

ETOILES A NEUTRONS ET PULSARS

Note de la Rédaction: Nous commençons ici la publication d'une série d'articles consacrée aux étoiles à neutrons et à la façon dont elles se manifestent à nous sous la forme de pulsars. Le souci de maintenir dans chaque numéro des Cahiers une certaine diversité dans les sujets traités et de limiter, pour des raisons financières évidentes, le volume de chaque numéro, nous conduit à adopter cette présentation en "feuilleton".

* * * * *

Il y a une cinquantaine d'années qu'au cours d'une discussion d'après dîner, le physicien soviétique L. Landau, prix Nobel 1962, suggérait la possibilité que des étoiles d'un type nouveau, les étoiles à neutrons, puissent exister. Aujourd'hui, non seulement ces étoiles ont été découvertes mais leur étude constitue un domaine de l'astrophysique en pleine expansion, stimulé par les données toujours plus précises apportées par les radiotélescopes et surtout par divers satellites artificiels conçus pour détecter les rayonnements X et gamma. La théorie de ces objets suscite également de nombreuses recherches sur les propriétés et la description de la matière nucléaire à haute densité, recherches qui progressent avec l'évolution de la physique nucléaire et des particules élémentaires. Bien plus, l'observation astronomique permet - dans une certaine mesure - de rejeter certaines théories de la matière nucléaire! En outre, la découverte d'un pulsar double (c'est-à-dire de deux étoiles à neutrons tournant l'une autour de l'autre) en 1975, jointe à des calculs théoriques menés à bien en 1982 grâce à une collaboration entre des chercheurs de l'Observatoire de Meudon et de l'Institut Henri Poincaré à Paris, a permis une vérification d'une précision inégalée de la Relativité Générale d'Einstein.

L'idée des étoiles à neutrons provenait d'une analogie avec les naines blanches (voir l'encadré), étoiles dont l'équilibre est assuré par la pression dite de Fermi exercée par les électrons présents dans la matière. Cette pression, d'origine purement quantique, est due au principe d'exclusion de Pauli (1925): deux électrons ne peuvent se trouver simultanément dans le même état et donc au même endroit; il s'ensuit qu'ils se "repoussent", exerçant ainsi une pression, la pression de Fermi (1926). Cette répulsion entre électrons n'a rien à voir avec la répulsion électrostatique usuelle mais est caractéristique de certaines particules élémentaires, les fermions. Ainsi le neutron - un constituant fondamental du noyau atomique, découvert par Chadwick en 1932 - est un fermion (non chargé) qui obéit au principe d'exclusion de Pauli. C'est pourquoi L. Landau, qui avait travaillé sur les naines blanches, avait imaginé qu'une masse de neutrons - un gigantesque noyau atomique - pourrait former un système stable qui ne s'effondrerait pas sous l'effet de son propre poids, grâce à la pression de Fermi des neutrons.

Quelques temps après, W. Baade et F. Zwicky (1934) suggéraient l'existence éventuelle d'un tel objet au centre de la nébuleuse du Crabe, reste de l'explosion d'une supernova, explosion observée par les astronomes chinois, coréens et japonais en 1054 (voir l'encadré).

En 1939 R. Oppenheimer et G. Volkov montraient que l'hypothèse de L. Landau n'était pas aussi farfelue qu'elle pouvait le paraître à première vue, mais était parfaitement compatible avec la Relativité Générale et des hypothèses simples sur la matière neutronique. Leur calcul donnait une masse maximale de $0,7$ masse solaire, pour un rayon de 15 km, ceci pour une densité centrale de $3,6 \times 10^{15}$ g cm⁻³ (un peu plus de dix fois la densité au coeur d'un noyau atomique).

En 1967 les pulsars étaient découverts par un groupe de radioastronomes de Cambridge et aussitôt identifiés (1969) aux étoiles à neutrons par T. Gold. Les pulsars sont des sources intenses de rayonnement divers qui sont observés sous forme d'impulsions périodiques extrêmement stables.

Voilà donc brièvement résumée l'histoire de la découverte des étoiles à neutrons. En réalité, celle-ci est loin d'être aussi simple; c'est pourquoi nous avons indiqué sur un diagramme comment théorie, expérience et observation se sont conjuguées pour aboutir au consensus qui règne actuellement dans la communauté astrophysique quant à l'existence des étoiles à neutrons et à leur identification aux pulsars. Nul doute que le lecteur y trouvera matière à quelques réflexions philosophiques sur la complexité de

LES TROIS STADES FINAUX DE LA VIE D'UNE ETOILE

L'existence et l'évolution des étoiles sont conditionnés par l'ajustement successif de deux facteurs antagonistes. D'une part la masse de l'étoile tend à la faire s'effondrer sur elle-même tandis que, d'autre part, la pression des matériaux brûlés dans des réactions thermonucléaires complexes s'oppose à cet effondrement. Si le premier facteur l'emporte, l'étoile s'effondre; si, au contraire, la pression prédomine, elle peut exploser.

Considérons, pour fixer les idées, une étoile qui initialement serait composée d'hydrogène. Sous l'effet de son propre poids elle commencerait à s'effondrer. L'hydrogène qui la compose est alors comprimé et s'échauffe. Arrive ensuite un moment où la température atteinte est suffisamment importante pour que des réactions de fusion thermonucléaire se produisent conduisant à la formation d'hélium. Ces réactions dégagent de l'énergie, échauffent encore le matériau constitutif de l'étoile et la pression qui en résulte stoppe l'effondrement. Cet équilibre de l'étoile, qui ne s'effondre donc plus, dure tant qu'il existe de l'hydrogène à "brûler". Lorsque celui-ci s'épuise, l'étoile recommence à s'effondrer...jusqu'à ce que la température à laquelle les noyaux d'hélium puissent brûler à leur tour dans des réactions thermonucléaires soit atteinte, dégageant de l'énergie et maintenant un nouvel équilibre pour l'étoile. Et ainsi de suite. Par l'intermédiaire de réactions complexes, il est possible d'obtenir du fer 56 qui, lui, ne peut brûler qu'en absorbant de l'énergie au lieu d'en produire, rendant l'effondrement inéluctable.

La mort d'une étoile représente cependant un processus complexe, dont tous les détails ne sont pas encore bien connus et qui, en tout état de cause, dépend étroitement des conditions initiales (masse, composition chimique, température). En particulier les trois stades finaux possibles - trou noir, naine blanche et étoile à neutrons (figure 1) correspondent à des conditions initiales différentes.

Les naines blanches ont longtemps posé une énigme aux astrophysiciens: par quel mécanisme physique peut-on engendrer la "pression absurde" (A.S. Eddington) nécessaire à leur équilibre? Leur très grande densité (10^5 à 10^6 g cm⁻³) et leurs masses (de l'ordre d'une masse solaire) exigeaient en effet une pression énorme pour en assurer l'équilibre. Ce problème ne fut résolu qu'en 1926 par R.H. Fowler qui comprit le premier que la pression de Fermi des électrons à haute densité était précisément cette pression "absurde".

Les étoiles à neutrons représentent un autre état final possible de l'évolution stellaire. On pense actuellement qu'elles se forment lors de l'explosion d'une supernova: les couches externes de l'étoile sont soufflées par des réactions thermonucléaires explosives tandis que le coeur de l'étoile, d'une composition différente, continue à s'effondrer sur lui-même jusqu'à ce que la plupart des électrons de la matière soient absorbés par les protons des noyaux pour donner essentiellement des neutrons (figure 2).

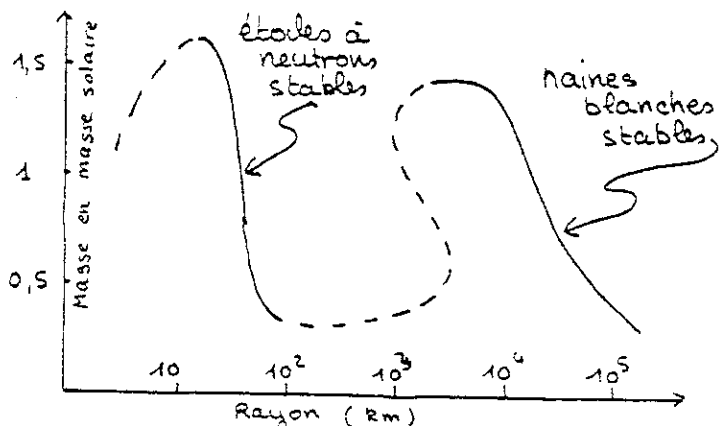


Figure 1

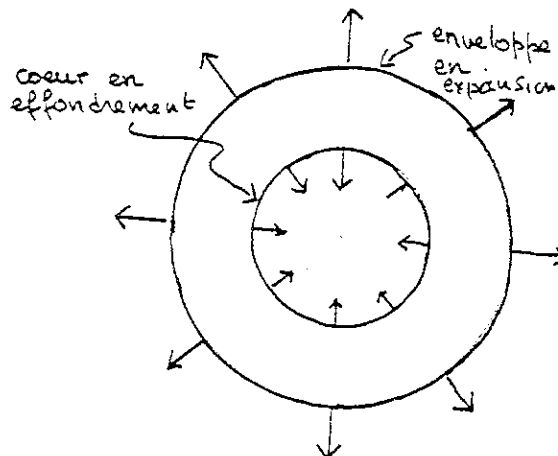


Figure 2

LA NEBULEUSE DU CRABE

La nébuleuse du Crabe joue un rôle très particulier - et même essentiel - dans l'identification des pulsars aux étoiles à neutrons et, comme nous le verrons plus loin, dans l'élimination d'hypothèses un instant plausibles concernant les pulsars. Aussi convient-il d'en dire quelques mots.

La nébuleuse du Crabe constitue le reste de l'explosion d'une supernova, explosion observée en 1054 par les astronomes chinois, coréens et japonais.

Voici en quels termes l'astronome impérial Yang Wei-Té le rapporte en 1054: "j'ai observé le phénomène d'une étoile-invitée. Sa couleur était légèrement irisée. Suivant un ordre de l'Empereur, je fis respectueusement la prédiction que l'étoile-invitée ne perturberait pas Aldébaran ... Ceci indique que ... le pays aura une grande puissance. Je sollicite la permission d'inscrire cette prédiction dans les Archives Impériales."

Cette explosion était visible à l'oeil nu et l'était restée pendant plusieurs mois avant de disparaître; d'où le nom d'"étoile-invitée" ou d'"étoile-hôte" que donnaient les chinois à ce type d'objet astronomique.

Cependant, loin d'être une étoile "nouvelle" une supernova signale plutôt la mort d'une étoile; les couches externes de l'étoile explosent et sont projetées dans l'espace tandis que le coeur s'effondre sur lui-même donnant lieu, ainsi que l'ont suggéré W. Baade et F. Zwicky en 1932 à une étoile à neutrons: "Avec toutes réserves, nous suggérons l'idée qu'une supernova représente la transition d'étoiles ordinaires en étoiles à neutrons..." Il s'agit d'un évènement relativement rare puisqu'une telle explosion se produit tous les 20 ou 30 ans dans notre galaxie. Malgré cela, elles ne sont pas toutes observées car la plus grande partie de la Voie Lactée (notre Galaxie) nous est cachée par d'énormes nuages de poussière interstellaire: c'est ainsi que Cassiopée A est une radiosource qui aurait dû être observée comme une supernova il y a deux ou trois siècles, n'était cette poussière. Outre l'explosion de 1054, d'autres tels phénomènes ont été observés en 1572 par l'astronome danois Tycho Brahé et en 1604 par Kepler. Les archives des astronomes impériaux chinois en indiquent encore en 1006, probablement en 1181 et 135 et peut-être en 386 et 393.

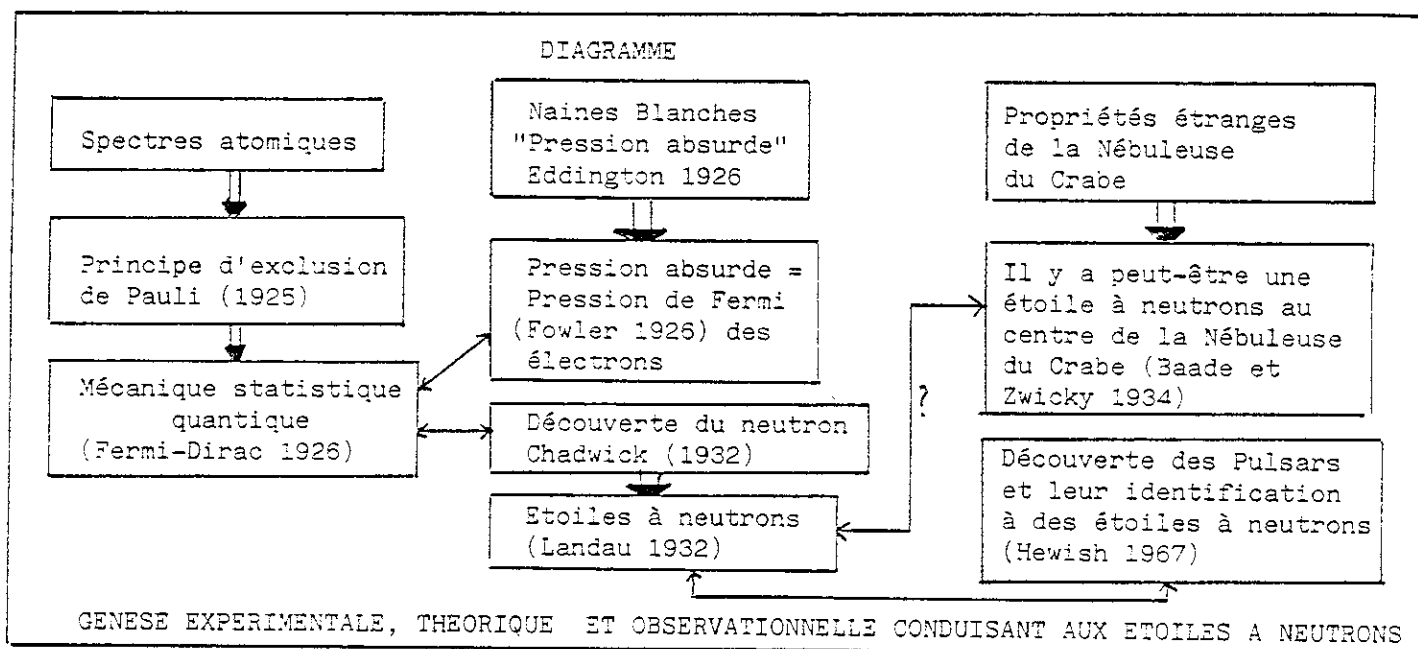
La nébuleuse du Crabe apparaît actuellement comme une masse brillante ayant une structure filamenteuse lorsqu'on en étudie les clichés pris dans la raie H α de l'hydrogène. En outre, on constate qu'elle s'épand rapidement avec une vitesse de l'ordre de 800 km s⁻¹: ceci est d'ailleurs perceptible sur des clichés pris à plusieurs années d'intervalle. Elle est située à la distance de 2 000 parsecs (un parsec est égal à 3,26 années de lumière). Le rayonnement émis par la nébuleuse du Crabe dans le domaine visible est fortement polarisé, ce qui est très caractéristique du rayonnement synchrotron (rayonnement émis par des électrons de très haute énergie spiralant dans un champ magnétique). La puissance totale émise dans le domaine des rayons X conduit à une estimation de l'intensité du champ magnétique de l'ordre de 2 x 10⁻⁴ gauss et des énergies moyennes pour les électrons responsables du rayonnement synchrotron de l'ordre de 10¹⁰ électrons volts. Le débit total d'énergie peut être estimé à environ 10³⁸ erg s⁻¹.

A peu près au centre de la nébuleuse se trouvent deux étoiles dont l'une, appelée d'abord l'objet de Baade, possède des propriétés inhabituelles: pas de raies mais au contraire un spectre en loi de puissance.

Dès 1934 se posait le problème qui a longtemps défié les astrophysiciens et qui sera résolu par l'identification de l'objet de Baade avec le pulsar du Crabe, l'étoile à neutrons envisagée par W. Baade et F. Zwicky. Le problème est que les électrons perdent de l'énergie en rayonnant, de sorte que leur durée de vie est, pour les énergies mises en jeu et l'intensité du champ magnétique de la nébuleuse du Crabe, de l'ordre de 10 ans seulement: il fallait donc trouver une source à peu près constante d'électrons "frais" qui permettent d'assurer la permanence du rayonnement observé. C'était là la principale raison de l'hypothèse de Baade et Zwicky en 1932.

la découverte scientifique et son cheminement tortueux. Ce n'est pas cependant dans le but de susciter de telles réflexions que nous donnons ce diagramme, mais plutôt d'éclairer ce qui va suivre: un exposé d'une question passablement enchevêtrée risque en effet d'être un peu déroutant...

Toutefois, la théorie des étoiles à neutrons et l'observation des pulsars sont très loin d'être achevées, très loin d'entrer dans le domaine des recherches de routine, car les physiciens disposent là d'un "laboratoire" unique où les avancées extrêmes de leurs spécialités peuvent parfois être testées. C'est pourquoi les recherches effectuées dans ce domaine sont extrêmement actives, qui portent aussi bien sur la physique nucléaire, des particules élémentaires et bien d'autres spécialités: on peut presque dire que chaque progrès de ces domaines de pointe suscite des applications aux étoiles à neutrons. De même les progrès constants de l'astronomie X et gamma, notamment ceux attendus d'expériences embarquées sur la navette spatiale (ou Spacelab) permettront de mieux comprendre encore ces passionnants objets et poseront, bien entendu de nouveaux problèmes.



Rémi Hakim

WILLIAM HERSCHEL ET URANUS

C'est l'astronome William Herschel qui découvrit, par hasard, la planète Uranus; vous le saviez peut-être. Mais savez-vous quel nom Herschel lui avait donné ?

Et qui baptisa la nouvelle planète du nom d'Uranus ?

Réponse: William Herschel avait donné à "sa" planète le nom de "Georgium sidus" du nom du roi Georges III d'Angleterre. Herschel était en effet l'astronome du roi Georges III. Le nom d'Uranus, dérivé de Ouranos, dans la mythologie grecque, fut choisi par Bode. Ouranos, fils de Gaia était le père des Cyclopes, des Titans et des monstres. Dieu du ciel, il fut détroné par son fils Cronos.