



aussi extrême qu'une étoile à neutrons. C'est seulement en 1967, lorsque Jocelyn Bell Burnell, alors en thèse à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont observé des pulsars (et que des chercheurs ont déterminé l'année suivante que ces pulsars devaient être des étoiles à neutrons en rotation) que l'idée s'est imposée.

D'après les astrophysiciens qui les étudient, les étoiles à neutrons auraient une masse comprise entre 1 et 2,5 fois celle du Soleil. Elles comporteraient au moins trois couches. La couche externe est une «atmosphère» gazeuse d'hydrogène et d'hélium de quelques centimètres d'épaisseur. Elle flotte au-dessus d'une «croûte» externe d'environ un kilomètre d'épaisseur et constituée de noyaux atomiques de fer disposés selon une structure cristalline, avec des neutrons et des électrons entre eux.

Le reste de l'astre, plus en profondeur, fait l'objet de davantage de spéculations. À mesure qu'on se rapproche du centre, la pression augmente et chaque noyau atomique renferme alors davantage de neutrons. Mais à partir d'un certain seuil, les noyaux saturent en neutrons, si bien qu'ils débordent: il ne s'agit plus de noyaux, mais juste d'un liquide de neutrons et de protons. Finalement, au plus profond de l'étoile, dans le noyau interne, il se pourrait bien qu'eux aussi se délitent. «Nous ne pouvons que spéculer sur cet état de la matière, car nous ne savons pas ce qui se passe avec des pressions et des densités aussi folles», commente Mark Alford. Au cœur de l'astre, dans le noyau interne, la densité pourrait

trouveraient poussés suffisamment près les uns des autres, ils formeraient des «paires de Cooper», à l'instar des électrons dans les matériaux supraconducteurs.

Un quark est un fermion, c'est-à-dire une particule dont le spin (moment cinétique intrinsèque) a, dans les unités appropriées, une valeur demi-entière ($1/2$ ou $3/2$, $5/2$, etc.). Un système de deux quarks se comporte comme un boson, une particule de spin entier (0, 1, etc.). Or les fermions et les bosons ne suivent pas les mêmes règles. Les premiers se conforment au principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Les bosons ne sont pas soumis à une telle restriction. Individuellement, les quarks d'une étoile à neutrons sont obligés d'occuper des énergies toujours plus élevées pour satisfaire à la fois le principe d'exclusion de Pauli et la densité écrasante. Mais associés en paires pour former des bosons, ils peuvent rester dans l'état de plus basse énergie (la configuration privilégiée de tout système physique) et néanmoins s'entasser. Et dans ce cas, les paires de quarks forment un superfluide.

UN CŒUR SUPERFLUIDE ?

Même en dehors du cœur, dans le noyau externe, où les neutrons seraient encore intacts, ces derniers pourraient aussi s'apparier pour former un superfluide. En fait, les scientifiques sont quasiment certains que les neutrons se comportent ainsi. Les preuves viennent de l'observation des «glitches» des pulsars, des épisodes où la rotation de l'étoile à neutrons accélère soudainement.

Les théoriciens pensent que ces glitches se produisent quand la vitesse de rotation de l'étoile dans son ensemble se désynchronise de la rotation du superfluide sous la croûte. Globalement, la rotation de l'étoile ralentit naturellement au fil du temps car l'astre perd de l'énergie par l'émission d'un rayonnement électromagnétique et d'un vent stellaire; au contraire, le superfluide, qui s'écoule sans friction, ne ralentit pas. La contrainte mécanique engendrée par la différence de vitesse entre les deux couches emmagasine de l'énergie, laquelle se libère brutalement sous la forme de moment cinétique, ce qui réaccélère l'étoile. «C'est comme un tremblement de terre, explique James Lattimer; vous avez un hoquet et un sursaut d'énergie; la fréquence de rotation augmente brièvement avant de rediminuer.»

En 2011, James Lattimer et ses collègues ont affirmé avoir trouvé des indices de superfluidité dans le cœur d'une étoile à neutrons, mais le chercheur admet que le débat reste ouvert. Son équipe, dirigée par Dany Page, de l'université nationale autonome du Mexique, a analysé les données de quinze ans d'observation en rayons X de Cassiopee A (voir la photo ci-contre), >

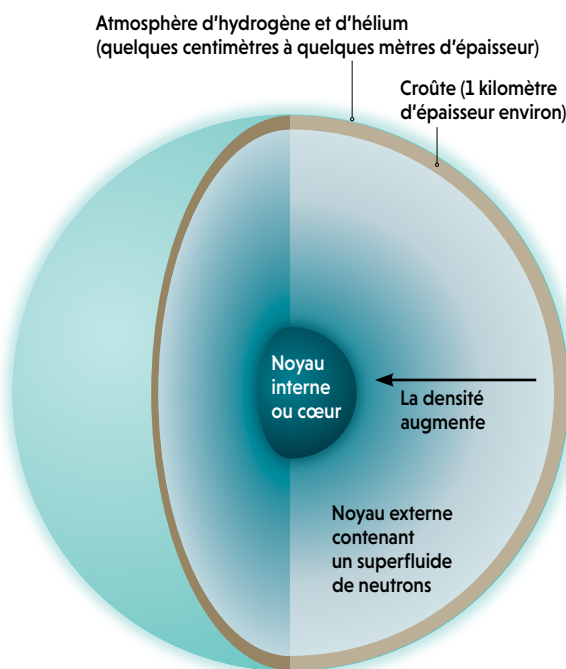
La densité au cœur d'une étoile à neutrons serait 4 à 6 fois celle des noyaux atomiques

être 4 à 6 fois supérieure à celle des noyaux atomiques. «Il se peut que les neutrons soient écrasés les uns contre les autres et qu'on ne puisse plus vraiment parler d'un fluide de neutrons, mais d'un fluide de quarks.»

À quoi ressemble ce fluide? Une possibilité est que ces quarks forment un «superfluide», dépourvu de viscosité et qui, une fois mis en mouvement, ne s'arrêtera théoriquement jamais de bouger. Cet étrange état de la matière est envisageable car les quarks ont une affinité pour les autres quarks, et s'ils se

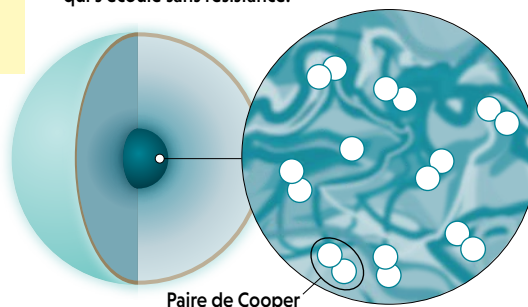
À L'INTÉRIEUR D'UNE ÉTOILE À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons sont une énigme. On sait que leur surface est constituée d'une mince atmosphère gazeuse, surmontant une épaisse croûte de noyaux atomiques lourds (surtout du fer). Mais sous ces couches, la nature de la matière, que l'on suppose constituée principalement de neutrons, reste mal connue. À l'intérieur du cœur dense, la forme que revêtent ces neutrons, et leur possible décomposition en quarks et gluons, reste une question ouverte.



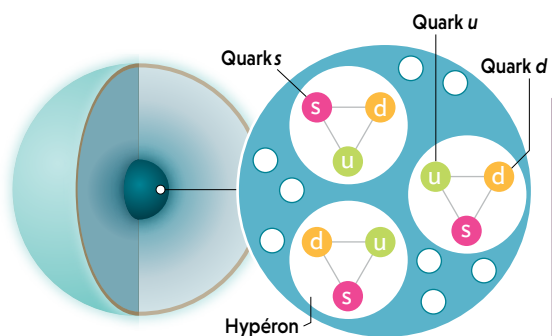
LE CŒUR, HYPOTHÈSE 1: DES MERS SUPERFLUIDES

Une possibilité est que les nucléons se transforment en un plasma de quarks et de gluons dans le noyau interne. Les quarks seraient alors tellement serrés qu'ils s'associeraient par deux pour former des « paires de Cooper ». Ces paires créent un « superfluide » qui s'écoule sans résistance.



LE CŒUR, HYPOTHÈSE 2: DES QUARKS ÉTRANGES

L'incroyable densité pourrait également entraîner la transformation des quarks du noyau interne, habituellement de types *u* ou *d*, en quarks exotiques *s*. Si les quarks se trouvent encore au sein de neutrons, ces neutrons deviendraient alors des hypérons.



> le vestige d'une supernova devenue visible au début du XVII^e siècle. Les astronomes ont trouvé que le pulsar au centre de la nébuleuse se refroidit plus vite que la théorie ne le suggère.

Une explication serait qu'au début de la formation du superfluide, beaucoup de neutrons s'appariaient, mais que ces paires, instables, se dissocieraient et se reformeraient souvent. Cette activité s'accompagnerait d'une importante émission de neutrinos vers l'espace. Ces particules emporteraient une grande quantité d'énergie, d'où le refroidissement plus rapide que prévu de l'astre. « C'est quelque chose que nous n'aurions jamais imaginé voir, commente James Lattimer. Mais par chance, cette étoile a juste l'âge qu'il faut pour voir cet effet. La confirmation viendra dans une cinquantaine d'années si l'astre commence à se refroidir plus lentement, parce qu'une fois que le superfluide est constitué, il ne reste plus d'excédent d'énergie à perdre. »

Les étoiles à neutrons pourraient ainsi héberger un superfluide dans leur noyau externe

et interne. Ils pourraient aussi abriter de la matière dite étrange car elle contiendrait des quarks *s*, ou étranges (*s* pour *strange* en anglais).

DE LA MATIÈRE « ÉTRANGE » ?

Il existe six sortes, ou « saveurs », de quarks : *u*, *d*, *c*, *s*, *t* et *b*. On ne trouve dans les atomes que les deux plus légers, *u* et *d*. Les autres saveurs sont plus massives et instables. Elles apparaissent, par exemple, dans les collisions de particules à hautes énergies dans des collisionneurs tels que le LHC (*Grand collisionneur de hadrons*) du Cern, près de Genève. Mais dans l'intérieur très dense des étoiles à neutrons, les quarks *u* et *d* contenus dans les neutrons se transformeraient parfois en quarks *s* (les autres saveurs sont tellement massives qu'elles ne se formeraient probablement pas même dans ces conditions extrêmes). Si des quarks *s* apparaissent et restent liés aux autres quarks, cela produira des hypérons.

Enfin, il est aussi possible que ces quarks soient présents dans le plasma de quarks et de