

► comment des trous noirs aussi gros se seraient formés en moins de un milliard d'années.

De nombreux astronomes pensent que les premiers trous noirs – les trous noirs «graines» – sont les restes de l'explosion en supernova des premières générations d'étoiles. Mais de tels trous noirs ne devraient pas avoir une masse de plus de quelques centaines de masses solaires. Il est alors difficile d'imaginer un scénario dans lequel les trous noirs supermassifs des quasars ont grandi à partir de précurseurs aussi petits.

Pour résoudre cette énigme, avec des collègues, j'ai proposé une piste où les trous noirs gagnent assez en masse pour expliquer les premiers quasars sans invoquer la naissance et la mort d'étoiles. À la place, ces trous noirs se seraient formés directement à partir du gaz d'hydrogène. Nous les nommons trous noirs à effondrement direct. Dans un environnement favorable, ces trous noirs à effondrement direct seraient nés avec une masse comprise entre 10 000 et 100 000 masses solaires quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Bien plus massifs que ceux du scénario classique, ces trous noirs ont très bien pu grandir pour atteindre 1 milliard voire 10 milliards de fois la masse du Soleil, comme dans les quasars qui intriguent depuis près de vingt ans les astronomes. Le défi est de prouver que ce scénario a bien eu lieu. Le télescope spatial *James-Webb*, dont le lancement est prévu pour 2020, devrait nous permettre de le savoir.

LES PREMIÈRES GRAINES

Les trous noirs sont des objets astrophysiques énigmatiques, des régions où la concentration de matière est si grande qu'elle déforme l'espace-temps de telle façon que même la lumière ne peut s'en échapper. Les chercheurs se sont longtemps demandé si les trous noirs étaient une simple curiosité mathématique des équations de la relativité générale d'Einstein. Avec les quasars, les astronomes observent la lumière émise par la matière qui chute dans les trous noirs, confirmant bien la réalité de ces derniers.

La plupart des trous noirs naissent de la mort d'étoiles très massives (de plus de 10 masses solaires). Au cœur d'une étoile, les atomes légers fusionnent et produisent assez d'énergie pour contrer la gravité de l'étoile qui tend à contracter cette dernière. Lorsque ce carburant nucléaire est épuisé, l'étoile s'effondre sur elle-même et déclenche une explosion cataclysmique, une supernova. L'astre laisse alors derrière lui un cœur extrêmement compact, un trou noir.

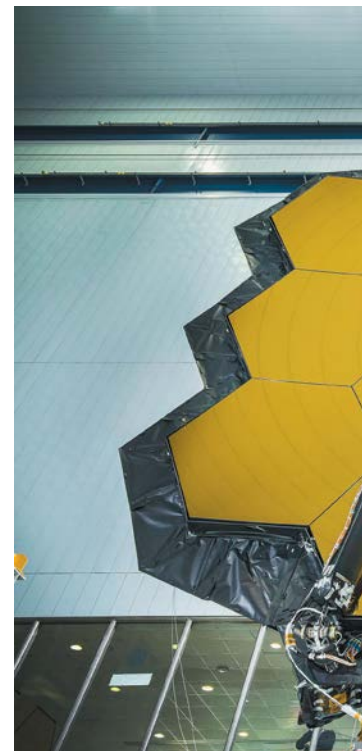
Les astronomes ont d'abord supposé que les trous noirs à l'origine des premiers quasars s'étaient aussi formés de cette façon. Ils seraient les héritiers de la première génération d'étoiles de l'Univers (les étoiles dites de population III). Ces astres se sont formés lorsque le gaz d'hydrogène s'est refroidi et a commencé à constituer

des zones de surdensité, 200 millions d'années après le Big Bang. Les étoiles de population III étaient probablement bien plus massives que les étoiles des générations suivantes. Elles auraient alors laissé derrière elles des trous noirs de plusieurs centaines de masses solaires. Et comme ces étoiles se seraient formées dans des amas denses, il est possible que les trous noirs produits lors de leur mort ont fusionné entre eux pour donner naissance à des trous noirs de plusieurs milliers de masses solaires. Mais même de tels trous noirs restent très insuffisants pour alimenter le cœur des quasars.

D'autres théoriciens suggèrent que des trous noirs primordiaux auraient émergé même plus tôt dans l'histoire de l'Univers, quand l'espace subissait une expansion exponentielle lors d'une brève phase cosmique nommée inflation. De petites fluctuations de densité dans l'Univers auraient été amplifiées durant l'inflation pour produire ces trous noirs primordiaux. Cependant, ces trous noirs devraient avoir une masse comprise entre 10 et 100 masses solaires, d'où le même problème que le cas des étoiles de population III.

Les explications proposées dans ces deux scénarios sont confrontées au même obstacle : les trous noirs graines peuvent grandir en absorbant de la matière, mais ils devraient le faire à un rythme extraordinaire pour atteindre la masse des trous noirs centraux des quasars durant le premier milliard d'années de l'histoire cosmique et ainsi créer les premiers quasars. Et ce que nous savons de la croissance des trous noirs nous permet de penser que ce scénario est peu probable.

Notre compréhension actuelle de la physique suggère qu'une grandeur, la limite d'Eddington, est le rythme maximal auquel un trou noir gagne de la masse de façon efficace. Un trou noir se nourrissant au rythme indiqué par la limite d'Eddington aurait une croissance exponentielle : sa masse doublerait tous les 10 millions d'années environ. Dès lors, pour atteindre 1 milliard de masses solaires, un trou



À la limite d'Eddington,
un trou noir double
de masse tous
les 10 millions d'années



noir graine de 10 masses solaires devrait avaler du gaz et des étoiles à la limite d'Eddington pendant 1 milliard d'années. Il est cependant difficile d'expliquer comment toute une population de trous noirs se serait alimentée en continu de façon aussi efficace.

Une solution possible serait d'imaginer qu'un trou noir né d'une étoile de population III se soit nourri à un rythme supérieur à la limite d'Eddington. Il est théoriquement possible de dépasser cette limite dans des conditions particulières, par exemple dans un environnement très dense et riche en gaz. De telles conditions ont pu exister dans l'Univers primordial, mais elles n'auraient pas été fréquentes, et elles n'auraient perduré que très brièvement.

En plus, une croissance exceptionnellement rapide peut provoquer une sorte d'étranglement. Lors de ces phases d'alimentation extrême, dites super-Eddington, le rayonnement émis par la matière qui tombe dans le trou noir crée une pression de radiation qui perturbe, voire bloque, le flot de matière. Le trou noir est alors privé de nourriture et arrête de grandir. Avec de telles contraintes, il est possible que ces repas gloutons expliquent quelques quasars, mais ils ne peuvent pas être la règle et rendre compte de tous les quasars que nous observons.

Les premiers trous noirs supermassifs se seraient-ils formés d'une autre façon? Inspirés par les travaux précurseurs de plusieurs équipes, mon collègue Giuseppe Lodato, de l'université de Milan, et moi-même avons publié plusieurs articles entre 2006 et 2007, dans lesquels nous

Le télescope spatial James-Webb sera assez puissant pour trouver des preuves de l'existence des trous noirs à effondrement direct. Son lancement, initialement prévu pour 2019, a été reporté d'un an.

proposons un nouveau mécanisme capable de produire, dès le début, des trous noirs graines plus massifs. Le point de départ de notre scénario consiste en de grands disques de gaz primordiaux. En général, ces disques se sont refroidis, puis se sont fragmentés et ont donné naissance aux étoiles et aux galaxies. Nous avons montré que telle n'a pas toujours été leur destinée. Si quelque chose perturbe le processus normal de refroidissement du disque et empêche la formation des étoiles, le disque devient gravitationnellement instable. La matière migre alors en grandes quantités vers le centre, de façon assez similaire à l'eau du bain qui s'écoule vers la bonde. Cet effondrement du gaz donne naissance à des trous noirs graines de 10000 à 1 million de masses solaires.

De façon générale, les disques se refroidissent plus efficacement si leur gaz est constitué d'hydrogène moléculaire (H_2 , deux atomes d'hydrogène liés) et non d'hydrogène atomique (H , constitué d'atomes isolés). Si un rayonnement émis par les étoiles d'une galaxie voisine atteint le disque, il peut briser les liaisons de l'hydrogène moléculaire et le réduire en hydrogène atomique. Le processus de refroidissement est alors ralenti et le disque reste trop chaud pour former des étoiles. Dénué d'étoiles et de température plus élevée, le disque devient instable et la matière migre vers son centre, conduisant rapidement à la formation d'un trou noir à effondrement direct.

Comme ce scénario nécessite la présence d'étoiles dans le voisinage proche du disque, nous nous attendons à ce que les trous noirs à effondrement direct se forment généralement dans des galaxies satellites évoluant autour de galaxies parents plus grandes où des étoiles de population III se seraient déjà formées.

Les simulations décrivant la formation des grandes structures et la dynamique du gaz aux plus grandes échelles cosmiques étayent les hypothèses du modèle des trous noirs à effondrement direct. Dès lors, l'idée que des trous noirs graines très massifs se soient formés dans l'Univers jeune semble plausible. En partant de telles graines, il n'y a alors plus de problème pour produire, en un temps raisonnable, des trous noirs supermassifs au cœur des quasars.

À LA RECHERCHE DE PREUVES

Le fait que les trous noirs à effondrement direct soient théoriquement possibles ne suffit pas pour affirmer que le modèle est juste. Pour le savoir, nous devons trouver des preuves observationnelles.

En absorbant de la matière, ces trous noirs ressembleraient à de petits quasars dans l'Univers jeune. En particulier, on s'attend à ce que cette graine fusionne avec la galaxie parent, et elle brillerait alors intensément. Cet événement serait assez fréquent car, dans notre modèle, les ➤