

noires

du fond des âges



L'ESSENTIEL

- La première génération d'étoiles s'est formée au sein des halos de matière noire entre 50 et 500 millions d'années après le Big Bang.
- Ces astres sont plus grands et plus lumineux que les étoiles ordinaires.
- Ils puisent leur énergie dans l'annihilation de neutralinos, particules hypothétiques qui composent la matière noire.
- Une nouvelle génération de télescopes permettrait de les observer directement, grâce au phénomène de lentille gravitationnelle.

© Monolithic Studios/Kern Brown

1. DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL, la matière noire est regroupée en filaments et en halos au sein desquels se sont constituées les premières étoiles.

noire aurait servi de source d'énergie à ces étoiles primordiales, que l'on peut ainsi qualifier d'étoiles noires.

La première génération d'étoiles aurait donc connu une évolution stellaire atypique et très différente de celle des étoiles actuelles. Comprendre le fonctionnement des étoiles noires permettrait de compléter la vision que les astrophysiciens ont de la vie des étoiles depuis leur toute première génération.

Le modèle que nous avons proposé en 2007 et que nous décrivons ici rend compte de l'évolution des étoiles noires : comment elles sont nées, comment elles sont devenues lumineuses grâce à l'annihilation de matière noire et comment elles sont mortes. Ces travaux restent à confirmer par des observations. Cette tâche est complexe en raison de l'éloignement temporel des étoiles noires : elles ont disparu il y a 13 milliards d'années et la lumière qui nous en parvient aujourd'hui est très atténuée, quasi indétectable.

En outre, la matière noire constitue une énigme supplémentaire. Les particules qui la composent restent à identifier. Toutefois, comme nous le verrons par la suite, les caractéristiques générales de la matière noire permettent de concevoir toute l'évolution de ces étoiles, depuis leur formation jusqu'à leur fin. Enfin, ces modèles d'étoiles noires laissent entrevoir quelques espoirs d'en observer la trace grâce à une future génération de télescopes spatiaux.

La fin de l'âge sombre

La première génération d'étoiles s'est formée alors que l'Univers était âgé de 50 à 500 millions d'années. Leur naissance a mis fin à ce qu'on nomme l'« âge sombre », qui a succédé à un phénomène crucial pour la cosmologie moderne, la « recombinaison ». Dans le cadre du modèle du Big Bang (voir la figure 2), l'Univers est en expansion et sa température ne cesse de décroître. Il a connu différentes phases. Vers 375 000 ans, il s'était suffisamment refroidi – à environ 3 000 degrés (en kelvins) – pour que les électrons et les noyaux aient pu s'associer et former un gaz électriquement neutre d'atomes d'hydrogène et d'hélium : c'est la recombinaison. La lumière, qui interagissait fortement avec le plasma chargé, a pu alors s'échapper et s'est propagée dans l'espace jusqu'à aujourd'hui, près de 13,8 milliards d'années plus tard. Ce rayonnement, dit du fond diffus cosmologique, est une mine

d'informations sur la structure de l'Univers, sa géométrie et sa composition, en particulier les proportions de matière ordinaire et de matière noire. Les cosmologistes étudient ce rayonnement aujourd'hui grâce à des sondes spatiales telles que WMAP, lancée en 2001 par l'Agence spatiale américaine, ou *Planck*, mise en orbite en 2005 par l'Agence spatiale européenne.

Avec la recombinaison, l'Univers, rempli de gaz froid et sans source de lumière, est entré dans l'âge sombre. Un observateur de cette période n'aurait vu aucune lumière dans le spectre visible et aurait été plongé dans l'obscurité. Cette période a pris fin lorsque les premières étoiles se sont embrasées, entre 50 et 500 millions d'années après la naissance de l'Univers. La condensation du gaz primordial d'hydrogène et d'hélium en nuages protostellaires a conduit à l'apparition des premiers objets lumineux, dont l'intense émission dans l'ultraviolet a ionisé les atomes du milieu intergalactique. Les mesures de la sonde WMAP indiquent que cette réionisation s'est achevée vers 480 millions d'années.

Les premières étoiles, également qualifiées de population III (elles se distinguent des étoiles actuelles de population II, pauvres en métaux, et des étoiles de population I, riches en métaux car plus récentes), ont dû apparaître relativement tôt au cours de l'âge sombre pour provoquer la réionisation.

■ LES AUTEURS



Katherine FREESE est professeur de physique à l'Université du Michigan, aux États-Unis, et directrice adjointe du Centre de physique théorique du Michigan.



Paolo GONDOLLO est professeur de physique et directeur de l'Institut d'astrophysique de haute énergie à l'Université de l'Utah, aux États-Unis.



Pierre SALATI est professeur à l'Université de Savoie et au Laboratoire de physique théorique d'Annecy-le-Vieux.

En général, les étoiles se forment par effondrement gravitationnel des nuages de gaz. Mais le processus est trop lent pour que le gaz se soit condensé seul et efficacement avant la réionisation. La solution a été de supposer que l'Univers recelait une autre composante susceptible d'aider la matière à s'agglomérer. Il s'agit d'un type différent de matière capable de constituer des zones denses, sous forme de mini-halos, avant même la recombinaison, et soumis à ses propres effets gravitationnels. Ces mini-halos auraient grandi et formé par la suite des pièges pour la matière ordinaire, où seraient apparus les premiers objets stellaires.

Indispensable matière noire

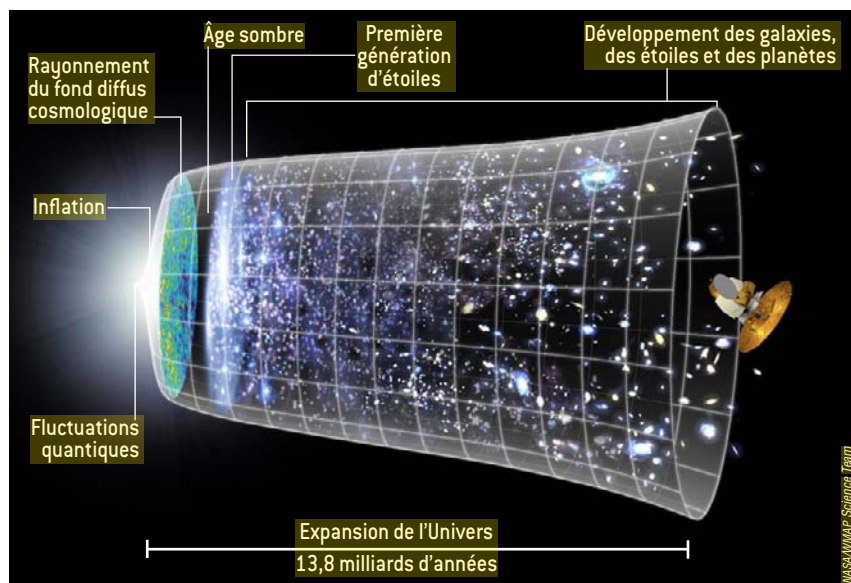
La matière noire est la clef du mécanisme d'effondrement des nuages de gaz. D'après les observations de la sonde WMAP, la matière ordinaire ne représentait que 15 pour cent de la composition de l'Univers au cours de l'âge sombre. Le reste était sous forme de matière noire.

Ce type de matière a été imaginé en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky lors de ses travaux sur l'amas de Coma. Distant d'environ 150 millions d'années-lumière, l'amas de Coma contient des milliers de grosses galaxies de taille comparable à la Voie lactée. Zwicky a mesuré les vitesses des galaxies au sein de l'amas et en a déduit la force de gravitation, donc la masse totale de l'amas, à l'origine de cette dynamique.

Le résultat de son calcul était 200 fois supérieur à ce que laissait supposer le recensement du contenu en matière de l'amas à partir de sa luminosité. Tel un gigantesque iceberg, l'amas de Coma ne laissait apparaître qu'une infime fraction de sa masse, l'essentiel étant obscur. Depuis 1933, de nombreuses observations ont révélé la présence de matière noire à toutes les échelles, aussi bien au sein des galaxies que dans l'Univers dans son ensemble.

La matière noire est constituée de particules de nature inconnue. Les physiciens et les cosmologistes ont cependant tracé les grandes lignes de leurs propriétés : ces particules sont électriquement neutres, interagissent peu avec la matière ordinaire, et ont été produites en abondance dans l'Univers primordial.

Contrairement au gaz de baryons (constituants de la matière ordinaire tels que les protons et les neutrons), la matière noire a formé des structures dès les premiers instants



2. LE MODÈLE DU BIG BANG DÉCRIT L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS. L'âge sombre est une période dépourvue de source de lumière qui débute vers 380 000 ans, après la recombinaison des noyaux et des électrons et l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique. Il s'achève avec la naissance des premières étoiles, 50 à 500 millions d'années plus tard.

Le neutralino est l'une des nombreuses particules introduites par la supersymétrie, une des extensions possibles du modèle standard de la physique des particules. Ses propriétés ne sont connues que dans les grandes lignes. L'une des missions du Grand Collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN à Genève est de déterminer si la supersymétrie existe et de préciser les caractéristiques du neutralino.

Ce dernier, 10 à 1 000 fois plus massif que le proton, est électriquement neutre et n'interagit que faiblement avec son environnement. Dans de nombreux scénarios supersymétriques, le neutralino est stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire.

Les physiciens espèrent le détecter grâce à différents types d'observations. Il peut, avec une faible probabilité, interagir avec un noyau d'un détecteur terrestre et y laisser une trace ténue de son passage. De

nombreuses expériences de détection directe tentent d'observer de tels événements dans des laboratoires souterrains à l'abri du rayonnement cosmique et bien protégés de la radioactivité, qui masquerait son signal.

Par ailleurs, deux neutralinos peuvent s'annihiler, le neutralino étant sa propre antiparticule.

L'expérience HESS-II recherche des signes d'annihilation de matière noire.



Ainsi, lorsque deux de ces particules se rencontrent, il y a une forte probabilité qu'elles s'auto-détruisent en émettant deux photons ou d'autres particules. Ce phénomène assure que cette particule existe dans des proportions com-

patibles avec l'existence de la matière noire. Dans l'Univers primordial, les neutralinos étaient en équilibre avec le milieu dense et chaud : ils s'annihilaient sans cesse, mais étaient aussitôt régénérés à partir du plasma environnant. Celui-ci finit cependant par se refroidir et l'annihilation l'emporta. Les neutralinos disparurent en grande partie,

mais pas complètement. Lorsqu'ils étaient devenus trop rares, ils ne se rencontraient plus que de façon sporadique et l'annihilation finit par cesser. Cela intervint lorsque l'Univers n'était âgé que de quelques milliardièmes de seconde.

Les neutralinos restants formèrent la matière noire. Leur densité dépend de la probabilité d'annihilation – on parle de « section efficace d'annihilation ». Plus l'annihilation est fréquente, moins il reste de particules. La densité de matière noire mesurée par WMAP indique que la section efficace d'annihilation des neutralinos est de l'ordre du picobarn (soit 10^{-36} centimètre carré), une valeur comparable aux prévisions des théories supersymétriques.

Cette annihilation continue à se produire lentement aujourd'hui dans des régions qui présentent une forte densité de matière noire, car plus la densité est élevée, plus la rencontre de deux neutralinos est probable. Le halo de matière noire qui enserrera la Voie lactée est un lieu possible d'annihilations. Ces dernières produisent notamment des particules d'antimatière et des photons de haute énergie, que les expériences dites de détection indirecte tentent d'observer.

de l'Univers. Cette différence de comportement provient de l'interaction des baryons avec les photons de haute énergie dans le plasma primordial. Les photons ont maintenu une distribution homogène des baryons et ont empêché la formation de régions plus denses que d'autres. Les particules de matière noire ne subissent d'interaction de ce type, mais, étant sensibles à l'interaction gravitationnelle, elles ont formé des petits « halos » d'une masse équivalente à celle de la Terre.

Ces structures ont fusionné ensuite pour devenir des halos un million de fois plus massifs que le Soleil. Pendant l'âge sombre, ces halos ont constitué des zones de fort champ gravitationnel qui ont piégé et accumulé de grandes quantités de matière baryonique. Le gaz, en particulier de l'hydrogène moléculaire qui se refroidit rapidement et permet la condensation du gaz, est tombé au centre des halos et a formé les étoiles de population III dont la masse atteignit une centaine de masses solaires.

Dans le schéma classique des étoiles primordiales, la source d'énergie stellaire provient essentiellement des réactions thermonucléaires de la « chaîne proton-proton », chaîne de réactions partant uniquement de la fusion de l'hydrogène. Les étoiles

primordiales avaient un cœur nucléaire plus chaud que celui des étoiles actuelles et brillaient avec une luminosité plus d'un million de fois supérieure à celle du Soleil. Leur température de surface étant de l'ordre de 100 000 degrés, elles ont émis un intense rayonnement ultraviolet qui a réionisé le gaz alentour, a détruit l'hydrogène moléculaire et a bloqué ainsi toute condensation ultérieure.

Annihilation de neutralinos

La matière noire a longtemps été considérée comme un acteur secondaire de la genèse des étoiles primordiales. Son seul rôle était d'avoir fourni, pendant l'âge sombre, des sites où le gaz stellaire s'était condensé. Ce point de vue a radicalement changé en 2007, quand on s'est rendu compte que la matière noire a peut-être servi de source de chaleur à une partie des étoiles de population III.

Pour comprendre ce scénario, il faut s'intéresser à une particule qui apparaît naturellement dans des extensions théoriques du modèle standard de la physique des particules : le neutralino (voir l'encadré ci-dessus). Cette particule a toutes les propriétés requises pour constituer la matière

noire : elle interagit faiblement avec la matière ordinaire et serait produite dans des quantités suffisantes pour reproduire les effets cosmologiques de la matière noire.

Une autre propriété du neutralino est d'être sa propre antiparticule. Ainsi, lorsque deux neutralinos se rencontrent, ils peuvent s'annihiler en produisant des particules ordinaires, tels des photons. La probabilité d'annihilation est plus élevée dans les régions riches en neutralinos, où les collisions sont plus nombreuses. Au cœur des étoiles de population III, l'annihilation de matière noire peut avoir servi de source d'énergie et de chaleur. Nous avons étudié le phénomène d'annihilation de neutralinos dans les étoiles primordiales et avons montré que l'évolution de ces étoiles diffère du scénario classique.

L'idée que la matière noire a eu des effets sur l'évolution des étoiles remonte à 1978. Gary Steigman et ses collègues, aux États-Unis, ont montré que si des neutralinos sont présents en grand nombre au centre d'une étoile, ils sont capables de transporter la chaleur du cœur vers la périphérie de l'astre. En 1985, Bill Press et David Spergel ont utilisé ce modèle pour expliquer le problème des neutrinos solaires. Ces particules avaient été imaginées par le physicien autrichien Wolfgang