



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