

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.

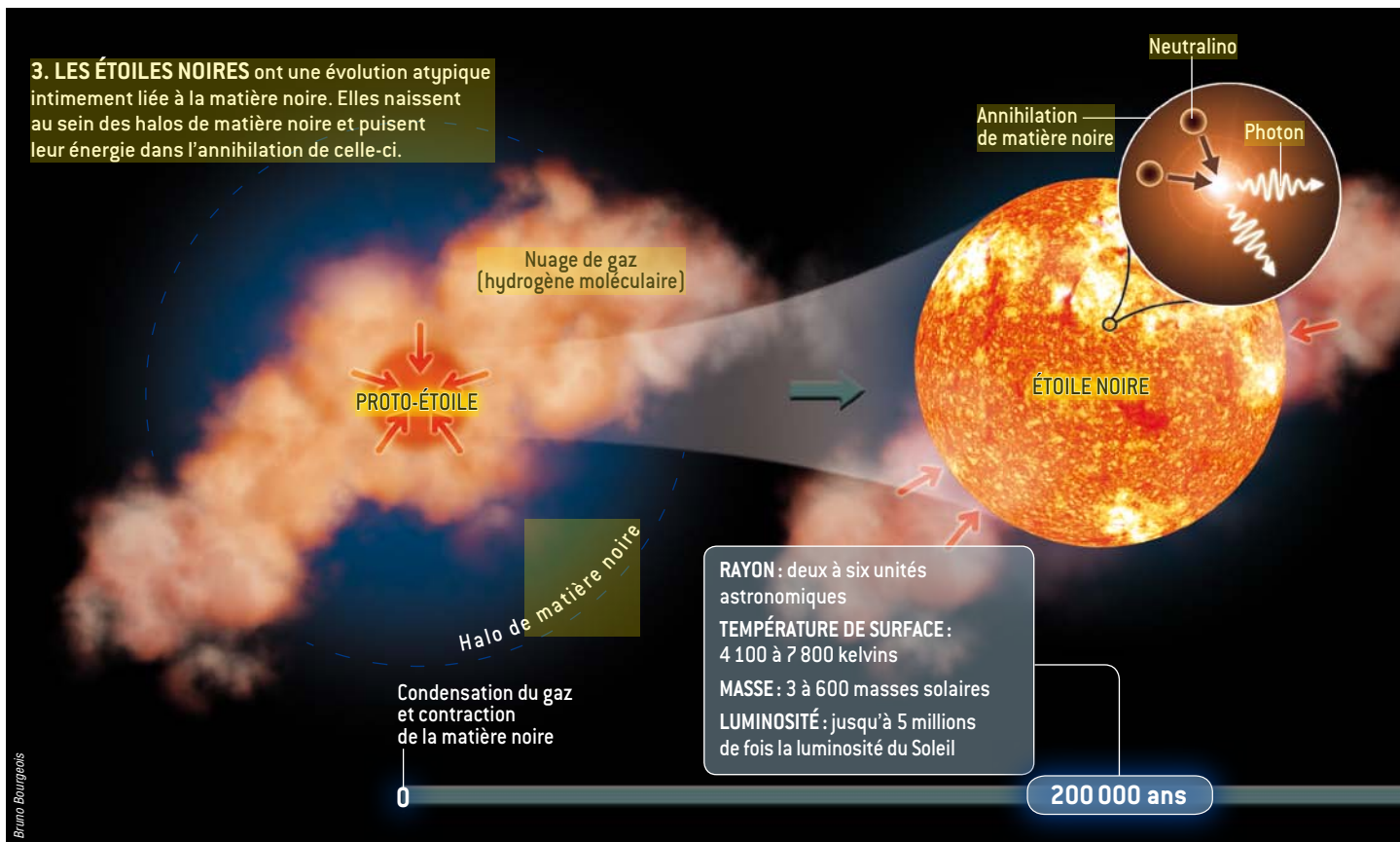
Pour comprendre ce scénario, il faut s'intéresser à une particule qui apparaît naturellement dans des extensions théoriques du modèle standard de la physique des particules : le neutralino (voir l'encadré ci-dessus). Cette particule a toutes les propriétés requises pour constituer la matière

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

3. LES ÉTOILES NOIRES ont une évolution atypique intimement liée à la matière noire. Elles naissent au sein des halos de matière noire et puisent leur énergie dans l'annihilation de celle-ci.



Pauli en 1930 pour assurer la conservation de l'énergie dans la radioactivité bêta. Leur existence a été confirmée en 1956. Dans les années 1960, l'Américain Raymond Davis a mesuré le flux de neutrinos provenant du Soleil. Le résultat était trois fois inférieur à celui prévu par John Bahcall, théoricien à Princeton. Ce dernier avait calculé le flux de neutrinos solaires à partir de l'analyse des réactions thermonucléaires qui produisent des neutrinos au sein de l'étoile.

B. Press et D. Spergel ont expliqué le déficit observé par Davis en invoquant les neutralinos, qui emportent une partie de l'énergie du cœur de l'étoile. Ce processus diminue la température du cœur, réduit le nombre de réactions thermonucléaires et, par conséquent, le flux de neutrinos. Cependant, ce modèle se heurtait à une autre contrainte soulignée par l'un de nous (K. Freese) : comme les neutralinos s'annihilent entre eux, ils ne réduiraient pas assez le flux de neutrinos.

L'hypothèse des neutralinos pour résoudre le problème des neutrinos solaires est aujourd'hui obsolète. On sait désormais que les neutrinos, qui existent sous trois types, peuvent passer d'un type à l'autre, phénomène nommé oscillation. Le résultat

de Davis s'explique par la transmutation partielle des neutrinos de type électronique en une autre espèce de neutrinos au cours de leur voyage du Soleil à la Terre.

Néanmoins, l'idée que la matière noire pouvait altérer les scénarios standards d'évolution stellaire a inspiré de nombreux travaux. En 1989, l'un de nous (P. Salati) et Joseph Silk, de l'Université de Berkeley, ont établi que certaines étoiles immergées dans une région où la matière noire est dense – par exemple au centre des galaxies – produiraient tellement d'énergie qu'elles gonfleraient et deviendraient des géantes rouges.

Cependant, toutes ces analyses reposaient sur des probabilités relativement élevées de collision entre un neutralino et un noyau au cœur de l'étoile. Or, aujourd'hui, les expériences dites de détection directe, qui cherchent précisément ce type de collisions sur Terre, excluent les valeurs de probabilités d'interaction nécessaires. Autrement dit, les effets stellaires des neutralinos semblaient si négligeables que le sujet est tombé en désuétude pendant une vingtaine d'années. Toutefois, deux d'entre nous (K. Freese et P. Gondolo) et Douglas Spolyar, de l'Université de Santa Cruz, le réexaminèrent en 2007 sous un jour nouveau.

L'idée était d'étudier des régions susceptibles d'héberger des étoiles et où la densité de matière noire est forte. La piste que nous avons explorée a été de regarder dans le passé, lorsque la densité de l'Univers, donc la concentration de matières baryonique et noire, était plus élevée qu'aujourd'hui.

Des germes pour les premières étoiles

À la fin de l'âge sombre, la densité moyenne de la matière noire était 8 000 fois plus élevée. Les premières structures formées par la matière noire étaient des halos 200 fois plus denses encore, ayant une masse d'un million de fois celle du Soleil et un rayon de l'ordre de 300 années-lumière. Un tel halo offrit un site privilégié pour la formation des premières étoiles, le gaz de matière baryonique environnant y étant fortement attiré.

Les calculs hydrodynamiques effectués en 2001 par Tom Abel, au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian aux États-Unis, et ses collègues, montrèrent qu'au centre d'un tel nuage de gaz froid, un cœur d'une centaine de masses solaires a commencé à se condenser, entraînant dans sa chute une partie du reste du nuage. La remarque