



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.

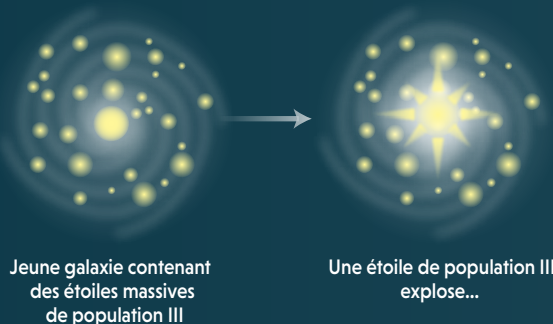
En absorbant de la matière, ces trous noirs ressembleraient à de petits quasars dans l'Univers jeune. En particulier, on s'attend à ce que cette graine fusionne avec la galaxie parent, et elle brillerait alors intensément. Cet événement serait assez fréquent car, dans notre modèle, les ➤

COMMENT SONT NÉS LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

Dans le schéma classique, la formation des trous noirs supermassifs (en haut) commence avec la mort des premières étoiles. Mais ce scénario ne semble pas pouvoir expliquer l'énorme masse des trous noirs sis au cœur des quasars les plus anciens. Des astrophysiciens ont proposé une nouvelle idée : ces trous noirs naîtraient de l'effondrement direct de nuages de gaz (en bas).

SCÉNARIO CLASSIQUE

Lorsque les premières étoiles (population III) ont épuisé leur carburant nucléaire, elles ont explosé en supernova, laissant derrière elles des trous noirs. En absorbant rapidement le gaz et les étoiles environnantes, ces trous noirs sont devenus beaucoup plus massifs.



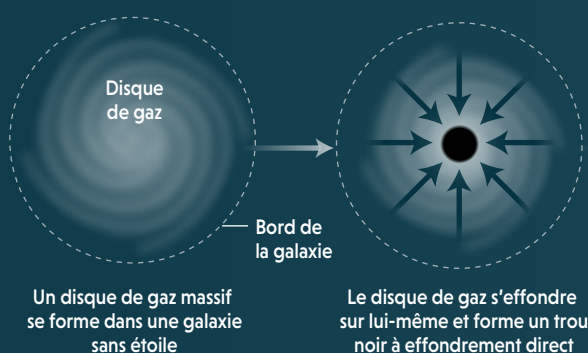
Big Bang

~ 180 millions d'années

~ 270 millions d'années

SCÉNARIO À EFFONDEMENT DIRECT

Si, dans une protogalaxie, la formation des étoiles est bloquée, tout le gaz pourrait s'effondrer vers le centre du disque et produire un trou noir. En entrant ensuite en collision avec une galaxie voisine, le trou noir grossirait très vite par absorption du gaz et des étoiles de cette galaxie. On obtiendrait une « galaxie à trou noir obèse », qui serait détectable par les télescopes.



➤ trous noirs à effondrement direct se sont formés dans des galaxies satellites de galaxies plus grandes. Une fusion galactique fournirait au trou noir graine une nouvelle source de gaz à engloutir, entretenant sa croissance. Il devrait alors se transformer rapidement en un quasar qui brille plus que toutes les étoiles de sa galaxie.

Ces trous noirs ne seraient pas seulement plus brillants que l'ensemble des étoiles environnantes, ils seraient aussi plus lourds – ce qui n'est en général pas le cas. Le plus souvent, les étoiles d'une galaxie pèsent au total plus que le trou noir central, d'un facteur 1000 environ. Mais lors de la fusion avec la galaxie parent, la masse du trou noir en pleine croissance dépasse rapidement celle des étoiles. La galaxie est alors qualifiée de galaxie à trou noir obèse. Et une telle structure devrait présenter un spectre électromagnétique particulier, notamment dans l'infrarouge, entre 1 et 30 micromètres de longueur d'onde. Or les instruments MIRI (*Mid-Infrared Instrument*) et NIRC*am* (*Near-Infrared Camera*) du télescope spatial *James-Webb* sont très sensibles à ces longueurs d'onde.

Ce télescope sera l'instrument le plus puissant que les astronomes auront jamais eu pour plonger leur regard dans la jeunesse de l'Univers. Si le télescope détecte des galaxies à trou noir obèse, ce serait un indice fort en faveur de

la théorie des trous noirs à effondrement direct. À l'inverse, les trous noirs graines, nés de la mort d'étoiles, seront bien trop pâles pour être visibles par le télescope *James-Webb*, ou n'importe quel autre.

D'autres types d'observations pourraient aussi fournir des indices en faveur de notre théorie. Dans les rares cas où la galaxie parent hébergerait un trou noir central, les deux trous noirs entreraient en collision en libérant d'importantes ondes gravitationnelles. Le futur interféromètre spatial *Lisa*, des agences spatiales européenne (l'ESA) et américaine (la Nasa), prévu pour les années 2030, devrait être en mesure de détecter un tel événement.

UN PORTRAIT PLUS PRÉCIS

Il est tout à fait possible que les scénarios des trous noirs à effondrement direct et les graines nourries à un rythme super-Eddington aient tous les deux coexisté dans l'Univers primordial. La question serait alors : lequel des deux a produit la majorité des quasars les plus anciens observés par les astronomes ? Résoudre cette énigme fera plus que préciser la chronologie de l'Univers jeune. Les astronomes auront aussi une meilleure compréhension de l'évolution des galaxies, car les trous noirs supermassifs y jouent un rôle important.