

Faute de pouvoir être observées directement, les étoiles primitives demeurent une énigme pour les scientifiques. Aussi, le scénario de leur formation repose-t-il sur celui des étoiles connues, où la mystérieuse matière noire tient un faible rôle. Or, voilà qu'une astrophysicienne américaine émet une hypothèse audacieuse: la matière noire serait au cœur même de l'extraordinaire rayonnement de ces premiers astres titanesques.

# Etoiles noires

## Elles seraient les premiers astres

Par Mathieu Grousseau

Imaginez le spectacle: il y a plus de 13 milliards d'années, notre Univers vit sa prime jeunesse, les futures galaxies ne sont encore que des nébuleuses de poussière et, en leur centre, voici que brillent des boules de gaz mille fois plus lourdes, deux mille fois plus grandes et un million de fois plus lumineuses que ne le sera jamais notre Soleil! Titanesques, inouïs, ces astres sont comme les phares d'un monde en gestation: les seules sources de lumière d'un espace par ailleurs obscur et glacé.

Ce spectacle sidéral de l'Univers primitif, on le doit à une physicienne américaine de l'université du Michigan, à Ann Arbor: à la lueur des équations

tourmant dans sa tête, Katherine Freese s'est aventurée dans les recoins sombres des premiers temps du cosmos pour en ramener une vision inédite, qui bouleverse l'image qu'en avaient jusqu'ici les astrophysiciens. Car la chercheuse en est revenue convaincue que les premiers astres qui ont illuminé l'Univers furent ces monstres stellaires nichés au cœur des nébuleuses de poussière, qui →

### Au début de l'Univers...



▲ Extraordinairement massives et lumineuses, les étoiles noires auraient illuminé fugacement l'Univers 200 millions d'années après le big bang, avant de donner naissance aux étoiles classiques.

## Vie et mort d'une étoile noire

### La matière se concentre

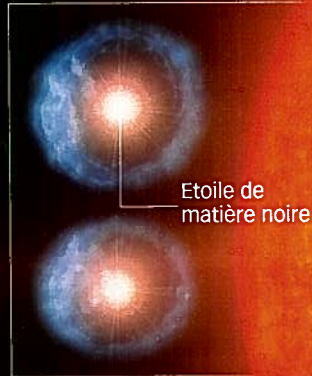
Environ 200 millions d'années après le big bang, l'Univers est structuré en halos contenant de la matière "normale" (principalement de l'hydrogène) et de la matière noire.



Halo de matière

### L'étoile noire s'allume...

Au centre d'un halo, les deux types de matière se concentrent. L'énorme pression provoque l'annihilation des particules de matière noire. L'astre s'enflamme, engendrant une étoile noire.



Etoile de matière noire

Terre, Soleil

Diamètre de l'étoile noire: 40 fois la distance Terre-Soleil

Annihilation de la matière noire

Cœur

→ apparurent 200 millions d'années après le big bang. Monstres qu'elle a baptisés "étoiles noires". Et pour cause. Ils auraient puisé leur extraordinaire rayonnement dans une énergie qu'aucune étoile, plus tard, ne saura exploiter: la destruction de particules de matière noire présente en leur sein.

L'hypothèse semble pour le moins étrange. Car, pour tout astrophysicien qui se respecte, toutes les étoiles de l'univers sont censées briller en consommant de l'hydrogène, via des réactions de fusion nucléaire, et non de la matière

noire. Et l'hypothèse est d'autant plus audacieuse que personne, à ce jour, n'a encore observé ne serait-ce que l'ombre d'une particule de cette fameuse matière exotique à la surface d'un détecteur – c'est même pour cette raison qu'elle a été baptisée ainsi. Pour autant, l'existence de cette hypothétique matière d'essence inconnue est désormais acceptée comme une quasi-nécessité. Sans elle, en effet, les physiciens (et, à travers eux, la théorie de la relativité d'Einstein qui décrit l'effet de gravitation) sont incapables d'expliquer la rotation des galaxies, celle des superamas ou encore la formation des grandes structures de l'Univers. En inventant le concept de matière noire

**"Personne n'avait encore étudié comment la matière noire affecte la physique interne de ces astres"**

KATHERINE FREESE, PHYSICIENNE, UNIVERSITÉ DU MICHIGAN, À ANN ARBOR

### UN SOLEIL MONSTRUEUX

#### COMPOSITION

99 % de matière classique  
1 % de matière noire

**RAYON** 2000 fois celui du Soleil

**MASSE** 1000 fois celle du Soleil

#### LUMINOSITÉ

1 million de fois celle du Soleil

#### TEMPÉRATURE DE SURFACE

Semblable à celle du Soleil

#### TEMPÉRATURE EN SON CENTRE

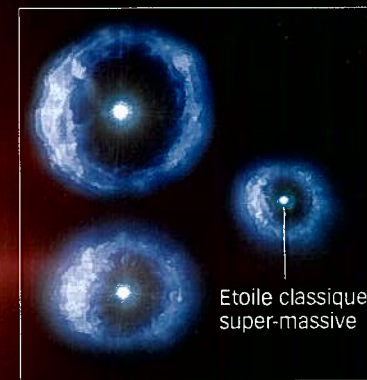
30 fois moindre que celle du Soleil

et en lui prêtant des effets gravitationnels justifiant les grands mouvements cosmiques, l'énigme prend un tour acceptable. A condition toutefois de ne pas lésiner sur les moyens: les calculs montrent que la matière noire doit, dans ce cadre, compter pour 85 % de la matière totale contenue dans l'Univers! Or, c'est justement cette omniprésence qui a mis Katherine Freese sur la piste de ses "étoiles noires", prêtes à faire

UMICH - P. CARRIL

### ...puis se transforme...

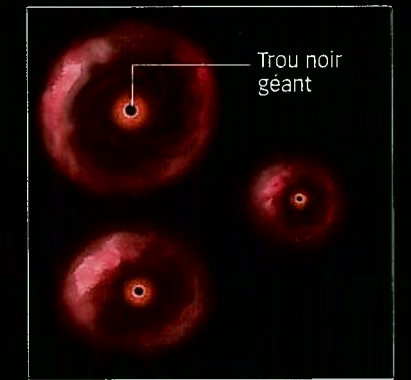
Lorsque toute la matière noire du cœur stellaire a été épuisée, l'étoile s'effondre. Le processus de fusion nucléaire de l'hydrogène s'enclenche alors: l'astre noir se transforme en étoile classique super-massive.



Etoile classique super-massive

### ...et devient un trou noir

L'hydrogène est, à son tour, rapidement consommé. L'étoile s'éteint en s'effondrant sur elle-même, donnant naissance à un trou noir géant (de 1000 à 10000 masses solaires), autour duquel va peu à peu s'organiser une galaxie.



Trou noir géant

leur entrée fracassante dans le panthéon de l'astrophysique. S'il est difficile d'imaginer à quoi ressemblerait le ciel à cette époque reculée, les astrophysiciens pensent que les premières étoiles sont apparues relativement rapidement: ce serait en leur sein qu'ont été produits les éléments chimiques lourds entrant dans la composition des étoiles plus récentes. Mais, faute de les avoir observées directement avec leurs télescopes – les plus lointaines images recueillies montrent les galaxies telles qu'elles étaient 600 millions d'années après le big bang, soit 400 millions d'années plus tard –, ils en sont réduits à spéculer sur la nature de ces astres primitifs

D'après les théories communément admises, la matière noire ne jouait qu'un rôle passif dans les scénarios de formation des étoiles primitives: c'est dans les zones de forte concentration

de cette masse invisible, appelées halos, que ces dernières auraient été forgées. Attirée par gravitation vers le centre de ce halo, la matière ordinaire – essentiellement de l'hydrogène – se serait peu à peu concentrée, cette contraction se poursuivant jusqu'à ce que la densité soit suffisante pour que s'amorcent les réactions nucléaires dont l'énergie dégagée allume l'astre et l'empêche de s'effondrer sur lui-même.

### UN RÉSULTAT INATTENDU

Mais la matière noire s'est-elle contentée de ce rôle passif de catalyseur? Rien n'est moins sûr. "Si on sait que les premières étoiles résultent de la gravité imposée par la matière noire au sein des halos, explique Katherine Freese, personne n'avait encore étudié en détail la manière dont cette matière noire affecte la physique interne de ces astres primordiaux." Et grâce à cette spécialiste de l'astrophysique des particules, c'est désormais chose faite... avec un résultat inattendu. D'après les calculs théoriques qu'elle et ses

collaborateurs ont effectués, l'effondrement de la matière ordinaire au centre du halo sous l'effet de l'attraction due à la matière noire créée, en retour, une force de gravitation qui attire encore plus de matière noire. Certes, cette matière exotique ne dépasse pas 1 % de la masse de la future étoile, mais sa densité finit par être suffisante pour que les particules qui la constituent commencent à s'entrechoquer. Or, le modèle le plus en vogue auprès des physiciens présente ces énigmatiques particules comme leurs propres antiparticules: la rencontre de deux d'entre elles entraînerait inévitablement leur annihilation totale dans une formidable explosion d'énergie lumineuse. Résultat: alors que l'étoile en formation n'est encore qu'une gigantesque boule d'hydrogène dilué incapable d'engendrer le processus de fusion nucléaire, ce processus d'annihilation des particules de matière noire serait suffisamment efficace pour enflammer l'astre et stopper l'effondrement du nuage de gaz. Sur le →



## UNE PARTICULE FANTÔME MONDIALEMENT TRAQUÉE

Les astrophysiciens sont persuadés: une écrasante majorité de la matière de l'Univers est constituée de particules de nature inconnue et jamais observées. Et pour cause, ces particules, baptisées Wimps (Weekly Interacting Massive Particles: "particules massives interagissant faiblement") auraient la fâcheuse propriété de traverser la matière sans laisser la moindre trace. Ou du moins une trace si infime que la probabilité d'en attraper une dans un détecteur est mince. Pour autant, plusieurs équipes à

travers le monde tentent de relever le défi. En décembre dernier, après deux années d'observation, plus une troisième pour analyser les données, l'équipe du projet CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) a annoncé la probable détection de deux de ces particules, grâce à leur détecteur enfoui au fond d'une mine, dans le Minnesota (voir S&V n° 1109, p. 22). Une expérience similaire est en cours dans le Laboratoire souterrain de Modane (LSM), à la frontière franco-italienne. Quant aux physiciens

de l'expérience Dama/Libra, installée à 1400 m sous le massif italien du Gran Sasso, s'ils affirment avoir déjà détecté de la matière noire, leur observation n'a pour l'heure été confirmée par aucune des équipes concurrentes. Peut-être l'annonce victorieuse viendra-t-elle du LHC, l'accélérateur surpuissant du CERN. Si cette matière est bien composée de particules "supersymétriques" censées émerger du vide à la faveur d'énergies colossales, il est possible que le LHC soit à la mesure de ces très discrètes particules.



▲ En Savoie, le Laboratoire souterrain de Modane s'est lancé sur la piste des particules de matière noire.

primordiales des scénarios standard, bien que très massives, n'auraient pas excédé une grosse centaine de masses solaires, et auraient été beaucoup plus chaudes, leur couleur tirant plutôt vers le bleu", souligne Katherine Freese.

Si une telle découverte née de l'imagination d'une théoricienne ne manque pas de fasciner, encore faut-il évaluer la probabilité que ces astres exotiques aient réellement existé. Pour Romain Teyssier, au Service d'astrophysique du CEA, à Saclay, "il est clair que les étoiles primordiales intégraient de la matière noire en raison du processus de leur formation. Toute la question est de savoir si elle se trouvait en quantité suffisante pour être à l'origine de la combustion de ces étoiles. L'étude de Katherine Freese admet des processus d'accrétion de la matière noire qui sont à ce stade spéculatifs. Je ne dis pas qu'ils sont faux, mais ils restent à prouver". Volker Bromm,

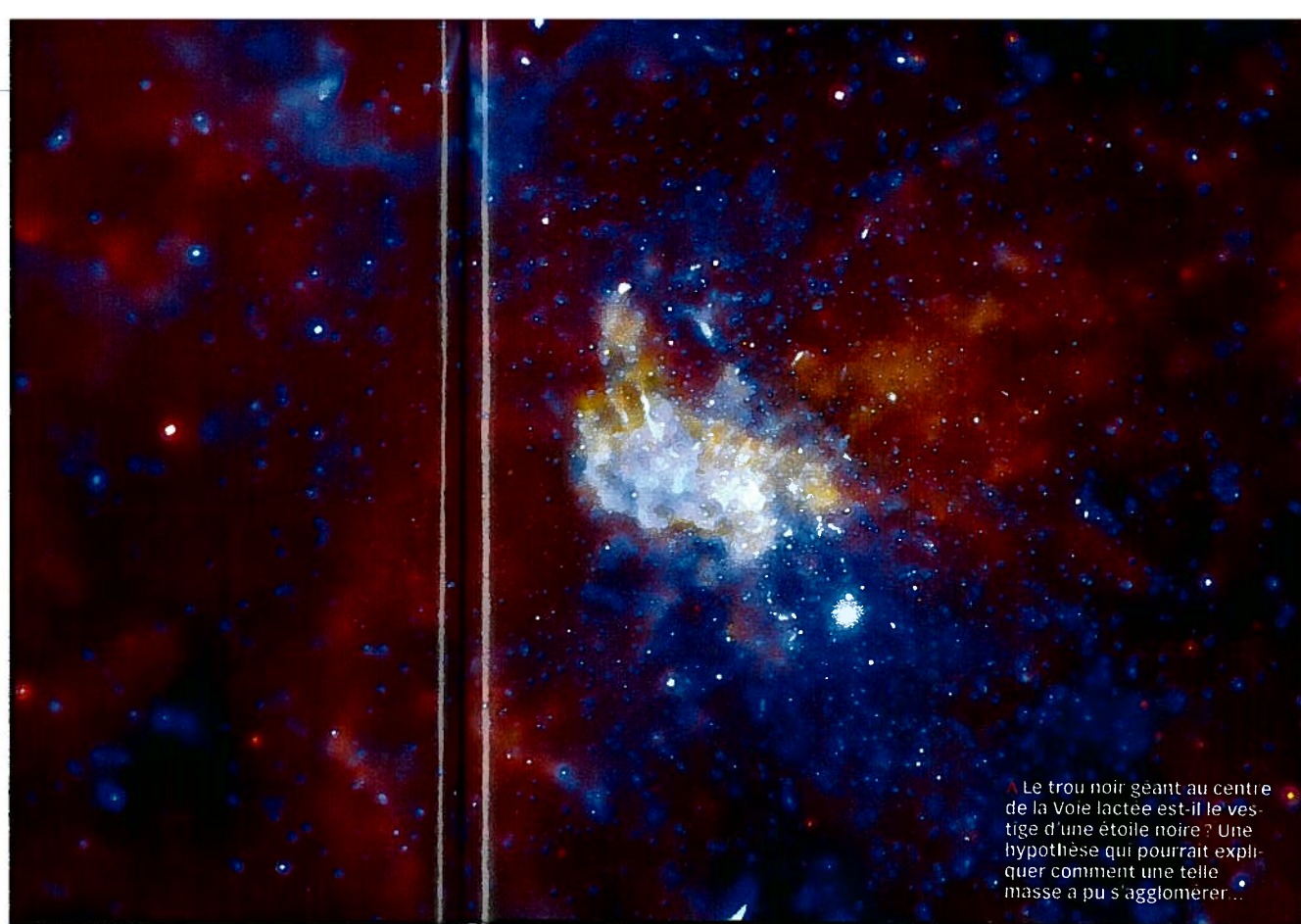
au département d'astronomie de l'université du Texas, à Austin (Etats-Unis), ajoute: "Ce scénario d'étoile noire est très intéressant et mérite d'être pris au sérieux. Pour autant, en l'absence d'observations directes, nous ne pouvons pas être absolument certains des propriétés de la matière noire. Même si celles invoquées par Katherine Freese sont plausibles."

### "Nos prochains télescopes seront capables de détecter ces monstres"

Ce point de vue est partagé par Patrick Hennebelle, au Laboratoire de radioastronomie de l'Ecole normale supérieure, à Paris, qui précise néanmoins: "Si les propriétés de la matière noires sont mal connues, cela vaut pour l'ensemble de la physique de l'univers primordial. Les étoiles noires font donc désormais partie des choses envisageables. Après tout, avant d'être observés, les trous noirs ou

les naines blanches faisaient figure d'objets théoriques exotiques!" Pour sa part, Pierre Salati, au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules, suggère: "Peut-être faut-il imaginer un univers primordial qui aurait été à la fois peuplé d'étoiles noires et d'étoiles plus classiques. Les premières se seraient formées dans les halos où la concentration en matière noire était la plus élevée."

De son côté, Katherine Freese invoque un autre argument en faveur de sa fascinante hypothèse. La physicienne a en effet montré qu'au terme des quelques centaines de milliers d'années durant lesquelles l'astre noir brûle son carburant exotique, la matière ordinaire dont il est majoritairement composé finit par s'effondrer sur elle-même pour donner naissance... à



Le trou noir géant au centre de la Voie lactée est-il le vestige d'une étoile noire? Une hypothèse qui pourrait expliquer comment une telle masse a pu s'agglomérer...

une étoile standard! De masse colossale, celle-ci brûle alors son carburant nucléaire extrêmement rapidement avant de finir sa vie en s'effondrant sous l'effet de son propre poids pour donner naissance à un trou noir.

### AVANT LA FIN DE LA DÉCENNIE...

Or, comme l'explique l'astrophysicienne, "nos prédictions indiquent des trous noirs colossaux de 1000 à 10000 masses solaires qui pourraient être à l'origine des trous noirs géants observés au centre des galaxies, y compris la Voie lactée, dont l'origine reste encore une énigme". Contrairement aux modèles classiques, l'hypothèse des étoiles noires permet ainsi d'expliquer comment ont pu s'agglomérer des masses aussi vertigineuses.

Mais, pour donner véritablement corps à ces mystérieuses étoiles n'ayant pour l'heure d'existence que sur le papier et dans les entrailles d'un ordinateur, il faudra dans un premier temps prouver l'existence de la matière noire elle-même (voir encadré p. 96). Et, surtout, en portant notre regard suffisamment loin dans l'espace, et donc suffisamment loin dans le passé, il faudra détecter réellement la présence de ces monstres galactiques. Actuellement, aucun télescope n'est assez puissant pour apercevoir cette éventuelle lueur laissée par les premières étoiles au plus profond du ciel. Mais comme l'espère Katherine Freese, "la prochaine génération de télescopes spatiaux, tel le James Webb Space Telescope, dont la mise sur orbite est prévue avant la fin de la décennie, en sera probablement capable." Les astrophysiciens verront alors sortir des ténèbres l'Univers primordial, sous la lumière de ses premières étoiles. Brillant de mille feux, certaines seront peut-être "noires". Et le panthéon de l'astrophysique sera bien obligé d'ouvrir grandes ses portes à ce nouveau titan de l'espace. ■

→ papier, une étoile noire est née! Et ses caractéristiques, radicalement différentes de celles des étoiles primitives prévues par les modèles classiques en vigueur, donnent le vertige...

De noire, cette étoile n'en a bien sûr que le nom: d'après les calculs de la scientifique américaine, sa couleur, oscillant entre le jaune et l'orangé, est

très proche de celle du Soleil, mais en incroyablement plus lumineux. Attirant de plus en plus de matière en son sein, cette étoile noire finit rapidement par devenir un monstre de près de 1000 masses solaires pour un rayon avoisinant les 3 milliards de kilomètres, soit la distance entre le Soleil et Uranus! "En comparaison, les étoiles