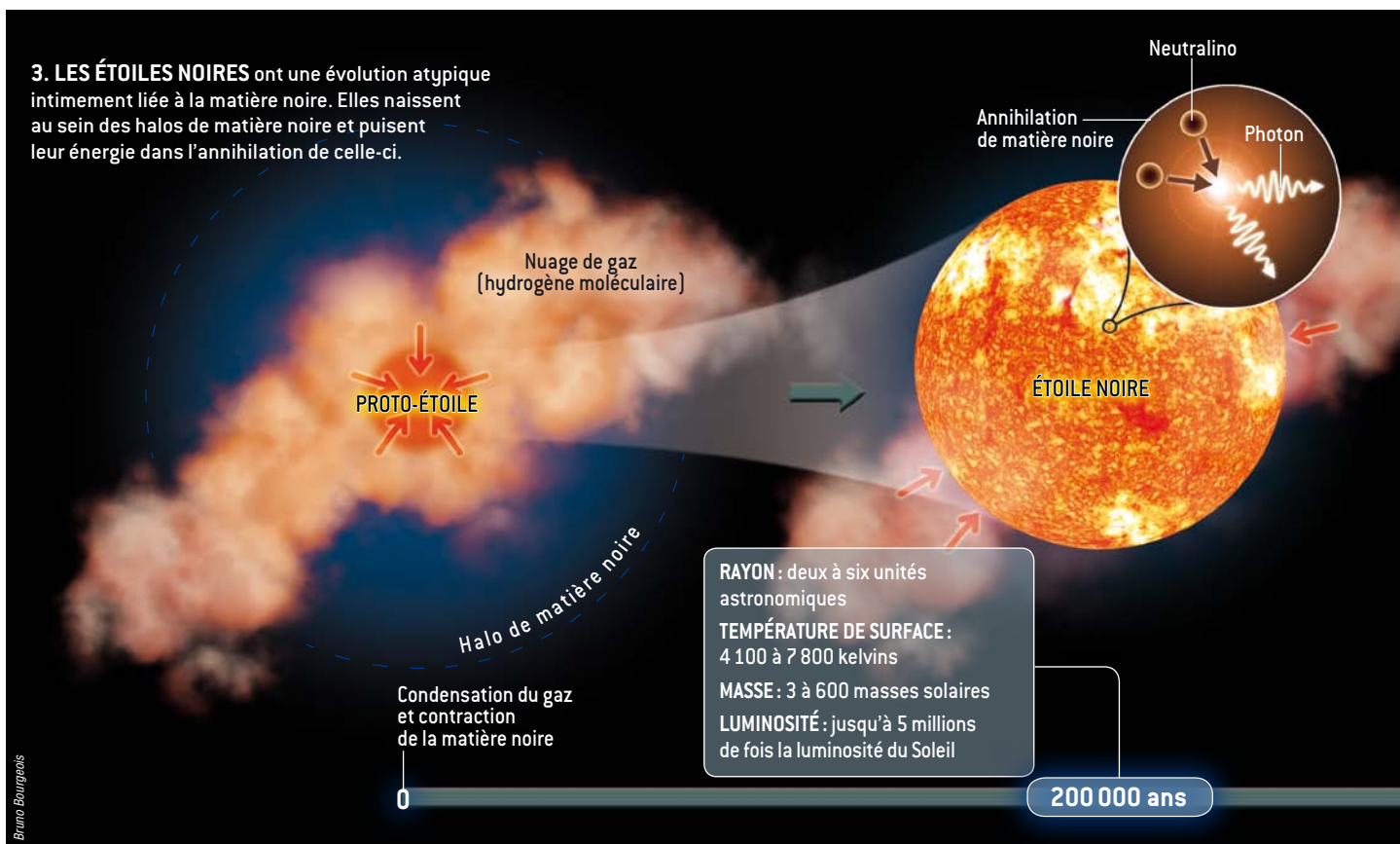


3. LES ÉTOILES NOIRES ont une évolution atypique intimement liée à la matière noire. Elles naissent au sein des halos de matière noire et puisent leur énergie dans l'annihilation de celle-ci.



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.

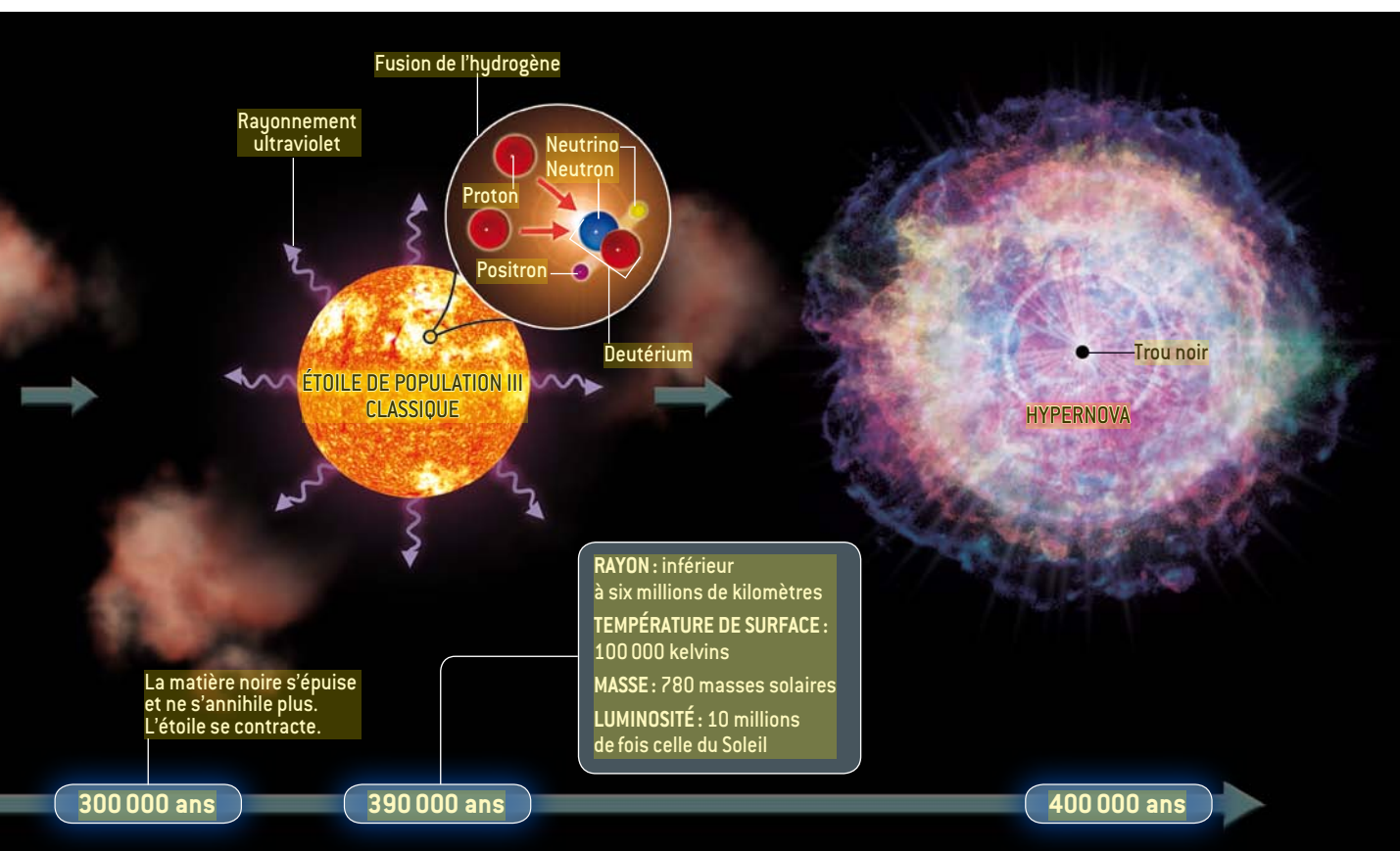
Cependant, toutes ces analyses reposaient sur des probabilités relativement élevées de collision entre un neutralino et un noyau au cœur de l'étoile. Or, aujourd'hui, les expériences dites de détection directe, qui cherchent précisément ce type de collisions sur Terre, excluent les valeurs de probabilités 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



cruciale que nous avons faite en 2007 est que la condensation du gaz, déclenchée par la matière noire, a agi à son tour sur cette dernière. À mesure que le cœur protostellaire se formait, le champ gravitationnel central est devenu plus intense et a attiré progressivement les neutralinos vers l'intérieur, pendant que la masse du cœur augmentait.

Ce processus est la clef de l'existence des étoiles noires. Il repose sur la dynamique gravitationnelle de Newton et ne présuppose rien des propriétés intrinsèques de la matière noire. Il est possible d'obtenir un cœur de proto-étoile riche en matière noire à condition que la contraction soit adiabatique, c'est-à-dire suffisamment lente pour que les neutralinos réagissent de façon appropriée aux modifications du champ gravitationnel (la contraction adiabatique est bien vérifiée dans les simulations numériques). Si le gaz se condensait trop rapidement, des trajectoires initialement circulaires deviendraient elliptiques. La densification de la matière noire serait moins efficace, car les particules passeraient une partie de leur temps très loin du centre de la proto-étoile.

À ce stade, le cœur de la proto-étoile serait devenu riche en matière baryonique

et en matière noire. La production d'énergie se serait amorcée. Dans le scénario classique de l'évolution d'une étoile, il s'agit de réactions de fusion thermonucléaire. Dans le cas des étoiles noires, c'est l'annihilation des neutralinos qui est à l'œuvre. Un tiers de l'énergie produite aurait été emportée par des neutrinos qui se sont échappés de l'étoile. Le reste se serait partagé entre photons, électrons et positrons qui ont produit de nouvelles particules et ont perdu progressivement leur énergie au sein du gaz, suffisamment dense pour les arrêter. Cette énergie aurait constitué une source de chaleur pour l'étoile en formation.

Une étoile noire est née

L'importante densité en neutralinos s'est traduite par une forte production d'énergie, qui a maintenu la température de l'étoile autour de 1000 kelvins, la luminosité de l'astre étant équivalente à 140 fois celle du Soleil. Le cœur a cessé alors de se condenser. Il s'est alors comporté comme un objet stellaire qui rayonne, mais dont la particularité était que l'énergie provenait de l'annihilation des neutralinos. Une étoile noire venait de naître – noire non pas parce qu'elle ne brillait

pas, bien au contraire, mais parce que sa source d'énergie était de la matière noire.

Pendant une grande part de sa vie, l'étoile a accumulé de la matière, ordinaire et noire, tandis que se poursuivait l'annihilation de neutralinos jusqu'à leur épuisement dans l'environnement de l'astre. Il est cependant possible de distinguer plusieurs étapes dans cette évolution.

Au début, la proto-étoile s'est contractée sous l'influence gravitationnelle de la matière. Lorsque l'annihilation est devenue importante, la pression de radiation exercée par la lumière a ralenti cette contraction. Le gaz environnant a continué de tomber vers l'astre à un rythme qui a évolué d'un centième à un millième de masse solaire par an au cours de la vie de l'astre.

Sous cette pluie d'hydrogène, l'objet est devenu plus lourd et la contraction a repris peu à peu. Après 100 ans, il avait une masse égale à trois fois celle du Soleil et un rayon de deux unités astronomiques. Sa luminosité était égale à 45 000 fois celle du Soleil et sa température de surface atteignait 4 100 kelvins. L'astre fonctionnait comme une étoile en équilibre thermique et hydrostatique. Ce stade est considéré comme l'instant initial de la phase noire.



MUSYESS/A. Fruchter et al. / WFP2/HST

4. LE PHÉNOMÈNE DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE se matérialise par la déformation d'images d'objets brillants – des étoiles ou, comme ici, des galaxies – qui prennent la forme d'arcs. Le trajet de la lumière est dévié par la présence d'un objet massif situé entre la source et l'observateur. Cet effet peut amplifier la luminosité d'un objet très éloigné – par exemple une étoile noire.

La pression de radiation était désormais assez intense pour bloquer la contraction de l'étoile, dont le rayon et la masse ont augmenté par accumulation de matière. Au bout de 19 000 ans dans la phase noire, l'astre a atteint une centaine de masses solaires et une température de surface de 5 800 kelvins. L'étoile émettait un rayonnement électromagnétique dont le spectre était semblable à celui du Soleil, mais avec une luminosité un million de fois supérieure.

Température modérée, mais forte luminosité

Alimentée par la fusion thermonucléaire centrale, une étoile classique a un cœur porté à 200 millions de kelvins, un rayon de cinq millions de kilomètres et, surtout, une température de surface de 100 000 kelvins. Pour une même masse, le cœur d'une étoile noire est resté relativement froid, à une température d'à peine 400 000 kelvins. L'astre n'émettait pas non plus de rayonnement ultraviolet intense et ne détruisait pas les molécules du nuage de gaz qui l'entourait.

Pendant 200 000 ans, la masse de l'étoile noire a continué de croître, tout comme sa luminosité, sa température de surface et son rayon, qui a atteint un maximum de six unités astronomiques. L'augmentation de sa masse a entretenu une contraction adiabatique sur le nuage de neutralinos

aux alentours, de sorte que de la matière noire était captée en continu et servait de carburant à l'étoile. C'est à ce stade que les réserves d'énergie étaient les plus hautes. Mais, petit à petit, elles se sont épuisées.

Il faudra attendre encore 100 000 ans pour que l'étoile noire atteigne 720 masses solaires. Son alimentation par l'annihilation des neutralinos s'est alors achevée et l'astre a entamé sa métamorphose. Sa luminosité n'a cependant pratiquement pas varié. Perdant toujours de l'énergie, fournie en moindre quantité par la matière noire, l'étoile a commencé à se contracter. Son rayon est devenu inférieur à une unité astronomique.

Pour évacuer à travers une surface plus petite l'énergie produite, la température a augmenté et a atteint 23 000 kelvins. Le cœur de l'objet s'est réchauffé fortement : la température y est passée à 15 millions de kelvins et le deutérium est entré en fusion pendant 50 000 ans. Toutefois, cela n'a pas suffi à stabiliser l'étoile, qui a continué de se contracter. Quand la source d'énergie formée par les neutralinos fut définitivement remplacée par la contraction gravitationnelle, le reste de matière noire a flambé une dernière fois et a produit, pendant 20 000 ans, un sursaut de luminosité. Mais l'étoile a continué à se contracter et les températures de cœur et de surface ont augmenté. L'intense rayonnement ultraviolet qui en a résulté

a détruit l'hydrogène moléculaire du gaz environnant, qui cessa d'alimenter l'étoile.

La fusion thermonucléaire de l'hydrogène s'est déclenchée et a alimenté en énergie l'astre, qui n'avait désormais plus rien de noir : il n'y avait plus d'annihilation de matière noire en son sein. L'astre s'est transformé en étoile de population III classique, mais de masse bien supérieure à celle de ses congénères – 780 masses solaires contre une centaine pour les étoiles de population III ordinaires. Son rayon était de six millions de kilomètres, seulement huit fois celui du Soleil. Et les températures de surface et de cœur étaient respectivement de 100 000 et 300 millions de degrés. La phase noire, qui s'est étalée sur 400 000 ans, venait de s'achever.

Les étoiles de population III, du fait de leur masse importante, ont eu une vie brève. Elles ont consommé rapidement l'hydrogène. Après quelques millions d'années, elles ont pu exploser en hypernova – d'une puissance équivalente à celle d'une centaine de supernovae. Elles ont laissé en leur cœur un trou noir et ont éjecté de grandes quantités de matière qui ont constitué de nouvelles étoiles ordinaires.

Comment les observer ?

Pour confirmer le scénario que nous avons décrit, il est nécessaire d'observer des étoiles noires. Or ces astres sont situés à des distances cosmologiques. Le télescope spatial *James Webb* (JWST pour *James Webb Space Telescope*), que la NASA projette de lancer en 2018, pourrait les traquer. En plus du visible, le télescope est sensible à l'infrarouge. L'une de ses caméras couvre les longueurs d'onde comprises entre 0,6 et 5 micromètres. Or le pic de luminosité d'une étoile noire dont la température de surface est de 20 000 kelvins se situe vers 0,15 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement ultraviolet est décalé vers le rouge en raison de l'expansion de l'Univers et serait détecté sur Terre avec une longueur d'onde de 1,5 à 3 micromètres.

En 2010, l'un de nous (P. Gondolo), Erik Zackrisson, de l'Université de Stockholm, et leurs collègues ont montré que la luminosité de ces objets, bien que dix millions de fois plus brillants que le Soleil, serait trop atténuée pour être détectable directement. Ils ont suggéré qu'une lentille gravitationnelle, tel un amas de galaxies, interposée entre une étoile noire et la Terre, résoudrait la difficulté. Au voisinage de l'amas, l'espace est courbé, ce qui dévie les rayons lumineux de l'étoile