
A

UN RÉSUMÉ DÉTAILLÉ POUR LES NON-SPÉCIALISTES

Cette partie a pour but de décrire mes travaux de thèse pour les lecteurs non-spécialistes en astrophysique. La recherche scientifique, même très spécialisée, se doit d'être rendue accessible à tous, autant que possible. L'astronomie et l'astrophysique ont la chance d'attirer naturellement le public, notamment grâce aux multiples images spectaculaires provenant des nombreux télescopes sur Terre et dans l'espace. Cependant, il n'est pas rare d'entendre des personnes se demander quels sont les impacts et les applications directes des travaux de recherche en astrophysique. Mon but n'est pas vraiment de convaincre le lecteur de l'utilité de ma recherche, mais je suis néanmoins déterminé à rendre ce résumé aussi accessible que possible.

Mes travaux de recherche consistent, en quelques sortes, à faire des autopsies d'étoiles mortes. Je cherche à savoir ce qu'il y a à l'intérieur ; quel type de matière compose leur cœur. Contrairement à un médecin qui peut regarder directement l'intérieur d'un cadavre, il est bien évidemment impossible – pour le moment – d'étudier directement l'intérieur des étoiles ; mortes ou pas ! Si on ajoute à cela le fait qu'elles sont situées à des milliers d'années lumières¹, la tâche est loin d'être triviale. Il existe cependant des méthodes d'observation indirectes pour déduire des informations à propos de l'intérieur des étoiles mortes. Je les décris dans cette section, mais avant cela, il est important de d'expliquer ce qu'est une étoile morte, et de motiver ces autopsies.

¹Une année-lumière est une unité de distance, qui correspond à la distance parcouru par la lumière en une année, ce qui équivaut à 10 000 milliards de km.

On dit qu'une étoile meurt quand elle épuise le carburant qui nourrit les réactions nucléaires se produisant dans son cœur pendant toute la durée de sa vie. Quand cela arrive, l'équilibre délicat entre la force de gravité (dirigée vers l'intérieur) et la force de pression créée par les réactions nucléaires (dirigée vers l'extérieur) est détruit. Le destin de cette étoile en train de mourir dépend ensuite de sa masse initiale. Une étoile de faible masse, tel notre Soleil, va mourir lentement en grossissant puis en éjectant ses couches extérieures pour former une nébuleuse colorée et en laissant en son centre, un objet appelé naine blanche, un cadavre d'étoile, sans réactions nucléaires et refroidissant lentement. Les naines blanches ont environ la moitié de la masse du Soleil, mais compressée dans une sphère de la taille de la Terre. Cela correspond à environ 1 million de fois la densité de l'eau². Une étoile avec une masse initiale plus large (plus de 8 fois la masse de notre Soleil) va mourir d'une façon très différente, et bien plus spectaculaire, en explosant en supernova. Pendant cette explosion, le cœur de l'étoile mourante est compressé à des densités inimaginables, à cause de la force de gravité. Ce qui reste au centre après l'explosion en supernova dépend à nouveau de la masse initiale. Les étoiles les plus massives laissent ces mystérieux trous noirs dont rien ne s'échappe, pas même la lumière. Par contre, si l'étoile mourante n'est pas assez massive pour créer un trou noir (mais néanmoins au-delà de 8 masses solaires), l'objet central après l'explosion en supernova sera une étoile à neutrons, ces étoiles mortes que j'étudie. Elles sont composées de la matière la plus dense que l'on puisse trouver dans l'Univers. En compressant une étoile à neutrons un peu plus, la matière s'effondrerait sur elle-même pour former un trou noir, duquel on ne pourrait obtenir aucune information puisque la lumière ne s'en échapperait pas.

En ce sens, les étoiles à neutrons sont plus intéressantes que les trous noirs puisqu'elles possèdent une surface observable qui permet aux astrophysiciens d'étudier leurs propriétés. Ce sont néanmoins des objets très mystérieux. J'ai mentionné leur densité extrême : Essayez d'imaginer, si cela est possible, de compacter la masse du Soleil³

²Une cuillère de naine blanche aurait une masse de 5000 kg

³Soit 2×10^{30} kg, c'est-à-dire, 2 000 000 000 000 000 000 000 000 000 kg, ou deux milliards de mil-

dans une sphère de la taille d'une grande ville (Figure 1.1). Pour reprendre l'analogie utilisée ci-dessus, une cuillère d'étoile à neutrons aurait une masse de 3 milliards de tonnes, 600 millions de fois plus que la cuillère de naine blanche. Cette densité indescriptible est due au fait que les atomes ont été tellement compressés que tout le vide à l'intérieur des atomes (et il y a plus de 99.99% de vide dans les atomes à des densités normales) a été remplacé par le noyau d'autres atomes. Une analogie astronomique pour visualiser ce concept serait de complètement remplir l'espace interplanétaire de notre système Solaire par des planètes. Aucun laboratoire sur Terre n'est capable de reproduire le genre de densité rencontrée à l'intérieur des étoiles à neutrons. Par conséquent, l'observation de ces objets est l'unique moyen de comprendre comment ce type de matière peut exister. C'est l'une des pièces cruciales pour compléter le grand puzzle de la physique de la matière.

En l'absence de données expérimentales, les physiciens nucléaires proposent une pléthore de modèles théoriques pour tenter d'expliquer le comportement de la matière ultra-dense, c'est-à-dire, l'évolution de la pression de la matière quand la densité augmente. Sans aucun moyen expérimental de tester ces modèles, les étoiles à neutrons deviennent les laboratoires tant nécessaires. Il y a différentes manières de sonder l'intérieur des étoiles à neutrons et ainsi de déterminer le bon modèle théorique parmi ceux proposés. La méthode la plus commune est de mesurer le rayon et/ou la masse des étoiles à neutrons. En effet, chacun de ces modèles de physique nucléaire correspond à une relation masse-rayon très spécifique pour les étoiles à neutrons. Par conséquent, avec la mesure précise de la masse et du rayon d'étoiles à neutrons, on peut déterminer si un modèle proposé décrit de manière appropriée la matière ultra-dense qui existe à l'intérieur des étoiles à neutrons.

La méthode utilisée dans cette thèse consiste à mesurer le rayon d'une sélection d'étoiles à neutrons. En quelques mots, cela se fait en observant leur surface très chaude (de l'ordre du million de degrés) et en mesurant leur température et leur

flux lumineux, c'est-à-dire, leur brillance apparente. Un modèle d'émission lumineuse d'étoile à neutrons nous permet ensuite de convertir la brillance apparente en rayon réel de l'étoile à neutrons. Cependant, et c'est très important, cette méthode nécessite de connaître la distance de l'objet observé. C'est un problème très fréquent en astronomie. Sans connaître leur distance, il est très difficile de mesurer la plupart des propriétés des objets dans l'Univers. Par exemple, cela revient à regarder une source lumineuse (sans aucun autre point de référence), par exemple une ampoule, et d'essayer d'en estimer sa luminosité. Est-ce une ampoule peu brillante mais relativement proche, ou bien une ampoule très brillante mais à une distance plus grande ? Notre cerveau interprète l'environnement et nos connaissances des ampoules afin de déduire la distance ou la brillance. De manière similaire, les astronomes obtiennent des mesures indépendantes de distance, ce qui n'est pas toujours facile, afin d'obtenir les informations voulues à propos de la brillance et des propriétés de l'objet observé.

De retour à nos mesures de rayons d'étoiles à neutrons: nous avons choisi d'observer des étoiles à neutrons situées à l'intérieur d'amas d'étoiles (non-mortes). Les astronomes ont développé des méthodes indépendantes pour mesurer la distance de ces amas d'étoiles. Par conséquent, les étoiles à neutrons à l'intérieur des amas ont des brillances intrinsèques mesurables relativement précisément, comparées à celles des étoiles à neutrons dont on ne connaît pas la distance, par exemple, celles en errance dans notre Galaxie,

Pour que cette méthode de mesure de rayon fonctionne correctement, il faut observer les étoiles à neutrons qui sont inactives. La plupart des étoiles à neutrons qui pourraient être utilisés pour des mesures de rayons sont dans des systèmes binaires très actifs, avec des explosions spectaculaires à leur surface, ce qui rend la mesure de leur rayon très difficile. De plus, les étoiles à neutrons dans les systèmes binaires ont souvent un disque de matière qui les entoure et qui domine la brillance, et par conséquent qui complique l'observation. Pour éviter ce genre de problèmes, nous observons des étoiles à neutrons inactives dont l'émission de lumière est calme et

provient exclusivement de la surface de l'étoile à neutrons. Il n'y a cependant qu'une poignée connue de ces objets dans tous les amas d'étoiles de notre Galaxie.

Avec ces quelques rares objets, j'ai mesuré leur rayon entre 7 km et 11 km (effectivement la taille d'une ville). C'est cependant plus petit que la taille prédite par la plupart des modèles de physique nucléaire. L'incertitude de notre mesure est assez grande, et il y a encore beaucoup de travail afin d'obtenir des mesures plus précises. Mais si le rayon des étoiles à neutrons est confirmé en dessous de 10 km, il faudra revoir en grande partie les modèles théoriques de la matière ultra-dense. Il y a plusieurs moyens de réduire l'incertitude de notre mesure. Par exemple, les distances des amas d'étoiles qui hébergent nos étoiles à neutrons ne sont pas parfaitement connues, et ce manque de précision affecte notre mesure du rayon des étoiles à neutrons.

Il y a donc encore beaucoup de travail à effectuer dans la quête pour comprendre la matière ultra-dense et finir le grand puzzle de la physique de la matière. Cependant, les travaux de recherches présentés dans cette thèse ont permis de faire un grand pas dans ce sens.