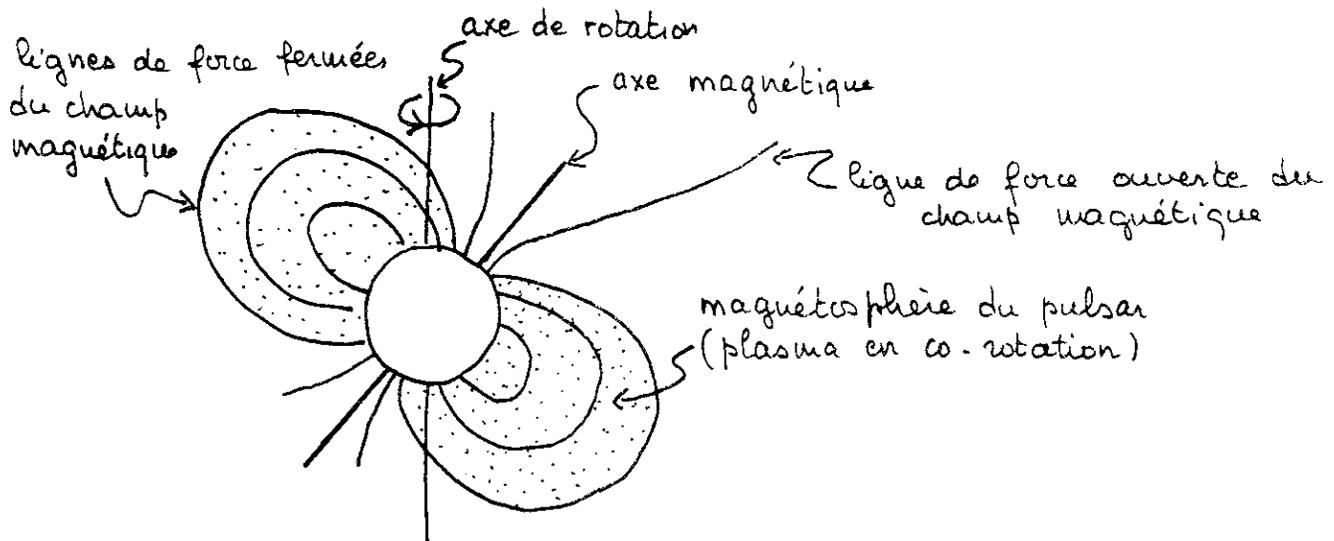
Restait alors le cas d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons en rotation rapide. Cependant une naine blanche ne peut tourner sur elle-même à plus d'un tour en quelques secondes sous peine d'exploser sous les effets centrifuges. Ce n'est pas le cas d'une étoile à neutrons en rotation, compte-tenu de la plus grande compacité d'un tel objet (10 km de rayon pour une masse du même ordre de grandeur que celle d'une naine blanche, c'est-à-dire la masse du Soleil). Toutefois, cette seule possibilité connue n'est pas nécessairement la bonne: aussi convenait-il d'élaborer des modèles que l'observation devra confirmer ou infirmer.

L'idée la plus naturelle est qu'il existe un "point chaud", c'est-à-dire une source de rayonnement électromagnétique, lié à l'étoile et qui tourne avec elle; les impulsions reçues par l'observateur sont analogues à celles d'un phare. C'est sur la base de cette idée simple que les modèles de pulsars sont élaborés et les données concernant la nébuleuse du Crabe vont les confirmer

Le modèle du dipole magnétique en rotation.

La question cruciale, encore non totalement résolue, est d'expliquer le mécanisme de ce rayonnement pulsé que l'on observe et ses principales propriétés. Comme pour les autres étoiles, ce rayonnement provient des couches les plus externes du pulsar et, plus précisément, du milieu ionisé qui l'entoure immédiatement. La polarisation du rayonnement est, comme je l'ai déjà signalé, une indication de l'existence d'un champ magnétique dans les pulsars, champ qui joue un rôle extrêmement important dans les processus de rayonnement. En fait, la plupart des objets de l'astrophysique possèdent des champs magnétiques: 0,2 gauss pour la Terre, 1 gauss pour le Soleil, 10^{-6} pour la Galaxie, 10^6 à 10^8 gauss pour certaines naines blanches. En ce qui concerne les étoiles à neutrons, divers arguments, pas toujours convaincants, conduisent à des intensités énormes de l'ordre de 10^{12} gauss (en laboratoire on atteint quelques millions de gauss pendant des temps très brefs). Un tel ordre de grandeur est corroboré par la valeur du champ magnétique de la nébuleuse du Crabe. En outre, cette valeur du champ magnétique des pulsars a été confirmée récemment en ce qui concerne le pulsar Herculis X-1 par l'observation dans le domaine des rayons X d'une raie interprétée comme étant la raie cyclotron d'électrons.

T. Gold était donc conduit naturellement en 1969 au modèle d'une étoile à neutrons en rotation rapide, dotée d'un champ magnétique dipolaire très intense. Comme l'axe du dipole magnétique n'a aucune raison de se trouver aligné avec l'axe de rotation de l'étoile, on est amené à considérer ce qu'on appelle un rotateur oblique.



Ce modèle est tout à fait confirmé par les données concernant la nébuleuse et le pulsar du Crabe: l'énergie émise par seconde par un dipole magnétique tournant à la vitesse d'un tour toutes les 33 millisecondes est du même ordre que la perte d'énergie de rotation due au ralentissement du pulsar. Enfin, le modèle du rotateur oblique conduit à une relation entre la période d'un pulsar, sa variation par unité de temps et sa décélération indépendante de toute autre grandeur; cette relation fait apparaître une constante, l'indice de freinage, qui vaut 3 dans le cas du rotateur oblique. La mesure de cet indice de freinage dans le cas du pulsar du Crabe donne 2,515, ce qui est très satisfaisant, compte-tenu du caractère primitif du modèle. Pour les autres pulsars, il est difficile de mesurer la décélération de la période. Il existe un certain nombre de modèles classiques, ayant chacun leurs vertus et leurs défauts, qui font l'objet de débats entre spécialistes. Aucun cependant ne fait l'unanimité, et comme ils sont assez complexes nous n'en parlerons pas ici. Tous ces modèles font appel aux propriétés physiques de plasmas qui, en l'occurrence, peuvent être relativistes et/ou quantiques et relèvent d'un traitement physique assez sophistiqué.

Peut-on avoir accès à l'intérieur d'une étoile à neutrons ?

Nous avons vu que si les caractéristiques principales (émissions pulsées) des pulsars peuvent être obtenues par leurs seules propriétés externes, la nature de l'intérieur n'affecte guère que les masses, rayons ou moments d'inertie, sur lesquels on possède très peu de mesures précises. Il existe cependant un phénomène, que nous avons mentionné précédemment, celui des "glitches" de quelques pulsars (rappelons qu'il s'agit d'une brusque accélération de la rotation suivie, quelques jours plus tard, d'un retour à la rotation antérieure) qui est très probablement lié à la structure interne des étoiles à neutrons. Seul un faible nombre de pulsars en présente. Or, s'il s'agissait, par exemple, d'une instabilité du champ magnétique, on ne voit pas pour quelle raison elle se manifesterait aussi rarement.

On a donc été amené à considérer, comme cause possible des "glitches", aussi bien des tremblements de la croûte (la rotation rendant l'étoile oblate, la croûte a tendance à se briser; l'étoile réaménage ainsi sa structure et modifie donc son moment d'inertie, ce qui produit une variation de sa vitesse de rotation) que des couplages complexes entre la croûte solide et l'intérieur superfluide (c'est-à-dire sans frottement) par l'intermédiaire des tourbillons engendrés par la rotation. De même, les propriétés physiques d'un coeur solide ou celles liées à la dynamique de transition de phases de la matière dense, pourraient expliquer ces "glitches". Dans tous les cas, même en adoptant un modèle bien défini de la matière ultra-dense, la complexité des phénomènes possibles rend généralement toute conclusion peu convaincante.

Conclusion.

Il peut être intéressant de noter que tôt ou tard les pulsars auraient été découverts. En effet, alors que les radiotélescopes usuels permettaient d'observer dans les domaines de longueur d'onde décimétrique, il était nécessaire - afin d'étudier les problèmes de scintillation du vent solaire - d'opérer avec des longueurs d'onde de l'ordre du mètre et surtout avec de faibles temps de résolution (c'est-à-dire avec la possibilité de mesurer des variations très rapides du signal). Or, précisément, c'étaient là les deux conditions essentielles à la découverte des pulsars. Ajoutons ainsi que, même si Landau (voire W. Baade et F. Zwicky) n'avaient pas "inventé" les étoiles à neutrons, la seule observation des pulsars, et en particulier celui du Crabe, jointe à ce que l'on sait des réactions nucléaires (capture bêta), aurait conduit à les imaginer.

Ce bref tour d'horizon correspond à peu près aux idées courantes et au consensus qui règnent actuellement dans la communauté astrophysique. En dépit de nombre d'incertitudes portant aussi bien sur la structure interne que sur les mécanismes d'émission des pulsars, on s'accorde à identifier ces derniers aux étoiles à neutrons selon un schéma tout à fait satisfaisant. Nous nous sommes bornés à ce qui est raisonnablement sûr actuellement. Mais bien d'autres aspects sont étudiés de manière intensive au niveau théorique et/ou observationnel: refroidissement et âge des pulsars; émission de bouffées de rayonnement gamma; disques de matière autour d'une étoile à neutrons; problèmes de stabilité; problèmes de la magnétosphère; etc... Il faut cependant préciser que dans tous les cas on a affaire à des problèmes d'une extraordinaire complexité, faisant appel à tous les domaines de pointe de la physique, et que les solutions apportées à un moment donné sont souvent provisoires et tributaires des progrès d'autres spécialités. Toutefois, nul doute que dans les années qui viennent, bon nombre de questions seront résolues.

Rémi Hakim

N'oubliez pas de vous réabonner aux Cahiers Clairaut et de payer votre cotisation 1985 au CLEA !!!
